

基于神经网络学习算法和粒子群算法的改进 PID 控制在高压静止无功补偿器中的应用

杨晓峰, 罗安, 彭楚武, 吴敬兵, 杨翠翠, 马伏军, 常亮亮
(湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南省 长沙市 410082)

Application of an Improved PID Control Based on Neural Network Learning Algorithm and Particle Swarm Optimization in High Voltage Static VAR Compensators

YANG Xiaofeng, LUO An, PENG Chuwu, WU Jingbing, YANG Cuicui, MA Fujun, CHANG Liangliang
(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan Province, China)

ABSTRACT: To remedy the defect of traditional proportional integral differential (PID) controller that it is difficult for the controller to trace the set value changeably and suppress the disturbances, it is proposed to add a second-order differential controlling unit in traditional PID controller to implement stable control of voltage at point of common coupling (PCC) in high voltage static var compensator (SVC). Parameters of the improved controller are optimized by improved neural network learning algorithm and particle swarm optimization to make the transient response and control performance of the controller optimal. Results of simulation and experiments show that the improved controller possesses strong robustness and adaptability, and can ensure rapid and non-overshoot tracking of set value, so the compensation accuracy of SVC can be improved.

KEY WORDS: high voltage static var compensator (SVC); neural networks; particle swarm optimization

摘要: 以高压静止无功补偿器(static var compensator, SVC)为研究对象, 针对传统比例-积分-微分(proportional integral differential, PID)控制器难以对设定值进行有变化的跟踪和对扰动进行抑制的缺陷, 提出在传统 PID 控制器的基础上加入一个 2 阶微分控制环节以实现公共连接点的电压稳定控制, 并采用改进的神经网络粒子群优化算法对控制器的参数进行优化, 使得系统瞬态响应性能和控制性能达到最佳。仿真和实验结果验证了所提出的控制方法能够保证快速、无超调的跟踪电压设定值, 具有较强的鲁棒性、适应性, 提高了 SVC 系统的补偿精度。

关键词: 高压静止无功补偿器; 神经网络; 粒子群优化算法

0 引言

在现代电力系统中, 高压静止无功补偿器

基金项目: 国家自然科学基金项目(60774043)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (60774043).

(static var compensator, SVC)在动态电压支撑和无功补偿方面发挥了重要的作用, 主要用于补偿供电网络的无功、改善不平衡度、抑制电压闪变等方面。由于其耐压等级高、补偿效果好, 因此在电力系统中得到了广泛的应用^[1-4]。

性能良好的控制器对于 SVC 功能的实现至关重要。传统 PID 控制器结构简单、易于实现, 在电力系统控制中占有重要地位, 但其控制参数不能针对动态情况实时改变, 控制性能也不够优越, 所以对于 SVC 这种非线性系统, 须采用更为精确的控制方法。本文将提出一种基于神经网络粒子群优化算法的改进 PID 控制方法以实现公共连接点的电压稳定控制, 并对控制器的参数进行优化, 使得系统瞬态响应性能和控制性能达到最佳。

1 SVC 系统描述

SVC 的系统结构如图 1 所示, 图中 u_{SVC} 、 i_{SVC} 分别代表负载电压和负载电流, u_p 、 i_p 分别代表电网电压和电网电流。SVC 系统主要由固定电容器组(fixed capacitor, FC)和三角形连接的晶闸管控制电抗器(thyristor controlled reactor, TCR)组成。电网母线的电压、电流以及 SVC 系统输出电压、电流采样值经过调理后分别由电压和电流传感器输入到工控机, 其中工控机具有数据采集、数据处理、数据存储、状态显示、历史数据查询以及参数修改功能。阀基电子设备^[5](valve base electronics, VBE)作为监视控制系统, 与工控机之间通过以太网进行通信, 以交换机作为中介, 工控机以广播的形式将启

动、停止、触发等命令发给 VBE 板，VBE 板将高电位触发板检测的晶闸管运行状态，发给工控机进行显示和做出相应的处理。经过算法处理产生所需的控制信号，通过光纤隔离回路传送到可控硅电子设备(thyristor electronics, TE)板。TE 板将信号传输到晶闸管门极，以控制晶闸管导通角，从而实现对注入到电网的无功调节。TE 板接受 VBE 传来的命令对晶闸管进行触发和检测，并将检测结果通过电光转换，以脉冲形式返回给 VBE 监控系统。

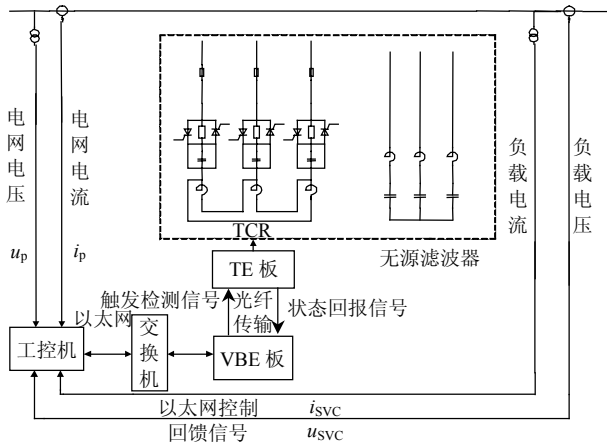


图 1 SVC 系统结构

Fig. 1 Configuration of SVC system

在 TCR 中，由于晶闸管的导通角与其提供的无功量有关，可以通过控制导通角产生连续可调的感性无功，FC 在提供容性无功功率的同时，还串联一个小的电抗器，从而将补偿电容器组调谐成单调谐滤波器，滤除电网中和 TCR 产生的谐波电流。TCR 通过实时检测电网负荷所需的无功量，首先可以根据无功需要判断容性无功是否过剩，如果过剩，则控制晶闸管的触发角，调节 TCR 中的感性无功，最终使电网提供无功功率 $Q_N=Q_V-Q_{FC}+Q_{TCR}$ 保持为常数(Q_V 为电网负荷侧所需无功功率， Q_{FC} 为 TSC 产生的无功功率， Q_{TCR} 为 TCR 吸收的无功功率)，进而达到稳定系统电压的目的。

带电流反馈的电压稳定控制框图如图 2 所示，图中 U_{ref} 为系统的参考电压， U_{rms} 为系统电压的方均根值， U_{SL} 为 SVC 的补偿电压，作为 U_{ref} 的修正

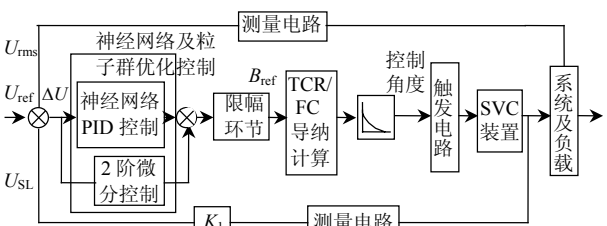


图 2 SVC 电压稳定控制框图

Fig. 2 Voltage-stability control structure of SVC

量，可由 $U_{SL} = K_1 I_{sVC}$ 得到，其中调差率 K_1 取 4%， I_{sVC} 为 SVC 的输出电流， $\Delta U = U_{ref} - U_{rms} - U_{SL}$ 。 B_{ref} 为 TCR/FC 导纳计算模块的输入量，由电压误差信号 U_e 通过神经网络 PID 控制与 2 阶微分控制算法计算后，再经过限幅环节处理后得到，其大小决定了 TCR 输出的导纳 B_{TCR} ，其中 B_{TCR} 可通过补偿导纳 B_{ref} 减去 FC 自身具有的导纳值 B_C 得到， B_{TCR} 通过图 2 中性线性化环节所获得的导通角 α 可用于控制 TCR 的无功输出。

2 SVC 控制器

2.1 SVC 控制器基本结构

传统 PID 控制器难以对设定值进行有变化的跟踪。为此，提出传统 PID 控制器串入一个 2 阶微分控制环节，以稳定系统公共点的电压。由于控制器参数是否取得最优，对系统控制性能有着较大的影响，因此利用基于粒子群算法的神经网络对控制器的 4 个参数进行了优化，以取得适合 SVC 系统的最佳参数值，对振荡有足够的阻尼作用，且使其适应性大大增强。此外，2 阶微分控制环节的加入可以有效地提高系统的控制精度与响应速度。控制算法实现框图如图 3 所示， K_p 、 K_i 、 K_d 分别为 PID 控制器的比例、积分、微分系数； K_s 为 2 阶微分系数。

传统 PID 控制算法的离散表达式^[6]为

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \sum_{i=1}^t e(i) + K_d [e(t) - e(t-1)] \quad (1)$$

式中 $u(t)$ 为控制器输出。

加入 2 阶微分控制环节后的控制算法离散表达式为

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \sum_{i=1}^t e(i) + K_d [e(t) - e(t-1)] + K_s [e(t) - 2e(t-1) + e(t-2)] \quad (2)$$

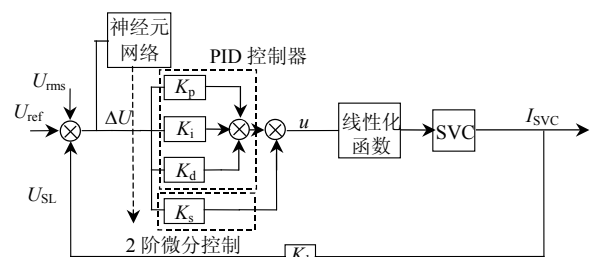


图 3 控制算法的控制框图

Fig. 3 Control structure of control algorithm

2.2 改进粒子群优化算法基本原理

粒子群优化算法 (particle swarm optimization, PSO) 是一种进化计算技术^[7-16]，其基本原理如下：设在 m 维空间中有 n 个粒子，每个粒子的坐标为

$X_i=(x_{i1},x_{i2},\dots,x_{im})$ ，并具有与优化目标函数 $f(x)$ 相关的适应度(通常直接将目标函数视为粒子的适应度)，同时每个粒子具有各自的速度 $V_i=(v_{i1},v_{i2},\dots,v_{im})$ 。对于第 i 个粒子，其所经历的历史最好位置记为 $P_i=(p_{i1},p_{i2},\dots,p_{im})$ ，记全体所有粒子经过最好位置为 $P_g=(p_{g1},p_{g2},\dots,p_{gm})$ 。对第 t 代的第 i 个粒子，第 $t+1$ 代的第 j 维的速度和位置为

$$v_{ij}(t+1) = wv_{ij}(t) + r_1c_1[p_{ij} - x_{ij}(t)] + r_2c_2[g_{ij} - x_{ij}(t)] \quad (3)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (4)$$

式中： r_1 、 r_2 为 0~1 的随机数； w 为惯性系数，惯性系数的引入使 PSO 可以调节算法的全局与局部寻优能力，通常采用线性惯性权重； c_1 、 c_2 为加速度权重，正常数。

根据惯性权重法^[17-18]，惯性系数 w 在搜索过程中递减变化为

$$w = w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{K'_{\max}} K' \quad (5)$$

式中： w_{\max} 、 w_{\min} 分别表示惯性系数的最大值与最小值； K'_{\max} 为最大迭代步数； K' 为迭代步数。

2.3 基于神经网络粒子群优化的控制器参数优化算法

近年来，基于粒子群算法的优化 BP 网络的学习算法已经有很多研究，这些改进算法对加速收敛和避免局部极小有一定效果^[19-21]。然而这些算法只进行 BP 算法训练的前向传播过程，没有进行训练的误差反向传播的权值调整过程，一定程度上影响了系统的控制性能。其权值调整亦未采用梯度下降法，而是直接采用 PSO 迭代算法优化调整神经网络的权值，因而只是基于 PSO 优化的前向神经网络算法。因此，提出了将 BP 算法与 PSO 算法结合的优化算法，该算法可以克服基本 BP 算法收敛速度慢和易陷入局部极值的局限，而且控制精度较高，能够提高 BP 网络学习能力与泛化能力。

针对研究对象 SVC 系统，建立一个具有输入层、隐含层和输出层的 3 层 BP 神经网络，其结构如图 4 所示。网络输入为 U_{ref} 、 U_{rms} 、 U_{SL} 、 ΔU ；输出层神经元为 K_p 、 K_i 、 K_d 、 K_s ；隐含层神经元数目的范围为[3,12]。

利用反向传播算法减小 U_{ref} 与 U_{rms} 、 U_{SL} 的差，其差值为： $e(t) = U_{\text{ref}} - U_{\text{rms}} - U_{\text{SL}}$ 。误差函数定义为： $E(t) = e^2(t) = (U_{\text{ref}} - U_{\text{rms}} - U_{\text{SL}})^2$ 。对在[-1, 1]范围内随机产生网络权值矩阵的第 k 个网络($k=1,2,\dots,10$ ；

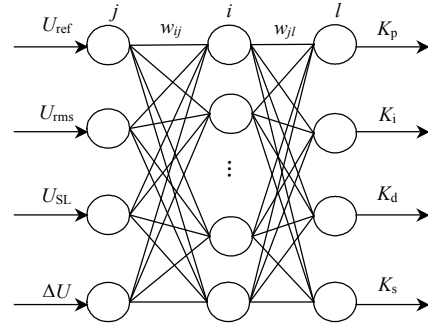


图 4 BP 神经网络结构

Fig. 4 The structure of BP neural network

10 为可能的神经网络结构的数目)，都采用学习率的 BP 网络权值学习算法进行训练，当全部样本每训练完一次后，计算 n_1 个训练样本误差为

$$E_1 = \frac{1}{n_1} \sum_{p=1}^{n_1} (U_{\text{ref}p} - U_{\text{rms}p} - U_{\text{SL}p})^2 \quad (6)$$

式中： n_1 为训练样本数目； $U_{\text{ref}p}$ 为系统参考电压的第 p 个样本值， $U_{\text{rms}p}$ 系统电压的方均根值的第 p 个样本值； $U_{\text{SL}p}$ 为 SVC 补偿电压的第 p 个样本值。

式(3)可另表示为

$$\begin{aligned} \Delta v_{ij}(t) &= v_{ij}(t+1) - v_{ij}(t) = \\ &= (w-1)v_{ij}(t) + r_1c_1[p_{ij} - x_{ij}(t)] + r_2c_2[g_{ij} - x_{ij}(t)] = \\ &= (w-1)[x_{ij}(t) - x_{ij}(t-1)] + r_1c_1[p_{ij} - x_{ij}(t)] + \\ &= r_2c_2[g_{ij} - x_{ij}(t)] \end{aligned} \quad (7)$$

式(7)表明：粒子相继 2 次速度的改变取决于粒子当前位置相对于历史最佳位置、群体历史最佳位置及前一时刻所处位置的变化。因此，若将神经网络的权值视为 PSO 算法中粒子的速度，则在网络训练中，相继 2 次权值的改变可视为粒子速度的改变。类比式(7)，网络权值修正量为

$$\Delta w_{li}(t) = (w-1)[w_{li}(t) - w_{li}(t-1)] + r_1c_1[w_{li}(b) - w_{li}(t)] + r_2c_2[w_{li}(g) - w_{li}(t)] \quad (8)$$

$$\Delta w_{ij}(t) = (w-1)[w_{ij}(t) - w_{ij}(t-1)] + r_1c'_1[w_{ij}(b) - w_{ij}(t)] + r_2c'_2[w_{ij}(g) - w_{ij}(t)] \quad (9)$$

式中： $w_{li}(b)$ 和 $w_{ij}(b)$ 为第 k 个网络所经历的历史上具有最小训练样本检验误差 E_1 时的网络权值； $w_{li}(g)$ 和 $w_{ij}(g)$ 为 10 个群体网络中历史上具有最小样本检验误差 E_1 时的权值； $w_{li}(t)$ 为 t 时刻输出层与隐含层的连接权值， $w_{ij}(t)$ 为 t 时刻隐含层与输入层的连接权值； E_1 为仍按式(4)得到的 n_1 个检验样本的方均误差。

定义网络隐含层的第 i 个神经元的输入、输出分别为 $net_i^{(2)} = \sum_{j=1}^4 w_{ij}x_j$ ， $O_i^{(2)} = f(net_i^{(2)})$ ，因而网络输出层的输入输出分别为

$$net_i^{(3)} = \sum_{i=1}^Q w_{ii} O_i^{(2)} \quad (10)$$

$$O_1^{(3)} = g(net_1^{(3)}) = K_p \quad (11)$$

$$O_2^{(3)} = g(net_2^{(3)}) = K_i \quad (12)$$

$$O_3^{(3)} = g(net_3^{(3)}) = K_d \quad (13)$$

$$O_4^{(3)} = g(net_4^{(3)}) = K_s \quad (14)$$

综合考虑 BP 算法与粒子群算法的共同效果, 得到新的网络权值学习算法为

$$\begin{cases} w_{ii}^{(3)}(t+1) = w_{ii}^{(3)}(t) + \beta \delta_i^{(3)} O_i^{(2)}(t) + \\ (w-1)[w_{ii}^{(3)}(t) - w_{ii}^{(3)}(t-1)] + r_1 c_1 [w_{ii}^{(3)}(b) - \\ w_{ii}^{(3)}(t)] + r_2 c_2 [w_{ii}^{(3)}(g) - w_{ii}^{(3)}(t)] \\ \delta_i^{(3)} = E(t) \operatorname{sgn}\left(\frac{\partial(U_{rms})}{\partial u(t)}\right) \frac{\partial u(t)}{\partial O_i^{(3)}(t)} g'[net_i^{(3)}(t)] \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} w_{ij}^{(2)}(t+1) = w_{ij}^{(2)}(t) + \beta \delta_i^{(2)} x_j^{(1)}(t) + \\ (w-1)[w_{ij}^{(2)}(t) - w_{ij}^{(2)}(t-1)] + r_1' c_1' [w_{ij}^{(2)}(b) - \\ w_{ij}^{(2)}(t)] + r_2' c_2' [w_{ij}^{(2)}(g) - w_{ij}^{(2)}(t)] \\ \delta_i^{(2)} = f'[net_i^{(2)}(t)] \sum_{l=1}^4 \delta_l^{(3)} w_{ij}^{(3)}(t) \end{cases} \quad (16)$$

式中: t 为采样时刻, 上角标(1)、(2)、(3)分别表示输入层、隐含层和输出层; $u(t)$ 为图 2 中控制器的输出; β 为学习率, 为[0,1]中 1 个常数。

输出层与隐含层激励函数均为 Sigmoid 函数:

$$\begin{cases} g(x) = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{e^{-x}}{e^x + e^{-x}}\right) \\ f(x) = \frac{e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} g'(x) = \frac{-1}{(e^x + e^{-x})^2} \\ f'(x) = \frac{-2}{(e^x + e^{-x})^2} \end{cases} \quad (18)$$

式(15)中 $\frac{\partial(U_{rms})}{\partial u(t)}$ 是 SVC 系统的雅克比信息。

由于 $\frac{\partial(U_{rms})}{\partial u(t)}$ 未知, 近似用符号函数 $\operatorname{sgn}\left(\frac{\partial(U_{rms})}{\partial u(t)}\right)$ 代替 $\frac{\partial(U_{rms})}{\partial u(t)}$, 由此带来计算不精确的影响可以通过学习速率 β 来补偿。

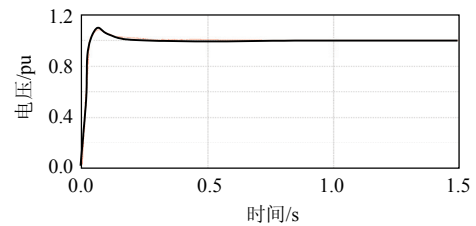
训练停止条件为: 当 $E_l \leq \varepsilon$ 时, ε 为检验精度, 停止训练, 此时得到的网络权值为最终权值。

3 仿真及实验结果

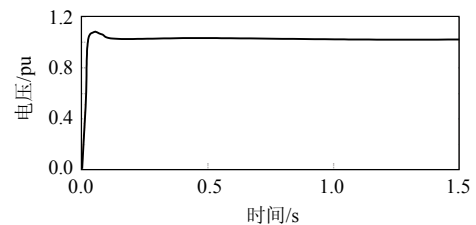
3.1 仿真结果

基于神经网络粒子群优化算法的改进 PID 的参数设置为: 选取 $C_1 = C_2 = 2$, w_{\max} 、 w_{\min} 分别取为

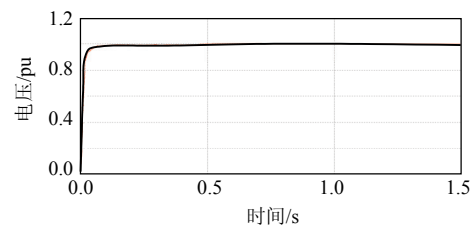
0.92 和 0.12, r_1 、 r_2 都取为 1, 神经网络最大迭代步数为 400, $c=0.05$ 、 $L=0.06$ 、 $c_1=c_2=2$ 、 $c_1'=c_2'=1.2$, 检验精度 ε 取 0.01, r_1 、 r_2 、 r_1' 、 r_2' 均为 (0,1) 内的随机数。依照以下程序进行优化: 为验证所提控制方法在 SVC 稳定电压控制中的有效性, 利用 PSIM 软件进行仿真。仿真参数为: 采用 50 Hz 三相 10 kV 交流电源供电, TCR 容量为 10 Mvar, FC 容量为 10 Mvar; 非线性负载为整流装置。电网三相平衡时, 系统在传统 PID、加入具有 K_s 环节 PID、粒子群算法的神经网络 PID 下的电压波形, 如图 5 所示, 其中 SVC 安装点电压(为三相电压方均根值)目标设定为 1 pu(基准电压为 8 000 V), 0.1 s 时投入 SVC。从图 5(a)可以看出, 传统 PID 电压在 0.25 s 时达到稳定, 但有一定的超调; 电压在 0.18 s 时达到稳定, 响应时间明显缩短, 但有一定的超调, 如图 5(b)所示; 电压在 0.16 s 时达到稳定, 且没有超调, 如图 5(c)所示。可见所提控制算法在抑制超调和提高响应速度上有明显优势。



(a) 传统 PID



(b) 加入 K_s 环节的 PID



(c) 加入 K_s 环节的神经网络粒子群优化 PID 电压波形

图 5 平衡负载下系统电压波形

Fig. 5 Response of system voltage under balanced load

3.2 实验结果

为了进一步验证控制方法的可行性搭建了 10 kV 高压静止无功补偿器试验样机, 控制系统采用非线性神经元控制算法, 对负荷进行无功补偿。

从工控机上的监视管理系统采集的 SVC 接入点

电压响应曲线如图6所示。图6(a)为投入SVC前的接入点电压波形,其中感性无功负荷在0.032s时突然投入引起接入点的电压跌落;图6(b)为采用传统PID优化方法的电压波形,SVC的投入对感性负荷的突然投入引起的电压跌落起到了补偿作用,但在瞬间补偿过大,使电压抬升超过了8000V,经过2.5个周期恢复到了正常值;图6(c)为采用控制方法的接入点电压波形,由于SVC的投入,公共连接点电压峰值经过1个周期时间恢复到8000V,电压没有过冲击,由感性负荷突然投入引起的电压跌落得到了很好的补偿,且响应速度比较理想,证明所提控制方法是有效、可行的。

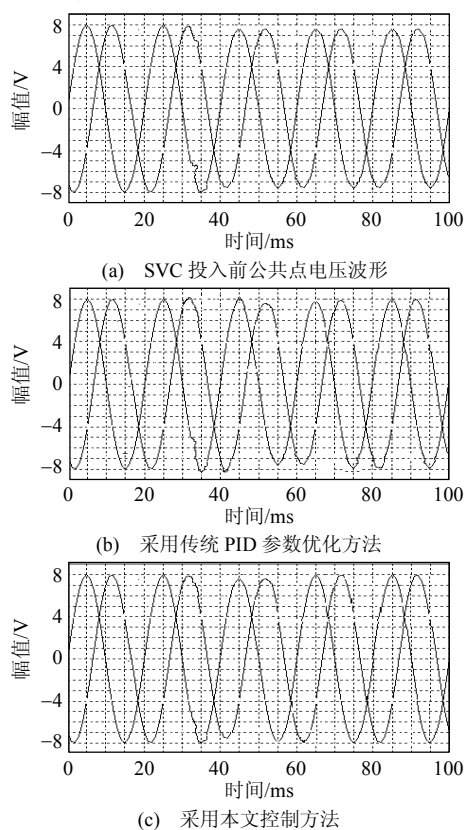


图6 SVC接入公共点电压响应曲线
Fig. 6 Voltage response curve of PCC

4 结论

针对传统PID控制器难以对设定值进行有变化的跟踪和对扰动进行抑制的缺陷,提出了一种基于神经网络粒子群优化算法的改进PID控制方法以实现公共连接点的电压稳定控制,其中基于神经网络粒子群算法对改进的PID控制器的参数进行优化,使得SVC系统的瞬态响应性能和控制性能达到最佳,引入非线性函数消除了系统的超调。结果表明,所提控制方法提高了SVC瞬态响应性能和控制性能,抑制了系统的超调。

参考文献

- [1] 罗安. 电网谐波治理和无功补偿技术及装备[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006: 183-187.
- [2] 吴杰. 大型电弧炼钢炉SVC方案设计及其实效效果[J]. 电网技术, 2003, 27(1): 76-79.
Wu Jie. Scheme design and practical effect of SVC for a large scale arc furnace[J]. Power System Technology, 2003, 27(1): 76-79(in Chinese).
- [3] 范高峰, 王纯琦, 乔元, 等. SVC补偿型定速风电机组模型及其特性分析[J]. 电网技术, 2007, 31(22): 64-68.
Fan Gaofeng, Wang Chunqi, Qiao Yuan, et al. Model of fixed speed wind turbine with SVC and its characteristic analysis[J]. Power System Technology, 2007, 31(22): 64-68(in Chinese).
- [4] 柯宁, 苏建设, 陈陈. TCSC与SVC用于提高输电系统暂态稳定性的仿真研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(1): 20-23.
Ke Ning, Su Jianshe, Chen Chen. Simulation study of TCSC and SVC to improve transient stability of transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(1): 20-23(in Chinese).
- [5] 任孟干. 高压晶闸管触发与在线监测系统的应用研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2002.
- [6] 刘金琨. 先进PID控制及其MATLAB仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003: 96-98.
- [7] 赵春晖, 肖晓俊. 克隆粒子群算法的镜像层叠滤波器的优化设计[J]. 智能系统学报, 2008, 3(2): 129-134.
Zhao Chunhui, Xiao Xiaojun. Optimizing stacked filters with mirrored threshold decomposition using an improved clone selection and PSO algorithm[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2008, 3(2): 129-134(in Chinese).
- [8] 高尚, 杨静宇. 混沌粒子群优化算法研究[J]. 模式识别与人工智能, 2006, 19(2): 266-270.
Gao Shang, Yang Jingyu. Research on chaos particle swarm optimization algorithm[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2006, 19(2): 266-270(in Chinese).
- [9] 吴方劫, 张承学, 段志远. 基于动态多种种群粒子群算法的无功优化[J]. 电网技术, 2007, 31(24): 35-39.
Wu Fangjie, Zhang Chengxue, Duan Zhiyuan. Application of modined particle swarm optimization in reactive power optimization[J]. Power System Technology, 2007, 31(24): 35-39(in Chinese).
- [10] 吴杰康, 朱健全. 求解电力库模式下竞价管理问题的改进粒子群算法[J]. 电网技术, 2006, 30(24): 56-60.
Wu Jiekang, Zhu Jianquan. A modified particle swarm optimization algorithm for bidding management in power pool environment[J]. Power System Technology, 2006, 30(24): 56-60(in Chinese).
- [11] 姚建红, 刘继承. 微粒子群算法在有源电力滤波器优化配置中应用[J]. 化工自动化及仪表, 2009, 36(1): 35-38.
Yao Jianhong, Liu Jicheng. Application of particle swarm algorithm in optima configuration of active power filter[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2009, 36(1): 35-38(in Chinese).
- [12] 李振坤, 陈星莺, 余昆, 等. 配电网重构的混合粒子群算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(31): 35-41.
Li Zhenkun, Chen Xingying, Yu Kun, et al. Hybrid particle swarm optimization for distribution network reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(31): 35-41(in Chinese).
- [13] 金义雄, 程浩忠, 严健勇, 等. 改进粒子群算法及其在输电网规划中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 46-70.
Jin Yixiong, Cheng Haozhong, Yan Jianyong, et al. Improved particle

- swarm optimization method and its application in power transmission network planning[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 46-70(in Chinese).
- [14] 刘佳, 李丹, 高立群, 等. 多目标无功优化的向量评价自适应粒子群算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(31): 22-28.
Liu Jia, Li Dan, Gao Liqun, et al. Vector evaluated adaptive particle swarm optimization algorithm for multi-objective reactive power optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(31): 22-28(in Chinese).
- [15] 金义雄, 程浩忠, 严健勇, 等. 基于局优分支优化的粒子群收敛保证算法及其在电网规划中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(23): 12-18.
Jin Yixiong, Cheng Haozhong, Yan Jianyong, et al. Local best embranchment based convergence guarantee particle swarm optimization and its use in transmission network planning[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(23): 12-18(in Chinese).
- [16] 黄海涛, 郑华, 张粒子. 基于改进粒子群算法的可用输电能力研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(20): 45-49.
Huang Haitao, Zheng Hua, Zhang Lizi. Study of available transfer capability based on improved particle swarm optimization [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(20): 45-49(in Chinese).
- [17] 江善和, 江巨浪, 吴磊. 基于粒子群算法的一种非线性 PID 控制器[J]. 计算机技术与发展, 2007, 17(4): 71-74.
Jiang Shanhe, Jiang Julang, Wu Lei. A nonlinear PID controller based on particle swarm tuning algorithm[J]. Computer technology and Development, 2007, 17(4) : 71-74(in Chinese).
- [18] Krusienski D J, Enkins W K. The application of particle swarm optimization to adaptive IIR phase equalization[C]//Proc of the 2004 ICASSP, PA USA, 2004: 693-696.
- [19] 宋乃华, 邢清华. 一种新的基于粒子群优化的 BP 网络学习算法[J]. 计算机工程, 2006, 32(14): 181-183.
Song Naihua, Xing Qinghua. A new learning algorithm of BP network based on particle swarm optimization[J]. Computer Engineering, 2006, 32(14): 181-183(in Chinese).
- [20] 李祚泳, 汪嘉杨, 郭淳. PSO 算法优化 BP 网络的新方法及仿真实验[J]. 电子学报, 2008, 36(11): 2224-2228.
Li Zuoyong, Wang Jiayang, Guo Chun. A new method of BP network optimized based on particle swarm optimization and simulation test[J]. Chinese of Journal Electronics, 2008, 36(11): 2224-2228(in Chinese).
- [21] 林志玲, 朱立忠, 张大鹏, 等. 基于粒子群广义神经网络的系统边际价格预测方法[J]. 电网技术, 2007, 31(1): 79-83.
Lin Zhiling, Zhu Lizhong, Zhang Dapeng, et al. A method of system marginal price forecasting by general regression neural network based on particle swarm optimization[J]. Power System Technology, 2007, 31(1): 79-83(in Chinese).



杨晓峰

收稿日期: 2010-10-15。

作者简介:

杨晓峰(1984), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统谐波抑制与无功补偿方面的研究, E-mail: yxf_oo@126.com;

罗安(1957), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力有源滤波、无功补偿及控制理论的研究;

彭楚武(1949), 男, 教授, 主要从事控制科学与工程学科中机电一体化、微机实时控制系统的研究;

吴敬兵(1982), 男, 博士研究生, 主要从事有源电力滤波器和无功补偿技术的研究;

杨翠翠(1985), 女, 硕士研究生, 主要从事电力系统无功补偿方面以及谐波治理方面的研究;

马伏军(1985), 男, 博士研究生, 主要从事高速铁路系统电能质量技术的研究

常亮亮(1983), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统无功补偿方面以及谐波治理方面的研究。

(编辑 张磊)