

H_2/H_∞ 保性能控制理论在静止无功发生器控制中的应用

孙运全, 孙玉坤, 刘贤兴, 尹 强

(江苏大学 电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 利用 H_2/H_∞ 保性能控制理论和直接反馈线性化, 给出了单机无穷大系统中, 具有参数摄动的静止无功发生器(STATCOM)的非线性控制模型. 使用MATLAB软件得出 H_2/H_∞ 保性能控制律, 表示为线性矩阵不等式(LMI). 在扰动及参数摄动的条件下进行了仿真. 结果表明这种控制方法同时具有鲁棒性和最优性能, 降低了单纯 H_∞ 控制方法的保守性, 提高了电力系统的稳定性, 并满足电压精度的要求.

关键词: 静止无功发生器(STATCOM); H_2/H_∞ 保性能控制; 直接反馈线性化; 参数摄动

中图分类号: TM761 **文献标识码:** A

H-two/H-infinity cost-guaranteed control for the static synchronous compensator

SUN Yun-quan, SUN Yu-kun, LIU Xian-xing, YIN Qiang

(School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu 212013, China)

Abstract: By using H-two/H-infinity cost-guaranteed control theory and direct feedback linearization, we develop a nonlinear control model for the parameter-perturbed static synchronous compensator(STATCOM) in a one-machine-infinite-bus system. The H-two/H-infinity cost-guaranteed control law is obtained by using MATLAB, in terms of a linear matrix inequality(LMI). Simulation of the control process is performed for the system with disturbance and parameter perturbation. Results show that the presented approach is robust and optimal in performance; the conservativeness of the pure H-infinity control approach is reduced; the stability of the power system is improved and the requirement of the voltage accuracy is satisfied

Key words: STATCOM; H-two/H-infinity guaranteed cost control; direct feedback linearization; parameter perturbation

1 引言(Introduction)

STATCOM 是 FACTS 技术中重要成员装置^[1]. STATCOM的控制方法很多, 其中PID控制、线性多变量控制等常规的控制方法是基于局部线性化的模型来设计的, 不能适应系统运行点变化的情况. 采用非线性化控制可以克服局部线性化方法带来的缺点^[2,3], 但在电力系统实际运行中还有着参数不确定、干扰未知及建模误差等问题.

20世纪80年代初提出的 H_∞ 鲁棒控制理论以系统的 H_∞ 范数为性能指标, 是目前解决鲁棒控制比较完善的一种理论体系, 已成为近20年来自动控制理论及工程应用的热门课题之一. H_2 最优控制具有较好的性能指标^[4], 而 H_∞ 控制较好的解决系统的鲁棒性问题^[5,6], 将两者结合起来, 得到兼有鲁棒性能和最优性能的控制, 并且可使 H_∞ 控制具有较小的保

守性, 这就是所谓的 H_2/H_∞ 混合控制^[7]. 当系统模型中存在参数不确定时, 相应的 H_2/H_∞ 混合控制称为保性能控制(guaranteed cost control)^[8,9]. 本文尝试利用 H_2/H_∞ 保性能控制方法对单机无穷大系统中的STATCOM控制器进行设计, 得到兼有鲁棒性能和最优性能的控制.

2 H_2/H_∞ 保性能控制理论(H_2/H_∞ guaranteed cost control theory)

在实际设计问题中, 人们通常需要所设计的系统满足多种性能的要求, 对系统(1):

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + B_1w_1 + B_2w_2, \\ z_1 = C_1x + D_{10}u + D_{11}w_1, \\ z_2 = C_2x + D_{20}u + D_{22}w_2, \end{cases} \quad (1)$$

希望设计一个控制器, 如图1使得闭环系统是渐

近稳定的, 且从 w_1 到 z_1 的闭环传递函数 $T_{w_1 z_1}$ 的 H_∞ 范数不超过一个给定的上界 γ_1 , 以保证闭环系统对由 $w_1 = \Delta z_1$ 进入的不确定性具有鲁棒稳定性; 同时使得从 w_2 到 z_2 的闭环传递函数 $T_{w_2 z_2}$ 的 H_2 范数尽可能的小, 以保证用 H_2 范数度量的系统性能处于一个好的水平(例如对白噪声的输入 w_2 , z_2 具有小的稳定方差; 或对脉冲输入 w_2 , 被控输出 z_2 具有小的能量). 这样一个问题相当于使得闭环系统满足

$$\sigma(A_c) \subset C^-, \|T_{w_1 z_1}\|_\infty < \gamma_1, \|T_{w_2 z_2}\|_2 < \gamma_2 \quad (2)$$

的所有控制器中, 寻找使得 γ_2 最小化的控制器.

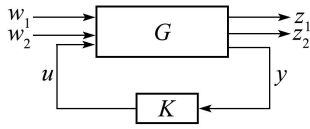


图1 H_2/H_∞ 保性能标准控制

Fig. 1 H_2/H_∞ guaranteed cost standard control

这个问题称为系统(1)的 H_2/H_∞ 保性能控制问题. 系统(1)的 H_2/H_∞ 保性能控制问题可以采用输出反馈控制器 K 来实现. 该控制器 K 应满足如下设计要求:

1) 系统(1)对于所有参数摄动及外部干扰闭环系统内稳定.

2) 最优 H_∞ 控制. 使闭环传递函数 $T_{w_1 z_1}$ 满足

$$\|T_{w_1 z_1}\|_\infty = \sup \bar{\sigma}(T(j\omega)) < \gamma_1, \quad (3)$$

即 H_∞ 范数极小化, 或者说简单的说系统的频率响应的最大奇异值的峰值极小化.

3) 最优 H_2 控制. 使闭环传递函数 $T_{w_2 z_2}$ 满足

$$\|T_{w_2 z_2}\|_2 = \text{tr}(1/2\pi \int_{-\infty}^{+\infty} T(j\omega)T^*(j\omega)d\omega)^{1/2} < \gamma_2, \quad (4)$$

即 H_2 范数极小化, $\text{tr}(\cdot)$ 表示矩阵 $(\cdot)$ 的迹.

4) H_2/H_∞ 控制. 闭环系统极点位于左半开复平面, 且使得性能指标 $\alpha\|T_{w_1 z_1}\|_\infty^2 + \beta\|T_{w_2 z_2}\|_2^2$ 最小化.

3 具有STATCOM的单机无穷大系统的数学模型(Mathematical model of one-machine infinite system of STATCOM)

图2为具有STATCOM的单机无穷大系统. 从系统级的角度来处理STATCOM, 将其等效为一个可控的无功电流源, 并接于输电线路电气中点. 式(5)(6)为发电机转子的运动方程, 式(7)为功率方程, 而式(8)为STATCOM的调节系数方程:

$$\Delta \dot{\omega} = \omega(t) - \omega_0, \quad (5)$$

$$\Delta \dot{\omega} = -\frac{D}{H}[\omega(T) - \omega_0] + \frac{\omega_0}{H}[P_m - P_e(t)], \quad (6)$$

$$P_e = E'_q U_m \frac{2 \sin \frac{\delta}{2}}{X_L} = \frac{E_q'^2 \sin \delta}{X_L} + \frac{1}{2} E_q' I_{\text{SVG}} \sin \frac{\delta}{2}, \quad (7)$$

$$\dot{I}_{\text{SVG}} = \frac{1}{T_s}(-I_{\text{SVG}} + I_{\text{SVG}0} + K_s u_B). \quad (8)$$

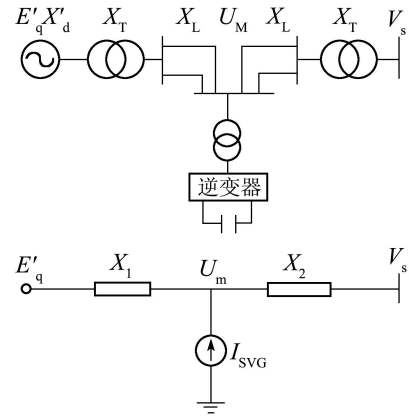


图2 具有STATCOM的单机无穷大电力系统

Fig. 2 One-machine infinite power system with STATCOM

上式和图2中: δ 为发电机转子运行角(rad), ω 为发电机角速度(rad/s), P_m 和 P_e 分别为发电机机械功率和电功率, H 为机组转动惯常数(s), D 为阻尼系数, E'_q 为发电机暂态电势, X'_d 为发电机暂态电抗, X_T 为变压器电抗, X_L 为线路电抗, X_1, X_2 为线路等值电抗, V_s 为无穷大电力系统母线电压, U_m 为接入电压, I_{SVG} 为STATCOM输出的电流, T_s 为调节系统的惯性时间常数, K_s 为调节系统放大倍数, u_B 为控制量, 对应于STATCOM的一个触发角度.

取 $\Delta \delta = \delta - \delta_0$, $\Delta \omega = \omega - \omega_0$, $\Delta P_e = P_e - P_m$, Δ 表示运行于初始运行点的增量, 设 $\Delta \dot{P}_e = u$, u 为采用直接反馈线性化方法而设置的虚拟控制. 为保证故障跳闸线路参数发生变化后, STATCOM接入电压 U_m 仍然维持初始值 U_{m0} , 消除稳态误差, 引入电压误差的积分值为状态变量, 即 $x_e = \int (U_m - U_{m0})dt$ 为状态变量, 有 $\dot{x}_e = U_m - U_{m0}$, 由于电压精度控制问题可以在运行点附近的小范围内讨论, 因此用泰勒级数将 x_e 的导数在初始运行点附近展开, 有

$$\begin{aligned} \dot{x}_e &= U_m - U_{m0} = \\ \frac{\partial U_m}{\partial \delta} \Big|_0 \Delta \delta + \frac{\partial U_m}{\partial P} \Big|_0 \Delta P_e &= C_\delta \Delta \delta + C_{P_e} \Delta P_e, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\text{式中 } U_m = E'_q \cos \frac{\delta}{2} + \frac{X_L}{4} I_{\text{SVG}}.$$

由式(5)(6)(9)可得到

$$\begin{cases} \Delta\dot{\delta} = \Delta\omega + w_1, \\ \Delta\dot{\omega} = -\frac{D}{H}\Delta\omega - \frac{\omega_0}{H}\Delta P_e + w_2, \\ \Delta\dot{P}_e = u + w_3, \\ \dot{x}_e = C_\delta\Delta\delta + C_{P_e}\Delta P_e + w_4. \end{cases} \quad (10)$$

上式中, u 为采用直接反馈线性化而设置的虚拟控制量, w 为可能的干扰, 例如转矩扰动等。

取 $x = [\Delta\delta \ \Delta\omega \ \Delta P_e \ x_e]^T$, STATCOM的单机无穷大电力系统的动态方程变化为

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + B_1w + B_2u, \\ z = C_1x + D_{11}w + D_{12}u, \\ y = C_2x + D_{21}w + D_{22}u. \end{cases} \quad (11)$$

其状态反馈控制器为

$$\begin{aligned} u &= Kx = \\ &[k_\delta \ k_\omega \ k_{P_e} \ k_{x_e}][\Delta\delta \ \Delta\omega \ \Delta P_e \ x_e]^T = \\ &k_\delta\Delta\delta + k_\omega\Delta\omega + k_{P_e}\Delta P_e + k_{x_e} \int (U_m - U_{m0})dt. \end{aligned} \quad (12)$$

4 参数不确定的STATCOM单机无穷大系统H₂/H_∞控制器设计(Design of H₂/H_∞ controller of one-machine infinite system of parameter uncertainty STATCOM)

在实际的电力系统中, 存在着一些不确定因素。一方面, 机组转动惯量 H 、阻尼系数 D 及线路电抗等参数往往不能精确测量或估计; 另一方面, 系统中常有运行状态改变以及各种故障等外部干扰, 所以建立一个包含不确定因素的STATCOM数学模型是很必要的。考虑到参数的偏差 $\Delta D, \Delta H, \Delta C_\delta, \Delta C_{P_e}$; 外部干扰为 w_1, w_2, w_3, w_4 ; $\Delta A, \Delta B_2$ 为参数摄动阵, 则不确定性可以表示为

$$\dot{x} = [A + \Delta A]x + B_1w + [B_2 + \Delta B_2]u. \quad (13)$$

式中:

$$\begin{aligned} x &= [\Delta\delta \ \Delta\omega \ \Delta P_e \ x_e]^T, \ \Delta B_2 = [0 \ 0 \ \Delta \ 0], \\ \Delta A &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{D\Delta H - H\Delta D}{H(H + \Delta H)} & \frac{\omega_0\Delta H}{H(H + \Delta H)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \Delta C_e & 0 & \Delta C_{P_e} & 0 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

定义评价信号:

$$\begin{cases} z_\infty = C_1x + D_{12}u, \\ z_2 = C_2x + D_{22}u. \end{cases} \quad (14)$$

式中: C_1, C_2, D_{12}, D_{22} 为权矩阵,

$$C_1 = \begin{bmatrix} q_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_{14} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \ D_{12} = [0 \ 0 \ 0 \ \gamma_1]^T,$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} q_{21} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q_{23} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_{24} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \ D_{22} = [0 \ 0 \ 0 \ \gamma_2]^T.$$

输出方程为

$$y = Cx + Du. \quad (15)$$

式中:

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \ D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

由式(9)(10)(11)构成的不确定模型表示为

$$\begin{cases} \dot{x} = [A + \Delta A]x + B_1w + [B_2 + \Delta B_2]u, \\ z_\infty = C_1x + D_{12}u, \\ z_2 = C_2x + D_{22}u, \\ y = Cx + Du. \end{cases} \quad (16)$$

式中:

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -D/H & -\omega_0/H & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_\delta & 0 & C_{P_e} & 0 \end{bmatrix}, \\ B_1 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \ B_2 = [0 \ 0 \ 1 \ 0]^T. \end{aligned}$$

对于被控对象(16)可求解状态反馈控制器 K . 将式(12)带入式(10)并整理得出如下控制律:

$$\begin{aligned} U_B &= \\ &\frac{2T_s}{K_s E'_q \sin \frac{\delta}{2}} [k_\delta \Delta\delta + k_\omega \Delta\omega + k_{P_e} \Delta P_e + \\ &k_{x_e} \int (U_m - U_{m0})dt - (\frac{E'_q}{X_L} \cos \delta + \\ &\frac{1}{4} E'_q I_{SVG} \cos \frac{\delta}{2})(\omega - \omega_0) + \\ &\frac{E'_q \sin \frac{\delta}{2}}{2T_s} (I_{SVG} - I_{SVG0})]. \end{aligned} \quad (17)$$

5 数字仿真(Simulation)

图1接有STATCOM的单机无穷大的500 kV系统中, 发电机600 MW, 20 kV, $H = 8$ s, $D = 5$, $X_1 = X_2 = 0.84$, $T_s = 0.02$, $K_s = 1$. 初始运行点为: $P_{e0} = 0.9684$, $\delta_0 = 48^\circ$, $\omega_0 = 314$ rad/s, $E'_{q0} = 1$, $I_{SVG0} = 0.4119$, $U_{m0} = 1$, $V_s = 1$ (以上未标单位的均用额定标么值).

设 $|\Delta D| = 0.1 D$, $|\Delta H| = 0.1 H$, $|\Delta C_\delta| = 0.1 C_\delta$, $|\Delta C_{P_e}| = 0.1 C_{P_e}$, $|\Delta| = 0.1$, 可以得到具有不确定因数的数学模型矩阵系数. MATLAB中LMI工具箱提供了 H_2/H_∞ 保性能控制问题的msfsyn.m函数^[10]. 该函数可以求解保性能 H_2/H_∞ (以及 H_2 , H_∞)状态反馈控制器 $u = K(S)x$ 的反馈系数 $K(S)$. 对于所有的参数摄动以及外部干扰, 可以使闭环系统稳定, 且达到 H_2/H_∞ 控制的性能指标.

取 $\varepsilon = 100$, $B_{1E} = [0.1B_1, E]$, $D_{11} = \text{zeros}(9, 8)$, $D_{21} = \text{zeros}(5, 8)$, $C_{1F} = [C_1; F_a]$, $D_{12F} = [D_{12}; F_b]$, 应用msfsyn.m函数, $r(1) = 5$, $r(2) = 1$, 得 H_2/H_∞ 状态反馈控制器增益为

$$K_{2/\infty} = [18.2696 \quad 3.5601 \quad -18.5974 \quad -24.8957],$$

$$g_{\text{opt}} = 3.52, h_{2\text{opt}} = 1.41.$$

将其代入式(17), 便可得出STATCOM得 H_2/H_∞ 保性能控制器的控制律. 同时可以求出STATCOM的最优 H_2 控制器的增益为

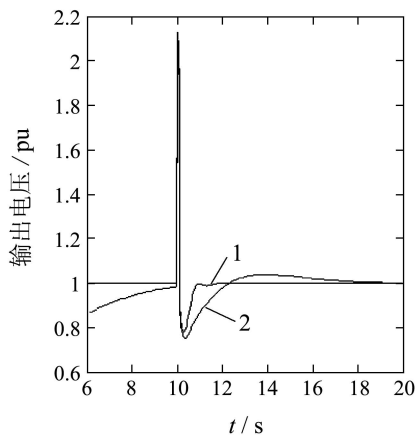
$$K_2 = [1.881 \quad 1.7233 \quad -11.7267 \quad -0.5997],$$

$$g_{\text{opt}} = 0, h_{2\text{opt}} = 4.56.$$

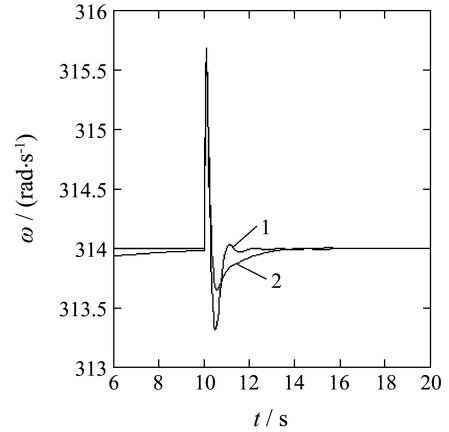
对所设计的两种控制器进行如下仿真:

1) 三相对称短路故障仿真.

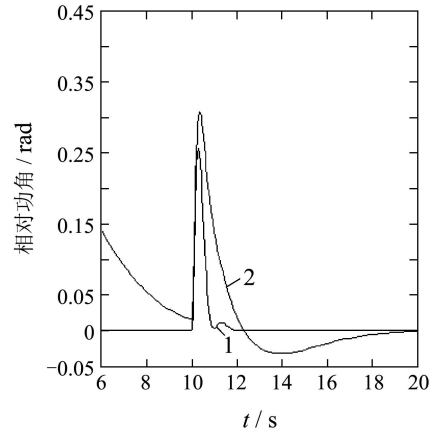
设定故障为发生在10 s~10.1 s, 进行数字仿真, 部分仿真结果如图3. 曲线1是 H_2/H_∞ 保性能控制器控制的STATCOM, 曲线2是 H_2 控制器控制的STATCOM. 从图3(a)~3(c)中可以看出, 曲线1比曲线2很快进入稳定状态.



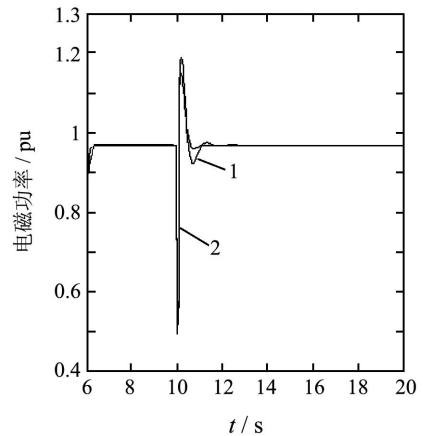
(a) STATCOM接入点电压



(b) 发电机角速度



(c) 发电机运行功角



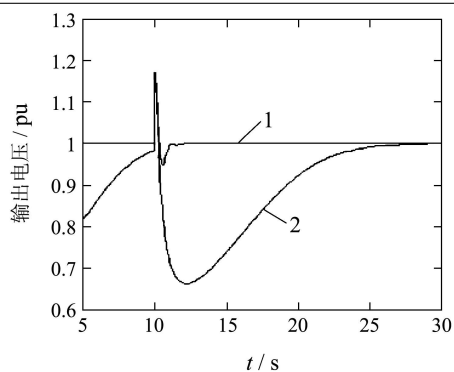
(d) 输出功率

图3 系统三相短路的仿真曲线

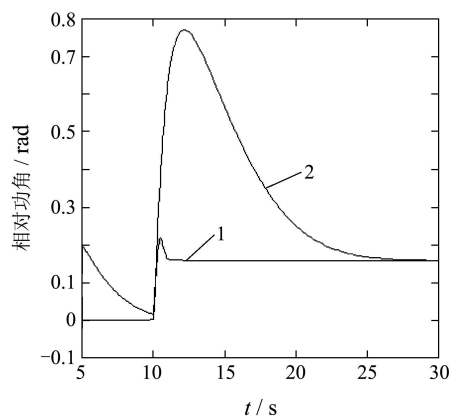
Fig. 3 Simulation curve of three-phase short-circuit system

2) 负荷突然增加仿真.

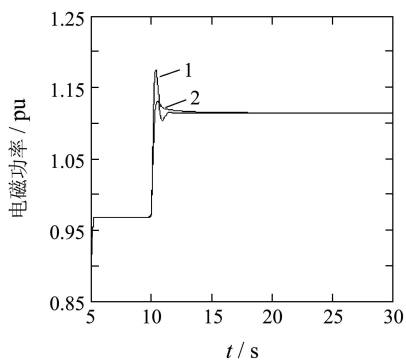
图4为10 s时输出功率突然增加15%时的仿真结果, 曲线1是 H_2/H_∞ 保性能控制器控制的STATCOM, 曲线2是 H_2 控制器控制的STATCOM, 从图4(a), 4(b)中可以看出, 曲线1比曲线2很快进入稳定状态.



(a) STATCOM接入点电压

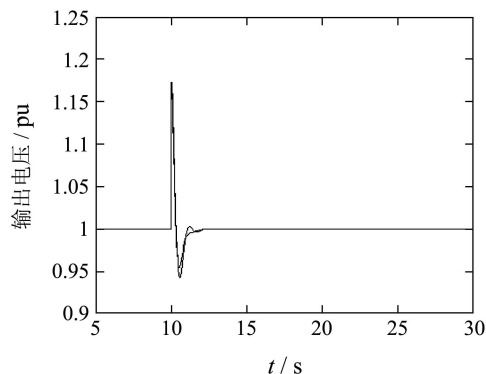


(b) 发电机转子运行角

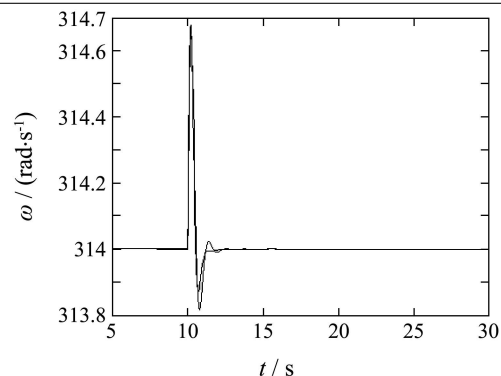


(c) 输出功率

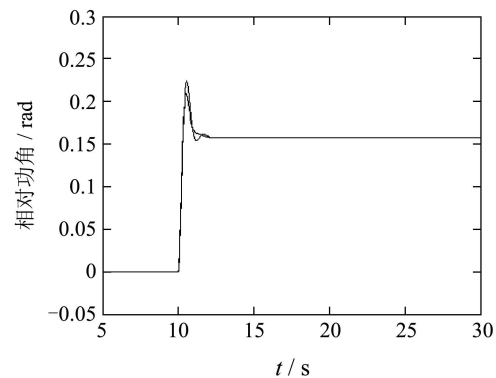
图4 功率突然增加15%仿真曲线
Fig. 4 Simulation curve of power increase by 15% suddenly



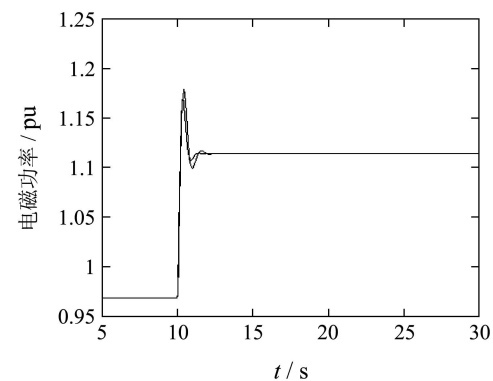
(a) 负荷增加15%同时D和H摄动STATCOM接入点电压



(b) 负荷增加15%同时D和H摄动发电机角速度



(c) 负荷增加15%同时D和H摄动发电机功角



(d) 负荷增加15%同时D和H摄动输出功率

图5 H 和 D 发生摄动同时负荷增加15%的响应曲线(H_2/H_∞)

Fig. 5 Response curve of H and D in perturbations with load increase by 15%(H_2/H_∞)

从仿真曲线可以看出,虽然图3(d)中曲线2比曲线1较早进入稳定,但相对与超调量而言,曲线2明显大于曲线1.图4(c)中曲线2比曲线1有较小的超调量,但曲线1却较早地进入稳定,这些都可以优化加权矩阵来优化曲线1的输出功率响应.本文重点考察STATCOM对接入点电压参数的控制.仿真表明 H_2/H_∞ 保性能控制器对系统扰动具有较强的鲁棒性,对维持系统的电压和阻尼有很好的效果.

3) 采用 H_2/H_∞ 保性能控制,参数摄动且负荷同时增加仿真.

图5为采用 H_2/H_∞ 保性能控制, H 在7.2 s~8.8 s之间发生摄动, 同时 D 在4.5~5.5之间发生摄动, 并且在10 s时输出功率突然增加15%时的仿真结果. 仿真表明 H_2/H_∞ 保性能控制器对参数的摄动具有较强的鲁棒性.

6 结论(Conclusions)

将 H_2/H_∞ 保性能设计应用到STATCOM控制器的设计. 在设计过程中, 考虑了系统建模的不确定因素对系统的影响, 建立了含有不确定因数的数学模型, 采用解LMI的方法, 得出了STATCOM的保性能控制律, 仿真表明: H_2/H_∞ 保性能控制兼有鲁棒性能和最优性能, 即使在参数发生摄动时, 可使系统快速平息振荡, 有效提高系统的暂态稳定, 改善系统的动态性能, 提高传输容量, 又能满足故障切除后电压精度的要求. 这种方法利用MATLAB/LIM工具箱解决及进行控制器参数优化, 计算方便, 便于实际应用.

参考文献(References):

- [1] HINGORANI N G, GYUGYI L. *Understanding FACTS-Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*[M]. New York: IEEE, 2000.
- [2] 孙元章, 杨志平, 赵志勇, 等. STATCOM非线性控制方式的研究及其暂态稳定的改善[J]. 电力系统自动化, 1996, 20(11): 17-22. (SUN Yuanzhang, YANG Zhiping, ZHAO Zhiyong, et al. Research of nonlinear control and improvement of transient stability of STATCOM[J]. *Power system Automation*, 1996, 20(11): 17-22.)
- [3] 马幼捷. 非线性控制理论及其在电力系统中的应用[J]. 青岛大学学报, 1998, 11(2): 63-68. (MA Youjie. Nonlinear control theory and its application in power system[J]. *Journal of Qingdao University*, 1998, 11(2): 63-68.)
- [4] 卢强, 王仲鸿, 韩英铎. 输电系统最优控制[M]. 北京: 科学出版社, 1982. (LU Qiang, WANG Zhonghong, HAN Yingze. *Transmission system optimal control*[M]. Beijing: Science Press, 1982.)
- [5] 申铁龙. H_∞ 控制理论及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996. (SHEN Tielong. *H_∞ Control Theory and Applications*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1996.)
- [6] 梅生伟, 申铁龙, 刘康志. 现代鲁棒控制理论与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003. (MEI Shengwei, SHEN Tielong, LIU Kongzhi. *Modern Robust Control Theory and Application*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.)
- [7] 王德进. H_2/H_∞ 优化控制理论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2001. (WANG Dejin. *H_2/H_∞ Optimal Control Theory*[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2001.)
- [8] 蔡超豪. TCSC的 H_2/H_∞ 控制器设计[J]. 电力科学与工程, 2005, (2): 48-51. (CAI Chao hao. Design of H_2/H_∞ controller of TCSC[J]. *Electric Power Science and Engineering*, 2005, (2): 48-51.)
- [9] 俞立. 鲁棒控制—线性矩阵不等式处理方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002. (YU Li. *Processing Method of Robust Control-Linear Matrix Inequality*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.)
- [10] GAHINET P, NEMIROVSKI A, LAUB A J, et al. *LMI Control Toolbox for Use with MATLAB*[M]. MI, USA: The Math Works Inc, 1995.

作者简介:

孙运全 (1969—), 男, 副教授, 博士, 主要从事电能质量与控制研究, E-mail: sunyunquan99@126.com;

孙玉坤 (1958—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事特种电机的智能控制、复杂过程的智能检测与计算机控制、电能的控制与变换等研究, E-mail: syk@ujs.edu.cn;

刘贤兴 (1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事特种电机传动、动态无功补偿、生物发酵系统、电力电子技术和计算控制技术等研究, E-mail: liuxianxing@ujs.edu.cn;

尹强 (1984—), 男, 硕士研究生, 主要从事电力电子与电力传动, E-mail: yin-1-qiang@163.com.