

电流型有源电力滤波器的神经网络滞环控制

王萍, 张珂, 许会军

(天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072)

[摘要] 神经网络滞环控制就是将神经网络和滞环比较器这两种方法相结合的一种控制方法。滞环控制是控制方法中较为简单的一种, 它不需要系统太多的参数, 实时性较好, 但用滞环控制方法时系统开关频率不固定, 这不仅影响电子开关的使用寿命, 而且降低了系统的稳定性。将二者结合的控制方法不仅可实现神经网络对快速变量的控制, 而且可以提高滞环控制的性能。通过训练神经网络能够完成滞环比较器的功能, 并可取代滞环比较器。给出了计算机仿真结果, 神经网络通过 DSP 实现。

[关键词] 有源滤波; 神经网络; 滞环比较器

[中图分类号] TM46 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2007)01-0040-04

1 引言

电网谐波污染随着电力变流装置的广泛使用而日益严重, 严重影响电力系统和其他电器设备的安全经济运行, 干扰通信系统和精密仪器的正常工作。电力谐波产生的根源在于非线性负载向电网注入的谐波电流, 谐波治理的重要途径是抑制负载谐波电流^[1]。有源电力滤波器 (APF, active power filter) 从原理上讲能够有效抑制负载谐波电流, 是解决电力谐波问题最具前景的手段之一。

并联型 APF 是目前主要研究应用的一种滤波器。并联 APF 的设计大都采用电压源型 (VS) 或电流源型 (CS) 结构。电压型 APF (VSAPF) 在降低开关损耗, 消除载波谐波方面占有一定优势, 但与 VSAPF 相比, 电流型 APF (CSAPF) 能够控制直接输出的谐波电流, 因此能够快速响应负载的变化; CSAPF 所需直流侧储能相对较小, 因而可降低直流侧储能无源元件容量, 减小损耗; CSAPF 不会由于主电路开关器件直通发生短路故障, 在可靠性和保护上占有较大的优势。随着超导储能磁体的研究及超导储能技术的成熟, 电流型有源电力滤波器

将越来越具有吸引力。

神经网络控制作为一种极具潜力的控制手段吸引了众多的学者, 因神经网络具有并行处理能力、自学习能力、容错能力, 很适合于处理非线性系统的控制问题。特别是随着 DSP 的运算速度不断增加, 使神经网络在快速量控制中的应用成为可能^[2]。滞环控制是一种有效、简单的控制方式, 它不需要系统更多的参数, 运行容易, 具有快速的电流响应和限幅能力, 但系统开关频率不固定, 系统稳定性较差。在滞环控制的基本控制思想上, 研究用神经网络控制器来实现滞环控制的功能。神经网络控制器通过 DSP 数字实现。

2 CSAPF 功率级模型

图 1 所示为单相电流型并联有源电力滤波器的拓扑结构。其中 APF 主电路为典型的电流型 PWM 逆变器, S_1, S_2, S_3, S_4 组成 H 桥, L_d 为其直流侧储能电感; 滤波电感 L 和电容 C 组成 2 阶低通滤波, 用来滤除 PWM 逆变器开关频率附近的谐波。在该结构中, 逆变器和负载直接并联, 逆变器产生的补偿电流不受 LC 滤波器的影响, 因此补偿

方式直接，同时对 LC 滤波器的参数设计要求较低。在带有非线性负载的电力系统中，有源电力滤波器的作用是提供负载所需要的谐波电流，使非线性负载仅从电网电源吸取基波有功电流，使电源电流为正弦波。

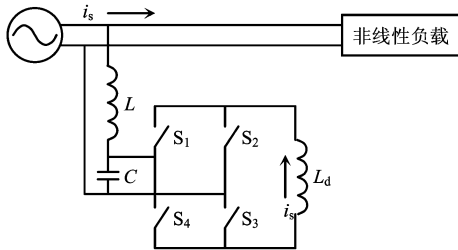


图 1 单相电流型 APF 拓扑结构

Fig.1 The topology of single phase CSAPF

根据系统工作特点，假设：

- 1) 为实现好的补偿效果，储能电感的电流大于电网电流的峰值，取 $I_d = 2 I_s$ ；
- 2) H 桥工作的开关频率 f_s 比电网电源的频率 f 高很多；
- 3) H 桥在每个开关周期内存在两种开关状态 (S_1, S_3 导通时， S_2, S_4 关断，或者相反)；
- 4) 储能电感足够大，因此在一个开关周期内，储能电感电流可认为保持不变。

由图 1 可以得出在每个开关周期内两种开关状态时的等效电路，如图 2 所示。

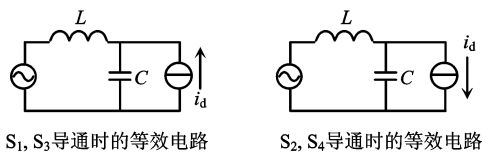


图 2 两种开关状态时的等效电路

Fig.2 Equivalent circuits of different switch-status

3 神经网络电流滞环控制器

滞环控制是一种有效、简单的控制方式，与神经网络结合可以发挥各自的优势。采用 BP 神经网络来代替传统电流滞环控制器，在滞环控制的基本控制思路训练一个神经网络控制器来实现滞环控制的功能。图 3 所示为有源电力滤波器电流控制系统，图 3a 采用瞬时值比较器的电流滞环控制，图 3b 是具有神经网络的电流滞环控制。在这里，神经网络作为图 3a 的滞环比较器来工作，因此，将

图 3b 的神经网络控制方式称为神经网络滞环比较器控制。滤波器补偿的实际电流与检测的参考电流之间的误差信号送入神经网络，进行运算，输出 PWM 开关信号作为 APF 主电路开关的驱动信号^[3]。

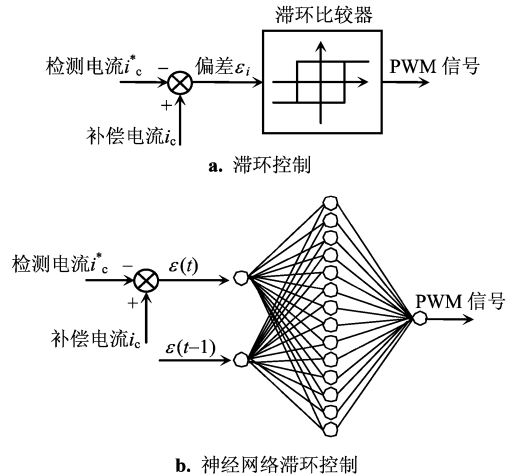


图 3 两种控制方法示意图

Fig.3 The diagrams of two kinds of control methods

反向传播 (BP, back-propagation) 网络，是对非线性可微分函数进行权值训练的多层网络。对于 BP 网络，一般采用常规的 BP 算法进行网络的学习与训练。但由于常规 BP 算法是采用基于梯度下降法 (LMS) 的广义 δ 纠错学习规则，因而不能保证网络经过学习训练能得到全局最优解；同时由于存在局部最优解和要求大量训练样本，故收敛速度很慢，训练时间比较长，并且对样本的表示次序变化比较敏感。为了改善常规的 BP 算法易陷入局部极小和收敛速度慢的问题，采用改进的 BP 算法即 L-M (levenberg-marquardt) 算法^[4]。L-M 是基于数值优化的算法，它结合了梯度下降法和牛顿法的优点，收敛速度迅速，性能优良。

根据 BP 网络应用经验及网络模型结构尽量简单的原则，采用了包含一个隐含层的 3 层 BP 神经网络，结构为 2-14-1，如图 3b 中神经网络所示。输入层取 2 个神经元，分别对应 t 时刻和 $t-1$ 时刻的电流误差信号 $\epsilon(t)$ 和 $\epsilon(t-1)$ 。输出层有一个神经元，对应 APF 开关控制信号。隐含层和输出层均采用 S 型激活函数。在滞环控制的基本控制思路训练该控制器来实现滞环控制的功能。训练样本通过对带有实际的滞环比较器的电路进行采样获得^[5]。

ANN (artificial neural network) 比较器输入为 ϵ_i

$= i_c - i_c^*$, 其中 i_c 为滤波器补偿的实际电流, i_c^* 为检测到的指令电流。

ANN 比较器输出为

$$u = f_2 \left[\sum_{j=1}^L w_{2,jk} f_1 \left[\sum_{i=1}^n w_{1,ij} \epsilon_i \right] \right] \quad (1)$$

f_1 为隐含层 S 型对数 (log-sigmoid) 激活函数:

$$f_{1,pj}^r = 1 / (1 + \exp(-a_{1,pj}^r)) \quad (2)$$

式中 $f_{1,pj}^r$ 是第 r 步迭代时隐含层第 j 个神经元节点对于第 p 组样本输入时的输出; $a_{1,pj}^r$ 为第 r 步迭代时隐含层第 j 个神经元节点对于第 p 组样本输入时所接收到的输入层的输入加权总和

$$a_{1,pj}^r = \sum_{i=1}^n w_{1,ij} \epsilon_i \quad (3)$$

f_2 为输出层 S 型 (log-sigmoid) 激活函数:

$$f_{2,jk}^r = 1 / (1 + \exp(-a_{2,jk}^r)) \quad (4)$$

式中 $f_{2,jk}^r$ 为第 r 步迭代时输出层第 k 个神经元节点的输出。此时隐层的输出作为输出层的输入。

$$a_{2,jk}^r = \sum_{j=1}^L w_{2,jk} f_{1,pj}^r \quad (5)$$

误差信号为输出误差平方和形式

$$E = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^M (t_k - u_k)^2 \quad (6)$$

式中 t_k 为 k 节点的输出期望值, u_k 为 k 节点的输出实际值。

神经网络结构中 $n=2$, $L=14$, $M=1$ 。神经网络采用 L-M 算法, 则经过训练, 神经网络的权值向量逼近最优值, 神经网络的输出逼近期望的滞环控制器 PWM 控制波形。

4 仿真实验结果

对上述系统进行仿真和实验。电源电压为 $110 \times 2^{1/2} \sin \omega t$ (V)。APF 主电路参数: 直流侧储能电感取为 70 mH, LC 无源滤波中电感、电容分别取值为 $1 \mu\text{H}$ 和 $47 \mu\text{F}$, 功率开关均使用功率 MOSFET。非线性负载分别为带容性负载和感性负载的整流桥电路, 容量 3 kVA。

神经网络比较器的滞环宽度 $H = \pm 0.01$ 。神经网络训练过程的误差信号曲线如图 4 所示。训练时采用 L-M 算法, 训练过程很快。

系统在容性负载下的仿真与实验波形如图 5、图 6 所示。仿真应用 MATLAB-SIMULINK 软件包进行。

图 5 分别给出正常工况时容性负载的负载谐波

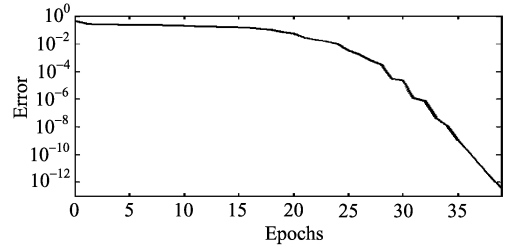
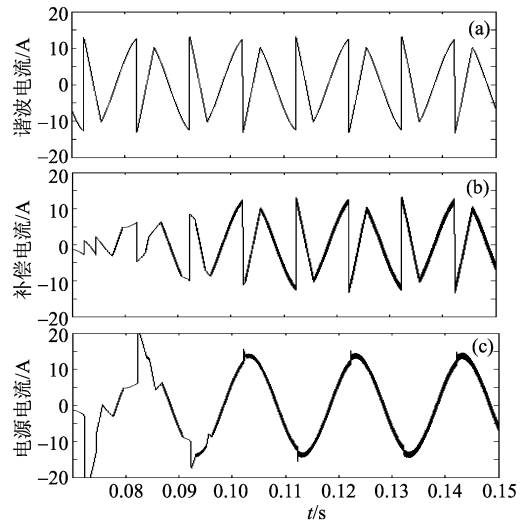


图 4 误差信号曲线

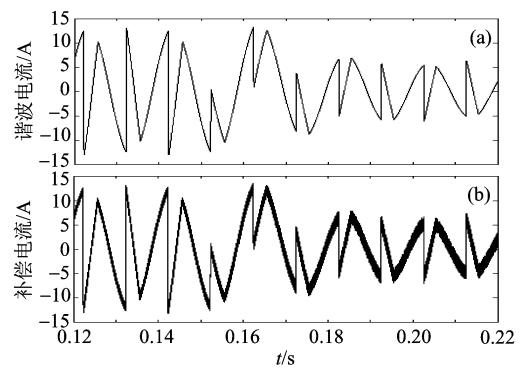
Fig.4 Error signal curve



a. 指令电流 b. 谐波补偿电流 c. 补偿后电源电流

图 5 容性负载时电流波形

Fig.5 Current waveforms with capacitive load



a. 谐波电流 b. 补偿电流

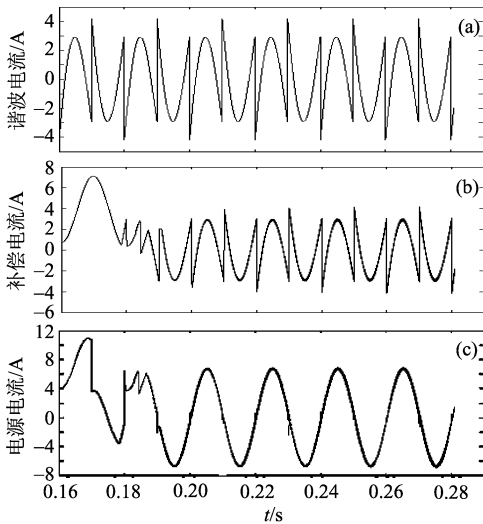
图 6 负载变化时电流波形

Fig.6 Current waveforms with load changing

电流 (指令电流)、APF 产生的补偿电流和电源电流波形 (为正弦波)。图 6 为负载突然变化时补偿

电流的响应过程。

图 7 对应感性负载时的相应波形。指令电流经 FFT 变换获得。在 MATLAB 仿真的基础上, 神经网络滞环比较器通过 DSP 编程数字实现。



a. 谐波电流 b. 补偿电流 c. 电源电流

图 7 感性负载时电流波形

Fig.7 Current waveforms with inductive load

键的一个环节, 在谐波电流检测准确无误的情况下, 控制的好坏直接影响波形的质量。神经网络的应用, 能够提高控制的速度和准确度。通过仿真结果可以看出, 神经网络滞环比较器能够达到很好的控制效果。

参考文献

- [1] 王兆安, 杨 君, 刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998
- [2] 孙孝峰, 郭伟杨, 黎顺元, 等. 三相变流器神经网络滞环控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(10): 39~43
- [3] Harashima F, Demizu Y, Kondo S, et al. Application of neural networks to power converter control [A]. Conf Rec IEEE-IAS Annu Meeting, Conf Rec [C]. 1989. 1087~1091
- [4] 丛 爽. 面向 MATLAB 工具箱的神经网络理论与应用 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1998
- [5] Vanzquez J R, Salmeron P. Active power filter control using neural network technologies [J]. IEE Proc Electr Power Appl, 2003, 150(2): 139~145

5 结论

有源滤波器的控制对波形的改善效果是较为关

Current Source Active Power Filter Control Using Neural Network Technologies

Wang Ping, Zhang Ke, Xu Huijun

(School of Electrical and Automation Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

[Abstract] In this paper, the application of neural network to power converter control is discussed. A new hysteresis comparator constructed by using neural network is introduced. Hysteresis band control is an effective and simple control method. It can easily run without many system parameters. But the switch frequency of system is not fixed. So it not only makes the system unstable but also may lessen the life span of the switches. The control method that combines the neural network technology with the hysteresis band technology has a high performance in response of current. Through training the neural network can learn the control rules by itself and can replace the real hysteresis comparator in power converter control. The computer simulation results are given in this paper and they can demonstrate the effectiveness of the proposed method. The neural network is realized by using DSP.

[Key words] source filter; neural network; hysteresis comparator