

文章编号: 1000-128X(2019)03-0012-05

# 神华号 HXD1 型电力机车的新型 自动过分相控制

郑 勇<sup>1,2</sup>, 李学明<sup>1</sup>, 袁 靖<sup>1</sup>, 董湘桃<sup>1</sup>

(1. 株洲中车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001;  
2. 动车组和机车牵引与控制国家重点实验室, 湖南 株洲 412001)

**摘 要:** 针对神朔铁路的供电分相区多数处于长大坡道, 电力机车传统过分相方式存在速度损失大和通过分相区时间过长等问题, 电子开关过分相作为一种新型的带电过分相技术, 首次在神朔铁路得到了应用。为适应电子开关快速换相, 神华号电力机车的控制方式进行了相应的优化, 在重载试验中, 列车牵引、制动、惰行等工况均能实现带电、快速无故障通过电分相区。试验结果表明, 神华号电力机车能适应基于电子开关的带电自动过分相的方式, 速度几乎无损失, 提高了重载铁路的运输能力。

**关键词:** 神华号 HXD1 型电力机车; 电子开关过分相; 电分相; 重载运输

中图分类号: U264.91<sup>+1</sup>

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2019.03.003

## New Neutral Section Automatic Passing Control of Shenhua HXD1 Electric Locomotive

ZHENG Yong<sup>1,2</sup>, LI Xueming<sup>1</sup>, YUAN Jing<sup>1</sup>, DONG Xiangtao<sup>1</sup>

(1. Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China;

2. State Key Laboratory for Traction and Control System of EMU and Locomotive, Zhuzhou, Hunan 412001, China)

**Abstract:** In view of the fact that most of the power supply phase separation sections of Shenshuo railway are on long ramps, the traditional way of passing phase for electric locomotives had the problems of large speed loss and long passing time. As a new technology of passing phase with electricity, the electronic switch passing phase had been applied in Shenshuo railway for the first time. In order to adapt to the rapid commutation of electronic switches, the control mode of Shenhua electric locomotive had been optimized accordingly. In the heavy-haul test, the working conditions of traction, braking and inertia of the train could realized fast and fault-free through the phase separation zone without power off. The test results showed that Shenhua electric locomotive could adapt to the way of automatic phase passing based on electronic switch with almost no loss of speed and improved the transportation capacity of heavy haul railway.

**Keywords:** Shenhua HXD1 electric locomotive; electronic switch passing phase; neutral setion; heavy haul transport

## 0 引言

我国电气化铁路采用 25 kV 单相工频交流供电制式, 为实现三相供电负荷的平衡和提高电力系统利用率, 电气化铁道牵引变电所依据电力系统的相序排列采用轮换接线方式获取电源, 为防止牵引供电的相间短

路, 接触网均设置有分相区<sup>[1]</sup>。目前电力机车通过分相的方式有驾驶员手动过分相、车载半自动过分相、车载自动过分相和地面控制自动过分相等方式<sup>[2]</sup>, 其中地面控制过分相目前国内分为机械开关式地面控制自动过分相和电子开关式地面控制自动过分相。神朔铁路线采用的过分相装置为车载自动过分相、机械开关式地面控制自动过分相和电子开关式地面控制自动过分相。其中地面控制自动控制过分相全部用于神

收稿日期: 2019-01-31

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB1200800)

朔线上行线路, 均为上坡路段, 最大坡度为12‰<sup>[3]</sup>。电子开关式地面控制自动过分相作为一种全新的快速自动过分相技术, 适合分相区处于长大坡道和重载运输线路, 有效克服了传统过分相方式存在的机车在中性区惰行时间过长、速度损失过大以及掉无电区的救援事故等。神华号HXD1型电力机车是神朔铁路主力车型, 为能适应电子开关式地面控制自动过分相装置, 实现快速通过分相区的目的, 对神华号电力机车的牵引变流器控制方式进行了相应优化, 并在线路重载试验中验证了相关功能。

### 1 神华号电力机车的牵引变流器主电路

1台神华号HXD1型电力机车配置2台牵引变压器, 每台牵引变压器二次侧设有4个独立的绕组, 其中2个绕组用于给每台牵引变流器中的2组完全独立的中间直流单元供电。每台牵引变流器中的二重四象限变流器输出直流电路并联, 向2个转向架的4台牵引电机及辅助负载提供逆变输出所需的直流电压。牵引工况时单相工频电网电压经四象限整流器整流为1800V直流电压, 再经逆变器逆变为三相电压供给牵引电机; 辅助变流器并联在中间直流环节, 其输出经辅助变压器转换提供AC440V电源, 给机车上的辅助设备(如牵引风机、压缩机、充电机等辅助负载)供电; 再生制动工况时牵引电机发出的三相电压经逆变模块整流后, 再经四象限模块逆变通过牵引变压器、受电弓反馈回电网。电抗器L4和C4组成二次谐振电路, 用于滤除四象限整流器输出的二次谐波电流。

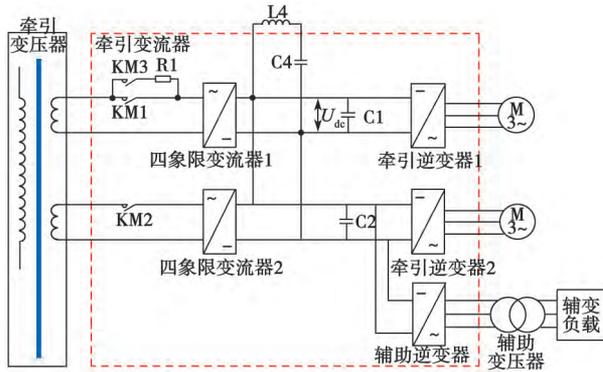


图1 牵引变流器主电路框图

### 2 车载自动过分相

#### 2.1 车载自动过分相控制

车载自动过分相是利用电气化线路在进出分相区地面埋设磁钢, 在电力机车两端安装过分相地面磁钢信号车载检测装置, 当机车到达分相区磁钢处时, 车载检测装置接收地面磁钢信号并将该信号发送至机车牵引控制系统TCU, TCU接收到信号后将机车牵引/制动力卸载至零, 然后停止四象限整流, 主断路器随后断开, 同时TCU对机车当前速度是否大于自动过分相最小允许速度进行判断, 将牵引电机由电动机状态转换为发电机

状态, 施加微电制动力发电, 牵引逆变模块将机车的动能转化为电能回馈至牵引变流器的中间直流环节, 并对中间直流电压进行闭环控制, 保持中间直流电压的稳定, 维持机车的辅助负载在过分相时不停电运行<sup>[4]</sup>。车载自动过分相控制流程如图2所示。当机车通过无电区后, 控制系统将接收到车载分相检测装置送过来的“通过”磁钢信号, 牵引控制系统将再次允许主断路器闭合, 启动四象限模块整流, 牵引电机由发电状态转换为牵引状态工作, 机车恢复正常运行。

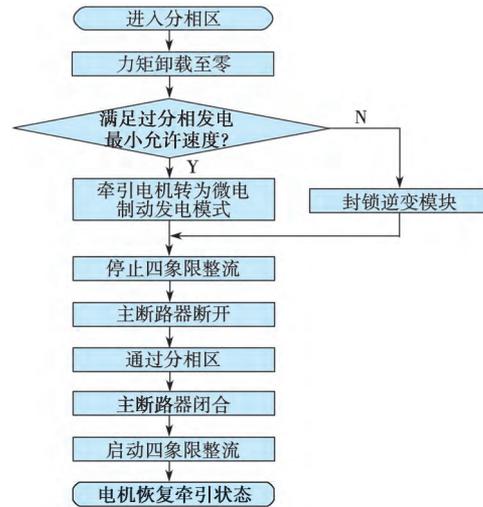


图2 车载自动过分相控制流程图

车载自动过分相技术无需人工干预, 实现了机车的辅助负载在过分相时不停电运行, 但这是以将机车的动能转化为电能, 牺牲列车速度来实现的, 导致在通过电分相中性区的运行时间较长, 机车牵引力丧失明显, 速度损失较大, 而且该方案进入过分相时需要机车具有一定的初速度, 难以在低速、大坡道区段采用。

#### 2.2 重载大坡道速度损失计算

在车载自动过分相发电过程中, 机车辅助负载的不停电运行会使速度损失较大, 而且机车运行的基本阻力和附加阻力做负功, 也会导致速度损失。根据能量守恒原理, 在不考虑杂散损耗情况下有

$$\frac{1}{2}mv_1^2 - \frac{1}{2}mv_2^2 \approx (f_0 + f_i)s + P_{ainv}t \quad (1)$$

式中:  $m$  为折算到单节机车牵引的列车质量, kg;  $v_1$  为进电分相区时刻的机车速度, m/s;  $v_2$  为出电分相区时的机车速度, m/s;  $f_0$  为列车运行的基本阻力, N;  $f_i$  为列车运行的坡道附加阻力, N;  $s$  为分相区的长度, m;  $P_{ainv}$  为HXD1型电力机车辅助变流器负载的额定功率, 其数值为120kW;  $t$  为通过整个分相区的时间, s。

以神朔铁路桥头变电所的分相区为例, 计算列车速度损失和通过时间, 计算如下:

①神朔铁路万吨重联货车一般采用“3+0”或“2+1”的编组模式, 牵引116辆C<sub>80</sub>货车, 总质量约为1.2万t, 故  $m$  取2000t。

②神朔铁路全线限速 80 km/h，列车实际运行速度约为 70 km/h，即  $v_1$  约为 19.44 m/s。

③只考虑货车的运行基本阻力，根据经验公式，货车运行单位基本阻力为

$$\omega''=0.92+0.0048v+0.000125v^2 \quad (2)$$

则

$$f_0=m \times g \times \omega_0'' \quad (3)$$

式中： $m$  为折算到单节机车牵引的列车质量，kg； $g$  为重力加速度，9.8 m/s<sup>2</sup>； $\omega_0''$  为货车运行单位基本阻力。

④机车和车辆的单位坡道附加阻力  $\omega_i$  等于坡道坡度的千分数，则

$$f_i=m \times g \times \omega_i \quad (4)$$

神朔铁路的桥头变电所分相区的坡度为 12‰，因此  $\omega_i$  为 12。

⑤在神朔铁路的桥头变电所分相区，从“禁止双弓”标识到“合”标识的长度约为 350 m。

将以上参数代入式 (1)，可以得到

$$\frac{1}{2} \times 2000 \times 10^3 \times (378 - v_2^2) \approx 2000 \times 9.8 \times (0.92 + 0.0048v + 0.000125v^2 + 12) \times 350 + 120 \times 10^3 \times \frac{350}{v} \quad (5)$$

式 (5) 中的速度  $v$  是一个衰减的变量，考虑到万吨重联列车是一个超大惯性物体，可以认为速度是线性下降的，因此取平均速度（其数值为  $\frac{v_1+v_2}{2}$ ）作为  $v$ ，代入式 (5) 可以得到一个一元三次方程：

$$95367274.8=1000v_2^3+378178.5v_2^2-185043.6v_2 \quad (6)$$

经计算可得

$$v_2=15.795 \text{ m/s 或 } v_2=56.862 \text{ km/h}$$

从上面的分析可以看出，当重载货运列车通过神朔铁路桥头变电所的分相区时，速度跌落了将近 14 km/h，通过时间约 22 s，对于神朔铁路这样的煤炭重载运输线路来说，是难以满足要求的。

### 3 机械开关式地面自动过分相

图 3 所示为机械开关式地面自动过分相装置原理图<sup>[5]</sup>。图中 QS1, QS2 和 QS3 为隔离开关，当地面分相装置投入运行时，默认闭合；QF1~QF4, QF33 和 QF44 为真空断路器，其中 QF33 和 QF44 为备用断路器。系统正常运行时（以机车从 A 臂到 B 臂为例），当机车到达位置识别装置 CG1 时，真空断路器 QF3 闭合，A 相电源输入到中性段转换区给机车供电；当机车到达中性段转换区的位置识别装置 CG3 时，先断开真空断路器 QF3，确保 QF3 状态已经完全断开之后，控制真空断路器 QF4 闭合，经过约 130 ms 完成由 A 相电源供电切换到由 B 相电源供电，持续给机车供电；待机车运行到达位置识别装置 CG4 时，将真空断路器 QF4 断开，分相区随之失去供电电源，恢复为中性段无电区状态，实现了接触网电分相中性段转换区不同相位

电源的自动转换与连续供电，机车断路器在不分闸情况下带电免操作自动通过电分相区段。

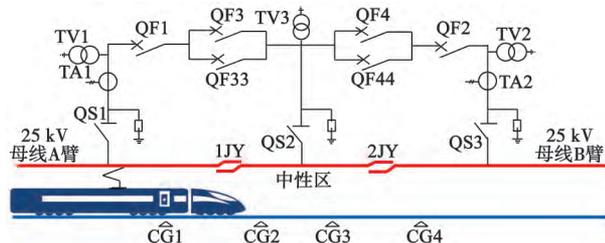


图 3 机械开关式地面自动过分相装置原理图

在机械开关式地面自动过分相方式中，一般会将线路上原来埋设的磁钢去掉，或者将车载地面磁钢信号检测接收装置关闭，而且位置识别装置 CG1~CG4 信号只送给牵引变电所内的地面控制分相装置，因此机车无法识别当前是否处于分相区，也不会进入到上述的车载自动过分相控制模式中。在这种情况下，电力机车要及时准确地判断出在中性段 A 相与 B 相两相转换过程中网压瞬间失电的 130 ms。具体控制过程为：①当机车到达中性区时，地面控制分相装置断开 QF3，导致弓网瞬间失电，牵引控制系统 TCU 判断出网压中断异常，并将机车牵引/制动力进行减载，停止四象限模块整流，封锁牵引逆变模块。由于网压失电 130 ms，中间直流支撑电容的电压无法满足辅变负载不停机运行，因此封锁辅助变流模块。②当地面控制分相装置闭合 QF4 后，机车检测到弓网有电，牵引控制系统将再次启动四象限模块整流，然后启动辅助变流模块，等水冷系统工作正常之后，启动牵引逆变模块，牵引电机恢复牵引力，机车恢复正常运行。机械开关式地面自动过分相控制逻辑如图 4 所示。

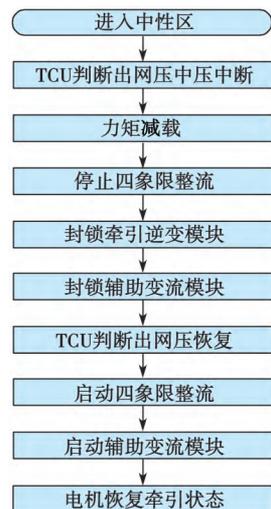


图 4 机械开关式地面自动过分相控制流程图

机械开关式地面自动过分相技术通过控制分相区 A 相和 B 相串联的真空断路器，达到对中性段转换区的换相输入，给机车供电，实现网侧几乎不断电，避免了车载自动过分相时机车长时间在中性段无电区运行和速度衰减。但是该方案在 2 个真空断路器切换过程中由于采用机械开关式分合，存在 130 ms 的切换时间，机车在该段时间内失电，辅助负载停止工作，机车重新得电后，恢复辅助水冷系统将花费较长时间。

### 4 电子开关式地面自动过分相

#### 4.1 电子开关式地面自动过分相控制

为避免机械开关式地面自动过分相装置在中性段

A 相与 B 相转换过程中网压失电时间过长, 电子开关式地面自动过分相装置采用基于大功率半导体技术的晶闸管阀组代替机械开关, 使得整个转换过程更快, 供电切换造成的失电时间可小于 2 ms, 如图 5 所示。电子开关式地面自动过分相装置的控制逻辑基本和机械开关式地面自动过分相装置一样, 不同的是当机车即将进入中性区时, 控制左 (或右) 侧电子开关阀组导通, 当机车完全进入中性区后, 快速封锁左 (或右) 侧电子开关阀组触发信号, 并通过检测到左 (或右) 侧电子开关阀组确实已经关断的信息后, 立即启动右 (或左) 侧阀组导通, 从而实现两供电臂对中性段轮流供电。

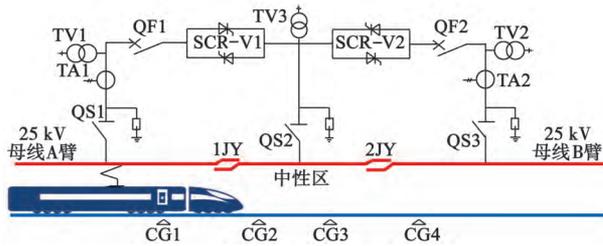


图 5 电子开关式地面自动过分相装置原理图

相比于机械开关式地面自动过分相, 电子开关式地面自动过分相将牵引网压的失电时间降低一个数量级, 对电力机车通过分相区基本不产生影响。辅助负载供电系统仅依靠中间直流支撑电容存储的电能就可以在网压短时失电情况下维持不停电运行, 避免了网压恢复后辅助水冷系统花费较长时间来恢复正常工作, 在真正意义上实现了快速过分相的目的。电力机车通过电子开关式地面自动过分相的控制逻辑和机械开关式地面自动过分相基本一样, 由于电子开关式地面自动过分相的网压失电时间远小于机械开关式地面自动过分相, 因此能够得到更好的适应效果: 牵引电机仍然保持励磁状态, 中间直流电压未跌落到保护阈值前, 辅变负载维持运行。电子开关式地面自动过分相控制逻辑如图 6 所示。

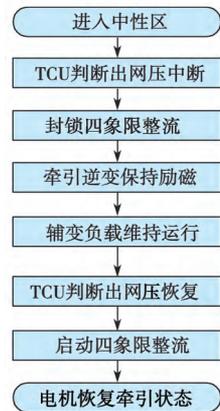


图 6 电子开关式地面自动过分相控制流程图

电子开关式地面自动过分相技术通过控制分相区内与 A 相和 B 相串联的晶闸管阀组, 达到对中性段转换区的电源输入, 给机车供电, 实现了几乎无感知过分相, 避免了机械开关式地面自动过分相装置在切换过程中切换时间长、辅助负载停止工作、机车重新得电后辅助水冷系统恢复时间长和列车速度衰减等问题。

#### 4.2 中间直流支撑电容允许放电时间计算

电容在某一时刻具有的能量公式为

$$W = \frac{1}{2} C u_c^2(t) \quad (7)$$

式中:  $W$  为电容存储的能量,  $W$ ;  $C$  为电容的容值,  $F$ ;  $u_c(t)$  为某一时刻电容的电压,  $V$ 。

当电容放电时, 在  $t_1$  初始时刻电容电压为  $u_c(t_1)$ ,  $t_2$  时刻的电容电压为  $u_c(t_2)$ , 则从  $t_1 \sim t_2$  内电容释放的电能为

$$\Delta W = \frac{1}{2} C u_c^2(t_1) - \frac{1}{2} C u_c^2(t_2) \quad (8)$$

电容放电的能量主要由辅助逆变器负载和牵引电机空载励磁所消耗, 放电时间计算如下:

① HXD1 型电力机车主电路的中间直流支撑电容  $C$  为 27.8 mF, 额定中间直流电压  $u_c(t_1)$  为 1 800 V, 辅变中间直流电压低压保护阈值  $u_c(t_2)$  为 1 200 V。

② 辅变功率额定为 120 kW, 故障冗余时最大为 240 kW。

③ 牵引电机的额定功率是 1 200 kW, 额定效率是 95%, 当牵引电机处于空载励磁状态时, 如果没有牵引力输出, 可以近似认为励磁电流等于空载电流, 也就是说励磁电流产生的功率等于牵引电机的空载损耗, 其数值为 60 kW [计算为  $1\,200\text{ kW} \times (1-95\%)$ ]。HXD1 型电力机车采用轴控方式, 2 个牵引电机逆变器共用一个中间直流环节, 因此总的励磁功率为 120 kW。

正常情况下, 综合上述参数和式 (8) 可得

$$\Delta W = \frac{1}{2} \times 27.8 \times 10^{-3} \times (1800^2 - 1200^2) = (120 + 2 \times 60) \times 10^3 \times \Delta t \quad (9)$$

经计算可得放电时间  $\Delta t = 104.25\text{ ms}$ 。

当辅变处于故障冗余运行时, 辅变功率最大为 240 kW, 则放电时间  $\Delta t$  为 69.5 ms。

因此, 在电子开关式地面自动过分相过程中, 晶闸管阀组的换相时间小于牵引变流器中间直流支撑电容的放电时间, 完全可以保证在通过分相区时辅变负载维持运行。

## 5 试验波形与分析

### 5.1 牵引工况

当机车处于牵引工况时, 通过电子开关式地面自动过分相过程的相关参数和状态量的试验波形如图 7 和图 8 所示。

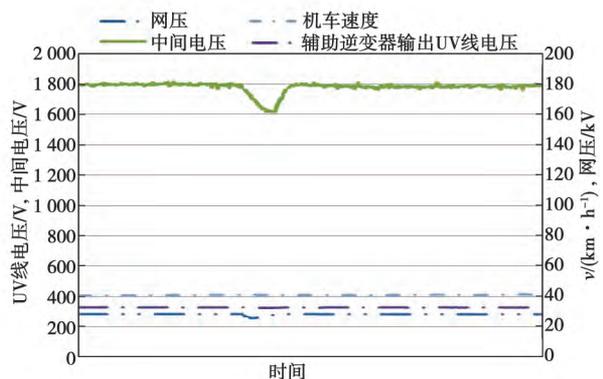


图 7 牵引工况 TCU 监视模拟量快速波形图

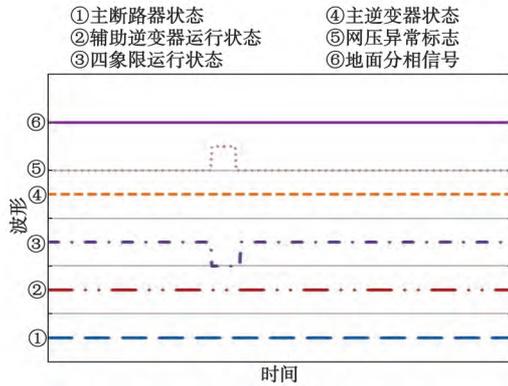


图8 牵引工况 TCU 监视数字量快速波形图

从试验快速波形可以看出, 过分相时机车速度约为 41 km/h 左右, 在整个进出分相区的过程中, 机车速度几乎没有衰减, 速度较为平稳, 没有剧烈变化, 整个过程几乎没有冲动。在电子换相时, 网压瞬时中断, 导致网压有效值跌落, 在整个过程 TCU 能够及时判断出网压过低异常标志; 四象限停止整流; 中间电压最小降到了 1 480 V; 网压恢复正常之后, 网压过低异常标志随即撤销, 四象限控制启动整流; 牵引电机的力矩以一定的斜率恢复到过分相前的给定力矩。

从整个电子过分相过程来看, 辅助逆变器没有停止工作; 水冷系统工作正常; 主断路器一直闭合; 逆变器处于牵引工况; 地面磁钢检测装置未输出过分相信号。

### 5.2 制动工况

当机车处于制动工况时通过电子开关式地面自动过分相过程的相关参数和状态量的试验波形如图 9 和图 10 所示。

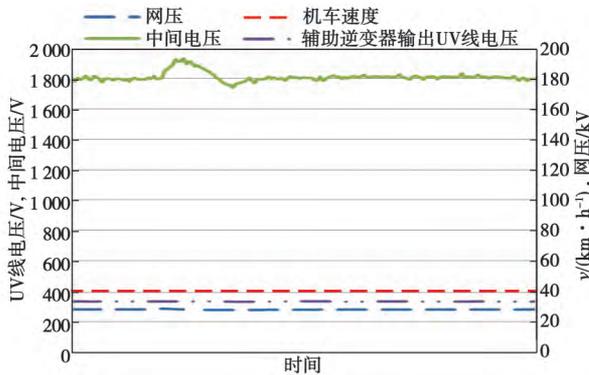


图9 制动工况 TCU 监视模拟量快速波形

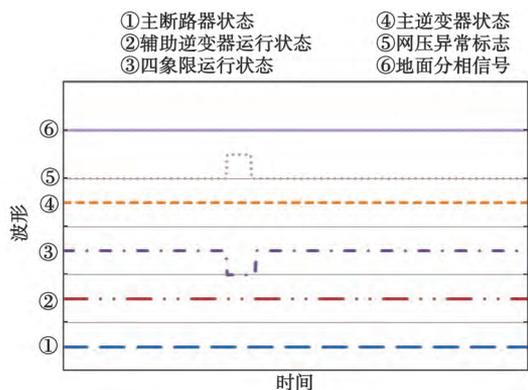


图10 制动工况 TCU 监视数字量快速波形

从试验快速波形可以看出, 过分相时机车速度约为 40 km/h 左右, 在整个进出分相区的过程中, 机车速度衰减很小, 速度较为平稳, 没有剧烈变化, 整个过程几乎没有冲动。在电子换相前, 机车由于制动能量回馈到电网, 导致网压有所抬升。电子换相后, 网压瞬时中断, 导致网压有效值跌落, 在整个过程中 TCU 能够及时判断出网压过低异常标志, 四象限停止整流, 电压检测波形与网压变化情况一致, 由于机车处于制动工况, 中间电压先上升到 1 900 V 左右, 然后降低到 1 780 V 左右, 说明制动工况下由于能量的回馈, 中间电压跌落很小; 网压恢复正常之后, 网压过低异常标志随即撤销, 四象限控制启动整流; 牵引电机的力矩也以一定的斜率恢复到过分相前的给定力矩。

从整个电子过分相过程来看, 辅助逆变器没有停止工作, 水冷系统工作正常; 主断路器一直闭合; 逆变器处于制动工况; 地面磁钢检测装置未输出过分相信号。

### 5.3 惰行工况

当机车处于惰行工况时通过电子开关式地面自动过分相过程的相关参数和状态量的试验波形如图 11 和图 12 所示。

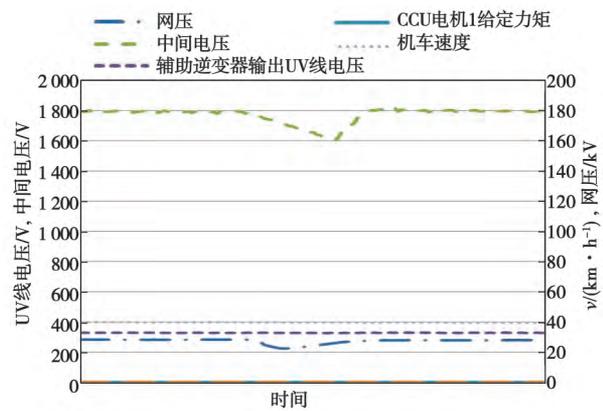


图11 惰行工况 TCU 监视模拟量快速波形

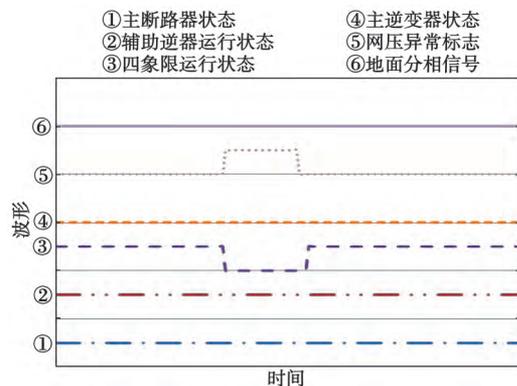


图12 惰行工况 TCU 监视数字量快速波形

从试验快速波形可以看出, 过分相时机车速度约为 38 km/h 左右, 在整个进出电分相区的过程中, 机车速度衰减很小, 速度较为平稳, 没有剧烈变化, 整个过程几乎没有冲动。在电子换相前, 机车处于惰行工况。

(下转第 21 页)

看出, 无负荷情况下, 无 RC 支路时晶闸管导通后通态电流很小, 不易维持阀组持续导通, 且中性区感应电压大, 阀组 SCR-V1 导通时已引起暂态过电压; 有 RC 支路时, 阀组 SCR-V1 导通后维持较小的通态电流, 保证了阀组的持续导通, 且中性区感应电压很小, 阀组开关状态切换时无暂态过电压。

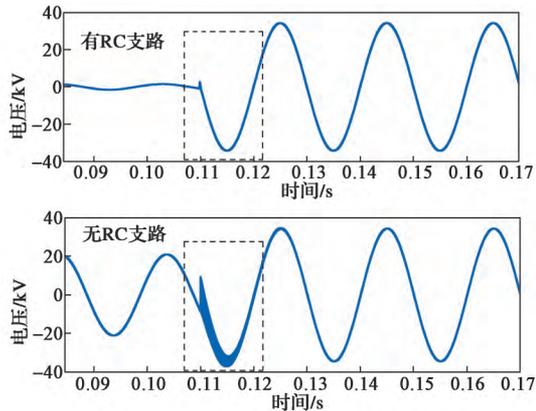


图9 有/无 RC 支路时中性区电压波形

## 5 结语

本文基于锚段关节式电子开关地面自动过分相系统, 研究了分相区的等效数学模型和电气参数, 建立了机车带载通过电子开关地面自动过分相的等效模型; 针对地面自动过分相过电压问题, 研究了 RC 吸收电路的原理与参数设计原则; 最后通过仿真验证, 证明了

本文选取 RC 参数方法的有效性。

## 参考文献:

- [1] 李群湛, 贺建闽. 牵引供电系统分析 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2007.
- [2] 姜晓峰, 何正友, 胡海涛, 等. 高速铁路过分相电磁暂态过程分析 [J]. 铁道学报, 2013, 35(12): 30-36.
- [3] 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.
- [4] 刘孟恺. 电力机车过分相暂态过程分析 [D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
- [5] 魏驰. 地面自动过分相方案与过电压分析及抑制措施研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [6] 黄沁悦. 地面自动过分相技术研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [7] HAYASHIYA H, AJIKI K. Closing surge and surge propagation at SHINKANSEN changeover section [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2006, 126(3): 322-329.
- [8] 刘冰, 冉旺, 李雄, 等. 电子开关实现带电自动过分相的研究 [J]. 电力电子, 2011(3): 26-29.
- [9] DELGADO E, AIZPURU I, CANALES J M, et al. Static switch based solution for improvement of neutral sections in HSR systems [C]//IEEE. 2012 Electrical Systems For Aircraft, Railway and Ship Propulsion. Bdogna: IEEE, 2012: 1-6.
- [10] 陈坚, 康勇. 电力电子学-电力电子变换和控制技术 [M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2011.

作者简介: 郑亚平 (1970—), 男, 高级工程师, 主要从事铁路供电和运输管理工作。

(上接第 16 页) 电子换相后, 网压瞬时中断, 导致网压有效值跌落, 整个过程 TCU 能够及时判断出网压过低异常标志; 四象限停止整流; 由于中间直流支撑电容的能量消耗, 中间直流电压逐渐降低到 1 600 V 左右, 跌落近 200 V; 网压恢复正常之后, 网压过低异常标志随即撤销, 四象限控制启动整流。

从整个电子过分相过程来看, 辅助逆变器没有停止工作, 水冷系统工作正常; 主断路器一直闭合; 列车处于惰行工况; 地面磁钢检测装置未输出过分相信号。

## 6 结语

针对神朔铁路存在的车载自动过分相、机械开关式地面自动过分相和电子开关式地面自动过分相的现状, 本文对 3 种过分相的工作原理和牵引变流器的控制过程进行了详细介绍。其中, 电子开关式地面自动过分相是一种全新的快速自动过分相技术, 对牵引变流器的控制方式进行了相应优化。在重载试验中, 列车牵引工况、制动工况和惰行工况时均能实现带电、

快速无故障通过电分相区, 有效克服了传统过分相方式存在的机车中性区惰行时间过长、速度损失过大以及掉无电区的救援事故等问题, 满足了神朔铁路的分相区处于长大坡道和重载运输的需要, 有效缩短了过分相的运行时间, 提高了线路的综合运输能力。

## 参考文献:

- [1] 黄浩, 郭维, 王文韬, 等. 主辅变一体牵引变流器动车组自动通过分相区的控制方法 [J]. 机车电传动, 2015(6): 30-33.
- [2] 易宏, 陈哲. 神华 HXd1 型交流机车地面控制过分相介绍及适应性测试 [J]. 技术与市场, 2014, 21(5): 98-99.
- [3] 韩涛. 地面控制自动过分相在神朔线的应用 [J]. 铁道运营技术, 2016, 22(3): 36-39.
- [4] 王雨, 李鹏, 颜罡, 等. HXd1C 电力机车自动过分相控制 [J]. 机车电传动, 2015(4): 42-44.
- [5] 罗文骥, 谢冰. 电气化铁道地面自动过分相系统技术的研究与应用 [J]. 铁道机车车辆, 2008, 28(增刊 1): 27-33.

作者简介: 郑勇 (1987—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电力机车牵引变流器控制系统的研发工作。