

文章编号:1671-251X(2013)03-0078-05 DOI:

李小凡,许春雨.改进型单位功率因数谐波检测算法在三相并联型 APF 中的应用研究[J].工矿自动化,2013,39(3):78-82.

改进型单位功率因数谐波检测算法在三相 并联型 APF 中的应用研究

李小凡, 许春雨

(太原理工大学 电气与动力工程学院, 山西 太原 030024)

摘要:为了降低电网电压不对称或畸变对 UPF 谐波检测算法的影响,通过引入锁相环电路的改进型 UPF 谐波检测算法产生基波正序电压,对有功功率进行修正,抑制了电压畸变的影响,同时提高了检测的实时性。在 Matlab 上对补偿前后电源侧电流波形进行对比研究,验证了改进型 UPF 谐波检测算法的可行性。实验结果表明,采用改进算法后,电源侧电流谐波成分中谐波含量最高的 5 次谐波含量由补偿前的 22.8% 降低为补偿后的 8.1%,负载电流主要次谐波成分得到了有效抑制,实现了抑制谐波的目的。

关键词:谐波检测;三相并联型 APF;单位功率因数;谐波抑制;电压畸变;锁相环

中图分类号:TD611 文献标志码:A 网络出版时间:

网络出版地址:

Study of application of harmonic detection algorithm with improved
unit power factor in three-phase shunt APF

LI Xiao-fan, XU Chun-yu

(College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology,
Taiyuan 030024, China)

Abstract: In order to reduce impact of grid voltage asymmetry or distortion on UPF harmonic detection algorithm, an improved UPF harmonic detection algorithm introducing PLL circuit was used to produce fundamental positive sequence voltage and correct active power, which inhibited impact of voltage distortion, while improved real-time performance of detection. Current waveforms of the power supply side before and after the compensation were compared by Matlab, which verifies feasibility of the improved algorithm. Experimental results show that harmonic content of the fifth harmonic which has the highest harmonic content is reduced from 22.8% before the compensation to 8.1% after the compensation by the improved algorithm, and the main harmonic component of the load current has been effectively inhibited, which achieves purpose of harmonic suppression.

Key words: harmonic detection; three-phase shunt APF; unit power factor; harmonic suppression; voltage distortion; phase-locked loop

0 引言

目前在电力滤波器中并联型有源电力滤波器

(Active Power Filter, APF)应用最多,技术也最为成熟,三相并联有源电力滤波器更是其中的典范。谐波电流检测作为有源电力滤波器的关键技术之

收稿日期:2012-12-25。

基金项目:教育部博士点基金项目(20101402120004)。

作者简介:李小凡(1985—),男,湖北广水人,硕士研究生,主要研究方向为电力电子与电力传动,E-mail:xjf0260@link.tyut.edu.cn。

一,其作用是检测出负载电流中的谐波含量并将其作为补偿电流的指令信号,目前已成为国内外有源电力滤波器研究的重点。单位功率因数(Unit Power Factor,UPF)谐波检测方法是谐波电流检测的重要方法。它不需要坐标变换,负载变化时也有较好的动态响应性能,可同时适用于单相系统、三相三线制系统、三相四线制系统^[1-2]。但是在该方法中,基波电流的提取是以电压波形为基准的,所以当电网电压不对称或发生畸变时,检测出的谐波电流也随之产生误差。鉴此,本文通过引入锁相环的改进型 UPF 谐波检测算法克服传统 UPF 谐波检测方法的缺陷,Matlab 仿真结果和实验结果验证了改进方法的可行性和有效性。

1 传统型及改进型 UPF 谐波检测算法原理

1.1 传统型 UPF 谐波检测算法基本原理

假设电网电压为理想正弦电压且三相平衡,则其傅里叶展开为

$$u_s = U \sin \omega t \quad (1)$$

加入 APF 补偿后的电网侧电流可表示为

$$i_s = k u_s = k U \sin \omega t \quad (2)$$

式中: k 为非线性负载和 APF 并联电路的复合负载电导。

假设补偿前网侧电流的傅里叶展开为

$$i_L = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n \omega t + \phi_n) = k u_s + i_q(t) \quad (3)$$

式中: i_L 为补偿前的网侧电流,同时也是补偿后的负载电流; $i_q(t)$ 为无功电流和谐波电流之和。

$i_q(t)$ 满足

$$\frac{1}{T} \int_0^T u_s i_q(t) dt = 0 \quad (4)$$

由式(3)、式(4)可推导出

$$k = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T u_s i_L dt}{\frac{1}{T} \int_0^T u_s^2 dt} = \frac{\overline{u_s i_L}}{\overline{u_s^2}} \quad (5)$$

式中: $u_s i_L$ 和 u_s^2 在 1 个周期内的积分分别为各自直流分量和积分周期的乘积。

电流的基波有功分量为

$$i_p(t) = k u_s(t) \quad (6)$$

则

$$i_q(t) = i_L(t) - i_p(t) = i_L(t) - k u_s(t) \quad (7)$$

单相系统中的 UPF 谐波检测法原理如图 1 所示^[3-4]。

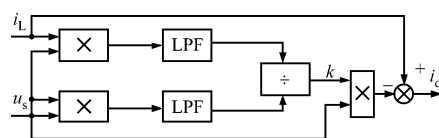


图 1 单相系统中的 UPF 谐波检测法原理

1.2 改进型 UPF 谐波检测算法原理

假设三相电网电压无畸变,则其傅里叶展开为

$$\begin{cases} u_{sa}(t) = \sqrt{2}U \sin \omega t \\ u_{sb}(t) = \sqrt{2}U \sin (\omega t - 2\pi/3) \\ u_{sc}(t) = \sqrt{2}U \sin (\omega t + 2\pi/3) \end{cases} \quad (8)$$

加入滤波器后,非线性负载和滤波器等效为线性电阻负载,所以补偿后网侧电流可表示为

$$\begin{cases} i_{sa} = k u_{sa} \\ i_{sb} = k u_{sb} \\ i_{sc} = k u_{sc} \end{cases} \quad (9)$$

将式(5)推广到三相并联系统可得

$$\begin{cases} \frac{1}{T} \left(\int_0^T u_{sa} i_{La} dt - k \int_0^T u_{sa}^2 dt \right) = 0 \\ \frac{1}{T} \left(\int_0^T u_{sb} i_{Lb} dt - k \int_0^T u_{sb}^2 dt \right) = 0 \\ \frac{1}{T} \left(\int_0^T u_{sc} i_{Lc} dt - k \int_0^T u_{sc}^2 dt \right) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

将式(10)三项相加可推得

$$k = \frac{\int_0^T (u_{sa} i_{La} + u_{sb} i_{Lb} + u_{sc} i_{Lc}) dt}{\int_0^T (u_{sa}^2 + u_{sb}^2 + u_{sc}^2) dt} = \frac{\bar{P}}{\overline{u_{sa}^2 + u_{sb}^2 + u_{sc}^2}} \quad (11)$$

则三相无功电流和谐波电流之和分别为

$$\begin{cases} i_{qa}(t) = i_{La}(t) - k u_{sa}(t) \\ i_{qb}(t) = i_{Lb}(t) - k u_{sb}(t) \\ i_{qc}(t) = i_{Lc}(t) - k u_{sc}(t) \end{cases} \quad (12)$$

三相系统中的 UPF 谐波检测算法原理如图 2 所示,其中 U_{cl} 为直流侧电压测量值, U_{cr} 为直流侧电压给定值。由式(9)可知,当电网电压发生畸变时,补偿后的网侧电流也随之发生畸变。为了抑制电压畸变的影响,在此引入了锁相环。该锁相环通过外围的锁相倍频电路来检测 A 相电压的过零点,通过在过零点时刻复位查正弦表的方法来产生三相基波正序电压,并将该电压作为电压基波有功分量。由于产生的基波正序电压只和 A 相电压过零点有关,所以计算出的谐波就不会受电网电压畸变的影响。加入锁相环后的改进型 UPF 谐波检测算法原理如图 3 所示^[5-7]。

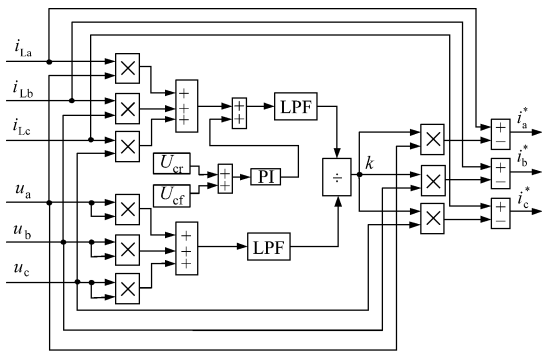


图 2 三相系统中的 UPF 谐波检测算法原理

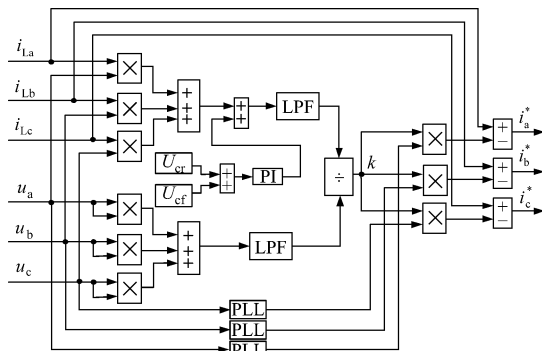


图 3 加入锁相环后的改进型 UPF 谐波检测算法原理

2 仿真研究

在 Matlab/Simulink 环境下对采用 UPF 谐波检测算法的三相并联型 APF 进行了仿真研究,仿真模型如图 4 所示。各模块的相关仿真参数设置:三

相电源线电压和频率分别为 380 V、50 Hz;谐波源为带电阻负载的三相不可控整流桥电路,其中电阻为 50 Ω;直流侧电压给定值为 1 kV;直流侧电容为 1 200 μF;交流侧电感为 3 mH;仿真时间为 0.2 s。

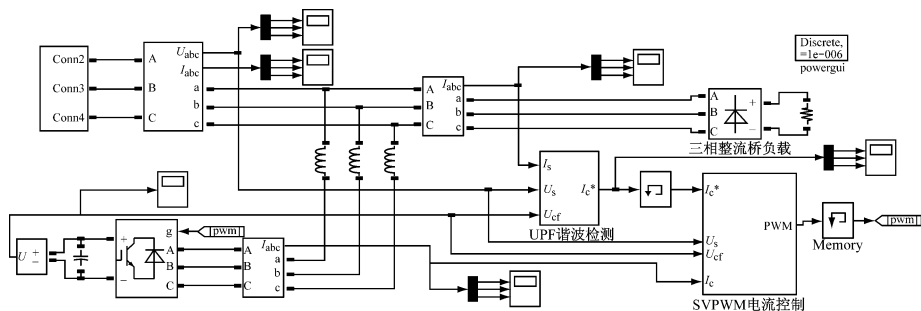
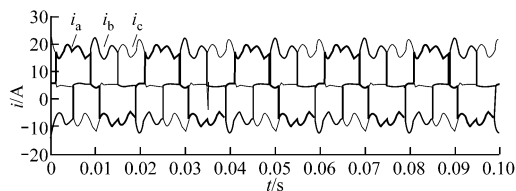
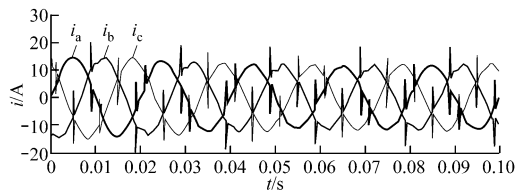


图 4 三相并联型 APF 系统仿真模型

改进型 UPF 谐波检测算法仿真模型如图 5 所示。为了验证改进算法对电压畸变的抑制效果,在三相相电压中加入有效值为 30 V 的 5 次谐波电压和有效值为 20 V 的 7 次谐波电压,仿真时间设为 0.1 s。仿真结果如图 6 和图 7 所示。从图 7 可看出,补偿后 A 相电流畸变率 D_{TH} 为 15.33%,与无畸变电压条件下的畸变率 14.52% 接近,说明改进型 UPF 谐波检测算法可抑制电压畸变的影响。



(a) 补偿前



(b) 补偿后

图 6 补偿前和补偿后电源侧三相电流波形

3 改进型 UPF 谐波检测算法程序实现

改进型 UPF 谐波检测算法通过查正弦表来产生基波正序电压,谐波电流计算程序流程如图 8 所示。

改进算法根据数据处理后的实际值计算谐波电流;首先计算三相负载的瞬时功率之和,然后与直流侧电压 PI 调节输出相加,并经过低通滤波求取直流量;计算三相电压瞬时值平方和,并通过低通滤波

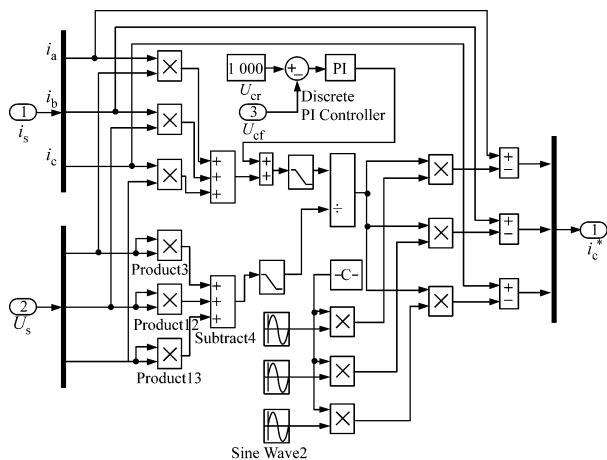


图 5 改进型 UPF 谐波检测算法仿真模型

求取直流分量;求取比例系数 k ,然后将 k 与查正弦表生成的基波正序电压相乘得到基波电流成分;最后基波电流与负载电流相减得到谐波电流(指令电流)。

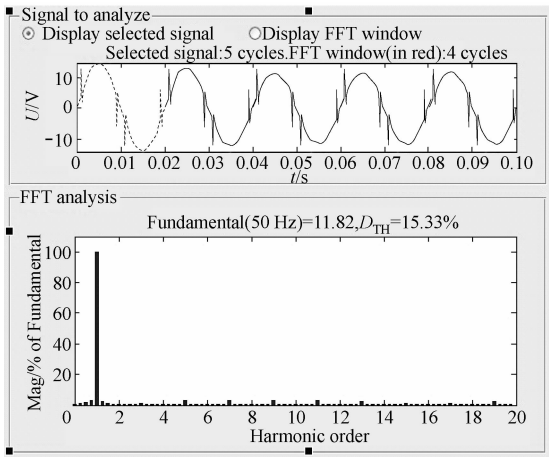


图 7 三相电压畸变时仿真结果的 FFT 分析

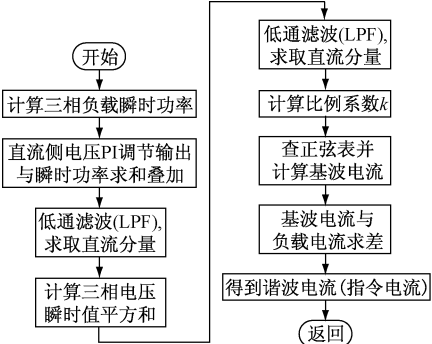


图 8 谐波电流计算程序流程

4 实验结果及分析

实验参数设置:三相电源线电压为 40 V(由调压器调节得到);三相整流桥负载电阻为 30 Ω ;负载电流约为 1.5 A;直流侧电容电压给定值为 90 V;直流侧电容为 2 200 μF (最大耐压值为 450 V);交流侧电感为 8 mH。实验硬件结构如图 9 所示。

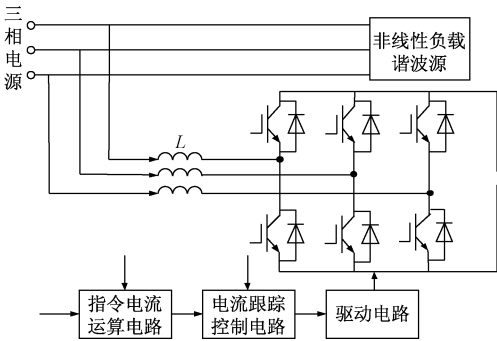
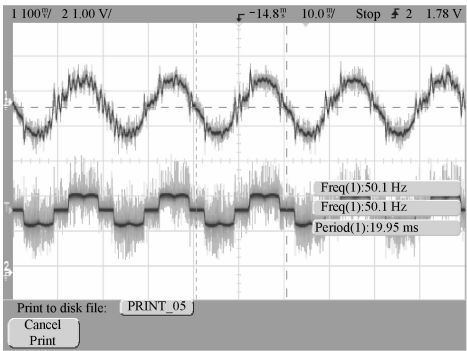
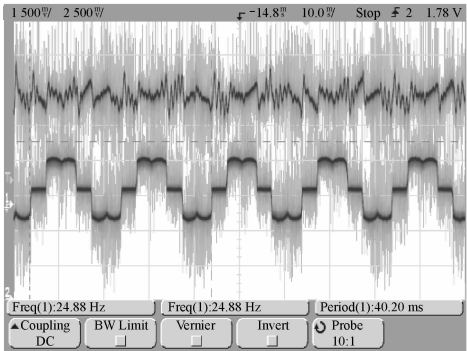


图 9 实验硬件结构

实验结果如图 10 所示,补偿后,电源侧电流波形接近正弦波,说明达到了抑制谐波的目的。



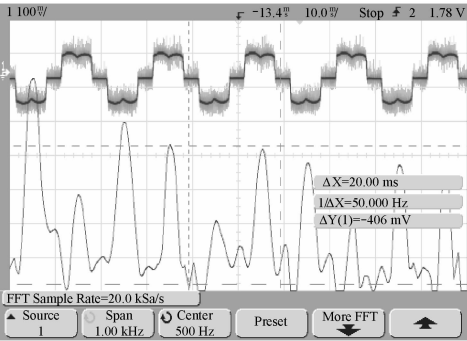
(a) 电源侧电流



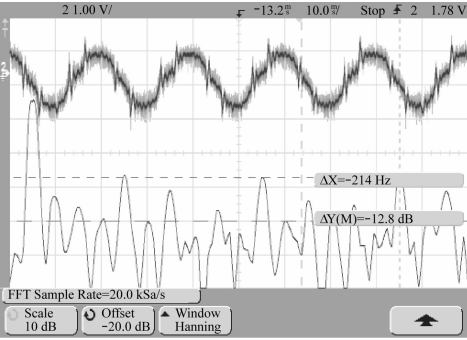
(b) 补偿后的补偿电流和负载电流

图 10 补偿后的实验结果

图 11 所示为补偿前和补偿后电源侧电流和负载电流的 FFT 分析,通过计算得到电源侧电流谐波成分中谐波含量最高的 5 次谐波含量由补偿前的 22.8%降低为补偿后的 8.1%。



(a) 补偿前电源侧 A 相电流 FFT 分析



(b) 补偿后电源侧 A 相电流 FFT 分析

图 11 补偿前与补偿后的电源侧电流 FFT 分析

其他的主要次谐波含量分析见表 1。

表 1 补偿后 i_{L_n} 和 i_{sn} 各次谐波含量

谐波次数	i_{L_n} 谐波含量/%	i_{sn} 谐波含量/%
5	22.8	8.1
7	10.0	4.7
11	9.8	7.5
13	8.9	3.2
17	8.6	7.4

从 FFT 分析来看,负载电流谐波含量较高的 5、7、11、13 次谐波都得到了有效抑制,只是从 17 次谐波开始,抑制效果减弱。

5 结语

改进型 UPF 谐波检测算法通过引入锁相环来减小电网电压畸变时电流的畸变。仿真结果表明,补偿后 A 相电流畸变率为 15.33%,与无畸变电压条件下的畸变率 14.52%接近,说明改进算法可抑制电压畸变的影响。实验结果表明,采用改进算法后,电源侧电流谐波成分中谐波含量最高的 5 次谐波含量由补偿前的 22.8%降低为补偿后的 8.1%;负载电流谐波含量较高的 5、7、11、13 次谐波都得到了有效的抑制,实现了谐波抑制的目的。

参考文献:

[1] 赵怀军,庞亚飞,邱宗明,等. 基于 UPF 的谐波电流检测方法的研究[J]. 电子器件,2007,30(1):189-192.

[2] KALE M, OZDEMIR E. Harmonic and reactive power compensation with shunt active power filter under non-ideal mains voltage [J]. Electric Power Systems Research, 2005,74(3):363-370.

[3] 张红莲,袁兆强. 基于单位功率因数的谐波和无功电流实时检测方法[J]. 电力自动化设备,2006,26(2):37-39.

[4] MONTERO M I M, CADAVAL E R, GONZALEZ F B. Comparison of control strategies for shunt active power filters in three-phase four-wire systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(1):229-236.

[5] EID A, ABDEL-SALAM M, EL-KISHKY H, *et al.* Active power filters for harmonic cancellation in conventional and advanced aircraft electric power systems[J]. Electric Power Systems Research,2009,79(1):80-88.

[6] 赵怀军,邵军,邱宗明. 快速修正 K 值的 UPF 谐波与无功电流检测方法[J]. 高压电器,2008,44(6):501-504,508.