

基于 CMAC 和 PID 的 HVDC 系统直流有源滤波器的复合控制研究

李战鹰¹, 任震²

(1. 中国南方电网有限责任公司, 广州 广东 510060; 2. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 高压直流系统直流侧有源滤波器的控制器设计直接影响其谐波抑制效果。而常规的有源滤波器的控制器难以实现复杂动态环境下的非线性实时控制。因此, 提出了一种新的控制策略——小脑模型神经网络 (Cerebella Model Articulation Controller, CMAC) 和 PID 的复合控制策略。该控制策略能够实现对被控对象的逆动态模型, 同时保证系统能有效地抑制扰动, 具有足够的稳定性。Simulink 仿真结果证实了文章所提出的控制策略是可行的。

关键词: 高压直流; 有源直流滤波器; 复合控制

中图分类号: TM721.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)16-0046-04

0 引言

高压直流换流器在换流过程中所产生的谐波将沿着直流和交流输电线路传播。频率为 3 000 Hz 以内的各次谐波会对输电线路附近的通讯线路产生电磁干扰。通常在换流器的交直流侧分别装设滤波器, 以抑制谐波、降低谐波对通讯线路的干扰水平。采用有源滤波器抑制换流站直流侧谐波对线路沿线的通讯线路引起的干扰, 是一种既经济又有效的技术^[1]。有源滤波器的性能与谐波电流的检测、脉宽调制放大技术、滤波器与高压系统的耦合以及滤波器的控制等因素有关。20 世纪 90 年代以来, 随着脉宽调制 (Pulse Width Modulation, PWM) 技术和数字信号处理 (Digital Signal Processor, DSP) 技术的突破, 有源滤波器领域的研究工作取得了很大进展。但有源直流电力滤波器 (Active DC Filter, ADF) 的实时控制一直难以实现。一方面是由于被控对象的阶数比较高, 并且受各种不确定因素的影响, 使得模型参数难以确定; 另一方面, 常规的 PID 控制无法满足 ADF 控制实时性的要求。

文献[2]结合状态反馈线性化方法和 H_∞ 控制理论对非线性系统的控制进行了研究, 主要是将非线性系统通过非线性状态反馈和坐标变换来进行严密的线性化, 再应用 H_∞ 线性控制理论来获得非线性鲁棒控制器。智能化方法是控制理论发展的最高阶段, 而和智能方法相结合的鲁棒控制为非线性鲁棒控制开辟了一条新的途径^[3-5]。神经网络是控制

强非线性的一种有效工具, 在很多情况下取得了很好的控制效果。文献[6]将神经网络与 H_∞ 控制有机地结合, 把逼近误差看作时变的外部扰动加以消除, 设计鲁棒控制器, 并证明了闭环系统的稳定性。

目前已有很多文献[7~12]对有源滤波器的非线性控制问题进行了研究。本文提出了一种新的 ADF 控制策略——小脑模型神经网络 (Cerebella Model Articulation Controller, CMAC) 和 PID 的复合控制策略, 以实现非线性实时控制。并通过 Simulink 仿真, 证实了该控制策略的有效性。

1 ADF 的控制原理^[10]

某高压直流系统 DC 侧改进后的滤波系统等值电路图见图 1。设谐波电压源 u_{sh} (对应谐波电流 i_{sh}) 在线路上产生的谐波电流为 i_{sh} ; 有源滤波器加装在 BD12 的底部, 设 u'_s 在线路上产生的谐波电流为 i'_{sh} 。通过控制有源滤波器输出的电流, 使得 i'_{sh} 与 i_{sh} 幅值相等、相位相反, 则线路上的谐波电流 $i_{sh} = 0$ 。

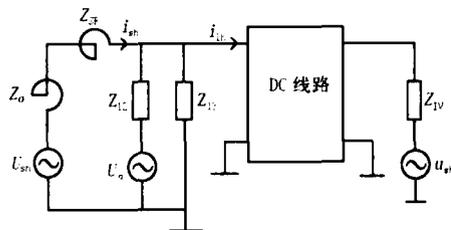


图 1 高压直流系统 DC 侧等值电路

Fig. 1 DC side equivalent circuit of HVDC system

图中: Z_{SR} 为平波电抗器电抗, Z_0 为换流器内阻抗, $Z_{12/13}$ 为双调谐滤波器阻抗, Z_{1V} 为逆变站的等效阻抗, u_{sh} 、 u'_{sh} 分别对应整流站和逆变站所产生的谐

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50337010)

波电压源。BD12和BD13分别对应着谐波阻抗为 Z_{12} 和 Z_{13} 的双调谐滤波器。

其模型的传递特性描述为:

$$I_{ls}(s) = G_{ls}(s) I_{sh}(s) \quad (1)$$

$$I_{la}(s) = G_{la}(s) U_a(s) \quad (2)$$

$$\text{其中: } G_{ls}(s) = \frac{Z_{12}Z_{13}}{Z_{12}Z_{13} + (Z_{12} + Z_{13})Z_{lc}} \quad (3)$$

$$G_{la}(s) = \frac{Z_{13}Z_s}{(Z_{13} + Z_{lc})(Z_{12} + Z_s // Z_{13} // Z_{lc})(Z_s + Z_{12} // Z_{lc})} \quad (4)$$

式中: Z_{lc} 为线路等效入端阻抗; $Z_s = Z_{SR} + Z_{\sigma}$ 。

通过检测线路电流 i_{lh} 及谐波源电流 i_{sh} (可测扰动),可以实现对ADF的复合控制,如图2所示。

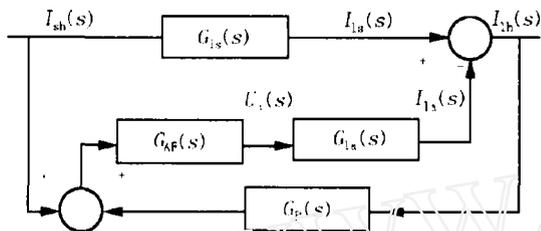


图2 ADF的复合控制系统

Fig. 2 Composite control for ADF

即有系统的闭环传递函数为:

$$I_{lh}(s) = \frac{[G_{ls}(s) - G_{AF}(s)G_{la}(s)]I_{sh}(s)}{1 + G_{AF}(s)G_{la}(s)G_p(s)} \quad (5)$$

式中: $G_{AF}(s)$ 为ADF控制器及PWM变换器的传递函数; $G_p(s)$ 为相位补偿器的传递函数。

2 基于CMAC与PID的复合控制策略

2.1 CMAC的基本原理^[13]

小脑模型神经网络(CMAC)是一种表达复杂非线性函数的表格查询型自适应神经网络,该网络可通过学习算法改变表格的内容,具有信息分类储存的能力。

CMAC已被公认为是一类联想记忆神经网络的重要组成部分,它能够学习任意多维非线性映射。CMAC可有效地用于非线性函数逼近、动态建模、控制系统设计等。CMAC较其他神经网络的优越性体现在:

① 它是基于局部学习的神经网络,它把信息存储在局部结构上,使每次修正的权很少,在保证函数非线性逼近性能的前提下,学习速度快,适合于实时控制。② 具有一定的泛化能力,即所谓相近输入产生相近输出,不同输入给出不同输出。③ 连续(模拟)输入、输出能力。④ 寻址编程方式,在利用串行

计算机仿真时,它可使回响速度加快。⑤ 作为非线性逼近器,它对学习数据出现的次序不敏感。

由于CMAC具有上述优越性能,使它能比一般神经网络具有更好的非线性逼近能力,更适用于复杂动态环境下的非线性实时控制。

2.2 CMAC与PID的复合控制算法

CMAC与PID的复合控制结构如图3所示,该系统通过CMAC和PID的复合控制实现前馈和反馈控制。其特点为:

1) 小脑模型神经网络控制器实现前馈控制,实现被控对象的逆动态模型。

2) 常规控制器实现反馈控制,保证系统的稳定性,且抑制扰动。

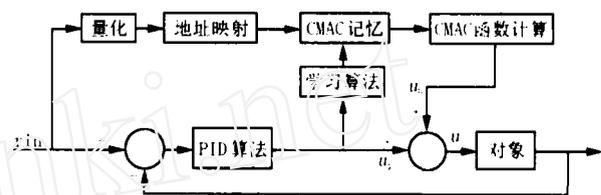


图3 CMAC与PID复合控制结构图

Fig. 3 Structure diagram of CMAC and PID composite control

CMAC采用有导师的学习算法。每一控制周期结束时,计算出相应的CMAC输出 $u_n(k)$,并与总控制输入 $u(k)$ 相比较,修正权重,进入学习过程。学习的目的是使总控制输入与CMAC的输出之差最小。经过CMAC学习,使系统的总控制输出由CMAC产生。常规控制器采用PD算法,使得CMAC的学习仅仅依赖于误差的当时测量值及变化值。

该系统的控制算法为:

$$u_n(k) = \sum_{i=1}^c w_i \alpha_i \quad (6)$$

$$u(k) = u_n(k) + u_p(k) \quad (7)$$

式中: w_i 为权重; α_i 为二进制选择向量; c 为CMAC网络的泛化参数, $u_n(k)$ 为CMAC产生的输出; $u_p(k)$ 为常规PID控制器产生的输出。

CMAC的调整指标为:

$$E(k) = \frac{1}{2} (u(k) - u_n(k))^2 \cdot \frac{\alpha_i}{c} \quad (8)$$

$$\Delta w(k) = \eta \frac{u(k) - u_n(k)}{c} \alpha_i = \eta \frac{u_p(k)}{c} \alpha_i \quad (9)$$

$$w(k) = w(k-1) + \Delta w(k) + \alpha (w(k) - w(k-1)) \quad (10)$$

式中: η 为网络学习速率, $\eta \in (0, 1)$; α 为惯性量, $\alpha \in (0, 1)$ 。

2.3 基于CMAC与PID的复合控制算法的ADF控制

本文提出了将基于CMAC与PID的复合控制策略应用于ADF控制。要实现ADF的控制,需要获得被控对象即ADF的数学模型。准确地获取ADF被控对象的数学模型是实现有源补偿的关键

环节之一,系统辨识技术是求取对象数学模型的一种十分有效的方法。本文采用了文献[14]利用系统辨识技术在线估计的被控对象的数学模型进行研究。基于CMAC与PID的复合控制算法的ADF控制框图如图4所示。

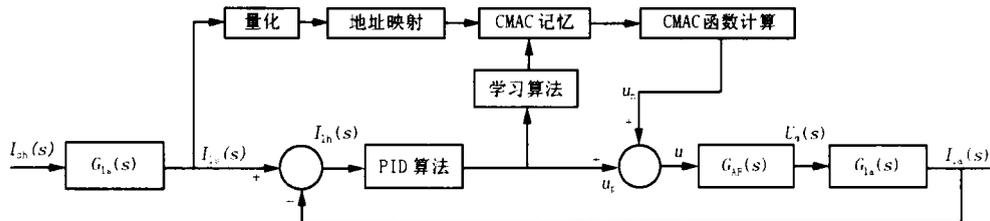


图4 基于CMAC与PID的复合控制算法的ADF控制框图

Fig. 4 ADF control diagram based on CMAC and PID composite control algorithm

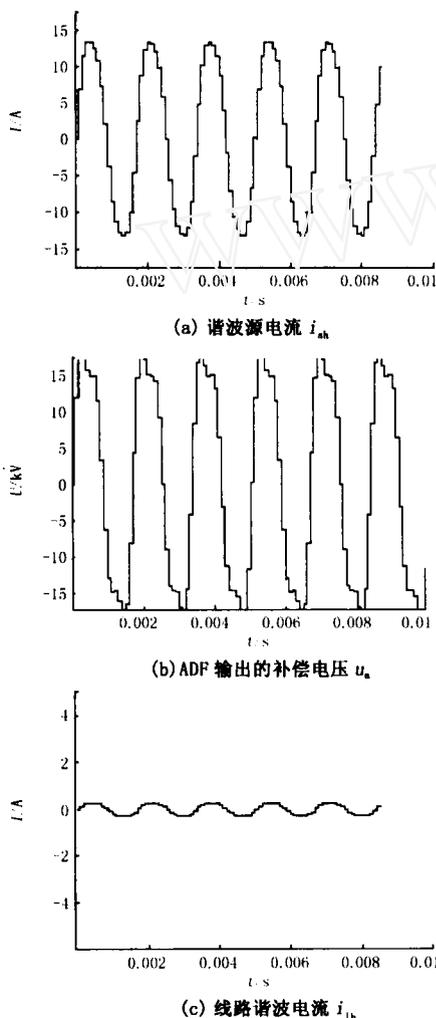


图5 仿真结果

Fig. 5 Simulation results

3 仿真结果及分析

为证实所提出的基于CMAC和PID的复合控

制策略的有效性,本文利用 Matlab/Simulink 软件建立了该控制系统的仿真模型,结合某 ± 500 kV 高压直流输电系统的实测数据,得到仿真结果如图5所示。

由仿真结果可见,采用CMAC和PID的复合控制策略对ADF进行控制,有效地抑制了扰动,增强了系统的稳定性。CMAC和PID对ADF的复合控制有效地抑制了谐波源的谐波电流,使得流入线路的谐波电流大为降低,具有较好的滤波效果。仿真结果证明了本文所提出的控制方法是可行的。

4 结论

本文提出的基于CMAC和PID的ADF的复合控制策略,通过CMAC实现前馈控制以实现被控对象的逆动态模型,通过常规控制器实现反馈以保证系统的稳定性、抑制扰动。通过仿真结果证明,该控制方法比一般神经网络具有更好的非线性逼近能力,更适于复杂动态环境下的非线性实时控制。采用本控制方法有效地提高了ADF的滤波效果。

参考文献:

- [1] Cahelhas A, Deixoto C A O, Porangaba H D. Converter Station Specification Considering State of the Art Technology[A]. IEEE/KTH SPT Conference. Stockholm (Sweden);1995. 30-37.
- [2] 孙元章,卢强,孙春晓. 电力系统鲁棒非线性控制研究[J]. 中国电机工程学报, 1996,16(6):361-365. SUN Yuan-zhang, LU Qiang, SUN Chun-xiao. On the Study of Power System Nonlinear Robust Control[J]. Proceedings of the CSEE, 1996,16(6):361-365.
- [3] Tananka K, Ikeda T, Wang H O. Robust Stabilization of Uncertain Nonlinear Systems via Fuzzy Control: Quadratic

- Stability Control Theory and Linear Matrix in Equalities [J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 1996,4(1):1-13.
- [4] GAO Shu-guang, Neville W. Analysis and Design of Fuzzy Systems Using Dynamic Fuzzy-state Space Model [J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 1999,2(7):192-200.
- [5] Lewia F L, Yesidirek A, Liu A. Neural Net Robot Controller with Guaranteed Tracking Performance [J]. IEEE Trans on Neural Network, 1995,6(3):703-715.
- [6] 朱瑞军,柴天佑,伏静丹. 基于神经网络的不确定非线性系统的鲁棒控制[J]. 控制与决策, 1999,14(1):73-76.
- ZHU Rui-jun, CHAI Tian-you, FU Jing-dan. Robust Control of a Class of Uncertain Nonlinear Systems Using Neural Networks [J]. Control and Decision, 1999,14(1):73-76.
- [7] 周林,蒋建文,周维维,等. 基于单周控制的三相四线制有源电力滤波器[J]. 中国电机工程学报, 2003,23(3):85-88.
- ZHOU Lin, JIANG Jian-wen, ZHOU Luo-wei, et al. Three-phase Four-wire Active Power Filter with One-cycle Control [J]. Proceedings of the CSEE, 2003,23(3):85-88.
- [8] 钱挺,吕征宇,胡进,等. 基于单周控制的有源滤波器双环控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2003,23(3):34-37.
- QIAN Ting, Lü Zheng-yu, HU Jin, et al. Dual-loop Scheme for Unified Constant-frequency Integration Control of Active Power Filter [J]. Proceedings of the CSEE, 2003,23(3):34-37.
- [9] 杜雄,周维维,谢品芳,等. 一种改进的单周控制直流侧有源电力滤波器及其稳态和动态研究[J]. 中国电机工程学报, 2003,23(7):12-17.
- DU Xiong, ZHOU Luo-wei, XIE Pin-fang, et al. An Improved One Cycle Controlled DC Side Active Power Filter and Research on Steady-state and Dynamics [J]. Proceedings of the CSEE, 2003,23(7):12-17.
- [10] 唐卓尧,任震. HVDC系统DC侧有源滤波器的自适应控制[J]. 中国电机工程学报, 1999,19(8):45-48.
- TANG Zhuo-yao, REN Zhen. Adaptive Control Strategy for Active DC Filter on DC-side of HVDC System [J]. Proceedings of the CSEE, 1999,19(8):45-48.
- [11] 李江,孙海顺,程时杰,等. 基于灰色系统理论的有源滤波器的预测控制[J]. 中国电机工程学报, 2002,22(2):6-10.
- LI Jiang, SUN Hai-shun, CHENG Shi-jie, et al. Prediction Control of Active Power Filter Based on Grey Theory [J]. Proceedings of the CSEE, 2002,22(2):6-10.
- [12] 任震,余得伟,唐卓尧. 基于模糊优化设计的混合滤波器——治理电气化铁道谐波的一种新方法[J]. 中国电机工程学报, 2001,21(2):66-68.
- REN Zhen, YU De-wei, TANG Zhuo-yao. A New Method for Eliminating Harmonics of Electrified Railway with Hybrid Filter Based on the Fuzzy Optimizing Design [J]. Proceedings of the CSEE, 2001,21(2):66-68.
- [13] 刘金琨. 先进PID控制及其MATLAB仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- LIU Jin-kun. Advanced PID Control and Its MATLAB Simulation [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003.
- [14] 唐卓尧,任震. HVDC系统直流侧有源滤波器对象模型的研究[J]. 电网技术, 1999,23(3):6-9.
- TANG Zhuo-yao, REN Zhen. Online Identification Mathematical Model of Active DC Filters on DC Side of HVDC System [J]. Power System Technology, 1999,23(3):6-9.

收稿日期: 2004-12-02; 修回日期: 2005-01-20

作者简介:

李战鹰(1973-),女,博士研究生,研究方向为高压直流输电系统谐波分析及滤波方案的研究; E-mail: lzhanying@163.net

任震(1938-),男,教授,博士生导师,国务院学位委员会电工学科评议组成员,IEEE高级会员,研究方向为电力系统可靠性、电力市场、高压直流输电、小波分析、无功优化等。

Study of CMAC and PID composite control of active DC filter of HVDC system

LI Zhan-ying¹, REN Zhen²

(1. South China Power Grid Co., Ltd, Guangzhou 510060, China;

2. Electric Power College, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The controller design for active DC filter affects its harmonic suppression. However, the normal controller of the ADF can hardly realize control under the complex dynamic conditions. Thus a novel control strategy, the composite control strategy with CMAC and PID, was proposed in the paper. The control strategy realizes the inverse dynamic model, mitigates the disturbance, ensures the system stability. The Simulink simulation results verified that the proposed control strategy is feasible.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50337010).

Key words: HVDC; active DC filter; composite control