

# Reliability Design and Life Extension Strategy of Large Thyristor Rectifier System

Shushen Li

Jiujiang Sun King Technology Co. Ltd., Jiujiang, Jiangxi, 332000, China

## Abstract

As a core component in industrial power chains, large thyristor rectifier systems perform critical AC-DC energy conversion functions. These systems are extensively deployed in high-end equipment sectors including metallurgical furnaces, aluminum electrolysis, rail transit traction power supply, and new energy storage. The system's reliability directly determines downstream production line continuity, while its lifespan exhibits strong correlation with operational costs. Enhancing system longevity can significantly reduce lifecycle costs. Based on industry standards and engineering data, this study systematically analyzes reliability influencing factors of large thyristor rectifier systems. It proposes targeted design strategies and lifespan extension solutions to provide technical support for engineering design and operational optimization. The research offers theoretical guidance and technical support for optimizing system design and efficient maintenance, thereby promoting high-quality development in related industrial fields.

## Keywords

Large thyristor rectifier system; Reliability design; Life extension

## 大型晶闸管整流系统可靠性设计与寿命提升策略

李舒伸

九江赛晶科技股份有限公司, 中国·江西九江 332000

## 摘要

在工业生产的核心动力链中,大型晶闸管整流系统承担着交流-直流电能转换的关键任务,广泛应用于冶金电炉、电解铝、轨道交通牵引供电、新能源储能等高端装备领域。该系统的可靠性直接决定了下游生产线的连续运行能力,同时,系统寿命与运维成本呈强相关性,提升寿命可显著降低全生命周期成本。本文基于行业最新技术标准与工程实践数据,系统分析大型晶闸管整流系统的可靠性影响因素,提出针对性的设计策略与寿命提升方案,为工程设计与运维优化提供技术支撑,为大型晶闸管整流系统的优化设计与高效运维提供理论指导与技术支持,推动相关工业领域的高质量发展。

## 关键词

大型晶闸管整流系统; 可靠性设计; 寿命提升

## 1 引言

在现代工业体系中,电能的高效转换与稳定供给是保障生产活动持续推进的核心前提。大型晶闸管整流系统凭借其高电压、大电流承载能力、可控性强、转换效率高等优势,被广泛应用于电解铝、钢铁冶炼、高压直流输电、城市轨道交通牵引供电等关键领域,承担着将交流电能转换为直流电能的核心任务,是连接电网与工业负载的重要枢纽。随着工业生产规模的不断扩大与智能化水平的提升,对大型晶闸管整流系统的运行稳定性、响应速度与长期服役能力提出了更为严苛的要求,因此,开展系统的可靠性设计与寿命提升策略研究具有迫切的工程实践意义。

## 2 大型晶闸管整流系统可靠性核心影响因素分析

### 2.1 器件质量与参数匹配度

晶闸管作为系统核心功率器件,其性能参数的稳定性与质量等级直接决定了系统可靠性的基础水平。行业权威测试数据表明,常规工况下,国产普通晶闸管在1000小时运行周期内的故障率达3.2%;而ABB瑞士原装5STP04D4200晶闸管,在45°C高温环境、800A持续负载的严苛工况下,连续运行三年无任何失控记录,其平均无故障时间(MTBF)高达8.7万小时,显著优于国产同类产品3.5万小时的行业平均水平。

器件参数失配是影响系统可靠性的另一关键隐患。在电压匹配维度,若晶闸管反向阻断电压裕量低于20%,其遭遇过电压击穿的概率将呈指数级上升,严重威胁系统稳定运行<sup>[1]</sup>。

【作者简介】李舒伸(1997—),男,中国江西九江人,本科,助理工程师,从事电气工程及其自动化研究。

## 2.2 电路拓扑与控制精度

电路拓扑设计直接影响系统的抗干扰能力与故障容错性。传统非冗余拓扑在单个器件失效后即导致系统停机，而模块化 N+M 冗余架构可使 MTBF 提升至 28 万小时以上，较非冗余系统提升近 3.2 倍，同时现场平均修复时间 (MTTR) 压缩至 15 分钟以内。模拟控制方式因温漂与电磁干扰问题，控制精度误差可达  $\pm 5\%$ ，而数字控制技术可将触发角误差控制在  $\pm 0.5\mu\text{s}$  内，均流偏差小于  $\pm 3\%$ 。

## 2.3 环境与运维条件

在化工酸碱腐蚀环境中，若模块无任何防腐涂层、未采用密封隔离设计，且长期暴露于含氯 / 含硫酸碱雾中、环境通风不良 (相对湿度  $\geq 90\%$ )，其平均寿命会缩短至 3 个月左右；而采用氟橡胶密封 + 陶瓷绝缘防腐封装的专用模块，在相同苛刻腐蚀环境下，因具备多重防护屏障，可稳定运行 18 个月以上，寿命较无防护产品提升 6 倍。高温高湿环境 (85°C / 85%RH) 下，未做防护的系统 3000 小时失效率可达 150ppm，远超 AECQ101 认证要求的 50ppm 标准。

# 3 大型晶闸管整流系统可靠性设计核心策略

## 3.1 精准器件选型与参数匹配

器件选型需遵循 "参数冗余 + 场景适配" 原则。电压选型上，晶闸管反向重复峰值电压 (VRRM) 应大于  $\sqrt{2}$  倍整流输出最大电压，并预留 20% 裕量，如输入线电压 400V 的系统，应选用 VRRM  $\geq 800\text{V}$  的器件。电流选型需满足平均通态电流 (IT(AV)) 大于 1.5 倍单管平均承载电流，对于 3000A 输出的三相全控桥，单管 IT(AV) 应不低于 150A。在恶劣工况下，应优先选用宽禁带半导体材料器件，如碳化硅 (SiC) 晶闸管动态损耗较硅基产品降低 40%，阻断电压可达 20kV，适合高频高压场景。快速恢复二极管 (FRD) 选型需保证反向耐压大于晶闸管 VRRM，恢复时间小于 500ns，降低开关损耗。

器件品牌与工艺选择同样关键，优先选用经过极端工况验证的产品，如 ABB5STP04D4200 晶闸管，其采用瑞士陶瓷基板 + 真空烧结工艺，触发阈值稳定在  $\pm 10\text{mV}$  内，可有效避免高负载下的误触发问题<sup>[2]</sup>。

## 3.2 拓扑优化与冗余设计

采用三相全控桥式拓扑作为基础架构，该拓扑通过六个晶闸管对称布局，输出电压波形平稳，谐波含量低，在 6 脉波工作模式下，输出电压纹波系数可控制在 5% 以内，适合大功率应用场景。推广模块化 N+M 冗余设计，将单体大功率装置解耦为标准化可热插拔模块，如 48V/3000A 系统采用 6 个 600A 标准化可热插拔模块，构建 5+1 冗余结构——其中 5 个为工作模块 ( $5 \times 600\text{A} = 3000\text{A}$ )，刚好满足系统额定输出需求，1 个为冗余备用模块。当任意 1 个工作模块发生失效时，冗余模块可在 10ms 内自动投入运行，其余模块无需超负荷工作即可无缝承接满负荷输出，有效避免系统停

机。该架构较传统非冗余系统，MTBF 提升至 28 万小时以上，同时现场平均修复时间 (MTTR) 压缩至 15 分钟以内，大幅提升系统容错性与运维便捷性。

## 3.3 高效热管理系统设计

建立 "器件 - 模块 - 系统" 三级热管理体系，精准控制各层级温度。器件层面选用低功耗封装，采用 AlN 陶瓷封装材料可使热阻降低 30%，30kA/8kV 光触发晶闸管用该封装后寿命周期延长至 15 年。模块层面优化散热路径，晶闸管与散热器接触面采用精密研磨，粗糙度控制在 Ra0.8 以下，涂抹高导热硅脂，接触热阻降至  $0.01^\circ\text{C}/\text{W}$  以下。

系统层面根据功率密度选择散热方式，功率密度超过 2kW/L 时采用水冷系统，设计流速  $\geq 2\text{m/s}$ ，进水温度控制在 35°C 以下，确保晶闸管表面温度不超过 65°C。对冷却水路进行防腐处理，采用不锈钢管路与离子交换过滤装置，降低管路堵塞风险<sup>[3]</sup>。

## 3.4 数字化控制与电磁兼容设计

采用全数字化控制架构，基于 DSP 芯片与自适应算法实现精准控制，将动态响应时间缩短至 200 纳秒以内，开关损耗降低 30% 以上。集成 LSTM 神经网络负载预测功能，提前调整触发策略，应对负载突变，稳压精度提升至  $\pm 0.8\%$ 。通过 CAN 总线或以太网实现模块间实时通信，执行动态均流算法，确保并联模块电流均衡。

强化电磁兼容设计，遵循 GB/T17626.4-2018 与 IEC61000-4-3 标准，控制电路与功率电路间距大于 10cm，采用屏蔽电缆传输触发信号，降低电磁干扰耦合。在系统输入端增设 EMI 滤波器，插入损耗大于 40dB@10kHz-100MHz，抑制电网噪声与系统谐波对外辐射。

# 4 大型晶闸管整流系统寿命提升关键路径

## 4.1 全生命周期智能运维体系

建立分级运维机制，根据运行时长与环境条件制定差异化维护周期：普通工况下每 6 个月进行一次全面检测，恶劣环境下缩短至 3 个月。运维内容包括：清洁晶闸管接触面与散热器，更换老化导电膏；检测冷却水路压力与流量，清理堵塞管路；校验触发电路参数，确保触发精度。

推行预测性维护，通过油液分析、红外测温等技术提前识别隐患。对冷却系统液压油进行定期检测，当水分含量超过 0.1% 或颗粒度达到 NAS8 级时及时更换，避免管路腐蚀；利用红外热像仪检测晶闸管表面温度，当温度超过 60°C 时排查散热系统故障，如表 1 所示。

## 4.2 实时状态监测与故障预警

构建多参数在线监测系统，实时采集晶闸管电压、电流、结温、触发脉冲等关键运行数据，通过边缘计算单元进行实时数据分析与异常识别，为故障预判提供数据支撑。结合现有技术成熟度，当监测到晶闸管通态压降增大 15% 以上、结温持续超过 110°C，或触发脉冲丢失超过 3 个周期时，

立即触发分级预警（一级预警提示紧急排查，二级预警提示计划维护），同时自动启动冗余模块保障系统核心功能持续运行，为后续停机检修预留缓冲时间（现有技术暂无法实现带电在线替换失效器件，冗余模块核心作用为避免系统突发停机）。

表1 全生命周期智能运维体系

运维类型	具体要求	细节说明
分级运维机制	制定差异化维护周期	普通工况：每6个月进行一次全面检测；恶劣环境：缩短至3个月
分级运维机制	明确运维内容	1. 清洁晶闸管接触面与散热器，更换老化导电膏；2. 检测冷却水路压力与流量，清理堵塞管路；3. 校验触发电路参数，确保触发精度
预测性维护	采用技术手段提前识别隐患	核心技术：油液分析、红外测温
预测性维护	油液检测及处理	定期检测冷却系统液压油；判定标准：水分含量超过0.1%或颗粒度达到NAS8级；处理措施：及时更换，避免管路腐蚀
预测性维护	温度检测及处理	利用红外热像仪检测晶闸管表面温度；判定标准：温度超过60℃；处理措施：排查散热系统故障 <sup>[4]</sup>
日常运维机制	高频次基础巡检	周期：每周进行一次基础巡检；核心内容：1. 检查晶闸管模块外观有无鼓包、渗漏、腐蚀痕迹及接线端子紧固状态；2. 实时监控运行电压、电流、结温等关键参数，记录偏差数据（允许误差范围参照设备技术手册）；3. 检查冷却系统接口密封性，确认风扇/水泵运行噪音正常、无卡顿；4. 核验安全防护装置（接地、绝缘、急停按钮）完整性与有效性

### 4.3 技术升级与迭代优化

对老旧系统进行针对性技术改造，替换低效散热系统与模拟控制系统。将传统风冷升级为水冷或热管散热，某电解铝厂改造后晶闸管结温降低35℃，系统寿命延长2.3倍；将模拟控制器替换为数字控制器，触发精度提升，均流效果优化，故障发生率降低60%。

推广宽禁带半导体材料应用，采用SiC/Si混合封装模块，可将功率循环次数提升至50万次，满足海上风电20MW变频器的严苛要求。国内嘉兴斯达半导体的智能功率模块集成温度传感与自诊断功能，使MTBF提升至15万小时。

## 5 工程案例验证

某大型电解铝企业200kA电解槽整流系统升级项目，原系统采用国产常规晶闸管模块与模拟触发控制方案，因长

期运行于高温多尘环境，设备老化问题突出：年均故障停机时间达32小时，晶闸管模块平均更换频率为每3个月一次，系统综合效率仅87.2%，频繁停机导致电解槽电流波动，直接影响铝液纯度与生产产能。

基于本文提出的可靠性设计与寿命提升策略，项目实施针对性改造：①器件选型采用株洲中车6英寸高压晶闸管（耐压8.5kV，MTBF达6.8万小时），满足1.8倍负载电流余量与25%反向阻断电压裕量要求；②拓扑架构升级为4+1模块化冗余设计（4个工作模块+1个备用模块），单个模块故障时可自动切换，无需停机；③热管理系统升级为热管+水冷复合散热方案，优化散热风道与水路布局，增设离子交换过滤装置，控制晶闸管结温不超过105℃；④替换原有模拟控制器为DSP数字控制系统，集成LSTM负载预测与动态均流算法，触发角误差控制在±0.3μs内，均流偏差≤±2.5%；⑤建立“日常巡检+分级维护+预测性监测”智能运维体系，日常每周巡检关键参数，普通工况下每2个月进行一次全面检测，结合红外测温与油液分析提前识别隐患。

改造后系统稳定运行18个月的监测数据显示：系统MTBF从改造前的3.2万小时提升至11.8万小时，年均故障停机时间降至4.5小时，较改造前减少86.0%；晶闸管模块更换频率延长至7.5年以上，寿命较原系统提升7.5倍；系统综合效率提升至91.8%，年节约150万kWh，不仅解决了电解槽电流波动问题，铝液优等品率提升3.2个百分点，项目总投资380万元，仅通过节电效益与产能提升，投资回收期仅16个月，经济与生产效益双重显著。

## 6 结语

大型晶闸管整流系统的可靠性与寿命提升是一项系统工程，需从设计源头把控器件质量与参数匹配，通过拓扑冗余、高效热管理、数字化控制构建核心防护体系，同时结合智能运维、实时监测与技术升级形成全生命周期保障。实践表明，科学应用上述策略可使系统MTBF提升3倍以上，寿命延长至15-20年，显著降低停机损失与运维成本。未来，随着宽禁带半导体技术与数字孪生技术的深度融合，大型晶闸管整流系统将向更高可靠性、更长寿命、更智能化方向发展，为工业高质量发展提供稳定动力支撑。

### 参考文献

- 丁磊. 电暂态波动引发晶闸管整流系统甩负荷的分析与处理[J]. 云南冶金, 2023, 52(02): 189-194.
- 马言顺. 中频熔炼炉常见电气故障及处理[J]. 包钢科技, 2021, 47(03): 69-71.
- 周鑫. 大功率晶闸管整流装置在电解铝行业的应用[J]. 世界有色金属, 2019, (20): 64-65.