

基金项目：国家电网公司科技项目（5222AS15000C），国家自然科学基金项目（61472200）。

基于高阶滑模的 STATCOM 系统有限时间鲁棒控制

杨洁¹，曹军威¹，方太勋²，吴扣林²，常喜强³

(1.清华大学信息技术研究院,北京市 100084;2.南京南瑞继保电气有限公司,南京市 211102;
3.国网新疆电力公司,乌鲁木齐市 830002)

摘要: 为提高静止同步补偿器(STATCOM)控制系统动态性能和鲁棒性,提出一种基于高阶滑模控制的 STATCOM 有限时间鲁棒控制方法。该方法首先对强耦合、非线性的 STATCOM 系统采用逆系统的方法进行线性化解耦,根据解耦后的系统状态特性,对无功补偿电流与直流侧电容电压分别采用超螺旋与螺旋算法进行控制器设计,这两种控制方法不仅在有限时间内,分别快速稳定无功补偿电流与直流侧电压,还对系统不确定性具有一定的鲁棒性。仿真结果验证了所提出方法的有效性。

关键词: 静止同步补偿器;滑模;高阶滑模;螺旋;超螺旋

Finite time robust control of STATCOM systems based on higher order sliding mode

YANG Jie¹, CAO Junwei¹, FANG Taixun², WU Koulin², CHANG Xiqiang³

(1. Research Institute of Information Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. NR Electric Co., Ltd, Nanjing 211102, China; 3. State Grid Xinjiang Electric Power Corporation, Wulumuqi 830002, China)

ABSTRACT: In order to improve the dynamic performance and robustness of the static synchronous compensator (STATCOM) control system, a STATCOM finite time robust control method based on higher order sliding mode control is proposed. Firstly, the strong coupling, nonlinear STATCOM system was linear decoupled by inverse system method. Then, twisting algorithm and super-twisting algorithm were adopted in reactive power compensation current and DC side capacitor voltage respectively. The two control methods not only compensate reactive power current and DC side capacitor voltage rapidly in limited time but also have some robustness to the system uncertainties. Simulation results show the effectiveness of the proposed method.

KEY WORDS: STATCOM; Sliding mode; Higher order sliding mode; Twisting ; Super -twisting
中图分类号:

0 引言

静止同步补偿器(Static Synchronous Compensator, STATCOM)是一种以电力电子变流器为装置核心的新型并联无功补偿装置,可同时解决电能质量中无功、谐波及三相不平衡问题,是灵活交流输电系统(Flexible AC Transmission System, FACTS)的一个重要基础部件^{[1][2]}。与基于可控电抗器和投切电容器的传统静止无功补偿器(Static Var Compensator, SVC)相比,工作原理有本质的不同,性能上也具极大的优越性。随着高压大功率的门级可关断晶闸管

(Gate-turn-off Thyristor, GTO)以及更先进的集成门极换流晶闸管(Integrated Gate Commutated Thyristors, IGCT)等可控器件的出现,STATCOM的开发和应用得到了长足的发展,受到了各国电力工作者和决策者的广泛关注。STATCOM已经成为了新一代的动态无功补偿装置的发展方向。

STATCOM是一个强耦合的非线性系统,文献[3]采用传统PI控制,但控制参数难以整定,对不确定性过于敏感。文献[4]通过对传统比例积分(PI)算法的深入研究,引入非线性PI算法,即在原有PI算法上添加过渡

过程, 并对该过渡过程进行详细设计。该方法克服了传统 PI 算法的快速性与超调的矛盾, 从而缓解了 STATCOM 启动时的初始冲击, 降低设备成本。文献[5]基于配电网静止同步补偿器控制系统的结构组成和无功补偿原理, 采用一种用于模糊 PI 控制策略。该控制策略以传统 PI 控制调整参数, 再通过模糊控制对参数进行模糊化, 该方法可提高 STATCOM 控制非线性系统时的响应精度和抗干扰性。

在对抗系统不确定性的鲁棒控制方法中, 传统滑模控制以其显著优点(如对匹配不确定性的不变性, 控制器实现简单等)而得到了广泛应用, 文献[6]首先采用逆系统方法将原系统进行线性化解耦, 构造出其伪线性模型, 运用传统滑模变结构控制理论对伪线性模型进行控制律设计, 验证了滑模控制在响应速度及稳定性方面比 PI 控制的优越性。文献[7]采用滑模控制理论实现其控制, 但将直流侧电压作为常量处理, 仅考虑控制 STATCOM 注入电流情况。文献[8]提出一种输入-输出反馈线性化与积分滑模控制相结合的 STATCOM 控制方法, 利用积分滑模增强对其参数摄动的鲁棒性, 并采用指数趋近率加饱和函数的方法来削弱抖振现象。以上文献均没有考虑 STATCOM 系统控制的有限时间稳定问题。

滑模控制方法虽响应迅速, 在仍存在抖振问题和相对阶的限制等不足之处。高阶滑模控制方法的提出, 不仅保留了传统滑模控制的优点, 还可以解决其存在的问题, 并且高阶滑模控制方法可以实现系统有限时间稳定, 对于控制系统来说, 有限时间稳定无疑更加有利。高阶滑模控制方法中有多种不同的算法, 各算法均有其不同的特点。其中超螺旋算法二阶滑模控制方法中唯一连续和唯一适用于系统对滑模面相对阶为 1 的系统的方法, 控制过程中只需要滑模面的信息, 却可以实现滑模面及其导数同时到达零点。螺旋算法则是针对二阶系统的。

为提高 STATCOM 控制系统动态性能, 提出一种基于高阶滑模有限时间稳定控制

的 STATCOM 鲁棒控制方法。将 STATCOM 动态模型经过变换, 得到 dq 坐标系下的表达式, 经过变量定义与求导, 得到 STATCOM 经过输入-输出反馈线性化后数学模型的矩阵表达式, 采用逆系统的方法进行线性化解耦, 根据解耦后的系统状态特性, 对无功补偿电流与直流侧电容电压分别采用超螺旋与螺旋算法进行控制器设计。

1 STATCOM 系统数学模型

如图 1 所示为输电线路中 STATCOM 的电路结构示意图:

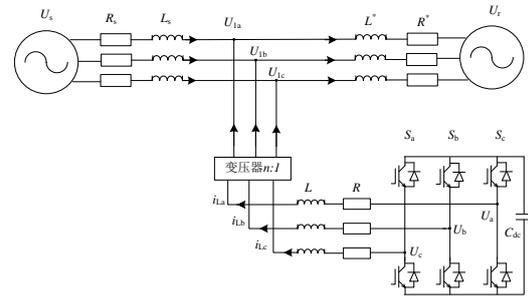


图 1 STATCOM 电路结构图

Fig. 1 Circuit diagram of STATCOM

电路中, 6 个绝缘栅双极型晶体管 (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT) 组成一个三相逆变器, 直流侧 C_{dc} 为储能电容, 逆变器在控制器作用下输出无功电流, 经过滤波装置与变压器, 注入到主线路中, S_a , S_b , S_c 是开关函数, i_{La} , i_{Lb} , i_{Lc} 是三相无功补偿电流, U_a , U_b , U_c 是逆变交流电压, U_{1a} , U_{1b} , U_{1c} 是 STATCOM 注入点电压, L 与 R 分别为连接电抗器与连接电阻值。由此电路结构可得到其动态时域数学模型:

$$\begin{cases} \frac{di_{La}}{dt} = \frac{U_a}{L} - \frac{Ri_{La}}{L} - \frac{U_{1a}}{L} \\ \frac{di_{Lb}}{dt} = \frac{U_b}{L} - \frac{Ri_{Lb}}{L} - \frac{U_{1b}}{L} \\ \frac{di_{Lc}}{dt} = \frac{U_c}{L} - \frac{Ri_{Lc}}{L} - \frac{U_{1c}}{L} \\ C_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} = S_a i_{La} + S_b i_{Lb} + S_c i_{Lc} \end{cases} \quad (1)$$

为便于分析与控制器设计, 对公式(1)进行派克变换, 变换矩阵为^[9]:

$$\frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\omega t & \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\omega t & \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, ω 表示转子角速度。

将其代入公式(1), 得到 dq 坐标系下数学表达式为:

$$\begin{cases} \frac{di_{Ld}}{dt} = \frac{S_d U_{dc}}{L} - \frac{Ri_{Ld}}{L} - \frac{U_{1d}}{L} + \omega i_{Lq} \\ \frac{di_{Lq}}{dt} = \frac{S_q U_{dc}}{L} - \frac{Ri_{Lq}}{L} - \frac{U_{1q}}{L} + \omega i_{Ld} \\ C \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} (S_d i_{Ld} + S_q i_{Lq}) \end{cases} \quad (3)$$

其中, 下标 d、q 表示为 dq 坐标下的值。忽略 STATCOM 自身和其连接阻抗的损耗, 由能量守恒定律可知, 直流侧功率等于配电网注入点处流入的有功功率, 即:

$$\frac{3}{2} (u_d i_d + u_q i_q) = u_{dc} i_{dc} = C u_{dc} \frac{du_{dc}}{dt} \quad (4)$$

重新选取参考坐标, 使 $u_q = 0$, 可以得到直流侧电压 u_{dc} 关于 d 轴电流 i_d 的非线性方程:

$$\dot{u}_{dc} = \frac{3u_d i_d}{2Cu_{dc}} \quad (5)$$

2 STATCOM 模型处理

定义 STATCOM 系统状态变量为 $\mathbf{X} = [x_1 \ x_2 \ \dot{x}_2]^T = [i_d \ i_q \ u_{dc}]^T$, 控制输入 $\mathbf{U} = [u_1 \ u_2]^T = [s_d \ s_q]^T$, 输出 $\mathbf{Y} = [y_1 \ y_2]^T = [i_q \ u_{dc}]^T$ 。控制器设计的目的是通过控制注入的无功电流 i_q 来控制输电线路的无功传输, 并保证直流侧电压 u_{dc} 稳定。

根据公式(3)与公式(5), 矩阵表达的 STATCOM 数学模型为:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L}x_1 - \frac{u_d}{L} + \omega x_2 \\ -\frac{R}{L}x_2 - \frac{u_q}{L} + \omega x_1 \\ \frac{3u_d x_1}{2Cx_3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{x_3}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{x_3}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

对输出变量分别求导数:

$$\dot{y}_1 = \dot{x}_2 = -\frac{R}{L}x_2 - \frac{u_q}{L} + \omega x_1 + \frac{x_3}{L}u_2 \quad (7)$$

$$\dot{y}_2 = \dot{x}_3 = \frac{3u_d x_1}{2Cx_3} \quad (8)$$

通过求导结果可发现, y_1 的导数已显含

控制输入 u_2 , 此公式相对阶为 1, y_2 的导数

不显含控制输入, 无法对其进行控制器设计, 故需要对其继续求导:

$$\begin{aligned} \ddot{y}_2 &= \frac{3u_d}{2Cx_3^2} \left\{ x_3 \left[\left(-\frac{R}{L}x_1 - \frac{u_d}{L} + \omega x_2 \right) + \frac{x_3}{L}u_1 \right] \right\} \\ &\quad - \frac{3u_d}{2Cx_3^2} x_1 \frac{3u_d x_1}{2Cx_3} \\ &= \frac{3u_d}{2Cx_3} \left(-\frac{R}{L}x_1 - \frac{u_d}{L} + \omega x_2 \right) - \frac{9u_d^2 x_1^2}{8C^2 x_3^3} + \frac{3u_d}{4CL} u_1 \end{aligned} \quad (9)$$

通过对 y_2 的再次求导, 已经显含控制输入, 相对阶为 2, 无需再求导便可进行控制器设计。

可以得到 STATCOM 经过输入-输出反馈线性化后数学模型的矩阵表达式为:

$$\begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} = \mathbf{A} + \mathbf{E} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L}x_1 - \frac{u_d}{L} + \omega x_2 \\ \frac{3u_d}{2Cx_3} \left(-\frac{R}{L}x_1 - \frac{u_d}{L} + \omega x_2 \right) - \frac{9u_d^2 x_1^2}{8C^2 x_3^3} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L} \\ \frac{3u_d}{4CL} & 0 \end{bmatrix}.$$

公式(10)中的系统仍然具有强耦合性, 逆系统的方法能够对其进行解耦和强制线性化, 在原控制输入前人为构造新的控制输入, 使其输出为原控制的输入。这样原来的二阶系统变化解为两个独立的系统, 简化了设计步骤。

引入新的状态变量 v_1 与 v_2 , 使之满足:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \mathbf{E}^{-1} \left(-\mathbf{A} + \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \right) \quad (11)$$

代入公式 (10), 可以得到新的系统:

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = v_1 \\ \dot{y}_2 = v_2 \end{cases} \quad (12)$$

分析公式(12), 已将原系统解耦为两个互相对立的子系统, 可根据子系统不同的相对阶段, 分别提出控制目标, 使控制器的设计更为灵活, 效果更加理想。

3 STATCOM 高阶滑模控制器设计

对公式(12)包含两个子系统, 考虑实际系统中的不确定性和扰动, 将系统写作如下形式:

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = \varphi_1 + \gamma_1 v_1 \\ \dot{y}_2 = \varphi_2 + \gamma_2 v_2 \end{cases} \quad (13)$$

其中, φ 和 γ 表示光滑的不确定项, 对不确定性做出了全局有界的假设, 即:

$$\begin{cases} |\varphi| \leq C \\ 0 < K_m \leq \gamma \leq K_M \end{cases} \quad (14)$$

其中 C 、 K_m 、 K_M 均为正常数。

对两个子系统分别设计高阶滑模控制器, 定义滑模面:

$$s_1 = e_1 = y_1 - y_1^* = i_q - i_q^* \quad (15)$$

$$s_2 = e_2 = u_d c - u_d c^* \quad (16)$$

其中 $y_1^* = i_q^*$ 表示所需要无功电流的期望值, u_{dc}^* 表示直流电压的期望值, e_1 与 e_2 表

示期望值与实际值的误差。对公式(12)中子系统 1 采用超螺旋算法, 这种算法适用于相对阶为 1 的系统, 能够保证系统有限时间稳定。该算法定义如下:

$$\begin{cases} \dot{v}_1 = -\lambda |s_1|^{\frac{1}{2}} \text{sgn}(s_1) + v_{11} \\ \dot{v}_{11} = -\alpha \text{sgn}(s_{11}) \end{cases} \quad (15)$$

其中 λ 与 α 为控制器参数, 均为正实数。当系统存在有界的不确定性时, 控制器参数满足一定条件即可保证系统的有限时间稳定。其有限时间稳定的充分条件为:

$$\begin{cases} \alpha > \frac{C}{K_m} \\ \lambda^2 > 2 \frac{\alpha K_M + C}{K_m} \end{cases} \quad (16)$$

对公式(12)中子系统 2 采用螺旋算法, 这种方法可同时保证滑模面及其导数同时有限时间内到达零点:

$$v_2 = -r_1 \text{sgn}(s_2) - r_2 \text{sgn}(\dot{s}_2) \quad (17)$$

其有限时间稳定的充分条件是:

$$\begin{cases} r_1 + r_2 K_m - C > r_1 - r_2 K_M - C \\ r_1 - r_2 K_m > C \end{cases} \quad (18)$$

4 稳定性分析

与以往无限时间收敛的渐近稳定控制方法相比, 有限时间稳定的控制方法是时间最优且具有更好的鲁棒性能。超螺旋算法可实现滑模面 s_1 在有限时间到零, 此时 $s_1 = e_1 = 0$, $y_1 = y_1^*$, $i_q = i_q^*$, $x_2 = x_2^*$ 。螺旋算法可实现滑模面 s_2 及其导数 \dot{s}_2 在有限时间内到零点。此时 $s_2 = \dot{s}_2 = e_2 = \dot{e}_2 = \dot{x}_3 = 0$, $u_{dc} = u_{dc}^*$, $y_2 = y_2^*$, $x_3 = x_3^*$ 。根据公式(8)可知, 到达稳定点时, 方程左右两侧均为零, 故 $x_1 = i_d = 0$, 整个系统均是有限时间稳定的。

5 仿真实验

为验证所提出高阶滑模控制算法的正确性和有效性, 对数学模型进行仿真验证, 根据文献[8], 选择电源电压为 380V, 直流侧电压初始值为 400V, 频率为 50Hz 连接电抗器为 8mH, 连接电阻为 0.1Ω, 直流侧电容为 10 000μF, 高阶滑模控制算法控制参

数 $\lambda=200$, $\alpha=100$, $r_1=2000$, $r_2=100$, 参数的选取应满足公式(16)和(18)。控制目标是稳定输出无功电流 20A, 直流侧电压保持在 800V。

仿真中, 采用传统滑模控制方法与积分滑模控制方法与所提出高阶滑模控制方法进行比较。

与传统滑模方法对比

将传统滑模控制方法应用其中, 传统滑模控制因其本质上的不连续开关特性导致系统存在抖振现象。根据传统滑模控制定义, 选取滑模面^[10]:

$$\begin{cases} s_1 = e_1 \\ s_2 = e_2 + k\dot{e}_2 \end{cases} \quad (19)$$

取滑模控制律得到:

$$\begin{cases} \dot{s}_1 = -\varepsilon_1 \text{sgn}(s_1) - k_1 s_1 \\ \dot{s}_2 = -\varepsilon_2 \text{sgn}(s_2) - k_2 s_2 \end{cases} \quad (20)$$

子系统控制律为:

$$\begin{cases} v_1 = -\varepsilon_1 \text{sgn}(s_1) - k_1 s_1 \\ v_2 = -\varepsilon_2 \text{sgn}(s_2) - k_2 s_2 \end{cases} \quad (21)$$

仿真中取控制参数, $k=1$, $\varepsilon_1=500$, $k_1=1000$, $\varepsilon_2=500$, $k_2=1000$ 。

与积分滑模控制方法对比

积分滑模再设计滑模面时使用的了状态误差的积分项, 导致了系统的阶数增加。积分项的引入一方面可以补偿模型的不确定性, 提高控制精度, 但另一方面, 在大的初始误差条件下, 会导致大的超调和长的调节时间从而使暂态性能恶化^{[11][12]}。

定义积分滑模面:

$$\begin{cases} s_1 = k_{11}e_1 + k_{12} \int_0^t e_1 d\tau \\ s_2 = k_{21}e_2 + \beta \dot{e}_2 + k_{22} \int_0^t e_2 d\tau \end{cases} \quad (22)$$

滑模控制律采用指数趋近律:

$$\begin{cases} \dot{s}_1 = -\varepsilon_1 \text{sgn}(s_1) - k_1 s_1 \\ \dot{s}_2 = -\varepsilon_2 \text{sgn}(s_2) - k_2 s_2 \end{cases} \quad (23)$$

控制量为:

$$\begin{cases} v_1 = \frac{1}{k_{11}}(k_{11}\dot{y}_1^* - k_{12}e_1 - \varepsilon_1 \text{sat}(s_1) - k_1 s_1) \\ v_2 = \frac{1}{\beta}(\beta \ddot{u}_{dc}^* - k_{22}e_2 - k_{21}\dot{e}_2 - \varepsilon_2 \text{sat}(s_2) - k_2 s_2) \end{cases} \quad (24)$$

积分滑模需要选择参数太多, 参数选择时需要利用极点配置方法, 这种方法需要将极点配置在复平面的左侧, 计算量大, 给控制器设计带来不便。仿真过程中, 取 $k_{11}=50$, $k_{12}=50$, $k_{21}=50$, $\beta=20$, $k_{22}=50$, $\varepsilon_1=1$, $k_1=0.1$, $\varepsilon_2=1$, $k_2=0.1$ 。

系统输入无功电流与直流侧电压稳定值如图 2 与图 3 所示。

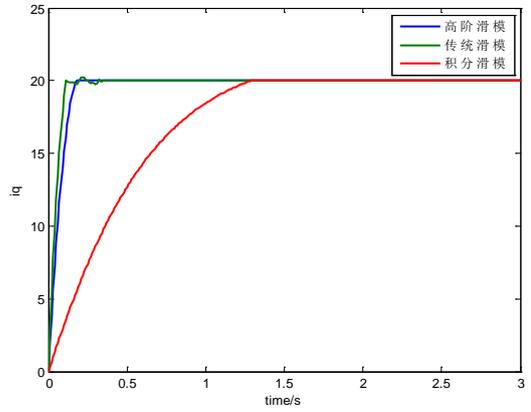


图 2 系统输出无功电流

Fig. 2 Reactive current of the system output

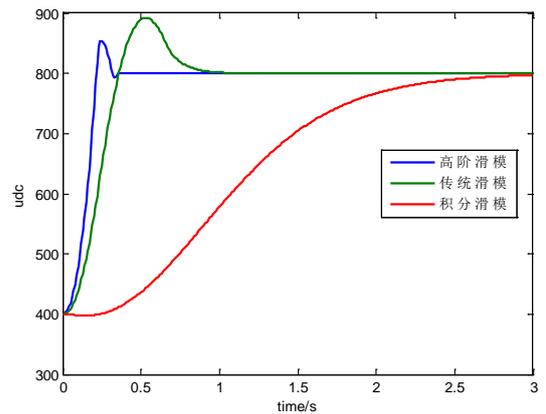


图 3 直流侧电压稳定值

Fig. 3 Voltage stability value of DC side

由仿真结果可以看出, 几种方法系统注入到电网的无功电流与直流侧电压均在有限时间内达到稳定值。但传统滑模控制存在

明显抖振现象，而积分滑模控制方法则存在调节时间过长的问题。

系统中存在各种各样的内部不确定性和外部扰动，所采用的两种高阶滑模控制对不确定均具有一定的抗干扰性，初始时刻便对系统加入不确定性进行仿真，令系统(13)中 $\varphi_1 = \sin(t)$ ， $\varphi_2 = \cos(t)$ ，原有控制器参数不动，仿真结果如图4和图5所示：

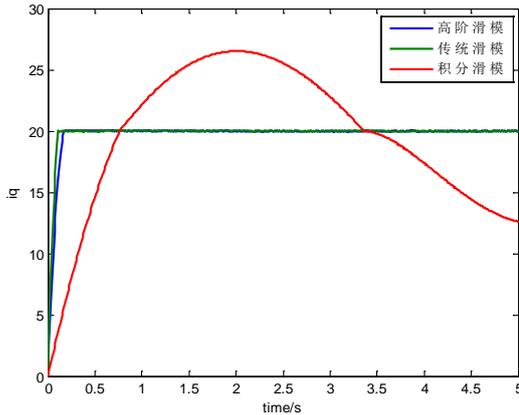


图4 增加扰动后系统输出无功电流
Fig. 4 Reactive current of system output under disturbance

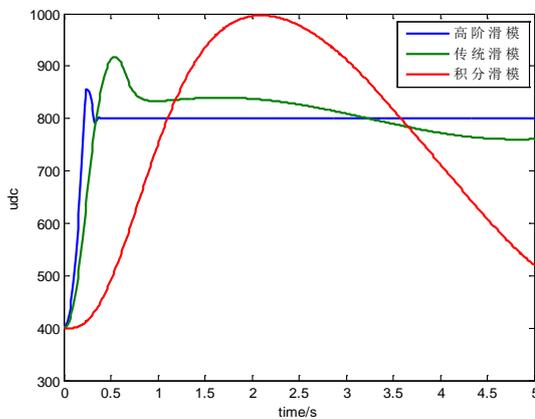


图5 增加扰动后系统直流侧电压稳定值
Fig. 5 Voltage stability value of DC side under disturbance

与图2和图3相比，虽然无功电流与直流侧电压值的收敛时间变长，超调也有增大，但仍能够保证状态在有限时间到达期望值。表明所提出的高阶滑模控制算法具有一定程度的鲁棒性。但同样参数情况下，传统滑模与积分滑模算法已经不能保持系统稳定。

在系统运行两秒钟后，加入扰动，控制

器参数不变，仿真结果如图6和图7所示。

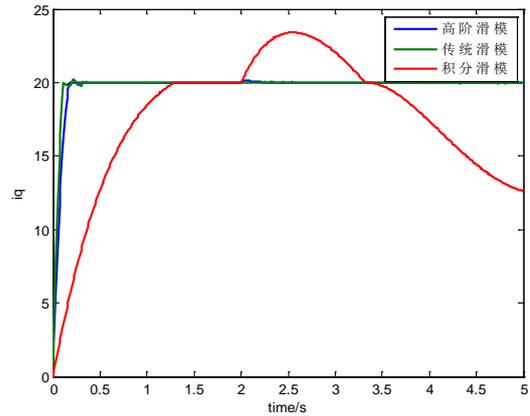


图6 运行中增加扰动后系统输出无功电流
Fig. 6 Reactive current of system output under disturbance in operation

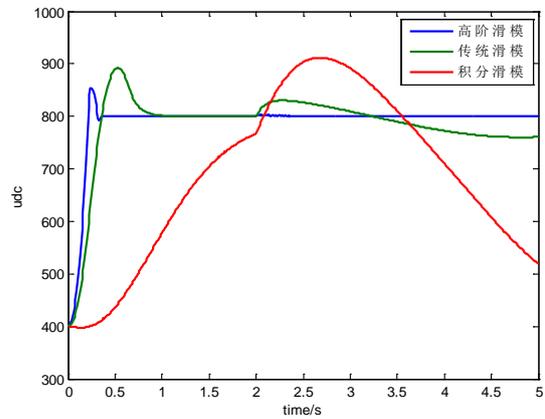


图7 运行中增加扰动后系统直流侧电压稳定值
Fig. 7 Voltage stability value of DC side under disturbance in operation

由图6和图7可以看到，在突然增加扰动的情况下，高阶滑模控制方法仍能够保持系统稳定，而传统滑模控制和积分滑模控制方法已经不能保证系统稳定。

6 结论

为提高 STATCOM 控制系统动态性能和鲁棒性，提出一种基于高阶滑模控制的 STATCOM 有限时间鲁棒控制方法。该方法对无功补偿电流与直流侧电容电压分别采用超螺旋与螺旋算法进行控制器设计，这两种控制方法不仅在有限时间内，快速稳定无功补偿电流与直流侧电压，还对系统不确定性具有一定的鲁棒性。仿真结果验证了所提出方法的有效性，通过与传统滑模控制和积

分滑模控制方法的对比, 展现出高阶滑模控制方法在对抗不确定性方面优势更加明显。

7 参考文献

- [1]夏正龙,史丽萍,杨晓冬,等. 一种改进的电网电压不平衡环境下链式 STATCOM 控制策略[J]. 电网技术,2014,38(5):1310-1316.
- Xia Zhenglong, Shi Liping, Yang Xiaodong, et al. An improved control strategy for cascaded STATCOM under supply voltage imbalance[J]. Power System Technology, 2014,38(5):1310-1316.
- [2]何健,丁晓群,陈光宇,等. 基于 DFIG 与 SVC 的风电场无功电压协调控制策略[J]. 电力建设,2015,36(5):1-6.
- He Jian, Ding Xiaoqun, Chen Guangyu, et al. Reactive voltage coordinated control strategy for wind farm based on DFIG and SVC[J]. Electric Power Construction,2015,36(5):1-6.
- [3]舒泽亮,丁娜,郭育华,等. 基于 SVPWM 的 STATCOM 电压电流双闭环控制[J]. 电力自动化设备,2008,28(9):27-30.
- Shu Zeliang, Ding Na, Guo Yuhua, et al. SVPWM-based voltage-loop and current-loop controls of STATCOM[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(9):27-30.
- [4]衡凤平,陈传清,崔鑫,等. 基于非线性 PI 算法 STATCOM 控制系统研究[J]. 电力电子技术,2017,51(3):51-53.
- Heng Fengping, Chen Chuanqing, Cui Xin, et al. Research on STATCOM control system based on nonlinear PI algorithm[J]. Power Electronics, 2017,51(3):51-53.
- [5]丁可,王博宇,莫树猛. 基于 D-STATCOM 原理的控制策略研究[J]. 电工技术,2017,1:27-29.
- Ding Ke, Wang Boyu, Mo Shumeng. Research on control strategy based on D-STATCOM principle[J]. Electrotechnics,2017,1:27-29.
- [6]单翀,王奔,陈丹,等. 基于滑模控制理论的 STATCOM 无功补偿控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(18):150-154.
- Shan Chonghao, Wang Ben, Chen Dan, et al. Study of the reactive compensation of STATCOM based on the sliding mode control theory[J]. Power System Protection and Control,2010,38(18):150-154.
- [7]邹超. 基于滑模变结构的 STATCOM 控制策略仿真研究[J]. 贵州电力技术,2015,11(18):80-83.
- Zou Chao. Simulation Research of STATCOM control strategy based on sliding mode variable structure[J]. Guizhou Electric Power Technology,2015,11(18):80-83.

[8]龚鸿,王渝红,李媛,等. D-STATCOM 的输入-输出反馈线性化滑模变结构控制[J]. 电力系统自动化,2016,40(5):102-108.

Gong Hong, Wang Yuhong, Li Yuan, et al. An input-output feedback linearized sliding mode control for D-STATCOM[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(5):102-108.

[9]高宇澄,赵伟,黄松岭. 基于瞬时无功理论的单相无功功率相关定义[J]. 电测与仪表,2016,53(20):1-8.

Gao Yucheng, Zhao Wei, Huang Songling. Reactive power definitions in single-phase circuits based on instantaneous reactive power theory[J]. Electrical Measurement and Instrumentation,2016,53(20):1-8.

[10]王鑫,陈欣,李继广. 一种新型滑模控制器的设计及其应用[J]. 科学技术与工程,2017,17(16):321-325.

Wang Xin, Chen Xin, Li Jiguang. Design of a novel sliding mode controller and its application[J]. Science Technology and Engineering,2017,17(16):321-325.

[11]李鹏,郑志强. 非线性积分滑模控制方法[J]. 控制理论与应用,2011,28(3):421-426.

Li Peng, Zheng Zhiqiang. Sliding mode control approach with nonlinear integrator[J]. Control Theory and Applications,2011,28(3):421-426.

[12]吴宇,皇甫宜耿,张琳,等. 大扰动 Buck-Boost 变换器的鲁棒高阶滑模控制[J]. 中国电机工程学报,2015,35(7):1740-1748.

Wu Yu, Huangfu Yigeng, Zhang Lin, et al. A robust high order sliding mode for buck-boost converters with large disturbances[J]. Proceedings of CSEE,2015,35(7):1740-1748.

收稿日期: yyyy-mm-dd

作者简介:

杨洁(1985), 女, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为智能电力与控制;

曹军威(1973), 男, 博士, 研究员, 本文通信作者, 主要研究方向为电能质量、能源互联网、先进计算技术等;

Email:jcao@tsinghua.edu.cn

吴扣林(1984), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为静止无功发生器等大功率电力电子技术;

方太勋(1973), 男, 硕士, 教授级高工, 主要研究方向为大功率电力电子技术;

常喜强(1976), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统调度自动化。

(编辑 ***)