

研
究
开
发

电力机车过分相过电压抑制新方法

李宗垒¹, 刘明光¹, 屈志坚², 王海姣¹(1. 北京交通大学 电气工程学院, 北京 100044;
2. 华东交通大学 电气工程学院, 江西 南昌 330013)

作者简介: 李宗垒(1986-), 男, 硕士研究生, 研究方向为牵引供电系统谐振过电压。

摘 要: 针对电力机车过分相时导致变电所跳闸、电弧烧损接触线等问题, 建立过分相过程的高阶等值电路, 理论分析影响过电压的因素, 得出机车过电分相的时刻是引起过电压的决定性因素, 高压互感器的饱和引起铁磁谐振过电压是造成设备绝缘击穿和保护装置误动作的主要原因。提出了利用自动过分相装置的强迫信号、机车速度与接触线的电压相位信号来控制电力机车达到过电分相的时刻来抑制过电压产生的新方法, 实现无过电压通过分相。利用电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 对过分相过程及抑制方法进行仿真验证。仿真结果表明, 新的控制方法可以有效地控制电力机车过分相过电压低于 50kV, 提高了机车运行的安全稳定性。

关键词: 电力机车; 电分相; 过电压; PSCAD; 过电压抑制

中图分类号: U223; TM264.91 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-128X(2013)05-0041-04

A New Method to Overvoltage Restrain of Electric Locomotive Passing the Neutral Section

LI Zong-lei¹, LIU Ming-guang¹, QU Zhi-jian², WANG Hai-jiao¹

(1. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. School of Electrical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang, Jiangxi 330013, China)

Abstract: Overvoltage problem caused by electric locomotive passing the neutral section, always result in traction substation trip or the arc eroding the contact line. In order to solve this problem, a high order circuit was established to analyze the overvoltage problem and found that the time of locomotive passing the neutral section was the conclusive factor causing overvoltage, and ferro-resonance overvoltage caused by high-voltage transformer saturation was the main reason leading to equipment insulation breakdown or protection's mis-operation. A new method was pointed out by utilizing auto-passing neutral section device force-breaking signals, speed of locomotive and contact line's voltage phase angle to realize the locomotive passing the neutral section without overvoltage. Electromagnetic transient simulation software PSCAD/EMTDC was used to simulate the process of passing the neutral section and the overvoltage restrain method. Simulation results indicated that the new overvoltage restrain method could efficiently control the overvoltage less than 50 kV and improve the security stability of the locomotive operation.

Key words: electric locomotive; neutral section; overvoltage; PSCAD; overvoltage restrain

0 引言

电气化铁路供电系统的电分相是为了防止两异相供电臂之间短路而设置的电气隔离装置, 同时又是保持非同相供电臂之间的机械连接的装置^[1]。绝缘锚段

关节式电分相消除了器件式电分相存在硬点的问题, 成为多数国家高速电气化铁路采用的主要电分相形式。每次过电分相时需要升降级、开合主断路器及一些辅助设备, 为减轻驾驶员的频繁操作, 自动过分相装置得到了广泛的应用。但是由于在状态切换时的随机性, 导致在过分相中出现严重的过电压、过电流, 轻则车顶间隙放电、绝缘子击穿危及机车电器设备安全, 重则引起变电所继电保护装置动作^[2]。

收稿日期: 2012-11-21; 收修改稿日期: 2013-05-27
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51007023)

文献[1]对过电压进行了理论阐述、原因分析,但缺少对分析结果的验证;文献[3]对过电压进行暂态求解得出过电压幅值的计算公式,确定其性质为合闸过电压和谐振过电压,但其所建微分方程较为简单,且没有考虑互感器的饱和特性;文献[4]采用阻容保护器改变电路结构参数来抑制过分相时在中性段上产生的过电压,虽然效果明显,但是抑制措施是以增加设备为基础;文献[7]将相控开关技术应用于自动过分相中,主要抑制断路器动作引起的截流过电压和合闸涌流,并没有考虑过分相中状态变化出现的过电压情况。

本文基于过分相的过程建立高阶等值电路模型, 对其进行数值求解, 发现影响过电压的因素, 进而提出较为经济有效的抑制措施。

1 电力机车过分相数学模型及分析

1.1 电力机车过分相的数学模型

电力机车进入电分相中性区之前,机车要禁止双弓运行,机车司机要切断牵引负荷(将级位手柄回到“0位”),在“断”字标牌前断开主断路器^[2](装有自动过分相装置时,上述操作由机车微机控制系统完成),机车依靠惰力通过中性区段,中性区段的长度取决于电分相所采用的跨数。电力机车过分相包含4个暂态过程:受电弓跨接接触线与中性线;受电弓离开接触线;受电弓再次跨接接触线与中性线;受电弓离开中性线。

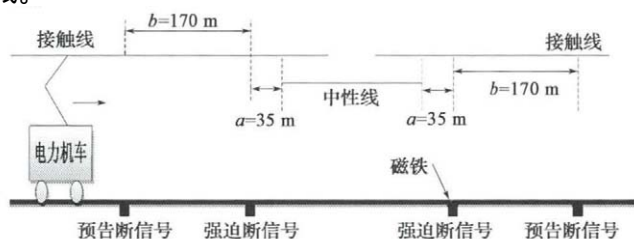


图 1 机车过电分相示意图

根据参考文献[3-4, 6], 本文将等值电路等效如图2所示。

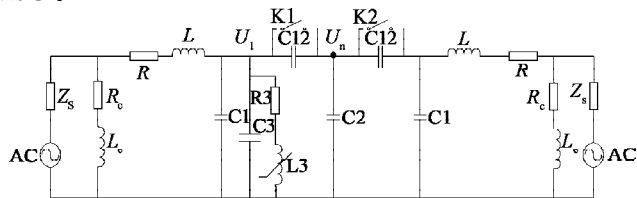


图 2 过分相等值电路

图2中两端电源表示中性线两端接触线上的电压, R_c 和 L_c 表示AT变压器励磁阻抗, R 和 L 中包含AT变压器的等值漏抗和接触线的等值阻抗, C_1 表示接触线的对地电容, C_2 表示中性线的对地电容, C_{12} 表示接触线与中性线间的耦合电容, C_3 表示受电弓对机车车顶的电容, R_3 和 L_3 表示高压互感器的等值电路。

1.2 受电弓过分相之前

机车进入电分相前, K1、K2 均为开状态。将图 1 中

性线两端电路分别用戴维南等效, 两端等值阻抗为 Z_{s1}, Z_{s2} , 由于 C_{12} 数值较小, $\frac{1}{\omega C_{12}} \ll Z_{s1}, Z_{s2}$, 忽略 Z_{s1}, Z_{s2} , 可由节点电压法求得 U_n 点电位 (对应表 1 中每一个 $\nabla \varphi$ 值)。

$$U_n = \frac{j\omega C_{12} \times (U_{s1} + U_{s2})}{2 \times j\omega C_{12} + j\omega C_2} = \frac{C_{12}}{2C_{12} + C_2} \times (U_{s1} + U_{s2})$$

表1 中性线感应电压

项目	数 值						
$\nabla\varphi$	0 °	30 °	60 °	90 °	120 °	150 °	180 °
U_n/kV	24.5	23.7	21.2	17.4	12.3	6.34	0

注：U₀的数据为有效值

1.3 受电弓跨接接触线与中性线

跨接两线时,即将图2中的K1打到闭合状态。由于 $\frac{1}{\omega C_{12}} \gg Z_{s2}$,可忽略 Z_{s2} ,K1 闭合后,将C3、C2并联后等值为C,忽略互感器的空载损耗后的简化电路如图3。

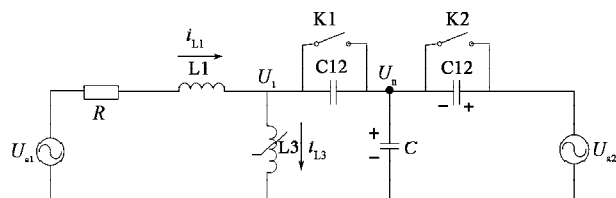


图 3 简化等值电路图

由基尔霍夫定律得：

$$\left\{ \begin{array}{l} Ri_{L1} + L_1 \frac{di_{L1}}{dt} + U_c = U_{s1} \\ L_3 \frac{di_{L3}}{dt} - U_c = 0 \\ i_{L1} - i_{L3} - C \frac{dU_c}{dt} + C_{12} \frac{dU_{12}}{dt} = 0 \\ U_{12} + U_c = U_{s2} \end{array} \right.$$

整理得到三阶状态方程：

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{L1}}{dt} \\ \frac{di_{L3}}{dt} \\ \frac{dU_n}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_1} & 0 & \frac{1}{L_1} \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_3} \\ \frac{1}{C+C_{12}} & -\frac{1}{C+C_{12}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L1} \\ i_{L3} \\ U_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{U_{s1}}{L_1} \\ 0 \\ \frac{C_{12}}{C+C_{12}} \frac{dU_{s2}}{dt} \end{bmatrix}$$

选择自适应步长的四阶Runge-Kutta法数值求解上式。解中有2个可变变量： i_{L1} 、 i_{L3} 、 U_n 的初始条件和 U_{s1} 、 U_{s2} 的相角。 i_{L1} 、 i_{L3} 、 U_n 的初始条件由跨接两线的时刻和 U_{s1} 、 U_{s2} 的相角共同影响。经计算比较得出，在两端相角差为零时，中性线上感应电压最大，但在过分相时产生的过电压最小；在相角差为 180° 时，中性线上感应电压最小，但在过分相时产生的过电压最大，与文献[7]中的结论相同，所以激起暂态过程的剧烈程度以及暂态过程中出现的电压最大值大小是受受电弓跨接两线的时刻与接触线的相角影响的，如图4所示。

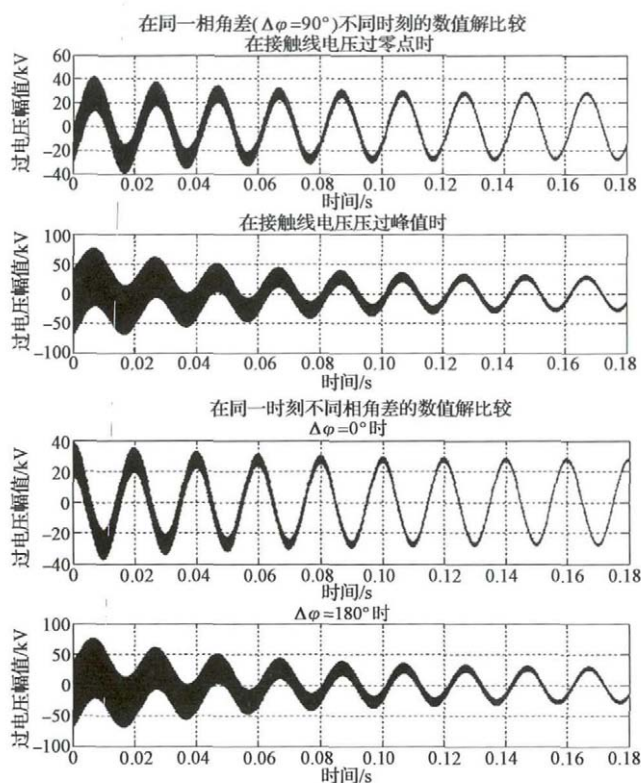


图4 数值解波形比较

1.4 受电弓离开接触线

受电弓离开接触线时,即将图3中的K1由合状态转到断开状态,受电弓与中性线对地电容并联。若因断开过程激发铁心电感 L_3 的磁路出现饱和现象引起电感值发生变化,在参数匹配时则极易发生铁磁谐振。关节式电分相的采用使中性线的长度达300 m左右,其对地分布电容的增大增加了参数匹配的可能性。

2 基于相角监测的抑制过电压方法

对于过电压抑制的基础是要辨别出过电压的类型,然后从产生过电压的影响因素入手,从根源上抑制过电压的产生;其次是考虑补偿措施,如增设RC保护装置或金属氧化物避雷器(MOA)。

电力机车过分相产生的过电压主要有2种类型:操作型过电压和谐振型过电压。受电弓跨接接触线与中性线时过电压呈现瞬态峰值较大,持续时间较短的特点,属于典型的操作过电压。该操作型过电压产生受过分相时接触线的相角影响,基于此提出利用自动过

分相装置的强迫断信号、机车速度、接触线电压相位共同控制“主断”信号的给定,以达到在接触线相位角为 $2k\pi$ 时跨接中性线的目的,实现抑制过电压的新方法。其控制算法流程如图5。

过分相的控制单元(动车组的监控装置)采用的是高可靠性的PLC控制,当监控装置接收到强迫断信号后要断开辅助系统的真空接触器,停止所有的辅助供电,并同时由机车速度和接触线电压相位角 φ_1 共同确定一个补偿角 φ_2 ,当相位等于 $\varphi_1 + \varphi_2$ 时,发出分断“主断”信号。

补偿角 φ_2 的计算如下:

$$\varphi_2 = 2k\pi - \omega t - \varphi_1$$

式中: k 为使 $\varphi_2 \geq 0$ 的最小整数;

$$t = (S_0 \div v) \% 0.02, \% \text{表示取余运算。}$$

谐振型过电压的产生与电感与电容的匹配有关,其抑制措施分为改变电路参数和消耗谐振能量两类。改变电路参数存在在其他频段谐振的隐患,所以增加阻尼电阻消耗谐振能量较为实用。据文献[8-9],在互感器低压绕组接入阻尼电阻,用于消耗谐振能量,可以抑制铁磁谐振过电压。阻尼电阻阻值越小消谐效果越好,但阻值越小对互感器低压侧热容量要求越高。用于消谐的电阻应满足 $R \leq 0.4X_m$,其中 X_m 为换算到互感器低压侧的励磁电感感抗。在给出分断“主断”信号的同时将互感器二次侧的阻尼电阻投入使用,驶出电分相时再将阻尼电阻退出。

3 抑制新方法的仿真验证

利用电磁暂态仿真软件PSCAD/EMTDC对受电弓跨接两线过程进行仿真计算,通过改变接触线一侧的相角和K1闭合时刻,分别计算中性线的电压幅值。当K1的闭合时刻固定在 $t=0.02$ s和 $t=0.025$ s时,在不同的接触线电压相位时中性线上的电压幅值如图6(a)。当接触线的电压相角固定为 $\varphi=0$ 、 $\varphi=\pi/2$ 和 $\varphi=\pi$ 时,在一个工频周期的不同时刻闭合K1中性线,电压幅值如图6(b)。图6表明:在相位角为 $2k\pi$ (k 为整数)时跨接两线不会有剧烈的暂态过电压,在相位角为 $k\pi/2$ (k 为奇数)时激起的暂态过电压明显增大,由此也说明基于接触线电压相位抑制过分相时操作型过电压的有效性。

在对受电弓分离接触线过程的仿真计算中,用饱和变压器替代等值电路中的非线性电感,改变接触线的相角和不同分开时刻,发现该过程中均有谐波谐振的出现,在 $\Delta\varphi=150^\circ$ 的 U_n 仿真波形及谐波分析结果见图7。

由图7仿真波形可见有明显的削顶特征,这是典型的铁磁谐振现象。由 U_n 波形的FFT分析结果可见,电压含有较多的25 Hz的分频谐波,分频谐振是铁磁谐振的重要特点,所以在受电弓离开接触线时由于电压互感

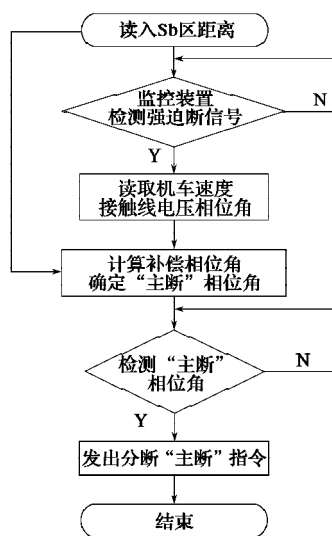
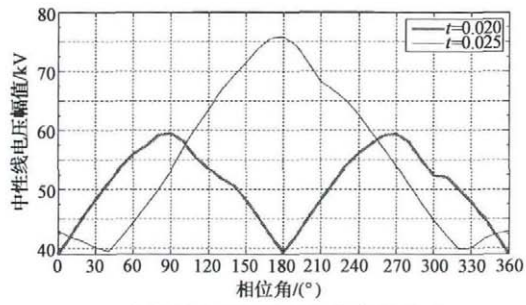
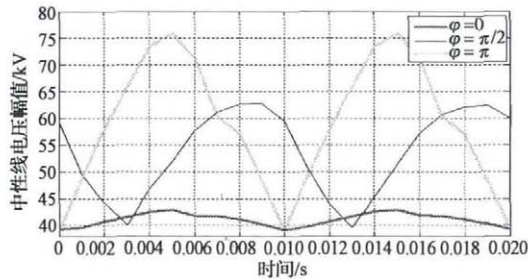


图5 “主断”信号发出控制流程图

器铁心电感的磁路饱和引起了铁磁谐振,验证了1.4节的推断。在不同的相角离开接触线所引起的铁磁谐振均是分次谐波谐振,谐波频率主要在20~30 Hz之间。



(a) 中性线电压幅值与相位角的关系



(b) 中性线电压幅值与过分相时刻的关系

图6 中性线电压幅值与相角和过分相时刻的关系

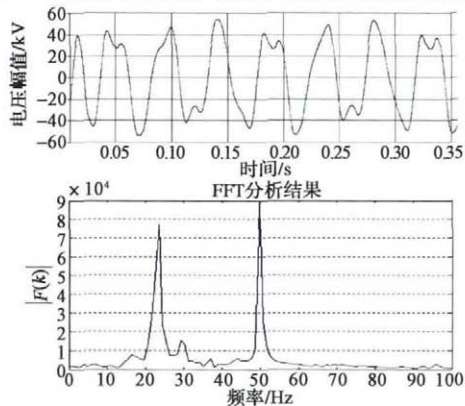


图7 仿真波形及FFT分析结果

表2 谐振中出现的最大电压

项目	数 值						
$\nabla\varphi$	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
U_n/kV	108.9	99.53	100.4	80.56	80.88	59.43	47.37

根据TB/T 3077.2—2006《电力机车车顶绝缘子第2部分:复合绝缘子》中规定的车顶绝缘子的电气性能指标(见表3)和图6及表2的数据得出,造成绝缘击穿或继电保护装置误动作主要是由受电弓分离接触线过程中出现的铁磁谐振过电压造成的。

表3 电力机车车顶复合绝缘子电气性能

绝缘子结构 高度/mm	冲击耐受电压 (不小于)/kV	工频耐受电压有效值(不小于)/kV	
		干	湿
315	170	90	75
400	185	100	85

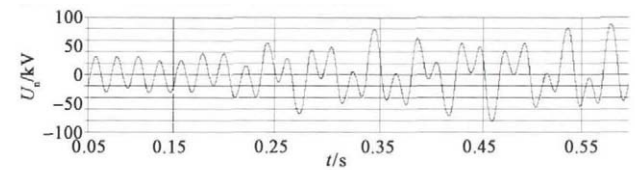
由表4的数据可得:阻尼电阻的取值范围随接触线的电压相位角而变化,在相角为 $\varphi=k\pi$ (k 取整数)时阻尼电阻的取值范围最大;当阻值小于20 Ω 时可抑制

任意相位角的铁磁谐振过电压;在互感器二次侧串接阻尼电阻后消耗其谐振能量,可使过电压得到有效抑制。图8表明本方法对抑制铁磁谐振过电压的效果。

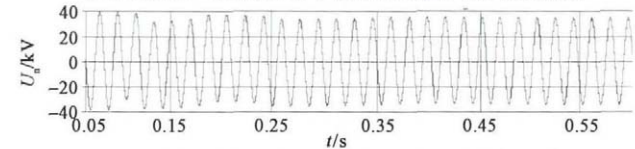
表4 不同阻尼电阻值的消谐影响

φ	R/ Ω							
	5	10	15	20	25	30	60	150
0°	37.3	35.3	34.9	34.8	34.7	34.7	34.8	78.8
30°	35.9	34.1	33.7	33.6	33.5	33.5	65.7	—
60°	32.3	30.6	30.2	61.4	—	—	—	—
90°	26.4	24.9	24.7	24.6	54.3	—	—	—
120°	18.6	17.7	17.7	17.4	44.3	—	—	—
150°	9.7	9.2	9.0	9.0	8.9	33.4	—	—

注:“—”表示数值大于左侧的数值



(a) 互感器二次侧没有串接阻尼电阻时的仿真波形



(b) 互感器二次侧串接15 Ω 阻尼电阻时的仿真波形

图8 过电压的抑制效果对比

4 结语

本文由电力机车过分相过程建立其高阶等值电路模型,通过自适应步长的四阶Runge-Kutta法数值求解,发现影响电力机车过分相过电压的因素有:机车过电分相的时刻、接触线的电压相位角和由于电压互感器饱和引起的铁磁谐振。对此,提出通过检测接触线电压相位角控制断路器的分断,使电力机车在接触线电压相位角为 $2k\pi$ 附近过分相和运用消谐阻尼电阻抑制铁磁谐振过电压的方法。

利用电磁暂态仿真软件对过分相过程及抑制方法进行仿真验证,仿真结果表明:电力机车在过分相时激起的过电压最大为108.9 kV,已超过绝缘子结构高度为400 mm时的工频耐受电压100 kV,极易造成设备的绝缘击穿或继电保护装置的误动作;在接触线电压相位角为 $2k\pi$ 附近跨接两线时对抑制操作型过电压效果明显,当在互感器二次侧加入小于20 Ω 的阻尼电阻时铁磁谐振过电压得到有效抑制,使整个过分相过程中产生的过电压低于50 kV,有效地解决了电力机车过分相过电压问题。

参考文献:

- [1] 姚小平. 浅析机车在关节式分相处产生的过电压根源及措施[J]. 甘肃铁道, 2010(3): 52-56.
- [2] 刘明光,路延安. 关节式电分相过电压试验研究[J]. 电气化铁道, 2007(4): 15-17.

(下转第61页)

出,软件还包括错误处理等模块。

界面底部的Switches信号都是数字量信号,是测试装置输出给控制器的。LabVIEW通过DAQ组件控制PXI机箱输出5 V数字量,软件实现如图5所示。

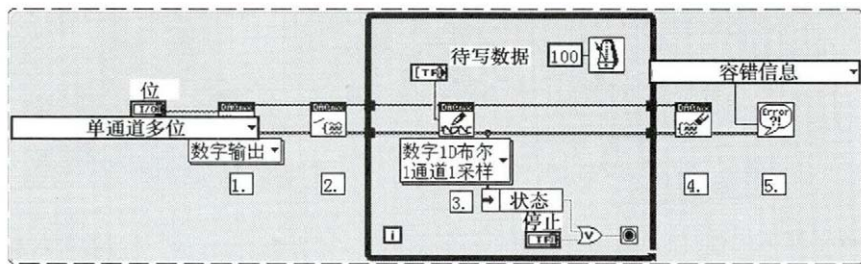


图 5 数字量输出

LabVIEW 首先设置输出通道, 然后设置数字输出模式为“单通道多位”, 并开始采样任务, 最后通一个循环结构不断输出数字信号。通过“停止按钮”可以终止输出, 软件还包括错误处理等模块。

4 测试流程

每个测试项都涉及到若干数字量和模拟量,还需对控制逻辑进行模拟。限于篇幅,在此仅以输出欠压保护试验为例说明详细的测试过程,流程图如图6所示。

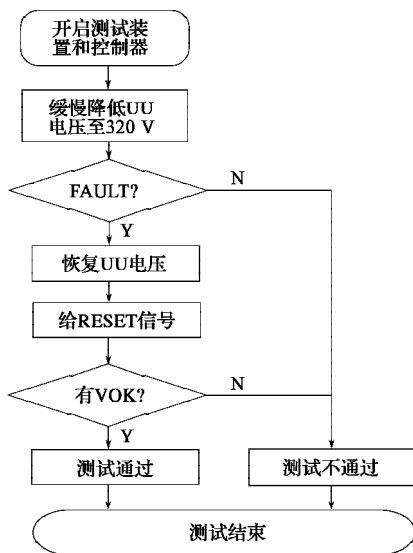


图 6 输出欠压保护试验

SIV控制 器正常启动

后,运行测试软件,测试装置开始与控制器交互,接受控制器的控制,仿真SIV的各项输出。测试人员按住鼠标拖动UU值(SIV输出电压),慢慢降低输出电压,当输出电压降低于AC 320 V,保持时间超过8 s时,SIV控制器将停止工作,控制器LED灯显示故障代码OPLU、OPLV、OPLW,测试装置可监测到S I V 控制器发出的故障(Fault)信号。此后,测试装置恢复UU值至AC 380 V,并给出系统复位(RESET)信号。控制器复位后正常运行,测试装置可监测到SIV控制器发出的正常(VOK)信号,而故障(Fault)

信号则不再出现。至此,本项试验完毕。做该项测试时,整个过程中的任一环节都必须与上述过程相符合,否则控制器该项功能试验失败,测试不通过。

5 结语

该测试装置已成功应用于香港地铁SIV控制器的检修试验,它能够检测SIV控制器的各项控制功能,快速排查故障,提高检修可靠性。整套测试过程可在30 min内完成,大大提高了香港地铁SIV控制器的检修效率。

SIV控制器广泛应用于各大城市的地铁车辆,如深圳地铁5号线和广州地铁1、2、8号线等,它们的基本控制原理都是一致的,只有具体控制逻辑略有差异。本文所论述的测试装置,经小幅度修改软件仿真逻辑后,可推广应用到其他地铁车辆的SIV控制器检修。

参考文献:

- [1] 曾 嵘, 杨卫峰, 刘 军. 列车分布式网络通信与控制系统 [J]. 机车电传动, 2009(3).
- [2] 饶 忠. 列车制动 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2006.
- [3] 杨乐平, 李海涛, 赵 勇, 等. LabVIEW 高级程序设计 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

(上接第44页)

- [3] 马德明. 机车过关节式电分相的暂态过程[J]. 铁道技术监督, 2008, 36(6): 47-49.
- [4] 宫衍圣. 电力机车过关节式电分相过电压研究[J]. 铁道学报, 2008, 30(4): 103-107.
- [5] 张薇, 刘承志. 相控开关技术在电力机车自动过分相中的应用研究[J]. 电气开关, 2009(1): 23-26.
- [6] 秦晓玲. 电力机车过关节式电分相过电压分析与防护[D].

北京：北京交通大学，2007.

- [7] 周福林, 李群湛. 基于概率的机车过分相过电压仿真实测及其机理研究[J]. 机车电传动, 2008(6): 13-16.
- [8] Yan Xianglian, Wen Yuanfang, Yi Xiaoyu. Study on the Resistive Leakage Current Characteristic of MOA Surge Arresters [J]. IEEE/PES, 2002, 2(6): 1198-1201.
- [9] 司马文霞, 郭飞, 杨庆. 变电站铁磁谐振仿真分析及抑制措施研究[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(6): 22-26.