

DOI: 10.7667/PSPC161109

基于复合控制的有源电力滤波器电流控制策略

李正明, 高远, 潘天红

(江苏大学电气信息工程学院, 江苏 镇江 212000)

摘要: 大量电力电子设备的使用, 导致电网中产生了一系列的谐波。针对谐波抑制方法, 提出了一种集无差拍控制和改进型重复控制于一体的复合控制策略, 实现对 $pk\pm 1$ 次谐波的高效补偿。依据有源电力滤波器(Active Power Filter, APF)的数学模型, 推导出应用于有源电力滤波器的无差拍控制算法; 提出一种改进型重复控制, 缩短工频延时, 通过调节内模 p 的值, 抑制 $pk\pm 1$ 次谐波; 详细研究了复合控制的设计方法。将无差拍控制和复合控制进行仿真对比和实验验证, 经滤波后网侧电流畸变率分别降至 7.8% 和 2.8%。该结果表明, 复合控制可以有效地补偿谐波, 改善波形质量, 同时满足稳态精度和动态性能的要求。

关键词: 有源电力滤波器; 无差拍控制器; 改进型重复控制; 复合控制; 稳定性

Compensation current control of APF based on compound control

LI Zhengming, GAO Yuan, PAN Tianhong

(School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212000, China)

Abstract: The wide application of power electronic equipment makes harmonic problem become increasingly serious. The deadbeat control combined with repetitive control are utilized to realize the high efficiency compensation for $pk\pm 1$ harmonics. The deadbeat control is deduced by mathematical model in order to control different harmonics, and a repetitive control is proposed to eliminate periodic steady-state error and shorten frequency delay through adjusting the value of the internal model p . The results of simulation and experiments demonstrate the effectiveness of current control for APF, the total harmonic distortion values of source current by deadbeat control and compound control reduce to 7.8% and 2.8%. The compensation meet the requirements of the higher precision and better dynamic performance.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477070).

Key words: APF; deadbeat control; improving repetitive control; compound control; stability

0 引言

随着大量电力电子装置等非线性负载的广泛使用, 电力系统中谐波污染日益严峻, 对电能质量、供电线路、用电设备造成巨大的负面影响^[1]。有源滤波技术是抑制谐波的一种有效手段, 它能够改善无源滤波技术滤波效果差、易与电网发生谐振等缺点, 因此有源电力滤波器越来越得到关注^[2-3]。与传统的无源电力滤波器 (Passive Power Filter, PPF) 相比, 有源电力滤波器(Active Power Filter, APF)不仅可以对谐波电流和无功功率进行补偿, 而且具有响应速度快, 跟踪精度高等优点。为了使有源电力

滤波器能够快速准确地补偿负载电流, 电流环的控制效果决定了系统的补偿精度。

近年来, 滑模控制、无差拍控制、自适应控制、预测控制、重复控制等一系列控制方法应用到有源电力滤波器中, 使电流跟踪控制效果得到显著改善^[4]。谐波电流一般为多个奇数次谐波的叠加, 传统的 PI 控制方法受到带宽的影响对交流信号的跟踪控制效果较差, 文献[5-6]提出了一种误差迭代 PI 控制对电流进行无静差跟踪, 但是采用误差迭代 PI 控制在系统产生扰动时会造成系统不稳定, 因此文献[7-8]引入了重复控制和 PI 控制相结合的复合控制方法以改善系统的稳态误差, 提高系统的灵敏度。由于重复控制存在一个工频周期的延时, 文献[9-11]提出了一种快速重复控制的方式, 减少重复控制的工频延时。但是这些控制方法对特定次谐波的针对

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51477070); 江苏高校优势学科建设工程资助项目 (PAPD)

性较弱。

本文基于重复控制原理，采用无差拍控制和改进型重复控制对有源电力滤波器补偿电流进行控制。通过 APF 的数学模型推导出无差拍控制算法；利用重复控制抑制 $pk \pm 1$ 次谐波，并弥补无差拍控制稳态性能的缺陷，两者结合提高系统动态性能和稳态特性。

1 APF 的工作原理和数学模型

1.1 APF 的工作原理

APF 的工作原理图如图 1 所示。APF 主要由两部分组成，即指令电流运算电路和电流跟踪控制电路。

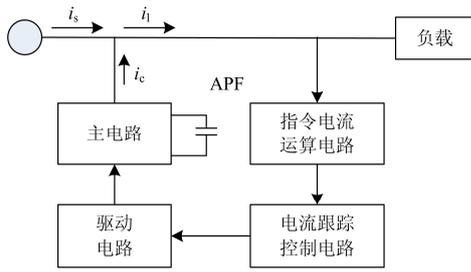


图 1 APF 的工作原理图

Fig. 1 Working principle of the APF

其中，指令电流运算电路主要是根据负载电流检测出谐波电流的成分。电流跟踪控制电路作用是根据指令电流的信号得出补偿电流的指令信号，通过指令信号对指令电流进行跟踪控制，达到抑制谐波的目的。

1.2 APF 的数学模型

三相三线制并联型有源电力滤波器(APF)的电路结构如图 2 所示。

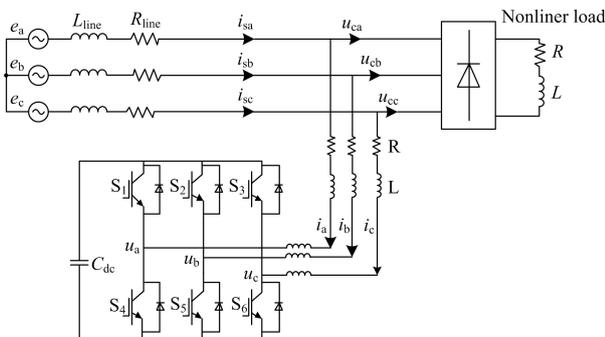


图 2 三相三线制 APF 电路结构图

Fig. 2 Three-phase three-wire system of APF

忽略死区影响，直流侧电压 U_{dc} 为直流电压源，由图 2 所示的电路拓扑结构得出式(1)。 e_a 、 e_b 、 e_c 为三相电源电压； R 为电路内阻； L 为滤波电感；

S_a 、 S_b 、 S_c 为桥臂的开关函数； $S(a, b, c)=1$ 表示上桥臂导通，下桥臂关断； $S(a, b, c)=0$ 表示下桥臂导通，上桥臂关断； i_a 、 i_b 、 i_c 为 APF 的输出电流； u_a 、 u_b 、 u_c 为交流侧的输出电压。

$$\begin{cases} e_a + Ri_a + L \frac{di_a}{dt} = u_a \\ e_b + Ri_b + L \frac{di_b}{dt} = u_b \\ e_c + Ri_c + L \frac{di_c}{dt} = u_c \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c \end{cases} \quad (1)$$

从式(1)可以看出，系统的动态性能取决于电感中电流的变化率，由于电流环控制必须满足两个要求，即良好的动态特性和零误差追踪，为了使系统有着良好的动态性能，引入无差拍控制^[12]。

2 电流环的复合控制策略

2.1 无差拍控制

以 a 相电流为例，由式(1)可以得出 APF 的一阶差分方程为

$$u_a(k) = e_a(k) + Ri_a(k) + L \frac{i_a(k+1) - i_a(k)}{T_s} \quad (2)$$

式中： T_s 为开关周期； $i_a(k)$ 为 APF 的实际输出电流； $i_a(k+1)$ 为 APF 下一采样时刻的输出电流。无差拍控制的实质即预测电流控制算法，常用的电流预测算法有平推预测、重复预测等。若采用平推预测电流法，它的传递函数可以表示为 $H(z)=z^{-1}$ ，从而可得 $i_a(k+1)=i_a^*(k)$ ^[13-14]。则式(2)可以改写为

$$u_a(k) = e_a(k) + Ri_a(k) + L \frac{i_a^*(k) - i_a(k)}{T_s} \quad (3)$$

平推预测电流的获取依赖系统模型的精确性。由于环境、扰动等因素的影响，系统模型参数可能发生变化。参数的不确定性使电流环跟踪效果变差，导致系统稳定性降低。因此，无差拍控制很难达到理想的控制效果。

2.2 基于改进型重复控制的复合控制

为了进一步改善系统的稳态误差，在电流环中加入重复控制器，传统的重复控制离散形式可以表示为

$$G_r(z) = \frac{z^{-N}}{1 - z^{-N}} = \frac{1}{z^N - 1} \quad (4)$$

本文提出了一种在旋转坐标系下针对 $pk \pm 1$ 次谐波且采样次数为 N/p 的改进型重复控制，重复控制可以表示为

$$G_{re}(z) = \frac{1}{z^{N/p} - Q(z)} K_r z^k S(z) \quad (5)$$

式中: $Q(z)$ 为补偿器; z^k 为相位补偿; K_r 为重复控制器的增益。

由式(5)可得重复控制的极点为(为了便于分析, 令 $Q(z)=1$)

$$z = e^{j(pk)\frac{2\pi}{NT}}, k=0, 1, 2, \dots \quad (6)$$

从式(6)可以看出, 在 pk 次谐波处正好是重复控制器的极点处, 因此, 该重复控制器对 pk 次谐波具有无穷大增益, 能够有效地抑制 pk 次谐波。其中 $S(z)$ 为低通滤波器, 为了加快 APF 控制器在高频电流处的衰减效果, 一般 $S(z)$ 取二阶巴特沃斯低通滤波器, 表达形式为

$$S(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (7)$$

$M=N/p$ 表示重复控制一个周期的采样次数, 为了使 M 能够自适应地改变, 同时保证 M 为整数, 则

$$M = \frac{N}{p} = \left\lfloor \frac{f_c}{pf_0} \right\rfloor \quad (8)$$

式中: f_c 为采样频率; f_0 为指令电流的频率, 通过锁相环实时采集信号。当 $p=1$ 时, 可以补偿任意次谐波; 当 $p=2$ 时, 可以补偿偶数次谐波; 当 $p=6$ 时, 可以补偿 $6k$ 次谐波, 以此类推。

负载产生的 $pk\pm 1$ 次谐波, 例如单相整流器只含有奇数次谐波, 奇数次经过 park 变换后, 转换为 dq 坐标系下的偶数次谐波, 再经过 park 反变换得到系统的三相补偿电流。第一次 park 变换将 $pk\pm 1$ 次和 pk 次的谐波电流互换, 第二次 park 反变换实现了 dq 坐标系到 abc 坐标系的相互转换。

在复合控制系统中, 当负载突变时, 由 $i_a(k+1) = i_a^*(k)$ 可以得出: 无差拍控制输出电流和参考电流之间仅存在一个采样周期的延时, 可以很好地跟踪指令电流信号; 而重复控制存在 N/p 个周波的延迟, 重复控制的输出几乎与前一个采样周期相同, 经过 N/p 个周波后, 重复控制才开始起到修正的作用。因此, 在系统突变的瞬间, 无差拍控制可以提高系统的动态性能; N/p 个周波后, 重复控制提高系统的控制精度。文献[15]指出可以在重复控制的基础上串联反馈控制, 其目的是加快系统响应速度同时满足稳定性条件, 系统结构如图 3 所示, 谐波指令电流输入至重复控制器中, 同时前馈到无差拍控制器。

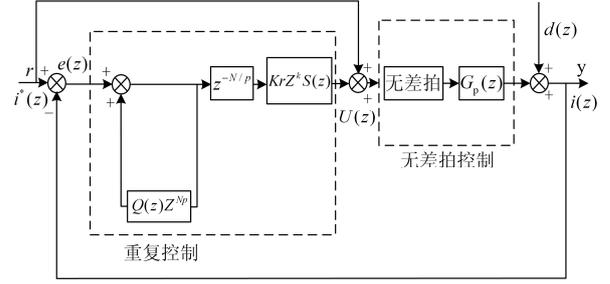


图 3 本文提出的复合控制结构图

Fig. 3 Block diagram of current loop with the one sampling ahead preview control

3 复合控制器的设计及稳定性分析

3.1 无差拍控制器的稳定性分析

理想情况下, 差一拍控制的传递函数可以表示为

$$H(z) = z^{-1} \quad (9)$$

则采用无差拍控制器的差分方程可以表示为

$$i_a^*(z) = i_a(z) + \frac{T_s}{L} [U(z) - E(z) - i(z)R] \quad (10)$$

由于系统的电感和电阻值的不确定性, 即

$$\begin{cases} L_n = L_r + \Delta L \\ R_n = R_r + \Delta R \end{cases} \quad (11)$$

式中: L_r 、 R_r 分别为电感和电阻的真实值; ΔL 和 ΔR 分别为变动值, $|\Delta L| \leq \delta_1$, $|\Delta R| \leq \delta_2$, 且 δ_1 、 $\delta_2 > 0$ 。联立上两式得

$$zi_a(z) = i_a(z) + \frac{T_s}{L_r + \Delta L} (U(z) - E(z) - i_a(z) \cdot (R + \Delta R)) \quad (12)$$

因此无差拍控制的传递函数可以修正为

$$\frac{i_a(z)}{i_a^*(z)} = \frac{L_r}{(L_r + \Delta L)z - \Delta L + T_s \Delta R} \quad (13)$$

显然从上式可以得出, 只要满足 $\Delta L \geq -0.5(L_r - T_s \Delta R)$, 系统稳定。

3.2 重复控制器稳定性分析

只有重复控制作用时, 重复控制器的传递函数可以表示为

$$G_{re}(z) = \frac{z^{-N/p} K_r z^k S(z)}{1 - Q(z) z^{-N/p}} \quad (14)$$

所以误差传递函数可以表示为

$$e(z) = i^*(z) - (i^*(z) + G_{re}(z))G_p(z) \quad (15)$$

误差函数与参考电流的关系为

$$e(z) = \frac{[1 - G_p(z)][1 - Q(z)z^{-N/p}]}{z^{N/p} - [Q(z) - K_r z^k S(z)G_p(z)]} i^*(z) \quad (16)$$

得出误差传递函数的特征方程为

$$z^{N/p} - [Q(z) - K_r z^k S(z) G_p(z)] = 0 \quad (17)$$

由小增益原理, 只要满足式(17)的模小于 1, 即

$$|z^{N/p}| = |Q(z) - K_r z^k S(z) G_p(z)| < 1 \quad (18)$$

若上式成立, 则系统稳定。这里的 $Q(z)$ 取 0.95。权衡整个系统的稳定性和动态性能, K_r 取 1.5。

4 仿真和实验分析

4.1 仿真分析

在理论分析的基础上, 为验证复合控制的补偿效果, 通过 Matlab/Simulink 构建三相三线制并联型有源电力滤波器的仿真模型。APF 的仿真模型参数如下: 交流电压源有效值 220 V, 频率 50 Hz, 负载电阻 3 Ω , 电感 1 mH, 电容 5 mF。直流侧电压设置为 700 V。

其他仿真参数为交流侧电阻 $R=0.05 \Omega$, 滤波电感 $L=2 \text{ mH}$ 。设定电路中采样频率为 5 kHz, 将被控对象离散化可得

$$G_0(z) = \frac{0.04944}{z - 0.9975} \quad (19)$$

采用无差拍控制时, 系统的闭环传递函数可以表示为

$$G_p(z) = \frac{0.4944}{z - 0.4982} \quad (20)$$

在重复控制器设计中, 按照中低频对消、高频衰减的原则进行控制器参数的选择, 以保证系统的稳定性。通常系统低频段的增益效果与截止频率有着直接的关系, 因此截止频率尽可能地取大, 但是截止频率过大又会导致系统衰减效果较差, 结合工程实际, 取截止频率 $\omega_n=3000 \text{ Hz}$, 阻尼比为 0.707, 二阶低通滤波器 z 域表达式为

$$S(z) = \frac{0.2758z^2 + 0.5117z + 0.1377}{z^2 - 0.0694z + 0.1727} \quad (21)$$

通过 $S(z) \cdot G_p(z)$ 的波特图可得, 需要加入相位补偿器 z^k 补偿相位滞后, 通过比较发现, 当 $k=3$ 时, 两者相位基本一致, 结合无差拍控制, 文中 k 取 4。由本文方法可以根据负载的不同设定 p 的值, 本文中负载多为奇数次谐波, p 可以取 2。为了验证以上分析, 在仿真过程中, 以 A 相电流为例, 系统电流的负载波形如图 4 所示。

仅用无差拍控制时 APF 电流输出波形、电网电流补偿后的波形、电流跟踪误差波形以及补偿后网侧电流波形频谱分析图如图 5 所示。加入重复控制

器后 APF 电流输出波形、电网电流补偿后的波形、电流跟踪误差波形和补偿后网侧电流波形频谱分析图如图 6 所示。

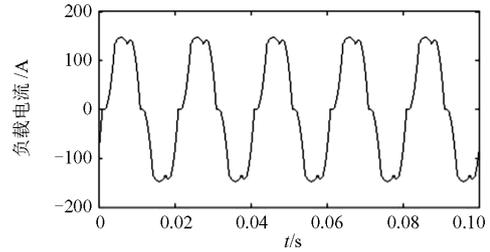
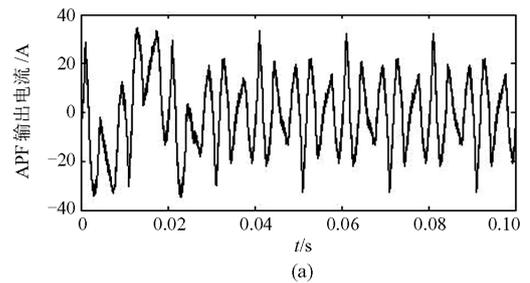
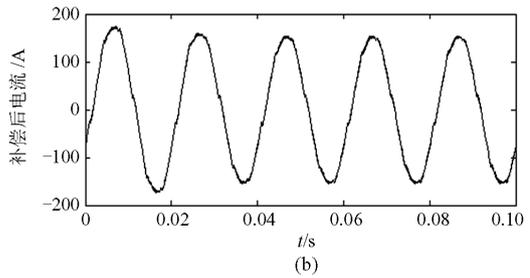


图 4 负载电流波形

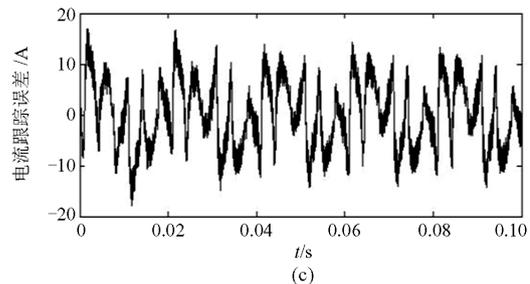
Fig. 4 Waveform of load current



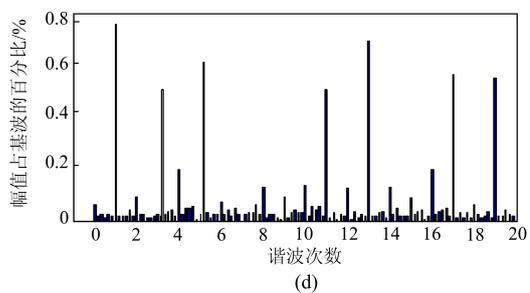
(a)



(b)



(c)



(d)

图 5 无差拍策略的 APF 仿真图

Fig. 5 Simulation of APF based on deadbeat control strategy

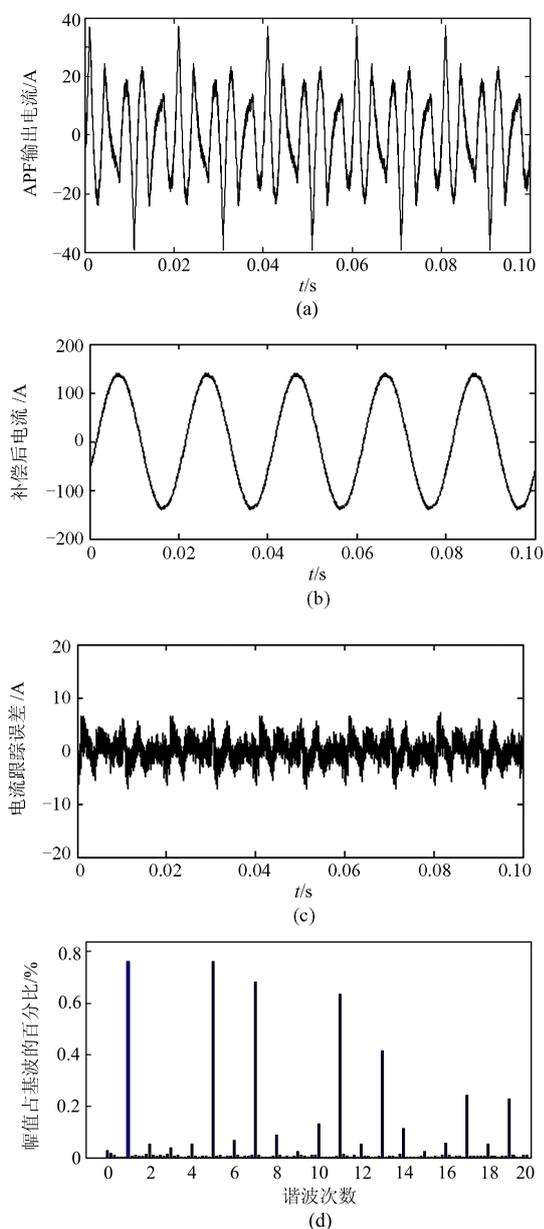


图 6 改进后复合控制策略的 APF 仿真图

Fig. 6 Simulation of APF based on hybrid control strategy after improvement

从图 5 和图 6 的比较中可以得出, 采用无差拍控制时, 其谐波畸变率(*THD*)由 12.4%降低到了 4.2%, 虽然补偿电流有了很好的改善, 但仍然不理想, 当采用本文提出的复合控制时, 谐波畸变率降低为 1.9%, 滤波效果较无差拍控制有了很大的改善。

图 7 为负载发生突变时(电阻由 $3\ \Omega$ 变为 $6\ \Omega$)网侧电流补偿后的波形。系统发生突变时, 网侧电流在半个周期内保持稳定, 并且能够很好地补偿谐波电流, 仿真表明, 改进后的复合控制有良好的动态特性和稳态性能。

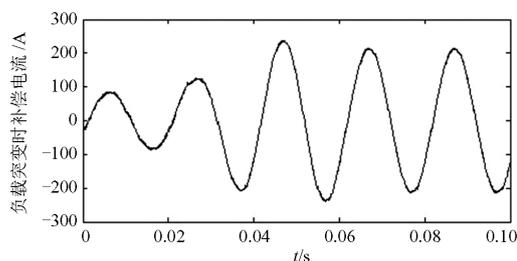


图 7 负载突变时电流补偿波形

Fig. 7 Waveform simulation of the sudden change

4.2 实验验证

实验采用 T1 公司的 32 位定点 DSP 芯片 TMS320F2812 为控制单元, 主电路的控制器件采用优派克 BSM50GB120DLC 型 IGBT 模块, 结合仿真结果, 搭建有源电力滤波器的实验平台。图 8 和图 9 分别为采用平推预测无差拍控制和复合控制的实验波形图, 图 10 为加载前后电流跟踪实验波形图。

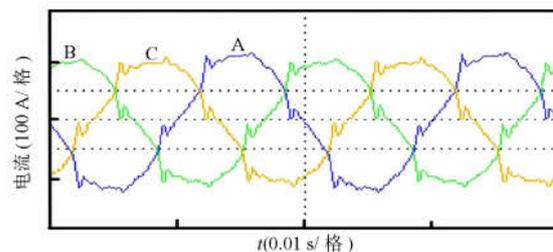


图 8 无差拍控制补偿网侧电流波形图

Fig. 8 Measured grid current with deadbeat control compensating scheme

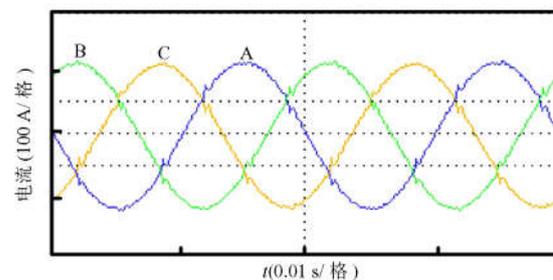


图 9 复合控制补偿网侧电流波形图

Fig. 9 Measured grid current with compound control compensating scheme

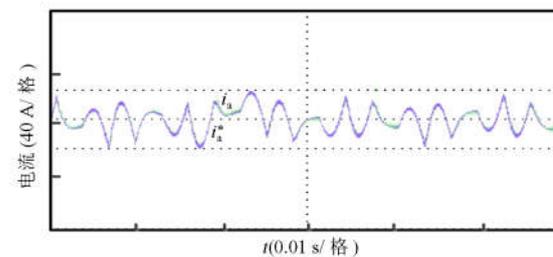


图 10 负载突变时电流跟踪波形图

Fig. 10 Current tracking waveforms while load sudden change

从图中可以看出：仅采用无差拍控制时，虽然网侧电流的波形已经得到改善，但是依然存在较多的毛刺，此时 THD 由 13.9% 降低为 7.8%，系统的稳定性并不理想；加入重复控制后毛刺现象得到明显改善， THD 由 7.8% 降低为 2.8%。同时在加载前后，补偿电流可以快速地跟踪谐波电流。波形质量得到较大的改善，系统可以稳定运行。

5 结论

(1) 针对 $pk \pm 1$ 次谐波的抑制，提出的复合控制系统包含了无差拍控制和重复控制，能够有效地抑制谐波，具有良好的动态性能和稳态性能。

(2) 重复控制器可以通过调节 p 的值来抑制 $pk \pm 1$ 次谐波，并缩短重复控制的工频延时，减少采样次数，性能优于常规的重复控制器。

(3) 仿真和实验结果表明，复合控制器能够改善波形质量，有效地抑制谐波。

参考文献

- [1] LI Zhengming, LI Wenwen, PAN Tianhong. An optimized compensation strategy of DVR for micro-grid voltage sag[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: pp.
DOI 10.1186/s41601-016-0018-9
- [2] 吕广强, 刘娱, 段海军. APF 中一种改进的变步长 LMS 自适应谐波检测算法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 96-101.
LÜ Guangqiang, LIU Yu, DUAN Haijun. An improved variable step-size LMS adaptive harmonic detection algorithm for active power filters[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 96-101.
- [3] 王洪诚, 王蕾, 沈霞, 等. 基于改进增益型自适应 LMS 算法的谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 42-46.
WANG Hongcheng, WANG Lei, SHEN Xia, et al. New harmonic detection method based on LMS algorithm of improved adaptive gain[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 42-46.
- [4] GARCIA CERRADA A, PINZON ARDILA O, FELIU BATLLE V, et al. Application of a repetitive controller for a phase active power filter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(1): 237-246.
- [5] 徐群伟, 钟晓剑, 胡健, 等. 基于误差迭代 PI 和改进重复控制的 APF 补偿电流控制[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(3): 124-131.
- XU Qunwei, ZHONG Xiaojian, HU Jian, et al. Compensation current control of APF based on error iteration PI and improved repetitive control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(3): 124-131.
- [6] HUANG Wei, ZHOU Lidan, LI Lixue, et al. A novel recursive integral PI repetitive control for three-phase three-wire shunt active power filter[C] // Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2011 6th IEEE Conference on: IEEE, 2011, 49(20): 493-498.
- [7] 陈玉庆, 武玉强, 蔡彬. 基于电流环复合控制的有源电力滤波器[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(10): 43-49.
CHEN Yuqing, WU Yuqiang, CAI Bin. Active power filter based on compound control of current loop[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(10): 43-49.
- [8] 刘飞, 宫金武, 彭光强, 等. 一种复合式重复控制在并联型有源电力滤波器设计中的应用[J]. 电工技术学报, 2012, 27(12): 138-145.
LIU Fei, GONG Jinwu, PENG Guangqiang, et al. Application of compound repetitive control in shunt active power filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(12): 138-145.
- [9] SUN Jianjun, GONG Jinwu, CHEN Baifeng, et al. Analysis and design of repetitive controller based on regeneration spectrum and sensitivity function in active power filter system[J]. IET Power Electronics, 2014, 7(7): 2133-2140.
- [10] 宫金武, 查晓明, 陈佰锋. 一种快速重复控制策略在 APF 中的实现和分析[J]. 电工技术学报, 2011, 26(10): 110-117.
GONG Jinwu, ZHA Xiaoming, CHEN Baifeng. Analysis and realization of a fast repetitive controller in active power filter system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(10): 110-117.
- [11] RODRIGUEZ A, GIRÓN C, SÁEZ V, et al. Analysis of repetitive-based controllers for selective harmonic compensation in active power filters[C] // IECON Proceedings, 2010: 2013-2018.
- [12] 何英杰, 刘进军, 王兆安, 等. 基于重复预测原理的三相 APF 无差拍控制方法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(2): 114-120.

- HE Yingjie, LIU Jinjun, WANG Zhaoan, et al. A deadbeat control algorithm based on repetitive predictor theory for three-level active power filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(2): 114-120.
- [13] 周娟, 秦静, 王子绩, 等. 内置重复控制器无差拍控制在有源滤波器中的应用[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 233-238.
- ZHOU Juan, QIN Jing, WANG Ziji, et al. Application of deadbeat control with plug-in repetitive controller in active power filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 233-238.
- [14] 史丽萍, 蔡儒军, 陈丽兵, 等. 三相三线制有源滤波器的改进无差拍控制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(14): 32-37.
- SHI Liping, CAI Rujun, CHEN Libing, et al. A deadbeat control scheme for three-phase three-wire active power filter[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(14): 32-37.
- [15] 邹志翔, 王政, 程明. 双模结构重复控制器在单相并联有源滤波器中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 88-95.
- ZOU Zhixiang, WANG Zheng, CHENG Ming. A hybrid current regulation scheme for single-phase active power filters based on dual-mode structure repetitive control[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 88-95.

收稿日期: 2016-07-19; 修回日期: 2016-12-01

作者简介:

李正明(1958—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为微电网及配电系统的保护与控制; E-mail: lzming@ujs.edu.cn

高远(1991—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为微电网, 电能质量。

(编辑 葛艳娜)