

改善系统暂态稳定性的 HVDC 模糊神经控制器

许秀芳,李兴源,颜泉,刘红超,王路

(四川大学电气信息学院,四川 成都 610065)

摘要: 提出了一种 HVDC 在线模糊神经控制器以提高交直流系统的暂态稳定性。该控制器的特点是结合了模糊系统处理复杂和不确定性问题及神经网络具有自学习能力的优点,选取整流侧交流母线电压相位误差及其变化率作为模糊逻辑控制部分的输入,其输出结果作为神经网络的一个输入,采用改进 BP 算法进行在线训练神经网络,神经网络的输出用来修正整流器的触发角,并利用 NETOMAC 软件对控制器主要参数进行了离线优化。仿真结果表明该控制器能有效地抑制有功功率振荡,改善发电机的功角特性,提高系统的暂态稳定性。

关键词: 模糊逻辑; 神经网络; 高压直流; NETOMAC 软件; 参数优化

中图分类号: TM76 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)11-0016-04

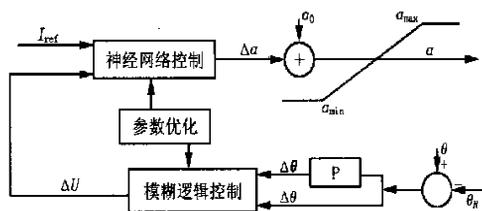
0 引言

随着电力体制改革的深入和实现全国电力资源优化配置的客观要求,大区域电网互联已成为电网发展规划中的热门话题,采用交直流输电已成为必然趋势。高压直流输电系统是高度可控的,其有效的运行依赖于这种可控性的正确应用,以保证电力系统有期望的性能^[1]。

直流系统的基本控制方式为整流侧定电流控制、逆变侧定电压控制,其控制方式主要为传统的 PID 控制,但这种控制方式自适应性较差,存在着系统建模困难问题。随着人工智能技术的发展,人们把人工智能引入到高压直流的控制中,文献[2]提出了一种模糊控制器。在模糊控制的基础上,本文引入了神经网络控制,设计了整流侧的在线模糊神经控制器。该整流器选取整流侧交流母线电压相位误差及其变化率作为模糊逻辑控制器的输入,模糊逻辑控制器的输出结果作为神经网络的输入,采用改进 BP 算法在线训练神经网络,神经网络的输出用来修正整流器的触发角,达到了在线控制的目的;并且利用 NETOMAC 软件对控制器的主要参数进行离线优化,解决了参数整定不当的问题。该控制器结合了模糊系统处理复杂、不确定性问题和神经网络具有自学习能力的优点,具有较好的性能,改善了交直流系统的暂态稳定性。

1 在线模糊神经直流控制器

在线模糊神经直流控制器分为 3 部分:模糊控制部分、神经网络控制部分和参数优化部分,其结构图如图 1 所示。



注: I_{ref} 为直流电流的整定值; α_0 为触发延迟角的初始值; N 为整流侧交流母线电压相位整定值; θ 为整流侧交流母线电压相位。

图 1 定电流控制的整流器

Fig. 1 Rectifier of constant current

1.1 模糊逻辑部分

本文参考文献[3,4]并与直流系统的实际控制^[1]结合,提出了相应的模糊控制方案。模糊逻辑控制包括 3 部分:模糊化、模糊推理和去模糊。以整流侧交流母线电压相位误差及其变化率为输入量,具体表达式为:

$$\begin{cases} (nT) = (nT) - N \\ (nT) = \frac{1}{T} [(nT) - (nT - T)] \end{cases} \quad (1)$$

式中: T 为采样周期; n 为正整数。

经过模糊化过程,将 ΔU 、 $\Delta \dot{U}$ 转化为模糊论域上的值。该控制采用了两个输入模糊化规则对输入量进行模糊化,即输入为正(P),输入为负(N)。的模糊隶属度函数如图 2 所示。

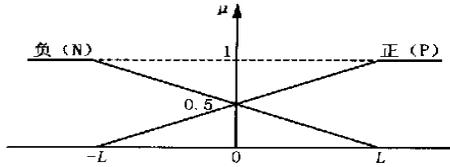


图2 隶属度函数

Fig.2 Membership function

由图2可得知 的隶属函数为:

$$\mu_P(x) = \begin{cases} 0 & x < -L \\ \frac{x+L}{2L} & -L \leq x \leq L \\ 1 & x > L \end{cases}$$

$$\mu_N(x) = \begin{cases} 1 & x < -L \\ \frac{-x+L}{2L} & -L \leq x \leq L \\ 0 & x > L \end{cases} \quad (2)$$

的隶属函数与 的相同,但 L 的取值不同。根据经验及研究结果,采用以下的模糊化规则:

如果 x 为正且 y 为正,则
 $u_1(x, y) = k_1 \mu_P(x) \cdot \mu_P(y)$

如果 x 为正且 y 为负,则
 $u_2(x, y) = 0$

如果 x 为负且 y 为正,则
 $u_3(x, y) = 0$

如果 x 为负且 y 为负,则
 $u_4(x, y) = k_2 \mu_N(x) \cdot \mu_N(y)$

去模糊的输出为:

$$U = u_1(x, y) - u_4(x, y)$$

$$U = k_3 \cdot U$$

k_3 是控制模糊控制器输出的比例因子,由此可见 U 是 x, y 的非线性函数。

1.2 在线神经网络控制部分

参考文献[5],本文设计了神经网络控制部分。在线神经网络控制器分为3层:输入层、隐含层和输出层。输入层由2个神经元组成;隐含层由3个神经元组成;输出层包含一个神经元,其结构如图3所示。

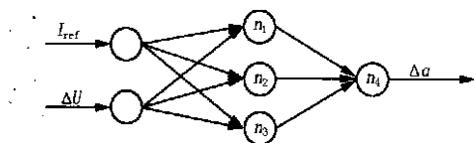


图3 神经网络控制器

Fig.3 On-line ANN controller

隐含层和输出层的激励函数采用 Sigmoid 函数,

有关参数定义如下: w_{ij} 为神经元之间的连接权值; x_j 为神经元的输入; n_i 为神经元的加权输入;定义在线学习误差性能指标为:

$$E = 0.5 (I_{ref} - I_d)^2 \quad (3)$$

在直流系统中, I_d 与触发角的关系为:

$$I_d = \frac{V_{dor} \cos \alpha - V_{dbi} \cos \beta}{R_{cr} + R_L - R_{ci}} \quad (4)$$

式中: V_{dor} 为整流器的理想空载直流电压; V_{dbi} 为逆变器的理想空载直流电压; α 为整流器的触发延迟角, $\beta = \alpha + \gamma$; γ 为逆变器的触发超前角; R_L 为直流线路的等值阻抗; R_{cr} 为整流器的等值阻抗; R_{ci} 为逆变器的等值阻抗。

根据BP梯度下降法的学习规则并结合直流系统的实际情况,经过推理可得权调节量的表达式

$$\Delta w_{ij} = - (I_{ref} - I_d) f'(n_i) x_j \quad (5)$$

采用加入动量项的BP改进算法,权调节量具体可表示为:

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \Delta w_{ij}(t)$$

$$\Delta w_{ij}(t) = - (I_{ref} - I_d) f'(n_i) x_j$$

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \Delta w_{ij}(t+1) \quad (6)$$

具体算法步骤为:

- 1) 赋予 w_{ij} 、 b_i 、 b_j 初值,输入 U 、 I_{ref} ;
- 2) 计算隐含层、输出层的输出值和误差函数 E ;
- 3) 按照式(6)修正各权值;
- 4) 判断是否满足条件,若满足 $E < \epsilon$,转至5),否则转至2);
- 5) 计算结束,将输出结果 Δa 输入到直流系统中。

2 参数优化

HVDC系统的控制参数较多,若设置不当,可能会影响HVDC系统的动态性能,甚至可能导致系统的不稳定,多篇文献就参数优化提出了解决方法。本文利用NETOMAC解决了参数整定不当问题。NETOMAC是德国西门子公司开发的大型电力系统仿真软件,内置有参数优化功能。该软件的优化功能具有以下特点:目标函数的定义十分方便,所有的相关约束可用模块化语言给出;优化功能的执行无需对仿真源文件进行改动。由于采用了自适应的变步长法,具有较高的效率和鲁棒性。

在本文中,待优化的参数有3个: k_1 、 k_2 、 k_3 。优化的目标定为整流侧直流电流、逆变器侧熄弧角与其相应整定值偏差之和最小,可用如下目标函数表示:

$$\min \int_0^t (I_{ref} - I_d)^2 dt + \int_0^t (I_{ref} - I_d)^2 dt \quad (7)$$

按照 NETOMAC 优化工具的要求,需在优化参数定义段给出待优化的参数的初始值及其取值范围。3 个待优化的参数的取值及最终优化结果如表 1 所示。

表 1 控制器参数优化结果

Tab. 1 Optimization results of controller parameters

参数	最小值	最大值	初值	优化值
k_1	0.1	10	0.9	1.127
k_2	0.1	10	0.9	0.968
k_3	1.4	10	0.9	2.624

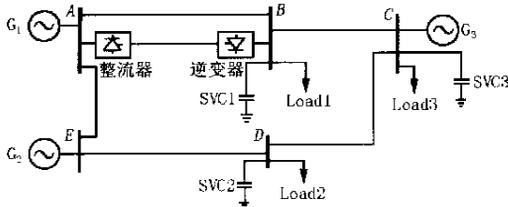


图 4 交直流系统结构

Fig. 4 Configuration of AC/DC system

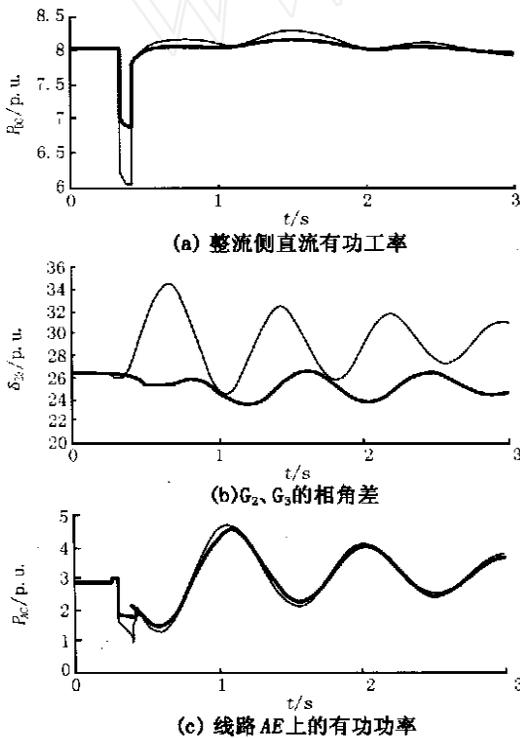


图 5 线路 AE 故障仿真结果

Fig. 5 Simulation results for AE line fault

3 仿真结果

为了验证该控制器的性能,本文采用 NETOMAC

软件对图 4 所示的 3 机 7 节点交直流输电系统进行仿真。图 4 所示交直流混合系统主要参数为:发电机额定容量 G_1 为 6 000 MVA、 G_2 为 1 200 MVA、 G_3 为 1 200 MVA,整流端直流输送功率为 800 MW。

整流侧为定电流控制,逆变侧为定电压控制。本文对 PID 控制器及在线模糊神经控制器进行了仿真比较。图 5 为交流母线 AE 的中点处发生 0.1 s 瞬时三相接地短路故障的仿真结果,图 6 为逆变侧交流母线 B 发生 0.1 s 瞬时三相接地短路故障的仿真结果。

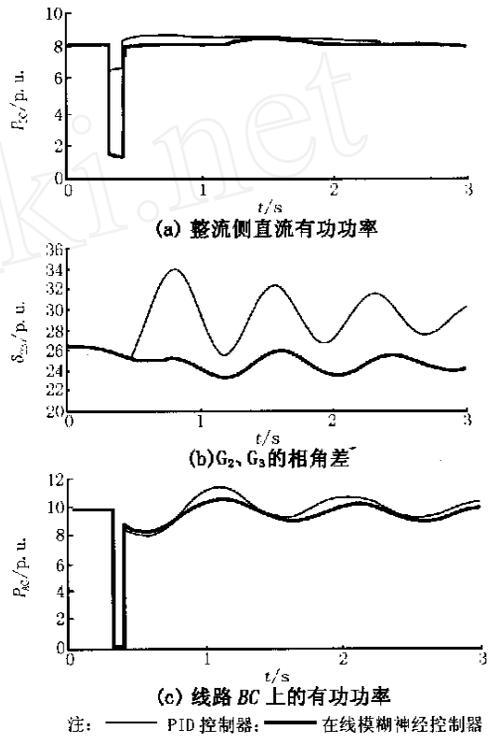


图 6 母线 B 故障仿真结果

Fig. 6 Simulation results for bus B fault

由图 5(a) 可看出,当线路 AE 发生故障时,直流线路能够传输更多的有功功率,弥补了系统功率缺额;图 6(a) 可看出,当母线 B 发生故障时,直流线路能够快速减少传输功率,限制了直流线路电流的增大。由图 5(b)、(c) 及图 6(b)、(c) 可看出,当系统发生故障时,故障线路的恢复时间缩短,振荡幅度减小,发电机 G_2 、 G_3 的功角振荡控制器对于改善交直流系统有功功率振荡,加快故障线路的恢复,抑制发电机的功角振荡都起到了较好的控制效果。

4 结论

本文提出了在线模糊神经控制器。该控制器结构简单,概念清晰,具有较好的动态性能和自适应

性,改善了交直流系统的暂态稳定性,更好地发挥了直流输电的优越性。在控制器设计过程中,参数优化目标函数、模糊规则的确定非常重要,如何进行参数在线优化也是今后研究的方向。

参考文献:

- [1] 李兴源 (LI Xing-yuan). 高压直流输电系统的运行和控制 (Operation and Control of HVDC Transmission System) [M]. 北京: 科学出版社 (Beijing: Science Press), 1998.
- [2] 房大中 (FANG Da-zhong). 提高交直流电力系统稳定性的 HVDC 模糊逻辑控制器的研究 (A Fuzzy Logic Controller for the HVDC System to Enhance Stability of AC/DC System) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2002, 26(6): 23-27.
- [3] Mishra S, Dash P K, Hota P K, et al. Genetically Optimized Neuro-Fuzzy IPFC for Damping Modal Oscillations of Power

System[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(4): 1140-1147.

- [4] 诸静 (ZHU Jing). 模糊控制原理与应用 (Theory and Application of Fuzzy Control) [M]. 北京: 机械工业出版社 (Beijing: China Machine Press), 1995.
- [5] 袁曾任 (YUAN Ceng-ren). 人工神经网络及其应用 (Artificial Neural Network and Application) [M]. 北京: 清华大学出版社 (Beijing: Tsinghua University Press), 1999.

收稿日期: 2003-10-23; 修回日期: 2003-11-05

作者简介:

许秀芳 (1976 -), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统稳定与控制、高压直流输电;

李兴源 (1945 -), 男, 教授, 博士生导师, 中国电机工程学会理事, IEEE 高级会员, 从事电力系统稳定与控制、高压直流输电的研究。

HVDC fuzzy neural controller for improving the transient stability of system

XU Xiufang, LI Xingyuan, YAN Quan, LIU Hongchao, WANG Lu
(School of Electrical Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: This paper puts forward an on-line controller for the HVDC transmission system to improve the transient stability of the AC/DC system. Based on the combination of fuzzy and ANN, this controller selects the voltage value of the AC bus at rectifier and its rate ratio as input signals of fuzzy control, the output of fuzzy part as one of the input signals of neural network, employs improved BP algorithm to perform neural network on-line training and NETOMAC software to perform off-line optimization. Simulation results show this proposed controller can damp the active power oscillation and enhance the transient stability of system.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50377017).

Key words: fuzzy logic; ANN; HVDC; NETOMAC software; parameter optimization

(上接第 15 页 continued from page 15)

收稿日期: 2003-12-20; 修回日期: 2004-01-02

作者简介:

程云国 (1972 -), 男, 硕士, 研究方向为灵活电力系统;

刘会金 (1952 -), 男, 教授, 博导, 主要从事电能质量和传感器方面的研究。

Discussion on electrical field interference to optical voltage transformer with different structures

CHENG Yun-guo, LIU Hui-jin
(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Applied electrical field interference to optical voltage transformer has something to do with its own structure of OVT. Applied electrical field has different effects on OVT when the directions of light beam and voltage are different. This paper details these effects upon the two basic structures of OVT—transverse and longitudinal modulation. Considering their characteristic and signal process of real high voltage measurement, it proposes an improved structure of OVT.

Key words: optical voltage transformer; transverse and longitudinal modulation; electrical field