

电解铝厂电气设备选型及继电保护配置方案设计

马星

沈阳铝镁设计研究院有限公司, 辽宁 沈阳 110001

DOI:10.61369/EPTSM.2026060002

摘 要： 本文针对电解铝生产对供电连续性、稳定性的特殊要求，首先梳理了电解铝厂供配电系统的负荷特性与设计约束，明确了核心电气设备的选型原则与适配方向，进而提出覆盖主变、整流机组、配电线路、无功补偿装置的全层级继电保护配置方案，最后通过实际工程案例验证了方案的应用效果。研究成果可为同类型高耗能冶金企业的供配电系统设计、改造提供理论支撑与实践参考。

关 键 词： 电解铝厂；电气设备选型；继电保护配置；供配电可靠性

Selection of Electrical Equipment and Design of Relay Protection Configuration Scheme for Electrolytic Aluminum Plants

Ma Xing

Shenyang Aluminum and Magnesium Engineering and Research Institute Co., Ltd., Shenyang, Liaoning 110001

Abstract： Addressing the special requirements for power supply continuity and stability in electrolytic aluminum production, this paper first outlines the load characteristics and design constraints of the power supply and distribution system in electrolytic aluminum plants. It clarifies the selection principles and suitable directions for core electrical equipment, subsequently proposing a comprehensive relay protection configuration scheme covering main transformers, rectifier units, distribution lines, and reactive power compensation devices. Finally, the practical application effects of the scheme are verified through real-world engineering cases. The research findings provide theoretical support and practical references for the design and renovation of power supply and distribution systems in similar high-energy-consuming metallurgical enterprises.

Keywords： electrolytic aluminum plant; electrical equipment selection; relay protection configuration; power supply and distribution reliability

电解铝是典型的连续化高耗能生产行业，供电系统的稳定性直接决定生产安全与经济效益，短时供电中断便可能导致电解槽报废、生产线停产，带来巨额经济损失。当前部分电解铝项目的电气设备选型未充分适配生产工况特性，继电保护配置未考虑谐波干扰、大电流冲击等特殊影响，频繁出现保护误动、设备过载损坏等问题。本文结合电解铝生产的供电需求，系统性设计适配性的电气设备选型与继电保护配置体系，切实提升电解铝厂供电安全水平。

一、电解铝厂供配电系统负荷特性与设计约束

（一）电解铝生产工艺的供电特殊要求

电解铝生产靠熔盐电解法来实现氧化铝还原，整个生产周期都需要持续供给稳定大电流直流电源，其对供电连续性的要求远高于常规工业场景。要是供电中断超过极短时间，电解槽内的熔融电解质会快速降温凝固，这不仅会让整槽电解铝产品报废，还可能损坏电解槽内衬结构，复产需要耗费数天甚至数周时间，经济损失非常高，同时电解铝生产对供电电压的稳定性也有着严格要求，电压波动幅度过大不仅会降低电解电流效率、增加生产能

耗，还可能引发电解槽热平衡紊乱进而影响产品质量，此外整流过程产生的大量谐波会叠加在供电线路上，对电气设备绝缘、保护装置动作准确性都会产生负面影响，这是供配电系统设计中必须重点考虑的特殊约束。

（二）电解铝厂负荷分级与运行特性

电解铝厂的用电负荷能够依据供电中断影响程度划分出不同等级，其中整流机组、电解槽控制装置以及安全连锁系统属于最高等级负荷，需要配备多电源冗余供电且严禁无理由中断供电。净化系统、物料输送系统等辅助生产负荷属于次一级负荷，短时停电不会引发严重生产事故可在故障时优先切除保障核心负荷供

电。办公、生活配套设施属于三级负荷，停电仅影响人员工作体验可根据供电裕度灵活调整。从运行特性方面来看，电解铝厂的整体负荷相对平稳，不过单台电解槽的参数调整会带来小幅的负荷波动，同时整流装置属于非线性负荷，会产生大量特征谐波导致电网电压畸变，加速电气设备绝缘老化，还可能干扰继电保护装置的采样准确性引发误动、拒动问题。

二、电解铝厂核心电气设备选型方案

（一）主变压器与整流变压器选型

主变压器是电解铝厂供电系统的核心枢纽，选型时要充分适配厂区长期满负荷运行特点，预留足够的过载余量，以保证在负荷小幅波动、电网侧异常时能稳定运行。调压方式优先选有载调压模式，可在不停电前提下调整输出电压，抵消电网侧电压波动影响，保证整流侧输入电压稳定，满足电解生产参数要求。绝缘等级与防护结构需结合安装区域环境特点设计，适配厂区多粉尘、有腐蚀性气体的工况，避免绝缘快速老化、设备锈蚀等问题。整流变压器作为整流机组配套输入设备，选型时要匹配整流装置脉波数要求，阀侧绕组采用对应接线组别，从源头抵消部分特征谐波，降低谐波对供电系统的影响^[1]。

（二）整流机组及配套装置选型

整流机组作为电解铝生产直流供电的核心装置，选型时需充分适配电解槽的额定工作参数。优先选择多脉波整流拓扑结构能大幅降低谐波注入电网的水平，减少谐波对厂区内电气设备与电网的负面影响。整流核心元件要选择通态压降低且过载能力强的类型，可提升机组整体运行效率^[2]。同时应对负荷波动带来的短时电流冲击，降低元件损坏风险。配套控制装置要选择响应速度快且调节精度高的类型，可根据电解槽运行需求快速调整直流输出参数，保证供电稳定性，同时要配置完善的故障监测与自诊断功能，可及时发现元件损坏、参数偏移等异常问题，避免小故障扩大成严重生产事故。冷却系统要采用冗余设计，单组冷却装置故障时仍可满足机组散热需求，避免因散热不足导致机组降负荷运行而影响生产效率^[3]。

（三）高低压配电系统设备选型

高压配电设备选型需重点考量分断能力和动热稳定性，以适配电解铝厂故障时大短路电流冲击，防止故障时出现断路器无法分断和柜体变形等问题，开关柜要选择密封性能优良的结构，能有效阻挡厂区内粉尘和腐蚀性气体进入柜内，避免内部积灰和锈蚀导致绝缘下降引发短路故障，断路器的脱扣器要选择具备抗谐波干扰功能的型号，避免谐波导致电流采样偏差引发误脱扣影响供电连续性，低压配电设备的母线和断路器要预留充足载流量余量，应对长期大负荷运行下的发热问题防止导体过热加速绝缘老化，接地系统要采用全厂等电位连接设计，降低故障时跨步电压与接触电压风险保障运维人员安全，全系统要配置覆盖全面的绝缘监测装置，可实时监测各回路绝缘状态及时发现绝缘破损隐患避免接地故障扩大影响生产^[4]。

三、各层级电气设备的继电保护具体配置方案

（一）主变压器与整流变压器保护配置

主变压器和整流变压器是连接电网跟厂区负荷的核心枢纽，保护配置需兼顾速动性和可靠性，既要快速切除严重故障，又要避免不必要跳闸影响生产，首先配置纵联差动保护当作主保护，可无延时反应变压器内部绕组短路、引线短路等严重故障，动作后直接跳开变压器两侧断路器来隔离故障点，油浸式变压器要配置瓦斯保护作为另一套主保护，能反应变压器内部轻微故障、油位异常等问题，轻瓦斯动作时触发报警信号提醒运维人员排查隐患，重瓦斯动作时直接跳闸避免故障进一步扩大，配置过流保护作为后备保护，反应外部短路导致的变压器过电流情况，动作定值和延时要与下级保护精准配合，避免出现越级跳闸问题扩大停电范围^[5]。

（二）整流机组专项保护配置

整流机组作为电力电子装置，其故障特性和常规工频电气设备差异明显，所以需配置专项保护来适配它的运行特性，首先要配置换相失败保护，它能够快速识别交流侧电压波动、缺相、谐波过大等问题引发的换相失败故障，防止整流机组长时间处于换相失败状态而导致元件大面积损坏，并且会依据故障持续时间来选择触发报警或者跳闸，要配置阀侧过流保护，它可反应整流桥臂的短路故障，能快速切除故障以避免故障电流损坏整流元件，配置过电压保护，可吸收整流换相过程中产生的操作过电压、雷击过电压，避免整流元件被高压击穿而损坏，另外还要配套配置缺相保护、元件过热保护、直流侧过压过流保护等，它们能实时监测整流机组的运行状态，会根据故障的严重程度选择触发报警信号或者跳开整流机组的输入侧断路器，这样既能避免故障扩大，又能尽可能减少不必要的跳闸对生产造成的影响^[6]。

（三）配电线路与母线保护配置

高低压配电线路是电能传输的重要通道，保护配置需在保证快速切除故障时尽可能缩小停电范围，避免非故障区域的供电受到影响，高压配电线路配置电流速断保护作为主保护，可无延时切除线路近端的严重短路故障，配置限时过流保护作为后备保护，动作定值与延时要和上级、下级保护精准配合，可切除线路远端故障并避免越级跳闸，配置接地保护以反应线路的单相接地故障，根据接地电流大小选择触发报警或者跳闸，小电流接地系统先报警提示运维人员排查故障而无需立即跳闸，进一步提升供电连续性，母线配置母线差动保护作为主保护，可快速切除母线上的短路故障，避免故障影响连接在母线上的所有设备，同时配置弧光保护应对开关柜内的弧光短路故障，动作速度远快于常规保护，可大幅降低故障对设备的损坏程度，低压配电线路配置过流保护、剩余电流保护，保障末端负荷的供电安全^[7]。

（四）无功补偿与滤波装置保护配置

电解铝厂的无功补偿与滤波装置是保障供电质量、降低谐波影响的关键核心设备，保护配置方面既需要保障装置本身的安全稳定运行，又要避免装置出现故障影响整个供电系统的稳定运

行，配置电容器过电压保护可应对电网侧电压升高导致的电容器过压运行状况，避免电容器绝缘老化速度加快进而缩短装置使用寿命，配置过流保护能够反应电容器内部短路、外部短路所导致的过电流情况，快速切除故障以避免故障扩大波及其他设备，配置滤波支路的谐波过流保护可避免特定次谐波含量过高致使滤波支路过载，防止滤波元件被损坏，配置装置投切故障保护能够反应无功补偿装置投切过程中产生的涌流、过压等异常现象，避免投切故障对装置造成损坏，还要配套配置不平衡电压、不平衡电流保护，可反应电容器组的元件损坏、容值偏移等问题，轻微异常时触发报警提示运维人员更换元件，严重故障时跳开装置的进线断路器以保障整个供电系统的稳定^[8]。

四、工程应用案例分析

（一）项目概况

国内西北某个工业园区新建设的大型电解铝生产项目配套建设了独立的110kV变电站，其供电范围覆盖2条电解铝生产线以及配套的辅助生产设施，在项目前期论证阶段，设计团队发现传统电气设备选型与继电保护配置方案无法适配电解铝生产特殊工况，存在因谐波干扰导致保护误动、设备过载能力不足等潜在风险，所以决定采用本文提出的电气设备选型与继电保护配置方案开展系统设计，从源头规避上述这些问题。

（二）本文方案的落地实施

在项目设计阶段会严格依照本文所提选型原则来完成主变压器、整流变压器、整流机组以及高低压配电设备的参数选型工作，并且充分考虑谐波适配、过载余量以及环境适应性等方面的要求，继电保护系统会按照本文提出的全层级配置方案开展装置

选型和逻辑设计工作，同时结合项目实际工况完成保护定值的整定。施工完成之后，会依次开展单设备调试、分系统调试以及整系统联动试验，以此全面验证设备运行的稳定性以及保护动作逻辑的正确性，之后正式投入生产运行。

（三）应用效果评估

项目投运后连续18个月的运行数据显示，本文提出的方案有效解决了传统配置下的谐波干扰、保护误动等问题，供电可靠性与电能质量均达到预期目标，具体指标对比如下表所示：

评估指标	同规模传统配置项目平均水平	本项目方案实施后水平
年继电保护误动次数	5.2次	0次
供电系统年可用率	99.72%	99.98%
10kV 母线谐波电压总畸变率	4.8%	1.2%
年停电导致的直接经济损失	2200万元	120万元

从实际运行的效果来观察，本方案让供电系统的稳定性大幅提升，每年减少的停电损失和能耗成本加起来超过2000万元，该方案的投资回报周期极其短暂，充分验证了本文方案具备实用性与经济性，能够为同类型电解铝项目的供配电系统设计提供成熟参考。

五、结论

本文结合电解铝生产的特殊供电需求，构建了覆盖设备选型、保护配置全流程的供配电系统设计方案，充分适配了电解铝厂大负荷、高谐波、对供电连续性要求高的工况特点，可有效降低供电故障发生率，减少故障损失。实际工程应用效果验证了方案的可行性与经济价值，可在同类型电解铝项目以及其他高载能冶金项目中推广应用。

参考文献

- [1] 沈科森. 电气时代背景下通用电工电气技术在电解铝产业的应用与展望 [J]. 中国金属通报, 2025, (08): 17-19.
- [2] 丁磊. 电解铝生产中电气设备管理策略研究 [J]. 化工设计通讯, 2024, 50(11): 161-163.
- [3] 马腾超. 电解铝配套电厂电气设备常见运行故障维修及安全管理 [J]. 中国金属通报, 2020, (09): 214-215.
- [4] 张昕. 基于 PLC 的电解铝整流供电系统 [J]. 农村电气化, 2020, (07): 22-24.
- [5] 豆亮. 电解铝厂电气设备节能技术的应用研究 [J]. 中国金属通报, 2019, (07): 10+12.
- [6] 薛赞斌. 电解铝整流机组电气设备安装及调试 [J]. 科技创新导报, 2019, 16(10): 29+31.
- [7] 孙新慧. 电解铝厂电气设备节能技术的应用研究 [J]. 山东工业技术, 2018, (23): 175.
- [8] 文辉. 浅谈微机继电保护装置和综合自动化系统的组成及应用 [J]. 科技与企业, 2011, (07): 162-163.