

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.07.015

大容量离相封闭母线轴向焊接与电动力分析

严兆君¹, 吴 军²

(中国电能成套设备有限公司, 北京 100080)

摘要: 随着发电机组容量越来越大,短路故障中离相封闭母线所受电动力也变得更大。在离相封闭母线的相关国家和行业标准中,对母线轴向焊缝焊接要求不明确。文中结合国内某1 250 MWe级核电项目离相封闭母线技术参数,对母线进行了短路故障下的受力分析,同时提出了大容量离相封闭母线轴向焊缝焊接要求建议。

关键词: 离相封闭母线; 轴向焊缝; 短路电动力; 正应力

Analyses on Axial Welding and Electromagnetic Force of Large Capacity Enclosure Type Isolated-phase Bus

YAN Zhaojun¹, WU Jun²

(China Power Complete Equipment Co., Ltd., Beijing 100080, China)

Abstract: The larger the capacity of a generating unit is, the greater the electromagnetic force on the enclosure type isolated-phase bus becomes in short circuit fault condition. In the related national and industrial standards with enclosure type isolated-phase bus, the requirements for axial welding are unclear. In this paper, a force analysis of the enclosure type isolated-phase bus in short circuit condition is conducted for a 1250 MWe nuclear power project, and some suggestions are provide for axial welding requirements of large capacity enclosure type isolated-phase bus.

Key words: enclosure type isolated-phase bus; axial weld; short circuit electromagnetic force; normal stress

0 引言

在大容量发电厂内,发电机组与升压变压器之间通过离相封闭母线相连。作为发电机组向外输送电能的唯一通道,其故障将影响机组可利用率,甚至导致发电机组停机。随着发电机组容量越来越大,短路故障中离相封闭母线所受电动力也越来越大。如何保证离相封闭母线能够承受短路故障下的破坏力,成为设计和制造中必须解决的问题。

目前,国内主要的离相封闭母线制造厂大约有 5 家。所生产的母线外壳和内部导体均采用 1060 铝板,在卷板机加工后,通过氩弧焊工艺焊接而成。除与其它设备连接处外,母线之间的连接都通过焊缝相连,见图 1。

从电气角度分析,母线上电流方向为轴向方向,其环缝需保证导电能力不小于被焊导体的导电

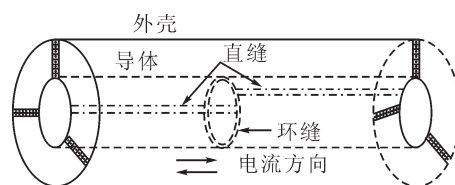


图 1 母线焊缝示意图

Fig. 1 Bus welding seam diagram

能力。轴向直焊缝起到保持母线形状及刚性的作用,在设备运行中基本不起导电作用。

1 国内主要离相封闭母线产品的轴向焊缝形式

在国内离相母线厂家制造工艺中,图 1 中母线外壳的轴向、环焊缝和导体的环焊缝普遍采用的是单面满焊,而导体轴向焊缝采用的焊接形式不尽相同。按照圆形和开缝八边形两种内部导体结构形式,轴向焊缝的形式主要有 3 种,见图 2。

在采用形式 1 焊接时,由于母线材料为圆形,

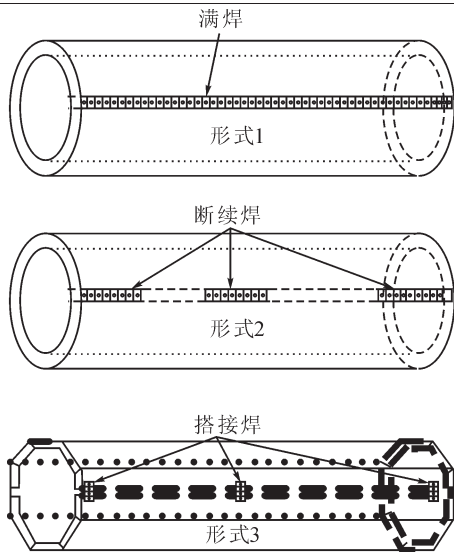


图 2 导体轴向焊缝形式

Fig. 2 Conductor axial welding form

制造工艺中不能设置焊接垫板,未焊透深度往往超过被焊材料的 5%,特别是在相对板材更厚的内部导体焊接时。

2 相关国标和行业标准对轴向焊缝焊接质量的要求

在离相封闭母线生产过程中,制造厂对铝母线焊接及焊接质量检验主要执行的标准是国家标准 GB/T 8349—2000《金属封闭母线》^[1]和机械行业标准 JB/T 9639—1999《封闭母线》^[2]。

两份标准中关于铝母线焊接的环焊缝和轴向焊缝要求内容见表 1。

从表 1 可看出,机械行业标准对轴向焊缝的焊接质量未作要求,而国家标准中对轴向焊缝和环缝

表 1 环焊缝和轴向焊缝焊接要求对比表

Table 1 Welding requirement comparison of axial and circular welding seam

标准名称	焊缝要求	
	环焊缝	轴向焊缝
GB/T 8349—2000	导体和外壳焊缝截面积不应小于被焊金属截面的 1.25 倍,未焊透长度不得超过焊缝长度的 10%,深度不超过被焊金属厚度的 5%。	未对直焊缝和环焊缝焊接质量要求予以清晰区分和明确。
	焊缝(环焊缝)纵截面积不应小于被焊导体总面积的 1.25 倍,未焊透的长度不得超过焊缝长度的 10%,深度不得超过被焊金属的 5%。	无相关要求。
JB/T 9639—1999		

焊接质量要求未清晰区分。在离相母线制造中,厂家往往注重起导电作用的环缝焊接质量,而忽略了轴向焊缝质量和强度。

3 短路故障下母线受力分析

为了验证母线轴向焊缝能否在设备运行中起到保持形状及刚性的作用,需首先对母线的导体和外壳受力情况进行分析。

离相封闭母线在运行中,除受到自身重力外还受三相相间的电动力作用,特别是在短路情况下的电动力。下面以国内某 1 250 MWe 级核电站使用的大容量离相封闭母线产品结构及技术参数为例进行三相短路情况下的受力分析,其产品主要技术参数见表 2。分析中选用两绝缘子之间一段主回路母线导体,轴向焊缝采用图 2 中的焊接形式 1。

表 2 结构及技术参数表

Table 2 Structure and technical parameter

名 称	产品结构/参数	名 称	产品结构/参数
型式	强迫风冷全连式离相封闭母线	母线分支回路外径/厚度/mm	200/10
额定电压/kV	24	主回路外壳外径/厚度/mm	1515/11
额定电流/A	主回路 36 000;三角回路 22 000;分支回路 2 500。	三角连接回路外壳外径/厚度/mm	1 430/7
额定短时工频耐受电压/kV	80	分支回路外壳外径/厚度/mm	905/4
动稳定电流/kA	主回路及三角回路 ≥ 602 ;分支 ≥ 946 。	主回路导体单相重量/(kg $\cdot$ m ⁻¹)	90
3s 热稳定电流/kA	主回路及三角回路 ≥ 193 ;分支 ≥ 323 。	三角回路导体单相重量/(kg $\cdot$ m ⁻¹)	65
短路电流直流分量时间常数/s	0.2	分支回路导体单相重量/(kg $\cdot$ m ⁻¹)	27
母线导体、外壳材料成份	1060 铝	相间最小距离/mm	1 575
母线主回路外径/厚度/mm	800/20	导体支撑点跨距(主回路)/m	9
母线三角连接回路外径/厚度/mm	725/14	分支回路导体支撑点跨距/m	5.5

由于外壳的电磁屏蔽作用,离相封闭母线三相短路电流的形式非常复杂,但是大体来说,主要由工

频的交流分量和直流的衰减分量组成。根据文[3-4]中分别对离相封闭母线导体和外壳在三相短路情

况下的受力研究,导体所受短路电动力为

$$f=2.04 \times 10^{-8} \cdot \frac{I_m^2}{S} \cdot K_a \cdot (1+e^{-uT_a}) \quad (1)$$

式(1)中: f 为导体每相米所受电动力; T_a 为短路电流直流分量衰减时间常数; I_m 为短路电流交流分量初始值; S 为相间距; K_a 为全连式封闭母线壳内直流屏蔽系数,该项目中可取0.64。

$t=0.01$ s时,导体所受电动力最大。将表1中的参数代入式(1),可得:

$$f=2.04 \times 10^{-8} \times \frac{(\sqrt{2} \times 193\,000)^2}{1.575} \times 0.64 \times (1+e^{-0.01/0.2})$$

$$\approx 1.2 \times 10^3 \text{ N/m}。$$

导体重力为

$$G=m \cdot g \approx 900 \text{ N/m}。$$

两者形成载荷的合力为

$$F=\sqrt{f^2+G^2}=\sqrt{1\,200^2+900^2}$$

$$=1\,500 \text{ N/m}。$$

载荷方向与垂直方向间角 θ 为

$$\arctan \frac{f}{G} = \frac{1\,200}{900} \approx 53.1^\circ$$

母线导体受力示意图见图3。

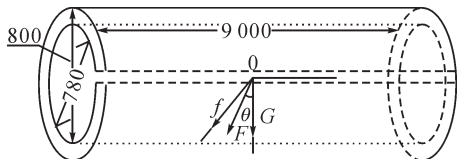


图3 母线导体受力示意图

Fig. 3 Bus conductor stress diagram

根据材料力学中均匀分布载荷梁的应力分析^[5],两支撑绝缘子之间的母线主回路导体正应力 σ 为

$$\sigma = \frac{M}{W} \quad (2)$$

式(2)中: W 为抗弯截面模量; M 为受力横截面上的弯矩。

圆筒结构母线的抗弯截面模量为

$$W = \frac{\pi}{32} \left(\frac{D^4 - d^4}{D} \right) \quad (3)$$

式(3)中: D 为圆母线外径; d 为圆母线内径。

将表1中参数代入式(3),得到:

$$W = \frac{\pi}{32} \left(\frac{800^4 - 780^4}{800} \right)$$

$$\approx 4.8 \times 10^6 \text{ mm}^3。$$

由于最大正应力发生在弯矩最大的横截面上,离中性轴最远处,即图3中导体表面的a处。a处受力横截面上的弯矩 M_a 为:

$$M_a = -\frac{1}{2} \times F \times \frac{L^2}{2} + \frac{1}{2} \times F \times \left(\frac{L}{2} \right)^2$$

$$= -\frac{1}{2} \times 1.5 \times \frac{9\,000^2}{2} + \frac{1}{2} \times 1.5 \times \left(\frac{9\,000}{2} \right)^2$$

$$= 3.0 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{mm}。$$

将 W 、 M_a 代入式(2),可得到最大正应力:

$$\sigma = \frac{3.0 \times 10^7}{4.8 \times 10^6}$$

$$= 6.3 \text{ N/mm}^2。$$

根据文[5]中的分析,截面上其他表面位置的正应力从a处开始沿载荷方向的中性轴高度线性分布,与载荷方向垂直的中性轴面处最小。

查铝合金的材料表^[6],1060铝材的屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 为35 MPa,再除以一个1.15~1.5的安全系数,就为母线导体的弯曲许用应力。与上述计算分析结果对比,母线导体的弯曲许用应力为导体上所受最大正应力的4倍左右。所受最大正应力点a在两绝缘子支撑之间导体的中点并与载荷方向垂直的表面。根据上述方法,同样可得到母线外壳的受力情况。

满焊工艺可以保证焊缝的强度与母材的强度保持一致。但是如果某段焊接深度不够,导致强度达不到母材的四分之一左右,特别是开缝八边形导体结构中此段未焊接的开缝,处在最大正应力的a点,则母线导体将容易发生弯曲。

4 结语

随着发电机组容量越来越大,在短路故障下产生的电流也越来越大。由于目前国内试验站不具备大于200 kA短路电流的动稳定试验能力,短路电流产生的电动力对离相封闭母线的影 响,只能通过计算或仿真来分析。为了保证母线在严重短路故障下的动稳定能力,在大电流离相封闭母线设计时需高度重视导体和外壳的受力分析和轴向焊缝设计,甚至在核电厂要求的VII抗震设防条件下的受力分析。

通过上文的分析,大电流离相封闭母线导体和外壳在两跨距支撑点的正中间、与载荷方向垂直的表面所受正应力最大。鉴于目前国内母线制造中所采取的轴向焊缝形式和焊接质量要求,制造厂必须保证此处的焊缝强度大于此处所受正应力,避免在两跨距支撑点的正中间段出现未焊接的轴向缝,并在设计中注意调整轴向缝与载荷受力的方向。在工艺允许的情况下,轴向焊缝应尽量采用满焊形式。

参考文献:

- [1] GB/T 8349—2000 金属封闭母线[S]. 北京:中国标准出 (下转第86页)

- 选择研究[J]. 高压电器, 2009, 45(3): 8-10.
- YANG Fenyang, XU Zheng. Selection of smoothing reactance for HVDC projects[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(3): 8-10.
- [16] 周晓琴, 苟锐锋, 吕金壮, 等. ± 800 kV 特高压直流换流站最高端换流变阀侧避雷器保护研究[J]. 高压电器, 2009, 45(2): 1-3.
- ZHOU Xiaoqin, GOU Ruifeng, LYU Jinzhuang, et al. Arrester protection at valve-side of highest potential converter transformer in ± 800 kV UHVDC project[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(2): 1-3.
- [17] 张万荣, 任军辉, 王蔚华. ± 800 kV 特高压直流输电工程直流滤波器设计研究[J]. 高压电器, 2007, 43(6): 431-433.
- ZHANG Wanrong, REN Junhui, WANG Weihua. Design and study on filter in ± 800 kV ultra high voltage direct current transmission project[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(6): 431-433.
- [18] 周浩, 陈锡磊, 陈润辉, 等. ± 800 kV 特高压直流换流站绝缘配合方案分析[J]. 电网技术, 2011, 35(11): 18-24.
- ZHOU Hao, CHEN Xilei, CHEN Runhui, et al. Analysis on insulation coordination scheme for ± 800 kV UHVDC converter station[J]. Power System Technology, 2011, 35(11): 18-24.
- [19] GB/T 311.3—2007 高压直流换流站绝缘配合程序[S]. 2007.
- [20] 刘振亚. 特高压直流输电系统过电压与绝缘配合[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- LIU Zhenya. Overvoltage and insulation coordination for UHVDC system[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2009.
- [21] 韩昆仑, 蔡泽祥, 贺智, 等. 高压直流输电线路故障行波传播特性及其对行波保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 20-25.
- HAN Kunlun, CAI Zexiang, HE Zhi, et al. Propagation characteristic of fault traveling wave on HVDC line and its influence on HVDC line traveling wave protection[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 20-25.
- 黄永瑞(1982—), 男, 硕士, 工程师, 从事高压直流输电技术研究工作。

(上接第 80 页)

- 版社, 2000.
- GB/T 8349—2000 Metal enclosed bus[S]. Beijing: China Standard Press, 2000.
- [2] JB/T 9639—1999 封闭母线[S]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- JB/T 9639—1999 Enclosed bus[S]. Beijing: Press of Machinery Industry, 1999.
- [3] 发电教研室大电流母线科研小组. 全连外壳式分相封闭母线在短路时外壳和母线导体所受电动力的分析和计算[J]. 西安交通大学学报, 1974, 6(3): 35-58.
- Research Group of Large Curge Current Busbar in Power Generation and Research Office Analgsis and caclulation of the wholc shell type isolated phase bus shell in short circuit and bus conduc tor by electric pouer[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1974, 6(3): 35-58.
- [4] 吴励坚. 离相封闭母线短路时的外壳电动力的分析和计算[J]. 西安交通大学学报, 1984, 18(1): 101-110.
- WU Lijian. Analysis and calculation of isolated phase bus shell electric power circuit [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1984, 18(1): 101-110.
- [5] 刘庆潭. 材料力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [6] GB/T 3190—2008 变形铝及铝合金化学成分[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2008.
- GB/T 3190—2008 Wrought aluminium and its chemical constituents[S]. Beijing: General Administration of the State Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2008.
- 严兆君(1963—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为核电厂电气设计、采购管理等。
- 吴军(1981—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向核电厂电气设计、采购管理等。