

轻型直流输电系统鲁棒非脆弱 H_∞ 控制器设计

王 鹏, 王 奔, 常 晓

(西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 建立了轻型直流输电系统 $dq0$ 坐标系下的电压源型换流器被控对象的状态空间方程, 考虑到模型参数的不确定性和不确定系统的控制器参数在一定范围内发生加性范数有界摄动的情况。利用线形矩阵不等式(LMI)方法对鲁棒非脆弱 H_∞ 状态反馈控制器的设计进行了研究, 然后分别对输电系统整流侧和逆变侧设计了鲁棒非脆弱 H_∞ 控制器。最后建立了 MATLAB 仿真模型, 将所设计的控制器与 H_∞ 控制器进行仿真分析, 仿真结果表明所设计的控制器具有良好的非脆弱性和鲁棒性。

关键词: 轻型直流输电; H_∞ 控制器; 非脆弱性; 电压源型换流器; 线形矩阵不等式; 鲁棒控制; 模型

中图分类号: TM 721.1

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.12.021

0 引言

轻型高压直流输电(HVDC Light)是新一代输电技术,其主要特点是采用全控型电力电子器件构成的电压源型换流器 VSC(Voltage Source Converter),取代常规直流输电中基于半控型晶闸管器件的电流源型换流器^[1]。与常规直流输电技术相比,轻型直流输电技术具有有功功率和无功功率可快速独立控制、潮流翻转方便快捷以及可向无源负载供电等诸多优点^[2-3]。

近年来,轻型直流输电技术被广泛用于电网互联、海岛供电和风电并网等领域,取得了很大的成功并日益受到重视^[4-6]。众多学者对轻型直流输电系统的建模与控制等进行了大量且富有成效的研究^[7-10]。然而,这些研究没有考虑建模过程中模型参数的不确定性,所设计控制器大都采用了简单的 PI 控制,没有考虑干扰的影响。在实际工程中,干扰是确实存在的,它会影响控制器的控制精度甚至导致整个系统的不稳定。 H_∞ 性能指标具有明确的工程意义,它表明系统的干扰对期望输出的影响程度。文献[11-12]考虑了干扰或参数不确定性对系统的影响,利用 H_∞ 控制理论设计了 VSC-HVDC 系统控制器,取得了一定的控制效果。但这些文献没有考虑数字控制器在实现时因参数摄动而引起的系统脆弱性问题,即当控制器参数偏离原设计值发生摄动时,系统可能无法满足所期望的性能指标甚至出现不稳定的情况^[13-14]。利用非脆弱控制理论可以解决数字控制器实现时系统的脆弱性问题^[15]。

因此,本文在建立轻型直流输电系统被控对象状态空间方程的基础上,考虑模型参数的不确定性和控制器参数偏离原设计值发生摄动的情况,利用线形矩阵不等式(LMI)方法设计轻型直流输电系统的鲁棒非脆弱 H_∞ 控制器。仿真结果表明所设计的控制器具有良好的鲁棒性和非脆弱性。

1 VSC 模型

对于双端轻型直流输电系统,其两端换流器的结构完全相同,现对其中一端进行建模,如图 1 所示。图中, u_{sa} 、 u_{sb} 、 u_{sc} 为交流侧三相电压, i_{sa} 、 i_{sb} 、 i_{sc} 为三相电流, R 为采用脉宽调制技术的 VSC 和线路损耗的等效电阻, L 为交流侧线路电感, C 为直流侧电容器。

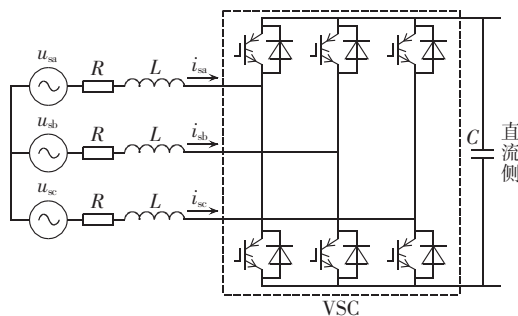


图 1 电压源型换流器的电路结构图

Fig.1 Circuit diagram of voltage source converter

设三相电网电压平衡,根据图 1 所示拓扑结构,可得 $dq0$ 坐标系下 VSC 交流侧动态微分方程(三相对称系统 0 轴分量为零,忽略)为:

$$\begin{cases} \frac{di_{sd}}{dt} = \frac{1}{L}u_{sd} + \omega i_{sq} - \frac{1}{L}u_{cd} - \frac{R}{L}i_{sd} \\ \frac{di_{sq}}{dt} = \frac{1}{L}u_{sq} - \omega i_{sd} - \frac{1}{L}u_{cq} - \frac{R}{L}i_{sq} \end{cases} \quad (1)$$

其中, u_{sd} 、 u_{sq} 分别为电网电压 d 、 q 轴分量; u_{cd} 、 u_{cq} 分别为 VSC 交流侧电网基波电压 d 、 q 轴分量; i_{sd} 、 i_{sq} 分别为电网电流的 d 、 q 轴分量; ω 为交流系统频率。

将式(1)表示为:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{sd} \\ \dot{i}_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R/L & 0 \\ 0 & -R/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L & 0 \\ 0 & 1/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{sd} - u_{cd} + \omega L i_{sq} \\ u_{sq} - u_{cq} - \omega L i_{sd} \end{bmatrix} \quad (2)$$

根据 H_∞ 控制理论,VSC 增广被控对象的状态空间方程可以表示为^[12]:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}_1\mathbf{w} + \mathbf{B}_2\mathbf{u} \\ \mathbf{z} = \mathbf{C}_1\mathbf{x} + \mathbf{D}_{12}\mathbf{u} \end{cases} \quad (3)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix}, \mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T, \mathbf{D}_{12} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

其中,状态变量 $\mathbf{x} = [i_{sd} \ i_{sq}]^T$,控制变量 $\mathbf{u} = [u_d \ u_q]^T = [u_{sd} - u_{cd} + \omega L i_{sq} \ u_{sq} - u_{cq} - \omega L i_{sd}]^T$, $\mathbf{z}$ 为控制输出, $\mathbf{w} = [w_1 \ w_2]^T$ 为系统的外来干扰,矩阵 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}_1$ 、 $\mathbf{B}_2$ 、 $\mathbf{C}_1$ 、 $\mathbf{D}_{12}$ 为系数矩阵。

2 轻型直流输电系统鲁棒非脆弱 H_∞ 控制器设计

2.1 模型参数不确定性考虑

在实际工程中,由于测量误差、器件老化以及发热等原因引起被控对象的数学模型存在不确定性,这类不确定性可以描述为对象模型参数的摄动。对第 1 节所建立的 VSC 被控对象的数学模型,模型参数的不确定性可以描述为 R 和 L 的摄动,不妨设其摄动量为 r 和 l ,则对式(2)有:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{sd} \\ \dot{i}_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R+r}{L+l} & 0 \\ 0 & -\frac{R+r}{L+l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L+l} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L+l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} \quad (4)$$

根据式(4),被控对象状态空间方程可表示为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = (\mathbf{A} + \Delta\mathbf{A})\mathbf{x} + \mathbf{B}_1\mathbf{w} + (\mathbf{B}_2 + \Delta\mathbf{B}_2)\mathbf{u} \\ \mathbf{z} = \mathbf{C}_1\mathbf{x} + \mathbf{D}_{12}\mathbf{u} \end{cases} \quad (5)$$

$$\Delta\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{Rl-Lr}{L(L+l)} & 0 \\ 0 & \frac{Rl-Lr}{L(L+l)} \end{bmatrix}$$

$$\Delta\mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} -\frac{l}{L(L+l)} & 0 \\ 0 & -\frac{l}{L(L+l)} \end{bmatrix}$$

为了不失一般性,令 $[\Delta\mathbf{A} \ \Delta\mathbf{B}_2] = \mathbf{H}_1\mathbf{F}_1[\mathbf{E}_1 \ \mathbf{E}_2]$,则有:

$$\mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{E}_1 = \begin{bmatrix} \frac{R}{L} & 0 \\ 0 & \frac{R}{L} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{E}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{F}_1 = \begin{bmatrix} \frac{l/L-r/R}{1+l/L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{l/L-r/R}{1+l/L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-l/L}{1+l/L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-l/L}{1+l/L} \end{bmatrix}$$

可以明显地看出, $\mathbf{H}_1$ 、 $\mathbf{E}_1$ 、 $\mathbf{E}_2$ 为实矩阵, $\mathbf{F}_1$ 为 Lebesgue 可测且 $\mathbf{F}_1^T\mathbf{F}_1 \leq \mathbf{I}$ 。

2.2 鲁棒非脆弱 H_∞ 控制器设计原理

系统在实际运行中,由于部件老化、A/D 和 D/A 转换等原因,控制器参数有发生摄动的情况。对传统控制器而言,相对较小的控制器参数摄动就有可能使闭环系统的性能下降或破坏稳定性,即表现为对控制器参数摄动的脆弱性。下面针对控制器发生参数摄动的闭环系统,设计一个状态反馈非脆弱 H_∞ 控制器,使其对控制器的参数摄动表现为非脆弱性^[16]。

对于系统式(5),设计一个状态反馈控制律:

$$\mathbf{u} = (\mathbf{K} + \Delta\mathbf{K})\mathbf{x} \quad (6)$$

其中, $\mathbf{K}$ 为所设计的控制器参数; $\Delta\mathbf{K}$ 为控制器实现时其参数发生的摄动,它具有加性范数有界形式。

$$\Delta\mathbf{K} = \mathbf{H}_2\mathbf{F}_2\mathbf{E}_3 \quad (7)$$

其中, $\mathbf{H}_2$ 、 $\mathbf{E}_3$ 分别为具有合适维数的已知实矩阵, $\mathbf{F}_2$ 为扰动矩阵,Lebesgue 可测且 $\mathbf{F}_2^T\mathbf{F}_2 \leq \mathbf{I}$ 。

将控制器式(6)代入系统式(5),得闭环系统:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_{cl}\mathbf{x} + \mathbf{B}_{cl}\mathbf{w} \\ \mathbf{z} = \mathbf{C}_{cl}\mathbf{x} \end{cases} \quad (8)$$

$$\mathbf{A}_{cl} = \mathbf{A} + \Delta\mathbf{A} + (\mathbf{B}_2 + \Delta\mathbf{B}_2)(\mathbf{K} + \Delta\mathbf{K})$$

$$\mathbf{B}_{cl} = \mathbf{B}_1$$

$$\mathbf{C}_{cl} = \mathbf{C}_1 + \mathbf{D}_{12}(\mathbf{K} + \Delta\mathbf{K})$$

定义:对于系统式(5)和给定的常数 γ ,若存在一个状态反馈控制律式(6)使得闭环系统式(8)对所有满足 $\mathbf{F}_2^T\mathbf{F}_2 \leq \mathbf{I}$ 的 $\mathbf{F}_2$ 是渐近稳定的且满足 $\|\mathbf{z}\|_2 \leq \gamma \|\mathbf{w}\|_2$,则称参数 $\mathbf{K}$ 为该系统的鲁棒非脆弱 H_∞ 控制器参数。

下面以定理的形式给出该不确定系统在控制器参数发生加性范数有界摄动时,鲁棒非脆弱 H_∞ 状态反馈控制器存在的一个充分条件。

定理:对于一个不确定系统式(5)和给定常数 $\gamma > 0$,采用满足式(7)的非脆弱状态反馈控制器式(6),使得闭环系统渐近稳定且具有 H_∞ 范数界 γ 的充分条件是存在正定对称矩阵 $\mathbf{X}$ 、矩阵 $\mathbf{Y}$ 及常数 $\lambda_1 >$

$0, \lambda_2 > 0$, 使得矩阵不等式(9)成立。此时所设计的鲁棒非脆弱状态反馈控制器参数 $K=YX^{-1}$ 。式(9)中,

$$\begin{bmatrix} AX+B_2Y+(AX+B_2Y)^T & B_1 & (C_1X+D_{12}Y)^T & \lambda_1 H_1 & (E_1X+E_2Y)^T & \lambda_2 B_2 H_2 & (E_3X)^T \\ * & -I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & -\gamma^2 I & 0 & 0 & \lambda_2 D_{12} H_2 & 0 \\ * & * & * & -\lambda_1 I & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & -\lambda_1 I & \lambda_2 E_2 H_2 & 0 \\ * & * & * & * & * & -\lambda_2 I & 0 \\ * & * & * & * & * & * & -\lambda_2 I \end{bmatrix} < 0 \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} AX+B_2Y+(AX+B_2Y)^T & B_1 & (C_1X+D_{12}Y)^T \\ * & -I & 0 \\ * & * & -\gamma^2 I \end{bmatrix} < 0 \quad (10)$$

此时,求解的参数 $K=YX^{-1}$ 则为 H_∞ 控制器参数。

2.3 控制器设计

根据第 2.2 节,状态方程的控制变量 $u=Kx$, 其中 $K=\begin{bmatrix} k_d & 0 \\ 0 & k_q \end{bmatrix}$ 。结合系统式(3)中的控制变量,则 VSC 交流侧期望输出的基波电压值为:

$$\begin{cases} u_1 = u_{sd} - k_d i_{sd} + \omega L i_{sq} \\ u_2 = u_{sq} - k_q i_{sq} - \omega L i_{sd} \end{cases} \quad (11)$$

脉冲发生器的输入为:

$$\begin{cases} M = 2\sqrt{u_1^2 + u_2^2} / U_{dc} \\ \delta = \arctan(u_2 / u_1) \end{cases} \quad (12)$$

整流侧控制器中,直流电压 U_{dc} 和其参考值 U_{dc}^* 相比较后,经 PI 环节产生参考值 i_{sd}^* 。无功功率 Q 和其参考值 Q^* 比较后,经 PI 环节产生参考值 i_{sq}^* 。将系统测量计算所得 i_{sd}, i_{sq} 与其参考值 i_{sd}^*, i_{sq}^* 比较后,与直流电压 U_{dc} 和电网电压的 d, q 轴分量 u_{sd}, u_{sq} 一同送入鲁棒非脆弱 H_∞ 控制器,控制器输出控制变量 M 和 δ 至脉冲发生器,进而控制输电系统。其中,输电系统模型参数 R, L 存在不确定性,控制器参数 k_d, k_q 可能会有一定的摄动。逆变侧控制器中,除有功功率 P 和其参考值 P^* 相比较后,经 PI 环节产生参考值 i_{sd}^* 之外,其他环节与整流侧基本一致。逆变侧输电系统模型和控制器同样存在模型参数不确定性和控制器参数摄动的情况。整流侧和逆变侧控制框图如图 2 所示,其中,括号中变量为逆变侧输入变量,其他输入变量对两侧而言含义相同。

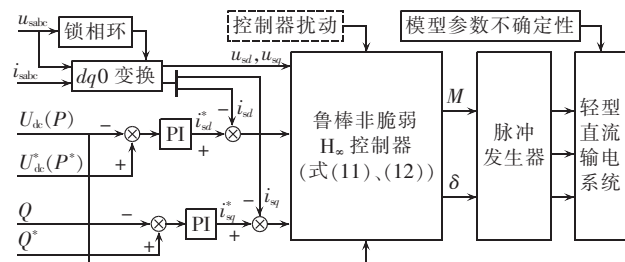


图 2 整流侧(逆变侧)控制框图

Fig.2 Block diagram of rectifier-side/inverter-side control

3 仿真分析

利用 MATLAB 仿真软件建立如图 3 所示的轻

* 为矩阵的对称转置。定理证明过程省略。

当 $\Delta K, \Delta A, \Delta B_2$ 均为零时,式(9)简化为式(10)。

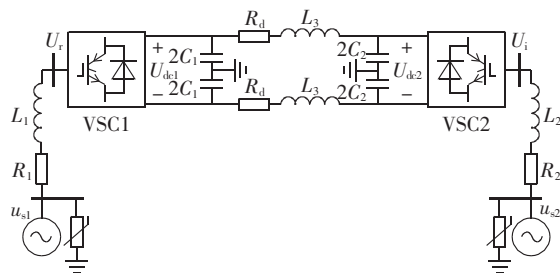


图 3 轻型直流输电系统结构图

Fig.3 Structure of HVDC Light transmission system

型直流输电系统仿真模型。VSC1 和 VSC2 为两电平三桥式主电路,系统主要参数如下:交流系统额定电压 $u_{s1}=u_{s2}=10\text{ kV}$,频率 50 Hz ,交流侧线路阻抗 $R_1=R_2=0.8\ \Omega, L_1=L_2=10\text{ mH}$,VSC 额定容量 $S=3\text{ MV}\cdot\text{A}$,开关频率 $f=5\text{ kHz}$,直流侧额定电压 $\pm 10\text{ kV}$,直流侧电容 $C_1=C_2=100\ \mu\text{F}$,直流线路电阻 $R_d=2.7\ \Omega$,直流线路电感 $L_3=10.36\text{ mH}$,直流线路长度 $l_d=10\text{ km}$ 。采用标么值计算,交流侧和直流侧的基准功率为 3 MW ,交流侧的基准电压为 10 kV ,直流侧电压基准值为 20 kV 。该系统式(5)的常数矩阵为:

$$A = \begin{bmatrix} -80 & 0 \\ 0 & -80 \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 100 \end{bmatrix}$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T, D_{12} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$H_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, E_1 = \begin{bmatrix} 80 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 80 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$E_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 100 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 100 \end{bmatrix}^T$$

为检验所设计控制器的控制效果,不妨令整流侧、逆变侧同时发生相同量的参数扰动。设鲁棒非脆弱 H_∞ 控制器参数摄动表达式满足:

$$H_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, E_3 = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix}$$

根据定理,取 $\gamma=0.1$,利用 MATLAB 软件的 LMI toolbox,求解 LMI 式(9)可得轻型直流输电系统鲁棒非脆弱 H_∞ 控制器参数为:

$$K_1 = \begin{bmatrix} -0.8022 & 0 \\ 0 & -0.8022 \end{bmatrix}$$

若不考虑模型不确定性和控制器参数摄动,即当 $\Delta A, \Delta B_2$ 和 ΔK 为零时,求解 LMI 式(10)可得轻型直流输电系统的 H_∞ 控制器参数为:

$$K_2 = \begin{bmatrix} -0.2229 & 0 \\ 0 & -0.2229 \end{bmatrix}$$

下面对 2 种控制器在相同扰动情况下的控制性能进行仿真对比。设控制器参数扰动矩阵 $F_2 = I$, 在 1.4 s 时, 整流侧和逆变侧分别同时发生 $r = 0.2 R, l = 0.2 l_d$ 的模型参数波动, 控制器发生 $\Delta K = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix}$ 的参数摄动。在仿真模型中, 整流侧采用定直流电压和定无功功率控制, 逆变侧采用定有功功率和定无功功率控制。稳态运行时, 直流电压为 1 p.u., 整流侧有功功率为 1 p.u., 无功功率为 0, 逆变侧有功功率为 -1 p.u., 无功功率为 0。图 4 为扰动前后整流侧和逆变侧的直流电压、有功功率和无功功率(均为标么值)的变化波形, 其中, 曲线 1 为 H_∞ 控制器作用下的波形, 曲线 2 为鲁棒非脆弱 H_∞ 控制器作用下的波形。

对于相同指标的轻型直流输电系统, 在发生同样扰动的情况下, 由图 4(a)、(b)可知, 在 H_∞ 控制器作用下, 系统直流电压发生很大波动, 波动幅度甚至已达到额定值的 10%, 而鲁棒非脆弱 H_∞ 控制器作用下的系统直流电压波动相对较小。由图 4(c)——(f)可知, 鲁棒非脆弱 H_∞ 控制器作用下系统整流侧和逆变侧的有功功率和无功功率有相对较小的波动幅度, 且受扰动后更快地趋于稳定。即仿真结果表明,

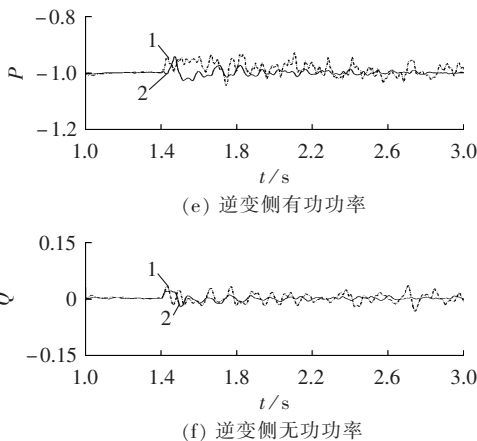
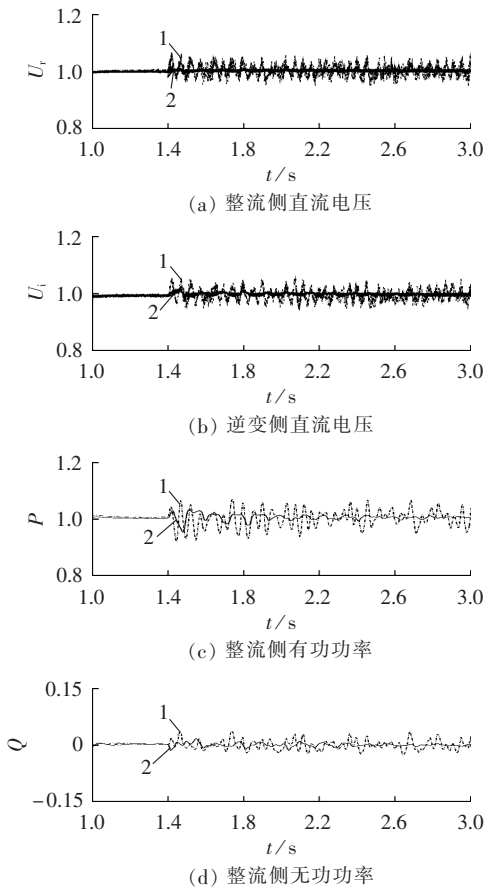


图 4 仿真波形图
Fig.4 Simulative waveforms

在发生相同扰动的情况下, 鲁棒非脆弱 H_∞ 控制器的动态性能要优于 H_∞ 控制器。

4 结论

本文在建立了轻型直流输电系统 VSC 交流侧动态微分方程的基础上, 考虑到模型参数和控制器参数发生摄动的情况, 利用 LMI 方法分别对整流侧和逆变侧设计了鲁棒非脆弱 H_∞ 控制器, 并利用 MATLAB 对所设计的控制器进行了仿真分析。仿真结果表明, 当控制器参数和模型参数在一定范围内发生摄动时, 鲁棒非脆弱 H_∞ 控制器具有良好的非脆弱性和较强的鲁棒性。

参考文献:

[1] OOI B T,WANG X. Voltage angle lock loop control of the Boost type PWM converter for HVDC application[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,1990,5(2):229-235.

[2] 胡兆庆,毛承雄,陆继明,等. 一种新型的直流输电技术——HVDC Light[J]. 电工技术学报,2005,20(7):12-16.

HU Zhaoqing,MAO Chengxiong,LU Jiming,et al. New high voltage direct current transmission technology-HVDC Light[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2005,20(7):12-16.

[3] 徐政,陈海荣. 电压源换流器型直流输电技术综述[J]. 高电压技术,2007,33(1):1-10.

XU Zheng,CHEN Hairong. Review and applications of VSC HVDC[J]. High Voltage Engineering,2007,33(1):1-10.

[4] ASPLUND G. Application of HVDC light to power system enhancement[C]//IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Singapore:[s.n.],2000:2498-2503.

[5] SPAHIC E,BALZER G. Impact of the VSC HVDC connection of large offshore wind farms on power system stability and control[C]//2007 IEEE Lausanne Power Tech. Lausanne,Switzerland:[s.n.],2007:207-212.

[6] 王书征,郑良广,赵剑锋. 用于海上风电场并网的多模块变压器耦合型 VSC-HVDC 技术 [J]. 电力自动化设备,2011,31(10):101-106.

WANG Shuzheng,ZHENG Lianguang,ZHAO Jianfeng. VSC-HVDC technology of multi-module transformer for grid-connection of

- offshore wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011,31(10):101-106.
- [7] 陈谦,唐国庆,胡铭. 采用 $dq0$ 坐标的 VSC-HVDC 稳态模型与控制器设计[J]. 电力系统自动化,2004,28(16):61-66.
CHEN Qian,TANG Guoqing,HU Ming. Steady-state model and controller design of a VSC-HVDC converter based on $dq0$ -axis[J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(16):61-66.
- [8] 尹明,李庚银,牛同义,等. VSC-HVDC 连续时间状态空间模型及其控制策略研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(18):34-39.
YIN Ming,LI Gengyin,NIU Tongyi,et al. Continuous-time state-space model of VSC-HVDC and its control strategy[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(18):34-39.
- [9] 张桂斌,徐政,王广柱. 基于 VSC 的直流输电系统的稳态建模及其非线性控制[J]. 中国电机工程学报,2002,22(1):17-22.
ZHANG Guibin,XU Zheng,WANG Guangzhu. Steady-state model and its nonlinear control of VSC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE,2002,22(1):17-22.
- [10] 袁旭峰,高璐,文劲宇,等. VSC-HVDC 三相不平衡控制策略[J]. 电力自动化设备,2010,30(9):1-5.
YUAN Xufeng,GAO Lu,WEN Jinyu,et al. Unbalanced three-phase control strategy of VSC-HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(9):1-5.
- [11] RAMADAN H S,SIGUERDIDJANE H,PETIT M. On the robustness of VSC-HVDC systems controllers under parameters uncertainties[C]//40th North American Power Symposium. Calgary,Canada:[s.n.],2008:1-8.
- [12] 梁海峰,王松,李庚银,等. VSC-HVDC 系统 H_∞ 控制器设计[J]. 电网技术,2009,33(9):35-39.
LIANG Haifeng,WANG Song,LI Gengyin,et al. Design of H_∞ controller for VSC-HVDC systems[J]. Power System Technology,2009,33(9):35-39.
- [13] DORATO P. Non-fragile controller design;an overview[C]//Proceedings of the American Control Conference. Philadelphia,Pennsylvania:[s.n.],1998:2829-2831.
- [14] KEEL L H,BHATTACHARYYA S P. Robust,fragile,or optimal[J]. IEEE Transactions on Automatic Control,1997,42(8):1098-1105.
- [15] TAKAHASHI R H C,DUTRA D A,PALHARES R M,et al. On robust non-fragile static state-feedback controller synthesis[C]//Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control. Sydney,Australia:[s.n.],2000:4909-4914.
- [16] 林瑞全,杨富文. 基于 H_∞ 控制理论的非脆弱控制的研究[J]. 控制与决策,2004,19(5):598-600.
LIN Ruiquan,YANG Fuwen. On non-fragile control based on H_∞ control theory[J]. Control and Decision,2004,19(5):598-600.

作者简介:

王 鹏(1986-),男,河南商丘人,硕士研究生,研究方向为轻型直流输电技术和电能质量控制(E-mail:wangp921@126.com);

王 奔(1960-),男,湖南衡阳人,教授,博士后,研究方向为电力系统非线性变结构控制和电能质量控制;

常 晓(1987-),女,河南洛阳人,硕士研究生,研究方向为电能质量控制。

Design of robust and non-fragile H_∞ controller for HVDC Light

WANG Peng,WANG Ben,CHANG Xiao

(School of Electrical Engineering,Southwest Jiaotong University,Chengdu 610031,China)

Abstract: The state space equations of the controlled object of voltage source converter for VSC-HVDC Light are established in the $dq0$ coordinates system,which considers the model parameter uncertainty and the additive norm-bounded perturbation of controller parameters in a certain range. The LMI(Linear Matrix Inequality) technology is used to study the design of robust and non-fragile H_∞ controller,which is then applied respectively to the rectification and inversion sides of transmission system. A MATLAB-based simulation model is constructed and the designed controller is compared with the H_∞ controller. Simulative results show that the designed controller has better robustness and non-frangibility.

Key words: HVDC Light; H_∞ controller; non-frangibility; voltage source converter; LMI; robust control; models