

D-STATCOM 的输入-输出反馈线性化滑模变结构控制

龚 鸿, 王渝红, 李 媛, 李兴源, 魏 亮

(四川大学电气信息学院, 四川省成都市 610065)

摘要: 为提高配电网静止同步补偿器(D-STATCOM)控制系统动态性能和鲁棒性,提出一种基于输入-输出反馈线性化与积分滑模控制相结合的 D-STATCOM 控制方法。该方法利用输入-输出反馈线性化实现 D-STATCOM 有功电流与无功电流的解耦,消除 D-STATCOM 直流侧电容电压的非线性特性,使之在支撑公共耦合点(PCC)处电压的同时快速稳定直流侧电压,并利用积分滑模控制增强其对参数摄动的鲁棒性。仿真和物理实验结果表明,D-STATCOM 采用文中提出的控制策略,配电网 PCC 处电压和直流侧电容电压均能快速、准确地调整到其参考值,并在外部干扰及参数变化时具有较强的鲁棒性。

关键词: 配电网静止同步补偿器; 输入-输出反馈线性化; 非线性; 积分滑模控制; 鲁棒性

0 引言

配电网静止同步补偿器(D-STATCOM)作为一种改善电能质量的重要电力电子装置,具有补偿无功功率、减小谐波畸变率,以及抑制电压闪变和三相不平衡等功能^[1-4]。与其他设备相比,D-STATCOM 响应速度快、体积小^[5-6],但其补偿效果主要取决于控制器的设计,D-STATCOM 控制策略的研究是目前的研究热点。

文献[7]提出一种用于维持静止同步补偿器(STATCOM)接入点电压的变结构神经网络控制,该方法针对电网参数的变化具有较好的鲁棒性、自适应性,但对 STATCOM 有功电流与无功电流之间耦合关系的讨论不多。基于瞬时功率理论,文献[8]提出一种直接电压控制和模糊自适应比例-积分(PD)控制相结合的方法,该方法算法简单、容易实现,侧重于对电压进行直接控制,但 D-STATCOM 并未对输出电流进行控制。通过对 D-STATCOM 非线性数学模型的时域分析,文献[9]提出一种新型的滑模控制方法,该方法鲁棒性好,能较好地抑制电流的毛刺现象,但没有考虑直流侧电压因其非线性特性而难以实现快速稳定的问题。文献[10-11]针对 STATCOM 的多变量、非线性、强耦合的系统模型,提出了一种 D-STATCOM 的非线

性控制方法,实现了 D-STATCOM 输出电压与输出电流耦合关系的消除,解决了直流侧电压因其非线性特性而存在难以快速稳定的问题,但易受内部参数摄动及外部干扰的影响,鲁棒性略显不足。

输入-输出反馈线性化通过坐标变换实现 D-STATCOM 输入-输出的精确线性化,使其变成完全或部分解耦的线性控制系统^[12-14]。而滑模控制作为控制系统的一种综合控制方法,具有响应快速、鲁棒性强、无需系统在线辨识、物理实现简单等优点^[15-17]。本文利用输入-输出反馈线性化的方法将 D-STATCOM 的非线性模型线性化,得到 D-STATCOM 的伪线性模型,再利用滑模控制理论,设计出伪线性系统的积分滑模控制器。其中,输入-输出反馈线性化可将 D-STATCOM 的有功电流和无功电流进行解耦,并且消除直流侧电压非线性特性,积分滑模控制在消除控制的静态误差同时,提高了控制系统的鲁棒性。本文在 MATLAB/Simulink 中进行仿真验证,并设计了一套 D-STATCOM 物理实验模型进行动态模拟物理实验,验证了该方法的正确性。

1 STATCOM 数学模型

D-STATCOM 电路拓扑结构如图 1 所示。图中: U_{ga}, U_{gb}, U_{gc} 和 i_{ga}, i_{gb}, i_{gc} 分别为 PCC 处电压和电流; U_{sa}, U_{sb}, U_{sc} 和 i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} 分别为 D-STATCOM 补偿输出的三相电压和电流; i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc} 为负载电流; L 和 R 分别为连接电抗值和连接电阻值; C 为直流侧滤波电容值。

收稿日期: 2015-08-03; 修回日期: 2015-10-29。

上网日期: 2016-01-18。

教育部博士点基金资助项目(20110181120007)。

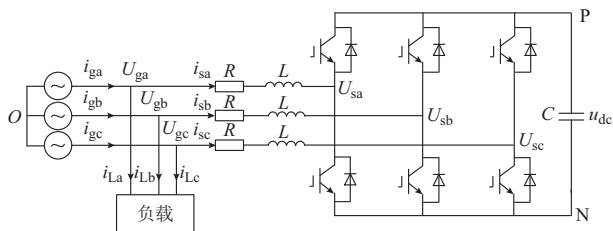


图1 D-STATCOM 电路拓扑结构
Fig.1 Circuit topology of D-STATCOM

D-STATCOM 在三相静止坐标下的数学模型如下:

$$\begin{cases} L \frac{di_{sa}}{dt} = U_{ga} - U_{sa} - Ri_{sa} \\ L \frac{di_{sb}}{dt} = U_{gb} - U_{sb} - Ri_{sb} \\ L \frac{di_{sc}}{dt} = U_{gc} - U_{sc} - Ri_{sc} \end{cases} \quad (1)$$

通过 Park 变换,式(1)可变为 dq 坐标下的形式为:

$$L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -R & \omega L & -M \cos \delta \\ -\omega L & -R & -M \sin \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ u_{dc} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: i_d 和 i_q 分别为 D-STATCOM 产生的 d, q 轴电流; u_d 和 u_q 分别为 PCC 处的 d, q 轴电压; δ 为 D-STATCOM 输出电压与 PCC 处电压之间的角度; ω 为电压矢量同步旋转的角速度; u_{dc} 为 D-STATCOM 直流侧电容电压; M 为 D-STATCOM 交流侧输出电压有效值与直流电容电压之比,有

$$M = \frac{U_{sa}}{u_{dc}} \quad (3)$$

忽略 D-STATCOM 换流器和连接阻抗的损耗,由能量守恒定律可知,直流侧有功功率等于配电网 PCC 处流入的有功功率,即

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

式中: i_{dc} 为 D-STATCOM 直流侧电流。

为了使计算更加方便,重新选取参考坐标,使 $u_q = 0$,可得到直流侧电压 u_{dc} 关于 d 轴电流 i_d 的非线性方程:

$$\frac{du_{dc}}{dt} = \frac{3u_d i_d}{2Cu_{dc}} \quad (5)$$

显然,式(5)中的 i_d 与 u_{dc} 间存在非线性特性,因此拟引入输入-输出反馈线性化以消除其非线性。

2 D-STATCOM 输入-输出反馈线性化积分滑模控制器设计

2.1 D-STATCOM 输入-输出反馈线性化

设多输入多输出系统如下式^[18]所示:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + G(x)u \\ y = h(x) \end{cases} \quad (6)$$

式中: x 为 n 维状态列向量; u 为 m 维控制列向量; y 为 m 维输出列向量; f 和 G 为光滑向量场; h 为光滑向量函数。

将输出 y 对时间 t 进行 r_i 次微分,直到至少有一个控制量以显式出现,即

$$y_i^{(r_i)} = L_f^{(r_i)} h_i + \sum_{j=1}^m L_{g_j} L_f^{(r_i-1)} h_i u_j \quad (7)$$

其中李导数

$$L_f^{(r_i)} h_i(x) = \frac{\partial (L_f^{(r_i-1)} h_i(x))}{\partial x} f(x) \quad (8)$$

$$L_{g_j} L_f^{(r_i-1)} h_i(x) = \frac{\partial (L_f^{(r_i-1)} h_i(x))}{\partial x} g_j(x) \quad (9)$$

式中: $i = 1, 2, 3, \dots$ 。

选取 D-STATCOM 输入-输出反馈线性化的状态变量 $X = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T = [i_d \ i_q \ u_{dc}]^T$,控制变量 $U = [u_1 \ u_2]^T = [M \cos \delta \ M \sin \delta]^T$,输出变量 $Y = [y_1 \ y_2]^T = [i_q \ u_{dc}]^T$,则由式(2)、式(5)可以得到用矩阵形式表达的 D-STATCOM 的数学模型为:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L}x_1 + \omega x_2 - \frac{u_d}{L} \\ -\frac{R}{L}x_2 - \omega x_1 - \frac{u_q}{L} \\ \frac{3u_d x_1}{2Cx_3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\dot{y}_1 = \dot{i}_q = \dot{x}_2 = -\frac{R}{L}x_2 - \omega x_1 - \frac{u_q}{L} + \frac{u_2}{L} \quad (11)$$

$$\dot{y}_2 = \dot{u}_{dc} = \dot{x}_3 = \frac{3u_d x_1}{2Cx_3} \quad (12)$$

由式(10)可以看出 y_1 与控制变量 u_2 存在显式表达,而 y_2 与控制变量 u_1 无显性关系,则由输入-输出反馈线性化理论可知,继续对 y_2 求导,直到其出现显式表达。

$$\ddot{y}_2 = -\frac{3u_d}{2Cx_3} \left(\frac{R}{L}x_1 - \omega x_2 - \frac{3u_d x_1^2}{2Cx_3^2} \right) + \frac{3u_d}{2LCx_3} u_1 \quad (13)$$

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

$$\begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} = \mathbf{A}(t) + \mathbf{E}(t) \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中

$$\mathbf{A}(t) = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L}x_2 - \omega x_1 - \frac{u_q}{L} \\ -\frac{3u_d}{2Cx_3} \left(\frac{R}{L}x_1 - \omega x_2 + \frac{u_d}{L} + \frac{3u_d x_1^2}{2Cx_3^2} \right) \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\mathbf{E}(t) = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L} \\ \frac{3u_d}{2LCx_3} & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

由式(15)可知,由于耦合项 ωx_1 的存在,不能快速地对输出变量 y_1 进行控制,且 i_d 的变化会引起 i_q 相应的变化。而输出变量 y_2 由于其状态变量与控制变量相乘存在非线性,亦难以实现对直流电压的快速控制。

因此,为实现 D-STATCOM 有功电流与无功电流的解耦、直流侧电压非线性特性的消除,引入两个新的控制变量 v_1 和 v_2 ,使之满足:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \mathbf{E}(t)^{-1} \left(-\mathbf{A}(t) + \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \right) \quad (17)$$

则由式(14)、式(17)可以得到新的控制变量与输出变量 \dot{y}_1 和 \dot{y}_2 满足简单的线性关系为:

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = v_1 \\ \dot{y}_2 = v_2 \end{cases} \quad (18)$$

由上式可知输入输出满足积分关系,系统可解耦为两个相互对立的子系统,不仅实现了有功电流与无功电流的解耦,而且消除了直流侧电压的非线性。

2.2 D-STATCOM 积分滑模控制设计

滑模变结构控制系统从初始状态到最终稳定包括两个阶段:趋近段与滑动模态段。系统进入滑动模态后,对内部参数摄动和外部扰动具有较好的自适应性^[19]。利用输入-输出反馈线性化将有功电流与无功电流解耦、直流电压非线性消除,再对控制量进行积分滑模控制设计,将输入-输出反馈线性化理论与积分滑模变结构控制理论相结合,保证 D-STATCOM 在外部干扰下与内部参数变化时,同时支撑 PCC 处电压与稳定直流侧电压,提高配电网的电能质量。

在滑模变结构控制中,滑模面的选取至关重要。在传统滑模变结构控制中,存在不可消除的静态误差。为了消除这种误差,可引入积分环节,构成积分滑模控制^[20-21]。

本文选取滑模面为:

$$\begin{cases} S_1 = k_{11}e_1 + k_{12} \int e_1 \\ S_2 = k_{21}e_2 + \beta \dot{e}_2 + k_{22} \int e_2 \end{cases} \quad (19)$$

式中: $e_1 = i_q - i_q^*$, $e_2 = u_{dc} - u_{dc}^*$, 其中 i_q^* 和 u_{dc}^* 分别为 q 轴电流与直流侧电压参考值; $k_{11}, k_{12}, k_{21}, k_{22}, \beta$ 为积分滑模面的参数。

为减小滑模控制的抖振,滑模控制律采用指数趋近律并与饱和函数结合,即

$$\begin{cases} \dot{s}_1 = -\epsilon_1 \text{sat}(s_1) - k_1 s_1 \\ \dot{s}_2 = -\epsilon_2 \text{sat}(s_2) - k_2 s_2 \end{cases} \quad (20)$$

式中: $\text{sat}(\cdot)$ 为饱和函数;为了使系统具有良好的控制效果,且响应快、抖振小, ϵ_1 和 ϵ_2 应尽量选取较小, k_1 和 k_2 应尽量选取较大。

由式(18)至式(20)可以得到新引入控制量为:

$$\begin{cases} v_1 = \frac{1}{k_{11}}(k_{11}\dot{y}_1^* - k_{12}e_1 - \epsilon_1 \text{sat}(s_1) - k_1 s_1) \\ v_2 = \frac{1}{\beta}(\beta \ddot{u}_{dc}^* - k_{22}e_2 - k_{21}\dot{e}_2 - \epsilon_2 \text{sat}(s_2) - k_2 s_2) \end{cases} \quad (21)$$

结合式(18)、式(21)可得, \dot{y}_1 和 \dot{y}_2 的跟踪误差 e_1 和 e_2 满足:

$$\begin{cases} k_{11}\ddot{e}_1 + k_{12}\dot{e}_1 + k_1 k_{11}\dot{e}_1 + k_1 k_{12}e_1 = 0 \\ \beta \ddot{e}_2 + k_{21}\dot{e}_2 + k_{22}e_2 + k_2 k_{21}\dot{e}_2 + k_2 \beta \ddot{e}_2 + k_2 k_{22}e_2 = 0 \end{cases} \quad (22)$$

利用极点配置的方法可求得 $k_1, k_2, k_{11}, k_{12}, k_{21}, k_{22}, \beta$ 的值,式(22)的极点需配置在复平面的左侧,以满足系统稳定的条件。

根据式(21)可得到 D-STATCOM 的输入-输出反馈线性化与积分滑模结合控制框图,如图 2 所示。图中: U_{pcc} 和 U_{pcc}^* 分别为 PCC 处电压及其参考值。

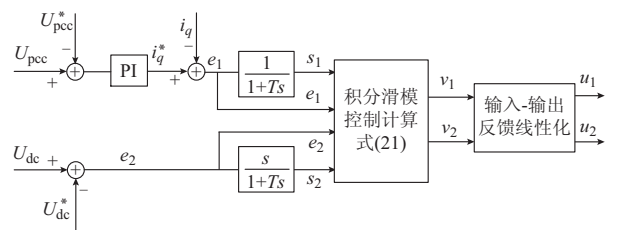


图 2 输入-输出反馈线性化与积分滑模控制结合控制框图

Fig.2 Control block diagram of input-output feedback linearized integral sliding mode controller

3 仿真与实验验证

3.1 数字仿真验证

为了验证 D-STATCOM 输入-输出反馈线性

化积分滑模控制策略的正确性和有效性,本文在 MATLAB/Simulink 中建立如图 1 所示的仿真模型进行数字仿真验证。选择电源电压为 380 V,直流侧电压为 800 V,频率为 50 Hz,连接电抗为 8 mH,连接电阻为 0.1 Ω ,直流侧电容为 10 000 μF 。滑模控制参数 $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 3, \beta = 2, k_1 = k_2 = k_{11} = k_{21} = 2, k_{12} = k_{22} = 2\ 500$ 。PI 控制参数通过试凑法仿真得到最优控制参数。

仿真过程中,通过在 PCC 处接入感性负荷来模拟 PCC 处电压跌落,通过改变 D-STATCOM 系统中部分电气参数来模拟系统状态的变化,从而验证控制器的动态性能和鲁棒性。

仿真采用传统的 PI 控制与本文提出的方法进行比较,并在 $t = 0.25\ \text{s}$ 时突加感性负荷,在 0.45 s 时切除该负荷。图 3 分别为 PI 控制与输入-输出反馈线性化积分滑模控制的 PCC 处电压的响应曲线(标么值)与直流侧电压曲线。

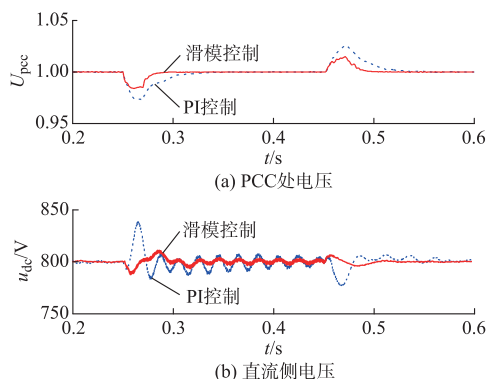


图 3 两种控制策略下的仿真曲线
Fig.3 Simulation curves under two control strategies

采用本文提出的控制策略时,PCC 处电压波动比 PI 控制时小约 2%,直流电压波动比 PI 控制时小 25 V 左右,且采用本文提出的控制策略在 2 个工频周期左右恢复稳定,而采用 PI 控制在 5 个工频周期左右才趋于稳定。可以看出,采用 PI 控制时,由于无功电流与有功电流之间的耦合作用,且有功电流与 D-STATCOM 直流侧电容电压存在必然的联系,造成 D-STATCOM 无功输出变化时,对其直流侧电压产生较大的波动,并且由于直流侧电压与控制输入之间的非线性,使之不能快速稳定。而当采用输入-输出反馈线性化积分滑模控制时,由于利用了输入-输出反馈线性化对有功电流和无功电流解耦,且消除了 D-STATCOM 直流侧电压的非线性特性,对直流电压进行直接控制,则 D-STATCOM 在输出无功功率对 PCC 处电压快速支撑的同时,直流侧电压波动较小,响应更加迅速,比

传统的 PI 控制具有较小的超调量和较短的调整时间。

为了验证本文所述控制策略的鲁棒性,在 $t = 0.1\ \text{s}$ 时将仿真模型的连接电抗增加 50%,且为了与图 3 进行对比,在 0.25 s 时突加感性负荷,在 0.45 s 时切除该负荷。图 4 分别给出了参数改动后两种控制策略下的 PCC 处电压曲线与直流侧电压曲线。

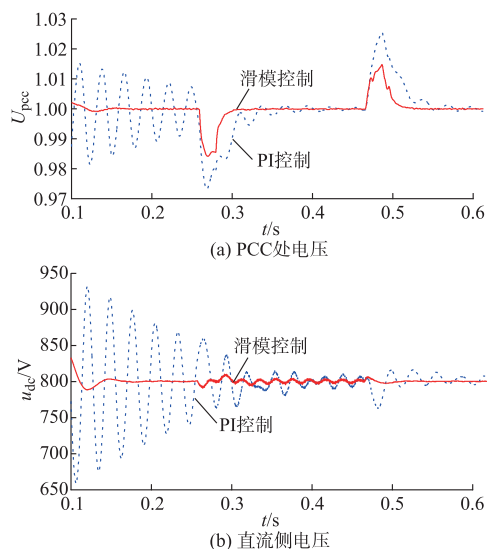


图 4 参数增加 50%后两种控制策略下的仿真曲线
Fig.4 Simulation curves under two control strategies after parameters increasing by 50%

由图 3、图 4 可知,当 D-STATCOM 模型参数增加后,PI 控制器的稳定性受到破坏,此时,PCC 处电压和直流侧电压均发生振荡,而采用本文设计的控制器时,控制性能几乎没有受到参数变化的影响。这是因为滑模控制的自适应鲁棒性,使得控制器在系统模型及参数不准确时依然具有良好的控制效果。

3.2 物理实验验证

为了进一步验证本文所述控制策略的正确性及有效性,进行了实验研究。实验中采用以 TMS320F28069 型数字信号处理器(DSP)为核心器件,主要实现本文提出的 D-STATCOM 控制算法。基于图 1 设计了一套 D-STATCOM 实验模型,其中电网电压采用三相可编程电压源,主电路开关器件采用型号为 CM300DY-24A 的绝缘栅双极型晶体管(IGBT),其额定电流为 300 A,耐压 1 200 V。采用 DL750 示波记录仪进行实验数据的收集、分析。D-STATCOM 具体工作参数如下:配电网电压 380 V;配电网频率 50 Hz;IGBT 开关频率 10 kHz;连接电抗 8 mH;滤波电容 5 μF ;连接电阻 0.1 Ω ;D-STATCOM 直流侧电压 800 V;D-STATCOM 直流

侧电容 $10\ 000\ \mu\text{F}$; 负载电阻 $25\ \Omega$; 负载电感 $50\ \text{mH}$ 。

实验中,通过在 $1.2\ \text{s}$ 时突加感性负荷,分别采用 PI 控制与本文提出的控制策略,得到控制器的动态性能。通过改变连接电抗的参数,验证本文控制策略的鲁棒性。

图 5 所示为 D-STATCOM 分别采用 PI 控制与本文控制策略控制时,PCC 处 a 相电压波形。由图 5(a)可知,在 $1.2\ \text{s}$ 投入感性负荷后,a 相电压在经过约 $0.4\ \text{s}$ 、幅度为 0.6 (标么值)的振荡后稳定,而由 5(b)图可知,采用本文提出的控制策略后,a 相电压波动的幅度约为 0.2 (标么值),并且在 $0.2\ \text{s}$ 后达到了稳定。

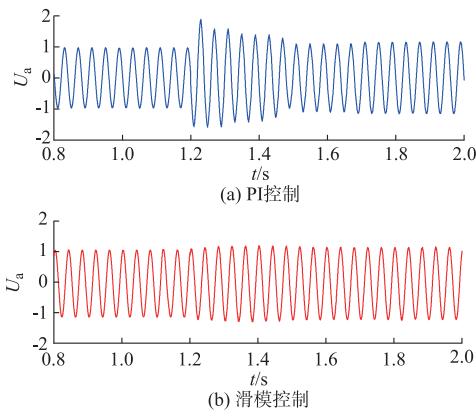


图 5 采用两种控制策略时 PCC 处 a 相电压波形
Fig.5 Phase-a voltage curve at PCC under two control strategies

图 6 所示为突加感性负荷后,D-STATCOM 分别采用 PI 控制与本文控制策略控制时 D-STATCOM 直流侧电压的波形。比较图 6(a)与图 6(b)可知:采用 PI 控制时,直流电压波动最大达到 $95\ \text{V}$,且在 $3\ \text{s}$ 时在 $\pm 10\ \text{V}$ 左右波动;而采用本文提出的控制策略时,直流电压波动最大达到 $35\ \text{V}$,且在 $2\ \text{s}$ 时其在 $\pm 10\ \text{V}$ 左右波动。由于直流侧电容值较大,其调整时间均相对缓慢,但本文控制策略依然比 PI 控制时调整时间更短。本文滑模控制用于实际控制系统时需将其离散化,因此对直流侧电压的控制会产生一定程度的波动,故需采用较大容量的直流侧电容抑制其波动。通过对其离散后的控制系统参数优化是下一步的研究工作重点。

图 7 所示为改变 D-STATCOM 连接电抗参数后的直流侧电压波形。将连接电抗在 $1.2\ \text{s}$ 时增加 50% ,可以看出采用 PI 控制时直流侧电压产生了幅度为 $200\ \text{V}$ 的振荡,且不断衰减,其控制器稳定性受到了破坏;而采用本文提出的控制策略时直流侧电压则能较快稳定,并且波动幅值小,其控制器稳定性

几乎不受到参数变化的影响。可见,当系统参数发生严重扰动时,采用本文提出的控制方法提高了控制系统的鲁棒性,对系统参数扰动具有较强的自适应性。由图 7 可知,仿真验证与实验所得结论相同,互相验证,进一步证明了采用本文提出的控制策略的正确性及有效性。

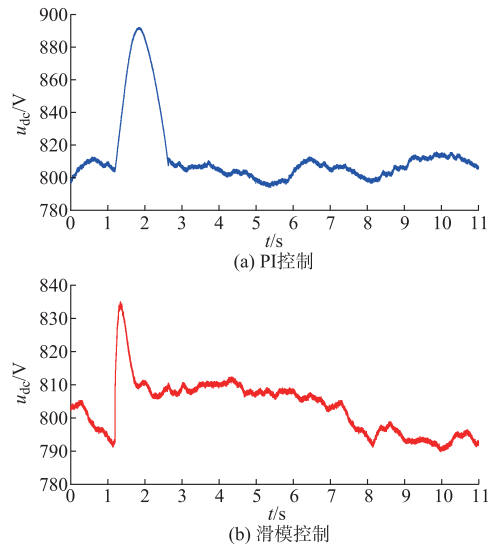


图 6 采用两种控制策略时的直流侧电压波形
Fig.6 Voltage curves at DC side under two control strategies

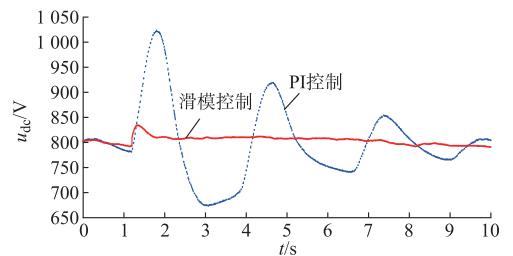


图 7 参数增加 50% 后的直流侧电压波形
Fig.7 Voltage curves at DC side after parameters increasing by 50%

4 结语

本文基于输入-输出反馈线性化理论建立了 D-STATCOM 动态数学模型,并引入滑模控制理论,设计了一种新的 D-STATCOM 控制器。输入-输出反馈线性化将其解耦且消除非线性,滑模控制提高控制系统的鲁棒性,两者互相扬长避短,获得了具有良好控制性能的控制器。通过仿真和物理实验结果表明:相比于传统的 PI 控制方法,该控制器使直流侧电压与 PCC 处电压均快速稳定,且超调量小、调整时间短、动态性能较好,并且对内部电气参数改变及模型参数不确定具有较好的自适应鲁棒性。

参 考 文 献

- [1] KUMAR C, MISHRA M. An improved hybrid DSTATCOM topology to compensate reactive and nonlinear loads[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2014, 61(12): 6517-6527.
- [2] LI C, XIAO L, CAO Y, et al. Optimal allocation of multi-type FACTS devices in power systems based on power flow entropy [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2014, 2(2): 173-180.
- [3] 张建成,黄立培,吴速.电压源型电能质量控制技术研究[J].电力系统自动化,2004,28(4):45-48.
ZHANG Jiancheng, HUANG Lipai, WU Su. Study on the power quality control technique of synchronous voltage sources [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(4): 45-48.
- [4] MOHOD S W, AWARE M V. A STATCOM-control scheme for grid connected wind energy system for power quality improvement[J]. IEEE Systems Journal, 2010, 4(3): 346-352.
- [5] 魏承志,苏杰和,文安.含 DSTATCOM 和分布式电源配电网的无功电压协调控制[J].电力系统自动化,2015,39(9):132-137. DOI:10.7500/AEPS20140904004.
WEI Chengzhi, SU Jiehe, WEN An. Reactive voltage coordinated control for distribution network with DSTATCOMs and DGs[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 132-137. DOI: 10.7500/AEPS20140904004.
- [6] 韩英铎,严干贵,姜齐荣,等.信息电力与 FACTS 及 DFACTS 技术[J].电力系统自动化,2000,24(19):1-7.
HAN Yingduo, YAN Gangui, JIANG Qirong, et al. Electric power in information society and FACTS & DFACTS [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(19): 1-7.
- [7] 唐杰,罗安,周柯.静止同步补偿器电压控制器的设计与实现[J].电工技术学报,2006,21(8):103-106.
TANG Jie, LUO An, ZHOU Ke. Design and realization voltage control for static synchronous compensator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(8): 103-106.
- [8] 唐杰,罗安,欧剑波,等.配电静止同步补偿器的模糊自适应 PI 控制策略[J].电工技术学报,2008,23(2):120-126.
TANG Jie, LUO An, OU Jianbo, et al. Voltage control strategy of D-STATCOM based on fuzzy-PI controller [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(2): 120-126.
- [9] 张伟奎,常鲜戎,李涛,等.基于 DSP 和新型滑模控制的 DSTATCOM 研究[J].电力系统保护与控制,2014,42(13): 7-12.
ZHANG Weikui, CHANG Xianrong, LI Tao, et al. Research on DSTATCOM based on DSP and novel sliding mode control [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(13): 7-12.
- [10] 汤赐.配电网静止同步补偿器的非线性控制方法[J].电力自动化设备,2011,31(3):18-23.
TANG Ci. The nonlinear control method for distribution static synchronous compensator [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(3): 18-23.
- [11] SOTO D, PENA R. Nonlinear control strategies for cascaded multilevel STATCOMs[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(4): 1919-1927.
- [12] XIA M, MAO Y. Integral sliding mode control strategy of D-STATCOM for unbalanced load compensation under various disturbances [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013, 20(13): 1-14.
- [13] 吴青华,蒋大.非线性控制理论在电力系统中应用综述[J].电力系统自动化,2001,25(3):1-10.
WU Qinghua, JIANG Da. Survey on nonlinear theory and its applications in power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(3): 1-10.
- [14] 兰华,尹鹏,蔡国伟,等.风电场中静止同步补偿器的输入-输出反馈线性化控制[J].电网技术,2009,33(17):141-145.
LAN Hua, YIN Peng, CAI Guowei, et al. Input-output feedback linearization control for static synchronous compensator in wind farm [J]. Power System Technology, 2009, 33(17): 141-145.
- [15] JIANG Z, XIANG L. Review of exact linearization method applied to power electronics system[C]// The 4th IEEE Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), March 26-28, 2012, Shanghai, China: 4p.
- [16] 徐榕,于泳,于雁南.基于离散状态观测器的 H 桥级联 STATCOM 无差拍控制[J].电力系统自动化,2014,38(21): 58-65. DOI:10.7500/AEPS20130714013.
XU Rong, YU Yong, YU Yannan. Dead-beat control of H-bridge cascaded STATCOM based on discrete state observer [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(21): 58-65. DOI: 10.7500/AEPS20130714013.
- [17] 倪雨,许建平,王金平,等.滞环调制全局滑模控制 Buck 变换器设计[J].中国电机工程学报,2010,30(21):1-6.
NI Yu, XU Jianping, WANG Jinping, et al. Design of global sliding mode control buck converter with hysteresis modulation [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(21): 1-6.
- [18] 全宇,年珩.不平衡及谐波电网下并网逆变器的谐振滑模控制技术[J].中国电机工程学报,2014,34(9):1345-1352.
QUAN Yu, NIAN Heng. Resonance-based sliding mode control of grid connected inverters under unbalanced and harmonic grid voltages [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(9): 1345-1352.
- [19] 刘锦波,明文龙.一种基于输入/输出反馈线性化的 Boost 型 DC/DC 变换器非线性控制方案[J].中国电机工程学报,2010, 30(27):55-61.
LIU Jinbo, MING Wenlong. A novel scheme of nonlinear control strategy based on input-output linearization for Boost type DC/DC converter [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(27): 55-61.
- [20] WANG Xi, WANG Yuhong, LI Xingyuan. Design of the static var compensator adaptive sliding mode controller considering model uncertainty and time-delay [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(23): 71-78.
- [21] HOU Yong, YOU Guodong. Integral sliding mode variable structure control for DSTATCOM [C]// IEEE International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), March 13-14, 2010, Changsha,

China; 476-479.

压直流输电、电力系统稳定与控制、新能源接入。E-mail:
yuhongwang@scu.edu.cn

龚 鸿(1992—),男,硕士研究生,主要研究方向:高压
直流输电、FACTS设备。E-mail: xinyuescuedu@163.com

李 媛(1981—),女,副教授,主要研究方向:新能源、电
能质量。E-mail: yixialili@gmail.com

王渝红(1971—),女,通信作者,教授,主要研究方向:高

(编辑 章黎)

An Input-output Feedback Linearized Sliding Mode Control for D-STATCOM

GONG Hong, WANG Yuhong, LI Yuan, LI Xingyuan, WEI Liang

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: To improve the dynamic performance and robustness of a distribution static synchronous compensator (D-STATCOM) control system, an input-output feedback linearization technique combined with integral sliding mode control method for D-STATCOM is presented. Input-output feedback linearization technique enables the active current and reactive current decoupling for D-STATCOM, and eliminates the non-linear dynamics on capacitor voltage at DC side, which makes it much stable. The integral sliding mode control is also adopted to improve the D-STATCOM control robustness. The simulation and physical experimental results show that the voltages at point of common coupling (PCC) and DC voltage of D-STATCOM could track their references quickly and accurately. This control strategy is insensitive to external disturbances and parameter variations.

This work is supported by Ph.D. Programs Foundation of Ministry of Education of China (No. 20110181120007).

Key words: distribution static synchronous compensator (D-STATCOM); input-output feedback linearization; nonlinearity; integral sliding mode control; robustness