机架电源负载自动调节测试台的开发与应用

面对电站计算机（DCC）48 V电源输出功率不足导致故障现象增多，为满足DCC的数字量输入（DI）机架48 V电源离线测试的需要，电源负载自动调节测试台应运而生，它可以模拟48 V电源在动态负载下的现场工作条件，便于离线定位电源故障。它使用嵌入式系统，控制程序在C51语言环境下开发，并在测试平台搭建前，使用仿真软件Proteus进行了仿真验证，以确认需要选择的控制参数和系统设计的可靠性。使用该测试平台，成功再现了48 V电源故障时的现象，掌握了电源在运行状态下的特点，明确了电源国产化的技术规格要求。此外，该测试平台也可以因地制宜，与其他设备配合进行应用扩展。

赵　心／中核核电运行管理有限公司

赵　心／工程师

关键词／Keywords
48 V电源模块 ·
自动调节 ·
嵌入式系统 ·
Modbus C语言 ·
仿真 ·

自2012年以来，中核运行秦山三厂电站计算机（DCC）的数字量输入（DI）机架陆续出现48 V电源电压持续波动降低至37.8 V，超出安全阈值的故障现象。将设备下线后，对怀疑因过热而导致故障的48 V电源模块进行更换后，再重新上线，该机架的48 V电压即可恢复正常，DI信号和控制程序未受影响。

开发的目的

由于现场条件的限制，在线测试会给电厂运行造成干扰和风险，所以必须开发电源负载自动调节测试平台，才能对DI机架的48 V电源模块进行离线测试和分析，负载控制则需要采用动态调节的方式，才能符合现场设备的运行状态。

测试台的开发

1. 设计开发

（1）现场数字量输入回路（DI）的工作原理

如图1所示，现场DI回路采用干触点连接方式，由DI机架的＋48 V电压对信号回路供电。＋48 V电压由两个48 V电源模块的输出端直接并联后，经DI板卡输出（＋48 V OUT）。当现场触点闭合时，＋48 V电压经过闭合的触点后，返

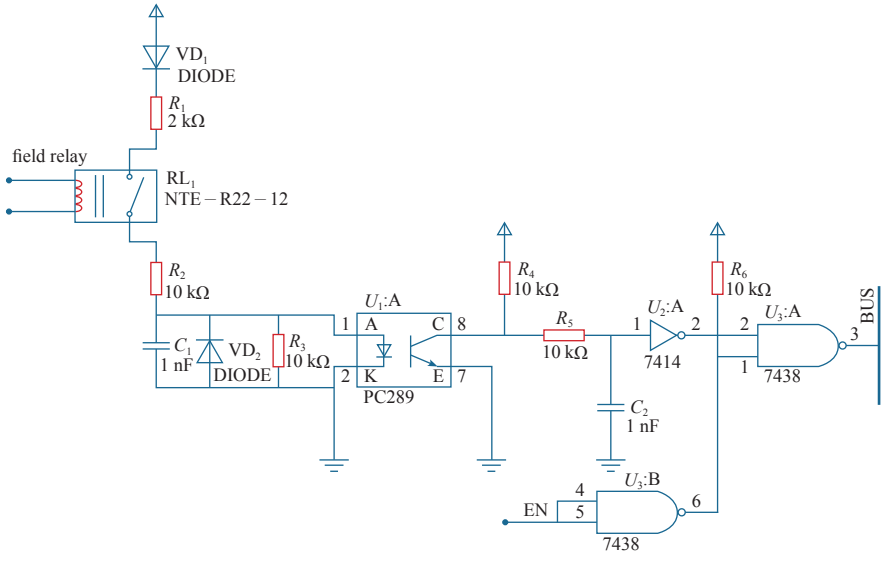

图1　电站计算机DI信号电路原理图

中国知网　https://www.cnki.net

回DI板卡上，经过光电耦合器内部的二极管到达机架的直流地（+48 V RTN）。光电耦合器所转换的逻辑电平信号上传至电站计算机（DCC）的数据总线。一个DI机架有16块DI板卡，每块DI板卡包含16个DI通道，共有256个DI通道。每个现场DI触点导通时需要10 mA的驱动电流，这样，当所有DI触点均闭合时，所需要的最大工作电流为：$I=2^4\times2^4\times10^{-2}$ A=2.56 A。

（2）设计思路

测试平台是具有数据记录功能、负载调节功能和测试过程控制功能的集成系统，由模块化结构所组成，便于安装、调试和更换。按照功能可以划分为控制分析模块、记录模块，负载调节模块以及测试对象。根据现场情况，可调节负载可以控制电源功率在0%～122%之间变化。

（3）设计难点

测试平台开发的关键在于：根据实际需要，让软硬件二者相互配合，实现所需要的控制功能；在满足使用功能的前提下，对软硬件资源进行合理的配置；减少开发和调试的周期，满足工作需要。

2. 开发过程

（1）开发方案

按照设计要求，记录模块采用记录仪和万用表，负责采集记录电源电压、电流的数据。控制器模块、负载模块都采用8051系列单片机，通过串口，按照Modbus协议发送和接收功能码。负载模块的P2.0～P2.4端口输出开关量信号到光电耦合器，再由光电耦合器驱动继电器，控制接入负载电阻的数量，达到对48 V电源的负载进行定时定量调节的目的。控制器模块单片机的P1.0和P1.1管脚分别连接一个开关，用于对4种工作模式（轻负载、重负载、循环和动态）进行设定和切换，P2.0～P2.1管脚分别与两个LED相连，指示负载工作模式。由于电站计算机DI所对应的应用程序的执行周期为2 s，所以以这种控制方式能够模拟现场负载动态变化的效果。控制软件采用C语言开发工具进行程序的编写，调试。

（2）软件编写

软件编写的关键是建立符合Modbus总线协议的串口通信，按照此协议，控制器模块可以和负载模块进行通信，也可以将不同的设备联成网络，信息集中管理，控制分散执行，保证系统的实时性。单片机频率为11.059 2 MHz，按照Modbus RTU模式，通信波特率为9 600 bit/s，通过串口一次发送命令的一个字节。命令由负载模块地址、功能号、负载端口地址和负载数据4部分所组成，控制相应的继电器。每一部分包含1位起始位，8位数据位，无校验位，1个停止位， 8个数据位由一或两个十六进制字符组成，最小的有效位先发送。其中，设定参数如表1所示。对应的功能发送与接收函数如下：

```
uchar presetSingleRegister（uchar addr，uint registeraddr，uint tempData）//发送函数
{while（（receCount<8））//等待
{ES=0；//关中断if（（receBuf[0]==addr）&&（receBuf[1]==6）&&（receBuf[6]==sendBuf[6]）&&（receBuf[7]==sendBuf[7]））
{receCount = 0；
ES=1；
return SUCCESS；}
receCount = 0；
ES=1；
return FAILURE；}}
void presetSingleRegister（void）//接收函数
{addr = （receBuf[2]<<8） + receBuf[3]；
tempData = （receBuf[4]<<8） + receBuf[5]；
sendBuf[0] = LocalAddr；
sendBuf[2] = addr >> 8； //寄存器地址高位
sendBuf[3] = addr & 0xff；//寄存器地址低位
sendBuf[4] =receBuf[4]；
sendCount = 8；
Begin_send（）；}
```

表1 Modbus－RTU消息代码设定

模块	地址	功能码	寄存器地址	数据范围
控制器	0	–	0x40～0x60	0x00～0xFF
负载	1	6	0x80，0x90，0xA0	0x00～0xFF

中国知网 https://www.cnki.net

（3）测试平台仿真

为提高工作效率，减少元器件不匹配所造成的问题，在开发中采用了仿真软件Proteus进行仿真验证。通过所选择的虚拟测试点，可以观察平台的工作情况，调节设定各个元器件的工作参数到最佳状态，实物如图2所示。

测试平台的设计保证了足够的驱动能力和触点容量。负载模块的单片机（8051）、模式设定器件（开关）、LED指示灯和分立元件（电阻，电容，晶振）都安装在一块PCB板上，由5 V电源供电。可调负载模块由两个继电器级联组成，第一级继电器所使用的光电耦合器的型号为DSC817，三极管采用2N2222，限流电阻的阻值为20 Ω。第二级继电器的触点串入48 V电源输出回路，其线圈则由第一级继电器的触点驱动，经过调试和模拟，满足2 s周期的控制脉冲波形定时程序如下：

```
if（bt2s!＝19600）
bt2s＝bt2s＋bt1ms；
else
 bt2s＝0；
void timer0_IntProc（） interrupt 1
{TL0 ＝ 0x66；
    TH0 ＝ 0xFC；
  bt1ms ＝ 1；}
```

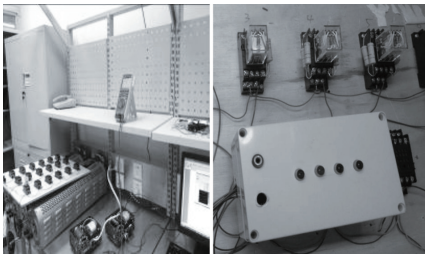

图2 测试台实物

（4）系统测试

电源的Sense控制信号端的反馈电阻是一个5 kΩ的可调电阻（与现场电位计相同）。当输出电流为2.56 A时，负载等效电阻阻值为18.75 Ω，功率为122.88 W，为模拟现场的工作条件，满足48 V电源的测试需要，可调负载回路采用25个470 Ω/5 W的电阻，平均分成5组而组成，对应的负载参数如表2所示。

表2 可调负载对应参数

负载变化范围（%）	额定电流/A	等效电阻/Ω	功率/W
0	0	∞	0
25	0.511	94	24.5
50	1.02	47	73.54
75	1.53	31.33	73.53
100	2.04	23.5	98.04
122（并联测试用）	2.55	18.8	122.55

（5）电源故障定位与分析

大修的DI测试程序可以驱动机架内所有DI触点同时翻转，所以在电源模块并联测试时，设定动态模式的负载在100%～122%之间变化，相当于22%的DI信号在不断变化。决定先对单个电源进行测试，再在并联条件下对两个电源模块的电压和电流进行观察，最后对工作参数进行记录和比较，所有数据都是在24℃环境温度下测得。

测试

1. 电源单体测试

将电源模块单独接入测试台负载回路，在电源的带载能力范围内进行测试，再更换为新电容后重复进行测试。记录参数如表3、表4所示。输出电压波形如图3、图4所示。电源模块温度如图5所示。可见：

1）在静态负载条件下，旧电源的工作稳定，输出电压为48 V，电压变化幅度为1.5 V。

2）在动态负载条件下，旧电源的工作不稳定，输出电压偏低，变化幅度为12 V，电压呈锯齿状起伏变化，更换电容后，电源的工作状态都非常稳定。

表3 单电源模块旧电容测试

测试对象	48 V－1#（旧电容）			48 V－2#（旧电容）		
	测试项目1#			测试项目2#		
测试条件	输出电流/A	输出电压/V	电源温度/℃	输出电流/A	输出电压/V	电源温度/℃
单电源轻负载47 Ω	1.02	47.6～49.1	58	1.01	50	60
单电源重负载23.5 Ω	2.04	50	71	2.04	48.2	69
单电源动态负载(23.5～31.33 Ω)	1.4～1.5	32～43	78	1.4～1.8	34～45	75

中国知网 https://www.cnki.net

表4　单电源模块新电容测试

测试对象	48V－1#（新电容）测试项目1#			48V－2#（新电容）测试项目2#		
测试条件	输出电流/A	输出电压/V	电源温度/℃	输出电流/A	输出电压/V	电源温度/℃
单电源轻负载 47.0 Ω	1.02	49	55	1.02	48.5	58
单电源重负载 23.5 Ω	2.04	50	73	2.04	49	71
单电源动态负载 (23.5～31.33 Ω)	1.88	51	71	1.87	50	74

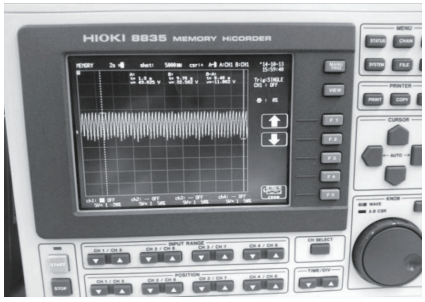

图3　单电源模块旧电容动态负载输出电压（32～43 V）

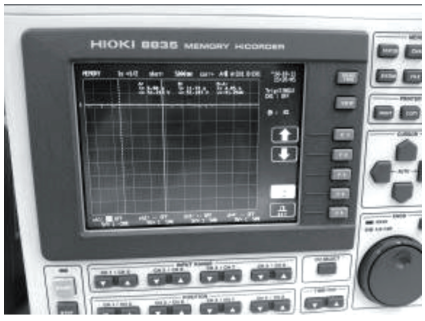

图4　单电源模块新电容动态负载输出电压（51 V）

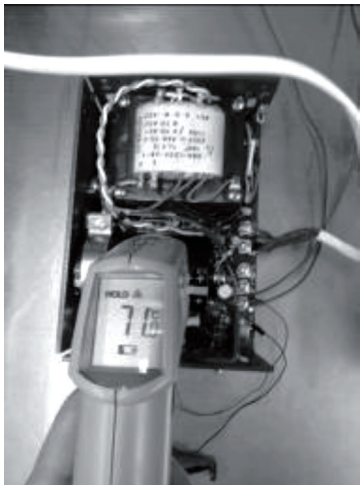

图5　单电源模块新电容动态温度（71℃）

3）若要令一个电源的温度在停机20 min后温度还在40℃，则该电源的连续功率输出至少要等效于72 W。

2. 电源并联测试

将两个电源模块并联，接入测试平台负载回路后测试并记录数据如表5所示。再将其中一个保持旧电容不变，另一个换为新电容，继续测试并记录数据如表6所示。再全更换为新电容，测试并记录数据如表7所示。输出电压如图6、图7所示。电源模块温度如图8所示。与单体测试相比，更换为新电容后，输出电压恢复正常，但输出功率不均的现象依然存在。

表5　并联电源模块旧电容测试

测试对象	48 V－1#（旧电容，单体电压48.52 V）测试项目1#			48 V－2#（旧电容，单体电压40.6 V）测试项目2#		
测试条件	输出电流/A	输出电压/V	电源温度/℃	输出电流/A	输出电压/V	电源温度/℃
并联电源轻负载 31.33 Ω	1.52	50	55	0.03	–	39
并联电源重负载 23.5 Ω	2.01	47.6	82	0.05	–	39
并联电源动态负载 (18.8～23.5 Ω)	1.60	34～45	86	0	–	39

表6　并联电源模块新旧电容测试

测试对象	48 V－1#（旧电容，单体电压48.52 V）测试项目1#			48 V－2#（新电容，单体电压40.32 V 测试项目2#		
测试条件	输出电流/A	输出电压/V	电源温度/℃	输出电流/A	输出电压/V	电源温度/℃
并联电源轻负载 31.33 Ω	1.51	51	54	0.05	–	39
并联电源重负载 23.5 Ω	2.00	49	82	0.05	–	39
并联电源动态负载 (18.8～23.5 Ω)	1.64	32～51	85	0.57	–	39

结束语

使用测试平台，通过离线测试，对48 V机架电源故障原因和影响有了直观的认识和证明：

1）通过更换部件进行对比观察的方法，可知

中国知网　https://www.cnki.net

表7 并联电源模块新电容测试

测试对象	48V－1#（新电容，单体电压48.3 V）			48V－2#（新电容，单体电压40.5 V）		
测试条件	测试项目1#			测试项目2#		
	输出电流/A	输出电压/V	电源温度/℃	输出电流/A	输出电压/V	电源温度/℃
并联电源轻负载 31.33 Ω	1.51	48.8	54	0.05	–	38
并联电源重负载 23.5 Ω	2.01	47.9	65	0.04	–	39
并联电源动态负载（18.8～23.5 Ω）	2.17	48～49	74	0.38	–	39

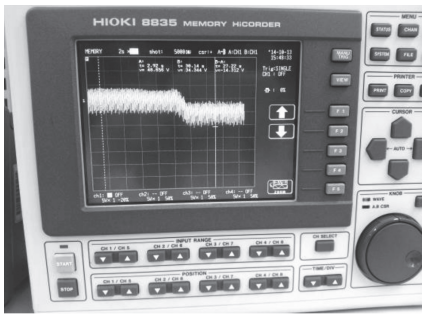

图6 并联电源模块旧电容动态负载测试（34～48 V）

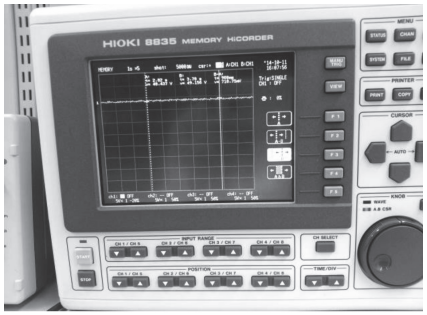

图7 并联电源模块新电容动态负载测试（48.4～49.2 V）

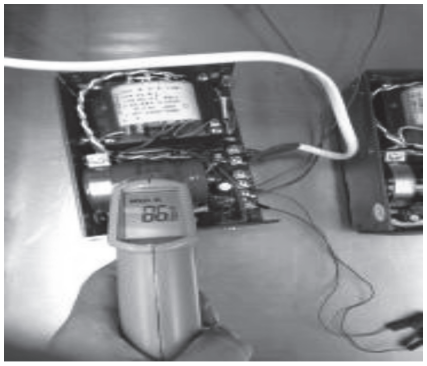

图8 并联电源模块旧电容动态负载温度（86℃）

电容老化是电源模块故障的直接原因。在保持电源工作条件不变的前提下，都更换为新电容后，电压输出正常，纹波电压减小。这说明长期在不均衡负载条件下运行，由于电容老化，电源模块已无法承受负载的动态变化。

2）电位器有死区，因此两个电源模块电压不会一致。即使差值只有1 V，2 V，也会导致并联输出时负载不均衡，但由于电源模块内部结构的缘故，并不会造成电源之间的逆充电，现场设备是安全的。

3）在静态重负载条件下，若负载状态不均衡，并联输出的电压可以保持在48 V，但单体电压高的模块的温度已达到72 ℃。在动态负载条件下，若负载状态不均衡，则并联输出模式下输出电压随负载的增加和运行的持续时间增加而不断下降，最低可至23 V，温度可达80 ℃。

4）经过数据分析，可知两个模块的负载分配情况与其单体输出电压有关。高电压模块分配负载越多，所以，当高电压模块因持续工作而老化，输出功率下降时，就会造成机架电压下降，模块发热，而电压低的电源由于输出电压过低，就一直没输出足够的电流，因此，现场实施的高温电源模块替换方案是正确的。

本方案的创新点如下：

1）采用嵌入式系统，模块化设计，软件在在C语言编辑环境下进行开发，能够准确实现负载的通断控制。

2）测试平台采用Modbus总线协议，抗干扰能力强，灵活性较强，方便今后的扩展运用。

3）使用软件Proteus对测试平台的驱动进行仿真测试，使得控制器的计时更加准确，优化了系统参数，合理保证了开发进度，减少了实际设备调试所耗费的时间，降低了开发过程所面临的风险。

通过测试平台的应用，明确了DCC的DI机架48 V电源的故障原因；了解了现场条件下的48 V电源的工作状态和特性，目前，这些测试结果已经作为电源国产化项目的技术参考的标准。

中国知网 https://www.cnki.net

参考文献

[1] 谭浩强．C语言程序设计 [M]．2版．北京：清华大学出版社，2004：116-131．

[2] Forrest M．MiMis．III．Engineers mini-notebook 555 circuits [M]．New York：Tandy Corporation，1973：16-18．

[3] 张义和，王敏男，许宏昌，等．例说51单片机 (C语言版) [M]．北京：人民邮电出版社，2008：136-143．

[4] 阎石．数字电子技术基础 [M]．5版．北京：高等教育出版社，2006：213-226．

[5] 周航慈．基于嵌入式实时操作系统的程序设计技术 [M]．2版．北京：北京航空航天大学出版社，2011：216-226．

[6] 许维蓥，郑荣焕．Proteus电子电路设计及仿真 [M]．2版．北京：电子工业出版社，2010：141-156．

（收稿日期：2015－03－10）EA

(上接第72页)

3）交流场设备在安排和布置时，其最小空气间隙按照标准DL/T 5352—2006《高压配电装置设计技术规程》执行。

4）阀厅内部空气间隙距离修正设计时应考虑大气密度、温度和湿度修正，但应避免大气密度重复修正，建议修正公式为$U_{50-corr}=U_{50}/K_t$。

5）以海拔2 000 m处换流站为例，取阀厅内绝缘水平最高、空气间隙最大点进行计算得出：不重复考虑海拔修正系数情况下，空气间隙d值可减小10%。

6）瓷绝缘子污秽的外绝缘配置按照$U_{WS}=U_0(1-0.035H)$进行海拔修正，以1 000 m为基准，设备所处的海拔每增加1 000 m，爬距提高6%～8%。硅橡胶绝缘子的爬距可按瓷绝缘子爬距的75%来选取。

参考文献

[1] GB 311.1—1997 高压输变电设备的绝缘配合 [S]．

[2] IEC 60071－2—1996 绝缘配合使用导则 [S]．

[3] IEC 60694—2002 高压开关设备和控制设备常用规范 [S]．

[4] GB/T 20635—2006 特殊环境条件高原用高压电器的技术要求 [S]．

[5] 刘振亚．国家电网公司物资采购标准高海拔外绝缘配置技术规范 [M]．北京：中国电力出版社，2009．

[6] DL/T 5352—2006 高压配电装置设计技术规程 [S]．

[7] IEC 60060－1—1989 High-voltage test techniques part l：general definitions and test requirements [S]．

[8] DL/T 5426—2009 ±800 kV高压直流输电系统成套设计规程 [S]．

[9] CIGRE brochure 158 Task Force 33.04.01．Polluted insulators：a review of current knowledge [R]．Paris，2000．

[10] 聂定珍，袁智勇．特高压直流换流站外绝缘海拔修正方法的选择 [J]．电网技术，2008，32 (13)：1-4．

[11] 赵宇明，黎小林，吕金壮，等．高海拔地区外绝缘参数海拔修正方法研究 [J]．南方电网技术，2011，5 (2)：59-63．

（收稿日期：2015－06－18）EA

中国知网 https://www.cnki.net