

〔开关设备〕

252 kV GIS 用转角母线模块的研发

文/特变电工中发上海高压开关有限公司 汤 伟 常 越 魏俊梅

在 GIS 中，转角母线是实现导通电流和改变通流方向的重要元件，设计出结构合理、性能可靠、成本低廉和运行故障率低的转角母线模块，对 GIS 设备安全可靠运行至关重要。对转角母线模块中 L 型铸造壳体、通流导体等核心部件的设计特点及仿真核算进行探讨和分析，对类似母线结构研发设计有一定借鉴作用。

气体绝缘金属封闭开关设备（GIS）是保证电力系统安全运行的重要设备，主要由断路器、电压互感器、电流互感器、接地开关、母线和套管等模块组成，以性能优异、运行可靠和维护便捷等优势广泛应用到电力系统中。

在 GIS 中，母线是主要的导电回路，用量较大。其中，转角母线是实现导通电流和改变通流方向的重要元件，设计出结构合理、性能可靠、运行故障率低、零部件种类少、生产制造成本低、采购管理成本低、物料管理成本低、生产效率及安装使用便捷的转角母线模块，是研发过程中的重点也是难点。进行探讨和分析，对类似母线结构研发设计提供一定借鉴作用。252 kV 典型 GIS 设备如图 1 所示。

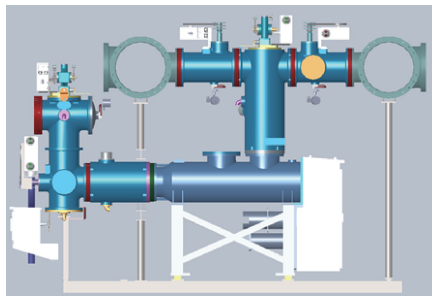


图 1 252 kV 典型 GIS 设备

252 kV GIS 用转角母线模块

252 kV GIS 用转角母线模块的整体外形结构如图 2 所示，由绝缘子、通流导体、触头座及 L 型铸造壳体等主要部件组成。

下面对转角母线模块中外部 L 型铸造壳体、内部通流导体等核心部件的设计特点及仿真核算进行介绍和分析。

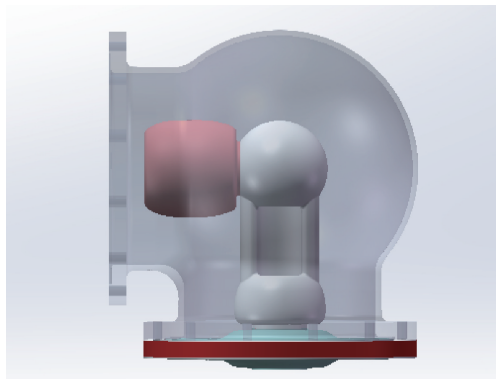


图 2 252 kV GIS 用转角母线模块

L 型铸造壳体的设计特点及仿真核算

252 kV GIS 转角母线模块用外部 L 型铸造壳体是由空心球体、水平连接法兰出口和竖直连接法兰

出口组成。根据国内外大量的 L 型铸造壳体爆破试验和应力测试结果分析, L 型铸造壳体的应力分布极不均匀, 最大应力出现在水平出口和竖直出口相交处的相贯区域 (如图 3 所示圈示区域)。

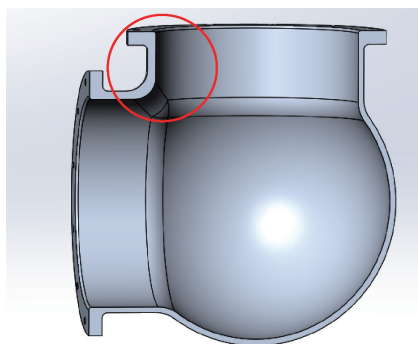


图 3 L 型铸铝壳体结构示意图

1. 设计特点

在水压爆破试验过程中, 相贯区域在 L 型铸造壳体两个出口处的盲板力和 5 倍设计压力 (0.65 MPa) 3.25 MPa 的内部压力共同作用下, 同时该相贯区域在结构上存在不连续性而产生了附加结构应力等不利因素的影响下, 使相贯区域的应力值很大, 从而成为 L 型铸造壳体设计的核心难点。

对于如何降低相贯区域的最大应力值, 提高水压爆破值的问题, 有针对性采取以下措施优化设计结构。

1) 水平和竖直出口的筒壁 (如图 4 所示) 是由一个筒体内壁半径为 R_i 的整圆和一个筒体外壁一侧为 R_o 的偏心圆, 而另一侧为 R_b 的不偏心圆组成的变厚度结构。其优点为在应力最高的相贯区域处加厚了壳体厚度, 在其他应力不高的地方减少了壳体的厚度, 即不增加壳体整体厚度就可达到降低相贯区域的最大应力值。

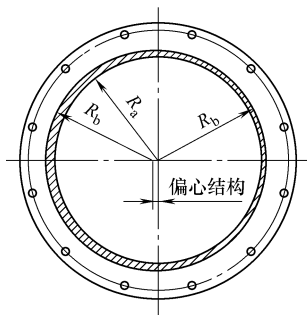


图 4 筒壁结构示意图

2) 相贯区域处用大 R 角均匀、圆滑过渡, 且宜采用外壁 R 角略大于内壁 R 角的设计结构。优点: ①壳体外部采用大 R 角结构可显著降低该处的结构应力值。②壳体外部 R 角略大于内部 R 角可增加相贯区域处壳体厚度, 从而进一步降低该处的应力值。

2. 机械性能的仿真核算

L 型铸造壳体的机械性能是 GIS 设备安全运行和运维人员生命安全的重要保证。

结合 L 型铸造壳体水压爆破型式试验, 应用有限元数值分析计算软件 ANSYS, 对优化设计后 L 型铸造壳体在其内侧承受 1 MPa 压力时的机械强度性能进行了数值仿真。

内表面应力等效云图分布如图 5 所示, 外表面应力等效云图分布如图 6 所示。

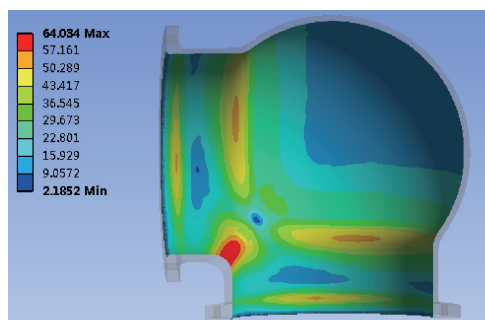


图 5 L 型铸造壳体内表面应力等效云图分布

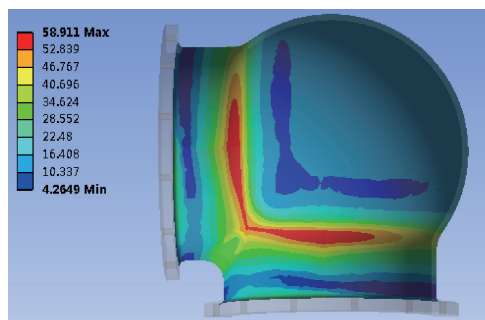


图 6 L 型铸造壳体外表面应力等效云图分布

由图 5、图 6 可知, 当 L 型铸造壳内侧承受 1 MPa 压力时, 应力最大值出现在相贯区域, 其值为 64.03 MPa。在恰当的配比及铸造工艺保证下, 铸造铝合金的破坏应力可以达到 275 MPa。因此, 通过仿真分析, 估算 L 型铸造壳体水压耐受强度可高达 4.29 MPa。

对 L 型铸造壳体进行水压爆破型式试验, 其水压爆破压力值高达 4.1 MPa, 与仿真核算结果相近。

内部通流导体的设计特点和仿真核算

252 kV GIS 转角母线模块用内部通流导体是由碗状屏蔽结构、带有开长方形孔的空心圆柱状支撑结构和球状的过渡结构组成。

1. 设计特点

通过触头座和通流导体两个零部件即可实现转角母线改变通流方向的功能, 将常规结构中需由支撑导体、屏蔽罩和过渡导体才能完成的功能, 优化成单一通流导体。通流结构和屏蔽结构合二为一, 其结构设计巧妙合理, 导电性能好, 屏蔽结构优, 易于批量化生产。且质量可靠、结构简单、安装十分方便, 生产制造成本低。

但也存在如下问题: 为方便安装将通流导体固定在绝缘子上螺栓, 需在通流导体侧面开一长方形孔。长方形孔的存在破坏了通流导体的同轴稍不均匀电场分布的结构, 尤其在长方形孔的边缘圆角处, 其电位线分布发生结构性的突变, 造成该处的场强值很高, 降低了转角母线模块整体的绝缘性能和裕度。

对于如何降低长方形孔边缘圆角处的最大场强值, 提高转角母线模块整体绝缘性能的问题, 有针对性采取以下措施优化设计结构:

1) 碗状屏蔽结构的外轮廓由 4~8 段圆弧相切圆滑过渡, 最大圆弧半径在 50~80 mm 之间, 起到均化电场的作用。

2) 球状的过渡结构, 两侧各加工有一个和触头座连接的电接触面。在电接触面上固定触头座后, 即可实现改变通流方向和联通不同 GIS 功能模块的功能, 球状结构本身可起到均化电场的作用。

3) 带有开长方形孔的空心圆柱状支撑结构, 长方形孔宽 50 mm, 高 70 mm, 四角倒有 R15mm 圆角, 长方形孔的外侧边缘倒有 R8~R12 mm 的多 R 圆角, 多 R 圆角可显著降低长方形孔的边缘圆角处的场强值。

2. 绝缘性能的仿真核算

通流导体屏蔽结构的优良设计对 252 kV GIS 用

转角母线模块的整体绝缘性能的提高至关重要。

本文利用有限元分析计算软件 ANSYS 对 252 kV GIS 用转角母线模块在雷电冲击耐受电压 1 050 kV 载荷作用时的绝缘性能进行了数值仿真。

其转角母线模块中优化后通流导体的电场强度等效云图分布如图 7 所示。

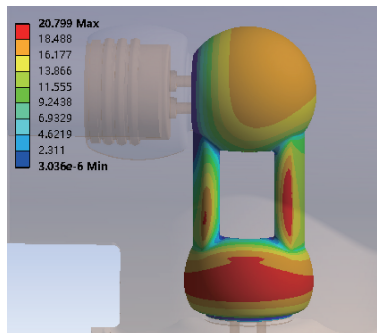


图 7 优化后通流导体的电场强度等效云图分布

通过仿真验算, 252 kV GIS 用转角母线模块在雷电冲击耐受电压 1 050 kV 载荷作用时, 其场强最大值出现通流导体开孔边缘多 R 圆角处, 其场强值为 20.799 kV/mm。

252 kV GIS 用转角母线模块额定 SF₆ 充气压力为 0.48 MPa, 最低功能充气压力为 0.40 MPa。根据黎斌著《SF₆ 高压电器设计》中相关规定, 在雷电冲击耐受电压作用下, 最低功能充气压力为 0.40 MPa 时许用场强应不大于 24 kV/mm。

因此, 优化后的 252 kV GIS 用转角母线绝缘性能不仅能满足判据要求, 而且具有更大安全裕度。

252 kV GIS 用转角母线模块在国家高压电器质量监督检验中心 (西安) 通过工频耐受电压、雷电冲击耐受电压等整套绝缘型式试验。绝缘型式试验样机如图 8 所示。

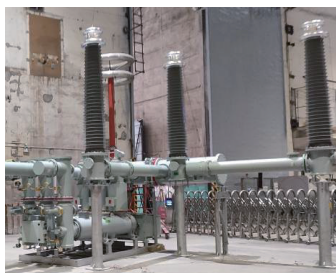


图 8 绝缘型式试验样机

(下转第 78 页)

$$n_{op} = \frac{d_{op} \times h_{op} \times 3\,600}{t_{cycle}} \quad (1)$$

按每年工作天数 $d_{op} = 340$ 天，每天工作小时数 $h_{op} = 23$ h，平均操作间隔时间 $t_{cycle} = 7\,200$ s，计算可得 $n_{op} = 7\,820$ 周期/年。

由式 (2)

$$MTTF_D = \frac{B_{10D}}{0.1n_{op}} \quad (2)$$

可得每个通道的 $MTTF_D = 25\,575.4$ 年，且两个通道完全相同，取最大 $MTTF_{D3} = 100$ 年；继电器的

状态间接监控，故 $DC_{avg} = 90\%$ 。查表可得 $PFH_{D3} = 4.29 \times 10^{-8}/h$ 。

SRP/CS₄ 中变桨驱动 PDU 的 PFH_D 值由制造商直接提供， $PFH_{D4} = 4 \times 10^{-8}/h$ 。

综上 SSD 触发紧急收桨安全功能总的 $PFH_D = 1.196 \times 10^{-7}/h$ ， $PL = d$ 。

安全功能的 PL 量化与评估在安全评估软件 SISTEMA 中实现起来更为方便快捷，利用软件分别对本文中描述的陆上机型与海上机组安全系统的安全功能进行计算，其结果见表 2。

表 2 风力发电机组安全功能的 PL

序号	功能描述	陆上机组		海上机组	
		$PFH_D(1/h)$	PL	$PFH_D(1/h)$	PL
SF01	急停按钮触发主电源跳闸	3.4×10^{-9}	e	3.3×10^{-9}	e
SF02	急停按钮触发变流器急停	1.2×10^{-6}	c	2.8×10^{-8}	e
SF03	急停按钮触发紧急收桨	1.2×10^{-6}	c	9.1×10^{-8}	e
SF04	SSD 触发紧急收桨	1.2×10^{-6}	c	1.2×10^{-7}	d
SF05	控制系统失效触发紧急收桨	1.2×10^{-6}	c	1.0×10^{-7}	d
SF06	扭缆超限触发紧急收桨	3.7×10^{-7}	d	3.3×10^{-7}	d
SF07	风轮超速触发紧急收桨	2.2×10^{-6}	c	2.3×10^{-7}	d
SF08	变桨驱动故障触发紧急收桨	2.7×10^{-7}	d	1.0×10^{-7}	d

结果表明，相比陆上机组安全系统方案，海上方案中各种安全功能的 PFH_D 值更低，安全性能 PL 更优，且满足安全系统 $PL_e \geq d$ 的设计要求。

结束语

采用安全 PLC 的海上风力发电机组安全系统通过调整安全功能结构、增加安全部件状态实时监控和改进安全系统控制逻辑等措施，使得系统能更有

效地规避单一性失效、系统性失效，提高故障诊断率，降低每种危险状况的风险，从而大大提高海上风电机组的安全性与可靠性。设计紧扣国际国内标准对于海上风电机组安全系统的功能要求，满足欧盟机械电气安全标准 ISO 13849 的设计要求，性能等级达到 d 以上，为海上风电走向深远海提供有力的技术支撑。EA

(收稿日期：2021-04-25)

(上接 58 页)

4 结束语

特变电工上海高压开关有限公司开发了具有自主知识产权的 252 kV GIS 转角母线模块，对其进行研究结果表明：

1) L 型铸铝壳体的应力分布极不均匀，最大应力出现在水平出口和竖直出口相交处的相贯区域。通过变厚度结构设计和大 R 角均匀过渡设计可有效降低相贯区域的应力值，从而有效提高 L 型铸铝壳体的水压爆破值。

2) 通导体侧面长方形孔边缘圆角处的电位

线分布发生结构性的突变，导致该处场强值过高。通过合理的屏蔽结构和长方形孔边缘倒多 R 圆角的优化设计可有效降低该处的最大场强值，从而提高转角母线模块整体绝缘性能，达到显著增加绝缘裕度的目的。

3) 对转角母线模块中 L 型铸造壳体、通流导体等核心部件的设计特点及仿真核算进行探讨和分析，以期对类似母线结构研发设计提供一定借鉴作用。EA

(收稿日期：2021-04-11)