

# 同相牵引供电系统负序、谐波、无功电流实时检测方法 及其补偿策略

魏光

(中铁第一勘察设计院集团有限公司电化处, 陕西 西安 710043)

**摘要:** 同相牵引供电系统旨在实现电能质量的综合补偿。提出了一种基于同步坐标变换的电流检测方法, 能实时准确地检测出负载电流的基波正序有功分量、基波正序无功分量、基波负序分量以及谐波分量, 为综合补偿提供了基础。电能质量的补偿力度与设备容量之间存在非线性关系。提出补偿度的概念, 并给出补偿度与电能质量参数的关系, 通过给定电能质量期望参数, 实时调整负序、谐波以及无功补偿度, 使得综合潮流控制器容量在各电能质量补偿参数之间得到实时优化配置, 从而实现同相供电系统容量优化满意补偿。理论推导和仿真结果验证了所提方法的正确性和可行性。

**关键词:** 电流检测; 补偿策略; 同相牵引供电系统; 综合潮流控制器; 同步坐标变换; 容量优化

## Real-time detection of negative, harmonic and reactive power currents in cophase traction power supply system and its compensation strategy

WEI Guang

(Electric Railway Design Department, China Railway First Survey and Design Institute Group Ltd, Xi'an 710043, China)

**Abstract:** The cophase traction power supply system aims at achieving power quality comprehensive compensation. A current detection method based on synchronous reference frame transformation is proposed. The method can decompose the load current real-timely into fundamental positive-sequence active component, fundamental positive-sequence reactive component, fundamental negative-sequence component and harmonic component, which lays a foundation for comprehensive compensation. There are nonlinear relation between compensation strength of power quality and device capacity. The paper proposes the concept of compensation degree and gives the relationship between compensation degree and power quality parameters. By giving expected power quality parameters, it adjusts compensation ratios of negative, reactive and harmonics instantaneously, so that the IPFC capacity can be allocated between power quality compensating parameters optimally and real-timely, thus achieving capacity optimal satisfactory compensation. The theoretical analysis and simulation verify the correctness and feasibility.

**Key words:** current detection; compensation strategy; cophase traction power supply system; integrated power flow controller; synchronous reference frame transformation; capacity optimization

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)20-0051-06

## 0 引言

我国电气化铁路牵引供电系统的结构形式以及机车负载的特殊性, 导致在电力系统侧产生大量的负序、谐波和无功。尤其是相邻供电区段分相绝缘器的存在, 造成了列车速度和牵引力无谓的损失。为实现铁路部门与电力部门的双赢, 将YN, vd平衡变压器与综合潮流控制器 (Integrated Power Flow

Controller, IPFC) 有机结合, 提出了新型同相牵引供电系统<sup>[1]</sup>方案, 彻底解决了电能质量综合补偿问题, 并实现无分相贯通供电。

同相供电的关键技术在于将负载电流进行彻底的分解, 从而实现满意补偿, 即在满足电能质量国标的前提下, 尽可能少地投入设备容量, 节约成本。传统的方法<sup>[2-6]</sup>均只能对电流进行某个层面的分解, 并且检测结果的实时性和准确性具有一定的缺陷。本文构造了负载电流在三相电力系统侧的映射模型, 提出了一种基于同步坐标变换的电流检测方法。

基金项目: “十一五” 国家科技支撑计划 (2007BAA12B05)

该方法在三相电压不对称且含畸变时, 无须对三相电压进行锁相和滤波, 避免了由此带来的检测误差。文献[7-9]均在完全补偿的范畴内给出了同相供电系统的控制策略, 本文通过建立补偿度与电能质量参数的关系, 实现了IPFC容量优化满意补偿, 极大地提高了技术经济性。

## 1 同相牵引供电系统补偿原理

新型同相牵引供电系统在现有的牵引供电系统中, 引入了YN, vd平衡变压器和综合潮流控制器IPFC, 使得不同变电所供电区段接触网电压相位相同, 并且在线路中取消了分相绝缘器, 如图1所示。

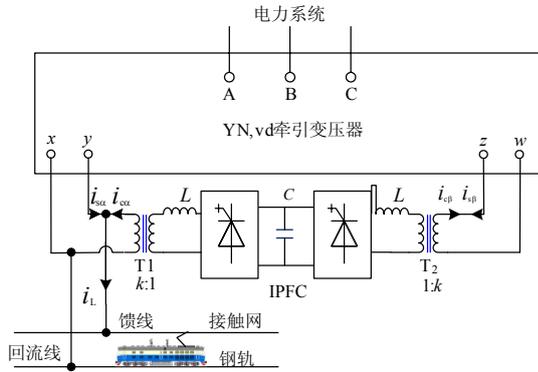


图1 同相牵引供电系统

Fig.1 Cophase traction power supply system

IPFC由背靠背四象限电压型变流器组成, 如图1所示, 利用直流侧电容作为能量交换环节, 在两端口间实现有功功率的传递, 同时补偿无功, 滤除主要谐波, 使得牵引端口电压、电流两相满意对称。再通过YN, vd平衡变压器的两相/三相平衡变换使得电力系统侧电压、电流三相满意对称。

设电力系统三相电压对称, 并取 $\dot{U}_A$ 为参考向量, 得

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_A & \dot{U}_B & \dot{U}_C \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 1 & a^2 & a \end{bmatrix}^T \dot{U}_A \quad (1)$$

其中:  $a = e^{j120^\circ}$ 。

定义牵引端口 $\alpha$ 相电压与一次侧线电压之比为变比, 即 $K = \frac{U_\alpha}{\sqrt{3}U_A}$ 。 $\dot{U}_\alpha$ 滞后 $\dot{U}_A$ 的相角 $\psi_L$ 为接线角, 即

$$\dot{U}_\alpha = U_\alpha e^{-j\psi_L} = \sqrt{3}U_A K e^{-j\psi_L} \quad (2)$$

端口电流 $\dot{I}_\alpha$  (即馈线负载电流 $\dot{I}_L$ ) 滞后端口电压 $\dot{U}_\alpha$ 的功率因数角为 $\varphi_L$ , 即

$$\dot{I}_L = I_L e^{-j(\psi_L + \varphi_L)} = \dot{I}_\alpha \quad (3)$$

为简化分析, 设IPFC两个端口电压为

$$\begin{cases} u_\alpha(t) = \sqrt{2}U_1 \sin(\omega t - \psi_L) \\ u_\beta(t) = \sqrt{2}U_1 \sin(\omega t - \psi_L - 90^\circ) \end{cases} \quad (4)$$

馈线负载电流为

$$i_L(t) = \sqrt{2}I_1 \sin(\omega t - \varphi_1 - \psi_L) + i_h(t) \quad (5)$$

其中:  $i_h(t) = \sum_{n=2}^{+\infty} \sqrt{2}I_n \sin(n\omega t - \varphi_n - \psi_L)$  为负载电流中谐波成分。

则负载的瞬时功率为

$$p_L(t) = u_\alpha(t)i_L(t) = U_1 I_{1p} [1 - \cos 2(\omega t - \psi_L)] - U_1 I_{1q} \sin 2(\omega t - \psi_L) + u_\alpha(t)i_h(t) \quad (6)$$

其中,  $I_{1p} = I_1 \cos \varphi_1$ ;  $I_{1q} = I_1 \sin \varphi_1$ 。

欲使IPFC输出幅值相等且与各自电压同相位的纯有功电流。设端口电流期望值为

$$\begin{cases} i_{s\alpha r}(t) = \sqrt{2}I_{sr} \sin(\omega t - \psi_L) \\ i_{s\beta r}(t) = \sqrt{2}I_{sr} \sin(\omega t - \psi_L - 90^\circ) \end{cases} \quad (7)$$

则电源需输出的瞬时功率为

$$p_s(t) = u_\alpha(t)i_{s\alpha r}(t) + u_\beta(t)i_{s\beta r}(t) = 2U_1 I_{sr} \quad (8)$$

在一个电源周期T内, 电源提供的能量应等于负载消耗的能量, 即

$$\int_0^T p_s(t) dt = \int_0^T p_L(t) dt \quad (9)$$

由式(6)和式(8)可得

$$I_{sr} = \frac{1}{2U_1} \frac{1}{T} \int_0^T u_\alpha(t)i_L(t) dt = \frac{I_{1p}}{2} \quad (10)$$

由此可得补偿原理为: IPFC的 $\alpha$ 端口需要输出一半的负载有功电流, 并需补偿负载的无功电流和谐波电流;  $\beta$ 端口则需要输入与负载另一半有功功率相对应的电流, 即

$$\begin{bmatrix} i_{s\alpha r} \\ i_{s\beta r} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} I_p \begin{bmatrix} \sin(\omega t - \psi_L) \\ -\cos(\omega t - \psi_L) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha r} \\ i_{c\beta r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_L(t) \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{s\alpha r} \\ i_{s\beta r} \end{bmatrix} \quad (12)$$

## 2 同步坐标变换电流检测方法

为了提取负载电流中的序分量, 需要将其映射到三相电力系统侧。单相负荷接入电力系统时, 不会引起零序电流<sup>[10]</sup>, 所以

$$i_A + i_B + i_C = 0 \quad (13)$$

由功率守恒原理可知

$$\dot{U}_A^* \cdot \dot{I}_A + \dot{U}_B^* \cdot \dot{I}_B + \dot{U}_C^* \cdot \dot{I}_C = \dot{U}_\alpha^* \cdot \dot{I}_L \quad (14)$$

联立式(13)、(14), 得

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \sqrt{3}K \cos \psi_L \\ \sqrt{3}K \sin \psi_L \end{bmatrix} i_L \quad (15)$$

式(15)两边左乘以变换阵  $\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -j \\ 0 & 1 & j \end{bmatrix}$  并进行

变换,可得负载电流在三相电力系统侧的映射电流,即

$$\begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} = \frac{K}{\sqrt{3}} i_L \begin{bmatrix} \sqrt{3} \\ 0 \\ -\sqrt{3} \end{bmatrix} \quad (16)$$

abc坐标系的三相电流可通过同步坐标变换<sup>[2]</sup>变换到dq0坐标系,如式(17)所示

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin \omega t & \sin(\omega t - 120^\circ) & \sin(\omega t + 120^\circ) \\ \cos \omega t & \cos(\omega t - 120^\circ) & \cos(\omega t + 120^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$T_1 [I_A \ I_B \ I_C]^T$$

由对称分量法,可将三相电流分解为序分量,并分别运用变换式(17),可得

$$\begin{bmatrix} I_{dn}^{(+)} \\ I_{qn}^{(+)} \end{bmatrix} = I_n^{(+)} \begin{bmatrix} \cos((n-1)\omega t + \phi_n^{(+)}) \\ \sin((n-1)\omega t + \phi_n^{(+)}) \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\begin{bmatrix} I_{dn}^{(-)} \\ I_{qn}^{(-)} \end{bmatrix} = I_n^{(-)} \begin{bmatrix} \cos((n+1)\omega t + \phi_n^{(-)}) \\ -\sin((n+1)\omega t + \phi_n^{(-)}) \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中:  $I_{dn}^{(+)}$ 、 $I_{qn}^{(+)}$ 、 $I_{dn}^{(-)}$ 、 $I_{qn}^{(-)}$  分别为dq0空间第n次谐波( $n=1$ 即表示基波)正序电流和负序电流相应分量。

由式(18)、(19)可知,只有基波正序分量在dq0坐标下呈现为直流量,而其他各分量均为交流量,通过均值积分器即可将其提取出来。因此,在abc坐标系下的基波正序有功电流  $i_{1p}$  和无功电流  $i_{1q}$  为

$$\begin{bmatrix} i_{A1p}^{(+)} \\ i_{B1p}^{(+)} \\ i_{C1p}^{(+)} \end{bmatrix} = I_{1p} \begin{bmatrix} \sin \omega t \\ \sin(\omega t - 120^\circ) \\ \sin(\omega t + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\begin{bmatrix} i_{A1q}^{(+)} \\ i_{B1q}^{(+)} \\ i_{C1q}^{(+)} \end{bmatrix} = I_{1q} \begin{bmatrix} \cos \omega t \\ \cos(\omega t - 120^\circ) \\ \cos(\omega t + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (21)$$

类似地,负序abc-dq0变换矩阵为

$$T_2 = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin \omega t & \sin(\omega t + 120^\circ) & \sin(\omega t - 120^\circ) \\ \cos \omega t & \cos(\omega t + 120^\circ) & \cos(\omega t - 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (22)$$

在abc坐标系下的基波负序电流为

$$\begin{bmatrix} i_{A1}^{(-)} \\ i_{B1}^{(-)} \\ i_{C1}^{(-)} \end{bmatrix} = I_{1p} \begin{bmatrix} \sin \omega t \\ \sin(\omega t + 120^\circ) \\ \sin(\omega t - 120^\circ) \end{bmatrix} + I_{1q} \begin{bmatrix} \cos \omega t \\ \cos(\omega t + 120^\circ) \\ \cos(\omega t - 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (23)$$

### 3 补偿度计算

IPFC在分配有功电流的同时,还需要补偿无功及谐波电流,其容量投入由对负序、谐波以及无功的补偿力度所决定。由此定义负序、无功、谐波补偿度分别为  $K_N, K_C, K_h \in [0, 1]$ , 通过对其设置可以实现对IPFC补偿力度的实时调整,使得电力系统侧电能质量满足国家标准<sup>[11-13]</sup>, 同时设备容量在各电能质量参数补偿中得到优化配置。经过计算,可得电能质量参数与补偿度的关系为

$$\varepsilon_1 = \frac{1 - K_N}{\sqrt{\cos^2 \varphi_1 + \sin^2 \varphi_1 (1 - K_C)^2}} \quad (24)$$

$$\begin{cases} THD_{iA} = \frac{\sqrt{3}(1 - K_h) THD_{iL}}{\sqrt{A^2 + B^2}} \\ THD_{iB} = 0 \\ THD_{iC} = \frac{\sqrt{3}(1 - K_h) THD_{iL}}{\sqrt{E^2 + F^2}} \end{cases} \quad (25)$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (26)$$

其中:

$$\begin{cases} A = -(1 - K_N) \sin(\varphi_1 + 60^\circ) + (1 - K_C) \sin \varphi_1 \\ B = \cos \varphi_1 + (1 - K_N) \cos(\varphi_1 + 60^\circ) \\ C = -\frac{\sqrt{3}}{2} \cos \varphi_1 + \frac{1}{2} (1 - K_C) \sin \varphi_1 + (1 - K_N) \sin(\varphi_1 + 120^\circ) \\ D = -\frac{1}{2} \cos \varphi_1 - \frac{\sqrt{3}}{2} (1 - K_C) \sin \varphi_1 + (1 - K_N) \sin(\varphi_1 + 30^\circ) \\ E = \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \varphi_1 + \frac{1}{2} (1 - K_C) \sin \varphi_1 + (1 - K_N) \sin \varphi_1 \\ F = -\frac{1}{2} \cos \varphi_1 + \frac{\sqrt{3}}{2} (1 - K_C) \sin \varphi_1 + (1 - K_N) \sin(\varphi_1 + 270^\circ) \\ P = P_A + P_B + P_C = \frac{1}{2} (2B - \sqrt{3}C - D + \sqrt{3}E - F) \\ Q = Q_A + Q_B + Q_C = \frac{1}{2} (-2A + C - \sqrt{3}D + E + \sqrt{3}F) \end{cases}$$

针对上述模型制定补偿度与电能质量参数对照表。当给定电能质量预期参数时,即可通过查表快速得出相应的补偿度,实现满意优化补偿。

### 4 电流检测方法及其补偿策略

综上所述，可得基于同步坐标变换的电流检测

方法及补偿策略如图 2 所示。

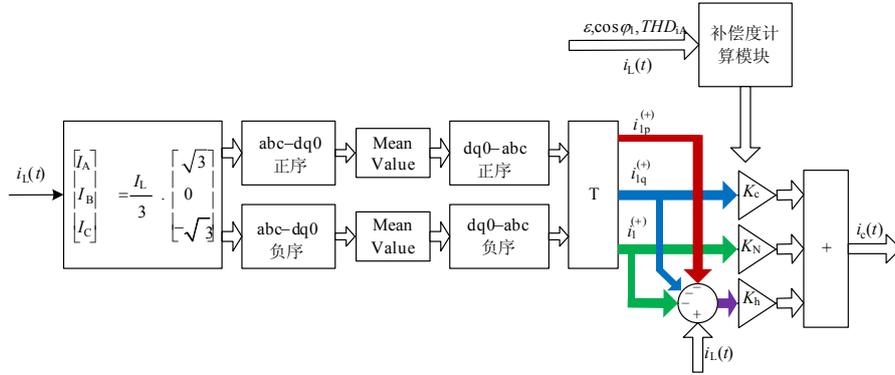


图 2 电流检测方法及其补偿策略框图

Fig.2 Scheme of current detection method and compensation strategy

首先将采集到的负载电流映射到三相电力系统侧，分别进行正、负序 abc-dq0 变换，用均值积分器取代低通滤波器，从中滤取基波正、负序分量，再通过正、负序 dq0-abc 变换得到三相电力系统侧电流各分量，最后经过三相/两相平衡变换矩阵即可得到牵引变压器副边各电流分量。文献[14]已推导了三相/两相平衡接线牵引变压器的变换阵，将接线角  $\psi_L = 30^\circ$  代入得

$$T_{32} = \frac{1}{\sqrt{3}K} \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & 1 & -\frac{1}{2} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}K} T \quad (27)$$

补偿度计算模块将预期电能质量参数转换为补偿度值，从而产生补偿电流指令信号，即

$$i_c(t) = K_N i_1^{(-)} + K_C i_{1q}^{(+)} + K_h i_h \quad (28)$$

补偿电流指令信号得到后，即可通过PWM控制变流器产生相应的输出电压控制IPFC实现其综合补偿功能。

### 5 仿真实证

本文对图2所示电流检测方法及其补偿策略，建立了基于Matlab/Simulink的仿真模型。负载采用同时含有无功（功率因数为滞后0.8）、21%三次谐波、15%五次谐波的非线性电流

$$i_L = 1000 \sin(\omega t - 36.8^\circ) + 210 \sin(3\omega t - 60^\circ) + 150 \sin(5\omega t + 150^\circ)$$

补偿前（即未投入IPFC）牵引变压器原副边电流波形如图3所示。可以看出，机车负载在电力系统侧产生了大量的负序、谐波及无功。

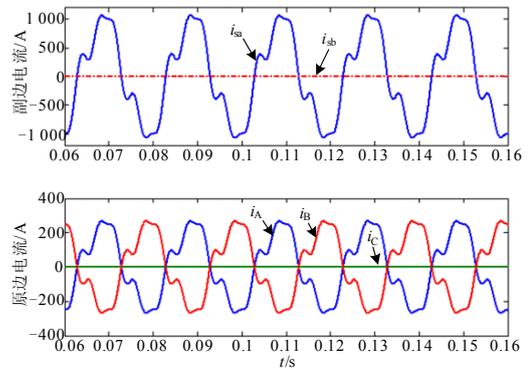
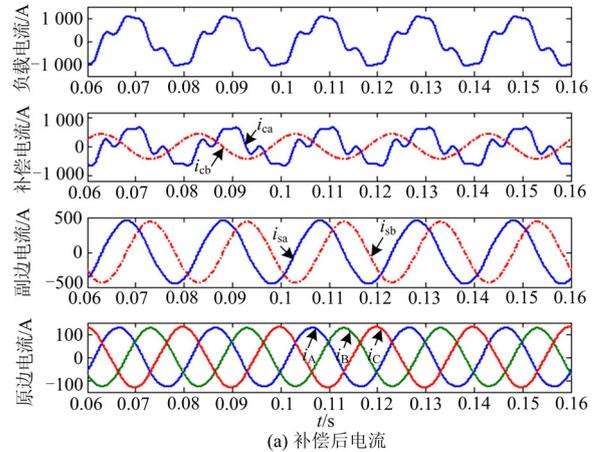


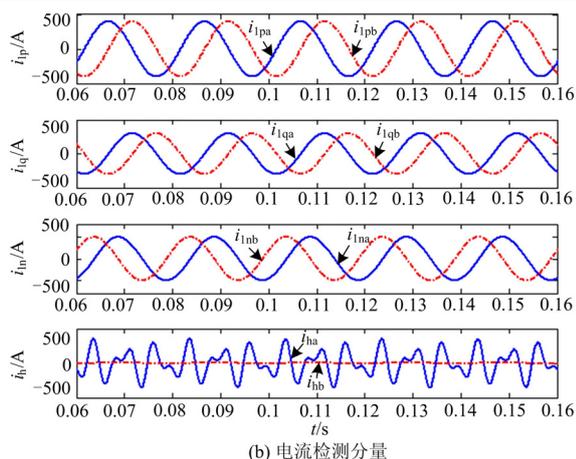
图 3 补偿前牵引变压器原副边电流

Fig.3 Traction transformer original-side and secondary-side currents before compensation

当投入IPFC后，设补偿度分别为  $K_N=0.983$ ,  $K_C=0.35$ ,  $K_h=0.96$ ，考虑电力电子器件产生的高次谐波，补偿后电力系统三相电流不平衡度为1.9%，谐波电流  $THD_{max}=2.0\%$ ，功率因数为0.9，满足国家标准，仿真结果如图4、图5所示。



(a) 补偿后电流



(b) 电流检测分量

图4 补偿后电流及电流检测分量

Fig.4 Currents after compensation and detecting current components

如图4 (b) 所示, 本算法将负载电流分解为基波正序有功电流分量、基波正序无功电流分量、基波负序电流分量以及谐波电流分量。通过容量优化控制, 实时设置各补偿度, 使得IPFC容量在各电能质量补偿参数之间得到优化配置。从而得到如图4 (a) 所示的电流波形。电力系统三相电流频谱如图5所示。

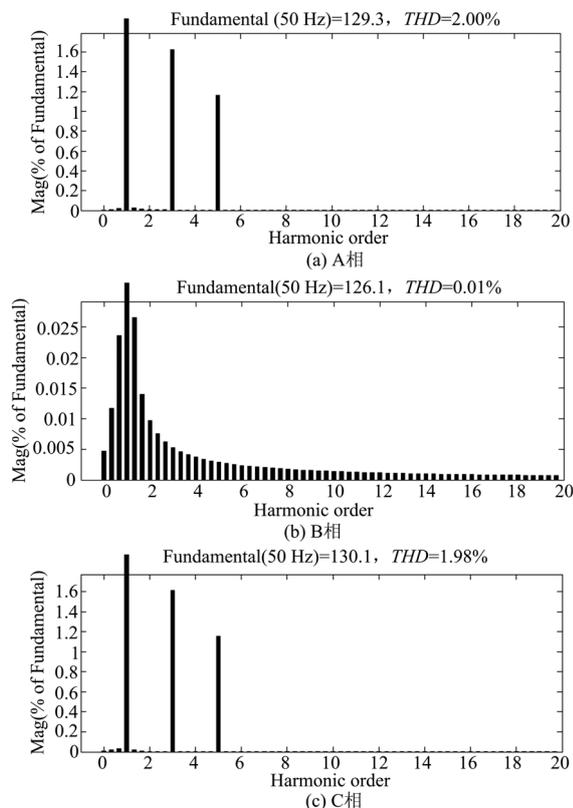


图5 电力系统三相电流频谱

Fig.5 Power system three-phase currents spectrum

可以看出, 电力系统侧电流已经基本实现三相对称, 其电能质量补偿效果与补偿度 (即IPFC容量投入力度) 密切相关。

## 6 结论

本文通过对负载电流分解模型的推导, 提出了基于同步坐标变换的电流检测方法。其从基波谐波、有功无功和正序负序三个角度对负载电流进行全面的分解, 是实现电能质量满意优化补偿的前提。通过所提出的补偿度与电能质量参数关系, 实时调整补偿度, 使得 IPFC 容量在各电能质量补偿参数之间得到实时优化配置, 从而在满足电能质量国标要求的前提下, 尽可能地减少设备投入, 节约成本支出。基于 Matlab/Simulink 的仿真结果验证了方案的正确性及可行性。

## 参考文献

- [1] 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 Qun-zhan, HUANG Jun, et al. A new cophase traction power supply system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (10): 80-83.
- [2] 孙驰, 魏光辉, 毕增军. 基于同步坐标变换的三相不对称系统的无功与谐波电流的检测[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (12): 43-48.  
SUN Chi, WEI Guang-hui, BI Zeng-jun. Detection for reactive and harmonics currents of unbalanced three-phase systems based on synchronous reference frame transformation[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (12): 43-48.
- [3] 孙卓, 姜新建, 朱东起. 电气化铁路中谐波、无功、负序电流的实时检测方法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (15): 53-57.  
SUN Zhuo, JIANG Xin-jian, ZHU Dong-qi. Detecting methods of reactive power, harmonic and negative-sequence current in electrified railway systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (15): 53-57.
- [4] 张秀峰. 基于有源滤波器的同相供电系统补偿电流的实时检测[J]. 铁道学报, 2005, 27 (6): 43-49.  
ZHANG Xiu-feng. Real-time detecting of compensating currents of the cophase supply system with active filters[J]. Journal of the China Railway Society, 2005, 27 (6): 43-49.
- [5] 吕晓琴, 张秀峰. 同相供电补偿电流实时检测方法[J]. 继电器, 2006, 34 (2): 53-57.  
Lü Xiao-qin, ZHANG Xiu-feng. Real-time detecting methods on compensating currents in cophase supply system[J]. Relay, 2006, 34 (2): 53-57.
- [6] 陆秀令, 张松华, 曹才开, 等. 单相电路谐波及无功电流新型检测方法[J]. 高电压技术, 2007, 33 (3):

163-166.  
 LU Xiu-ling, ZHANG Song-hua, CAO Cai-kai, et al. New detecting method for harmonics and reactive currents in single-phase circuits[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33 (3): 163-166.

[7] 张秀峰, 李群湛, 吕晓琴. 基于有源滤波器的 V, v 接同相供电系统[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(2): 98-103.  
 ZHANG Xiu-feng, LI Qun-zhan, Lü Xiao-qin. V, v connection cophase power supply system based on active power filter[J]. China Railway Science, 2006, 27 (2): 98-103.

[8] 张秀峰, 连级三. 基于斯科特变压器的新型同相 AT 牵引供电系统[J]. 机车电传动, 2006 (4): 14-18.  
 ZHANG Xiu-feng, LIAN Ji-san. A new cophase AT traction power supply system based on scott transformer[J]. Electric Drive for Locomotives, 2006 (4): 14-18.

[9] 张秀峰, 高仕斌, 钱清泉. 基于阻抗匹配平衡变压器和 AT 供电方式的新型同相牵引供电系统[J]. 铁道学报, 2006, 28 (4): 32-37.  
 ZHANG Xiu-feng, GAO Shi-bin, QIAN Qing-quan. A novel cophase traction power supply system based on impedance matching balance transformer and AT power supply mode[J]. Journal of the China Railway Society, 2006, 28 (4): 32-37.

[10] 谭秀炳. 交流电气化铁道牵引供电系统[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2007.  
 TAN Xiu-bing. AC electrified railway traction power supply system[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Publishing House, 2007.

[11] GB-T14549-1993 公用电网谐波[S].

[12] GB-T15543-2008 三相电压允许不平衡度[S].

[13] GB 12325-2003 供电电压允许偏差[S].

[14] 李群湛. 牵引变电所供电分析及综合补偿技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2006.  
 LI Qun-zhan. Traction substation power supply analysis and integrated compensation technology[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2006.

[15] 刘光晔, 周有庆, 姚建刚. 新型平衡变压器的平衡条件及等值电路研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19 (4): 84-88.  
 LIU Guang-ye, ZHOU You-qing, YAO Jian-gang. Study of requirements and equivalent circuit of new balance transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19 (4): 84-88.

收稿日期: 2009-11-20; 修回日期: 2009-12-19

作者简介:

魏光 (1984-), 男, 硕士, 主要研究方向为电能质量分析与控制、新型牵引供电系统理论分析, 供变电工程设计。  
 E-mail: weiguang1185@163.com

(上接第 50 页 continued from page 50)

[15] 赵渊, 周家启. 发电组合系统可靠性评估的最优负荷削减模型研究[J]. 电网技术, 2004, 28 (10): 34-37.  
 ZHAO Yuan, ZHOU Jia-qi. Research of the optimal load shedding model in the composite generation and transmission system reliability evaluation[J]. Power System Technology, 2004, 28 (10): 34-37.

[16] 王元驰, 肖先勇, 邓武军. 一种基于邻接关系和广度优先搜索的网络拓扑分析方法[J]. 四川电力技术, 2007 (12): 29-32.  
 WANG Yuan-chi, XIAO Xian-yong, DENG Wu-jun. A topology analysis method based on adjacent relation of elements in the network and breadth first search[J]. Sichuan Power Technology, 2007 (12): 29-32.

[17] 杨彬. 数据结构[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.

[18] Reliability Test System Task force of the application of probability method subcommittee. IEEE reliability test system[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1979, 98 (6): 2047-205.

[19] 程莹, 刘明波. 求解离散无功优化的非线性原-对偶内点算法[J]. 电力系统自动化, 2001, 25 (9): 23-27, 60.  
 CHENG Ying, LIU Ming-bo. Nonlinear primal-dual interior point algorithm for discrete reactive power optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25 (9): 23-27, 60.

[20] 郑望其, 程林, 孙元章. 2005 年南方电网可靠性充裕度评估[J]. 电网技术, 2004, 28 (19): 5-8.  
 ZHENG Wang-qi, CHENG Lin, SUN Yuan-zhang. Adequacy evaluation for south China electric power grid in 2005[J]. Power System Technology, 2004, 28 (19): 5-8.

[21] 孙昕, 丁明. 大型电力系统可靠性评价体系 (1) 指标定义[J]. 合肥工业大学学报, 1998, 21 (S1): 18-21.  
 SUN Xin, DING Ming. Reliability indices framework for bulk power system (1) definition[J]. Journal of Hefei University of Technology[J]. 1998, 21 (S1): 18-21.

收稿日期: 2009-11-04; 修回日期: 2010-02-01

作者简介:

周欣 (1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统分析与计算; E-mail: zhouxingxing240@126.com  
 刘明波 (1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统优化、运行与控制;  
 谢敏 (1978-), 女, 讲师, 博士, 主要研究方向为电力系统规划、运行与控制。