

同相供电补偿电流实时检测方法

吕晓琴, 张秀峰

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 平均功率法同相供电补偿电流检测, 需要积分一个周期才能得出检测结果, 存在实时性差的缺点, 且受电网电压畸变影响。提出了两种补偿电流检测方法: 有延时的两相构造和无延时的两相虚拟。通过理论分析和仿真结果证明, 两种方法都能达到对同相供电系统补偿电流的实时检测, 平衡三相, 消除三相谐波及无功电流。后者算法简单, 动态跟踪速度快, 检测精度高。

关键词: 同相供电; 补偿电流; 实时检测; 有源滤波器

中图分类号: TM711 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)02-0053-05

0 引言

基于有源滤波器实现的同相供电系统, 不仅能够达到传统的以 LC 对称补偿网络为基础的同相供电系统所具有的平衡三相的目的, 而且能够动态补偿无功和谐波, 是较理想的供电方案。补偿电流检测的方法, 是同相供电系统的关键技术。文献 [1~3] 中提到的检测方法, 实时性差, 需要积分一个周期才能得出结果。对于目前较成熟的瞬时无功功率理论, 旨在补偿三相系统谐波和无功电流上。如果能将成熟的谐波和无功电流检测技术, 加以改造, 使之应用于同相供电系统中含量较大的负序、谐波和无功电流检测中, 则具有很大意义。本文基于瞬时无功功率理论, 针对同相供电系统中含量较高的负序电流, 和含量较高的谐波和无功电流, 提出了两种检测方法, 即通过 90° 延时构造 相和无延时虚拟相的检测方法, 实现对基于有源滤波器的同相供电系统中负序、谐波和无功电流的检测, 平衡三相, 滤除谐波和无功。经过理论分析和仿真证明, 这两种方法都能够利用传统的谐波和无功电流检测理论来实现对同相供电系统中负序、谐波和无功电流的检测, 且具有实时性好, 检测精度高的特点。

1 同相供电系统平衡变换原理

图 1 是基于 Y, d11 接线变压器平衡变换的原理图。图中, i_a, i_b, i_c 为 110 kV 侧三相电流; i_a, i_b, i_c 为牵引侧三相线电流; i_{pa}, i_{pb}, i_{pc} 为平衡器提供的三相电流; i 为负载电流; R 为钢轨。

由图 1 可得:

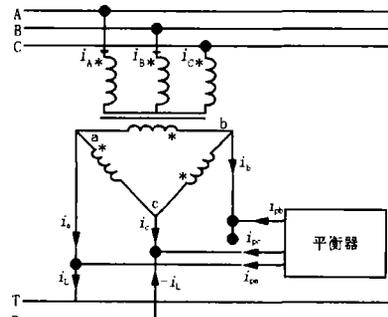


图 1 Y/d11 变压器同相供电平衡原理图

Fig 1 Balance theory of Y/d11 transformer cophase power supply

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i \\ 0 \\ -i \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{pa} \\ i_{pb} \\ i_{pc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$[i_a, i_b, i_c]^T = \frac{e^{-j30^\circ}}{\sqrt{3}K} [i_a, i_b, i_c]^T \quad (2)$$

式 (2) 中: K 为变压器相电压之比, T 表示矩阵转置。

将变压器原边电流表示成各序分量为:

$$\begin{bmatrix} i_{a0} \\ i_{a1} \\ i_{a2} \end{bmatrix} = \frac{e^{-j30^\circ}}{3\sqrt{3}K} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 & -2 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} i - \frac{e^{-j30^\circ}}{\sqrt{3}K} \begin{bmatrix} i_{p0} \\ i_{p1} \\ i_{p2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式 (3) 中: i_{p0}, i_{p1}, i_{p2} 为平衡变换器输出的各序分量。

当三相供电系统平衡时, $i_{a0} = 0, i_{a2} = 0$, 为了降低平衡变换器容量, 负载正序电流应由电源全部提供, 所以有:

$$i_{p0} = 0 \quad (4)$$

$$i_{p1} = 0 \quad (5)$$

$$i_{p2} = \frac{1}{3} (1 -) i = \frac{1}{\sqrt{3}} e^{-j30^\circ} i \quad (6)$$

因此可得:

$$\dot{i}_{pa} = \dot{i}_{pb} = \dot{i}_{pc} = \frac{1}{\sqrt{3}} e^{-j30^\circ} \dot{i} \quad (7)$$

$$\dot{i}_a = \dot{i}_b = \dot{i}_c = \frac{1}{\sqrt{3}} e^{j30^\circ} \dot{i} \quad (8)$$

以上各式中, $\dot{i} = e^{j120^\circ}$ 。

由以上分析可知,当牵引侧电流满足式(8),110 kV侧三相电流平衡,此时平衡变换器输出电流如式(7)所示。

式(8)表达的是:要使110 kV侧三相电流平衡,牵引侧三相电流与负载电流之间的关系。当式(8)中等式右边负载电流 \dot{i}_l 只包含基波有功电流时,110 kV侧电流不仅三相平衡,而且完全补偿了谐波与无功。此时,平衡变换器补偿电流包括基波有功电流引起的负序分量,无功分量和谐波电流。当式(8)等式右边 \dot{i}_l 用负载基波有功电流 \dot{i}_{lp} 表示时,有:

$$\dot{i}_a = \dot{i}_b = \dot{i}_c = \frac{1}{\sqrt{3}} e^{j30^\circ} \dot{i}_{lp} \quad (9)$$

从上面的分析我们可以看出,牵引侧三相电流满足式(8)时,110 kV供电侧三相平衡,有源滤波器仅补偿负序电流;牵引侧三相电流满足式(9)时,110 kV供电侧不仅三相平衡,而且只提供负载基波正序有功电流,此时,有源滤波器需要补偿负载基波有功电流引起的负序分量,无功分量和谐波分量,即:

$$\dot{i}_{px} = \dot{i}_{pax} + \dot{i}_{qx} + \dot{i}_{hx} \quad (10)$$

式(10)中: \dot{i}_{px} 表示平衡器 $x(x=a, b, c)$ 相的输出电流; \dot{i}_{pax} 表示负载引起的 x 相的基波有功电流负序分量; \dot{i}_{qx} , \dot{i}_{hx} 表示负载引起的 x 相的无功分量和谐波分量。

实际情况中,负载电流不仅存在无功而且含有谐波电流。在要求电源只提供基波正序有功电流时,平衡变换器不仅要输出基波负序电流,还要输出无功和谐波分量。因此,同相供电系统三相综合补偿结果应如式(9)所示。

2 基于瞬时无功功率理论的平衡器补偿电流实时检测

基于瞬时无功功率理论的三相电路检测方法是:将待检测的三相信号经过park变换变为互相垂直的、两相静止坐标,然后再进行谐波和无功电流的提取。对于同相供电系统,基于瞬时无功功率理论的平衡器补偿电流实时检测的重点也是构造、

两相相对静止坐标。

设牵引网电压和负载电流为:

$$u_s(t) = \sqrt{2}U \sin t \quad (11)$$

$$\dot{i}_l(t) = \sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n t + \varphi_n) \quad (12)$$

基波有功电流和基波无功电流分别为:

$$\dot{i}_{lp} = \sqrt{2} I_1 \cos \varphi_1 \sin t \quad (13)$$

$$\dot{i}_{lq} = \sqrt{2} I_1 \sin \varphi_1 \cos t \quad (14)$$

方法一:

$$\dot{i} = \dot{i}_l = \sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n t + \varphi_n) \quad (15)$$

$$\dot{i} = \dot{i}_l e^{-j30^\circ} = \sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin[n(t - \varphi_n/2) + \varphi_n] \quad (16)$$

则:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_p \\ \dot{i}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin t & -\cos t \\ \cos t & -\sin t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i} \\ \dot{i} \end{bmatrix} \quad (17)$$

将式(15)、(16)代入式(17)得:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_p \\ \dot{i}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{i}_p \\ \dot{i}_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{i}_{np} \\ \tilde{i}_{nq} \end{bmatrix} \quad (18)$$

其中: \tilde{i}_p 、 \tilde{i}_q 为:

$$\begin{bmatrix} \tilde{i}_p \\ \tilde{i}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2} I_1 \cos \varphi_1 \\ \sqrt{2} I_1 \sin \varphi_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{lp} \\ I_{lq} \end{bmatrix} \quad (19)$$

式(18)等式右边由直流分量和交流分量组成,通过低通滤波器后可得 \dot{i}_p 和 \dot{i}_q 的直流分量 \tilde{i}_p 、 \tilde{i}_q 。由式(13)可知,瞬时基波有功分量可由 \tilde{i}_p 乘以 $\sin t$ 所得。因此根据式(9)可得牵引侧三相电流为:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_a(t) \\ \dot{i}_b(t) \\ \dot{i}_c(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_{lp} \begin{bmatrix} \sin(t + 30^\circ) \\ \sin(t - 90^\circ) \\ \sin(t + 150^\circ) \end{bmatrix} \quad (20)$$

所以,由式(1)可得平衡变换器三相综合补偿电流为:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{pa}(t) \\ \dot{i}_{pb}(t) \\ \dot{i}_{pc}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{i}_l \\ 0 \\ -\dot{i}_l \end{bmatrix} - \frac{1}{\sqrt{3}} I_{lp} \begin{bmatrix} \sin(t + 30^\circ) \\ \sin(t - 90^\circ) \\ \sin(t + 150^\circ) \end{bmatrix} \quad (21)$$

方法二:令 $\dot{i} = \dot{i}_l$, $\dot{i} = 0$,则:

$$\begin{bmatrix} \dot{i} \\ \dot{i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{i} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

将式(22)代入式(17)可得:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_p \\ \dot{i}_q \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \sqrt{2} I_1 \cos \varphi_1 \\ \sqrt{2} I_1 \sin \varphi_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{i}_{np} \\ \tilde{i}_{nq} \end{bmatrix} \quad (23)$$

式(23)等号右边由一直流分量和交流分量组成,通过2倍增益的低通滤波器后,再乘以 $\sin t$ 得到基波有功分量如式(13)所示。

同理,可得到平衡变换器三相综合补偿电流,如式(21)。其中,有:

$$\sin(t - 90^\circ) = -\cos t \quad (24)$$

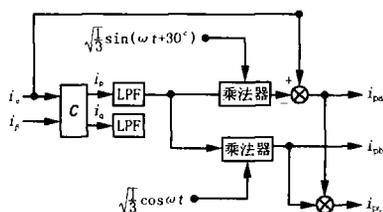


图2 同相供电综合补偿电流实时检测

Fig 2 Detecting method of integrated compensating currents in cophase power supply

同相供电综合补偿电流实时检测电路如图2所示。图中 c 为:

$$c = \begin{bmatrix} \sin t & -\cos t \\ \cos t & -\sin t \end{bmatrix} \quad (25)$$

$\sin t$ 、 $\cos t$ 分别是与电网电压同相位的正弦信号和与之相对应的余弦信号,它们可由锁相环和一个正、余弦信号发生器得到。 $\sin(t + 30^\circ)$ 可由 $\sin t$ 、 $\cos t$ 分别乘以 $\sqrt{3}/2$ 、 $1/2$ 得到,即:

$$\sin(t + 30^\circ) = \sqrt{3}/2 \sin t + 1/2 \cos t$$

3 仿真分析

3.1 稳定负荷仿真分析

在以上分析的基础上,本文基于Matlab/Simulink对上述两种方法分别进行了仿真。在负载电流无突变情况下,两种方法的仿真结果一样,如图3所示。其中图3(a)是负载实际电压与电流波形。为了使仿真符合实际情况和便于比较,假定牵引侧负载电流波形由基波和3、5、7、9、11、13次谐波分量组合而成,且谐波的幅值与次数成反比。负载电流表达式如下:

$$i_s = \sum_{n=1}^7 (20/(2n-1)) \sin((2n-1)t - (2n-1)30^\circ) \quad (26)$$

图3(b)、(c)、(d)、(e)分别为平衡器三端输出综合补偿电流、Y/Δ-11变压器副边线电流和110 kV侧电流、电压(即Y/Δ-11变压器原边线电流、电压)。可见,平衡后的110 kV侧电网电流消除了负序、谐波和无功电流,为三相对称的纯有功电流。

图3(a)中,负载电流 i_L 为明显的单相畸变电流,无功含量较大。经由平衡器输出综合补偿电流(图3(b)),Y/Δ-11变压器原副边线电流被补偿为三相平衡的纯正弦波(图3(c)、图3(d))。通过比较110 kV侧三相电压波形(图3(e))和其三相电流波形(图3(d))相位差,补偿后的110 kV侧电网电流不仅为三相平衡的纯正弦波,而且不含无功分量。

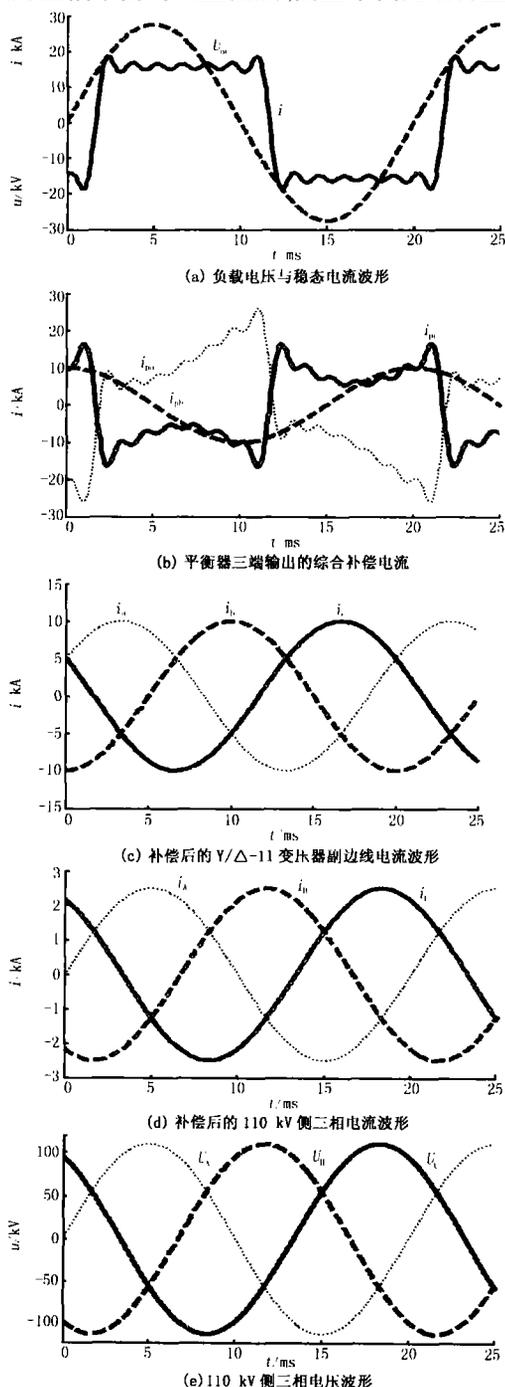


图3 平衡检测结果

Fig 3 Balancing detecting results

3.2 突变负荷仿真分析

当负荷存在突变情况时,两种方法的动态响应过程存在差别。假设负载电流波形为突变的 180 方波,与电源电压相位相差 36°在 22~32 ms 之间,波形幅值由 10 kA 线性增加到 20 kA,之后保持 20 kA 不变。如图 4 所示。

图 5、6、7 分别是两种方法的低通滤波器输出有功电流直流分量、平衡器综合补偿电流和 110 kV 侧三相电流动态仿真波形。由仿真结果分析出,当负荷电流在 22~32 ms 之间跳变时,方法一比方法二延迟 1/4 周期达到稳定。因此方法一存在的 90 延环节,使其动态响应速度不如方法二。方法二经过半个周期的滤波延迟达到稳定,动态响应性能较好。

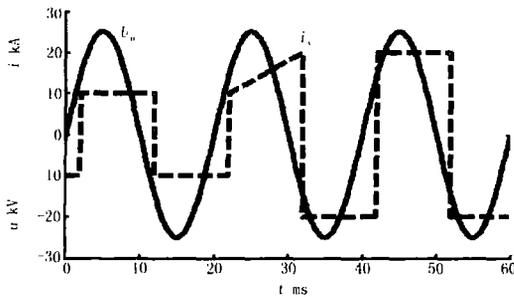


图 4 负载电压与突变电流

Fig 4 Voltage and variable current of the load

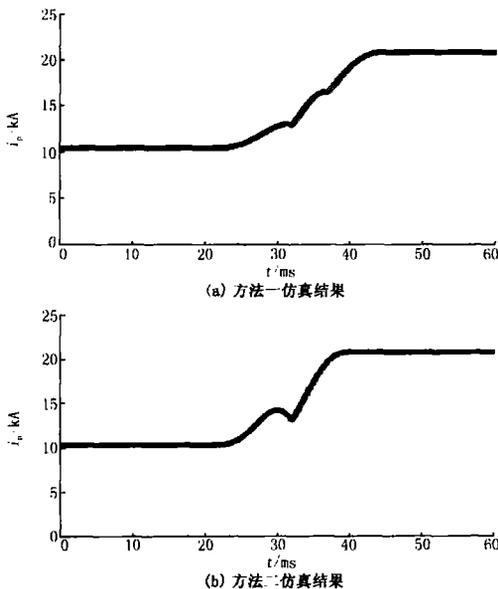
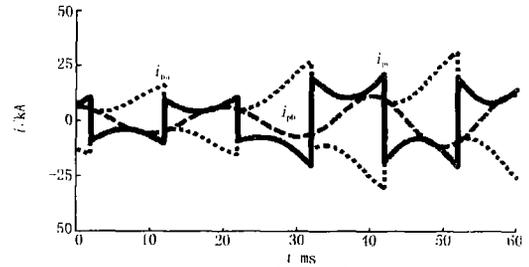


图 5 低通滤波器输出的有功电流直流分量

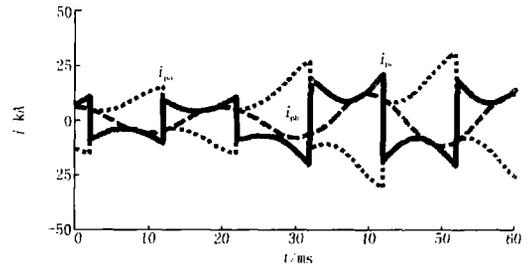
Fig 5 Direct active power current from low power filter

4 结论

本文提出了两种基于瞬时无功功率理论的同相



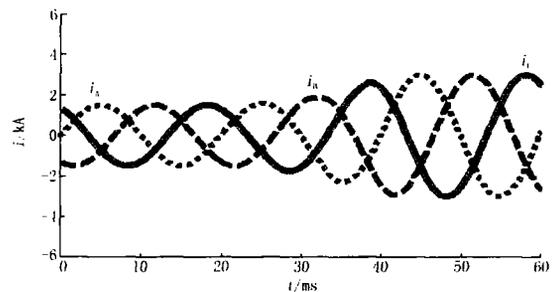
(a) 方法一仿真结果



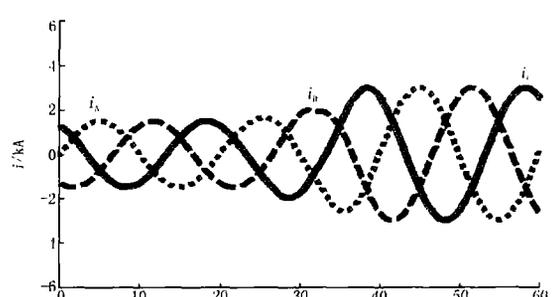
(b) 方法二仿真结果

图 6 平衡器综合补偿电流

Fig 6 Integrated compensated currents from balance instrument



(a) 方法一仿真结果



(b) 方法二仿真结果

图 7 110 kV 侧三相电流波形

Fig 7 Three-phase currents waveforms of 110 kV side

供电补偿电流实时检测方法。该两种检测方法实时性好,尤其是两相虚拟检测法,从其动态响应仿真图可以看出,补偿时只需半个周期就可实现动态跟踪。两种方法检测精度高,均不受电网电压畸变影响,检测电路简单,不需要三相构造环节,实现起来更容易。

参考文献:

- [1] 曾国宏,郝荣泰.采用有源滤波器实现平衡变的供电系统研究[J].铁道学报,2003,25(1):48-53.
ZENG Guo-hong, HAO Rong-tai 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.
- [2] 曾国宏,郝荣泰.基于有源滤波器和斯科特变换器的同相供电系统[J].北方交通大学学报,2003,27(4):84-90.
ZENG Guo-hong, HAO Rong-tai Cophase Traction Supply System Based on Active Power Filter and Scott Transformer[J]. Journal of Northern Jiaotong University, 2003, 27(4): 84-90.
- [3] 曾国宏,郝荣泰.基于有源滤波器和阻抗匹配平衡变压器的同相供电系统[J].铁道学报,2003,25(3):49-54.
ZENG Guo-hong, HAO Rong-tai Cophase Traction Supply System Based on Active Power Filter and Impedance Matching Balance Transformer[J]. Journal of the China Railway Society, 2003, 25(3): 49-54.
- [4] 任永峰,李含寿,贺纲,等.两种单相电路瞬时谐波及无功电流实时检测方法分析[J].电力系统及其自动化学报,2003,15(1):95-98.
REN Yong-feng, LI Han-shou, HE Gang, et al The Analysis of Two Real-time Detecting Approaches of Instantaneous Harmonic and Reactive Current in Single-phase Circuit[J]. Proceedings of the EPSA, 2003, 15(1): 95-98.
- [5] 李群湛,贺建闽.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):10-13.
LI Qun-zhan, HE Jian-min Electrified Railway Feeding System Without Phase Exchange and Symmetrical Compensation Technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(4): 10-13.
- [6] 贺建闽,李群湛.用于同相供电系统的对称补偿技术[J].铁道学报,1998,20(6):47-51.
HE Jian-min, LI Qun-zhan Symmetrical Compensation Technology Used in Feeding System Without Phase Exchange [J]. Journal of the China Railway Society, 1998, 20(6): 47-51.
- [7] 吴命利,李群湛.同相供电对称补偿的接线形式与补偿装置容量选择[J].机车电传动,2000,(5):15-18.
WU Ming-li, LI Qun-zhan Connection Forms and Compensator Capacity Determination of Symmetrical Compensation for Cophase Supply[J]. Electric Drive for Locomotive, 2000, (5): 15-18.
- [8] Rukonuzzaman M, Nakaoka M. Single-phase Shunt Active Power Filter with Knowledge-based Harmonics Detection Algorithm [A]. Proceedings of the Power Conversion Conference PCC. Csaka: 2002. 778-783.
- [9] 王兆安,杨军,刘进军.谐波抑制和无功功率补偿[M].北京:机械工业出版社,2002.
WANG Zhao-an, YANG Jun, LIU Jin-jun Harmonic Control and Reactive Power Compensation[M]. Beijing: China Machine Press, 2002.

收稿日期: 2005-06-07; 修回日期: 2005-08-15

作者简介:

吕晓琴(1980-),女,硕士,研究方向为综合补偿技术及其应用;E-mail: xiaoqin93@163.com

张秀峰(1963-),男,副教授,主要从事于供电技术、继电保护和电力电子技术方面研究工作。

Real time detecting methods on compensating currents in cophase power supply system

L ÜXiao-qin, ZHANG Xiu-feng

(1. College of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Southwest Jiaotong University, Emei 614202, China)

Abstract: It needs to integrate one period to get the results of average power method on detecting compensating currents in cophase power supply system which leads to bad real time detecting and easily be affected by aberrant voltage. Two detecting methods on compensating currents, including two phase with time delay and two virtual phase without time delay, are proposed in this paper. The theoretical analysis and simulation results show that both two methods can realize detecting compensating currents in cophase power supply system, balancing three-phase, filtering harmonics and reactive power currents. The latter method has the characteristics of simple arithmetic, quick dynamic response and high detecting precision.

Key words: cophase power supply; compensating currents; real-time detecting method; active power filter

欢迎投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告