

基于平均值理论的无锁相环单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滤波器所引起的检测误差和延时问题, 对单相电路有功电流分离法进行了深入研究, 提出了一种新的谐波电流检测方法。该方法去掉了锁相环, 引入了平均值理论, 解决了锁相环对检测准确性和低通滤波器对检测实时性的影响, 提高了检测的准确性, 加快了动态响应速度。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; 平均值理论; 单相电路; 谐波; 实时检测

A harmonics-detection method without PLL and based on average theory in single-phase circuit

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 (LPF) on harmonics detection, the method of separating active currents in single-phase circuit is studied deeply and a new detecting method is proposed. The PLL is omitted and average theory is used in this method, so that the problem of detecting accuracy induced by PLL and real-time induced by LPF is solved, the detection accuracy is improved and the speed of dynamic response is accelerated. It is testified through analysis and simulation, that the method has little delay time and has a good real-time quality.

Key words: phase lock loop (PLL); average theory; single-phase circuit; harmonics; real-time detection

中图分类号: TM732 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)13-0026-05

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, 它能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。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^[1]。

谐波与无功电流检测的方法有很多, 文献[2-3]提出的有功电流分离法是近年来出现的一种单相电路无功和谐波电流检测方法, 算法简单、硬件实现容易。但该方法使用了锁相环和低通滤波器。当电网电压畸变和频率偏移时由于锁相环的存在而无法准确检测, 同时低通滤波器也给检测方法带来了一定的延时。文献[4]根据正交函数的正交特性改进了有功电流分离法, 解决了电网电压畸变的影响, 但是以增加低通滤波器为代价的, 并且仍未解决锁相环的问题。文献[5]根据三角函数的有关特性对有功电流分离法进行了改进, 也解决了电网电压畸变对检测的影响, 但仍使用了锁相环和低通滤波器。文

献[6]提出了无锁相环的三相三线制不对称条件下的任意次谐波 $ip-iq$ 检测方法, 该方法虽然通过预先设定变换矩阵的频率去掉了锁相环, 但仍未解决低通滤波器的问题并且也不能应用于单相电路。

本文在有功电流分离法的基础上, 提出了一种新型的单相电路谐波电流检测方法。该方法去掉了锁相环, 从而在电网电压畸变和频率偏移时依然能够准确检测; 引用了平均值理论, 将延时时间减小至 $T/2$, 从而加快了动态响应速度, 提高了检测的实时性, 解决了低通滤波器带来的问题。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 无锁相环单相电路谐波电流检测方法的基本原理

假设电网电压 u_s 畸变并且基波频率发生了偏移, 用傅里叶级数展开为

$$u_s = U_1 \sin(\omega t + \phi_1) + \sum_{n=3}^{\infty} U_n \sin(n\omega t + \phi_n) = \quad (1)$$

$$u_1 + u_h$$

式中: u_1 为基波电压; u_h 为谐波电压。

由于长期以来阻感负载整流电路是应用最广、数量最多的负载, 而单相整流负载(如电力机车)只含有奇次谐波, 上式中 $n=3, 5, 7, \dots$, 以下类同。

根据瞬时功率理论^[1], 基波电流矢量 I 在基波电压矢量 U 上的投影为基波有功电流, 与 U 垂直的分量为基波无功电流。设电网电流 i_s 畸变并且基波频率发生了偏移, 用傅里叶级数展开为

$$i_s = I_1 \sin(\omega' t + \phi_1) + \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \phi_n) =$$

$$I_1 \cos(\phi_1 - \phi_1) \sin(\omega' t + \phi_1) +$$

$$I_1 \sin(\phi_1 - \phi_1) \cos(\omega' t + \phi_1) +$$

$$\sum_{n=3}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \phi_n) = i_{1p} + i_{1q} + i_h = i_1 + i_h$$
(2)

式中: i_1 为基波电流; i_{1p} 为基波有功电流; i_{1q} 为基波无功电流; i_h 为谐波电流。

将式(1)的电网电压 u_s 两边同乘 $\sin(\omega t + \theta)$

$$u_s \sin(\omega t + \theta) = \frac{U_1}{2} \cos[(\omega' - \omega)t + \phi_1 - \theta] -$$

$$\frac{U_1}{2} \cos[(\omega' + \omega)t + \phi_1 + \theta] +$$

$$\sum_{n=3}^{\infty} \frac{U_n}{2} \{ \cos[(n-1)\omega t + \phi_n - \theta] -$$

$$\cos[(n+1)\omega t + \phi_n + \theta] \}$$
(3)

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 5 Hz, 因而截止频率之上的交流量均被滤去。因此, 对上式, 采用低通滤波器滤波, 并增大一倍后, 可得 $U_1 \cos[(\omega' - \omega)t + \phi_1 - \theta]$, 以下类同。

将 $U_1 \cos[(\omega' - \omega)t + \phi_1 - \theta]$ 与 $\sin(\omega t + \theta)$ 相乘可得

$$U_1 \cos[(\omega' - \omega)t + \phi_1 - \theta] \sin(\omega t + \theta) =$$

$$\frac{U_1}{2} \sin(\omega' t + \phi_1) + \frac{U_1}{2} \sin[(2\omega - \omega')t - \phi_1 + 2\theta]$$
(4)

将式(1)的电网电压 u_s 两边同乘 $\cos(\omega t + \theta)$

$$u_s \cos(\omega t + \theta) = \frac{U_1}{2} \sin[(\omega' - \omega)t + \phi_1 - \theta] +$$

$$\frac{U_1}{2} \sin[(\omega' + \omega)t + \phi_1 + \theta] +$$

$$\sum_{n=3}^{\infty} \frac{U_n}{2} \{ \sin[(n+1)\omega t + \phi_n + \theta] +$$

$$\sin[(n-1)\omega t + \phi_n - \theta] \}$$
(5)

采用低通滤波器滤波, 并增大一倍, 可得 $U_1 \sin[(\omega' - \omega)t + \phi_1 - \theta]$, 将其与 $\cos(\omega t + \theta)$ 相乘可得

$$U_1 \cos[(\omega' - \omega)t + \phi_1 - \theta] \cos(\omega t + \theta) =$$

$$\frac{U_1}{2} \sin(\omega' t + \phi_1) - \frac{U_1}{2} \sin[(2\omega - \omega')t - \phi_1 + 2\theta]$$
(6)

将式(4)、式(6)相加可得

$$u_1 = U_1 \sin(\omega' t + \phi_1)$$
(7)

同理可得

$$i_1 = I_1 \sin(\omega' t + \phi_1)$$
(8)

由电网电流 i_s 的表达式(2), 欲检测出基波有功电流 i_{1p} 、基波无功电流 i_{1q} , 尚需知道 $\cos(\phi_1 - \phi_1)$, 由于

$$\cos(\phi_1 - \phi_1) = \cos[(\omega' - \omega)t + \phi_1 - \theta] \cdot$$

$$\cos[(\omega' - \omega)t + \phi_1 - \theta] + \sin[(\omega' - \omega)t +$$

$$\phi_1 - \theta] \sin[(\omega' - \omega)t + \phi_1 - \theta]$$
(9)

结合式(2)、(8)、(9), 可得

$$i_{1p} = \frac{U_1 I_1 \cos(\phi_1 - \phi_1)}{U_1^2} u_1 =$$
(10)

$$I_1 \cos(\phi_1 - \phi_1) \sin(\omega' t + \phi_1)$$

$$i_{1q} = -\frac{U_1 I_1 \sin(\phi_1 - \phi_1)}{U_1^2} u_1 =$$
(11)

$$-I_1 \sin(\phi_1 - \phi_1) \sin(\omega' t + \phi_1)$$

$$i_h = i_s - i_1$$
(12)

式中 U_1^2 由 $U_1 \cos[(\omega' - \omega)t + \phi_1 - \theta]$ 、 $U_1 \sin[(\omega' - \omega)t + \phi_1 - \theta]$ 运算可得。

由式(10)、(11)、(12)可以看出, 参与运算的正余弦信号 $\sin(\omega t + \theta)$ 、 $\cos(\omega t + \theta)$ 的相位角 θ 对基波有功电流、基波无功电流以及谐波电流的检测没有任何影响, 也即, θ 可取任意值。而 $\sin(\omega t + \theta)$ 、 $\cos(\omega t + \theta)$ 的角频率 ω , 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, 可以直接确定。那么, 频率为基频、相位角任意的正余弦信号 $\sin(\omega t + \theta)$ 、 $\cos(\omega t + \theta)$ 可以用信号发生器得到。

由此可得该检测方法的原理框图1。

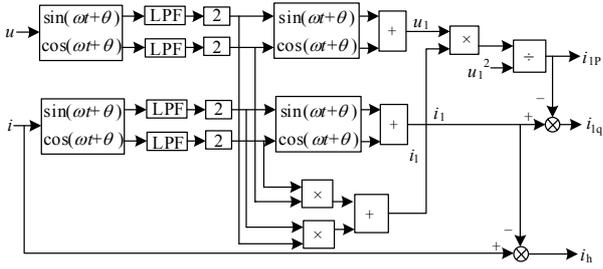


图1 无锁相环检测方法的原理框图
Fig.1 Harmonics detecting without PLL

2 基于平均值理论的无锁相环检测方法的改进

上述检测方法中, $U_1 \cos[(\omega' - \omega)t + \phi_1 - \theta]$ 是通过低通滤波器滤波得到的。低通滤波器的固有延时使检测系统跟踪时间较长, 动态性能较差。

由式 (3), 由于 ω' 与 ω 相差很小,

$$\frac{2}{T} \int_{t-T/2}^t \cos[(\omega' - \omega)t + \phi_1 - \theta] dt \approx \cos[(\omega' - \omega)t + \phi_1 - \theta]$$

$$\frac{2}{T} \int_{t-T/2}^t \cos[(\omega' + \omega)t + \phi_1 - \theta] dt \approx 0$$

$$\frac{2}{T} \int_{t-T/2}^t \cos[(n-1)\omega t + \phi_1 - \theta] dt = 0$$

$$\frac{2}{T} \int_{t-T/2}^t \cos[(n+1)\omega t + \phi_1 - \theta] dt = 0$$

由此可见, 式 (3) 积分后取平均值也能得到 $U_1 \cos[(\omega' - \omega)t + \phi_1 - \theta]$, 从而省去了滤波器, 将积分延迟时间缩减到了 $T/2$, 提高了检测的实时性。

平均值理论的原理框图如图 2 所示。包括积分器、延迟器、减法器 and 除法器。延迟器的输出是积分延迟 $T/2$ 的值, 积分器与延迟器的输出的差表示在 $[t-T/2, t]$ 的值, 由除法器得到积分值除以积分区间 $T/2$ 的值。

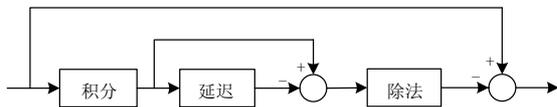


图2 平均值理论的原理框图
Fig.2 Average theory

3 仿真分析

本文利用 Matlab/Simulink 中的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。仿真中假设电网电压 u_s 畸变并且基波频率发生了偏移, 电网电流 i_s 含有 3、5、7、9、11 次谐波,

波形分别如图 3 (a)、(b) 所示。

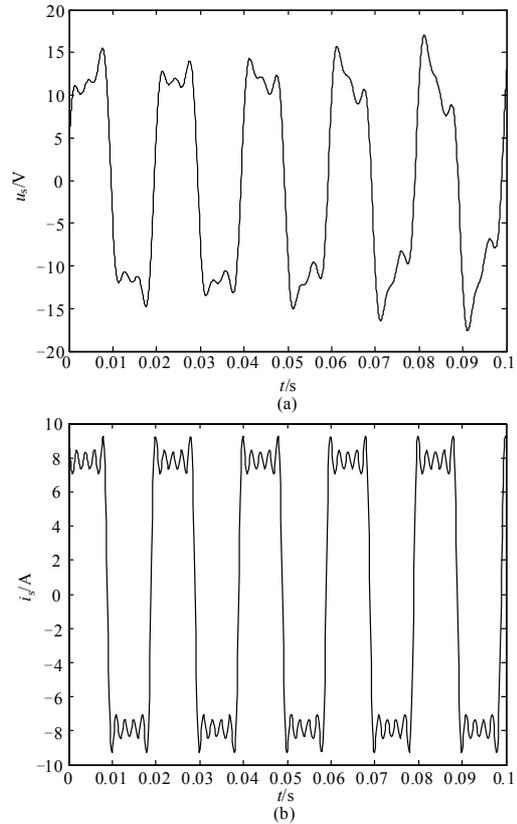


图3 电网电压、电流
Fig.3 Voltage and current

图 4、5 分别是有、无锁相环检测方法基波电流的检测结果。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基波电流检测波形大约经过一个半周期后理论波形基本重合。由此说明, 电网电压畸变和基波频率偏移对无锁相环检测方法的检测准确性没有影响, 无锁相环检测方法的准确性较好。

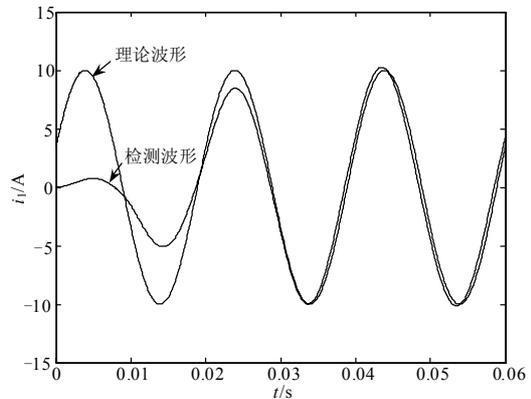


图4 有锁相环检测方法检测的基波电流
Fig.4 Fundamental current with PLL

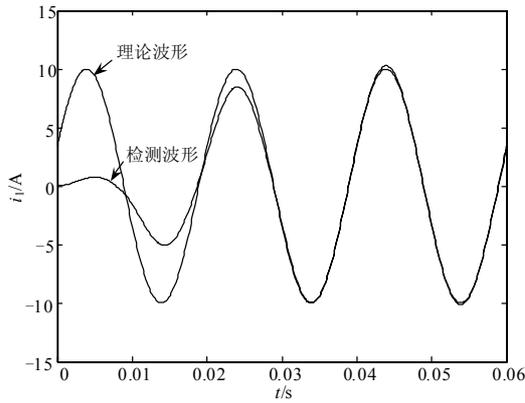


图 5 无锁相环检测方法检测的基波电流

Fig.5 Fundamental current without PLL

图 6、7 是无锁相环检测方法在使用滤波器和基于平均值理论检测时的基波和谐波电流检测结果。由图可见, 有滤波器检测方法动态响应时间大约需要一个半周期左右, 而基于平均值理论的检测方法大约只需半个周期左右。

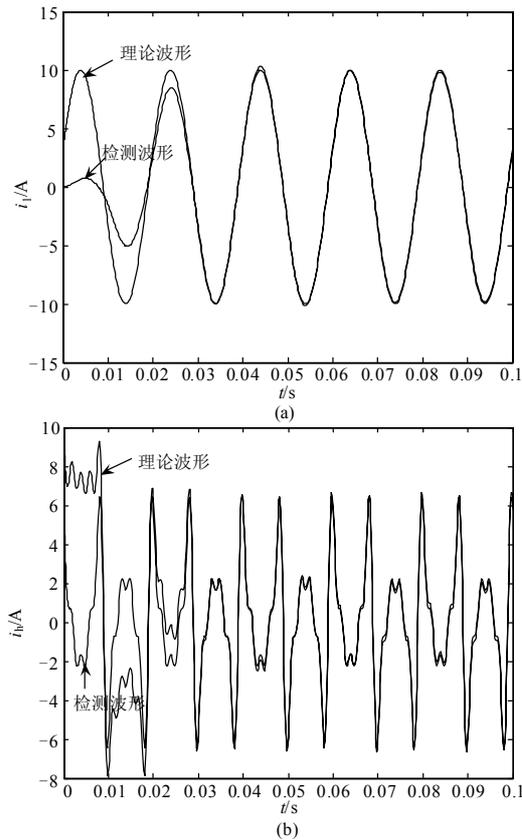


图 6 有滤波器检测方法检测的基波、谐波电流

Fig.6 Harmonics and fundamental current with LPF

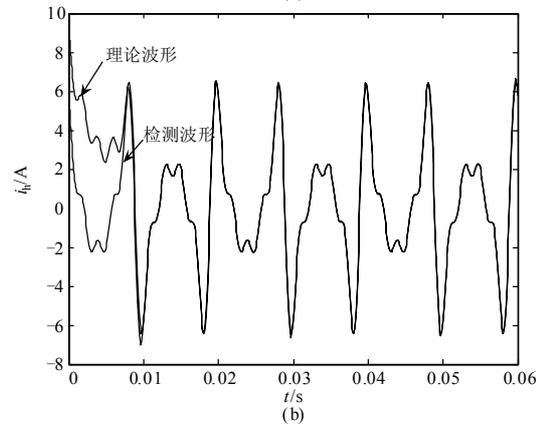
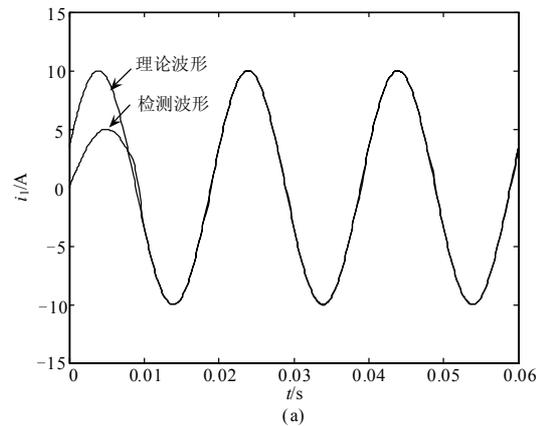


图 7 基于平均值理论检测方法检测的基波、谐波电流

Fig.7 Harmonics and fundamental current based on average theory

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 分别为使用滤波器和基于平均值理论检测时的基波电流检测结果。由图可见, 基于平均值理论检测方法不仅具有快的动态响应速度, 跟踪性能也较好。

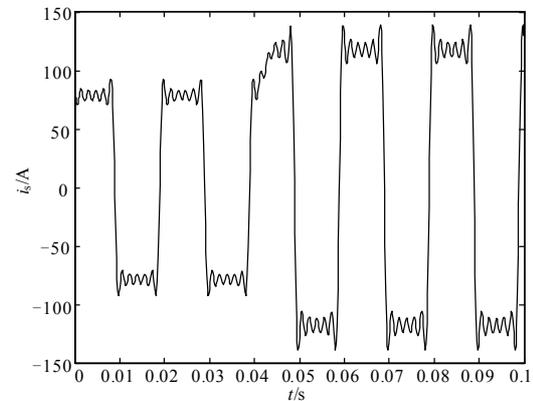


图 8 电网电流

Fig.8 Current

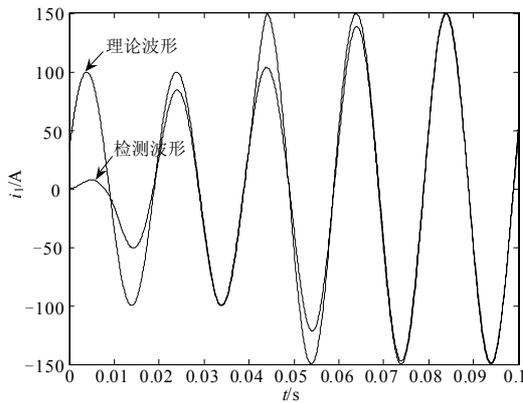


图 9 有滤波器检测方法检测的基波电流
Fig.9 Fundamental current with LPF

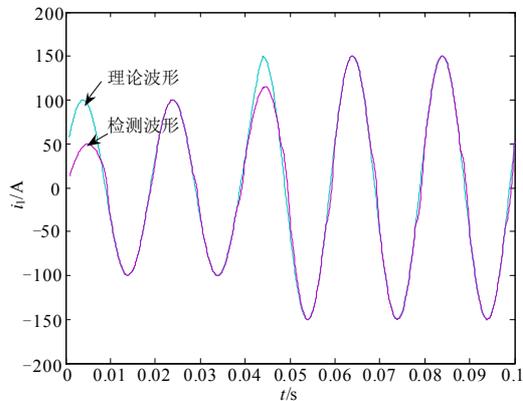


图 10 基于平均值理论检测方法检测的基波电流
Fig.10 Fundamental current based on average theory

4 结论

本文在单相电路有功电流分离法的基础上，提出了一种新型的谐波电流检测方法，去掉了锁相环，引入了平均值，解决了锁相环对检测准确性和低通滤波器对检测实时性的影响，提高了检测的准确性，加快了动态响应速度。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。

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] 任永峰, 李含善, 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-shan, HE Gang, et al. The analysis of two real-time detecting approach of instantaneous harmonics and reactive currents in single-phase circuit[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2003, 15 (1): 95-98.

[3] 戴瑜兴, 张义兵, 陈标达. 检测单相系统谐波和无功电流的一种新方法[J]. 电工技术学报, 2004, 19 (2): 95-97.
DAI Yu-xing, ZHANG Yi-bing, CHEN Biao-da. A novel detection approach to harmonics and reactive currents in single-phase circuit[J]. Trans of CETS, 2004, 19 (2): 95-97.

[4] 路秀令, 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 Xu-ling, ZHANG Song-hua, CAO Cai-kai, et al. The new detection method for harmonics and reactive currents in single-phase circuit[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33 (3): 163-166.

[5] 孙曙光, 王景芹, 师顺泉. 单相电路谐波及无功电流实时检测的研究[J]. 电测与仪表, 2008, 45 (1): 4-7.
SUN Shu-guang, WANG Jing-qin, SHI Shun-quan. The study of real time detection for harmonics and reactive currents in single-phase circuit[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2008, 45 (1): 4-7.

[6] 周林, 张凤, 栗秋华, 等. 无锁相环 i_p-i_q 检测任意次谐波电流的新方法[J]. 高电压技术, 2007, 33 (7): 129-133.
ZHOU Lin, ZHANG Feng, LI Qiu-hua, et al. New algorithm for random harmonic current detection using i_p-i_q without phaselock loop[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33 (7): 129-133.

收稿日期: 2009-11-10; 修回日期: 2010-01-23

作者简介:

丁菊霞 (1977-), 女, 讲师, 硕士, 主要从事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