

DOI: 10.7667/PSPC161558

并联型 APF 直流侧电压的滑模 PI 控制策略研究

李兰芳¹, 徐晓刚¹, 吴国兵², 蔡晓燕²

(1. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广东 广州 510080;

2. 广州开能电气实业有限公司, 广东 广州 510670)

摘要: 并联有源滤波器(shunt active power filter, SAPF)在主动配电网系统中应用日益广泛, 提升 SAPF 的补偿性能成为众多学者关注和研究的热点。对直流侧电压精准稳定控制是保证 SAPF 补偿性能的关键。采用传统 PI 控制系统在非线性负载突变和电压跳变时无法对直流侧电压进行快速稳定控制, 为改善直流侧电压的控制性能, 提出电压外环滑模变结构 PI 复合控制器。仿真与实验结果表明: 滑模 PI 复合控制器提高了直流电压控制的稳态精度和响应速度, 降低了直流电压波动对 SAPF 补偿性能的影响。

关键词: 并联有源滤波器; 主动配电网; 滑模变结构控制; 直流侧电压控制

PI control based on sliding mode variable structure of DC-link voltage for shunt active power filter

LI Lanfang¹, XU Xiaogang¹, WU Guobing², CAI Xiaoyan²

(1. Electric Power Research Institute, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China;

2. Guangzhou KINO Electrical Industrial Co., Ltd., Guangzhou 510670, China)

Abstract: Duo to the shunt active power filter is widely used in the active power distribution system, more and more scholars aim to improve the compensation performance of the SAPF. The precise performance of the DC-link voltage is the key to ensure the SAPF be steady. Due to the bad performance of the output DC-link voltage based on the traditional PI controller, especially, under the load step-change and the reference voltage jump change, this paper presents an effective sliding mode variable structure control based PI control method in the voltage loop. At last, the simulations and experimental results show that the SMC based on PI scheme can improve the steady-state performance and transient response of the DC-link voltage, and reduce the bad affection of the DC-link voltage fluctuations.

This work is supported by Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (No. GDKJXM00000015).

Key words: shunt active power filter; active power distribution system; sliding mode variable structure control; DC-link voltage

0 引言

随着电力电子装置在主动配电系统中的广泛应用, 配电系统中的谐波污染等问题日趋严重, 有源电力滤波器(Active Power Filter, APF)作为一种解决电网谐波污染的有效手段, 它可以对系统存在的谐波、负序电流及无功功率实现准确、实时有效的补偿^[1-5]。其中对有源滤波器拓扑结构和检测及电流控制算法的研究已经比较成熟, 关于直流侧电压控制性能的研究日益增多, 直流侧电容电压的稳定控制

是保证有源滤波器补偿性能的重要环节。本文主要是针对三相三线制并联有源滤波器的直流侧电压进行研究。

目前用于 APF 直流侧电压的主要控制方法有传统 PI 控制算法、模糊控制器、自适应等控制方法^[6-10]。传统 PI 控制器用于直流侧电压控制时, 虽能够最终满足直流电压稳定, 但电压的响应速度慢, 并且存在超调, 在负载突变时和参考电压跳变时无法满足需要。模糊控制器不依赖系统, 便于移植, 其鲁棒性能较强; 然而其控制精度差, 直流侧电压波动大导致损耗增大而降低 APF 的补偿性能。基于电压自适应控制方法实现较为复杂, 在控制算法运算时占用片上资源较多, 其直流侧电压动态性能不理想。

基金项目: 中国南方电网有限责任公司科技项目 (GDKJXM00000015)

为此, 本文提出滑模 PI 复合控制算法来提高直流侧电压在负载突变和参考电压跳变时的稳态精度和响应速度, 从而保证并联有源滤波器的补偿特性。在负载突变和参考电压发生跳变时, 该方法利用滑模控制器能够在模型变化情况下快速输出 PI 算法的控制参数, 这种变 PI 参数控制的方法可有效地改善直流侧电压的动态和稳态特性。另外, 为削弱滑模控制器的抖振, 针对电压误差设定边界值, 在边界值外滑模控制器可以提高直流电压的动态响应速度, 在边界层内可以有效提高系统的跟踪稳态性能^[11-14]。最后, 通过 Matlab/Simulink 仿真模型与实验平台验证所提算法的有效性与其可行性。

1 并联 APF 数学模型

图 1 所示为三相三线制并联有源电力滤波器的主电路拓扑, 图中 u_{sa}, u_{sb}, u_{sc} 为三相接入点电压, u_{fa}, u_{fb}, u_{fc} 为三相各桥臂中点电位, $i_{s(a,b,c)}, i_{l(a,b,c)}, i_{f(a,b,c)}$ 分别为电源输入电流、负载电流和补偿电流, R 为线路以及电感的等效电阻, L 为平波电感, C 为直流侧电容, 电容两端电压为 u_{dc} 。

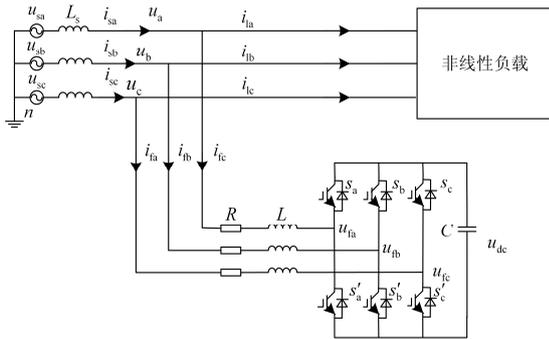


图 1 三相三线并联型 APF 主电路结构

Fig. 1 Main circuit topology of three-phase three-wire SAPF

为简化并联 APF 控制系统的设计, 设开关处于理想状态, 忽略开关参数的影响; 同时采用同步旋转坐标变换, 将 abc 坐标系下的强耦合高阶系统模型变换到 dq 坐标系的低阶系统模型。设 dq 坐标系下, 接入点电压为 u_{sd}, u_{sq} , 并联 APF 桥臂电压为 u_{td}, u_{tq} , 并联 APF 补偿电流为 i_{td}, i_{tq} , 则并联 APF 的数学模型为

$$\begin{cases} L \frac{di_{td}}{dt} = u_{sd} - u_{td} + L\omega i_{tq} - Ri_{td} \\ L \frac{di_{tq}}{dt} = u_{sq} - u_{tq} - L\omega i_{td} - Ri_{tq} \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = i_{td} + i_{tq} - \frac{u_{dc}}{R_{dc}} \end{cases} \quad (1)$$

令并联 APF 的电流内环处于稳定控制状态, 在一个控制周期 T_s 内 APF 输出能量为零, 此时 APF 输出能量全部存储在直流侧电容上, 此时直流侧能量方程为

$$C \frac{du_{dc}^2}{2dt} + \frac{u_{dc}^2}{R_{dc}} = u_{sd} i_{td} + u_{sq} i_{tq} \quad (2)$$

式(1)、式(2)中, T_s 为直流侧电容器的内阻与外接功能电阻的等效电阻。

2 直流侧电压波动分析

为使有源滤波器能够有效地补偿系统谐波电流, 根据逆变器的控制规律可知直流侧电压必须能够保持稳定, 为逆变器提供电压基准值和能量, 因此 APF 直流侧电压稳定控制非常重要。可采用 PI 控制器解决这个问题, 主要是通过主电路检测到的直流侧电容两端电压与直流电压参考值进行求差值, 将偏差值 T_s 作为 PI 控制器的输入, 经过 PI 控制器运算得到直流侧基波电流的有功分量幅值。图 2 为直流侧电压采用 PI 控制器系统补偿后的电流波形, 如图 2 所示补偿后电流中存在大量的尖峰和毛刺。毛刺一方面是电力电子开关器件工作特性造成的; 另一方面是直流电压含有大量的纹波, 而尖峰主要负载突变和直流电压波动造成。

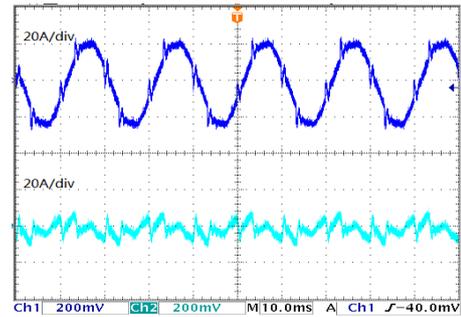


图 2 直流侧电压采用 PI 控制系统下的电源电流和补偿电流
Fig. 2 Grid current and compensation current waveforms of PI method for DC-link voltage

针对直流侧电压波动, 分析其对有源滤波器补偿的影响。对直流侧电容应用基尔霍夫定律:

$$C \frac{du_{dc}}{dt} = i_{dc} \quad (3)$$

根据能量守恒, APF 输出能量全部存储在直流侧电容上, 由式(3)可得直流电容的功率方程为

$$P_c = Cu_{dc} \frac{du_{dc}}{dt} = C \frac{du_{dc}^2}{2dt} \quad (4)$$

式(4)中, P_c 为 APF 直流电容的存储有功功率, 令其平均值为 P_{avc} , 则在一个开关周期的平均值可表示为

$$P_{avc} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} P_c dt = \frac{C}{2T_s} [u_{dc}^2(T_s) - u_{dc}^2(0)] = \frac{C\Delta u_{dc}^2}{2T_s} \quad (5)$$

令电源传输的瞬时功率为 P_s ，负载侧传输的瞬时有功功率为 P_l ，令其平均值分别为 P_{avs} 和 P_{avl} ，根据能量守恒定律可得三者之间的关系为

$$P_{avc} = P_{avl} - P_{avs} = \frac{C\Delta u_{dc}^2}{2T_s} \quad (6)$$

电源平均功率为： $P_{avs} = U_s I_s / 2$ ，其中 P_{avs} 和 P_{avl} 分别为系统相电压、相电流的幅值，将式(3)代入其中，并对其运算可求出直流电压偏差值与电源电流以及负载传输功率之间的关系为

$$I_s = \frac{2}{U_s} (P_{avl} - \frac{C\Delta u_{dc}^2}{2T_s}) \quad (7)$$

式(7)可以得出直流侧电压波动会严重影响电网系统电流，导致系统电流发生畸变，从而降低有源滤波器的补偿性能。

3 滑模 PI 控制策略

滑模 PI 控制器的设计主要有两个目的：(1) 在负载突变和参考电压跳变时，直流侧电压能够保持足够的响应速度；(2) 在直流侧电压稳定控制能够具有良好的鲁棒性能。图 3 为并联 APF 基于电压滑模 PI 复合控制的双闭环控制系统，直流电压采用新型滑模 PI 控制器，其控制原理与传统 PI 控制相似，滑模 PI 控制器的输出作为电流内环的电流参考值 i_{fd_ref} ，关于电流内环控制已有大量文献介绍，本文不再赘述，接下来主要研究滑模 PI 控制器，主要包括滑模面的设计和滑模控制器的可达性。

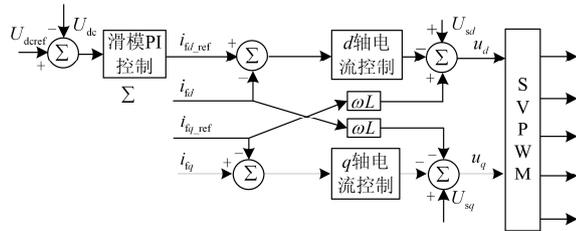


图 3 并联有源滤波器的双闭环控制框图

Fig. 3 Block diagram of double-loop control system for SAPF

3.1 滑模面的设计

图 4 为滑模 PI 复合控制方法的控制框图，APF 直流侧的控制器主要用于电压的稳定控制，其控制自由度变量采用直接变量直流电压 u_{dc} ，这样可以直接对控制量进行控制；根据文献[8]选取滑模面的原则，可定义直流侧电压的滑模控制面为

$$S = k(u_{dc_ref} - u_{dc}) + \frac{d(u_{dc_ref} - u_{dc})}{dt} \quad (8)$$

式(8)中令 $e_{dc} = u_{dc_ref} - u_{dc}$ ，其中 k 为正常数。

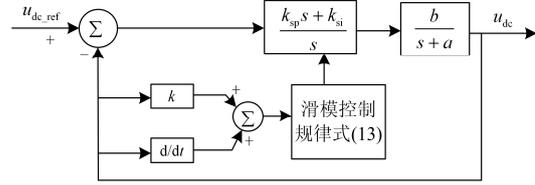


图 4 并联有源滤波器的滑模 PI 控制框图

Fig. 4 Block diagram of the SMC-PI control scheme for SAPF

直流侧电压的稳定控制是保证有源滤波器补偿性能的关键技术之一，并联 APF 在正常工作状态用于补偿谐波电流和无功电流，为简化推导过程，令 q 轴电流为零，则利用 d 轴电流推导有源滤波器直流侧电压的传递函数为

$$G_{dc}(s) = \frac{u_{dc}(s)}{i_d(s)} = \frac{1/C}{S + 1/R_{dc}C} = \frac{b}{S + a} \quad (9)$$

式(9)中： $b = 1/C$ ； $a = 1/R_{dc}C$ 。

滑模控制器的输出用于确定 PI 控制器参数，其形式与传统 PI 控制器类似，基于上一小节关于传统 PI 控制器的介绍可直接得出基于滑模控制的 PI 控制器：

$$C_{SMC_PI}(s) = \frac{k_{sp}s + k_{si}}{s} \quad (10)$$

式(10)中， k_{sp} 、 k_{si} 为 PI 控制器的参数，它们由滑模控制器按照所设计的滑模面(8)来决定其值的大小，其主要特点是根据系统的变化而得到较合适的 PI 控制参数。利用式(9)和式(10)可以得到直流侧电压的动态闭环函数为

$$\frac{u_{dc}(s)}{u_{dc_ref}(s)} = \frac{bk_{sp}(s + k_{si}/k_{sp})}{s^2 + (a + bk_{sp})s + bk_{si}} \quad (11)$$

为保证直流侧电压的稳定控制，根据式(11)可以得到一下关系式为

$$\begin{cases} a + bk_{sp} > 0 \\ bk_{si} > 0 \end{cases} \quad (12)$$

为使式(12)成立，根据滑模面(8)设计 PI 控制器的控制参数输出函数为

$$\begin{cases} k_{sp} = [(1 + \text{sgn}(s))k_{p+} - (1 - \text{sgn}(s))k_{p-}] + k_{av_p} \\ k_{si} = [(1 + \text{sgn}(s))k_{i+} - (1 - \text{sgn}(s))k_{i-}] + k_{av_i} \end{cases} \quad (13)$$

式(13)中，控制参数 k_{p+} 、 k_{p-} 、 k_{i+} 、 k_{i-} 都为正数，这些控制参数是在满足 PI 控制输出特性下的整定结果，它们可以按照标准 PI 控制器的方法来进行整定，例如采用根轨迹法等；同时为消除系统在滑模控制面附近产生的直流电压波动，分别在 PI 控制器

的微分和积分参数加上正参数 k_{av_p} 、 k_{av_i} ，从而消除由滑模面抖振造成直流侧电压的波动问题。其中 $\text{sgn}(s)$ 为饱和函数：

$$\text{sgn}(s) = \begin{cases} 1, s > 0 \\ -1, s < 0 \end{cases} \quad (14)$$

3.2 滑模控制器的可达性

为证明所设计滑模 PI 控制器的稳定性，根据在滑模面(8)滑动切换的特点，在滑模控制器的滑模面邻域内，基于滑模控制器的系统将于有限时间到达切换面，则意味着滑模模态存在，选取李亚普诺夫函数 $V(e_{dc}) = e_{dc}^2/2$ ，并对时间求导得：

$$V(e_{dc}) = e_{dc} \dot{e}_{dc} = e_{dc} (-ke_{dc}) = -ke_{dc}^2 < 0 \quad (15)$$

式(15)中， k 为正常数，且 e_{dc}^2 大于零，式(15)小于零恒成立则证明了所设计滑模控制器的稳定性^[4,8]。

滑模控制器在滑模面领域内的抖振是难以避免的，为消除系统在滑模控制面领域产生的直流电压波动，分别在 PI 控制器的微分和积分参数加上正参数 k_{av_p} 、 k_{av_i} ，从消除由滑模面抖振造成直流侧电压的波动问题。当 $S > 0$ 时， $k_{sp} = 2k_{p+} + k_{av_p}$ ， $k_{si} = 2k_{i+} + k_{av_i}$ ；当 $S < 0$ 时， $k_{sp} = 2k_{p-} + k_{av_p}$ ， $k_{si} = 2k_{i-} + k_{av_i}$ 。

4 仿真与实验分析

4.1 仿真结果分析

为验证滑模 PI 控制策略的可行性和有效性，建立基于 Matlab/Simulink 的仿真模型，并将滑模 PI 控制与传统 PI 控制进行比较。其仿真模型参数如下：三相电源为 220 V/50 Hz；直流电压给定值为 650 V；负载采用三相不可控整流桥接电阻，其阻值为 10 Ω ；负载跳变时，在负载上并联一个 20 Ω 电阻；直流侧电容为 4000 μF ；开关频率 10 kHz。传统双闭环 PI 控制器根据本身特性，按照二阶模型并综合考虑系统动态性能和稳态性能进行设计，电流环控制参数为 $k_p = 55$ ， $k_i = 10$ ，外环控制参数为 $k_p = 1.5$ ， $k_i = 3$ ；基于滑模 PI 控制策略的控制参数为 $k = 110$ ， $k_{p+} = 0.035$ ， $k_{p-} = 0.027$ ， $k_{i+} = 3.125$ ， $k_{i-} = 0.92$ ， $k_{av_p} = 0.23$ 、 $k_{av_i} = 3.25$ 。

图 5 和图 6 分别为 PI 和滑模 PI 控制方法下的直流侧参考电压跌落和升高时直流侧电压波形图。如图 5 所示，在 $t=9$ s 时参考给定电压从 650 V 跌落到 600 V，基于 PI 滑模控制系统的直流侧电压能够快速趋近于给定参考值，从图 5 可以看出 PI 滑模大约仅需 0.1 s 第一次达到给定值，而 PI 控制方法

大约需要 0.3 s 才能到给电压定值；另外基于 PI 滑模控制的直流电压波形符合滑模控制器在滑模面邻域内切换的特征，快速性要优于 PI 控制方法，而在直流电压波动方面优势不明显。图 6 为直流侧参考电压升高时电压对比波形图，此时滑模 PI 控制策略在快速性和稳定性能方面优势比较明显，滑模 PI 控制大约仅需 0.11 s 就到达稳定状态，而 PI 控制大约需要 0.3 s 才趋于稳定值。

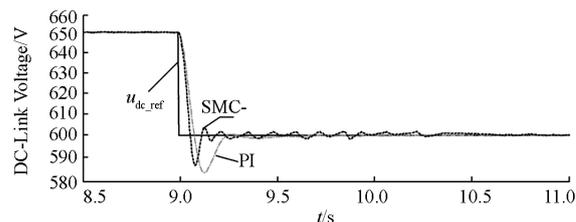


图 5 参考电压跌落时，PI 与滑模 PI 控制的直流侧电压波形
Fig. 5 DC-link voltage waveforms of both the PI and the SMC-PI strategies when the reference DC-link voltage sags

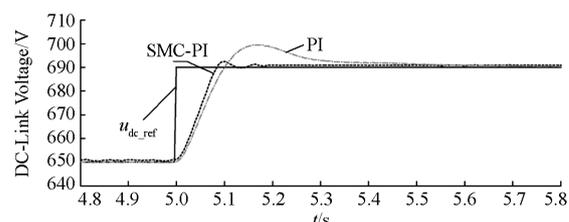


图 6 参考电压升高时，PI 与滑模 PI 控制的直流侧电压波形
Fig. 6 DC-link voltage waveforms of both the PI and the SMC-PI strategies when the reference DC-link voltage increases

图 7 和图 8 分别为 PI 和滑模 PI 控制方法下负载突变时的直流侧电压波形图。图 7 所示为负载变小时的电压波形图，在 $t=12$ s 时，在负载 10 Ω 上并联 20 Ω 跳变到 6.67 Ω ；图 8 所示断开并联电阻 20 Ω ，负载升高到 10 Ω ；从图 7 和图 8 可以观察到滑模 PI 控制策略电压波形超调小，且响应速度快。通过以上波形对比验证了基于滑模 PI 控制方法的系统可以快速强迫系统运行轨线快速向滑动流形移动，提高直流侧电压控制的响应速度和加速系统的收敛过程，从而使系统快速到达稳定状态。

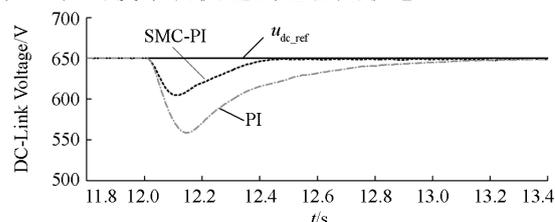


图 7 负载减小时，PI 与滑模 PI 控制的直流侧电压波形图
Fig. 7 When the load steps down, the DC-link voltage waveforms of both the PI and the SMC-PI strategies

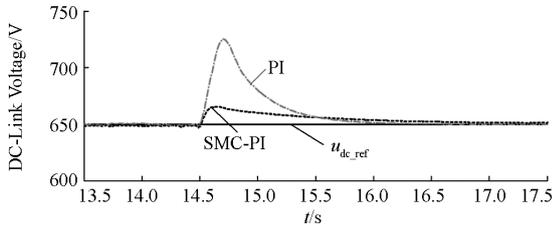


图 8 负载增大时, PI 与滑模 PI 控制的直流侧电压波形图
Fig. 8 DC-link voltage waveforms of both the PI and the SMC-PI strategies when the load steps up

4.2 实验结果分析

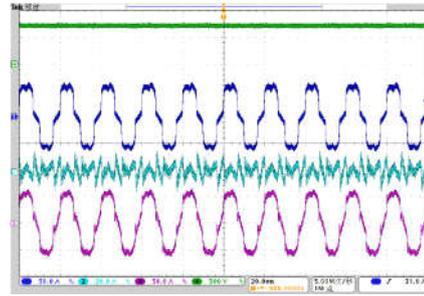
通过仿真结果对比分析验证了滑模 PI 控制器对直流侧电压控制性能的提高, 实验结果与仿真结果一致, 此处不再赘述, 接下通过实验样机来分析补偿性能。根据仿真模型搭建实验样机, 如图 9 所示, 实验装置中的 IGBT 选用 2MB1400U4H, 其驱动模块采用 2SD315A; TMS320CS467DSP 芯片为核心控制器, 该芯片用作核心方法运算、采样中断控制以及驱动信号分配等; 实验记录装置主要包括 FLUKE 万用表, 示波器泰克 TBS1000 和电能质量分析仪 E6000 等器材。



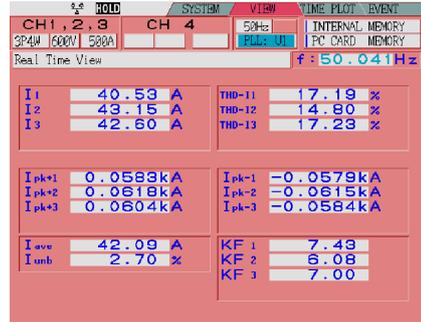
图 9 三相三线并联型 APF 实验样机

Fig. 9 Experimental topology of three-phase three-wire SAPF

图 10 和图 11 所示为两种控制方法下的补偿后电流及谐波分析, 从图 10(a)和图 11(a)中补偿后电流波形可以明显看出基于滑模 PI 控制系统的电流波形正弦化程度高, 而图 10(a)所示补偿后 a 相电流波形中的尖峰和毛刺含量高于图 11(a)中所示的补偿后 a 相电流; 另同时分别给出三相电流的谐波分析结果, 传统 PI 控制方法下的三相电流谐波平均值约为 16%, 而滑模 PI 控制下的三相电流谐波约为 5%; 从而明显得出基于滑模 PI 控制系统的补偿性能较好, 这证明了直流侧电压的稳定控制有助于 APF 补偿性能的提高。

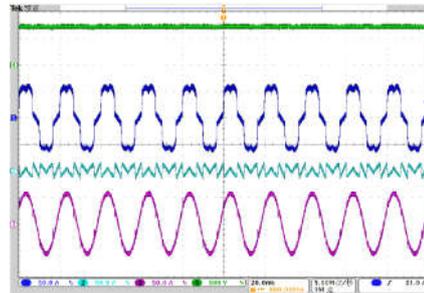


(a) 补偿后的 a 相电流

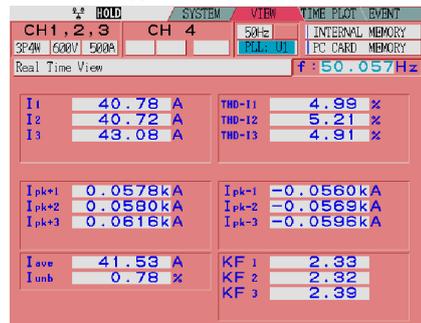


(b) 补偿后三相电流的谐波分析

图 10 PI 控制方法下补偿后的电流波形及谐波分析
Fig. 10 Compensated grid current waveform and harmonic analysis of the PI method



(a) 补偿后的 a 相电流



(b) 补偿后三相电流的谐波分析

图 11 滑模 PI 控制方法下补偿后的电流波形及谐波分析
Fig. 11 Compensated grid current waveform and harmonic analysis of the SMC-PI scheme

5 结论

本文详细分析直流侧电压波动与谐波补偿功率

的关系, 针对传统 PI 控制算法在响应速度和稳态性方面的不足, 设计一种能够实现 PI 控制参数在线自修正的滑模 PI 复合控制器。该方法改善了直流侧电压控制的动态和稳态性能, 降低了直流侧功率损耗而保证了有源滤波器的补偿性能。仿真与实验结果表明了滑模 PI 复合控制的有效性和可行性, 在实际工程中具有较好的应用价值和前景。

参考文献

- [1] 赵辉, 吕新亚, 王红君, 等. 基于复合控制策略的混合有源滤波器谐波治理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 60-66.
ZHAO Hui, LÜ Xinya, WANG Hongjun, et al. Study on control strategy based on compound control for hybrid active power filter harmonic governance[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 60-66.
- [2] 陈仲, 王志辉, 陈森. 一种高动态性能的级联型有源电力滤波器[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 147-154.
CHEN Zhong, WANG Zhihui, CHEN Miao. A cascade h-bridge active power filter with high dynamic performance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 147-154.
- [3] 刘文亚, 姚钢, 何雯, 等. 基于级联多电平的有源滤波器直流侧电压平衡控制[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 94-101.
LIU Wenya, YAO Gang, HE Luan, et al. Research of DC voltage balance control based on multi-level cascaded APF[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 94-101.
- [4] MA H, XIE Y, SHI Z. Improved direct power control for Vienna-type rectifiers based on sliding mode control[J]. IET Power Electronics, 2016, 9(3): 427-434.
- [5] 张超, 马小平, 张义君, 等. 间谐波环境下并联有源电力滤波器系统设计[J]. 电工技术学报, 2015, 30(20): 118-127.
ZHANG Chao, MA Xiaoping, ZHANG Yijun, et al. System design of shunt active power filter for inter-harmonics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20): 118-127.
- [6] 郑建勇, 张愉, 丁祖军. 并联电感型混合有源滤波器及其控制策略[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 90-97.
ZHENG Jianyong, ZHANG Yu, DING Zujun. The parallel inductance type hybrid active power filter and its control strategy[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 90-97.
- [7] 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.
- [8] 马辉, 谢运祥. 基于滑模变结构的 Vienna 整流器新型双闭环控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 143-151.
MA Hui, XIE Yunxiang. A novel dual closed-loop control strategy based on sliding-mode variable structure of Vienna-type rectifier[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 143-151.
- [9] JB/T 11067-2011 低压有源电力滤波装置[S].
JB/T 11067-2011 low-voltage active power filter (APF)[S].
- [10] 朱宁辉, 白晓民, 董伟杰, 等. 空间矢量脉宽调制下有源电力滤波器直流侧电压设定值研究[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 568-574.
ZHU Ninghui, BAI Xiaomin, DONG Weijie, et al. Research on setting value of DC-side voltage for active power filter under space vector pulse width modulation control[J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 568-574.
- [11] 谢斌, 戴珂, 张树全, 等. 并联型有源电力滤波器直流侧电压优化控制[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(9): 23-29.
XIE Bin, DAI Ke, ZHANG Shuquan, et al. Optimization control of DC link voltage for shunt active power filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(9): 23-29.
- [12] 张国荣, 蒋继勇, 吴飞. 一种基于空间矢量的 APF 直流侧电容电压设计和优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18): 1-7.
ZHANG Guorong, JIANG Jiyong, WU Fei. A design and optimization method of value of DC-side voltage for APF based on space vector[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18): 1-7.
- [13] 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.
- [14] 王峰, 张旭隆, 何凤有, 等. 基于复合模型预测控制策略的三电平 APF 研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 79-85.
WANG Feng, ZHANG Xulong, HE Fengyou, et al. Research of three-level shunt APF control method based on composite model predictive control strategy[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 79-85.

收稿日期: 2016-09-20; 修回日期: 2016-11-17

作者简介:

李兰芳(1981-), 女, 博士研究生, 研究方向为电能质量及其控制技术; E-mail: lilanf1011@126.com

徐晓刚(1982-), 男, 工程师, 工学硕士, 从事输变电技术管理工作;

吴国兵(1979-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子及其相关技术。

(编辑 葛艳娜)