

# 电解制氢整流柜参数优化实现节能降耗策略研究

马建雄

国华(赤城)风电有限公司 河北张家口 075000

**摘要:** 在当前推动能源结构转型与实现“双碳”目标的背景下,电解水制氢技术作为绿氢生产的关键路径,其能效水平直接影响氢气的经济性与竞争力。本文聚焦电解制氢系统中整流柜运行参数优化对于降低直流电耗、提升系统能效及保障安全运行的核心作用。研究基于某制氢厂实际案例,该厂 $500\text{Nm}^3$ 电解槽长期存在运行电压高于额定值、直流电耗超出设计标准的问题。针对此问题,本研究深入分析发现,整流系统作为将交流电能转换为电解所需直流电的核心设备,其关键运行参数(如限流设定值、换档角、补偿角)与整流变压器实际性能指标、电解槽动态负载特性的适配性不足是导致能量转换效率低下、能耗上升及运行风险增大的根本原因。研究构建了“整流变-整流柜-电解槽”全过程数据链分析体系,提出并实施了以参数精细化调整为核心的系统性策略,包括精准诊断偏差、理论计算与仿真优化、协同调整参数、建立标准化验证闭环及经验固化等环节。

**关键词:** 电解制氢; 整流柜参数优化; 直流电耗; 能效提升; 电压稳定

## 引言

氢能作为清洁、高效的二次能源载体,在全球能源结构转型和碳中和进程中扮演着日益重要的角色。电解水制氢技术,尤其利用可再生能源供电的方式,是实现绿氢规模化生产的核心路径之一。然而,电解过程的能量消耗是其生产成本构成中的主要部分,因此降低电解过程的单位制氢能耗对于提高绿氢经济性至关重要。在电解水制氢系统中,整流柜作为将电网或可再生能源提供的交流电转换为电解槽所需的直流电的关键设备,其转换效率与输出品质(电压稳定性、纹波系数)直接影响电解槽的运行效率、气体产量、系统能耗以及设备寿命与安全。本研究旨在通过对电解制氢整流系统运行参数进行精细化优化调整的系统性方案探索,实现节能降耗目标并保障设备安全稳定运行,为行业提供实践参考与技术支持。引言字数符合要求。

## 一、电解制氢系统能效瓶颈及整流柜作用

### 1. 电解制氢系统与能耗构成分析

电解水制氢过程的整体能效受到多重环节影响,核心在于电解槽单元本身的理论分解电压、过电位损失以及将交流电能转化为适用于电解的直流电能的整流转换效率。其中,整流环节消耗的能量不容忽视。典型的碱性水电解槽系统主要电气设备包括整流变压器、整流柜和电解槽本体。整流变压器负责电压变换和电气隔离,

整流柜通过晶闸管等电力电子器件将交流电转换为直流电供给电解槽。

### 2. 整流柜参数失配的实际表现与后果

实际工业运行中,整流柜参数与系统实际特性失配带来的问题日益凸显。以某 $500\text{Nm}^3$ 碱性水电解制氢装置为例,其电解槽额定电压314伏,额定电流7350安,设计直流电耗 $\leq 4.5\text{kWh}/\text{Nm}^3$ 。然而实测满负荷工况下电压常高于317伏,直流电耗达 $4.84\text{kWh}/\text{Nm}^3$ 。更严重的情况发生在另一套装置上,电压可超出额定值327伏甚至更高,对应电耗远超 $5.0\text{kWh}/\text{Nm}^3$ 。这种高电压运行首先导致直接的电能损失显著增加,提升氢气生产成本,例如计算表明一个 $500\text{Nm}^3$ 槽年运行因此多耗电超过17万千瓦时。

## 二、整流柜运行参数问题的系统性分析

### 1. 多源数据驱动的精准诊断体系构建

有效识别和定位整流柜参数失配问题,需要构建覆盖整流变压器、整流柜及电解槽的全环节、多维度的数据采集与分析系统。具体实践上,需系统性收集的关键数据包括:整流变压器一次侧/二次侧的交流电压、电流有效值与波形、输入/输出有功功率、无功功率、功率因数、各部位运行温升;整流柜的交流输入电压/电流波形、直流输出电压/电流波形及纹波系数、触发脉冲的时序与占空比、内部各可控硅触发角设定值、限流设定值、换档阈值、功率因数校正角设定;电解槽的总电压、总

电流、各分区电压、电解液温度、氢气/氧气产量、累计直流耗电量等。

## 2. 核心问题的深度论证与根因锁定

在全面数据支撑的基础上，运用工程分析与故障树结合的方法进行深度论证。例如采用5Why分析法追本溯源：为何电解槽电压会高于设定？可能是因为整流输出设定点本身偏高或控制响应超调。为何会出现设定点偏离或超调？可能与整流柜移相控制角范围有关联。移相控制角为何不匹配？可能源自对整流变压器实际短路阻抗或电解槽等效负载阻抗特性变化的不适应。论证聚焦于参数灵敏度高的核心环节，如移相触发控制回路（决定晶闸管导通时序与换相过程）及功率因数校正回路（决定交流侧能量转换效率和设备应力）。

## 3. 待优化关键参数的识别与敏感度评估

基于诊断结论，筛选出对整流系统性能与电解槽运行状态影响最为显著的核心可控参数进行敏感度分析。首先是输出限流设定值，它定义了整流柜允许输出的最大直流电流上限。过高设置可能在大负荷跃变或故障时危及设备安全导致过流保护动作甚至器件损坏；过低设置则会人为限制电解槽的产氢能力上限，牺牲了装置可实现的产能，相当于提高了单位产品的边际能耗。其次是触发控制系统的核心参数移相角范围设定<sup>[1]</sup>。

### 三、整流柜参数精细化优化策略与实践

#### 1. 基于理论模型与仿真的参数优化预研

实施现场参数调整前，必须进行严谨的理论计算与计算机仿真，预测优化效果并指导安全调整区间。这需要依据诊断阶段获得的整流变压器实测等效参数（特别是短路阻抗、等效电阻、励磁特性曲线、损耗数据等）以及电解槽的实际等效负载阻抗特性（可在不同运行电流点下获取电压电流关系曲线拟合得出），结合整流电路的实际拓扑结构（如三相桥式全控、多重化结构等）和选用的控制方式。利用电力电子仿真软件建立完整的整流系统仿真模型，涵盖整流变压器、晶闸管及其驱动保护电路、触发逻辑以及电解槽的等效负载模型。首先在模型上输入当前的整流柜参数设置值，运行仿真观察是否复现出实际系统中存在的电压偏高、纹波大、功率因数低等问题，以验证模型的准确性<sup>[2]</sup>。然后，针对前述识别出的关键参数，如限流值、换挡角范围或具体触发控制策略中的角度变量、无功补偿角或PFC控制算法的增益等核心参数，进行系统地迭代调整尝试。在每一次迭代中，调整一个或多个参数，观察仿真结果中输出直

流电压的稳定性（均值接近目标、波动范围小）、直流输出波形质量（纹波系数降低）、交流输入侧的功率因数提升程度、晶闸管器件承受的峰值电流/电压应力变化情况。

#### 2. 分级协同调整策略的实施

基于理论仿真确定的可调范围和备选参数集，采用“分级优化、小步调整、工况模拟、协同验证”的策略进行现场实施。制定详细的参数调整计划书，明确不同工况下（如低负荷启机、中负荷稳态过渡、满负荷稳定运行）的调整步骤、安全监护措施与预期效果观察点。首先优化输出限流值，在确保设备安全的前提下，适度上调限流设定以满足电解槽额定电流和可能的短时过载需求，充分释放产能潜力；同时，密切关注调整后大电流条件下的关键部件温升和设备稳定性。其次，分阶段调整移相角范围参数，目标在于优化直流输出波形品质与转换效率。这通常采用小幅度渐进修改的方式完成。根据负荷变化的实际需要，逐步缩小移相角度范围或修正触发时序策略，使直流电压平均值更接近电解槽的理想运行点（即额定电压），同时抑制纹波幅值，例如通过优化换相角减少换相压降损失和重叠期影响，降低因开关动作带来的附加损耗，提升系统在稳定运行状态下的整体效率与动态响应能力<sup>[3]</sup>。

#### 3. 标准化效果验证与闭环管理机制

为了确保调整方案的有效性和稳定性，必须建立严格的、基于数据的闭环验证机制，应用PDCA管理方法进行全程跟踪控制。每一次参数调整后，立即在对应工况下组织系统全面的测试验证工作。配备高精度仪器如高性能示波器或高级电能质量分析仪，深入分析交流输入端的三相电流波形畸变率、谐波含量变化；精确测量直流输出电压的纹波系数、波动幅度；记录各档位切换过程中的电流电压瞬时变化曲线。关键效能比对是衡量调整效果的直接依据，精确计算调整前后的整流系统综合效率：采集交流输入电能表的有功功率读数与直流输出侧直流电量计（或通过高精度电表计算瞬时功率）的数据，计算实时整流效率作为核心效能指标；同时，关联氢气流量计数据，重新计算单位标准立方米氢气生产的直流电耗 $\text{kWh/Nm}^3$ 。将测试结果与调整前的基线数据、理论仿真预测值以及预设目标值进行对比分析。若达到或接近目标效果，则冻结当前参数设定，并记录为有效配置；若未达标或出现非预期现象（如电压波动异常加剧、换挡逻辑出错或设备温度异常），则立即回撤调整或进入深度分析环节，找出问题根源可能是指标间相互影

响规律认识不足、参数组合不匹配或工况特殊性未被覆盖，据此修正参数集或调整方向后进行下一轮测试<sup>[4]</sup>。

#### 4. 优化成果的标准化固化与运维能力提升

成功实现参数优化的最终价值体现在成果的应用与持续改进中。因此，必须将优化的经验、标准参数设定值及验证流程制度化融入日常运维体系。第一步是修订或制定新的《整流柜维护运行规程》，在其中明确不同运行状态（特别是额定工况及典型非额定工况）、不同设备配置（如果存在系列差异）下的核心参数设定标准值表、推荐的参数微调指导原则、进行参数调整时必须遵循的标准化作业卡，包括详细的操作步骤、测试方法、安全措施、数据记录要求及异常情况应对预案。第二步是建立自动化与可视化的设备状态监控体系。在分布式控制系统或集中监控平台DCS中，需要新增或完善对整流系统关键运行参数的实时监控与预警功能。重点对整流效率、交流输入功率因数、直流输出电压与电流的有效值及稳定性范围（波动幅度与频率）、纹波系数、电解槽单槽电压值、实时直流电耗 $\text{kWh}/\text{Nm}^3$ 等关键性能指标设置合理的运行区间报警限值（预警值、报警值）和性能考核限值。将以上数据整合生成直观的数据看板，便于运行人员实时掌握设备状态并即时识别出性能劣化趋势或参数偏移风险。第三步是知识传递与人员能力建设。组织专项技术培训，向运行班组成员和检修人员系统讲解本次优化的原理、参数间相互作用关系、核心控制逻辑及调整方法要点，确保维护团队具备必要的知识技能以理解和执行优化后的规程<sup>[5]</sup>。

#### 5. 节能降耗与安全保障的实际效果分析

上述系统性参数优化策略在 $500\text{Nm}^3$ 电解槽实施后取得显著成效。最核心的能耗指标直流电耗由优化前的 $4.84\text{kWh}/\text{Nm}^3$ 降至 $4.66\text{kWh}/\text{Nm}^3$ ，降幅高达3.7%。以一个电解槽按照设计负荷满产运行时间计算，仅此一槽的年节电量便超过17.2万千瓦时，经济效益显著。同时，电解槽的稳定运行电压在满负荷7350安培工况下，从异常升高的317伏特稳步下降并稳定在304伏左右，不仅远低于原设定报警阈值317伏，更显著低于电解槽铭牌额定电压314伏特，压降达13伏特，电压波动范围也显著收

敛。电压水平的优化对于设备安全具有革命性意义。将运行电压稳定控制在额定值之下，从根本上消除了因持续过压运行引发的系列风险：电解槽内部电极加速老化失效、槽框内部密封材料绝缘性能劣化导致短路风险显著降低；槽体及其连接部件的电化学腐蚀速率得以延缓；电解小室内副反应受到抑制，气体纯度得以保障<sup>[6]</sup>。由于电压降低且运行状态更平稳，电解槽及相关电气设备如整流柜的可控硅、电容、连接排等承受的电热应力水平显著减小。例如1#B槽电压由327伏降到309.99伏，2#槽电压由320伏降至312.18伏，应力缓解明显。预计这将有效降低关键功率器件的平均故障率，使计划性维修和零部件更换周期延长约15%~20%，设备可用率提高，进一步节约了维护成本并提升了生产的连续性。

#### 结束语

本文以电解水制氢系统能耗偏高与运行电压超限的实践问题为切入点，深入剖析了整流柜关键运行参数（限流值、换挡角、补偿角）对系统整体能效及设备安全性的决定性影响。研究论证了建立“整流变-整流柜-电解槽”三位一体数据链分析体系的重要性，为精准识别参数适配偏差提供了科学依据。

#### 参考文献

- [1] 戎琳, 林婵娟, 孙祖勇, 等. 大功率绿电制氢电源装置研究[J]. 电力电子技术, 2024, 58(6): 24-27.
- [2] 李海鹏. 基于电压检测型SPR的电解制氢电源谐波补偿控制策略研究[J]. 仪器仪表与分析监测, 2023(4): 7-15.
- [3] 王成悦, 江才. 制氢整流电源背靠背对拖实验方案的研究[J]. 通信电源技术, 2024, 41(7): 133-136.
- [4] 王辉, 等. 千方级电解水制氢整流电源设计与分析[J]. 设备管理与维修, 2024(23): 8-12.
- [5] 胡尚举, 郝雅丽. 制氢机可控硅整流装置自动化系统改进[J]. 山西冶金, 2023, 46(2): 133-135.
- [6] 李阳, 赵嘉驹, 史铁, 等. 新能源制氢系统及电源研究现状[J]. 电工技术, 2024(S01): 453-456.