

## 适于电气化铁路的三相两臂混合有源补偿研究

周末<sup>1</sup>, 王果<sup>1</sup>, 常文寰<sup>1</sup>, 陈苹<sup>2</sup>

(1. 兰州交通大学自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省电力公司白银供电公司, 甘肃 白银 730900)

**摘要:** 为治理电气化铁路中机车负载引起的电能质量问题, 讨论了一种能应用于电气化铁路三相有源补偿的新型拓扑电路。该三相两臂混合有源补偿结构的主电路采用三相两臂并联型混合有源补偿器的拓扑结构, 其开关元件数量与三相桥式相比减少2个, 成本较低。由于逆变器仅有两个开关臂, 为此提出一种适用于三相两臂的无功、负序和谐波检测方法及坐标变换矩阵, 运算量及存储空间大大减少。通过分析其工作原理、控制原理及策略, 建立该三相两臂混合有源补偿器的 Simulink 仿真模型。仿真分析表明, 该三相两臂并联型混合有源补偿器可以有效地抑制电力机车负载对电力系统产生的负序问题, 抑制了无功和谐波对电网影响, 提高了电网电能质量, 并验证了所提出结构和控制方法的正确性。

**关键词:** 电气化铁路; 综合补偿; 电流检测; 三相两桥臂; 仿真分析

### Study on hybrid active compensation based on three-phase two-leg inverter for electrification railway

ZHOU Mo<sup>1</sup>, WANG Guo<sup>1</sup>, CHANG Wenhuan<sup>1</sup>, CHEN Ping<sup>2</sup>

(1. School of Automation & Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;  
2. Baiyin Power Supply Company, Gansu Electric Power Corporation, Baiyin 730900, China)

**Abstract:** A novel topology circuit of three-phase active compensation is discussed to be used to manage negative sequence caused by locomotive load in high-speed electrification railway. The main circuit uses a three-phase two-leg compensator as active elements of shunt hybrid active compensator topology. The switch devices' number of this topology is reduced by two comparing with three-phase full-bridge active inverter, and the cost is lower. A new coordinates alternate method and matrix applied to detecting for reactive power, negative sequence and harmonic is presented due to the two-leg in inverter, calculation and storage are reduced, the computational speed is improved. The simulation model is developed by analyzing working principle, control principle and strategy with Simulink. The simulating results indicate that the shunt hybrid active compensator could restrain the problem of negative sequence generated by locomotive load, reduce the effect of reactive power and negative sequence, and improve electric energy quality. And the correctness of the proposed structure and control method is verified.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51367010).

**Key words:** electrification railway; integrated compensation; current detection algorithm; three-phase two-leg; simulation analysis

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)13-0100-05

## 0 引言

电力机车是一种单相、移动性的非线性负荷,

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(51367010); 甘肃省自然科学基金项目(1212RJZA064); 甘肃省高等学校基本科研业务费专项资金, 兰州交通大学青年科学基金项目(2011042); 甘肃省科技计划项目资助(1304WCGA181)

向电力系统中引入大量负序电流和谐波, 降低电气化铁路牵引供电系统和电力系统的电能质量, 还影响到铁路沿线周边电力用户的供电质量<sup>[1-4]</sup>。因此, 电气化铁道电能质量问题的有效综合治理是一个亟需解决的重大课题和难点问题。

世界各国针对本国电气化铁路的实际情况, 采取了多种治理措施<sup>[5]</sup>。提升电气化铁路供电电压等级(如日本采用 154 kV、220 kV 和 275 kV 三种电压

等级,法国采用 235 kV 电压等级,我国高速电气化铁路牵引变电所采用 220 kV 电压等级供电);三相变单相供电方式(如英国东北电力走廊);采用独立发电系统(如德国);轮流换相技术;采用平衡变压器(我国广泛采用斯科特 Scott 平衡变压器,阻抗匹配平衡变压器和非阻抗匹配平衡变压器,日本广泛采用 Scott 变压器和变形 Wood-bridge 变压器);采用 SVC、SVG 等无功补偿装置(如澳大利亚的昆士兰铁路牵引变电所及日本的 Hagashi-Osaka 变电所及我国南昆线);采用同相供电装置(中国成昆铁路眉山牵引变电所);采用铁路静止功率调节器(如日本新干线 Shinkasen);有源补偿技术等。

但上述治理方法也存在不足。提升电压等级需要很强的电力系统支持,即大容量、高电压等级的一次侧电力系统;轮流换相技术必须使用电分相,存在负序电流波动;采用平衡变压器需两臂负载相同才能有效消除负序;静止无功补偿器体积大、成本高,本身向系统引入谐波,接在高压侧,电压等级高。因此有源补偿装置体积小,响应快,对牵引变电所综合补偿的优点拥有较高的学术研究和性价比,得到了专家学术界的关注<sup>[6-9]</sup>。

有源电力滤波器(Active Power Filter, APF)可以根据负载状况灵活调节补偿容量,能对电气化铁路谐波和负序进行有效抑制,是解决电气化铁路供电系统电能质量的一个有效方法。

传统 APF 采用三相三臂结构,该结构的结构设计及散热设计,需要更大的功率模块体积及开关损耗,成本高。本文研究基于三相两臂主电路的 APF 以实现电气化铁路谐波、无功和负序的补偿<sup>[10-11]</sup>,其中两臂由 IGBT 和续流二极管组成,第三相由直流侧电容组成。功率开关元件数量与传统结构相比减少 2 个,降低成本,实现与传统结构相同的补偿能力。控制环节采用改进的  $i_p-i_q$  方法及滞环控制,最后仿真验证本文所提结构和控制方法的正确性。

## 1 基于三相两臂 APF 的地铁有源补偿结构

图 1 为一种适用于电气化铁路的有源补偿结构。主电路采用三相二臂的逆变器,只需 2 个开关臂和 2 个串联电容器组成,与传统有源补偿的主电路相比,减少了一臂功率开关器件,降低成本,装置的性价比提高,且具有与三相逆变器相同的补偿能力。并联的  $C_p$  作用是补偿无功功率,降低了有源补偿电路的电压和容量,串联的 L 电抗器使输出补偿电流平滑。

图中,  $i_{La}$ 、 $i_{Lb}$ 、 $i_{Lc}$  分别为三相负载电流;  $C_1$  和  $C_2$  为直流侧电容;  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  为逆变器的交流端输

出电流。系统的 C 相连接到 2 个直流电容的中性点 n。主电路采用三相二臂结构的逆变器,所有的功率半导体器件都被视为工作在理想状态,并且假设中性点 n 保持动态电压平衡,电容  $C_1$  和  $C_2$  上的平均电压相等,即  $U_{c1} = U_{c2} = U_{dc}/2$ 。为了避免每个桥臂上的功率开关同时动作,  $S_1$  和  $S_3$ ,  $S_2$  和  $S_4$  彼此互补。

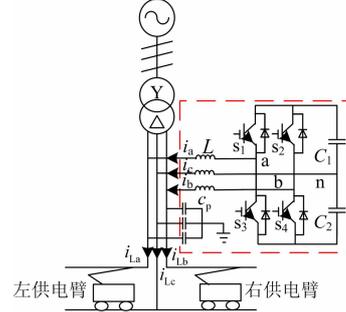


图 1 电气化铁路三相有源补偿新结构

Fig. 1 New structure system of 3-phase active compensate in electrification

## 2 改进的指令电流检测环节

由于电网三相不对称电压的存在,使得正序电压相位和检测电压相位间存在误差,导致常用的  $p-q$  和  $i_p-i_q$  法的检测结果出现误差,因此只有准确检测出电网正序电压的相位值,才能消除误差<sup>[12-14]</sup>。本文采用一种改进的  $i_p-i_q$  方法,使当某相电压的初相角与此相正序电压的初相角间存在相位差时,仍可检测系统提供与此相正序电压同相位的正余弦信号。参考信号的检测框图如 2 所示。

假设电网电压为

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} E_{1n} \sin(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} E_{2n} \sin(n\omega t + \theta_{2n}) \\ \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} E_{1n} \sin(n\omega t - \frac{2\pi}{3}) + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} E_{2n} \sin(n\omega t + \theta_{2n} + \frac{2\pi}{3}) \\ \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} E_{1n} \sin(n\omega t + \frac{2\pi}{3}) + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} E_{2n} \sin(n\omega t + \theta_{2n} - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $1n$  表示正序电压;  $2n$  表示负序电压。建立过渡矩阵为

$$C_{xy} = \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \varphi) & -\cos(\omega t + \varphi) \\ -\cos(\omega t + \varphi) & -\sin(\omega t + \varphi) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $\sin(\omega t + \varphi)$ 、 $\cos(\omega t + \varphi)$  由标准正余弦工频信号发生器产生;  $\varphi$  为任意初相角。



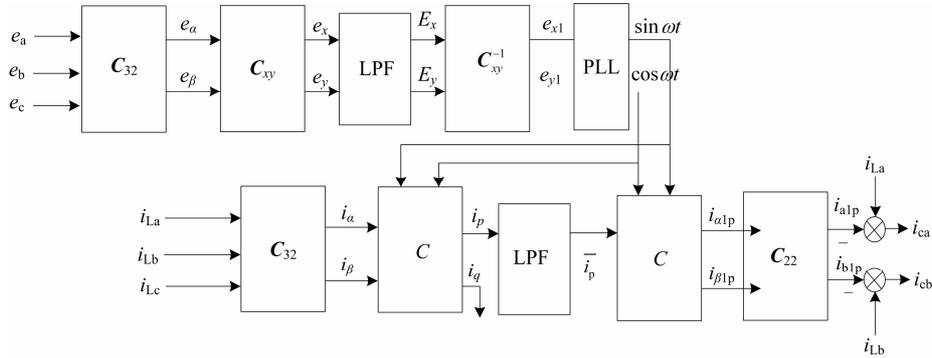


图2 负序、无功和谐波电流综合检测框图

Fig. 2 Block diagram of negative sequence, reactive and harmonic currents detection

$$\begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} = C_{xy} C_{32} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{3}E_{1n} \sum_{n=1}^{\infty} \cos[(n-1)\omega t - \varphi] - \sqrt{3}E_{2n} \sum_{n=1}^{\infty} \cos[(n+1)\omega t + \theta_{2n} - \varphi] \\ -\sqrt{3}E_{1n} \sum_{n=1}^{\infty} \sin[(n-1)\omega t - \varphi] - \sqrt{3}E_{2n} \sum_{n=1}^{\infty} \cos[(n+1)\omega t + \theta_{2n} - \varphi] \end{bmatrix} \quad (3)$$

通过低通滤波器提取直流分量:

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{3}E_{11} \cos(-\varphi) \\ \sqrt{3}E_{11} \sin(-\varphi) \end{bmatrix} \quad (4)$$

反变换得:

$$\begin{bmatrix} e_{x1} \\ e_{y1} \end{bmatrix} = C_{xy} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{3}E_{11} \sin \omega t \\ -\sqrt{3}E_{11} \cos \omega t \end{bmatrix} \quad (5)$$

最后通过锁相得电网正序基波电压的正、余弦信号  $\sin \omega t$  和  $-\cos \omega t$ 。从而进一步检测基波正序有功分量。

由于逆变器仅有两个开关臂, 即仅需两相参考电流信号来驱动开关臂, 而第三相与这两相存在逻辑关系, 即三相参考电流的和为零。故可将  $\alpha$ - $\beta$  坐标系下的参考电流信号变换至  $a$ - $b$ - $c$  坐标系下任意两相的参考电流信号, 即可实现对两个开关臂的控制。即将原先  $\alpha$ - $\beta$  坐标系变换至  $a$ - $b$ - $c$  坐标系的变换

$$\text{矩阵 } C_{23} = \begin{bmatrix} \sqrt{2/3} & 0 \\ -\sqrt{1/6} & \sqrt{1/2} \\ -\sqrt{1/6} & -\sqrt{1/2} \end{bmatrix} \text{ 改为 } C_{22} = \begin{bmatrix} \sqrt{2/3} & 0 \\ -\sqrt{1/6} & \sqrt{1/2} \end{bmatrix}。$$

即将 3 行 2 列矩阵改为 2 行 2 列矩阵, 减少了运算和存储量, 计算速度提升。

根据定义可以算出  $i_p$ 、 $i_q$ , 当断开  $i_q$  的通道时, 可由  $i_p$  计算出负载基波电流的有功分量  $i_{a1p}$ 、 $i_{b1p}$ 、 $i_{c1p}$ 。进一步算出两相指令电流  $i_{ca}$ 、 $i_{cb}$  控制三相补偿电流  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  的产生。只要补偿器能把三相电网电流补偿为检测出的基波电流值, 即达到补偿的目的。

### 3 仿真分析

为了证明提出的三相二臂 APF 的正确性和有效性, 根据图 1 构建 Matlab/Simulink 仿真电路。表 1 给出了仿真系统的详细参数。负载选择典型谐波源单相整流桥, 功率因数为 0.6。0 s 投入单相负载 200 A, 0.2 s 投入两相对称负载 200 A, 0.4 s 投入两相不平衡负载 200 A 和 300 A。电流控制采用跟踪型 PWM 控制, 具体为瞬时值比较方式, 滞环宽度选择  $H=0.5$ 。为了简化仿真模型, 逆变器直流侧电容用直流电源代替。

表 1 系统参数

Table 1 Simulation parameters of compensation system		
元件名称	参数	模块
电源电压	110 kV, 50 Hz	AC Voltage Source
牵引变压器	31.5 MVA, Ynd11, 110/27.5 kV	Three-Phase Transformer
输出电容 $C_p$	1 $\mu$ F	Series RLC Branch
输出电感 $L$	50 mH	Series RLC Branch

图 3 为补偿前后的三相电网电流波形。从图中可看出补偿前三相电流不对称且有畸变。补偿后三相电流基本对称无畸变。

电力机车给电气化铁路造成的谐波污染大多集中于  $4k \pm 1$  ( $k=1, 2, \dots$ ) 次谐波频率处, 补偿前系统负载电流的谐波含量如图 4(a) 所示, 负载电流的总谐波畸变率  $THD=32.68\%$ , 主要含有 3、5、7 次谐波, 图 4(b) 为补偿后电流的谐波含量及畸变率, 经过 APF 注入补偿电流以后, 系统电流的总谐波畸变率降至  $THD=1.88\%$ , 满足国家标准, 电能质量有了很好的改善。

图 5 为补偿前后电源侧三相电流的不平衡度。系统三相电流不平衡度从补偿前的 100%、50%、58% 下降到补偿后 1.5%、0.8%、0.6%, 满足国家电能质量标准, 可使系统安全稳定运行。

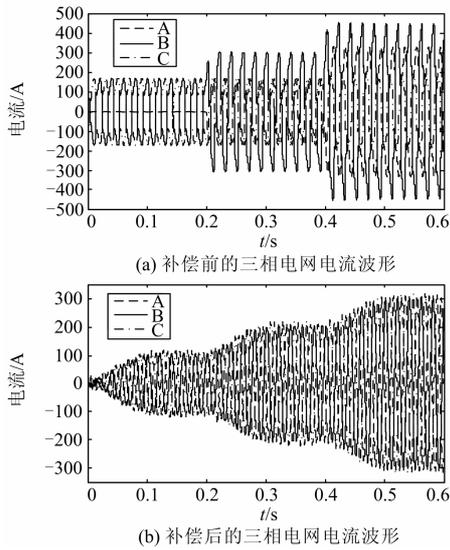


图3 补偿前后的三相电网电流波形

Fig. 3 Current waveforms with and without compensation

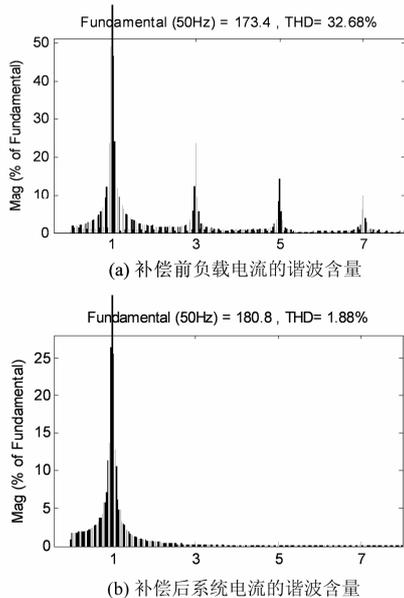


图4 补偿前后负载电流频谱

Fig. 4 Load current spectrum

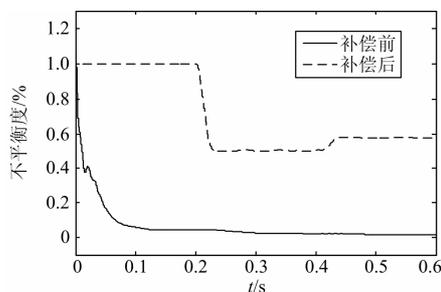


图5 补偿前后系统三相电流的不平衡度

Fig. 5 Unsymmetry of the current with and without compensation

图6为补偿前后系统电源侧的总功率因数,系统的总功率因数分别从0.08、0.87、0.84上升到0.96、0.954、0.959,负序和无功基本消除,即补偿器的投入实现了无功补偿,系统的电能质量大大提高。

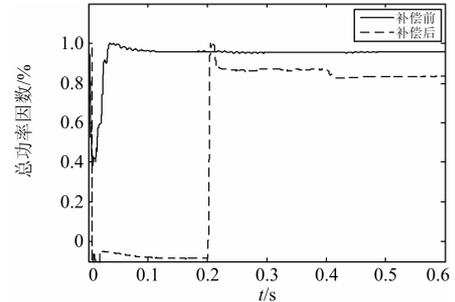


图6 补偿前后系统的总功率因数

Fig. 6 Total power factor of the system with and without compensation

## 4 结论

本文对所研究的新型的适用于电气化铁路三相两臂的混合有源补偿器结构和基本工作原理进行了详细分析,并建立了系统的 Matlab/Simulink 仿真模型。从仿真结果可以看出:

1) 三相两臂 APF 与传统的三桥臂 APF 相比,使用了较少的开关器件,降低了系统成本,电路结构和控制方法都比较简单。

2) 三相两臂 APF 能够大幅度提高系统电能质量。电流补偿完成后,奇次频率谐波大大减少,总谐波畸变率减小,电流不平衡度数值大大优于国家标准,补偿后的功率因数可提高到 0.95 以上。补偿效果可以与传统结构相媲美。

3) 负载变化后经过约 5 个周期电流波形趋于稳定,电流检测及电流跟踪环节需进一步改善以提高稳态性能及动态性能,参数需进一步优化。

## 参考文献

- [1] 刘凡, 杨洪耕, 马文营, 等. 单相并联型有源滤波器在电铁谐波抑制中的研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2002, 14(6): 60-62.  
LIU Fan, YANG Honggeng, MA Wenying, et al. Analysis of single phase shunt active power filter in electrical railway[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2000, 14(6): 60-62.
- [2] 刘育权, 吴国沛, 华煌圣, 等. 高速铁路牵引负荷对电力系统的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(18): 150-154.  
LIU Yuquan, WU Guopei, HUA Huangsheng, et al. Research on the effect on the power system of traction load of high-speed railway[J]. Power System Protection

- and Control, 2011, 39(18): 150-154.
- [3] PENG F Z, AKAGI H, NABAE A. A new approach to harmonic compensation in power systems—a combined system of shunt passive and series active filters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1990, 26(6): 983-990.
- [4] 孟金岭, 肖勇, 王文, 等. 适用于高速电气化铁路的低成本电能质量综合补偿装置[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 73-80.  
MENG Jinling, XIAO Yong, WANG Wen, et al. A low cost power quality compensation scheme for high-speed electric railway[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 73-80.
- [5] 何常红, 吴广宁, 张雪原, 等. 世界高速电气化铁道电能质量现状及治理措施[J]. 电气化铁道, 2008(1): 1-5.  
HE Changhong, WU Guangning, ZHANG Xueyuan, et al. The present situation and treatment measures of international high-speed electric railway power quality[J]. Electric Railway, 2008(1): 11-15.
- [6] 吴传平, 罗安, 孙娟, 等. 一种电气化铁路电能质量综合补偿系统[J]. 电工技术学报, 2011, 26(10): 68-76.  
WU Chuanping, LUO An, SUN Juan, et al. A power quality integrated compensation system for electric railway[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(10): 68-76.
- [7] 周建佳, 胡成, 杨苏飞. 基于 UPQC 的电气化铁路同相供电方案的研究[J]. 电气技术, 2010(1): 14-17.  
ZHOU Jianjia, HU Cheng, YANG Sufei. Research on a scheme of cophase power supply system for electrified railways based on UPQC[J]. Electrical Engineering, 2010 (1): 14-17.
- [8] 吴琼, 姜齐荣, 魏应冬. 新型 STATCOM 装置 UPQC 在电气化铁路中的应用[J]. 科技传播, 2011(10): 165-167.  
WU Qiong, JIANG Qirong, WEI Yingdong. The Application of STATCOM device UPQC in electrified railway[J]. Public Communication of Science & Technology, 2011(10): 165-167.
- [9] LONG Y, XIAO X, XU Y, et al. MMC-UPQC: application of modular multilevel converter on unified power quality conditioner[C] // Power and Energy Society General Meeting (PES), 2013 IEEE: 1-5.
- [10] WU J C, JOU H L, FENG Y T, et al. Novel circuit topology for three-phase active power filter[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1): 444-449.
- [11] 马伏军, 罗安, 涂春鸣. 一种三相二臂的三电平有源电能质量补偿器[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(15): 55-62.  
MA Fujun, LUO An, TU Chunming, et al. A three-level active power quality compensator based on three-phase two-leg converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(15): 55-62.
- [12] 董祥, 李群湛, 黄军, 等. 适用于电气化铁路的无功谐波电流检测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(6): 32-35.  
DONG Xiang, LI Qunzhan, HUANG Jun, et al. Detecting methods of reactive power and harmonic current in electrified railway systems[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(6): 32-35.
- [13] 陈民武, 宫衍圣, 李群湛, 等. 电气化铁路电能质量评估及新型控制方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(16): 141-147.  
CHEN Minwu, GONG Yansheng, LI Qunzhan, et al. Assessment of power quality of electrified railway and the research on the new control scheme[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(16): 141-147.
- [14] 杨玉昆, 刘伟, 赵艳雷, 等. 不平衡非正弦电压下的无功电流检测[J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(7): 30-33.  
YANG Yukun, LIU Wei, ZHAO Yanlei, et al. The detection of current under unbalance and non-sinusoidal voltage[J]. Power System and Clean Energy, 2009, 25(7): 30-33.

收稿日期: 2014-07-31; 修回日期: 2015-10-25

作者简介:

周末(1990-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力电子及电力传动、电能质量补偿; E-mail: helloweekend@sina.com

王果(1977-), 女, 副教授, 研究方向是轨道交通供电、电能质量补偿等; E-mail: wangguo2005@eyou.com

常文寰(1992-), 女, 在读研究生, 研究方向为电力电子及电力传动、电能质量补偿。E-mail: 15293175030@163.com

(编辑 姜新丽)