

文章编号: 1001-0920(2013)12-1894-04

## TCSC 系统的自适应 minimax 干扰抑制控制器设计

刘 婷, 井元伟, 姜 囡, 张嗣瀛

(东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110819)

**摘 要:** 针对含有未知外部干扰和不确定参数的非线性晶闸管控制串联补偿器 (TCSC) 系统, 提出一种  $L_2$  增益干扰抑制算法. 将 minimax 方法引入耗散 Hamilton 系统, 消除了不等式假设条件的约束; 构造检验函数, 推算出系统所能承受的最大干扰程度, 降低了传统干扰处理方法的保守性; 采用参数映射方法设计自适应律, 提高了参数跟踪效率. 最后通过机械功率和对地短路故障的仿真结果表明了所提出的控制方案能够有效改善系统的暂态性能.

**关键词:** 晶闸管控制串联补偿器; 耗散 Hamilton 系统;  $L_2$  增益干扰抑制; minimax; 参数映射

中图分类号: TP273

文献标志码: A

### Adaptive minimax disturbance attenuation controller design for TCSC system

LIU Ting, JING Yuan-wei, JIANG Nan, ZHANG Si-ying

(College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Correspondent: JING Yuan-wei, E-mail: jingyuanwei@ise.neu.edu.cn)

**Abstract:** An  $L_2$  gain disturbance attenuation algorithm and a parameter estimation method are investigated for nonlinear thyristor controlled series capacitor (TCSC). The restriction of assumption inequality is eliminated by introducing the minimax method into the dissipative Hamiltonian system. With the test function formed, the worst-case disturbance can be calculated, accordingly the conservativeness brought by conventional disturbance treatment is significantly reduced. Meanwhile, the parameter projection mechanism is used to design adaptive law to enhance the efficiency of the parameter tracking error convergence. By considering the mechanical power perturbation and short-circuit ground fault, simulation results show that the proposed scheme can effectively improve the transient performance of the system.

**Key words:** thyristor controlled series capacitor (TCSC); dissipative Hamiltonian system;  $L_2$  gain disturbance attenuation; minimax; parameter projection

## 0 引 言

晶闸管控制串联补偿器 (TCSC) 作为一种常用的柔性交流输电装置, 能够经济高效地提升电网输电能力. 然而, 电力系统难以避免要受到突发性大干扰的影响, 因此对 TCSC 鲁棒控制器的设计问题进行深入研究具有重要意义. 基于系统能量的 Hamilton 方法已广泛应用于 TCSC 系统鲁棒控制的设计<sup>[1]</sup>; 采用预置反馈方法, 能够巧妙构造 TCSC 系统的端口受控 Hamilton 模型<sup>[2]</sup>; 耗散 Hamilton 系统理论成功地解决了 TCSC 等电力系统的  $L_2$  增益干扰抑制问题<sup>[3-4]</sup>. 然而, 在设计过程中大都限定系统结构参数的不等式假设条件, 这些条件在工程实际中往往难以实现. 对于 TCSC 系统存在的干扰, 一般在能量函数中将干

扰相关的项通过不等式放缩掉<sup>[5-6]</sup>, 这样处理会使得假设条件强化, 从而增加了保守性. 另外, 人为施加一个上界也是一种常用的干扰处理方法<sup>[7-8]</sup>, 但由于很难精确测量干扰值, 假设的上界有时是不合理的. minimax 方法能够有效抑制突发性的大干扰<sup>[9]</sup>, 与 Backstepping 方法相结合, 在 TCSC 系统中取得了理想的控制效果<sup>[10]</sup>, 但在逆推设计过程中容易产生计算膨胀的问题. 因此, 将 minimax 理论与 Hamilton 函数方法相结合, 是一种解决 TCSC 系统干扰抑制问题的有效途径.

针对 TCSC 系统参数不确定问题, 常规自适应设计方法往往忽略未知参数的取值范围<sup>[10-11]</sup>, 容易导致参数在无效的区间进行跟踪, 使误差收敛速度缓慢.

收稿日期: 2012-10-11; 修回日期: 2013-04-15.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61304021); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(N110404032, N110417005).

作者简介: 刘婷(1984—), 女, 博士生, 从事电力系统非线性鲁棒控制的研究; 井元伟(1956—), 男, 教授, 博士生导师, 从事非线性控制理论、网络通信系统等研究.

参数映射机制充分考虑并利用了未知参数的可知上下界信息<sup>[12-13]</sup>, 大大提高了参数估计的效率。

本文针对非线性 TCSC 系统, 基于耗散 Hamilton 理论设计鲁棒控制器. 采用 minimax 方法处理干扰项, 构造与性能指标相关的检验函数, 以充分估计突发性大干扰对系统的影响, 有效降低传统干扰处理方法的保守性. 同时, 通过引入辅助变量, 采用参数映射机制设计自适应律, 以保证未知参数在有效区间内进行跟踪, 缩短收敛时间. 数值仿真分析结果表明, 所提出的控制策略能有效改善系统的暂态性能和对大干扰的不敏感性.

## 1 TCSC 系统 Hamilton 模型建立

TCSC 单机无穷大系统的数学模型如下<sup>[2]</sup>:

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega_s \omega, \\ \dot{\omega} = \frac{1}{M} [P_m - E'_q V_s y_{\text{tcsc}} \sin \delta - D\omega] + \varepsilon_1, \\ \dot{y}_{\text{tcsc}} = \frac{1}{T_{\text{tcsc}}} (-y_{\text{tcsc}} + y_{\text{tcsc}0} + u) + \varepsilon_2. \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $\delta$  为发电机转子运行角;  $\omega_s$  为同步角速度,  $\omega$  为转子角速度与同步角速度的偏差;  $M$  为转动惯量;  $P_m$  为发电机的机械功率;  $D$  为阻尼系数;  $E'_q$  为发电机  $q$  轴暂态电势;  $V_s$  为无穷大母线电压;  $y_{\text{tcsc}}$  为系统的导纳;  $T_{\text{tcsc}}$  为惯性时间常数;  $u$  为等效控制;  $\varepsilon_1$  和  $\varepsilon_2$  为属于  $L_2$  空间的函数, 表示未知干扰.

令  $x_1 = \delta, x_2 = \omega, x_3 = y_{\text{tcsc}}$ , 假定系统(1)的平衡点为  $(x_{10}, x_{20}, x_{30})$ . 为使系统(1)具有 Hamilton 结构, 根据文献[2]的结论, 构造预置反馈控制输入

$$u = K_u E'_q V_s (\cos x_1 - \cos x_{10}) + u_0, \quad (2)$$

其中  $K_u$  为待设计的控制器参数. 构造 TCSC 系统的 Hamilton 能量函数如下:

$$H(x) = \frac{1}{2} M \omega_s x_2^2 - P_m (x_1 - x_{10}) - E'_q V_s x_3 (\cos x_1 - \cos x_{10}) + \frac{1}{2K_u} (x_3 - x_{30})^2. \quad (3)$$

当  $x_3 \cos x_1 > K_u E'_q V_s \sin^2 x_1$  时,  $H(x)$  在稳态平衡点的邻域内具有极小值. 进一步定义如下矩阵:

$$J(x) = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{M} & 0 \\ -\frac{1}{M} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad R(x) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{D}{M^2 \omega_s} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K_u}{T_{\text{tcsc}}} \end{bmatrix},$$

显然  $J = -J^T, R \geq 0$ . 考虑到阻尼系数  $D$  难以精确测量, 令  $\theta = D$  表示未知参数, 则  $R(x) = R_1(x) + R_2(x)$ . 其中

$$R_1(x) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K_u}{T_{\text{tcsc}}} \end{bmatrix}, \quad R_2(x) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\theta}{M^2 \omega_s} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

定义系统(1)的调节输出为  $z(x)$ , 综上所述可以得到

TCSC 系统的 Hamilton 形式如下:

$$\dot{x} = [J(x) - R(x)] \frac{\partial H}{\partial x} + G_1(x) u_0 + G_2(x) \varepsilon, \quad (4)$$

$$z = h(x) G_1^T(x) \frac{\partial H}{\partial x}. \quad (5)$$

其中

$$G_1(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{T_{\text{tcsc}}} \end{bmatrix}, \quad G_2(x) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \end{bmatrix},$$

$$h(x) = [q_1(x_1 - x_{10}) \quad q_2(x_2 - x_{20}) \quad q_3(x_3 - x_{30})]^T.$$

$h(x)$  为权重矩阵,  $q_i (i = 1, 2, 3)$  为非负的权重系数, 表示  $x_1, x_2, x_3$  之间的加权比重.

## 2 自适应 minimax 干扰抑制控制器设计

针对系统(4)含有的未知参数  $\theta$ , 可根据经验预先知道该参数的取值范围, 即  $\theta \in [\theta_{\min}, \theta_{\max}]$ , 因此引入辅助信号  $\bar{\theta}$  来确保系统在取值区间内进行参数跟踪. 结合式(3), 定义整个系统的 Lyapunov 函数如下:

$$V = H + \frac{1}{2\rho} [(\bar{\theta} - \theta)^2 - (\bar{\theta} - \hat{\theta})^2], \quad (6)$$

其中  $\hat{\theta}$  为参数  $\theta$  的估计值, 由  $\bar{\theta}$  的映射机制确定.

定义性能指标函数

$$J_0 = \int_0^\infty (\|z\|^2 - \gamma^2 \|\varepsilon\|^2) dt. \quad (7)$$

根据 minimax 理论, 构造检验函数

$$\psi = \dot{V} + \frac{1}{2} (\|z\|^2 - \gamma^2 \|\varepsilon\|^2). \quad (8)$$

令  $\tilde{\theta} = \theta - \hat{\theta}, \nabla H = \frac{\partial H}{\partial x}$ , 可以得到

$$\begin{aligned} \psi = & -(\nabla H)^T (R_1 + R_2) (\nabla H) + (\nabla H)^T G_1 u_0 + \\ & (\nabla H)^T G_2 \varepsilon - \frac{1}{\rho} [\dot{\tilde{\theta}} - (\bar{\theta} - \hat{\theta}) \dot{\tilde{\theta}}] + \\ & \frac{1}{2} (\nabla H)^T G_1 h^T h G_1^T (\nabla H) - \frac{1}{2} \gamma^2 \varepsilon^T \varepsilon. \end{aligned} \quad (9)$$

利用极值原理, 对  $\psi$  关于  $\varepsilon$  求一阶导数, 并令导数等于 0, 得到

$$\varepsilon^* = \frac{1}{\gamma^2} G_2^T (\nabla H). \quad (10)$$

因为  $\frac{\partial^2 \psi}{\partial \varepsilon^2} = -\gamma^2 < 0$ , 可知  $\psi$  关于  $\varepsilon$  有极大值, 并且

$$\max(\psi) = \max \left[ \dot{V} + \frac{1}{2} (\|z\|^2 - \gamma^2 \|\varepsilon\|^2) \right]. \quad (11)$$

对式(11)两边同时取积分, 并令  $\bar{\psi} = \int_0^\infty \psi dt$ , 则有

$$\max(\bar{\psi}) = [V(\infty) - V(0)] + \max \left( \frac{1}{2} J_0 \right).$$

如果干扰  $\varepsilon$  对系统的影响足够大, 使得  $V$  不衰减, 即  $\Delta V = 0$ , 则

$$\max \left( \frac{1}{2} J_0 \right) = \max(\bar{\psi}),$$

表示  $\varepsilon^*$  同样使得  $J_0$  取得极大值.  $J_0$  越大, 表示外界干扰对系统输出的影响越大, 因此  $\varepsilon^*$  对系统的影响程度最大. 这里希望  $J_0$  越小越好, 因此应在系统承受最坏

干扰的情况下设计反馈控制器. 将式(10)代入(9), 有

$$\begin{aligned} \psi = & -(\nabla H)^T(R_1 + \hat{R}_2 + \tilde{R}_2)(\nabla H) + (\nabla H)^T G_1 u_0 + \\ & \frac{1}{2\gamma^2}(\nabla H)^T G_2 G_2^T (\nabla H) - \frac{1}{\rho}[\hat{\theta}\dot{\theta} - (\bar{\theta} - \hat{\theta})\dot{\hat{\theta}}] + \\ & \frac{1}{2}(\nabla H)^T G_1 h^T h G_1^T (\nabla H). \end{aligned} \quad (12)$$

其中

$$\begin{aligned} \hat{R}_2 + \tilde{R}_2 &= R_2, \\ \hat{R}_2 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\hat{\theta}}{M^2\omega_s} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ \tilde{R}_2 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\tilde{\theta}}{M^2\omega_s} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

令  $\gamma^2 = \frac{M^2\omega_s}{2\hat{\theta}}$ , 考虑式(2), 选择 TCSC 控制器为

$$\begin{aligned} u = & K_u E'_q V_s (\cos x_1 - \cos x_{10}) - \\ & \sum_{i=1}^3 \frac{q_i^2 (x_i - x_{i0})^2}{2T_{tcsc}} + \frac{T\hat{\theta}}{M^2\omega_s} \left[ E'_q V_s (\cos x_{10} - \right. \\ & \left. \cos x_1) + \frac{x_3 - x_{30}}{K_u} \right]. \end{aligned} \quad (13)$$

选择自适应律如下:

$$\dot{\hat{\theta}} = -\rho\omega_s x_2^2 - \sigma(\bar{\theta} - \hat{\theta}), \quad \sigma > 0. \quad (14)$$

其中

$$\hat{\theta} = \begin{cases} \bar{\theta}, & \theta_{\min} \leq \bar{\theta} \leq \theta_{\max}; \\ \theta_{\min}, & \bar{\theta} < \theta_{\min}; \\ \theta_{\max}, & \bar{\theta} > \theta_{\max}. \end{cases}$$

因此可以得到  $\psi = -(\nabla H)^T R_1 (\nabla H) \leq 0$ . 若令  $Q(x) = (\nabla H)^T R_1 (\nabla H)$ , 则可以得到如下定理.

**定理 1** 对于任意给定的  $\gamma > 0$ , 针对最坏干扰, 在控制器(13)和自适应律(14)的作用下, 系统(1)存在能量存储函数  $V(x) \geq 0$  和  $Q(x) \geq 0$  满足耗散不等式  $\dot{V} + Q(x) \leq \frac{1}{2}(\gamma^2 \|\varepsilon\|^2 - \|z\|^2)$ , 系统具有  $L_2$  干扰抑制特性, 并且在平衡点附件渐近稳定.

**注 1** 在耗散哈密顿系统求解控制器的过程中, 往往限定系统参数假设条件, 即

$$R(x) - \frac{1}{2\gamma^2} [G_2(x)G_2^T(x) - G_1(x)G_1^T(x)] \geq 0.$$

本文通过 minimax 方法消除了假设条件的局限性.

**注 2** 针对干扰项, 本文没有人为地施加一个上界或进行放缩处理, 而是推算出对系统影响最大的干扰程度, 在此基础上设计控制器.

**注 3** 式(14)中包含  $\sigma$  的项在  $\bar{\theta} \in [\theta_{\min}, \theta_{\max}]$  时不起作用, 而一旦  $\hat{\theta}$  超出有效取值范围, 则该项立即将  $\hat{\theta}$  “拉回”正确的区间.

### 3 数值仿真分析

系统参数为  $\omega_s = 1.0$  pu,  $M = 7$  s,  $P_m = 0.9$  pu,  $E'_q = 1.067$  pu,  $V_s = 0.995$  pu,  $T_{tcsc} = 0.05$  s,  $y_{tcsc} = 1.20$  pu. 平衡点为 (0.785 4, 0, 1.199 1). 控制器参数选取如下:  $q_1 = 0.3, q_2 = 0.3, q_3 = 0.4, \rho = 1, K_u = 1, \theta \in [0, 2]$ .

#### 3.1 机械功率干扰

假设在 10~12 s 期间, 机械功率上存在 25% 的扰动, 在平衡点附近任意相同非零初始条件下, 将本文设计的自适应 minimax Hamilton 控制器 (AMH) 的作用效果与文献 [10] 给出的自适应 Backstepping 控制器 (AB) 的作用效果进行比较, 如图 1 和图 2 所示.

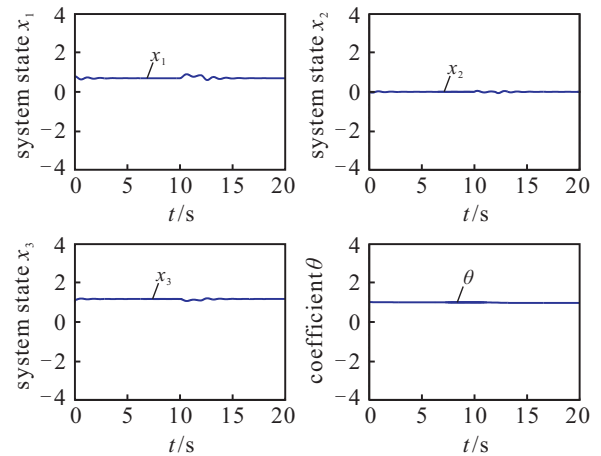


图 1 25% 机械功率扰动时具有 AMH 控制器的系统响应

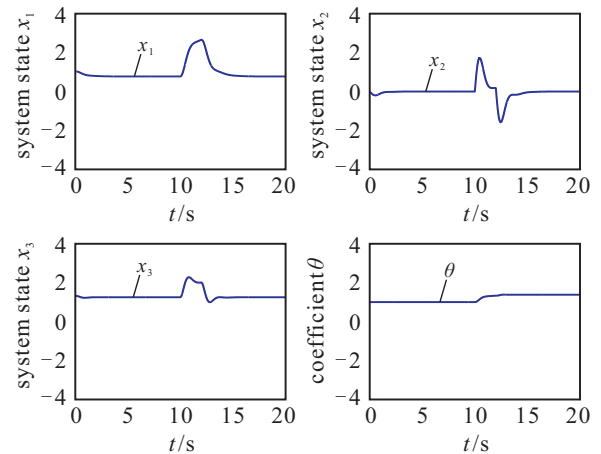


图 2 25% 机械功率扰动时具有 AB 控制器的系统响应

从图 1 和图 2 的状态响应曲线可以看出, 同样施加 25% 的机械功率扰动, 在 AMH 控制器的作用下系统振荡幅度较小, 幅值约为 0.5, 而在 AB 控制器的作用下幅值约为 1.5. AMH 干扰抑制控制器具有较强的鲁棒性, 并且控制器设计过程中不会产生计算膨胀, 其解析表达式比 AB 控制器简洁, 更容易被工程人员接受.

### 3.2 对地短路故障

考虑一条输电线路的送端在 12 s 发生瞬时三相接地短路故障, 在  $t \in [12.0, 12.5]$  时间段内  $y_{tcsc} = 0$ , 在 12.5 s 后故障线路被切除, 输电线路阻抗值改变, 从而  $y_{tcsc} = 0.16$  pu. 系统的动态响应如图 3 所示.

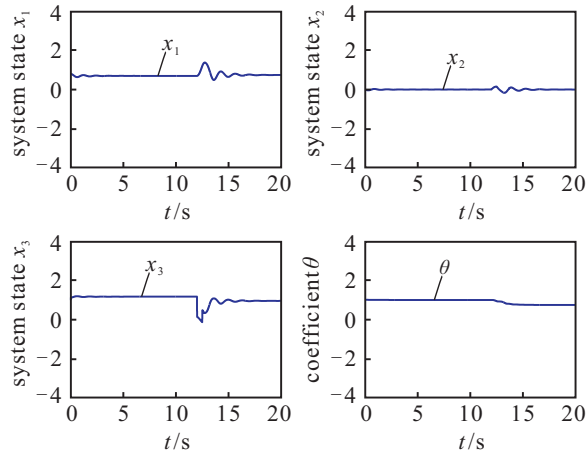


图 3 短路故障时具有 AMH 控制器的系统响应

当输电线发生对地短路故障后, 系统的状态被镇定在一个新的平衡点. 虽然干扰的形式从机械功率扰动变化为短路故障, 但系统的响应曲线并未发生明显变化, 可见系统对干扰是不敏感的.

## 4 结 论

本文研究了带有未知干扰和参数摄动的非线性 TCSC 控制系统的稳定性问题, 将 minimax 理论引入具有 Hamilton 结构形式的 TCSC 系统, 解决了常规耗散 Hamilton 方法中系统参数受不等式假设条件约束的问题, 降低了传统干扰处理方法的保守性. 采用参数映射机制设计自适应律, 尽可能利用未知参数的已知属性, 提高了参数跟踪效率. 与 Backstepping 干扰抑制方法相比, 控制器结构简单, 系统鲁棒性有所增强, 为解决 TCSC 大干扰抑制和稳定控制问题提供了一种解决途径和方法, 所提出的设计方案同样适用于其他工程对象. 如何设计连续变化的自适应映射函数的问题, 尚待进一步研究.

### 参考文献(References)

[1] 孙元章, 焦晓红, 申铁龙. 电力系统非线性鲁棒控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 201-213.  
(Sun Y Z, Jiao X H, Shen T L. Nonlinear robust control of power systems[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008: 201-213.)

[2] Sun Y Z, Liu Q J, Song Y H, et al. Hamiltonian modelling and nonlinear disturbance attenuation control of TCSC for improving power system stability[J]. IEE Proc of Control Theory and Applications, 2002, 149(4): 278-284.

[3] 刘前进, 孙元章, 宋永华, 等. FACTS 的 PCH 模型与自适应  $L_2$  增益控制(二)应用篇[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(16): 1-5.  
(Liu Q J, Sun Y Z, Song Y H, et al. PCH models of FACTS with adaptive  $L_2$ -gain control part two application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(16): 1-5.)

[4] Wang Y Z, Feng G, Cheng D Z, et al. Adaptive  $L_2$  disturbance attenuation control of multi-machine power systems with SMES units[J]. Automatica, 2006, 42(7): 1121-1132.

[5] Li W L, Jing Y W, Dimirovski G M, et al. Robust nonlinear control of TCSC for power system via adaptive Backstepping design[C]. Proc of 2003 IEEE Conf on Control Applications. Turkey, 2003: 296-300.

[6] Sun L Y, Zhao J, Dimirovski G M. Nonlinear robust controller design for thyristor controlled series compensation[J]. Int J of Innovative Computing, Information and Control, 2009, 5(4): 981-989.

[7] Wang Y F, Chai T Y, Zhang Y M. State observer-based adaptive fuzzy output-feedback control for a class of uncertain nonlinear systems[J]. Information Sciences, 2010, 180(24): 5029-5040.

[8] Tong S C, Li Y M. Fuzzy adaptive robust Backstepping stabilization for SISO nonlinear systems with unknown virtual control direction[J]. Information Sciences, 2010, 180(23): 4619-4640.

[9] Kogan M M. Solution to the inverse problem of minmax control and worst case disturbance for linear continuous-time systems [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1998, 43(5): 670-674.

[10] Jiang N, Liu B, Jing Y W. The design of nonlinear disturbance attenuation controller for TCSC robust model of power system[J]. Nonlinear Dynamic, 2012, 67(3): 1863-1870.

[11] 付俊, 冯佳昕, 赵军. TCSC 控制的一种新自适应 Backstepping 方法[J]. 控制与决策, 2006, 21(10): 1163-1171.  
(Fu J, Feng J X, Zhao J. Novel adaptive Backstepping method for TCSC control[J]. Control and Decision, 2006, 21(10): 1163-1171.)

[12] Bakker R, Annaswamy A M. Stability and robustness properties of a simple adaptive controller[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1996, 41(7): 1352-1358.

[13] Akellaa M R, Subbaraob K. A novel parameter projection mechanism for smooth and stable adaptive control[J]. Systems & Control Letters, 2005, 54(1): 43-51.