

核电机组LNE接触器触点故障分析与维护策略

毛璐 何丹 裴江辉

中广核核电运营有限公司 广东 深圳 518000

摘要: 本文针对国内核电机组LNE系统逆变器出口接触器自保持触点故障展开分析与维修策略研究。通过对运行核电机组逆变器出口接触器自保持辅助触点异常的研究,文章指出,触点表面氧化腐蚀导致接触电阻增大,并设计模拟试验验证了电阻值上升至约16千欧时,线圈电压下降至临界值,触发跳闸故障。鉴于此,本文建议在长达约三年一次的停盘检修期间,增加对触点接触电阻的系统性测量,并根据测量结果采取预防性维修或更换措施,以提前预警并排除因触点劣化导致系统退出的风险,从而提升LNE系统的长期运行可靠性。

关键词: 接触器自保持触点;接触电阻;维修策略

引言: 随着我国华龙一号、国和一号、玲珑一号、高温气冷堆、钍基熔盐堆等三代四代核电站的陆续投产,目前国内核电站机型存在多种技术路线,三代四代及早期投产的二代二代改进型核电机组并存的现状。核电机组LNE系统为控制棒控制系统、堆内测量系统、辐射监测系统及DCS等核安全相关设备提供220V交流不间断电源,其运行可靠性直接关系到机组的安全稳定运行。随着核电机组运行年限增长,电气设备老化问题日益突出,逆变器出口接触器自保持触点故障已成为影响LNE系统可靠运行的典型问题之一。本文以某在运核电机组LNE系统逆变器出口接触器003JA自保持触点跳闸故障为研究对象,通过现场检查、理论分析与模拟试验,系统剖析故障机理,并提出针对性的维修策略优化建议,为核电机组LNE系统的可靠性提升提供技术支撑。

1 LNE系统概述与接触器功能定位

1.1 LNE系统构成与运行原理

LNE系统是早期M310及CPR1000核电机组中重要的永久交流220V不间断电源配电系统。该系统通过多台逆变器将230V直流电源逆变为220V/50Hz交流电源,为KIT计算机系统、DCS集散控制系统、控制棒控制系统(RGL)、堆内测量系统(RIC)、辐射监测系统(KRT)、记录/指示仪表以及直流电气盘接地故障探测装置等设备供电。该系统若发生故障导致不可用,将造成核电机组多个监视控制系统失效,严重威胁机组的安全运行。

1.2 出口接触器003JA的结构与功能

LNE系统各逆变器直流输出端配备003JA出口接触

器,管控逆变器与LNE交流母线通断,设备额定电压220VDC/600VAC、最大工作电流200A。该接触器含两对主触点、三对辅助触点,主触点控制输出主回路通断,辅助触点分别负责设备启动自保持、运行信号指示、线圈分压电阻投切。自保持触点可在主触点闭合后,以小电流维持接触器吸合,降低线圈功耗与发热、延长设备寿命,但该回路运行可靠性依赖辅助触点接触电阻的稳定性。

1.3 故障现象描述

某在运核电机组在正常运行期间,LNE系统一台逆变器突发退出运行故障。现场检查确认该逆变器内部出口接触器003JA已跳闸,逆变器与LNE母线解列。初步外观检查:接触器本体、线圈、分压电阻及逆变器内其他元器件(电容器、可控硅、二极管、铜排、电缆接头等)均未见异常。然而,在对003JA自保持辅助触点进行进一步检测时发现,断电状态下其接触电阻在数十千欧姆范围内无规律波动,明显偏离正常值。这一异常现象指向自保持辅助触点的接触劣化为本次跳闸故障的根本原因。

2 故障特征与初步排查

LNE系统由多台逆变器并联运行(M310机型为三台,CPR1000机型为四台),该系统通过逆变器将230VDC电源变换为220VAC-50Hz交流电源,系统正常运行是三台或四台逆变器并列运行。系统逆变器容量设计为三取二或四取三原则,即当系统中其中一台逆变器损坏不可用时,另外两台或三台逆变器的容量能保证系统最大负载的供电要求,但系统冗余度下降,机组正常运行期间需要在14天内恢复不可用的逆变器可用性,若叠加其他逆变器不可用,LNE供电系统将失电,机组将后退至事故规程^[1]。LNE系统供电图如图1所示。

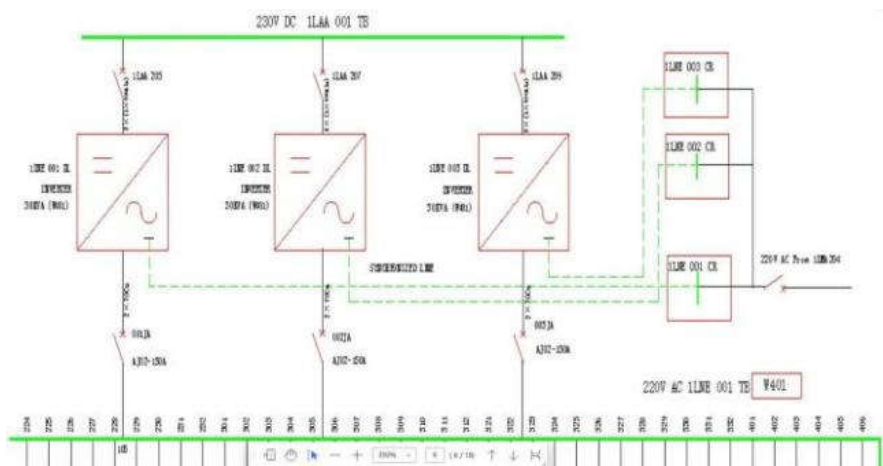


图1 LNE单线图

LNE供电系统中存在多个设备部件，在运核机组中曾出现逆变器内部直流电源输出端的出口接触器003JA自保持辅助触点接触电阻增大导致003JA线圈失电跳闸，进而该逆变器退出运行故障。

3 原因分析

3.1 LNE002DL出口接触器003JA功能简述

LNE002DL内部出口接触器003JA安装于逆变器的直流电源输出端，在确认输出电压正常，且电压、频率、相位与LNE的其他几台逆变器输出电压同步后，通过闭合输出端接触器 003JA，实现与其他几台逆变器并列运行，为系统提供220V交流电源。出口接触器 003JA 使用了两对主触点，和三对辅助触点，其中主触点在主回路的输出端用于通断闭合输出电压，三对辅助触点用于

控制回路中，一对常开触点用于逆变器启动的自保持功能，一对常开触点用于输送 003JA 位置状态信息和逆变器带载信号灯 004LA 状态控制，一对常闭触点用于003JA 线圈分压电阻的投入和切除。该接触器额定电压为220VDC/600VAC，最大工作电流为200A。

3.2 LNE002DL出口接触器003JA现场检查情况

通过现场检查LNE002DL内部其他元器件电容、可控硅、二极管、铜排、电缆接头未见异常。同时检查LNE002DL内的003JA接触器线圈、本体和分压电阻外观无异常，测量003JA 接触器线圈电气参数：接触电阻正常（267.6Ω），分压电阻接触电阻正常（4.7kΩ），因此接触器 003JA 本体线圈或分压电阻正常。



图2 LNE逆变器003JA备件图片

003JA 自保持辅助触点为一单独元器件，安装于003JA 本体上方，当 003JA 线圈带电合闸后，自保持辅助触点闭合，将合闸回路的分压电阻与 003JA 线圈串联，使 003JA 工作在小电流合闸自保持状态。现场检查003JA自保持触点外观正常，但测量触点阻值发现：断电状态下003JA 自保持辅助触点接触电阻在几十千欧姆之间波动^[2]。



图3 LNE逆变器003JA现场安装图片



图4 LNE逆变器003JA自保持辅助触点照片

进一步离线对003JA接触器进行分压模拟试验,示意图如图5及式1,逐步提高003JA自保持辅助触点的阻值(R5),测得当003JA线圈电压降到3V左右时,线圈会失电,此时003JA接触器会跳闸,故障可以复现。此时可算出003JA自保持辅助触点的阻值R5约为16千欧左右,与现场测量结果相符。综合分析,由于003JA自保持辅助触点的接触电阻增大导致003JA线圈失电跳闸。



图5 003JA控制回路分压模拟试验图

$$U_{R2}/U_{总} = R2/(R1+R2+R3+R4+R5)$$

$$R5 = U_{总} \times R2 / U_{R2} - (R1+R2+R3+R4)$$

$$U_{R2} = 3V; U_{总} = 240V$$

$$R5 = 16472\Omega \approx 16.5k\Omega$$

式1: 分压比例公式计算结果

3.3 LNE002DL接触器003JA故障原因分析

自保持辅助触点在长期闭合状态下,触点表面仍会与空气中的氧气等发生反应,形成氧化膜,使触点表面变得粗糙,触点接触面减少,接触电阻增大。对故障的辅助触点进行多次模拟动作发现其接触电阻逐渐降低,对其进行解体发现,其动静触头表面均存在明显的氧化情况,因此003JA自保持辅助触点表面发生氧化腐蚀,氧化物堆积使得触点接触电阻逐渐增大,最后导致003JA线圈失电跳闸,且在离线对触头多次动作后氧化层被破坏接触电阻恢复正常,进一步论证该故障原因。



图6 003JA自保持辅助触点静触头表面情况

4 维修策略建议

4.1 接触电阻检测方法的规范实施

建议机组停盘检修时,把接触器辅助触点接触电阻测量纳入LNE系统必检项目,常规检测周期不低于三年。统一采用四端开尔文电桥法测量,排除引线与测试接触电阻干扰。断电测直流低电阻,测量前分合触点三次清除浮尘再读取稳定数值,检测数据按设备编号归档建立趋势数据库,用于趋势分析与寿命预判^[3]。

4.2 基于趋势分析的预防性维修策略

单纯的单次测量值判定存在一定的局限性——若某触点在本次检修中测得的接触电阻尚处于“关注区”下限,但较上次测量值增长了数倍,则表明劣化速率较快,若按常规周期等待下一次检修,在此期间发生故障的风险较高。因此,建议在建立历史数据库的基础上,实施基于趋势分析的预防性维修策略。具体而言,每次检修中将本次测量值与历次数据进行纵向对比,若出现以下情形之一,即应触发提前更换决策:接触电阻较上次测量值增长超过100%;连续两次测量值均处于“关注区”且增幅超过50%;同一设备同型号触点在电厂其他机组已发生类似故障。通过趋势分析实现从“定期维修”向“状态维修”的转变,在触点劣化尚未达到临界值之前主动干预,消除突发故障隐患。

结束语

本文深入分析了核电机组LNE供电系统逆变器出口接触器自保持辅助触点的故障机理,指出因长期氧化导致接触电阻增大进而造成设备跳闸的根本原因。通过现场检查与模拟实验,进一步验证了故障模式的合理性,强调了对关键电力控制系统潜在隐患进行前瞻性检测和预防性维护的重要性。为了保障核电站关键电力系统的持续稳定运行,建议将接触电阻检测纳入定检流程,以便实现更准确的趋势性监测与设备状态评估。未来,研究可扩展至其他电力控制触点在高可靠性应用中的环境稳定性分析和维护方法优化,以不断提升系统运行的稳定与安全。

参考文献

- [1]刘松洋,白云鹏,陈志董,等.基于熔盐储热的核电机组调峰特性研究[J].发电技术,2025,46(6):1200-1211.
- [2]张茹,孙培伟,魏新宇.热电厂产压水堆核电机组解耦控制[J].哈尔滨工程大学学报,2023,44(12):2201-2207.
- [3]沈艳强,周浩,居法立,等.核电机组循环水泵密封水流量监测优化措施[J].设备管理与维修,2025(9):119-121.