

一种改进的无锁相环三相电路谐波电流检测方法

丁菊霞¹, 张华俊², 张秀峰¹

(1.西南交通大学峨眉校区, 四川 峨眉山 614202; 2.西南交通大学, 四川 成都 610031)

摘要:为了解决谐波电流检测方法中锁相环和低通滤波器所引起的检测误差和延时问题,在基于瞬时无功功率理论的检测法的基础上,提出了一种新的三相电路谐波电流检测方法。该方法去掉了锁相环,引入了反馈,从而解决了锁相环对检测准确性的影响,加快了动态响应速度,补偿了低通滤波器的延时。理论分析和仿真验证表明,该方法可以准确、实时地检测谐波电流。

关键词:锁相环; 反馈; 三相电路; 谐波; 检测

An improved method without PLL on harmonics detection

DING Ju-xia¹, ZHANG Hua-jun², ZHANG Xiu-feng¹

(1.Emei Branch, Southwest Jiaotong University, Emeishan 614202, China;
2.Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031,China)

Abstract: In order to reduce the error of the phase lock loop(PLL) and compensate the delay of the low pass filter on harmonics detection, a new detecting method based on the instantaneous reactive power theory in three-phase circuit is researched in this paper. The PLL is omitted and feedback is used in this method, so that the problem of error is solved, the speed of dynamic response is accelerated and the delay of low pass filter is compensated. It is testified through analysis and simulation, that the method has less delay time and has a good real-time quality.

Key words: phase lock loop(PLL); feedback; three-phase circuit; harmonics; detection

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)24-0041-05

0 引言

有源滤波器是一种用于动态抑制谐波、补偿无功的新型电力电子装置,它可对变化的电网谐波及无功电流实现连续动态的跟踪补偿,补偿特性不受电网阻抗的影响^[1]。其关键技术之一是实时准确地检测负载电流中的谐波和无功电流分量,以得到有源滤波器所需的参考补偿量。

现有的三相电路谐波电流检测方法有很多,如 Fryze 时域分析法、基于瞬时无功功率理论检测法等,这些检测方法大多使用了锁相环和低通滤波器。当电网电压频率偏移时由于锁相环的存在而无法准确检测^[2],同时低通滤波器也给检测方法带来了一定的延时。

本文在基于瞬时无功功率理论的检测法的基础上,提出了一种新型的三相电路谐波电流检测方法。该方法去掉了锁相环,引入了电流负反馈,从而在电网电压畸变和频率偏移时依然能够实现准确检

测,同时电流负反馈加快了动态响应速度,补偿了低通滤波器的延时。理论分析和仿真验证表明,该方法可以实时、准确地检测谐波电流,算法简单,容易实现。

1 无锁相环三相电路谐波电流检测的基本原理

假设三相三线制电网电压不对称、有畸变并且基波频率发生了偏移,用对称分量法分解为正序、负序以及零序和的形式,令 u_a 为 (u_b 、 u_c 略):

$$u_a = \sqrt{2}U_{1+} \sin(\omega t + \phi_{1+}) + \sqrt{2}U_{1-} \sin(\omega t + \phi_{1-}) + \sum_{n=2}^{\infty} \sqrt{2}U_{n-} \sin(n\omega t + \phi_{n-}) + \sum_{n=2}^{\infty} \sqrt{2}U_{n+} \sin(n\omega t + \phi_{n+})$$

将 u_a 、 u_b 、 u_c 两边分别乘以 $\sin(\omega t + \theta)$ 、 $\sin(\omega t - 120^\circ + \theta)$ 、 $\sin(\omega t + 120^\circ + \theta)$ 后,三者相加并用低通滤波器滤波。由于电网频率偏差很小,即 ω' 与 ω 之差很小,而实际使用的低通滤波器并不是完全只通过直流,一般都需设定一个较低的频率,如 20 Hz,因而截止频率之上的交流量均被滤去。

基金项目:西南交通大学峨眉校区科技基金资助项目

因此, 低通滤波器滤波并放大 $2/3$ 倍后可以得到 $\sqrt{2}U_{1+} \cos[(\omega' - \omega)t + \phi_{1+} - \theta]$, 将其再与 $\sin(\omega t + \theta)$ 相乘得:

$$\begin{aligned} & \sqrt{2}U_{1+} \cos[(\omega' - \omega)t + \phi_{1+} - \theta] \sin(\omega t + \theta) = \\ & \frac{\sqrt{2}}{2} U_{1+} \sin(\omega' t + \phi_{1+}) + \frac{\sqrt{2}}{2} U_{1+} \sin[(2\omega - \omega')t - \phi_{1+} + 2\theta] \end{aligned} \quad (1)$$

类似地, 将 u_a 、 u_b 、 u_c 的两边分别乘以 $\cos(\omega t + \theta)$ 、 $\cos(\omega t - 120^\circ + \theta)$ 、 $\cos(\omega t + 120^\circ + \theta)$ 后, 三者相加, 用低通滤波器滤波并放大 $2/3$ 倍, 得到 $\sqrt{2}U_{1+} \sin[(\omega' - \omega)t + \phi_{1+} - \theta]$, 再与 $\cos(\omega t + \theta)$ 相乘得:

$$\begin{aligned} & \sqrt{2}U_{1+} \sin[(\omega' - \omega)t + \phi_{1+} - \theta] \cos(\omega t + \theta) = \\ & \frac{\sqrt{2}}{2} U_{1+} \sin(\omega' t + \phi_{1+}) - \frac{\sqrt{2}}{2} U_{1+} \sin[(2\omega - \omega')t - \phi_{1+} + 2\theta] \end{aligned} \quad (2)$$

将式 (1)、(2) 相加可得

$$\sqrt{2}U_{1+} \sin(\omega' t + \phi_{1+})$$

类似地, 将 $\sqrt{2}U_{1+} \cos[(\omega' - \omega)t + \phi_{1+} - \theta]$ 、 $\sqrt{2}U_{1+} \sin[(\omega' - \omega)t + \phi_{1+} - \theta]$ 分别与 $\cos(\omega t + \theta)$ 、 $\sin(\omega t + \theta)$ 相乘后结果相减, 可得

$$\sqrt{2}U_{1+} \cos(\omega' t + \phi_{1+})$$

由变换

$$\begin{bmatrix} \sin(\omega t + \phi_{1+}) \\ \sin(\omega t - 120^\circ + \phi_{1+}) \\ \sin(\omega t + 120^\circ + \phi_{1+}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \phi_{1+}) \\ \cos(\omega t + \phi_{1+}) \end{bmatrix}$$

可得三相基波正序电压

$$\begin{bmatrix} u_{a1+} \\ u_{b1+} \\ u_{c1+} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2}U_{1+} \sin(\omega' t + \phi_{1+}) \\ \sqrt{2}U_{1+} \sin(\omega' t - 120^\circ + \phi_{1+}) \\ \sqrt{2}U_{1+} \sin(\omega' t + 120^\circ + \phi_{1+}) \end{bmatrix}$$

假设三相电网电流不对称、有畸变并且基波频率发生了偏移, 同理, 可得三相基波正序电流

$$\begin{bmatrix} i_{a1+} \\ i_{b1+} \\ i_{c1+} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2}I_{1+} \sin(\omega' t + \phi_{1+}) \\ \sqrt{2}I_{1+} \sin(\omega' t - 120^\circ + \phi_{1+}) \\ \sqrt{2}I_{1+} \sin(\omega' t + 120^\circ + \phi_{1+}) \end{bmatrix}$$

定义基波有功电流为基波电流矢量 I 在基波电压矢量 U 上的投影, 基波无功电流为与 U 垂直的分量, 以 a 相电流 i_a 为例:

$$\begin{aligned} i_a &= \sqrt{2}I_{1+} \cos(\phi_{1+} - \phi_{1+}) \sin(\omega t + \phi_{1+}) + \\ & \sqrt{2}I_{1+} \sin(\phi_{1+} - \phi_{1+}) \cos(\omega t + \phi_{1+}) + \\ & \sum_{n=2}^{\infty} \sqrt{2}[I_{n+} \sin(n\omega t + \phi_{n+}) + I_{n-} \sin(n\omega t + \phi_{n-})] = \\ & i_{a1p+} + i_{a1q+} + i_{ah+} + i_{ah-} \end{aligned}$$

其中: i_{a1p+} 为 a 相基波正序有功电流; i_{a1q+} 为 a 相

基波正序无功电流; i_{ah+} 、 i_{ah-} 为 a 相基波正序、负序谐波电流。

由于 $\cos(\phi_{1+} - \phi_{1+}) = \cos[(\omega' - \omega)t + \phi_{1+} - \theta] \cos[(\omega' - \omega)t + \phi_{1+} - \theta] + \sin[(\omega' - \omega)t + \phi_{1+} - \theta] \sin[(\omega' - \omega)t + \phi_{1+} - \theta]$ 可得三相基波正序有功电流

$$\begin{bmatrix} i_{a1p+} \\ i_{b1p+} \\ i_{c1p+} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}U_{1+} I_{1+} \cos(\phi_{1+} - \phi_{1+})}{U_{1+}^2} \begin{bmatrix} u_{a1+} \\ u_{b1+} \\ u_{c1+} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2}I_{1+} \cos(\phi_{1+} - \phi_{1+}) \sin(\omega' t + \phi_{1+}) \\ \sqrt{2}I_{1+} \cos(\phi_{1+} - \phi_{1+}) \sin(\omega' t - 120^\circ + \phi_{1+}) \\ \sqrt{2}I_{1+} \cos(\phi_{1+} - \phi_{1+}) \sin(\omega' t + 120^\circ + \phi_{1+}) \end{bmatrix}$$

式中: U_{1+}^2 由 $\sqrt{2}U_{1+} \cos[(\omega' - \omega)t + \phi_{1+} - \theta]$ 、 $\sqrt{2}U_{1+} \sin[(\omega' - \omega)t + \phi_{1+} - \theta]$ 运算可得。

因此, 三相基波正序无功电流、负序电流以及谐波电流的和为

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{a1p+} \\ i_{b1p+} \\ i_{c1p+} \end{bmatrix}$$

在该检测方法中, 用到了正余弦信号 $\sin(\omega t + \theta)$ 、 $\sin(\omega t - 120^\circ + \theta)$ 、 $\sin(\omega t + 120^\circ + \theta)$ 以及 $\cos(\omega t + \theta)$ 、 $\cos(\omega t - 120^\circ + \theta)$ 、 $\cos(\omega t + 120^\circ + \theta)$, 它们可由 $\sin(\omega t + \theta)$ 、 $\cos(\omega t + \theta)$ 通过以下变换得到。

$$\begin{bmatrix} \cos(\omega t + \theta) \\ \cos(\omega t - 120^\circ + \theta) \\ \cos(\omega t + 120^\circ + \theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \theta) \\ \cos(\omega t + \theta) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \sin(\omega t + \theta) \\ \sin(\omega t - 120^\circ + \theta) \\ \sin(\omega t + 120^\circ + \theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \theta) \\ \cos(\omega t + \theta) \end{bmatrix}$$

由上述分析可以看出, 正余弦信号的相位角 θ 对三相基波正序电流、三相基波正序有功电流以及三相基波负序电流和谐波电流的检测没有任何影响, 也即, θ 可取任意值。由于实际的电力系统中, 经过有源滤波器补偿后的信号的频率总希望是基频, 并且检测出的基波信号的频率也基本是基频, 因此, ω 可以直接确定。那么, 频率为基频、相位角任意的正余弦信号 $\sin(\omega t + \theta)$ 、 $\cos(\omega t + \theta)$ 可以由信号发生器得到。

该检测方法的检测原理框图如图 1 所示。

三相四线制电路, 三相电网电流 i_a 、 i_b 、 i_c 中含有零序分量。将 i_a 、 i_b 、 i_c 两边分别乘以 $\sin(\omega t + \theta)$ 、 $\sin(\omega t - 120^\circ + \theta)$ 、 $\sin(\omega t + 120^\circ + \theta)$

后三者相加, 可以发现, 由于 $\sin(\omega t + \theta) + \sin(\omega t - 120^\circ + \theta) + \sin(\omega t + 120^\circ + \theta) = 0$, 零序电流分量被抵消, 运算结果与不含零序电流分量的三相三线制的运算结果相同。因此, 三相四线

制电网电流的分析与结果同三相三线制, 无锁相环的三相三线制电网谐波与无功电流检测方法可以不加修改地应用于三相四线制。这也是该方法的另一大优点。

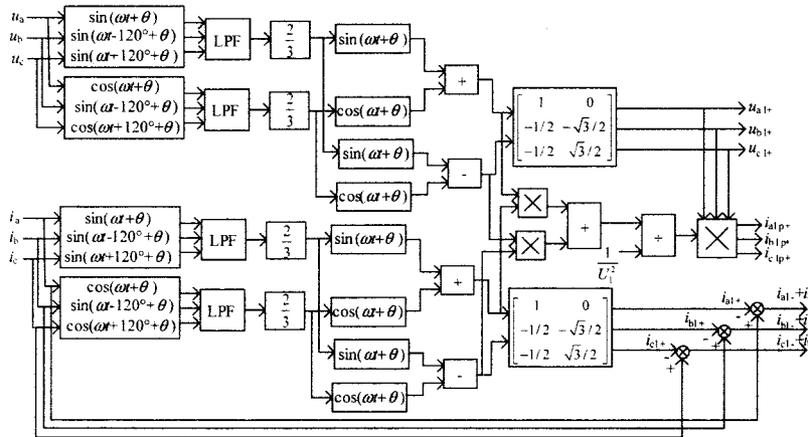


图 1 无锁相环的三相电路谐波电流检测原理框图

Fig.1 Harmonics detecting without PLL in three-phase circuit

2 基于反馈理论的检测方法的改进

上述检测方法中, LPF 的固有延时对检测结果有一定的影响, 为了提高检测方法的动态响应速度, 引入基波电流反馈, 如图 2。当基波电流增大时, 由于低通滤波器的延时, 检测出的基波电流不能迅速跟踪实际值, 在一段时间内, 基波的检测结果要

比实际值小, 这样输出的谐波电流中含有与基波电流同相位的成分, 反馈到输入端, 使得检测出的基波电流将有所增大, 从而补偿了过渡过程中的检测误差, 加快了动态响应速度。同理, 当基波电流减小时, 输出的谐波电流中含有与基波电流反相位的成分, 此时检测出的基波电流将迅速衰减, 从而补偿了低通滤波器的延时。

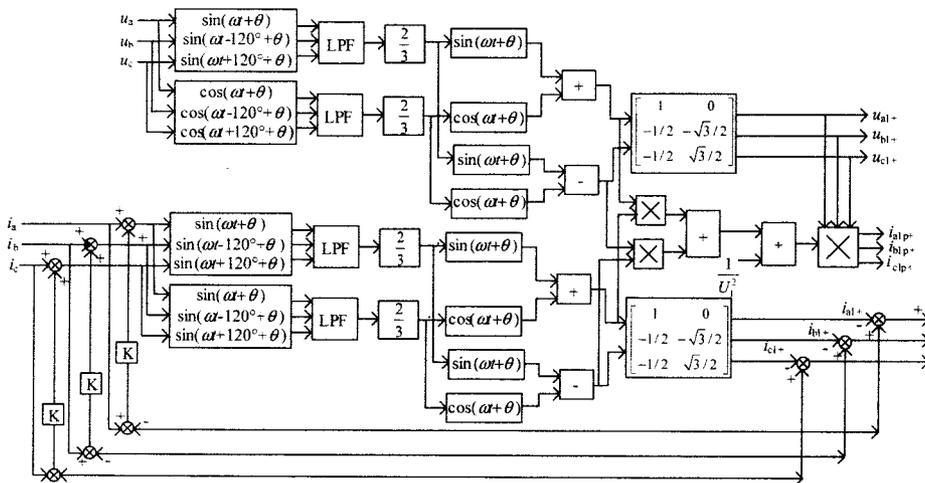


图 2 基于反馈理论的检测方法原理框图

Fig.2 Harmonics detecting based on feedback

3 仿真分析

本文基于 Matlab/Simulink 电力系统仿真元件库建立仿真模型, 对所提出的检测方法进行了仿真。

仿真中假设三相电网电压 u_s 不对称、含有 3、5 次谐波、且基波频率偏移为 55 Hz, 电流 i_s 不对称且含有 5、7 次谐波, 波形分别如图 3 (a)、(b)。

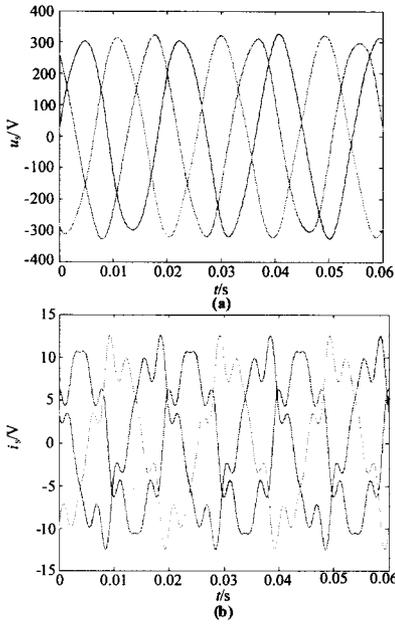


图3 三相电网电压、电流
Fig.3 Three-phase voltage and current

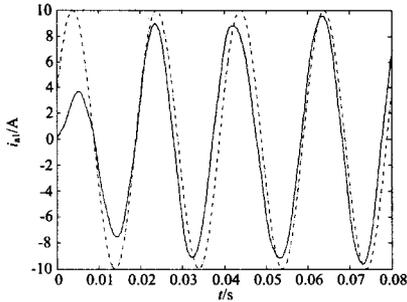


图4 有锁相环时的 a 相基波电流
Fig.4 A-phase fundamental current with PLL

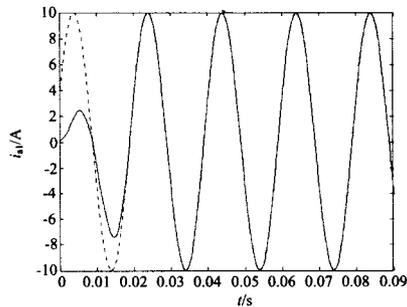


图5 无锁相环时的 a 相基波电流
Fig.5 A-phase fundamental current without PLL

图 4、5 分别为用有、无锁相环检测方法检测出的 a 相基波电流波形。由图可见，电网电压畸变和频率偏移时，有锁相环检测方法检测的 a 相基波电流的检测波形与理论波形始终无法重合，而无锁相环检测方法检测的 a 相基波电流检测波形大约经

过一个周期后与理论波形基本重合。由此说明，无锁相环检测方法电网电压畸变和基波频率偏移对检测的准确性没有影响，检测的准确性较好。

图 6、7 是使用无锁相环检测方法在有无反馈时的 a 相基波电流检测结果。仿真中经反复验证，反馈系数取 1.1 时效果更为理想。由图可见，不带反馈的检测方法动态响应时间大约需要一个周期左右，而带反馈的方法大约只需半个周期左右。可见，引入反馈后，获得了更好的检测效果。

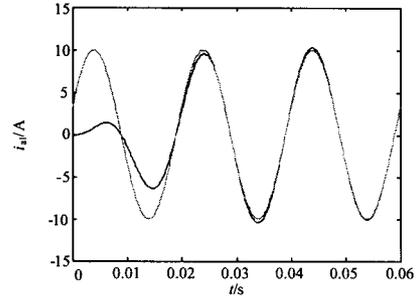


图6 无反馈的 a 相基波电流检测结果
Fig.6 A-phase fundamental current without feedback

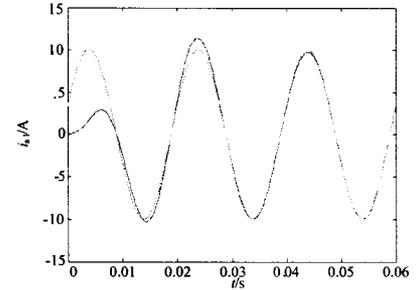


图7 有反馈的 a 相基波电流检测结果
Fig.7 A-phase fundamental current with feedback

假设电网电压不变，电网电流的幅值在 0.04 s 时突然由 10 A 变至 15 A，波形如图 8 所示。图 9、10 分别为有、无反馈时 a 相基波电流的理论波形和检测波形。由图可见，该方法不仅具有快的动态响应速度，其跟踪性能也较好。

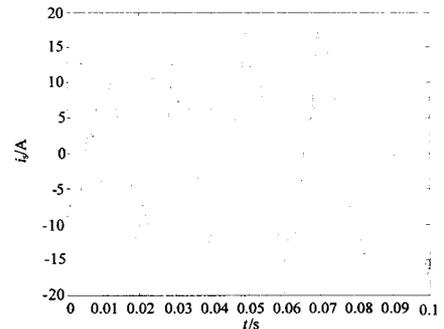


图8 三相电网电流
Fig.8 Three-phase current

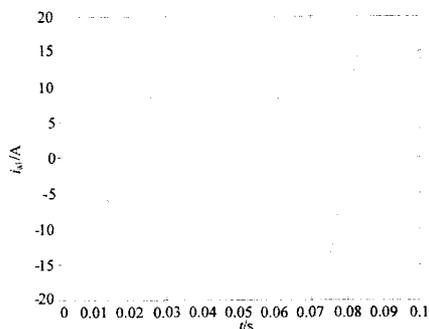


图9 无反馈的 a 相基波电流检测结果

Fig.9 A-phase fundamental current without feedback

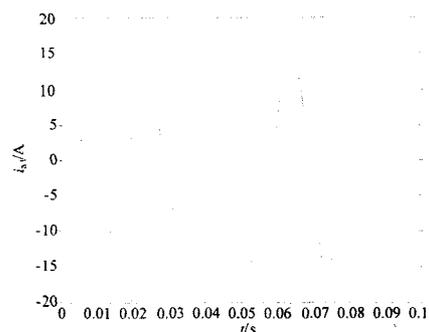


图10 有反馈的 a 相基波电流检测结果

Fig.10 A-phase fundamental current with feedback

4 结论

本文在基于瞬时无功功率理论的检测法的基础上,提出了一种新型的三相电路谐波电流检测方法,该方法去掉了锁相环,引入了反馈,解决了锁相环对检测准确性的影响,加快了动态响应速度,减少了检测方法的延时。理论分析和仿真验证表明,该检测方法原理简单,易于实现,并且具有较好的准

确性和实时性。

参考文献

- [1] 王兆安,杨君,刘进军.谐波抑制和无功补偿[M].北京:机械工业出版社,1998.209-238.
WANG Zhao-an,YANG Jun,LIU Jin-jun.Harmonic and Reactive Power Compensation[M]. Beijing:China Mechine Press,1998.209-238.
- [2] 孙弛,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.Reactive and Harmonic Current Detection Based on Synchronize Coordinate Transformation in Three-phase System of Asymmetric[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(12):43-48.
- [3] 刘开培,张俊敏,宣扬.基于重采样理论和均值滤波的三相电路谐波检测方法[J].中国电机工程学报,2003,23(9):78-82.
LIU Kai-pei,ZHANG Jun-min,XUAN Yang.Harmonic Detection for Three-phase Circuits Based on Resampling and Feedback Theory[J]. Proceedings of the CSEE,2003,2003,23(9):78-82.
- [4] 颜秋容,葛加武.基于瞬时无功率理论的谐波检测方法之误差分析[J].电气传动,2007,37(5):57-60.
YAN Qiu-rong,GE Jia-wu.Error Analysis of Harmonic Detection Based on the Instantaneous Reactive Power Theory[J].Electric Drive,2007,37(5):57-60.

收稿日期:2008-12-26

作者简介:

丁菊霞(1977-),女,硕士,讲师,从事于电力电子与电力传动、电能质量方面的教学与研究。E-mail:northdingding@163.com

(上接第40页 continued from page 40)

- [13] 金群,李欣然.遗传算法参数设置及其在负荷建模中应用[J].电力自动化设备,2006,26(5):23-27.

JIN Qun, LI Xin-ran. GA Parameter Setting and Its Application in Load Modeling[J]. Electric Power Automatic Equipment,2006,26(5):23-27.

- [14] 陈玲,沈洁,秦玲.蚁群算法进行连续参数优化的新途径[J].系统工程理论与新实践,2003,3:48-53.

- [15] 程颖,鞠平,吴峰.负荷模型参数辨识的粒子群优化法及其与基因算法比较[J].电力系统自动化,2003,27(11):25-29.

CHENG Ying, JU Ping, WU Feng. PS Algorithm in Load Parameter Identification and its Comparison with General Algorithm[J].Automation of Electric Power

Systems,2003,27(11):25-29.

- [16] 程颖.电力负荷建模的工程实现与应用研究(硕士论文)[D].南京:河海大学,2003.

CHENG Ying. Research on the Engineering Realization and Application of Electrical Load Modeling, Thesis[D]. Nanjing: Hohai University,2003.

收稿日期:2008-12-20; 修回日期:2009-01-22

作者简介:

许津津(1987-),女,硕士研究生,研究方向为电力稳定分析与控制; E-mail:bvyk@163.com

马进(1976-),男,副教授,研究方向为电力系统动态仿真。