

# 一种新型的统一潮流控制器设计方法

叶其革<sup>1</sup>, 王晨皓<sup>2</sup>, 吴捷<sup>1</sup>

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640; 2. 广东邮电职业技术学院, 广东 广州 510630)

**摘要:** 在介绍统一潮流控制器 (UPFC) 的构成、电压空间矢量脉宽调制技术及带有 UPFC 单机无穷大系统的数学模型之后, 采用两种控制策略来设计 UPFC。第一部分采用电流预测的 d-q 轴解耦控制策略结合电压空间矢量脉宽调制技术来调节线路有功功率及无功功率。第二部分采用多输入单输出的自组织模糊神经网络和 d-q 轴解耦控制策略并结合电压空间矢量脉宽调制技术来维持节点电压及电容器端电压的稳定。Matlab 仿真结果表明: 基于以上两种控制策略的 UPFC 能有效调节线路的有功功率及无功功率, 保证节点电压及电容器端电压的稳定, 证明该 UPFC 的设计方法是有效的。

**关键词:** 自组织模糊神经网络; 电流预测; 统一潮流控制器

**中图分类号:** TM761 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)05-0032-06

## 0 引言

统一潮流控制器 (UPFC) 是一种高效的 FACTS 设备, 能有效地调节电力系统的有功功率、无功功率、节点电压, 提高长距离输电线路的输送功率及电力系统暂态稳定。目前大部分 UPFC 控制器的研究文献集中于对 UPFC 数学建模问题的研究<sup>[1-5]</sup>及 UPFC 对电力系统稳定性影响的研究<sup>[7,8]</sup>, 而对控制技术, 特别是智能控制技术在 UPFC 的应用研究较少。近年来有少数文献介绍了传统控制技术在 UPFC 的应用研究<sup>[3,5,8]</sup>, 其中文献 [5,8] 将 PD 控制技术应用于 UPFC 控制器, 文献 [3] 将模糊控制策略应用于 UPFC 控制器。但是由于传统 PD 及传统模糊控制器的自身缺点, 致使以上方法存在美中不足之处, 主要表现在: 尽管传统 PD 控制算法相当简单, 但无法适应被控对象的参数变化; 尽管模糊控制具有逻辑推理的特点, 但过分依赖人们的先知经验。于是本文利用模糊神经网络的自组织能力、在线学习能力及设计上不依赖被控对象数学模型的特点, 结合电流预测、d-q 轴解耦控制策略及电压空间矢量脉宽调制技术来设计统一潮流控制器。这种 UPFC 能避免调整控制器参数的麻烦及人们的先知经验对控制性能的影响, 仿真表明: 这种 UPFC 能有效调节输电线路的有功功率及无功功率, 维持节点电压及电容器端电压的稳定, 说明该设计方法是有效的。

## 1 UPFC 的构成

UPFC 装置通常由一个串联变压器、一个并联变压器、两个逆变器及一个直流电容器组成, 逆变器

1 连接串联变压器, 逆变器 2 连接并联变压器。逆变器 1 产生一个幅值及相位可调的电压, 以调节输电线路的有功功率及无功功率。逆变器 2 也产生一个幅值及相位可调的电压, 以维持 UPFC 与电力系统有功功率交换量为零, 使直流电容器端电压维持恒定, 同时通过吸收或释放无功功率来维持接入点电压的稳定。电容器只起吸收或释放能量和功率传输的作用。

## 2 带有 UPFC 的单机无穷大系统的数学模型

本文研究对象为带有 UPFC 的单机无穷大系统 (见图 1), 其数学模型由同步电机方程、并联变压器和串联变压器的 d-q 轴解耦控制方程、电容器端电压的动态方程等组成, 具体表示如下。

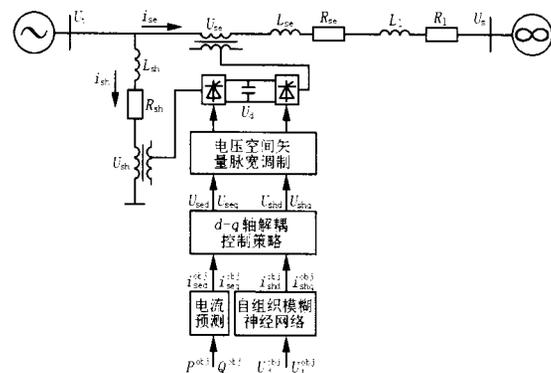


图 1 带有 UPFC 的单机无穷大系统图

Fig 1 Single infinite power system with UPFC

同步电机方程取二阶模型, 其方程为:

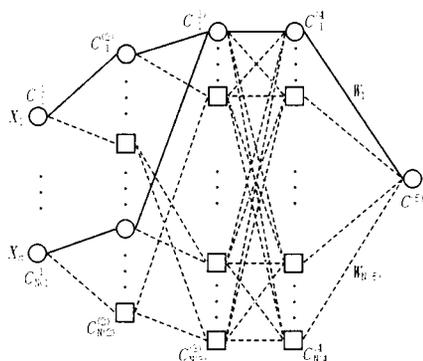
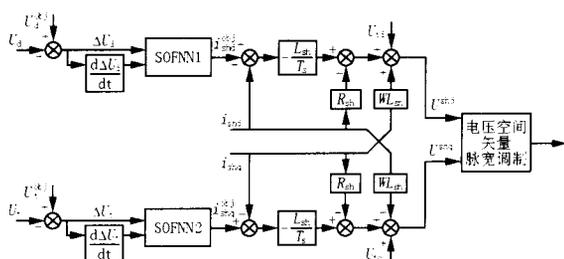
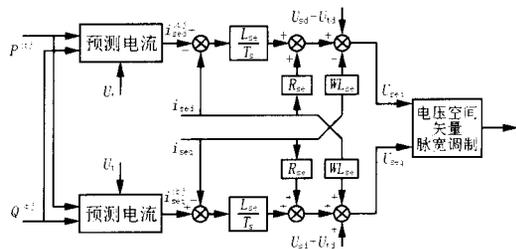


图 2 自组织模糊神经网络

Fig 2 Self-organizing fuzzy neural network



(a) 并联回路部分控制策略



(b) 串联回路部分控制策略

图 3 UPFC控制策略

Fig 3 Control scheme in UPFC

$$\begin{cases} T_j \frac{d}{dt} = T_m - E_q i_q + (x_d - x_q) i_d i_q + D(-1) \\ \frac{d}{dt} = -1 \\ i_d = i_{sed} + i_{shd} \\ i_q = i_{seq} + i_{shq} \\ u_{td} = x_q i_q \\ u_{tq} = E_q - x_d i_d \\ u_t = \sqrt{u_{td}^2 + u_{tq}^2} \end{cases} \quad (1)$$

并联变压器的 d-q轴解耦控制方程为:

$$L_{sh} \frac{di_{shd}}{dt} = u_{td} - u_{shd} - R_{sh} i_{shd} + L_{sh} i_{shq} \quad (2)$$

$$L_{sh} \frac{di_{shq}}{dt} = u_{tq} - u_{shq} - R_{sh} i_{shq} - L_{sh} i_{shd} \quad (3)$$

串联变压器的 d-q轴解耦控制方程为:

$$L_z \frac{di_{sed}}{dt} = u_{td} + u_{sed} - u_{sd} - R_z i_{sed} + L_z i_{seq} \quad (4)$$

$$L_z \frac{di_{seq}}{dt} = u_{tq} + u_{seq} - u_{sq} - R_z i_{seq} - L_z i_{sed} \quad (5)$$

考虑电容器充放电过程,电容器端电压的动态方程取:

$$\frac{du_d}{dt} = \frac{1}{C u_d} (P_{sh} - P_{se}) \quad (6)$$

(1)~(6)方程中的参数描述如下:无穷大系统电压  $u_s$ 、节点电压  $u_t$ 、电容器端电压  $u_d$ 、串联变压器的阻抗  $R_{se}$ 、感抗  $L_{se}$ 和电压  $u_{se}$ 、并联变压器的阻抗  $R_{sh}$ 、感抗  $L_{sh}$ 和电压  $u_{sh}$ 、线路的阻抗  $R_l$ 、感抗  $L_l$ 、 $R_z = R_{se} + R_l$ 、 $L_z = L_{se} + L_l$ 、电容器的电容  $C$ 、UPFC吸收、发出的有功功率  $P_{sh}$ 、 $P_{se}$ 。

### 3 UPFC电压空间矢量脉冲调制

UPFC中逆变器的开关元件采用门极可关断晶闸管 GTO,其调制模式采用电压空间矢量脉宽调制方式,具体可参考文献 [3, 9]。电压空间矢量脉宽调制的核心部分在于理想三相电压源  $U_{xa}$ 、 $U_{xb}$ 、 $U_{xc}$  可向两相旋转坐标 d-q轴转换,转换公式如下:

$$\begin{bmatrix} U_{xd} \\ U_{xq} \\ 0 \end{bmatrix} = V \begin{bmatrix} U_{xa} \\ U_{xb} \\ U_{xc} \end{bmatrix}$$

其中

$$V = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \cos(t) & \cos(t - \frac{2}{3}) & \cos(t + \frac{2}{3}) \\ -\sin(t) & -\sin(t - \frac{2}{3}) & -\sin(t + \frac{2}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (7)$$

转换后电压空间矢量在 d-q轴的作用时间为:

$$\begin{cases} t_1 = B T_s \sin(\cdot) / U_d \\ t_2 = B T_s \sin(\cdot) / U_d \\ t_0 = T_s - t_1 - t_2 \end{cases} \quad (8)$$

其中:  $T_s$  为采样周期。

$$B = \sqrt{3(U_{xd}^2 + U_{xq}^2)} = t + \arctan\left(\frac{U_{xq}}{U_{xd}}\right) \quad (9)$$

根据计算出来的 及作用时间  $t_1$ 、 $t_2$  便可以实现电压空间矢量脉宽调制。

#### 4 功率及电压的控制策略

文中统一潮流控制器控制策略分为两部分:第一部分是有功功率  $P$ 、无功功率  $Q$  的调节采用基于电流预测的 d-q 轴解耦控制策略<sup>[3]</sup>,第二部分是节点电压和电容器端电压的调节采用自组织模糊神经网络控制器结合 d-q 轴解耦控制策略的方法,具体控制策略见图 3(a)、3(b)。为了更清晰地分析 UP-FC 控制策略,采用前向差分法离散 (2) ~ (5) 式,得:

$$U_{\text{shd}}(k) = u_{\text{td}}(k) - R_{\text{sh}} i_{\text{shd}}(k) + L_{\text{sh}} i_{\text{shq}}(k) - L_{\text{sh}} \frac{i_{\text{shd}}(k+1) - i_{\text{shd}}(k)}{T_s} \quad (10)$$

$$U_{\text{shq}}(k) = u_{\text{tq}}(k) - R_{\text{sh}} i_{\text{shq}}(k) - L_{\text{sh}} i_{\text{shd}}(k) - L_{\text{sh}} \frac{i_{\text{shq}}(k+1) - i_{\text{shq}}(k)}{T_s} \quad (11)$$

$$U_{\text{secd}}(k) = u_{\text{sd}}(k) - u_{\text{td}}(k) + R_z i_{\text{secd}}(k) - L_z i_{\text{seq}}(k) + L_z \frac{i_{\text{secd}}(k+1) - i_{\text{secd}}(k)}{T_s} \quad (12)$$

$$U_{\text{seq}}(k) = u_{\text{sq}}(k) - u_{\text{tq}}(k) + R_z i_{\text{seq}}(k) + L_z i_{\text{secd}}(k) + L_z \frac{i_{\text{seq}}(k+1) - i_{\text{seq}}(k)}{T_s} \quad (13)$$

其中:采样周期为  $T_s$ ,系统频率为  $f$ ,其它符号见文中 (1) ~ (6) 式中的说明。

##### 4.1 有功功率、无功功率的解耦控制策略

统一潮流控制器的第一部分控制目标是维持线路的有功功率  $P$ 、无功功率  $Q$  (标么值) 为某一定值,采用基于电流预测的 d-q 轴解耦控制策略,控制策略如图 3(b) 所示。

由于

$$S = P + jQ = V I = (u_d + ju_q) (i_d - ji_q) \quad (14)$$

可得:

$$i_d^{\text{obj}} = \frac{(u_d P + u_q Q)}{(u_d^2 + u_q^2)} \quad i_q^{\text{obj}} = \frac{(u_q P - u_d Q)}{(u_d^2 + u_q^2)} \quad (15)$$

对于式 (12) ~ (13) 中预测值  $i_{\text{secd}}(k+1)$ 、 $i_{\text{seq}}(k+1)$  取:  $i_{\text{secd}}(k+1) = i_{\text{secd}}^{\text{obj}}$ 、 $i_{\text{seq}}(k+1) = i_{\text{seq}}^{\text{obj}}$ 。

##### 4.2 节点电压及电容器端电压的控制

统一潮流控制器的第二部分控制目标是维持节点电压  $u_i$ 、电容器端电压  $u_d$  为某一定值,采用自组织神经网络及 d-q 轴解耦控制策略相结合控制策略,控制策略如图 3(a) 所示。其中图中多输入单输出自组织模糊神经网络 SOFNN1 的输入量为电容器端电压误差  $u_d = u_d^{\text{obj}} - u_d$  及其变化率  $d u_d / dt$  输出量为  $i_{\text{shq}}^{\text{obj}}$ ;多输入单输出的自组织模糊神经网络

SOFNN2 的输入量为节点电压误差  $u_i = u_i^{\text{obj}} - u_i$  及其变化率  $d u_i / dt$  输出量为  $i_{\text{shd}}^{\text{obj}}$ 。

对于式 (10) ~ (11) 中预测值  $i_{\text{shd}}(k+1)$ 、 $i_{\text{shq}}(k+1)$  取:  $i_{\text{shd}}(k+1) = i_{\text{shd}}^{\text{obj}}$ 、 $i_{\text{shq}}(k+1) = i_{\text{shq}}^{\text{obj}}$ 。

#### 5 自组织模糊神经网络

##### 5.1 自组织模糊神经网络的结构

自组织模糊神经网络<sup>[6]</sup>由输入层、模糊化层、模糊逻辑层、模糊归一层、输出层组成,仅模糊归一层与输出层之间才有连接权系数。具体结构如图 2,其中圆圈及实线代表已存在的节点及连接,方框及虚线代表将增加的节点及连接,  $a_i^{(j)}$ 、 $c_i^{(j)}$ 、 $N(j)$  分别为第  $j$  层的输入变量、输出变量、节点数,  $w_i$  为连接权系数。每层的节点函数及节点数描述如下:

输入层的节点函数为

$$c_i^{(1)} = a_i^{(1)} = x_i \quad i = 1, 2, \dots, N(1) \quad (16)$$

节点数 (其中  $n$  为输入分量数) 为

$$N(1) = n \quad (17)$$

模糊化层的节点函数取 Gaussian 隶属函数 (均值为  $m_{ij}$ , 方差为  $\sigma_{ij}^2$ ), 即:

$$c_k^{(2)} = c_{ij}^{(2)} = \exp\left\{-\frac{(c_i^{(1)} - m_{ij})^2}{2\sigma_{ij}^2}\right\} \quad i = 1, 2, \dots, N(1), \\ j = 1, 2, \dots, N_i(2), k = 1, 2, \dots, N(2), \\ k = (i-1) \times N_{i-1}(2) + j N_0(2) = 0 \quad (18)$$

节点数为:

$$N(2) = \sum_{i=1}^n N_i(2) \quad (19)$$

模糊逻辑层的节点函数为:

$$c_i^{(3)} = c_{i,k}^{(2)} c_{2,l}^{(2)} \dots c_{n,m}^{(2)} \quad i = 1, 2, \dots, N(3), \\ k = 1, 2, \dots, N_1(2), l = 1, 2, \dots, N_2(2), \dots, \\ m = 1, 2, \dots, N_n(2) \quad (20)$$

节点数为:

$$N(3) = \prod_{i=1}^n N_i(2) \quad (21)$$

模糊归一层的节点函数为:

$$c_i^{(4)} = c_i^{(3)} / \sum_{j=1}^{N(3)} c_j^{(3)} \quad i = 1, 2, \dots, N(4) \quad (22)$$

节点数与上层的相同, 即:

$$N(4) = N(3) \quad (23)$$

输出层的节点函数为:

$$c^{(5)} = \sum_{i=1}^{N(4)} c_i^{(4)} w_i \quad (24)$$

节点数

$$N(5) = 1 \quad (25)$$

## 5.2 模糊神经网络的自组织机制

在说明自组织机制之前,我们先定义:点火强度最大值:

$$\max p = \max_j b_j^{(3)} \quad (26)$$

隶属函数近似度:

$$\text{degree}(i, k) = \max_k E[f(m_{i-\text{new}}, i-\text{new}), f(m_k, k)] \quad (27)$$

其中:

$$E(C, D) = \frac{|C - D|}{|C| + |D|} = \frac{|C - D|}{|C| \sqrt{1 + \frac{D^2}{C^2}} + |D| \sqrt{1 + \frac{C^2}{D^2}}};$$

$$|C - D| = \frac{1}{2} \left[ \frac{h^2(m_2 - m_1 + \sqrt{(m_1 + m_2)})}{\sqrt{(m_1 + m_2)}} + \frac{h^2(m_2 - m_1 + \sqrt{(m_1 - m_2)})}{\sqrt{(m_2 - m_1)}} + \frac{h^2(m_2 - m_1 - \sqrt{(m_1 - m_2)})}{\sqrt{(m_1 - m_2)}} \right];$$

$h(x) = \max\{0, x\}$ ;  $f(m_{i-\text{new}}, i-\text{new})$  为新增加的节点函数。

模糊神经网络的调整机制是通过模糊逻辑层的点火强度的最大值  $\max p$  是否小于某一阈值来进行的,  $\max p$  小于某一阈值,说明现有的模糊规则不满足控制的要求,需增加新节点、新模糊函数和新模糊规则,否则无需进行结构调整。

模糊神经网络的调整时约束机制:如果新模糊化层的节点函数与旧的节点函数的近似度是小于某一参数,则说明新产生的节点满足自组织机制的要求,可以接受,否则需去掉刚产生的节点。具体实现过程可简单描述如下:

1) 如果  $\max p <$ , 在模糊化层中对应于每个  $x_i$  的论域上各增加一个节点,并各赋予隶属函数,  $x_i$  对应的模糊化层节点数为:

$$N_i^{(k+1)}(2) = N_i^k(2) + 1 \quad (28)$$

2) 如果新增加的节点与原有节点的隶属函数

$$m_{ij}(k+1) = \begin{cases} m_{ij}(k) + \frac{1}{2} [y_i^{\text{obj}}(k) - y_i(k)] \text{sign}\left(\frac{\partial y_i(k)}{\partial u}\right) \sum_t \frac{w_t - u}{\sum_t c_t^{(3)}} c_t^{(3)} \frac{2(x_i - m_{ij})}{i_j} & \text{节点 } i \text{ 与节点 } l \text{ 相连} \\ m_{ij}(k) & \text{节点 } i \text{ 与节点 } l \text{ 不相连} \end{cases} \quad (35)$$

$$i_j(k+1) = \begin{cases} i_j(k) + \frac{1}{2} [y_i^{\text{obj}}(k) - y_i(k)] \text{sign}\left(\frac{\partial y_i(k)}{\partial u}\right) \sum_t \frac{w_t - u}{\sum_t c_t^{(3)}} c_t^{(3)} \frac{2(x_i - m_{ij})}{i_j} & \text{节点 } i \text{ 与节点 } l \text{ 相连} \\ i_j(k) & \text{节点 } i \text{ 与节点 } l \text{ 不相连} \end{cases} \quad (36)$$

近似度的  $\text{degree}(i, j) >$ , 则删去刚产生的节点及隶属函数, 否则保留刚产生的节点及隶属函数。

3) 增加模糊逻辑层新节点数为:

$$N(3) = \sum_{i=1}^n N_i^{k+1}(2) - \sum_{i=1}^n N_i^k(2) \quad (29)$$

4) 增加模糊归一层的新节点数为:

$$N(4) = N(3) \quad (30)$$

5) 按照自组织模糊神经网络的连接方式联接各层的新、旧节点。

## 5.3 隶属函数的产生

1) 原有节点的隶属函数的中心及宽度的初值为:

$$m_{ij} = x_{i-\text{init}}, \quad i_j = i-\text{init} \quad (31)$$

2) 新节点的隶属函数的中心及宽度的初值为:

$$m_{i-\text{new}} = x_i, \quad i-\text{new} = 1/n(\max p) \quad (32)$$

## 5.4 模糊逻辑规则的产生

由于自组织模糊神经网络的规则的动态变化首先表现在前提条件的合成, 即:

$$c_i^{(3)} = c_{1,k}^{(2)} c_{2,l}^{(2)} \dots c_{n,m}^{(2)} \quad i=1, 2, \dots, N(3),$$

$$k=1, 2, \dots, N_1(2)_{\text{new}}, l=1, 2, \dots, N_2(2)_{\text{new}}, \dots,$$

$$m=1, 2, \dots, N_n(2)_{\text{new}} \quad (33)$$

其次表现在模糊逻辑规则的结论变量的产生(即赋予结论变量的初值)及变化。

## 5.5 模糊神经网络的训练机制

根据图 3a 所示, 自组织模糊神经网络的学习能力体现在对隶属函数的参数及连接权(结论变量)的训练, 训练算法是采用梯度下降法(GDM), 其目标函数选为:

$$J = \frac{1}{2} (y_i^{\text{obj}} - y_i)^2 \quad (34)$$

这里:对于 SOFNN1 来说,  $y_i^{\text{obj}}$  取  $u_d^{\text{obj}}$ ,  $y_i$  取  $u_d$ ; 对于 SOFNN2 来说  $y_i^{\text{obj}}$  取  $u_t^{\text{obj}}$ ,  $y_i$  取  $u_t$ 。

### 5.5.1 隶属函数的训练机制

Gaussian 隶属函数的中心及宽度(即均值及方差)  $m_{ij}, i_j$  的训练算法为:

式中:  $\eta_1 = \eta_1 \left| \frac{\partial y_i}{\partial u} \right|$ ,  $\eta_2 = \eta_2 \left| \frac{\partial y_i}{\partial u} \right|$ ,  $\eta_1$ 、 $\eta_2$  为变化的学习因子,  $\eta_1$ 、 $\eta_2$  为实际学习因子,  $\eta_3$  为常数。

### 5.5.2 结论变量的训练机制

自组织模糊神经网络的连接权系数的训练算法为:

$$w_i(k+1) = w_i(k) + \eta_3 [y_i^{obj}(k) - y_i(k)] \text{sign} \left( \frac{\partial y_i(k)}{\partial u} \right) c_j^{(4)} \quad (37)$$

$\eta_3 = \eta_3 \left| \frac{\partial y_i}{\partial u} \right|$ ,  $\eta_3$  为变化的学习因子,  $\eta_3$  为实际学习因子,  $\eta_3$  为常数。

从式 (35) ~ (37) 中可看出: SOFNN1 和 SOFNN2 的训练算法仅需知道  $\text{sign}(\partial y_i(k)/\partial u)$  即可, 无需知道被控对象的数学模型。

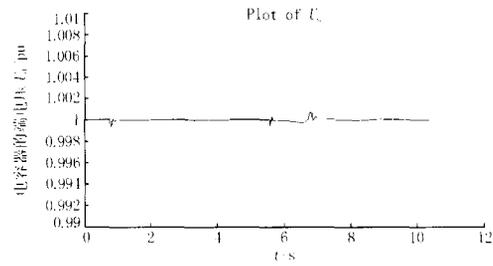
## 6 仿真结果

仿真中采用的单机无穷大系统的参数如下:  $L_{sh} = 0.01$ ,  $R_{sh} = 0.1$ ,  $L_{sc} = 0.01$ ,  $R_{sc} = 0.1$ ,  $L_1 = 0.03$ ,  $R_1 = 0.3$ ,  $X_q = 0.18$ ,  $X_{dl} = 0.16$ , UPFC 中 SOFNN1 的学习系数为  $\eta_1 = \eta_2 = \eta_3 = 0.08$ ,  $\eta_4 = 0.5$ ,  $\text{sign}(\cdot)$  为正, SOFNN2 的学习系数为  $\eta_1 = \eta_2 = \eta_3 = 0.06$ ,  $\eta_4 = 0.5$ ,  $\text{sign}(\cdot)$  为正。在 0.8 s 时, 有功功率由 0.2 pu 升至 0.4 pu, 无功功率由 0.2 pu 升至 0.3 pu, 在 5.6 s 时, 有功功率由 0.4 pu 升至 0.6 pu, 无功功率由 0.3 pu 升至 0.5 pu, 自组织模糊神经网络经 10 次学习后, 其控制结果如图 4 所示。仿真结果表明: (1) 电流预测 d-q 轴解耦控制策略能有效实现有功功率和无功功率的解耦控制; (2) 节点电压的变化控制在  $1 \pm 0.05$  pu 范围内、电容器端电压的变化控制在  $1 \pm 0.002$  pu 范围内, 有效维持节点电压和电容器端电压稳定。

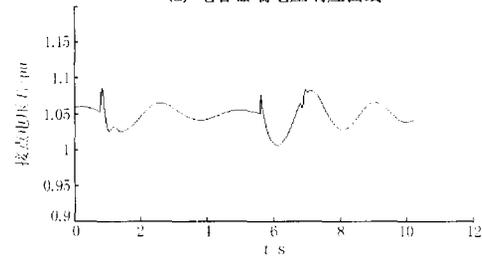
## 7 结论

- 1) 这种采用电流预测、自组织模糊神经网络与 d-q 轴解耦控制策略相结合的 UPFC 与采用常规 PD 的 UPFC 相比, 具有在线学习能力。
- 2) 这种 UPFC 与采用常规模糊控制器的 UPFC 相比, 具有自我产生模糊规则及调整模糊规则的能力。同时不依赖设计者对被控对象的控制经验, 且设计上无需知道被控对象的数学模型。
- 3) 这种 UPFC 能有效地实现有功功率和无功功率的解耦控制, 维持节点电压和电容器端电压稳定, 且控制精度较高。

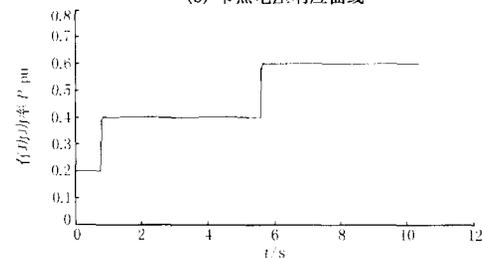
以上说明这种 UPFC 设计方法是有效的。



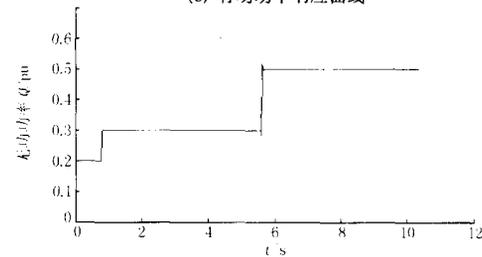
(a) 电容器端电压响应曲线



(b) 节点电压响应曲线



(c) 有功功率响应曲线



(d) 无功功率响应曲线

图 4 仿真结果

Fig 4 Simulation results

## 参考文献:

- [1] Menniti D, Pinnarelli A, DeMartinis A, et al Modelling of Unified Power Flow Controller into Power Systems Using P-Spice[A]. International Conference on Power System Transients (IPST 2001). Rio de Janeiro (Brazil): 2001. 24-28
- [2] NabaviNiaki A, Iravani M R. Steady-stated and Dynamic Models of Unified Power Flow Controller (UPFC) for Power Systems Studies[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(4): 1937-1943
- [3] 鞠儒生, 陈宝贤, 邱晓刚. UPFC 控制方法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 60-65.  
JU Ru-sheng, CHEN Bao-xian, QU Xiao-gang Basic Control of Unified Power Flow Controller[J]. Proceedings

- of the CSEE, 2003, 23 (6): 60-65.
- [4] 李勋,杨荫福,陈坚. 基于 SPWM 控制的 UPFC 开关函数数学模型 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (9): 37-40  
LI Xun, YANG Yin-fu, CHEN Jian Switching Function Mathematical Model of UPFC Based on SPWM Control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (9): 37-40
- [5] 章良栋,岑文辉,刘为. UPFC 的模型及控制器设计研究 [A]. 第十三届全国高等学校电力系统及其自动化专业学术论文集, 1997. 193-200.  
ZHANG Liang-dong, CEN Wen-hui, LIU Wei A Design and Study on the Model and Controller of UPFC [A]. Proceedings of the 13th CUS - EPSA. 1997. 193-200
- [6] 叶其革,吴捷. 一种自组织模糊神经网络控制器 [J]. 控制与决策, 1998, 11: 694-699.  
YE Qi-ge, WU Jie A Self-organizing Fuzzy Neural Network Controller [J]. Control and Decision, 1998, 11: 694-699
- [7] Dizdarevic N, Tesnjak S, Adersson G Converter Rating Powers of Unified Power Flow Controller [A]. Proceedings of the 2002 IEEE PES Summer Meeting on System Aspects of FACTS and HVDC. Chicago (USA): 2002. 1-7.
- [8] 王涛,于继来,鲁保春,等. 统一潮流控制器 (UPFC) 在电力系统中稳态调控范围分析 [A]. 第十三届全国高等学校电力系统及其自动化专业学术论文集, 1997: 224-229.  
WANG Tao, YU Ji-lai, LU Bao-chun, et al The Steady Control Range Analysis Application UPFC to Power System Stabilizer [A]. Proceedings of the 13th CUS-EPSA. 1997. 224-229.
- [9] 朱典旭,张锦生,赵雅利,等. PER D200G3 系列变频调速装置研究 [J]. 电力电子技术, 1996, (2): 1-5.  
ZHU Dian-xu, ZHANG Jin-sheng, ZHAO Ya-li, et al Research on PER D200G3 VVVF Series Equipment [J]. Power Electronics, 1996, (2): 1-5.

收稿日期: 2004-06-23; 修回日期: 2004-08-03

作者简介:

叶其革 (1969 - ), 男, 工程师, 博士研究生, 主要研究方向为自动控制理论及控制工程, 电力系统控制技术; E-mail: yeqige2003@163.com

王晨皓 (1971 - ), 女, 讲师, 主要研究方向为高频开关电源;

吴捷 (1937 - ), 男, 博士生导师, IEEE 会员, 主要从事自适应控制、电力系统运行监测与控制、电机控制、生物电子学等研究工作。

### Design of a new unified power flow controller

YE Qi-ge<sup>1</sup>, WANG Chen-hao<sup>2</sup>, WU Jie<sup>1</sup>

(1. Electric Power College, SCUT, Guangzhou 510640, China; 2. Guangdong Post and Telecommunication Vocational Technology Institute, Guangzhou 510630, China)

**Abstract:** The paper introduces structure of a unified power flow controller (UPFC) voltage-space-vector PWM control technique and the mathematics model of single machine infinite power system including UPFC. Two control strategies are applied to design UPFC. Electric current forecasting d-q axis decouple control and voltage-space-vector PWM control technique are employed to regulate active power flow and reactive power flow. Self-organizing fuzzy neural network of multi-input-and-single-output, d-q axis decouple control and voltage-space-vector PWM control technique are adopted to regulate voltage on bus and voltage on direct circuit capacitor. MATLAB simulation shows that UPFC can effectively regulate active power flow, reactive power flow, voltage on bus and voltage on direct circuit capacitor.

**Key words:** self-organizing fuzzy neural networks; electric current forecasting; UPFC

(上接第 31 页 continued from page 31)

(School of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** Automatic tuning extinction coil realizes automatic measurement for capacitance current of power network and automatic tracking compensation for single-phase earth fault, which enhances the security of network operation and the reliability of power supply, but brings much difficulty to single-phase earth fault line selection. Based on brief analysis of harmonic current, zero sequence active power, zero sequence phase-to-ground admittance and signal injection, and with the operation characteristic of auto-compensated distribution network, this paper improves the calculation method of zero sequence phase-to-ground admittance and explores a new principle for fault line selection, which strengthens the accuracy and the suitable range of fault line selection with zero sequence phase-to-ground admittance. The result of simulation analysis shows the correctness of the conclusion.

**Key words:** auto-compensated distribution network; zero sequence phase-to-ground admittance; extinction coil