

## 基于锁相环理论的逆变器故障报警根本原因分析

## Root Cause Analysis of an Inverter Fault Alarm Based on Phase-locked Loop Theory

陈伟

Wei Chen

中广核核电运营有限公司 中国·广东 深圳 518000

China Nuclear Power Operations Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518000, China

**摘要:** 论文通过阐述逆变器的运行方式、SPWM 原理、静态开关原理,对逆变器故障报警原因逐级深入地分析。先定位了导致逆变器出现 CB03 电容电流故障的直接原因,最终基于锁相环同步理论,深入剖析了控制主板程序 EA 同步初相角参数异常这一根本原因并加以论证。论文对同类设备复杂故障的处理具有借鉴意义。

**Abstract:** This paper analyzed the reason of an inverter fault alarm step by step by describing the inverter operation mode, SPWM principle and static switching principle. First of all, the direct cause of the CB03 capacitor current fault of the inverter had been located, and finally based on the phase-locked loop synchronization theory, the root cause of the abnormal EA synchronization initial phase angle parameter of the control board program had been analyzed and demonstrated. This paper has reference significance for the handling of complex faults in similar equipment.

**关键词:** 逆变器; 故障; 电容; 锁相环; 同步

**Keywords:** inverter; fault; capacitance; phase-locked loop; synchronization

**DOI:** 10.12346/etr.v6i1.8949

## 1 引言

不间断电源 UPS 是一种为了能安全可靠地提供高质量正弦交流电的系统,核电站常常使用不间断电源系统为核安全相关的重要负荷进行供电,保证这些负荷的供电可靠性。2020 年 6 月,某核电站 4 号机 LNH 不间断电源系统在大修期间出现了逆变器故障报警,影响系统正常安全运行。论文针对这一故障报警根本原因进行分析并解决了故障问题。

## 2 系统原理

### 2.1 系统运行方式

LNH 系统主要包括逆变器输出和旁路变压器输出两路冗余电源,逆变器部分由上游整流器和蓄电池供电,旁路部分由市电供电,原理图如图 1 所示。

逆变器将 110V 直流电源逆变成 50Hz 正弦交流 220V 电源;旁路变压器将市电 380V 交流电源转换成 220V 交流电源;静态开关 SBS 在逆变器与变压器之间实现自动保护切

换,保证重要负载不掉电。系统包含以下三种工作模式:逆变器带载模式、旁路带载模式、手动维修旁路模式。

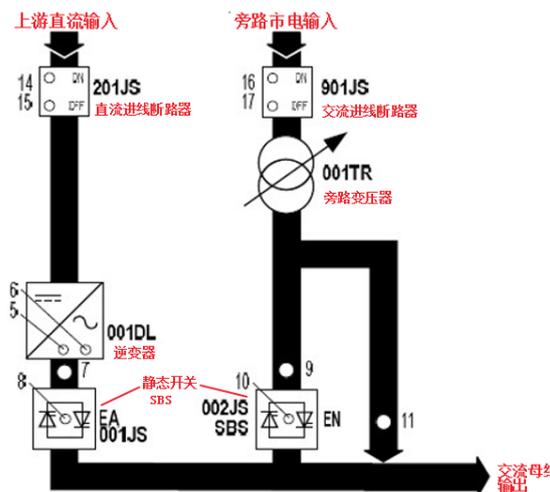


图 1 LNH 系统原理图

【作者简介】陈伟（1988-），男，中国广东深圳人，本科，高级工程师，从事配电技术研究。

## 2.2 SPWM 原理

将一个正弦半波  $N$  等分, 形成  $N$  个相连的脉冲序列, 宽度相等, 但幅值不等。冲量相等而形状不同的窄脉冲加在具有惯性的环节上时, 其效果基本相同。根据这个原理用一系列等幅不等宽的脉冲矩形代替上述  $N$  个脉冲、中点重合、面积 (冲量) 相等, 宽度按正弦规律变化。只要脉冲的频率越来越高, 经过脉宽调制后的波形也是越来越接近正弦波<sup>[1]</sup>, 这样就得到了 SPWM (正弦脉宽调制) 波形。要改变等效输出正弦波幅值, 按同一比例改变各脉冲宽度即可。

目前, 主要采用调制法控制 PWM 波形, 通常采用等腰三角波或锯齿波作为载波, 当它与任何一个平缓变化的正弦波相交时, 如果交点时刻对电路中开关器件的通断进行控制, 就可以得到所需要的 SPWM 波形, 最后经过一系列变压和滤波处理得到标准正弦波。LNH 逆变器就是基于这一原理输出正弦交流电的。

## 2.3 静态开关

静态开关是实现由逆变器向市电不间断切换的重要部件, 通常由两个反接并联的可控晶闸管组成, LNH 包括逆变器静态开关 EA 和旁路静态开关 EN。逆变器带载时 EA 导通 EN 截止, 旁路带载时 EN 导通 EA 截止, 切换条件是逆变器输出与旁路电源输出的电压幅值、频率、相位必须一致。

旁路电源是市电电压, 受当地供电情况及负载特性的影响, 幅值、频率相位 (波形) 时时刻刻都在变化。为了保证在随机的任意时刻, 逆变器与旁路电源之间的切换总能成功, 逆变器产生的正弦波就应与旁路电源同步, 即每时每刻都在追踪旁路的频率与相位。

## 3 逆变器报警事件过程

在执行 4LNH 设备启动试验中, 当系统为旁路带载而逆变器备用时, 逆变器面板显示 CB03 电容 (逆变器输出滤波电容) 电流报警。

排查故障时首先将系统置于手动维修旁路状态启动逆变器, 观察到 EA 导通 EN 截止, 此时逆变器无法检测同步信号处于独立空载状态, 逆变器输出电压为 221V, 无报警。然后将系统置于试验位置, 让 EN 导通 EA 截止, 此时系统出现 CB03 电容电流报警。测量 CB03 电流为 168A, 逆变器输出电压为 206V, 旁路电压为 218V。将系统置于自动运行模式, 母线为旁路经 EN 带载, 报警仍存在, 将系统切至逆变器带载, 该报警消失。测量 CB03 电流为 183A, 逆变器输出电压为 221V, 旁路电压为 218V。再将系统设为旁路带载, 该报警复现, 测量 CB03 电流、逆变器输出电压、旁路电压与之前报警时一致。经过多次模拟均能复现故障。

## 4 原因分析与排查

### 4.1 CB03 电容电流故障报警分析

由于 CB03 电容 (逆变器输出滤波电容) 与电感是逆变器输出滤波的核心部件, 电容和电感的参数匹配至关重要,

因此逆变器内部设计了专门用于监测 CB03 电容量的报警回路, 其监测原理为根据电容电流计算公式  $I=2\pi fCU$ , 在输出电压一定的情况下, 通过监测电容电流来监测电容量变化, 当采样到的电容电流下降至 90% 设定值时出现 CB03 电容电流故障报警。

设备调试期间 CB03 电容新安装, 电容量一般较额定值偏高一点, 此时电容电流 100% 基准值为 187A, 电流报警设定值为 90% 基准值即 168.3A。查询上次大修数据, 该逆变器的整组 CB03 电容经过了换型, 当前逆变器整组 CB03 电容容量  $C$  为 2620 $\mu$ F, 那么在逆变器电压  $U$  为 206V 时对应电流为 169A, 与本次故障时实际测量的电流值 168A 基本吻合, 实际电流略低于报警设定值 168.3A 而触发报警。理论计算和实际测量都印证了本次 CB03 电流故障报警直接原因为旁路带载时逆变器输出电压异常。

### 4.2 旁路带载时逆变器输出电压异常分析

在逆变器带载和旁路带载两种状态下分别测量的电压数据如表 1, 系统要求逆变器输出电压标准为  $220V \pm 1\%$ , 因逆变器输出电压仅在静态开关 EN 导通时存在异常, 从硬件控制、采样及软件设置全方位考虑, 主要有如下可能。

表 1 调节前后逆变器带载与旁路带载测量电压对比

参数调节前后对比	测量电压	逆变器带载 EA 导通, EN 截止 (V)	旁路带载 EA 截止, EN 导通 (V)	程序同步 初相角过 程参数
调节前	逆变器输出电压	221.4	207.5	128
	EA 端电压	0.99	14.55	
	EN 端电压	7.8	0.92	
调节后	逆变器输出电压	221.4	219.6	115
	EA 端电压	1	8.1	
	EN 端电压	7.8	0.9	

#### 4.2.1 静态开关卡和接口卡的接线存在异常

本次清扫工作中卡件清洁使用吹风机, 全过程防静电措施到位, 程序中重要端子测量结果全部合格, 对各卡件的排线、插头检查均插接到位无松动, 可排除。

#### 4.2.2 EA 卡故障

目视检查卡件无异常, 使用一块以往大修从现场换下的良品备件对 EA 卡进行更换, 故障现象完全一致, 各电压数据吻合, 可排除。

#### 4.2.3 EN 卡故障

目视检查卡件无异常, 使用换下的 EA 卡对 EN 卡进行更换, 故障现象完全一致, 各电压数据吻合, 可排除。

#### 4.2.4 静态开关双向可控硅故障

对逆变器输出电压与母线输出电压进行录波, 在逆变器带载情况下, 逆变器与母线输出电压波形一致, 为标准正弦波; 切至旁路带载时, 母线电压与旁路电压一致, 为标准正弦波。证明静态开关的双向可控硅可正常导通, 且无击穿现象, 可排除。

#### 4.2.5 采样接口卡故障

逆变器带载时，逆变器输出电压、母线输出电压、旁路输出电压均为 220V 正常，且在操作面板中观察到的母线输出电压、旁路输出电压均为 220V。因接口卡造成电压采样异常影响逆变器实际输出的可能性无（操作面板无读取逆变器电压功能），可排除。

#### 4.2.6 控制主板程序 EA 同步初相角参数异常

逆变器为了稳定跟随旁路市电信号，使用了一种锁相环（phase-locked loop, PLL）控制技术，PLL 作为一种闭环反馈控制系统，以其可以在一定范围内良好地使输出相位和频率跟踪输入信号而被广泛地应用在并网逆变器控制系统中<sup>[2]</sup>。

PLL 电路由鉴相器（phase detector, PD）、环路滤波器（loopfilter, LF）和压控振荡器（voltage-controlled oscillator, VCO）三大基本部分组成。鉴相器将输出反馈电压与输入参考电压信号进行相位比较输出一个与二者相位差成正比的误差电压，再经过环路滤波器后滤除其中的高频成分，输出一个直流控制电压，它将使压控振荡器的频率和发生变化，向输入信号频率靠拢，最后使振荡频率等于输入电压频率，环路锁定。环路一旦进入锁定状态后，压控振荡器的输出信号与环路的输入参考电压信号之间只有一个固定的稳态相位差，而没有频差存在，而且当输入信号频率在捕捉带范围内变化时或相位变化时，输出信号跟踪输入信号的频率和相位<sup>[3]</sup>。

逆变器输出电压在设计上利用了锁相环原理实时跟踪旁路输出电压的频率与相位，由于两个电压是共 N 极的，在 EA 截止 EN 到通时，逆变器输出电压与旁路带载的母线输出电压之间的电压差即 EA 两端截止压降测量值为 14.55V，该压差实际是因为逆变器与母线输出电压之间存在相角差而产生的一个周期变化的电压差向量的有效值，该相角差等效为同步相角差，而母线电压此时为旁路带载的 220V 正常电压，逆变器电压波形为旁路电压波形经过相角差偏移量移位后的波形，两者之间必然存在电压差，只有尽可能减小相角差让波形重合度更高，才能减小因相角差带来的电压差，使逆变器输出升高到正常。如果控制主板程序 EA 同步初相角参数异常，导致 PLL 控制电路的锁相角阈值变大，当逆变器输出波形跟随旁路电压进行同步调节时达到某一个较大的相角差时就进行了锁相保持了相位稳定，那么逆变器电压与旁路电压波形就会存在较大的电压差，而旁路电压减去此较大电压差必然导致逆变器电压偏低。

为了验证以上理论分析，通过以下试验进行了验证。首先根据系统软件校准菜单第 52 步“Calibration of zero phase only with EA”对控制主板程序 EA 同步初相角参数进行了调节，相当于修正减小故障中存在的较大相角差，调节前后数据对比如表 1 所示，完成调节后，EN 导通时逆变器电压已从 206V 增大到了 219.6V，满足了系统要求，多次进行切

换试验和录波无异常，且无任何异常报警。

调节前与调节后系统各输出波形对比如图 2 所示，逆变器带载阶段逆变器输出与系统输出电压因 EA 压降很低基本完全重合，只需要比较旁路带载阶段波形，可明显发现相角差调节前，逆变器与旁路电压偏差较大，很容易造成静态开关承受较大环流甚至切换失败，而调小后对逆变器跟随旁路电压的重合度有很大改善，进一步证实电压差是因为逆变器与旁路输出电压之间存在相角差导致。

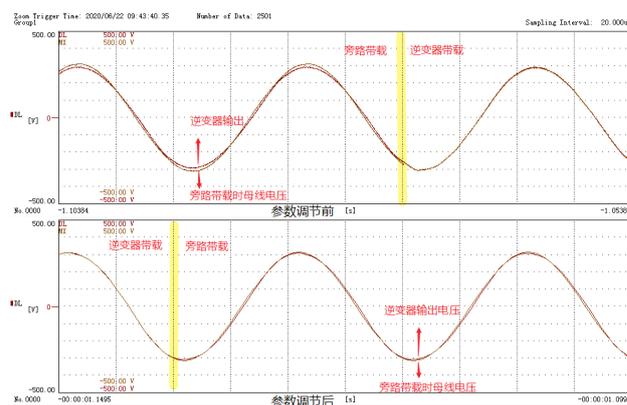


图 2 调节前（上）与调节后（下）系统各输出波形

## 5 结论

论文通过逆变器的 SPWM 原理、静态开关原理进行了详细阐述，对不间断电源系统的结构及运行方式进行了分析研究，然后结合逆变器故障报警的事件过程，对故障根本原因采取了逐级深入地分析，首先定位了导致逆变器出现 CB03 电容电流故障的直接原因为系统旁路带载时逆变器输出电压异常，随后从系统硬件控制、采样及软件设置全方位考虑了各种可能原因并逐一分析排查，最终通过分析研究逆变控制的锁相环原理，深入剖析并成功定位了故障的根本原因因为控制主板程序 EA 同步初相角参数异常，并通过试验后的详细数据和录波波形进行了充分验证，为后续设备出现同类复杂技术问题的处理提供了良好的参考和借鉴。不间断电源作为核电站电仪设备中的重要供电电源被列为关键敏感设备，此类逆变器的故障可能导致核安全相关供电冗余性降低，甚至影响核电站的可靠运行，研究逆变器的工作原理及掌握一定的故障分析能力对于提升设备管理水平非常重要。

## 参考文献

- [1] 陶奕冰,李浩亮.基于DSP的单相SPWM逆变器数字化控制技术[J].现代信息科技,2017(12):35.
- [2] 宋杨呈祥.应用于并网逆变器的锁相环关键技术[J].分布式能源,2017(6):34.
- [3] 曾正,邵伟华,刘清阳,等.并网逆变器数字锁相环的数学物理本质分析[J].电工技术学报,2018(2):809.