

同相供电系统的改进型电流检测方法

段胜朋, 李群湛, 杜雪松, 申宁

(西南交通大学 电气工程学院, 四川省 成都市 610031)

Modified Current Detection for Cophase Power Supply System

DUAN Shengpeng, LI Qunzhan, DU Xuesong, SHEN Ning

(College of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan Province, China)

ABSTRACT: A cophase power supply system for electric railway is constituted by the combination of YNvd balance transformer with integrated power flow controller (IPFC). In this paper the simulation of cophase power supply system is performed while the running state of the electric locomotive changes. When the running state of electric locomotive is changed from tractive running state into electric braking state, due to the defects of traditional current detection method utilized in cophase power supply system, the measured capacitor voltage at DC side of IPFC steep rises, however when the modified current detection method based on the definition of power proposed by Fryze is used, this phenomenon can be avoided. In addition, the modified current detection method can be also applied in partial compensation mode. Simulation results show that the modified current detection method is feasible.

KEY WORDS: cophase power supply system; integrated power flow controller (IPFC); capacitor voltage at DC side; traditional current detection; modified current detection

摘要: 基于 YNvd 平衡变压器和综合潮流控制器(integrated power flow controller, IPFC)相结合构成的同相供电系统, 在机车运行状态改变时进行了仿真分析。当同相供电系统采用传统型电流检测方法, 在机车由牵引状态转变为电气制动状态时, 由于传统型电流检测方法的缺陷性, IPFC 直流侧电容电压会急剧上升。而基于 Fryze 功率定义的改进型电流检测方法则可以避免该问题, 另外改进型电流检测方法可应用于部分补偿模式。仿真结果证明了改进型电流检测方法的可行性。

关键词: 同相供电系统; 综合潮流控制器; 直流侧电容电压; 传统型电流检测; 改进型电流检测

0 引言

目前我国电气化铁路采用单相工频交流牵引

供电系统。为了解决现行铁路牵引供电系统中负序、无功、谐波和电分相等问题, 文献[1-3]提出了同相供电系统理论, 并对采用无源补偿装置实现同相供电系统进行了研究; 文献[4-7]对采用有源补偿装置实现同相供电系统进行了研究。对于采用有源补偿装置构成的同相供电系统来说, 负载电流中基波有功电流、基波无功电流和谐波电流的实时检测结果直接影响了其补偿效果; 文献[8-10]给出了基于瞬时无功功率理论的三相电路谐波电流的检测方法, 而在同相供电系统中, 被检测对象是单相电路; 文献[11-13]提出将瞬时无功功率理论推广到单相电路, 由单相构造三相的电流检测方法, 该方法存在一定的构造延时; 文献[14-15]介绍了基于 Fryze 功率定义的有功电流分离法, 该方法采用了滤波器或均值积分器, 所以也存在一定的延时。

将上述传统型电流检测方法应用在同相供电系统中, 由于其存在一定的延时, 会造成机车由牵引状态转变为电气制动状态时, IPFC 两端口输入有功功率大于输出有功功率, 电容电压急剧上升。本文对传统型电流检测方法进行一定的改进, 提出改进型电流检测方法, 即检测出负载电流中的基波有功电流、基波无功电流和 3、5、7 次谐波电流; 然后通过组合相加得到 IPFC 的 α 端和 β 端的指令电流, 保证 IPFC 两端口输入输出有功功率时刻相等, 从而解决电容电压急剧上升的问题。

1 同相供电系统

同相供电系统是指线路上不同变电所供电区段的接触网电压相位相同、线路上无电分相环节的牵引供电方式^[1]。本文研究的基础是直供或 BT 供电方式下, 基于 YNvd 平衡变压器和 IPFC 相结合构成的同相供电系统, 其基本结构如图 1 所示。

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划重大项目(2007BAA12B05)。

Key Project of the National Eleventh-Five Year Research Program of China (2007BAA12B05).

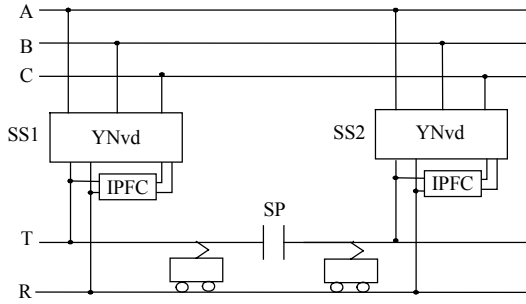


图1 基于YNvd平衡变压器和IPFC相结合构成的同相供电系统的结构
Fig. 1 Structure of cophase power supply system established by combining a YNvd balance transformer with IPFC

其中 SS1 和 SS2 为同相供电系统牵引变电所，SP 为分段断路器，T 和 R 分别是接触网和钢轨。

2 潮流控制器

IPFC 由背靠背 4 象限电压型变流器组成，2 个单相变流器通过直流电容耦合在一起，其结构如图 2 所示。图中： u_α 、 u_β 为 YNvd 变压器次边两端口输出电压； $i_{s\alpha}$ 、 $i_{s\beta}$ 为变压器次边两端口输出电流； $i_{c\alpha}$ 、 $i_{c\beta}$ 为 IPFC 两端口输出的补偿电流； i_L 为负载电流^[5]。

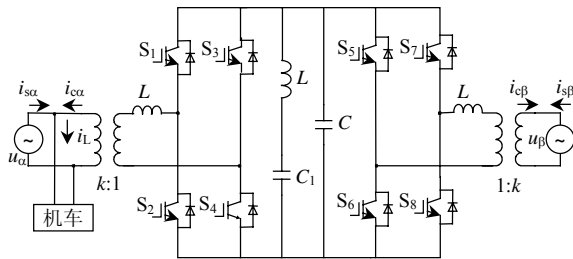


图2 IPFC的结构
Fig. 2 Structure of IPFC

设馈线负载电流为

$$i_L(t) = i_1(t) + i_n(t) = \sqrt{2}I_1 \sin(\omega t + \phi_1) + h(t) = \sqrt{2}I_1 \cos \phi_1 \sin \omega t + \sqrt{2}I_1 \sin \phi_1 \cos \omega t + h(t) = \sqrt{2}I_{1p} \sin \omega t + \sqrt{2}I_{1q} \cos \omega t + \sum_{n=2}^{\infty} \sqrt{2}I_n \sin(n\omega t - \phi_n) \quad (1)$$

式中： I_n 、 ϕ_n 分别是负载电流中 n 次电流的有效值和相位； I_{1p} 为基波有功电流； I_{1q} 为基波无功电流。

IPFC 调节的目标是使 YNvd 变压器次边两端口输出幅值相等，相位相差 90° 的纯有功电流，因此设 YNvd 变压器次边两端口输出电流期望值为

$$\begin{cases} i_{sar}(t) = \sqrt{2}I_{sr} \sin(\omega t) \\ i_{sbr}(t) = \sqrt{2}I_{sr} \sin(\omega t - 90^\circ) \end{cases} \quad (2)$$

式中 I_{sr} 为 YNvd 变压器次边两端口输出电流的有效值。

根据完全平衡变化条件^[4]，IPFC 两端口需要输出的补偿电流的指令电流 i_{car} 、 i_{cbr} 为

$$\begin{bmatrix} i_{car}(t) \\ i_{cbr}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_L(t) \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{sar}(t) \\ i_{sbr}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} I_{1p} \sin \omega t + \sqrt{2} I_{1q} \cos \omega t + h(t) \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} I_{1p} \sin(\omega t - 90^\circ) \end{bmatrix} \quad (3)$$

IPFC 的 α 端需要输出一半的负载有功电流，并补偿负载全部的无功电流和谐波电流； β 端则输入一半的负载有功电流。

3 传统型电流检测方法

在单相电路电流检测方法中，采用均值积分器的有功电流分离法动态性能最好，延时最小，所以本文以此方法代表传统型电流检测方法进行分析。

根据正弦函数的正交特性，通过加法器、乘法器和均值积分器，可以检测出负载电流中任意次数的电流^[14]。

在式(1)两边同乘以 $2\sin \omega t$ ，并在 1 个周期内积分后，取平均有

$$\frac{1}{T} \int_0^T i_L(t) 2\sin \omega t d\omega t = \sqrt{2}I_{1p} = I_{1pm} \quad (4)$$

在式(1)两边同乘以 $2\cos \omega t$ ，并在 1 个周期内积分后，取平均有

$$\frac{1}{T} \int_0^T i_L(t) 2\cos \omega t d\omega t = \sqrt{2}I_{1q} = I_{1qm} \quad (5)$$

同理，在式(1)两边同乘以 $2\sin n\omega t$ ，并在 1 个周期中积分，取平均可以得到 I_{npm} ，式(1)两边同乘以 $2\cos n\omega t$ ，并在 1 个周期中积分，取平均可以得到 I_{nqm} 。

根据完全平衡变换条件，传统型电流检测电路如图 3 所示。

设机车在 $t \leq 0.3$ s 时运行在牵引状态，当 $t = 0.3$ s 机车由牵引状态转变为电气制动状态，此时负载电流反向，通过 IPFC 的补偿，往电力系统输入三相对称电流。

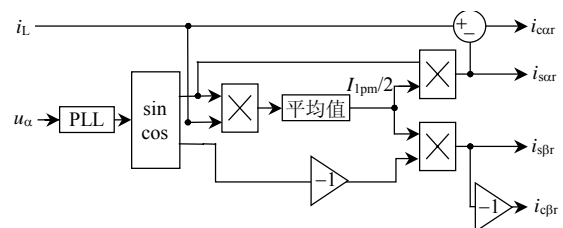


图3 传统型电流检测电路
Fig. 3 Detection circuit of traditional current

采用传统型电流检测方法，利用 Matlab/Simulink 搭建同相供电系统仿真模型，仿真结果如图 4~6 所示。

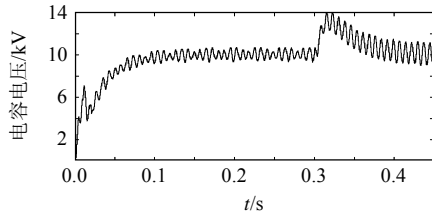


图 4 传统方法下的直流侧电容电压

Fig. 4 Capacitor voltage of DC side under tradition ways

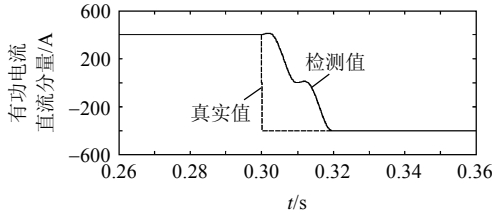


图 5 传统方法下的有功电流直流分量

Fig. 5 DC component of active current under tradition ways

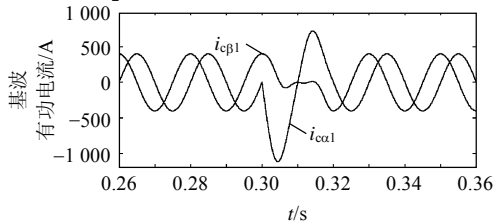


图 6 传统方法下的指令电流 i_{car} 和 i_{cpr} 中基波有功电流

Fig. 6 Fundamental active current in reference current i_{car} and i_{cpr} under tradition ways

在本文所有的仿真结果中，横坐标 t 表示仿真时间。如图 4 所示，在 $0 \text{ s} < t < 0.1 \text{ s}$ 期间，电容电压逐渐建立，在 $0.1 \text{ s} < t < 0.3 \text{ s}$ 期间，系统稳定运行，电容电压在电容参考电压 U_d^* 附近上下波动，在 $0.3 \text{ s} < t < 0.32 \text{ s}$ 期间，电容电压急剧上升，在 $t = 0.32 \text{ s}$ 时电容电压升到最高值，然后慢慢回落。由图 5 可以看出，由于均值积分器的延时性，在 $0.3 \text{ s} < t < 0.32 \text{ s}$ 期间，有功电流直流分量检测值的绝对值小于真实值的绝对值。所以如图 6 所示，指令电流 i_{car} 中的基波有功电流 $i_{\alpha 1}$ 大于一半的负载有功电流， i_{cpr} 中的基波有功电流 $i_{\beta 1}$ 小于一半的负载有功电流，即 α 端输入的有功功率大于一半的负载有功功率， β 端输出的有功功率小于一半的负载有功功率，在 $0.3 \text{ s} < t < 0.32 \text{ s}$ 期间， β 端甚至仍往直流侧输入有功功率，从而导致了电容电压急剧上升。

电容电压急剧上升，可能造成的后果是将元器件击穿，另外电容电压波动会影响 IPFC 的动态补偿效果。当负载电流急剧下降时，同样会出现电容电压急剧上升的情况。反之，当机车由电气制动转变为牵引状态，或负载电流急剧上升时，直流侧电

容电压则会急剧下降。

为了解决该问题，可以采取的措施有：1) 增大电容容量；2) 增大电容参考电压 U_d^* 。但是大容量的电容制造难度较大，增大电容参考电压 U_d^* 会提高器件的额定电压等级，使成本升高；而且这 2 种方法只是能够降低电压波动幅度，不能彻底解决问题。

4 改进型电流检测方法

本文对传统的电流检测方法进行一定的改进，提出改进型电流检测方法，保证指令电流 i_{car} 和 i_{cpr} 中的基波有功电流在任何时刻都相等，从而从根本上解决上述问题。

在同相供电系统中，IPFC 一般只需补偿 3、5 和 7 次谐波电流，其原因主要有：1) 如果高次谐波电流也需要 IPFC 补偿，势必要求开关器件的开断频率较高，使成本增大；2) 我国采用的交-直型电力机车的负载电流中含有的谐波主要是 3、5 和 7 次，更高次数的谐波电流含量很小。所以 IPFC 两端口输出的补偿电流的指令电流 i_{car} 、 i_{cpr} 可以改为

$$\begin{cases} i_{\text{car}}(t) = \frac{1}{2} I_{1\text{pm}} \sin \omega t + I_{1\text{qm}} \cos \omega t + \\ I_{3\text{pm}} \sin 3\omega t + I_{3\text{qm}} \cos 3\omega t + \\ I_{5\text{pm}} \sin 5\omega t + I_{5\text{qm}} \cos 5\omega t + \\ I_{7\text{pm}} \sin 7\omega t + I_{7\text{qm}} \cos 7\omega t \\ i_{\text{cpr}}(t) = -\frac{1}{2} I_{1\text{pm}} \sin(\omega t - 90^\circ) = \frac{1}{2} I_{1\text{pm}} \cos \omega t \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)可以看出， α 端输出一半的负载有功电流，并补偿负载的无功电流和 3、5、7 次谐波电流， β 端输入一半的负载有功电流。该式保证了不管电流检测电路检测出的有功电流直流分量与真实值是否相等，指令电流 i_{car} 和 i_{cpr} 中的基波有功电流都相等。

根据式(6)，改进型电流检测电路如图 7 所示。

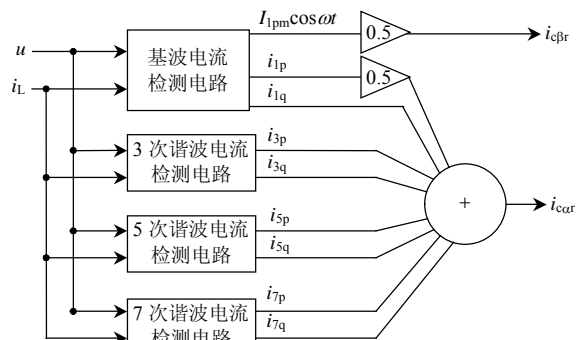


图 7 改进型电流检测电路

Fig. 7 Detection circuit of modified current

在图 8 中，由虚线框包围的电路只在基波电流检测电路中存在，在 3、5、7 次谐波电流检测电路中不存在。

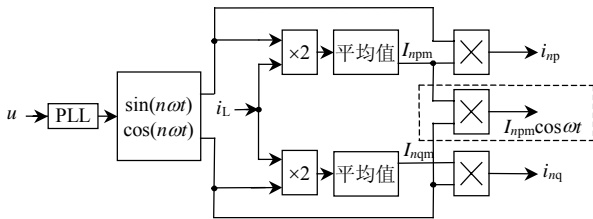


图 8 n 次电流检测电路

Fig. 8 Detection circuit for n-order current

采用改进型电流检测方法建立同相供电模型，仿真结果如图 9~12 所示。

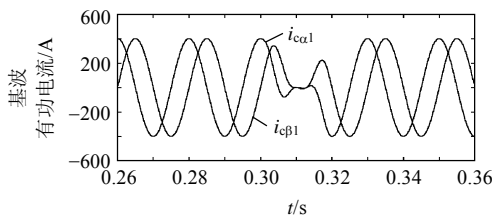


图 9 改进后的指令电流 $i_{c\alpha r}$ 和 $i_{c\beta r}$ 中基波有功电流

Fig. 9 Fundamental active current in reference current $i_{c\alpha r}$ and $i_{c\beta r}$ after modification

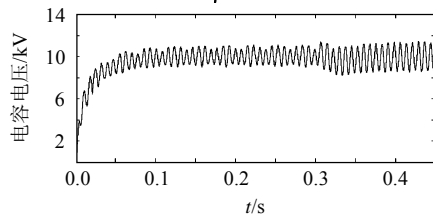


图 10 改进后的直流侧电容电压

Fig. 10 Capacitor voltage at DC side after modification

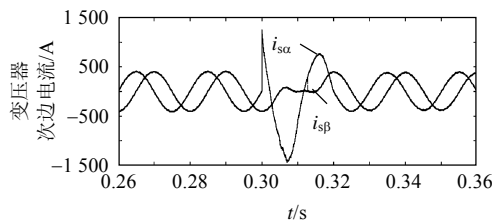


图 11 补偿后变压器次边电流

Fig. 11 Current of transformer secondary side after compensation

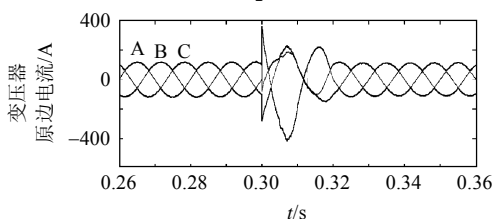


图 12 补偿后变压器原边电流

Fig. 12 Current of transformer primary side after compensation

在 $0.3s < t < 0.32s$ 期间，虽然有功电流直流分量检测值的绝对值小于真实值的绝对值。但是由图 9 可以看出，指令电流 $i_{c\beta r}$ 中的基波有功电流小于一

半的负载有功电流， $i_{c\alpha r}$ 中的基波有功电流同样小于一半的负载有功电流，IPFC 两端口输入输出的有功功率基本相等，从而保证了电容电压在机车由牵引状态转变为电气制动状态时不会急剧上升，如图 10 所示。由图 11 和 12 可以看出，在 IPFC 的补偿下，除在 $0.3s < t < 0.32s$ 期间，其它时间负载的无功电流和谐波电流都得到补偿，变压器原边电流三相基本对称，单相牵引负荷对电力系统来讲为一个纯阻性的三相对称负荷。

另外当同相供电系统采用完全补偿模式时，IPFC 流过的电流非常大、容量要求高、制造难度大。所以应考虑部分补偿模式，即在满足电力系统对负序、无功、谐波要求的前提下，部分补偿负序、无功和谐波，这样可以大大降低 IPFC 的容量。当采用部分补偿模式时，IPFC 两端口需要输出的补偿电流的指令电流 $i_{c\alpha r}$ 、 $i_{c\beta r}$ 为

$$\begin{cases} i_{c\alpha r}(t) = \frac{1}{2}k_{1p}I_{1pm} \sin \omega t + k_{1q}I_{1qm} \cos \omega t + \\ \quad k_3(I_{3pm} \sin 3\omega t + I_{3qm} \cos 3\omega t) + \\ \quad k_5(I_{5pm} \sin 5\omega t + I_{5qm} \cos 5\omega t) + \\ \quad k_7(I_{7pm} \sin 7\omega t + I_{7qm} \cos 7\omega t) \\ i_{c\beta r}(t) = -\frac{1}{2}k_{1p}I_{1pm} \sin(\omega t - 90^\circ) = \frac{1}{2}k_{1p}I_{1pm} \cos \omega t \end{cases} \quad (7)$$

式中系数 k 为补偿度。

此时传统型电流检测方法不再适用，而改进型电流检测方法仍适用，只需在电流检测电路中加上增益器就可以实现。

5 结论

1) 当同相供电系统采用传统型电流检测方法，在机车由牵引状态转变为电气制动状态时，IPFC 的 α 端输入的有功功率大于 β 端输出的有功功率，从而导致 IPFC 直流侧电容电压急剧上升。

2) 改进型电流检测方法保证了 IPFC 两端口输入输出有功功率时刻相等，从而解决了电压急剧上升的问题，另外改进型电流检测方法可应用于部分补偿模式。

参考文献

[1] 李群湛，张进思，贺威俊. 适于重载电力牵引的新型供电系统的研究[J]. 铁道学报，1988，10(4): 23-31.
Li Qunzhan, Zhang Jinsi, He Weijun. Study of a new power supply system for heavy haul electric traction[J]. Journal of the China Railway Society, 1988, 10(4): 23-31(in Chinese).
[2] 李群湛，贺建闻. 电气化铁路的同相供电系统与对称补偿技术[J]. 电力系统自动化，1996，20(4): 9-11.

- Li Qunzhan, He Jianmin. Electrified rail way feeding system without phase exchange and symmetrical compensation technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(4): 9-11(in Chinese).
- [3] 解绍锋, 李群湛, 贺建闽, 等. 同相供电系统对称补偿装置控制策略研究[J]. 铁道学报, 2002, 24(2): 109-113.
Xie Shaofeng, Li Qunzhan, He Jianmin, et al. Control strategy of symmetry compensation system for traction power supply system in phase[J]. Journal of the China Railway Society, 2002, 24(2): 109-113(in Chinese).
- [4] 吴萍. 电气化铁路同相供电技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- [5] 魏光. 同相供电装置控制策略研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
- [6] 魏光, 李群湛, 黄军, 等. 新型同相牵引供电系统方案[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(10): 80-83.
Wei Guang, Li Qunzhan, Huang Jun, et al. A new cophase traction power supply system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(10): 80-83(in Chinese).
- [7] 曾国宏, 郝荣泰. 采用有源滤波器实现平衡变换的供电系统研究[J]. 铁道学报, 2003, 25(1): 48-53.
Zeng Guohong, Hao Rongtai. A novel three-phase balanced traction supply system based on active power filter[J]. Journal of the China Railway Society, 2003, 25(1): 48-53(in Chinese).
- [8] 何英杰, 邹云屏, 黄柱, 等. 基于瞬时无功功率理论的改进谐波检测算法[J]. 电网技术, 2007, 31(6): 79-83.
He Yingjie, Zou Yunping, Huang Zhu, et al. An improved algorithm for harmonic based on instantaneous reactive current detection power theory[J]. Power System Technology, 2007, 31(6): 79-83(in Chinese).
- [9] 戴列峰, 蒋平, 田大强. 无锁相环 d-q 谐波电流检测法的实现[J]. 电网技术, 2003, 27(8): 46-49.
Dai Liefeng, Jiang Ping, Tian Daqiang. Realization of harmonic current detection of d-p transformation without phase lock loop[J]. Power System Technology, 2003, 27(8): 46-49(in Chinese).
- [10] 唐蕾, 陈维荣. 瞬时无功功率理论坐标变换的推导及谐波电流检测原理分析[J]. 电网技术, 2008, 32(5): 66-69.
Tang Lei, Chen Weirong. Deduction of coordinate transform for instantaneous reactive power theory and analysis on the principle of harmonic current detection method[J]. Power System Technology, 2008, 32(5): 66-69(in Chinese).
- [11] 耿云玲, 王群. 单相电路的一种谐波和无功电流实时检测方法[J]. 国防科技大学学报, 2000, 22(4): 111-115.
Geng Yunling, Wang Qun. Real time detection approach of harmonic and reactive currents for single-phase circuit[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2000, 22(4): 111-115(in Chinese).
- [12] 马雪丽, 张爱玲, 崔晓优, 等. 改进的单相电路谐波电流检测方法[J]. 电网技术, 2008, 32(S1): 34-36.
Ma Xueli, Zhang Ailing, Cui Xiaoyou, et al. An improved harmonic current detection method of a single-phase system[J]. Power System Technology, 2008, 32(S1): 34-36(in Chinese).
- [13] 葛玉敏, 李宝英, 邢砾云. 基于瞬时无功功率理论的单相电路谐波电流检测方法的研究[J]. 电网技术, 2006, 30(S1): 225-229.
Ge Yumin, Li Baoying, Xing Liyun. The study on the detecting methods for harmonic current of the single-phase circuit based on the instantaneous reactive power theory[J]. Power System Technology, 2006, 30(S1): 225-229(in Chinese).
- [14] 陆秀令, 张松华, 曹才开, 等. 单相电路谐波及无功电流的新型检测方法[J]. 高电压技术, 2007, 33(3): 163-166.
Lu Xiuling, Zhang Songhua, Cao Caikai, et al. New detecting method for harmonics and reactive currents in single-phase circuits[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(3): 163-166(in Chinese).
- [15] 戴瑜兴, 张义兵, 陈际达. 检测单相电路瞬谐波与无功电流的一种新方法[J]. 电工技术学报, 2004, 19(2): 95-97.
Dai Yuxing, Zhang Yibing, Chen Jida. A novel detection approach to harmonic and reactive currents of a single-phase system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(2): 95-97(in Chinese).

收稿日期: 2009-11-30。

作者简介:

段胜朋(1987), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电能质量与控制, E-mail: xnjddsp@126.com;
李群湛(1957), 男, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为牵引供电理论、电能质量与控制。



段胜朋

(责任编辑 王晔)