

基于 d-q 变换的三相不对称系统任意次谐波电流的检测方法

杨柳, 孙建军, 刘会金, 崔福鑫

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 410072)

摘要: 基于传统 d-q 理论的谐波检测方法只能检测出三相对称系统中的谐波分量,但在电力系统故障检测和
保护中,往往需要检测出对应于故障的特征次谐波电流。提出了一种改进的 d-q 检测法,它能检测出三相不
对称系统的任意次谐波电流。针对实际检测环节中,高次谐波通过加设在检测环节前端的低通滤波器时产生较
大的相角误差,给出了一种切实可行的相位误差校正方法。理论分析和仿真结果证明了所提方法的正确性。

关键词: d-q 变换; 任意次谐波; 相位误差; 校正; 仿真

中图分类号: TM93 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)24-3629-04

0 引言

近年来,随着电力电子技术的迅速发展,各种新
型电力电子器件相继进入市场,随之而来的谐波污
染日益严重,由电网谐波引起的电能质量问题也日
益受到重视,采用有源电力滤波器已成为谐波补偿
的一种重要趋势。其基本原理是从补偿对象中检测
出谐波电流,由补偿装置产生一个与该谐波电流大
小相等,极性相反的补偿电流与其相抵消,其中,谐
波电流的正确检测是决定补偿效果的重要环节。目
前电流检测方法有很多种,主要有瞬时无功功率检
测方法和 d-q 坐标变换检测方法^[1]。这些方法的检
测原理都是将电流基波分量转化为直流量,再用低
通滤波器将其滤出,然后反变换或者计算出基波分
量,计算其与原负荷电流之差从而得到要消除的所
有谐波。但三相系统电流检测的另一个主要目的是
故障诊断和保护,它需要检测出对应于故障的特征
次谐波电流^[2],例如在电力系统继电保护中,对三相
线路中性点接消弧线圈的短路故障保护中五次谐波
电流的检测。因此,针对不同的目的,发展有效、快
速和可靠的三相电路电流检测方法一直是人们研究
的方向。前面提到的一些电流检测方法仅能检测出
三相电路的基波电流,并由此得到总谐波电流,在要
求任意次谐波电流的检测中无法满足实际的需要,
不能适应电网故障诊断和保护要求。因而,本文提
出了一种改进了的 d-q 坐标变换检测方法,它能检
测出三相系统中的任意指定次谐波电流,对三相对
称系统、不对称系统均适用。

1 d-q 坐标变换检测法的检测原理

d-q 坐标变换检测法是在 d-q0 坐标变换的理

论基础上简化而来, Park 变换(也称 d-q0 变换)的
实质就是将静止的 abc 坐标系变成按顺时针方向旋
转的 d-q0 坐标系,其旋转角速度为 abc 三相电流中
的基波角频率。经 d-q0 变换后, abc 坐标系下的三相
对称正序基波电流、电压分量转换为在 d-q0 坐标系下
的直流量,而其余需要进行补偿的谐波在 d-q0 坐标
系则呈现交流分量,就为谐波检测和补偿分量分离提
供了方便^[3]。对于三相三线制系统,0 轴分量为 0,要得
到的仅是基波电流正序分量,不需要进行 0 轴变换,
因此可以将变换矩阵 C 写成^[4]:

$$C^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos t & -\sin t \\ \cos(t-2/\sqrt{3}) & -\sin(t-2/\sqrt{3}) \\ \cos(t+2/\sqrt{3}) & -\sin(t+2/\sqrt{3}) \end{bmatrix}$$
$$C = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos t & \cos(t-2/\sqrt{3}) & \cos(t+2/\sqrt{3}) \\ -\sin t & -\sin(t-2/\sqrt{3}) & -\sin(t+2/\sqrt{3}) \end{bmatrix}$$

在并联有源电力滤波器 APF 中,我们希望只留
下基波正序分量,而基波正序分量在 d-q0 坐标系
系统对应的是直流分量。因此通过派克变换先将三相
电流变换到 d-q0 系统上,然后滤除其中的正弦分
量,分离出相应的直流分量,再将该直流分量进行派
克反变换就可以还原得到三相基波的正序分量了。
最后,将所得基频正序电流从检测到的总电流中减
去,便得到了需要补偿的包含谐波、基波负序在
内的总的畸变电流,其检测回路算法框图如图 1。

2 可检测三相三线制不对称系统任意指定 次数谐波电流的新算法

事实上,d-q 法是基于电力系统中的基波频率
基本为一恒值、并不考虑基波的动态过程而给出
的^[5]。基于这一假定以及傅里叶级数,也可视各次
谐波频率基本为一恒定值。由此,可用 PLL 获得需

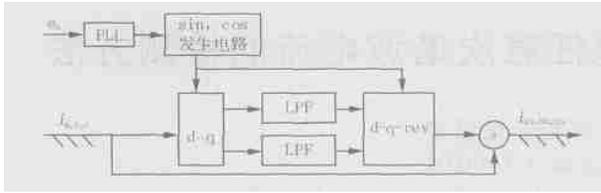


图1 d-q 变换谐波检测算法框图

Fig.1 Block diagram of harmonic detecting method based on d-q transformation

要检测的某次谐波的频率值。经旋转变换,可得到旋转坐标上的该次谐波的幅值,但这种方法对于不对称三相三线制系统,只能检测出指定次数谐波的正序分量,因此还必须在此基础上对检测法作进一步的改进,使之能检测出负序分量。下面将分别介绍指定次数谐波正、负序分量的检测方法。

2.1 正序分量的检测

假设要检测的谐波次数为 n ,检测 n 次谐波电流正序分量的原理框图如图 2。

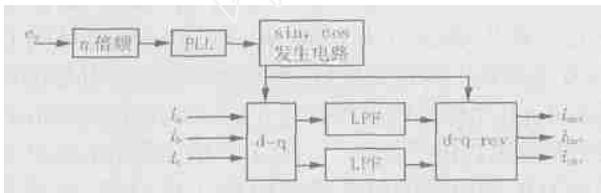


图2 检测 n 次谐波电流正序分量的原理框图

Fig.2 Block diagram of detecting the n th harmonic positive-sequence current components

将 e_a n 倍频后通过锁相环和正、余弦发生电路得到与 e_a 同相位的 $d-q$ 变换矩阵:

$$C_+ = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \cos n t & \cos(n t - 2 / 3) & \cos(n t + 2 / 3) \\ -\sin n t & -\sin(n t - 2 / 3) & -\sin(n t + 2 / 3) \end{bmatrix}$$

$$C_+^{-1} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \cos(n t) & -\sin(n t) \\ \cos(n t - 2 / 3) & -\sin(n t - 2 / 3) \\ \cos(n t + 2 / 3) & -\sin(n t + 2 / 3) \end{bmatrix}$$

这种改进后的 $d-q$ 变换的实质也是将静止的 abc 坐标系变成按顺时针方向旋转的 $d-q$ 坐标系,但与传统的 $d-q$ 变换不同的是,此处的旋转角速度为 abc 三相电流中任意指定的要检测的谐波角频率,即 n 。经变换后, abc 三相系统中的 n 次谐波电流中的正序分量转换成 d 轴、 q 轴上的 2 个直流分量,然后滤除其中的正弦分量,分离出相应的直流分量,再将该直流分量通过变换矩阵为 C_+^{-1} 的 $d-q$ 反变换就可以得到需补偿的 n 次谐波的正序分量了。

2.2 负序分量的检测

对于三相三线制不平衡系统,为了补偿任意指定次数谐波电流,除了检测出任意指定次数谐波电流的正序分量外,还需检测出其负序分量。

分析 2.1 中的 $d-q$ 坐标变换,是将静止的 abc 坐标系变换成以角速度 n 顺时针方向旋转的 $d-q$ 坐标系,从而将 abc 系统中的 n 次谐波的正序分量转换成 $d-q$ 系统中的直流分量,同理,若将矩阵 C_+ 和 C_+^{-1} 中的 $2 / 3$ 全部换成 $-2 / 3$, $-2 / 3$ 全部换成 $2 / 3$ 就可以得到 C_- 和 C_-^{-1} ,即将静止的 abc 坐标系变换成以角速度 n 逆时针方向旋转的 $d-q$ 坐标系,经变换后 abc 坐标系下的 n 次谐波电流的负序分量转换为在 $d-q$ 坐标系下的直流分量,然后滤除其中的正弦分量,分离出相应的直流分量,再将该直流分量通过变换矩阵为 C_-^{-1} 的 $d-q$ 反变换就可以还原得到 n 次谐波电流的负序分量了。其中 $d-q$ 变换矩阵和 $d-q$ 反变换矩阵如下所示:

$$C_- = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \cos n t & \cos(n t + 2 / 3) & \cos(n t - 2 / 3) \\ -\sin n t & -\sin(n t + 2 / 3) & -\sin(n t - 2 / 3) \end{bmatrix}$$

$$C_-^{-1} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \cos n t & -\sin n t \\ \cos(n t + 2 / 3) & -\sin(n t + 2 / 3) \\ \cos(n t - 2 / 3) & -\sin(n t - 2 / 3) \end{bmatrix}$$

最后将 2.1 和 2.2 分别检测出的任意指定次数谐波电流的正、负序分量相加即得到要检测的指定次数谐波。

3 实际应用中的误差分析

在实际的谐波补偿系统中,负载电流往往要先通过一个 Butterworth 低通滤波器,滤除 25 次以上谐波及一些干扰谐波后再进入检测环节。若要检测的谐波次数较高,则该高次谐波通过滤波器时产生的相位偏移就会较大^[6],必须加以校正。通常我们采用滞后 n 个采样点的方法来实现波形相位误差的校正。这里提出一种计算方法,它可以算出任意次谐波电流通过 Butterworth 低通滤波器时产生的相位偏移,并在采样周期给定的情况下换算出准确的应滞后采样点个数。

以检测 7 次谐波为例,说明任意指定次谐波通过二阶 Butterworth 低通滤波器时产生相位偏移的校正方法,其中系统的采样周期为 0.1 ms。校正方法如下:

- 1) 将归一化参考角频率即截止角频率 $\omega_c = 2 \times \pi \times 1250 \text{ Hz} = 9424 \text{ rad/s}$ 代入二阶 Butterworth 低通滤波器的传递函数 $H(S) = \frac{1}{S^2 + 1.4142 S + 1}$ 进行反归一化,可得巴特沃思系统函数:

$$H(S) = \frac{1}{1.126 \times 10^{-8} S^2 + 1.500 \times 10^{-4} S + 1}$$

- 2) 用 Matlab 软件观察反归一化后的系统函数

的 Bode 图,由图 3 可以看出,25 次以内高次谐波经过 Butterworth 时产生的滞后相角较大,而幅值误差不明显。在图中查出横坐标 $\omega = 2 \times 350 \text{ Hz} = 2.64 \times 10^3 \text{ rad/s}$ 的点对应的纵坐标为 -23.4° ,即为 7 次谐波通过滤波器时产生的相位滞后角度。

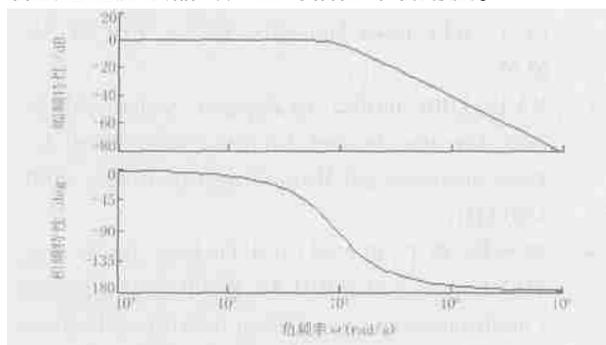


图 3 反归一化后的二阶 Butterworth 传递函数的 Bode 图

Fig. 3 Bode diagram of the second Butterworth transferring function after denormalization

3) 采样周期为 0.1 ms,将通过二阶 Butterworth 低通滤波器的 7 次谐波相角滞后 $(360^\circ - 23.4^\circ) = 336.6$ 即可得到校正,将滞后角度换算成滞后采样点的个数来实现相位误差校正。滞后角 336.6 换算成滞后采样点的个数如下:

$$\text{INT} \left[\frac{336.6}{360} \times \frac{200}{7} \right] = \text{INT} [26.7] = 27$$

4 仿真研究

仿真软件采用 Matlab6.5,在三相三线制系统中,负载电流含有幅值为 100 的基波,幅值为 30 的 5 次谐波电流,幅值为 20 的 7 次谐波电流。在仿真中,采样周期 $T = 0.1 \text{ ms}$,二阶 Butterworth 低通滤波器的截止频率为 $2 \times 10^3 \text{ Hz}$,用一个加设在 Butterworth 低通滤波器之后的时间延迟环节来实现相位误差的校正。按上述误差分析中的校正原理计算出 7 次谐波延迟时间参数为 $t = 27 \times 0.1 \text{ ms} = 0.0027 \text{ s}$,5 次谐波延迟时间参数为 $t = 0.0038167 \text{ s}$ 。要求分别检测出 5 次、7 次谐波电流,并将检测到的 5 次、7 次谐波和原 5 次、7 次谐波源进行比较。

仿真结果如图 4~9 所示,图 4 为待检测的负载畸变电流,图 5 为加相位校正环节后滤除 5 次、7 次谐波后剩下的基波电流。图 6、7 为未加相位校正环节检测出的 5 次、7 次谐波电流和原谐波电流源,图 8、9 为加相位校正环节后检测出的 5 次、7 次谐波电流和原谐波电流。由图 4~9 可以看出,本文提出的这种检测任意指定次谐波的算法很准确,并且对于

因 Butterworth 低通滤波器引起的相位偏移,用本文中提出的校正方法也得到了很准确的校正。

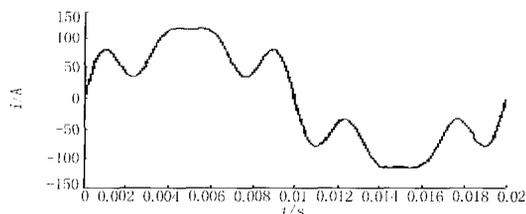


图 4 待检测的负载畸变电流

Fig. 4 Load aberrance current needing detecting

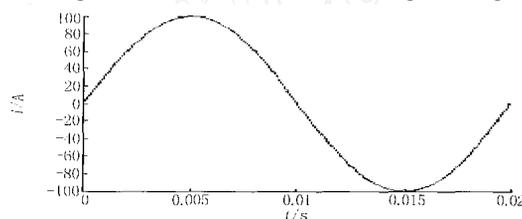


图 5 加相位校正环节滤除 5 次、7 次谐波后剩下的基波电流

Fig. 5 First harmonic current after filtering 5th and 7th harmonics by using phase error revising technique

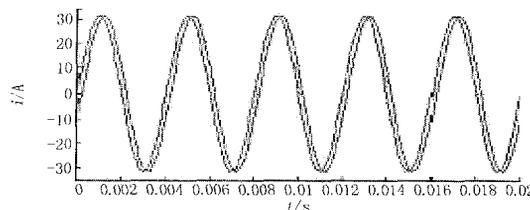


图 6 未加相位校正环节检测出的 5 次谐波和原 5 次谐波源

Fig. 6 Primary 5th harmonic source and the detected 5th harmonic without using phase error revising technique

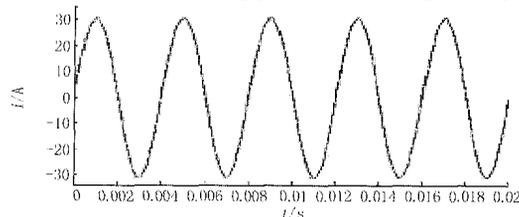


图 7 加相位校正环节后检测出的 5 次谐波和原 5 次谐波源

Fig. 7 Primary 5th harmonic source and the detected 5th harmonic using phase error revising technique

5 结论

本文介绍了 d-q 坐标变换检测电流谐波的基本原理,并在此基础上提出了一种新的检测算法,即对 d-q 坐标变换中的变化矩阵作了适当修改,能分别

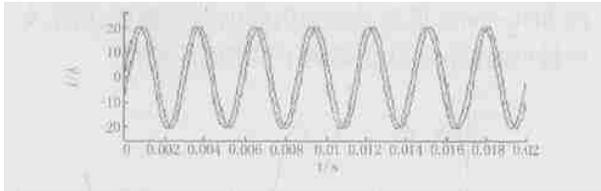


图8 未加相位校正环节检测出的7次谐波和原7次谐波源

Fig.8 Primary 7th harmonic source and the detected 7th harmonic without using phase error revising technique

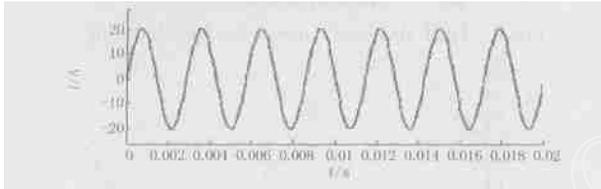


图9 加相位校正环节后检测出的7次谐波和原7次谐波源

Fig.9 Primary 7th harmonic source and detected 7th harmonic using phase error revising technique

检测出任意指定次数谐波电流的正、负序分量。在实际应用中,由低通滤波器产生的高次谐波相位误差不能忽略,本文又提出了一种切实可行的相位误差校正方法,能准确的计算出要检测的高次谐波通过 Butterworth 低通滤波器时产生的相位误差,并根据相位误差换算出采样应滞后的采样点个数,从而实现误差的校正。这种任意指定次数谐波电流的检测新算法和相位误差校正方法对于三相对称系统和三相不对称系统均适用,理论分析和仿真结果都证明了其正确性。

参考文献:

- [1] 玛莉,周景海,吕征宇,等(MA Li, ZHOU Jing-hai, L ü Zheng-yu, et al). 一种基于 $d-q$ 变换的改进型谐波检

测方案的研究(An Improved Harmonic Detecting Approach Based on $d-q$ Rotating Coordination Transformation) [J]. 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 2000, 20(10):59-63.

- [2] Chang G W. A New Method for Determining Reference Compensating Currents of Three-phase Shunt Active Power Filter[J]. IEEE Power Engineering Review, 2001, 21(3):63-65.
- [3] MA Li, ZHOU Jing-hai, L üZheng-yu. An Improved Harmonic Detecting Approach for Active Power Filter[A]. Power Electronics and Motion Control Conference. 2000. 1420-1424.
- [4] 戴列峰,蒋平,田大强(DAi Lie-feng, JIANG Ping, TIAN Da-qiang). 无锁相环 $d-q$ 谐波电流检测法的实现(Realization of Harmonic Current Detection of $d-q$ Transformation without Phase Lock Loop) [J]. 电网技术(Power System Technology), 2003, 27(8):46-49.
- [5] 王兆安,杨军,刘进军(WANG Zhao-an, YANG Jun, LIU Jin-jun). 谐波抑制和无功补偿(Harmonic Restraining and Reactive Power Compensation) [M]. 北京:机械工业出版社(Beijing: China Machine Press), 1998.
- [6] 黄忠霖(HUANG Zhong-lin). 控制系统 MATLAB 计算与仿真(Control System MATLAB Calculation and Simulation) [M]. 北京:国防工业出版社(Beijing: National Defense Industry Press), 2003.

收稿日期: 2004-04-13; 修回日期: 2004-05-13

作者简介:

杨柳(1980-),女,硕士研究生,从事电力系统运行与控制方面的研究;E-mail: lanlan-yang409@sohu.com

孙建军(1975-),男,博士研究生,从事灵活交流输电方面的研究;

刘会金(1952-),男,教授,从事电力系统稳定、继电保护及自动化方面的研究。

A new algorithm for random harmonic current detection based on the $d-q$ transformation in three-phase unbalanced system

YANGLiu, SUN Jian-jun, LIU Hui-jin, CUI Fu-xin

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Harmonic current detection based on conventional approach using $d-q$ transformation can only detect harmonic components in three-phase balanced system. But in power system fault detection and protection, only characteristic harmonic current corresponding to fault needs can be detected. A new detection algorithm for random harmonic current in three-phase unbalanced system based on $d-q$ transformation is presented. Furthermore, this paper brings forward a feasible phase error revising method to revise the bigger error during higher harmonic passing the LPF, which is installed at the front of the detector. Analysis and simulation prove the correctness of the algorithm.

Key words: $d-q$ transformation; random harmonic; phase error; revise; simulation