

# 特高压换流站直流场管形母线选择

余波, 吴怡敏, 陶俊培

(西南电力设计院, 四川 成都 610061)

**摘要:** 常规超高压交流变电站设计中, 各级电压配电装置母线选择是设计的重要内容之一, 而国内工程设计中常忽视直流场母线选择。主要从工作电流、电磁环境、机械强度等几方面重点论述, 提出特高压换流站直流场母线型式、截面、对地高度方面要求, 同时满足经济性和安全性的要求。

**关键词:** 母线; 选型; 工作电流; 电磁环境; 机械强度

**Abstract:** The selection of busbar type is one of the most important parts in EHVAC substation design. But the busbar selection in DC field is usually ignored in HVDC project design. The working current, electromagnetic environment and mechanical strength of tubular busbar are analyzed. Based on these analyses, an optimal scheme which is about busbar type, conductor section and the height of busbar in UHVDC project is proposed, which has met the requirements of economy and security simultaneously.

**Key words:** busbar; type selection; working current; electromagnetic environment; mechanical strength

**中图分类号:** TM645 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)02-0069-04

常规超高压交流变电站设计中, 各级电压配电装置母线选择是设计的重要内容之一, 而国内直流输电技术也是近十多年来开始大规模采用, 早期的直流输电工程换流站设计多由供货商成套设计, 而直流场属于成套设计范围, 国内设计单位接触较少。常对直流场母线选择忽略, 近年来随着国内直流输电工程大量实施, 根据国产化的相关要求, 设计单位也逐步参与成套设计。

根据目前国内外 ±600 kV 电压等级以下的直流输电换流站的工程经验, 直流场母线型式均采用支持管母线, 支持管母线配电装置型式具有占地面积较省、土建投资较低、直流场接线清晰等特点, 大多换流站的直流场母线采用此种母线型式。因此, 特高压直流工程中也考虑采用此种母线型式, 不再详细论述。

直流场母线选择, 主要包括截面和对地高度, 其主要由工作电流、电磁环境、机械强度等几方面综合比较后确定。根据在超高压换流站的设计经验, 对于管母线的管径大小和对地高度主要由电磁环境条件决定, 以下就此几方面内容进行论述。

## 1 工作电流对母线选型的影响

直流场铝管母线的直流载流量与常规交流变电站的铝管母线的载流量的计算方法相同, 即考虑长期工作电流和短时电流要求的最小截面, 可参照常规交

流变电站的计算方法进行计算, 计算公式如下。

(1) 长期工作电流计算

$$Q_R + Q_t = Q_f + Q_d \quad (1)$$

式中:

$Q_r$ ——铝管母线通过电流时电阻发热量 (w/m);

$Q_t$ ——铝管母线太阳辐射热量 (w/m);

$Q_f$ ——铝管母线向周围介质辐射散热 (w/m);

$Q_d$ ——铝管母线对周围介质的对流散热 (w/m)。

(2) 短时电流计算

$$S \geq \frac{\sqrt{Q_d}}{C} \quad (2)$$

式中:

$S$ ——铝管母线截面积 (mm<sup>2</sup>);

$Q_d$ ——短路时的热效应 (A<sup>2</sup>·s);

$C$ ——与材料及发热温度有关的系数。

根据上述公式以及换流站的气象条件, 可以确定直流场铝管母线的最小要求, 需要注意的是, 在长期直流工作电流计算时, 应考虑直流侧的长期过负荷电流的影响, 同时为了母线的长期安全运行, 铝管母线在长期工作电流下的表面温度不超过 70℃。

目前, 国内 ±500 kV、3 000 MW 的换流站直流场的极母线采用 Φ250 铝镁合金管, 该管母线的载流量可达 5 000 A 以上, 远远大于其工作电流, 因此, 特高压换流站直流场极母线按照载流量选择, Φ250 管形

母线已经满足要求。

## 2 电磁环境对母线选型的影响

### 2.1 电磁环境标准

换流站直流场的电磁环境主要指电场强度、磁场强度以及离子流密度,而要控制换流站直流场电场环境,首先需确定电场强度、磁场强度以及离子流密度的限制值,而无论在超高压还是特高压换流站工程,对于电磁环境的控制指标,原则上应一致,但目前尚无相应的标准要求,参照现已运行的、已被接受的 $\pm 500$  kV 换流站的环境状况、国内外相关标准来确定特高压直流换流站的合成电场、离子流密度和磁场限值。

根据中国 $\pm 500$  kV 换流站电磁环境测试结果,管母线下地面的合成电场大致为 $20\sim 30$  kV/m;由于直流场的母线布置结构复杂,而一般工程中仅仅考虑管母线产生的合成电场,建议其限值取 $27.5$  kV/m。主要考虑因素如下:

(1) 换流站的合成电场由导体上的电荷和空间电荷共同产生,这些导体不仅仅是母线,空间电荷也不仅仅是母线产生,总的合成电场比由管母线产生的合成电场要大,由管母线产生的合成电场限值不能太大。

(2) 避免换流站工作人员工作时出现较重的暂态电击而影响操作或出现事故。

管母线产生的线下地面的离子流密度限值可以参照直流输电线路的离子流密度限值执行;由管母线电流产生的磁场限值可以参照国际非电离辐射防护委员会给出的公众暴露限值执行,对于直流输电工程,这一限值应该不会起到制约作用。

综上所述,建议由管母线产生的线下合成电场、离子流密度和磁场限值为:

- (1) 地面合成电场限值取 $27.5$  kV/m;
- (2) 地面离子流密度限值取 $100$  nA/m<sup>2</sup>;
- (3) 地面磁感应强度限值取 $40$  mT。

### 2.2 电场强度计算

换流站中直流场的正负极母线布置距离很远(多在 $150$  m 以上),其相互影响在研究管母线产生的电场时可看成单极运行方式。合成电场由两部分叠加而成,一部分由管母线上的电荷产生,另一部分由电晕产生的空间电荷产生。前者主要受母线电压

和母线对地高度的影响,后者主要与母线电压、母线对地高度和母线直径有关。在母线电压和母线对地高度一定的条件下,管母线直径大小直接影响母线表面电场强度大小。而母线表面电场强度大小又直接影响母线起晕程度,进而影响空间离子流密度和合成电场大小。

管母线起晕场强与母线表面状况和天气有关。根据国内外研究机构的试验,在常规海拔条件下,可用于特高压直流换流站的管母线的起晕场强为:

干管母线: $18.4$  kV/cm

湿管母线: $11.3$  kV/cm

而对于污秽状态管型母线的起晕电场强度的试验数据,仅有的参考数据为 EPR I 在《Bipolar HVDC Transmission System Study Between  $\pm 600$  kV and  $\pm 1200$  kV; Corona》报告中提供的一组在人工污秽条件下的试验数据(约为 $9.2$  kV/cm),该报告中未说明试验条件,而国内研究单位尚无此方面的示意数据,该数据是否适合在国内工程中采用有待国内研究单位的进一步验证,这里暂不考虑在污秽条件下的合成场强。

对于户外直流场,需考核管母线在干、湿两种状态下的地面合成场强,对管径为 $250$  mm、高度 $12\sim 16$  m 的管母线表面场强的计算结果见图 1。从图 1 中可以看出,对于在干燥状态下的管母线,其表面场强较低,未达到管母线的起晕场强 $18.4$  kV/cm,管母线不会起晕,起面场强即为标称场强,计算结果见图 2。而对于湿状态的管母线,表面场强均超过 $11.3$  kV/cm,管母线起晕,地面场强应为合成场强,计算结果见图 3。从上述计算结果可以看出,对于户外直流开关场,外径为 $250$  mm,在湿状态下,母线高度 $14$  m 就满足 $27.5$  kV/m 的要求。

对于户内直流场,仅需考核管母线在干燥状态条件下的地面合成场强。母线高度仅需 $12.0$  m 满足 $27.5$  kV/m 的要求。

### 2.3 离子电流密度计算

图 4 为采用 $\Phi 250$  管母线时,在潮湿状态下,地面最大离子电流密度与管母线对地高度之间的变化曲线。由图 4 可见,无论是在户外还是户内,当管母线对地高度为 $12\sim 18$  m 时,地面最大离子电流密度均远小于 $100$  nA/m<sup>2</sup>。因此,离子电流密度不是管母线截面和高度选择的关键条件。

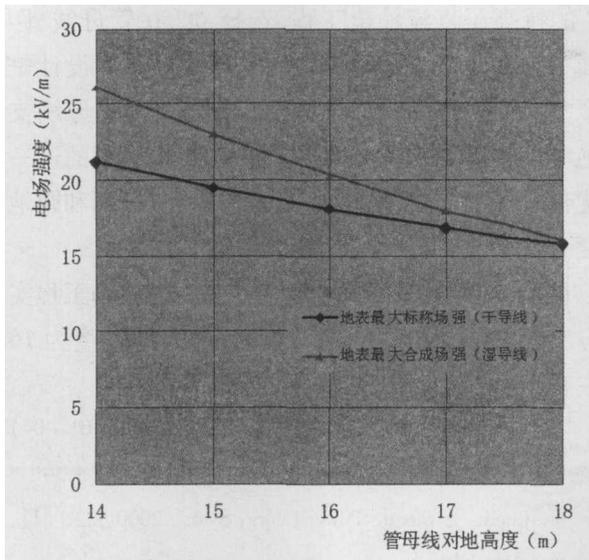


图 1 管母线表面场强与管母线对地高度之间的关系

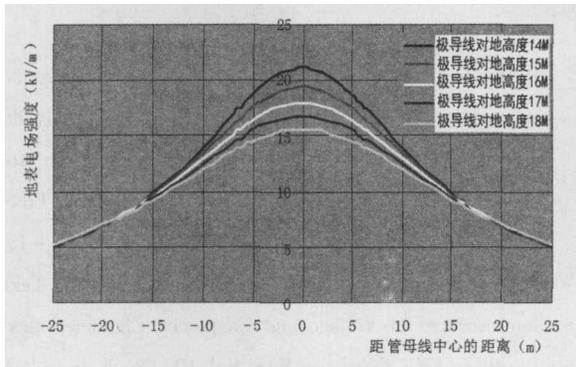


图 2 地面标称场强横向分布

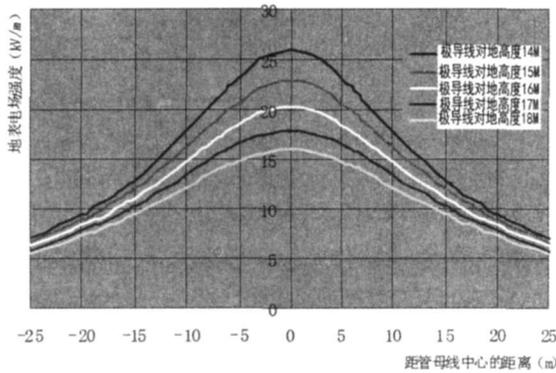


图 3 地面合成场强横向分布 (起晕电压 11.3kV/cm)

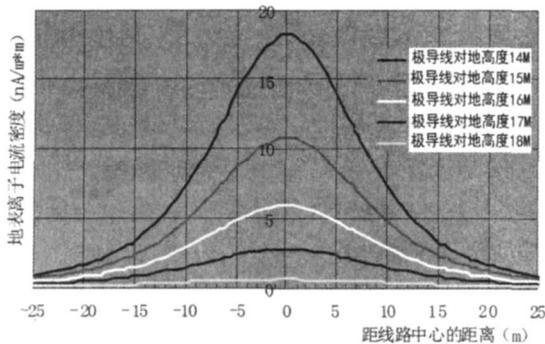


图 4 管母线在潮湿状态下地面最大离子电流密度与母线对地高度间关系图

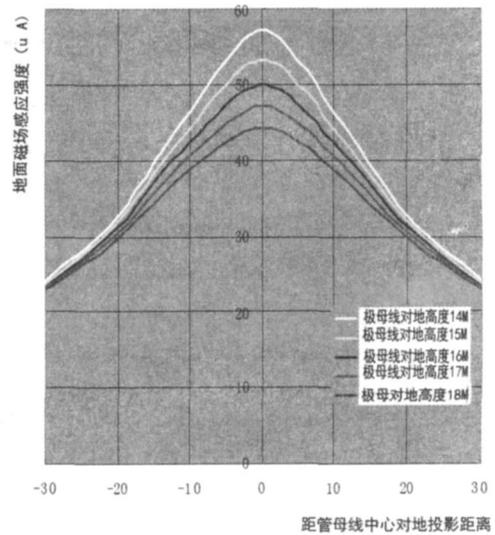


图 5 管母线地面合成磁场与母线对地高度间关系图

### 2.4 磁场强度计算

直流磁场的产生与交流输电线路产生的工频磁场的机理相同,即电流产生磁场,但直流磁场仅为正负两个方向的恒定电流产生,计算分析更为简单。图 5 为直流场采用  $\Phi 250$  管母线时,导线通流 4 000 A,两极母线间距 250 m,曲线自上而下的高度变化 12~18 m。ICNIRP 的导则给出一般公众的磁场暴露参照水平 (1 Hz 以下),即 40 mT,并且表明直流磁场对人的影响远比交流磁场要小。而通过计算,包括  $\pm 500$  kV 和  $\pm 800$  kV 输电线路的磁场水平,都远远小于 ICNIRP 的磁场暴露参照水平,从这个意义上, $\pm 800$  kV 直流输电线路可以不考虑磁场问题。

可以看出,线路下方附近,磁场随导线高度增加和随距导线的距离增加衰减很快地面合成磁场与管母线对地高度之间的变化曲线。由图 5 可见,无论是在户外还是户内,当管母线对地高度为 12~18 m 时,地面最大磁场强度均小于 60 mT。

### 3 机械强度的影响

直流场极母线多采用支撑结构,而管母线的机械强度是否能够满足要求,与支柱绝缘子布置有关,布置决定了铝管母线的跨度,从而决定了铝管母线的机械强度是否满足要求,在计算上可以参照交流变电站支持管母线的强度计算公式进行计算,荷载组合和安全裕度的选择上,也可参照其计算方法。此外,需要重点计算在地震条件下的机械强度,正常状况下跨中挠度。

## 4 结束语

从上述分析情况来看,关于特高压换流站直流开关场母线的选择上,主要受地面合成电场强度和机械强度的影响,而机械强度可以通过调整支撑点的数量进行调节,而工作电流、离子电流密度以及地面磁场强度对直流场管母线的截面和距地高度不起决定性作用。

通过上述论述表面,对于 ±800 kV、5 000~6 400

MW 的特高压直流输电工程,选择 Φ250 管母线、距地面 15 m 左右就可满足要求,但直流场母线设计是一个复杂的工作,还需结合直流场 ±800 kV 母线支柱绝缘子的特性,进行管母线截面和距地高度的进一步优化设计工作,最终确定直流场母线的截面和距地高度。

目前,云广特高压直流工程换流站直流场工程实施方案中,极母线选择 Φ250 管母线,距地高度为 16 m 左右。

(收稿日期: 2009-01-04)

(上接第 18 页)

在完成对各发电机的  $f$  和频率滑差  $\frac{df}{dt}$  以及惯性常数的估算之后,未知量  $\Delta P$  就能从式 (2) 中得到。进一步,可以得到要切除的负荷量:

$$\sum P_{LS} = \Delta P - K_L \Delta f_s \quad (5)$$

式中:  $\sum P_{LS}$  为总减负荷功率;  $\Delta P$  为系统总的不平衡功率;  $K_L$  为负荷调节效应系数。

如果考虑到充分发挥系统旋转备用容量 (SR, spinning reserve capacity) 的作用,那么减负荷总量为:

$$\sum P_{LS} = \Delta P - K_L \Delta f_s - SR \quad (6)$$

## 3 小结

前面提出了一种新的自适应的低频减载方案,该方案基于对故障大小的估计和判断,并根据故障大小的变化而改变。该方案的准确性有赖于对  $f$  和频率滑差  $\frac{df}{dt}$  的准确测量,这将是下一步所关注的问题。

### 参考文献

[1] 方勇杰. 电力系统的自适应解列控制 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(20): 41-44.

[2] SMAHA, D. W. et al.: 'Coordination of load conservation with turbine-r underfrequency protection', IEEE Trans Power Appar Syst 1980, 99, pp 1137-1150.

[3] PRASETIJO, D. et al.: 'A new load shedding scheme for limiting under-frequency', IEEE Trans Power Syst, 1994, 9, (3), pp 1371-1378.

[4] HUANG, S. J., and HUANG, C. C.: 'An adaptive load shedding method with time-based design for isolated pow-

er systems', Electr Power Energy Syst, 2000, 22, (1), pp 51-58.

[5] [苏] БЕЛУКОВ В. А. 电力系统过渡状态控制 [M]. 杨笑石, 张金镔, 译. 北京: 科学出版社, 1989.

[6] P. Harrison: 'Restoring system stability by under frequency load shedding in circumstances of sudden supply deficiency. In: Proceedings of the IFAC Symposium on Automatic Control of Power Generation Distribution and Protection Pretoria (Republic of South Africa); 1980. 15-19.

[7] Kalanishwamy K. A. et al.: 'Optimal Load Shedding Taking into Account of Voltage and Frequency Characteristics of Loads', IEEE Trans on PAS Vol 104, No 6, June 1985.

[8] 高元楷, 王漪, 郑定海. 东北电力系统低频控制 [C]. 中国电机工程学会稳定控制装置研讨会资料, 湖北武汉, 1989.

[9] 秦明亮. 在频率紧急控制装置中扩充  $\frac{df}{dt}$  应用的探讨 [J]. 电网技术. 1998, (6), 39-41.

[10] Delfino B, Massucco S, Morini A, Scaleria P, Silvestro F.: 'Implementation and comparison of different under frequency load-shedding schemes', Power Engineering Society Summer Meeting 2001, (1).

[11] ANDERSON, P. M., and FOUAD, A. A.: 'Power system control and stability' (The Iowa Press Ames 1977).

### 作者简介:

巫 柯 (1983-), 男, 硕士研究生, 从事电力系统稳定和控制等方面的研究工作;

李兴源 (1945-), 男, 教授, 博士生导师, 中国电机工程学会理事, IEEE 高级会员, 从事电力系统稳定和控制等方面的研究工作;

李青芸 (1982-), 女, 硕士研究生, 从事电力系统稳定和控制等方面的研究工作。

(收稿日期: 2009-01-09)