

FBD 法在三相四线制系统 电流实时检测中应用

康 静,郑建勇,曾 伟,袁 涛

(东南大学 电气工程系,江苏 南京 210096)

摘要: 为了快速、有效地检测出三相四线制电力系统中的谐波、负序和零序电流,提出了一种基于 FBD 法的电流实时检测方法。该方法的关键是利用参考电压进行投影变换,利用参考电压和三相电流求得电路等效电导,再利用等效电导求得指令电流,从而使检出电流与参考电压波形相位保持一致,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、无功电流分量,不对称电流以及谐波电流分量,拓展了 FBD 法的应用范围。与基于瞬时无功功率理论的电流检测方法相比,该方法没有复杂的 Park 变换和 dq 变换,可以更加快速有效地进行电流实时检测。仿真结果表明了该电流检测方法的正确性和有效性。

关键词: 有源滤波器; 电流检测; 三相四线; FBD 法

中图分类号: TM 93

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)08-0036-04

0 引言

近年来,各种电力电子装置的大量应用使得电网的谐波污染日益严重,采用有源电力滤波器进行电流补偿是抑制谐波的有效方法。在有源电力滤波器中,谐波电流检测是决定其补偿性能好坏的重要环节。目前,应用最广泛的检测算法是由 H.Akagi 等人提出的三相瞬时无功功率理论^[1]。该方法与基于傅里叶级数的实时检测法^[2]相比,提高了检测方法的快速性,但其中包含了 Park 变换、 dq 变换及其反变换,算法仍比较复杂。

FBD 法是时域中的一种算法,其基本思想由德国学者 S.Fryze 于 1932 年提出,后经 F.Buchholz 和 M.Dpenbrock 等人不断改进、拓展、修正,逐渐形成体系,因此该方法以这 3 人命名,称为 FBD 法。该方法物理意义明确,实时性好,适用于单相系统和多相系统^[3-4],既可以应用于牵引供电系统^[5],也可以对电气化铁路中的有害电流进行检测^[6]。目前,该方法还处于理论研究阶段,暂未得到广泛应用。文献^[7]证明了三相瞬时无功理论是 FBD 法的特例。

本文提出的基于 FBD 法的电流实时检测方法可以快速方便地检测出基波正序有功和无功电流,并且可以利用滑动窗口法代替低通滤波器,提高了检测方法的快速性。

1 FBD 法原理

FBD 法的基本思想是:把实际电路中的各相负载等效为串联在各相的等值的电导,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 法等效电路如图 1 所示。

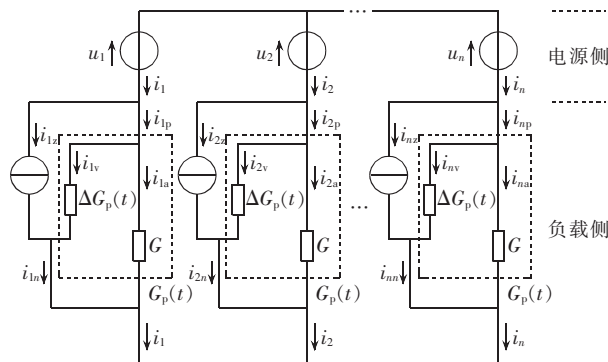


图 1 FBD 法 n 相电路等效图

Fig.1 The n -phase equivalent circuit with FBD method

令系统电压矢量为 $\mathbf{u} = [u_1, u_2, \dots, u_n]^T$, 系统电流矢量为 $\mathbf{i} = [i_1, i_2, \dots, i_n]^T$, 各矢量中的元素分别为各相电压、电流瞬时值。

如图 1 所示,每相电流由 3 部分组成:

$$i_k = i_{ka} + i_{kv} + i_{kz} \quad k=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中 i_{ka} 、 i_{kv} 分别为等效电流和波动电流,它们的和称为功率电流 i_{kp} ,其与电压作用产生瞬时功率;剩下的电流分量 i_{kz} 称为零功率电流。

由于 i_p 与 $\mathbf{u}$ 共同作用产生的瞬时功率等于电路中的瞬时总功率,即

$$\langle \mathbf{u}, \mathbf{i}_p \rangle = \sum_{k=1}^n u_k i_{kp} = \sum_{k=1}^n u_k i_k = \langle \mathbf{u}, \mathbf{i} \rangle \quad (2)$$

因此,零功率电流对瞬时总功率没有贡献:

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{u}, \mathbf{i}_z \rangle &= \sum_{k=1}^n u_k i_{kz} = \sum_{k=1}^n u_k (i_k - i_{kp}) = \\ &= \sum_{k=1}^n u_k i_k - \sum_{k=1}^n u_k i_{kp} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

现从电导和电压的角度定义各电流分量。

等效电导为

$$G_p(t) = \frac{\langle \mathbf{u}, \mathbf{i} \rangle}{\langle \mathbf{u}, \mathbf{u} \rangle} = \frac{P_\Sigma(t)}{\|\mathbf{u}\|^2} \quad (4)$$

$G_p(t)$ 与图 1 中方框里的内容相对应, 由图可得: $G_p(t) = G + \Delta G_p(t)$, 其中, G 是等效电导中的线性部分, 即直流分量

$$G = \left(\frac{P_\Sigma(t)}{\|\mathbf{u}\|^2} \right) \quad (5)$$

$\Delta G_p(t)$ 是等效电导中的非线性部分, 可知:

$$\Delta G_p(t) = G_p(t) - G \quad (6)$$

各电流分量定义为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{i}_p \\ \mathbf{i}_a \\ \mathbf{i}_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_p(t) \\ G \\ \Delta G_p(t) \end{bmatrix} \mathbf{u} \quad (7)$$

2 电流实时检测方法

2.1 检测方法原理

本文提出的电流实时检测方法, 不需要进行复杂的矩阵变换, 可以直接检测出基波正序有功和无功电流分量。检测方法原理图如图 2 所示。

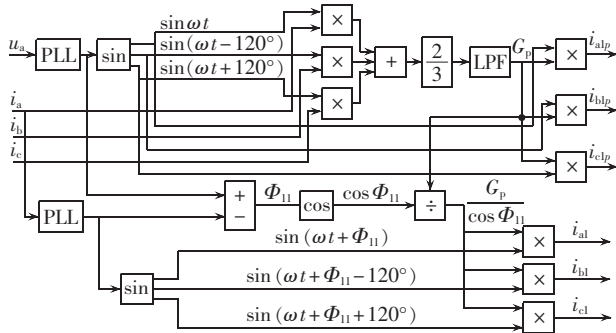


图 2 电流检测原理图

Fig.2 Principle 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(PLL)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, 可以得到理想的检测效果^[6]。

令三相参考电压为

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \omega t \\ \sin(\omega t - 120^\circ) \\ \sin(\omega t + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (8)$$

三相四线制不对称系统中电流包含正序、负序和零序电流, 分别用 I_{1n} 、 I_{2n} 、 I_{0n} 表示:

$$\begin{aligned} i_a &= \sum_{n=1}^{\infty} [I_{1n} \sin(n\omega t + \Phi_{1n}) + I_{2n} \sin(n\omega t + \Phi_{2n}) + I_{0n} \sin(n\omega t + \Phi_{0n})] \\ i_b &= \sum_{n=1}^{\infty} [I_{1n} \sin(n\omega t + \Phi_{1n} - 120^\circ) + I_{2n} \sin(n\omega t + \Phi_{2n} + 120^\circ) + I_{0n} \sin(n\omega t + \Phi_{0n})] \\ i_c &= \sum_{n=1}^{\infty} [I_{1n} \sin(n\omega t + \Phi_{1n} + 120^\circ) + I_{2n} \sin(n\omega t + \Phi_{2n} - 120^\circ) + I_{0n} \sin(n\omega t + \Phi_{0n})] \end{aligned} \quad (9)$$

从而可得三相瞬时等效电导为

$$G_p(t) = \sum_{n=1}^{\infty} [I_{1n} \cos((n-1)\omega t + \Phi_{1n}) - I_{2n} \cos((n+1)\omega t + \Phi_{2n})] \quad (10)$$

将其经过低通滤波器(LPF)后为

$$G_p = \overline{G_p(t)} = I_{11} \cos \Phi_{11} \quad (11)$$

上式中, Φ_{11} 为 a 相电压和基波正序电流的夹角, 只要利用锁相环得到电压和电流的相位, 然后相减即可得到。再通过查表法求该相位差的余弦值, 经过除法器后得到的是基波正序电流的幅值, 再与其相位相乘, 结果为基波正序电流分量。

$$i_{alp} = I_{11} \sin(\omega t + \Phi_{11}) \quad (12)$$

同理, 可以得到 b、c 相电流的基波正序分量。

若要得到三相基波正序有功电流分量, 只需将低通滤波器的输出乘以同相的参考电压即可。a 相基波正序有功电流分量为

$$i_{alp} = G_p e_a = I_{11} \sin \omega t \cos \Phi_{11} \quad (13)$$

基波正序无功电流可以由基波正序电流减去基波正序有功电流得到。

$$i_{alq} = I_{11} \cos \omega t \sin \Phi_{11} \quad (14)$$

同理, 可以得到 b、c 相电流的基波正序有功分量和无功分量。

当有源电力滤波器需要补偿系统中的谐波、负序和零序电流分量时, 只要用负载电流减去三相基波正序电流所得结果作为补偿指令电流即可。由原理图及以上分析可以看出, 该方法计算比较简单, 仿真结果可证明其正确性。

2.2 电流锁相环

电流锁相环结构原理图如图 3 所示。



图 3 电流锁相环结构原理图

Fig.3 Structure of the current PLL

电流信号经过电流互感器后变为电压信号, 然后经过隔直、限幅和滤波整形环节, 整形后的信号加至锁相环芯片作为输入信号。锁相环芯片输出连接 N 分频器, 从而实现对电流一个周期相位的 N 点采样。计数器每增加 1 个单位, 电流相位就增加 $2\pi/N$ 。这样, 根据整形输出信号过零点时的计数值和当前计数值之差就可得到电流此时此刻的相位。

2.3 滑动窗口法

为提高检测方法的计算效率, 改善其实时性, 可用一种基于滑动时间窗口的实时方法提取直流分量代替低通滤波器^[8]。该方法以时间轴上任意时刻 t 为观察点, 并在时间轴上截取 $[t-T, t]$ 时间段作为观察对象, 实时地计算输入信号直流分量, 其中 T 为观察周期。由式(10)可见, 等效电导中除基波正序分量, 其他分量在 1 个基波周期中的积分全部为零, 积分并取平均值后的结果为等效电导的直流分量, 即

$$G_p = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t G_p(\tau) d\tau \quad (15)$$

由于数据的分析处理是在微机内部进行的,所以需将模拟量进行离散化处理,从而有

$$G_p(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=k-N+1}^k G(i) = G_p(k-1) + \frac{1}{N} [G(k) - G(k-N)] \quad (16)$$

该方法在系统负载功率波动较小时可以实时准确地提取出输入信号的直流分量;当系统负载功率发生阶跃变化时,可以在 1 个工频周期内实现对信号的准确跟踪。

3 FBD 法和 i_p-i_q 法的比较

目前,在各种电流检测方法中, i_p-i_q 法因其延时小、实时性好等特点占据着主要地位。现将本文提出的检测方法与 i_p-i_q 法相比,以此说明该检测算法的特点。

3.1 计算量

i_p-i_q 检测方法中存在 Park 变换、 dq 变换及其反变换,算法相当复杂,且需要较多的存储单元,对硬件要求较高。 i_p-i_q 法中的 α 、 β 轴在电力系统中没有明确的意义,因此 Park 变换的意义也不明确。此外, i_p-i_q 法是针对三相三线制系统提出的,对于单相电路,必须首先将单相电路电流分解,然后再构造基于瞬时无功功率理论的三相电流的谐波检测电路,最后通过计算得到实际存在的那一相电路的谐波分量,算法比三相电路还复杂。

FBD 法中各参量物理意义明确,易于理解。该检测方法中没有复杂的 Park 变换、 dq 变换及其反变换过程,公式中正、余弦量均可通过查询存放在 EPROM 中的正、余弦表格得到^[9],算法简单、实时性好。FBD 法应用范围不局限于三相系统,适用于从单相到多相电路。在进行单相电路电流实时检测时,算法比三相电路更加简单。

3.2 实时性

基于瞬时无功功率理论的 i_p-i_q 检测方法具有较好的实时性,但该方法因谐波源不同和采用的滤波器不同而有不同的延时。负载不对称时其延时接近于 1 个工频周期;当负载为三相整流装置时检测电路的延时最小,但也达到 1/6 工频周期,且由于电路结构复杂,用模拟电路实现难度较大。

本文提出的检测方法中,用到了电流互感器,会给检测方法带来一定的延时。电流互感器一次侧电压、电流和二次侧电压、电流波形之间存在一定的相移,较大时可达 $1^\circ \sim 3^\circ$,即在工频 50 Hz 情况下,二次侧电压、电流波形大约滞后一次侧电压、电流波形 $56 \sim 167 \mu\text{s}$ ^[10]。但这种滞后可以通过对电流互感器进行相位误差补偿得以消除。

在 FBD 法中,为了减小低通滤波器带来的延时,可以改用滑动时间窗口法提取直流分量。这样,只需要一点的数据就可以计算出输入信号的直流分

量,它在时延理论上只需要 1 个采样周期。因此 1 个工频周期内,采样点数越多,延时越小,检测方法的实时性越好。

4 仿真分析

因为 FBD 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 FBD 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。

对于不同特性负载产生的谐波电流,本文介绍的检测方法都能有效地工作,如图 4~6 所示。

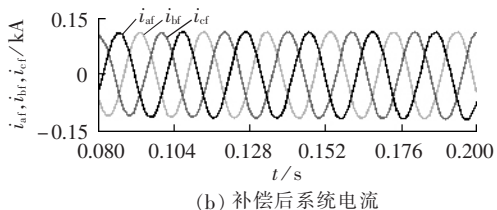
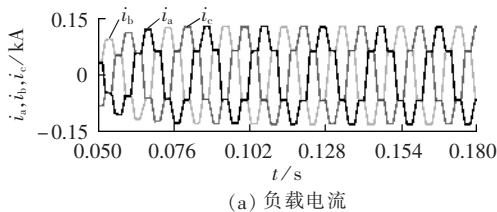


图 4 负载对称情况下负载电流和补偿后系统电流比较

Fig.4 Comparison of load current and compensated system current with symmetrical loads

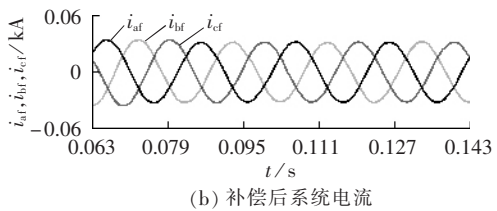
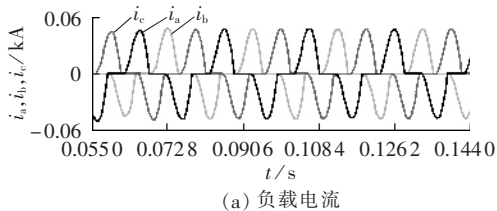


图 5 负载不对称情况下三相负载电流和补偿后系统电流比较

Fig.5 Comparison of load current and compensated system current with unsymmetrical loads

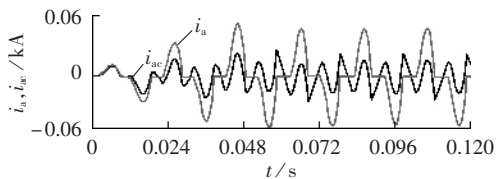


图 6 a 相负载电流和需补偿电流 (谐波、基波负序和零序) 波形

Fig.6 Load current and required compensation current of phase a

图4是三相桥式二极管整流电路接电阻电感性负载构成对称非线性负载电路的负荷电流和经过理想补偿后系统电流的波形对比。仿真结果说明了该检测方法能有效地检测出三相四线制对称电路中的谐波电流。

图5是二极管、电阻、电容和电感组成的三相不对称负载电路中的负荷电流和经过理想补偿后系统电流的波形对比。仿真结果表明本文提出的检测方法同样可以快速有效地检测出三相四线制不对称负载电路中的谐波电流、负序和零序电流。

图6是与图5负载相同情况下利用本文提出的检测方法检测出的a相有害电流 i_{ac} (包括谐波、基波负序和零序电流分量)和负载电流 i_a 波形的对比。

5 结语

本文提出的基于FBD法的电流检测方法,能够快速有效地检测出谐波电流、基波负序和零序电流,同时能够检测出基波正序有功和无功电流。仿真结果表明了该检测方法的有效性和正确性,该方法可以方便地用于谐波、负序、零序以及无功功率的补偿与控制。

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] 栗时平,郑小平,金维宇. 电力系统谐波检测方法及其实现技术的发展[J]. 电气开关,2004(1):33-38.
SU Shi-ping,ZHENG Xiao-ping,JIN Wei-yu. Development of measuring methods and their implementing technologies for harmonic of power systems[J]. Electrical Switch,2004(1):33-38.
- [3] DEPENDBROCK 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.
- [4] SUN Zhuo,JIANG Xin-jian,ZHU Dong-qi. Study of novel electri-

- fied railway active power quality compensator [C]//The 4th International Conference on Power Delivery. Changsha,China:[s.n.],2003:881-887.
- [5] 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]. Journal of Tsinghua University:Science and Technology,2003,43(3):361-365.
 - [6] 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.
 - [7] DEPENDBROCK M. A theoretical investigation of original and modified instantaneous power theory applied to four-wire systems[J]. Transactions on Industry Applications,2003,39(4):1160-1167.
 - [8] 殷波,陈允平. abc坐标系下广义无功电流和功率的定义及补偿[J]. 电网技术,2003,27(7):43-46.
YIN Bo,CHEN Yun-ping. Definition and compensation of generalized instantaneous reactive current and reactive power in abc coordinates[J]. Power System Technology,2003,27(7):43-46.
 - [9] 李彦栋,王凯斐,卓放,等. 新型软件锁相环在动态电压恢复器中的应用[J]. 电网技术,2004,28(8):42-45.
LI Yan-dong,WANG Kai-fei,ZHUO Fang,et al. Application of soft phase locked loop technique in dynamic voltage restorer[J]. Power System Technology,2004,28(8):42-45.
 - [10] 高大威,孙孝瑞. 有源电力滤波器的延时特性对补偿效果影响的研究[J]. 电力系统及其自动化学报,2001,13(4):28-31.
GAO Da-wei,SUN Xiao-rui. A study about influence of time delay on compensation results for active power filters [J]. Proceedings of the EPSA,2001,13(4):28-31.

(责任编辑:康鲁豫)

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;
曾 伟(1979-),男,江苏常州人,博士研究生,研究方向为电力电子与电力传动;
袁 涛(1982-),男,江苏常州人,硕士研究生,研究方向为电力电子与电力传动。

Application of FBD-method to real-time current detection in three-phase four-wire system

KANG Jing,ZHENG Jian-yong,ZENG Wei,YUAN Tao

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

Abstract: A real-time current detection based on FBD(Fryze-Buchholz-Dpendbrock) method is presented to detect the harmonic,negative-sequence and zero-sequence currents in three-phase four-wire system,and the essential of the method is the projection transformation of reference voltage. With reference voltages and currents,the equivalent conductance is acquired,and then used to calculate the instruction current,thus the current is in phase with the reference voltage. The fundamental positive-sequence active and reactive currents,unsymmetrical current and harmonic current can be detected in case of voltage distortion,which extends the application field of FBD method. Compared with the detection method based on instantaneous reactive power theory,it does not need Park transformation and dq transformation. Simulations prove its feasibility and validity.

Key words: active power filter; current detection; three-phase four-wire; FBD method