

# 基于 GD-FNN 的特高压直流输电暂态稳定控制

胡 弢

(盐城供电公司, 江苏 盐城 224005)

**摘 要:** 本文提出在特高压直流输电 (UHVDC) 中采用广义动态模糊神经网络 (GD-FNN) 控制来提高系统暂态稳定性, 通过附加控制信号动态调节输送功率从而给系统提供足够阻尼。首先根据系统选择合适的调制信号以及控制维数, 然后对 GD-FNN 系统进行训练, 通过系统误差和模糊规则的  $\varepsilon$ -完备性作为判据来优化系统结构, 同时对隶属度函数的参数进行修正, 从而保证了控制器具有紧凑的结构和良好的泛化能力。在 PSCAD/EMTDC 中搭建了 2012 年夏季高峰典型运行方式的江苏电网主要架构以及锦苏直流的电磁暂态模型, 通过 Matlab 实现 GD-FNN 的算法并通过联合仿真运行, 验证了 GD-FNN 在保持系统稳定方面具有优越的性能, 并且鲁棒性较好, 可有效保障机组和电网的安全稳定运行。

**关键词:** 特高压直流输电(UHVDC); 广义动态模糊神经网络 (GD-FNN); 暂态稳定; PSCAD/EMTDC

未来十年内华中-华东电网将出现多回特高压直流输电系统<sup>[1]</sup>。以锦屏-苏南工程为例, 该工程预计在 2012 年建成投运, 届时将有 7200MW 电量从四川水电基地送至江苏电网, 巨大功率输入对受端电网的运行方式和稳定性必将带来重大影响<sup>[2]</sup>。

利用 UHVDC 传输功率大, 响应速度极快的优势可以改善交流系统的暂态稳定性, 为此, 学者进行大量的相关研究<sup>[3-7]</sup>。文献[4]通过利用 UHVDC 的暂态过负荷能力减少故障期间系统的功率缺额, 取得一定的控制效果, 但当系统本身阻尼较小时, 该方法并不能实时快速增大系统阻尼从而使系统快速恢复正常运行; 文献[5]通过利用模糊神经控制器代替传统 PI 调节器, 取得较好的控制效果, 但文中模糊系统和神经网络系统相对独立, 两者内部参数的确定依赖操作人员的知识经验, 带有一定的主观性。

广义动态模糊神经网络 (GD-FNN) 是一种新型智能控制方法, 它结构紧凑, 泛化能力好, 并且参数估计和结构辨识同时进行, 可操作性高, 目前在电力系统应用较少, 在 UHVDC 暂稳控制方面更是空白。本文提出在特高压直流输电 (UHVDC) 中应用 GD-FNN 来对系统暂态稳定进行控制。在 Matlab 中实现了 GD-FNN 算法, 在 PSCAD/EMTDC 搭建了 2012 年江苏电网夏季高峰典型运行方式的电磁暂态模型, 通过联合仿真对算法效果进行验证。在系统不同运行情况下与未进行暂态控制以及采用

传统极点配置法的控制效果进行对比, 证明了 GD-FNN 控制器对系统具有良好的适应性和鲁棒性, 取得较好的暂态稳定控制效果。

## 1 特高压直流输电 (UHVDC) 原理

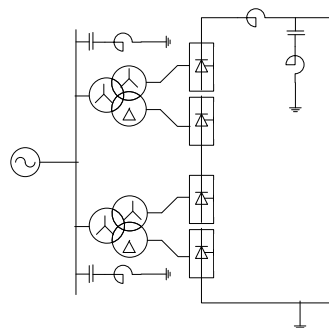


图 1 每极两组 12 脉动换流器串联接线

特高压直流输电工程常采用如图 1 的每极两组 12 脉动换流器串联接线方式。每组 12 脉动换流器额定直流电压值设为为直流每极电压一半。我国已有的 UHVDC 工程, 如向家坝-上海及锦屏-苏南两回  $\pm 800\text{kV}$  特高压直流输电工程均采用  $(400+400)\text{kV}$  的每极两组 12 脉动换流器串联接线方式<sup>[3]</sup>。

## 2 广义动态模糊神经网络 (GD-FNN)

### 2.1 GD-FNN 的结构<sup>[11]</sup>

广义动态模糊神经网络基本结构如图 2 所示。

其中网络有  $r$  个输入, 每个输入

$x_i (i=1, 2, \dots, r)$  有  $u$  个隶属函数:

$$MF_{ij}(x_i) = \exp\left[-\frac{(x_i - c_{ij})^2}{\sigma_{ij}^2}\right] \quad (1)$$

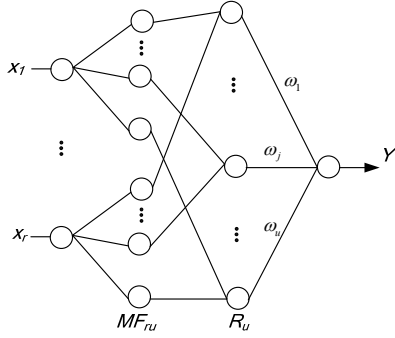


图 2 GD-FNN 的结构

其中  $\sigma_{ij}$  和  $c_{ij}$  表示  $x_i$  的第  $j$  个隶属度函数的宽度和中心。网络的第三层第  $j$  个规则的输出为:

$$\phi_j(x_1, x_2, \dots, x_r) = \exp\left[-\sum_{i=1}^r \frac{(x_i - c_{ij})^2}{\sigma_{ij}^2}\right] \quad (2)$$

将第三层地规则运算结果运算加权求得:

$$y(x_1, x_2, \dots, x_r) = \sum_{j=1}^u \omega_j \cdot \phi_j \quad (3)$$

其中  $\omega_j = \alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \dots + \alpha_r x_r$ 。

## 2.2 GD-FNN的学习算法

如果系统误差  $\|e_k\| > k_e$ ，则一条新的规则增加至 GD-FNN 系统。其中:

$$k_e = \begin{cases} e_{\max} & 1 < k < n/3 \\ \max[e_{\max} \times \beta^k, e_{\min}] & n/3 \leq k \leq 2n/3 \\ e_{\min} & 2n/3 < k \leq n \end{cases} \quad (4)$$

其中:  $e_{\min}$  是误差限:  $e_{\max}$  是最大误差:  $k$  是系统学习的次数:  $\beta \in (0, 1)$  称为收敛常数。可以推导出:

$$\beta = \left(\frac{e_{\min}}{e_{\max}}\right)^{3/n} \quad (5)$$

当一个训练样本  $(X_k, t_k)$  进入系统, 定义

马氏距离  $md_k(j)$ , 它是  $X_k$  和现有的 RBF 单元中

心  $C_j (j=1, 2, \dots, u)$  之间的马氏距离。

$$J = \arg \min_{1 \leq i \leq u} (md_k(j)) \quad (6)$$

如果  $md_{k, \min} = md_k(J) > k_d$ , 则现有的系统不满足  $\varepsilon$ -完备性而应该产生一条新的规则, 其中:

$$k_d = \begin{cases} d_{\max} = \sqrt{\ln(1/\varepsilon_{\min})} & 1 < k < n/3 \\ \max[d_{\max} \times \gamma^k, d_{\min}] & n/3 \leq k \leq 2n/3 \\ d_{\min} = \sqrt{\ln(1/\varepsilon_{\max})} & 2n/3 < k \leq n \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{其中 } \gamma = \left(\frac{d_{\min}}{d_{\max}}\right)^{3/n} = \left[\frac{\ln(1/\varepsilon_{\max})}{\ln(1/\varepsilon_{\min})}\right]^{3/n} \quad (8)$$

若系统已经有  $u$  条模糊规则, 当得到一个新的训练样本  $(x_k, t_k)$  时, 要将多维的输入映射到一

维隶属度函数空间, 同时还要求得数据  $x_i^k$  和边界集

$\phi_i$  之间的欧氏距离  $ed_i(j)$ , 并找到它的最小值

$ed_i(j_n)$ , 如果  $ed_i(j_n) \leq k_{mf}$ , 则无需修改新的高

斯函数的相关参数, 否则有必要添加新的高斯函数,

其宽度由式(9)决定, 其中心设置为  $c_{i(u+1)} = x_i^k$ ;

$$\sigma_i = \max\{|c_i - c_{i-1}|, |c_i - c_{i+1}|\} / \sqrt{\ln(1/\varepsilon)} \quad (9)$$

其中  $c_{i-1}$  和  $c_{i+1}$  是邻近的两个隶属函数的中心。

对于  $\|e_k\| > k_e$  和  $md_{k, \min} \leq k_d$  成立, 则对输入

变量  $x_i$  最近的隶属函数的宽度  $\sigma_{ij}$  可以修正如下:

$$\sigma_{ij}^{new} = \xi \times \sigma_{ij}^{old} \quad (10)$$

其中

$$\xi = \begin{cases} 1/[1 + k_w(B_{ij} - 1/r)] & B_{ij} < 1/r \\ 1 & B_{ij} \geq 1/r \end{cases} \quad (11)$$

式中

$$B_{ij} = \rho_{ij} / \sum_{k=2}^{r+1} \rho_j(k) \quad (12)$$

GD-FNN 算法流程图见图 3。

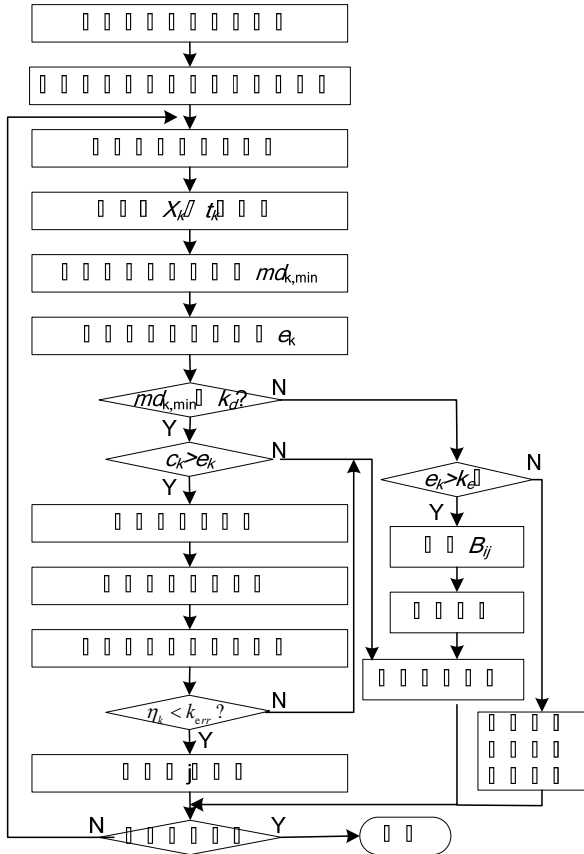


图 3 GD-FNN 算法流程图

### 2.3 GD-FNN在UHVDC暂稳控制中的实现

要在 UHVDC 中实现 GD-FNN 智能算法, 目前有三种主要途径: 一是通过 GD-FNN 算法动态调节直流控制器内部参数 (如 PI 环节的控制参数); 二是用 GD-FNN 控制环节代替原有的直流控制环节; 三是考虑在现有控制环节的基础上加上附加控制。由于直流基本控制策略发展较为成熟, 运行经验丰富, 故采用第三种方法, 既保证了运行可靠性, 又拓宽了直流系统的可控性, 并且易于实现。

GD-FNN 附加控制的实现需要选取合适的调制信号, 调制信号的选取并无通用标准, 它与交流网络的结构和运行状态有很大关系, 本文选择双侧频差信号作为调制信号, 因为其可以即时反映整个网络的频率状况, 且便于测量。接下来要选择合适的信号维数, 本文选择二维信号作为输入, 即调制信

号  $E$  本身及其变化率  $EC$ , 这样便可以较为深刻地展示出系统在控制过程中动态特性, 且结构并不复杂, 实际确定系统相关参数并不困难, 所以相对紧凑, 便于实现。对于交直流互联系统, 交流系统频率和直流线路输送功率的相互影响比较明显, 所以 GD-FNN 模块的输出量应附加在直流输电系统定电流控制或定功率控制的指令值上, 从而对输送功率进行实时控制, 对交流系统进行动态迅速的支援。

实际运行中通过内置 GD-FNN 算法的微机控制将二维控制信号进行处理后叠加至功率或电流指令信号中即可实现 GD-FNN 的附加控制, 控制原理框图如图 4 所示。

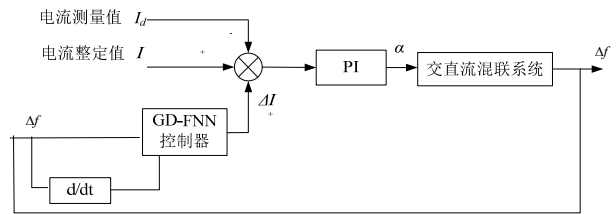


图 4 GD-FNN 控制原理框图

### 3 仿真及结果分析

为实现 GD-FNN 算法在 UHVDC 中的应用, 在 PSCAD/EMTDC 中搭建了 2012 年江苏电网夏季高峰典型运行方式的电磁暂态模型。该模型中包括了江苏网的 500kV 架构以及锦苏直流线路, 能够较为精确地模拟实际系统的电磁暂态响应。江苏网的 500kV 架构 (部分) 以及锦苏直流线路接入如图 5 所示, 锦屏-苏南特高压直流运行参数如表 1 所示。

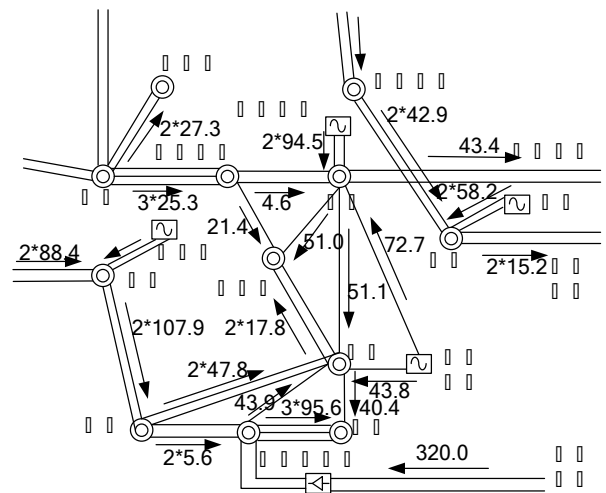


图 5 2012 年江苏电网夏季高峰典型运行方式 (部分)

表1 锦屏-苏南特高压直流主要运行参数

裕隆换流站		同里换流站	
参数	值	参数	值
$U_{acR}$	535kV	$U_{acI}$	505kV
$u_{kR}\%$	19%	$u_{kI}\%$	19%
$T_R$	535/171.3	$T_I$	505/160.7
$S_{TR}$	1090.2MVA	$S_{TI}$	1022.4MVA
$U_{dR}$	787kV	$U_{dI}$	735.8kV
$\alpha$	17.5°	$\gamma$	18°
$\mu_R$	24.1°	$\mu_I$	24.0°
$R_{dc}$	11.2Ω	$R_{dc}$	11.2Ω
$I_d$	4.574kA	$I_d$	4.574kA
$P_R$	7237MW	$P_I$	6696MW
$Q_R$	3370Mvar	$Q_I$	4320Mvar

注:  $U_{ac}$  为交流侧额定运行电压,  $u_k\%$  为换流变压器短路阻抗,  $T$  为换流变压器变比,  $S_T$  换流变压器三相容量。

采用 matlab 编制 GD-FNN 的运算程序, 算法参数设置为:  $e_{\max}=0.5$ ,  $e_{\min}=0.03$ ,  $\varepsilon_{\min}=0.5$ ,  $\varepsilon_{\max}=0.8$ ,  $k_{mf}=0.8$ ,  $k_{err}=0.01$ 。

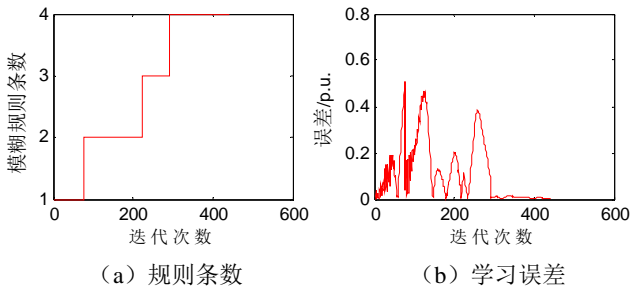


图6 训练过程

算法参数设置好以后, 需要对广义动态模糊神经网络进行训练, 训练数据为极点配置环节的输入输出响应, 训练过程如图6所示, 随着迭代的不断进行, 误差不断缩小至误差限内, 模糊规则最终收敛于4条, 而若采用一般的模糊控制或模糊神经网络控制, 则一般至少需  $3 \times 3 = 9$  条规则, 所以 GD-FNN 使控制器结构更加紧凑, 不会产生过拟合和过训练现象, 确保系统的泛化能力。

GD-FNN 算法虽以极点配置法为学习样本, 但两者有本质区别, GD-FNN 算法是通过归纳总结获得一般的控制规律, 而不是基于某一运行点的闭环控制, 例如从 GD-FNN 输入输出特性 (如图7所示) 可以看出, 当频差量  $E$  和变化率  $EC$  都为正时, 即故障系统频率正在上升, 此时 GD-FNN 为较大的负值输出量, 即减小指令电流和功率输送, 从而使故障区域频率上升减缓并回落。就这样,

GD-FNN 附加控制在故障恢复期间对直流功率进行调整, 利用 UHVDC 的快速调节与短期过载能力, 起到了抑制系统振荡, 提高暂态稳定性的作用。

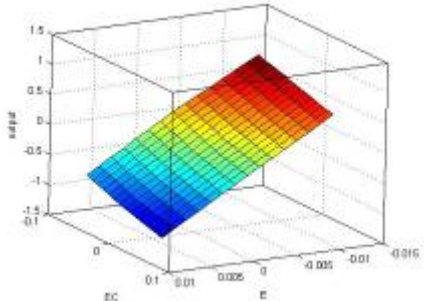


图7 训练好的 GD-FNN 环节输入输出特性

当 GD-FNN 训练好后, 利用 PSCAD/EMTDC 的 Matlab 接口进行联合仿真。在上党站设置金属性三相短路, 0.1s 后故障消失。选择不同的运行情况进行电磁暂态仿真, 观察离短路点较近的镇江III厂发电机功角变化以及直流功率变化, 并与未进行暂态控制以及采用传统极点配置法的系统进行对比。

3.1 正常运行情况

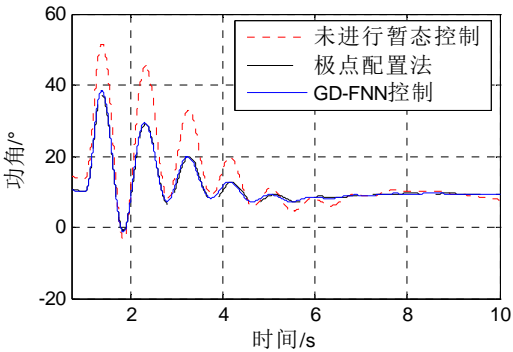


图8 正常运行情况镇江III厂发电机功角变化情况

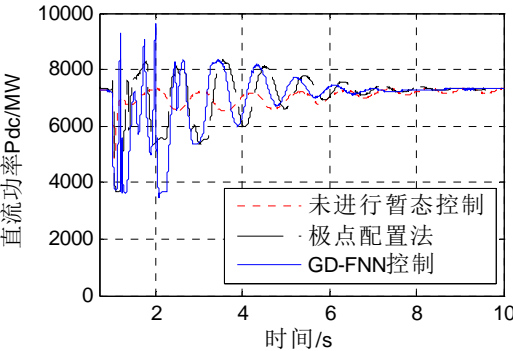


图9 直流输电功率变化

正常运行情况下, 见图8, 极点配置法和 GD-FNN 控制的暂态稳定控制效果相当, 都能对系统的振荡进行快速的抑制, 保证系统安全稳定运行。

由于附加控制量叠加在直流定电流控制的电流设定值上,所以故障时直流输电线路上的功率根据系统阻尼的需要进行了快速调节。与未加附加控制相比,加附加控制后直流线路传输的功率在故障发生后变化更为剧烈(如图 9 所示),这就相当于是“分担”了故障对交流系统的冲击。

### 3.2 控制器结构发生改变

实际运行中 UHVDC 控制器可能会发生变化,如测量信号和输出信号的延迟都有可能使控制器性能发生恶化。在 HVDC 整流侧定电流控制器加入时滞环节来模拟该种情况,滞后时间取 50ms。

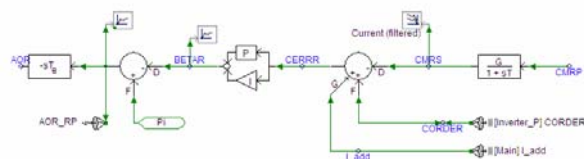


图 10 加入时滞环节的整流侧定电流控制器

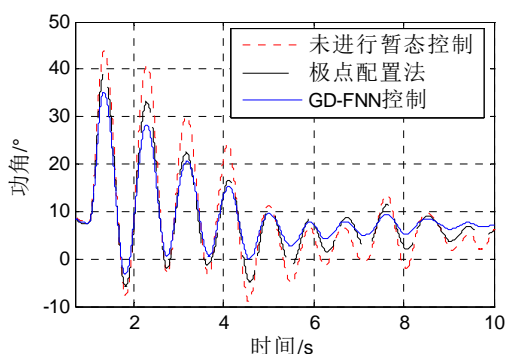


图 11 加入时滞环节后镇江Ⅲ厂发电机功角变化情况

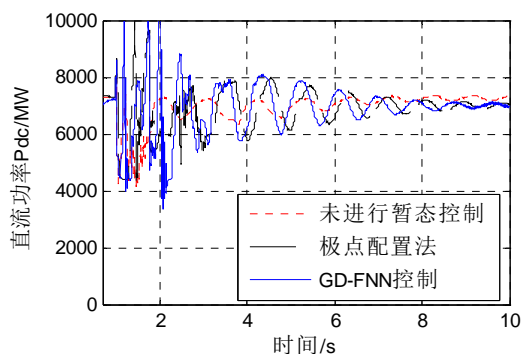


图 12 直流输送功率变化

由图 10、11、12 可知:加入时滞环节后,极点配置法和 GD-FNN 的暂态稳定控制效果都有所降低,但 GD-FNN 的控制效果明显优于极点配置法,说明 GD-FNN 控制相对于传统方法具有较好的鲁

棒性,在系统具有延迟的情况下也具有一定的控制效果。

### 3.3 系统运行点发生改变

实际运行中系统的运行点不断发生变化,所以控制方法对系统的适应能力显得至关重要。将镇江Ⅲ发电机出力减少 30%来模拟该种情况。

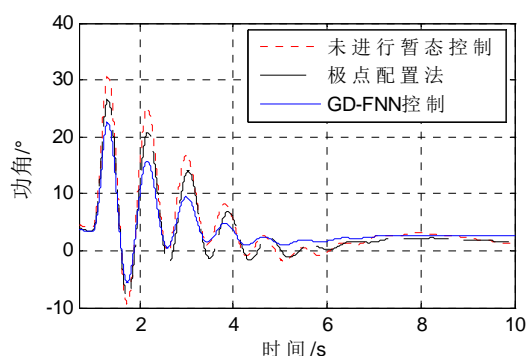


图 13 改变出力后镇江Ⅲ厂发电机功角变化情况

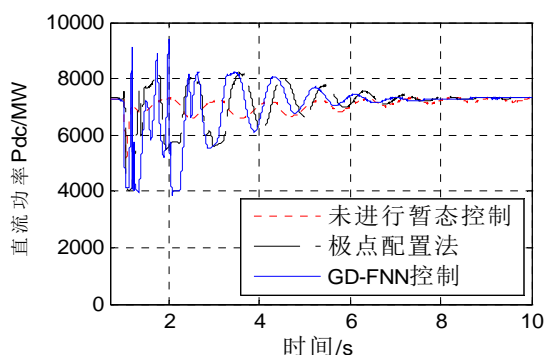


图 14 直流输送功率变化

由图 13、14 可以看出:改变镇江Ⅲ发电机出力后,系统的运行状况发生改变,由于电力系统的非线性,故极点配置法配置的极点会发生偏差,从而会导致稳定控制效果有所降低,而 GD-FNN 控制本质上是一个参数合理准确,结构紧凑合理的模糊推理系统,所以对系统模型结构和参数要求不高,但其与一般的模糊控制系统相比,其尺度变换、隶属度函数和输出值函数更为精确严格,所以在系统模型结构和参数不确定的情况也具有较好的控制效果。

## 4 结论

(1) 在正常运行情况下,广义动态模糊神经网络控制与传统的极点配置方法效果接近,并未显现出明显的优势。

(2) 当控制器内部发生改变或系统运行状况发

生改变时,极点配置的控制效果降低,不能对系统有效地进行稳定控制;而 GD-FNN 方法由于具有对系统良好的适应性和强鲁棒性,仍然可以起到较为理想的控制效果。

(3) 相比于模糊控制, GD-FNN 能够进行参数估计和结构辨识,具有良好的可操作性;相比于神经网络控制, GD-FNN 结构清晰,逻辑意义明确,并且可以加入新的规则,扩充性好;相比于自适应模糊神经网络控制(ANFIS), GD-FNN 可以优化至较紧凑的结构,保证泛化能力,在电力系统自动化控制领域具有非常广阔的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 周浩,钟一俊. 特高压交、直流输电的适用场合及其技术比较[J]. 电力自动化设备,2007,27(5):6-12.  
ZHOU Hao, ZHONG Yi-jun. Applicable occasions of UHVAC/UHVDC transmission and their technology comparisons in China [J]. Electric Power Automation Equipment, 2007,27(5):6-12.
- [2] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [3] 许爱东,柳勇军,吴小辰.  $\pm 800\text{kV}$  云广特高压直流安全稳定控制策略研究[J]. 南方电网技术,2008,2(5):14-18.  
XU Aidong, LIU Yongjun, WU Xiaochen. Study on security and stability control strategy for  $\pm 800\text{kV}$  Yun-Guang UHVDC Transmission[J]. Southern Power System Technology, 2008,2(5):14-18.
- [4] 陈汉雄,胡劲松. 金沙江一期送端特高压直流输电系统的协调控制[J]. 电网技术,2008,32(8),10-14.  
CHEN Han-xiong, HU Jin-song. Coordinated control of UHVDC transmission system at sending end of first phase Jinsha River project[J]. Power System Technology, 2008,32(8),10-14.
- [5] 庄侃沁,李兴源. 高压直流输电系统在线模糊神经控制器的研究[J]. 电力系统自动化,2001,25(24).  
Zhuang Kanqin, Li Xingyuan. Study of an on-line HVDC controller based on fuzzy logic and ANN[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001,25(24).
- [6] 谢惠藩,张尧,等. 特高压紧急直流功率支援策略研究[J]. 电力自动化设备,2008,28(8):1-7.  
XIE Huifanl, ZHANG Ya, et al. Study of UHV emergency DC power support strategy [J]. Electric Power Automation Equipment, 2008,28(8):1-7.
- [7] 谢惠藩,张尧,等. 基于正交小波神经网络的广域紧急直流功率支援在线预测[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(11):82-86.  
XIE Huifanl, ZHANG Ya, et al. Wide-area EDCPS online prediction based on orthogonal wavelet neural network. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(11):82-86.
- [8] H.Rahman, B.H.Khan. Stability improvement of power system by simultaneous AC-DC power transmission[J]. Electric Power Systems Research, 2008,78(4): 756-764.
- [9] Martin Atena, Herbert Werner. Subsynchronous damping controller design for high voltage DC links using linear matrix inequalities[J]. Control Engineering Practice, 2004,12:735-744.
- [10] 张建民,王涛,王忠礼. 智能控制原理及应用[M]. 北京:冶金工业出版社, 2003.
- [11] 伍世虔, 徐军. 动态模糊神经网络——设计与应用[M]. 清华大学出版社, 2008.

#### 作者简介:

胡 弢(1986-), 男, 江苏建湖人, 盐城供电公司电力调控中心调度员, E-mail: hutaoyc@js.sgcc.com.cn。