

## 基于复合模型预测控制策略的三电平 APF 研究

王峰<sup>1</sup>, 张旭隆<sup>1</sup>, 何凤有<sup>2</sup>, 张晓<sup>2</sup>

(1. 徐州工程学院信电工程学院, 江苏 徐州 221111; 2. 中国矿业大学信电学院, 江苏 徐州 221008)

**摘要:** 电力有源滤波器 (Active power filter, APF) 是消除电网中非线性负载产生的电流谐波的有效手段之一。提出一种三相静止坐标下的基于模型预测控制复合控制器, 复合控制器由改进的自适应广义积分器和模型预测控制两部分组成。该复合控制策略有效地整合了预测控制和自适应广义积分器的优点, 在最大限度利用模型预测进行谐波电流快速跟踪的同时, 采取自适应广义积分器对各次谐波进行无静差跟踪控制。所提出的复合控制器与三电平电压空间矢量调相结合, 能够消除单独预测控制交流变量时所存在的稳态误差问题和改善系统鲁棒性。详细研究了复合控制器的设计方法, 并给出了系统的参数设计和稳定性分析。最后通过实验验证了控制方法的正确性和有效性。

**关键词:** 有源电力滤波器; 三电平; 自适应; 模型预测

### Research of three-level shunt APF control method based on composite model predictive control strategy

WANG Feng<sup>1</sup>, ZHANG Xu-long<sup>1</sup>, HE Feng-you<sup>2</sup>, ZHANG Xiao<sup>2</sup>

(1. School of Information and Electrical Engineering, Xuzhou Institute of Technology, Xuzhou 221111, China;

2. School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

**Abstract:** Active power filter (APF) is one of the effective means to eliminate the grid harmonic current generated by nonlinear loads. This paper proposes a compound controller based on model predictive control under three-phase static coordinate. The compound controller consists two parts including improved adaptive generalized integrator and model predictive control. The composite control strategy effectively integrates advantages of adaptive generalized integrator and the model predictive control. Steady-state error is conducted by the adaptive generalized integrator under each harmonic current tracking control, at the same time model predictive control is used to track harmonic current at fastest speed. The proposed composite controller combined with three-level voltage space vector phase modulation can eliminate the steady-state error which exists only using the model predictive control strategy and improve system robustness. Detailed study of the composite controller design method is given, as well as the parameters of the system design and stability analysis. Effectiveness and correctness of the control method proposed are finally verified by experiments.

**Key words:** active power filter; three-level; adaptive control; model predicts

中图分类号: TM76

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)11-0079-07

## 0 引言

随着电力电子技术的不断发展, 各种电力电子装置在工业中的应用越来越广泛, 电网中的谐波污染日益严重, 谐波治理问题受到了广泛关注。有源电力滤波器(Active Power Filter, APF)与传统的无源电力滤波器相比, 具有滤波特性好、体积小、应用灵活等特点。随着半导体器件成本的降低, APF 逐渐成为电力系统谐波抑制的研究热点和发展方向<sup>[1]</sup>。

**基金项目:** 科技部创新基金重点项目 (11C26213204616); 江苏省科技创新与成果转化项目 (BA2008029)

补偿电流控制算法对 APF 的补偿性能有较大影响。工业控制中最常用的方法是 PI 控制器, 但 APF 的指令电流是多种频率正弦量的叠加信号, 采用 PI 控制必然存在稳态误差和相位偏移。针对此类问题, 国内外学者进行了大量的学术研究, 文献[2]提出基于广义积分的模糊自整定 PI 分频控制方法, 来实现稳态无静差控制的同时满足系统的快速性要求; 文献[3]将重复控制与滞环控制相结合增加了各频率点系统响应的增益, 单开关频率仍然不固定; 文献[4]将滞环控制和空间矢量调制算法相结合, 利用空间矢量来克服传统滞环所存在的一些缺点, 但

这种方法过于依赖系统模型,当系统模型参数发生扰动时可能引入误差;文献[5]采用一种基于模糊自适应可变环宽的滞环控制策略,减小了对于系统模型的依赖,同时利用模糊自适应控制很好地抑制了开关频率较大范围内的波动,但是仍然无法完全实现固定开关频率运行。

预测控制是一类新型的控制算法,不需要知道控制对象的具体模型,就可取得响应速度快、鲁棒性强的控制效果,所以一直深受重视。目前比较常用的预测算法主要有模型算法控制(MPC)、动态矩阵控制(DMC)、广义预测控制等<sup>[6]</sup>。针对 APF 的电流控制中对于响应快速性和稳态静差的双重要求<sup>[7]</sup>,本文在分析三相三线制三电平并联型有源电力滤波器系统模型的基础上,提出采用基于 MPC 与自适应广义积分器并联的复合控制策略,MPC 控制可以提高电流响应速度,同时自适应广义积分器可以实现对正弦量的积分,在正弦量频率处其增益为无穷大,可以实现对该频率下正弦量的无静差跟踪。在静止三相坐标系下采用复合控制器进行 APF 的电流控制,对各次谐波有良好的补偿能力。实验结果证明了所提复合控制器的有效性。

### 1 三电平并联型 APF 数学模型

如图 1 所示定义开关函数  $S_{ij}(i=a,b,c; j=1,2,3)$ ,  $\begin{cases} S_{ij}=1, & \text{开关闭合} \\ S_{ij}=0, & \text{开关断开} \end{cases}$ 。在三相 ABC 坐标系下三电平 APF 的数学模型为<sup>[1,6]</sup>

$$\mathbf{Z}\dot{\mathbf{x}}^+ = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (1)$$

式(1)中:  $\mathbf{Z} = \text{diag}[L_s \quad L_s \quad L_s \quad C_d \quad C_d]$ ;

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -S_{1a} & S_{2a} \\ 0 & 0 & 0 & -S_{1b} & S_{2b} \\ 0 & 0 & 0 & -S_{1c} & S_{2c} \\ S_{a1} & S_{b1} & S_{c1} & 0 & 0 \\ S_{a2} & S_{b2} & S_{c2} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$(S_{ji} = S_{ij} - \frac{S_{aj} + S_{bj} + S_{cj}}{3} \quad i=a,b,c; j=1,2);$$

$$\mathbf{x} = [i_a \quad i_b \quad i_c \quad V_{dc1} \quad V_{dc2}]^T;$$

$$\mathbf{B} = \text{diag}[1 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \quad 0];$$

$$\mathbf{u} = [u_a \quad u_b \quad u_c \quad 0 \quad 0]。$$

由式 (1) 三电平 APF 的时域数学模型可以得

到,三电平 APF 的某一相的复频域传递函数如式 (2) 所示。

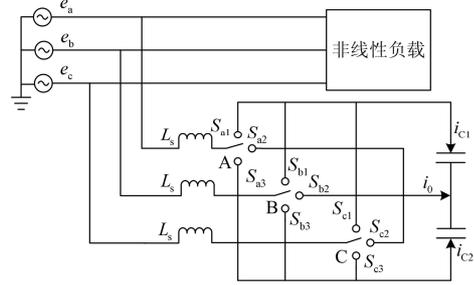


图 1 三电平并联型 APF 系统结构框图

Fig. 1 Three-level structure diagram of shunt APF system

$$G(s) = \frac{i_a(s)}{V_a(s) - e_a(s)} = \frac{1}{Ls + R} \quad (2)$$

### 2 基于参数在线调整的改进型广义积分器

传统广义积分器可以实现对正弦交流量积分控制,其传递函数如式 (3) 所示<sup>[8]</sup>。

$$G_R(s) = \frac{2K_{gi}s}{s^2 + \omega^2} \quad (3)$$

但是改变广义积分器参数  $K_{gi}$  只对其他频率信号的衰减程度,而并不能改变其带宽。带宽小意味着对频率变化的适应性较差,同时在传统广义积分器中  $K_{gi}$  的改变对其响应影响变化较小,为此文献 [9] 提出采用改进的广义积分器如式(4)所示,其中  $\omega_c$  为截止频率,不同  $\omega_c$  频率特性如图 2 所示。

$$G_R(s) = \frac{2K_{gi}\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega^2} \quad (4)$$

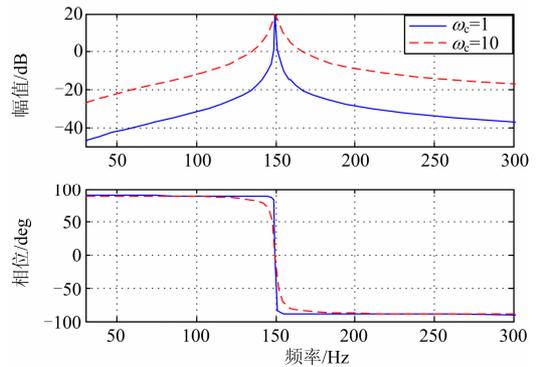


图 2  $\omega_c$  对 R 控制器的频率特性的影响

Fig. 2 Frequency response of the resonant regulator for variation in  $\omega_c$

改进型广义积分器增加积分器的频带响应宽度,对于电网频率波动而引入的偏差有更好的抑制能力,由式(3)可知,在谐振频率处,传统广义积分

器的增益无穷大; 而改进型广义积分器在谐振频率处的广义积分器的增益为  $K_{gi}$ , 对于不同的输入信号, 如果  $K_{gi}$  始终保持不变必然无法自始至终保证较小的稳态误差。

为了解决上述广义积分器存在的问题, 在改进型广义积分器的基础上加入自适应控制器, 使得广义积分器的参数实现在线连续调整, 改进型自适应广义积分器的原理如图 3 所示。

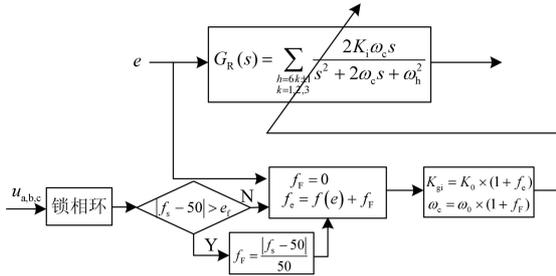


图 3 自适应广义积分器原理图

Fig. 3 Schematic of adaptive generalized integrator

令广义积分器中  $K_{gi}$ ,  $\omega_c$  的初值为  $K_0$ ,  $\omega_0$ , 通过锁相环实时跟踪电网频率, 并将其输出的频率  $f_s$  与 50 Hz 相比较, 当频差的绝对值大于设定的误差限  $e_f$  时, 则对影响带宽的参数  $\omega_c$  进行修改来减小频率偏差所带来的干扰, 同时根据被控制量的误差在线实时调整广义积分器的增益  $K_{gi}$ , 其中  $f_f, f_c$  分别是引入的  $\omega_c$  和  $K_{gi}$  自适应调节因子。因此基于参数在线调整的自适应广义积分器保证了电网频率漂移时, 广义积分器对各次谐波的增益不发生衰减, 改善了 APF 对电网主要次谐波电流的抑制效果。

### 3 复合型模型预测电流控制

#### 3.1 模型预测控制的基本原理

模型预测控制 (Model Predictive Control, MPC) 是基于内模原理的一种控制策略<sup>[10-12]</sup>, 其基本思想是利用预测模型对被控对象的输出进行预测。基于 MPC 的控制策略不需要被控对象有精准的数学模型, 因此模型预测控制适用于被控对象复杂而又具有不确定性的控制系统。MPC 包括三个部分: 预测模型, 优化控制和反馈校正, MPC 的基本原理如图 4 所示。

图 4 中  $y(k)$  表示被控对象当前时刻的输出电流, 预测模型通过前一时刻的电流值对下一时刻控制对象的输出电流进行预测。实际应用中, 由于模

型自身误差、系统参数变化或外部环境干扰等因素, 使预测输出偏离理想状态, 因此引入  $e(k)$  来表示预测模型输出  $y_m(k)$  与控制对象输出  $y(k)$  之间的误差, 利用图 1 中的反馈校正环节对  $e(k)$  进行校正及时修正预测输出, 获得反馈信号  $y_p(k+1)$ , 然后利用优化控制得出最终的控制信号  $u(k)$  使控制对象的输出  $y(k)$  与给定参考  $y_r(k+1)$  一致<sup>[13]</sup>。

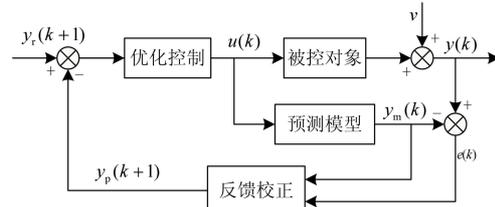


图 4 模型预测控制原理图

Fig. 4 Schematic diagram of predictive control model

#### 3.2 复合型电流控制器设计

根据上述分析, 要使得被控对象在控制器的作用下, 其输出能够无差地跟踪给定信号, 控制器必须要包含积分环节。APF 的参考信号为交流周期信号, 常规的积分器无法起到很好的效果, 为解决此问题同时实现分频控制, 必须引入多谐波频率下的广义积分器对参考信号中的多个频率的正弦波叠加信号进行无静差跟踪控制<sup>[9]</sup>。虽然使用广义积分可以消除稳态静差, 但却牺牲了系统响应的快速性, 违背了谐波治理的初衷。基于模型预测控制的方案大大提高了系统的响应速度, 但是却存在较大的稳态误差<sup>[11]</sup>。本文提出一种模型预测控制与改进的自适应广义积分器复合的控制策略, 即利用模型预测控制提高系统电流的响应速度, 同时通过自适应广义积分器增加控制系统在各谐波频率下的系统增益, 从而实现补偿电流的快速准确控制, 其控制框图如图 5 所示。图中虚线框内所示的改进型自适应广义积分器在前面已经做出详细的分析, 本节以 A 相的电流控制为例给出模型预测控制的设计过程分析。

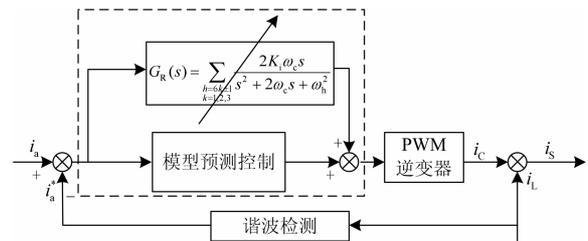


图 5 谐波电流复合控制原理框图

Fig. 5 Harmonic current control block diagram of composite controller

基于空间矢量控制的有源电力滤波器可以定

义为怎样去选择合适的电压空间矢量  $u^*(k)$ ，使有源滤波器的输出  $i(k)$  电流尽量地去接近所希望的参考电流  $i^*(k)$ 。由图 4 的 MPC 基本结构图，结合三电平 APF 的系统传递函数可得到图 6 所示的 A 相电流 MPC 结构图。

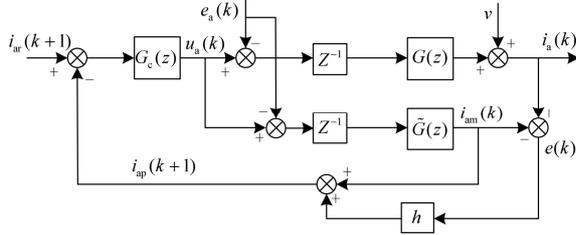


图 6 APF 单相电流模型预测控制结构图

Fig. 6 Model predictive control diagram of APF single-phase current

图 6 中  $i_{ar}(k+1)$  是下一时刻谐波跟踪指令电流的参考值， $i_a(k)$  表示当前时刻 APF 输出的补偿电流值。 $\tilde{G}(z)$  为三电平 APF 的离散预测模型， $i_{am}(k)$  是预测模型的输出，通过系统实际输出与预测模型输出的差值  $e(k)$  根据校正算法获得反馈电流值  $i_{ap}(k+1)$ ， $G_c(z)$  为优化控制环节的传递函数。

由于 APF 的内部模型是用数字系统实现的，所以应当将式 (2) 转化成离散的形式，可以得到预测模型为离散表达式为

$$i_{am}(k+1) = ai_a(k) + b[V_a(k) - u_a(k)] \quad (5)$$

其中： $\tilde{a} = e^{-R\tilde{T}_s/L}$ ； $\tilde{b} = (1-a)/\tilde{R}$ 。

实际对象中存在时变非线性或外部干扰等因素，因此预测模型不一定与实际模型完全一致，预测输出不能准确反映对象的真实输出，因此需对其进行校正。设  $k$  时刻 APF 实际电流输出与预测模型电流输出的差值  $e(k) = i_a(k) - i_{am}(k)$ ，可以利用它们的误差对预测模型的输出进行校正，校正后的预测输出为

$$i_p(k+1) = i_{am}(k+1) + he(k) \quad (6)$$

式中， $h$  为反馈校正系数<sup>[12]</sup>。

将式 (6) 代入式 (5) 获得修正后的系统预测模型，输出  $t_{k+1}$  时刻的电流  $i_{ap}(k+1)$  能被预测。为预测  $t_{k+1}$  时刻的电流  $i_{ap}(k+1)$ ，当前采样的电流  $i_a(k)$ ，电网电压  $e_a(k)$ ，需得到三相并网逆变器开关状态以及直流母线电压。当预测  $t_{k+1}$  时刻的电流  $i_{ap}(k+1)$  后，应构造一个价值函数  $g$  去评估有源电力滤波器的参考电压矢量，通过一定的算法优化获得

一个使价值函数最小的电压矢量，在下一个采样周期控制系统的响应，这个控制过程就是 MPC 中的优化控制。传统方法中采用离散控制策略对全部开关状态组合进行优化比较，当目标函数值为最小时预测模型中存在的电压矢量即为最优控制矢量<sup>[11]</sup>，这种方法的优点在于原理简单且易于实现，但是由于三电平拓扑结构自身的开关状态是有限的，因此直接制约了优化的效果。本文提出的电流型预测控制优化价值函数的基础上，建立基于空间矢量的电压型优化价值函数，采用电流误差二次方和电压空间矢量平方和作为价值函数，其价值函数  $V$  表示为

$$V = \min \{ q[i_{ar}(k+1) - i_{ap}(k+1)]^2 + \lambda[u_a(k)]^2 \} \quad (7)$$

其中， $q$ 、 $\lambda$  为权系数，分别表示对跟踪误差和控制量的约束。合理选择  $q$ 、 $\lambda$ ，可得到使控制目标  $V \rightarrow \min$ <sup>[13]</sup>，且使预测输出与参考轨迹确定的期望输出间的偏差最小的控制量  $u_a(k)$ 。最终可以获得 APF 的控制参考电压由两部分组成，如式 (8) 所示。

$$u_{a,b,c}(k) = u_{ya,b,c}(k) + u_{ga,b,c}(k) \quad (8)$$

其中：

$$u_{ya,b,c}(k) = -\{qb[ai_{a,b,c}(k) - bu_{a,b,c}(k) + he(k) - i_{a,b,cr}(k+1)]\} / (\lambda + qb^2)$$

$$u_{ga,b,c}(k) = e_{a,b,c}(k) \left[ \sum_{\substack{h=6k\pm 1 \\ k=1,2,3}} \frac{2K_i' \omega_c' s}{s^2 + 2\omega_c' s + \omega_h^2} \right]$$

#### 4 稳定性分析

根据现代控制系统中李雅普诺夫稳定性理论，一个离散系统的状态方程可以表示为

$$x^+ = f(x, u) \quad (9)$$

其中： $x \in X \subset R^n$  表示系统的状态变量； $u \in U \subset R^m$  表示系统的控制输入； $R$  为非负实数集。对于  $R^n$  的一个子集  $A$  有  $x \in A \subset R^n$ ，存在一个常数  $\delta > 0$  且以  $k$  为控制因子的单调递减函数  $\beta(x_0, k)$  满足

$$|x(k)| \leq \beta(x_0, k) + \delta \quad (10)$$

其中， $x \in A$ ， $k \geq 0$ ， $|x(k)|$  表示  $k$  时刻系统的状态，在这种情况下单调递减函数可以表示为  $\beta(x_0, k) = c|x_0|^l \cdot \rho^k$ ，其中  $c \geq 1$ ， $0 < \rho < 1$ ， $l > 1$ 。因此我们可以定义系统 (9) 在子集  $A$  上是渐进稳定的，由于  $\beta(x_0, k)$  为单调递减函数，当  $k \rightarrow \infty$  时系统状态可以最终表示为

$$D_\delta = \{x \in R^n : |x(k)| \leq \delta\} \quad (11)$$

$D_\delta$  即为系统的稳定域<sup>[14]</sup>。

根据上文对三电平有源电力滤波器数学模型的分析, 三电平有源滤波器的系统方程可以按照式(9)表示为

$$x^+ = f(x, u) = Z^{-1}Mx + Z^{-1}Nu \quad (12)$$

其中,  $A = Z^{-1}M, B = Z^{-1}N$ , 本文在模型预测控制中, 滚动优化函数采用平方和函数作为价值判定函数, 因此根据李雅普诺夫稳定性判据有<sup>[15]</sup>

$$\begin{aligned} & V_f(Ax + Bu_f) - V_f(x) + \ell(x, u_f) = \\ & |A_k x + Bu_f|_p^2 - |x|_p^2 + |x|_Q^2 + |Kx + u_f|_R^2 = \\ & x'(A_k' P A_k + Q^* - P)x + u_f'(B' P B + R)u_f + 2x'(A_k' P B + K' R)u_f \end{aligned} \quad (13)$$

其中:  $Q^* = Q + K' R K$ ;  $A_k = A + B K$ ; 矩阵  $P$  用来解 Riccati 方程  $A_k' P A_k - P + Q^* = 0$ , 解 Riccati 方程可以得出

$$K = -(B' P B + R)^{-1} B' P A \quad (14)$$

对于量化误差, 其控制量终值的范围为  $|u_f| \leq \Delta_q$ , 将控制量终值约束条件代入式(13)

$V_f(Ax + Bu_f) - V_f(x) + \ell(x, u_f) \leq |B' P B + R| \Delta_q^2, \forall x \in X_f$   
因此本文提出的式(7)所表示的平方和价值函数, 在实施中作为李雅普诺夫控制方程应当满足的条件是

$$\begin{aligned} & V(x) > a_1 |x|^2, \forall x \in X_N \\ & V(x) < a_2 |x|^2, \forall x \in X_f \end{aligned} \quad (15)$$

$$\Delta V(x) < -a_3 |x|^2 + \gamma,$$

其中:  $a_1 = a_3 = \lambda_{\min}(Q)$ ;  $a_2 = \lambda_{\max}(P)$ ;  $\gamma = |B' P B + R| \Delta_q^2$ 。

通过求解式(15), 基于平方和价值函数的模型电流预测控制的系统最终稳定状态可以表示为

$$D_\delta = \{x \in R^n : |x(k)|^2 \leq \delta\}$$

$$\delta = \frac{\gamma}{a_1} = \frac{|B' P B + R|}{\lambda_{\min}(Q)} \Delta_q^2$$

当系统控制参数满足上述要求时, 根据李雅普诺夫稳定性理论系统稳定。

## 5 实验研究

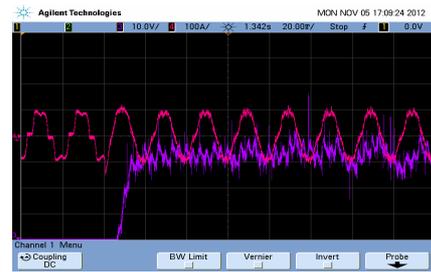
为验证本文提出的基于复合型自适应广义积分器的三电平 APF 控制系统的可行性, 在仿真的基础上搭建实验平台对其进行动模实验。其中参数设置

为: 电网电压 380 V, 频率为 50 Hz, 非线性负载选用三相不可控整流桥, 直流侧电阻 16  $\Omega$ , 电感 1 mH。三电平变流器直流侧总电压  $V_{dc}$  给定值为 1 000 V。APF 输出电感为 1 mH, 本系统采样频率为 10 k。采用基于 TMS320F28335 型 DSP+XCS200 型 FPGA 全数字控制系统进行实验, 得实验波形如图 7 所示。



CH1: A 相电网电压 CH2: A 相电网电流  
CH3: 直流母线电压 CH4: 电网电压相角

(a) 采用复合控制器滤波



CH1: A 相电网电流 CH2: 直流母线电压

(b) 单独采用预测控制控制器滤波

谐波表格					
Amp	L1	L2	L3	U P	N
THD% <sub>f</sub>	22.8	98.6	70.7	97.1	
H3% <sub>f</sub>	0.3	40.5	7.4	48.0	
H5% <sub>f</sub>	21.1	25.9	20.2	25.3	
H7% <sub>f</sub>	7.1	18.2	18.4	13.9	
H9% <sub>f</sub>	0.2	12.2	14.9	12.5	
H11% <sub>f</sub>	3.9	11.1	10.2	10.0	
H13% <sub>f</sub>	2.3	7.7	11.7	8.4	
H15% <sub>f</sub>	0.1	3.6	8.3	9.1	

(c) 补偿前电流谐波频谱分析

谐波表格					
Amp	L1	L2	L3	U P	N
THD% <sub>f</sub>	5.8	84.8	54.5	145.7	
H3% <sub>f</sub>	0.7	30.2	21.7	57.1	
H5% <sub>f</sub>	0.9	24.3	9.3	22.8	
H7% <sub>f</sub>	1.4	8.5	9.0	22.4	
H9% <sub>f</sub>	0.6	11.8	8.3	14.8	
H11% <sub>f</sub>	1.5	7.8	5.4	21.8	
H13% <sub>f</sub>	0.5	7.3	3.6	12.2	
H15% <sub>f</sub>	0.5	7.0	4.7	10.1	

(d) 复合控制器补偿后频谱分析

谐波表格					
Amp	L1	L2	L3	U P	N
THD% <sub>f</sub>	6.2	57.2	82.0	71.6	
H3% <sub>f</sub>	0.6	28.6	26.2	29.9	
H5% <sub>f</sub>	4.1	13.5	14.4	18.9	
H7% <sub>f</sub>	0.3	9.0	26.9	18.9	
H9% <sub>f</sub>	0.3	8.0	10.6	11.9	
H11% <sub>f</sub>	1.3	7.2	7.0	8.2	
H13% <sub>f</sub>	1.0	4.7	5.5	6.9	
H15% <sub>f</sub>	0.3	4.6	7.1	4.6	

(d) 单独预测控制补偿频谱分析

图 7 实验波形

Fig. 7 Test wave

图 7 (a) 给出复合控制器补偿的实验波形, 图 7 (b) 为单独采用预测进行相同非线性负载补偿时

获得的实验波形,图 7 (c) 为 APF 未投入补偿时电网电流的畸变率及频谱分析,图 7 (d) 为采用复合控制器补偿后电网电流的畸变率及频谱分析,图 7 (e) 为单独采用预测控制补偿后电网电流的畸变率及频谱分析。由于试验中复合控制器只采用了模型预测控制和改进型五次广义积分器进行复合,因此从图 7 (d) 和图 7 (e) 的对比中可以看出,自适应复合控制器对于五次谐波的抑制起到了更好的效果。也证明了本文所提出的自适应复合控制器的有效性和正确性。

由试验结果图 8 可知,当负载电流发生突变时,APF 的补偿电流迅速跟踪上突变的参考电流,并稳定于变化后的系统状态,输出电流没有出现不稳定状态。证明了本文所设计的控制系统具有稳定性。

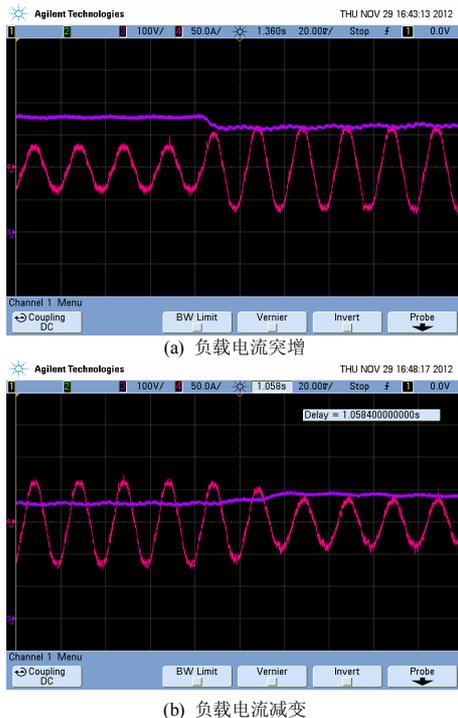


图 8 APF 动态补偿效果

Fig. 8 Dynamic compensation of APF

## 6 结论

提出了一种复合控制的有源电力滤波器控制方案,将模型预测控制和改进型广义积分器相结合,再通过自适应控制对相关参数进行在线自动调整。相对常规的控制方法,该方案使系统具有更好的自适应能力与快速性。仿真结果表明复合控制相对于常规的单采用控制有更好的补偿效果,通过优化的控制算法,中点电位问题也得到了很好的解决,验证了该方案的可行性与有效性。

## 参考文献

- [1] 马永健, 徐政, 沈沉. 有源电力滤波器闭环控制算法研究[J]. 电工技术学报, 2006, 21(2): 73-78.  
MA Yong-jian, XU Zheng, SHEN Chen. Studies of closed-loop control strategy of active power filters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(2): 73-78.
- [2] 范瑞祥, 罗安, 涂春鸣. 并联混合型有源滤波器的分频控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(25): 108-113.  
FAN Rui-xiang, LUO An, TU Chun-ming. The Frequency dividing control research based on shunt hybrid active power filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(25): 108-113.
- [3] 唐欣, 罗安. 基于重复控制的有源滤波器的三态滞环控制方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(9): 134-139.  
TANG Xin, LUO An. Repetitive control based three-state hysteresis control of a single-phase active filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(9): 134-139.
- [4] 姜俊峰, 刘会金, 陈允平, 等. 有源滤波器的电压空间矢量双滞环电流控制新方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 82-86.  
JIANG Jun-feng, LIU Hui-jin, CHEN Yun-ping, et al. A novel double hysteresis current control method for active power filter with voltage space vector[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(10): 82-86.
- [5] 邱晓初, 肖建, 刘小建. 一种 APF 模糊自适应可变环宽滞环控制器[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(7): 73-77.  
QIU Xiao-chu, XIAO Jian, LIU Xiao-jian. A novel fuzzy adaptive hysteresis band current controller for active power filter[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(7): 73-77.
- [6] 何英杰, 刘进军, 王兆安, 等. 基于重复预测原理的三电平 APF 无差拍控制方法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(2): 114-120.  
HE Ying-jie, LIU Jin-jun, WANG Zhao-an, 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.
- [7] 黄崇鑫, 王奔, 邹超, 等. 并联有源电力滤波器新型控制策略仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(5): 52-70.

- HUANG Chong-xin, WANG Ben, ZOU Chao, et al. Simulation research on shunt active power filter with a novel control method[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(5): 52-70.
- [8] YUAN Xiao-ming, MERK W, STEMMLER H, et al. Stationary-frame generalized integrators for current control of active power filters with zero steady-state error for current harmonics of concern under unbalanced and distorted operating conditions[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2002, 38(2): 523-532.
- [9] 周娟, 张勇, 耿乙文, 等. 四桥臂有源滤波器在静止坐标系下的改进 PR 控制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(6): 113-119.
- ZHOU Juan, ZHANG Yong, GENG Yi-wen, et al. An improved proportional resonant control strategy in the static coordinate for four-leg active power filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(6): 113-119.
- [10] 张波, 唐昆明, 周小平, 等. 基于预测直接电流控制的 APF 死区效应补偿[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(12): 54-58.
- ZHANG Bo, TANG Kun-ming, ZHOU Xiao-ping, et al. Dead-time effect compensation of APF based on predictive direct current control[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(12): 54-58.
- [11] RODRÍGUEZ J, PONTT J, SILVA C A, et al. Predictive current control of a voltage source inverter[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2007, 54(1): 495-503.
- [12] 唐鑫鑫, 惠晶. 基于模型算法预测控制策略的 APF 的研究[J]. 电力电子, 2011, 45(11): 92-94.
- TANG Xin-xin, HUI Jing. Research on predictive control of APF based on model algorithmic control[J]. Power Electronics, 2011, 45(11): 92-94.
- [13] 方宇, 裘迅, 邢岩, 等. 基于预测电流控制的三相高功率因数 PWM 整流器研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(19): 60-64.
- FANG Yu, QIU Xun, XING Yan, et al. Research on three-phase high power factor correction based on predictive digital current controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(19): 60-64.
- [14] AGUILERA R P, QUEVEDO D E. On stability and performance of finite control set MPC for power converters[J]. Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics (PRECEDE), 2011: 55-62.
- [15] 于晶荣, 滕召胜, 章兢, 等. 有源电力滤波器预测电流控制及稳定性分析[J]. 电工技术学报, 2009, 24(7): 164-170.
- YU Jing-rong, TENG Zhao-sheng, ZHANG Jing, et al. Predictive current control and stability analysis of active power filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(7): 164-170.

收稿日期: 2013-07-20; 修回日期: 2013-09-23

作者简介:

王峰(1978-), 男, 博士, 讲师, 研究方向为电力电子与电力传动; E-mail: wangwf1231@163.com

张旭隆(1984-), 男, 博士, 讲师, 研究方向为电力电子与电力传动;

何凤有(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力电子与电力传动。