

DOI: 10.7667/PSPC180385

# 基于BP神经网络递推积分PI-重复控制 在微电网APF中的研究

李鑫<sup>1</sup>, 孟亨<sup>1</sup>, 杨桢<sup>1</sup>, 李书斌<sup>2</sup>, 耿浩<sup>1</sup>

(1. 辽宁工程技术大学电气与控制工程学院, 辽宁 葫芦岛 125100;

2. 国网辽宁省电力有限公司, 辽宁 沈阳 110006)

**摘要:** 为改善有源滤波器(APF)在微电网运行中对谐波起到抑制作用及补偿电能质量的能力, 提出了一种适用于微电网有源电力滤波器中的BP神经网络递推积分PI-重复控制策略。结合并联型APF拓扑结构, 在传统PI控制算法基础之上引进BP神经网络算法及递推积分函数, 根据跟踪误差变化趋向将PI控制参数进行实时、快速整定, 进而满足最优化要求。并与重复控制进行并联, 提高跟踪稳态误差能力, 保证系统运行的稳定性。建立并联型APF仿真模型和实验装置, 通过仿真对比验证了所提出的控制策略能够很好地提高响应速度和补偿精度, 提高了有源电力滤波器的鲁棒性。

**关键词:** 有源滤波器; 神经网络; PI控制; 重复控制; 递推积分; 谐波抑制

## Research on recursive integral PI-repetitive control based on BP neural network in micro-grid APF

LI Xin<sup>1</sup>, MENG Heng<sup>1</sup>, YANG Zhen<sup>1</sup>, LI Shubin<sup>2</sup>, GENG Hao<sup>1</sup>

(1. College of Electrical and Engineering Control, Liaoning Technical University, Huludao 125100, China;

2. State Grid Liaoning Province Power Co., Ltd., Shenyang 110006, China)

**Abstract:** In order to improve the ability of the Active Power Filter (APF) to suppress the harmonics and compensate the power quality in the operation of the micro-grid, a recursive integral PI-repetitive control strategy for BP neural network for APF in micro-grid is proposed. Combined with the parallel APF topology, BP neural network and recursive integral function are introduced on the basis of traditional PI control. According to the trend of tracking error change, the PI control parameters are adjusted in real time and quickly, and then the optimization requirements are met. In parallel with the repetitive control, the ability of tracking steady state error is improved to ensure the stability of the system operation. The parallel APF simulation model and experimental device are established. Simulation results show that the proposed control strategy can improve the response speed and the compensation precision, improving the robustness of active power filter.

This work is supported by Foundation of Liaoning Education Department (No. LJYL016).

**Key words:** active power filter; neural network; PI control; repetitive control; recursive integral; harmonic suppression

## 0 引言

随着微电网概念及并网技术的提出与日趋发展, 并网后谐波问题<sup>[1-3]</sup>日趋严重, 给电网带来了严重的电能质量问题。因此, 研究电网谐波治理技术, 为使电网稳定、可靠的运行, 促进智能微电网技术的快速发展具有重要意义<sup>[4]</sup>。有源滤波器(APF)是基

于电力电子技术, 也是应用最为广泛的谐波补偿装置<sup>[5]</sup>, 能够实现谐波抑制、无功调节等多重功能。而对其结构控制策略的研究也有着十分重要的意义<sup>[6]</sup>。为了治理微电网中的谐波源, 获得理想的电流波形, 需要APF拓扑结构采取适合的控制策略。

近年来, 中外学者提出了众多控制方案。文献[7]提出了PI-重复控制, 利用PI控制治理谐波具有动态响应快、重复控制具有稳态性高等优点, 但受到扰动时, 无法实时整定PI参数, 使得系统出现较

大的误差;文献[8-9]提出了模糊与PI复合式控制,通过实时调整PI参数,具有减小变电感对系统影响等优点,但该控制无法保证系统的稳定性;文献[10-11]提出了重复控制方法,提高了系统的跟踪稳态误差精度及运动的稳定性,但其无法保证系统的计算量低及响应速度快;文献[12]提出了滑模-PI控制策略,通过滑模控制使得系统获得对应参数变化及扰动不灵敏及无需系统在线辨识等优点,但是系统稳态跟踪精确无法保证;文献[13-14]提出了重复-模糊PI控制方法,通过模糊PI控制保证系统的动态响应速度,依靠重复控制改进了系统输出电流波形稳态跟踪精确度等优点,但系统计算量较大,无法提高动态响应速度。

在上述研究方法基础之上,本文提出一种BP神经网络递推积分PI-重复控制策略,结合并联型APF拓扑结构,在传统PI控制算法基础之上引进BP神经网络算法及递推积分函数,根据跟踪误差变化趋向将PI控制参数进行实时、快速整定,进而满足最优化要求;并与重复控制进行并联,提高跟踪稳态误差能力,保证系统运行的稳定性。该策略通过微电网分布式协调控制<sup>[15]</sup>有效地提高系统抗干扰性及鲁棒性,并且大大减少了计算量。实验结果验证了所提出的最优化控制是有效的、可行的。

## 1 微电网APF拓扑结构控制律

微电网并联型有源电力滤波器(SAPF)拓扑结构如图1所示<sup>[16]</sup>,工作原理是依据APF补偿目的得出非线性负荷中的谐波电流分量,电压由霍尔传感器输送到谐波电流检测电路中生成指令信号,将其输送到跟踪控制电路中产生PWM波,作为驱动电路IGBT的触发信号,然后经IGBT使主电路产生相应的谐波补偿电流并输送到电网中,该电流与非线性负荷中的谐波电流分量幅值相同,相位相反,因此叠加后可以抵消了微电网中的谐波分量<sup>[17]</sup>。

其中 $e_a$ 、 $e_b$ 、 $e_c$ 、 $i_{ca}$ 、 $i_{cb}$ 、 $i_{cc}$ 分别为三相电压、三相补偿电流,主电路中S1-S6为6个全控型的开关器件, $L$ 为进线电感, $C$ 为PN端直流侧电容, $U_{dc}$ 为电容 $C$ 两端的电压, $R$ 为等效滤波电阻。

为了便于分析,假设电网电压为对称的理想电源,开关及LC均为理想元器件。定义表示开关工作状态的开关函数 $S_k$ 为

$$S_k = \begin{cases} 1 & \text{第}k\text{相上桥臂导通,下桥臂关断} \\ 0 & \text{第}k\text{相上桥臂关断,下桥臂导通} \end{cases}, k = a, b, c$$

令 $U_{NO}$ 表示N点相对于参考点O的电压,根据KVL可推导出

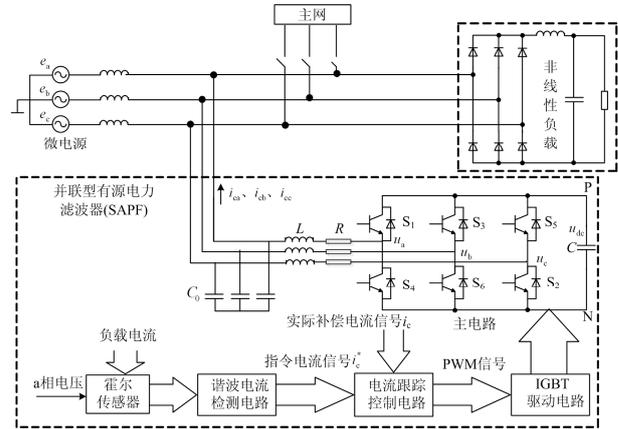


图1 微电网并联 APF 拓扑结构

Fig. 1 Parallel APF topology of microgrid

$$\begin{cases} L \frac{di_{ca}}{dt} = S_a U_{dc} - Ri_{ca} - e_a + U_{NO} \\ L \frac{di_{cb}}{dt} = S_b U_{dc} - Ri_{cb} - e_b + U_{NO} \\ L \frac{di_{cc}}{dt} = S_c U_{dc} - Ri_{cc} - e_c + U_{NO} \\ C \frac{dU_{dc}}{dt} = i_{ca} S_a + i_{cb} S_b + i_{cc} S_c \end{cases} \quad (1)$$

由于三相电压平衡,三相电流之和始终为0,可得

$$e_a + e_b + e_c = 0, \quad i_{ca} + i_{cb} + i_{cc} = 0 \quad (2)$$

将式(2)代入式(1),可得

$$U_{NO} = -\frac{1}{3}(S_a + S_b + S_c)U_{dc} \quad (3)$$

将式(3)代入式(1),有

$$\begin{cases} L \frac{di_{ca}}{dt} + Ri_{ca} = \frac{2S_a - S_b - S_c}{3} u_{dc} - e_a \\ L \frac{di_{cb}}{dt} + Ri_{cb} = \frac{2S_b - S_a - S_c}{3} u_{dc} - e_b \\ L \frac{di_{cc}}{dt} + Ri_{cc} = \frac{2S_c - S_a - S_b}{3} u_{dc} - e_c \\ C \frac{dU_{dc}}{dt} = i_{ca} S_a + i_{cb} S_b + i_{cc} S_c \end{cases} \quad (4)$$

式(4)即为APF在电压平衡时的基本数学模型。在三相电压已知情况的下,通过对 $S_a$ 、 $S_b$ 、 $S_c$ 不同取值的控制,便可达到控制补偿电流的目的。本文采用传统的 $i_p$ - $i_q$ 检测方法。

## 2 BP神经网络递推积分PI控制

由于传统PI控制原理上自身的不足之处,无法获得理想的控制效果。为此,本文先设计了优化的

BP 神经网络递推积分 PI 控制实时整定 PI 参数、提高响应速度；大大降低了计算量，提高了跟踪时间，其中利用递推积分 PI 控制可以同时使  $M$  个 PI 控制在一个周期内共同响应，代替各采样点在每个相应的周期内进行逐点积分，因此大大提高了跟踪误差的快速性及准确度；而 BP 神经网络可以根据误差变化趋向对 PI 参数进行实时调节，从而再进一步提高 PI 控制的响应速度。

### 2.1 递推积分 PI 控制的原理

传统 PI 控制的离散形式如式(5)所示，这种控制是对每个误差采样点进行逐点积分。

$$s(k) = K_p e(k) + \sum_{j=0}^k K_i e(j) \quad (5)$$

式中： $s(k)$  为  $k$  时刻控制器的输出； $e(k)$  为  $k$  时刻的误差采样值； $K_p$ 、 $K_i$  为系统比例积分常数。

递推积分 PI 算法如式(6)所示，即对  $k$ 、 $k-N$ 、 $k-2N$ 、 $\dots$ 、 $k-MN$  时刻的控制输出量进行积分，充分利用了指令输出信号会定期地发生重复的特性，提高控制的准确性。

$$S_R(k) = K_p e(k) + \sum_{i=0}^M K_i e(k+iN) \quad (6)$$

式中： $S_R(k)$  为  $k$  时刻控制器的输出； $N$  为一个周期时间内的采样总点数； $M$  显示目前时刻已经采样完成的数量。

在  $k-N$  时刻，式(6)可改写为

$$s(k-N) = K_p e(k-N) + \sum_{j=0}^{M-1} K_i e[k-(j+1)N] \quad (7)$$

那么递推积分 PI 控制律为

$$S_R(k) = S_R(k-N) + K_p e(k) - K_p e(k-N) + K_i e(k) \quad (8)$$

递推积分函数作用是将采样点在相应的每个周期时间内对误差采样值  $e(k)$  进行并行逐点积分。

即： $M$  个 PI 共同响应来完成整个系统的 PI 控制。

根据式(8)，设计控制结构框图如图 2 所示。

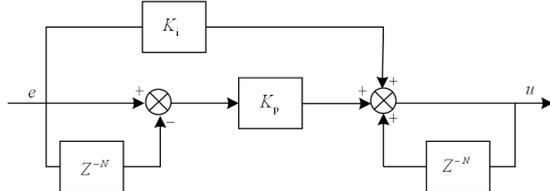


图 2 递推积分 PI 控制器

Fig. 2 Recursive integral PI controller

### 2.2 BP 神经网络递推积分 PI 控制器

BP 神经网络递推积分 PI 控制器结构如图 3 所示。该控制结构由采用了递推积分函数的 PI 控制与 BP 神经网络算法构成。当系统运行出现较大扰动

时，BP 神经网络经过自学习及不断调节权值，实时整定递推积分 PI 参数，以获得性能的最优化。

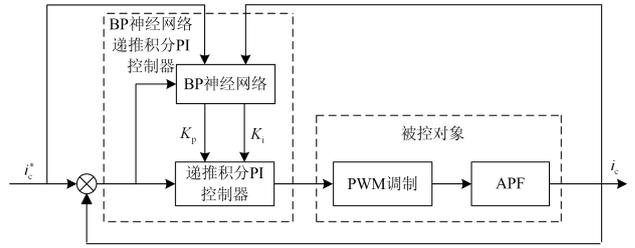


图 3 BP 神经网络递推积分 PI 控制结构框图

Fig. 3 BP neural network recursive integral PI controller

该控制中采用 BP 神经网络，该控制算法是人工神经网络的一种按照误差反向传播的训练算法，是当前应用最广泛的神经网络模型之一<sup>[18]</sup>。BP 神经网络结构框图如图 4 所示，其由 3 个部分组成：输入层、隐含层、输出层。其中隐含层是衔接输入与输出的纽带，只有通过隐含层才能得到对应的比例、积分常数  $K_p$ 、 $K_i$ 。因而，经过三层之间权值的不断学习，实现了对 PI 控制参数的实时整定<sup>[19]</sup>。

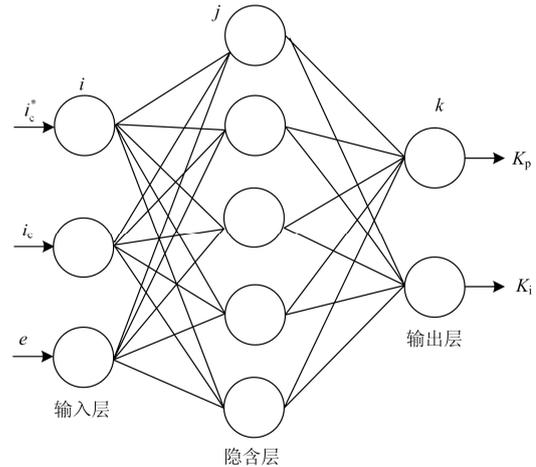


图 4 BP 神经网络结构图

Fig. 4 Block diagram of BP neural network

图 4 中 BP 神经网络的输入为

$$e(k) = i_c^*(k) - i_c(k) \quad (9)$$

式中： $i_c^*$  为指令电流； $i_c$  为实际输出谐波电流； $e(k)$  为误差。

设  $W_{ij}$  为输入层到隐含层的权值， $W_{jk}$  为隐含层到输出层的权值，所以神经网络隐含层的输入、输出分别为

$$\begin{cases} I_j = \sum_{i=1}^3 W_{ij} x_i, & j=1, \dots, 5 \\ Q_j = f(I_j), & j=1, \dots, 5 \end{cases} \quad (10)$$

隐含层的激发函数通过 Sigmoid 函数计算得

$$f(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (11)$$

同理, 可以获得输出层输入、输出分别为

$$\begin{cases} N_k = \sum_{j=1}^5 W_{jk} Q_j, & k=1,2 \\ E_k = g(N_k), & k=1,2 \end{cases} \quad (12)$$

隐含层神经单元的激发函数通常采取连续可导的 Sigmoid 函数:

$$g(x) = \frac{e^x}{e^x + e^{-x}} \quad (13)$$

则神经网络的输出为

$$\begin{cases} E_1 = K_p \\ E_2 = K_i \end{cases} \quad (14)$$

输出层的  $E_1$ 、 $E_2$  两个节点分别对应  $K_p$ 、 $K_i$ 。

同时得到实际与预期的输出之间的误差为

$$e^k = \sum_{k=1}^2 (d_k - E_k) \quad (15)$$

式中,  $d_k$  为节点  $k$  的输出期望值。

取性能指标函数为

$$J(k) = \frac{(i_c^*(k) - i_c(k))^2}{2} \quad (16)$$

通常情况下, 各个网络之间的权值采取梯度下降法来整定, 所以  $\Delta W_{jk}(k)$  校正量为

$$\Delta W_{jk}(k) = -\lambda \frac{\partial J(k)}{\partial W_{jk}} + \mu \Delta W_{jk}(k-1) \quad (17)$$

式中:  $\lambda$  为学习率;  $\mu$  为惯性系数。

$$\frac{\partial J(k)}{\partial W_{jk}(k)} = \frac{\partial J(k)}{\partial y(k)} \cdot \frac{\partial y(k)}{\partial \Delta u(k)} \cdot \frac{\partial \Delta u(k)}{\partial E_k(k)} \cdot \frac{\partial E_k(k)}{\partial N_k(k)} \cdot \frac{\partial N_k(k)}{\partial W_{jk}(k)} \quad (18)$$

将  $\frac{\partial y(k)}{\partial \Delta u(k)}$  近似值用符号函数  $\text{sgn}\left[\frac{\partial y(k)}{\partial \Delta u(k)}\right]$  代替, 因此可得到

$\Delta W_{jk}(k)$  的学习算法为

$$\Delta W_{jk}(k) = \mu \Delta W_{jk}(k-1) + \lambda \delta_i x_i(k) \quad (19)$$

$$\delta_i = x_3(k) \text{sgn}\left(\frac{\partial y(k)}{\partial \Delta u(k)}\right) \cdot \frac{\partial \Delta u(k)}{\partial E_k(k)} \cdot g(N_k(k)) \quad (20)$$

同理, 得到  $\Delta W_{ij}(k)$  的学习算法为

$$\Delta W_{ij}(k) = \mu \Delta W_{ij}(k-1) + \lambda \delta_j x_i(k) \quad (21)$$

$$\delta_j = f(I_j(k)) \sum_{k=1}^2 \delta_k W_{jk}(k) \quad (22)$$

综上, 优化控制流程图如图 5 所示。

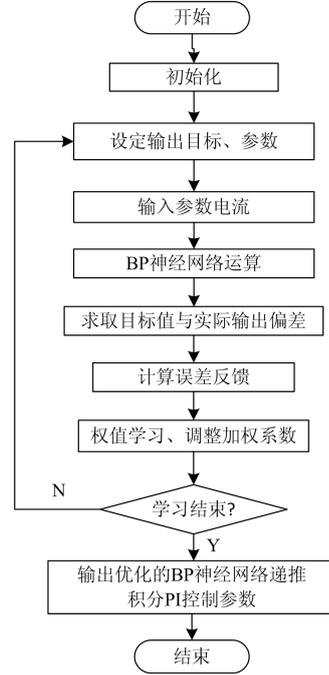


图 5 BP 神经网络递推积分 PI 控制算法流程图

Fig. 5 BP neural network recursive integral PI control algorithm

### 3 BP神经网络递推积分PI-重复控制

虽然 BP 神经网络递推积分 PI 控制改善了谐波补偿精确度及响应速度, 但是无法保证系统的稳定性。因此, 本文最终设计了 BP 神经网络递推积分 PI-重复控制器, 利用并联重复控制实现误差跟踪能力, 提高系统稳态精度, 保证了系统的稳定性。

BP 神经网络递推积分 PI-重复控制器的结构框图如图 6 所示。当系统出现较大的波动时, 谐波电流忽然增加, BP 神经网络 PI 控制开始运行, 实时整定 PI 参数, 调节输出的稳定谐波电流; 而重复控制将在下一个周期后参与调制。当系统处于平稳运行状态时, 此刻由重复控制提供调节, 提高稳态谐波补偿精确度的同时使系统具有良好的稳定性。

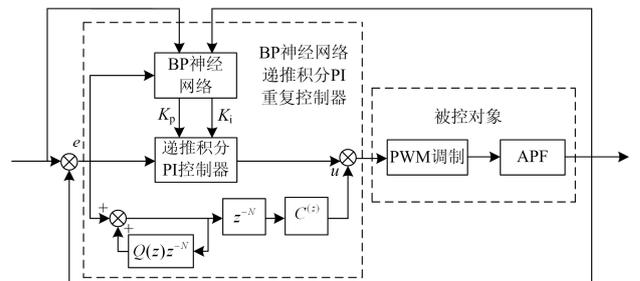


图 6 BP 神经网络递推积分 PI-重复控制器的结构框图

Fig. 6 Structural block diagram of recursive integral PI-repetitive controller for BP neural network

重复控制器具体参数如下:

(1)  $Q(z)$  通常情况下由一个低通滤波器或是接近于 1 的常数构成,为增强控制系统鲁棒性而设置的。 $Q(z)$  与  $z^{-N}$  共同组成重复控制器闭环的内模环节,为了使控制系统无静差跟踪误差,所以通常情况下  $Q(z)$  取常数 0.95。信号在改进内模中反馈环节的传递函数为

$$\frac{u(z)}{e(z)} = \frac{1}{1-Q(z)z^{-N}} = \frac{1}{1-0.95z^{-N}} \quad (23)$$

(2) 在系统闭环环路前串联一个周期延迟部分  $z^{-N}$ , 是该系统在延迟一个周期时间段后才进行的动作,即:上一个周期检测出的误差信息要在本周产生控制影响,其中  $N$  是一个周期内的总采样点数,在有源滤波器中电网频率为  $f=50\text{ Hz}$ , 开关频率为  $f_s=25\ 600\text{ Hz}$ 。

$$N = \frac{f_s}{f} = 512 \quad (24)$$

(3)  $C(z)$ 是补偿器,是根据被控对象特性设计的,通常情况下,设计补偿器  $C(z)$ 的形式为  $C(z)=K_r \cdot z^k \cdot S(z)$ ,  $K_r$ 为幅值增益,一般取值为 $[0, 1]$ 。为了获得快速收敛性和减小稳态误差,  $K_r$ 取为 1;为了抵消其相位滞后,保持调制后系统没有出现相移差,在控制器中增加相位补偿装置  $z^k$ ;  $S(z)$ 是校对部分,利用  $S(z)$ 对被控对象的幅频、相位等某些特征进行校对。

### 4 仿真结果分析

为了验证所提出的控制方法的有效性,建立并联型 APF 仿真模型如图 7 所示。设置仿真参数,微电源采用软件中三相电压模块和非线性负载代替,根据软件自带模块,设置电压源为 380 V,频率与公共电网频率保持一致为 50 Hz,非线性负载为三相不可控整流桥,滤波电感为 4 mH,滤波电容为 50  $\mu\text{F}$ 。

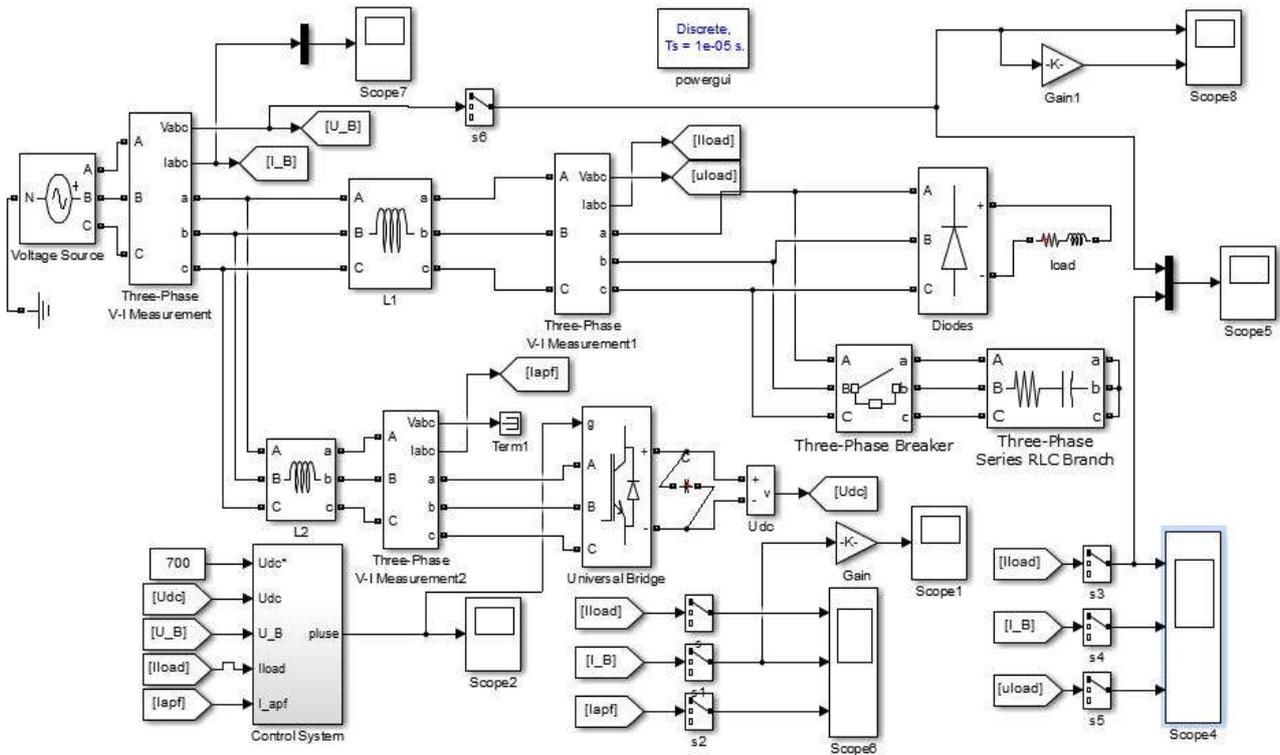


图 7 SAPF 仿真模型

Fig. 7 Simulation model of shunt active power filter

为了证明本节提出的最优化BP神经网络递推积分PI-重复控制在响应速度及补偿精度等方面的优势,下面将其分别与传统的PI控制及优化的BP神经网络递推积分PI控制进行仿真比较分析。

#### (1) 系统跟踪速度分析

由图 8(a)和图 8(b)可以看出,系统在 0~0.2 s内 A 相谐波信号实际输出的波形。由图 8(a)可知,传统PI控制在 0.06 s时跟踪上输出电流波形;而图 8(b)中优化控制在 0.02 s时跟踪上输出电流波形。可见,优化控制利用其BP神经网络调节权值实时整定PI

参数; 利用递推积分函数使 $N$ 个PI并行工作, 大大降低了计算量, 使指令电流的响应速度比传统PI控制的响应速度快, 提高了响应时间。

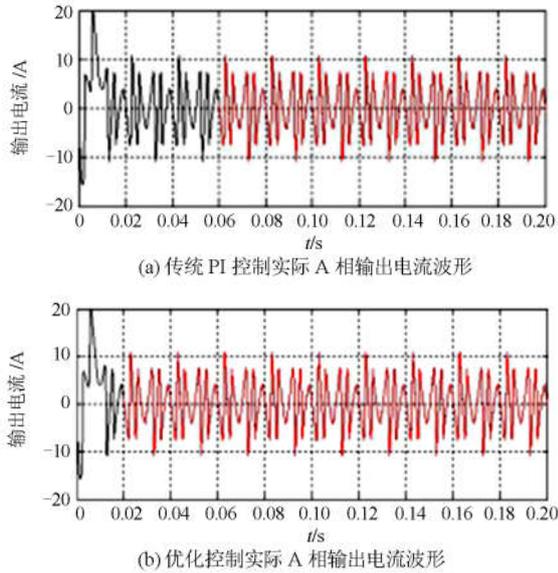


图8 跟踪速度对比分析

Fig. 8 Tracking speed contrast analysis

### (2) 控制精度分析

由图9(a)~图9(f)可以看出, 在三种控制方法下A相跟踪误差及补偿后谐波频谱图。采用优化控制算法使得指令电流跟踪稳态误差明显减小; 补偿后系统的总畸变率由采用传统PI控制方法的8.37%下降到6.37%; 而采用最优化控制策略之后, 跟踪误差电流在此基础上进一步减小, 系统的总畸变率降低到3.25%, 达到国家对电能质量的评判标准。

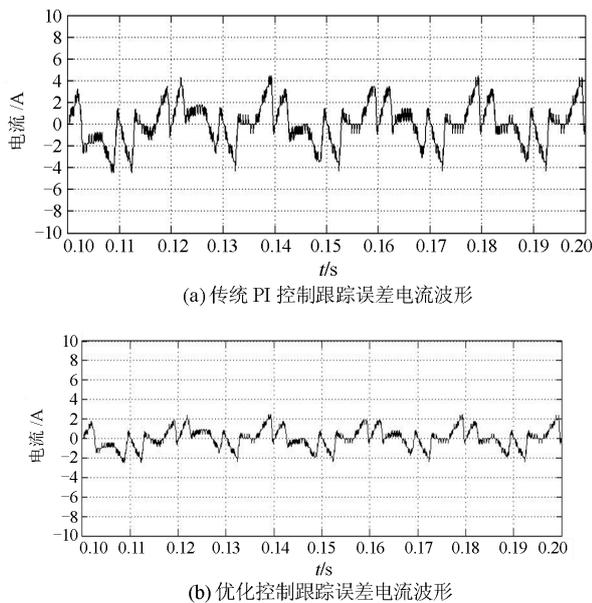
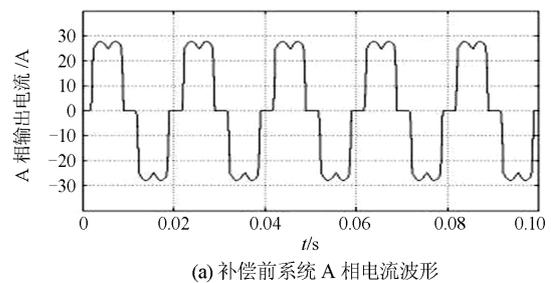


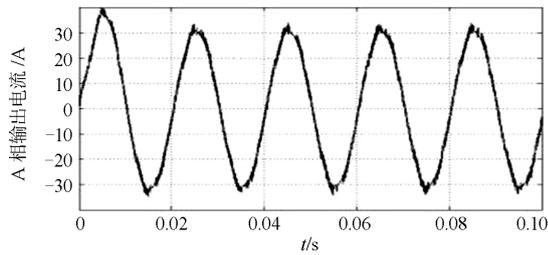
图9 控制精度对比分析

Fig. 9 Comparison and analysis of control precision

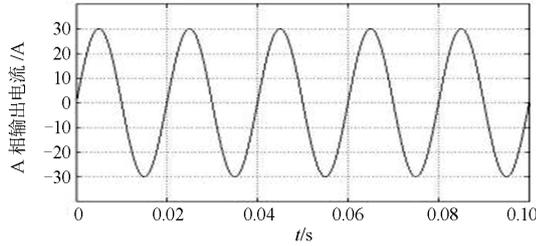
### (3) 补偿效果分析

图10为系统经过补偿前后A相电流波形。从图10可知, 经过APF最优化控制后出现畸变的A相电流波形相比于优化控制获得进一步的改善, 更加趋近于正弦波。





(b) 优化控制补偿后系统 A 相电流波形



(c) 最优化控制补偿后 A 相电流波形

图 10 补偿效果对比分析

Fig. 10 Comparison and analysis of the compensation effect

### 5 实验结果分析

依据本文实验具体要求的情况及实验室资源储备的现有状况，搭建了并联APF实验平台。根据系统的要求，在确保输出功率正常的同时兼顾实验投入成本，实验设计了低电压小功率的实验装置平台。实验参数如下：电网电压 380 V，50 Hz；经三相整流接阻感负载 10 Ω，5 mH；直流侧电压为 700 V；APF 输出端滤波电抗器为 1 mH；IGBT 参数为 1 700 V，100 A；系统开关频率为 25.6 kHz。整个实验平台如图 11 所示。

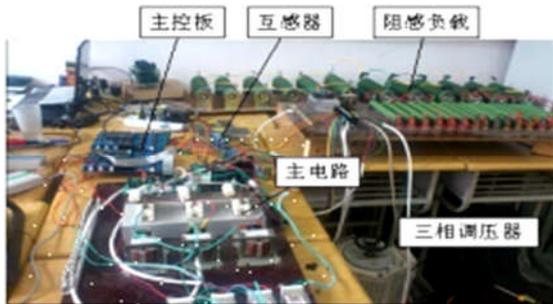
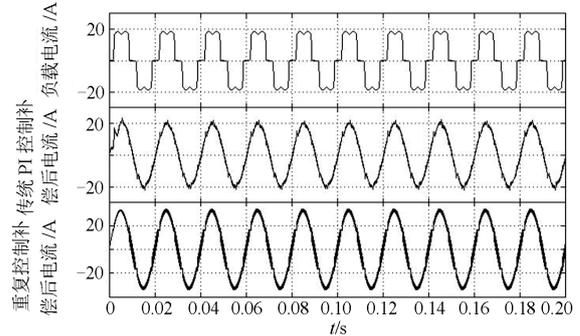


图 11 SAPF 实验装置图

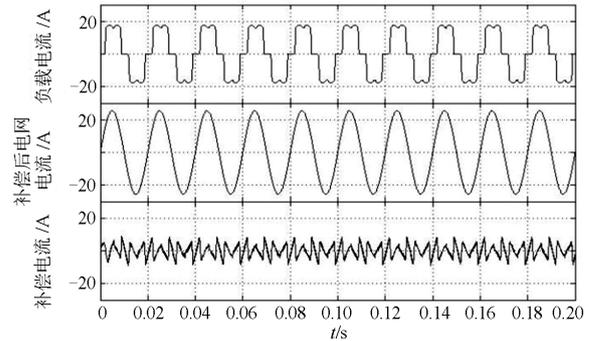
Fig. 11 SAPF experimental device diagram

图 12(a)是通过传统 PI 控制和重复控制补偿后电流波形图，可以看出由这两种方法控制的电流波形得到一定的改善，但无法达到控制的精度要求。图 12(b)是通过本文所提出的方法得到的补偿后电流波形图，可以看出采用最优化的控制策略补偿后的电流波形在上述两种方法之上进一步得到完善，更加趋近于正弦波。图 12(c)、图 12(d)和图 12(e)分别

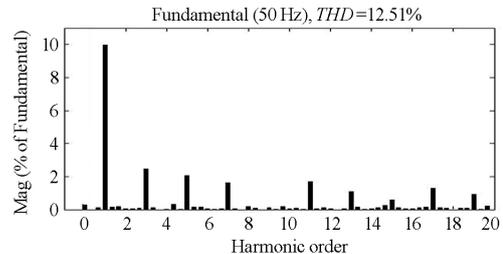
是传统PI控制、重复控制、BP神经网络递推积分PI-重复控制对A相进行补偿后的频谱分析图。可以得出传统PI控制、重复控制补偿后A相THD分别降低到 12.51%、10.11%；而通过本文所提出的优化控制补偿后THD降到 4.97%，满足实验要求。由于实验装置的元器件的特性导致一定的误差不可避免，从而与理想状态存在微量的差异，实验装置结果可以验证所提出的最优化控制策略是可行的。



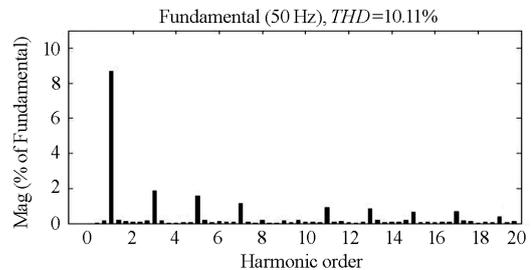
(a) 传统 PI 控制、重复控制 A 相补偿后的电流波形



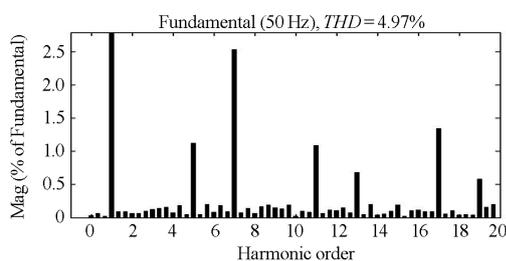
(b) BP 神经网络递推积分 PI 重复控制 A 相补偿后电流波形



(c) 传统 PI 控制 A 相补偿后的频谱分析图



(d) 重复控制 A 相补偿后的频谱分析图



(c) BP 神经网络递推积分 PI 重复控制 A 相  
补偿后的频谱分析图

图 12 实验结果

Fig. 12 Experimental result

## 6 结论

(1) 本文针对传统 PI 控制以不变的参数来运行变幻莫测的动态过程的不足之处, 首先提出具有改善动态性能的 BP 神经网络算法, 经过其自学习及不断调节权值, 在线实时整定 PI 参数以获得动态性能的最优化。

(2) 通过递推积分函数在一个周期内同时进行  $M$  个 PI 控制共同工作, 代替各采样点在每个相应的周期内进行逐点积分, 因此可以提高跟踪误差的快速性及准确度; 大大降低了计算量, 提高了跟踪时间。

(3) 同时利用重复控制提供系统稳态调节, 提高稳态谐波补偿精度的同时保证了系统运行的稳定性, 使系统安全、可靠、稳定运行。

对系统建立仿真模型, 仿真和实验结果表明: 采用最优化后的控制动态响应时间比传统 PI 控制缩短了 0.04 s; 控制精度也大大提高; 系统的总畸变率由 8.37% 降低到 3.25%, 满足电能质量标准要求。相比较于传统控制方法, 该控制策略更加具有针对性, 从而证明了所提出方法的有效性及其准确性。

## 参考文献

- [1] 王兆安, 杨军, 刘凯. 谐波抑制及无功功率补偿方法 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [2] 卢昊, 周维维, 杜雄. 三相直流侧 APF 补偿性能的区域研究[J]. 电源学报, 2009, 7(2): 137-142.  
LU Hao, ZHOU Luowei, DU Xiong. Research frequency compensation performance of three-phase DC side APF[J]. Journal of Power Supply, 2009, 7(2): 137-142.
- [3] 孙龙庭, 张旸, 陈新. 基于重复控制的微电网逆变器控制策略[J]. 电源学报, 2018, 16(2): 38-44.  
SUN Longting, ZHANG Yang, CHEN Xin. Repetitive control based control strategy for microgrid inverter[J]. Journal of Power Supply, 2018, 16(2): 38-44.
- [4] ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, BO Zhiqian. New development in relay protection for smart grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 121-127. DOI: 10.1186/s41601-016-0025-x.
- [5] 刘国海, 张琛, 陈兆岭, 等. 基于全程滑模变结构控制有源电力滤波器[J]. 电气传动, 2014, 44(11): 29-32.  
LIU Guohai, ZHANG Chen, CHEN Zhaoling, et al. Global sliding mode variable structure control for active power filter[J]. Electric Drive, 2014, 44(11): 29-32.
- [6] 刘继权, 张茂松. 基于瞬时无功功率理论的新型谐波检测法[J]. 电测与仪表, 2012, 49(562): 32-54.  
LIU Jiquan, ZHANG Maosong. A new harmonic detection method based on instantaneous reactive power theory[J]. Electrical Measurement and Instrument, 2012, 49(562): 32-54.
- [7] 乔鸣忠, 夏益辉, 梁京辉, 等. 基于重复-PI 的复合控制应用于并联有源滤波器研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 54-59.  
QIAO Mingzhong, XIA Yihui, LIANG Jinghui, et al. Research on PI control based compound controller applying to shunt active filter[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 54-59.
- [8] 季宇, 王东旭, 吴红斌, 等. 提高直流微电网稳定性的有源阻尼方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(2): 370-379.  
JI Yu, WANG Dongxu, WU Hongbin. The active damping method for improving the stability of DC microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 33(2): 370-379.
- [9] 梁姗姗, 吴军, 刘涤尘, 等. 智能电网技术体系与发展趋势研究[J]. 陕西电力, 2015, 43(10): 1-5.  
LIANG Shanshan, WU Jun, LIU Dichen, et al. Technology system and development trend of smart grid[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(10): 1-5.
- [10] 应素云. 基于重复控制的有源电力滤波器控制算法[D]. 福州: 福州大学, 2011.  
YING Suyun. Control algorithm of active power filter based on repetitive control[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2011.
- [11] 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.
- [12] 李兰芳, 徐晓刚, 吴国兵, 等. 并联型 APF 直流侧电压的滑模 PI 控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 32-37.  
LI Lanfang, XU Xiaogang, WU Guobing, et al. The sliding mode PI control strategy of parallel APF DC side voltage[J]. Power System Protection and Control, 2017,

- 45(5): 32-37.
- [13] 张培远. 重复-模糊 PI 复合控制策略在 APF 中的应用[J]. 电气应用, 2016, 35(18): 30-51.  
ZHANG Peiyuan. The application of repetitive fuzzy PI complex control strategy in APF[J]. Electrical Application, 2016, 35(18): 30-51.
- [14] 王树民, 李祥生, 齐凌成, 等. 并联型有源电力滤波器的研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(9): 79-82, 102.  
WANG Shumin, LI Xiangsheng, QI Lingcheng, et al. Study on shunt active power filter[J]. Smart Power, 2008, 46(9): 79-82, 102.
- [15] 范其丽, 郑晓茜, 王璞, 等. 基于混合储能动态调节的独立混合微电网分布式协调控制[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(7): 105-114.  
FAN Qili, ZHENG Xiaoqian, WANG Pu, et al. Distributed coordinated control of independent hybrid microgrid based on hybrid energy storage dynamic regulation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(7): 105-114.
- [16] 蔡冰倩, 贾利虎, 朱永强, 等. 新型交直流混合微电网结构设计[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 147-154.  
CAI Bingqian, JIA Lihu, ZHU Yongqiang, et al. New architecture design for hybrid AC/DC micro-grid[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 147-154.
- [17] 谢斌. 并联型有源滤波器谐波检测及控制技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.  
XIE Bin. Research on harmonic detection and control of shunt active power filter[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010.
- [18] 董飞飞, 俞登科. 我国电网技术的回顾与展望[J]. 智慧电力, 2018, 46(4): 6-10.  
DONG Feifei, YU Dengke. Retrospect and prospect of china power grid technology[J]. Smart Power, 2018, 46(4): 6-10.
- [19] 周朋祥. 基于改进人工蜂群优化 BP 神经网络的微电网 APF 控制策略研究[D]. 葫芦岛: 辽宁工程技术大学, 2017.  
ZHOU Pengxiang. APF control strategy of microgrid based on improved artificial bee colony optimization BP neural network[D]. Huludao: Liaoning Technical University, 2017.

收稿日期: 2018-04-04; 修回日期: 2018-06-13

作者简介:

李鑫(1981—), 女, 博士, 副教授, 主要从事智能电网技术及理论方向的研究;

孟亨(1992—), 男, 硕士, 主要从事智能电网及微电网控制技术的研究;

杨桢(1980—), 男, 博士, 副教授, 主要从事智能电网技术及理论、安全监测与监控方向的研究。

(编辑 魏小丽)