

基于同步旋转坐标系下DFT谐波检测方法 在APF中的应用

季瑞锋, 周 明, 沈 广

(华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 针对三相有源电力滤波器(APF)选择性谐波补偿的实现问题,提出了一种基于同步旋转坐标系离散傅里叶变换(DFT)的谐波检测方法。首先,将负载电流信号从abc坐标系变换到dq坐标系;然后,对dq坐标系下的信号进行了DFT变换、解耦和反变换;再将dq坐标系下的信号反变换回abc坐标系;最后,对所提出的谐波检测方法在Matlab/Simulink环境下搭建了仿真模型。仿真及研究结果显示,该谐波检测方法具有较快的动态响应速度。

关键词: 有源电力滤波器; 选择性谐波补偿; 谐波检测; 离散傅里叶变换; 同步旋转坐标

中图分类号: TM743 文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)12-1480-05

Application of DFT-based harmonic detection method under synchronous reference frame in APF

JI Rui-feng, ZHOU Ming, SHEN Guang

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Aiming at the realization of selective harmonic compensation for three-phase active power filter(APF), harmonic detection method based on discrete Fouries transform(DFT) was presented. Firstly, sampled load current signals were transformed from abc-frame to dq-frame; then, the signals were transformed from time-domain into frequency-domain, decouple and transformed back to time domain under dq-frame; the concerned parts were inverted into abc-frame. Finally, simulation experiment has been conducted under Matlab/Simulink environment. Simulation results verify the proposed method's fast response speed.

Key words: active power filter (APF); selective harmonic compensation; harmonic detection; discrete Fouries transform (DFT); synchronous reference frame

0 引 言

并联型有源滤波器(parallel active power filter, PAPF)能够有效消除非线性负载产生的谐波电流及无功和不平衡补偿^[1-2]。目前,有源电力滤波器中的关键技术(包括控制策略、调制策略、电磁兼容和主电路拓扑)都已经得到了广泛的研究。

文献[3-4]指出,采用负载和电网电流检测方法时,如果负载中包含容性负载,由于容性负载和感性负载的谐振,使得系统在补偿谐振频率附近的谐波时出现不稳定的情况。研究者采用电网电压检测方法

时,对谐振可以起到抑制作用,但是,其补偿效果将受到电网谐波电压影响。

具有选择性谐波补偿策略的有源滤波器能够避免上述谐振问题,同时有效限制系统的输出容量,已经得到了广泛研究^[5-6]。文献[7-8]采用多dq变换检测谐波电流指令并对延时进行补偿;文献[9-12]中则直接通过控制器设计实现选择性谐波补偿,选择频率实现控制器开环高增益和闭环零相位滞后,有关文献充分证实了这一点。

研究者通过采用选择性谐波指令检测和直接控制器设计均能实现有源电力滤波器选择性谐波补偿,从而提高有源电力滤波器的性能和实用性。然而,直

接控制设计法所导致的控制器性能变换,特别是对鲁棒性的影响,还需要进一步讨论。文献[13]对适用于APF的谐波检测方法做了综合的讨论。

本研究探讨谐波检测方法,提出一种基于同步旋转坐标系DFT谐波检测方法,并与 abc 坐标下DFT谐波检测进行比较。

1 典型非线性负载谐波特性

电力系统存在大量以三相不控整流和SCR半控整流为前端电路的电力电子设备产生的谐波电流,其谐波的次数和幅值^[14-15],即电力滤波器所要抑制的主要谐波成分如下:

$$h = (6k \pm 1)f_1, k = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

$$I_h = 1/h \quad (2)$$

式中: h —谐波次数, $h=k-1$ 为负序分量, $h=k+1$ 为正序分量; f_1 —基波频率。

本研究所讨论的检测方法主要针对此类典型谐波,为便于分析,本研究将电流信号表示为如下离散域形式:

$$\begin{pmatrix} i_a(n) \\ i_b(n) \\ i_c(n) \end{pmatrix} = I_1 \cdot \begin{pmatrix} \sin(\omega \cdot n + \varphi_1) \\ \sin(\omega \cdot n - 2\pi/3 + \varphi_1) \\ \sin(\omega \cdot n + 2\pi/3 + \varphi_1) \end{pmatrix} + \sum_{h=6k \pm 1, k=1}^{\infty} I_h \cdot \begin{pmatrix} \sin(h \cdot \omega \cdot n + \varphi_h) \\ \sin(h \cdot (\omega \cdot n - 2\pi/3) + \varphi_h) \\ \sin(h \cdot (\omega \cdot n + 2\pi/3) + \varphi_h) \end{pmatrix} \quad (3)$$

2 基于DFT三相谐波检测

2.1 傅里叶变换基础

对于任一含有谐波的信号 $x(t)$,设其基波周期为 T ,频带宽度从基波角频率 $\omega \rightarrow \infty$,傅里叶变换的表达式为:

$$x(t) = \sum_{h=1}^{\infty} A_h \cdot \sin(h\omega t + \varphi_h) = \sum_{h=1}^{\infty} A_{hx} \cdot \cos(h\omega t) + \sum_{h=1}^{\infty} A_{hy} \cdot \sin(h\omega t) \quad (4)$$

其中:

$$A_{hx} = A_h \cdot \sin \varphi_h = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cdot \cos(h\omega t) \quad (5)$$

$$A_{hy} = A_h \cdot \cos \varphi_h = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cdot \sin(h\omega t) \quad (6)$$

其相应的离散变换为:

$$A_{hx} = A_h \cdot \sin \varphi_h = \frac{2}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot h \cdot n}{N}\right) \quad (7)$$

$$A_{hy} = A_h \cdot \cos \varphi_h = \frac{2}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot h \cdot n}{N}\right) \quad (8)$$

反变换为:

$$A_h = \sqrt{A_{hx}^2 + A_{hy}^2} \quad (9)$$

$$\varphi_h = \arctan(A_{hx}/A_{hy}) \quad (10)$$

式中: $x(n)$ —第 n 个点 $x(t)$ 采样值, N —基波周期内采样点数。

2.2 基于 abc 坐标下的DFT谐波检测

对于由式(3)表示三相谐波的任意一相,本研究以A相为例,可采用式(7)、式(8)进行 h 次谐波提取,并采用迭代算法(即,周期平均),如图1所示。

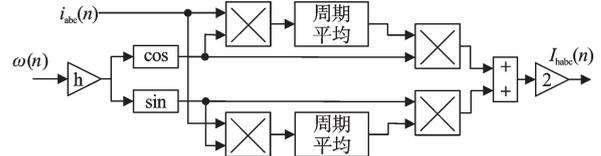


图1 abc 坐标系下基于DFT的 h 次谐波检测框图

2.3 基于 dq 坐标下的DFT谐波检测

首先,本研究将电流信号从 abc 坐标系变换到 dq 坐标系,则基波型号变为直流分量,谐波信号变为6的整数次谐波,如, abc 坐标系下5次负序和7次正序分量将耦合成6次,等。如果需要进行5次、6次分别提取需要在 dq 坐标系下进行解耦,然后再通过iDFT反变换到时域空间。

将式(3)由 abc 坐标系变换到 $\alpha\beta$ 坐标系:

$$\begin{pmatrix} i_\alpha(n) \\ i_\beta(n) \end{pmatrix} = T_{\alpha\beta} \cdot \begin{pmatrix} i_a(n) \\ i_b(n) \\ i_c(n) \end{pmatrix} = I_1 \cdot \begin{pmatrix} \sin(\omega \cdot n + \varphi_1) \\ -\cos(\omega \cdot n + \varphi_1) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sum_{h=6k-1, k=1}^{\infty} I_h \cdot \sin(h \cdot \omega \cdot n + \varphi_h) \\ \sum_{h=6k-1, k=1}^{\infty} I_h \cdot \cos(h \cdot \omega \cdot n + \varphi_h) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sum_{h=6k+1, k=1}^{\infty} I_h \cdot \sin(h \cdot \omega \cdot n + \varphi_h) \\ \sum_{h=6k-1, k=1}^{\infty} -I_h \cdot \cos(h \cdot \omega \cdot n + \varphi_h) \end{pmatrix} \quad (11)$$

其中:

$$T_{\alpha\beta} = \frac{2}{3} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{pmatrix}$$

即: $T_{\alpha\beta}$ 为Clarke变换矩阵。

再将式(11)由 $\alpha\beta$ 坐标系变换到 dq 坐标系:

$$\begin{pmatrix} i_d(n) \\ i_q(n) \end{pmatrix} = T(\omega \cdot n) \cdot \begin{pmatrix} i_\alpha(n) \\ i_\beta(n) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \varphi_1 \\ -\cos \varphi_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sum_{h=6k, k=1}^{\infty} I_{h-1} \cdot \sin(h \cdot \omega \cdot n + \varphi_{h-1}) + I_{h+1} \cdot \sin(h \cdot \omega \cdot n + \varphi_{h+1}) \\ \sum_{h=6k, k=1}^{\infty} I_{h-1} \cdot \cos(h \cdot \omega \cdot n + \varphi_{h-1}) - I_{h+1} \cdot \cos(h \cdot \omega \cdot n + \varphi_{h+1}) \end{pmatrix} \quad (12)$$

其中:

$$T(\omega \cdot n) = \begin{pmatrix} \cos \omega \cdot n & \sin \omega \cdot n \\ -\sin \omega \cdot n & \cos \omega \cdot n \end{pmatrix}$$

即: $T(\omega \cdot n)$ 为 PARK 变换矩阵。

本研究对式(12)采用式(7、8)变换,由于基波呈直流分量,谐波变为6的整数次谐波,DFT基波周期可设为 $T/6$,则:

$$\begin{aligned} I_{dhx}(k) &= I_{h-1}(k) \cdot \sin(\varphi_{h-1}) + I_{h+1}(k) \cdot \sin(\varphi_{h+1}) = \\ I_{dhx}(k-1) &+ \frac{12}{N} \cdot \cos\left(\frac{h}{6} \cdot \frac{2\pi}{N} \cdot k\right) \cdot (I_{dhx}(k) - I_{dhx}(k-N+1)) \\ I_{dhy}(k) &= I_{h-1}(k) \cdot \cos(\varphi_{h-1}) + I_{h+1}(k) \cdot \cos(\varphi_{h+1}) = \\ I_{dhy}(k-1) &+ \frac{12}{N} \cdot \sin\left(\frac{h}{6} \cdot \frac{2\pi}{N} \cdot k\right) \cdot (I_{dhy}(k) - I_{dhy}(k-N+1)) \\ I_{qhx}(k) &= I_{h-1}(k) \cdot \cos(\varphi_{h-1}) - I_{h+1}(k) \cdot \cos(\varphi_{h+1}) = \\ I_{qhx}(k-1) &+ \frac{12}{N} \cdot \cos\left(\frac{h}{6} \cdot \frac{2\pi}{N} \cdot k\right) \cdot (I_{qhx}(k) - I_{qhx}(k-N+1)) \\ I_{qhy}(k) &= -I_{h-1}(k) \cdot \sin(\varphi_{h-1}) + I_{h+1}(k) \cdot \sin(\varphi_{h+1}) = \\ I_{qhy}(k-1) &+ \frac{12}{N} \cdot \sin\left(\frac{h}{6} \cdot \frac{2\pi}{N} \cdot k\right) \cdot (I_{qhy}(k) - I_{qhy}(k-N+1)) \end{aligned}$$

由以上各式可见,经DFT变换后 $h-1$ 正序分量和 $h+1$ 负序分量耦合成 h 次谐波,如果需单独提取,可采用下式解耦:

$$I_{h-1}(n) \cdot \sin(\varphi_{h-1}) = \frac{I_{dhx}(n) - I_{qhy}(n)}{2} \quad (13)$$

$$I_{h-1}(n) \cdot \cos(\varphi_{h-1}) = \frac{I_{dhy}(n) + I_{qhx}(n)}{2} \quad (14)$$

$$I_{h+1}(n) \cdot \cos(\varphi_{h+1}) = \frac{I_{dhy}(n) - I_{qhx}(n)}{2} \quad (15)$$

$$I_{h+1}(n) \cdot \sin(\varphi_{h+1}) = \frac{I_{dhx}(n) + I_{qhy}(n)}{2} \quad (16)$$

上述方法可表述如图2所示的框图。

3 理论分析与比较

3.1 电网频率波动

采用DFT检测谐波时,采样周期应满足:

$$T = N \cdot T_s \quad (17)$$

式中: T — 基波周期, T_s — 采样周期, N — 基波周期采样点数。

当电网频率发生波动时,需通过调整采样周期保证基波周期采样点数不变,否则算法存在着频谱泄漏和栅栏现象,使检测出的谐波存在较大的误差^[16],本研究采用固定采样点以保证检测精度。

3.2 DSP运算效率估计

本研究对算法的可行性和算法效率做了一个理论比较,包括:变量存储空间大小、运算量和程序执行时间。算法基于TI TMS F2812 芯片实现,根据用户

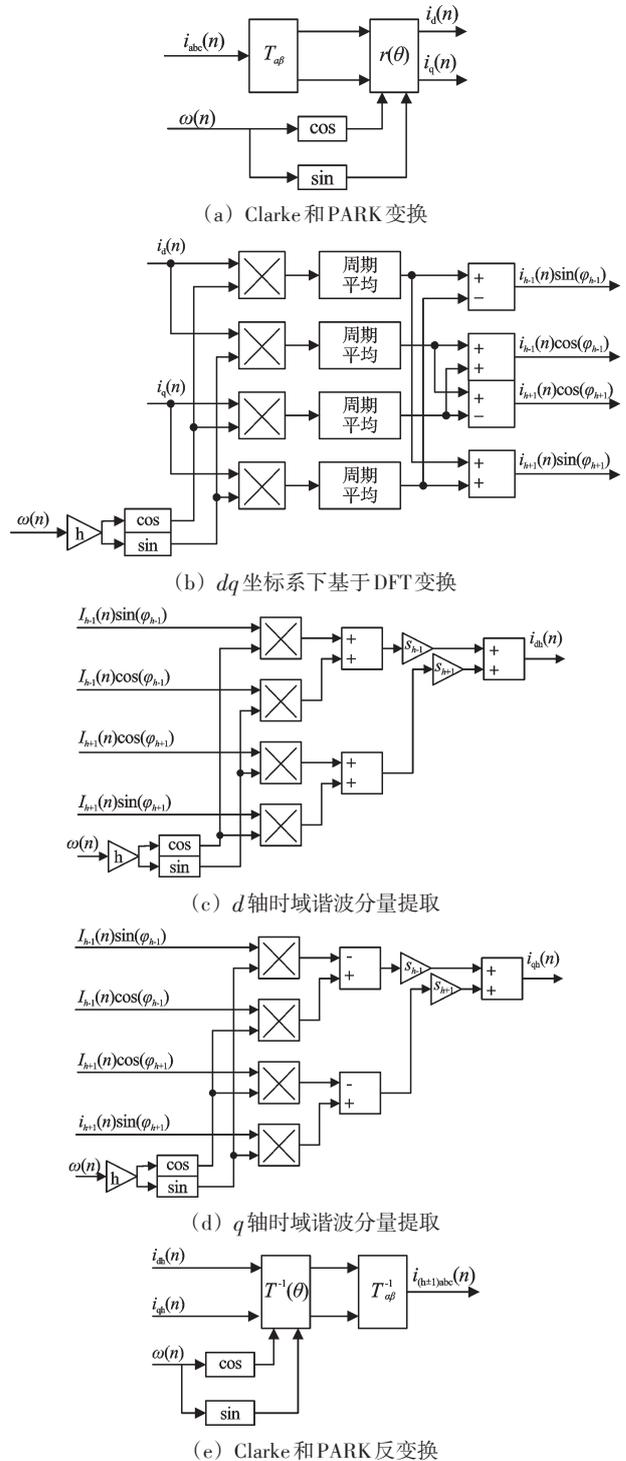


图2 dq坐标系下基于DFT的 $h \pm 1$ 次谐波检测框图

手册^[17]提供的各种运算所占CPU时间,可估计出3种算法运算时间如表1所示。

表1 两种坐标系下DFT谐波检测效率比较

| | abc 坐标系 | dq 坐标系 |
|---------------|---------|--------|
| 变量数目 | (30+6N) | 20+N/3 |
| 查表运算 | 2 | 2 |
| 乘法运算 | 21 | 10 |
| 加法运算 | 15 | 12 |
| 运算时间/ μs | 1.5 | 1.1 |

如果本研究选择开关频率为5 kHz,采用非对称规则采样,采样频率为10 kHz。则表1中基波周期采样点数 N 为200。采用 dq 坐标系下DFT谐波提取和多 dq 变换谐波法提取可节约相当程序数据存储空间。在运算时间方面, dq 坐标系下DFT谐波提升更快,更容易实现多次谐波的选择性提取。

4 仿真实验

为了验证方法的正确性,本研究针对讨论的3种检测方法,在Matlab7.1/Simulink环境下,建立了仿真模型,如图3所示,并以典型直流侧电感滤波不控整流负载电流为检测对象,进行了仿真。

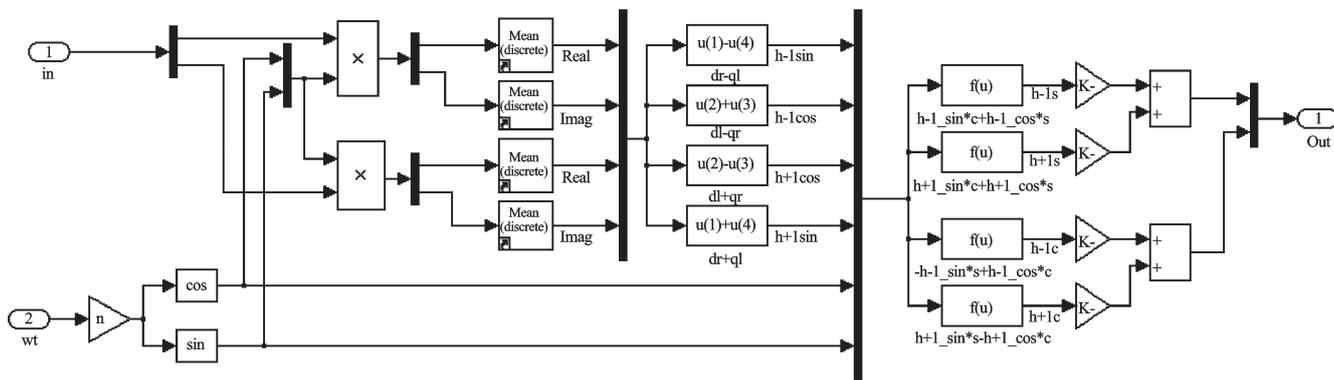
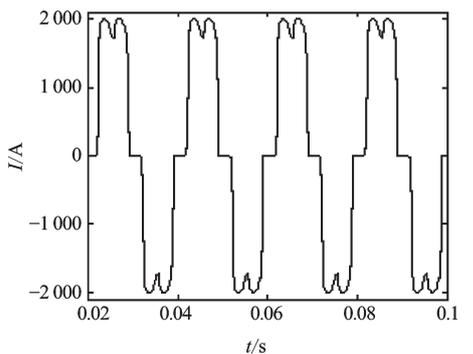
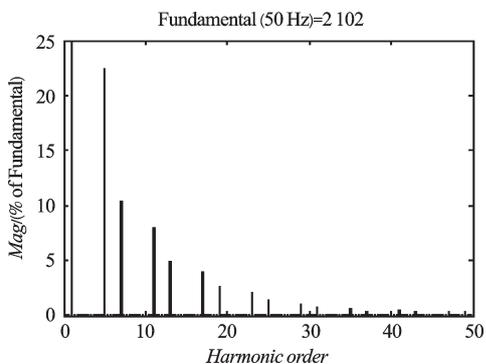


图3 基于 dq 坐标系 DFT 5次谐波检测仿真模型

负载电流波形及频谱如图4所示;在负载突变(100%~10%负载)时,不同检测方法的动态响应仿真波形如图5、图6所示。其中,基于 abc 坐标系 DFT 算法响应时间为一个基波周期;基于 dq 坐标系 DFT 算法响应时间为 $1/6$ 个基波周期。



(a) 负载电流波形



(b) 负载电流频谱

图4 被测负载电流波形及频谱

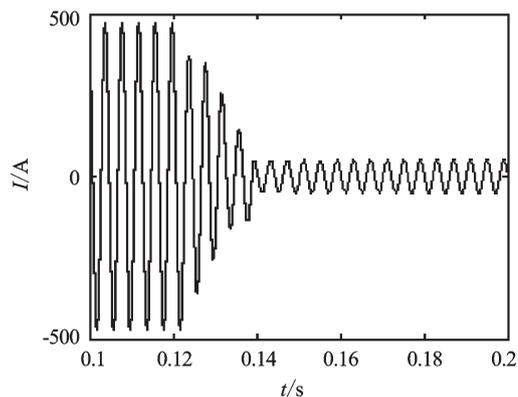


图5 基于 abc 坐标系 DFT 5次谐波检测动态波形

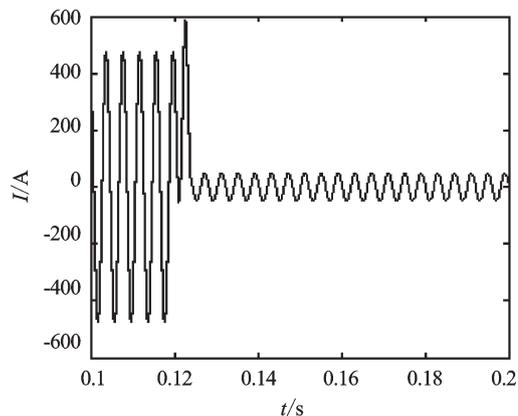


图6 基于 dq 坐标系 DFT 5次谐波检测动态波形

5 结束语

针对三相有源电力滤波器选择性谐波补偿实现,

本研究提出了一种基于同步旋转坐标系 DFT 单次谐波检测方法,并进行了理论分析和仿真验证。

研究表明,基于 dq 坐标系离散傅里叶变换谐波提取法比在 abc 坐标系下的提取方法,响应速度比以前提高了6倍,存储变量减少90%以上,更利于数字实现,仿真结果也验证了该理论分析的正确性。

参考文献(References):

- [1] TAKEDA M, IKEDA K, TOMINAGA Y. Harmonic current compensation with active filter [C]// IEEE-IAS Annual Meeting, 1987:808-815.
- [2] AKAGI H. New trends in active filters for power conditioning [J]. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 1996, 32(6):1312-1322.
- [3] AKAGI H, FUJITA H, WADA K. A shunt active filter based on voltage detection for harmonic termination of a radial power distribution line [J]. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 1999, 35(3):638-645.
- [4] AKAGI H. Control strategy and site selection of a shunt active filter for damping of harmonic propagation in power distribution systems [J]. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 1997, 12(1):354-363.
- [5] 杨秋霞, 梁雄国, 郭小强, 等. 准谐振控制器在有源电力滤波器中的应用 [J]. 电工技术学报, 2009, 24(7):171-176.
- [6] MONTEIRO L F C, ENCARNA X E. A novel selective control algorithm for the shunt active filter [C]// IPEC 2010, 2010:2288-2293.
- [7] 郭希铮, 韩强, 杨耕, 等. 可选择谐波型有源电力滤波器的闭环控制和实现 [J]. 电工技术学报, 2006, 21(9):51-56.
- [8] 王灏, 张超, 杨耕, 等. 可选择谐波型有源滤波器的检测及其闭环控制 [J]. 清华大学学报:自然科学版, 2004, 44(1):130-133.
- [9] MATTAVELLI P, TENTI P. High Performance Active Filters using Selective Harmonic Control [C]// IEEE PES Summer Meeting 2000. Seattle: [s.n.], 2000:977-982.
- [10] MATTAVELLI P, MARFAO F P. Repetitive-based control for selective harmonic compensation in active power filters [J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2004, 51(5):1018-1024.
- [11] BOJRUP M, KARLSSON P, ALAKÜLA M. A Multiple Rotating Integrator Controller for Active Filters [C]// EPE Conference, 1999:1-9.
- [12] Honeywell Int. Inc.. Three-phase active filter utilizing rotating axis transformation: US, 5526252 [P]. 1994-06-14.
- [13] ASIMINOAEI L, BLAABJERG F, HANSEN S. Detection is key - Harmonic detection methods for active power filter applications [J]. **Industry Applications Magazine**, 2007, 13(4):22-33.
- [14] 王兆安, 杨军, 刘进军, 等. 谐波抑制和无功功率补偿 [M]. 北京:机械工业出版社, 2006.
- [15] RICE D E. A detailed analysis of six-pulse converter harmonic currents [J]. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 1994, 30(2):294-304.
- [16] 薛蕙, 杨仁刚. 基于FFT的高精度谐波检测算法 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(12):106-110.
- [17] Texas Instruments. Module user's Guide C28x Foundation Software C28x IQmath Library [M]. Texas Instruments, 2009.

[编辑:张翔]

(上接第1479页)

参考文献(References):

- [1] 彭春华, 刘建业. 车辆检测传感器综述 [J]. 传感器与微系统, 2007, 26(6):29-31.
- [2] 曹光磊, 徐克宝. 基于超声探测的停车场车位引导系统的研究 [J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(4):736-738.
- [3] 李辉. 智能交通系统中基于视频的车辆检测与跟踪方法研究 [D]. 南京:华东师范大学信息科学技术学院, 2010.
- [4] 吴皓. 基于地磁的车辆检测系统和识别算法研究 [D]. 武汉:华中科技大学控制科学与工程系, 2007.
- [5] 吴晓航. 公路车辆感应线圈检测系统分析 [J]. 机电工程, 2008, 25(8):108-110.
- [6] 胡琼. 磁阻传感器在停车场车位检测中的应用 [D]. 上海:华东理工大学理学院, 2010.
- [7] 崔逊学, 赵湛, 王成. 无线传感器网络的领域应用与设计技术 [M]. 北京:国防工业出版社, 2009.
- [8] 陈强, 陶海鹏. 基于磁阻传感器的无线车辆检测器的设计 [J]. 传感器与微系统, 2011, 30(6):82-83.
- [9] 翟雷, 刘盛德. ZigBee 技术及应用 [M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2007.
- [10] 北京奥尔斯电子科技有限公司. OVRs-WSN-IOT 物联网创新开发套件实验指导书 [M]. 北京:北京奥尔斯电子科技有限公司, 2011.
- [11] 张任, 王坚锋, 严海, 等. 基于 ZigBee 的无线传感网络节点设计 [J]. 机电工程, 2008, 25(8):18-21.
- [12] 乔建忠, 李艳. 一种各向异性磁阻传感器在车辆探测中的应用 [J]. 传感器与微系统, 2009, 28(5):106-108.
- [13] 钱正洪, 白茹, 黄春奎, 等. 先进磁电子材料和器件 [J]. 仪表技术与传感器, 2009(z1):96-101.
- [14] 马飞. 基于 AMR 传感器的车辆检测系统设计 [D]. 太原:太原理工大学物理与光电工程系, 2011:13-16.
- [15] HUI Hong-Zhong, BACKENS J, SONG Min. A High-Performance Vehicle Detection Algorithm for Wireless Sensor Parking Systems [C]// 2009 Fifth International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks. Fujian, China, 2009. Portugal: [s.n.], 2009:327-333.
- [16] 高效岳. 如何选购电池. 电池工业 [J]. 2005, 10(3):190-192.
- [17] YORK I, AL-KATIB M. Methods of traffic signal control and signal timings at high speed sites [C]// Tenth International conference on Road Transport Information and Control, London, 2000. Portugal: [s.n.], 2000:167-171.
- [18] 李文仲, 段朝玉. ZigBee 无线网络技术入门与实战 [M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2007.

[编辑:李辉]