

电气化铁路功率调节器综合补偿系统的 稳定性与闭环跟踪能力分析

吕文坤, 罗安, 马伏军, 蔡平, 兰征, 张寅, 孙娟, 王刚
(湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南省 长沙市 410082)

Analysis of Stability and Closed-Loop Tracking Ability for Comprehensive Compensation System of Railway Static Power Regulator

LÜ Wenkun, LUO An, MA Fujun, CAI Ping, LAN Zheng, ZHANG Yin, SUN Juan, WANG Gang
(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan Province, China)

ABSTRACT: In allusion to a great deal of negative-sequence and harmonic currents resulted in high-speed railway traction system, a railway static power conditioner (RPC) structure, which can perform large capacity power transfer, negative-sequence compensation and harmonic elimination, is proposed. Firstly, the principle of negative-sequence compensation of RPC system for V/V traction transformer is analyzed and its mathematical model and the schematic diagram of its control are built; then the influences of controller parameter variation on stability and closed-loop tracking ability of RPC system are emphatically analyzed to provide theoretical foundation for the selection of parameters; finally simulation verification of the proposed structure and model is carried out and the correctness of above-mentioned analysis is verified.

KEY WORDS: high-speed electric railway; negative sequence compensation; stability analysis; closed-loop tracking ability; parameters-selecting

摘要: 针对高速化铁路牵引系统产生的大量负序与谐波电流, 提出了一种能够进行大容量功率转移、负序补偿与谐波抑制的电气化铁路功率调节器 (railway static power conditioner, RPC) 结构。首先分析了针对 V/V 牵引变压器的 RPC 系统负序补偿原理, 建立了其数学模型和控制原理图, 重点分析了控制器参数变化对系统稳定性和闭环跟踪能力的影响, 为参数的合理选取提供了理论依据。最后进行了仿真验证, 仿真结果验证了分析的正确性。

关键词: 高速电气化铁路; 负序补偿; 稳定性分析; 闭环跟踪能力; 参数选取

基金项目: “十一五” 国家科技支撑计划重大项目(2009BAG12A09); 国家重点基础研究发展计划项目(973 计划)(2009CB219706)。

Key Project of the National Eleventh-Five Year Research Program of China(2009BAG12A09); The National Basic Research Program of China (973 Program)(2009CB219706)。

0 引言

我国电气化铁路研究起步于 20 世纪 50 年代末, 随着市场经济和电气领域相关行业的发展, 电气化铁路技术得到了长足的发展^[1]。然而电力机车具有非线性、不对称性和波动性等特点, 其产生的三相不平衡负序和高次谐波电流注入电网, 将导致旋转电机转子发热、电力变压器使用寿命缩短、输电线路送电能力降低、继电保护装置误动作、安全自动装置不能正常投切等故障^[2-4]。

文献[5]提出了电气化铁路功率调节器(railway static power conditioner, RPC)的概念, 认为连接在牵引变压器输出两相之间基于自关断开关器件的 RPC, 具有控制牵引变电所两相有功、无功和谐波电流的能力。目前国内外就高压大容量无功补偿装置、有源电力滤波器和静止无功补偿装置对电气化铁路负序、谐波和无功进行综合补偿方案已展开了广泛研究^[6-14]。文献[7]提出了负序优先补偿和功率因数优先补偿的 2 种控制策略, 并提出了充分利用 RPC 功率容量的最优算法。文献[11]提出将静止无功补偿器和混合有源滤波器组成并联混合补偿装置, 前者动态补偿无功电流并抑制负序电流, 后者补偿谐波电流。但目前少有文献研究 RPC 应用于三相 V/V 牵引变压器的牵引供电系统。考虑到电气化铁路的高可靠性要求, 有必要对 RPC 综合补偿系统的稳定性进行分析。

本文将针对京沪电气化铁路 V/V 牵引系统, 分析 RPC 综合补偿系统的控制器参数变化对系统开环稳定性和对指令信号闭环跟踪能力的影响, 为参

数的合理选取提供理论依据，并通过仿真验证理论分析的正确性。

1 RPC 补偿原理分析

RPC 综合补偿系统结构如图 1 所示，三相 220kV 高压经三相 V/V 变压器变成 2 个电压等级为 27.5kV 的单相电压给两供电臂机车供电，正序和负序电流计算式由文献[15]给出。RPC 通过 2 个滤波电感 L_o 和 2 个降压变压器连接于两供电臂，RPC 包括组成背靠背结构的 2 个电压源变流器和 1 个共用的直流电容。两变流器可以控制为电流源，将有功率从一供电臂转移至另一供电臂，实现负序补偿，并且能够进行谐波抑制和无功补偿。

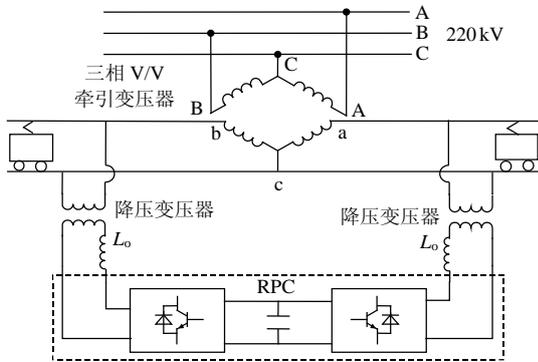


图 1 RPC 综合补偿系统结构

Fig. 1 The comprehensive compensation system topology of RPC

为便于分析，假设牵引变压器变比 $K_B=1$ ，定义图 1 中的右侧供电臂为 α 相，左侧供电臂为 β 相，以 α 相供电臂有机车负载、 β 相供电臂无机车负载为例来分析 RPC 负序补偿能力。

图 2 中 U_A 、 U_B 、 U_C 为牵引变压器一次侧三相电压， U_α 、 U_β 为牵引变压器二次侧两桥臂电压。RPC 补偿前，只有 α 桥臂有有功负载，首先通过综合补偿装置转移一半的有功电流到 β 桥臂，此时两桥臂电流的幅值相等，相角相差 60° ，不平衡度由原来的 100% 变为 50%。在此基础上， α 桥臂补偿一定的容性无功电流 $I'_{C\alpha}$ 使电流超前该桥臂电压 30° ，在 β 桥臂补偿一定的感性无功电流 $I'_{C\beta}$ 使电

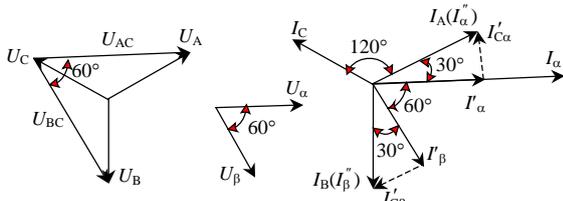


图 2 系统负序补偿矢量原理

Fig. 2 Vector schematic for negative sequence compensation

流滞后该桥臂电压 30° ，如此得到的两桥臂电流 I'_α 、 I'_β 分别与一次侧 A、B 相电流 I_A 、 I_B 重合，相角相差 120° ，并根据文献[15]得一次侧 C 相电流为 I_C ，此时一次侧三相电流完全对称，负序电流为零，达到了负序补偿的目的。在其他负载情况下，通过 RPC 实现功率转移与负序补偿的原理不变。可见 RPC 综合补偿装置具有优异的负序补偿能力。

2 控制策略及系统性能分析

2.1 控制策略

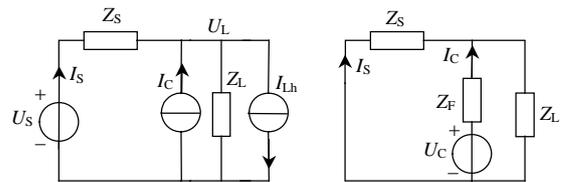
RPC 控制主要包括 2 个方面内容，直流侧电压稳定控制、负序与谐波电流补偿跟踪控制。

考虑到 RPC 两供电臂结构的对称性，建立其单相等效电气模型，如图 3(a)所示。 U_S 、 I_S 分别为 V/V 牵引变压器二次侧电压与电流，供电臂电网阻抗为 Z_S ，机车负载等效为阻抗 Z_L 和谐波电流源 I_{Lh} ，RPC 逆变器输出视为受控电流源 I_C ，由于 Z_L 远大于 Z_S ，RPC 根据指令信号产生的基波和谐波电流基本全部流入电网，达到负序补偿与谐波抑制的目的。

为详细分析 RPC 的运行原理，将 RPC 逆变器具体等效为电压源 U_C ，逆变器输出电抗的等效阻抗为 Z_F ，故有其单独作用时等效模型如 3(b)所示。假设降压变压器变比为 $n:1$ ，逆变输出电源 $U_C=nU_{inv}$ ，其中 U_{inv} 为逆变器实际输出电压，故可得到电源 U_{inv} 与逆变输出电流 I_C 的关系为

$$G_1(s) = \frac{I_C}{U_{inv}} = \frac{n}{Z_F + Z} \approx \frac{n}{Z_F + Z_S} \quad (1)$$

式中： $Z_F=n^2L_oS$ ； $Z_S=R_S+L_Ss$ ； $Z=Z_SZ_L/(Z_S+Z_L)$ 。



(a) 单相等效电路模型

(b) 逆变器等效后的 RPC 模型

图 3 RPC 单桥臂等效电气模型

Fig. 3 RPC single-arm equivalent electrical model

为实现 RPC 实时转移有功功率、负序补偿和抑制谐波等目标，以闭环方式将 RPC 支路控制为一个受控电流源 I_C ，实现对指令信号的实时跟踪，系统的闭环控制框图如图 4 所示。直流侧电压跟踪误差经调节器处理后分别乘以两供电臂的同步信号，得到 RPC 中 α 、 β 相变流器的直流侧电压调节信号，并与谐波和负序补偿电流参考指令叠加，得到 RPC 两变流器的实际电流参考指令信号。图中 $G_m(s)$ 为逆变输出电流到直流侧电压的传递函数。

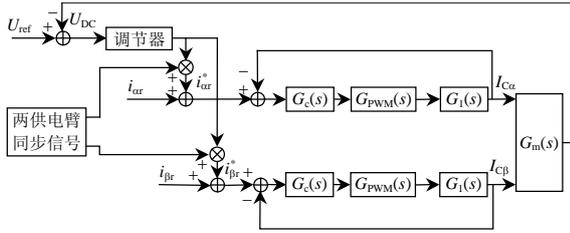


图 4 综合补偿系统闭环控制结构

Fig. 4 Closed-loop control block diagram of comprehensive compensation system

逆变器可视为惯性环节，其传递函数 $G_{PWM}(s)$ 等效为

$$G_{PWM}(s) = K_{PWM} / (Ts + 1) \quad (2)$$

式中： K_{PWM} 为逆变器增益； T 为时间常数。根据仿真测量，取 $K_{PWM}=30$ ， $T=0.01$ ms。

$G_c(s)$ 为控制器的传递函数，当控制器采取比例-积分分(proportional integral, PI)控制算法时，则有

$$G_c(s) = K(1 + 1/T_i s) \quad (3)$$

式中： K 为比例系数； T_i 为积分系数。

可以求得系统单相开环传递函数为

$$G_{open}(s) = G_c(s)G_{PWM}(s)G_1(s) \quad (4)$$

系统单闭环传递函数为

$$G(s) = G_{open}(s) / [1 + G_{open}(s)] \quad (5)$$

考虑到直流侧电压在合适控制时波动很小，可以忽略，因此研究的重点放在 RPC 对指令电流信号闭环控制能力和稳定性分析方面。

2.2 系统稳定性分析

由于结构对称，以 α 相为例讨论控制器参数比例系数 K 、积分系数 T_i 对 RPC 稳定性的影响。

当保持 $T_i=0.005$ ， K 分别为 0.1、1 和 10 时，用 Matlab 分析 $G_{open}(s)$ ，其波特图如图 5 所示。

由图 5 可以看出，保持 $T_i=0.005$ ， $K=0.1$ 、1、

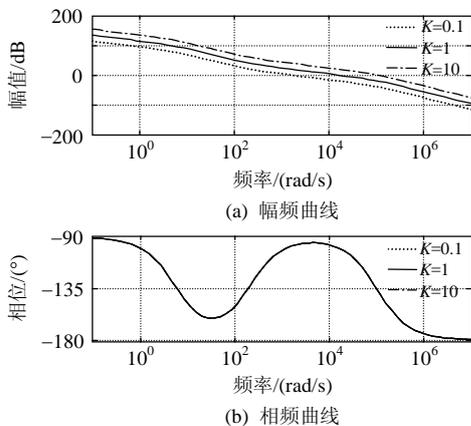


图 5 保持 $T_i=0.005$ ， K 分别为 0.1、1、10 时 RPC 开环波特图

Fig. 5 Open-loop bode chart of RPC when $T_i=0.005$, and K is 0.1,1,10 respectively

10 时幅值稳定裕度分别为 126、106 和 86.3 dB，相角裕度分别为 83° 、 75.5° 和 30.2° ，说明当 T_i 一定、 K 值逐渐增大时，开环系统的幅值稳定裕度逐渐变小，但相角稳定裕度相对减小得更快，系统稳定性能逐渐下降。又从开环波特图可知，当 K 值减小时，幅频曲线的过零交点左移，从而相角稳定裕度会减小，因此 K 值的选取不能过大也不要太小。

保持 $K=2$ ，分析 T_i 分别为 0.1、0.001 和 0.0001 时 RPC 的稳定性，系统开环波特图如图 6 所示。

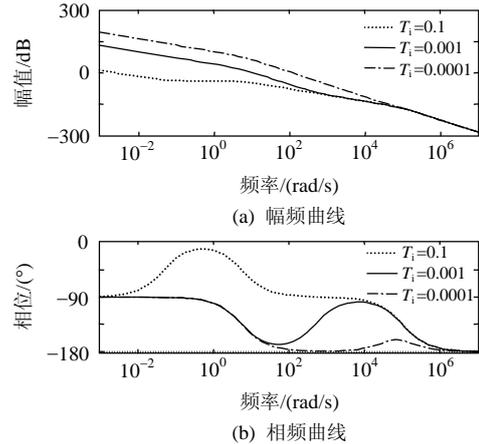


图 6 保持 $K=2$ ， T_i 分别 0.1、0.001、0.0001 时 RPC 开环波特图

Fig. 6 Open-loop bode chart of RPC when $K=2$ ， T_i is 0.1 0.001, 0.0001 respectively

从图 6 可知，保持 $K=2$ ， T_i 分别为 0.1、0.001 和 0.0001 时系统的相角稳定裕度分别为 89° ， 78.4° 和 23° ，幅值稳定裕度分别为 103、99 和 98 dB。因此 T_i 值逐渐减小时，幅值稳定裕度基本不变，相角稳定裕度明显减小，随着 T_i 进一步减小，系统稳定性性能下降，因此 T_i 的取值不能太小。

2.3 闭环跟踪能力分析

理想的补偿系统的性能应使得闭环控制电流输出 I_C 实时无差跟踪参考指令信号 I_C^* ，即要求闭环传函 $G(s)$ 在任意频率点上，相频和幅频特性曲线的值都为零。根据 $G(s)$ 的具体表达式，分析不同控制参数情况下 RPC 的闭环跟踪能力。

当积分系数 $T_i=0.005$ ，取系统稳定范围内不同的比例系数 K 分别为 0.1、1 和 10 时，用 Matlab 分析 $G(s)$ 波特图如图 7 所示。

从图 7 可知， $T_i=0.005$ ， $K=0.1$ 、1、10 时，随着 K 值的增大，幅值无差跟踪频率范围拓宽，但 $K=10$ 时，在高频 10 kHz 附近有谐振放大的现象，系统的稳定性下降。另外，随着 K 值的增大，相角无差跟踪频率范围拓宽，但 K 值过小时，其相频跟踪曲线很差并在主要的补偿频率范围内存在较大补偿误差。

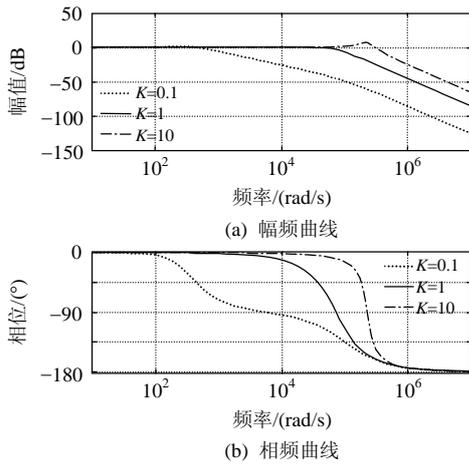


图7 $T_i=0.005$, $K=0.1, 1, 10$ 时 RPC 闭环跟踪特性
Fig. 7 Closed-loop bode chart of system when $T_i=0.005$, K is 0.1, 1, 10 respectively

尤其 $K=0.1$ 时, 基频相角有 30° 左右的补偿误差。同时对于同一 K 值时, 随着频率的升高, 其幅值与相角跟踪差值越来越大, 这将会带来高频补偿误差。

当比例系数 $K=2$, 取稳定范围内不同积分系数 T_i 分别为 0.1、0.001 和 0.0001 时, $G(s)$ 波特图如图 8 如示。 $K=2$, $T_i=0.1, 0.001, 0.0001$ 时, 随着 T_i 值的减小, 幅值和相角无差跟踪频率范围基本不变, 在主要的补偿频率范围内都能无差跟踪, 但 $T_i=0.0001$ 时, 幅频特性曲线在高频 1.8kHz 附近有谐振放大的现象, 系统的稳定性下降。同时对于同一 T_i 值, 随着频率的升高, 其幅值与相角跟踪差值越来越大, 因此会出现高频补偿误差。

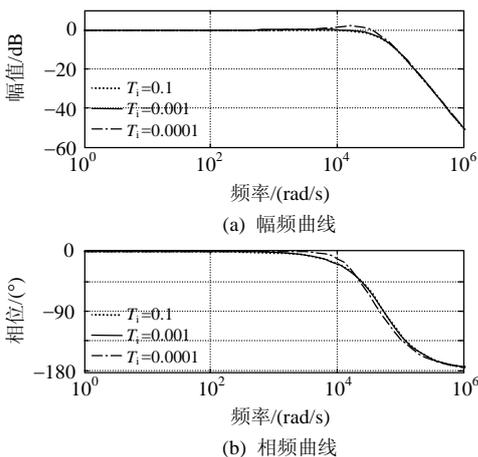


图8 $K=2$, $T_i=0.1, 0.001, 0.0001$ 时 RPC 闭环跟踪特性

Fig. 8 Closed-loop bode chart of system when $K=2$, T_i is 0.1, 0.001, 0.0001 respectively

2.4 参数选取

由开环稳定性分析可知, K 值过大或 T_i 及 K 值过小都能使系统稳定性下降。根据闭环跟踪能力分析可知, 随着 K 值的增大或 T_i 值的减小, 都会在高

频部分引起谐波放大的现象, 这与开环稳定性分析一致, 然而又随着 K 值的减小, 其相频跟踪曲线在主要补偿频率范围内都存在较大的补偿误差, 从而引起该频段内谐波的放大。

在工程上, 一般要求开环幅值稳定裕度 $G_m \geq 20$ dB, 相角稳定裕度 $P_m \geq 45^\circ$, 因此, 从系统的稳定性以及闭环幅值和相角在主要谐波频段内的跟踪能力两方面折中考虑, 本文选择 $K=2$ 、 $T_i=0.005$, 在此参数下, RPC 的幅值和相角稳定裕度分别为 114 dB 和 55.3° , 在主要补偿频段能实现对指令信号完全跟踪。

3 仿真验证

为证明本文提出的检测方法和理论分析的正确性, 进行了仿真验证。RPC 系统仿真参数见表 1。机车负载用电阻和不可控整流负载(谐波源)来等效。

表 1 RPC 参数

Tab. 1 Parameters of RPC

参数名称	数值
三相电压	220 kV
三相 V/V 牵引变压器变比	220:27.5
电网阻抗电阻	$R_s=0.2$
电网阻抗电感	$L_s=2$ mH
输出电抗	$L_s=0.1$ mH
直流侧电容	$C=20\ 000$ μ F
降压变压器变比	$N_1=27.5:1.5$
车载降压变压器变比	$N_2=27.5:1.5$

以只有 α 相供电臂有机车负载 β 相供电臂无机车负载为例, 验证上述分析结果。机车负载功率一般为 4.5 MW 左右, 即用 0.8Ω 的电阻负载和 0.4Ω 的电阻串联 10mH 电感的不可控整流负载来模拟谐波源, 通过并联方式接在车载降压变压器 1.5kV 侧, 负载功率因数近似为 1。利用 RPC 进行负序和谐波综合补偿, 控制策略为上述方法。选取参数为 $K=2$, $T_i=0.005$ 。RPC 在 0.1s 投入, 仿真结果如图 9 所示。

从图 9 可以看到, 在投入 RPC 补偿系统以前, 只有 α 相供电臂有电流, β 相供电臂电流为零, 故高压电网侧只有 A、C 相有电流且互为反相, 在投入 RPC 补偿结构之后, α 相供电臂通过 RPC 转移一定的有功功率到 β 相供电臂, 并根据指令信号在相应供电臂补偿指定量无功与谐波用来补偿负序与谐波电流, 补偿后两供电臂电流 I_{sa} 和 I_{sb} 幅值相等, 相角相差 120° , 原边 I_A 、 I_B 和 I_C 三相电流几乎完全对称, 三相电流不平衡度和 α 相供电臂电流畸变率由原来的 100% 和 14.8% 分别下降为 3.1% 和 2.3%。

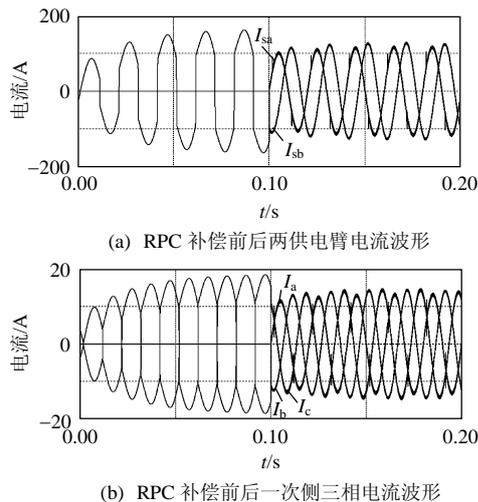


图9 RPC综合补偿前后供电臂电流与三相电流波形
Fig. 9 The power arm current and three-phase current waveforms before and after comprehensive compensation of RPC

4 结论

1)分析了电气化铁路V/V牵引变压器的电气特点,并在此基础之上分析了RPC的负序补偿原理。

2)建立了综合补偿系统的数学模型,重点分析了控制器参数变化对系统稳定性和闭环跟踪能力的影响。首先根据系统的开环稳定性分析可知, K 值过大或者 K 和 T_i 值过小都会使系统稳定性下降。而又根据闭环跟踪能力分析可知,随着 K 值的增大或者随着 T_i 值的减小,都会在高频部分引起谐波放大的现象,然而又随着 K 值的减小,其相频跟踪曲线在主要补偿频率范围内会出现较大的误差从而引起该频段内谐波电流的放大,最后通过综合考虑各方面的影响合适的选择了PI参数。

3)仿真验证了理论分析与控制方法的正确性。

参考文献

- [1] Horstmann D, 王渤洪, 黄济荣. 电气化铁路传动技术100年的发展[J]. 变流技术与电力牵引, 2004(1): 1-6.
Horstmann D, Wang Bohong, Huang Jirong. 100 years of development of traction equipment for electrified railway[J]. Converter Technology & Electric Traction, 2004(1): 1-6 (in Chinese).
- [2] 孟丽萍. 电气化铁路负序影响及对策[J]. 应用能源技术, 2007(8): 38-40.
Meng Liping. The negative sequence influence and counter measure to the electrified railroad[J]. Applied Energy Technology, 2007(8): 38-40(in Chinese).
- [3] 姚金雄, 张涛, 林榕, 等. 牵引供电系统负序电流和谐波对电力系统的影响及其补偿措施[J]. 电网技术, 2008, 32(9): 61-64.
Yao Jinxiong, Zhang Tao, Lin Rong, et al. Impacts of negative sequence current and harmonics in traction power supply system for electrified railway on power system and compensation measures[J]. Power System Technology, 2008, 32(9): 61-64(in Chinese).
- [4] 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: 21-25.

- [5] Mochinaga Y, Hisamizu Y, Takeda M, et al. Static power conditioner using GTO converters for AC electric railway[C]//Power Conversion Conference. Yokohama, 1993: 641-646.
- [6] 蔺宝生. 神朔电气化铁路加装SVC静补装置技术方案的研究[J]. 西北电力技术, 2003, 31(4): 6-8.
Lin Baosheng. Technical scheme research on adding static reactive power compensation device (SVC) on shenshuo electric railway[J]. Northwest China Electric Power, 2003, 31(4): 6-8(in Chinese).
- [7] Wei Yingdong, Jiang Qirong, Zhang Xiujuan. An optimal control strategy for power capacity based on railway power static conditioner [C]//IEEE Asia Pacific Conference. Macao, IEEE, 2008: 236-239.
- [8] 周春晓, 高云峰, 沈斐, 等. 两相型SVG在电铁电能质量治理中的应用研究[J]. 电气化铁道, 2008(1): 6-9.
Zhou Chunxiao, Gao Yunfeng, Shen Fei, et al. Research on application of two-phase SVG for improving power quality of electric railway[J]. Electric Railway, 2008(1): 6-9(in Chinese).
- [9] 陈兵, 陈证明. 浅谈灵活交流输电系统(FACTS)控制技术的发展和现状[J]. 电气传动自动化, 2005, 27(2): 9-13.
Chen Bing, Chen Yanming. Development and present status of control technology of flexible AC transmission systems(FACTS)[J]. Electric Drive Automation, 2005, 27(2): 9-13(in Chinese).
- [10] Morimoto H, Ando M, Mochinaga Y, et al. Development of railway static power conditioner used at substation for shinkansen[C]//Power Conversion Conference. Osaka, 2002: 1108-1111.
- [11] 张定华, 桂卫华, 王卫安, 等. 新型电气化铁道电能质量综合补偿系统的研究及工程应用[J]. 电工技术学报, 2009, 24(3): 189-194.
Zhang Dinghua, Gui Weihua, Wang Weian, et al. Study and application of a new power quality combined compensation system for electrified railway[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(3): 189-194(in Chinese).
- [12] 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, 9(10): 4-9.
Pi Junbo, Jiang Qirong, Wei Yingdong. Research on a scheme of cophase power supply system for electrified railways based on cascade structure UPQC[J]. Electrical Equipment, 2008, 9(10): 4-9(in Chinese).
- [13] 王跃, 杨君, 王兆安, 等. 电气化铁路用混合电力滤波器的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 23-27.
Wang Yue, Yang Jun, Wang Zhaoan, et al. Study on hybrid power filter used in electrified railway system[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 23-27(in Chinese).
- [14] Kneschke T A. Control of utility system unbalance caused by single-phase electric traction[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1985: 1559-1569.
- [15] 高志建. 三相V/V接线牵引变压器负序电流分析[J]. 变流技术与电力牵引, 2008(5): 8-10.
Gao Zhijian. Analysis of negative sequence current of three-phase V/V traction transformer[J]. Converter Technology & Electric Traction, 2008(5): 8-10 (in Chinese).



吕文坤

收稿日期: 2010-10-14.

作者简介:

吕文坤(1987),男,硕士研究生,主要从事电气化铁路电能质量综合补偿技术、有源电力滤波器和无功补偿方面的研究, E-mail: wenkun_lv@163.com;

罗安(1957),男,教授,博士生导师,主要从事先进电能质量控制技术的教学与科研工作;

马伏军(1985),男,博士研究生,主要从事电气化铁路电能质量综合补偿技术、有源电力滤波器和无功补偿方面的研究。

(编辑 张磊)