

# 停堆系统电源分析与故障解决

停堆棒电源是CANDU堆一号停堆系统的重要设备部件。无须经过任何控制逻辑，它的好坏直接关系到停堆系统动作与否。在没有厂家手册，图样文件不清晰的情况下，对95 V电源系统进行了深入的理论分析，设备的实测，重新绘制了触发电路，电流限制回路等电路回路，并对其控制功能进行了仿真，得到了缺陷诊断的重要数据。为电源的缺陷诊断与认识提供重要依据，并节省了设备采购的费用。

韩家伦 王晓峰 姜 武 徐清华/中核核电运行管理有限公司维修五处

## 0 引言

一号停堆系统属于专设安全系统之一，通过向反应堆中插入停堆棒来终止反应堆的自持链式裂变反应，吸收中子，减少核燃料产生的能量。

一号停堆系统从反应堆得到工艺测量参数与核测参数送到D通道脱扣逻辑。如果某一参数值达到脱扣设定值，则D通道将脱扣。D通道脱扣信号分别输送到奇数组停堆棒和偶数组停堆棒的3取2逻辑回路。当E通道或/和F通道也脱扣（无论脱扣原因是否和导致D通道脱扣的工艺参数相同），一号停堆系统将触发，奇数组和偶数组停堆棒离合器失电，28根停堆棒在加速弹簧和重力的双重作用下落入反应堆中，引入 $-80\text{ mk}$ 的负反应性。

正常运行情况下，95 V电源系统通过加载离合器保持其通电吸合。当停堆棒需要提升时，电动机起动，带动蜗轮蜗杆转动并通过减速齿轮减速使停堆棒提升。当停堆棒到达顶部位置后，停堆棒位置测量装置发出停堆棒到顶的信号，自动切除电动机电源，电动机停运，停堆棒就被悬挂在反应堆的顶部保

持不动。

当一号停堆系统触发时，28根停堆棒失去了保持落入堆芯。控制停堆棒的离合器由两路95 V电源系统同时供电，正常运行时由三级电源整流后供电（DC 95 V），三级电源故障时由二级电源供电（DC 92.5 V）。当其发生故障时将不通过任何逻辑直接导致一号停堆系统动作的情况发生。某年设备发生故障，当时95 V电源停电检修，钳位电源进行工作，但设备出现故障，效率偏低，直接导致电源跳闸停堆棒下落。

在随后的时间里，在图样不清晰和技术资料匮乏以及厂家故障定位失误的背景下，开展了基础数据的收集分析，最后进行设备试验和仿真计算，最终定位了故障，提高了电源效率，提高系统的安全性。

## 1 95 V直流电源工作原理

95 V电源系统由可控整流主回路和晶体管触发控制电路组成。95 V电源通过电源变压器将交流电压变成整流电路要求的交流电压，其后利用两个整流二极管和晶闸管构成单相桥式半控整流电路。由于整流得到的输出为单向脉动电压，于是在负载之前加入LC滤波器调整输出电压的脉动系数得到平稳的直流电压。基本原理图如1所示。

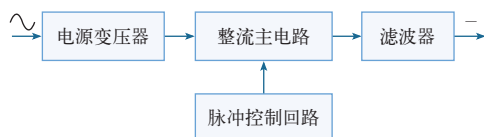


图1 基本原理图



韩家伦/工程师

### 关键词/Keywords

95 V电源 ·  
仿真 ·  
触发电路 ·

在晶闸管承受正向电压的时间内,通过控制电路产生的触发脉冲进行移相,从而改变晶闸管的导通时间,负载上的电压波形也就随之改变。所以控制触发脉冲的输出时刻,就可以控制整流电路的输出电压的大小。

### 1.1 电源基本构成

95 V电源系统由以下部件组成:输入与输出回路断路器、主电源变压器、桥式半控整流器、LC滤波器、脉冲控制电路板、机架和分流电阻。

在电源变压器一次侧和直流电源输出侧各安装一个断路器。电源变压器AC一次侧断路器当电流超过40 A将进行动作。直流电源输出DC侧提供30 A的输出保护,它是输出负载的最后一个部件。

主电源变压器采取双绕组结构,提供给整流元件正确的电压。

桥式整流器采用两个型号为IR40HF60的二极管,两个MCR6510的晶闸管构成整流电路。

为了减小输出电压的脉动程度,在滤波电容之前串接一个铁心电感线圈,组成了电感电容滤波器。电感线圈对整流电流的交流分量具有阻抗,谐波频率愈高,阻抗愈大,所以它可以减弱整流电压中的交流分量。 $\omega L$ 比负载大得越多,滤波效果越好;经过电容滤波,再一次滤掉交流分量,输出纹波很小的输出电压。

为了采集输出电流的大小,采用分流器设备。分流器是电阻值很微小的电阻。95 V电源系统没有介绍原理的维修手册,甚至图样都不是很明显。这为设备分析与故障诊断带来了困难,如何确认电阻值达到毫欧级别的分流器?现场的各种仪器准确度级别都达不到。搭建电路,电阻值太小,必须要很大的电流才能进行计算。但是电流过大又会直接导致电路跳闸。搭建回路使用精密电阻测试,电阻值达到2.25 m $\Omega$ 。使用一台专用仪器也得到分流器数值为2.25 m $\Omega$ 。

95 V电源系统全部的设备安装于一个整体机架当中,前面板安装输出电流表、输出电压表、AC和DC断路器、电压调整电位计以及限流电位计。后面板安装输入AC电压,输出DC电压。

### 1.2 控制回路工作原理

如图2所示,95 V直流电源的正端输出与负端输出在特定的电路中采样,采样得到的电压信号与一个反馈信号进行比较放大,得到的放大信号通过移相电路控制晶闸管导通时间,从而实现电压的可调。

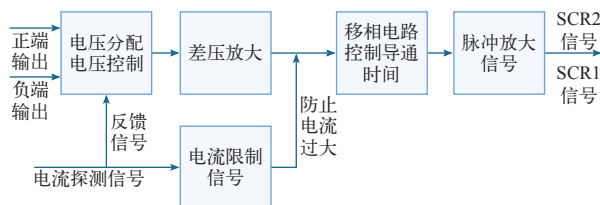


图2 控制回路

95 V直流电源的电压输出通过分流器来反映(即电流探测信号),分流器与负载串联,它用于测量一个较大的直流电流(95 V直流电源负载比较小导致电流比较大)。负载固定时,电源输出电压与电流是成比例的。当95 V直流电源电压变化导致电流变化,从而实现通过分流器的电压产生变化,一部分经过处理的分流器产生的电压信号,通过反馈与采样得到的电压信号进行比较,从而控制导通角的变化直接进行电压大小的调整。

另一部分经过处理的分流器产生的电压信号通过二极管钳位,直接作用于主控制回路中,当回路中的电流值大于设定的电流值时,直接控制主回路移相电路调整导通角降低电压值,防止主回路电流过大引起设备的损伤。

## 2 控制电路分析

95 V电源控制电路是整个电源进行电压调整控制的核心。电压的大小调整,电流的过电流保护,脉冲信号的移相,电压信号的采样,脉冲信号的放大与触发,电压电流的指示全部经过控制电路进行控制。

### 2.1 触发电路分析

图3为信号发生电路,由此电路产生需要变换的波形。

控制板经电源引入板内变压器,经变压器输出电压为17 V,而相位相差180°的交流电压,分

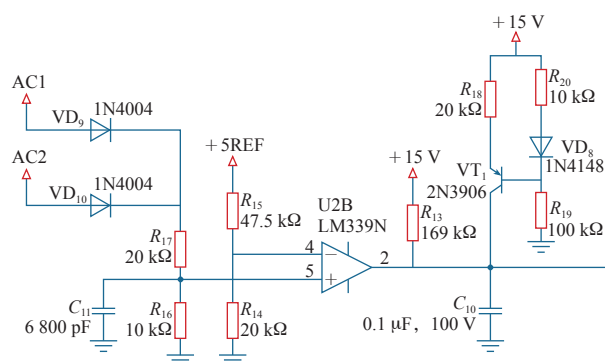


图3 信号发生电路

别引入AC1、AC2。经过二极管整流成为一个单向波形，最后经过分压二极管VD<sub>9</sub>、VD<sub>10</sub>将电压减小1/3波形，经过减小的电压经过过零比较器U2B产生矩形波。信号经过比较器后产生矩形波，送入滞后比较器U2A的同相端，经过处理过的取样信号送入滞后比较器的反相端成为输入参考电平。

迟滞比较器是比较器的一种，它使比较器的输入阈值随输入参考电平而改变。这种比较器的特点是有两个阈值，且并不相等，随输入信号 $u_i$ 的逐渐增大或逐渐减小时，在阈值处变化。

设其同相输入端电压为 $u_i$ ，反相输入电压为参考电压 $u_r$ ，输出为 $u_o$ 。设其为理想比较器，则 $u_+ = u_-$ 。

得到相应的等式

$$\frac{u_i - u_+}{R_{12}} = \frac{u_+ - u_o}{R_{11}}$$

由于 $u_+ = u_- = u_r$

推导得

$$u_i = \left(1 + \frac{R_{12}}{R_{11}}\right) u_r - \frac{R_{12}}{R_{11}} u_o$$

于是门限上限电压

$$u_{TH} = \left(1 + \frac{R_{12}}{R_{11}}\right) u_r - \frac{R_{12}}{R_{11}} u_{OL}$$

门限下限电压为

$$u_{TL} = \left(1 + \frac{R_{12}}{R_{11}}\right) u_r - \frac{R_{12}}{R_{11}} u_{OH}$$

$u_{OH}$ 、 $u_{OL}$ 为电源正负极供电电压。由公式可以看到，改变 $u_r$ 的值即能改变门限上限、下限电压值，从而改变电压导通角的大小实现电压的变化。

迟滞比较器输出信号经过场效应管隔离之后，通过一个放大的电路，续流二极管与线圈并联，防止线圈产生感抗效应，最终输出控制脉冲信号。

## 2.2 电流限制回路

根据电路模拟出负载和分流器在95 V的回路中的状态，当回路中电流 $I$ 通过分流器时，这时分流器相当于一个传感器。在2.25 mΩ分流器作用下转化电流信号为 $I \times 2.25 \text{ m}\Omega$ 的一个电压信号。电流信号经过差值比较器放大输出送入一个二极管中。二极管钳位控制电压与电流限制信号。当电流过大时，电流限制信号导通去控制导通角使电压降低，从而防止电流 $I$ 过大影响整个回路。设分流器电阻为 $R_1$ ，则通过分流器电阻后电压为 $IR_1$ 。

根据比较器理想化特性得同相输入 $U_+$ 等于反相输入 $U_-$ 。则

$$U_+ = \frac{5R_{38}}{R_p + R_{39} + R_{38}} = a$$

式中， $R_p$ 为 $R_{39}$ 下电位计。

$$U_i = \frac{(5 + IR_1)R_{36}}{R_{36} + R_{37}}$$

式中， $U_i$ 为 $R_{36}$ 、 $R_{37}$ 之间的输入电压。

得等式

$$U_- = U_i - \frac{(U_i - U_o)R_{40}}{R_{40} + R_5}$$

式中， $U_o$ 为比较器输出电压。

推导得

$$U_o = \frac{R_5}{R_{40}} U_i - \frac{(R_{40} + R_5)a}{R_{40}}$$

式中， $U_i$ 为关于 $I$ 的等式； $a$ 为关于 $R_p$ 的等式。

可以得出当 $R_p$ 设定为一定值时， $U_i$ 越大即 $I$ 越大 $U_o$ 越大。所以根据电位计 $R_p$ 可以设定电流值 $I$ 。当 $I$ 到达一定值时即 $U_o$ 到达一定值， $U_o$ 导通直接控制输出移相。

## 3 95 V电源系统转换效率低下缺陷分析

电源是一个由变压器和交流/直流转换器以及相应稳压电路所组成的综合变电器，本身就存在



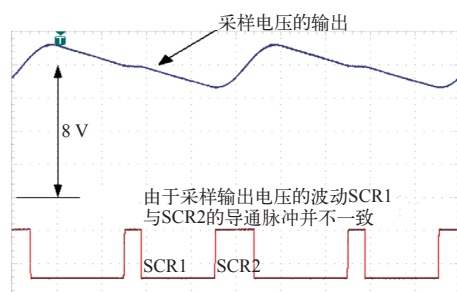


图6 采样与脉冲图样

采样电路与 $R_{46}$  ( $210\text{ k}\Omega$ ) 并联了一个电容 $C_{14}$  ( $1\text{ }\mu\text{F}$ )，电容的作用在于加快电路的反应速度，但是在模拟过程中 $C_{14}$  ( $1\text{ }\mu\text{F}$ ) 电容由于其电容值比较大，其通交阻直的作用使采样电压的纹波也予以增大。采样电压是从 $95\text{ V}$ 电源输出比例采样，于是纹波效应更加凸显。实际电路中不易试验，本文采取仿真软件仿真过程。采样电路如图7所示。对负载连续并接采样电路，并对 $C_{14}$ 进行了区别，分别为 $1\text{ }\mu\text{F}$ 、 $0\text{ }\mu\text{F}$ 和 $0.1\text{ }\mu\text{F}$ ，观测电源（红色线）， $1\text{ }\mu\text{F}$ 下采样电压（蓝色）， $0\text{ }\mu\text{F}$ 下采样电压（黄色）， $0.1\text{ }\mu\text{F}$ 下采样电压（棕色）仿真得到的结果如图8所示。输出为 $95\text{ V}$ 电压加纹波电压 $2\text{ V}_{\text{p-p}}$ 模拟输出。

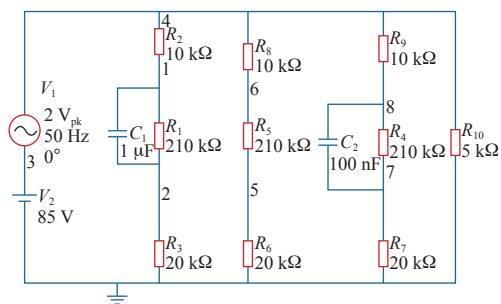


图7 采样电路

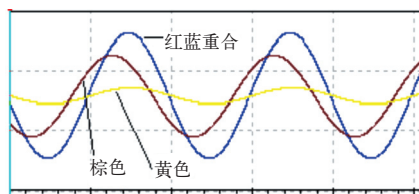


图8 仿真结果

由图8看到红色曲线（测量电源的波形，缩小了直流叠加的大小，）与蓝色曲线重合，说明电容越大通交能力越强，导致纹波越大。

棕色曲线电容变小（取值为 $0.1\text{ }\mu\text{F}$ ），并没有

显著地改善取样电压的纹波变化。

黄色为没有电容时的情况，清楚地看到，纹波特性得到了改善。于是在电路板中去掉 $C_{14}$ 电容，试验检测如下表所示。

表 试验数据

| 负荷电阻               | 交流电流值<br>$I_1/\text{A}$ | 交流电压值<br>$V_1/\text{V}$ | 输入功率<br>$W_1/\text{V}\cdot\text{A}$ | 直流输出电流<br>$I_2/\text{A}$ | 直流输出电压<br>$V_2/\text{V}$ | 输出功率<br>$W_2/\text{W}$ | 效率 (%) | 直流输出纹波电压<br>$V_{\text{AC}}$<br>( $< \text{AC } 1\text{ V}$ ) |
|--------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|--------|--------------------------------------------------------------|
| 空载                 | 1                       | 129.4                   | 129.4                               | N/A                      | 0                        | N/A                    | N/A    | 0                                                            |
| $30\text{ }\Omega$ | 8.2                     | 128.7                   | 1 055                               | 3.2                      | 92.6                     | 296                    | 28     | /                                                            |
| $20\text{ }\Omega$ | 11                      | 128.5                   | 1 413                               | 4.8                      | 92.6                     | 444                    | 31.4   | 0.33                                                         |
| $10\text{ }\Omega$ | 18.4                    | 127.6                   | 2 351                               | 9.8                      | 92.6                     | 907                    | 38.6   | 0.63                                                         |
| $5\text{ }\Omega$  | 32                      | 125.9                   | 4 028                               | 21.1                     | 92.5                     | 1 951                  | 48.4   | 0.89                                                         |
| 序号                 | 测量仪表名称及型号               |                         | 仪表编号                                |                          | 仪表有效期                    |                        |        |                                                              |
| 1                  | 钳形电流表HOIKI3288-20       |                         | 110118166                           |                          | 2014-8-28                |                        |        |                                                              |
| 2                  | 万用表FLUKE287C            |                         | 16000095                            |                          | 2014-11-28               |                        |        |                                                              |

没有电容时的情况，纹波特性得到了改善，于是在电路板中去掉 $C_{14}$ 电容，试验最终证明采取的措施是有效的，解决了电源效率低的问题。

## 4 结束语

$95\text{ V}$ 电源出现故障会产生严重后果，导致停堆棒直接插入堆芯。因此， $95\text{ V}$ 电源系统研究显得很有意义。然而电源维修手册讲解非常单一，仅是功能介绍，并无实际内容，图样表达模糊，元器件都找不出来。于是手绘控制板功能图，查询相关书籍，对其进行了理论分析，设备实际检测，依据数据进行实地仿真，最终找到缺陷的原因。修复了12台效率低下的电源，节约了设备采购费用，为 $95\text{ V}$ 电源缺陷分析提供了依据，也为之后的研究者提供了一些资料。

## 参考文献

- [1] 张洪润，等．模拟电路与数字电路 [M]．北京：清华大学出版社，2008．
- [2] 王远．模拟电子技术 [M]．北京：机械工业出版社，1997．
- [3] 张洪润．实用自动控制 [M]．成都：四川科学技术出版社，1993．

（收稿日期：2016-11-23） EA