

矢量理论在谐波和无功电流检测中的应用与改进

陈永延, 吴为麟, 邹家勇

(浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 基于通用瞬时无功功率理论, 对矢量理论在有源电力滤波器的谐波和无功电流检测算法中的应用进行了分析和改进。改进的算法针对电网电压存在谐波分量的情况, 在保证补偿前后系统有功功率保持不变及不严重影响算法运行时间的前提下, 在基准电流求取过程中增加了电压基波正序分量的检测环节, 保证补偿后电流与供电电压基波正序分量同相位, 完全消除三相四线系统中的谐波无功和不平衡分量。通过 Matlab 仿真给出了有源滤波器在电压含有零序分量及谐波分量情况下基准电流的检测结果, 表明了该方法的准确性。

关键词: 有源电力滤波器; 瞬时无功功率理论; 谐波和无功补偿; 基波正序分量

Application and development of the vectorial theory in detection of harmonics and reactive current

CHEN Yong-yan, WU Wei-lin, ZOU Jia-yong

(School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Based on the generalized instantaneous reactive power theory, the vectorial theory used in the detection of harmonics and reactive current is analyzed and improved. According to the condition of component harmonics existing in the voltage, the positive-sequence fundamental voltage detection is increased during obtaining the fundamental current in the improved algorithm to eliminate the harmonics and reactive current in 3-phase 4-wire system so that the current after compensation can be in phase with the voltage. In this algorithm, the active power is unchanged before and after compensation, and the operation time won't be largely increased. The simulation results when the voltage contains zero-sequence component and harmonic component provided based on matlab simulation validate the accuracy of proposed strategy.

Key words: active power filter; instantaneous reactive power theory; harmonics and reactive compensation; positive-sequence fundamental

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)20-0126-04

0 引言

随着电力电子技术的发展和电力电子装置的大量使用, 电力系统中的谐波污染和不平衡问题日益严重。有源电力滤波器 (Active Power Filter, APF) 以其优异的补偿性能得到广泛研究和应用^[1-2], 其原理是检测出负载的谐波和无功分量, 产生与该分量大小相等、相位相反的补偿量并注入电网。其中, 谐波和无功分量的检测环节决定着APF的补偿性能好环。

目前, 有源滤波器的谐波电流检测方法主要有 p-q 算法^[3], d-q 算法^[4], p-q-r 算法^[5]及矢量理论算法^[6]等基于瞬时无功功率理论的算法。p-q 算法不考虑电源电压的谐波和不平衡分量, 只适用于电压为三相正弦对称的系统; d-q 算法在电源电压非正弦对称时, 不能保证补偿前后有功功率不变; p-q-r 算

法不考虑谐波和不平衡分量引起的功率, 无法用于不对称非正弦系统; 矢量理论算法在电源电压含有谐波成分时, 不能保证电源侧电流为三相正弦对称。

为改进以上算法的不足, 本文在矢量理论算法的基础上, 提出了一种能克服电源电压畸变、保证补偿后电流不含谐波和不平衡分量的算法, 并对该算法进行了仿真实验验证。

1 矢量理论算法

图 1 为三相四线电网 APF 示意图。设三相瞬时电压矢量 \mathbf{u} 和三相瞬时电流矢量 \mathbf{i} 为:

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad \mathbf{i} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

其中, 下标 a、b、c 分别代表 A、B、C 三相电压或

电流。图 2 为瞬时矢量在三相坐标中的示意图。瞬时有功功率定义为

$$p = \mathbf{u} \cdot \mathbf{i} = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c \quad (1)$$

瞬时无功功率定义为

$$\mathbf{q} = \mathbf{u} \cdot \mathbf{i} = \begin{bmatrix} q_a \\ q_b \\ q_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_b i_c - u_c i_b \\ u_c i_a - u_a i_c \\ u_a i_b - u_b i_a \end{bmatrix} \quad (2)$$

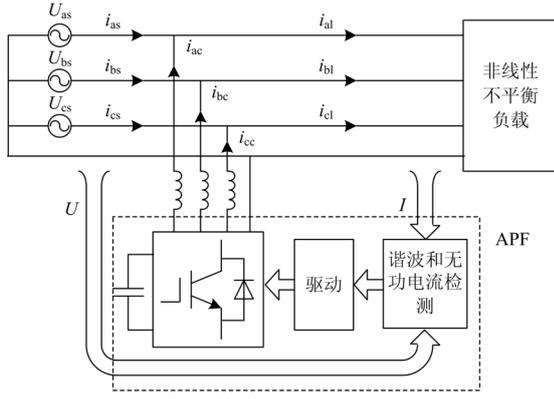


图 1 三相四线电网有源滤波器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of three-phase four-wire APF

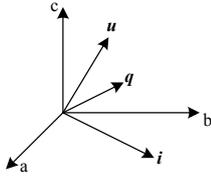


图 2 瞬时矢量在三相坐标中的示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the instantaneous vector in three-phase coordinates

p 可分解成直流有功分量 \bar{p} 和谐波有功分量 \tilde{p} ^[7]:

$$p = \bar{p} + \tilde{p} \quad (3)$$

式中: \bar{p} 对应电压基波正序分量消耗的有功功率; \tilde{p} 对应其他分量消耗的有功的总和。

定义瞬时有功电流 \mathbf{i}_p 和瞬时无功电流 \mathbf{i}_q 分别为:

$$\mathbf{i}_p = \begin{bmatrix} i_{ap} \\ i_{bp} \\ i_{cp} \end{bmatrix} = \frac{p}{\mathbf{u} \cdot \mathbf{u}} \mathbf{u} \quad (4)$$

$$\mathbf{i}_q = \begin{bmatrix} i_{aq} \\ i_{bq} \\ i_{cq} \end{bmatrix} = \frac{\mathbf{q} \cdot \mathbf{u}}{\mathbf{u} \cdot \mathbf{u}} \quad (5)$$

三相电流矢量 \mathbf{i} 可表示为 \mathbf{i}_p 和 \mathbf{i}_q 的矢量和^[8]

$$\mathbf{i} = \mathbf{i}_p + \mathbf{i}_q \quad (6)$$

其中: \mathbf{i}_p 与 \mathbf{u} 方向一致, \mathbf{i}_q 与 \mathbf{u} 垂直, 因此 APF 产生的补偿电流可由检测出的 \mathbf{i}_p 中与 \bar{p} 对应的分量 $\bar{\mathbf{i}}_p$ 和负载电流矢量 \mathbf{i}_L 相减求得。补偿电流可表示为

$$\mathbf{i}_C = \mathbf{i}_L - \bar{\mathbf{i}}_p = \mathbf{i}_L - \frac{\bar{p}}{\mathbf{u}_S \cdot \mathbf{u}_S} \mathbf{u}_S \quad (7)$$

式中: \mathbf{i}_C 为 APF 支路的补偿电流矢量; \mathbf{i}_L 为负载电流矢量; \mathbf{u}_S 为电源电压矢量。由式 (7) 可知, 矢量理论算法中影响 APF 补偿性能的主要因素是电源电压。当电源电压三相对称且无畸变时, 该方法可以有效地补偿谐波、无功和不平衡分量。

当电源电压存在零序分量时, 补偿后的电流也含有零序分量, 对该算法进行改进得到的补偿电流为^[9]:

$$\mathbf{i}_C = \mathbf{i}_L - \bar{\mathbf{i}}_p = \mathbf{i}_L - \frac{\bar{p}}{\mathbf{v}_S \cdot \mathbf{v}_S} \mathbf{v}_S \quad (8)$$

式中, \mathbf{v}_S 为不含零序分量的电源电压矢量。当电源电压不对称且含有谐波时, 以上方法所得补偿后电流均会畸变。

2 矢量理论算法的改进

由以上分析可知, 矢量理论算法的缺陷在于, 当电源电压畸变时, 补偿后的电源侧电流会跟随电源电压畸变, 当有多个用户连接于公共点上时, 电流谐波分量会相互叠加, 公共点处电流会超出国标限值, 因此 APF 的补偿策略应充分考虑电源电压的谐波成分, 保证滤除电流中的谐波成分。

APF 本身无储能元件, 为使补偿后电源电流不含谐波、无功和不平衡分量, 且保证补偿前后系统有功功率保持不变, 补偿后的 \mathbf{i}_S 需满足以下两个条件:

(1) \mathbf{i}_S 为正弦波且与电源电压基波正序分量同相位。参考瞬时有功电流的定义, 可设 \mathbf{i}_S 为

$$\mathbf{i}_S = \begin{bmatrix} i_{aS} \\ i_{bS} \\ i_{cS} \end{bmatrix} = \frac{p}{K} \mathbf{u}_f = \frac{p}{K} \begin{bmatrix} u_{af} \\ u_{bf} \\ u_{cf} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: \mathbf{u}_f 为电源电压基波正序分量; K 为待定系数。

(2) 补偿电流 \mathbf{i}_C 与电源电压 \mathbf{u}_S 正交, 即 APF 与系统无有功功率交换。APF 产生的瞬时有功功率为:

$$p_C = \mathbf{u}_S \cdot \mathbf{i}_C = \mathbf{u}_S \cdot (\mathbf{i}_L - \mathbf{i}_S) = \mathbf{u}_S \cdot \mathbf{i}_L - \mathbf{u}_S \cdot \frac{p}{K} \mathbf{u}_f = p - \frac{p}{K} \mathbf{u}_S \cdot \mathbf{u}_f \quad (10)$$

由式(10)可知,当 $K = \mathbf{u}_S \cdot \mathbf{u}_f$ 时, $p_C = 0$, APF只产生无功。

由式(3)、(9)、(10)可求出,在保证电源有功功率不变的前提下,APF产生的补偿电流为

$$\mathbf{i}_C = \mathbf{i}_L - \frac{\bar{p}}{\mathbf{u}_S \cdot \mathbf{u}_f} \mathbf{u}_f \quad (11)$$

图3为APF补偿电流 i_C 的计算流程图,图4为电压基波正序分量提取的流程图^[10],补偿电流产生环节中的低通滤波器LPF选择截止频率为20 Hz的2阶Butterworth低通滤波器^[11],兼顾实时性和准确性。由图4可知,电压基波正序分量提取环节中增加的LPF和瞬时有功功率计算环节中的LPF可同时并行运算,对算法速度影响不大。

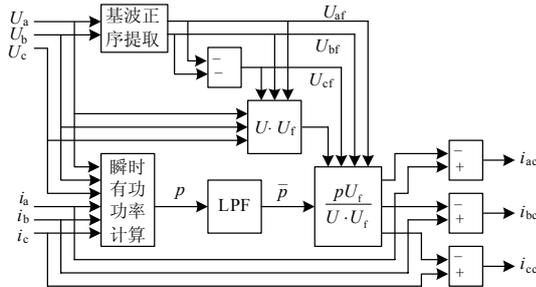


图3 APF补偿电流 i_C 计算流程图

Fig. 3 The block diagram of compensation current detection

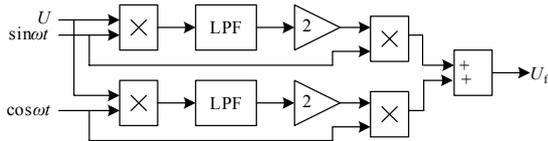


图4 电压基波正序分量提取流程图

Fig. 4 Block diagram of the positive-sequence fundamental voltage detection

本方法对矢量理论算法进行分析,在保证补偿前后有功功率不变前提下,针对电源电压含有谐波和不平衡分量的情况,改进了APF的电流基准求取算法。

3 仿真分析

利用 Matlab 建立仿真模型仿真分析本文提出的谐波和无功电流检测算法,如图5所示。三相电源电压基波正序分量有效值为220 V,负载由非线性负载和不平衡负载构成。

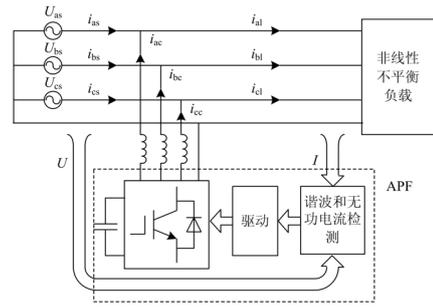


图5 Matlab 仿真模型

Fig. 5 Matlab simulation model

采用能检测出电压零序分量的矢量理论算法和本文提出的改进算法分别对该模型进行仿真,分以下两种情况:

- (1) 电源电压初始为只含基波正序分量,在0.08 s时刻加入零序分量;
- (2) 电源电压初始为只含基波正序分量,在0.08 s时刻加入5次和7次谐波及零序分量。

图6和图7分别给出了情况(1)和情况(2)下的三相电压和电流波形。其中各子图所描绘的波形分别为:(1)检测点三相电压 u_S ; (2)负载侧三

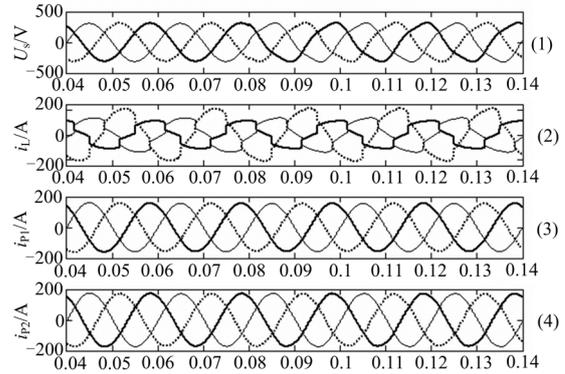


图6 电压含有零序分量的仿真波形

Fig.6 Simulation waveforms when the voltage contains zero-sequence component

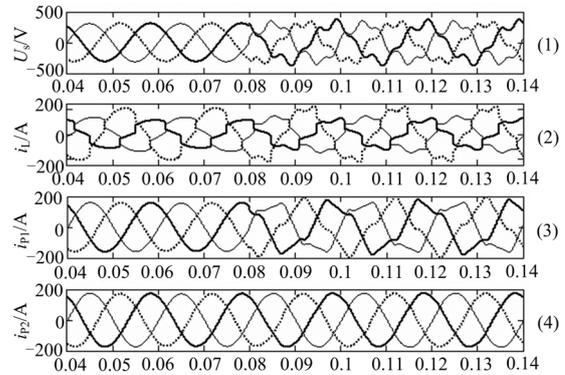


图7 电压含有零序和谐波分量的仿真波形

Fig.7 Simulation waveforms when the voltage contains zero-sequence component and harmonics

相电流 i_L ; (3) 采用能检测出零序分量的矢量理论算法得到的基准电流 i_{p1} ; (4) 采用本文的改进算法得到的基准电流 i_{p2} 的仿真波形。

比较图 6 和图 7, 当电源电压只含基波正弦分量时, 负载侧由于非线性和不平衡负载的存在导致电流畸变较严重, 采用能检测出电压零序分量的矢量理论算法和本文提出的改进算法均能正确地检测出电流中的基波正序分量; 当在 0.08 s 加入电压零序分量时, 由图 6 (3)、(4) 可知, 两种算法均能正确检测出电流基波正序分量; 而当在 0.08 s 加入电压零序分量和谐波分量时, 由图 7 (3)、(4) 可知, 采用能检测出电压零序分量的矢量理论算法得到的基准电流会跟随电压畸变, 而本文提出的改进算法可得到三相正弦电流。

图 8 和图 9 分别给出了情况 (1) 和情况 (2) 下所得电源电压基波正序分量 U_f 和基准电流 i_L 比较图, i_{L1} 为矢量理论算法所得基准电流波形, i_{L2} 为改进的算法所得基准电流波形。由图 8 可知, 当电源电压只含有零序分量时, 两种算法均可保证电流和电压同相位。由图 9 可知, 当电源电压畸变时,

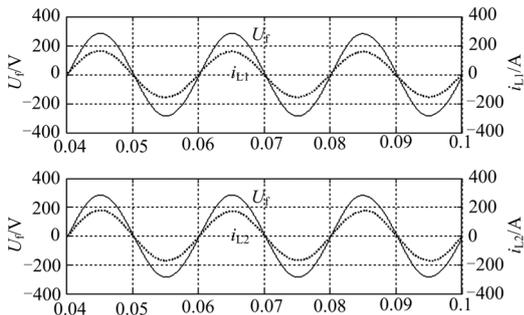


图 8 电压含有零序分量情况下的 U_f 和 i_L

Fig.8 Simulation waveforms of U_f and i_L when the voltage contains zero-sequence component

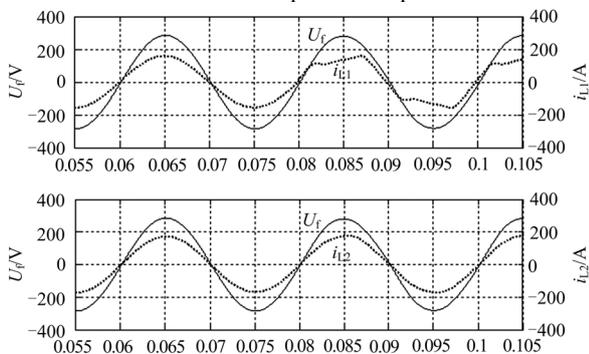


图 9 电压含有谐波分量情况下的 U_f 和 i_L

Fig.9 Simulation waveforms of U_f and i_L when the voltage contains harmonics

只有本文的改进算法能保证电流和电压同相位, 同时保证电流为正弦波。

4 结语

本文针对矢量理论算法在电压含有谐波分量的情况下不能保证电源侧电流为三相正弦对称的不足, 在保证有功功率不变的前提下对算法进行了改进。改进的算法在不严重影响运算时间的前提下增加了电压基波正序分量的检测环节, 可准确检测出负载电流中的谐波、无功和不平衡分量, 经过有源滤波器的无功补偿后可使电源侧电流只含基波正序有功分量。仿真结果验证了本方法的正确性和可行性。

参考文献

- [1] Akagi H. New trend in active filters for power conditioning[J]. IEEE Trans on IA, 1996, 32 (6): 1312-1321.
- [2] Cavallani A, Montarani G C. Compensation strategies for shunt active filter control[J]. IEEE Trans on PE, 1994, 19 (6): 587-593.
- [3] Akagi H, Kanazawa Y, Nabae A. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components[J]. IEEE Trans on IA, 1984, 20 (3): 625-630.
- [4] Verdelho P, Soares V. A unity power factor PWM voltage rectifier based on the instantaneous active and reactive current id-iq method[C]. //Proc IEEE Int Symp Ind Electron. 1997: 411-416.
- [5] 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 PE, 2002, 17 (5): 701-710.
- [6] Peng F Z, Ott G W, Adams D J. Harmonic and reactive power compensation based on the generalized instantaneous reactive power theory for three-phase four-wire systems[J]. IEEE Trans on PE, 1998, 13 (6): 1174-1181.
- [7] Watanabe I E, Stephan R M, Aredes M. New concepts of instantaneous active and reactive powers in electrical systems with generic load[J]. IEEE Trans on PD, 1993, 8 (2): 697-703.
- [8] Peng F Z, Lai J S. Generalized instantaneous reactive power theory for three-phase power systems[J]. IEEE Trans Instrum Meas, 1996, 45 (1): 293-297.
- [9] Salmeron P, Montano J C, Vazquez J R, et al. Practical application of the instantaneous power theory in the compensation of four-wire three-phase systems, Industrial Electronic Society[C]. //Proc IEEE 28th Annu Conf. 2002: 650-655.

(下转第 135 页 continued on page 135)

- with distributed generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (14): 20-24.
- [8] 余后强, 金升平. 遗传算法在非线形规划中的应用[J]. 电脑知识与技术, 2009, 5 (19): 5252-5253.
YU Hou-qiang, JIN Sheng-ping. Application of genetic algorithms for non-linear programming problem[J]. Computer Knowledge and Technology, 2009, 5 (19): 5252-5253.
- [9] 章文俊, 程浩忠, 王一, 等. 基于树形结构编码单亲遗传算法的配电网优化规划[J]. 电工技术学报, 2009, 24 (5): 154-160.
ZHANG Wen-jun, CHENG Hao-zhong, WANG Yi, et al. Distribution network optimal planning based on tree structure encoding partheno genetic algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24 (5): 154-160.
- [10] 刘沛津, 谷立臣, 韩行. 基于内点法与改进遗传法的无功规划优化混合算法[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36 (17): 56-59.
LIU Pei-jin, GU Li-chen, HAN Xing. Reactive power planning based on IPM and improved GA hybrid method[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36 (17): 56-59.
- [11] 杨秀媛, 肖洋, 陈树勇. 风电场风速和发电功率预测研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (11): 1-5.
YANG Xiu-yuan, XIAO Yang, CHEN Shu-yong. Wind speed and generated power forecasting in wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (11): 1-5.
- [12] Patel M R. Wind and solar power systems design, analysis, and operation[M]. CRC Press, 2008.
- [13] 孙健, 江道灼. 基于牛顿法的配电网 Zbus 潮流计算方法[J]. 电网技术, 2004, 28 (15): 40-44.
SUN Jian, JIANG Dao-zhuo. A Zbus power flow calculation method for distribution network based on Newton method[J]. Power System Technology, 2004, 28 (15): 40-44.
- [14] 郑金华. 多目标进化算法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
ZHENG Jin-hua. Multi-objective evolutionary algorithm and its application[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [15] 刘健, 毕鹏翔, 董海鹏, 等. 复杂配电网简化分析与优化[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
LIU Jian, BI Peng-xiang, DONG Hai-peng, et al. The complex distribution networks simplification analysis and its optimization[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [16] Andrés E, Feijóo, José Cidrós. Modeling of wind farms in the load flow analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15 (1): 110-115.

收稿日期: 2009-10-20; 修回日期: 2009-12-18

作者简介:

刘学平 (1985-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制, 分布式发电; E-mail: liuxueping2004@163.com

刘天琪 (1962-), 女, 博士, 教授, 博士生导师, IEEE 会员, 研究方向为电力系统分析计算与稳定控制、高压直流输电、调度自动化;

李兴源 (1945-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 中国电机工程学会理事, IEEE 高级会员, 从事电力系统稳定与控制、高压直流输电、分布式发电等研究。

(上接第 129 页 continued from page 129)

- [10] 孙才华, 宗伟, 何磊, 等. 一种任意整数次谐波电压实时检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (18): 70-73.
SUN Cai-hua, ZONG Wei, HE Lei, et al. A real time detection method for any integral harmonic voltage based on instantaneous reactive power theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (18): 70-73.
- [11] 孙生鸿, 李鹏, 陈志业. 谐波及无功电流的直接检测方法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (19): 52-55.
SUN Sheng-hong, LI Peng, CHEN Zhi-ye. Harmonic and reactive currents detection for active power filter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26 (19):

52-55.

收稿日期: 2009-11-05; 修回日期: 2009-12-24

作者简介:

陈永延 (1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电能质量问题及电力电子在电力系统中的应用; E-mail: eechenyy@163.com

吴为麟 (1944-), 男, 博士生导师, 主要研究方向为电力电子在电力系统中的应用、电能质量分析与研究和分布式发电的研究;

邹家勇 (1982-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为继电保护、电力电子技术和电磁场理论及其应用的研究。