

4.3 重点监测潜在泄漏口（管道接头处）

针对管道接头等潜在泄漏点，可采用图 1 “抽吸式”可燃气体探测器强化监测效果。该探测器配备气体捕捉器、

吸气泵等部件，将气体捕捉器直接设置在管道接头处，通过主动抽吸方式快速捕捉泄漏气体，大幅提升泄漏检测的灵敏度和响应速度。

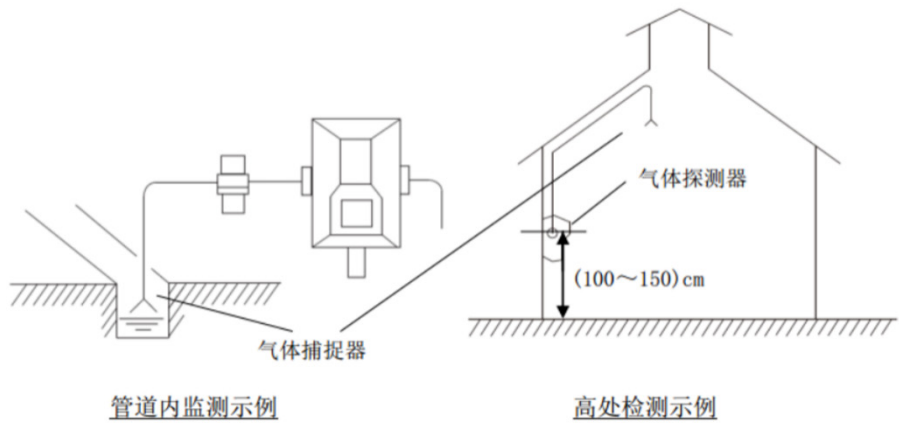


图 1 抽吸式可燃气体探测器示意图

5 结论

天然气掺氢虽能推动能源系统低碳化，但也一定程度上增大了输气系统的运行风险。在实际工程中，需综合考虑以下要素对燃气轮机可燃气体泄漏监测系统进行优化：

- ①基于氢气体积比修正可燃气体监测探头的报警设定值；
- ②合理配合配置甲烷探头与光学氢气探头，实现多参数协同监测；
- ③对管道接头等潜在泄漏口采用抽吸式探测器进行定

向重点监测。

通过上述优化措施，可有效提升掺氢燃烧过程中可燃气体泄漏监测的准确性与及时性，为系统安全稳定运行提供保障。

参考文献

[1] 刘延雷，徐平，郑津洋等. 管道输运高压氢气与天然气泄漏扩散数值模拟[J].太阳能学报, 2008,29（10）：1252-1255.

[2] 李敬法，苏越，张衡等.掺氢天然气管道输送研究进展[J]. 天然气工业, 2021,4(4):1000-0976.

[3] GB50177-2005, 氢气站设计规范[S].

Analysis of Causes and improvement Measure for Flash Bus Power Loss in Parallel Inverters

Naimu Deng

China Nuclear Power Operation Co. Ltd. MEE, Shenzhen, GuanDong, 518000, China

Abstract

This paper introduces the fault of isolating a single inverter with flash bus power loss in a parallel inverter system. Through the analysis of bus circulation and synchronous control card, a logical loophole in the master-slave control logic of the synchronous control card was identified. This loophole allows multiple master units to exist on the synchronous bus. When a phase-leading master unit is isolated, a phase-lagging master unit immediately takes over its position, causing a frequency jump and resulting in circulation in the system. Based on the analysis results, the inverter synchronous control card A024 was upgraded and improved, which solved the fault of isolating a single inverter with flash bus power loss. The analysis process in this paper provides important reference significance and value for troubleshooting bus circulation faults in subsequent parallel inverter systems of the same type.

Keywords

Parallel inverter; Bus power loss; circulating currents; Synchronous Bus; Parallel control card;

并联逆变器闪发母线失电原因分析及改进措施

邓乃木

中广核核电运营有限公司电气部, 中国 · 广东 深圳 518000

摘 要

本文介绍了并联逆变器系统隔离单台逆变器闪发母线失电的故障。通过对母线环流和同步控制卡分析, 定位了同步控制卡主从逻辑漏洞。此漏洞允许同步母线出现多台主机。相位超前主机被隔离, 相位滞后主机立刻取代相位超前主机位置, 产生频率跳变, 导致系统出现环流。根据分析结果, 逆变器同步控制卡A024被升级改进, 解决了隔离单台逆变器闪发母线失电的故障。本文的分析过程为后续同类型并联逆变器系统出现母线环流故障提供了重要的借鉴意义和参考价值。

关键词

并联逆变器; 母线失电; 环流; 同步母线; 同步控制卡

1 引言

核电站某配电盘电源设计为: 四台冗余逆变器并联, 共同承担负载。当单台逆变器故障时, 冗余逆变器仍能保证百分之百负载电流。采用逆变器冗余技术既实现逆变器热更换又能保证系统供电不间断^[1]。此配电盘负载均为重要负荷, 故配电盘供电可靠性对核安全十分重要。

检修人员在此配电盘停运检修期间发现, 系统处于四台逆变器并联运行时状态正常。关闭任一逆变器, 断开逆变器上游电源开关, 再断开逆变器至母线的输出开关, 会导致剩余 3 台逆变器输出产生严重电流波动, 母线失去电压超过 2 秒。该故障并非必然, 每当按照上述步骤操作系统时, 有较大的概率出现故障造成母线失电。本文通过逻辑分析, 成功复现该闪发故障, 并进行根本原因分析, 制定有效的改

进措施, 确保了核安全重要设备的安全稳定运行。为后续该类型逆变器冗余系统产生环流的故障查找及故障原因分析提供了重要参考。

2 核电站并联逆变器简介

某核电站配电盘由 4 台容量为 80KVA 逆变器并联运行。上游直流电源 220VDC (-15%/+20%) 经直流滤波后进入逆变器, 经电感及变压器升压转变为交流电源 (220VAC $\pm$ 1%、50Hz $\pm$ 0.01%), 最后经静态开关至并联柜到达配电盘母线。正常工况下每台逆变器均为轻载运行, 负载 2%、功率因数 0.8。每台逆变器在输入电压降到 193VDC 时发出低电压报警, 输入电压降至 166VDC 时关机。每台逆变器在输入电压升到 280VDC 时发出高电压报警, 输入电压升到至 302VDC 时关机。

【作者简介】邓乃木 (1987-), 男, 中国四川泸州人, 本科, 工程师, 从事电气设备维修研究。

3 系统母线失压原因分析

3.1 初步原因分析

因系统为逆变器并联结构，逆变器出口环流造成系统母线电流波动。以两台逆变器电源并联举例分析。两台逆变器并联时的等效电路如下图 1，其中 U_1 、 U_2 代表各逆变器输出的基波电压， L_1 、 L_2 、 C_1 、 C_2 代表逆变器的输出滤波器， R 为系统负载。

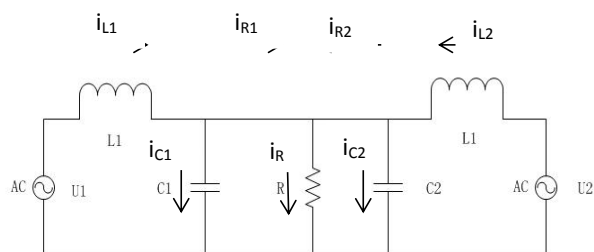


图 1 逆变器并联冗余系统的等效电路

得如下等式：

$$U_1 - j\omega L_1 i_{L1} = U_0$$

$$U_2 - j\omega L_2 i_{L2} = U_0$$

$$i_{L1} + i_{L2} = i_{C1} + i_{C2} + i_R + i_{R2}$$

$$i_R + i_{R2} = \frac{U_0}{R}$$

$$U_0 = \frac{i_{C1}}{j\omega C_1}$$

$$U_0 = \frac{i_{C2}}{j\omega C_2}$$

由于系统的逆变器完全一致，令 $C_1 = C_2 = C$ ， $L_1 = L_2 = L$ 。联立上述六式可以解出：

$$i_{L1} = \frac{U_1 - U_2}{2j\omega L} + \frac{1}{2} U_0 \left(\frac{1}{R} + 2j\omega C \right)$$

$$i_{L2} = \frac{U_2 - U_1}{2j\omega L} + \frac{1}{2} U_0 \left(\frac{1}{R} + 2j\omega C \right)$$

可以看出，逆变器输出电流 i_{L1} 和 i_{L2} 由两部分组成，一部分为负载电流分量，一部分为环流分量。当输出滤波器相同时，负载电流分量总是平衡的，环流分量会使逆变器的输出电流各不相同。当 U_1 与 U_2 同相时，电压高的环流分量是容性，电压低的环流分量是感性。当 U_1 与 U_2 同幅时，相位超前者环流分量为正有功分量，输出有功功率。相位滞后者环流分量为负有功分量，吸收有功功率^[2]。

由于故障工况下系统轻载运行，负载电流分量很小。故判断逆变器输出电流较大波动是由环流分量造成。

此外，分析认为环流是参与逆变器主从逻辑的同步控制卡 A024 故障造成的。若一个逆变器在同步母线上被选择为主机（通常情况下最先启动的逆变器为主机）。主机将自身同步信号发送至同步母线上。其他逆变器（从机）跟从同步母线的同步信号，将自身同步信号与同步母线信号同步^[3]。

即主从式并联确保了所有并联逆变器同步运行。

逆变器并联时，主机控制输出负载端的电压，将负载上的电流根据并联的逆变器台数进行平均，所得平均电流作为从机的电流给定基准。从机时刻将自身同步信号与逆变器同步母线信号保持一致，使得从机可以在任何时候在不产生相位突变的情况下接替主机成为下一个主机^[1]。

当某台逆变器在同步母线上被选择为主机，主机的主控制卡 A070 和同步控制卡 A024 会维持主机状态。主机的主控制卡 A070 和同步控制卡 A024 由逆变器上游电源开关和逆变器交流输出开关交叉供电。只有在逆变器上游电源开关和逆变器交流输出开关均断开时，主控制卡 A070 和同步控制卡 A024 才会失电导致主机状态无法维持。系统必须进行主从机切换。本次闪发故障是主机上游电源开关及交流输出开关断开后，从机不能接替主机引起母线环流，判断系统中的从机的同步控制卡 A024 有故障。对同步母线录波做进一步分析，还发现同步母线存在多个主机。当有两个主机在同步母线上均为可用时，关闭优先级高的主机会 100% 造成母线环流。母线环流触发了系统限流功能导致系统关闭，母线失压。故进一步判断系统中的主机或多台从机的同步控制卡 A024 有故障。

3.2 根本原因分析

3.2.1 出现多重主机的原因

如果只有一台主机在同步母线上并且这台主机被停运隔离，那么同步母线上任一从机都可能成为新主机。每台从机的 A024 卡件探测到同步母线的主机同步信号失去设定时间后，从机会切换为主机，存在多台从机接替主机的情况。若多台从机同时探测到同步母线上主机的同步信号失去，多台从机会同时成为主机。此外，并联逆变器系统中从机启动时，若从机的同步信号和同步母线上主机的同步信号一致，从机会成为同步母线上的第二台主机。这与逆变器主从式并联系统中要求一台主机和多台从机同步运行的设计理念不符。

3.2.2 多重主机模式分析

当两台主机同时出现在同步母线上，即同步母线会出现两个主机的同步信号，且两个同步信号不一致。由于逆变器元器件的限制，两个主机的同步信号无法同步，一个同步信号会超前，另一个同步信号会滞后，如图 2。同步信号超前的主机被称为超前主机，同步母线上所有从机的同步信号会与超前主机的同步信号一致。同步信号滞后的主机被称作滞后主机。同步母线上两个主机的逻辑是“或”的关系。若超前主机被停运且其上游电源开关和其输出交流开关被断开，主机的主控制卡 A070 和同步控制卡 A024 失电，滞后主机会引发一个相位突变，而不像从机那样在任何时候在不产生相位突变的情况下接替主机成为下一个主机。由于逆变器元器件限制原因，滞后主机引发的相位突变未触发逆变器