

趋肤效应对开关柜母线载流能力的影响及改进策略

朱达 李显东 欧林龙

宁波奥克斯智能科技股份有限公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i3.8812

[摘要] 本研究聚焦趋肤效应对开关柜母线载流能力的影响及改进策略，围绕交流工况下母线电流分布与热特性变化核心问题，从趋肤效应作用机理、对母线载流性能的多维度影响展开探究。通过优化母线结构设计、优选导电材料、改进加工连接工艺、强化散热体系及搭建动态监测机制，实现母线有效导电面积利用率提升、交流电阻降低、温度场分布均匀化，可有效解决趋肤效应引发的载流能力下降、局部温升超标等问题，提升开关柜母线的运行稳定性与安全裕度，增强其在大电流配电场景的适配能力。

[关键词] 趋肤效应；开关柜母线；载流能力；交流电阻；温升控制

Impact of Skin Effect on Busbar Current-carrying Capacity in Switchgear and Improvement Strategies

Zhu Da Li Xiandong Ou Linlong

Ningbo AUX Intelligent Technology Co., Ltd.

[Abstract] This study investigates the influence of skin effect on busbar current-carrying capacity in switchgear and proposes improvement strategies. Focusing on core issues of current distribution and thermal characteristics under AC operating conditions, the research explores the mechanism of skin effect and its multidimensional impacts on busbar performance. By optimizing busbar structural design, selecting superior conductive materials, refining manufacturing processes, enhancing thermal management systems, and establishing dynamic monitoring mechanisms, the study achieves increased effective conductive area utilization, reduced AC resistance, and uniform temperature field distribution. These measures effectively address current-carrying capacity degradation and localized temperature exceedances caused by skin effect, thereby improving operational stability and safety margins of switchgear busbars while enhancing their adaptability in high-current power distribution scenarios.

[Key words] Skin effect; Switchgear busbar; Current-carrying capacity; AC resistance; Temperature rise control

引言

开关柜是电力系统配电环节的核心设备，母线作为其内部电能传输的关键部件，载流能力直接决定开关柜的额定运行容量与安全服役性能^[1]。在电力系统向大容量、高电压方向发展的背景下，开关柜母线长期处于工频大电流交流工况，趋肤效应的影响愈发显著，成为制约母线载流能力提升的关键因素。目前行业内普遍存在因趋肤效应导致母线有效导电面积闲置、交流损耗增加、局部温升超标，进而引发绝缘部件老化、连接部位烧蚀甚至短路故障等问题，严重影响开关柜的运行可靠性。因此本文研究趋肤效应对开关柜母线载流能力的作用规律

及改进策略，为开关柜母线的优化设计与工程应用提供理论依据和技术途径。

1 趋肤效应作用机理及开关柜母线应用特性

1.1 趋肤效应的基本作用机理

趋肤效应是交流电流通过导体时的固有物理现象，其核心机理为：交变电流在导体内部产生交变磁场，该磁场诱导产生涡流，涡流方向与导体中心主电流方向相反、与表面主电流方向相同，最终使电流向导体表面聚集，形成从表面向中心逐渐衰减的电流密度分布。导体表面参与有效导电的薄层区域为趋肤深度，其计算公式为：

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\gamma}} \quad (1)$$

式中, δ 为趋肤深度, ω 为电流角频率, μ 为导体磁导率, γ 为导体电导率。电流频率越高、导体磁导率越大、电导率越高, 趋肤深度越小, 趋肤效应越显著; 工频 50Hz 下, 铜母线趋肤深度约 8.5mm, 铝母线约 11.7mm, 超过 2 倍趋肤深度的导体中心区域几乎无电流通过。

1.2 开关柜母线的结构与运行特性

开关柜母线主要采用铜、铝等良导体, 常见结构为矩形、槽形、管形及多片并列形式, 广泛应用于中低压 380V~35kV 配电系统, 承担柜内各功能单元间的电能传输任务。其运行具有三大核心特性: 一是空间封闭性, 母线置于开关柜专用母线室, 散热条件有限; 二是电流工况特殊性, 工业配电、高层建筑等场景下母线通流等级达千安级, 工频大电流下趋肤效应影响凸显; 三是结构排布紧密性, 母线相与相之间间距小, 热量易相互传递, 局部温升易叠加。

1.3 开关柜母线趋肤效应的作用特征

开关柜母线在工频大电流工况下, 趋肤效应呈现出针对性作用特征: 对于实心大截面母线, 有效导电面积仅为表面 2 倍趋肤深度内的区域, 几何截面利用率大幅下降; 对于多片并列母线, 片间电磁耦合易导致电流分布不均, 加剧局部趋肤效应; 对于母线连接部位, 电流聚集与接触电阻叠加, 成为温升超标重灾区。与架空输电导线相比, 开关柜母线因封闭散热差, 趋肤效应引发的电能损耗转化为热量后难以快速扩散, 形成“电阻增大-温升过高-电阻率再增大”的恶性循环, 对载流能力的负面影响被进一步放大^[2]。

2 趋肤效应对开关柜母线载流能力影响的应用价值分析

2.1 明晰影响机理, 夯实母线优化设计基础

探究趋肤效应对开关柜母线载流能力的影响规律, 其核心价值在于明确磁场、涡流、电流分布与载流性能的内在关联, 为母线结构设计、材料选型提供科学依据。通过量化趋肤效应下母线有效导电面积、交流电阻、温升的变化规律, 可打破传统母线“凭经验选型”的局限, 实现从“几何截面设计”向“有效导电截面设计”的转变, 从源头提升母线设计的精准性, 夯实开关柜大容量、高可靠性运行的基础。

2.2 定位核心问题, 破解行业共性运行痛点

趋肤效应引发的母线载流能力下降、局部温升超标是配电行业的共性问题, 深入分析其影响路径, 可精准定位故障诱因: 有效导电面积减小导致交流电阻增大, 焦耳损耗增加; 电流分布不均引发温度场畸变, 局部高温加速绝缘老化; 连接部位电流聚集导致接触电阻进一步增大, 易引发烧蚀故障。

3 趋肤效应影响下开关柜母线载流能力的改进策略

3.1 适配趋肤效应特性, 优化母线结构设计提升有效导电面积利用率

构建“趋肤深度匹配-结构形式优化-截面参数校准”的三阶改进路径, 以趋肤效应的作用规律为核心, 贯穿母线结构选型、截面尺寸设计、多片排布优化等关键环节, 实现有效导电面积利用率与载流能力的同步提升。建立母线结构与趋肤深度的联动适配机制, 将调控目标分解为单芯厚度控制、分裂结构设计、片间间隙优化等具体任务, 聚焦有效导电面积最大化开展技术攻关。例如在 2000A 大电流开关柜母线设计中, 针对铜母线 8.5mm 的工频趋肤深度, 将单芯矩形母线厚度控制在 15~17mm (接近 2 倍趋肤深度), 采用 3 片并列形式, 片间设置 5~8mm 绝缘间隙减小电磁耦合, 同时将实心母线改为槽形空心结构, 在保证有效导电面积的前提下, 减少中心无效导电材料, 提升散热效率。

推动结构设计标准与载流性能评价体系的深度融合, 将趋肤效应适配性纳入开关柜母线设计规范。在设计迭代过程中, 系统梳理大截面母线有效面积利用率低、多片母线电流分布不均等核心痛点, 结合不同通流等级、柜体空间的应用需求, 制定差异化结构设计方案, 形成“趋肤特性适配-结构优化-载流验证”的闭环机制。

3.2 协同材料电磁特性, 优选导电材料降低趋肤效应作用程度

作为开关柜母线载流能力提升的核心技术环节, 材料选型与趋肤效应特性的协同优化承载着降低交流电阻、减少能量损耗的双重诉求。将导体材料的磁导率、电导率等电磁特性精细化分析深度融入母线选材全流程, 通过材料优选实现趋肤效应作用程度的有效降低, 是破解母线载流能力受趋肤效应制约、筑牢开关柜配电性能基础的关键方向。

企业可构建“材料特性分析-电磁适配性验证-工程选型落地”的母线选材优化路径, 以材料电磁特性与趋肤效应的协同调控贯穿母线设计、采购、加工等全阶段, 达成材料选型与工频大电流工况的深度契合。需建立材料磁导率、电导率与趋肤深度、交流电阻的联动匹配机制, 将降低趋肤效应影响的核心目标拆解为非磁性材料选用、高电导率材料优选、复合结构设计等具体实施任务, 由电气设计团队牵头材料的性能测试与落地应用。例如在 35kV 中压开关柜母线选型中, 优先选用无氧铜母线 (电导率 $\geq 58\text{MS/m}$, 磁导率为真空磁导率), 其趋肤效应影响远低于磁性材料, 同时针对成本敏感的低压场景, 选用铝镁硅合金母线 (电导率 $\geq 37\text{MS/m}$), 并通过表面搪锡处理提升导电性能与抗氧化能力, 严禁选用铁、钢等磁性金属材料作为母线本体及连接附件, 防止磁滞损耗与涡流损耗叠加加剧趋肤效应。

在材料应用优化过程中, 由技术专家组联合材料供应商, 系统梳理不同导电材料在趋肤效应下的性能表现、成本差异、加工难度等工艺痛点, 结合开关柜的应用场景 (室内/室外、大/小电流), 制定针对中高压、低压、大容量、小容量等不同工况的差异化选材方案, 形成“材料特性精准分析+电磁效应协同优化”的联动推进机制。在母线成品质量管控阶段, 依

托材料电导率测试仪、电磁特性分析平台建立数据联动机制，通过实时采集材料电导率、磁导率指标，动态优化材料选型与加工工艺，推动母线选材从“单一导电性能考量”向“电磁特性综合适配”转变，切实保障母线材料在降低趋肤效应影响、提升载流能力等方面的综合效益协同统一。

3.3 匹配母线电流分布，改进加工连接工艺消除局部电流集中印刷干燥速率的精准匹配与涂层固化度的科学调控，是高强度印刷装饰纸强化耐磨摩擦性能的核心技术路径。开关柜母线的加工精度与连接质量直接影响电流分布均匀性，通过改进加工、连接及表面处理工艺，消除母线边角、连接部位等局部电流集中点，是降低趋肤效应叠加影响、提升载流能力的关键举措。

企业需以趋肤效应下电流分布规律为核心导向，构建“加工精度控制-连接工艺优化-表面性能改性”的一体化技术体系。优先采用高精度加工设备，按电流均匀分布要求优化母线加工工艺参数，按边角倒圆、表面平整的标准控制加工质量，设计多组工艺方案，同步控制加工公差与表面粗糙度在适配区间。借助涡流检测、接触电阻测试等专业设备，系统采集不同工艺参数下母线的电流分布均匀性、连接部位接触电阻、局部温升等核心指标。为保证母线载流性能达标，可结合母线通流等级、柜体散热条件等运行参数，建立工艺参数与电流分布、局部温升的关联模型，精准定位适配大电流工况的最优工艺区间。

针对母线电流均匀分布与局部集中控制的协同性提升，可通过多元工艺参数复配优化实现效能最大化。例如母线加工时，将直角边角倒圆（圆角半径 \geq 母线厚度的1/2），避免边角电场集中引发电流聚集，剪切、折弯处进行表面抛光处理，粗糙度控制在Ra1.6以下，减少电流集中诱因；母线连接部位采用搪锡、镀银处理（搪锡层 \geq 0.05mm，镀银层 \geq 0.02mm），降低接触电阻，避免连接部位电流聚集。

3.4 融合母线热特性规律，强化散热体系改善温度场分布

开关柜母线的温升是趋肤效应下电能损耗的直接体现，涂层平整度与网点形态的适配调控决定装饰纸视觉效果，而母线温度场分布与散热体系的协同适配直接决定载流能力的发挥。企业需紧扣趋肤效应下母线表面温升高、中心温升低的热特性规律，系统调控散热方式、风道设计、散热辅助部件配置，构建“散热方式优化-风道设计适配-热特性协同”的全流程技术体系，实现散热体系与母线热特性的深度契合。

在散热体系设计环节，需搭建多维度性能评估框架，整合母线温升、散热效率、柜体空间、运行噪音等关键指标，完成散热方案的动态适配测试与工艺参数校准。例如，针对封闭型开关柜母线表面温升过高问题，采用“自然通风+强制风冷”复合散热方式，在柜体下部设进风口、上部设出风口，利用热空气上升形成自然风道，同时在母线室增设轴流风机（防护等级 \geq IP54），与温控系统联动，当母线温度达到45℃时自动启动，强制加快空气流通。搭配铝制散热翅片（粘贴于母

线表面），增大散热面积，将管形母线改为空心结构，形成内部通风通道，提前预判因温升过高导致的绝缘老化、载流能力下降等质量风险。

在散热体系与母线工艺耦合优化阶段，需设计针对性调节方案，以母线结构形式（矩形/槽形/管形）与开关柜类型（抽出式/固定式）作为双重约束，制定适配不同配电场景的协同优化策略。以高端工业用大容量开关柜应用场景为例，针对多片并列矩形母线散热差的特性，通过优化片间间隙强化风道流通，同时调整母线室与其他功能室的隔板设计，形成独立散热空间，避免热量相互传递。

3.5 结合母线运行状态，搭建动态监测机制实现载流智能调控

为保障改进策略的落地效果，实时掌握趋肤效应下母线的运行状态，需结合开关柜智能化发展趋势，搭建母线运行状态动态监测机制，实现载流能力的智能调控与故障预警。构建“测点精准布设-数据实时采集-智能分析调控”的监测体系，在母线表面、连接部位、边角等趋肤效应影响显著、易温升超标区域，布设光纤光栅温度传感器（抗电磁干扰、测量精度 \pm 0.5℃），实现温度数据的实时、精准采集。将传感器与开关柜智能监控系统联动，搭建云端监测平台，实现温度数据的远程传输、实时显示与历史追溯，建立温度与载流能力的关联模型，当母线温度达到预警值（如铜母线温升32K，接近国家标准40K限值）时，平台发出声光预警；当温度达到跳闸值时，联动保护装置实现负荷降载或切除，防止温升超标引发故障。

同时，将监测数据与母线设计、工艺优化联动，通过分析不同运行工况下母线的温度分布规律，反推趋肤效应的作用强度，持续优化母线结构、材料、工艺及散热方案，形成“监测-分析-优化-验证”的闭环改进机制。例如通过监测发现某一连接部位温升持续偏高，可及时排查接触电阻过大问题，重新处理连接表面并紧固螺栓；通过分析多片母线的温度分布，可优化片间间隙与风道设计，提升电流分布均匀性与散热效率。

4 结论

通过从结构设计、材料选型、加工连接工艺、散热体系、动态监测五个维度制定改进策略，可有效降低趋肤效应对开关柜母线的负面影响，实现有效导电面积利用率提升、交流电阻降低、温度场分布均匀化，可解决母线载流能力下降、局部温升超标等核心问题，显著提升开关柜母线的运行稳定性与安全裕度。

[参考文献]

[1]吴真超. 中压开关柜母线规格选型分析[J]. 中国新技术新产品, 2021, (18): 62-64.

[2]梁景明, 李新海, 曾令诚, 等. 10kV 母线载流能力提升改造方案研究[J]. 电气时代, 2019, (12): 57-60.

作者简介：朱达，出生年月：1991-03-19，男，汉族，籍贯：宁波象山，学历：大专，职称：中级工程师，研究方向：电气工程、电力传输技术、母线趋肤效应分析与优化。