

# 智能控制方法应用于 APF 的综述与展望

王晓刚, 谢运祥, 帅定新

(华南理工大学 电力学院, 广东省 广州市 510640)

## Overview and Prospect on Application of Intelligent Control Methods to Active Power Filters

WANG Xiao-gang, XIE Yun-xiang, SHUAI Ding-xin

(College of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong Province, China)

**ABSTRACT:** With the development of computer and chip technologies, intelligent control is becoming more and more practical. Application of intelligent control to active power filter (APF) can enhance the performances of APF evidently. In this paper, an overview of present situation of applying intelligent control methods, such as fuzzy control, artificial neural network (ANN), genetic algorithm (GA) and so on, as well as the compound control methods consisting of intelligent control technologies with other control approaches, in the control of APF is given; the advantages and disadvantages of these control methods as well as the existing problems in them are compared and summarized. The prospect of applying intelligent control in APF is presented and it is pointed out that the control of APF based on the combination of intelligent control with nonlinear control will be an up-and-coming development direction.

**KEY WORDS:** active power filter; intelligent control; fuzzy logic control; artificial neural network; genetic algorithm; compound control

**摘要:** 随着计算机技术和芯片技术的发展, 智能控制方法将逐步进入实用化阶段。将智能控制方法用于控制有源电力滤波器(active power filter, APF)可大大提高 APF 的各项性能。文章对模糊控制、人工神经网络、遗传算法等智能控制方法及其与其它方法结合构成的复合控制方法在 APF 中的应用现状进行了综述, 比较和总结了上述控制方法的优缺点及存在的问题, 并对智能控制方法应用于 APF 的发展方向进行了展望, 指出将智能控制方法和非线性控制方法相结合, 实现对 APF 的控制会是一个较有前途的发展方向。

**关键词:** 有源电力滤波器; 智能控制; 模糊控制; 人工神经网络; 遗传算法; 复合控制

## 0 引言

非线性负载使输电网和配电网的电能质量严

重恶化, 有源电力滤波器(active power filter, APF)是解决电能质量问题的有效装置。APF 可以补偿电网的谐波和无功功率、提高电能质量、增强电网的可靠性和稳定性<sup>[1]</sup>。APF 有着多种多样的拓扑结构, 无论结构如何, 要获得优良的补偿特性, 控制策略的选取是至关重要的。APF 的控制方法包括常规比例-积分(proportional integral, PI)控制、无差拍控制、变结构控制、模糊控制(fuzzy logic control, FLC)、重复控制、预测控制、自适应控制、神经网络控制等。另外, 一般将脉宽调制(pulse width modulation, PWM)的实现方法也作为控制方法, 包括三角波比较法、滞环控制法、空间矢量法、特定消谐 PWM 法等<sup>[2]</sup>。

工业的发展对电能质量提出了更高的要求, 对电网的谐波限制也越来越严格, 常规的控制方法已逐渐难以满足要求。在上述控制方法中, 模糊控制、神经网络控制和遗传算法等属于智能控制方法, 智能控制是自动控制发展的高级阶段, 是控制论、系统论、信息论和人工智能交叉结合的产物, 在处理非线性、时变、复杂系统时有明显的优势, 特别适合于 APF 等电力电子系统。文献[1-3]介绍了 APF 的各种控制方法, 但未深入论述智能控制方法在有源电力滤波器中的应用情况, 本文将对智能控制方法在有源电力滤波器中的应用现状进行全面地综述, 介绍上述控制方法的原理和特点, 指出智能控制方法在 APF 中的应用前景和发展方向。

## 1 模糊控制

模糊理论是 Zadeh 于 1965 年提出的, 其建立在模糊集合和模糊逻辑的基础上, 通过引入隶属度函数来描述介于“属于”和“不属于”之间的过程,

即每个元素或多或少地属于某个集合。模糊控制是以模糊集理论为基础，以模糊语言变量和逻辑推理为工具，利用人的知识和经验，把直觉推理纳入决策中的智能控制。

模糊控制在 APF 中的应用包括直流侧电压和交流侧电流控制。最常见的直流侧电压模糊控制方法<sup>[4-5]</sup>是测得给定电压和实际电压间的误差和误差变化率，然后根据由经验建立的控制规则进行模糊化、模糊推理和清晰化，得到电源电流的参考幅值。文献[6]采用了模糊控制和 PI 控制相结合的模糊自整定 PI 参数控制器(fuzzy-PI controller)，在常规 PI 调节器的基础上，应用模糊集理论建立比例系数  $K_P$ 、积分系数  $K_I$  同误差绝对值  $|e|$  和误差变化率绝对值  $|\dot{e}|$  间的二元连续函数关系，并根据不同的  $|e|$ 、 $|\dot{e}|$  在线自整定  $K_P$ 、 $K_I$ ，与常规 PI 调节器相比，Fuzzy-PI 控制具有更快的响应和更小的超调，且鲁棒性较强。

文献[7]用带自校正因子(self-adjustable factor)的模糊控制器对 APF 的电压环进行控制，实现了 APF 的软启动，设控制变量为

$$U = -[aE^* + (1-a)E_C^*] \quad (1)$$

式中： $E^*$ 和  $E_C^*$ 分别为电压误差  $e$  及其变化率  $\dot{e}$  的模糊值； $a$  为可调的自校正因子。自校正因子的模糊控制器如图 1 所示。图中：启动阶段，直流电压  $u_{DC}$  逐渐上升，误差  $e$  很大，这表明电压和参考值相差很多，控制器应加大作用，此时  $E^*$ 在控制变量中扮演更重要的角色，应增加  $a$ ；为使系统尽快进入稳态并避免振荡，应减小超调，由于误差的变化  $E_C^*$ 起更重要的作用，此时应减小  $a$ 。

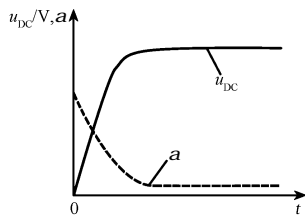


图 1 自校正因子的模糊控制器原理  
Fig. 1 Fuzzy controller principle with self-adjustable factor

由于模糊控制相当于比例-微分(proportional differential, PD)调节器，故其稳态精度不如 PI 调节器。为此进一步将上述模糊控制器和 PI 控制结合起来，当系统处于暂态时，模糊控制器起作用，加快响应，使系统快速进入稳态，而后采用 PI 控制，消除静差，改善了静态性能。

为使电流跟踪误差小，动态响应快，APF 的交流侧电流控制也可采用上述常见的模糊控制方法。文献[8-9]提出的模糊滞环电流调节器如图 2 所示。图中： $u_s$  和  $i_s$  分别为电源电压和电源电流； $i_s^*$  为电源电流参考值； $T_1$  和  $T_1'$  分别为同一桥臂上下开关管的开关信号。常规滞环电流控制器有实现简单、响应快等优点，但其最明显的缺点是开关频率不受限制，开关频率的最大值可能超过器件的承受极限。模糊滞环电流调节器根据电源电流  $i_s$  的误差和误差变化率在线调节滞环宽度，该方法不仅实现了较低的可控开关频率，而且改善了电流动态响应，减小了跟踪误差。

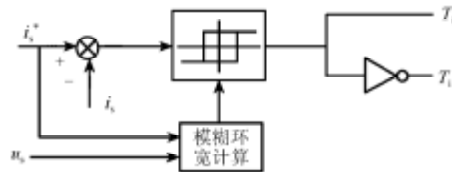


图 2 模糊滞环电流调节器

Fig. 2 Fuzzy variable-band hysteresis current controller

多重化逆变器可以进一步减小谐波、提高补偿效果、提高 APF 的容量，适于高压大功率的场合。在多重化逆变器中，逆变器的空间矢量数目较多，如 3 电平逆变器有 24 个矢量，包括 3 个零矢量、12 个小矢量、6 个中矢量和 6 个大矢量。为减小 APF 的电流跟踪误差，需要采用比 2 电平逆变器空间矢量更复杂的方法来选取合适的矢量，这增加了控制的复杂性。为简化控制，可采用模糊方法选取最佳矢量<sup>[10]</sup>，首先将  $a$  相和  $b$  相的电压误差( $e_a$  和  $e_b$ )量化为某一区间内的连续值，然后将连续量离散化，即分为若干个档次(如负大、负中、负小、零、正小、正中、正大)，每个  $e_a$  和  $e_b$  的组合对对应着一个最佳矢量，这样就可以建立规则库，实现模糊矢量控制。

模糊 T-S 模型是由 Takagi 和 Sugeno 提出的，是对非线性不确定系统建模的一个重要工具，目前已在系统辨识及其控制中得到了广泛应用，并成为模糊控制领域中最重要研究方向。T-S 模糊控制可选择任意的输入输出模糊集和普通的解模糊器，可使用更少的规则。设  $c_i$  为真值参数，则采用线性集结方法可将 T-S 模糊控制规则的输出部分表示为：如果  $x_1$  为  $F_1^l$ ， $\dots$ ，且  $x_n$  为  $F_n^l$ ，则  $y^l = c_0^l + c_1^l x_1 + \dots + c_n^l x_n$ 。若输入向量  $x = [x_1, \dots, x_n]^T$ ，其输出  $y(x)$  等于  $y^l (l=1 \sim M)$  的加权平均值，即

$$y(x) = \sum_{l=1}^M y^l \prod_{i=1}^n F_i^l(x_i) / \sum_{l=1}^M \prod_{i=1}^n F_i^l(x_i) \quad (2)$$

这种模型形式简单, 适于工程应用。文献[11]将 T-S 模糊控制器应用于三相并联型 APF 中, 仿真结果表明, 控制器的动态性能优于 PI 控制, 且当负载和系统其它参数发生变化时, 该控制方法有较强的鲁棒性。

## 2 人工神经网络控制

### 2.1 概述

人工神经网络(artificial neural networks, ANN)是由大量的、简单的神经元彼此按某种方式相互连接而形成的计算机系统, 该系统靠其状态对外部输入信息的动态响应来处理信息, 是一种旨在模仿人脑结构及其功能的信息处理系统。神经网络在电气工程中得到了越来越广泛的应用, 目前也逐步成为 APF 控制系统的有效工具。ANN 的主要特性如下: 本质上是非线性系统, 能充分逼近任意复杂的非线性关系; 无需建立输入输出间明确的关系, 而是通过学习过程和自适应算法实现, 能够适应不确定系统的动态特性; 系统信息存储在神经元及连接权中, 具有很强的鲁棒性和容错能力; 具有并行处理能力, 可大大加快系统的速度和可靠性。

APF 本身是一个非线性系统, 考虑到神经网络的上述特性, 将 ANN 应用于 APF 控制具有很广阔的前景。目前, ANN 在 APF 中主要用于产生参考电流或电压、控制电压环和电流环。

### 2.2 用 ANN 产生参考电压或电流

严格来说, 用神经网络产生参考电压和电流属于谐波或无功检测技术, 不属于控制方法, 但其智能化的特点同样提高了 APF 的性能, 故本文对其进行介绍。

用神经网络产生 APF 参考信号的方法分频域和时域 2 类<sup>[12]</sup>。用频域法检测谐波电流的示意图如图 3 所示。图中: 将测得的电网电压  $u(t)$  进行傅里叶分解得到各次谐波电压分量  $u_h$ , 其与参考谐波电压  $u_{ref,h}$  (通常为 0) 之差即为电压误差; 根据估计出的谐波电抗  $Z_h$ , 可将电压误差转换为误差电流量, 将其与  $Z_h$  一同输入至神经网络, 神经网络的输出即为各次谐波补偿电流  $I_{cref,h}$ ,  $I_{cref,h}$  与误差电流之和可作为神经网络的训练信号, 神经网络修改连接权值, 经过一段时间的训练, 误差电压将为 0, 权值不再改变, 训练结束。

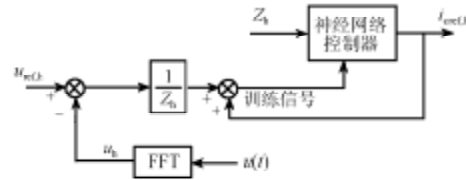


图 3 用频域法检测谐波电流的示意图  
Fig. 3 A harmonic detection sketch map by frequency domain method

由于频域方法需进行傅里叶分解, 故这种方法存在延时较长的缺点。采用时域法检测谐波电流的示意图如图 4 所示, 其中  $i_L$  为负载电流,  $i_{cref}$  为参考补偿电流。图 4 中的神经网络包括 1 个输入神经元、1 个隐含层和 1 个输出层, 其中输入层为神经网络提供负载电流若干个过去一段时间内的延迟序列, 如要测 25 次以内的谐波, 则需要的长度为 50, 神经网络的输出即为当前要补偿电流的瞬时值。由于利用了延迟序列, 这种神经网络还具备模式识别能力, 可识别负载电流波形的形状, 从而快速得到补偿电流。频域法的缺点是需要较多的神经元存储信息, 运算量大; 而神经网络的容量有限, 这也限制了频域法的应用。

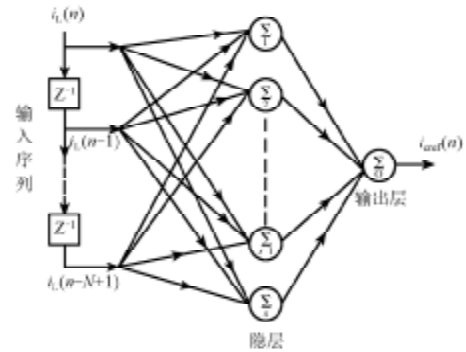


图 4 用时域法检测谐波电流的示意图  
Fig. 4 A harmonic detection sketch map by time domain method

上述时域法还存在精度不够高的问题, 其原因在于输出谐波和同一个隐层相连, 输出层和隐层间的连接权对全部待测谐波均要给出最佳值, 神经元的记忆负担太重, 从而影响了检测效果。若使每次谐波对应一个隐层, 每个隐层负责记忆各自对应次谐波的隐含映射关系, 将会较好地解决记忆负担过重的问题和相互影响的问题<sup>[13]</sup>。当隐层的神经元足够多时, 一般可实现所需的非线性映射, 此时可使用一个隐层。采用改进的时域法检测谐波电流的示意图如图 5 所示。假设测量 3 和 5 次谐波, 隐层被分为 2 部分, 每一部分的神经元只和对应的输出神

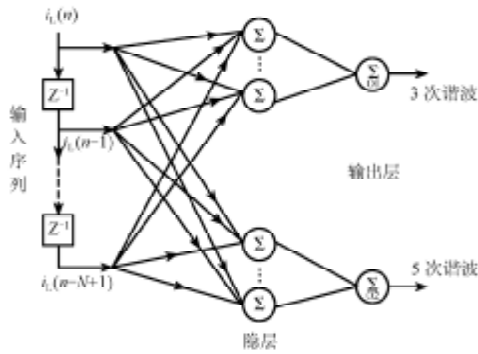


图5 采用改进时域法检测谐波电流的示意图  
Fig. 5 A harmonic detection sketch map by modified time domain method

神经元连接, 需测量几个谐波就把隐层分成几个部分, 每部分神经元的数目相等, 这样可减小谐波间的相互影响。

### 2.3 用 ANN 进行电压或电流控制

基于神经网络的控制方法如图 6 所示<sup>[14]</sup>, 神经网络输入为参考补偿电流  $i_{cref}$  和实际补偿电流  $i_c$  的误差, 输出为开关信号。经过训练后, 该神经网络相当于一个滞环比较器, 产生 APF 所需的 PWM 开关函数, 与常规滞环比较器相比, 其滞环宽度可自动调节。



图6 神经网络电流控制器

Fig. 6 An artificial neural network current controller

文献[15-16]总结了 3 种不同的基于 ANN 的电流控制器: ①直接神经网络控制器。该控制器学习传统的参考信号跟踪(reference signal tracking, RST)控制器, 以获得满意的性能。ANN 直接和被控对象级联作为直接控制器。在初始阶段, ANN 学习 RST 控制器, 最后完全取代 RST, 打破了传统 RST 控制器的局限。直接神经网络控制的目的是使系统误差, 即  $e(k)=i_{cref}(k)-i_c(k)$  最小, 通常采用误差反向传播 BP 算法。②逆神经网络控制器。直接神经网络控制需离线训练, 当 RST 控制器发生错误时, 控制性能将变差, 逆控制采用在线学习方法, RST 控制器发生错误时可恢复其控制性能。控制器包括 4 个输入, 即神经网络的输出电流、实际电流、第  $k$  及  $k-1$  时刻的电流误差, 输出为逆变器的控制信号。ANN 通常采用迭代校正的方法修改权值, 以使误差电流的均方值最小。③直接逆神经网络控制器。

直接逆控制需利用对象的模型和动态特性。对象的动态特性首先由辨别器神经网络(identifier neural network, INN)获得。控制逆变器时, INN 估计出系统的参数和对象的雅可比行列式  $\partial i_c / \partial u(k)$ ; 而控制器神经网络(controller neural network, CNN)是 INN 的准确复制, 由它根据雅可比行列式直接给出逆变器控制信号。

上述方法中, 逆神经网络控制和直接逆神经网络控制均为在线学习的控制策略, 仿真和试验结果表明, 二者的补偿效果相近, 但逆控制方法因具有简单和对硬件要求较低的优点而成为首选。

## 3 遗传算法

遗传算法(genetic algorithm, GA)是一种借鉴生物界自然选择和自然遗传学机理的迭代自适应概率性搜索算法, 它借鉴了达尔文的进化论和孟德尔的遗传学说, 模仿生物遗传过程中的选择、交叉、变异等过程, 最终使指定的适应度函数达到最优的个体保留下来, 属于一种智能方法。遗传算法是一种高效并行的全局搜索算法, 除适应度函数值外, 不需要其它辅助信息, 不易陷入局部最优, 具有内在启发式的搜索特性。近年来, 遗传算法发展十分迅速, 在自动控制等涉及到优化的各个领域得到了广泛应用。

由于遗传算法是一种优化方法, 故一般不单独使用。文献[17]将 GA 用于 APF 模糊神经网络预测模型的参数优化, 文献[18]将 GA 用于 APF 预测控制过程中的滚动优化环节, 二者都有效提高了控制器的性能。自抗扰控制器有十几个待定参数, 用一般方法很难确定, 文献[19]首次将自抗扰控制应用于 APF, 并用遗传算法搜索出了全部参数, 保证了全局最优。

## 4 复合控制

### 4.1 模糊控制与变结构控制相结合

滑模变结构控制出现于 20 世纪 50 年代, 经过半个多世纪的发展, 已成为自动控制系统的一种设计方法。APF 的核心是全控半导体器件, 器件的开关不断改变着系统的结构, 故 APF 是一种变结构系统, 特别适合用变结构方法进行控制<sup>[20-21]</sup>。但滑模变结构控制的缺点是系统会在滑模面附近发生抖振, 这将极大地影响控制的品质。

20 世纪 90 年代以来, 模糊滑模控制(fuzzy sliding mode control, FSMC)得到了广泛的研究和应

用，其基本思想是针对一类参数不确定的受控对象，按照滑模控制的方法定义滑模切换函数  $s$ ，用  $s$  及其导数  $\dot{s}$  代替一般模糊控制中的  $e$  和  $\dot{e}$ 。FMSC 结合了模糊控制不需要对象精确模型和滑模控制鲁棒性高的优点，控制器输出的是控制变化量  $\Delta u$ ，有助于削弱抖振。

文献[22]对 FSMC 应用于串联型 APF 进行了尝试，模糊滑模控制原理如图 7 所示，其中  $x_1$  和  $x_2$  分别表示负载电压误差及其变化率。图中定义穿过原点并垂直于滑模切换线  $s=0$  的直线  $d=0$ ，状态点到这两条线的距离平方和表示状态点到原点的距离平方，此值越大，控制变量  $u_{fuzz}$  越小，反之  $u_{fuzz}$  越大，即距离切换面越近，趋近速度越低，从而有效减弱了抖振。状态点到  $d$  轴和  $s$  轴的距离用模糊语言变量表示：PB 为正大，PS 为正小，PZ 为正零，NZ 为负零，NS 为负小，NB 为负大。采用上述方法控制负载供电电压，可显著降低电压谐波畸变率。

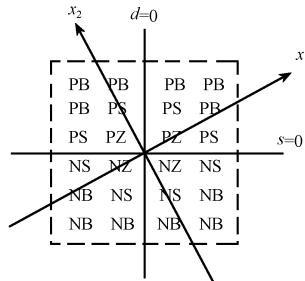


图 7 模糊滑模控制原理

Fig. 7 Principle of fuzzy sliding mode control

#### 4.2 模糊控制与预测控制相结合

预测控制(predictive control, PC)是一种新型的控制方法，其基本原理是在当前时刻基于过程的动态模型预测未来一定时域内过程的输出，按照基于反馈校正的某个优化目标函数计算当前和未来一定时域内控制量的大小。常规的预测控制需要准确知道系统的数学模型，这在很多时候是做不到的，尤其对 APF 这样的非线性时变系统来说就更加困难，必须和其它方法相结合。

将模糊控制与预测控制相结合控制 APF 是一种新的尝试<sup>[23]</sup>。文献[23]建立了 APF 的 T-S 模型，采用模糊预测控制的 APF 系统框图如图 8 所示。图中： $i_{c,a}$  为 APF 实际输出的补偿电流； $i_c$  是 APF 的模糊 T-S 模型输出的补偿电流； $i_{cref}$  是参考电流。预测控制器根据  $i_{cref}$  和  $i_{c,a}$  的误差以及  $i_c$  不断改变控制量  $u$ ，最终使  $u$  为优化值。实验结果表明，上述方法可使 APF 系统获得更好的稳态和暂态性能，且

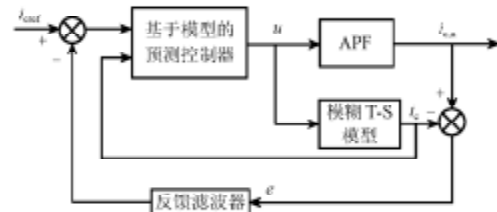


图 8 采用模糊预测控制的 APF 系统框图

Fig. 8 Block diagram of APF with fuzzy predictive control  
时延小，只要选取简单的模糊建模方法，整个控制策略就具备简单、有效的特点。

#### 4.3 模糊神经网络与预测控制相结合

文献[17]首次将基于模糊神经网络的预测控制算法用于 APF，这种方法的优点是不需要控制系统结构或参数的先验知识。模糊神经网络可获得系统复杂的映射关系，可以预测不同情况下需补偿的谐波电流。此外，引入遗传算法可使模糊神经网络预测模型更加简洁和精确。将模糊神经网络与预测控制相结合可使预测控制适合实时性要求比较高的场合。具体实现过程如下：将过去和当前时刻的补偿电流以及过去时刻的 APF 控制矢量输入至模糊神经网络，采用模型预测控制算法计算出当前的控制量  $u$ ，再将其送入空间矢量调制环节，产生控制逆变器器件合适的开关信号，使 APF 输出的电流快速跟踪指令电流。实验结果表明，上述控制方法使 APF 获得了优良的补偿性能，补偿后的网侧电流谐波畸变率仅为 2.9%。

#### 4.4 模糊控制和迭代自学习控制相结合

迭代自学习控制(iterative learning control, ILC)的基本思想如下<sup>[24]</sup>：基于多次训练，只要能保证训练过程中系统的不变性，就可以在模型不确定的情况下获得有规律的控制作用，使系统的实际输出逼近期望输出。这种方法学习控制规律简单、实时性好、对干扰和系统模型的变化有一定的鲁棒性。然而，传统迭代自学习控制的学习增益是固定的，跟踪误差时收敛速度慢，对噪声敏感，对模型不确定的鲁棒性不是特别强。为解决上述问题，可引入模糊控制，构成模糊迭代自学习控制，以便对学习增益进行合适的调节，加快收敛速度，增强鲁棒性。文献[25]将该控制方法应用于三相并联型 APF 中，其自学习公式<sup>[25]</sup>为

$$u_d^{k+1}(t) = u_d^k(t) + K_{pd} e_d^{k+1}(t) + K_{dd} \frac{de_d^{k+1}(t)}{dt} \quad (3)$$

$$u_q^{k+1}(t) = u_q^k(t) + K_{pq} e_q^{k+1}(t) + K_{dq} \frac{de_q^{k+1}(t)}{dt} \quad (4)$$

式中: 上标  $k$  为学习次数;  $e_d$  和  $e_q$  分别为  $d$  轴和  $q$  轴电流分量的误差;  $K_{pj}$  和  $K_{dj}$  ( $j=d, q$ ) 分别为比例学习增益和微分学习增益, 这 2 个增益根据误差和误差变换率 ( $|e_j|$  和  $|\dot{e}_j|$ ) 以一定的模糊规则进行调节。

实验结果表明该方可提高跟踪精度、加快收敛速度。

#### 4.5 模糊控制和自适应控制相结合

模糊控制虽然能够在一定程度上应对系统的不确定性、非线性和未建模动态, 但模糊控制的粗糙或不完善都会不同程度地影响控制效果。为使模糊控制更加智能化, 应使其具备自适应性, 当系统出现不确定因素时, 系统仍能保持较理想的特性, 这种复合控制方法即为自适应模糊控制 (adaptive fuzzy logic control, AFLC)。自适应模糊控制利用专家提供的具有自适应功能的语言性模糊信息, 使控制系统适应被控对象的不确定性因素, 而传统的自适应控制须通过系统参数辨识才能具备自适应功能。自适应模糊控制在电力电子中的应用仍处于初级阶段, 严格来说, 文献[6]的模糊自整定 PI 参数控制器和文献[7]的带自校正因子的模糊控制器均属于自适应模糊控制器。除此之外, 文献[26]还将自组织模糊控制器应用于 Boost 变换器中。上述 3 类自适应模糊控制虽然简单、易实现, 但都缺少对控制系统稳定性和收敛性的分析。稳定的非线性自适应模糊控制<sup>[27]</sup>弥补了上述方法的不足, 这种方法的特点是设计控制器时可以把专家知识结合到模糊逻辑系统中, 基于 Lyapunov 稳定性理论得出模糊系统参数的自适应调节律, 并严格证明系统的稳定性。稳定的非线性自适应模糊控制在有源电力滤波器中还未得到应用, 但已较多的用于无刷直流电机的控制中<sup>[28]</sup>, 而无刷直流电机的驱动部分为一逆变器, 故将这种优良的自适应模糊控制应用于基于逆变器的有源电力滤波器中会是一个很好的发展方向。

### 5 智能控制方法的发展方向

根据上述分析, 本文认为智能控制方法应用于有源电力滤波器是当前的研究热点, 今后可在如下方面作进一步发展:

(1) 智能控制方法的工程实现。目前, 智能控制在 APF 中还未进入实用化阶段, 但其应用研究已有了长足的进展。由于 APF 神经网络控制器的运算量大, 一般文献中只给出仿真结果, 但近年已有采用数字信号处理器实现的实验结果。而由于模糊

控制及其复合控制的理论较简单, 运算量相对较小, 必将先于神经网络在 APF 中得到实际应用。

(2) APF 的全智能化控制。本文介绍的智能控制有源电力滤波器, 相当一部分只是控制器的某个环节应用了智能控制方法, 如电流环采用智能控制, 而电压环仍然采用常规 PI 控制, 因此 APF 整体性能的改进在很大程度上会受到限制。如果全部环节均采用智能控制, 理论上会提高 APF 的性能, 但由于实现复杂, 这方面还有很多工作要做。

(3) 遗传算法的大量应用。在自动控制中, 存在着大量的优化问题, 随着对有源电力滤波器性能要求的提高, 利用遗传算法进行参数寻优是一项有意义的工作。

(4) 复合控制方法有待进一步研究。目前模糊控制以其相对简单的原理实现了与其它传统方法的有机结合, 大大提高了控制性能; 但由于神经网络的运算量较大, 理论相对复杂, 基于神经网络的复合控制方法在 APF 中应用的较少。本文认为, APF 属非线性系统, 将智能控制方法和非线性控制方法相结合, 将比智能控制方法与线性控制方法相结合更能提高 APF 的性能, 会是一个较有前途的发展方向。

### 6 结论

(1) 与传统控制方法相比, 采用智能控制方法的有源电力滤波器功能更强大, 性能更优越, 但目前这种滤波器大多处于仿真或实验阶段, 并未有实际应用的产品。

(2) 智能控制方法可极大地提高有源电力滤波器的性能, 因此将智能控制方法和非线性控制方法相结合会是一个较有前途的发展方向。

### 参考文献

- [1] El-Habrouk M, Darwish K, Mehta P. Active power filters a review[C]. IEE Proceedings-Electric Power Application, 2000, 147(5): 403-413.
- [2] 顾建军, 徐殿国, 刘汉奎, 等. 有源滤波技术现状及其发展[J]. 电机与控制学报, 2003, 7(2): 126-132.  
Gu Jianjun, Xu Dianguo, Liu Hankui, et al. Active power filter technology and its development[J]. Electric Machines and Control, 2003, 7(2): 126-132 (in Chinese).
- [3] Chen D H, Xie S J. Review of the control strategies applied to active power filters[C]. IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies, Hong Kong, 2004.
- [4] Dixon J, Contado J, Moran L. DC link fuzzy control for an active power filter, sensing the line current only[C]. 28th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, St Louis, USA, 1997.

- [5] Jain S K, Agrawal P, Gupta H O. Fuzzy logic controlled shunt active power filter for power quality improvement[J]. IEE Proceedings of Electric Power Applications, 2002, 149(5): 317-328.
- [6] 陈宇, 王碧芳, 刘会金. 基于模糊控制的有源电力滤波器控制方法[J]. 继电器, 2005, 33(16): 40-45.  
Chen Yu, Wang Bifang, Liu Huijin. Fuzzy control applied to active power filter[J]. Relay, 2005, 33(16): 40-45(in Chinese).
- [7] He N, Wu J, Xu D G. The fuzzy soft-startup controller of active power filter[C]. Power Electronics and Motion Control Conference, Portoroz, Slovenia, 2006.
- [8] Yu D M, Guo Q D, Hu Q, et al. A novel DSP based current controller with fuzzy variable-band hysteresis for active power filters [C]. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition, Dalian, China, 2005.
- [9] Mekri F, Mazari B, Machmoum M. Control and optimization of shunt active power filter parameters by fuzzy logic[J]. Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, 2006, 31(3): 127-134.
- [10] Shoulaie A, Ramezanzpoor P, Amirkhani H. Control of multilevel-inverters for active power filters using a fuzzy space-vector method[C]. IEEE Proceedings-International Symposium on Industrial Electronics, Guimaraes, Portugal, 1997.
- [11] Mishra S. TS-Fuzzy controlled active power filter for load compensation[C]. IEEE Proceedings-Power Engineering Society General Meeting, Montreal, Canada, 2006.
- [12] Round S D, Mohan N. Comparison of frequency and time domain neural network controllers for an active power filter[C]. International Conference on Industrial Electronics Control and Instrumentation, Hawaii, 1993.
- [13] 王群, 吴宁, 王兆安. 一种基于人工神经网络的谐波测量方法[J]. 电网技术, 1999, 23(1): 29-32.  
Wang Qun, Wu Ning, Wang Zhaoan. An artificial neural network approach for measuring harmonics[J]. Power System Technology, 1999, 23(1): 29-32 (in Chinese).
- [14] Vazquez J R, Salmeron P R. Three-phase active power filter control using neural networks[C]. 10th Mediterranean Electrotechnical Conference, Lemesos, Cyprus, 2000.
- [15] Djaffar O A, Patrice W, Jean M, et al. A unified artificial neural network architecture for active power filters[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2007, 54(1): 61-76.
- [16] Ahdeslam D O, Wira P, Merckle J, et al. A neural approach for the control of an active power filter[C]. Proceeding of 5th International Power Electronics Conference, Niigata, Japan, 2005.
- [17] Wang X H, He Y G. Fuzzy neural network based predictive control for active power filter[C]. International Conference on Power System Technology, Chongqing, China, 2006.
- [18] Fan S S, Wang X H, Zhou Y S. Neural network based predictive control for active power filter[C]. 30th Annual IEEE Industrial Electronics Society Conference, Busan, Korea, 2004.
- [19] 李乔. 并联型混合有源电力滤波器的自抗扰与 H<sub>∞</sub>鲁棒控制[D]. 广州: 华南理工大学, 2004.
- [20] Miret J, Luis G V, Castilla M, et al. A simple sliding mode control of an active power filter[C]. Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany, 2004.
- [21] 周卫平, 吴正国, 刘大明, 等. 有源电力滤波器变趋近律滑模变结构控制[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(23): 91-94.  
Zhou Weiping, Wu Zhengguo, Liu Daming, et al. The variable reaching law sliding mode control strategy for three-phase three-wire active power filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(23): 91-94 (in Chinese).
- [22] 龙英文. 变结构控制理论问题及在有源电网调节器中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- [23] Fan S S, Wang Y N. Fuzzy model predictive control for active power filter[C]. IEEE Proceedings-Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies Conference, Hong Kong, 2004.
- [24] 王伟, 周林, 徐明. 有源电力滤波器控制方法综述[J]. 继电器, 2006, 34(20): 81-86.  
Wang Wei, Zhou Lin, Xu Ming. Control method of active power filter[J]. Relay, 2006, 34(20): 81-86(in Chinese).
- [25] Lee T S, Tzeng K S, Chong M S. Fuzzy iterative learning control for three-phase shunt active power filters[C]. IEEE Proceedings-International Symposium on Industrial Electronics, Montreal, Canada, 2006.
- [26] Sung-hoe H, Gwi-Tae P. An adaptive fuzzy controller for power converters[C]. IEEE Proceedings-Fuzzy System Conference, Seoul, Korea, 1999.
- [27] 佟绍成. 非线性系统的自适应模糊控制[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [28] 纪志成, 沈艳霞, 薛花. 无刷直流电机自适应模糊控制的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5): 104-109.  
Ji Zhicheng, Shen Yanxia, Xue Hua. Study on the adaptive fuzzy control for brushless DC motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(5): 104-109(in Chinese).

收稿日期: 2008-01-05.

作者简介:

王晓刚(1976—), 男, 讲师, 博士研究生, 从事电力电子技术、电能质量改善、非线性控制、智能控制等方面的研究, E-mail: [ieewxg@sohu.com](mailto:ieewxg@sohu.com);

谢运祥(1965—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事电力电子及电力传动方面的研究。

帅定新(1979—), 男, 博士研究生, 从事电力电子与电力传动、非线性控制方面的研究。

(编辑 杜宁)

## 世界累计容量最大的电网串补工程成功投运

2008年4月2日, 山西省浑源500 kV串补工程8套串补装置中的首套——托源(托克托电厂—浑源变电站) I线串补装置一次投运成功。由中国电力科学研究院承担的浑源500 kV串补工程是为奥运供电的重要工程, 该工程将在浑源开闭所4进4出线路上装设8套串补装置, 是迄今为止世界上加装串补套数最多、工程量最大、串补累计容量最大的工程。

4月2日02:30, 首套串补装置顺利完成多项试验后, 进入带负荷试运行测试阶段, 至12:30, 历经10个小时的带负荷试验, 装置所有性能指标满足设计要求, 设备运行正常。预计其余几套串补装置将陆续完成系统试验, 进入试运行阶段。