

# 阻尼振荡的 GNF 统一潮流控制器设计

孙荣富, 陈铁, 杨振东

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 在现代电力系统中, 统一潮流控制器(UPFC)是调节电压和潮流的有效手段。该文提出一种用遗传算法优化参数的基于径向函数单一神经元的神经网络(RBFNN)和 TS 模糊控制策略综合而成的统一潮流控制器设计方案, TS 模糊控制策略应用非线性规则设计了更为有效的控制器, 使用 RBFNN 避免了产生控制器的训练样本, 同时利用 GA 全局优化 TS 模糊控制的参数, 从而提高系统的暂态稳定性。经验证, 该方案比传统的 PI 控制策略具有更好的系统振荡阻尼性能。

**关键词:** GNF 统一潮流控制; ITAE 指数; TS 模糊控制策略; 遗传算法

**中图分类号:** TM712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)24-0050-04

## 0 引言

电力系统的发展迫切需要先进的输电技术来提高电网的输送能力和维持电网的稳定性。基于大功率电力电子技术、微机技术、控制技术的灵活交流输电技术能增强系统正常工作方式和紧急工作方式下的运行手段, 其中尤以 UPFC 功能最强, 最具应用前景<sup>[1]</sup>, 可进行电压调整、串联补偿、相角调整及多功能潮流控制等。

本文提出一种基于 RBFNN 神经网络和 TS 模糊理论的控制策略, 并用 GA 算法分别优化其参数, 实现了提高系统稳定运行性能的自适应控制。

## 1 概论

为了控制 UPFC 注入电压的幅值和相角, 使用 PI 控制器来控制其与线路电流同向的分量和垂直分量<sup>[2]</sup>, 系统稳态运行时的有功无功潮流作为参考量。但是 PI 控制器不能有效阻尼系统大范围的机电振荡。模糊控制被应用到 UPFC 等效串联、并联电压源换流器控制策略中<sup>[3]</sup>, TS 方法由于能够应用非线性规则, 具有与 Mamdani 方法不同的输出定义和去除模糊化方式, 用来设计更为有效的多机系统中的 UPFC 控制器<sup>[4]</sup>。此外, 为了避免利用人工神经网络的训练样本的困难, 文献<sup>[5]</sup>设计了基于径向函数单一神经元的神经网络(RBFNN) UPFC 控制器, 但使用扩展卡尔曼滤波(EKF)优化其参数需要经过复杂的数学运算。本文综合了 TS 模糊控制和 RBFNN 的优点: TS 模糊控制策略用来实时更新 RBFNN 的参数, 避免使用 EKF 来强化学习过程, 这使计算量大为减

少。同时利用遗传算法(GA)的全局优化能力优化 TS 模糊控制的系数以及辅助阻尼信号的参数<sup>[5,6]</sup>。这就是 GNF 统一潮流控制器的基本思路。

## 2 含 UPFC 的系统模型

UPFC 是 FACTS 系列功能最全面的器件, 能通过控制注入串联电压独立地控制有功和无功潮流; 并联侧换流器通过直流连接线向串联侧换流器提供所需的有功。两侧换流器能相互独立地向系统注入或从系统中吸收无功。



图1 UPFC 等效电路

Fig. 1 UPFC equivalent circuit

对于并联侧, 设  $I_s$  是与母线电压  $V_s$  同相的分量, 则并联侧换流器的有功:

$$P_{conv1} = I_s \cdot V_s = I_s \cdot V_s \quad (1)$$

考虑串联侧换流器, 其等效电路图化简为诺顿等效电路如图 2 所示。

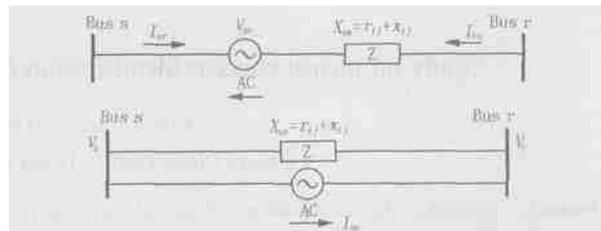


图2 串联侧换流器等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of series converter

可知:

$$I_{se} = -j \cdot V_{se} / X_{se} \quad (2)$$

(式(2)、(7)中的j表示复数形式,与节点*i*、*j*区分。)

从而对应于串联换流器的等效注入功率:

$$S_s = V_s \cdot (-I_{se})^* \quad (3)$$

$$S_r = V_r \cdot I_{se}^* \quad (4)$$

式(2)代入式(3)、(4),并设  $V_{se} = V_s e^{j\theta}$ ,  $I_{sr} = I_s e^{-j\theta}$

$$S_s = - ( |V_s|^2 \sin(\theta) + j |V_s|^2 \cos(\theta) ) / X_{se} \quad (5)$$

$$S_r = ( |V_s| |V_r| \sin(\theta_r + \theta) + j |V_s| |V_r| \cos(\theta_r + \theta) ) / X_{se} \quad (6)$$

而由串联换流器电压源提供的功率:

$$S_{conv2} = V_{se} \cdot I_{sr} = -j V_s e^{j\theta} (V_s + V_{se} - V_r) / X_{se} \quad (7)$$

根据式(1)、(5)、(6)、(7),可分别求得  $P_s$ 、 $Q_s$ 、 $P_r$ 、 $Q_r$ 、 $P_{conv2}$ 、 $Q_{conv2}$ 。

由于两个换流器之间的有功失配,使得直流连接电容电压不能保持恒定:

$$pV_{dc} = (P_{conv1} - P_{conv2}) / (C_{eq} \cdot V_{dc}) \quad (8)$$

其中:  $C_{eq} = C \cdot V_{dcbase}^2 / VA_{base}$ ,  $V_{dcbase}$ 为电容额定电压值。

从而可根据  $P_s$ 、 $Q_s$ 、 $P_r$ 、 $Q_r$  修改节点导纳矩阵,对于母线*s*和母线*r*:

$$Y_{ss} = (P_s - jQ_s) / |V_s|^2 \quad (9)$$

$$Y_{rr} = (P_r - jQ_r) / |V_r|^2 \quad (10)$$

这样,并联侧换流器等效为注入功率,串联侧换流器等效为对节点导纳矩阵的修正。

### 3 GNF 统一潮流控制器的设计

#### 1) RBFNN 模块

由于 RBFNN 具有简单的拓扑结构,因此广泛用于对非线性系统的控制。单神经元 RBFNN<sup>[7]</sup>能够简单实时地对 FACTS 元件进行有效的控制,其结构如图 3 所示。



图 3 单神经 RBFNN

Fig. 3 Single neuron RBFNN structure

从图 3 中可以看出,隐层只包含一个神经元,采用高斯核函数运算,从而引入两个参数  $\mu$ 、 $\sigma$ 。隐层输出可表示为:

$$u(x) = \exp(-\frac{|x - \mu|^2}{2\sigma^2}) \quad (11)$$

从而 RBFNN 输出为:

$$f(x) = a_0 + a_1 \cdot u(x) \quad (12)$$

#### 2) TS 模糊控制模块

本文中,TS 模糊控制策略用来实时更新 RBFNN 涉及的参数向量  $X = [a_0, a_1, \mu, \sigma]$ ,其输入为有功无功与给定值的偏差及其微分(或积分)。使用两个输入模糊集 Pos、Neg 来模糊化有功无功的偏差,其隶属度函数分别为:

$$u_{Neg}(x_i) = \begin{cases} 1 & x_i < -L_2 \\ (x_i + L_2) / 2L_2 & -L_2 < x_i < 0 \\ 0 & x_i > 0 \end{cases}$$

$$u_{Pos}(x_i) = \begin{cases} 0 & x_i < -L_1 \\ (x_i + L_1) / 2L_1 & -L_1 < x_i < 0 \\ 1 & x_i > 0 \end{cases} \quad (i = 1, 2)$$

其中:  $x_i(k)$  为第  $k$  次取样时刻的模糊控制器输入,

$$x_1(k) = e(k) = (P_{ref} - P) \text{ 或 } (Q_{ref} - Q)$$

$$x_2(k) = e(k) = e(k) - e(k-1) = \dot{e}(k)$$

如图 4 所示,TS 模糊控制器使用了 4 个简化规则。

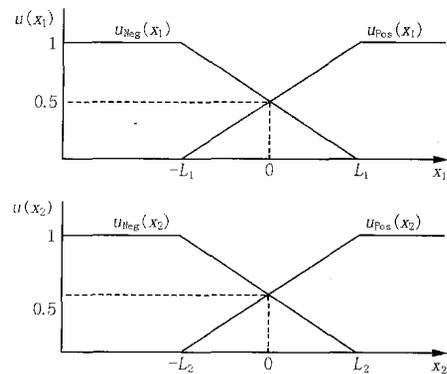


图 4 隶属度函数

Fig. 4 Membership function

规则 1:如果  $e(k)$  是 Pos 且  $\dot{e}(k)$  是 Pos,则

$$u_1(k) = K_{r1} \cdot A_1 \cdot (e(k) + \dot{e}(k));$$

规则 2:如果  $e(k)$  是 Pos 且  $\dot{e}(k)$  是 Neg,则  $u_2$

$$u_2(k) = K_{r2} \cdot u_1(k);$$

规则 3:如果  $e(k)$  是 Neg 且  $\dot{e}(k)$  是 Pos,则  $u_3$

$$u_3(k) = K_{r3} \cdot u_1(k);$$

规则 4:如果  $e(k)$  是 Neg 且  $\dot{e}(k)$  是 Neg,则  $u_4$

$$u_4(k) = K_{r4} \cdot u_1(k)。$$

在 Matlab 模糊工具箱使用 wtaver 方法<sup>[8]</sup>,即用 wtsum 的结果除以隶属度的和,得:

$$u(k) = \frac{\sum_{i=1}^4 u_i u_i(k)}{\sum_{i=1}^4 u_i} = a(e(k) + e(k)) \quad (13)$$

其中:  $a = \frac{A_1 K_{r1}(u_1 + K_{r2} u_2 + K_{r3} u_3 + K_{r4} u_4)}{u_1 + u_2 + u_3 + u_4}$

因此,模糊控制器输出  $u(k)$  实时地加入到 RBFNN 参数向量中:

$$X(k) = X_0 + u(k) \quad (X_0 \text{ 为参数向量初始值})$$

### 3) 遗传算法优化参数

遗传算法(GA)能很好地适应不规则空间搜索的优化问题。本文采用 GA 优化 TS 模糊控制器的系数  $A_1$  和辅助阻尼信号的参数  $k_1, k_2, k_3$ 。GA 有 3 个基本运算:选择、交叉、变异。选择较大数目的初始种群可以同时处理更多的解,因而容易找到全局最优解,但增加每次迭代时间,这里取初始种群数目

为 80;染色体长度由求解精度要求决定,取 40 位二进制字符串,前 10 位对应  $A_1$ ,后面的 30 位依次对应  $k_1, k_2, k_3$ ;交叉率越高可以越快地收敛到最有希望的最优解区域,取 0.75;种群越大,染色体长度越长,变异率选取越小,取 0.01。最大进化代数选为 150。在本文模型中,采用多机系统中的转速信号  $\omega$  TAE 指数作为适应度函数:

$$F = \sum_{t=0}^{simu} \sum_{i=1}^M \sum_{j=i+1}^M |w_i - w_j| \cdot t \cdot dt = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^M \sum_{j=i+1}^M \sum_{k=1}^N |w_{ij}(k)| \quad (14)$$

式中:  $M$  为系统中发电机个数;  $N$  为仿真总的步数。

随着进化过程的进行,群体中适应度较低(适应度函数值较大)的一些个体逐渐被淘汰掉,而适应度较高(适应度函数值较小)的一些个体会越来越多,且都集中在问题最优点(函数  $F$  值最小)附近,从而搜索到最优解。

总的控制器流程框图如图 5 所示。

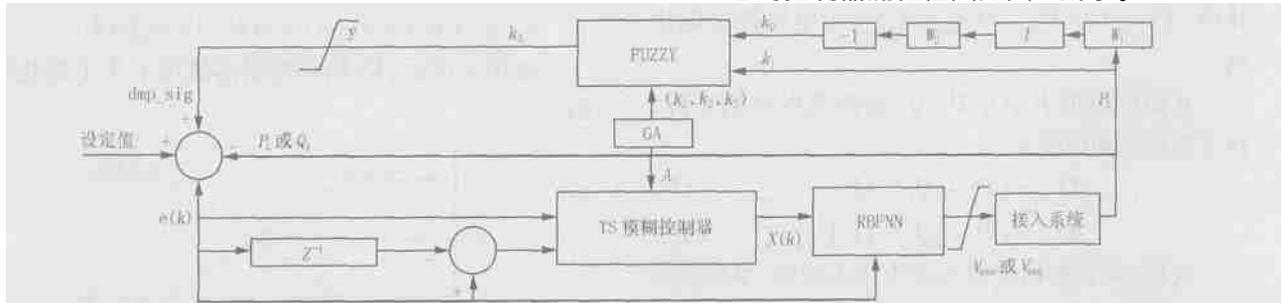


图 5 GNF UPFC 控制器

Fig. 5 GNF UPFC controller

其中:  $V_{sep}, V_{seq}$  分别为 UPFC 串联注入  $V_{se}$  与线路电流  $I_r$  同相分量和垂直于线路电流  $I_r$  的分量。辅助阻尼控制部分模糊控制策略参见文献[6]。优化结果  $A_1 = 0.0072, k_1 = 0.51, k_2 = 1.55, k_3 = 0.92$ 。

## 4 仿真结果

对如图 6 的 4 机系统,设计的 UPFC 的 GNF 控制器与常规的 PI 控制策略进行比较。设在线路 3 - 101 靠近母线 3 侧发生三相短路,故障发生后 0.1 s、0.5 s 切除故障。系统参数参见文献[6]。

以发电机 1 和发电机 3 之间的转速差为例,与常规的 PI 控制策略暂态响应效果相比较,如图 7(a)、(b),0.1 s 切除故障 GNF UPFC 在 7.2 s 时趋于稳定,而常规的 PI 控制器则在 8.8 s 时才能达到稳定;0.5 s 切除故障在故障后 0.2 s 时 PI 控制器失去

稳定(图 7(d)),而此时 GNF 仍能在操作中 7.5 s 后达到稳定(图 7(c))。

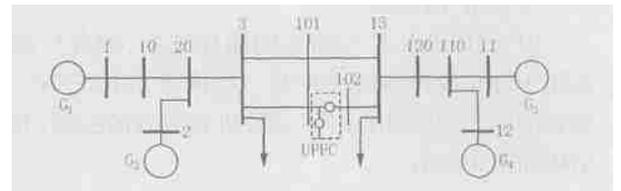


图 6 两区域四机系统

Fig. 6 Two-area four-machine test system

## 5 结论

本文尝试使用 GNF 综合控制策略控制 UPFC,利用 GA 全局优化能力优化 TS 模糊控制的系数,同时避免了利用人工神经网络(ANN)设计 UPFC 控制器时如何产生控制器的训练样本的困难。仿真试验

证明在阻尼区域间振荡时有着比常规 PI 控制策略更好的效果。使用 GNF 综合控制策略的 UPFC 更快地趋于稳定。

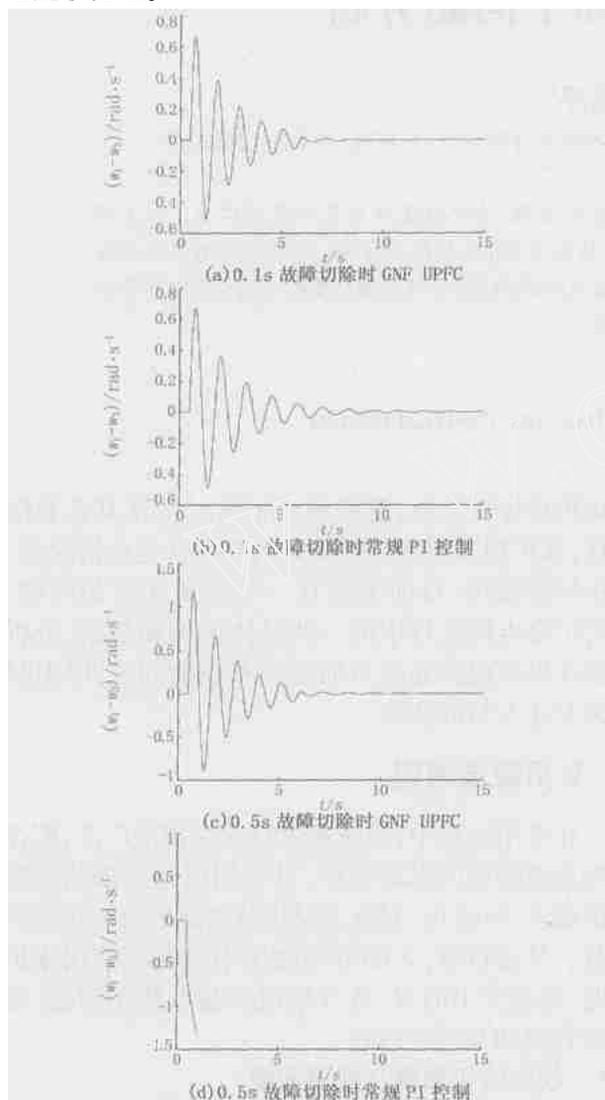


图 7 故障发生时  $G_1$ 、 $G_3$  转速差 ( $w_1 - w_3$ )

Fig. 7 Rotate speed difference of ( $w_1 - w_3$ ) during fault

## 参考文献:

- [1] Gyugyi L. The Unified Power Flow Controller: a New Approach for Transmission Control [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995:1085-1097.
- [2] Gyugyi L. Unified Power Flow Concept for Flexible AC Transmission Systems [J]. IEE Proceedings, 1992, (4):323-331.
- [3] Limyingcharoen S, Annakkage U D. Fuzzy Logic Based Unified Power Flow Controllers for Transient Stability Improvement [J]. IEE Proc, 1998, (3):225-232.
- [4] Mishra S, Dash P K, Panda G. TS-fuzzy Controller for UPFC in a Multimachine Power System [J]. IEE Proceedings, 2000, (1):15-22.
- [5] Dash P K, Mishra S, Panda G. A Radial Basis Function Neural Network Controller for UPFC [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000:1293-1299.
- [6] Mok T K, Ni Y X, et al. Design of Fuzzy Damping Controller of UPFC Through Genetic Algorithm [A]. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. 2000. 1889-1894.
- [7] 王士同 (WANG Shi-tong). 神经模糊系统及其应用 (Neural Fuzzy System and Its Application) [M]. 北京:北京航空航天大学出版社 (Beijing:Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press), 1998.
- [8] Matlab 与 Simulink 工程应用 (Engineering Application of Matlab and Simulink) [M]. 北京:电子工业出版社 (Beijing: Publishing House of Electronics Industry Press), 2002.

收稿日期: 2004-03-22; 修回日期: 2004-05-24

## 作者简介:

孙荣富(1982-),男,硕士研究生,研究方向为灵活交流输电系统及其智能控制; E-mail: ericsunf@163.com

陈铁(1975-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统稳定、发电机励磁控制;

杨振东(1980-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统建模、控制与仿真。

## Design of damping controller of GNF UPFC

SUN Rong-fu, CHEN Tie, YANG Zherrong

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** The unified power flow controller (UPFC) has been proved to be an effective means for regulating voltage and power flow in modern power systems. In this paper, an integrated approach of RBFNN and TS-fuzzy scheme with a genetic optimization of their parameters are presented to design UPFC controller for improving transient stability performance of power system. TS-fuzzy scheme applies nonlinear rules to avoid producing training samples of RBFNN. Case studies show that this approach exhibits better damping performance than conventional PI controller.

**Key words:** GNF UPFC; ITAE index; TS-fuzzy control; GA