

某核电厂高频电源模块异常短路故障的根本原因分析

李浩哲 牛东元 韦 晓 池波澜 谢文彬

中广核核电运营有限公司 广东 深圳 518000

摘 要: 2022年,某核电厂直流电源系统充电器的充电模块在蓄电池组放电后的充电阶段突然出现短路故障。经过现场工程师的细致排查和深入分析,最终确定了根本原因为整流桥中功率模块D1故障。本文结合该型号充电器设备特性、工作原理、维护手册和现场检修情况对该故障现象进行了根本原因分析。

关键词: 充电器;短路故障;整流桥;功率模块

引言: 2022年,某核电厂直流系统蓄电池年度放电阶段结束后,投运充电器对蓄电池充电过程中,2#充电器的充电模块203AN故障。维护人员发现,本次故障是由充电器内部模块异常导致的。后文将浅析故障成因并浅谈维修策略。

1 工作原理

该直流系统充电器生产厂家均为许继电源有限公司,许继充电器采用模块化结构,N+1冗余方式设计,充电模块之间并联运行。充电模块通过串行总线(485通讯)接受集中监控器的监控,主要控制充电模块的开/关机、均/浮充转换、输出电压以及模块之间的均流^[1]。

直流系统共有两台充电器,每台充电器有5个充电模块,型号为ZZG23A-50110,单个模块输出标称直流电压

为110V,额定电流为50A。ZZG23A-50110型高频开关电源模块采用全桥移相软开关技术。其工作原理是:四个主功率开关管的驱动脉冲为占空比不变($D = 50\%$)的固定频率脉冲。其中一个桥臂功率开关管的驱动脉冲的相位固定不变,另一个桥臂功率开关管的驱动脉冲的相位是可调的。通过调节驱动脉冲的相位,来调节直流输出电压^[2]。

三相交流电输入后,先经EMI滤波,再经三相全波整流变成高压直流电,经全桥移相逆变、整流为50kHz左右的脉冲电压波,经滤波后输出110V的直流电,并在输出端进行电压电流信号采样,反馈至全桥移相控制单元和信号处理单元,通过与稳压值和限流值比较,调整全桥移相部分电压的输出,进而调整最终DC输出。其原理如下图1所示

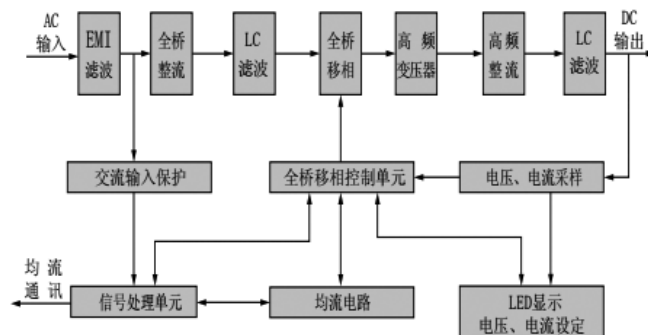


图1 充电模块原理图

系统正常运行时,充电器为下游负载供电并且对蓄电池组进行浮充电^[3],当蓄电池亏电,充电电流大于等于蓄电池充电限流值时,集中监控器自动调节充电模块的输出限流点,通过降低输出电压使蓄电池充电电流稳定在限流值范围内,进入限流运行状态;单个故障模块不影响其余充电模块的正常均流运行。

2 事件过程及原因分析

2022年,某核电厂直流系统蓄电池年度放电阶段结束后,投运充电器对蓄电池充电过程中,2#充电器的充

电模块203AN故障过热。

对故障模块进行解体检查,发现高频整流卡件交流输入印刷导线部分基本被烧毁,电阻电容器件本体形态基本完好,排除电阻电容为故障点;电连接部位均紧固无松动,排除因接触不良导致过热的可能;功率模块D1(位于卡件背面和风冷通道之间)的1、3号端子(图2红框)过热情况比较严重,端子1的金属引脚已经断裂,所以初步判断故障点在D1的1、3端子。



图2 故障卡件图

根据高频整流部分原理图（图3），测量D1的1-2和3-4之间正反向均导通，D2正常。D1内部两个二极管均击穿短路，导致交流进线X1和X2短路，短路电流导致D1内部以及整个进线回路部分产生大量热量，卡件烧毁。所以，根据对203AN进行解体检查，可以判断故障的直接原因为：功率模块D1击穿短路。

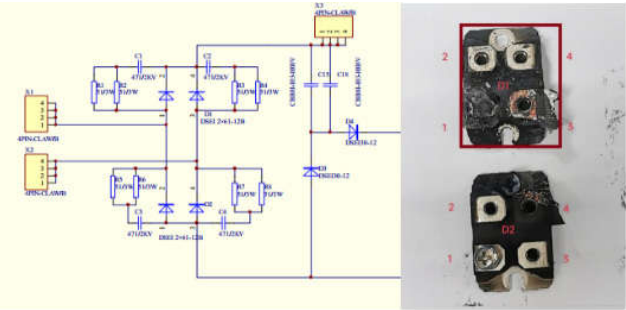


图3 高频整流原理图

维护人员查询系统参数趋势曲线，按时序排列如下所示：

2022年9月1日21时51分，蓄电池放电阶段工作结束，此时两台充电器处于停运状态，蓄电池组单独为下游负载供电，电流为9.5A。

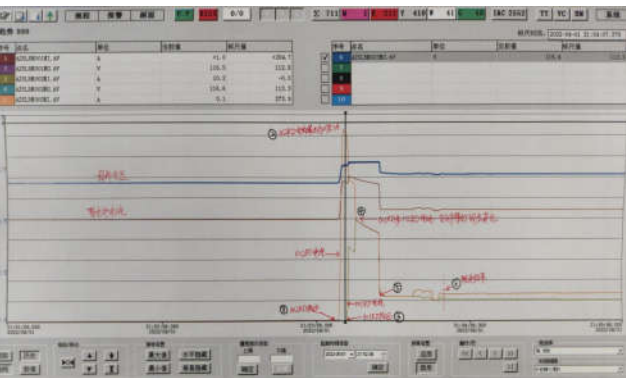


图4 参数趋势图-1

- （1）21时54分04秒，工作负责人投运2#充电器，蓄电池组端电压较低，故2#充电器电流从0开始迅速上升；
- （2）21时54分06秒，2#充电器电流升至最大值278.1A（蓄电池充电限流值60A），随后开始下降；
- （3）21时54分07秒，工作负责人投运1#充电器，此时2#充电器电流为273.9A且持续下降，1#充电器分摊负

载，电流开始上升；

（4）21时54分11秒，1#充电器和2#充电器电流基本一致，分别为148.1A和148.6A，此后两台充电器电流在限流作用下继续下降；

（5）21时54分20秒，1#充电器和2#充电器电流均为35.3A；

（6）21时54分41秒，1#充电器和2#充电器在小范围限流调整后，电流开始稳定，分别为30.7A和42.4A，2#充电器由于电压略高，所以额外承担蓄电池以外其他负荷的电流。

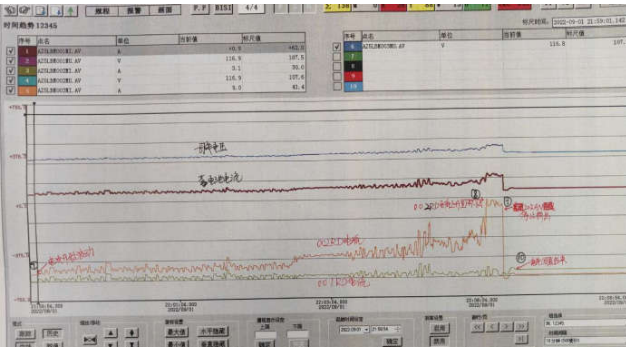


图5 参数趋势图-2

（7）21时59分01秒，2#充电器电流开始小范围波动，1#充电器电流跟随2#充电器波动；

（8）22时06分30秒，2#充电器电流波动增大到147.3A；

（9）22时06分45秒，配电盘集中监控器触发“2#整流器模块3故障”，2#充电器总电流从最大值147.3A瞬间下降至30A以下，203AN电压逐步下降至70V左右，203AN内部出现剧烈放电现象，工作负责人关闭故障模块203AN开关；

（10）22时06分59秒，电流微调结束，充电器电流分别为38.4A和30.6A，203AN故障停止输出后，1#充电器由于电压略高，所以额外承担蓄电池以外其他负荷的电流；

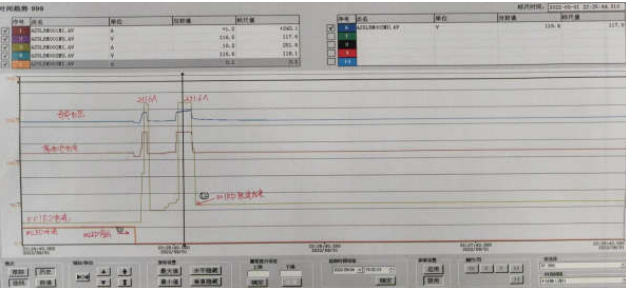


图6 参数趋势图-3

- （11）22时25分25秒，配合运行人员停运2#充电器；
- （12）1#充电器重新进行限流调整，电流在经过大概20S的限流调整之后稳定在69.4A左右。通过对整个过程

参数曲线变化的描述和分析:

首先,通过图4中的②位置可以看出,2#充电器输出电流在启动后的2S左右达到峰值278.1A后立即下降,超出了单台充电器输出限流的250A(50A×5),对比图6中⑪⑫位置,当2#充电器停运之后,1#充电器电流在约20S的限流调整过程中两次上升至251.6A,考虑到变送器误差,可以认为1#充电器的最大冲击电流被限制在了250A左右,而且在峰值时受到限流影响,有短时保持状态后回落;所以可以认为203AN中D1的二极管在②位置附近的大电流冲击过程中已经出现异常,导致2#充电器电流超过250A,随后1#充电器投运,经过约35S的限流调整,电流逐渐下降并稳定。

随着203AN内D1异常部位热量的积累,2#充电器输出电压(母线电压)在图5中⑦位置开始异常波动,导致2#充电器电流开始波动。随着故障逐步发展,2#充电器电压电流波动范围越来越大,此过程持续7分钟左右后,2#充电器电压由107V上升到115V左右,电流上升到147.3A,D1内二极管在大电流作用下击穿短路。

由图3及全桥整流电路工作原理可知,假设在交流输入正半波时,受损二极管的短路不影响整流桥的输出,那么在负半波时,交流电压会直接加在D1另外一个未受损的二极管两端,使交流输入短路,又因为交流输入侧未设置熔断器,致使未受损二极管长时间通过短路电流,最终导致击穿短路,此时D1两个二极管均短路。

因为D1内部两个二极管均短路,所以交流输入在正负半波时正负极均直接相连,高频整流卡件交流输入部分在短路电流作用下开始放电燃烧,203AN停止输出电压电流(图5中⑨位置),在电容作用下,203AN电压开始缓慢下降,2#充电器电流则突降至30A以下,为其余四个正常模块电流之和,说明2#充电器其余四个模块在集中监控器限流功能下正常运行,203AN异常输出最大电流在117A左右,持续约15秒。

在203AN电压下降过程中,短路电流使D1端子1的金属引脚烧断,交流输入脱离短路状态,全桥整流变为半桥整流,203AN输出电压稳定在70V左右。

图4中⑥位置第一次限流结束时,最极端的情况:蓄

电池电流小于限流值60A时,203AN在稳压运行状态下单独带载(蓄电池+负载),当203AN输出电流达到 $60+9.5=69.5$ A时,集中监控器控制所有充电模块进入限流运行状态,此时203AN输出电压受内阻和大电流影响开始下降,当电压下降到与其他充电模块相同时,其他模块开始分摊负载并均匀分摊余下负载电流,所以203AN电流最大约为 $69.5+(278.1-69.5)/5=111.22$ A。

203AN内部D1/D2型号为IXYS(艾赛斯)DSEI-2×101-12A,配置两个独立式标准二极管,正向平均整流电流为91A,由它组合成的全波桥式整流回路最大承受电流应为 $91\times 2=182$ A,大于203AN故障电流。

此外,整流桥正常工作时,四个二极管工作环境完全一致,整个故障发展过程中,203AN异常输出最大电流在117A左右,持续约15秒,功率模块D2的功能基本未受影响,所以判断功率模块D1本身质量缺陷,导致在大电流冲击时损坏,又因为交流输入侧未设置熔断器,故障进一步发展导致整个功率模块击穿短路。

3 结论

(1)直接原因:功率模块D1击穿短路。

(2)促成因素:(1)高频整流交流输入侧未设置熔断器;(2)蓄电池限流调节速度慢。

(3)根本原因:功率模块D1个体本身质量缺陷。

结束语

本次设备缺陷提示了维修人员,在后续的设备维护工作中,应当深挖设备特性,全面的了解设备各元器件的逻辑原理,检查工作需更加细致入微,不治已病治未病。

参考文献

- [1]苏冰,王玉斌,王璠,等.基于耦合电感的多相交错并联双向DC-DC变换器及其均流控制[J].电工技术学报,2020,35(20):4336-4345.
- [2]梁彦科,刘旭.适用于充电装置的辅助电路型软开关全桥变换器[J].电源学报,2023,23(2):1051-1062.
- [3]赵梦欣,陶文彪,易永利,等.基于间歇充电的锂电池直流电源系统远程运维方案[J].电力信息与通信技术,2022,20(6):75-81.