

DOI: 10.7667/PSPC170046

# 基于 PCHD 模型的 APF 自适应模糊无源控制研究

郑成才<sup>1</sup>, 王久和<sup>1</sup>, 慕小斌<sup>2</sup>, 张巧杰<sup>1</sup>

(1. 北京信息科技大学自动化学院, 北京 100101; 2. 北京交通大学电气工程学院, 北京 100044)

**摘要:** 为改进有源电力滤波器 APF 的电网电流补偿效果, 基于 APF 的端口受控哈密顿(PCHD)数学模型, 采用互联和阻尼配置无源控制(IDA-PBC)方法, 设计了通过模糊控制实现注入阻尼在线调整的无源混合控制器。同时, 为提高 APF 的直流侧电压控制能力, 采用自适应模糊 PI 控制器, 实现比例系数与积分系数的在线调整。利用所提出的控制器, 可有效补偿电网电流, 抑制负载电流谐波, 使电网电流为近似正弦波; 同时, 获得更好的直流电压动静态性能。在 Matlab/Simulink 仿真平台上搭建 APF 自适应模糊无源混合控制器的仿真模型, 对 APF 的谐波补偿性能进行了仿真实验研究。仿真结果表明所提出的自适应模糊无源混合控制策略是可行的。

**关键词:** 有源电力滤波器; PCHD 模型; 无源混合控制; 模糊控制; 谐波补偿

## Self-adaption fuzzy-passivity based hybrid control strategy of active power filter based on port controlled Hamiltonian with dissipation model

ZHENG Chengcai<sup>1</sup>, WANG Jiuhé<sup>1</sup>, MU Xiaobin<sup>2</sup>, ZHANG Qiaojie<sup>1</sup>

(1. School of Automation, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100101, China;

2. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** The passivity based hybrid controller which can adjust the damping injection online through fuzzy control theory is designed based on the Port Controlled Hamiltonian with Dissipation (PCHD) mathematical model of Active Power Filter (APF) and through the method of Interconnection and Damping Assignment Passivity Based Control (IDA-PBC) to improve the current compensation effect of APF. While self-adaptive fuzzy PI control method is used in order to adjust the proportional and integral coefficient online to improve the DC side voltage control performance of APF. Using the controller proposed, the source current can be compensated and the load harmonic current can be suppressed effectively, which makes the power supply current sinusoidal and gets a better dynamic and static performance of DC voltage. The simulation models of APF and the self-adaptive fuzzy-passivity based hybrid control system are built based on Matlab/Simulink. The harmonic compensation performance of APF is simulated and analyzed. The simulation results show that the self-adaptive fuzzy-passivity based hybrid control strategy proposed is feasible.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51777012 and 51477011).

**Key words:** active power filter, port controlled Hamiltonian with dissipation model; passivity based hybrid control; fuzzy control; harmonic compensation

## 0 引言

电网谐波污染问题随着电力电子设备的广泛应用而日趋严重。大量的谐波电流由非线性负载注入到电网, 增加输配电线路的损耗, 影响其他设备的

正常运行。因此, 谐波污染的有效解决方法引起了国内外专家学者的广泛关注。

体积小、成本低且技术成熟的传统无源电力滤波器(Passive Power Filter, PPF)只能滤除特定次数的谐波, 易受到电路参数的影响<sup>[1]</sup>, 而有源电力滤波器(Active Power Filter, APF)能够同时对多次谐波进行动态补偿, 且负载类型和电路参数对补偿效果影响不大。

APF的补偿效果取决于控制策略的优劣, 因而

基金项目: 国家自然科学基金项目(51777012, 51477011); 北京市自然科学基金重点项目(KZ201511232035); 北京市高创计划教学名师项目(PXM 2017\_014224\_000025)

控制器的设计是APF研究的关键问题之一。文献[2]采用滑模变结构控制,其优点是鲁棒性强,响应速度快,缺点是稳态效果不佳;文献[3]采用无差拍控制,这种控制方法的精度较高,但鲁棒性欠佳;文献[4]采用重复控制,其优点是静态性能好,但动态性能差;文献[5]采用模糊控制策略,无需被控对象的精确数学模型,有较强的自适应性和鲁棒性,但不可避免地存在稳态误差;文献[6]采用有源阻尼控制方法,该方法调试容易,稳定性好,但精度不佳;文献[7]采用基于李雅普诺夫函数的非线性控制方法,简单易行、鲁棒性强的特点,但精度不佳;文献[8]采用无源控制策略,可调参数较少,且具有良好的动态性能和静态性能,但注入阻尼值恒定,不能实时调节。

为进一步提高APF的控制性能,本文基于APF系统的无源性,首先建立APF的端口受控的耗散哈密顿(Port Controlled Hamiltonian with Dissipation, PCHD)模型,设计APF的无源控制律,然后将模糊控制理论与传统无源控制理论结合起来,采用自适应模糊无源混合控制策略,实现注入阻尼和PI控制器中比例系数、积分系数的参数自整定,使APF系统既具有模糊控制自适应性和鲁棒性强的优点,又具有无源控制参数少和调试容易的优点,提高了APF系统的动、静态性能。仿真结果证明了本文所提出控制策略的有效性。

## 1 APF 的拓扑结构

三相 APF 的拓扑结构如图 1 所示,由直流侧电容器  $C$ 、逆变器、输出电感  $L$  及其内阻  $R$  组成,  $T_1 \sim T_6$  为逆变器各相桥臂的 IGBT 开关管,构成 APF 的主电路。 $u_{sa}$ 、 $u_{sb}$ 、 $u_{sc}$  为电网三相交流相电压,  $u_a$ 、 $u_b$ 、 $u_c$  分别为 APF 输出的三相交流相电压,  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  分别为逆变器输出三相线电流,  $u_{DC}$ 、 $i_{DC}$  分别为直流侧电容  $C$  两端的电压和流入逆变器的电流。

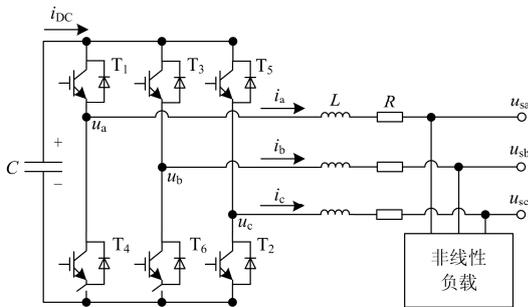


图 1 APF 的拓扑结构图

Fig. 1 Topology of APF

当非线性负载向电网中注入谐波电流时, APF 中的逆变器将对直流电容  $C$  两端的电压进行 PWM 调制, 改变 APF 的输出电压, 调节逆变器的输出电流  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$ , 若逆变器输出电流与非线性负载产生的谐波电流大小相等、方向相反, 即可抵消非线性负载对电网产生的电流谐波污染。

## 2 APF 的数学模型

为建立 APF 的数学模型, 假设电源为三相平衡正弦电压, 开关管为理想开关, 无导通、关断延时且无损耗, 滤波电感为线性且不考虑饱和。根据三相桥式两电平逆变器输出电平与开关管之间的关系, 结合图 1, 可定义 APF 的开关函数为

$$S_j = \begin{cases} 1 & j \text{ 相上桥臂导通, 下桥臂关断} \\ 0 & j \text{ 相下桥臂导通, 上桥臂关断} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $j=a, b, c$ 。

由此可得 APF 在三相静止 abc 坐标系下的数学模型为

$$\begin{cases} L \frac{di_a}{dt} + Ri_a - u_a = -u_{sa} \\ L \frac{di_b}{dt} + Ri_b - u_b = -u_{sb} \\ L \frac{di_c}{dt} + Ri_c - u_c = -u_{sc} \\ C \frac{du_{DC}}{dt} = -S_a i_a - S_b i_b - S_c i_c \end{cases} \quad (2)$$

式中

$$\begin{cases} u_a = u_{DC} (S_a - \frac{1}{3} \sum_{j=a,b,c} S_j) \\ u_b = u_{DC} (S_b - \frac{1}{3} \sum_{j=a,b,c} S_j) \\ u_c = u_{DC} (S_c - \frac{1}{3} \sum_{j=a,b,c} S_j) \end{cases} \quad (3)$$

利用等量变换矩阵将式(2)变换到  $dq0$  同步旋转坐标系下, 可得

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} + Ri_d - \omega Li_q - u_d = -u_{sd} \\ L \frac{di_q}{dt} + Ri_q + \omega Li_d - u_q = -u_{sq} \\ C \frac{du_{DC}}{dt} = -\frac{3}{2} (S_d i_d + S_q i_q) \\ u_d = S_d u_{DC}, u_q = S_q u_{DC} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $i_d$ 、 $i_q$  分别为逆变器输出三相电流  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  在  $d$ 、 $q$  轴上的分量;  $u_{sd}$ 、 $u_{sq}$  分别为三相电网电压

$u_{sa}$ 、 $u_{sb}$ 、 $u_{sc}$  在  $d$ 、 $q$  轴上的分量； $S_d$ 、 $S_q$  分别为开关函数在  $d$ 、 $q$  轴上的分量； $\omega$  为角频率。

选取体现系统能量的电感磁链和电容电荷作为状态变量。

$$\mathbf{x} = [x_1 \quad x_2 \quad x_3]^T = [Li_d \quad Li_q \quad Cu_{DC}]^T \quad (5)$$

选择系统的哈密顿函数作为电感和电容的能量存储总和<sup>[9]</sup>。

$$H(\mathbf{x}) = \frac{x_1^2}{2L} + \frac{x_2^2}{2L} + \frac{x_3^2}{3C} = \frac{1}{2} \mathbf{x}^T \mathbf{D}_{\text{th}} \mathbf{x} \quad (6)$$

$$\text{式中, } \mathbf{D}_{\text{th}} = \text{diag} \left\{ \frac{1}{L_1}, \frac{1}{L_1}, \frac{2}{3C} \right\}.$$

根据式(4), 可得 APF 的 PCHD 模型为

$$\dot{\mathbf{x}} = (\mathbf{J} - \mathbf{R}) \frac{\partial H(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{u} \quad (7)$$

式中:

$$\mathbf{J}_1 = \begin{pmatrix} 0 & \omega L & \frac{3}{2} S_d \\ -\omega L & 0 & \frac{3}{2} S_q \\ -\frac{3}{2} S_d & -\frac{3}{2} S_q & 0 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{u} = \begin{pmatrix} -u_{sd} \\ -u_{sq} \end{pmatrix}$$

### 3 APF 的自适应模糊无源控制器设计

#### 3.1 无源控制器的设计

无源控制从系统能量角度出发, 通过系统的能量和注入阻尼的重新分配, 使系统总能量跟踪期望的能量函数, 并使系统的状态变量渐进收敛至期望值, 实现系统的渐进稳定<sup>[10]</sup>。

设系统的期望平衡点为  $x_1^* = Li_d^*$ ,  $x_2^* = Li_q^*$ ,  $x_3^* = Cu_{DC}^*$ , 其中  $i_d^*$  和  $i_q^*$  分别为  $d$  轴和  $q$  轴上的逆变器输出电流的期望值, 即检测出的谐波电流在  $d$ 、 $q$  轴上的分量。为了使系统快速收敛到期望的稳定平衡点, 需进行阻尼注入, 采用互联和阻尼分配无源控制 IDA-PBC (Interconnection and Damping Assignment Passivity Based Control, IDA-PBC) 方法进行无源控制器设计<sup>[11]</sup>。

配置  $\mathbf{J}_d(\mathbf{x}) = \mathbf{J}(\mathbf{x}) + \mathbf{J}_a(\mathbf{x})$  和耗散矩阵  $\mathbf{R}_d(\mathbf{x}) = \mathbf{R}(\mathbf{x}) + \mathbf{R}_a(\mathbf{x})$ , 使闭环系统的形式为

$$\dot{\mathbf{x}} = (\mathbf{J}_d - \mathbf{R}_d) \frac{\partial H_d(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \quad (8)$$

由 IDA-PBC 定理可知<sup>[12]</sup>, 系统(8)是渐进稳定的。

结合式(7)和式(8)可得

$$(\mathbf{J}(\mathbf{x}) - \mathbf{R}(\mathbf{x})) \frac{\partial H(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{u} = (\mathbf{J}_d(\mathbf{x}) - \mathbf{R}_d(\mathbf{x})) \frac{\partial H_d(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \quad (9)$$

取期望能量函数为

$$H_d(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} (\mathbf{x} - \mathbf{x}^*)^T \mathbf{D}_{\text{th}} (\mathbf{x} - \mathbf{x}^*) \quad (10)$$

采用  $\mathbf{J}_a(\mathbf{x}) = 0$ ,  $\mathbf{R}_a(\mathbf{x}) \neq 0$ , 其中

$$\mathbf{R}_a(\mathbf{x}) = \text{diag} \left\{ r_{a1}, r_{a2}, \frac{3}{2} r_{a3} \right\}$$

由式(9)可知

$$\mathbf{R}_a(\mathbf{x}) \frac{\partial H(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{u} = (\mathbf{J}_d(\mathbf{x}) - \mathbf{R}_d(\mathbf{x})) \frac{\partial H_d(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \quad (11)$$

由于  $\frac{\partial H(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} = \mathbf{D}_{\text{th}} \mathbf{x}$ ,  $\frac{\partial H_d(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} = \mathbf{D}_{\text{th}} (\mathbf{x} - \mathbf{x}^*)$ , 则有

$$\frac{\partial H_a(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} = \frac{\partial H_d(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} - \frac{\partial H(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} = -\mathbf{D}_{\text{th}} \mathbf{x}^* \quad (12)$$

式(11)可变为

$$\mathbf{R}_a(\mathbf{x}) \mathbf{D}_{\text{th}} \mathbf{x} + \mathbf{u} = -(\mathbf{J}(\mathbf{x}) - \mathbf{R}_d(\mathbf{x})) \mathbf{D}_{\text{th}} \mathbf{x}^* \quad (13)$$

将式(13)展开, 可解得系统的无源控制器为

$$\begin{cases} u_d = u_{sd} - \omega Li_q^* + i_d^* (R + r_{a1}) - r_{a1} i_d \\ u_q = u_{sq} + \omega Li_d^* + i_q^* (R + r_{a2}) - r_{a2} i_q \end{cases} \quad (14)$$

对应的开关函数为

$$\begin{cases} S_d = \frac{u_{sd} - \omega Li_q^* + i_d^* (R + r_{a1}) - r_{a1} i_d}{u_{DC}^*} \\ S_q = \frac{u_{sq} + \omega Li_d^* + i_q^* (R + r_{a2}) - r_{a2} i_q}{u_{DC}^*} \end{cases} \quad (15)$$

#### 3.2 基于模糊控制的注入阻尼自整定

由式(13)可知, 注入阻尼的大小直接关系到无源控制器的收敛速度。没有注入阻尼会使系统的响应变慢, 理论上注入阻尼越大, 系统收敛越快, 但是在实际工程中, 当注入阻尼过大时, 系统会失控。为了使能量存储函数快速收敛到期望的平衡点, 必须注入合适的阻尼<sup>[13]</sup>。传统的无源控制策略中, 注入阻尼值为恒定值, 存在不能实时调节、无法适应

参数变化和抗干扰能力差等缺点, 控制效果难以达到预期目标。对此, 本文通过构造模糊控制器, 在传统无源控制策略的基础上, 结合模糊控制原理, 对阻尼  $r_{a1}$  和  $r_{a2}$  的取值进行在线调整, 实现注入阻尼自整定, 提高了系统的动态性能和鲁棒性, 进一步优化 APF 的补偿效果。

理论上, 模糊控制的精度会随着维数的增加而提高, 但是过高的维数会造成模糊控制规则、编写难度与复杂度的增加, 不利于控制算法的实现。而一维模糊控制器的动态性能低, 输出偏差大<sup>[14]</sup>。为实现  $r_{a1}$  和  $r_{a2}$  的自整定, 本文设计了一个二维模糊控制器, 以期望电流  $i_x^*$  ( $x=d, q$ ) 与逆变器实际输出电流  $i_x$  的偏差  $\Delta i_x$  及该偏差的变化率  $d\Delta i_x/dt$  作为模糊控制器的输入变量, 利用模糊规则确定  $r_{a1}$  和  $r_{a2}$ 。

本文采用 Mamdani 推理法。设定模糊无源混合控制器输入变量  $\Delta i_x$ ,  $d\Delta i_x/dt$  的模糊论域均为  $[-3, 3]$ , 输出变量  $r_{a1}$ 、 $r_{a2}$  的模糊论域为  $[0, 100]$ , 输入、输出模糊论域皆平均量化为七个等级。模糊输入变量、输出变量的语言值集合均设为  $\{\text{NB}(\text{负大}), \text{NM}(\text{负中}), \text{NS}(\text{负小}), \text{ZO}(\text{零}), \text{PS}(\text{正小}), \text{PM}(\text{正中}), \text{PB}(\text{正大})\}$ , 其中模糊语言变量 NB 采用 Z 形隶属度函数, PB 采用 S 形隶属度函数, 其他变量语言均采用三角形隶属度函数。

模糊控制器设计的核心是建立合适的模糊规则表<sup>[15]</sup>。为保证系统良好的动态性能, 由系统自整定要求和专家经验, 可列出  $r_{a1}$  和  $r_{a2}$  的模糊规则表如表 1 所示。

 表 1  $r_{a1}$  和  $r_{a2}$  的模糊规则表

 Table 1 Fuzzy rules table for  $r_{a1}$  and  $r_{a2}$ 

$\Delta i_x$	$d\Delta i_x/dt$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

### 3.3 直流侧的自适应模糊 PI 控制

对直流侧电容电压的控制是 APF 控制的重要环节之一。传统的 PI 控制算法因其原理简单, 易于实现, 广泛应用于过程控制中, 但是存在需要系统的精确数学模型、鲁棒性差、容易引起电压超调等缺点。与传统无源控制策略相同, 传统 PI 控制的比例系数  $K_p$  和积分系数  $K_i$  为恒定值, 亦存在参数不能实时调节和鲁棒性差等不足。本文针对传统 PI

控制策略的不足, 在传统基于 PI 控制 APF 直流侧电压方法的基础上, 采用模糊自适应的方法, 通过模糊控制规则, 在线调节比例、积分系数, 实现 PI 参数自整定, 使系统的动态响应得到提高, 稳态误差减小, 进而达到控制直流侧电压的目的。直流侧自适应模糊 PI 控制的原理框图如图 2 所示, 其中  $k_e$ 、 $k_{ec}$  分别为电压偏差与电压偏差变化率的量化因子, 用于实际值与模糊控制各论域中的值进行相互转化。

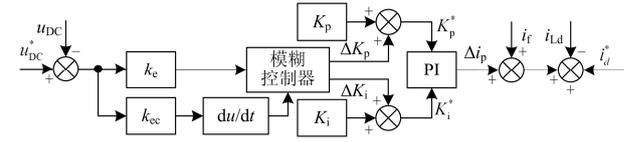


图 2 APF 的直流侧控制框图

Fig. 2 Diagram of APF's DC link

直流侧的自适应模糊 PI 控制器以电容电压给定值  $u_{DC}^*$  与实际值  $u_{DC}$  的偏差及其变化率  $d\Delta u_{DC}/dt$  作为输入变量, 比例系数的自调节量  $\Delta K_p$  和积分系数的自调节量  $\Delta K_i$  作为输出变量。

设定模糊 PI 控制器输入变量  $u_{DC}$ ,  $d\Delta u_{DC}/dt$  的模糊论域均为  $[-3, 3]$ , 输出变量  $\Delta K_p$  的模糊论域为  $[-0.3, 0.3]$ ,  $\Delta K_i$  的模糊论域为  $[-0.06, 0.06]$ 。与模糊无源混合控制器的模糊规则设计类似, 模糊 PI 的输入、输出模糊论域亦平均量化为七个等级。模糊输入变量、输出变量的语言值集合均设为  $\{\text{NB}, \text{NM}, \text{NS}, \text{ZO}, \text{PS}, \text{PM}, \text{PB}\}$ , 其中模糊语言变量 NB 采用 Z 形隶属度函数, PB 采用 S 形隶属度函数, 其他变量语言均采用三角形隶属度函数。 $\Delta K_p$  的模糊规则表与表 1 基本相同,  $\Delta K_i$  的模糊规则表如表 2 所示。

 表 2  $\Delta K_i$  的模糊规则表

 Table 2 Fuzzy rules table for  $\Delta K_i$ 

$\Delta u_{DC}$	$d\Delta u_{DC}/dt$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

由表 2 得到  $\Delta K_p$  和  $\Delta K_i$  后, 则修正后的比例系数  $K_p^*$  和积分系数  $K_i^*$  可分别表示为

$$\begin{cases} K_p^* = K_p + \Delta K_p \\ K_i^* = K_i + \Delta K_i \end{cases} \quad (16)$$

于是可得调节指令

$$\Delta i_p = K_p^* \Delta u_{DC} + K_i^* \int_0^t \Delta u_{DC} \quad (17)$$

将  $\Delta i_p$  叠加到有功电流的直流分量  $i_f$  上, 最后减去负载电流  $i_{Ld}$ , 便可得到需要补偿的电流指令值  $i_d^*$ 。

综上, APF 的整体控制原理框图如图 3 所示。

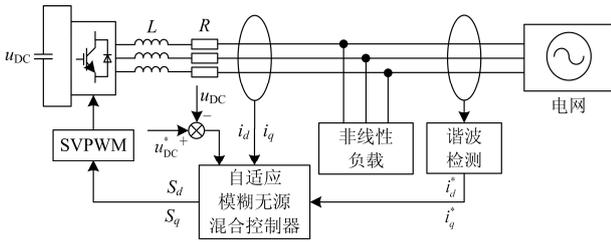


图 3 APF 的整体控制框图  
Fig. 3 Control system configuration of APF

## 4 仿真研究

### 4.1 负载恒定时的补偿效果分析

为验证本文所设计的自适应模糊无源混合控制策略的有效性, 在 Matlab 仿真平台上搭建了 APF 及其控制系统的 Simulink 仿真模型, 对系统进行仿真研究, 并与传统无源混合控制的仿真结果进行对比。谐波检测采用文献[16]中的检测方法, 电网采用标准三相平衡正弦电压源, 相电压有效值为 220 V, 频率为 50 Hz。直流侧电容电压期望值为 800 V, 其初始电压为 0 V。非线性负载为三相二极管全桥整流电路, 其直流侧电阻为 4 Ω。预设注入阻尼值  $r_{a1}$ 、 $r_{a2}$  均为 0, 预设比例系数  $K_p$  和积分系数  $K_i$  分别为 1 和 0.5。仿真总时长为 0.2 s。

由于系统三相对称, 此处仅给出 A 相的仿真结果。图 4 为检测出的 A 相电流谐波波形与 APF 输出电流波形对比图, 通过对比分析可以看出, 采用自适应模糊无源混合控制策略的 APF 的输出电流与谐波电流形状相似, 说明本文提出的控制策略能使 APF 的输出电流稳定跟踪期望电流, 且跟踪误差较小。

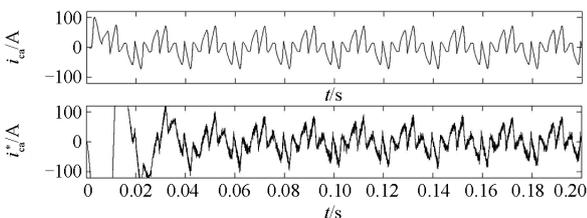


图 4 电流谐波与 APF 输出电流波形  
Fig. 4 Current harmonic and output current of APF

采用固定注入阻尼值、比例系数和积分系数的传统无源混合控制补偿时, 经过多次仿真测试发现, 当注入阻尼  $r_{a1}=50$ ,  $r_{a2}=49$ , 比例系数  $K_p^*=1$ , 积分系数  $K_i^*=0.2$  时的补偿效果最好。图 5 从上至下分别为负载侧 A 相电流波形、传统无源混合控制补偿后的电网侧 A 相电流波形及直流侧电压波形。图 6 从上至下分别为负载侧 A 相电流波形、采用自适应模糊无源混合控制策略补偿后的电网侧 A 相电流波形及直流侧电压波形。可以看出, 电网电流可从第二个周期起变为幅值与相位基本稳定的正弦波, 直流侧电压也可以迅速达到期望值, 与传统无源混合控制相比, 采用本文的控制策略补偿后, 电网电流纹波更小, 直流侧电压也更为稳定, 稳态误差较小, 补偿效果更佳。

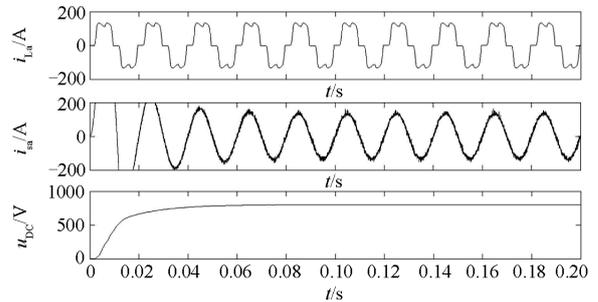


图 5 采用传统无源混合控制补偿后的负载侧、电网侧 A 相电流与直流侧电压波形  
Fig. 5 Load and grid side current of A phase and DC voltage by using traditional passivity based control hybrid strategy

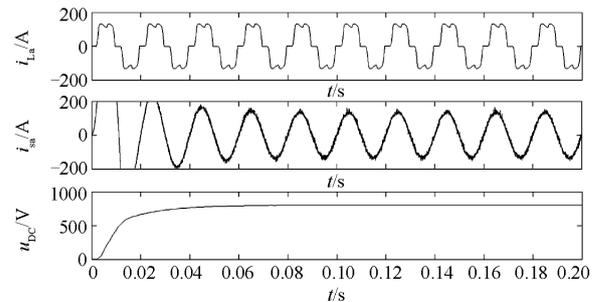


图 6 采用自适应模糊无源混合控制策略补偿后的负载侧、电网侧 A 相电流与直流侧电压波形  
Fig. 6 Load and grid side current of A phase and DC voltage by using self-adaption fuzzy-passivity based hybrid control strategy

采用本文的控制策略时, 图 7 为注入阻尼  $r_{a1}$ 、 $r_{a2}$  及其细节波形, 图 8 为比例系数  $K_p$  和积分系数  $K_i$  及其细节波形。可以看出, 在系统运行过程中, 注入阻尼与比例、积分系数均非恒值, 并可实现在线调整。

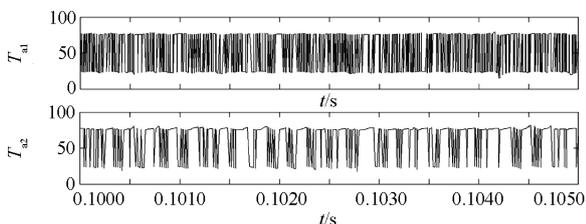


图 7 注入阻尼  $r_{a1}$ ,  $r_{a2}$  及其细节图

Fig. 7 Injected damping  $r_{a1}$ ,  $r_{a2}$  and the details

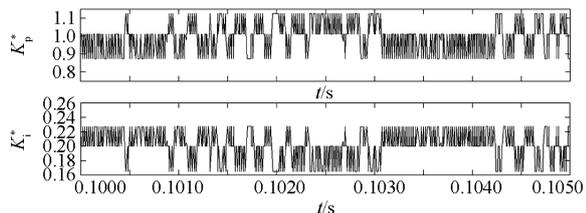


图 8 比例系数  $K_p^*$ 、积分系数  $K_i^*$  及其细节图

Fig. 8 Proportional coefficient  $K_p^*$ , integral coefficient  $K_i^*$  and the details

图9为稳态时的电网电压、电流曲线和功率因数曲线。通过对比可以看出,在系统达到稳态时,功率因数恒定在1附近,基本实现单位功率因数,可以看出本文采用的自适应模糊无源混合控制策略和直流环节控制方法的有效性。

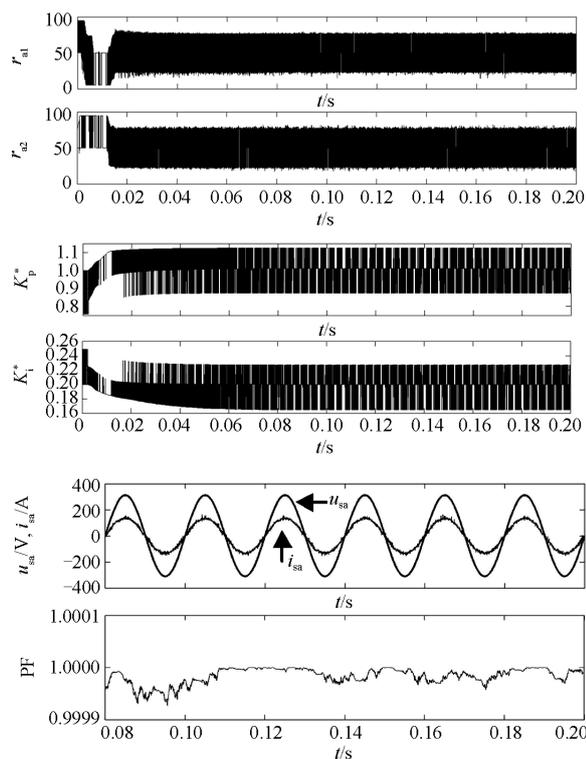


图 9 稳态时的负载电压、电网电流和功率因数曲线

Fig. 9 Load voltage, grid side current and PF wave in steady state

## 4.2 负载突变实验

在0.1 s时将负载加载到 $2 \Omega$ , 0.16 s时将负载恢复为 $4 \Omega$ , 进行总时长为0.2 s负载突变实验, 仿真结果如图10所示。可以看出, 在负载突增的瞬间, 电网电流可迅速恢复为正弦波, 且幅值增加, 直流侧电压也在短暂下跌后迅速恢复至期望值, 并基本保持恒定。负载恢复的瞬间, 电网电流和直流侧电压值也可迅速恢复至负载突增前的状态, 说明本文设计的控制策略控制的APF在负载突变的情况下具有较好的动态响应速度, 鲁棒性较强。

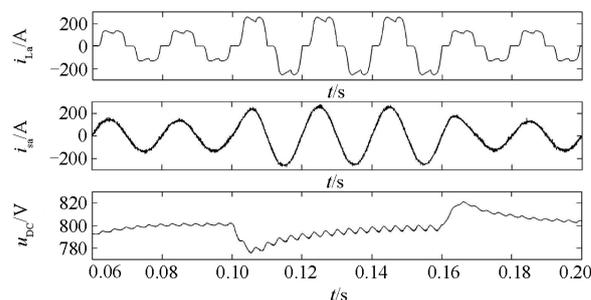


图 10 负载突变时的负载侧与电网侧电流和直流电压波形

Fig. 10 Load and grid side current and DC voltage waves when load sudden changes

## 4.3 电流谐波分析

为进一步验证本文提出的控制策略对谐波的补偿效果, 利用 powergui 工具, 分析电网电流的谐波畸变率, 并与传统无源混合控制时的仿真结果进行对比。图 11 为补偿前严重畸变的负载电流波形, 其畸变率为 24.55%。采用传统无源混合控制时, 电网电流的谐波畸变率为 3.75%, 如图 12 所示。而采用自适应模糊无源混合控制策略时, 电网电流畸变率可降至 1.59%, 如图 13 所示。对比分析表明, 与传统无源混合控制补偿后的波形畸变率相比, 本文设计的控制策略可使电网电流畸变率更低, APF 对负载谐波的隔离效果更好, 补偿效果优于传统无源控制策略。

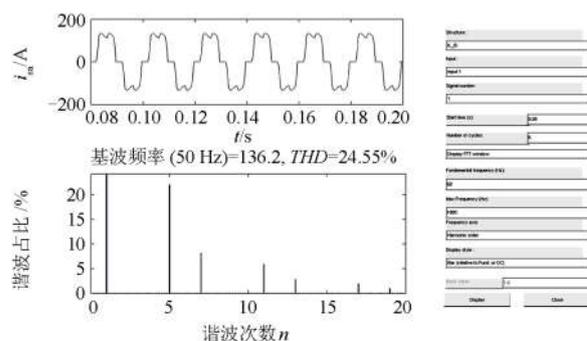


图 11 负载侧 A 相电流频谱分析

Fig. 11 Spectrum analysis chart for A phase load current

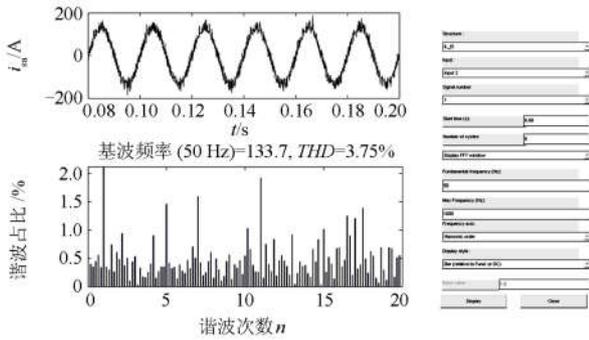


图 12 采用传统无源混合控制时的  
电网侧 A 相电流频谱分析

Fig.12 Spectrum analysis chart for A phase grid current by using traditional passivity based control hybrid strategy

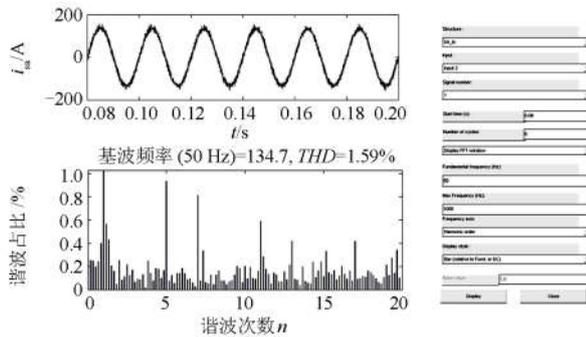


图 13 采用自适应模糊无源混合控制策略时的  
电网侧 A 相电流频谱分析

Fig.13 Spectrum analysis chart for A phase grid current by using self-adaption fuzzy-passivity based hybrid control strategy

## 5 结语

由仿真结果可知，本文采用的自适应模糊无源混合控制策略能使APF有效滤除电网中的谐波电流，并能维持其直流电容电压的稳定，在负载突变的情况下，依然能保证良好的补偿效果。与传统无源混合控制相比，因无源控制器与PI控制器的参数可实现实时调节，本文采用的方法具有更好的谐波滤除效果和抗干扰能力，对负载突变的鲁棒性也更强。从图13中也可以看出，采用本文控制策略的APF在稳定运行时，电网电流波形畸变率明显下降，有效抑制了电网中的电流谐波，负载对电网的电流谐波影响得到了有效隔离，表明了本文提出的自适应模糊无源混合控制策略的有效性与可行性。

## 参考文献

[1] 李鹏, 蒋晓明, 黄俊华, 等. 并联型 APF 补偿容性非线性负载不稳定机理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 55-60.

LI Peng, JIANG Xiaoming, HUANG Junhua, et al. Instability mechanism study of shunt active filter in compensation of capacitive nonlinearity load[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(14): 55-60.

[2] 陈聪. 三相四线制有源电力滤波器滑模变结构控制的研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2013.

CHEN Cong. Research on sliding mode variable structure control of three-phase four-wire active power filter[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2013.

[3] 张晓, 李新宇, 周睿. 三相四桥臂并联型 APF 无差拍控制策略的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(20): 78-83.

ZHANG Xiao, LI Xinyu, ZHOU Rui. Study on a deadbeat control scheme for three-phase four-leg shunt active power filter[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(20): 78-83.

[4] 杨新华, 谢兴峰, 马建立, 等. 并联有源滤波器的一种高可靠性控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(5): 128-133.

YANG Xinhua, XIE Xingfeng, MA Jianli, et al. A high-reliability control strategy for shunt active filter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(5): 128-133.

[5] 朱玉萍. 模糊控制 APF 在电力推进船舶电网中的应用[D]. 大连: 大连海事大学, 2010.

ZHU Yuping. Fuzzy control of APF in the electric propulsion ship power system[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2010.

[6] 李建泉, 吴小云, 何星瑶, 等. 集中补偿型 LCL-APF 的有源阻尼控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 101-106.

LI Jianquan, WU Xiaoyun, HE Xingyao, et al. Research on the active power damping control of LCL-APF based on concentrated compensation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 101-106.

[7] 薛花, 范月, 王育飞. 基于李雅普诺夫函数的并联型混合有源电力滤波器非线性控制方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(21): 133-141.

XUE Hua, FAN Yue, WANG Yufei. Nonlinear control strategy based on Lyapunov function for shunt hybrid active power filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(21): 133-141.

[8] 马生坤, 石峰, 邹江峰, 等. 无源性控制策略在中性线有源电力滤波器中的应用[J]. 继电器, 2007, 35(23): 52-54.

MA Shengkun, SHI Feng, ZOU Jiangfeng, et al. Passivity-based control applied in the neutral active power filter[J]. Relay, 2007, 35(23): 52-54.

- [9] 关琳燕, 周洪, 胡文山. 基于 Hamilton 理论的广域非线性时滞多机电力系统的稳定与控制[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(19): 17-24.  
GUAN Linyan, ZHOU Hong, HU Wenshan. Nonlinear wide-area time-delay stabilization and control of multi-machine power system based on Hamilton theory[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 17-24.
- [10] 丁青青, 鲁伟, 徐长波, 等. 三相并联混合有源电力滤波器的无源控制策略[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(5): 1-6.  
DING Qingqing, LU Wei, XU Changbo, et al. Passivity-based control of a three-phase shunt hybrid active power filter[J]. Electric Machines and Control, 2014, 18(5): 1-6.
- [11] 钱甜甜, 苗世洪, 刘子文, 等. 基于 PCHD 模型的 VSC-HVDC 的无源控制及滑模辅助改进控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(3): 138-144.  
QIAN Tiantian, MIAO Shihong, LIU Ziwen, et al. Passivity control and auxiliary sliding mode control strategy for VSC-HVDC system based on PCHD model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(3): 138-144.
- [12] WANG Jiuhe, YIN Hongren. Passivity based controller design based on EL and PCHD model[J]. Procedia Engineering, 2011, 15: 33-37.
- [13] 王久和. 先进非线性控制理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [14] 蒋小平, 彭朝阳, 魏立彬, 等. 基于模糊控制的混合储能平抑风电功率波动[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(17): 126-132.  
JIANG Xiaoping, PENG Chaoyang, WEI Libin, et al. Hybrid energy storage for smoothing wind power fluctuations based on fuzzy control[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(17): 126-132.
- [15] 韩力群. 智能控制理论及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [16] ZHENG Chengcai, WANG Jiuhe. The method of harmonic compensation of UPQC based on Euler-Lagrange model[C] // 2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia), Hefei, China, 22-26 May, 2016, IEEE Conference Publications, 2016: 142-146.

---

收稿日期: 2017-01-09

作者简介:

郑成才(1991—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为电能质量控制; E-mail: 1013180768@qq.com

王久和(1959—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事电能变换器非线性控制、电能质量控制、微电网等领域的研究; E-mail: wjhyhrwm@163.com

慕小斌(1986—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为分布式发电及电能质量控制。E-mail: 494483006@qq.com

(编辑 周金梅)