

改进的 FBD 法在电流实时检测中应用

康 静¹, 郑建勇¹, 饶 莹², 曾 伟¹, 袁 涛¹

(1. 东南大学 电气工程系, 江苏 南京 210096;

2. 南京供电局, 江苏 南京 210008)

摘要: 为了使有源滤波器快速有效地检测出三相四线制电力系统中的谐波和无功电流, 提出了一种基于 FBD(Fryze-Buchholz-Dpenbrock)法的改进的电流检测方法。该方法利用抽样降低系统计算量, 并用一个陷波滤波器和一个高截止频率的低通滤波器串联代替一个低截止频率的低通滤波器提取直流分量, 提高了检测方法的实时性。该方法可以在系统电压畸变的情况下检测出三相电流的基波正序有功电流分量、基波正序无功电流分量、不对称电流及谐波电流分量。Matlab 仿真结果表明了该方法的正确性和有效性。

关键词: 电流检测; 三相四线; FBD 法; 抽样

中图分类号: TM 93

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)05-0077-04

0 引言

电力电子装置的广泛应用使得电网的谐波问题日益严重。目前, 应用最广的谐波检测算法是 20 世纪 80 年代初日本学者 H.Akagi 等人提出的三相瞬时无功率理论^[1-2]。该方法虽然解决了以前检测方法的一些缺点, 但同时仍存在一些不足^[3]。

FBD(Fryze-Buchholz-Dpenbrock)法^[4]是近些年国外学者提出的一种新的时域检测方法。该方法物理意义明确、实时性好、适用范围广^[5-7]。在 FBD 法中, 影响实时性的一个重要因素是低通滤波器, 当其截止频率较低时系统的实时性会变差。现对传统的 FBD 法进行改进: 采用滤波器串联的方法解决低通滤波器截止频率低带来的延时问题; 对实时数据进行抽样来降低系统的运算量, 避免数字滤波器

计算量大的缺点。改进后的检测方法可以快速方便地检测出谐波和无功电流。Matlab 仿真结果证明了该方法的有效性。

1 FBD 法原理

FBD 法的基本思想^[8]是把实际电路中的各相负载等效为串联在各相的等值电导, 电路中的功率都消耗在这个等效电导上, 没有其他能量损失。根据等效电导对电流分解, 可计算出需要补偿的电流分量。FBD 法电流检测方法原理图如图 1 所示。

图 1 中, a 相电压经过锁相环(PLL)后得到三相参考电压, 它们分别与三相电流相乘, 得到参考功率, 图中 $2/3$ 为三相参考电压平方和, 参考功率除以参考电压平方和为等效电导, 经过低通滤波器(LPF), 得到其直流分量 G_p , 再分别与三相参考电压相乘得三相基波正序电流 i_{ap} 、 i_{bp} 、 i_{cp} 。由 i_a 、 i_b 、 i_c 减去

收稿日期: 2006-05-22; 修回日期: 2007-01-12

Communication network of digital substation and improvement of real-time performance

LI Qiang, DOU Xiao-bo, WU Zai-jun, HU Min-qiang

(Department of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The CNDS(Communication Networks of Digital Substation) is quite different from that of conventional substation in structure, functions, performance, essentiality and so on. To meet the requirements of IEC 61850 for functional hierarchy, three types of CNDS network structures are proposed based on its clarified functional targets: point-to-point/multi points at process level, bus at process level and internal unique network. The first two types are easier to be realized, while the unique network in whole substation, with highly shared information, will be the final structure of CNDS. Based on the analysis of Ethernet media access control, measures to improve its real-time performance are suggested, some of which are applicable for CNDS. The partition method for the broadcasting domain of CNDS is discussed.

Key words: digital substation; communication network; network structure; real-time performance; electronic current transducer; electronic voltage transducer

i_{alp} 、 i_{blp} 、 i_{clp} 分别得三相谐波和无功电流分量。

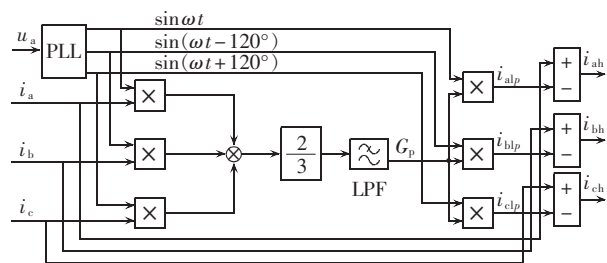


图 1 电流检测原理图

Fig.1 Schematic diagram of current detection

在电源电压波形畸变严重或干扰较强时,利用锁相环生成与电压同相位的参考电压波形代替电压进行运算,检测过程中只包含电压的相位信息而不受幅值干扰,可得到理想的检测效果^[9]。

2 FBD 法的改进

改进后的电流检测原理图如图 2 所示。图中 BSF 表示带阻滤波器(陷波滤波器)。

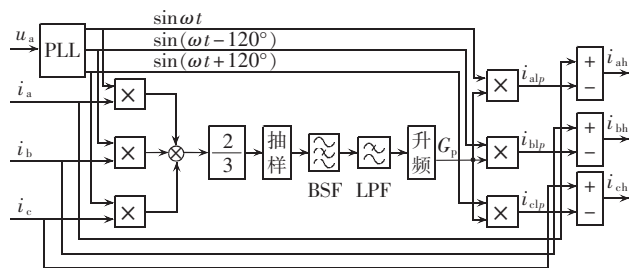


图 2 改进后的电流检测原理图

Fig.2 Schematic diagram of improved current detection

2.1 抽样方法

为保证系统检测和控制精度,应尽量保存电网中电压和电流所含的信息,本系统中输入信号采样频率定为 12 800 Hz,即电压和电流的 A/D 频率为 12 800 Hz。高采样频率增加了系统硬件和软件开销,为减轻 CPU 负担,对数据进行抽样。基于抽样的检测方法原理如图 2 所示。抽样是为了方便提取输入信号的直流量,因此要兼顾准确性和实时性。抽样后的滤波计算量极大下降。

输入信号频谱可分为有效信号频谱和无效信号频谱^[10]。只要保证有效信号频谱不产生混叠,就可从采样信号中恢复被测的有效信号。设第 1 次采样频率即 A/D 采样频率为 f_1 ,每个基波周期采样 N_1 个点;抽样频率为 f_2 ,每个基波周期采样 N_2 个点;电流中所含的最高谐波次数为 N_h ,基波频率为 f_0 。电流中基波正序分量经过前面环节后求等效电导运算而转化为直流量,要保证频谱在直流处不产生混叠,最小采样频率^[11] $f = (N_h + 1 + n)f_0 = (N_h + 1 + 0)f_0 = (N_h + 1)f_0$,其中 $N_h = N_1/4 - 1$, n 表示谐波次数,此处为直流,即 $n = 0$,从而可得抽样的最小频率为 $N_1 f_0 / 4$ 。为了提高系统的补偿性能,此处 $N_h = 63$,

$N_1 = 256$, f_2 取最小采样频率 3 200 Hz,抽样每周周期采样点数为 64。

为保证检测结果的精度,系统在低通滤波后加入插值环节,将滤波后的频率升为第 1 次采样频率。可通过如下方法实现插值:在第 n 和 $n-1$ 时刻间等时间间隔插入 3 个值,使这 3 个值的大小和第 n 时刻值相同,即令各点保持 4 个第 1 次采样周期时间。

基于抽样的检测方法将一个基波周期的采样点在有效信号频谱不产生混叠的前提下减少到原来的 $1/4$,从而滤波环节的运算量减少 $3/4$,软件开销大幅降低。同时,系统的响应速度明显提高。仿真结果证明了抽样方法的可行性和快速性。

2.2 串联滤波器

为了提取等效电导中的直流量,需要用到数字低通滤波器。由于提取的信号是直流量,对相位要求不高,就选用 IIR 型即无限冲激响应滤波器^[12-13]。IIR 滤波器与 FIR(有限冲激响应)滤波器相比,其优点是实现阶数低^[14]。对于实现同样功能的数字滤波器,FIR 型滤波器阶数一般比 IIR 滤波器高 5~10 倍。此外,IIR 数字滤波器的系统函数 $H(Z)$ 与模拟滤波器的传递函数具有类似的有理函数形式,因此,可由模拟滤波器传递函数通过某种变换得到数字滤波器的系统函数,例如冲激响应不变法、双线性变换法等成熟算法,使 IIR 数字滤波器设计变得简单。文中的滤波器均系 IIR 型数字滤波器。

影响数字低通滤波器的主要因素有采样频率和截止频率^[15]。系统的采样频率已定,为 12 800 Hz,抽样后的频率为 3 200 Hz。传统的检测方法中为了提取直流量将低通滤波器的截止频率设为 40 Hz、20 Hz 甚至更低。截止频率 f_c 越低,检测精度越高,但延时加大导致动态响应过程变慢。 f_c 变大,延时变小加快了动态响应过程,但容易使检测波形失真,影响电流检测精度。因此,选取 f_c 时要兼顾动态响应过程和检测精度要求。

采用一个陷波滤波器和一个高截止频率的低通滤波器串联的方式提取直流量。由于 Cheby 滤波器衰减性能比较好,陷波滤波器以 Cheby I 型低通滤波器为原型进行设计,由等效电导公式可得,在等效电导中, n 次谐波分量的正序分量变为 $n-1$ 次分量; n 次谐波分量的负序分量变为 $n+1$ 次分量,考虑到不对称 3 次谐波的正序分量经过运算后频率变为 100 Hz,此陷波滤波器的中心频率设为 100 Hz,通带波纹大小 $\delta = 1$ dB,带阻宽度为 300 Hz,采样频率为 3 200 Hz。利用 Filter Solution 软件设计该陷波滤波器的传递函数为

$$H_{\text{BSF}}(Z) = \frac{0.8662 - 1.699Z^{-1} + 0.8662Z^{-2}}{1 - 1.699Z^{-1} + 0.7325Z^{-2}}$$

陷波滤波器的中心频率为 100 Hz,带阻宽度为 300 Hz,可以滤除 100 Hz 信号,50 Hz 的信号分量衰减也超过 3 dB,因此其后串联的低通滤波器截止频

率可以提高到 100 Hz 以上。因为 Butterworth 滤波器具有阶跃响应速度快且超调小、频域幅值响应最平坦等优点,设计低通滤波器原型为 Butterworth 型,截止频率为 120 Hz。其传递函数表达式为

$$H_{LPF}(Z) = \frac{0.01186 Z^{-2} + 0.02372 Z^{-1} + 0.01186}{Z^2 - 1.669 Z^{-1} + 0.7166}$$

将陷波滤波器和低通滤波器级联,传递函数为

$$H(Z) = H_{BSF}(Z) \times H_{LPF}(Z) = \frac{0.8662 - 1.699 Z^{-1} + 0.8662 Z^{-2}}{1 - 1.699 Z^{-1} + 0.7325 Z^{-2}} \times \frac{0.01186 Z^{-2} + 0.02372 Z^{-1} + 0.01186}{Z^2 - 1.669 Z^{-1} + 0.7166}$$

仿真结果可以证明一个陷波滤波器和截止频率高的低通滤波器串联得到的滤波器与一个截止频率低的低通滤波器相比,系统响应速度得以大幅度提高。

3 仿真试验结果

因为改进后的检测方法检测出的基波正序电流对应理想补偿后的电网中的电流情况,因此,可以分析出以该方法检测电路所得电流为指令电流的有源电力滤波器的补偿效果。

首先,将该方法用于三相对称系统。由 Matlab/Simulink 库中的元件生成三相对称负载电流如下:

$$\begin{aligned} i_a &= 140 \sin \omega t + 16 \sin(5\omega t + 5.7^\circ) + 13 \sin(7\omega t + 17.2^\circ) + 2 \sin(11\omega t + 11.5^\circ) \\ i_b &= 140 \sin(\omega t + 240^\circ) + 16 \sin(5\omega t + 125.7^\circ) + 13 \sin(7\omega t + 257.2^\circ) + 2 \sin(11\omega t + 131.5^\circ) \\ i_c &= 140 \sin(\omega t + 120^\circ) + 16 \sin(5\omega t + 245.7^\circ) + 13 \sin(7\omega t + 137.2^\circ) + 2 \sin(11\omega t + 251.5^\circ) \end{aligned}$$

图 3 是用 2 个滤波器串联的方法和用 1 个低通滤波器方法分别检测 a 相基波正序有功电流的结果比较(图中虚线表示标准参考电流 i_{ref} ,实线表示实测电流 i_{tes} ;下同)。仿真结果说明利用一个陷波滤波器和一个截止频率高的低通滤波器代替一个截止频率低的低通滤波器,可以明显改善系统的响应速度,使系统快速稳定下来。

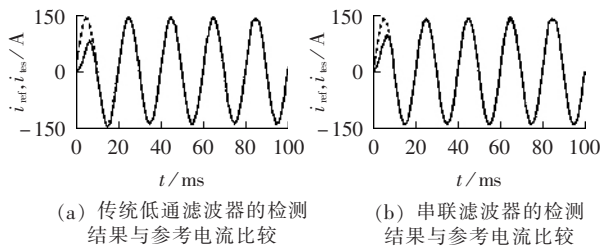


图 3 改进滤波器前、后检测电流波形比较

Fig.3 Detected currents before and after filter improvement

图 4 是分别用基于抽样的方法与只有 1 次采样的方法进行检测时的结果比较。仿真结果说明改进后的方法与传统方法相比,系统响应速度明显提高。图 5 是将采样频率和串联滤波器综合改进后的检测方法与传统方法的仿真结果比较。

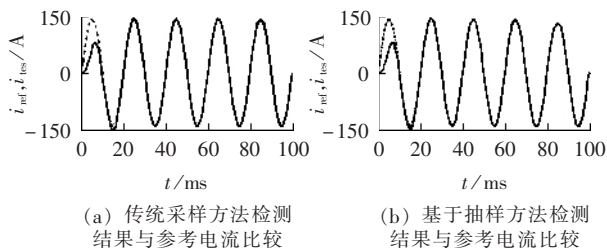


图 4 基于抽样检测方法和传统方法电流波形比较

Fig.4 Detected currents with and without sampling improvement

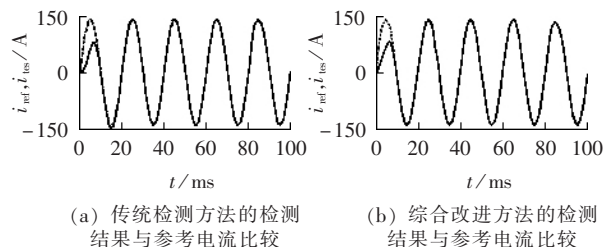


图 5 滤波器和抽样综合改进后的检测方法和传统方法电流波形比较

Fig.5 Detected currents with and without improvements of filter and sampling

只要在对称电流分量中加入 3 次谐波,幅值为 20 A,初相角为 28.6° ,就构成不对称三相系统。图 6 为将改进后的检测方法和传统方法应用于不对称系统的仿真结果比较(图(b)实线为补偿前电流 i_{fN} ,虚线为补偿后电流 i_c)。

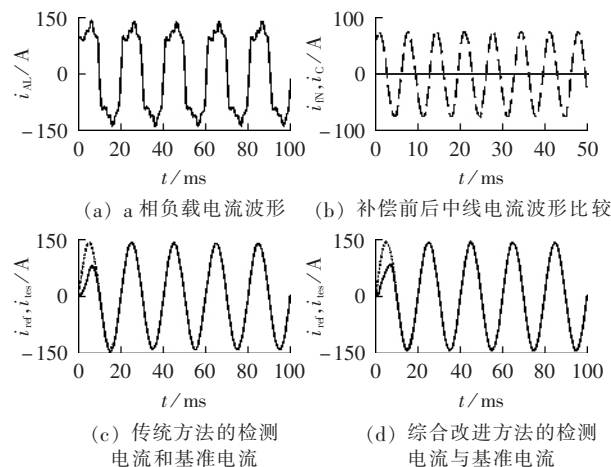


图 6 不对称三相系统中改进后的检测方法和传统方法电流波形比较

Fig.6 Detected currents with and without improvements in asymmetric systems

4 结论

提出了一种基于 FBD 法的改进的电流检测方法,该方法利用抽样环节克服了传统的离散谐波检测系统实时性差、计算量大的问题,降低了系统软件开销;并用一个陷波滤波器和一个高截止频率的低通滤波器串联代替一个低截止频率的低通滤波器,使系统实时性明显提高。该方法能够快速有效地检测出谐波电流、基波负序和零序电流。仿真结果表明了该检测方法的快速性和准确性。

参考文献:

- [1] 卓放, 杨君, 王兆安, 等. 用于三相四线制系统的有源电力滤波器研究[J]. 西安交通大学学报, 2000, 34(3): 87-90.
ZHUO Fang, YANG Jun, WANG Zhao-an, et al. The study on active power filter in application of three-phase four-wire power systems [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2000, 34(3): 87-90.
- [2] AKAGI H, KANAZAWA Y, NABAE A. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components[J]. IEEE Trans on Industry Application, 1984, 20(3): 625-630.
- [3] 康静, 郑建勇, 曾伟, 等. FBD 法在三相四线制系统电流实时检测中的应用[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(8): 36-39.
KANG Jing, ZHENG Jian-yong, ZENG Wei, et al. Application of FBD - method to real-time current detection in three-phase four-wire system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(8): 36-39.
- [4] DEPNBROCK M, STAUDT V. The FBD - method as tool for compensating total non-active currents[J]. IEEE Trans Power System, 1993, 8(2): 320-324.
- [5] DEPNBROCK M. The FBD-method, a generally applicable tool for analyzing power relations[J]. IEEE Trans Power System, 1993, 8(2): 381-387.
- [6] 孙卓, 姜新建, 朱东起. FBD 法及其在牵引供电系统中的应用[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2003, 43(3): 361-365.
SUN Zhuo, JIANG Xin-jian, ZHU Dong-qi. FBD-method and its application in traction power systems[J]. J Tsinghua Univ: Sci and Tech, 2003, 43(3): 361-365.
- [7] 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.
- [8] DEPNBROCK M, STAUDT V, WREDE H. A concise assessment of original and modified instantaneous power theory applied to four-wire systems[C]//Power Conversion Conference, 2002. Osaka: PCC, 2002: 60-67.
- [9] 陈峻岭, 姜新建, 孙卓, 等. 基于 FBD 法的三相电力系统电流检测方法的应用[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(24): 23-27.
CHEN Jun-ling, JIANG Xin-jian, SUN Zhuo, et al. Current detections for three-phase power system based on FBD method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(24): 23-27.
- [10] 郑瑞晨, 魏志轩, 张俊敏, 等. 基于重采样和均值滤波的谐波检测 $i_p - i_q$ 法的动态性能分析[J]. 电测与仪表, 2005, 42(474): 16-18, 65.
ZHENG Rui-chen, WEI Zhi-xuan, ZHANG Jun-min, et al. The dynamic performance analysis for the harmonic detection $i_p - i_q$ method based on re-sampling and mean filter [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2005, 42(474): 16-18, 65.
- [11] 胡广书. 数字信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [12] 饶志强, 叶念渝. FIR 和 IIR 数字滤波器的探讨与实现[J]. 计算机与数字工程, 2005, 33(7): 143-146.
RAO Zhi-qiang, YE Nian-yu. Inquisition and realization of digital wave filter based on FIR DF and IIR DF [J]. Computer and Digital Engineering, 2005, 33(7): 143-146.
- [13] 王群, 姚为正, 王兆安. 低通滤波器对谐波检测电路的影响[J]. 西安交通大学学报, 1999, 33(4): 5-8.
WANG Qun, YAO Wei-zheng, WANG Zhao-an. Effect of low pass filter on harmonics detection circuit [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1999, 33(4): 5-8.
- [14] 张晓光, 徐钊. IIR 数字滤波器的优化设计和 DSP 实现[J]. 电子工程师, 2006, 32(3): 37-39.
ZHANG Xiao-guang, XU Zhao. Optimized design of IIR digital filter and its realization with DSP [J]. Electronic Engineer, 2006, 32(3): 37-39.
- [15] 耿云玲, 王群. 单相电路的一种谐波和无功电流实时检测方法[J]. 国防科技大学学报, 2000, 22(4): 111-115.
GENG Yun-Ling, WANG Qun. Real time detection approach of harmonic and reactive currents for single-phase circuit [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2000, 22(4): 111-115.
- [16] 周志宇, 李裕能, 郭松梅, 等. 基于 DSP 的同步交流采样技术[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(5): 57-60.
ZHOU Zhi-yu, LI Yu-neng, GUO Song-mei, et al. Synchronous AC sampling technologies based on DSP [J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(5): 57-60.

(责任编辑: 汪仪珍)

作者简介:

康 静(1980-), 女, 河北深州人, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动(E-mail: jkang568@163.com);

郑建勇(1966-), 男, 江苏南京人, 系副主任, 教授, 研究方向为电力电子与电力传动。

Application of improved FBD method in real-time current detection

KANG Jing¹, ZHENG Jian-yong¹, RAO Ying², ZENG Wei¹, YUAN Tao¹

(1. Electrical Engineering Department, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210008, China)

Abstract: An improved FBD(Fryze - Buchholz - Dpenbrock) method is presented for the quick and effective detection of harmonic and reactive current of APF(Active Power Filter) in 3-phase 4-wire power system. Sampling is used to reduce the calculation and a trap filter in series with a low pass filter with higher cut-off frequency is designed to extract the DC component instead of a low pass filter with low cut-off frequency, improving the real-time performance of current detection. The fundamental positive - sequence active and reactive currents, unsymmetrical current and harmonic current can be detected in case of voltage distortion. Simulations with Matlab prove its correctness and effectiveness.

Key words: current detection; three-phase four-wire; FBD-method; sampling