

±1100 kV 换流站直流母线导体选型与布置研究

骆玲,丁晓飞,邢毅,包维瀚,李龙才,杨伦

(中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司,四川成都 610021)

摘要: ±1100 kV 特高压直流输电工程在工程应用中属于新的电压等级,对于换流站内直流母线的选型与布置在参考±800 kV 换流站的基础上做进一步的研究分析。针对±1100 kV 直流极线户内布置的方案,对3种备选直流管母线(6063G-Φ400/380、6063G-Φ450/430、6063G-Φ500/480)进行了电磁环境的校核计算,并结合目前±1100 kV 设备外形对导体的布置提出了推荐意见。研究结果表明:3种备选管母在对地高度15~25 m的范围内均不起晕,地面离子流密度以及磁感应强度满足相关规程规范要求;在对地高度不小于18 m时,3种管母线地面合成场强均小于25 kV/m;管母线跨距不大于15 m的布置形式能满足管母线的破坏应力及挠度要求。综合考虑运行的安全可靠性以及工程的经济性,推荐采用6063G-Φ400/380管母线作为±1100 kV 直流母线,并建议管母线对地高度不小于18 m,且管母线跨距不大于15 m。

关键词: ±1100 kV 换流站;直流母线;电磁环境;机械受力;管母跨距

Abstract: ±1100 kV UHVDC transmission projects belong to a new voltage level in engineering applications, and the selection and arrangement of DC polar bus can refer to ±800 kV converter station, which needs a further research and analysis. For the indoor layout scheme of ±1100 kV polar line, the checking calculation is carried out for electromagnetic environment of three tube buses (6063G-Φ500/480, 6063G-Φ450/430 and 6063G-Φ400/380), and the recommendations are given for the arrangement of tube bus combined with the current ±1100 kV equipment size. The results indicate that, for these three alternative tube buses, corona would not appear when their height above ground is between 15~25 meters as well as the ground ion current density and magnetic induction would meet the requirements of relevant standards and regulations. The earth resultant electric field of each bus should be less than 25 kV/m when their height above ground is more than 18 m. Besides, the requirements of failure stress and deflection would be met when the conductor span is less than 15 m. Therefore, considering the safety and reliability of operation and the engineering economics, 6063G-Φ400/380 tube bus is recommended as ±1100 kV polar bus, and it is also recommended that the height should be more than 18 m and the layout span of bus should be less than 15m.

Key words: ±1100 kV converter station; DC polar bus; electromagnetic environment; mechanical force; span of tube bus

中图分类号: TM85 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2017)03-0021-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2017.03.005

0 引言

换流站内直流母线的选型与布置对直流母线周围的电磁环境有较大的影响^[1-4]。合理的母线导体选型与布置方案既要确保工程的安全可靠运行,也要兼顾运行的经济性。

铝合金管母线在±800 kV 特高压换流站中已经有成熟应用,而目前±1100 kV 特高压直流输电工程在工程应用中属于新的电压等级^[2-5],考虑±1100 kV 设备制造水平^[6-8]以及运行的安全可

科技项目: 国家电网公司科技项目(GWJYKJXM[2014]002)

靠性,直流极线设备按户内布置方案考虑。针对±1100 kV 户内直流场布置方案,对直流母线的选型与布置开展详细研究。

1 直流母线导体电磁环境分析

由于支撑管母线具有初始起晕场强高、占地面积较省、接线清晰等特点,±1100 kV 换流站直流场母线仍推荐采用支撑管母线。

根据以往工程经验,在满足通流要求的前提下选择管母线导体6063G-Φ400/380、6063G-Φ450/430、6063G-Φ500/480进行比较。

1.1 电磁环境限值要求

±1 100 kV 导体电磁环境要求暂无相应标准、规程规范可执行,下面参照 DL/T 1088-2008《±800 kV 特高压直流线路电磁环境参数限值》以及中国电力科学研究院开展的人在直流电场下的稳态感受试验研究结论,确定 ±1 100 kV 换流站直流母线电磁环境的控制指标如下^[9-10]:

1) 为了将换流站的地面合成电场在较大范围内控制在不超过 30 kV/m,由单根管母线产生的地面合成电场需控制在 20~25 kV/m;

2) 由管母线产生的线下地面离子流密度限值建议为 100 nA/m²;

3) 直流磁场磁感应强度的控制指标为 10 mT。

1.2 导体起晕场强的计算

导体电晕是在导体表面场强超过某一临界值后才开始产生,这一临界值通常称为电晕临界电场强度或起始电晕电场强度。皮克(F. W. Peek)最早开始研究线路电晕,并给出了适用于交流线路电晕起始电场强度的计算公式,经修改,得到适用于直流线路电晕起始场强的判据如下^[11-12]:

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

式中: 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^[12](标准情况下取 1)。

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

式中: P_0 为标准大气压, 101.3 kPa; P 为换流站的实际大气压, kPa; t_0 为标准环境温度, 20 °C; t 为换流站的实际温度, °C。

根据式(1)、式(2)计算标准环境条件下 3 种外径导体的起晕场强如表 1 所示。

表 1 导体起晕电场强度

导体型号	导体外径 /mm	电压等级 /kV	导体起始电晕电场强度/(kV·cm ⁻¹)
φ500/480	500	1 100	19.084
φ450/430	450	1 100	19.142
φ400/380	400	1 100	19.211

1.3 导体表面场强的计算

采用国际大电网会议 CIGRE 及国际无线电干扰委员会 CISPR 推荐的马克特-门格尔法^[13-14]计算导体表面电场强度。

1) 用麦克斯韦电位系数法决定等效导线上的

总电荷

$$[Q] = [P]^{-1} [U] \quad (3)$$

式中: $[Q]$ 为导线上的电荷矩阵; $[U]$ 为导线上的电压矩阵; $[P]$ 为电位系数矩阵,它们可以直接用镜像法求得。

2) 忽略子导线间的相互影响,并认为总电荷平均分配在每根子导线上,即每根导线的电荷为 Q/n 。则子导线表面平均表面电场强度由式(4)计算:

$$g_{av} = \frac{Q}{\pi \epsilon n d} \quad (4)$$

式中: ϵ 为空气介电常数; n 为导线分裂根数,对于管母线 $n=1$; d 为子导线直径, cm ; 对于管母线 d 即为管母直径。

3) 对于分裂导线,由于屏蔽效应,实际表面场强在分裂导线外部要更大些,而在内部则小些。计算分裂导线的平均最大表面电场强度如式(5)所示:

$$g_{max} = g_{av} \left[1 + (n-1) \frac{d}{D} \right] \quad (5)$$

式中 D 为通过分裂导线束各子导线中心的圆的直径, cm 。对于管母线而言,最大表面电场强度与导线平均表面电场强度相等。

根据式(3)~式(5)计算直流母线在距地高度 15~25 m 条件下,不同导体的表面最大场强如图 1~图 3 所示。

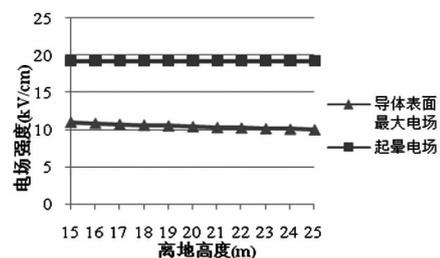


图 1 φ400/380 管母线导体表面最大电场

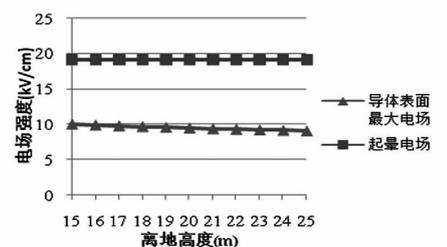


图 2 φ450/430 管母线导体表面最大电场

由图 1~图 3 可知: 3 种外径的管母线在 15~25 m 的对地高度下,导体表面最大电场均小于其起

晕场强,不起晕;相同高度时,导体外径越大,导体表面平均最大电场强度越小;同一导体,高度越高,导体表面平均最大电场强度越小。

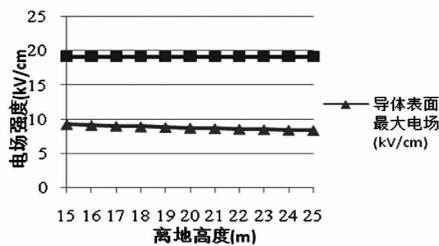


图3 φ500/480管母线导体表面最大电场

1.4 地面合成场强计算

直流导体下的电场有两种极限情况,一种是没有电晕时,仅由导线上电荷决定的静电场或标称电场;另一种是饱和电晕时,仅由空间电荷决定电场,此时电晕已发展得相当严重,线下电场仅取决于极间距离和对地距离,导线本身尺寸已不影响线下电场。

如前所述的导体表面最大场强计算中,按15~25 m的对地高度,备选导体表面电场均小于起晕电场,导体表面理论上不会有电晕情况发生,故导体下方地面电场以直流导体电荷产生的电场为主,空间电荷产生的电场相对于直流导体电荷产生的电场较小。

文献[15]中指出:“未提供频率低于1 Hz的电场强度限值,因为它实际上属于静电场,对大多数人来说因表面电荷而引起烦恼的感觉不会发生在25 kV/m场强之下,引起紧张或烦恼的火花放电应该避免”。因此,在确定直流导体电场的限值时,除考虑人在直流电场下的直接感受外,还应考虑可能引起的暂态电击。所以由直流场导体产生的地面合成电场值应控制在25 kV/m以下。

根据静电场理论,由于在换流站中实际直流场正负极线相距200 m以上,忽略相反极性线及避雷线的影响,考虑电荷对无穷大地面场强情况时,使用镜像法计算地面合成电场,结果如图4~图6所示。

由于备选管母线均不起晕,地面合成场强即地面标称场强。对比以上3种备选管母地面标称场强计算结果,要满足地面标称场强值不大于25 kV/m,则:

- 1) 采用φ400/380管母线时高度不应小于17.3 m;
- 2) 采用φ450/430管母线时高度不应小于17.6 m;
- 3) 采用φ500/480管母线时高度不应小于18 m。

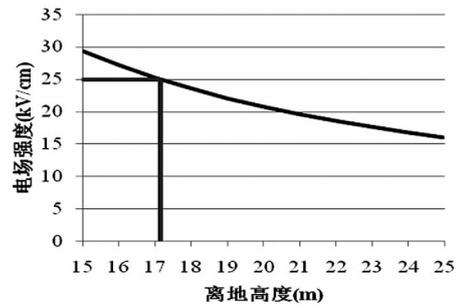


图4 φ400/380管母地面合成场强

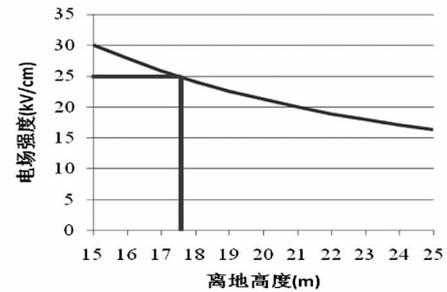


图5 φ450/430管母地面合成场强

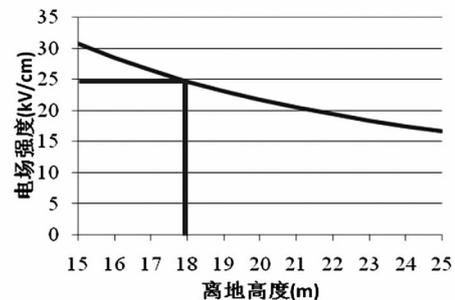


图6 φ500/480管母地面合成场强

1.5 离子流密度计算

由于备选管母线电晕起始场强均大于表面最大电场强度,因此,不会产生饱和电晕情况。此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,满足管母线产生的线下地面离子流密度限值不大于100 nA/m²的要求。

1.6 磁感应强度计算

根据恒定磁场理论,考虑过负荷情况,采用安培环路定律,计算导体正下方磁感应强度B为

$$B = \frac{\mu I}{2\pi H} \quad (6)$$

式中: B为导体在地面磁感应强度,T; μ为磁导系数,取4π×10⁻⁷ T·m/A; H为导体的对地高度,m; I为导体电流,A。

从式(6)可以看出,导体的外径不影响地面磁感应强度的计算结果。因此,备选管母线磁感应强度与对地高度的变化计算结果如表2所示。

表2 导体磁感应强度

对地高度/m	磁感应强度/mT
15	0.076
16	0.072
17	0.067
18	0.064
19	0.060
20	0.057
21	0.055
22	0.052
23	0.050
24	0.048
25	0.046

根据表2的计算结果,备选管母线6063G- ϕ 400/380、6063G- ϕ 450/430、6063G- ϕ 500/480布置在对地高度15~25m情况下,均满足地面磁感应强度小于10mT的要求。

2 直流母线导体机械受力计算

± 1100 kV直流极线及设备在户内布置,不考虑大风、覆冰的工况,不考虑采用阻尼线。由于户内设备散热差,特别是直流极线平波电抗器正常运行时会产生很大的热量,户内需加装空调及风机,风机的最大风速为7m/s。

经向设备厂家调研, ± 1100 kV极线主要设备均压环外径如表3所示。

表3 极线主要设备均压环尺寸

1100 kV设备	均压环外径/m
隔离开关	4.0
PLC电容器	3.5
分压器	3.0
避雷器	2.3
光CT	3.4
绝缘子	2.5

根据极母线的集中荷载分布情况,考虑最严重的情况:在同一管母线跨中悬挂安装光CT及避雷器(光CT重量约0.6t,避雷器重量约3.2t,另计及金具共4t)。避雷器、光CT及支柱绝缘子均压环外径共8.2m,考虑设备吊装时为避免设备均压环间

的碰撞,设备布置需要满足一定的间距。支撑管母线的支柱绝缘子暂按间距15m布置,则15m为一跨。下面按15m管线为一跨,两跨连续计算受力情况。

6063G系列管母线的破坏应力为179.928MPa。根据上述工况及荷载条件,分别计算3种管母线受力如表3~表5所示。

表4 ϕ 400/380管母线受力计算结果

工况	计算值
大风工况最小应力要求($k=1.67$)/MPa	170.52
地震工况合成应力要求($k=1.67$)/MPa	170.52
要求管母线最小破坏应力/MPa	170.52
管母最大挠度/cm	73.5

注: k 为荷载短期作用时硬导体的安全系数^[15]

表5 ϕ 450/430管母线受力计算结果

工况	计算值
大风工况最小应力要求($k=1.67$)/MPa	135.24
地震工况合成应力要求($k=1.67$)/MPa	135.14
要求管母线最小破坏应力/MPa	135.24
管母最大挠度/cm	50.98

注: k 为荷载短期作用时硬导体的安全系数^[15]

表6 ϕ 500/480管母线受力计算结果

工况	计算值
大风工况最小应力要求($k=1.67$)/MPa	109.86
地震工况合成应力要求($k=1.67$)/MPa	109.76
要求管母线最小破坏应力/MPa	109.86
管母最大挠度/cm	36.75

注: k 为荷载短期作用时硬导体的安全系数^[16]

由表4~表6可知,3种备选管母线在实际运行工况下,要求管母线最小破坏应力均小于管母实际的破坏应力;最大抗度满足规程规范要求^[15]:不大于 $0.5D$ (D 为管母直径)。

如按跨距16m布置,两跨连续计算, ϕ 400/380管母线要求最小破坏应力达182.868MPa,超出管母线的实际限制; ϕ 450/430、 ϕ 500/480管母线破坏应力满足要求。

3 结论

通过对 ± 1100 kV直流母线3种备选管母 ϕ 400/380、 ϕ 450/430、 ϕ 500/480在对地高度15~25

m 的范围内,导体下方的合成场强、离子流密度以及磁感应强度进行计算,并结合 ± 1100 kV 极线设备布置的实际情况确定直流母线的最大跨距,其结果如下:

1) 3种备选导体均不起晕且地面离子流密度与磁感应强度满足规程规范要求。

2) $\phi 500/480$ 管母,对地高度不小于 18 m;
 $\phi 450/430$ 管母,对地高度不小于 17.6 m;
 $\phi 400/380$ 管母,对地高度不小于 17.3 m; 均能满足地面合成场强满足不大于 25 kV/m 的要求。

3) 根据目前所调研的 ± 1100 kV 设备均压环外径,综合考虑设备布置安装方式,计算出能满足3种管母破坏应力及挠度要求的最大管母跨距为 15 m。

± 1100 kV 直流母线合理的选型与布置方案既要确保工程的安全可靠运行也要兼顾运行的经济性,直径越小的管母经济性越高。因此推荐 $\phi 400/380$ 管母作为 ± 1100 kV 直流母线,结合目前设备外形,建议管母对地高度 18 m,且支撑管母的支柱绝缘子间距 15 m 为经济技术最优方案。可根据现场设备的布置情况合理调整支撑管母的支柱绝缘子间距,但不应大于 15 m。

参考文献

[1] 万保权,张小武,张广洲,等. ± 800 kV 云广线换流站母线电晕特性试验研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(9): 1788-1791.

[2] 李先志,梁明,李澄宇,等. ± 1100 kV 特高压直流输电线路按电磁环境条件的导线设计[J]. 高电压技术, 2012, 38(12): 3284-3291.

[3] 柏晓路,李健,等. ± 1100 kV 特高压直流输电线路电磁环境研究[J]. 中国电力, 2014, 47(10): 24-29.

[4] hartier V L, Stearns R D. Formulas for Predicting Audible Noise from Overhead High Voltage AC and DC Lines[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, 100(1): 121-130.

[5] 魏晓光,宗文志,王高勇,等. ± 1100 kV 特高压直流换流阀外绝缘操作冲击放电试验及海拔校正研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(12): 1996-2003.

[6] 张猛,王国金,张月华,等. ± 1100 kV 特高压干式平波电抗器绝缘设计与试验分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1760-1768.

[7] 周沛洪,何慧雯,戴敏,等. ± 1100 kV 直流换流站避雷

器布置、参数和设备绝缘水平的选择[J]. 高电压技术, 2014, 40(9): 2871-2884.

[8] 聂定珍,马为民,余世峰,等. ± 1000 kV/ ± 1100 kV 特高压直流输电系统换流站的绝缘配合[J]. 高电压技术, 2012, 38(12): 3156-3160.

[9] DL/T 1088-2008, ± 800 kV 特高压直流线路电磁环境参数限值[S]. 北京: 中国电力出版社, 2008.

[10] 陆家榆,鞠勇. ± 800 kV 直流输电线路电磁环境限值研究[J]. 中国电力, 2006, 39(10): 37-42.

[11] Moyo N. M., Jumba N. M., Britten A. C. Investigating Contributing Factors to HVDC Corona Noise [C]. PES 2005 Conference and Exposition in Africa, Proceedings of the Inaugural IEEE, 2005: 428-432.

[12] J. G. Anderson. Transmission Line Reference Book: 345 kV and Above [M]. Electric Power Research Institute, 1975.

[13] H. Anis, A. Zeitoun, M. El-Ragheb, et al. Field Calculations around Non-standard Electrodes Using Regression and Their Spherical Equivalence [J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1977, 96(6): 1721-1730.

[14] Maruvada P. Sarma, W. Janischewskyj. Electrostatic Field of A System of Parallel Cylindrical Conductors [J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1969, 88(7): 1069-1079.

[15] No Authors Listed. Guidelines for Limiting Exposure to Time-varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz) [J]. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Health Physics, 1998, 74(4): 494-522.

[16] DL/T 5222-2005, 导体和电器选择技术规定[S]. 北京: 中国电力出版社, 2005.

作者简介:

骆玲(1986),工学硕士,从事变电站电气设计工作;
丁晓飞(1975),工学学士、高级工程师,从事变电站电气设计工作;
邢毅(1983),工学硕士,从事特高压变电站电气设计工作;
包维瀚(1989),工学硕士,从事变电站电气设计工作;
李龙才(1982),工学学士、高级工程师,从事特高压变电站电气设计工作;
杨伦(1965),工学学士、高级工程师,从事变电站电气设计及其管理工作。

(收稿日期: 2017-01-07)