某核电站充电器纹波超限导致跳闸的根本原因分析

谢文彬 陈 伟 李浩哲 池波澜 南 杨
中广核核电运营有限公司 广东 深圳 518000

摘 要：2023年2月5日，某核电站3号机组大修期间一号110V直流系统2#充电器跳闸停运。本文通过梳理事件经过、查询历史信息与设计资料，从直接原因与根本原因两个层级开展溯源分析。经现场排查与历史数据对比确认，跳闸直接原因为蓄电池恢复充电初期大电流限流工况下，充电器控制卡件PI调节参数与现场工况匹配不足，导致输出电压纹波超限触发保护动作；根本原因在于充电器纹波保护定值设定为额定电压的0.5%，低于设计规范《RCC-ED2330》规定的2.5%要求，定值过于严苛。本文据此提出了优化建议与维修策略。

关键词：核电站；充电器；纹波；跳闸；根本原因分析

引言：核电厂直流电源系统承担着为控制、保护、测量及通信等关键设备不间断供电的任务，其运行稳定性直接关系核电机组安全。某核电站3号机组在蓄电池年度放电试验后的恢复充电过程中，充电器因纹波超限保护动作跳闸。纹波是直流电压中叠加的交流分量，超过一定限度可能对下游精密负荷产生干扰，但保护定值设定需兼顾设备安全与运行可靠性。本文对本次事件全过程进行追溯，从工作原理、事件经过、直接原因和根本原因四个维度展开分析，旨在查明故障根源并提出改进措施，为同类型设备运维管理提供参考。

1 充电器工作原理与技术参数

1.1 设备基本参数

本次故障充电器为德国北宁公司生产，型号D380G110/1200BWrug-Dt6，是核岛直流电源系统核心设备。额定输入380V交流，输出110V直流，最大电流1200A，承担蓄电池组充电功能。具备过压、欠压、过流及纹波超限保护，其中纹波超限保护是其特色配置。设备每20ms采集6个波形周期，当输出电压纹波有效值超过额定电压0.5%时立即跳闸停机，防止交流纹波分量干扰下游精密直流负荷。该保护旨在保障核岛仪控、保护等敏感负荷获得纯净直流电源，避免纹波过大引发控制信号畸变或保护误动。

1.2 控制卡件的功能与关键元件

充电器电压调节、限流控制及动态稳压由202/302CT[T1.1S]控制卡件完成，是其核心控制单元。卡件内部采用运放组成的比例积分闭环调节系统，通过对输出电压和电流实时采样反馈，精确控制整流桥触发脉冲。PI调节器性能直接决定充电器动态响应特性，其调节品质高度依赖板载电容参数匹配。C5电容平滑输入电压、抑制扰动；C7电容调节输出响应特性、影响PI时间常数；C10电容平滑运放输入电流、稳定控制基准。上述电容参数匹配性决定充电器在限流、恒压及浮充等工况下的调节品质与稳定性[1]。

1.3 纹波产生的机理与保护逻辑

直流充电器整流过程中，因整流器件周期性切换，输出电压不可避免地含有交流分量即纹波。正常时PI调节器将纹波抑制在较低水平。但当蓄电池深度放电后大电流限流充电时，为维持恒定限流值，控制卡件需持续高频调节输出电压以跟踪蓄电池端电压回升，频繁调节使PWM脉宽不断变化，整流输出电压交流分量增大，直流母线纹波幅值显著上升。当纹波RMS值持续超出预设定值时触发保护，该保护每20ms采集6个波形周期计算RMS值，一旦超限即瞬时跳闸停机并报警。

2 事件经过与故障排查

2.1 故障发生过程

2023年2月4日23时，某核电站3号机组一号110V直流系统铅酸蓄电池年度放电试验结束。该试验旨在检验蓄电池组实际容量是否满足设计要求。试验结束后，按运行规程，两台直流充电器同步投入，由2#充电器单独全额带载，对深度放电后的蓄电池组进行恢复充电。蓄电池深度放电后端电压降低、内阻增大，充电初期电流极大，充电器需工作在限流模式以保护设备。2月5日00时28分，2#充电器持续限流充电1.5小时后突发跳闸，主控触发故障报警，系统自动切换至1#充电器独立带载。1#充电器运行平稳，0.5小时后充电转入浮充模式，全程无异常，表明跳闸问题不在蓄电池本身。

2.2 现场排查与故障定位

2月5日01时，维修人员到达现场排查，调取充电器故障日志和报警记录，面板指示灯指示跳闸原因为纹波超限保护动作（图1、图2）。为进一步验证，查阅KIC系

统历史趋势曲线（图3），清晰显示：2#充电器全额带载进入限流充电后，蓄电池充电电流呈大幅锯齿波动，直流母线电压剧烈振荡，输出电压叠加大量交流杂波，纹波幅值持续升高，最终超出保护定值，触发纹波超限保护导致跳闸。进一步分析排除了过压、过流、过热等其他保护因素，确认故障原因锁定为纹波超限，跳闸前无其他异常报警，环境与输入电源均正常。

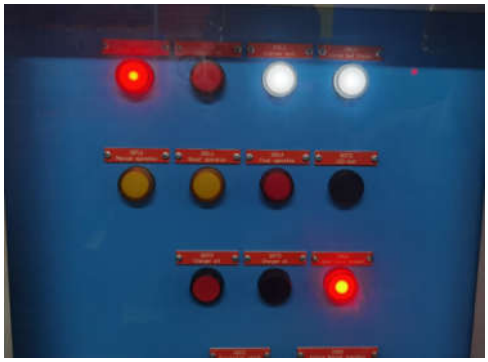


图1 故障现场指示灯情况

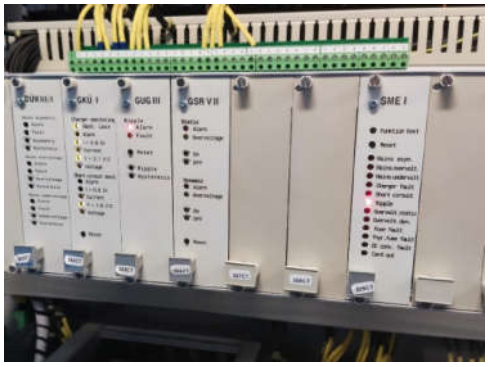


图2 现场控制卡件报警灯记录

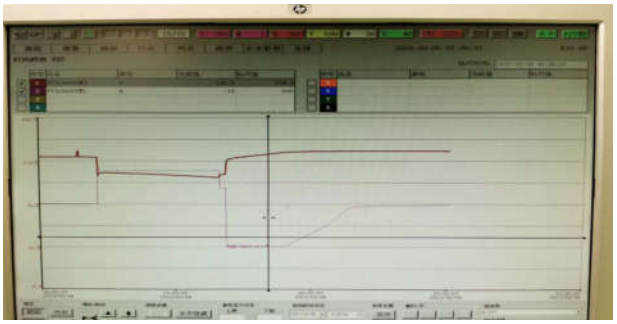


图3 故障期间KIC系统交互界面趋势

通过对趋势曲线的进一步分析，维修人员确认了跳闸瞬间的电压、电流及纹波参数特征，排除了过压、过流、过热等其他可能导致跳闸的保护因素，将故障原因锁定在纹波超限这一特定保护类别[2]。排查过程中还发现，该充电器在跳闸前并未出现任何其他异常报警，设备运行环境温度、湿度均在正常范围，输入电源质量也符合标准要求，进一步印证了跳闸是由于充电器自身输出特性异常所致。

2.3 历史情况调查与设计资料复核

维修人员在排查过程中调查了该核电站的历史调试记录，发现该问题并非首次出现。在核电站调试期间，核岛直流系统蓄电池在核容试验后的均充限流阶段，充电器曾多次因其输出的直流电压中纹波含量过高而导致纹波保护动作跳闸。该问题的本质在于：蓄电池均衡充电初期，充电器工作在限流充电状态，202/302CT[T1.1S]控制卡件在限流充电期间需要频繁调节输出电压以维持恒定的限流值，这一过程中直流电压的交流分量迅速增大，超过纹波保护定值后充电器停运（见图4）。

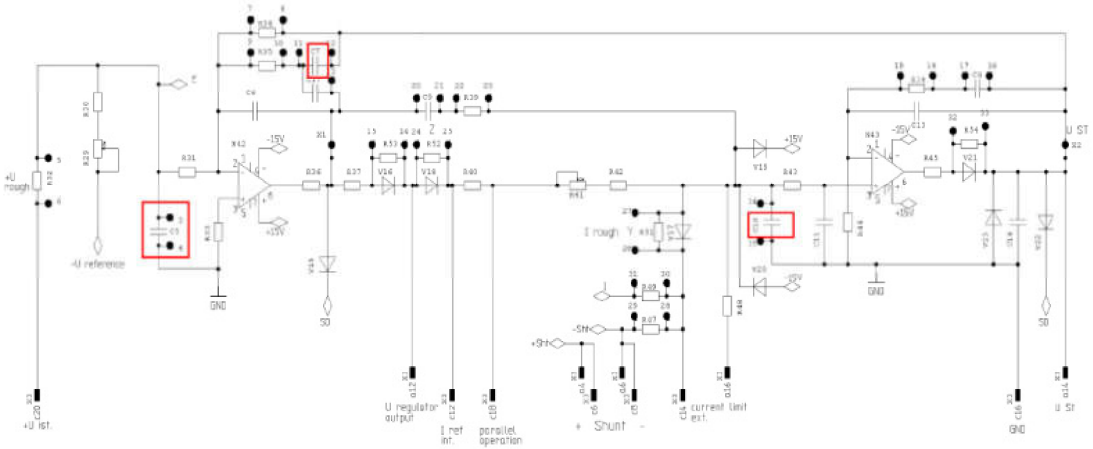


图4 202/302CT[T1.1S]控制卡件电路图

经查阅该核电站直流系统设计手册，发现对于直流系统纹波含量均未作明确要求，以3号机组一号110V直流系统为例，系统设计手册中对纹波保护并无强制规定。进一步追溯设计源头，该核电站直流系统的设计参

考准则为《压水堆核电站核岛电气设备设计和建造规则D2330》（RCC-E D2330），该规范对直流系统纹波参数的要求如图5所示。

48V 系统	电压 峰一峰波动系数 有效波动比	39~53V ≤3% ≤1.5%	39~55V ≤3% ≤1.5%
125V 系统	电压 峰一峰波动系数 有效波动比	100~135V ≤5% ≤2.5%	100~138V ≤5% ≤2.5%
230V 系统	电压 峰一峰波动系数 有效波动比	185~250V ≤5% ≤2.5%	180~255V ≤5% ≤2.5%

图5 《RCC-E D2330》直流系统设计规范参数

该核电站核岛直流系统充电器纹波保护定值设定为额定电压的0.5%，而设计参考文件《RCC-E D2330》中规定的110/220V直流系统纹波报警值为额定电压的2.5%，48V系统为额定电压的1.5%。充电器实际保护定值仅为设计规范推荐值的五分之一，定值设置过于严苛。维修人员调研对比了多个核电基地直流系统充电器纹波超限保护的配置方式，发现只有极少数核电站充电器配置了纹波保护跳闸功能，其余基地均未配置纹波保护跳闸功能或仅配置了纹波报警功能，进一步说明了该基地保护定值设置的特殊性和严苛性。

2.4 故障原因的综合判定

综合判定故障原因如下。直接原因：蓄电池大电流限流充电初期，控制卡件为维持恒定限流值需高频连续调节电压，PI参数与现场工况匹配不足，系统稳定性变差，纹波快速增大超出0.5%定值，触发保护跳闸。促成因素：纹波超限保护为直接跳闸停机，未给运行人员预留干预时间。根本原因：纹波保护定值设为额定电压0.5%，仅为《RCC-E D2330》规定值2.5%的五分之一，定值过于严苛，缺乏合理设计依据与运行裕度。

3 解决方案与改进措施

3.1 应急处理与设备恢复

2023年2月5日20时10分，维修人员新增工作票对2#充电器故障的202/302CT[T1.1S]限流控制卡件进行更换，严格执行断电隔离、卡件拆装、参数校验等规程。更换完成后依次开展空载输出电压测试、负载调节特性测试、限流功能验证及纹波保护功能测试，所有试验合格、功能正常。设备重启后持续跟踪观察168小时，运行稳定无异常。应急处理验证了卡件更换方案的有效性，也证明原卡件在PI调节参数匹配方面确实存在问题[3]。

3.2 根本解决措施

从根本上解决问题需对纹波保护定值合理调整。经与厂家澄清，0.5%定值是厂家对采购技术规范的理解偏差，并非设计强制要求。经技术评估，制定维修策略：纹波保护定值按《RCC-E D2330》规范220/110V系统额定电压2.5%、48V系统1.5%设定，避免严苛定值导致不必要跳闸。对已投运充电器在后续检修中逐步完成定值调整；对新采购设备在技术规范书中明确设定要求；同时在运维管理制度中增加保护定值合理性定期评估程序。

4 结论与启示

本次充电器跳闸事件的直接原因为大电流限流充电工况下控制卡件高频调节导致纹波超限，促成因素为保护方式为直接跳闸停机，根本原因为纹波保护定值0.5%远低于规范要求的2.5%。事件提示运维人员：保护定值设置应在设备安全与运行可用性之间寻求合理平衡；采购阶段技术规范书应科学合理，避免以偏离设计规范的最高性能指标作为验收依据；运行经验反馈体系应覆盖保护定值合理性评估[4]。深入理解设备控制逻辑、科学设定保护参数、持续积累运行经验，是保障核电厂直流电源系统长期安全稳定运行的重要基础。

结束语

核电厂直流电源系统承载着为仪控、保护等关键设备供电的重要使命，其运行可靠性直接关系到核电机组安全稳定。本文通过对某核电站充电器纹波超限跳闸事件的全过程溯源，查明直接原因与根本原因，揭示纹波保护定值过于严苛是设备频繁跳闸的深层根源。保护定值设定须在设备安全与运行可用性间寻求合理平衡，过度追求高性能指标反而可能降低可靠性。事件提示运维人员，设备全生命周期中保护定值的合理性应持续关注，采购阶段技术规范编制、运行阶段参数核实均应纳入规范化管理，所提改进措施已在后续运维中逐步应用，可为同类型设备运维提供参考。

参考文献

[1]于艇,刘晨,杜冰心.核电厂直流控制棒驱动机构电源系统绝缘监测问题仿真分析[J].山东工业技术,2023(5):82-88.

[2]刘爱芬.国内主要核电厂核岛直流及交流不间断电源系统研究[J].电工技术,2024(13):206-209.

[3]余学良.核电厂智能电气设备状态监测与故障诊断技术研究[J].中国设备工程,2025(z1):186-189.

[4]卢东斌,俞翔,黄志岭,等.高压直流输电系统故障电流控制策略及其应用[J]. 电力系统自动化,2025,49(16):197-207.