

地面自动过分相系统过电压抑制 建模仿真研究

郑亚平¹, 吴丽然²

(1. 中国神华能源股份有限公司 神朔铁路分公司, 陕西 榆林 719300;

2. 株洲中车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 介绍了电子开关地面自动过分相系统工作原理, 进行了接触网、牵引负荷、过分相装置电气参数计算和系统仿真建模。建立了基于电子开关地面自动过分相的机车带载通过分相区的等效模型。从抑制感应电压、阀组续流等方面综合设计中性区 RC 支路关键参数。最后通过仿真验证了本方法抑制过分相过电压的有效性。

关键词: 过分相; 电子开关; 过电压; RC 支路; 仿真; 接触网

中图分类号: U223.5

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2019.03.004

Modeling and Simulation of Overvoltage Suppression in Ground Automatic Neutral Section Passing System

ZHENG Yaping¹, WU Liran²

(1. Shenshuo Railway Branch, China Shenhua Energy Incorporated Company, Yulin, Shaanxi 719300, China;

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

Abstract: The working principle of ground automatic neutral section passing system of electronic switch was introduced. The calculation of electrical parameters of catenary, traction load and phase passing device and system simulation modeling were carried out. The equivalent model of the locomotive passing through the phase separation zone on load was established based on the ground automatic passing of the electronic switch. The key parameters of RC branch were designed by considering suppressing reactive voltage and maintain SCR in on-state. Finally, the effectiveness of suppressing overvoltage was validated by simulation.

Keywords: neutral section passing; electronic switch; overvoltage; RC branch; simulation; catenary

0 引言

电气化铁路采用单相工频供电制式, 牵引负荷是典型的单相负荷, 会在电力系统侧产生较大的负序电流, 进而对三相电网电能质量产生不可忽视的影响。电气化铁路接触网采用分段换相供电, 为防止相间短路, 各相间用空气或绝缘物隔离, 称为电分相区, 一般每几十公里就有一个分相区^[1]。

电分相的存在是牵引供电系统发展的主要制约因

素之一, 其中列车过分相过电压问题更是引起了很多专家和学者的广泛研究。文献[2]详细划分并分析高速铁路列车过分相各暂态过程, 建立系统等效数学模型并进行推导计算, 探讨了过分相过电压的影响因素。文献[3]结合过电压试验统计结果, 分析中性段产生过电压的原因, 并提出使用 RC 保护器抑制过电压。文献[4]研究了车载自动过分相的暂态过程, 并使用 RC 保护器抑制车载自动过分相过电压。文献[5]对机械开关地面自动过分相过电压进行分析, 同时也采取 RC 保护器来抑制过电压。文献[6]提出了一种新型分区所不间断供

收稿日期: 2019-01-03; 修回日期: 2019-03-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB1200800)

电自动过分相方案,该方案可以有效解决列车通过分区所中性区时产生过电压等现象。近年来,随着电力电子器件技术发展,电子开关地面自动过分相技术受到广泛关注^[7-9]。在此基础上,本文针对电子开关过分相系统,构建列车带电、带载过分相模型,并且从限制中性区感应电压、晶闸管续流以及滤除谐波的角度综合设计了中性区 RC 支路的基本参数。

1 地面自动过分相原理

自动过分相主要包括车载自动过分相、柱上开关自动过分相、机械开关地面自动过分相和电子开关地面自动过分相等,前 2 种方式存在列车过分相时断电时间长、易产生过电压以及维护成本高的问题。为克服上述缺点,国内外很多学者对电子开关过分相展开研究以及工程化应用^[10],即以晶闸管功率半导体开关器件为主构成电子开关,每个电子开关由多组反并联或双向晶闸管串联构成阀组,用于中性区与供电臂电源的电气连通控制。

图 1 是电子开关地面自动过分相典型结构。其中,SCR-V1 和 SCR-V2 是采用晶闸管构成的电子开关阀组,当 CG1 检测到有列车通过,控制电子开关 SCR-V1 导通,中性区由 a 相供电臂供电;当 CG3 检测到有列车通过,顺序控制电子开关 SCR-V1 关断、SCR-V2 导通,由 a 相供电臂转换至 b 相供电臂给中性区供电;当 CG4 检测到有列车通过,表明列车已通过中性区,此时控制电子开关 SCR-V2 关断,使整个系统复位,为下次列车过分相做准备。若列车反向行驶,则依次根据 CG4,CG2,CG1 判断列车位置实现自动过分相。

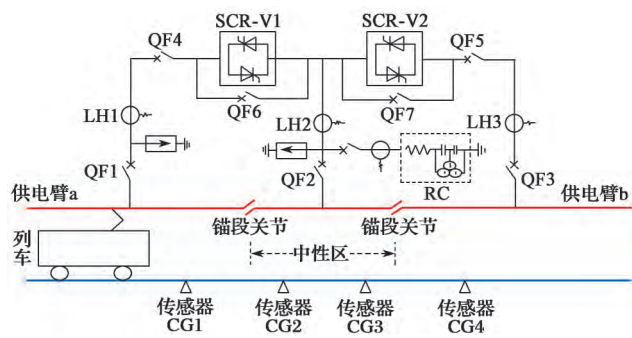


图 1 地面自动过分相系统结构

2 系统等效模型

2.1 接触网中性区

本文以某典型电气化铁路单线牵引网的参数为例进行计算,主要参数如表 1 所示。

表 1 牵引网参数

参数名称	接触线	承力索	钢轨
	CTMH150	JTMH120	P60
电阻率/($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	0.184	0.242	0.135
等效半径/mm	7.20	7.00	12.79
悬挂高度/mm	1 300	-	-
弛度/mm	-	600	-
钢轨距离/mm	-	-	1 435

“接触网-地”回路的单位长度阻抗:

$$Z_1 = z_j + \frac{(z_j - z_{jc})(z_c - z_{jc})}{(z_j - z_{jc}) + (z_c - z_{jc})} = 0.1559 + j0.5883 \Omega/\text{km} \quad (1)$$

式中: z_j 为“接触网-地”回路的单位长度自阻抗; z_c 为“承力索-地”回路的单位长度自阻抗; z_{jc} 为“接触网-地”回路与“承力索-地”回路间的单位长度互阻抗。

“钢轨-地”的单位长度阻抗:

$$Z_2 = \frac{r_g}{2} + 0.05 + j0.1446 \lg \frac{D_g}{\sqrt{R_{ej}d}} = 0.118 + j0.553 \Omega/\text{km} \quad (2)$$

式中: r_g 为钢轨电阻率; R_{ej} 为钢轨等效半径; d 为钢轨之间的距离; D_g 为“钢轨-地”回路等值深度, $D_g = 0.93 \text{ km}$; 其他参数取值见表 1。

“接触线-地”回路与“钢轨-地”回路的互阻抗:

$$Z_{12} = 0.05 + j0.1446 \lg \frac{D_g}{d_{12}} = 0.049 + j0.39 \Omega/\text{km} \quad (3)$$

式中: d_{12} 为两回路几何平均距离,取 $d_{12} = 1\,800 \text{ mm}$ 。

两回路等效单位长度阻抗:

$$Z_w = Z_1 - \frac{Z_{12}^2}{Z_2} = 0.1427 + j0.3143 \Omega/\text{km} \quad (4)$$

当中性区长度 $l = 0.35 \text{ km}$ 时,则其等效阻抗为

$$Z_s = Z_w \times l = 0.0499 + j0.11 \Omega$$

取中性区距离地面的高度 $H = 6 \text{ m}$,中性段和接触线重叠区长度为 100 m ,并且间距 $D_z = 0.5 \text{ m}$,真空介电常数 $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ 。根据理论计算得到中性区对地单位等值电容 $C_1' = 1.0066 \times 10^{-10} \text{ F/m}$ 和耦合电容 $C_2' = 1.11 \times 10^{-11} \text{ F/m}$ 。

由中性区及重叠区长度得到耦合电容 $C_1 = 1.0066 \times 10^{-8} \text{ F}$,中性区对地等值电容 $C_2 = 3.885 \times 10^{-9} \text{ F}$ 。

2.2 列车负荷

本文选用交流传动列车作为研究对象,它主要由受电弓、电压互感器、主断路器、牵引变压器、主变流器、牵引电机以及辅助机组等部分组成,其结构原理如图 2 所示。

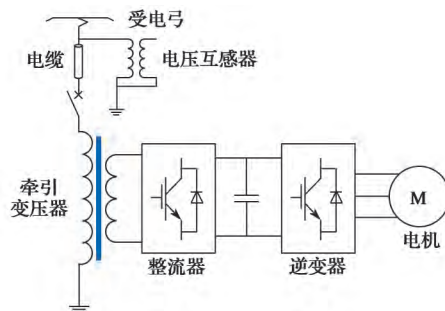


图 2 电力机车原理图

1) 受电弓与车顶高压引线对地电容

受电弓弓头对地面积为 1.13 m^2 ,与车顶距离为 2 m ;弓架对地面积为 1.222 m^2 ,与车顶平均距离为 1.5 m ;受电弓底座面积为 0.846 m^2 ,与车顶距离为 0.32 m ,

则受电弓对地电容为^[4]

$$C_s = \frac{1.13\varepsilon_0}{2} + \frac{1.222\varepsilon_0}{1.5} + \frac{0.846\varepsilon_0}{0.32} = 3.565 \times 10^{-11} \text{ F} \quad (5)$$

高压电缆与车顶距离为 500 mm, 长度 $l=14.55 \text{ m}$, 则高压电缆对地电容为

$$C_r = \frac{2\pi\varepsilon_0 l}{\ln \frac{2H}{\sqrt{r_{eq}}}} = 3.5665 \times 10^{-10} \text{ F} \quad (6)$$

受电弓和高压引线对地电容 C_t 为 2 个对地电容 C_s 和 C_r 之和, $C_t = C_s + C_r = 3.923 \times 10^{-10} \text{ F}$ 。

2) 列车牵引变压器励磁电感

牵引网电压 $U_{1N}=25 \text{ kV}$, 车载牵引变压器二次侧电压 $U_{2N}=1.770 \text{ kV}$, 二次侧空载电流 $I_0=4.21 \text{ A}$, 变压器空载损耗 $P_0=855 \text{ W}$, 则励磁阻抗参数如下:

$$\left. \begin{aligned} Z_{2m} &= \frac{U_{2N}}{I_0} = 420.43 \text{ } \Omega \\ R_{2m} &= \frac{P_0}{I_0^2} = 48.24 \text{ } \Omega \\ R_m &= R_{2m} \left(\frac{U_{1N}}{U_{2N}} \right)^2 = 9623.67 \text{ } \Omega \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

等效电感:

$$X_m = \sqrt{Z_{2m}^2 - R_{2m}^2} \times \left(\frac{U_{1N}}{U_{2N}} \right)^2 = 83\ 362.1 \text{ H} \quad (8)$$

3) 列车等效阻抗

取列车牵引功率为 5 500 kW, 功率因数取 0.98, 令牵引网电压 $\dot{U}=25\angle 0^\circ \text{ kV}$, 取电流为 $\dot{I}=200\angle 11.5^\circ \text{ A}$, 则列车等效阻抗为

$$Z_1 = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = 125\angle 11.5^\circ = 125 + j24.9 \text{ } \Omega \quad (9)$$

4) 电压互感器阻抗

本文选用高压电压互感器型号为 TBY1-25, 该互感器的变比为 25 000/100, 额定容量为 20 VA, 等效电阻 $R_0=3\ 000 \text{ } \Omega$ 。在非饱和状态下, 高压电压互感器的电抗为

$$L_0 = \frac{U^2}{2\pi f Q} = 99\ 472 \text{ H} \quad (10)$$

2.3 电子开关过分相系统

本文采用多组晶闸管串联构成的电子开关阀组, 两供电臂采用理想电压源表示, 中性区接触网配置 RC 支路, 以发挥降低中性区接触网感应电压和维持晶闸管阀组持续导通的功能, 有效降低列车过分相的过电压冲击。含列车负荷与 RC 支路的电子开关地面自动过分相系统如图 3 所示。

图 3 中, SCR-V1 和 SCR-V2 为晶闸管阀组; S1, S2, S3 表示列车位置开关; U_a 和 U_b 为两供电臂电压; R_{s1} , R_{s2} , L_{s1} 和 L_{s2} 为中性段的等效电阻和电感; C_2 为中性段对地电容; C_1 为供电臂与中性段的线间耦合电

容; C_t 为受电弓和高压引线对地电容; R_T 和 L_T 分别是列车电压互感器等电阻和电感; R_m 和 L_m 分别是列车变压器励磁电阻与励磁电感; R_l 和 L_l 分别是列车等效负荷电阻与电感。列车通过中性区过程可以分为 7 个阶段: ①列车未进入分相区前, 即 S1 闭合, S2 和 S3 断开, SCR-V1 和 SCR-V2 关断; ②列车驶入左侧重叠区, S1 和 S2 闭合, S3 断开, SCR-V1 开通, SCR-V2 关断; ③列车受电弓与左侧供电臂分离, 受电弓完全进入中性区, 即 S1 和 S3 断开, S2 闭合; ④列车在中性区运行一定时间后, 当受电弓在中性区中点附近时, SCR-V1 关断, 然后 SCR-V2 开通, 完成换相供电; ⑤列车驶入右侧重叠区, S2 和 S3 闭合, S1 断开。⑥列车受电弓与中性区分离, 进入右侧供电臂, 即 S3 闭合, S1 和 S2 断开。⑦列车由供电臂 B 供电, S3 闭合, S1 和 S3 断开, SCR-V1 和 SCR-V2 关断。

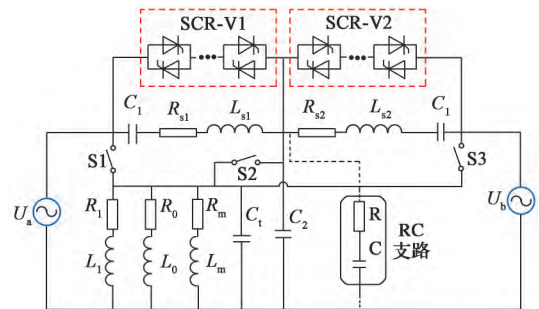


图3 地面自动过分相系统模型

3 RC 参数设计

目前, 国内外对于中性段过电压抑制最常用的方案是采用 RC 装置对冲击过电压进行吸收, 这种方案结构简单且便于实施, 可以对过电压起到一定的抑制作用。列车过分相动态过程可等效为多个电路回路的反复通断, 晶闸管阀组存在被迫短接关断的风险, 因此合理设计 RC 装置的参数, 保证基波回路位置晶闸管阀组持续导通是必要的。

3.1 限制中性区感应电压

中性区感应电压等效电路图可由图 3 简化为图 4。

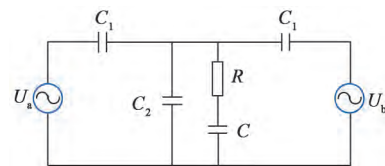


图4 感应电压计算原理

限制中性区感应电压, 使得地面自动过分相系统开关闭合时相对于中性区接触网呈零电压状态, 可以达到良好的控制效果, 减小过电压冲击。根据图 4 求解节点电压方程, 可以得到感应电压计算公式为

$$\dot{U}_n = \frac{jC_1(\omega^2 R^2 C^2 + 1)}{\omega R C^2 + j[C + (2C_1 + C_2)(\omega^2 R^2 C^2 + 1)]}(\dot{U}_a + \dot{U}_b) \quad (11)$$

为消除电路的振荡, 电容 C 必须满足足够大的要

求^[9], 即 $C \gg C_2$ 。由前面计算可知, $C_1 = 2.59C_2$, 则有 $C \gg C_1 > C_2$, 那么式 (11) 可以进一步简化为

$$|\dot{U}_n| = \omega C_1 \sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}} |\dot{U}_a + \dot{U}_b| \quad (12)$$

由式 (12) 和图 5 可知, 当 C , C_1 和 R 取值一定时, 中性区感应电压大小与两供电臂电压的相位差有关, 相位差越小, 感应电压越大。为降低中性区感应电压对过分相过电压的影响, 可通过设计 RC 支路的参数将其限制在 1.5 kV 以内。将以上参数带入式 (12) 可得

$$\sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}} \leq 9.487 \quad (13)$$

3.2 晶闸管阀组续流

在关节式电分相结构中, 锚段关节的设置使得供电臂和中性区接触网存在重叠区域, 受电弓滑过将会短接晶闸管阀组, 在驶过中性区后晶闸管阀组重新导通。该过程存在晶闸管被迫关闭再复通的过程, 易引起接触网过电压。其中, 维持其导通的最小电流为维持电流 I_H , 通常为几十到几百毫安, 而晶闸管刚从断态转入通态并移除触发信号后, 能维持其导通所需的最小电流为擎柱电流 I_L , 通常情况下 I_H 大小为 2~4 倍 I_L ^[10]。因此, RC 支路续流时, 取流过 RC 支路电流有效值 I_{RC} 为 2.5~3 A, 设定 $I_{RC1} = 2.5$ A, $I_{RC2} = 3$ A。当晶闸管导通时, 中性区上的电压基本与接触线电压相等, 此时取中性段电压 $U_n = 25$ kV, 则有

$$I_{RC1} \leq \frac{U_n}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}} \leq I_{RC2} \quad (14)$$

即

$$8333 \leq \sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}} \leq 10000 \quad (15)$$

综上所述, R 可取 800~1 000 Ω , C 可取 0.34~0.39 μF 。

4 仿真验证

为验证和分析上述方法的有效性, 在数字仿真平台搭建地面自动过分相系统仿真模型。根据前文计算结果, 以 $R = 800 \Omega$, $C = 0.34 \mu\text{F}$ 为例进行仿真验证。假设列车牵引功率为 4.4 MW, 以单位功率因数运行, 在 $t = 0.11$ s 时晶闸管阀组 SCR-V1 触发导通, 在 t 为 0.32~0.60 s 期间 SCR-V1 关断、SCR-V2 导通。

图 6 为列车通过中性区前后的两供电臂电压和中性区电压波形。可以看出, 中性区先与左供电臂电压相同, 经过短暂的切换时间后, 再与右供电臂电压相同, 无暂态过电压。

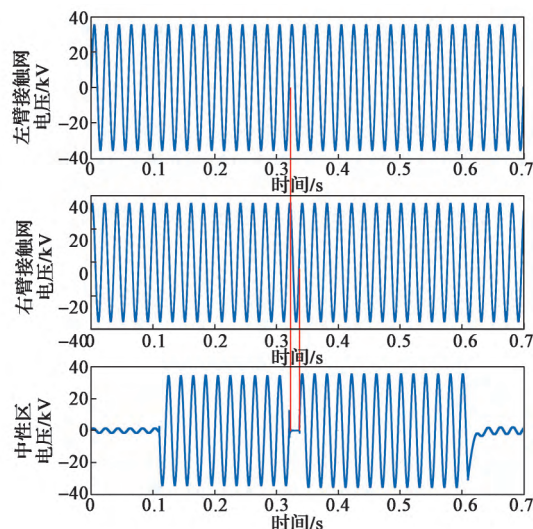


图 6 供电臂与中性区电压波动图

图 7 为对应时间内的两晶闸管阀组电流和负载电流。列车行驶在中性区时, 先由阀组 SCR-V1 向负载供给电流, 经过短暂时间切换至由阀组 SCR-V2 向负载供给电流。

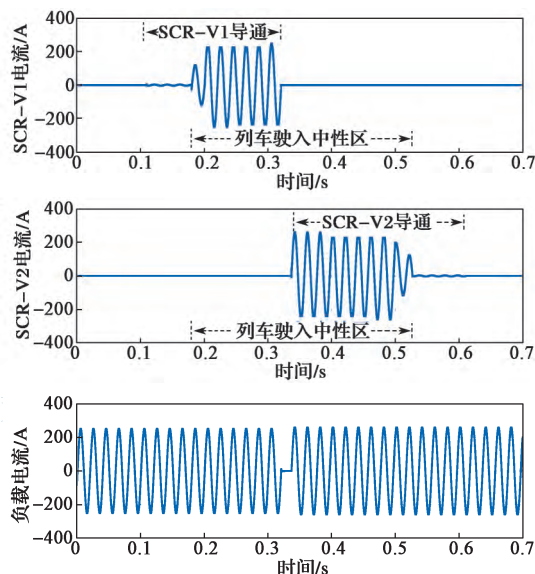


图 7 两晶闸管阀组电流与负载电流波形

图 8 和图 9 分别为有 / 无 RC 支路时的晶闸管阀组电流和阀组 SCR-V1 开通时的中性区电压波形。可以

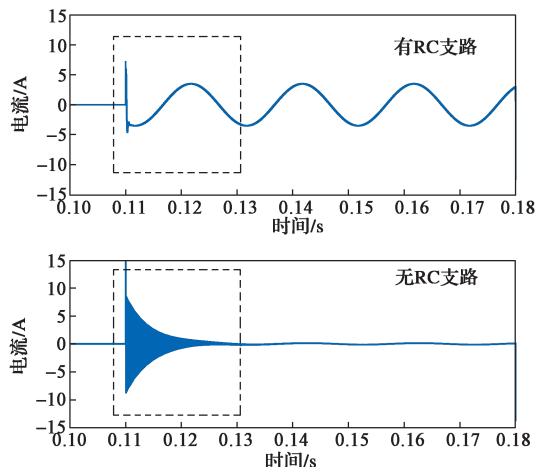


图 8 有 / 无 RC 支路时阀组导通电流波形

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。

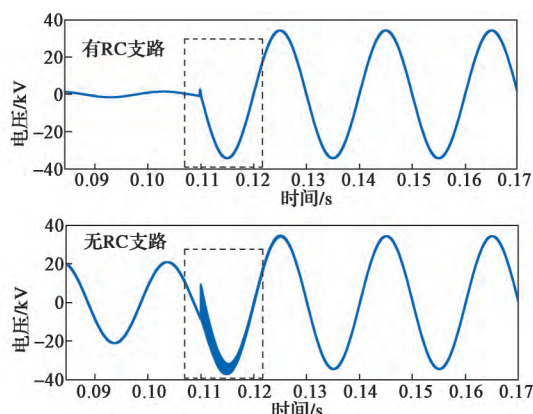


图9 有/无 RC 支路时中性区电压波形

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。