考虑控制量限幅的发电机非线性分散鲁棒汽门控制

常乃超[1],郭志忠[1,2]

(1. 哈尔滨工业大学电气工程系,黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 北京许继电气有限公司,北京 100085)

摘要: 提出了一种冗余控制量情况下考虑控制量限幅的非线性反馈控制方法,这种方法通过在动态过程的任一时间点上求解一个具有不等式约束的最优化问题得到该时刻各控制量值,使实际能够给出的虚拟控制量尽量达到保证系统渐近稳定所需要的虚拟控制量要求。将该方法与引入量测变量的建模方法相结合,设计了可同时考虑高压、中低压缸汽门控制的多机系统非线性分散鲁棒汽门控制器。对一个多机交直流系统的数字仿真表明,所设计的控制器是有效的。

关键词: 非线性反馈控制; 最优化; 电力系统

中图分类号: TM311 **文献标识码**: A **文章编号**: 1003-4897(2003)12-0001-04

1 引言

文献[1~2]将非线性控制理论引入电力系统控制,开创了电力系统控制研究的新领域。文献[1~2]中不论是励磁控制还是汽门控制的研究均是控制量无冗余的情况,即控制量与控制目标是一对一的关系。在控制量没有冗余的情况下正如文献[2]指出的,在设计控制器时没有必要考虑控制量的限幅作用,只需在仿真或实验时加上控制量限幅即可。当同时考虑高压缸、中低压缸的控制时,汽门控制是一个有冗余控制量的问题。在控制量具有冗余的情况下,存在各控制量如何在其各自的限幅范围之内协调配合以尽量达到控制目标的问题。文献[3]应用逆系统方法研究了同时考虑高压缸、中低压缸控制的汽门控制问题,在由虚拟控制量求各实际控制量时采用的方法是先给定一个实际控制量然后求解另外一个实际控制量,在实际控制量无限幅的情况下,这种做法是可行的,但当考虑实际控制量限幅后这种做法不能考虑两个实际控制量的最佳协调配合问题。另外,文献[3]中给出的模型针对单机无穷大系统,没有考虑多机系统的情形。

本文首先提出了一种冗余控制量下考虑控制量限幅的非线性反馈控制方法,该方法通过在任一时间点上求解一个不等式约束的最优化问题使各控制量协调配合尽量达到虚拟控制量的要求,从而尽量达到控制目标。然后利用文献[4~6]中提出的电力系统非线性分散鲁棒控制建模方法给出了多机系统下同时考虑高压缸、中低压缸控制的汽门控制模型,将提出的非线性反馈控制方法应用于该模型中,设计了考虑控制量限幅作用,同时考虑高压缸、中低压缸控制的非线性分散鲁棒汽门控制器。对一个交直流多机系统的仿真表明,所设计的控制器是有效的,能够提高发电机的暂态稳定性。

2 冗余控制量下考虑控制量限幅的非线性反馈控制

考虑如下系统

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 \\ \quad \cdots \\ \dot{x}_n = f(\mathrm{X}, \mathrm{X}^{(1)}, \cdots \mathrm{X}^{(k)}, \mathrm{M}, \mathrm{M}^{(1)}, \cdots \mathrm{M}^{(k)}, v_1, v_2, \cdots v_m) \end{cases} \tag{1}$$

$\mathrm{X} = [x_1, x_2, \cdots, x_n]^{\mathrm{T}}$ 为状态变量, $\mathrm{X}^{(k)}$ 为 X 对时间 t 的 k 阶导数, $\mathrm{V} = [v_1, v_2, \cdots, v_m]^{\mathrm{T}}$ 为控制向量, $\mathrm{M} = [M_1, M_2, \cdots, M_l]^{\mathrm{T}}$ 为量测向量, M 充分光滑或分段充分光滑, $\mathrm{M}^{(k)}$ 为 M 对时间 t 的 k 阶导数,控制目标为使 X 镇定于原点。当 $m > 1$, $m \in N$, 对 $\forall i = 1, 2 \cdots, m$ 均满足当 v_i 取遍 $(-\infty, +\infty)$ 则 $f(\mathrm{X}, \mathrm{X}^{(1)}, \cdots \mathrm{X}^{(k)}, \mathrm{M}, \mathrm{M}^{(1)}, \cdots \mathrm{M}^{(k)}, v_1, v_2, \cdots, v_m)$ 也取遍 $(-\infty, +\infty)$, 且 f 关于 v_i 可逆,那么称式(1)所示的系统是有冗余控制量的系统。

命题 当 $v_1, v_2, \cdots, v_m$ 中至少存在一个控制量 v_i 无限幅限制时,式(1)所示的系统是完全可控的。

这一命题的正确性是显然的。事实上,令 $v = f(\mathrm{X}, \mathrm{X}^{(1)}, \cdots, \mathrm{X}^{(k)}, \mathrm{M}, \mathrm{M}^{(1)}, \cdots, \mathrm{M}^{(k)}, v_1, v_2, \cdots, v_m)$,则式(1)变为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 \\ \quad \cdots \\ \dot{x}_n = v \end{cases} \tag{2}$$

由线性系统理论的基本理论,式(2)所示系统是完全可控的,存在如下线性最优反馈

$$v = KX \tag{3}$$

使 X 镇定于原点。又根据我们的假设,当 v_i 取遍 $(-\infty, +\infty)$ 则 $f(X, X^{(1)}, \cdots, X^{(k)}, M, M^{(1)}, \cdots, M^{(k)}, v_1, v_2, \cdots, v_m)$ 也取遍 $(-\infty, +\infty)$ 且 f 关于 v_i 可逆,因此可以解出

$$v_i = f^{-1}(X, X^{(1)}, \cdots, X^{(k)}, M, M^{(1)}, \cdots, M^{(k)}, v, v_1, v_2, \cdots, v_{i-1}, v_{i+1}, v_m) \tag{4}$$

式(4)中 $v_1, v_2, \cdots, v_{i-1}, v_{i+1}, v_m$ 可以为任意值,比如都取为某一常数便可以得到 v_i 的一个确定的控制规律,此控制规律保证 X 镇定于原点。

对于实际的物理系统,控制量限幅限制是不可避免地存在的。设控制量限幅为

$$v_{i\min} \leq v_i \leq v_{i\max}, \ \forall i = 1, 2, \cdots, m \tag{5}$$

在式(5)的约束之下,设函数 $y = f(X, X^{(1)}, \cdots, X^{(k)}, M, M^{(1)}, \cdots, M^{(k)}, v_1, v_2, \cdots, v_m)$ 的值域为

$$y_{\min} \leq y \leq y_{\max} \tag{6}$$

在式(6)所示的约束下,式(1)所示的系统不能保证是完全可控的。这是因为,某一时间点上式(3)所示的虚拟控制量 v 可能超出式(6)所示的范围,此时方程 $v = f(X, X^{(1)}, \cdots, X^{(k)}, M, M^{(1)}, \cdots, M^{(k)}, v_1, v_2, \cdots, v_m)$ 关于 v_i 无解。一个自然的问题是如何在控制量存在限幅的情况下设计非线性反馈控制器,下面提出一种考虑控制存在限幅情况下的非线性反馈控制器设计方法。

在动态过程的任一时间点上,求解如下最优化问题

$$\min L(v_1, v_2, \cdots, v_m) = [v - f(X, X^{(1)}, \cdots, X^{(k)}, M, M^{(1)}, \cdots M^{(k)}, v_1, v_2, \cdots, v_m)]^2 \tag{7}$$

$$s.t. \quad v_{i\min} \leq v_i \leq v_{i\max}, \ \forall i = 1, 2, \cdots, m \tag{8}$$

式(7)中的 v 由式(3)确定,任一时间点上均为已知。目标函数 L 的意义是使保证系统镇定于原点的虚拟反馈量与实际能够给出的虚拟反馈量之间的距离最小,即使 $(v_1, v_2, \cdots, v_m)$ 的取值尽可能满足虚拟控制量的要求。

3 发电机汽门控制模型

作者在文献[4~6]中提出了一种新的电力系统非线性分散鲁棒建模及控制方法,其核心是在电力系统控制模型中引入量测变量使动态元件数学模型本身与外部系统解耦,不包含外部系统参数,大大方便了电力系统非线性分散鲁棒控制目标的实现。多机系统中第 i 台发电机同时考虑高压缸、中低压缸控制的汽门控制模型为(为方便起见,省略了下标 i):

$$\begin{cases} \dot{\delta} = (\omega - 1)\omega_N \\ \dot{\omega} = \frac{1}{H}(P_H + P_{ML} - P_e) - \frac{D}{H}(\omega - 1)\omega_N \\ \dot{P}_H = -\frac{1}{T_H}P_H + \frac{C_H}{T_H}P_{m0} + \frac{C_H}{T_H}\mu_1 \\ \dot{P}_{ML} = -\frac{1}{T_{ML}}P_{ML} + \frac{C_{ML}}{T_{ML}}P_{m0} + \frac{C_{ML}}{T_{ML}}\mu_2 \end{cases} \tag{9}$$

控制目标

$$y = \delta - \delta_0 \tag{10}$$

式(9)、(10)中 δ 为发电机转子角度(rad);ω 为转子角速度;ω_N 为同步转速(rad/s);D 为阻尼系数(s);P_{m0} 为机械功率初始值;P_H、P_{ML} 分别为高压缸、中低压缸输出机械功率;P_e 为电磁功率;H 为转子惯量;C_H、C_{ML} 分别为高压缸、中低压缸功率分配系数;T_H、T_{ML} 分别为高压缸、中低压缸蒸汽调节系统等效时间常数(s);μ_1 为高压缸汽门控制;μ_2 为中低压缸汽门控制。

式(10)中 P_e 为量测变量,P_e 的引入使得第 i 台发电机的汽门控制模型式(1)与外部系统解耦,不包含外部系统参数,不受外部系统动态的影响,在此模型下设计出分散、鲁棒(对外部系统)的汽门控制器是自然的。

4 控制器设计

由于

$$y^{(3)} = \delta^{(3)} = \omega_N\left[\frac{1}{H}\left(-\frac{1}{T_H}P_H + \frac{C_H}{T_H}P_{m0} - \frac{1}{T_{ML}}P_{ML} + \frac{C_{ML}}{T_{ML}}P_{m0} - \dot{P}_e + \frac{C_H}{T_H}\mu_1 + \frac{C_{ML}}{T_{ML}}\mu_2\right) - \frac{D}{H}\omega_N\dot{\omega}\right] \tag{11}$$

即 y 的 3 阶导数可以被 μ_1、μ_2 直接控制,因而 $R(y, \mu_1) = R(y, \mu_2) = 3$[4~6]。

令 $z_0 = y$, $z_1 = \frac{y^{(1)}}{\omega_N}$, $z_2 = \frac{y^{(2)}}{\omega_N}$,从而有

$$\begin{cases} \dot{z}_0 = \omega_N z_1 \\ \dot{z}_1 = \dot{z}_2 \\ \dot{z}_2 = \frac{1}{H}\left(-\frac{1}{T_H}P_H + \frac{C_H}{T_H}P_{m0} - \frac{1}{T_{ML}}P_{ML} + \frac{C_{ML}}{T_{ML}}P_{m0} - \dot{P}_e + \frac{C_H}{T_H}\mu_1 + \frac{C_{ML}}{T_{ML}}\mu_2\right) - \frac{D}{H}\omega_N\dot{\omega} \end{cases} \tag{12}$$

可以看到,式(12)所示的是一个有冗余控制量的系统。

引入虚拟控制量

$$v=\frac{1}{H}\left(-\frac{1}{T_H}P_H+\frac{C_H}{T_H}P_{m0}-\frac{1}{T_{ML}}P_{ML}+\frac{C_{ML}}{T_{ML}}P_{m0}-\dot{P}_e+\frac{C_H}{T_H}\mu_1+\frac{C_{ML}}{T_{ML}}\mu_2\right)-\frac{D}{H}\omega_N\dot{\omega}=f(P_H,P_e,\dot{P}_e,\mu_1,\mu_2) \quad (13)$$

设控制量限幅为

$$\mu_{1\min}\le\mu_1\le\mu_{1\max},\quad \mu_{2\min}\le\mu_2\le\mu_{2\max} \quad (14)$$

在暂态过程的任一时间点上求解如式(15)～(16)所示的最优化问题 P

$$\min J(\mu_1,\mu_2)=[v-f(P_H,P_e,\dot{P}_e,\mu_1,\mu_2)]^2 \quad (15)$$

$$s.t.\quad \mu_{1\min}\le\mu_1\le\mu_{1\max},\quad \mu_{2\min}\le\mu_2\le\mu_{2\max} \quad (16)$$

式(15)中 v 可采用各种线性控制方法给出,如线性最优控制、变结构控制、H_∞控制等给出,这里采用线性最优控制给出

$$v=KZ=[k_1\quad k_2\quad k_3]\begin{bmatrix}\Delta\delta\\ \Delta\omega\\ \Delta\dot{\omega}\end{bmatrix} \quad (17)$$

式(17)中

$$K=-R^{-1}B^TP \quad (18)$$

式(18)中 P 为黎卡提方程

$$PA+A^TP-PBR^{-1}B^TP+Q=0 \quad (19)$$

的解。式(19)中:

$$A=\begin{bmatrix}0&\omega_N&0\\0&0&1\\0&0&0\end{bmatrix},\quad B=\begin{bmatrix}0\\0\\1\end{bmatrix},\quad Q=diag(q_1,q_2,q_3),\ R=r,$$

Q, R 为所选择的正定权矩阵。

5　数值仿真

采用 PSASP[8]中的用户自定义模型、用户程序接口功能实现了考虑控制量限幅作用的非线性分散鲁棒汽门控制器。仿真采用一个 8 机交直流系统进行,该系统有一条 Bus33 - Bus34 的直流线路,仿真条件为 Bus30 在 0 s 时发生三相对地短路,0.2 s 故障清除。图 1 为常规汽门控制器(Conventional Valve Controller)下系统的暂态功角响应,图 2 为 7 号发电机装设了本文设计的非线性分散鲁棒汽门控制器(Nonlinear Decentralized Robust Valve Controller, NDRVC)后系统的暂态功角响应。

由图(1)、(2)可以看出,常规汽门控制不能保证系统的暂态稳定性,而本文设计的非线性分散鲁棒汽门控制器可以保证系统的暂态稳定性,且由于考虑了控制量的限幅约束本文设计的控制器也较为符合实际情况。对 7 号发电机,仿真中采用的一些参数如下: $Q=diag(10,100,100)$, $R=1$, $K=[-3.16,-213.88,-22.97]$, $C_H=0.3$, $C_{ML}=0.7$, $T_H=0.2$, $T_{ML}=0.35$, $H=7.69$, $D=0$, $\mu_{1\min}=\mu_{2\min}=-0.3$, $\mu_{1\max}=\mu_{2\max}=0.9$, $\omega_1=\omega_2=1$。

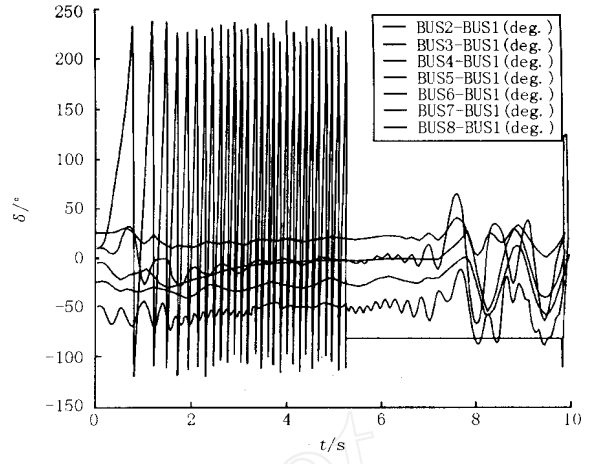

图 1　常规汽门控制下系统功角暂态响应

Fig. 1　Transient response of generator angles under CVC

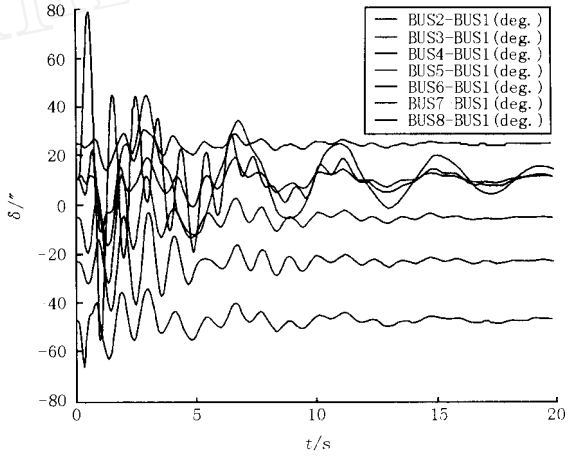

图 2　考虑限幅的非线性分散鲁棒汽门控制下系统功角暂态响应

Fig. 2　Transient response of generator angles under NDRVC

6　结论

(1) 在控制量具有冗余且考虑控制量限幅的情况下,各控制量存在如何协调配合的问题。本文提出的考虑冗余控制量下控制量限幅的非线性反馈控制方法可以使各控制量协调配合,尽量达到虚拟控制量的要求,从而尽量达到控制目标;

(2) 建立了多机系统下同时考虑高压缸、中低压缸控制的非线性分散鲁棒汽门控制模型,对该模

型应用所提出的可以考虑冗余控制量下控制量限幅的非线性反馈控制方法设计了同时考虑高压缸、中低压缸控制的多机系统非线性分散鲁棒汽门控制器。对一个交直流多机系统的数值仿真表明,所设计的控制器是有效的。

参考文献:

[1] Lu Q, Sun Y Z. Nonlinear Stabilizing Control of Multimachine Systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1989,4(1):236-241.

[2] 卢强,孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 北京:科学出版社, 1993.

[3] 黎浩荣,李东海,李立勤,等. 中间再热汽轮发电机组汽门开度的全程非线性控制[J]. 清华大学学报,2000,40(10):84-87.

[4] 常乃超,胡林献. 基于详细模型的 HVDC 系统非线性输出跟踪控制器[J]. 电力系统自动化,2001, 25(24):30-32.

[5] CHANG Nai-chao, GUO Zhi-zhong, et al. Nonlinear Decentralized Robust Control of Power Systems Based on Synchronized Phasor Measurements[C]. 1st International CRIS Conference,2002,23-27.

[6] CHANG Nai-chao, GUO Zhi-zhong, et al. A New Modeling Method for Nonlinear Decentralized Robust Control of Power Systems[C]. 2002.

[7] 段广仁. 线性系统理论[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1996.

收稿日期: 2003-05-14; **修回日期**: 2003-07-23

作者简介:

常乃超(1977-),男,博士研究生,研究方向为电力系统稳定控制、电力市场;

郭志忠(1961-),男,教授,博士生导师,研究方向为电力系统稳定、电力市场、光电互感器、数字化电力系统等。

Nonlinear decentralized robust valve controller constrained by control limits for turbo-generator

CHANG Nai-chao[1], GUO Zhi-zhong[1,2]

(1. Dept. of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
2. Beijing XuJi Electric Co., Ltd, Beijing 100085, China)

Abstract: A nonlinear feedback control method under redundant control input with limits is proposed, With this method, every control input value at any point of time in dynamic process can be collected through solving an optimal problem constrained by some inequalities, Therefore the virtual control values actually given are as close as possible to the virtual values that can guarantee the asymptotic stability of the control system. Combined the proposed method with the modeling method into which measurable variables are introduced, a nonlinear robust decentralized valve controller that can simultaneously consider control of high-pressure valve and mid-low-pressure valve for multi-machine power systems is designed. Data simulations of a multi-machine AC/DC power system verify that the controller designed is effective.

Key words: nonlinear feedback control; optimization; power systems