

「发电机」

空冷发电机出口导体选择

文/中国葛洲坝集团电力有限责任公司 潘露 高鹏飞 王栋 高浩 杨植民 付端

300 MW级空冷发电机出口由于风道狭窄，出口导体选择及连接方式与常规300 MW级水氢冷发电机差别较大。基于工程实例，通过计算及校验，推荐300 MW级空冷发电机出口导体采用双槽形铜导体。

目前，300 MW级发电机主要有水氢冷和空冷两种冷却方式。发电机出线回路工作电流较大，通常发电机与主变压器之间采用离相封闭母线连接。由于结构原因，水氢冷发电机出线端子可直接与离相封闭母线连接，但空冷发电机受风道狭窄的影响，其出线需先经过一段导体引出风道后才能与离相封母相连。本文基于工程实例，推荐300 MW级空冷发电机出口导体采用双槽形铜导体，供设计同仁参考借鉴。

导体型式

导体除需满足工作电流、机械强度和电晕要求外，导体形状还应满足以下要求：

- 1) 趋肤效应系数尽可能低。
- 2) 机械强度高。
- 3) 散热良好。
- 4) 有利于提高电晕起始电压。
- 5) 安装、检修简单，连接方便。

常用的导体形式有矩形、槽形和管形。

1. 矩形导体

单片矩形导体具有趋肤效应小、散热条件好、安装简单、连接方便等优点，一般适用于工作电流不超过2 000 A的回路中。多片矩形导体趋肤效应系数比单片导体的大，附加损耗增大，载流量不是随着导体片数增加而成倍增加，一般适用于工作电流不超过4 000 A的回路中。

2. 槽形导体

槽形导体的电流分布比较均匀，与相同截

面积的矩形导体相比，其优点是散热条件好、机械强度高、安装也比较方便。尤其是在垂直方向开有通风孔的双槽形导体比不开孔的方管形导体的载流能力约大10%；比矩形导体载流能力约大35%。在回路持续工作电流为4 000~8 000 A时，宜选用双槽形导体。

3. 管形导体

管形导体是空心导体，趋肤效应系数小，且有利于提高电晕的起始电压，一般适用于工作电流大于8 000 A的回路中。与同载流量的双槽形导体相比，其截面尺寸略大。

工程实例

新疆某电厂建设两台330 MW亚临界机组，厂址海拔为1 000 m以下。发电机采用山东济南发电设备厂有限公司生产的QFa-330-2空冷机型，额定功率为330 MW，额定电压为22 kV，功率因数为0.85，额定电流为10 188.5 A。电厂以220 kV电压等级接入系统，220 kV母线短路水平为50 kA。发电机出线端子处风道尺寸狭小，仅为1 677 mm×3 200 mm，且需同时引出发电机主出线及中性点出线。经咨询发电机制造厂，风道处温度约为+35℃。发电机出口短路电流计算数据见表1。

发电机出口导体选择

根据，发电机出口导体的选择主要考虑以下

表1 发电机出口短路电流计算数据表

序号	名称	单位	符号	电流值
1	0 s短路电流周期分量有效值	kA	I''	72.835
2	0.03 s短路电流周期分量有效值	kA	$I_{0.03}$	60.443
3	0.06 s短路电流周期分量有效值	kA	$I_{0.06}$	59.940
4	冲击电流峰值	kA	I_{ch}	202.127

几个因素:

1. 按回路持续工作电流选择

$$I_{xu} \geq I_g \quad (1)$$

式中, I_g 为导体回路的持续工作电流(A)对于发电机回路为1.05倍发电机额定电流,即 $10\ 188.5 \times 1.05 = 10\ 698\text{ A}$; I_{xu} 为导体在某一运行温度、环境条件及安装方式下长期允许的载流量, A。

满足回路持续工作电流的导体见表2。

2. 按带电距离校验

由于发电机出线端子处风道尺寸狭窄,且需同时引出发电机主出线及中性点出线六组导体,因此在选择导体时需考虑其尺寸并校验带电距离。对于本案例,带电距离按300 mm校验,圆管形铝导体 $\phi 280/250\text{ mm}$ 不能满足尺寸要求,双槽形铜导体 $[225 \times 105 \times 12.5\text{ mm}]$ 可以满足要求。

3. 按短路热稳定校验

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

$$Q_d = Q_z + Q_f \quad (3)$$

$$Q_z = (I''^2 + 10I_{z/2}^2 I_{zi}^2) \times t / 12 \quad (4)$$

$$Q_f = TI''^2 \quad (5)$$

式中, S 为导体的载流截面(mm^2); Q_d 为短路电流的热效应($\text{A}^2 \cdot \text{s}$),包括短路电流周期分量引起的热效应 Q_z 及短路电流非周期分量引起的热效应 Q_f ; C 为与导体材料及发热温度有关的系数。短路前温度为 $+70\text{ }^\circ\text{C}$ 时,对于铜导体, C 值取171; I'' 为0 s短路电流周期分量有效值(kA); t 为短路持续时间,采用主保护动作时间加相应断路器开断时间,取0.06 s; $I_{z/2}$ 为短路电流在 $t/2\text{ s}$ (即0.03 s)时的周期分量有效值(kA); I_{zi} 为短路电流在 t 秒(即0.06 s)时的周期分量有效值(kA); T 为等效时间(s),取值为0.15 s。

短路热稳定校验计算结果见表3。

4. 按短路动稳定校验

$$\sigma_{xu} > \sigma \quad (6)$$

$$\sigma = \sigma_{x-x} + \sigma_x \quad (7)$$

$$\sigma_{x-x} = 17.248 \times 10^{-3} \frac{l^2}{aW} i_{ch}^2 \beta \quad (8)$$

$$\sigma_x = 5 \times 10^{-2} \frac{l_c^3}{12hW_y} i_{ch}^2 \quad (9)$$

式中, σ 为短路时导体产生的总机械应力(N/cm^2); σ_{x-x} 为短路时导体相间产生的最大机械应力(N/cm^2); σ_x 为短路时同相导体片间相互作用的机械应力(N/cm^2); σ_{xu} 为导体材料的允许应力(N/cm^2)。对于铜导体,取值为 $13\ 720\text{ N}/\text{cm}^2$; l 为绝缘子间跨距(cm),本案例取值为60 cm; l_c 为导体垫片中心线间距离(cm),本案例取

表2 满足回路持续工作电流的导体选择表

序号	名称	单位	基准环境温度 ($+25\text{ }^\circ\text{C}$)载流量	综合校正 系数	实际载流量	备注
1	双槽形铜导体 $[225 \times 105 \times 12.5\text{ mm}]$	A	12 395.2	0.88	10 907.8	$>10\ 698\text{ A}$, 满足要求
2	圆管形铝导体 $\phi 280/250\text{ mm}$	A	13 120	0.88	11 545.6	$>106\ 98\text{ A}$, 满足要求

注:1、规程规范中只有双槽形铝导体的载流量,经咨询相关制造厂家及结合其他形式铜铝导体载流量的对比,同规格的双槽形铜导体载流量可按铝导体载流量的1.27倍考虑。

表3 短路热稳定校验计算表

序号	名称	单位	符号	计算值	备注
1	短路持续时间	s	t	0.06	
2	等效时间	s	T	0.15	
3	与导体材料及发热温度有关的系数		C	171	
4	短路电流周期分量的热效应	$\text{A}^2 \cdot \text{s}$	Q_z	200.63×10^6	
5	短路电流非周期分量的热效应	$\text{A}^2 \cdot \text{s}$	Q_f	795.74×10^6	
6	短路电流的热效应	$\text{A}^2 \cdot \text{s}$	Q_d	996.37×10^6	
7	热稳定截面	mm^2		184.6	
8	双槽形铜导体 $[225 \times 105 \times 12.5\text{ mm}]$ 的载流截面	mm^2	S	9 760	>184.6 , 满足要求

值为30 cm； a 为相间距离（cm），本案例取值为80 cm； β 为振动系数，工程一般取值为0.58； h 为槽形导体高度（cm），对于双槽形铜导体[]225×105×12.5 mm取值为22.5 cm； W_y

为导体截面系数（cm³），对于双槽形铜导体[]225×105×12.5 mm取值为66.5 cm³； W 为导体截面系数（cm³）， $W=2W_y$ 。
短路动稳定校验计算结果见表4。

表4 短路动稳定校验计算表

序号	名称	单位	符号	计算值	备注
1	绝缘子间跨距	cm	l	60	
2	导体垫片中心线间距离	cm	l_c	30	
3	相间距离	cm	a	80	
4	振动系数		β	0.58	
5	槽形导体高度	cm	h	22.5	
6	导体截面系数	cm ³	W_y	66.5	
7	导体截面系数	cm ³	W	133	
8	短路时导体相间产生的最大机械应力	N/cm ²	σ_{x-x}	138.29	
9	短路时同相导体片间相互作用的机械应力	N/cm ²	σ_x	3 071.83	
10	短路时导体产生的总机械应力	N/cm ²	σ	3 210.11	$<\sigma_{xu}$ ，满足要求
11	铜导体材料的允许应力	N/cm ²	σ_{xu}	13 720	

根据上述计算及校验，同时结合，对持续工作电流较大且位置特别狭窄的发电机出线端部导体宜

选铜导体。本案例发电机出口导体可选择双槽形铜导体[]225×105×12.5 mm。最终布置详见图1。

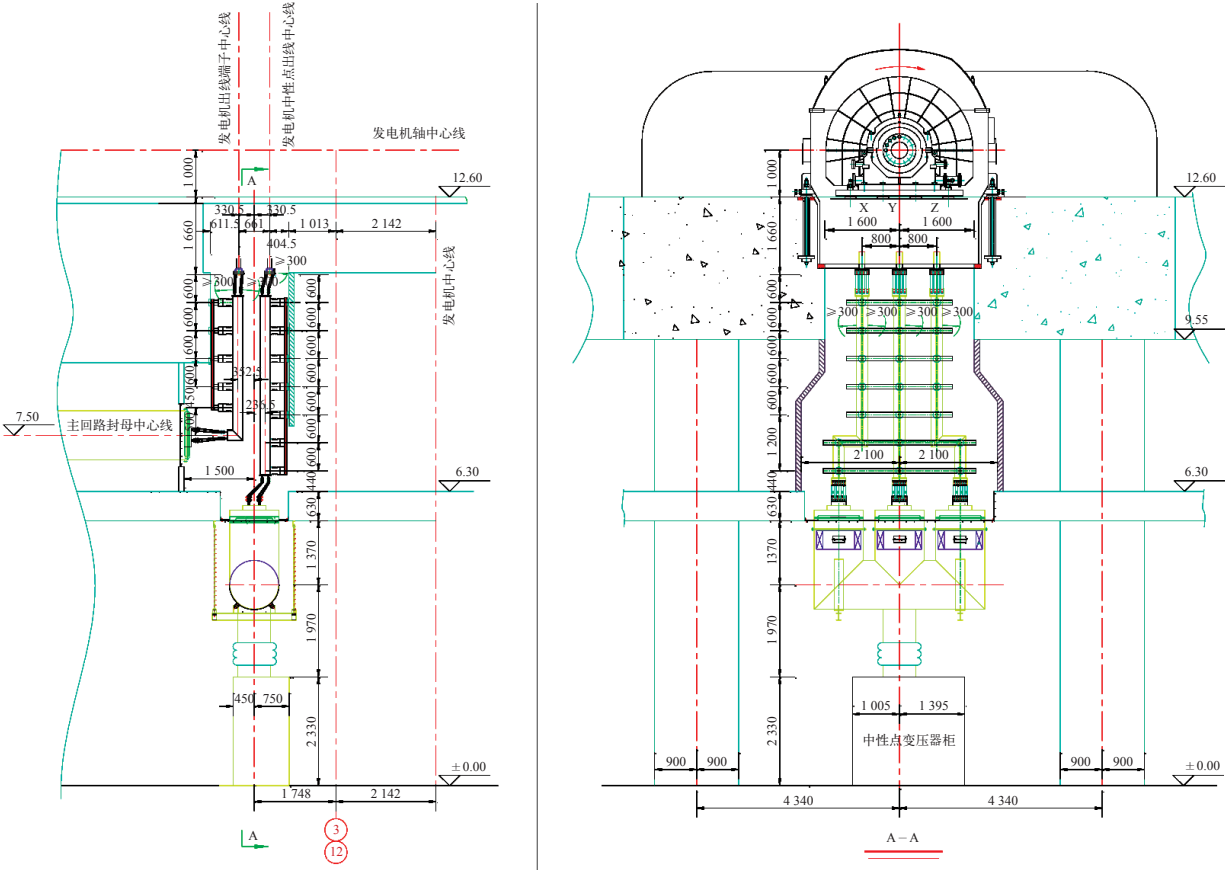


图1 发电机出口导体布置图

展望

1. 绝缘管形导体

绝缘管形导体是一种新型导体形式，其实是利用铜或铝管母作为导体，外敷绝缘的一种母线产品。绝缘管形导体由于其机械强度高、外形尺寸小、电气绝缘性能强的优点，近十年来，绝缘管形母线在变电站、发电厂和大型光伏发电工

程等领域内得到了越来越多的应用。

2. 技术比较

槽形导体与绝缘管形导体的技术比较详见表5。

3. 经济比较

经过咨询相关制造厂家，表6列出了满足本案例要求的槽形导体与绝缘管形导体的经济比较。

表5 槽形导体与绝缘管形导体技术比较表

序号	项目	槽形导体	绝缘管形导体
1	趋肤效应系数	电流分布比较均匀，趋肤效应系数较小	采用管形空芯结构，趋肤效应系数更小
2	机械强度	高	高
3	散热条件	暴露在空气中，散热好	导体外敷绝缘护层，散热较裸导体稍差
4	安装检修	导体用绝缘子支撑，母线的绝缘子、固定金具、连接头等配套附件多，安装及检修较复杂	导体对地绝缘，母线附件及中间环节少，弯曲半径小，安装简单，维护及检修工作量小
5	运行可靠性	依靠空气绝缘，发生短路故障及触电的概率比绝缘管形导体高	导体外敷绝缘层，具有很好的绝缘性能，不需要考虑安全距离，可靠性高

表6 槽形导体与绝缘管形导体经济比较表

序号	项目	双槽形铜导体[225 × 105 × 12.5 mm]	绝缘管形铜导体2 × Φ200
1	长度/m	60	60
2	单价/(万元/m)	0.63	0.88
3	总价/万元	37.8	52.8

从上述技术经济比较可知，绝缘管形导体在技术上除了散热稍差之外，在趋肤效应、安装检修及运行可靠性方面均优于槽形导体；在经济性方面，投资比槽形导体略高。但根据，绝缘管形导体在实际工程中，主要应用于电压在35 kV及以下、电流在6 300 A及以下回路中，国内尚没有12 500 A的供货业绩。

相信各绝缘管形导体制造企业在加大科技投入，加强行业合作的基础上，随着制造产品载流量的增大，以后绝缘管形导体也能应用于300 MW级空冷发电机组出口回路中。

结束语

以往300 MW级空冷发电机组工程，在引出线设计时，要求发电机厂家对风道内的导体进行设计和供货，但发现有发电机厂家选择的导体并不能满足要求，给电厂安全运行带来隐患。本文对满足300 MW级空冷发电机组出口要求的双槽形铜导体进行了详细的计算和校验，供设计同仁参考借鉴，其计算原理等同样也适用于近期兴起的300 Mvar空冷调相机工程。另外，随着绝缘管形导体的技术发展，今后势必也会在300 MW级空冷发电机组中得到运用。EA

(收稿日期：2017.08.30)

(编辑：白文亭)