

Root cause analysis of the abnormal bypass switching fault of an inverter in a nuclear power plant

Bolan Chi Haoliang Zhang Wei Chen Haozhe Li Wenbin Xie

China General Nuclear Power Operation Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518000, China

Abstract

In 2018, an uninterruptible power supply (UPS) system at a nuclear power plant unexpectedly automatically switched from inverter operation to bypass operation. Throughout this event, the AC busbar maintained continuous power supply and did not cause power loss to downstream equipment. The on-site engineers immediately inspected the equipment's operational status and checked the alarm history stack. However, no suspicious alarms were found in the stack. Through a meticulous inspection of the equipment by the engineers and the manufacturer's maintenance personnel, along with an in-depth analysis of the fault logic, the fault point was eventually traced to the control power circuit. This paper analyzes the causes of this rare abnormal condition by examining the characteristics of this UPS model, its maintenance manual, and the on-site troubleshooting process, furthermore, relevant preventive measures are proposed.

Keywords

Inverter, Auto switch, Alarm history

某核电厂逆变器异常切旁路故障的根本原因分析

池波澜 张皓亮 陈伟 李浩哲 谢文彬

中广核核电运营有限公司, 中国·广东 深圳 518000

摘要

2018年,某核电厂一不间断电源系统突然自动从逆变器带载切换至旁路带载,期间交流电母线保持供电连续,并未造成下游设备失电。现场工程师遂对设备运行情况进行检查,翻阅报警历史堆栈,怪异的是报警历史中未发现可疑报警。经过现场工程师和厂家维护人员,对设备的细致排查和对故障逻辑深入分析,最终锁定控制电源回路的故障点。本文结合该型号UPS设备特性、维护手册和现场检修情况对该罕见异常工况进行了原因分析,并提出了相关预防措施。

关键词

逆变器; 自动切换; 报警历史

1 引言

2018年,某核电厂不间断电源系统逆变器LND001DL非预期切换至旁路供电,未导致下游出现短时失去电源。随着故障排查的开展,维护人员发现,本次故障特殊在设备报警历史并未能正确记录报警历史。后文将浅析故障成因并浅谈维修策略。

2 设备原理介绍

该逆变器主要由直流进线断路器、直流滤波电容、IGBT模块、电感、交流滤波电容、干式变压器、交流输出断路器及其他控制卡件等构成。其中控制卡件负责系统控制电源的产生、IGBT模块的控制、控制信号处理、人机交互

等。该逆变系统共有110V直流电和380V旁路市电两路电源。其直流电源来自同厂家生产的某型充电器,可将380V三相交流电源整流为110V直流电,为下游逆变器供应直流电源。同时,直流母线上还连接着一组蓄电池,正常时蓄电池保持在浮充电状态,当直流电源意外失去时,蓄电池组至少还能作为负荷供能1小时。直流电源经柜内电容滤波后,被IGBT模块逆变为单相交流电,再经过电感、电容滤波和干式变压器升压后,为下游负荷提供高质量220VAC电源。旁路电源取自该厂一380V低压交流配电盘,同样具有较高的电源质量,经过逆变器柜内的旁路调压变后降为稳定的220V交流电,供给下游负荷,拓扑图如下图1所示。

3 全桥逆变电路原理介绍

逆变电路是将输入直流电源转化为固定频率、幅值交流电输出的电路^[1]。IGBT全桥逆变电路由4个IGBT组成。IGBT是一种电力行业广泛使用的三端元器件,由晶体管和

【作者简介】池波澜(1998-),男,中国福建三明人,本科,助理工程师,从事电气工程及其自动化研究。

MOS管组成。IGBT综合了GTR和MOSFET的优点^[2]，兼有MOS管的输入阻抗高、通断速度快和晶体管的导通压降小的优点，故适用于电力系统中大电压、电流的场景。IGBT的通断是由栅极和射极间的电压决定的，当该电压大于开启电压时，IGBT导通；当在已导通的IGBT的栅极和射极间施加反向电压或时中断电压信号时，IGBT关断。该型号逆变器利用4个IGBT构成H桥，并搭配4个反并联续流二极管，构成基础逆变电路，其拓扑结构如下图2所示：

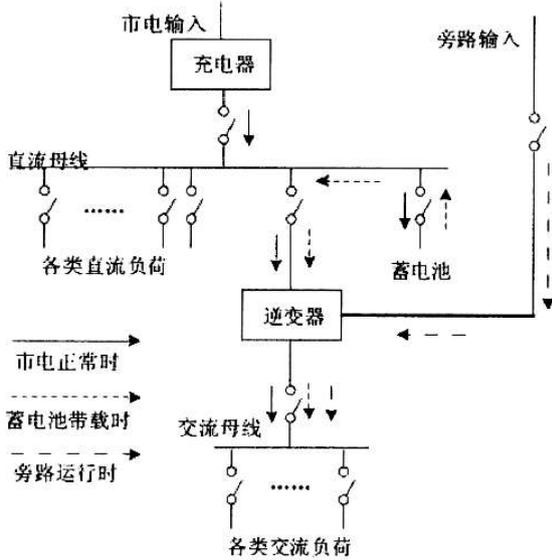


图1 逆变系统原理图

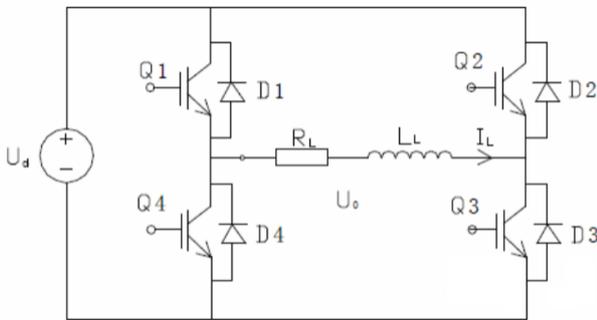


图2 单相全桥逆变电路拓扑结构

控制卡件对IGBT的触发信号进行调控，使其按规定顺序导通。交流电正半周时，触发信号使Q1和Q3导通，Q2和Q4关断，电流从直流正极流向负极，RL产生正向电压；交流电负半周时，触发信号使Q1和Q3关断，Q2和Q4导通，电流从直流负极流向正极，RL产生负电压。为了防止上下桥臂直接导通导致直流电源短路烧毁，控制信号一般存在死区时间，为IGBT的轮换导通插入毫秒级延迟。为使电路输出理想电压波形，全桥逆变电路普遍采用了正弦脉宽调制原理（SPWM），通过控制IGBT的导通时间，使脉冲占空比按正弦规律排列。每个半周内输出若干宽度不一的脉冲矩形波，正弦波形达到高值时，脉冲的宽度相应增大，脉冲间隔

短；当正弦波形处于积分相对低值时，输出的脉冲宽度相应减小，脉冲的间隔延长。最终实现任意周期内，脉冲矩形波的积分等同正弦波。输出端采用LC滤波器滤波^[3]，即可在RL两侧得到完美的正弦波。

4 原因分析

为确认故障原因，维护人员操作逆变器面板，检查其记录的报警历史，按时序排列如下所示：

1.51号报警：Synchronization error。产生原因为逆变器与旁路相位同步异常。经复核，系未及时清除的历史报警；

2.64号操作记录：Bypass operation。产生原因为切换至旁路运行，系与异常切旁路相关的唯一记录；

3.57号报警：AUX1 error。该报警的定义由辅助接点实际接线决定，对于文中设备代表转换开关由Auto转到Test位置。此报警系维护人员排查故障时产生；

4.62号操作记录：Normal operation。该记录在旁路切至正常运行模式时产生，系系维护人员排查故障时产生；

5.64号操作记录：Bypass operation，系维护人员排查故障时产生；

6.57号报警：AUX1 error恢复，因维护人员恢复转换开关而产生；

7.62号操作记录：Normal operation，维护人员恢复逆变器正常运行而产生。

通过检查历史报警列表，Bypass operation是与异常切旁路相关的唯一报警，但该报警的成因众多，并不能直接反应当时设备出现的异常。

查阅设备维护手册（Eomm），可能导致的该型逆变器切旁路的故障工况如下：

1. 超温报警类。包括了TSM temp shutdown（变压器/电感温控动作）、Charger 0° temp shutdown（整流模块温控动作）、High temp charger magnetic（充电器上游变压器磁饱和）、High temp inverter magnetic（逆变器下游变压器磁饱和）、Static switchEA temp shutdown（EA静态开关温控动作）。由于逆变器未记录超温报警相关信息，故可排除；

2. 电力指标异常。包括了High DC shutdown（直流电压过高）、Low DC shutdown（直流电压过低）、Output freq. out of tolerance（输出频率超限）、Output inst out of tolerance（输出电流超限）、Output is out of tolerance（输出超限）、Inverter voltage error（输出电压异常）。系统通过采样和比较回路获取相关信息，控制静态开关切换至旁路供电。这些故障不仅会被逆变器记录，还会通过DCS系统送至电厂的主控室，这与实际情况不符，故排除；

3. 逆变器熔断器发生熔断，报警名称Inverter fuse blown，因未见于报警历史，故排除；

4. 滤波电容电流过低，报警名称CB03 current shutdown，因未见于报警历史，故排除。

综上，逆变器异常切旁路属于非典型故障工况，需要对设备系统层进行排查，而唯一的线索是故障未能被正确记录，可能是主控制卡软硬件或相关控制回路的异常。

A070 是该型逆变器的主控制卡，集成了多项控制功能，包括整流器控制、静态开关控制、逆变器控制、监视系统电压电流及报警等运行参数、与面板交互、内部元件的串行通信等。鉴于卡件功能繁多且复杂，出现故障确实可能导致报警无法记录。维护人员拆下卡件进行单独检查，未见元件异常，拔下卡件 EEPROM 检查烧录程序，未见异常篡改，则 A070 异常可以排除。

维护人员与厂家维保人员就现场情况进行讨论，怀疑逆变器的控制系统存在电源间歇异常，导致异常发生时系统故障且无法记录故障信息。下面对排查过程进行介绍。

该型 UPS 的控制电源由电源板卡 A201/A202 产生，A201 取电自旁路和交流母线，A202 取电自直流母线，输出均为 20V、±12V、5V 直流电，通过一根并联排线外送至接口板 A071，再送至主控制卡 A070，最后由 A070 分配至其他卡件。通过对控制回路进行测量，发现在逆变器外部接口卡 A025 的 X005 端子上有如下测量结果，见表 1：

表 1 A025 卡件引脚测量结果

测量位置	测量内容	测量结果
A025: X005: 1-3	电压	4.982V
A025: X005: 2-3	电压	4.983V
A025: X005: 1-地	电压	15.92V
A025: X005: 2-地	电压	15.92V
A025: X005: 3-地	电压	20.91V
A025: X005: 1-地	电阻	2.7kΩ
A025: X005: 2-地	电阻	2.7kΩ
A025: X005: 3-地	电阻	1.64KΩ

A025: X005 端子共计三个引脚，各有不同功能。其中 1 号引脚接收逆变器的外部启动信号，而 2 号引脚接收逆变器的外部关机信号，3 号引脚为 GND。外部信号在低电平时触发，下表为设备手册中该端子的信息。正常情况下，X005 的 1、2 引脚与 3 号地脚之间均可测得 5V 电平。为滤除杂波，该型逆变器卡件地脚经阻容接地，如在正常情况下，

X005 的 3 号引脚对地应当是等电位，不应测量出电压，而 1、2 号引脚对地电压应当均为 5V。为此，维修人员测量测量了同型其他系统逆变器 A025: X005 的 1、2、3 脚对地电阻，结果分别为 6kΩ、6kΩ、5kΩ，可见故障设备的控制电源回路发生了接地。整理如下表 2：

表 2 A025: X005 卡件引脚功能

TERMI-NAL	FUNCTION	Input/output	ELECTRICAL DATA
X005:1	External On	I	0-5V, active low
X005:2	External Off	I	0-5V, active low
X005:3	GND		

后续维修人员组织对故障设备的控制电源回路进行逐一排查，发现直流电源卡 A202 一处固定螺栓黄腊管破损，以致卡件一电感搭接螺栓从而发生接地。A202 作为该型逆变器的直流电源卡，其主要采用了 Buck 降压斩波电路原理，通过控制高频开关元件，调节占空比，从而控制输出电压的大小。在本次设备故障中，由于回路电感接地，导致回路参考电位异常，对地电压异常，且卡件 RC 滤波回路无法正常过滤杂散干扰，最终在系统遭遇偶发扰动后发生了异常切旁路的情况。更换黄腊管后，重新测量 A025: X005 各个引脚对 GND 的电压，测量结果均恢复正常。后续设备正常运行，未见故障重发。

5 结语

本次极为特殊的设备缺陷提示了维修人员，在设备记录的报警历史存在明显异常时，对控制回路开展排查或许能有重大突破。另外，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] Chivukula A B .SIMULATION OF SLIDING MODE CONTROLLER BASED SINGLE PHASE INVERTER[J]. 2013. DOI:10.13140/RG.2.2.17940.63367.
- [2] 电力电子技术[M]. 王兆安,黄俊主编.机械工业出版社.2000
- [3] 葛主峰.基于DSP的单相逆变控制系统研究[D].江苏大学,2015.