

静止同步串联补偿器(SSSC)的非线性鲁棒 H_∞ 控制策略研究

胡益¹, 王晓茹¹, 李鹏², 曹洪¹

(1. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031; 2. 东风汽车公司电力处, 湖北 十堰 442000)

摘要: 为了提高静止同步串联补偿器(SSSC)的稳定性和灵活性, 同时考虑到 SSSC 直流侧储能电容电压的动态调节过程以及各状态量之间的相互作用, 建立了含不确定性干扰参数的 SSSC 五阶动态仿射非线性系统数学模型。在鲁棒 H_∞ 控制方法的基础上, 利用 SDM 反馈线性 H_∞ 方法设计出了系统的非线性鲁棒控制器。针对设计过程中的 Riccati 方程, 利用 Matlab 鲁棒控制工具箱, 求解得到控制器的具体控制参数。利用 Matlab 进行系统的建模仿真, 通过与传统的非线性最优控制系统的仿真效果对比, 验证了该控制器在提高电力系统稳定性上的有效性和优越性。

关键词: 静止同步串联补偿器; 不确定性干扰; SDM 混合反馈线性 H_∞ 方法; Riccati 方程

Nonlinear robust strategy static synchronous series compensator (SSSC) of H_∞ control

HU Yi¹, WANG Xiaoru¹, LI Peng², CAO Hong¹

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Dongfeng Automobile Company Power Bureau, Shiyan 442000, China)

Abstract: In order to improve the stability and flexibility of the static synchronous series compensator (SSSC), at the same time considering the energy storage capacitor voltage in DC side of SSSC dynamic adjustment process and the interaction between the state variable, this paper establishes a SSSC five order dynamic mathematical model for affine nonlinear systems with uncertain disturbance parameters. On the basis of robust H_∞ control method, the method of SDM feedback linearization H_∞ is used to design the nonlinear robust controller of the system. In view of the design process of Riccati equation, MATLAB robust control toolbox is used to obtain the specific control parameters of the controller. Using the MATLAB modeling and simulation of the system, with traditional nonlinear optimal control system simulation results contrast, this paper verifies the controller's effectiveness and superiority on improving the stability of the power system.

Key words: static synchronous series compensator(SSSC); uncertainty interference; SDM mixed linear feedback H_∞ method; Riccati equation

中图分类号: TM921 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)07-0030-07

0 引言

静止同步串联补偿器(Static Synchronous Series Compensator, SSSC)是解决电力系统稳定性和经济性问题的重要设备之一, 也是柔性交流输电系统(Flexible AC Transmission System, FACTS)控制器家族中新近发展的技术之一^[1-2]。SSSC 是基于电压源逆变器的新型可关断串联补偿器件, 它串联在输电线路中, 并产生与输电线路电流方向正交、幅值可控的电压来实现对输电线路纵向电压的控制, 从而起到改变线路有效电抗、调节输电线路输送功率以及抑制系统功率振荡、电压振荡等作用^[3-4]。相对于传统的可控串联补偿器, SSSC 的最大优点就是

响应速度快、输出谐波含量少、可避免系统谐振以及次同步振荡等。因此对 SSSC 控制器的研究对提高大电力系统的整体稳定性、增强输电线路能量传输能力具有重要的现实意义。

近几年来, 许多国内外的学者对 SSSC 展开了深入的研究和探讨, 并且在 SSSC 的控制策略上取得了不少的成果。目前在 SSSC 控制系统中用的最多的控制方法就是 PI 控制^[5-6]以及改进的 PI 控制^[7-9], 但是采用 PI 控制会使系统参数不易调节, 并且对参数变化较敏感, 从而控制效果不是很理想。随着微分几何学在电力系统稳定性控制理论中大量应用, 又出现了很多新的非线性控制方法。文献[10]将直接反馈线性化首次用于 SSSC 控制器设计上, 其控制效

果相比 PI 控制有所提高, 但其只建立了 SSSC 的三阶动态模型。文献[11]采用了逆系统原理和变结构控制原理实现了 SSSC 非线性控制器设计, 虽然变结构控制具有较强的鲁棒性且控制参数也易于调节, 但是逆系统解耦线性化得到的子系统是伪线性系统且存在隐动态。文献[12]则在文献[11]的思想利用了 PI 控制原理以及精确线性化变结构控制的设计方法, 混合设计了五阶的 SSSC 动态模型非线性控制器, 有效地提高了对系统稳定性控制效果。

本文在文献[12]的基础上, 构建了 SSSC 系统的完整五阶动态数学模型, 考虑到系统在运行中会存在各种不确定干扰对系统输出的不利影响, 即系统的鲁棒性。利用了 SDM(状态-动态-量测)混合反馈线性化 H ∞ 设计方法^[13-15], 将系统的不确定性干扰纳入到系统的数学模型中, 从而设计出可以抑制系统不确定性干扰的非线性鲁棒控制器, 有效地抑制了干扰对系统输出的影响。并且最后利用 Matlab 仿真软件, 通过传统的非线性最优控制方法^[16]的控制效果对比仿真, 验证了它的有效性和优越性。

1 SSSC 的数学模型

SSSC 主要是由电压源性逆变器(VSC), 直流储能电容与耦合变压器构成, 它在高压输电线路上的连接示意图如图 1 所示。SSSC 在输电线路中的结构原理图如图 2 所示。

根据图 2 以及 SSSC 的基本工作原理可得到 SSSC 在 abc 三相坐标系下的状态空间模型为

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{i}_s}{dt} = \frac{1}{L}(-\mathbf{u}_c - R\mathbf{i}_s + S\mathbf{U}_{dc} + \mathbf{u}_{NO}) \\ \frac{d\mathbf{u}_c}{dt} = \frac{1}{C}(\mathbf{i}_s - \mathbf{i}_L) \\ \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{1}{C_{dc}}S^T\mathbf{i}_s \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{i}_s = [i_{sa} \ i_{sb} \ i_{sc}]^T$ 为低通滤波器电感电流; $\mathbf{u}_c = [u_{ca} \ u_{cb} \ u_{cc}]^T$ 为低通滤波器电容电压; $\mathbf{S} = [S_a \ S_b \ S_c]^T$ 为全控器件开关函数; $\mathbf{u}_{NO} = [u_{NO} \ u_{NO} \ u_{NO}]^T$ 为 N、O 两点电压; $\mathbf{i}_L = [i_{La} \ i_{Lb} \ i_{Lc}]^T$ 为耦合变压器二次侧换流器电流; U_{dc} 直流侧储能电容 C_{dc} 上的直流电压; C 、 L 分别为低通滤波器电容和电感; R 为换流器的等效电阻。

对式(1)进行 Park 变换可得到系统在 dq 坐标系下的数学模型为式(2)。

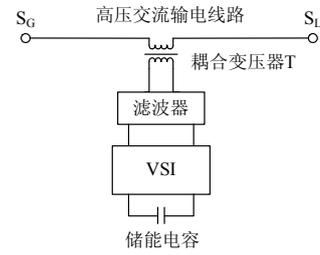


图 1 SSSC 连接示意图

Fig. 1 SSSC connection diagram

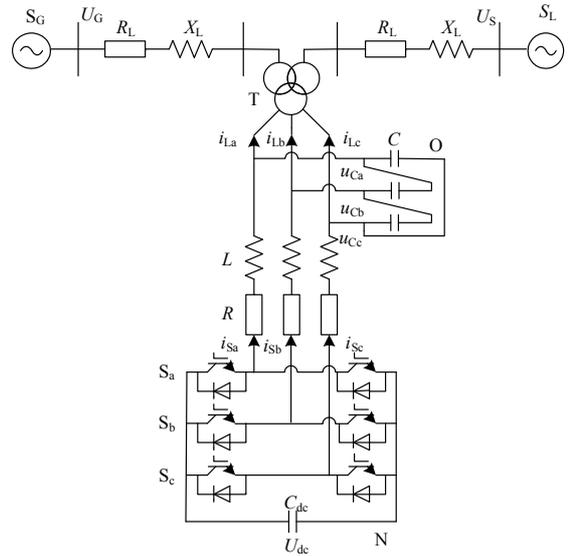


图 2 SSSC 的结构原理图

Fig. 2 SSSC structure diagram

$$\begin{cases} \frac{di_{sd}}{dt} = \frac{1}{L}(-Ri_{sd} - u_{cd} + \omega Li_{sq} + S_d U_{dc}) \\ \frac{di_{sq}}{dt} = \frac{1}{L}(-Ri_{sq} - u_{cq} - \omega Li_{sd} + S_q U_{dc}) \\ \frac{du_{cd}}{dt} = \frac{1}{C}(\omega C u_{cq} + i_{sd} - i_{Ld}) \\ \frac{du_{cq}}{dt} = \frac{1}{C}(-\omega C u_{cd} + i_{sq} - i_{Lq}) \\ \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{3}{2C_{dc}}(S_d i_{sd} + S_q i_{sq}) \end{cases} \quad (2)$$

式中, 下标 d 、 q 表示参数在 dq 坐标系上的分量。

对于式(2)中所描述的 SSSC 非线性系统, 当考虑到系统在运行过程中外界的不确定性干扰时, 可以将 SSSC 系统描述为标准的放射非线性系统数学模型为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}_1(\mathbf{x})\boldsymbol{\mu} + \mathbf{g}_2(\mathbf{x})\mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) \end{cases} \quad (3)$$

式中:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ u_{cd} \\ u_{cq} \\ U_{dc} \end{bmatrix} \quad \mathbf{u} = \begin{bmatrix} S_d \\ S_q \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \frac{1}{L}(-Ri_{sd} - u_{cd} + \omega Li_{sq}) \\ \frac{1}{L}(-Ri_{sq} - u_{cq} - \omega Li_{sd}) \\ \frac{1}{C}(\omega Cu_{cq} + i_{sd} - i_{ld}) \\ \frac{1}{C}(-\omega Cu_{cd} + i_{sq} - i_{lq}) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{g}_1(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{g}_2(\mathbf{x}) = [\mathbf{g}_{21}(\mathbf{x}) \quad \mathbf{g}_{22}(\mathbf{x})] = \begin{bmatrix} \frac{U_{dc}}{L} & 0 \\ 0 & \frac{U_{dc}}{L} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{3i_{sd}}{2C_{dc}} & \frac{3i_{sq}}{2C_{dc}} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_1(\mathbf{x}) \\ \mathbf{h}_2(\mathbf{x}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{cd} \\ u_{cq} \end{bmatrix}$$

$\boldsymbol{\mu} = [\mu_1 \quad \mu_2 \quad \mu_3 \quad \mu_4]^T$; 其中 μ_1 、 μ_2 、 μ_3 、 μ_4 分别为 i_{sd} 、 i_{sq} 、 u_{cd} 、 u_{cq} 在测量过程中的不确定性干扰量。

2 SSSC 的非线性鲁棒控制器设计

对于式(3)所描述的 SSSC 的标准仿射非线性系统数学模型, 求系统的各阶 Lie 导数:

$$L_f \mathbf{h}_1(\mathbf{x}) = \frac{\partial \mathbf{h}_1(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{f}(\mathbf{x}) = \frac{1}{C}(\omega Cu_{cq} + i_{sd} - i_{ld})$$

$$L_f^2 \mathbf{h}_1(\mathbf{x}) = \frac{\partial L_f \mathbf{h}_1(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{f}(\mathbf{x}) =$$

$$\frac{1}{LC}(-Ri_{sd} - u_{cd} + \omega Li_{sq}) + \frac{\omega}{C}(-\omega Cu_{cd} + i_{sq} - i_{lq})$$

$$L_{g_{21}} L_f \mathbf{h}_1(\mathbf{x}) = \frac{\partial L_f \mathbf{h}_1(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{g}_{21}(\mathbf{x}) = \frac{U_{dc}}{LC} \neq 0$$

$$L_{g_{22}} L_f \mathbf{h}_1(\mathbf{x}) = \frac{\partial L_f \mathbf{h}_1(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{g}_{22}(\mathbf{x}) = 0$$

$$L_f \mathbf{h}_2(\mathbf{x}) = \frac{\partial \mathbf{h}_2(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{f}(\mathbf{x}) = \frac{1}{C}(-\omega Cu_{cd} + i_{sq} - i_{lq})$$

$$L_f^2 \mathbf{h}_2(\mathbf{x}) = \frac{\partial L_f \mathbf{h}_2(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{f}(\mathbf{x}) =$$

$$\frac{1}{LC}(-Ri_{sq} - u_{cq} - \omega Li_{sd}) + \frac{\omega}{C}(\omega Cu_{cq} + i_{sd} - i_{ld})$$

$$L_{g_{21}} L_f \mathbf{h}_2(\mathbf{x}) = \frac{\partial L_f \mathbf{h}_2(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{g}_{21}(\mathbf{x}) = 0$$

$$L_{g_{22}} L_f \mathbf{h}_2(\mathbf{x}) = \frac{\partial L_f \mathbf{h}_2(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{g}_{22}(\mathbf{x}) = \frac{U_{dc}}{LC} \neq 0$$

由上述各阶 Lie 导数可以看出系统的两个输出的关系度为 $r_1 = 2$ 、 $r_2 = 2$, 则对于 SSSC 系统有 $r_1 + r_2 < n$, 不可直接用常规的反馈线性化 H_∞ 方法。对于这种情况本文采用了文献[13, 15]所介绍的 SDM 反馈线性化 H_∞ 方法, 对系统进行动态扩张增维后, 按 SDM 反馈线性化 H_∞ 方法的设计步骤设计出具有 SSSC 的非线性鲁棒控制器。

第一步: 对原系统模型进行动态扩张, 选择积分核函数为 $(u_{cd} + u_{cq})$, 定义以下积分变换。

$$\xi = \int_0^t (u_{cd} + u_{cq}) d\tau \quad (4)$$

因此根据上式可以得到系统动态扩张后的新系统为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}_1(\mathbf{x})\boldsymbol{\mu} + \mathbf{g}_2(\mathbf{x})\mathbf{u} \\ \dot{\xi} = u_{cd} + u_{cq} \\ \mathbf{y} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) \end{cases} \quad (5)$$

第二步: 构造针对扩张系统的坐标变换 $\mathbf{z} = \Phi(\mathbf{x}, \xi)$ 为

$$\begin{cases} z_1 = u_{cd} \\ z_2 = \frac{1}{C}(\omega Cu_{cq} + i_{sd} - i_{ld}) \\ z_3 = u_{cq} \\ z_4 = \frac{1}{C}(-\omega Cu_{cd} + i_{sq} - i_{lq}) \\ z_5 = u_{cd} + u_{cq} \\ z_6 = \xi \end{cases} \quad (6)$$

这里, $\mathbf{z} = [z_1 \quad z_2 \quad z_3 \quad z_4 \quad z_5 \quad z_6]^T$ 。

在式(6)坐标变换下动态扩张的 SSSC 系统(5)可变换为

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = \frac{1}{C}(\omega C u_{Cq} + i_{Sd} - i_{Ld}) + \tilde{\mu}_1 \\ \dot{z}_2 = -(\omega^2 + \frac{1}{LC})u_{Cd} + \frac{2\omega}{C}i_{Sq} - \frac{\omega}{C}i_{Lq} - \\ \quad \frac{R}{LC}i_{Sd} + \frac{U_{dc}}{LC}S_d + \tilde{\mu}_2 \\ \dot{z}_3 = \frac{1}{C}(-\omega C u_{Cd} + i_{Sq} - i_{Lq}) + \tilde{\mu}_3 \\ \dot{z}_4 = -(\omega^2 + \frac{1}{LC})u_{Cq} - \frac{2\omega}{C}i_{Sd} + \frac{\omega}{C}i_{Ld} - \\ \quad \frac{R}{LC}i_{Sq} + \frac{U_{dc}}{LC}S_q + \tilde{\mu}_4 \\ \dot{z}_5 = \frac{1}{C}[\omega C(u_{Cq} - u_{Cd}) + i_{Sd} + i_{Sq} - i_{Ld} - i_{Lq}] \\ \dot{z}_6 = u_{Cd} + u_{Cq} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\tilde{\mu}_1 = \mu_3$; $\tilde{\mu}_2 = \frac{1}{C}\mu_1 + \omega\mu_4$; $\tilde{\mu}_3 = \mu_4$;

$$\tilde{\mu}_4 = \frac{1}{C}\mu_2 - \omega\mu_3。$$

第三步: 矩阵

$$\mathbf{B}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} L_{g21} L_f \mathbf{h}_1(\mathbf{x}) & L_{g22} L_f \mathbf{h}_1(\mathbf{x}) \\ L_{g21} L_f \mathbf{h}_2(\mathbf{x}) & L_{g22} L_f \mathbf{h}_2(\mathbf{x}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{U_{dc}}{LC} & 0 \\ 0 & \frac{U_{dc}}{LC} \end{bmatrix}$$

则 $\det \mathbf{B}(\mathbf{x}) \neq 0$, 即 $\mathbf{B}(\mathbf{x})$ 为非奇异矩阵。

设置系统的预反馈为

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_f^2 \mathbf{h}_1(\mathbf{x}) \\ L_f^2 \mathbf{h}_2(\mathbf{x}) \end{bmatrix} + \mathbf{B}(\mathbf{x}) \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(\omega^2 + \frac{1}{LC})u_{Cd} + \frac{\omega}{C}(2i_{Sq} - i_{Lq}) - \frac{1}{LC}(Ri_{Sd} - U_{dc}S_d) \\ -(\omega^2 + \frac{1}{LC})u_{Cq} - \frac{\omega}{C}(2i_{Sd} - i_{Ld}) - \frac{1}{LC}(Ri_{Sq} - U_{dc}S_q) \end{bmatrix} \quad (8)$$

由上式所描述的预反馈, 则可将系统式(7)写成以下矩阵形式:

$$\dot{\mathbf{z}} = \mathbf{A}\mathbf{z} + \mathbf{B}_1\tilde{\boldsymbol{\mu}} + \mathbf{B}_2\mathbf{v} \quad (9)$$

式中:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad \tilde{\boldsymbol{\mu}} = [\tilde{\mu}_1 \quad \tilde{\mu}_2 \quad \tilde{\mu}_3 \quad \tilde{\mu}_4]^T$$

$$\mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

第四步: 根据线性 H ∞ 控制理论, 设计下述系统的鲁棒控制策略。对线性系统式(9), 对于给定的正数 λ , 求解系统的 Riccati(黎卡提)矩阵不等式方程:

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} + \frac{1}{\lambda^2} \mathbf{P} \mathbf{B}_1 \mathbf{B}_1^T \mathbf{P} - \mathbf{P} \mathbf{B}_2 \mathbf{B}_2^T \mathbf{P} + \mathbf{Q} < 0 \quad (10)$$

式中, \mathbf{Q} 为事先设定好的正定或半正定矩阵。

根据 H ∞ 控制理论, 以及由式(10)所得到的系统的 Riccati(黎卡提)矩阵不等式方程得解 \mathbf{P}^* (正定矩阵), 可以得到系统(9)的 H ∞ 控制律为

$$\mathbf{v}^* = -\mathbf{B}_2^T \mathbf{P}^* \mathbf{z} = -\mathbf{k}^* \mathbf{z} \quad (11)$$

即为

$$\begin{cases} v_1 = -P_{21}z_1 - P_{22}z_2 - P_{23}z_3 \\ v_2 = -P_{44}z_4 - P_{45}z_5 - P_{46}z_6 \end{cases} \quad (12)$$

式中, p_{ij} 为正定矩阵 \mathbf{P}^* 第 i 行第 j 列的元素。

第五步: 将式(12)代入到式(8)中, 就可以得到由 SDM 混合反馈线性化 H ∞ 方法所设计的 SSSC 系统非线性鲁棒控制器的控制律为

$$\begin{cases} S_d = \frac{1}{U_{dc}}(Ri_{Sd} + u_{Cd} - \omega Li_{Sq}) + \frac{L\omega}{U_{dc}}(\omega C u_{Cd} - \\ \quad i_{Sq} + i_{Lq}) - \frac{LC}{U_{dc}}(P_{21}z_1 + P_{22}z_2 + P_{23}z_3) \\ S_q = \frac{1}{U_{dc}}(Ri_{Sq} + u_{Cq} + \omega Li_{Sd}) + \frac{L\omega}{U_{dc}}(\omega C u_{Cq} + \\ \quad i_{Sd} - i_{Ld}) - \frac{LC}{U_{dc}}(P_{44}z_4 + P_{45}z_5 + P_{46}z_6) \end{cases} \quad (13)$$

将式(6)坐标变换代入上式可得系统的最终控制律为

$$\begin{cases} S_d = \frac{(1 + L\omega^2 C - LCP_{21} - LC\omega P_{22})}{U_{dc}}u_{Cd} + \frac{R - LP_{22}}{U_{dc}}i_{Sd} + \\ \quad \frac{LP_{22}}{U_{dc}}i_{Ld} - \frac{LCP_{23}}{U_{dc}}u_{Cq} - \frac{2L\omega}{U_{dc}}i_{Sq} + \frac{L\omega}{U_{dc}}i_{Lq} \\ S_q = \frac{(1 + L\omega^2 C - LCP_{45})}{U_{dc}}u_{Cq} + \frac{R - LP_{44}}{U_{dc}}i_{Sq} - \frac{L\omega}{U_{dc}}i_{Ld} + \\ \quad \frac{L\omega CP_{44} - LCP_{45}}{U_{dc}}u_{Cd} + \frac{2L\omega}{U_{dc}}i_{Sd} + \frac{LP_{44}}{U_{dc}}i_{Lq} + \\ \quad P_{46} \int_0^t (u_{Cd} + u_{Cq}) dt \end{cases} \quad (14)$$

上式给出了 SSSC 系统非线性鲁棒控制器的最终控制律, 显然式中的各反馈变量都是局部可测量, 因而易于工程实现。

由以上的分析可以得到 SSSC 系统的非线性鲁棒控制器的实现框图如图 3 所示。

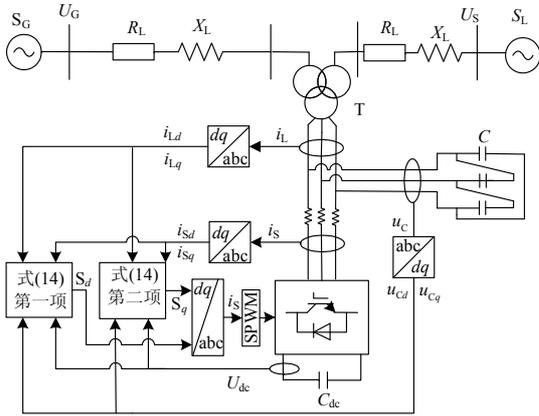


图 3 SSSC 系统的非线性鲁棒控制实现框图
Fig. 3 SSSC nonlinear robust control system realization diagram

3 SSSC 的非线性鲁棒控制系统仿真

为了检验上述 SDM 混合反馈线性化 H_∞ 方法所设计的控制器的控制效果, 本文将利用 Matlab 对图 3 所示的 SSSC 系统进行仿真, 并将本次所设计的非线性鲁棒控制器的仿真效果与传统的非线性最优控制方法的仿真效果进行对比。

以下为本次仿真中 SSSC 系统各部分参数设定。

系统输电线路部分参数如表 1 所示。SSSC 装置参数如表 2 所示。

表 1 输电线路参数

Table 1 Transmission line parameters	
输电线路参数项	参数值
输送功率容量	1000 MVA
输电线路电压	500 kV
线路长度	500 km
系统两端相位差	30°
耦合变压器变比	10:10:1

表 2 SSSC 装置参数

Table 2 SSSC device parameters	
SSSC 装置参数值	参数值
滤波器电容 C	100 Mf
滤波器电感 L	0.5 mH
换流器等效电阻	0.525 Ω
直流侧储能电容 Cdc	9400 μF

非线性鲁棒控制器参数: 令非负数 $\lambda=1.5$, 并且设定正定矩阵 Q 为

$$Q = \text{diag}[4.2358 \quad 8267.8251 \quad 5432.5142 \quad 2548.2345 \quad 6425.4115 \quad 6.2547]$$

则利用 Matlab 鲁棒控制工具箱, 通过解的 Riccati(黎卡曼)矩阵方程式(10)可得: $p_{21}=0.5217$, $p_{22}=514.4123$, $p_{23}=23.8145$, $p_{44}=5225.4158$, $p_{45}=684.8541$, $p_{46}=0.6841$ 。

根据以上所设置的系统参数, 分别在以下两种情况下进行仿真。

① 在 1 s 时, 增大 SSSC 补偿度; 在 5 s 时, 将 SSSC 装置补偿度减小为原来 50%。则输电系统接收端电压 U_s 、输电线路有功功率 P 、输电线路无功功率 Q 的响应曲线如图 4 所示。

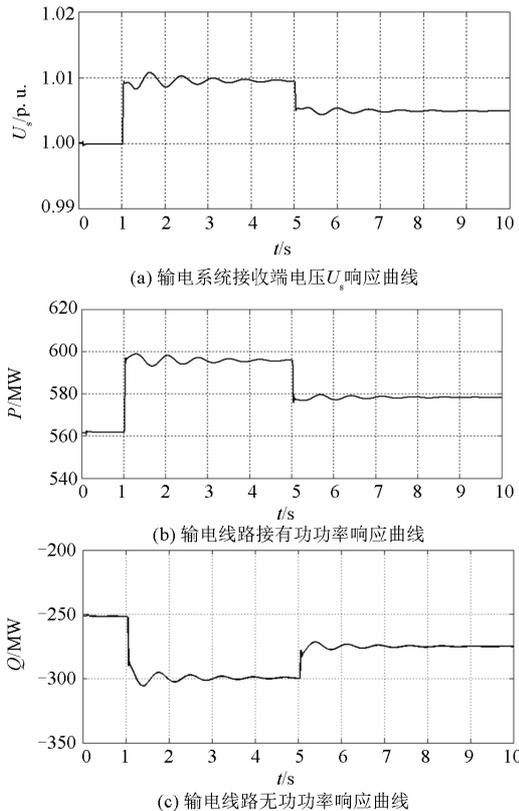


图 4 SSSC 系统在补偿度改变时的动态响应曲线
Fig. 4 SSSC system dynamic response curves when compensation degree changes

从图 4 中响应曲线可以看出当 SSSC 补偿度增大时, 输电系统接受端电压 U_s 会成相应比例增大, 同时线路输送有功功率的能力有明显的提高, 并且输送无功功率的能力有明显的减少。可见 SSSC 装置具有减小了输电线路电抗, 增大有功功率, 减小无功功率的作用。

② 在 2 s 时, 系统接收端发生三相短路; 在 2.2 s 时, 系统故障清除, 恢复正常运行。则在本文所设计的非线性鲁棒控制器的控制下和传统非线性最优控制器控制下的输电线路有功功率 P 、输电线路无功功率 Q 、输电系统接收端电压 U_s 的动态响应曲线对比如图 5 所示(实线为非线性鲁棒控制器控制效果、虚线为传统非线性最优控制器控制效果)。

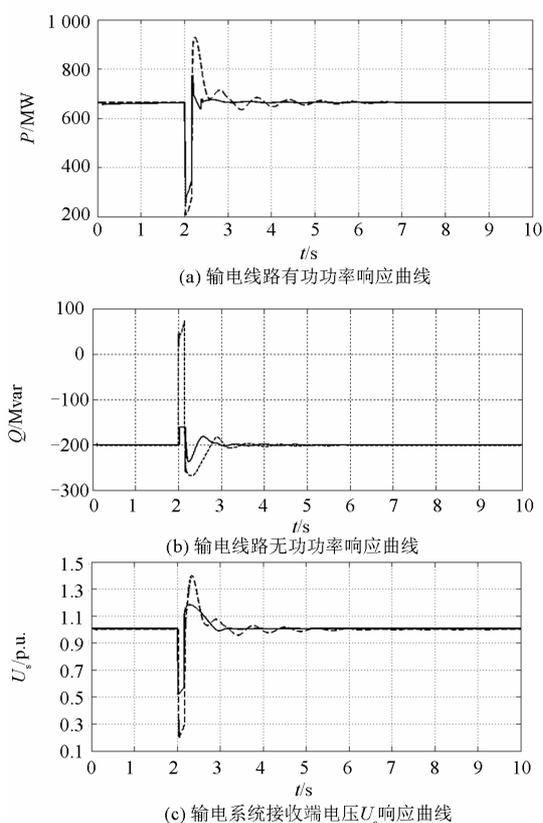


图 5 SSSC 系统在故障状态下的动态响应曲线
Fig. 5 SSSC system dynamic response curves under fault condition

在电力系统出现大干扰故障时, 输电线路有功功率、输电线路无功功率以及输电线路电压均会出现一定范围的振荡, 从图 5 中能看出, 在非线性鲁棒控制器的控制下 SSSC 对系统振荡的抑制能力明显比在传统的非线性最优控制器控制下效果要好, 它能明显减小系统振荡的超调量, 使系统在最短的时间内恢复正常。

4 结论

本文针对 SSSC 在输电系统中的工作原理及特点, 建立了 SSSC 的五阶带有外部不确定干扰参数的仿射非线性系统模型, 在鲁棒 H_∞ 控制基础之上, 利用了 SDM 混合反馈线性 H_∞ 方法设计出系统的非线性鲁棒控制器, 最后对整个 SSSC 系统利用

Matlab 进行仿真, 在仿真过程中分别采用了本文所设计的控制器和传统的非线性最优控制器对 SSSC 进行控制, 显然从系统的最终仿真效果对比可以得出, 基于 SDM 混合反馈线性 H_∞ 方法设计出的非线性鲁棒控制器的控制效果明显好于传统非线性最优控制器, 从而验证了本次所设计的非线性鲁棒控制器在提高系统稳态性能上的可行性和优越性。

参考文献

- [1] 陈建业, 蒋晓华, 于歆杰, 等. 电力电子技术在电力系统中的应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [2] 刘家军, 王小康. 基于 VSC-HVDC 并网装置转为 SSSC 的仿真[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(11): 17-22.
- LIU Jiajun, WANG Xiaokang. Simulation of grid paralleling devices converted into SSSC based on VSC-HVDC [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(11): 17-22.
- [3] 吴政球, 邹贤求, 陈波, 等. SSSC 在互联电力系统负荷频率控制中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(5): 75-79.118
- WU Zhengqiu, ZOU Xianqiu, CHEN Bo, et al. Application of SSSC in the load frequency control of interconnected power system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2011, 23(5): 75-79.118
- [4] 刘青, 王增平, 郑振华. 静止同步串联补偿器对距离保护影响分析的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(10): 39-43.
- LIU Qing, WANG Zengping, ZHENG Zhenhua. Study on the influence of SSSC on the distance protection[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(10): 39-43.
- [5] GYUGYI L, SCHAUDER C D, SEN K K. Static synchronous series compensator: a solid-state approach to the series compensation of transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(1): 406-417.
- [6] WANG H F. Static synchronous series compensator to damp power system oscillations[J]. Electric Power Systems Research, 2000, 54(2): 113-119.
- [7] 王辉, 王耀南, 许维东. 基于模糊自整定 PI 控制的 SSSC 潮流控制器研究[J]. 电工技术学报, 2004, 19(7): 65-69.
- WANG Hui, WANG Yaonan, XU Weidong. Investigation of a power flow controller of SSSC based on self-tuning PI controller with fuzzy logic[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(7): 65-69.
- [8] 张爱国, 韩军锋, 蒋程. 基于神经网络自适应 PI 控制的 SSSC 潮流控制器[J]. 电力系统保护与控制, 2010,

- 38(22): 15-19.
ZHANG Aiguo, HAN Junfeng, JIANG Cheng. Power flow control of SSSC based on adaptive PI controller with neural networks[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(22): 15-19.
- [9] 张爱国, 张建华, 韩军锋, 等. 基于 HDP 算法的 SSSC 神经控制器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 87-92.
ZHANG Aiguo, ZHANG Jianhua, HAN Junfeng, et al. Design of neuro-controller for static series synchronous compensator based on HDP algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 87-92.
- [10] 颜伟, 吴文胜, 华智明, 等. SSSC 非线性控制的直接反馈线性化方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 65-68.
YAN Wei, WU Wensheng, HUA Zhiming, et al. Direct feedback linearization method for designing SSSC nonlinear control law[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 65-68.
- [11] 钱碧甫, 王奔, 黄崇鑫, 等. 静止同步串联补偿器的变结构控制器设计[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(6): 124-129.
QIAN Bifu, WANG Ben, HUANG Chongxin, et al. Design of variable structure controller used in the static synchronous series compensator[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2010, 22(6): 124-129.
- [12] 邓大磊, 王奔, 尹维恒. 基于状态反馈精确线性化变结构控制的 SSSC 控制器设计[J]. 现代电力, 2013, 30(4): 50-54.
DENG Dalei, WANG Ben, YIN Weiheng. Design of SSSC controller based on exact linearization via feedback and variable-structure[J]. Modern Electric Power, 2013, 30(4): 50-54.
- [13] 卢强, 梅生伟, 孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [14] 张敏, 朱红萍, 王俊年, 等. 静止同步补偿器的非线性鲁棒 H^∞ 控制[J]. 电工技术学报, 2005, 20(5): 35-39.
ZHANG Min, ZHU Hongping, WANG Junnian, et al. Static synchronous compensator of the nonlinear robust H^∞ control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(5): 35-39.
- [15] MEI S W, GUI X Y, SHEN C, et al. Dynamic extending nonlinear H^∞ control and its application to hydraulic turbine governor[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2007, 50(5): 618-635.
- [16] 赵迎春. 阻尼功率振荡的 SSSC 控制策略研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2013.
ZHAO Yingchun. Research on control strategy of SSSC for damping power oscillation[D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2013.

收稿日期: 2014-06-17; 修回日期: 2014-10-09

作者简介:

胡 益(1990-), 男, 博士研究生, 主要从事柔性交流输电装置运行与控制; E-mail: huangganghui@163.com

王晓茹(1962-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统保护与安全稳定控制;

李 鹏(1980-), 男, 电气工程师, 主要从事电力系统智能控制。

(编辑 姜新丽)