

# 可控串补 (TCSC)的自适应单神经元控制

宁联辉, 程时杰, 文劲宇, 彭晓涛

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 电力系统是一个高阶、强非线性系统,其模型和运行参数的不确定性给各种控制器的设计带来极大的不便,智能控制方式通过人为构造一非线性映射与被控系统进行拟合,而不需要精确的数学模型,因此具有良好的控制特性。利用单神经元设计了可控串补 (TCSC)控制器,并在单机——无穷大系统中与常规 PD 控制器的控制效果做比较,结果表明:基于单神经元的 TCSC 自适应控制系统对电力系统暂态稳定性具有良好的效果。

关键词: 可控串补; 单神经元; 鲁棒性

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)02-0010-03

## 0 引言

可控串联电容补偿 (TCSC)是柔性输电技术中比较成熟的控制装置,它通过采用大功率的高频电力电子装置,实现对线路阻抗快速灵活的平滑调节,因此不但可以提高输电线路的输送容量,而且可以极大地提高电力系统的暂态稳定性,这对于充分利用输电走廊,减少网架建设费用具有较大的意义。国内外对于 TCSC 进行的研究工作主要集中在以下几个方面: 提高系统暂态稳定性; 抑制次同步振荡; 阻尼低频振荡; 稳态潮流控制。

对于 TCSC 控制策略的研究,则主要是按照三条路来进行:一是进行局部线性化,从而可以按照线性系统的设计方法进行设计;二是应用非线性控制理论直接设计非线性控制器;三是智能控制方式。

线性化方法设计的控制器在工作点附近具有良好的控制效果,可是对于大扰动必然显得力不从心;而非线性控制器对于系统运行方式的适应性明显提高,但是却需要精确的数学模型,而且由于电力系统暂态稳定控制问题的高度非线性,导致许多状态变量不可观测,使得控制器的设计更加困难。近年来,人工智能技术的日臻成熟为电力系统稳定控制开辟了广阔的前景。本文提出了一种基于单个神经元的自适应控制策略,算法简单,无需数学建模,而且可以在线修改权值以达到自适应、自学习的目的<sup>[1]</sup>。

## 1 自适应神经元

单个神经元是一个具有自学习和自适应能力的多输入单输出的非线性处理单元,其输入输出特性

可由下式表示:

$$y = K \sum_{i=1}^n w_i x_i - \quad (1)$$

式中:  $K$ 为比例系数;  $x_i$ 为第  $i$ 个输入,  $y$ 为输出;  $\theta$ 为阈值;  $w_i$ 为与  $x_i$ 相对应的权值,可采用某种学习算法确定。

神经元与环境的适应和作用如图 1 所示。图中  $E$ 表示环境;  $p_i(t)$ 为递进信号或性能指标。

根据 Hebb 假设<sup>[2]</sup>,自适应神经元采用 Hebbian 规则  $[r_i(t) = S(t) x_i(t)]$ 与监督学习  $[r_i(t) = Z(t) \cdot x_i(t)]$ 相结合。其中  $Z(t)$ 表示教师信号,通过关联搜索对未知的外界作出反映和作用。这意味着在教师信号指导下,对环境信息进行自组织来产生控制作用,并隐含对元作用信号的评价<sup>[1]</sup>。

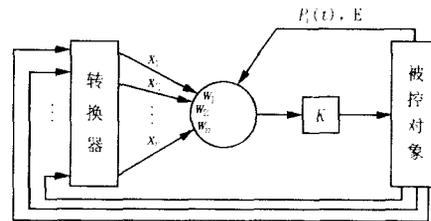


图 1 自适应神经元结构示意图

Fig 1 Schematic diagram of the SNN

为保证学习算法的收敛性和控制的鲁棒性,可采用规范化的学习算法:

$$u(t) = K \sum_{i=1}^n w_i(t) x_i(t) \quad (2)$$

$$w_i(t) = \frac{w_i(t)}{\sum_{i=1}^n |w_i(t)|} \quad (3)$$

$$w_i(t+1) = w_i(t) + d_i[r(t) - y(t)]x_i(t) \quad (4)$$

式中:  $r(t)$ 为给定信号,也即参考输入;  $y(t)$ 为被控对象的实际输出;  $d_i$ 为与状态变量  $x_i$ 相对应的学习速率。

采用式(2)~(4)构成闭环控制器以前,必须确定状态变量  $x_i$ 的数目  $n$ 以及各  $x_i$ 的性质。根据文献[1],由于待设计控制系统属于调节系统,而非伺服系统,故可取  $n=3$ ;各状态变量分别如下:

$$\begin{cases} x_1 = r(t) \\ x_2 = r(t) - y(t) = e(t) \\ x_3 = x_2(t) = x_2(t) - x_2(t-1) \end{cases} \quad (5)$$

可以证明:式(2)~(5)所表达的控制算法是按照最小化目标函数  $E\{e^2(t)\}$ 的方向进行搜索的,运用随机逼近理论,在较宽松的条件下,  $w_i(t)$ 可以收敛到某一稳定值  $w_i^*(t)$ ,从而使系统的控制输出与其期望值之间的偏差达到所允许的范围[3]。

由式(5)可见,神经元产生的控制信号由3部分组成:前馈比例控制、反馈比例控制和反馈微分控制。前馈比例控制将参考输入信号  $r(t)$ 通过权值  $w_1(t)$ 直接作用于受控对象,加快了系统的响应速度;反馈比例控制能够迅速减小跟踪误差;反馈微分控制能够改善系统的响应速度,减少超调值。这三个环节构成了一种多层次、多模式的控制结构,通过不断调整权值  $w_i(t)$ 以改善控制器的动态性能。

## 2 TCSC的自适应单神经元控制器设计

### 2.1 系统运行参数和控制器初值的确定

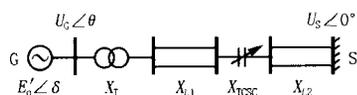


图2 含TCSC装置的SGB系统示意图

Fig 2 Schematic diagram of SGB including TCSC device

含有TCSC的单机—无穷大系统(SGB)如图2所示,同步机采用五阶实用模型,并考虑到凸极效应;励磁调节系统作一阶环节看待;TCSC作一阶滞后环节看待[4];系统参数如下:

$$\begin{aligned} X_d &= 1.79(\text{pu}), & X_d' &= 0.17(\text{pu}), \\ X_d &= 0.269(\text{pu}), & X_q &= 0.335(\text{pu}), \\ X_q &= 0.17(\text{pu}), & T_{d0} &= 7.65(\text{s}), \\ T_{d0} &= 0.0314(\text{s}), & T_{q0} &= 0.0623(\text{s}), \\ T_{TCSC} &= 0.015(\text{s}), & D &= 0.2, \\ X_T + X_{L1} &= 0.1(\text{pu}), \end{aligned}$$

$$X_T + X_{L1} + X_{L2} = 0.5(\text{pu}).$$

SNN控制器共有8个参数:  $K, K_1, d_1, d_2, d_3, w_1, w_2, w_3$ ,在投入控制器之前必须先确定其初始值,通过遗传算法GA,在给定的性能指标下,通过寻优可以得到该初始值。本文选择的初始值如下:

SNN控制器:

$$d_1 = 0.01; d_2 = 1.5; d_3 = 1.5;$$

$$K = 2.6; \text{转换器增益 } K_1 = 13;$$

$$w_{10} = 0; w_{20} = 1.000; w_{30} = 20.$$

PD控制器参数如下:

$$P = 20; I = 10; D = 0.01; N = 50.$$

### 2.2 仿真结果

根据2.1中的参数在Matlab6.5中构建仿真模型,仿真步长为0.01s,系统运行点:  $P_0 = 0.85; \delta_0 = 1.2$ ;

$t = 0.5$ s时,系统在TCSC靠近无穷大母线侧发生三相短路,  $t = 0.6$ s时,故障切除。选取系统角频率为反馈量。

控制效果如图3、图4所示,图3、图4为在运行点  $P_0 = 0.85, \delta_0 = 1.2$ 时,不加控制、常规PD控制和单神经元控制效果对比图,可见,除在故障开始瞬间,单神经元对于的控制略有过冲之外,它能很快抑制系统振荡。

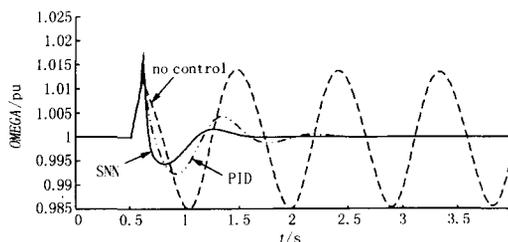


图3 角频率控制曲线

Fig 3 Controlling curve of the angle frequency

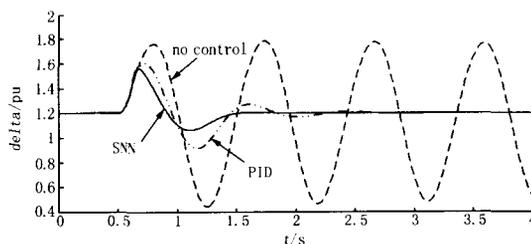


图4 功角控制曲线

Fig 4 Controlling curve of the power angle

图5、图6为在  $t = 2$ s时系统工作点跃变至  $P = 1.2$ 时,单神经元控制和常规PD控制效果对比图。

可见,应用单神经元控制能够明显提高系统的暂态稳定性,它比常规 PD 控制具有更强的抑制系统振荡的能力和鲁棒性。

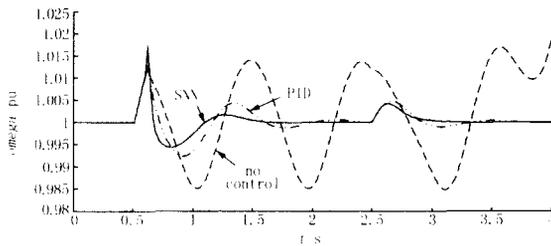


图 5 角频率控制曲线

Fig 5 Controlling curve of the angle frequency

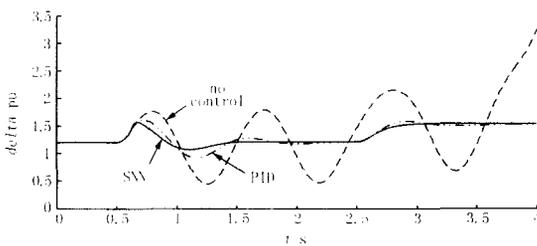


图 6 功角控制曲线

Fig 6 Controlling curve of the power angle

### 3 小结

本文设计了 TCSC 的自适应单神经元控制器,仿真结果表明,该控制器能够在功角第一摆内迅速抑制系统振荡;由于能够实时在线修改自身参数,所以具有很强的鲁棒性,能够适应系统工作点的大幅变化,对于提高系统暂态稳定性和阻尼功率振荡具有重要意义。

### 参考文献:

- [1] 王永骥,涂健.神经网络控制[M].北京:机械工业出版社,1998  
WANG Yong-ji, TU Jian. The Control of Neural Network [M]. Beijing: China Machine Press, 1998
- [2] 王永庆.人工智能原理与方法[M].西安:西安交通大学出版社,1998  
WANG Yong-qing. The Principle and Method of Artificial Intelligence [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1998
- [3] 王宁,涂健,陈锦江.自适应神经网络的智能控制[J].信息与控制,1992,21(4):235-239.  
WANG Ning, TU Jian, CHEN Jin-jiang. The Intelligence Control of Adaptive Neural Network [J]. Information and Control, 1992, 21(4): 235-239.
- [4] 李艳.电力系统稳定控制用 SMES 系统的特性分析和控制策略研究(博士学位论文)[D].武汉:华中科技大学,2003.  
LI Yan. The Characteristic Analysis and Control Strategy Investigation of SMES for Power System Stability, Doctoral Dissertation [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2003.

收稿日期: 2004-05-14; 修回日期: 2004-06-06

作者简介:

宁联辉(1979-),男,硕士研究生,电力系统及其自动化专业;E-mail: ebohui@sohu.com

程时杰(1945-),男,教授,博士生导师,研究方向为电力系统分析与控制、人工智能在电力系统中的应用、超导电力技术;

文劲宇(1970-),男,博士,副教授,研究方向为负荷预测,人工智能在电力系统中的应用。

### Study of adaptive control strategy of TCSC based on SNN

N NGLian-hui, CHENG Shi-jie, WEN Jin-yu, PENG Xiao-tao

(College of Electrical and Electronic Engineering, Huzhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Because the power system is a high order and strong nonlinearity system, the uncertainty of its parameters and models makes a great difficulty in various controllers design. Intelligent control, however, has a remarkable control ability by establishing a nonlinear mapping between the controller and the object, without needing precise math model. Thus, a controller of TCSC based on the single neural network (SNN), called intelligent control method is designed, and the result is optimistic compared with the controller based on the conventional PD method.

**Key words:** TCSC; SNN; robustness