

DOI: 10.7667/PSPC170929

静止无功补偿器新型自适应动态规划电压控制

周晓华, 张 银, 刘胜永, 罗文广, 李振强

(广西科技大学电气与信息工程学院, 广西 柳州 545006)

摘要: 以静止无功补偿器电压控制非线性系统为研究对象, 提出了一种采用新型自适应动态规划 GrHDP 实现静止无功补偿器电压控制的方法。选取当前及历史时刻电压误差作为系统状态反馈向量, 根据外部增强信号及内部强化信号, GrHDP 利用误差反向传播算法对 3 个神经网络权值进行反馈调节并获取最优权值, 实现了静止无功补偿器的电压优化控制。在 Matlab/Simulink 仿真平台对执行依赖启发式动态规划 ADHDP、PI 控制和 GrHDP 进行了仿真对比。结果表明, 采用 GrHDP 的静止无功补偿器能快速补偿系统无功功率, 具有更好的电压控制效果, 控制系统响应速度快、自适应能力强。

关键词: 静止无功补偿器; 电压控制; 新型自适应动态规划; 执行依赖启发式动态规划; 电压调节器

Voltage control of static Var compensator based on novel adaptive dynamic programming

ZHOU Xiaohua, ZHANG Yin, LIU Shengyong, LUO Wenguang, LI Zhenqiang

(School of Electrical and Information Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, China)

Abstract: To remedy the defect of traditional PI controller in static Var compensator nonlinear voltage control system, a method based on novel adaptive dynamic programming, goal representation heuristic dynamic programming (GrHDP), is proposed to optimize control of SVC voltage control system adaptively. According to the external enhancement signal and the internal strengthening signal, the GrHDP algorithm uses error backward propagation to adjust the weights of the three neural networks and obtain the optimal weights in order to realize the optimal control of the system by selecting the current and historical voltage errors as the system state feedback vector. The Action Dependent Heuristic Dynamic Programming (ADHDP) and the GrHDP algorithm are used to design the voltage regulator of the SVC voltage control system respectively, and simulation comparison is carried out in Matlab/Simulink platform. The results show that the SVC voltage control system based on GrHDP algorithm can compensate reactive power quickly, and has better voltage stability and control effect. The control system has faster response speed and stronger adaptive ability.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61563006), Science and Technology Project of Guangxi (No. 1598008-2), and Natural Science Foundation of Guangxi (No. 2013GXNSFCA019020).

Key words: static Var compensator; voltage control; novel adaptive dynamic programming; action dependent heuristic dynamic programming; voltage regulator

0 引言

静止无功补偿器(Static Var Compensator, SVC)是一种常用的并联型柔性交流输电系统(Flexible AC Transmission System, FACTS)装置^[1]。它通过从电网吸收或向电网注入可连续调节的无功功率, 以

维持 SVC 装设点的电压恒定, 同时有利于电网无功功率的平衡。目前, SVC 以其性价比高、响应速度快和可靠性高等特点, 在电力系统中得到了广泛的应用^[2-3]。传统 PID 控制需确定的参数少, 且易于在工程中实现, 目前工程中 SVC 的电压控制一般采用传统的 PI 控制^[4], 以维持 SVC 所在线路的电压稳定。然而, 将传统 PID 控制应用于 SVC 这个非线性复杂系统, 将无法同时满足快速性和稳定性的要求, 也不能实现对 SVC 的精确控制^[5]。为此, 针对 SVC 的电压控制问题, 学者们提出了不同的控制策

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61563006); 广西科技攻关项目资助(1598008-2); 广西自然科学基金项目资助(2013GXNSFCA019020)

略,如模糊 PID 控制、蚁群优化 PI 控制、非线性 PI 控制、神经网络 PID 控制、神经网络控制、非线性控制、自适应动态规划^[6-13]等,以改善 SVC 的电压控制效果,并取得了一定的研究成果。其中,自适应动态规划(Adaptive Dynamic Programming, ADP)是近年来新兴起的一种近似最优控制方法。通过离线迭代或在线更新方式,ADP 能获得系统的近似最优控制,有效解决了非线性系统的优化控制问题。对于难于控制的高复杂性、多变量非线性电力系统,ADP 已有一些成功应用^[14]。

GrHDP(Goal Representation Heuristic Dynamic Programming)是由执行网络、目标网络和评价网络 3 个神经网络构成的一种新型自适应动态规划算法^[15]。GrHDP 算法的优势在于,除外部环境提供的增强信号 $r(k)$ 之外,可通过目标网络产生一个系统内部的强化信号 $S(k)$ 。由于 $S(k)$ 具有更好的适应性和精确性,能有效提高系统在线学习能力和优化系统控制策略的能力。目前,该算法已经应用于储能系统的低频振荡阻尼控制^[16]、风电场电力系统稳定控制^[17]、智能电网频率控制^[18]、电力系统动态等值^[19]和高压直流输电系统控制^[20-21]等领域,并获得了较好的效果。

在 SVC 控制方面,文献[12]采用 PID 神经网络设计了一种可借助已有 PID 参数指导控制器初值选取的直接启发式动态规划(Direct Heuristic Dynamic Programming, DHDP)算法,并用其实现了 SVC 的附加阻尼控制,有效抑制了互联电网的区间低频振荡。文献[13]采用小波神经网络和 BP 神经网络分别设计了执行依赖启发式动态规划(Action Dependent Heuristic Dynamic Programming, ADHDP)的执行网络和评价网络,并用其实现了 SVC 的电压控制,获得了较好的电压控制效果。本文采用 GrHDP 算法对 SVC 电压控制系统的电压调节器进行了设计,较好地实现了 SVC 的电压优化控制。通过对 GrHDP 电压调节器、ADHDP 电压调节器和 PI 电压调节器三者控制效果的仿真对比,验证了基于 GrHDP 算法的 SVC 电压控制方法的有效性和优越性。

1 GrHDP 原理简介

GrHDP 算法是在 ADHDP 算法结构的基础上发展起来的新型自适应动态规划算法,主要由执行网络、目标网络和评价网络三部分构成。在 ADHDP 算法结构的基础上,GrHDP 算法增加了一个目标网络,其结构^[22]如图 1 所示。执行网络的输入为被控对象的状态反馈向量 $X(k)$,输出为控制信号 $u(k)$;目标网络的输入为状态反馈向量 $X(k)$ 及控制信号

$u(k)$,输出为系统内部的强化信号 $S(k)$;评价网络的输入为状态反馈向量 $X(k)$ 、控制信号 $u(k)$ 及强化信号 $S(k)$,输出为代价函数 $J(k)$ 的估计值。

执行网络、目标网络和评价网络采用三层 BP 神经网络进行设计。根据外部环境提供的增强信号 $r(k)$ 和内部强化信号 $S(k)$,GrHDP 利用误差反向传播算法对 3 个神经网络的权值进行反馈调节,以获取最优权值从而使系统稳定并趋于最优化。

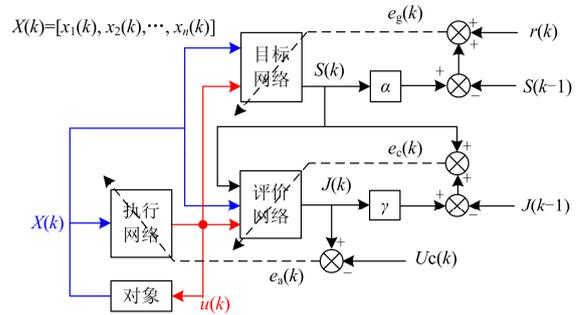


图 1 GrHDP 结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of GrHDP

2 基于 GrHDP 的 SVC 电压控制

2.1 SVC 电压控制原理

TSC+TCR 型 SVC 具有较快的反应速度和较高的运行可靠性,是目前应用较为广泛的静止无功补偿装置^[23]。其中,TSC 为晶闸管投切电容器(Thyristor Switched Sapacitor),TCR 为晶闸管控制电抗器(Thyristor Controlled Reactor)。TSC 支路可进行分组投切,通过与 TCR 支路相配合,可实现无功功率的连续调节。SVC 向系统注入的无功功率^[24-25]为

$$Q_{\text{SVC}} = [B_C - B_L(\alpha)]U^2 = B_{\text{SVC}}U^2 \quad (1)$$

其中

$$B_C = \omega C \quad (2)$$

$$B_L(\alpha) = \frac{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha}{\pi \omega L} \quad (3)$$

$$B_{\text{SVC}} = \frac{\pi \omega^2 LC - 2(\pi - \alpha) - \sin 2\alpha}{\pi \omega L} \quad (4)$$

式中: U 为 SVC 连接点电压; B_C 为 TSC 基波电纳; $B_L(\alpha)$ 为 TCR 等值基波电纳; B_{SVC} 为 SVC 的等值电纳; α 为晶闸管触发延迟角,且 $90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ 。

由式(1)和式(4)可知,SVC 向系统注入的无功功率 Q_{SVC} 、等值电纳 B_{SVC} 均是晶闸管触发角 α 的连续函数。通过调节 α 并改变投切 TSC 支路数,可连续改变 SVC 等值电纳 B_{SVC} ,从而改变 SVC 向系统注入的无功功率 Q_{SVC} ,最终起到调节和控制母线电压的作用^[26-27]。

SVC 控制系统通常由电压调节器、导纳计算、线性化和触发电路等环节构成。通过测量并输入参考电压与 SVC 安装点电压及电流反馈环节补偿电压三者的误差信号 ΔU , 电压调节器输出 SVC 的参考电纳 B_{ref} 。导纳计算环节根据参考电纳 B_{ref} 计算晶闸管触发角 α , 并确定 TSC 支路的投切状态, 最后经线性化和触发电路产生触发脉冲实现对 TSC 支路的投切及 TCR 支路晶闸管触发角的控制。

2.2 GrHDP 电压调节器设计

选择当前及历史时刻的电压误差 ΔU 作为系统的状态反馈向量 $\mathbf{X}(k)$ 。 ΔU 定义为

$$\Delta U = U_{\text{ref}} - U_m - X_S I_{\text{SVC}} \quad (5)$$

式中: U_{ref} 为 SVC 安装点参考电压; U_m 为 SVC 安装点电压方均根值; $U_{\text{SL}} = X_S I_{\text{SVC}}$ 为 SVC 补偿电压; X_S 为斜率阻抗, 取 $X_S = 0.01 \text{ p.u./100 MV}\cdot\text{A}$; I_{SVC} 为 SVC 输出电流。

1) 执行网络

执行网络采用图 2 所示的 3-6-1 结构 BP 神经网络设计, 其输入为系统状态反馈向量 $\mathbf{X}(k) = [\Delta U(k), \Delta U(k-1), \Delta U(k-2)]$, 输出控制信号 $\Delta B_{\text{ref}}(k)$ 。 $w_a^{(1)}$ 为输入层与隐含层间的权值, $w_a^{(2)}$ 为隐含层与输出层间的权值。隐含层和输出层神经元的激活函数均为求和函数和 sigmoid 函数。

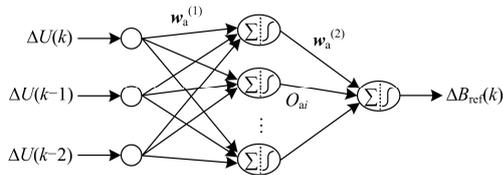


图 2 执行网络结构

Fig. 2 Structure of action network

执行网络输出的控制量 $\Delta B_{\text{ref}}(k)$ 按式(6)计算^[28]。

$$\Delta B_{\text{ref}}(k) = \frac{1 - e^{-\sum_{i=1}^6 w_{ai}^{(2)}(k) O_{ai}(k)}}}{1 + e^{-\sum_{i=1}^6 w_{ai}^{(2)}(k) O_{ai}(k)}} \quad (6)$$

其中

$$O_{ai}(k) = \frac{1 - e^{-\sum_{j=1}^3 w_{aij}^{(1)}(k) x_{aj}(k)}}}{1 + e^{-\sum_{j=1}^3 w_{aij}^{(1)}(k) x_{aj}(k)}}, i = 1, 2, \dots, 6 \quad (7)$$

式中: $O_{ai}(k)$ 为隐含层第 i 个神经元的输出; $x_{aj}(k)$ 为输入层第 j 个神经元的输入, 且 $j=1, 2, 3$ 。

执行网络的权值采用梯度下降法进行调整, 具体算法为

$$w_{ai,j}^{(1)}(k) = w_{ai,j}^{(1)}(k-1) - l_a \frac{\partial E_a(k)}{\partial w_{ai,j}^{(1)}(k)} \quad (8)$$

$$w_{ai}^{(2)}(k) = w_{ai}^{(2)}(k-1) - l_a \frac{\partial E_a(k)}{\partial w_{ai}^{(2)}(k)} \quad (9)$$

式中: l_a 为执行网络的学习速率; $E_a(k)$ 为执行网络的误差函数, 其定义式如下

$$E_a(k) = \frac{1}{2} [J(k) - U_c(k)]^2 \quad (10)$$

式中: $J(k)$ 为代价函数, 其值由评价网络估算得到; $U_c(k)$ 为效用函数, 且 $U_c(k)=0$ 。

2) 目标网络

目标网络采用图 3 所示的 4-6-1 结构 BP 神经网络设计, 其输入向量为 $[\mathbf{X}(k), \Delta B_{\text{ref}}(k)]$, 输出为内部强化信号 $S(k)$ 。 $w_g^{(1)}$ 为输入层与隐含层间的权值, $w_g^{(2)}$ 为隐含层与输出层间的权值。隐含层和输出层神经元的激活函数均为求和函数和 sigmoid 函数。

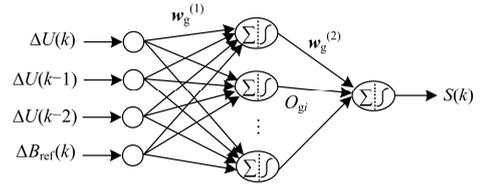


图 3 目标网络结构

Fig. 3 Structure of goal representation network

内部强化信号 $S(k)$ 按式(11)计算。

$$S(k) = \frac{1 - e^{-\sum_{i=1}^6 w_{gi}^{(2)}(k) O_{gi}(k)}}}{1 + e^{-\sum_{i=1}^6 w_{gi}^{(2)}(k) O_{gi}(k)}} \quad (11)$$

其中

$$O_{gi}(k) = \frac{1 - e^{-\sum_{j=1}^4 w_{gij}^{(1)}(k) x_{gj}(k)}}}{1 + e^{-\sum_{j=1}^4 w_{gij}^{(1)}(k) x_{gj}(k)}}, i = 1, 2, \dots, 6 \quad (12)$$

式中: $O_{gi}(k)$ 为隐含层第 i 个神经元的输出; $x_{gj}(k)$ 为输入层第 j 个神经元的输入, 且 $j=1, 2, \dots, 4$ 。

目标网络的权值用梯度下降法进行调整, 具体算法为

$$w_{gi,j}^{(1)}(k) = w_{gi,j}^{(1)}(k-1) - l_g \frac{\partial E_g(k)}{\partial w_{gi,j}^{(1)}(k)} \quad (13)$$

$$w_{gi}^{(2)}(k) = w_{gi}^{(2)}(k-1) - l_g \frac{\partial E_g(k)}{\partial w_{gi}^{(2)}(k)} \quad (14)$$

式中: l_g 为目标网络的学习速率; $E_g(k)$ 为目标网络的误差函数, 其定义式如下

$$E_g(k) = \frac{1}{2} [S(k-1) - \alpha S(k) - r(k)]^2 \quad (15)$$

式中: $S(k-1)$ 为 $(k-1)$ 时刻的内部强化信号; α 为目标网络的折扣因子, 取 $\alpha=0.95$ 。

3) 评价网络

评价网络采用图4所示的5-6-1结构BP神经网络设计,其输入向量为 $[\mathbf{X}(k), \Delta B_{\text{ref}}(k), S(k)]$,输出为代价函数 $J(k)$ 的估计值。 $w_c^{(1)}$ 为输入层与隐含层间的权值, $w_c^{(2)}$ 为隐含层与输出层间的权值。隐含层神经元的激活函数为求和函数和sigmoid函数,而输出层神经元的激活函数为求和函数。

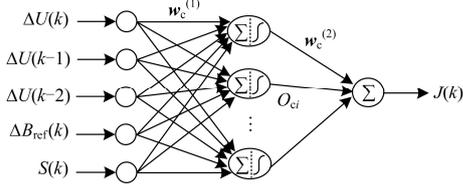


图4 评价网络

Fig. 4 Structure of critic network

代价函数 $J(k)$ 按式(16)计算。

$$J(k) = \sum_{i=1}^6 w_{ci}^{(2)} O_{ci}(k) \quad (16)$$

其中

$$O_{ci}(k) = \frac{1 - e^{-\sum_{j=1}^5 w_{ci,j}^{(1)}(k)x_{cj}(k)}}{1 + e^{-\sum_{j=1}^5 w_{ci,j}^{(1)}(k)x_{cj}(k)}}, i=1, 2, \dots, 6 \quad (17)$$

式中: $O_{ci}(k)$ 为隐含层第 i 个神经元的输出; $x_{cj}(k)$ 为输入层第 j 个神经元的输入,且 $j=1, 2, \dots, 5$ 。

评价网络的权值同样用梯度下降法进行调整,具体算法为

$$w_{ci,j}^{(1)}(k) = w_{ci,j}^{(1)}(k-1) - l_c \frac{\partial E_c(k)}{\partial w_{ci,j}^{(1)}(k)} \quad (18)$$

$$w_{ci}^{(2)}(k) = w_{ci}^{(2)}(k-1) - l_c \frac{\partial E_c(k)}{\partial w_{ci}^{(2)}(k)} \quad (19)$$

式中: l_c 为评价网络的学习速率; $E_c(k)$ 为评价网络的误差函数,其定义为

$$E_c(k) = \frac{1}{2} [J(k-1) - \gamma J(k) - S(k)]^2 \quad (20)$$

式中: $J(k-1)$ 为 $(k-1)$ 时刻的代价函数, γ 为评价网络的折扣因子,取 $\gamma=0.95$ 。

外部强化信号 $r(k)$ 的定义为

$$r(k) = -[\Delta U^2(k) + 0.4\Delta U^2(k-1) + 0.16\Delta U^2(k-2)] \quad (21)$$

电压调节器输出的控制量采用增量式^[29]

$$B_{\text{ref}}(k) = B_{\text{ref}}(k-1) + \Delta B_{\text{ref}}(k) \quad (22)$$

2.3 GrHDP 电压调节器学习和训练

1) 设定执行网络、目标网络和评价网络的初始权值为 $(-1, 1)$ 内的随机数;

2) 根据输入的系统状态反馈向量 $\mathbf{X}(k)$, 执行网

络计算 $\Delta B_{\text{ref}}(k-1)$ 和 $\Delta B_{\text{ref}}(k)$;

3) 根据输入的 $\mathbf{X}(k)$ 、 $\Delta B_{\text{ref}}(k-1)$ 及 $\Delta B_{\text{ref}}(k)$, 目标网络计算内部强化信号 $S(k-1)$ 和 $S(k)$;

4) 根据输入的 $\mathbf{X}(k)$ 、 $\Delta B_{\text{ref}}(k-1)$ 、 $\Delta B_{\text{ref}}(k)$ 、 $S(k-1)$ 及 $S(k)$, 评价网络计算代价函数 $J(k-1)$ 和 $J(k)$;

5) 计算外部强化信号 $r(k)$ 和目标网络误差 $E_g(k)$,按式(13)、式(14)调整目标网络的权值,并重新计算 $S(k)$,当 $E_g(k) \leq \varepsilon_r$ 时,转步骤6),否则循环步骤5);

6) 计算评价网络误差 $E_c(k)$,按式(18)、式(19)调整评价网络的权值,并重新计算 $J(k)$,当 $E_c(k) \leq \varepsilon_c$ 时,转步骤7),否则循环步骤6);

7) 计算执行网络误差 $E_a(k)$,按式(8)、式(9)调整执行网络的权值,并重新计算 $\Delta B_{\text{ref}}(k)$,当 $E_a(k) \leq \varepsilon_a$ 时,转步骤8),否则循环步骤7);

8) 输出电压调节器控制量 $B_{\text{ref}}(k)$ 。

3 控制策略仿真与分析

采用 Matlab 电力系统工具箱的 SVC 仿真系统进行仿真。仿真系统由短路容量 6 000 MVA、735 kV 电压源、线路及 200 MW 负荷串联组成, SVC 装置通过一台 735 kV/16 kV、333 MVA 的耦合变压器并联在负荷侧, SVC 包含一条 109 Mvar 的 TCR 支路和三条 94 Mvar 的 TSC 支路^[30-31]。为验证基于 GrHDP 算法的 SVC 电压控制效果,文中还采用 ADHDP 算法设计了 SVC 的电压调节器并进行了仿真对比。为便于比较,ADHDP 执行网络和评价网络同样采用三层 BP 神经网络设计。两种电压调节器的内部参数设置相同,见表 1 所示。

表 1 两种电压调节器的内部参数

Table 1 Internal parameters of two voltage regulators

调节器类型	网络模型	网络结构	学习率	误差限
GrHDP	目标网络	4-6-1	0.02	0.01
GrHDP	执行网络	3-6-1	0.01	0.4
ADHDP	执行网络	3-6-1	0.01	0.4
GrHDP	评价网络	5-6-1	0.02	0.01
ADHDP	评价网络	4-6-1	0.02	0.01

设定参考电压 $U_{\text{ref}}=1.0$ p.u., 当系统电压变化时, SVC 安装点电压 U_m 控制效果对比曲线如图 5 所示。

0~0.05 s 时, 系统电压保持为 1.0 p.u.不变, $U_m=1.0$ p.u.; 0.05 s 时, 系统电压突增到 1.025 p.u., 在电压调节器的控制作用下, U_m 被调低到 1.01 p.u., 由图可知, GrHDP 和 ADHDP 电压调节器的控制效果均优于 PI 调节器; 0.2 s 时, 系统电压突降到 0.93

p.u., 在电压调节器的控制作用下, U_m 被提升到 0.974 p.u., GrHDP 电压调节器的响应速度最快; 0.35 s 时, 系统电压恢复为 1.0 p.u., 在电压调节器的控制作用下, U_m 被调回到 1.0 p.u., GrHDP 调节器的电压控制效果最好。

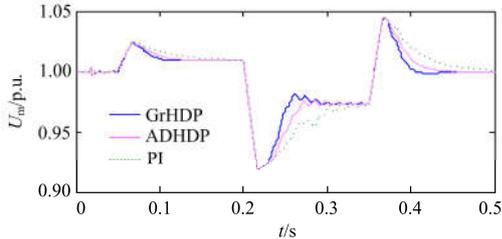


图 5 电压控制效果对比

Fig. 5 Control performance of voltage

SVC 注入系统的无功功率变化曲线如图 6 所示。0.05 s 系统电压突增时, SVC 吸收系统无功功率以调低电压 U_m ; 0.2 s 系统电压突降时, SVC 向系统注入无功功率以提升电压 U_m ; 0.35 s 系统电压恢复为 1.0 p.u. 时, SVC 向系统注入的无功功率为 0。基于 GrHDP 的 SVC 电压控制策略可更好地实现无功功率的快速补偿。

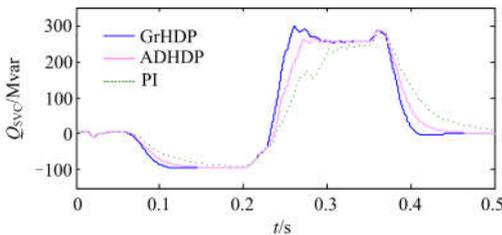


图 6 SVC 注入系统无功功率

Fig. 6 Injection reactive-power into system

SVC 的 TSC 支路投入数 n_{TSC} 的变化曲线如图 7 所示。

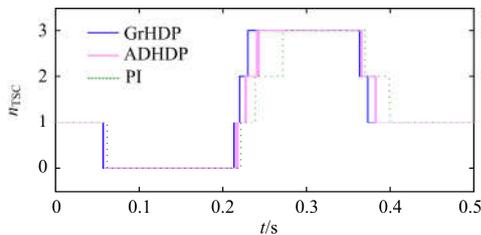


图 7 TSC 支路投入数目

Fig. 7 The number of TSC branch input

$n_{TSC}=0$ 时, 3 条 TSC 支路全部退出运行; $n_{TSC}=1$ 时, TSC1 支路投入运行; $n_{TSC}=2$ 时, TSC1 和 TSC2 支路投入运行; $n_{TSC}=3$ 时, TSC1、TSC2 和 TSC3

支路投入运行。由图可知, ADHDP 和 GrHDP 控制下的 SVC 都能迅速地投入或切除 TSC 支路, 实现了无功功率的快速补偿和调节。相比之下, GrHDP 控制下的 TSC 支路投切速度更快、稳定性更好。

TCR 触发延迟角 α 变化曲线如图 8 所示。 α 在 $[90^\circ, 180^\circ]$ 内变化, 通过与 TSC 支路相配合, TCR 可吸收系统多余的无功功率, 实现了系统无功功率的平滑调节。

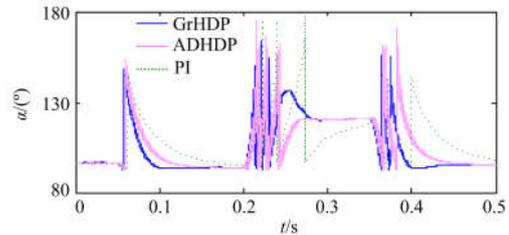
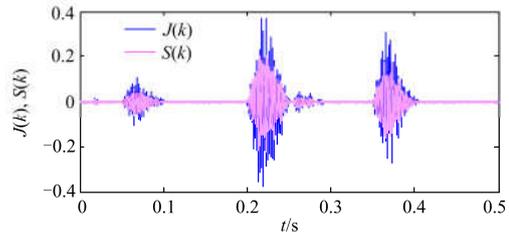


图 8 TCR 触发角

Fig. 8 TCR firing angle

GrHDP 电压调节器的代价函数 $J(k)$ 和内部强化信号 $S(k)$ 变化曲线如图 9 所示。由图可见, 当系统电压变化时, 代价函数 $J(k)$ 和内部强化信号 $S(k)$ 曲线的收敛速度较快。

图 9 GrHDP 的 $J(k)$ 和 $S(k)$ 曲线Fig. 9 Curve of $J(k)$ and $S(k)$ for GrHDP

系统电源电压保持不变, 负荷侧发生三相短路故障时, SVC 安装点电压 U_m 的控制效果曲线对比如图 10 所示。由图 10 可知, 三相短路故障发生后, 电压 U_m 跌落至 0.154 p.u., 控制系统通过投入 TSC 支路增加了 SVC 向系统注入的无功功率以提升 SVC 安装点电压。故障切除后, SVC 安装点电压 U_m 被调回到 1.0 p.u.。GrHDP 和 ADHDP 算法均较好地实现了 SVC 对系统电压的稳定和控制作用。相比之下, GrHDP 算法的调节时间相对较短, 超调较小。

图 11 所示为 SVC 注入系统无功功率的变化曲线。三相短路发生后, 通过投入 TSC 支路, SVC 增加向系统注入的无功功率以提升 SVC 安装点电压。故障切除后, 在 SVC 调压作用下, SVC 安装点电压 U_m 稳定在 1.0 p.u., 此时, 通过切除 TSC 支路, SVC 向系统注入的无功功率减少到 0。

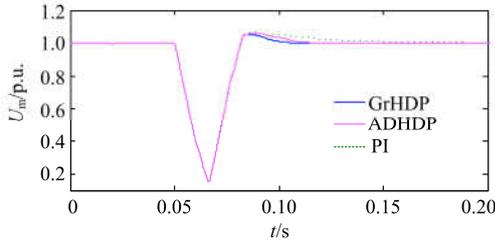


图10 电压控制效果对比

Fig. 10 Control performance of voltage

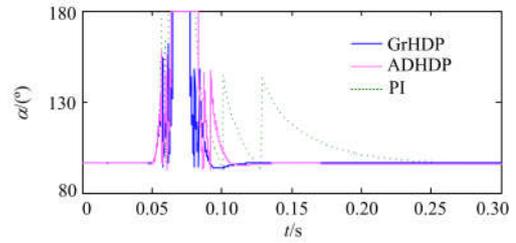


图 13 TCR 触发角

Fig. 13 TCR firing angle

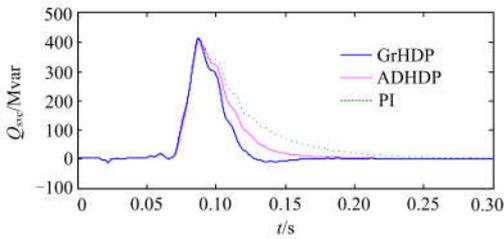


图 11 SVC 注入系统无功功率

Fig. 11 SVC injection reactive-power into system

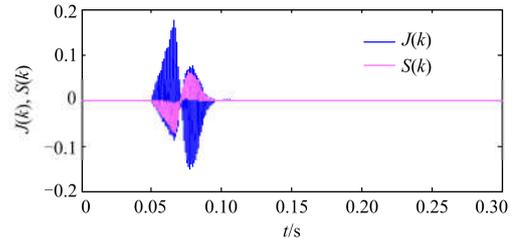


图 14 GrHDP 的 $J(k)$ 和 $S(k)$ 曲线

Fig. 14 Curve of $J(k)$ and $S(k)$ for GrHDP

TSC支路投入数 n_{TSC} 的变化曲线如图12所示。三相短路发生前，TSC1支路投入运行， $n_{TSC}=1$ ；三相短路发生后， n_{TSC} 由1变为2，再变为3，TSC2、TSC3支路相继投入，以增加SVC向系统注入的无功功率。故障切除后， n_{TSC} 由3变为2，再变为1，TSC3、TSC2支路相继退出运行，SVC向系统注入的无功功率减少。

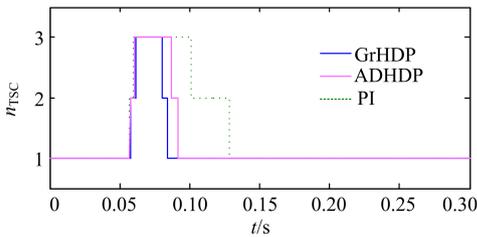


图 12 TSC 支路投入数目

Fig. 12 The number of TSC branch input

TCR 触发角 α 变化曲线如图 13 所示。TCR 触发角 α 在 $[95^\circ, 180^\circ]$ 内变化，与 TSC 支路相互配合，实现了 TCR 支路对系统多余无功功率的吸收。

GrHDP 电压调节器的代价函数 $J(k)$ 和内部强化信号 $S(k)$ 变化曲线如图 14 所示。在三相短路故障情况下，代价函数 $J(k)$ 和内部强化信号 $S(k)$ 均能快速收敛，较好地实现了 SVC 对安装点电压 U_m 的稳定和控制作用。

4 结论

针对静止无功补偿器 SVC 非线性系统电压控制问题，本文提出了一种采用新型自适应动态规划 GrHDP 实现 SVC 电压控制的方法。为验证基于 GrHDP 的 SVC 电压控制能力，文中还采用 ADHDP 设计了 SVC 的电压调节器并进行了仿真对比。仿真验证了基于 GrHDP 的 SVC 控制系统能快速投切 TSC 支路和调节 TCR 触发角 α ，实现了 SVC 无功功率的快速补偿和平滑调节，更好地实现了调节和控制 SVC 母线电压的目标。与 ADHDP 相比，GrHDP 具有更快的响应速度、更好的动态和静态稳定性，控制效果更好。为提高算法执行效率，文中选择了较少的神经网络隐含层节点数，实际应用中可根据经验并通过反复仿真调试加以确定。

参考文献

- [1] 米阳, 马超, 符杨, 等. 基于滑模观测器的孤岛风柴混合电力系统 SVC 滑模补偿控制器设计[J]. 电网技术, 2017, 41(1): 178-186.
MI Yang, MA Chao, FU Yang, et al. Design of SVC sliding mode compensation controller in isolated wind-diesel hybrid power system based on sliding mode observer[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 178-186.
- [2] 马伏军, 罗安, 曾灿林, 等. 基于快速等效电纳计算的静止无功补偿器复合控制方法[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 140-145.
MA Fujun, LUO An, ZENG Canlin, et al. Research on

- closed-loop control method for static var compensation based on fryze-buchholz-depenbrock algorithm[J]. Power System Technology, 2012, 36(1): 140-145.
- [3] 李自明, 姚秀萍, 王海云, 等. 计及风电场静态电压稳定性的 VMP 系统无功电压控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 77-83.
LI Ziming, YAO Xiuping, WANG Haiyun, et al. Study on reactive power and voltage control strategy of VMP system considering static voltage stability of wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 77-83.
- [4] 周红婷, 宋玮. 计及动态无功控制影响的大规模风电汇集地区电压稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 13-18.
ZHOU Hongting, SONG Wei. Analysis on voltage stability in large-scale wind farms integration area considering impact of dynamic reactive power control[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 13-18.
- [5] 付伟, 刘天琪, 李兴源, 等. 静止无功补偿器运行特性分析和控制方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 147-154.
FU Wei, LIU Tianqi, LI Xingyuan, et al. Analysis of operating characteristic and survey of control methods used in static var compensator[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22): 147-154.
- [6] 曾光, 苏彦民, 柯敏倩, 等. 用于无功静补系统的模糊 PID 控制方法[J]. 电工技术学报, 2006, 21(6): 40-43.
ZENG Guang, SU Yanmin, KE Minqian, et al. A hybrid fuzzy and PID control method for static var compensation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(6): 40-43.
- [7] 盘宏斌, 罗安, 涂春鸣, 等. 蚁群优化 PI 控制器在静止无功补偿器电压控制中的应用[J]. 电网技术, 2008, 32(18): 41-46.
PAN Hongbin, LUO An, TU Chunming, et al. Application of ant colony optimized PI controller in voltage control of static reactive power compensator[J]. Power System Technology, 2008, 32(18): 41-46.
- [8] 徐先勇, 罗安, 方璐, 等. 静止无功补偿器的新型最优非线性比例积分电压控制[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(1): 80-86.
XU Xianyong, LUO An, FANG Lu, et al. New optimal nonlinear PI voltage controller for SVC[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(1): 80-86.
- [9] 杨晓峰, 罗安, 彭楚武, 等. 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[J]. 电网技术, 2011, 35(6): 65-70.
YANG Xiaofeng, LUO An, PENG Chuwu, et al. Application of an improved PID control based on neural network learning algorithm and particle swarm optimization in high voltage static VAR compensators[J]. Power System Technology, 2011, 35(6): 65-70.
- [10] 马兆兴, 万秋兰, 李洪美, 等. 基于神经网络的 SVC 电压稳定性控制[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(18): 67-71.
MA Zhaoxing, WAN Qiulan, LI Hongmei, et al. A voltage stability control method of SVC based on neural network[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(18): 67-71.
- [11] 刘艳红, 楚冰, 汤洪海. 基于结构保留模型的静止无功补偿器鲁棒非线性控制[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(4): 49-53.
LIU Yanhong, CHU Bing, TANG Honghai. Robust nonlinear control of static var compensator based on structure preserving model[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(4): 49-53.
- [12] 孙健, 刘锋, SI Jennie, 等. 一种改进的近似动态规划方法及其在 SVC 的应用[J]. 电机与控制学报, 2011, 15(5): 95-102.
SUN Jian, LIU Feng, SI Jennie, et al. An improved approximate dynamic programming and its application in SVC control[J]. Electric Machines and Control, 2011, 15(5): 95-102.
- [13] 周晓华, 罗文广, 刘胜永, 等. 静止无功补偿器自适应动态规划电压控制方法[J]. 电网技术, 2017, 41(3): 895-900.
ZHOU Xiaohua, LUO Wenguang, LIU Shengyong, et al. Voltage control method of static var compensator based on adaptive dynamic programming[J]. Power System Technology, 2017, 41(3): 895-900.
- [14] 张化光, 张欣, 罗艳红, 等. 自适应动态规划综述[J]. 自动化学报, 2013, 39(4): 303-311.
ZHANG Huaguang, ZHANG Xin, LUO Yanhong, et al. An overview of research on adaptive dynamic programming[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(4): 303-311.
- [15] HE H, NI Z, FU J. A three-network architecture for on-line learning and optimization based on adaptive dynamic programming[J]. Neurocomputing, 2012, 78(1): 3-13.
- [16] SUI X, TANG Y, HE H, et al. Energy-storage-based low-frequency oscillation damping control using particle swarm optimization and heuristic dynamic programming[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(5): 2539-2548.
- [17] TANG Y, HE H, WEN J, et al. Power system stability control for a wind farm based on adaptive dynamic programming[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(1): 166-177.

- [18] TANG Y, YANG J, YAN J, et al. Intelligent load frequency controller using GrHDP for island smart grid with electric vehicles and renewable resources[J]. Neurocomputing, 2015, 170: 406-416.
- [19] 杜治, 苏宇, 彭昌勇, 等. 基于多层次启发式动态规划算法的电力系统动态等值[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(17): 1-9.
DU Zhi, SU Yu, PENG Changyong, et al. Dynamic equivalent of power system based on global representation heuristic dynamic programming algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(17): 1-9.
- [20] TANG Y, HE H, NI Z, et al. Adaptive modulation for DFIG and STATCOM with high-voltage direct current transmission[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2016, 27(8): 1762-1772.
- [21] 沈郁, 陈伟彪, 姚伟, 等. 采用新型自适应动态规划算法的柔性直流输电附加阻尼控制[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3768-3774.
SHEN Yu, CHEN Weibiao, YAO Wei, et al. Supplementary damping control of VSC-HVDC transmission system using a novel heuristic dynamic programming[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3768-3774.
- [22] ZHONG X, NI Z, HE H. A theoretical foundation of goal representation heuristic dynamic programming[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2016, 27(12): 2513-2525.
- [23] 王艳, 王东, 焦彦军, 等. 中压配电网无功补偿装置对 PLC 信道特性的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 62-68.
WANG Yan, WANG Dong, JIAO Yanjun, et al. Analysis of PLC channel characteristics of reactive power compensation equipment in medium-voltage distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 62-68.
- [24] 周晓华, 王琦, 王荔芳, 等. 静止无功补偿器的神经元变结构 PID 控制策略[J]. 电测与仪表, 2015, 52(10): 61-65.
ZHOU Xiaohua, WANG Qi, WANG Lifang, et al. Neuron variable structural PID control strategy for SVC[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(10): 61-65.
- [25] 邹延生, 董萍. 一种基于协同控制的 SVC 新型非线性控制器[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 10-17.
ZOU Yansheng, DONG Ping. Design of an innovative SVC nonlinear controller based on synergetic control[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 10-17.
- [26] 李娟, 黄喜旺, 关程宇, 等. SVC 和 IPC 联合改善异步机风电场的电压稳定性[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(8): 79-84.
LI Juan, HUANG Xiwang, GUAN Chengyu, et al. Improvement of voltage stability of asynchronous wind farms based on SVC and IPC[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2016, 28(8): 79-84.
- [27] 张东辉, 金小明, 周保荣, 等. PSS/E 的自定义建模及其仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 82-87.
ZHANG Donghui, JIN Xiaoming, ZHOU Baorong, et al. User-defined modeling in PSS/E and its applicability in simulations[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 82-87.
- [28] 方啸. GrHDP 算法的研究及其在虚拟交互中的应用[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2014.
- [29] 郑文迪, 蔡金锭, 刘丽军. 基于 ADP 的复合燃料电池发电系统控制策略[J]. 电工电能新技术, 2013, 32(3): 51-56.
ZHENG Wendi, CAI Jinding, LIU Lijun. Control strategy on hybrid fuel cell generation system based on ADP[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2013, 32(3): 51-56.
- [30] 唐酿, 肖湘宁, 陈众. 基于 Sugeno 模糊推理的静止无功补偿器多模态切换方法[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 140-143.
TANG Niang, XIAO Xiangning, CHEN Zhong. A method of multi-mode switching for SVC based on Sugeno fuzzy inference[J]. Power System Technology, 2011, 35(8): 140-143.
- [31] 周晓华, 王荔芳, 覃金飞, 等. 基于改进单神经元 PID 的 SVC 电压调节器[J]. 电测与仪表, 2011, 48(9): 73-77.
ZHOU Xiaohua, WANG Lifang, QIN Jinfei, et al. Voltage regulator based on improved single neuron adaptive PID for SVC[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2011, 48(9): 73-77.

收稿日期: 2017-06-21; 修回日期: 2017-10-05

作者简介:

周晓华(1976—), 男, 通信作者, 硕士, 副教授, 研究方向为电力系统智能控制、电机控制等; E-mail: zhxxh76@126.com

张银(1986—), 男, 硕士, 讲师, 研究方向为电能质量检测、电机故障检测等; E-mail: zhangyin0830@126.com

刘胜永(1976—), 男, 博士, 教授, 研究方向为智能控制、新能源发电与控制。E-mail: liusypp@163.com

(编辑 姜新丽)