

# 再生制动对同相供电系统电能质量影响研究

孙镜堤, 解绍锋, 张 凯, 李海燕, 陈氏武

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

**摘要:**同相供电系统可提供牵引供电网中的负序电流、无功电流、谐波的补偿以及解决电分相问题。本文介绍了单相组合式同相供电系统和列车再生制动工作原理,通过建立仿真模型,分析了列车处于再生制动工况下对同相牵引供电系统及电力系统三相不平衡度、功率因数和谐波的影响,验证了同相供电系统在列车再生制动工况下,不改变控制策略解决电能质量问题的有效性。

**关键词:**同相供电系统;再生制动;三相不平衡度;功率因数;谐波

**中图分类号:**U223

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2018)06-0133-06

## 0 引言

现有电气化铁路采用分段异相供电,会造成三相不平衡、功率因数低、谐波含量大等电能质量问题,以及由于存在电分相会影响列车速度及机电性能。同相牵引供电系统可从根本上解决牵引供电网中的负序电流、谐波电流、无功电流的补偿以及电分相问题,是电能质量治理较为理想的措施。

再生制动是指将列车运行的动能转化为电能通过电网直接供给其他负荷使用或者通过储能装置储存起来以供其他负荷使用的工作过程<sup>[1-3]</sup>。目前高速列车普遍采用“交-直-交”方式牵引,这为实现再生制动提供了必要条件。再生制动技术的采用可以节约列车运行时消耗的能量,是一种较为理想的制动方式。在牵引供电系统中,电力机车是大功率、单相整流负荷,具有冲击性、不对称和非线性的特点,在快速运行时会对牵引供电系统的电能质量产生较大影响。文献[4]讨论了再生制动工况下负序电流的计算,提出了一种简便的工程计算方法。文献[5]介绍了同相供电系统工作原理,并分析了再生制动对于电网电能质量的影响。文献[6]仿真分析了同相供电系统能抑制再生制动引起的牵引网电压抬升。文献[7-11]主要对同相供电系统的控制策略、仿真建模等进行分析。现有的论文大多对既有牵引供电系统分析再生制动对电网电能质量的影响,对同相供电系统分析再生制动对牵引网和电网电能质量影响的较少。

文中介绍了同相供电系统的工作原理,通过Matlab/Simulink软件建立了单相组合式同相供电系统以及机车模型,分析了列车处于再生制动工况下对同相供电系统及电力系统电能质量的影响,验证

了同相供电系统解决电能质量问题的有效性。

## 1 组合式同相供电系统

同相供电系统是指为电力机车或动车组提供电能的各供电区间具有相同的电压和相位的牵引供电系统。目前包括多种技术方案,组合式同相供电是其中一种,其优势是实现最小同相补偿装置容量取消牵引变电所电分相,包括单相组合式同相供电和单三组合式同相供电<sup>[2]</sup>。两种方案区别为同相供电装置高压匹配变压器接线形式不同。

本文以单相组合式同相供电为例进行讨论。单相组合式同相供电系统结构如图1所示。

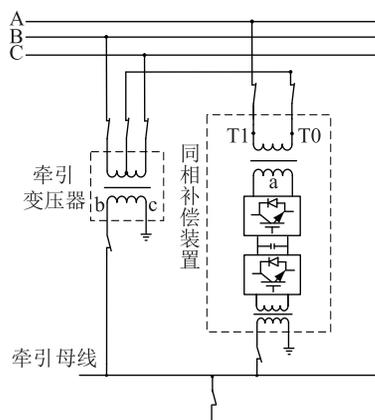


图1 单相组合式同相供电系统

Fig.1 Single-phase combined co-phase power supply system

同相供电牵引变电所由牵引变压器和同相补偿装置组成,牵引变压器和高压匹配变压器构成一种供电容量不等、电压幅值不等、电压相位垂直的特殊三相-两相平衡变压器,使得同相补偿装置端口和牵引变压器端口电压相位相差90°。若同相供电补偿装置与牵引变压器分别供给牵引负荷功率的1/2,可使得负序电流完全补偿,电力系统三相电

压不平衡度为零。正常运行中,牵引变压器起着主要供电作用,同相供电补偿装置根据三相电压不平衡度国标要求担负辅助供电任务。同相补偿装置包括高压匹配变压器、同相补偿变流器和牵引匹配变压器。通过同相补偿装置传递功率,提供列车牵引负荷的一半,同时与负荷直接相连的变流器一端兼顾补偿牵引负荷的无功和谐波。

图2为单相组合式同相供电系统供电电压向量图(实线代表原边电压,虚线代表次边电压),通过特殊接线实现原边三相对称电压向次边电压  $U_{bc}$  和  $U_{ao}$  相位互差  $90^\circ$  的变换。同相补偿装置通过采集牵引网上电压、电流来控制电力电子开关器件的通断,实现交流-直流-交流变换,使输出电流满足补偿需求。

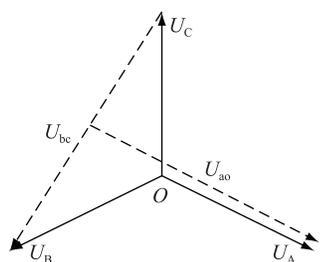


图2 单相组合式同相供电电压向量图  
Fig.2 Single-phase combined co-phase supply voltage vector diagram

## 2 再生制动工作过程

再生制动就是当列车减速运行时,牵引电机由电动机状态转变为发电机状态,将机械能转化为电能,并通过牵引网供给其他运行于牵引工况的电力机车使用或通过储能装置储存起来以供其他用电负荷使用的工作过程。

列车再生制动时,过程与牵引运行正好相反,功率流向相反,整流器将牵引电机产生的三相交流电变换为直流电,通过中间直流环节后,再由逆变器将直流电变换为与牵引网频率相同的单相交流电,最后由牵引变电所主变压器将交流电升压后反馈回电网<sup>[1]</sup>。其工作原理如图3所示。

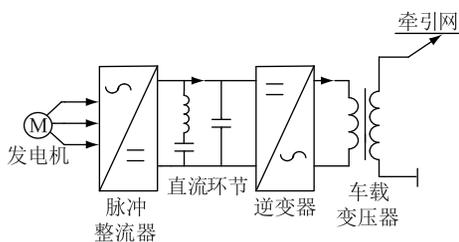


图3 再生制动工作原理  
Fig.3 Principle diagram of regenerative braking working

## 3 再生制动对电能质量的影响

本文采用 Matlab/Simulink 软件分别建立了单相组合式同相供电系统仿真模型和某型动车组等效模型。图4为组合式同相供电系统仿真图,图5为同相补偿装置控制仿真图。

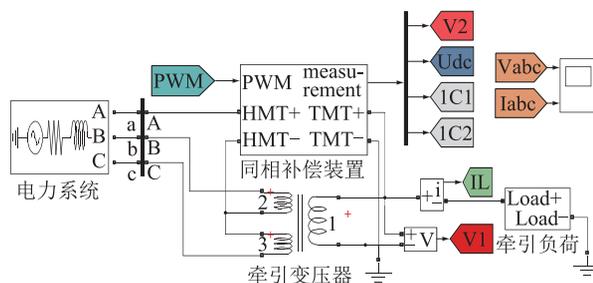


图4 组合式同相供电系统仿真图

Fig.4 Simulation of combined co-phase power system

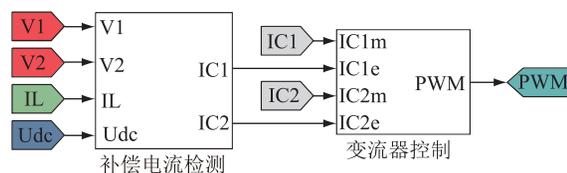


图5 同相补偿装置控制图

Fig.5 Control chart of compensation device of co-phase power system

参考文献[12],设三相电力系统线电压  $U_L$  为 220 kV,牵引网电压  $U$  为 27.5 kV,系统短路容量  $S_d$  为 1500 MV·A,同相补偿装置容量  $S_C$  为 10 MV·A,牵引变压器容量  $S_T$  为 35 MV·A。

### 3.1 再生制动对同相牵引网电能质量的影响

#### 3.1.1 对牵引网电压偏差的影响

根据铁道干线电力牵引交流电压规定,牵引变电所牵引侧母线的额定电压为 27.5 kV,短时允许为 29 kV,电力机车、动车组上受电弓上最低工作电压为 20 kV。为保证牵引变电所接入系统公共连接点处其他负荷的电压水平,首先要保证牵引负荷在牵引网带来的电压偏差要小<sup>[11]</sup>。

列车再生制动时会产生的电能反馈回牵引网,特别是列车处于牵引网末端或者多辆列车共线时再生制动,会导致受电弓处牵引网电压过高,从而产生诸多影响,如保护装置误动作,电力设备绝缘受损等,可能造成重大的经济损失。

假设牵引负荷为一列满载运行的某型交直交机车,参考文献[11—14],基于实测数据,设定负荷电流  $i_L$  为:

$$i_L(t) = \begin{cases} i_1(t) & 0 \leq t < 2 \\ i_2(t) & 2 \leq t \leq 5 \end{cases} \quad (1)$$

$$i_1(t) = 384\sin(\omega t - 11.48^\circ) + 8\sin(3\omega t - 30^\circ) + 5\sin(5\omega t + 15^\circ) + 4\sin(7\omega t + 60^\circ) + 4\sin(45\omega t - 60^\circ) + 8\sin(47\omega t + 50^\circ) + 6\sin(49\omega t) A \quad (2)$$

$$i_2(t) = -i_1(t) \quad (3)$$

牵引负荷总功率为 9600 kW,同时含有 3,5,7,45,47,49 次谐波,总谐波畸变率为 3.87%。通过仿真设置列车在 0~2 s 正常牵引取流,负荷电流为  $i_1(t)$ ;2~5 s 变为再生制动反馈能量,负荷电流为  $i_2(t)$ 。

根据我国某牵引变电站的实际参数,牵引网等值阻抗为  $0.0584 + j0.125 \Omega/\text{km}$ ,由于要研究列车在同相供电系统供电臂末端时再生制动的情况,设列车再生制动位置距离牵引变电所首端 25 km,此时牵引网一个供电臂总阻抗为  $1.46 + j3.125 \Omega$ ,从 2 s 时刻机车由牵引变为再生制动。在牵引供电臂末端测量 0~5 s 内牵引网电压变化如图 6 所示。

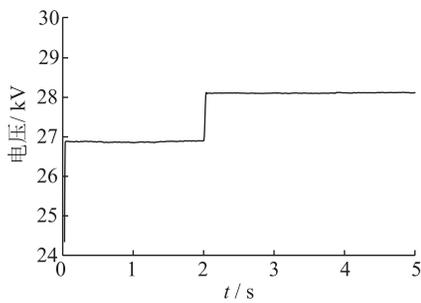


图 6 再生制动时同相牵引网末端电压变化波形

Fig.6 The terminal voltage change waveform of co-phase traction network during regenerative braking

与既有牵引网供电臂末端电压(如图 7 所示)进行比较可得,2 s 时列车再生制动,同相供电系统牵引网末端电压抬升在国标规定以内。若线路上存在其他处于牵引工况的列车,牵引网电压将会进一步降低,可见同相供电系统对于牵引网电压抬升具有较好的抑制作用,会大大避免由于电压过高引起的事故。

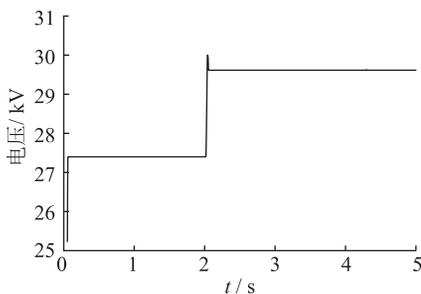


图 7 再生制动时既有牵引网末端电压变化波形

Fig.7 The terminal voltage change waveform of the existing traction network during regenerative braking

### 3.1.2 对牵引网谐波的影响

设定的牵引负荷电流如式(1),同时含有 3,5,7,45,47,49 次谐波,对负荷电流进行快速傅里叶变换(fast fourier transformation, FFT),得出其各次谐波分布如图 8 所示,在牵引负荷处测出其总的谐波畸变率为 3.87%。

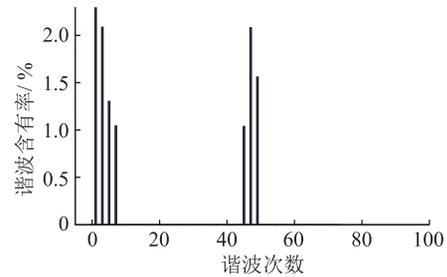


图 8 牵引负荷谐波电流分布

Fig.8 Harmonic current distribution of traction load

如图 9 所示为负荷电流、谐波补偿电流和牵引网馈线电流。可得,在列车再生制动时同相补偿装置能对牵引网谐波电流兼顾补偿。

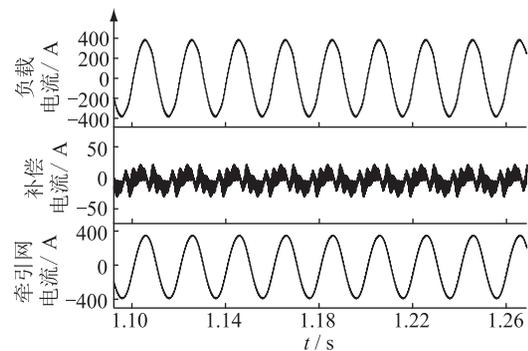


图 9 负载电流、谐波补偿电流与牵引网馈线电流

Fig.9 Load current, harmonic compensation current and traction network feeder current

## 3.2 再生制动对电力系统电能质量的影响

### 3.2.1 对三相电压不平衡度的影响

GB/T 15543—2008 中规定,电力系统公共连接点正常电压不平衡度的允许值为 2%,短时不超过 4%。接于公共连接点的每个用户引起的该点负序电压不平衡度的允许值一般为 1.3%,短时不超过 2.6%<sup>[12]</sup>。标准中指出,在公共连接点电力系统的等值正序阻抗与负序阻抗相等的前提下,由负序电流换算为电压不平衡度的近似公式为:

$$\varepsilon_{U2} = \frac{\sqrt{3}I_2U_L}{S_{SC}} \times 100\% \quad (4)$$

式中:  $I_2$  为负序电流值;  $U_L$  为线电压;  $S_{SC}$  为公共连接点三相短路容量。可以看出三相电压不平衡度与系统短路容量成反比,与牵引变电所的负序电流成正比。

GB/T 15543—2008 在其附录 A 中给出不平衡度的表达式为:

$$\varepsilon_U = \frac{U_2}{U_1} \times 100\% \quad (5)$$

式中:  $U_1$  为三相电压正序分量方均根值;  $U_2$  为三相电压负序分量方均根值。

根据式(5)在 Matlab/Simulink 中建立三相电压不平衡度检测模块,如图 10 所示。

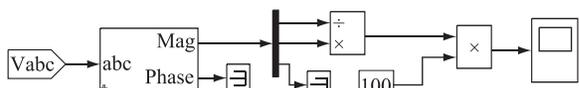


图 10 三相电压不平衡度检测模块

Fig.10 Three-phase voltage imbalance detection module

由图 11 可得,电力系统侧三相电压不平衡度在列车再生制动期间稳定在 0.05% 到 0.08% 之间,满足国标要求。可得在列车再生制动时,同相供电系统同样能有效地解决负序电流带来的三相不平衡问题。

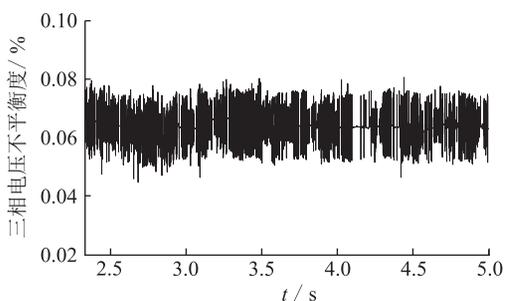


图 11 再生制动时电力系统三相电压不平衡度

Fig.11 Three-phase voltage unbalance on power system during regenerative braking

### 3.2.2 对功率因数和谐波的影响

功率因数和谐波也是考核供电品质的重要指标之一,组合式同相供电系统也对其兼顾进行补偿。

按原水利电力系统和国家物价局颁布的《功率因数调整电费办法》规定电气化铁路功率因数不能低于 0.9。电能质量公用电力系统谐波规定,标称电压为 110 kV(或 220 kV)的电力系统电压共谐波畸变率不超过 2%。

列车处于再生制动工况时,同相供电系统馈线负载电流  $i_L(t)$  为:

$$i_L(t) = - [i_{1p}(t) + i_{1q}(t) + i_h(t)] \quad (6)$$

式中:  $i_{1p}(t)$ ,  $i_{1q}(t)$  分别为负载电流基波有功分量和无功分量;  $i_h(t)$  为谐波电流。

在补偿电流的检测中要实现有功电流、无功电流以及谐波电流的分离,才能控制同相补偿装置输出满意的补偿电流。有功电流、无功电流以及谐波电流的检测控制框图如图 12 所示。将实际补偿电流和理想补偿电流做差后经过 PI 控制器校正,与三角载波进行比较产生控制同相补偿装置的开关信号,从而输出满意的补偿电流。

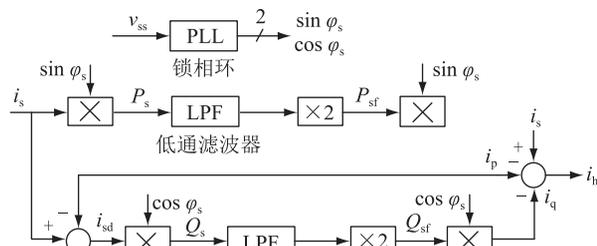


图 12 补偿电流分离检测控制框图

Fig.12 Compensation current separation detection control block diagram

在仿真中搭建的有功电流、无功电流以及谐波电流的检测模型如图 13 所示。

搭建功率因数检测模块,对电力系统侧功率因数进行计算,结果如图 14 所示。

由图 14 可以看出,列车处于牵引工况时,电力

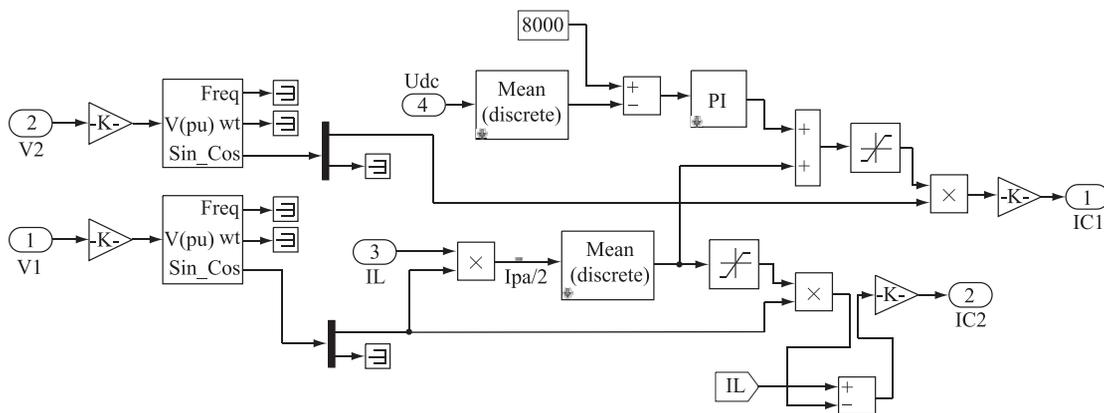


图 13 补偿电流检测仿真模块

Fig.13 Compensation current detection simulation module

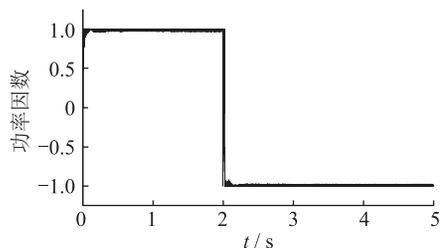


图 14 电力系统功率因数变化

Fig.14 Power factor change diagram of Power system

系统侧功率因数接近 1, 2 s 时刻开始处于再生制动工况时, 电力系统侧功率因数接近 -1。图 15 为再生制动时电力系统侧的瞬时功率因数, 其波动处于 -0.96 到 -1 之间。同相补偿装置可对再生制动工况下的负荷无功功率进行补偿。

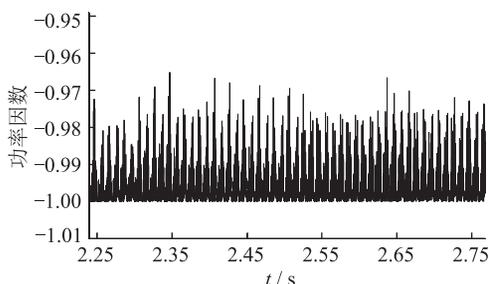


图 15 再生制动时电力系统瞬时功率因数

Fig.15 Power system instantaneous power factor in regenerative braking

负荷由牵引工况变为再生制动工况下电力系统侧的三相电压如图 16 所示。

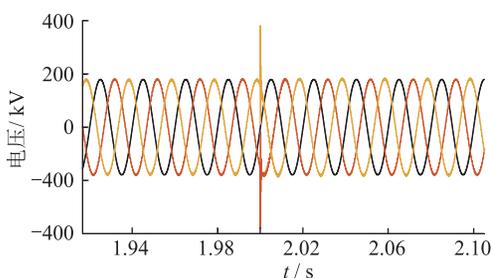


图 16 电力系统三相电压波形

Fig.16 Power system three-phase voltage waveform

分别在牵引工况和再生制动时对电力系统侧三相电压进行 FFT 变换, 得出同相补偿装置在不进行谐波补偿和进行谐波补偿时电力系统侧三相电压谐波畸变率如表 1、表 2 所示。

表 1 电力系统谐波畸变率(不补偿)

Tab.1 Power system harmonic distortion rate

电力系统电压相别	牵引工况谐波畸变率/%	再生制动谐波畸变率/%
A	0.74	0.75
B	0.85	1.02
C	0.83	0.98

表 2 电力系统谐波畸变率(补偿)

Tab.2 Power system harmonic distortion rate

电力系统电压相别	牵引工况谐波畸变率/%	再生制动谐波畸变率/%
A	0.58	0.58
B	0.76	0.83
C	0.73	0.79

由表 1、表 2 可得, 负荷处于牵引工况和再生制动工况时, 其电力系统侧三相电压谐波畸变率均低于 2%, 满足国标要求。并且同相补偿装置补偿谐波的情况下电力系统侧电压谐波畸变率低于不补偿的情况, 证明同相补偿装置在列车再生制动工况下同样能对谐波进行补偿以满足国标要求。

综上, 同相补偿装置可在不调整控制策略的情况下, 向三相电力系统回馈再生制动能量<sup>[15]</sup>。

## 4 结语

同相供电系统可以有效地解决牵引供电系统中的三相不平衡、功率因数低、谐波含量大的电能质量问题。列车在再生制动工况下, 同相补偿装置可在不改变控制策略的情况下对三相不平衡进行满意的补偿, 使得各项指标符合国家标准。

## 参考文献:

- [1] 冯晓云. 电力牵引交流传动及其控制系统[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.  
FENG Xiaoyun. Electric traction AC drive and its control system [M]. Beijing: Higher Education Press, 2009.
- [2] 李群湛. 论新一代牵引供电系统及其关键技术[J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(4): 559-568.  
LI Qunzhan. Onnew generation traction power supply system and its key technologies for electrification railway [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014, 49(4): 559-568.
- [3] 肖 峥, 王 恒, 张巧霞, 等. 地铁供电系统对电网电能质量影响的仿真研究[J]. 陕西电力, 2017, 45(1): 57-62.  
XIAO Zheng, WANG Heng, ZHANG Qiaoxia, et al. Simulation research on influence of metro power supply system on grid power quality [J]. Shaanxi Electric Power, 2017, 45(1): 57-62.
- [4] 解绍锋, 李群湛. 高速列车再生制动对负序影响研究[J]. 铁道学报, 2011, 33(7): 14-18.  
XIE Shaofeng, LI Qunzhan. Study on impact of high-speed train regenerative braking on negative sequence [J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(7): 14-18.
- [5] 刘晓菊, 李群湛, 康 婕, 等. 同相牵引供电系统的补偿原理及再生制动特性[J]. 电网技术, 2010, 34(12): 99-103.  
LIU Xiaoju, LI Qunzhan, KANG Jie, et al. Compensation principle of co-phase traction power supply system and its regenerative braking characteristics [J]. Power System Technology, 2010, 34(12): 99-103.

- [6] 王瀚艺,刘小涵. 抑制再生制动引起的牵引网网压抬升方法研究[J]. 变频器世界, 2017(8): 88-94.  
WANG Hanyi, Liu Xiaohan. Research on the control of network voltage rise for regenerative braking progress[J]. The World of Inverters, 2017(8): 88-94.
- [7] 常文寰. 组合式同相供电系统的容量分析及 MMC 仿真研究[D]. 兰州:兰州交通大学, 2017.  
CHANG Wenhuan. Study on capacity analysis and MMC simulation of combined co-phase power supply system[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2017.
- [8] 张丽艳,李群湛,易东,等. 同相供电系统潮流控制器容量的优化配置[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(8): 59-64.  
ZHANG Liyan, LI Qunzhan, YI Dong, et al. Capacity optimization of power flow controller used in a co-phase traction power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(8): 59-64.
- [9] 李丹丹. 同相贯通牵引供电系统优化设计研究[D]. 成都:西南交通大学, 2017.  
LI Dandan. Study on optimization design of co-phase continuous traction power supply system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [10] 许臣友. 贯通同相供电系统潮流控制策略及其优化[D]. 成都:西南交通大学, 2017.  
XU Chenyou. The continuous co-phase power supply system power flow control strategy and optimizing [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [11] 尚国旭. 新建高速铁路同相供电方案研究[D]. 成都:西南交通大学, 2015.  
SHANG Guoxu. Research on the scheme of co-phase power supply system in newly built high speed railway [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [12] 李群湛,解绍锋,张丽,等. 电气化铁路供电系统及其电能质量控制技术[M].北京:中国电力出版社,2015.  
LI Qunzhan, XIE Shaofeng, ZHANG Li, et al. Electrified railway power supply system and its power quality control technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2015.
- [13] 李欣,杨健维,戎骏,等. 基于实测数据的 CRH380A 型高速动车组特征谐波建模[J]. 铁道学报, 2017, 39(9): 32-39.  
LI Xin, YANG Jianwei, RONG Jun, et al. Characteristic harmonic modeling for CRH380A high-speed EMU based on field data[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(9): 32-39.
- [14] 李欣. CRH380A 型高速动车组谐波特性分析与建模[D]. 成都:西南交通大学, 2016.  
LI Xin. Harmonic characteristic analysis and modeling for CRH380A high speed EMU [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [15] 皮俊波,姜齐荣,魏应冬. 一种基于链式结构 UPQC 的电气化铁路同相供电方案研究[J]. 电力设备, 2008(10): 4-9.  
PI Junbo, JIANG Qirong, WEI Yingdong. Research on a scheme of co-phase power supply system for electrified railways based on cascade structure UPQC [J]. Electrical Equipment, 2008(10): 4-9.

作者简介:



孙镜堤

孙镜堤(1995—),男,硕士研究生,研究方向为电能质量分析与控制,牵引供电系统分析(E-mail:jindysun@hotmail.com);

解绍锋(1976—),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为牵引供电系统分析和电能质量分析与控制等;

张凯(1994—),男,硕士研究生,研究方向为电能质量分析与控制,牵引供电系统分析。

## The Influence of Regenerative Braking on Power Quality of Co-phase Power Supply System

SUN Jingdi, XIE Shaofeng, ZHANG Kai, LI Haiyan, CHEN Minwu

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** The co-phase power supply system can provide the compensation of negative-sequence current, reactive current and harmonic current and solve the problem of electrical separation in the traction network. This paper introduces the working principle of single-phase combined co-phase power supply system and train regenerative braking. By establishing a simulation model, the influence of three-phase unbalance, power factor and harmonics on co-phase power supply system and three-phase power network is analyzed in regenerative braking condition. And the effectiveness of the co-phase power supply system in solving the power quality problems without change the control strategy in regenerative braking is verified.

**Key words:** co-phase power supply system; regenerative braking; power quality; three-phase unbalance; power factor; harmonics

(编辑 方晶)