

光伏直流接入电解铝供电系统的优化与节能策略

路晓宁

国家电投集团铝电投资有限公司青铜峡铝业分公司, 宁夏 吴忠 751600

DOI:10.61369/EPTSM.2025060007

摘 要 : 电解铝工业是我国经济发展的基础工业, 其生产流程严重依靠电能, 其多次整流和逆变导致的电能转化损失较大, 再加上高比例的燃煤发电, 从而使工业的“绿色化”面临着巨大的压力。伴随着国内光伏产业的大规模发展, 消除部分转换环节, 降低能源的消耗, 是实现“双碳”目标的有效途径。然而, 由于光伏直流的波动特性与电解铝生产对供电的稳定需求之间出现冲突, 需要从系统的角度和节能的角度来破解, 这不仅是工业降低成本的实际需要, 也是高能耗工业和新能源协调发展的重要探索。

关 键 词 : 光伏电流; 电解铝供电系统; 节能策略

Optimization and Energy-Saving Strategies for Photovoltaic DC Connection to Electrolytic Aluminum Power Supply Systems

Lu Xiaoning

Qingtongxia Aluminum Industry Branch, State Power Investment Corporation Aluminum and Electricity Investment Co., LTD., Wuzhong, Ningxia 751600

Abstract : The electrolytic aluminum industry is a fundamental industry for China's economic development. Its production process relies heavily on electricity, resulting in significant energy conversion losses due to multiple rectifications and inverters. Coupled with a high proportion of coal-fired power generation, this has placed tremendous pressure on the "greening" of the industry. With the large-scale development of the domestic photovoltaic industry, eliminating some conversion links and reducing energy consumption are effective ways to achieve the "dual carbon" goals. However, due to the conflict between the fluctuating characteristics of photovoltaic direct current and the stable power supply demand of electrolytic aluminum production, it is necessary to solve the problem from both the system perspective and the energy conservation perspective. This is not only an actual need for the industry to reduce costs, but also an important exploration for the coordinated development of high-energy-consuming industries and new energy.

Keywords : photovoltaic current; power supply system for aluminum electrolysis; energy-saving strategies

引言

电解铝加工是高能耗产业, 其常规电源具有多个连接损耗, 而直接引入太阳能电池可降低逆变和整流损耗, 提高发电效率。其核心是光储的一体化协调, 利用双向-直流-直流变换器, 使光电和存储之间能量互补, 抑制光照变化。同时结合“电压-电流”双闭环的方法通过稳定直流母线, 让电流波动使其处于一个合理的范围内, 保证了电解槽道过程的平稳运行。

一、光伏直流接入电解铝供电系统的重要性

将光伏直流引入电解铝槽中, 具有多方面的经济价值: 能够减少电能消耗。在常规方式下, 需要将光伏发电通过逆变器接入电网后进行整流, 而采用直流直供的方式可以减少两极变换损失, 从而达到节约电能的目的。以中电建为例, 一年可节约1.95

亿多的电力费用。此外, 还能避免碳税的风险。在国家范围内的电力交易规模不断扩大的同时, 电解铝企业也将面对碳排放费用^[1]。推广“绿色电力”后, 每吨铝碳排放由原来的10~14吨减少1.5~2吨, 大大减少了碳排放。与此同时, 绿色电力的铝会因价格上涨而受益。在此基础上, 通过“光伏+储能”的协调调控, 可实现提高发电效率, 减少对电网的依赖。该模式既契合了

我国的能源保障政策，又可通过数字监测平台对电网进行在线动态调整，使母线损耗大大降低，从而达到节能减排和节能减排的目的。

二、光伏直流接入电解铝供电系统的技术细节

系统架构以一条直流母线为中心，光伏阵列产生的直流电汇集智能汇流箱中，直接通过直流母线接入。在汇流箱内设置了一个电流监控模块，可以对每一条电池线的运行情况进行实时监控，一旦有一条线发生了故障，就可以通过内部断路器迅速隔离，避免对系统的输出造成不利的影响。针对光伏输出的工作电压与电解槽工作电压之间的存在的差异，需要利用 DC-DC 变换器来进行电压匹配，即利用移相全桥技术，通过调整开关管导通时序，使电池端的电压达到母线水平，并在蓄能释放过程中降低，从而实现功率在两个方向上的有效转化。

在储能系统装置中由一个双向 DC—DC 变换器连接到直流母线上，其核心作用是抑制光伏的电压波动。在光伏出力功率大于电解负荷的情况时，变换器切换为可充电状态，将多余电能存储在储能单元；在光伏出力功率不足的情况下，变换器将会自动进入到放电状态，通过将存储的电能释放出来填补系统的空缺。为了防止储能的过度充电和放电，系统内设计了一个荷电状况监控模块（SOC），当 SOC 逼近极限时，启动电量限制的充电逻辑。在此范围内，应以保证槽底负载为第一位，并对不必要的放电进行控制。利用高频率的变压器进行电力隔离，保证了系统的安全性，降低了系统的能耗^[2]。

稳定电流是保证电解过程安全的重要机制。电解槽对电流的稳定性有很高的要求，任何细微的变化都会造成铝液的纯净度降低。该系统采取了“电压－电流”双闭环的控制方法，外环对直流母线进行监测，在光伏出力波动引起电压偏差时，利用 PI 调节器产生一个电流信号；内环通过对槽内的电流进行实时采集，并与指令值结果进行比较，从而调节 DC-DC 变换器的输出功率，保证了电流的波动在技术许可的限度之内。

以上这些技术细节的整合，在保持光伏直流供电效率的基础上，以精确调控和防护机理适应了电解铝生产的苛刻需求，为实现系统平稳、节能减排奠定了坚实技术基础。

三、光伏直流接入电解铝供电系统的优化与节能策略

（一）光储协同调度，负荷预测与响应

在光伏直流接入电解铝供电系统中，其光储能协调运行和负载预估响应是其能量效率最优的关键步骤。其技术机制以光伏发电功率波动规律、储能动态调控性能和电解铝负载特点展开，以多维协调控制为手段，实现系统稳定性与经济性的平衡。光储能装置协调运行的关键在于体系结构和调控方法的深层次耦合。光伏直流母线与电解池相连，消除了传统交流转化过程，而储能系统通过双向 DC-DC 变换器与直流母线相连。在光伏出力大于电解铝负荷的情况下，多余电能通过 MPPT 控制器优化后存入储

能；反过来，储存的电能又会补充电力的不足。其中，基于双向 DC-DC 双变换器的自适应换相技术，通过其同步整流电路，在充放电两种状态下，实现能量的有效转化，并结合闭环 PI 控制，保证能量存储的精确和稳定。

负荷预测和响应技术是利用数据驱动的建模方法，准确地将电解铝负荷特性和光伏出力进行准确匹配。利用 LSTM 神经网络建立了负荷预测的模型，通过对历史电流数据、电解槽温度和过程参数的录入，实现了 15 分钟到 1h 内的负荷曲线，预测精确度大于 95%。在此基础上，构建基于辐射、温度等天气信息的光伏出力预测模型，提前调整储能充放电计划。

其中，稳态流动的协调控制是动态响应机制的核心。在光伏出力波动引起的直流母线电压偏差的情况下，SCADA 系统可以对电解槽的电压和电流进行实时采集，并由分布式控制单元对其进行调节。比如在母线电压降低到 98% 时，通过对电解池中的高度进行调节，使电解槽中的电流波动保持到 $\pm 0.5\%$ 。采用“电压—电流”双闭环的方式，不仅保证了电解槽运行的平稳，而且减少了母线的损失。数字监测平台是光储系统协调和负荷响应的核心。在此基础上，将 SCADA 系统和能量管理系统（EMS）相结合，对光伏阵列效率、储能健康状况和电解槽运行参数进行监测，生成动态优化指令。通过构建能量效率评价方法，对电网的整体能量消耗进行动态分析，在节点失效率高于 3% 的情况下，实现故障的快速准确定位和维修，见表 1。

表1 故障的快速准确定位和维修的技术环节		
技术环节	核心机制	典型应用场景
稳流协调控制技术	用“电压—电流”双闭环控制，调 DC-DC 参数	母线电压下降至设定值 98% 时，增加储能放电功率，微调电解槽阳极高度，将电流波动控制在 $\pm 0.5\%$ 以内
	SCADA/EMS 系统相结合，实时监测与指令生成	光伏组串效率下降 15% 时触发清洗机机器人并调整储能策略；母线损耗率超 3% 时启动设备诊断修复接触电阻异常

（二）高效设备选型，电解槽参数匹配

高效设备选型要把重点放在转化环节的重点上。光伏侧采用防尘部件，其涂层可以降低因车间粉尘而引起的效率下降，且工作区域应涵盖整个电解房内的高温工作，防止因过热而降低效果。该系统需要整合智能化的分流器和快熔器，不仅可以实时监控各组的串联电流差值来查找效率较低的组件，还可以在短时间内实现对故障线路的微秒级断开，降低相关损失。其中，核心的 DC-DC 变换器需要使用低损失的器件，采用软开关方法降低开关的导通损失，使其具有较大的可调压范围，同时兼顾电池输出的变化幅度和槽内工作电压的要求，以保证在两个方向均能保持较高的转化效率。在储能方面，需要选择具有较大使用周期的磷酸铁锂电池，其充电速率要与其在光电转换过程中的频率变化相适应，以防止因反复充电而引起的容量快速衰退。

电解参数中，电源特征与电解过程的协调是关键。为了防止在全负荷状态下由于过流而引发的能量限制，电池的容量必须与电池的最大容量相适应。其中，最重要的是对其进行动态自适应：电解槽内的槽道电压与其运行时的电流强度呈非线性变化，太小会造成电解不完全，太大会造成不必要的能量消耗。该方法

需要与电解液温度、氧化铝浓度等相关技术因素相融合，比如随着温度的提高，电解质电导率增大，需要对其进行相应的电压调整，以保证其在相应的工作状态下的稳态，从而减少过压带来的能量消耗。

（三）集成 SCADA 系统，明确母线的损害扣除算法

SCADA 系统利用分布式传感网实时获取直流母线的电压、电流和温升数据，并结合光伏阵列输出、储能充放电状态、电解槽实时负荷等数据。通过采集的数据，经工业以太网传输至中央监控平台，形成动态可视化界面。运维人员可以直观掌握的母线电流、温度变化等监测信息，并在此基础上设置了一个门限判别模型，对母线局部温度突然升高等异常情况进行预警，以便及时采取措施。

母线损害扣除算法的关键在于精确地对母线上的电力损失进行精确地定量，其运算逻辑采用焦耳定律和动态电阻修正模型。该算法以现场实测的母线电流和材质参考电阻为基础，对实测的电阻值进行动态修正，从而实现对实测阻值的在线校正。然后，利用该方法对每一时段内节点的电能损耗进行累加，将该损失从整个电池系统的输出功率中剔除，从而获得真正投入电解池的可用功率。

该算法的独到之处是将“正常损耗”和“异常损害”区别开来：在某段母线由于接触不良而引起的局域电阻突然剧增，将这些超标的损失分别标注为“异常损害”，并引发 SCADA 系统的故障诊断命令——通过对比历史数据和拓扑结构，找出触点氧化、螺栓松动等故障的原因，以便于运维人员进行有针对性的维修。这种闭环机制不仅保证了能量效率评价的精度，而且能够及时检测出隐患，降低母线过热引起的停机风险，为电网的安全、高效运行起到了双保证作用，见表 2。

表 2 SCADA 系统以及母线损害扣除算法

模块	核心功能	关键机制 / 数据
SCADA 系统	采集参数、动态监控、异常告警	分布式传感器网络（每 s 采样 1 次）；工业以太网传输；温度突升超 5℃ 等异常自动告警
母线损害扣除算法	量化母线损耗、区分损害类型	基于焦耳定律 + 动态电阻修正；损耗评估误差较小；8℃ 即异常损害单独标记

（四）优化用电时段，抵消排放成本

优化用电时段是实现光伏接入电解铝系统抵消排放成本的关键所在，其核心机制是利用时段匹配光伏出力特征和电网的碳排放强度进行分时调控。系统基于能源管理模块，根据天气预测对光伏发电量高峰期和低谷期进行分类，并将分时电价和电源结构等参数进行匹配。

在光伏出力高峰期间，通过提高电解槽的负载，使之消纳更多的光伏直流电，降低对电网的电力需求；在光伏出力不足的情况下，利用储能释放对电能负荷的储能，从而有效地防止了在碳排放期大规模购买电力的现象。

四、结束语

光伏直流接入电解铝供电系统的优化策略，通过技术整合和精确调控，实现高效节能减排。其贴合实际的方法，为高耗能能源密集型工业的绿色发展提供技术支持，实现节能与低碳双赢。

参考文献

[1] 朱盛和. 电解铝整流供电系统中的无功补偿及高次谐波的抑制 [J]. 中国金属通报, 2023, (07): 13–15.
[2] 张驰, 王金龙, 邢沛. 电解铝整流供电系统中的无功补偿及高次谐波研究 [J]. 信息技术与信息化, 2024, (12): 53–56.
[3] 叶鹏, 郭喜鹏. 电解铝企业供电系统能耗分析及节能措施研究 [J]. 现代工业经济和信息化, 2023, 13(11): 122–125.