

三相电压畸变且不对称时电流基波正序有功分量的改进瞬时检测方法研究

袁川, 杨洪耕

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 电力有源滤波器是抑制谐波的有效手段, 补偿分量的准确检测直接决定了它的补偿效果。提出了改进的三相电压畸变且不对称情况下的基波正序有功电流分量的检测方式, 通过 dq 变换分别测出电压和电流基波正序分量的有效值和相位, 求出准确的电流基波正序有功分量, 从而得到需要补偿的电流分量。电压和电流基波正序分量的检测同步进行, 减少了低通滤波器的延时, 仿真结果说明了改进方式的有效性和正确性。

关键词: 谐波; 有源滤波; 不对称电压; 检测

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)14-0057-04

0 引言

随着电力电子技术的飞速发展, 越来越多的非线性负荷投入运行严重恶化了电能质量。有源电力滤波器是能够综合治理谐波、不平衡及无功补偿的装置。其中检测部分是最重要的, 它的准确程度决定了补偿的效果。瞬时无功功率理论^[1]在三相电压正弦且对称时能准确检测谐波及基波无功电流, 在三相电压畸变且不对称时则有很大的误差^[2], 而实际的电网电压波形很多情况下都存在不同程度的畸变和不对称。

已有很多文献对三相电压不对称且畸变情况下有源滤波器的检测方法做出了讨论, 文献 [3] 只考虑了谐波和基波负序电流的检测, 文献 [4, 5] 中虽然能检测出基波正序无功电流, 但用对称分量分解矩阵对三相电压瞬时值进行分解难以达到预期的分离出正序电压分量的目的, 并且文献 [4] 中用窄带滤波器从电压和电流瞬时值中得到基波成分, 这会检测出的基波分量带来附加相移。受文献 [6] 的启发, 本文提出基于 dq 变换理论的改进瞬时检测方法, 通过 dq 变换同步提取出电压和电流的基波正序分量, 从而得出电流基波正序有功分量, 减少了低通滤波器的延时, 能实时的检测出三相电压畸变且不对称时基波正序有功电流。

以下先分别介绍基于 dq 变换的电压和电流基波正序分量的实时检测原理, 然后提出改进的基波正序有功分量的检测原理, 最后通过仿真结果验证其效果。

1 电压基波正序分量实时检测原理

当系统三相电压畸变且不对称时设 a 相基波电

压初相角为 ϕ_1 , 则可以写出三相电压的表达式如下:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \sqrt{2}U_{n1} \begin{bmatrix} \sin(t + \phi_1) \\ \sin(t + \phi_1 - \frac{2}{3}) \\ \sin(t + \phi_1 + \frac{2}{3}) \end{bmatrix} + \sqrt{2}U_{n2} \begin{bmatrix} \sin(t + \phi_2) \\ \sin(t + \phi_2 + \frac{2}{3}) \\ \sin(t + \phi_2 - \frac{2}{3}) \end{bmatrix} + \sum_h \begin{bmatrix} u_{ah} \\ u_{bh} \\ u_{ch} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式 (1) 中: U_{n1} 、 U_{n2} 分别为基波电压正、负序分量有效值, ϕ_1 、 ϕ_2 分别为基波电压正、负序分量相对于 a 相基波电压的初相角, u_{ah} 、 u_{bh} 、 u_{ch} 分别为 a、b、c 三相的 h 次谐波电压瞬时值。对三相电压瞬时值做 dq 变换。dq 变换矩阵 C 为

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

则可以得到 dq 电压分量为

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \sqrt{3}U_{n1} \begin{bmatrix} \cos \phi_1 \\ -\sin \phi_1 \end{bmatrix} + \sqrt{3}U_{n2} \begin{bmatrix} \cos(2t + \phi_2) \\ \sin(2t + \phi_2) \end{bmatrix} + C \sum_h \begin{bmatrix} u_{ah} \\ u_{bh} \\ u_{ch} \end{bmatrix} \quad (2)$$

以上的 dq 同步轴变换是与基波正序分量同步的变换, 故得出的 dq 轴电压分量中基波正序分量为

直流分量,而与基波正序分量反向旋转的负序分量在 dq轴中则呈现为 2 倍基频交流分量, h 次谐波分量变换为 h ± 1 次交流分量。故用低通滤波器即可将直流分量得出。d、q 分量经过低通滤波器后可得到如下直流分量

$$\begin{bmatrix} \bar{u}_d \\ \bar{u}_q \end{bmatrix} = \sqrt{3}U_n \begin{bmatrix} \cos \phi_1 \\ -\sin \phi_1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

由式 (3) 即可以求出电压基波正序分量的有效值 U_n 和相位 ϕ_1 。

类似电压基波正序分量有效值和相位的计算方法,可得电流基波正序分量的有效值 I_n 和相位 ϕ_i 。

2 改进的基波正序有功电流检测原理

经过以上分析后可以求出电压基波正序分量的相角 ϕ_1 和电流基波正序分量的有效值 I_n 和相角 ϕ_i , 可以算出电流基波正序有功分量的有效值和 a 相瞬时值如下:

$$I_{np} = I_n \cos(\phi_1 - \phi_i) \quad (4)$$

$$i_{nnp} = \sqrt{2} I_n \sin(\omega t + \phi_1) \quad (5)$$

由以上分析可以将改进的电流基波有功分量检测原理如图 1 所示, 根据第 1 节中叙述的电压和电流基波正序分量的实时检测原理分别求出电压和电流基波分量的幅值和相角, 再算出电流基波正序有功分量的幅值, 最后通过变换矩阵 D 求出三相电流基波正序有功分量瞬时值, 图中的变换矩阵 C 与式 (2) 中相同, 变换矩阵 D 如下:

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

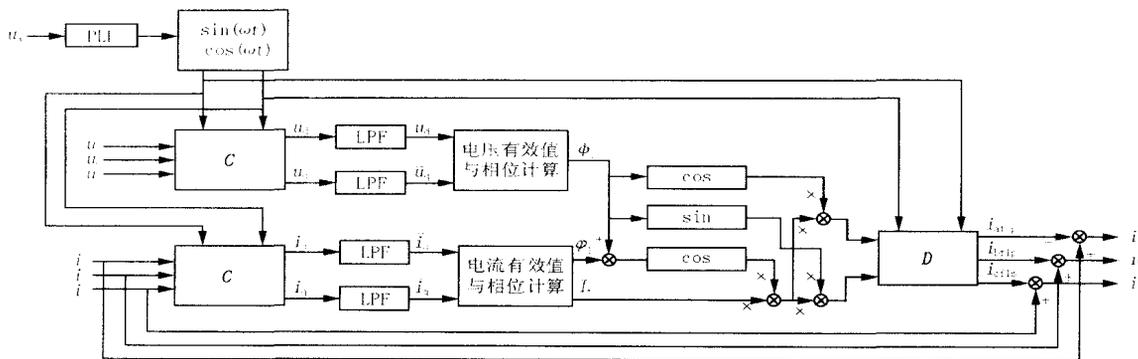


图 1 电流基波正序有功分量的改进检测原理图

Fig 1 Schematic diagram of advanced detection of positive and active component of fundamental current

图 1 中检测出的各相补偿电流参考值 i_{ac} 、 i_{bc} 、 i_{cc} 是基波正序无功电流、基波负序电流和各次谐波电流之和。如果只需要补偿负序电流和谐波电流, 则不需要检测电压基波正序分量相位的部分, 只需对 \bar{i}_d 和 \bar{i}_q 做 dq 反变换即可得到电流基波正序分量, 从而求得需补偿的负序和谐波电流。文献 [3] 中的 $i_p - i_q$ 检测法只能准确测出电流的谐波和负序分量, 如果用来检测电流的基波正序有功分量, 则有很大的误差, 而采用本文的方法则可以实现电流的基波正序有功分量的准确检测。另外与文献 [5] 中不同的是, 改进的检测方法中电流基波正序分量的检测不依赖于电压基波正序分量的检测, 它只需要用 a 相电压通过锁相环 (PLL) 和正余弦发生电路产生的正、余弦信号做 dq 变换, 即电压和电流的基波正序分量的检测同步进行, 如果各个低通滤波器 (LPF) 的延时相同, 则相当于只有一次低通滤波器延时, 而文献 [5] 中先检测电压基波正序分量, 再用测出的基波正序分量产生正、余弦信号以检测电流的基波正序分量, 这相当于有两次低通滤波器的延时, 故改进方法减小了测量的延时。

3 仿真实验

用 MATLAB 由本文提出的改进的基波正序有功电流分量的检测方法对 6 脉冲晶闸管整流感性负荷进行仿真实验, 系统三相电压不对称。兼顾测量精度和实时性, 所选低通滤波器为 2 阶 Butterworth 滤波器, 截止频率为 25 Hz。图 2 为仿真实验电路示意图。仿真时设定系统三相电压源的值为

$$u_{as} = \sqrt{2} [220 \sin(\omega t + 10^\circ) + 38.35 \sin(\omega t - 85^\circ)]$$

$$u_{bs} = \sqrt{2} [220 \sin(\omega t - 110^\circ) + 38.35 \sin(\omega t + 35^\circ)]$$

$$u_{cs} = \sqrt{2} [220 \sin(\omega t + 130^\circ) + 38.35 \sin(\omega t - 205^\circ)]$$

a相电压还可以写成 $220\sqrt{2}\sin(\omega t)$, 即 a相电压相位为 0, 以上的表达式中右边的第一项为正序分量, 第二项为负序分量, 系统阻抗设为小电感即图 2 中的 L_{s0}

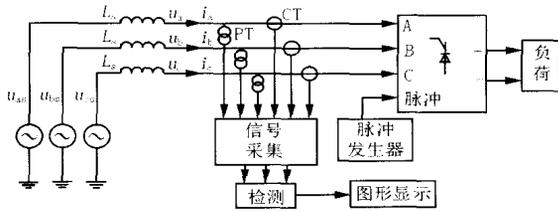


图 2 仿真实验示意图

Fig 2 Schematic diagram of simulation experimentation

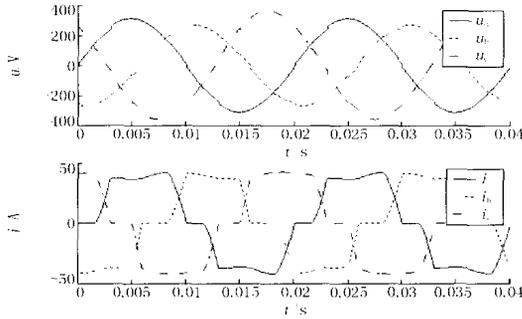


图 3 系统三相电压和电流波形图

Fig 3 Waveforms of system three-phase voltages and currents

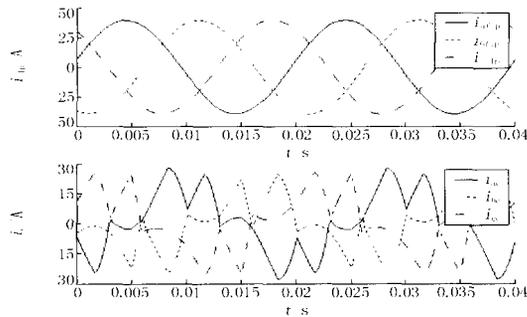


图 4 三相电流基波正序有功分量和补偿电流参考值波形图

Fig 4 Waveforms of positive and active current and compensated reference current

图 3 为系统三相电压和电流瞬时值波形, 此处的系统三相电压为计及系统阻抗压降后的电压 u_a 、 u_b 、 u_c , 具体标识见图 2。由图 3 可见, 系统三相电压和三相电流都不对称且有谐波畸变。系统电压有畸变是谐波电流在系统阻抗上的压降引起的。所以对电流基波正序有功分量的检测是在三相电压不对称且畸变的情况下进行的。

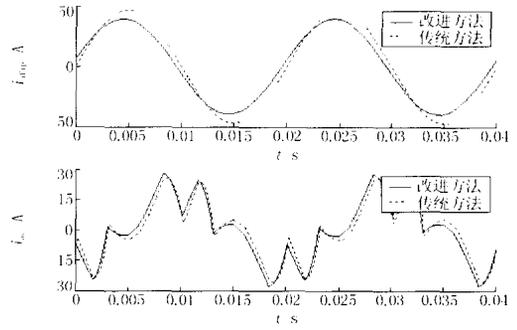


图 5 传统方法和改进方法的结果对比图

Fig 5 Diagram of results comparison between traditional method and improved method

图 4 为采用本文的方法检测出的电流三相基波正序有功分量 (i_{dp}) 和补偿电流参考值 (i_c) 的波形。图 5 为采用本文中的改进方法和文献 [3] 中的 i_p-i_q 检测法 (传统方法) 得出的 a 相基波正序有功电流 (i_{dp}) 和需要补偿的电流 (i_{dc}) 的结果对比。由图 5 可以看出传统方法检测出的基波正序有功电流分量比改进方法测出的波形的峰值更大, 这是因为负荷是感性的, 基波正序电流滞后于基波正序电压, 仿真过程中测得基波正序电流分量相对于 a 相基波电压的相位 φ_1 小于零, 而电压基波正序分量的相位 ϕ_1 为 10° 大于零, 采用传统方法时设定电压基波正序分量的相位为 0, 即测出的电流基波正序有功分量的峰值是 $\sqrt{2}I_n \cos(\varphi_1)$, 而改进方法测出的电流基波正序有功分量的峰值是准确值 $\sqrt{2}I_n \cos(\phi_1 - \varphi_1)$, 针对这个实验, $\cos(\varphi_1) > \cos(\phi_1 - \varphi_1)$, 故用传统方法测得的峰值应比准确值偏大, 这与图 5 中的结果一致。另一方面从相位来看, 用改进方法测出的 a 相基波正序电流有功分量的相位应该与电压基波正序分量一致, 即超前 10° ; 由图 5 可以看出, 改进方法得到的结果与此一致, 而传统方法得到的 a 相电流基波正序有功分量的相角接近零。传统方法比改进方法测出的电流基波有功分量偏大, 相应的无功分量就应该偏小, 由补偿电流参考值波形可以看出结果是正确的, 由传统方法测得的补偿电流确实比改进方法的偏小。

4 结论

本文提出了基于瞬时无功功率理论的改进基波正序有功电流的检测方法, 适用于电压三相不对称且畸变的情况, 采用 dq 变换对电压和电流基波正序分量的检测同步进行, 易于实现, 减少了低通滤波器的延时。仿真结果证明了改进方法的效果和正确性。

参考文献:

- [1] Akagi H, Kanazawa Y, Nabae A. Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-phase Circuits [A]. Proceedings of JIEE IPEC. Tokyo: 1983. 1375-1386
- [2] 杨君,王兆安. 三相电路谐波电流两种检测方法的对比研究 [J]. 电工技术学报, 1995, 10(2): 43-48
YANG Jun, WANG Zhao-an. A Study on the Comparison of Two Methods Used to Detect the Harmonic Currents of Three-phase Circuits [J]. Transactions of China Electro technical Society, 1995, 10(2): 43-48
- [3] 杨君,王兆安,邱关源. 不对称三相电路谐波及基波负序电流实时检测方法研究 [J]. 西安交通大学学报, 1996, 30(3): 94-100.
YANG Jun, WANG Zhao-an, QIU Guan-yuan. A Study on Real-time Detecting Method for Harmonic and Fundamental Negative Sequence Currents in Unbalanced Three-phase Circuits [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1996, 30(3): 94-100.
- [4] 杨万开,肖湘宁,杨以涵. 电网中三相电压不对称谐波及负序电流检测方法的研究 [J]. 电网技术, 1997, 21(11): 45-48
YANG Wan-kai, XIAO Xiang-ning, YANG Yi-han. A Detecting Method for Harmonic and Negative Sequence Current under Unsymmetrical Power System Voltage [J]. Power System Technology, 1997, 21(11): 45-48
- [5] 杨杰,赖声礼,李心广,等. 三相电压不对称时谐波与基波有功、无功电流的精确检测方法研究 [J]. 继电器, 2003, 31(4): 6-9.
YANG Jie, LAI Sheng-li, LI Xin-guang, et al. Research on Precision Detection Method of Harmonics, Fundamental Active Current and Reactive Current in the Case of Unsymmetrical Three-phase Voltage [J]. Relay, 2003, 31(4): 6-9.
- [6] 肖湘宁,徐永海,刘连光. 考虑相位跳变的电压凹陷动态补偿控制器研究 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1): 64-69.
XIAO Xiang-ning, XU Yong-hai, LU Lian-guang. Research on Mitigation Methods of Voltage Sag with Phase-angle Jump [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(1): 64-69.

收稿日期: 2004-11-05; 修回日期: 2005-02-22

作者简介:

袁川(1980-),男,硕士研究生,研究方向为有源滤波器和动态电压恢复器的监测与控制; E-mail: eliteryuan@163.com

杨洪耕(1949-),男,博士,教授,从事电能质量监测和控制技术方面的教学与研究工作。

An advanced instantaneous detection method for fundamental positive-sequence active current under unsymmetrical and distorted three-phase system voltage

YUAN Chuan, YANG Hong-geng

(School of Electricity and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Active power filter is an effective device to clear harmonics. Accurate detection of compensated components decides its compensation effect directly. This paper proposes an advanced instantaneous detection method for fundamental positive-sequence active current under unsymmetrical and distorted three-phase system voltage by detecting magnitude and phase of fundamental positive-sequence voltage and current respectively using dq transformation. Thus fundamental positive-sequence active current and the compensated current components can be obtained exactly. The detection of voltage and current are simultaneous, which reduce delay-time of low-pass filter. Simulation results illustrate efficiency and accuracy of the improved method.

Key words: harmonic; active power filter; unsymmetrical voltage; detection

(上接第 38 页 continued from page 38)

Abstract: This paper analyzes two maloperations of distance protective relaying on an 110 kV power feeder. And it compares the characteristics of the round distance-relaying component to that of quadrangular one, and discusses the different distance resistance sampling methods of microcomputer based relaying protection of high-voltage power feeder in common use. In the end, the improved setting principle and its feasibility and effectiveness have verified in practice.

Key words: power feeder; distance protective relaying; resistance