

变电工程设计电气专业主设人工作手册

专题报告

导体选择

中国电力工程顾问集团
华北电力设计院工程有限公司变电电气室
2011 年 12 月

目 录

第 1 章 导体选择的一般原则和依据	1
1.1 变电站导体选择原则	1
1.2 导体选择的一般步骤	2
第 2 章 管形导体选择	4
2.1 500kV 铝管母线	4
2.2 66kV 铝管母线	9
第 3 章 软导线选择	13
3.1 500kV 主变进线	13
3.2 500kV 出线	15
3.3 220kV 主变进线	17
3.4 66kV 主变进线	19
3.5 电容器及电抗器回路	20

第 1 章 导体选择的一般原则和依据

1.1 变电站导体选择原则

配电装置的导体主要包括主母线、进出线跨线、设备间连线及引下线等。导体的选型对于变电站的占地面积、电磁环境参数和配电装置的抗震性能、技术经济特性等均具有一定的影响。因此，合理地选择导体的材料、类型、结构，对于配电装置的设计具有重要意义。

(1) 导体选择按满足正常运行、检修、短路和过电压状态下的要求，并考虑远景发展及上级单位的特殊要求。

(2) 选择导体时，应按当地环境条件校核，主要包括：气温、风速、湿度、海拔及覆冰等。

(3) 最高环境温度，对于屋外裸导体，为最热月平均最高温度；对于屋内裸导体，为该处通风设计温度，当无资料时，可取最热月平均最高温度加 5°C 。

(4) 选择屋外导体时，应考虑日照的影响。对于按经济电流密度选择的导体，可不校验。计算导体日照的附加温升时，日照强度取 $0.1\text{W}/\text{cm}^2$ ，风速取 0.5m/s 。

(5) 选择导体时所用的最大风速，对 220kV 及以下导体，采用离地面 10m 高、30 年一遇 10min 平均最大风速；对 500kV 导体，采用离地面 10m 高、50 年一遇 10min 平均最大风速；对 1000kV 导体，采用离地面 10m 高、100 年一遇 10min 平均最大风速。计算导体风荷载时，应按安装处的高度对最大风速进行折算。

1.1.1 母线选择的主要原则

屋外配电装置主母线可供选择的有软导线和管形母线。国内 500kV 配电装置采用双分裂特轻型或耐热铝合金导线，后来采用管形母线。管形母线又分单管和多管两种型式，选用管材有铝锰合金管、铝镁合金管、铝锰镁合金管，安装方式有支持式管母和悬吊式管母。对于单管支持式管母，由于 500kV 配电装置母线跨度达 28m ，由多个工程实践得知，母线挠度大，导致垂直开启母线隔离开关动静触头配合存在一定困难，故近年来多采用悬吊式管形母线。由多管组成的分裂结构型支持式管母，由于结构复杂，施工难度大，安装工程量大，国内仅少量工程采用过。

母线导体截面选择有如下几个方面要求：

- (1) 按母线穿越功率即载流量选择;
- (2) 按电晕截面要求选择;
- (3) 按无线电干扰水平校验;
- (4) 对管母要进行机械强度及挠度验算。

1.1.2 进出线跨线及设备连线选择的主要原则

配电装置的进出线、跨线及设备连线的主要原则有以下几点:

- (1) 按载流发热条件选择;
- (2) 按电晕电压、无线电干扰条件进行校验;
- (3) 对构架的拉力小;
- (4) 导线使用金具简单;
- (5) 安装工程量小。

1.2 导体选择的一般步骤

导体按载流量、热稳定、动稳定或机械强度以及经济性等条件进行选择,按电晕、无线电干扰、可听噪声、静电感应等条件进行校验,并应尽量使导体金具简单、安装简便。

(1) 按回路持续工作电流选择

导体在要求的运行温度、环境条件下的载流量应不小于导体回路持续工作电流。在计及日照影响时,钢芯铝绞线及管形导体按不超过 80℃考虑,耐热导线安装散热金具后按不超过 110℃考虑。导体的长期允许载流量应按所在地区的海拔及环境温度进行修正。

分裂软导线载流量的修正除了考虑温度和海拔外,还需考虑由于各次导线相互靠近,使次导线内电流密度分布不均匀而产生邻近效应。

(2) 按经济电流密度选择。

除配电装置的回流母线外,较长导体的截面宜按经济电流密度选择。当无合适规格导体时,导体面积可按经济电流密度计算截面的相邻下一档选择。

(3) 按电晕条件校验

110kV 及以上导体的电晕临界电压应大于导体安装处的最高工作电压。

为了尽可能的降低 1000kV 配电装置对环境的影响，减小电晕损耗，1000kV 导体选型的控制条件取得的较超高压工程更加严格，以雨天不起晕作为其控制标准，要求最高工作线电压与导线临界起始电晕电压之比小于 0.9。

（4）按短路热稳定校验

要求导体载流截面 $S > \frac{\sqrt{Q_d}}{C}$ ，式中： Q_d 为短路电流热效应， C 为热稳定系数。

（5）按挠度校验

对于管形导体，要求 $f \leq (0.5 \sim 1.0) \times D$ ，式中： f 为母线跨中挠度允许值， D 为母线外径。

（6）按机械强度校验

对于硬导体，校验正常状态及短路状态下导体所承受的最大弯矩及应力均不应超过材料允许的弯矩及应力。

（7）无线电干扰校验

为了尽可能的降低 1000kV 配电装置对环境的影响，1000kV 导体选型的控制条件取得的较超高压工程更加严格，需校验无线电干扰。导线的无线电干扰主要由电晕和火花放电产生，干扰对象主要是收音机和收讯台。无线电干扰的预估主要采取以下 3 种方法：①半理论分析法，目前各国使用得较少；②比较法，基于已知导线的无线电干扰，通过比较导线参数，预估出新导线的无线电干扰；③特高压设计法，通过试验笼内的导线，在大雨状态下求得激发函数，用于预估新导线的无线电干扰。各国广泛采用的是比较法，这种方法简单可行，且较为准确。因此，1000kV 分裂导线的无线电干扰校验采用比较法。

（8）可听噪声校验

为了尽可能的降低 1000kV 配电装置对环境的影响，1000kV 导体选型的控制条件取得的较超高压工程更加严格，需校验可听噪声。美国 BPA 推荐的预测公式是根据各种不同电压等级、分裂方式的实际试验线路上长期实测数据推导出来的，该公式具有较好的代表性和准确性，因此 1000kV 分裂导线的可听噪声采用 BPA 推荐的预测公式进行校验。

变电站可听噪声的控制目标是使站界噪声满足噪声限值要求。由于变电站内的导线、设备布置复杂，站界噪声是站内的导线、金具、设备等声源共同作用的结果，

需要根据变电站的实际布置情况，借助噪声预测软件分析出变电站内各种噪声源中对站界噪声的贡献量。

特高压交流试验示范工程利用噪声预测软件进行了大量的站界噪声计算。噪声预测软件的准确性和可信度已经在特高压试验基地噪声分布的研究与测试分析中得到验证。研究表明：特高压交流试验示范工程采用 $4\times\text{JLHN58K-1600}$ 导线，其电晕噪声对站界噪声不起控制作用。

（9）次档距的选择

次档距长度是指间隔棒安装的距离，它与下列四因素有关：短路张力、短路电流大小、短路时次导线允许的接触状态、对架构受力的限制。

双分裂导线短路张力具有其特殊性。其不仅有相间短路力，当分裂导线受到大的短路电流作用时，同相次导线间由于电磁吸引力作用，使次导线受到拉伸，产生弹性拉力，称为第一最大张力。

第一最大张力的大小与次档距有密切的关系，从小到大改变次档距，次导线处于三种不同的状态：1）非接触状态。开始次档距较小，在短路电流作用下次导线之间还有一定距离，并不接触，次导线相对伸长形变较小，第一最大张力不大；2）临界接触状态。次档距增大到某一值时次导线处于接触与不接触的临界状态，这时次导线有最大的相对伸长形变，第一最大拉力最大；3）接触状态。次档距继续增大，在一个安装距离内次导线有一部分互相紧贴在一起，次导线的相对伸长形变反而相对减小，短路拉力逐渐下降。因此需要考虑架构及绝缘子串的受力限制，准确计算第一最大张力与次档距的关系，确定适当的次档距。

双分裂导线用的间隔棒实际安装距离应避开临界次档距范围，同时保证短路时次导线处于非接触状态，避免因次导线接触而使导线损伤并产生电晕。

本专题以 500kV 变电站为例，说明导体选择的一般原则和步骤。

第 2 章 管形导体选择

2.1 500kV 铝管母线

本工程 500kV 配电装置采用 HGIS 布置型式。

根据系统提资，500kV 母线穿越功率为 5196MVA，得母线通流为：

$$I_g = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{5196 \times 1000}{\sqrt{3} \times 500} = 6000 A$$

选用 6063G-T6-D250/230，以下分别从载流量、热稳定、电晕、挠度、机械强度等方面进行校验，不校验经济电流密度。

2.1.1 按回路持续工作电流选择

采用公式计算该铝管母线的载流量为：（见《35-500kV 铝管母线配电装置》）

$$I = \sqrt{\frac{a_s k F (t_1 - t_2) - A_{t,y} D E_{t,y}}{R_{ac}}}$$

式中：

a_s —综合放热系数，此处取 9.3。

k —管型系数，对圆管型、封闭异型 $k=1$ ，对开槽的封闭异型管 $k=1.5 \sim 1.6$ ；

F —铝管母线表面积(m^2/m)

t_1 —最高温度 $80^\circ C$

t_2 —环境温度 $37.9^\circ C$

$A_{t,y}$ —导体对阳光吸收率，考虑黑化影响，取 $0.5 \sim 0.6$

D —铝管母线的直径（米）

$E_{t,y}$ —太阳对母线水平照射总功率密度， $0.09 W/cm^2$

R_{ac} —铝管母线的交流电阻（欧/米），其计算如下：

铝管母线交流电阻应考虑集肤效应及电阻温度修正系数点影响：

$$R_{20} = \rho \frac{l}{S} = 0.0303 \times \frac{1}{7540} = 4.02 \times 10^{-6}$$

式中： ρ — $20^\circ C$ 导体点电阻率（欧·毫米²/米）

S —铝管母线点截面积，(mm^2)

l —导体点单位长度（m）

$$R_{ac} = R_{20} [1 + \alpha_0 (t - 20)] \left(\frac{R_{ac}}{R_{dc}} \right) = 4.02 \times 10^{-6} \times [1 + 0.0042(80 - 20)] \times 1.01$$

$$= 5.08 \times 10^{-6} \Omega/m$$

式中： $\left(\frac{R_{ac}}{R_{dc}} \right)$ —集肤系数。

α_0 —电阻温度系数（ $1/^\circ C$ ）。

代入本工程参数得：

$$\therefore I = \sqrt{\frac{a_s k F (t_1 - t_2) - A_{t,y} D E_{t,y}}{R_{ac}}} = \sqrt{\frac{9.3 \times 1 \times 0.7854 \times (80 - 37.9) - 0.5 \times 0.25 \times 900}{5.08 \times 10^{-6}}} \\ = 6195.6 A$$

$\therefore I > I_g$ ，即所选铝管母线的载流量超过系统母线通流量，满足要求。

2.1.2 按电晕校验

按 DL/T 5222《导体和电器选择设计技术规定》的表 7.1.7 的规定，在 500kV 电压等级，管型导体外径超过 60mm 时可不进行电晕校验。所以该导体可不进行电晕校验。

电晕临界电压（线电压有效值，kV）可按式计算：

$$u = 84 m_1 m_2 \delta^{\frac{2}{3}} r_0 K \left(1 + \frac{0.301}{\sqrt{r_0 \delta}} \right) \lg \frac{D_{Hj}}{r_0} = 84 \times 0.9 \times 0.85 \times 1 \times 12.5 \times 0.96 \times 1.085 \times 1.82 \\ = 1522.7 kV$$

m_1 —导线表面粗糙系数，取 0.9

m_2 —天气系数，晴天取 1、雨天取 0.85

δ —空气相对密度，取 1

r_0 —导体的半径， $r_0 = 25/2 = 12.5 \text{cm}$

D_{Hj} —三相导线几何均距， $D_{Hj} = 1.26D = 1.26 \times 6.5$ （相间距离） $= 8.19 \text{m} = 819 \text{cm}$

K —电容不均匀系数，三相导线水平排列时，考虑中间导线电容比平均电容大的不均匀系数，一般取 0.96

因为系统最高运行电压 $550 \text{kV} < 1522.7 \text{kV}$ ，故满足要求。

2.1.3 热稳定校验

裸导体的载流截面：

$$S = 3.1416 \times \left(\frac{250^2 - 230^2}{4} \right) = 7539.8 \text{mm}^2$$

500kV 母线三相短路电流为 62.6kA，动稳定电流为 159.6kA。

$$\frac{\sqrt{Q_d}}{C} = \frac{62.6 \sqrt{0.4}}{83} \times 10^3 = 477.0 \text{mm}^2$$

$$\therefore S > \frac{\sqrt{Q_d}}{C}$$

式中：C—热稳定系数。

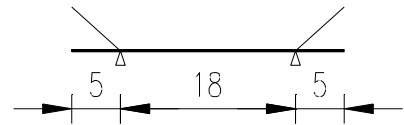
2.1.4 按挠度校验

悬吊式管母的挠度允许标准没有支持式铝管母线严格，因为它的铝管两端用金具悬吊起来，属固定连接，不存在因为挠度过大造成支持金具滑动失常损耗绝缘子的问题，它的挠度是由单柱式隔离开关的安装要求和适当考虑美观等因素控制，但根据《导体和电器选择设计技术规定》P18 页 7.3.7 条，允许值为：

$$f \leq (0.5 \sim 1.0) \times D$$

式中：f—母线跨中挠度允许值

D—母线外径(cm)；



对于单跨简支梁，均布荷载产生的挠度 f_1 为： $\frac{5ql^4}{384EJ}$ ，即 $1.3 \times \frac{ql^4}{100EJ}$

其中：q—均布荷载 kg/cm $W_p = \alpha K_1 K_2 V^2 / 16$ (kg/m)

l—计算跨距 cm

E—弹性模量 kg/cm^2

J—截面惯性矩 cm^4

若内外径大小变化，按如下公式计算：

管形导体截面惯性矩 $J = \frac{\pi}{64} D^4 [1 - (\frac{d}{D})^4]$ ，其中 D 导体外径，d 导体内径。

- 本工程，对于管形导体 $\Phi 250/230$ ：（计算重量 22.32kg/m，弹性模量 690000N/mm²，截面惯性矩 5438.1cm⁴）

均布荷载产生的跨中挠度：

$$f_1 = 1.3 \times \frac{ql^4}{100EJ} = 1.3 \times \frac{22.32 \times 18^4 \times 10^6}{100 \times 6.9 \times 10^5 \times 5438.1} = 8.1cm$$

集中荷载产生的跨中挠度：

$$f_2 = 2.08 \times \frac{Pl^3}{100EJ} = 2.08 \times \frac{120 \times 18^3 \times 10^6}{100 \times 6.9 \times 10^5 \times 5438.1} = 3.88cm$$

$$f = f_1 + f_2 = 8.1 + 3.88 = 12cm < 25cm$$

所以，挠度满足要求。

2.1.5 机械强度校验

材料的正常允许应力为：

$$\sigma = \frac{\sigma_{0.2}}{1.6} = \frac{170 \times 100}{1.6} = 10625 \text{ N/cm}^2$$

材料的短路及地震时允许应力为：

$$\sigma = \frac{\sigma_{0.2}}{1.4} = \frac{170 \times 100}{1.4} = 12143 \text{ N/cm}^2$$

① 正常状态时母线所承受的最大弯矩 M_{\max} 及应力 σ_{\max} 计算：

母线自重产生的垂直弯矩 M_{cz} 为：

$$M_{cz} = 0.125 q_1 l_{js}^2 \times 9.8 = 0.125 \times 22.32 \times 18^2 \times 9.8 = 8858.8 \text{ Nm}$$

集中荷载产生的垂直弯矩 M_{cf} 为：

$$M_{cf} = 0.25 P l_{js} \times 9.8 = 0.25 \times 120 \times 18 \times 9.8 = 5292 \text{ Nm}$$

最大风速产生的水平弯矩 M_{sf} ：

$$f_D = a_D K_D D_1 \frac{v_{\max}^2}{16} = 1 \times 1.2 \times 0.25 \times \frac{35^2}{16} = 22.97 \text{ kg/m}$$

$$M_{sf} = 0.125 f_D l_{js}^2 \times 9.8 = 0.125 \times 22.97 \times 18^2 \times 9.8 = 9116.8 \text{ Nm}$$

正常状态时母线所承受的最大弯矩及应力为：

$$M_{\max} = \sqrt{(M_{cz} + M_{cf})^2 + M_{sf}^2} = \sqrt{(8858.8 + 5292)^2 + 9116.8^2} = 16833.3 \text{ Nm}$$

$$\sigma_{\max} = 100 \frac{M_{\max}}{W} = 100 \frac{16833.3}{435.16} = 3868.3 \text{ N/cm}^2$$

此值小于材料的正常允许应力 10625N/cm²，故满足要求。

② 短路状态时母线所承受的最大弯矩 M_d 及应力 σ

短路电动力 f_d 及其产生的水平弯矩 M_{sd} 为：

$$f_d = 1.76 \frac{i_{ch}^2}{a} \beta = 1.76 \times \frac{160^2}{650} \times 0.58 = 40.2 \text{ kg/m}$$

$$M_{sd} = 0.125 \times f_d l_{js}^2 \times 9.8 = 0.125 \times 40.2 \times 18^2 \times 9.8 = 15956.9 \text{ Nm}$$

短路情况下风速产生的水平弯矩 M_{sf} 及风压 f_v ：

$$f_v = d_v k_D D_1 \frac{v^2}{16} = 1 \times 1.2 \times 0.25 \times \frac{17.5^2}{16} = 5.742 \text{ kg/m}$$

$$M_{sf} = 0.125 \times f_v l_{js}^2 \times 9.8 = 0.125 \times 5.742 \times 18^2 \times 9.8 = 2278.2 \text{ Nm}$$

短路状态时母线所承受的最大弯矩及应力为：

$$\begin{aligned} M_d &= \sqrt{(M_{sd} + M_{sf})^2 + (M_{cz} + M_{cf})^2} \\ &= \sqrt{(15956.9 + 2278.2)^2 + (8858.8 + 5292)^2} \\ &= 23081.7 \text{ Nm} \end{aligned}$$

$$\sigma_d = 100 \frac{M_{\max}}{W} = 100 \frac{23081.7}{435} = 5306 \text{ N/cm}^2$$

此值小于材料短路时允许应力 12143N/cm²，故满足要求。

2.2 66kV 铝管母线

按工作电流 $I_g = \sqrt{(2 \times 591 + 2 \times 650)^2 + 9.2^2} = 2482 \text{ A}$ ，选用 6063G-T6-D130/110。

以下分别从载流量、热稳定、电晕、挠度、机械强度等方面进行校验，不校验经济电流密度。

2.2.1 按回路持续工作电流选择

该铝管母线的载流量为：

$$I = \sqrt{\frac{a_s k F (t_1 - t_2) - A_{t,y} D E_{t,y}}{R_{ac}}}$$

式中：

t_1 —最高温度 80℃

t_2 —环境温度 35℃

F—铝管母线表面积(m²/m)

k—管型系数，k=1

$A_{t,y}$ —导体对阳光吸收率 0.6

$E_{t,y}$ —照射总功率密度 0.09W/cm²

a_s —综合放热系数，此处由查表取 11.4

$$R_{20} = \rho \frac{l}{S} = 0.0337 \times \frac{1}{3770} = 8.94 \times 10^{-6}$$

$$R_{ac} = R_{20} \left[1 + \alpha_0 (t - 20) \right] \left(\frac{R_{ac}}{R_{dc}} \right) = 8.94 \times 10^{-6} \times [1 + 0.0042(80 - 20)] \times 1.02$$

$$= 11.4 \times 10^{-6} \Omega/m$$

$$\therefore I = \sqrt{\frac{a_s k F (t_1 - t_2) - A_{t,y} D E_{t,y}}{R_{ac}}} = \sqrt{\frac{11.4 \times 1 \times 0.408 (80 - 38.4) - 0.6 \times 0.13 \times 900}{11.4 \times 10^{-6}}}$$

$$= 3493.1 A$$

$$\therefore I > I_g$$

2.2.2 按电晕校验

110kV 以下电压的母线可不校验电晕电压。

若校验电晕电压，电晕临界电压（线电压有效值，kV）可按下式计算：

$$u = 84 m_1 m_2 \delta^{\frac{2}{3}} r_0 K \left(1 + \frac{0.301}{\sqrt{r_0 \delta}} \right) \lg \frac{D_{Hj}}{r_0} = 84 \times 0.9 \times 0.85 \times 1 \times 6.5 \times 0.96 \times 1.118 \times 1.46$$

$$= 654.5 kV$$

m1—天气好坏系数，取 0.9

m2—导体表面粗糙系数，取 0.85

δ —空气相对密度，取 1

r0—导体的半径，r0=13/2=6.5cm

D_{Hj}—三相导线几何均距，D_{Hj}=1.26D=1.26×1.5（相间距离）=1.89m=189cm

K—电容不均匀系数，取 0.96

因为系统最高运行电压 72.5kV<654.5kV，故满足要求。

2.2.3 热稳定校验

裸导体的载流截面：

$$S = 3.1416 \times \left(\frac{130^2 - 110^2}{4} \right) = 3770 mm^2$$

66kV 母线三相短路电流为 21.9kA，动稳定电流为 55.9kA

$$\frac{\sqrt{Q_d}}{C} = \frac{21.9 \sqrt{0.65}}{83} \times 10^3 = 213 mm^2$$

$$\therefore S_e > \frac{\sqrt{Q_d}}{C}$$

式中：C—热稳定系数。《导体和电器选择设计技术规定》P15 公式

2.2.4 按挠度校验

无冰无风时支持式铝管母线自重产生的跨中挠度允许值为：

$$f \leq (0.5 \sim 1.0) \times D$$

式中：f—母线跨中挠度允许值

D—母线外径(cm)；

均布荷载产生的跨中挠度：（最大跨距取 $l=12m$ ，母线计算重量 $q=10.14kg/m$ ，集中荷载 $P=50kg$ ）

$$f_1 = 1.3 \times \frac{ql^4}{100EJ} = 1.3 \times \frac{10.14 \times 12^4 \times 10^6}{100 \times 6.9 \times 10^5 \times 683.3} = 5.80cm$$

集中荷载产生的跨中挠度：

$$f_2 = 2.08 \times \frac{Pl^3}{100EJ} = 2.08 \times \frac{50 \times 12^3 \times 10^6}{100 \times 6.9 \times 10^5 \times 683.3} = 3.81cm$$

$$f = f_1 + f_2 = 5.80 + 3.81 = 9.61cm < 13cm$$

所以，挠度满足要求。

2.2.5 机械强度校验

材料的正常允许应力为：

$$\sigma = \frac{\sigma_{0.2}}{1.6} = \frac{170 \times 100}{1.6} = 10625 N/cm^2$$

材料的短路及地震时允许应力为：

$$\sigma = \frac{\sigma_{0.2}}{1.4} = \frac{170 \times 100}{1.4} = 12143 N/cm^2$$

① 正常状态时母线所承受的最大弯矩 M_{\max} 及应力 σ_{\max} 计算：

母线自重产生的垂直弯矩 M_{cz} 为：

$$M_{cz} = 0.125q_1l_{js}^2 \times 9.8 = 0.125 \times 10.14 \times 12^2 \times 9.8 = 1788.7Nm$$

集中荷载产生的垂直弯矩 M_{cf} 为：

$$M_{cf} = 0.25Pl_{js} \times 9.8 = 0.25 \times 50 \times 12 \times 9.8 = 1470Nm$$

最大风速产生的水平弯矩 M_{sf} ：

$$f_D = a_D K_D D_1 \frac{v_{\max}^2}{16} = 1 \times 1.2 \times 0.13 \times \frac{35^2}{16} = 11.944 \text{ kg/m}$$

$$M_{sf} = 0.125 f_D l_{js}^2 \times 9.8 = 0.125 \times 11.944 \times 12^2 \times 9.8 = 2106.9 \text{ Nm}$$

正常状态时母线所承受的最大弯矩及应力为：

$$M_{\max} = \sqrt{(M_{cz} + M_{cf})^2 + M_{sf}^2} = \sqrt{(1788.7 + 1470)^2 + 2106.9^2} = 3880.5 \text{ Nm}$$

$$\sigma_{\max} = 100 \frac{M_{\max}}{W} = 100 \frac{3880.5}{105.12} = 3691.4 \text{ N/cm}^2$$

此值小于材料短路时允许应力 10625N/cm²，故满足要求。

② 短路电动力 f_d 及其产生的水平弯矩 M_{sd} 为：

$$f_d = 1.76 \frac{i_{ch}^2}{a} \beta = 1.76 \times \frac{80^2}{150} \times 0.58 = 43.55 \text{ kg/m}$$

$$M_{sd} = 0.125 \times f_d l_{js}^2 \times 9.8 = 0.125 \times 43.55 \times 12^2 \times 9.8 = 7682.95 \text{ Nm}$$

内过电压情况下风速产生的水平弯矩 M_{sf} ，及风压 f_v ，

$$f_v = d_v k_D D_1 \frac{v^2}{16} = 1 \times 1.2 \times 0.13 \times \frac{17.5^2}{16} = 2.986 \text{ kg/m}$$

$$M_{sf} = 0.125 \times f_v l_{js}^2 \times 9.8 = 0.125 \times 2.986 \times 12^2 \times 9.8 = 526.7 \text{ Nm}$$

短路状态时母线所承受的最大弯矩及应力为：

$$\begin{aligned} M_d &= \sqrt{(M_{sd} + M_{sf})^2 + (M_{cz} + M_{cf})^2} \\ &= \sqrt{(7682.95 + 526.7)^2 + (1788.7 + 1470)^2} \\ &= 8832.7 \text{ Nm} \end{aligned}$$

$$\sigma_{\max} = 100 \frac{M_{\max}}{W} = 100 \frac{8832.7}{105.12} = 8402.5 \text{ N/cm}^2$$

此值小于材料短路时允许应力 12143N/cm²，故满足要求。

第 3 章 软导线选择

3.1 500kV 主变进线

3.1.1 按经济电流密度选择

主变压器进线回路工作电流：

$$I_g = \frac{1200 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 500} \times 1.4 = 1940 \text{ A}$$

按经济电流密度选择截面为：

$$S_j = I_g / j = 1940 / 1.1 = 1763.6 \text{ mm}^2$$

选择低一级的导线截面，选用 2×LGJQT-1400 钢芯铝绞线，其截面为：

$$S_e = 2 \times 1399.6 = 2799.2 \text{ mm}^2$$

单根导体载流量：1882*0.83=1562A（导体最高允许温度 80° C 时）

3.1.2 导体载流量校验

不同排列方式的分裂导线，由于各次导线相互靠近，使次导线内电流密度分布不均而产生邻近效应。邻近效应使导线内总的允许电流下降，故导线实际载流量应考虑导线排列方式、分裂根数、分裂间距等因素的影响。

导线实际载流量按下式计算：

$$Z = 4\pi\lambda \frac{s}{\rho + 1} = 4 \times 3.14 \times 3.7 \times 10^{-4} \times \frac{1399.6}{0.8 + 1} = 3.61$$

$$B = \left\{ 1 - \left[1 + \left(1 + \frac{1}{4} Z^2 \right)^{\frac{1}{4}} + \frac{10}{20 + Z^2} \right] \times \frac{Z^2 d_0}{(16 + Z^2) d} \right\}^{\frac{1}{2}} = 1.063$$

$$I = n I_{xu} \frac{1}{\sqrt{B}} = 2 \times 1562 \times \frac{1}{\sqrt{1.063}} = 3030 > 1940 \text{ A}$$

式中：

B ——邻近效应系数；

s ——次导线计算截面， mm^2 ；

d_0 ——次导线外径， cm ；（LGJQT-1400 钢芯铝绞线外径 5.1cm）

ρ ——绞合率，一般取 0.8；

n ——每相导线分裂根数；

λ ——次导线 1cm² 的电导，铝 $\lambda=3.7\times 10^{-4}$ ；

d ——分裂导线的分裂间距，cm；取 40cm

I_{xu} ——单根导线长期允许工作电流。

所以 $2\times(\text{LGJQT-1400})$ 钢芯铝绞线能够满足载流量的要求

3.1.3 电晕电压校验

按 DL/T 5222《导体和电器选择设计技术规定》的表 7.1.7 的规定，在 500kV 电压等级，可不进行电晕校验的最小导体型号为 $2\times\text{LGKK600}$ 。所以该导体可不进行电晕校验。

若进线电晕电压校验，导线的电晕临界电压应大于导体安装处的最高工作电压。

分裂导线的电晕临界电压可按下式计算：

$$U_0 = 84m_1m_2K\delta^{\frac{2}{3}}\frac{nr_0}{K_0}\left(1+\frac{0.301}{\sqrt{r_0\delta}}\right)\lg\frac{a_{ij}}{r_d}$$
$$= 84\times 0.9\times 0.85\times 0.96\times 1\times \frac{5.7}{1.12}\times 1.19\times 1.99 = 663kV$$

$$\delta = \frac{2.895p}{273+t}\times 10^{-3}$$

$$K_0 = 1 + \frac{r_0}{d}2(n-1)\sin\frac{\pi}{n}$$

U_0 ——电晕临界电压，kV；

K_0 ——次导线电场强度附加影响系数；对双分裂水平排列 $K_0 = 1 + \frac{2r_0}{d}$

d ——分裂间距，取 40cm；

m_1 ——导体表面粗糙系数，取 0.9；

m_2 ——天气好坏系数，晴天取 1.0，雨天取 0.85；

K ——三相导线水平排列时，中间导线电容比平均电容大的不均匀系数，取 0.96；

δ ——空气相对密度，取 1；

n ——分裂导线根数； $n=2$

r_0 ——导体的半径， $r_0=5.7/2=2.85\text{cm}$ ；

r_d ——分裂导体等效半径，对双分裂水平排列 $r_d = \sqrt{r_0d}$ ；

ajj—三相导线几何均距, $=1.26D=1.26 \times 8(\text{相间距})=10.08\text{m}=1008\text{cm}$;

跨线安装处的最高工作电压为 550kV, 因 $550\text{kV} < 663\text{kV}$, 故满足电晕电压校验要求。

3.1.4 热稳定校验

$$S = 2 \times 1399.6 = 2799.2\text{mm}^2$$

500kV 母线三相短路电流为 62.6kA, 动稳定电流为 159.6kA。

$$\frac{\sqrt{Q_d}}{C} = \frac{62.6\sqrt{0.4}}{83} \times 10^3 = 477.0\text{mm}^2$$

$$\therefore S_e > \frac{\sqrt{Q_d}}{C}$$

所以 $2 \times (\text{LGJQT-1400})$ 钢芯铝绞线能够满足热稳定校验的要求

3.2 500kV 出线

3.2.1 按经济电流密度选择

出线工作电流: (导线型号 LGJ-630 \times 4)

$$I_g = 1139 \times 4 \times 0.83 = 3781\text{A}$$

按经济电流密度选择截面为:

$$S_j = I_g / j = 3781 / 1.1 = 3437.3\text{mm}^2$$

选择低一级的导线截面, 选用 $2 \times \text{NAHLGJQ-1440}$ 耐热型钢芯铝绞线, 其截面为:

$$S_e = 2 \times 1399.6 = 2799.2\text{mm}^2$$

3.2.2 导体载流量校验

导线实际载流量按下式计算:

$$Z = 4\pi\lambda \frac{s}{\rho + 1} = 4 \times 3.14 \times 3.7 \times 10^{-4} \times \frac{1440}{0.8 + 1} = 3.72$$

$$B = \left\{ 1 - \left[1 + \left(1 + \frac{1}{4} Z^2 \right)^{\frac{1}{4}} + \frac{10}{20 + Z^2} \right] \times \frac{Z^2 d_0}{(16 + Z^2) d} \right\}^{\frac{1}{2}} = 1.065$$

$$I = n I_{xu} \frac{1}{\sqrt{B}} = 2 \times 1981 \times \frac{1}{\sqrt{1.065}} = 3840 > 3781\text{A}$$

式中:

B ——邻近效应系数;

s ——次导线计算截面, mm^2 ;

d_0 ——次导线外径, cm ; (NAHLGJQ-1440 钢芯铝绞线外径 5.1cm)

ρ ——绞合率, 一般取 0.8;

n ——每相导线分裂根数;

λ ——次导线 1cm^2 的电导, 铝 $\lambda=3.7\times 10^{-4}$;

d ——分裂导线的分裂间距, cm ; 取 40cm

I_{xu} ——单根导线长期允许工作电流。

所以 $2\times(\text{NAHLGJQ-1440})$ 钢芯铝绞线能够满足载流量的要求。

3.2.3 电晕电压校验

按《DL/T 5222-2005 导体和电器选择设计技术规定》的表 7.1.7 的规定, 在 500kV 电压等级, 可不进行电晕校验的最小导体型号为 $2\times\text{LGKK600}$ 。所以该导体可不进行电晕校验。

若进线电晕电压校验, 分裂导线的电晕临界电压可按下式计算:

$$\begin{aligned} U_0 &= 84m_1m_2K\delta^{\frac{2}{3}}\frac{nr_0}{K_0}\left(1+\frac{0.301}{\sqrt{r_0\delta}}\right)\lg\frac{a_{jj}}{r_d} \\ &= 84\times 0.9\times 0.85\times 0.96\times 1\times\frac{5.136}{1.255}\times 1.188\times 1.99 = 666.3\text{kV} \end{aligned}$$

$$\delta = \frac{2.895p}{273+t}\times 10^{-3}$$

$$K_0 = 1 + \frac{r_0}{d}2(n-1)\sin\frac{\pi}{n}$$

U_0 ——电晕临界电压, kV ;

K_0 ——次导线电场强度附加影响系数; 对双分裂水平排列 $K_0 = 1 + \frac{2r_0}{d}$

d ——分裂间距, 40cm;

m_1 ——天气好坏系数, 取 0.9;

m_2 ——导体表面粗糙系数, 按雨天取 0.85;

K ——三相导线水平排列时, 中间导线电容比平均电容大的不均匀系数, 取 0.96;

δ ——空气相对密度, 取 1;

n—分裂导线根数；n=2

r₀—导体的半径，r₀=5.136/2=2.568cm；

r_d—分裂导体等效半径，对双分裂水平排列， $r_d = \sqrt{r_0 d} = 10.1\text{cm}$ ；

a_{jj}—三相导线几何均距，DH_j=1.26D=1.26×8=10.08m=1008cm；

跨线安装处的最高工作电压为 550kV，因 550kV<666.3kV，故满足电晕电压校验要求。

3.2.4 热稳定校验

$$S_e = 2 \times 1440 = 2880\text{mm}^2$$

500kV 母线三相短路电流为 62.6kA，动稳定电流为 159.6kA。

$$\frac{\sqrt{Q_d}}{C} = \frac{62.6\sqrt{0.4}}{83} \times 10^3 = 477.0\text{mm}^2$$

$$\therefore S > \frac{\sqrt{Q_d}}{C}$$

所以 2×(NAHLGJQ-1440)钢芯铝绞线能够满足热稳定校验的要求。

3.3 220kV 主变进线

3.3.1 按经济电流密度选择

主变压器进线回路工作电流：

$$I_g = \frac{1200 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 220} \times 1.3 = 4094\text{A}$$

按经济电流密度选择：

$$S_j = I_g / j = 3721\text{mm}^2$$

选择低一级的导线截面，选用 2×NAHLGJQ-1440 钢芯铝绞线，其截面为：

$$S_e = 2 \times 1440 = 2880\text{mm}^2$$

单根导体载流量：2381*0.83=1981A

3.3.2 导体载流量校验

导线实际载流量按下式计算：

$$Z = 4\pi\lambda \frac{s}{\rho+1} = 4 \times 3.14 \times 3.7 \times 10^{-4} \times \frac{1440}{0.8+1} = 3.72$$

$$B = \left\{ 1 - \left[1 + \left(1 + \frac{1}{4} Z^2 \right)^{\frac{1}{4}} + \frac{10}{20 + Z^2} \right] \times \frac{Z^2 d_0}{(16 + Z^2) d} \right\}^{-\frac{1}{2}} = 1.064$$

式中：

B ——邻近效应系数；

s ——次导线计算截面，mm²；

d_0 ——次导线外径，cm；（NAHLGJQ-1440 钢芯铝绞线外径 5.136cm）

ρ ——绞合率，一般取 0.8；

n ——每相导线分裂根数；

λ ——次导线 1cm² 的电导，铝 $\lambda = 3.7 \times 10^{-4}$ ；

d ——分裂导线的分裂间距，cm；取 20cm

I_{xu} ——单根导线长期允许工作电流。

所以 2×(NAHLGJQ-1440)钢芯铝绞线能够满足载流量的要求。

3.3.3 电晕电压校验

按《DL/T 5222-2005 导体和电器选择设计技术规定》的表 7.1.7 的规定，在 220kV 电压等级，可不进行电晕校验的最小导体型号为 LGJ-300。所以该导体可不进行电晕校验。

若进线电晕电压校验，分裂导线的电晕临界电压可按下式计算：

$$U_0 = 84 m_1 m_2 K \delta^{\frac{2}{3}} \frac{n r_0}{K_0} \left(1 + \frac{0.301}{\sqrt{r_0 \delta}} \right) \lg \frac{a_{ij}}{r_d}$$

$$= 84 \times 0.9 \times 0.85 \times 0.96 \times 1 \times \frac{5.136}{1.255} \times 1.188 \times 1.70 = 509.8 kV$$

$$\delta = \frac{2.895 p}{273 + t} \times 10^{-3}$$

$$K_0 = 1 + \frac{r_0}{d} 2(n-1) \sin \frac{\pi}{n}$$

U_0 ——电晕临界电压，kV；

K_0 ——次导线电场强度附加影响系数；对双分裂水平排列 $K_0 = 1 + \frac{2r_0}{d}$

d ——分裂间距，20cm；

m1—天气好坏系数，取 0.9；

m2—导体表面粗糙系数，按雨天取 0.85；

K—三相导线水平排列时，中间导线电容比平均电容大的不均匀系数，取 0.96；

δ —空气相对密度，取 1；

n—分裂导线根数；n=2

r0—导体的半径， $r_0=5.136/2=2.55\text{cm}$ ；

rd—分裂导体等效半径，对双分裂水平排列， $r_d=\sqrt{r_0 d}=10.1\text{cm}$ ；

ajj—三相导线几何均距， $DH_j=1.26D=1.26\times 4=5.04\text{m}=504\text{cm}$ ；

跨线安装处的最高工作电压为 252kV，因 $252\text{kV}<509.8\text{kV}$ ，故满足电晕电压校验要求。

3.3.4 热稳定校验

$$S = 2 \times 1440 = 2880\text{mm}^2$$

220kV 母线三相短路电流为 48.1kA，动稳定电流为 122.5kA。

$$\frac{\sqrt{Q_d}}{C} = \frac{48.1\sqrt{0.4}}{83} \times 10^3 = 366.5\text{mm}^2$$

$$\therefore S > \frac{\sqrt{Q_d}}{C}$$

所以 $2 \times (\text{NAHLGJQ-1440})$ 钢芯铝绞线能够满足热稳定校验的要求。

3.4 66kV 主变进线

3.4.1 按经济电流密度选择

主变进线工作电流：

$$I_g = 2 \times 591 + 2 \times 650 + 9.2 = 2491.2\text{A}$$

按经济电流密度选择：

$$S_j = I_g / j = 2491.2 / 1.1 = 2264.7\text{mm}^2$$

选用 $2 \times (\text{LGJQT-1400})$ 钢芯铝绞线，其截面为：

$$S_e = 2 \times 1399.6 = 2799\text{mm}^2$$

单根导体载流量： $1882 \times 0.83 = 1562\text{A}$

3.4.2 导体载流量校验

$$Z = 4\pi\lambda \frac{s}{\rho+1} = 4 \times 3.14 \times 3.7 \times 10^{-4} \times \frac{1399.6}{0.8+1} = 3.6$$

$$B = \left\{ 1 - \left[1 + \left(1 + \frac{1}{4} Z^2 \right)^{-\frac{1}{4}} + \frac{10}{20 + Z^2} \right] \times \frac{Z^2 d_0}{(16 + Z^2) d} \right\}^{-\frac{1}{2}} = 1.139$$

$$I = n I_{xu} \frac{1}{\sqrt{B}} = 2 \times 1562 \times \frac{1}{\sqrt{1.139}} = 2927 > 2491.2 \text{ A}$$

所以 $2 \times (\text{LGJQT-1400})$ 钢芯铝绞线能够满足载流量的要求。

3.4.3 热稳定校验

$$S_e = 2 \times 1399.6 = 2799 \text{ mm}^2$$

66kV 母线三相短路电流为 21.9kA，动稳定电流为 55.9kA

$$\frac{\sqrt{Q_d}}{C} = \frac{21.9 \sqrt{0.65}}{83} \times 10^3 = 212.8 \text{ mm}^2$$

$$\therefore S_e > \frac{\sqrt{Q_d}}{C}$$

3.5 电容器及电抗器回路

3.5.1 按经济电流密度选择

电容器及电抗器回路最大工作电流为串入 5%电抗器的电容器组回路，工作电流为： $I_g = 650 \text{ A}$

$$S_j = I_g / j = 650 / 1.1 = 591 \text{ mm}^2$$

选用 $2 \times \text{LGJ-400}$ 钢芯铝绞线，其截面为：

$$S_e = 2 \times 425 = 950 \text{ mm}^2$$

单根导体载流量： $882 \text{ A} \times 0.83 = 732 \text{ A}$

3.5.2 导体载流量校验

$$Z = 4\pi\lambda \frac{s}{\rho+1} = 4 \times 3.14 \times 3.7 \times 10^{-4} \times \frac{400}{0.8+1} = 1.0327$$

$$B = \left\{ 1 - \left[1 + \left(1 + \frac{1}{4} Z^2 \right)^{-\frac{1}{4}} + \frac{10}{20 + Z^2} \right] \times \frac{Z^2 d_0}{(16 + Z^2) d} \right\}^{-\frac{1}{2}} = 1.0012$$

$$I = nI_{xu} \frac{1}{\sqrt{B}} = 2 \times 732 \times \frac{1}{\sqrt{1.0012}} = 1464 > 650 \text{A}$$

2×LGJ-300 钢芯铝绞线能够满足载流量的要求。

3.5.3 热稳定校验

$$S_e = 2 \times 425 = 950 \text{mm}^2$$

66kV 母线三相短路电流为 21.9kA，动稳定电流为 55.9kA

$$\frac{\sqrt{Q_d}}{C} = \frac{21.9\sqrt{0.65}}{83} \times 10^3 = 212.7 \text{mm}^2$$

$$\therefore S_e > \frac{\sqrt{Q_d}}{C}$$