

$p-q-r$ 法与 FBD 法在三相四线制系统谐波电流检测中的对比

陈娟, 郑建勇, 丁祖军, 曾伟, 康静, 袁涛

(东南大学 电气工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 谐波电流检测是使用并联有源滤波器解决电网谐波污染的关键环节。对当今流行的三相四线制系统中谐波电流检测方法: $p-q-r$ 法、FBD 法进行了深入分析。就系统电压对称和发生畸变 2 种情况, 讨论了各自在谐波电流检测准确性、消除中线电流有效性、计算量、实时性等方面的检测性能, 最后采用 PSCAD/EMTDC 仿真软件加以验证。结果表明, 2 种检测方法在准确性方面基本相同, FBD 法电路简单, 实时性较强; 而 $p-q-r$ 法能够独立消除中线电流, 补偿灵活性好。

关键词: 三相四线制; 谐波检测; 电压畸变; $p-q-r$ 法; FBD 法

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)11-0030-04

0 引言

当三相四线制系统中带不平衡或非线性负载时, 会产生大量的中线电流, 而日益增加的非线性负载使得这一问题更为严重, 造成了电网的严重污染, 所以对三相四线制系统中的谐波电流进行补偿有重要意义。有源滤波器是解决电网谐波污染的一种有效手段, 其中并联有源滤波器的应用与研究已日趋成熟。并联有源滤波器的基本原理^[1-2]是为了防止谐波电流流入系统, 通过检测非线性负载电流中含有的谐波分量, 控制有源滤波器输出的补偿电流等于该谐波分量, 则系统电流中只含有基波电流分量, 从而防止谐波污染电网。要使有源电力滤波器有理想的补偿性能, 如何精确、实时检测出负载中的谐波分量是进行谐波补偿的关键之处。

至今, 已经有多种谐波电流检测算法^[3-5]: 模拟滤波器滤波法; 以傅里叶变换为基础的频域滤波方法; 基于瞬时无功功率理论的瞬时空间矢量法, 主要包括 $p-q$ 法、 i_p-i_q 法以及 $d-q$ 法; 基于现代控制理论的方法, 主要有滑模控制及模糊控制的方法; 自适应检测法; 基于小波分析的谐波检测方法。

针对三相四线制电力系统, 这里深入研究了 2 种较新的谐波检测算法 $p-q-r$ 法和 FBD 法, 讨论了这 2 种检测算法的检测性能并通过仿真加以验证, 为并联有源电力滤波器设计中电流检测环节提供了选择依据。

1 $p-q-r$ 电流检测法

1.1 $p-q-r$ 基本理论^[6-9]

由韩国学者 Hyosung Kim 提出的 $p-q-r$ 法, 其主要思想是首先通过 2 次空间坐标变换, 将 $a-b-c$

坐标系下的三相电压矢量变换到 $\alpha-\beta-0$ 坐标系下再变换至 $p-q-r$ 坐标系下。2 次空间变换之后, 只在 p 轴上存在电压矢量, q 轴与 r 轴上均不存在电压矢量, 并且 q 轴落在 $\alpha-\beta$ 坐标平面上。以此电压变换为基准, 将 $a-b-c$ 坐标系下的三相电流变换到 $p-q-r$ 坐标系下。经过变换之后, p 轴上为系统电流的有功分量, q 及 r 轴上为系统电流的无功分量。式(1)(2)分别为三相电压、电流从 $a-b-c$ 至 $\alpha-\beta-0$ 坐标系以及从 $\alpha-\beta-0$ 至 $p-q-r$ 坐标系的变换式。

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \\ u_0 \end{bmatrix} = C_{\alpha\beta 0} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = C_{\alpha\beta 0} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} u_p \\ u_q \\ u_r \end{bmatrix} = C_{pqr} \begin{bmatrix} u_0 \\ u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{\alpha\beta 0} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = C_{pqr} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中,

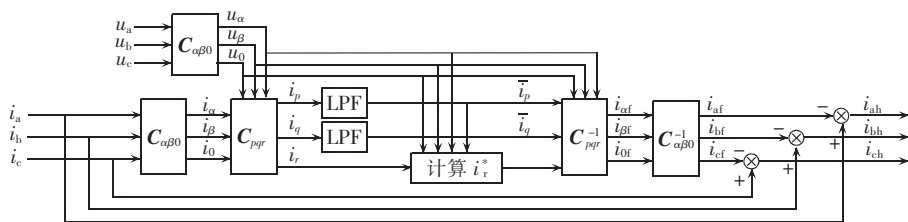
$$C_{\alpha\beta 0} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

$$C_{pqr} = \frac{1}{u_{\alpha\beta 0}} \begin{bmatrix} u_0 & u_\alpha & u_\beta \\ 0 & -\frac{u_{\alpha\beta 0} u_\beta}{u_{\alpha\beta}} & \frac{u_{\alpha\beta 0} u_\alpha}{u_{\alpha\beta}} \\ u_{\alpha\beta} & -\frac{u_\alpha u_0}{u_{\alpha\beta}} & -\frac{u_\beta u_0}{u_{\alpha\beta}} \end{bmatrix}$$

$$u_{\alpha\beta 0} = \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2 + u_0^2}, \quad u_{\alpha\beta} = \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2}$$

1.2 检测原理

系统电压对称时, 谐波电流检测原理图如图 1 所示^[7-8]。经过空间矢量变换之后的 p 轴电流的直流分量 i_p 恰为系统基波正序有功电流分量, q 轴电流的直流分量 i_q 恰为基波正序无功电流分量, 而剩余的交流分量则由基波负序、零序分量和谐波电流转化而来。另外, 分析变换式(1)和式(2)可知, 在三相四线制系统中, 中线电流 i_n 与 p 轴电流 i_p 及 r 轴电

图 1 $p-q-r$ 法谐波电流检测原理图Fig.1 Principle of $p-q-r$ harmonic detection method

流 i_r 有关。因此要使系统中线电流为零,必须使 p 轴与 r 轴的电流矢量和落在 $\alpha-\beta$ 平面上,控制 r 轴上的电流为 $i_r^* = -(u_0/u_{ab})i_p^{[6]}$ 。所以将 i_p, i_q 及 i_r^* 经过 $p-q-r$ 及 $\alpha-\beta-0$ 的反变换,可得到三相负载电流中的基波正序分量 (i_{af}, i_{bf}, i_{cf}),该分量与三相负载电流相减即可得到电流补偿分量 (i_{ah}, i_{bh}, i_{ch}),包括谐波分量及基波负序、零序分量。投入有源滤波器将这些电流分量补偿之后,所得系统电流即为理想的正弦对称电流。

系统电压畸变时,电压瞬时值 u_a, u_b 和 u_c 中均含有谐波电压分量。如直接进行 $p-q-r$ 变换,变换矩阵 C_{pqr} 中将含有瞬时谐波电压分量,使检测到的基波电流分量存在误差,从而影响了补偿效果。将系统电压 u_a, u_b 和 u_c 首先经过低通滤波器 (LPF)^[9],滤除谐波电压分量,所得的基波分量传到与上述系统电压对称情况下相同的后续步骤进行计算,就可以消除电网电压畸变所产生的影响,从而达到很好的谐波检测效果。

2 FBD 法

2.1 基本思想

FBD 法^[10-11]的基本思想是:将实际电路中的每相负载等效为串联在各相的理想等效电导元件,电路中的功率全部消耗在这个等效电导上。根据等效电导将系统电流分解成有功与无功 2 个部分,讨

论分解后的有功电流与无功电流的性质,根据系统要求计算出需要补偿的电流分量^[12-14]。

2.2 检测原理

三相四线制系统中,令系统电压矢量为: $\mathbf{u} = [u_a, u_b, u_c]^T$, 电流矢量为 $\mathbf{i} = [i_a, i_b, i_c]^T$ 。电压对称时 $\mathbf{u} = [u_a, u_b, u_c]^T = [U \sin \omega t, U \sin (\omega t - 2\pi/3), U \sin (\omega t + 2\pi/3)]^T$ 。

根据定义可以计算出系统中的有功电导和无功电导,经过 LPF 后分别得到两者的直流电导分量 G_{pf} 与 G_{qf} ,从而可以检测出三相瞬时基波正序有功电流及无功电流,两者相加即为检测出的负载基波正序电流分量 (i_{af}, i_{bf}, i_{cf}),与负载电流相减即为所要的补偿分量 (i_{ah}, i_{bh}, i_{ch}),包括谐波电流、基波负序及零序分量。所需补偿的电流经过并联有源滤波器投入加以补偿之后,系统中的电流将只含有基波正序分量。具体谐波电流检测原理图如图 2 所示。

系统电压发生畸变时,不能直接根据电压波形分析电流,因此可以用锁相环 (PLL) 生成与 a 相电压同相位的参考电压矢量: $\mathbf{u} = [\sin \omega t, \sin (\omega t - 2\pi/3), \sin (\omega t + 2\pi/3)]^T$, 由此代入与上述系统电压对称情况下的相同的后续步骤,可以求出基波正序电流,从而计算出并联有源滤波器需要补偿的电流分量。

3 仿真结果

电磁暂态分析程序 PSCAD/EMTDC V4 是目前世界上被广泛使用的一种电力系统分析软件^[15]。为

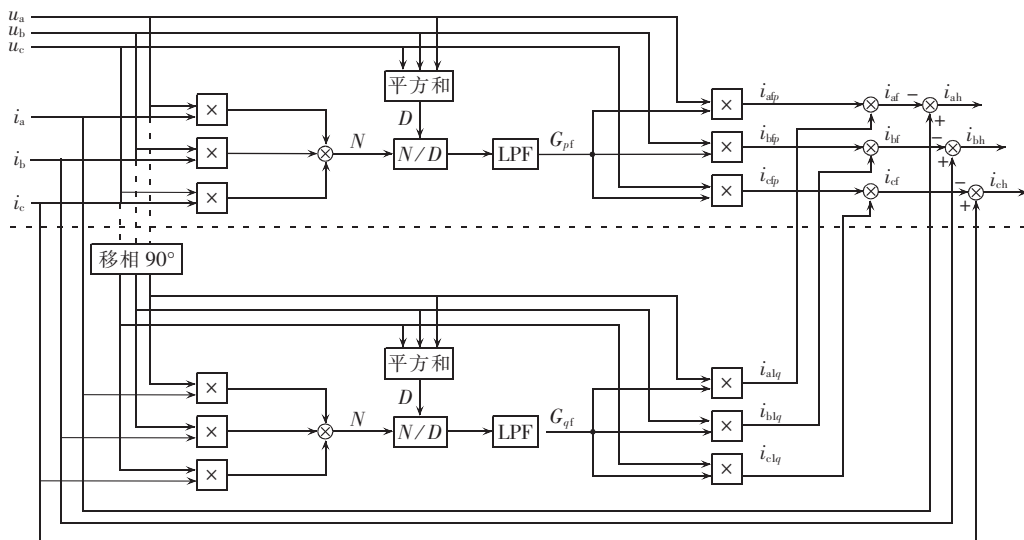


图 2 FBD 法谐波电流检测原理图

Fig. 2 Principle of FBD harmonic detection method

了验证上述 2 种谐波检测算法的性能,在 PSCAD 软件包中搭建了一个利用并联有源滤波器进行谐波补偿的系统进行仿真。该三相四线制系统的仿真参数如下:系统三相电压有效值为 50 V,基波频率 50 Hz;被检测对象是由二极管、电阻(100 Ω)、电感(0.004 H)、电容(1 000 μF)组成的三单相整流桥不对称负载。上述讨论的 2 种谐波电流检测方法检测出来的基波正序电流对应于理想补偿后的系统电流,因此由检测结果可以分析出并联有源滤波器的补偿效果。

通过检测补偿前后的系统电流畸变率,可以直观地看出检测算法的准确性。考虑电压发生畸变这一特殊情况,系统电流畸变率仿真结果见表 1。

表 1 补偿前后的谐波电流分析
Tab.1 Analysis of harmonic currents
before and after compensation

补偿情况	3 次谐波 含有率	5 次谐波 含有率	7 次谐波 含有率	% 总畸变率
补偿前	62.86	18.25	7.04	65.83
$p-q-r$ 法补偿后	0.16	0.34	0.1	0.39
FBD 法补偿后	0	0.32	0.1	0.34

4 检测特性分析

4.1 谐波电流检测准确性

由 2 种谐波电流检测方法的仿真结果可以看出:当系统电压对称时, $p-q-r$ 法与 FBD 法都能准确地检测出系统的谐波电流,从而达到很好的谐波补偿效果,两者具有相同的检测精度;当系统电压畸变时,通过对原有算法的改进,同样能够有效地检测出谐波电流,但是从总的电流畸变率来看,FBD 法的精确度比 $p-q-r$ 法稍高些,如表 1 所示。

4.2 消除中线电流的有效性

由仿真结果中的中线电流波形可以看出,无论系统电压是否畸变, $p-q-r$ 法与 FBD 法均能有效地抑制中线电流,使其降为零。但 $p-q-r$ 法是通过补偿 q 轴的瞬时无功并且不需要使用任何储能元件来实现,极大增加了补偿中线电流的灵活性。FBD 法是通过准确检测出三相系统基波电流来消除系统中的谐波电流,从而能够很好地消除中线电流,没有对中线电流单独控制,补偿灵活性没有 $p-q-r$ 法好。

4.3 计算量

$p-q-r$ 法需要采样三相电流、电压,经过 2 次坐标变换,包括复杂的 Park 变换、 dq 变换以及两者的反变换。在测量出系统电压和电流之后,需要使用 36 个乘法器和 8 个除法器来决定三相参考电流,计算量很大。

FBD 法中没有复杂的 Park 变换、 dq 变换及其反变换过程,算法简单。在测量出系统电压和电流之后,当三相电压对称时,FBD 法需要使用 18 个乘法器和 2 个除法器来决定三相参考电流;当三相电压畸变时,FBD 法虽然要多用一个锁相环和正余弦发生电路,但是却只需要 14 个乘法器而不需要使用除法器,实现起来相对容易。因此在考虑低成本的要求时,

FBD 法更为合适。

4.4 实时性

低通滤波器会给检测电路带来一定的延时,但是由于 $p-q-r$ 法和 FBD 法在检测过程中采用的低通滤波器个数相差不大,因此由低通滤波器引起的实时性差别不大。而由于 $p-q-r$ 法要经历 2 次空间坐标变换及其反变换,使用的乘法器及除法器个数远比 FBD 法中的多,运算复杂,因此 FBD 法的实时性相对于 $p-q-r$ 法要略胜一筹。

5 结语

研究了三相四线制系统中有源滤波器的 2 种谐波电流检测方法: $p-q-r$ 法和 FBD 法。针对系统电压对称和发生畸变 2 种情况进行了仿真,对算法特性作了详细的比较。仿真结果验证了 2 种检测方法各有优势,两者对于谐波电流检测的准确性方面不相上下,但是 FBD 法电路简单、实时性较强,而 $p-q-r$ 法补偿灵活性好,可以根据具体检测要求来选择合适的检测方法。

参考文献:

- [1] 姜齐荣,谢小荣,陈建业. 电力系统并联补偿——结构、原理、控制与应用[M]. 北京:机械工业出版社,2004.
- [2] 姜齐荣,赵东元,陈建业. 有源电力滤波器:结构、原理、控制[M]. 北京:科学出版社,2005.
- [3] 李圣清,朱英浩,周有庆,等. 电网谐波检测方法的综述[J]. 高电压技术,2004,30(3):39-42.
LI Sheng-qing,ZHU Ying-hao,ZHOU You-qing,et al. The overview of detection methods for harmonic in power system[J]. High Voltage Engineering,2004,30(3):39-42.
- [4] 华晓萍,王奔,孟凌凌,等. 有源电力滤波器仿真研究[J]. 电力自动化设备,2007,27(1):42-45.
HUA Xiao-ping,WANG Ben,MENG Ling-ling,et al. Simulation research on active power filter[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(1):42-45.
- [5] 罗德凌,唐朝晖. 电力系统谐波检测方法的研究现状及其发展[J]. 国外电子测量技术,2006,25(4):5-8.
LUO De-ling,TANG Zhao-hui. Research current and development trend of harmonic detection method of power system[J]. Foreign Electronic Measurement Technology,2006,25(4):5-8.
- [6] KIM H,BLAABJERG F,BAK - JENSEN B,et al. Instantaneous power compensation in three - phase systems by using $p-q-r$ theory[J]. IEEE Trans on Power Electronics,2002,17(5):701-710.
- [7] 郭书芳,陈艳慧. $p-q-r$ 法在三相四线制谐波抑制中的作用[J]. 继电器,2004,32(12):25-28.
GUO Shu-fang,CHEN Yan-hui. The usage of $p-q-r$ theory in three - phase four - line system for harmonic restraint[J]. Relay,2004,32(12):25-28.
- [8] 刘开培,陈艳慧,张俊敏. 基于 $p-q-r$ 法的电力系统谐波检测方法[J]. 中国电机工程学报,2005,25(14):25-29.
LIU Kai - pei,CHEN Yan - hui,ZHANG Jun - min. Harmonic detection method for power system based on $p-q-r$ theory[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(14):25-29.
- [9] 宫鑫,蒋云峰,张蕾,等. 三相四线制系统谐波检测的 $p-q-r$ 法[J]. 电力自动化设备,2005,25(5):5-9.
GONG Xin,JIANG Yun-feng,ZHANG Qiang,et al. Three - phase four - wire system harmonic detection by $p-q-r$ method[J]. Electric Power Automation Equipment,2005,25(5):5-9.

- [10] DEPENDROCK M. The FBD - method, a generally applicable tool for analyzing power relations[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(2): 381-387.
- [11] DEPENDROCK M, SAUDT V. The FBD - method as tool for compensating total non - active currents[C]//Proceedings of IEEE ICHQP. Athens, Greece: IEEE, 1998: 320-324.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.

- [15] 林良真, 叶林. 电磁暂态分析软件包 PSCAD/EMTDC[J]. 电网技术, 2000, 24(1): 65-66.
LIN Liang - zhen, YE Lin. An introduction to PSCAD/EMTDC[J]. Power System Technology, 2000, 24(1): 65-66.

(责任编辑: 康鲁豫)

作者简介:

陈 娟(1984-), 女, 江苏靖江人, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动(E-mail: chenjuan2@163.com);

郑建勇(1966-), 男, 江苏南京人, 副院长, 教授, 研究方向为电力电子与电力传动;

丁祖军(1978-), 男, 江苏淮安人, 博士研究生, 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;

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;

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。

Comparison of harmonic detection in three-phase four-wire system between $p-q-r$ method and FBD method

CHEN Juan, ZHENG Jian - yong, DING Zu - jun, ZENG Wei, KANG Jing, YUAN Tao
(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Harmonic detection is the important part of the active power filter used in power system for harmonic pollution control. The $p-q-r$ method and FBD method, two harmonic detection methods used widely in three - phase four - wire system, are compared in correctness, effectiveness of neutral - line current elimination, calculation load and real - time performance for both symmetric and distorted system voltages. Results of PSCAD/EMTDC simulation show that, two methods are nearly same in correctness, FBD method has simple circuit and better real - time performance while $p-q-r$ method is better in compensation flexibility and independent elimination of neutral - line current.

Key words: three - phase four - wire system; harmonic detection; voltage distortion; $p-q-r$ method; FBD method