

电力与传动控制

电子开关过分相装置控制策略研究

刘永丽, 成正林, 陶洪亮, 唐建宇

(株洲中车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 随着我国铁路运输技术的持续发展, 地面过分相装置已得到推广应用, 但基于断路器投切的地面过分相装置存在使用寿命短、投切精度差的问题。为此, 文章设计了一种电子开关地面自动过分相装置, 其采用瞬时电压和电流检测与剩磁预估相结合的方法, 通过控制晶闸管的开断来实现两个供电臂与中性区之间的供电切换, 使换相断电时间可低至 1 ms。该过分相装置具有断电时间短、使用寿命长、对机车冲击小、供电可靠的特点, 能实现列车不断电过分相, 显著提升了铁路供电质量和运输能力。

关键词: 过分相; 预测控制; 瞬态检测; 晶闸管; 铁路供电; 重载铁路

中图分类号: U231.6; TP319

文献标识码: A

文章编号: 2096-5427(2020)04-0030-05

doi:10.13889/j.issn.2096-5427.2020.04.006

Research on Control Strategy of Electronic Switch Neutral Section Passing Equipment

LIU Yongli, CHENG Zhenglin, TAO Hongliang, TANG Jianyu

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

Abstract: With continuous development of China's railway transportation technology, ground neutral section passing equipment has been widely used. However, ground neutral section passing equipment based on circuit breaker has the problems of short service lifetime and poor switching accuracy. It proposed an electronic switch neutral section passing equipment with transient voltage and current test and remanence prediction, which switch power supply between two power supply arms and neutral area by thyristors, and the switch time can be as low as 1 ms. The equipment has the advantages of short power off time, long service lifespan, high reliability, slight impact on locomotive, and can realize continuous power supply in neutral section passing, and significantly upgrade the railway power supply technology and transport capacity.

Keywords: neutral section passing; predictive control; transient control; thyristor; railway power supply; heavy-haul railway

0 引言

目前我国主要采用车载过分相的方式来实现机车过分相, 但现有的车载过分相断电通过分相区造成的机车速度损失, 给铁路运输能力的提升及铁路供电的稳定性均带来了制约, 在高速、高坡和重载铁路中尤为明显。随着电气化铁路技术水平的不断发展进步, 地面自动过分相装置也得到越来越多的推广应用^[1]。地面带电自动过分相系统是设置在牵引变电所、分区所的地面自动转换设备, 实现了在电力机车主断路器闭合状态下, 乘务员免操作, 机车带电、带负荷、安全地自动通过电分相

中性区并保持列车牵引力和运行速度, 有效缩短了机车过分相的运行时间, 提高了线路的综合运输能力。

我国实际应用的地面过分相装置目前主要为基于断路器投切式^[2], 由于断路器动作时间长、使用寿命较短、投切角度精度差, 对于需频繁切换的分相区, 该类过分相装置性能亟待提升; 而基于电力电子技术的地面过分相装置(简称“电子开关过分相装置”)相比基于断路器投切的地面过分相装置, 其换相时间短、适用范围广、使用寿命长、安全可靠性能高, 具有更高的推广价值。为此, 本文设计了一种基于晶闸管技术的电子开关过分相装置, 介绍了其工作原理及控制策略。

1 电子开关过分相装置原理

电气化铁路的电力是由在铁路沿线建设的若干个牵

收稿日期: 2019-08-02

作者简介: 刘永丽(1987—), 女, 工程师, 主要从事网侧变流器设计相关工作。

基金项目: 湖南省科技攻关与重大科技成果转化项目(2018GK4016)

引变电站所提供。变电站将三相高压交流电变换为2路额定电压为27.5 kV的工频单相交流电，分别为上行、下行双向供电接触网供电。为了平衡电力系统A, B, C各相负荷，电气化铁道采用相序轮换、分段分相供电的方案，这样就会有分相区。我国生产的“韶山”系列机车为直流车，过分相机车失电后，辅助绕组和异步辅助机群构成的闭合回路中仍有电流，辅机系统的转速并不为0，系统的反馈能量在中性段上形成残压，其在机车空载工况下可接近系统网压值，在机车带载工况下可达到11~12 kV。换相后，电压叠加将会产生过电压，威胁机车电气设备安全并可能导致牵引变电所跳闸^[3]。

国内现有地面过分相装置主要为西安铁路局科学技术研究所研制的智能选相关地面过分相装置^[4]，其利用断路器的投切来实现中性区两个供电臂电源的切换，采用断路器的串并联来降低因断路器拒合、拒分而带来的安全隐患（图1）。图中，QF1~QF4为断路器，QS1~QS3为隔离开关，QF1B和QF4B分别为QF1和QF4的备用断路器。该装置在神朔铁路投入使用后，提升了重载铁路运能。

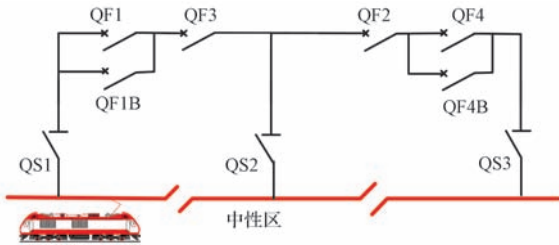


图1 基于断路器的地面过分相装置
Fig. 1 Ground neutral section passing equipment based on breaker

基于断路器的地面过分相装置存在机械开关控制精度低、动作速度慢、寿命有限、故障率高的缺陷。为此，设计一种电子开关过分相装置，其中性区采用RC吸收电路抑制过电压，通过实时控制晶闸管的通断来实现电源的切换，其响应速度快，稳定性高，并且电力电子开关寿命长，断电时间可低至1 ms。该装置原理如图2所示，每个供电臂均采用晶闸管阀组与中性区相连，中性区加入RC支路以对晶闸管续流并吸收过电压，通过晶闸管控制中性区供电切换，电子开关控制系统根据机车位置对晶闸管进行实时控制。

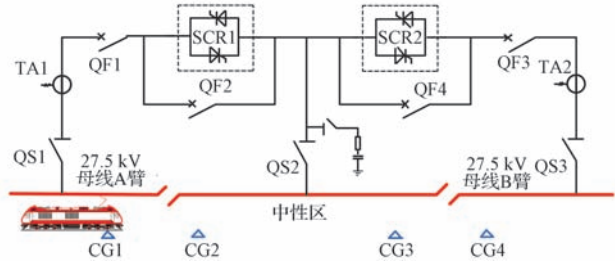


图2 电子开关过分相系统原理图
Fig. 2 Principle diagram of electronic switch neutral section passing equipment

地面装置位置检测单元CG1~CG4（图2）实时检测列车方向和位置。正常情况下，断路器QF1和QF3闭合，断路器QF2和QF4分断，晶闸管阀组SCR1和SCR2关断。

对于正向行车，当机车行驶到CG1安装装置时，列车即将进入中性区，此时晶闸管SCR控制系统控制SCR1导通；当列车行驶至CG3位置时，晶闸管SCR1关断，并在确保其关断之后晶闸管SCR2导通；当列车完全驶离CG4位置时，晶闸管SCR2关断。

对于反向行车，当机车行驶到CG4安装位置时，列车即将进入中性区，此时晶闸管SCR2导通；当列车行驶至CG2位置时，晶闸管SCR2关断，并在确保其关断之后晶闸管SCR1导通；当列车完全驶离CG1位置时，晶闸管SCR1关断。

2 电子开关过分相装置控制方法与应用研究

2.1 电子开关过分相装置控制原理

电子开关过分相装置逻辑控制单元是电子开关过分相装置的主控制系统，其根据所采集的机车实时位置进行逻辑判断、处理并下发对断路器及阀组控制单元的控制命令，同时对整个装置进行实时监控及保护；SCR控制单元负责对SCR1及SCR2进行实时控制，实现中性区供电电源快速切换；断路器用来对电子开关进行实时保护和越区供电（图3）。

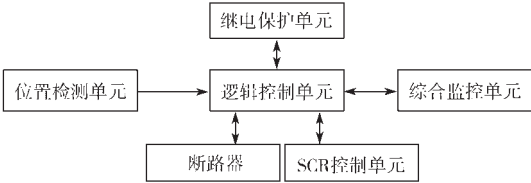


图3 电子开关过分相控制关系框图
Fig. 3 Control relationship diagram of electronic switch neutral section passing equipment

电子开关过分相装置采用晶闸管阀组控制单元实现自动换相。晶闸管为半控型器件，给晶闸管发出关断命令之后，只要当电流过零时，晶闸管才能自然关断，关断时刻与机车运行工况及负荷特性相关。晶闸管换相原理如图4所示。

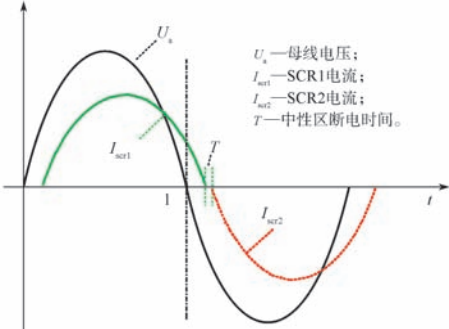


图4 换相原理图
Fig. 4 Principle diagram of phase switch

根据图 4 可知，通过精确控制 SCR1 关断时刻与 SCR2 的开通时刻，就可以精确控制中性区断电时间 T 。电子开关过分相装置控制系统利用“DSP+ 双 CPLD”控制平台，采用瞬时电压与电流检测与智能预测相结合的控制方法，能够准确预测关断过零点，从而准确控制关断与开通时刻，完成 1 次中性区电源切换的断电时间低至 1 ms。

根据文献 [5]，对于传统过分相装置，不同的接线方式对供电网的影响程度不同，其中 YNd11 接线方式和 Scott 接线方式下电压波动幅值最大，V/v 接线方式下整体电压的波动幅度较小。在电子开关过分相装置中性区设置了 RC 支路，可实现晶闸管的续流、中性区残压的释放和过电压的吸收。不同于车载过分相装置^[6]或基于断路器的过分相装置，电子开关过分相装置在换相过程中中性区网压与机车网侧电压保持一致，牵引工况下几乎不用考虑残压对晶闸管造成的过电压。

SCR 控制系统控制流程如图 5 所示，设备挂网后，实时对设备各元件状态进行自检，对行车及供电状况进行实时监测；列车进入中性区后，设备进入运行状态；列车驶离中性区后，自动进入行车等待，根据逻辑控制系统的命令进行实时控制，到达换相点时，根据图 4 所示的换相原理，进行自动换相。SCR 控制系统在等待投运、自检以及运行状态下均对设备进行实时故障监测，任何一个控制过程出现严重故障时，立即进入故障状态，并将故障信息送至逻辑控制单元，由逻辑控制单元进行故障处

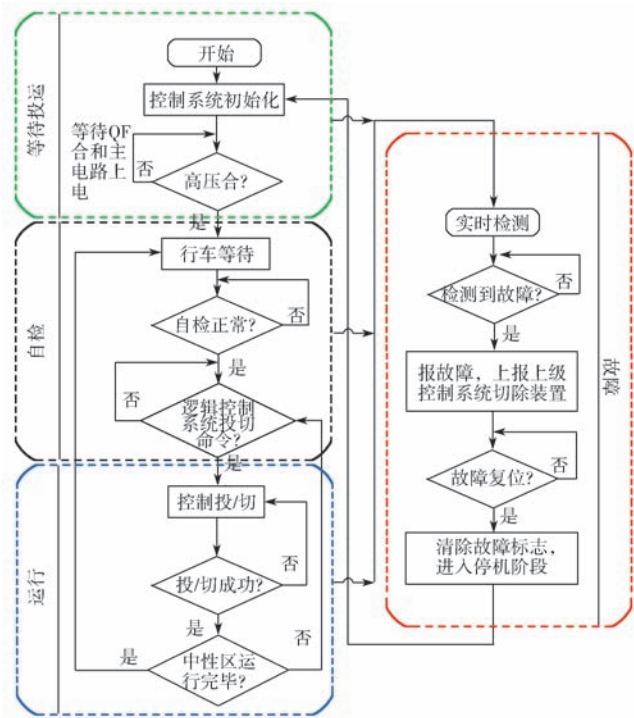


图 5 控制流程图
Fig. 5 Control flow chart

2.2 电子开关分相装置对机车影响

机车完全进入中性区后，在即将驶出中性区之前，需要将中性区的供电由 A 臂切换至 B 臂供电。变电所牵引变压器供电方式不同，A 臂与 B 臂相位差亦不同，如在变压器采用 V/v 接线方式的牵引变电所，两臂相位差为 60°；但是在分区所，两供电臂相位相同，电压末端相位差小于 10°。

当列车通过分区所对应接触网分相区时，两供电臂相位差不大(小于 10°)，可以设置断电时间为 1 ms 左右。以文献 [6] 中 HXd1C 型机车为例，其中间直流电压 U_d 为 1 800 V，额定功率为 7 200 kW，单轴功率约 1 200 kW，中间支撑电容 C_d 为 4.6 mF。由电容放电电压公式 $V_t=U_d \times e^{-t/RC}$ 可知，当 V_t 为 0.91 U_d (1 630 V) 时，机车功率因数近似为 1，可算出等效电阻 R ，从而得出放电时间 t 约为 1.5 ms。当直流电压小于 1 630 V 时机车开始卸力，电子开关过分相装置可以实现换相时间低至 1 ms，小于支撑电容支撑时间，完全可以达到无感知过分相的要求。由于换相时间较短，而且两相相位差较小，磁通变化也较小，机车几乎无励磁涌流现象。

当列车通过变电所对应接触网分相区时，电子开关过分相装置换相的断电时间对不同类型的机车的影响各不相同。由于脉冲整流器逆变电源相位与接触网电源相位存在相位差，如果不对列车的四象限整流器采取任何措施，合闸后可能会产生很大的暂态电流^[7]，导致机车过流跳闸。为了保障机车安全，需要等机车整流器脉冲封锁后再换相，换相断电时间设置在 15 ms 左右。

当机车变压器处在非常短的断电时间内，剩磁无法快速衰减，换相后容易在电力机车用电回路中产生很大的浪涌电流，造成电力机车过流保护装置启动跳闸。电子开关需要选择合适的投切相角，以减小机车因换相而再次带电引起的浪涌电流冲击，提高车网匹配性。

3 电子开关过分相装置的换相过程仿真与应用

3.1 电子开关过分相装置换相仿真

以采用 V/v 牵引变压器变电站与 HXd1C 型机车为例进行电子开关过分相过程仿真，HXd1C 型机车主要技术参数^[8]如表 1 所示。

表 1 HXd1C 型机车变流电路参数
Tab. 1 Converter parameters of HXd1C locomotive

参数	数值	参数	数值
变压器短路阻抗 /%	38	中间直流电压 /V	1 800
变压器一次侧额定电压 /V	25 000	额定输出功率 /kW	7 200
变压器二次侧额定电压 /V	970	中间直流支撑电容 /mF	25.8

将两相晶闸管连接至 V/v 牵引变压器同一供电臂，模拟分区所的供电方式，如图 6 所示。

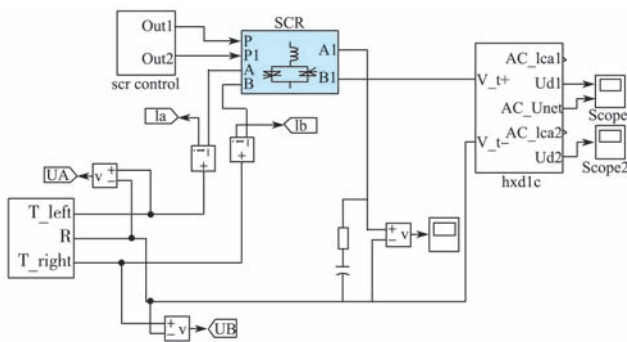


图 6 地面过分相系统仿真模型
Fig. 6 Simulation model of ground neutral section passing system

SCR 控制系统采用瞬态电流及功率检测与剩磁预估的控制方法（图 7），实现 1.5 ms 快速换相，并可适应不同机车，达到最佳涌流抑制效果。

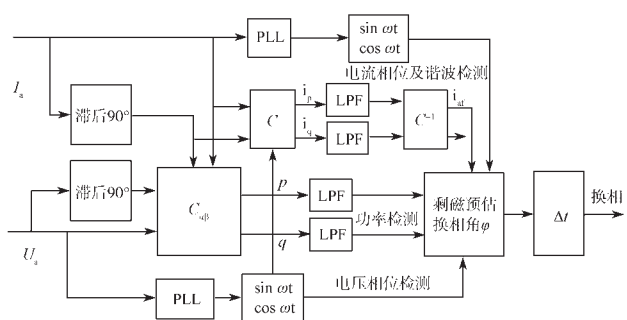


图 7 SCR 控制方法
Fig. 7 SCR control method

分相区断电时间 1.5 ms（分区所）机车网侧电压与电流如图 8 所示，机车中间直流电压如图 9 所示。由图可知，在两供电臂同相模式下，电子开关过分相装置换相时间为 1.5 ms，晶闸管换相关断过电压尖峰值约为 50 kV，符合电力机车操作过电压应限制在额定工作电压 2.25 倍的技术要求，所引起的中间直流电压波动很小，机车能够无感知过分相。

将两相晶闸管分别至 V/v 牵引变压器两相来模拟变电所供电方式，对机车异相换相进行仿真，分相区断电

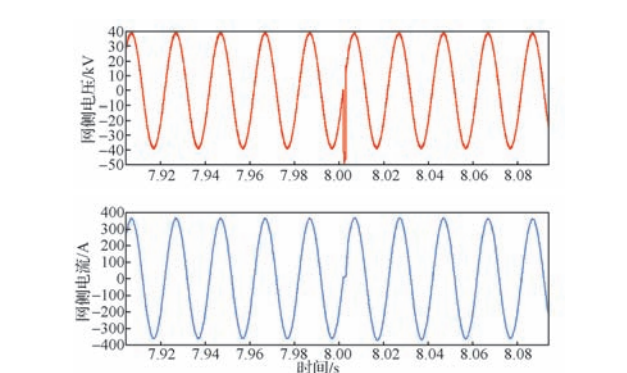


图 8 1.5 ms 换相机车网侧波形
Fig. 8 Grid-side waveforms of locomotive as phase switch time is 1.5 ms

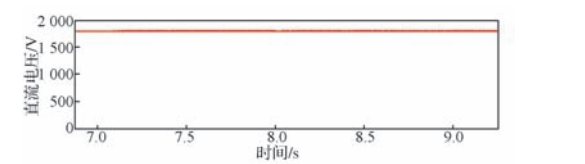


图 9 1.5 ms 换相机车直流电压波形
Fig. 9 DC voltage waveforms of locomotive as phase switch time is 1.5 ms

时间 15 ms 机车网侧电压与电流仿真波形如图 10 所示；机车中间直流电压仿真波形如图 11 所示。由图可知，当两供电臂在异相模式下时，电子开关过分相装置换相时间为 15 ms，晶闸管换相关断过电压尖峰值约为 50 kV，符合电力机车操作过电压应限制在额定工作电压 2.25 倍的技术要求，所引起的中间直流电压在满载时有明显的跌落，机车需要经历退载及加载过程^[9]。

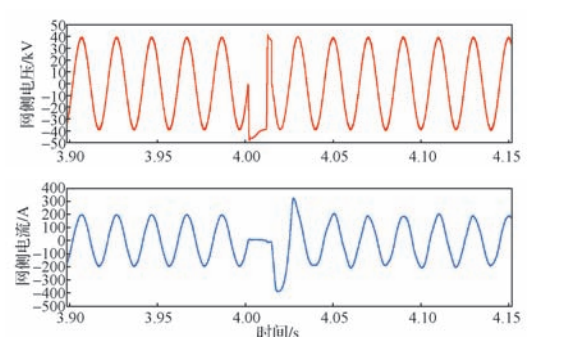


图 10 15 ms 换相机车网侧波形
Fig. 10 Grid-side waveforms of locomotive as phase switch time is 15 ms

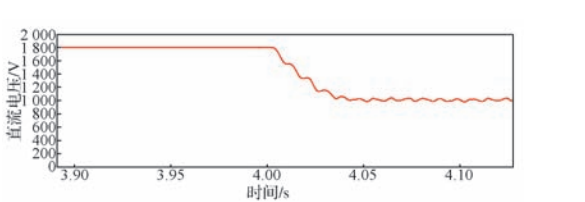


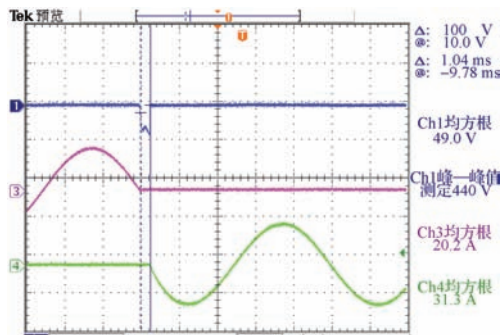
图 11 15 ms 换相机车直流电压波形
Fig. 11 DC voltage waveforms of locomotive as phase switch time is 15 ms

3.2 电子开关过分相装置试验及应用

3.2.1 同相换相

用电子开关过分相装置同相换相模拟分区所换相过程，两个牵引供电臂同相位时，电子开关过分相装置 1.5 ms 内换相试验波形如图 12 所示，晶闸管阀组无明显过电压，换相过程平稳。

电子开关过分相装置在广珠货运线进行行车试验验证，HXD1C 型机车试验结果如图 13 所示。试验工况为牵引工况、车速 60 km/h 和换相时间 1.5 ms。从图 13 可见，网侧电压恢复迅速，电流基本连续，机车直流电压波动很小，机车无冲动及卸载现象出现，实现了无感知过分相。



Ch1—阀组电压；Ch3—B 臂电流；Ch4—A 臂电流

图 12 同相换相时的电子开关过分相装置换相波形
Fig. 12 Waveforms of electronic switch neutral section passing equipment in the period of same-phase switching

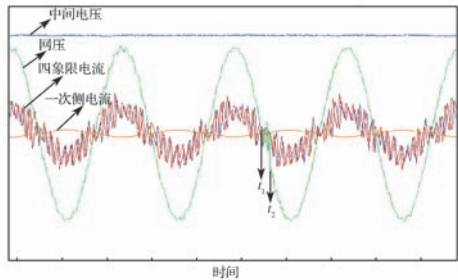
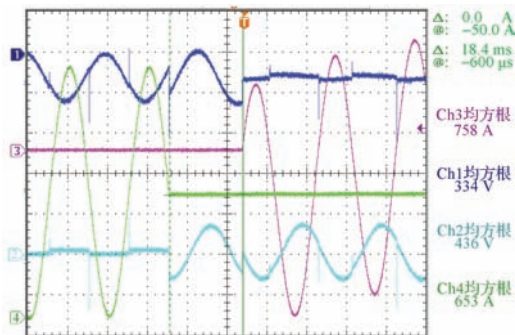


图 13 同相换相时的 HXD1C 型机车试验波形
Fig. 13 Test waveforms of HXD1C locomotive in the period of same-phase switching

3.2.2 异相换相

用电子开关过分相装置异相换相模拟变电所过分相过程，以变压器模拟机车牵引变压器进行换相试验，考虑到供电臂相差及机车变流器特性，试验设置换相断电时间为 18 ms，试验波形如图 14 所示。

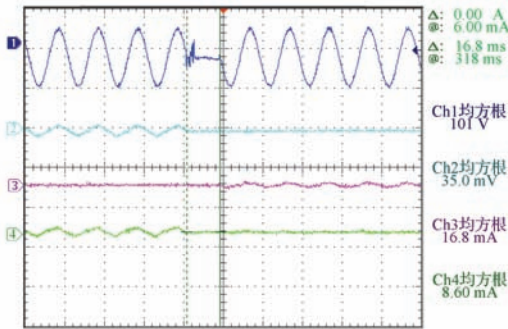


Ch1—SCR1 电压；Ch2—SCR2 电压；Ch3—SCR2 电流；Ch4—SCR1 电流

图 14 异相换相时的电子开关过分相装置换相波形
Fig. 14 Waveforms of electronic switch neutral section passing equipment in the period of out-phase switching

由图 14 可知，仅按断电时间进行切换，换相后容易产生较大的励磁浪涌电流（见 Ch3 波形）。在实际运行中，还需考虑机车牵引变压器的磁通特性。为了减少供电相位变化对机车带来的影响，避免机车牵引变压器饱和造成较大的励磁浪涌电流，需要控制电子开关过分相装置投入的相位，尽量减少换相给机车带来的浪涌电流冲击。

广珠线行车试验牵引网侧捕获的机车牵引工况浪涌电流抑制效果波形如图 15 所示，换相时间为 16.8 ms，换相后无浪涌电流（见 Ch3 波形），励磁涌流得到完全抑制。



Ch1—中性区网压；Ch2—SCR1 电流；Ch3—SCR2 电流；Ch4—中性区电流

图 15 变电所机车涌流试验波形
Fig. 15 Test waveform of locomotive inrush current in substation

HXD1C 型机车试验波形如图 16 所示。可以看出，失电期间中间电压略有跌落，换相过程平稳，一次侧无过电压和励磁浪涌电流。

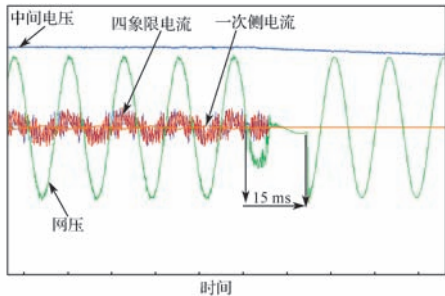


图 16 异相换相时的 HXD1C 型机车试验波形
Fig. 16 Test waveforms of HXD1C locomotive in the period of out-phase switching

4 结语

电子开关过分相装置响应速度快，换相断电时间可低至 1 ms，具有良好的车网匹配特性，且装置基于电力电子器件，使用寿命长，控制精度高，能实现中性区稳定供电。本文设计了一种电子开关过分相装置，其能自适应不同相位差变电所，并实时检测机车运行工况，通过选择最佳投切角度，快速恢复供电，减少投入涌流，降低对机车的冲击，对不同类型的机车均有较好的适应性，对高速、高坡和重载铁路运输能力的提升有明显效果，实际应用市场经济效益显著。因铁路供电对设备可靠性的要求非常高，后续将针对如何提高电子开关过分相装置的可靠性做进一步的研究。

参考文献：

[1] 张晓光. 重载列车的地面自动过分相系统探讨[J]. 科技创新导报, 2016, 13(6): 59. (下转第 79 页)