

# 励磁系统的 $H_2/H$ 保性能控制器

蔡超豪

(沈阳工程学院, 辽宁 沈阳 110136)

摘要: 基于  $H_2/H$  保性能控制理论和直接反馈线性化研究了单机 - 无穷大电力系统的励磁控制器设计。建立了含不确定因素的数学模型, 采用解线性矩阵不等式 (LMI) 方法, 利用 MATLAB/LMI 工具箱得出发电机励磁的  $H_2/H$  保性能控制律。分析表明这种控制方法兼有鲁棒性能和最优性能, 使  $H$  控制具有较小的保守性, 提高了电力系统的稳定性, 并能满足电压精度的要求。

关键词: 发电机励磁控制器;  $H_2/H$  保性能控制; LMI 方法

中图分类号: TM621.6 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)20-0044-04

## 0 引言

发电机励磁系统是电力系统的重要组成部分, 励磁控制则是提高电力系统稳定性最经济最有效的技术手段之一。传统的 PD 控制和 PSS (电力系统稳定器) 的设计是基于某一平衡状态下的近似线性化模型, 因此它们只能处理小干扰稳定问题。20 世纪 60 年代现代控制理论得到了发展, 具有广泛工程背景的线性二次型最优调节器采用线性二次型性能指标 ( $H_2$  性能指标), 是一种典型的最优控制。但最优控制理论采用精确的控制对象的数学模型, 没有考虑模型误差的影响。而实际控制系统中模型误差的存在是不可避免的, 这就限制了最优控制理论的应用。基于现代控制理论的线性最优励磁控制 (LOEC)<sup>[1]</sup> 和非线性励磁控制 (NEC)<sup>[2]</sup>, 其建模均是采用固定的结构和参数而未考虑模型的不确定性, 因而所设计的控制器也难以达到预期的性能指标。

为了克服上述励磁控制器的不足, 即在建立数学模型和设计控制器的过程中如何考虑不确定性问题, 以  $H$  控制<sup>[3]</sup>、无源化控制及  $L_2$  增益分析<sup>[4]</sup> 等理论为代表的现代鲁棒控制理论应运而生。它们共同的出发点是在系统建模和控制器设计过程中考虑不确定性对系统的影响, 并且基于有关不确定性的不完整信息, 设计出计及不确定因素的控制器, 使得实际系统能够满足预期的性能指标。

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, 已成为近代 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, 而  $H$  控制能较好地解决

系统的鲁棒性问题, 将两者结合起来, 得到兼有鲁棒性能和最优性能的控制律, 并且可以使  $H$  控制具有较小的保守性, 这就是所谓  $H_2/H$  混合控制<sup>[5]</sup>。当系统模型中存在参数不确定时, 相应的  $H_2/H$  鲁棒控制称为保性能控制 (Guaranteed cost control)。

随着线性矩阵不等式 (LMI) 及求解凸优化问题的内点法的提出, 为不确定系统  $H_2/H$  混合控制提供了有效的求解方法<sup>[7,8]</sup>。国际通用软件 Matlab 中 LMI 工具箱的推出使得  $H_2/H$  鲁棒控制的解题及控制器参数的优化更加方便, 进一步推动了 LMI 处理方法在控制领域中的应用, 使  $H_2/H$  控制理论真正成为实用的工程设计理论。

本文采用直接反馈线性化 (DFL) 将电力系统的数学模型线性化, 然后将  $H_2/H$  混合控制在 90 年代所取得的研究成果应用于发电机励磁系统状态反馈控制器设计, 采用 LMI 工具箱解题及进行控制器参数的优化, 以求得最佳的控制效果, 并将其与其他控制方式进行仿真比较。

## 1 基本原理

### 1.1 单机 - 无穷大电力系统的数学模型及直接反馈线性化

单机 - 无穷大电力系统如图 1 所示。式 (1)、(2) 为发电机的转子运动方程, 式 (3) 为功率方程, 式 (4) 为转子绕组电磁动态方程<sup>[2]</sup>。

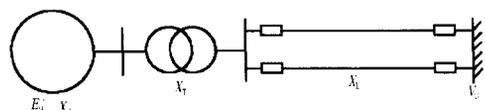


图 1 单机 - 无穷大电力系统

Fig 1 A single-machine infinite-bus power system

$$\dot{\delta} = -\omega_0 \quad (1)$$

$$\dot{P}_e = -\frac{D}{H} (P_e - P_m) - \frac{\omega_0}{H} (P_e - P_m) \quad (2)$$

$$P_e = \frac{E_q V_s}{X_{d\Sigma}} \sin \delta + \frac{V_s^2}{2} \left( \frac{X_d - X_q}{X_{d\Sigma} X_{q\Sigma}} \right) \sin 2\delta \quad (3)$$

$$\dot{E}_q = -\frac{1}{T_d} E_q + \frac{1}{T_{d0}} \frac{X_d - X_q}{X_{d\Sigma}} V_s \cos \delta + \frac{1}{T_{d0}} V_f \quad (4)$$

式中： $\delta$ 为发电机的转子运行角 (rad)， $\omega_0$ 为发电机角速度 (rad/s)， $P_e$ 和  $P_m$ 分别为发电机电功率和机械功率； $H$ 为机组转动惯量 (s)， $D$ 为阻尼系数； $E_q$ 为发电机空载电势； $E_q'$ 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； $X_{d\Sigma} = X_d + X_T + X_L$ ， $T_{d0}$ 为发电机定子绕组开路时励磁绕组的时间常数 (s)； $V_s$ 为无穷大电力系统母线电压； $V_t$ 为发电机端电压； $V_f$ 为励磁电压，为控制量 (以上未标单位的均用标么值)， $\omega_0 = 314$  rad/s，假设  $P_m$  恒定， $P_m = P_{m0} = P_{e0}$ 。

对式 (3)求导，并将式 (1)、(4)代入得：

$$\begin{aligned} \dot{P}_e = & \frac{V_s}{X_{d\Sigma}} [E_q (\dot{\delta} - \omega_0) \cos \delta + (-\frac{1}{T_d} E_q + \\ & \frac{1}{T_{d0}} \frac{X_d - X_q}{X_{d\Sigma}} V_s \cos \delta + \frac{1}{T_{d0}} V_f) \sin \delta] + \\ & V_s^2 \left( \frac{X_d - X_q}{X_{d\Sigma} X_{q\Sigma}} \right) (\dot{\delta} - \omega_0) \cos 2\delta \end{aligned} \quad (5)$$

取  $\delta_0 = \delta$ ， $\omega_0 = \omega_0$ ， $P_e = P_e - P_{e0} = P_e - P_m$ ，其中  $\delta_0$ 、 $\omega_0$ 、 $P_{e0}$ 表示对应变量的初值。采用直接反馈线性化，指定虚拟控制量

$$u = \frac{\omega_0}{H} \dot{P}_e \quad (6)$$

式 (1)、(2)、(6)可写成

$$\begin{aligned} \dot{\delta} &= -\omega_0 \\ \dot{P}_e &= -\frac{D}{H} (P_e - P_m) - \frac{\omega_0}{H} (P_e - P_m) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\dot{P}_e = \frac{H}{\omega_0} u$$

为了保证电压的调节精度，消除发电机端电压的稳态误差，引入端电压偏差的积分值为状态变量，用  $V_1$ 表示，即

$$V_1 = \int_0^t V_t dt = \int_0^t (V_t - V_0) dt$$

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，按照小范围线性化的推导<sup>[1]</sup>，有  $P_e = S_V + R_V V_t$ ，所以

$$\dot{V}_1 = V_t = -\frac{S_V}{R_V} + \frac{1}{R_V} P_e \quad (8)$$

将式 (8) 嵌入方程组 (7)，便构成单机 - 无穷大系统线性化后的四阶模型。

### 1.2 单机 - 无穷大电力系统具有不确定因素时的数学模型

在实际电力系统中， $D$ 、 $H$ 以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，因此有必要建立一个包含上述不确定因素的数学模型。对于系统 (7)、(8)，如果考虑参数偏差为  $\Delta D$ 、 $\Delta H$ 、 $\Delta S_V$ 、 $\Delta R_V$ ，外部干扰为  $w_2$ 、 $w_3$ 、 $w_4$ ， $A(t)$ 、 $B_2(t)$ 为参数摄动阵，则它可表示为：

$$\dot{x} = [A + \Delta A(t)]x + B_1 w + [B_2 + \Delta B_2(t)]u \quad (9)$$

式中：

$$x = [ \delta \quad P_e \quad V_1 ]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{D}{H} & -\frac{\omega_0}{H} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{S_V}{R_V} & 0 & \frac{1}{R_V} & 0 \end{bmatrix}, \quad A(t) =$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\Delta D}{H(H+\Delta H)} & \frac{\Delta H}{H(H+\Delta H)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\Delta S_V}{R_V(R_V+\Delta R_V)} & 0 & -\frac{\Delta R_V}{R_V(R_V+\Delta R_V)} & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_1 w = [w_1 \ w_2 \ w_3 \ w_4]^T = [0 \ d_2 \ d_3 \ d_4]^T w$$

$$B_2 = [0 \ 0 \ H/\omega_0 \ 0]^T$$

$$B_2(t) = [0 \ 0 \ H/\omega_0 \ 0]^T$$

定义性能评价信号为：

$$\begin{aligned} z_1 &= C_1 x + D_{12} u \\ z_2 &= C_2 x + D_{22} u \end{aligned} \quad (10)$$

式中：

$$C_1 = \begin{bmatrix} q_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_{14} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} q_{21} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q_{23} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_{24} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$D_{12} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ r_1]^T$   $D_{22} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ r_2]^T$   
 $C_1, C_2, D_{12}, D_{22}$ 为权矩阵,  $q_{ij} > 0$  ( $i=1, 2, j=1, 2, 3, 4$ )和  $r_i$  ( $i=1, 2$ )  $> 0$ 为加权系数。通过改变加权系数选择最优的性能组合,包括电力系统稳定性、电压调节精度以及控制系统的低能量消耗等。

1.3  $H_2/H$  保性能控制器的求解方法<sup>[7]</sup>

对于如图 2 的控制系统我们要求设计一个控制器  $K(s)$ ,使得闭环系统是渐近稳定的,且从  $w$ 到  $z$  的闭环传递函数  $T(s)$ 的  $H$  范数不超过一个给定的上界,以保证闭环系统对由  $w$  进入的不确定性具有鲁棒稳定性;同时使得  $w$ 到  $z_2$  的闭环传递函数  $T_2(s)$ 的  $H_2$  范数尽可能小,以保证用  $H_2$  范数度量的系统性能处于一个较好的水平。这样一个问题称为  $H_2/H$  控制问题。

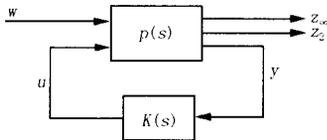


图 2  $H_2/H$  控制  
 Fig 2  $H_2/H$  control

对于具有不确定因素(存在参数不确定和外部干扰)的被控对象(9)、(10),假设参数摄动阵  $A(t), B_2(t)$ 满足下述匹配条件

$$[A(t) \ B_2(t)] = E \sum(t) [F_a \ F_b] \quad (11)$$

其中:  $E, F_a, F_b$  为具有适当维数的已知矩阵,且满足  $\sum(t)$ ,其控制器  $K$ 可以由对应的增广被控对象  $P(s)$ 来求解<sup>[3]</sup>。

$$P(s) = \begin{bmatrix} A & \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{r_1}} B_1 & E \end{bmatrix} & B_2 \\ \begin{bmatrix} C_1 \\ F_r \end{bmatrix} & [0] & \begin{bmatrix} D_{12} \\ F_b \end{bmatrix} \\ C_2 & [0] & D_{22} \\ I & [0] & [0] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B_{1E} & B_2 \\ C_{1F} & D_{11} & D_{12F} \\ C_2 & D_{21} & D_{22} \\ I & [0] & [0] \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中:  $r_i > 0$ 为给定常数,  $r_i$  越小意味控制系统对干扰抑制的性能越好,但控制系统所需能耗越大。

LM工具箱提供了求解  $H_2/H$  控制问题的 `msfsyn`函数,该函数可用以求解图 2 所示的多目标  $H_2/H$  (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,且达到下列性能指标 ( $\gamma_0$ 表示最小化的扰动抑制度):

1)最优  $H$  控制:

$$\|T\|_\infty = \sup_j |T(j\omega)| < \gamma_0 \quad (13)$$

即  $H$  范数极小化,或简单地讲,系统频率响应的最大奇异值的峰值极小化。

2)最优  $H_2$  控制:

$$\|T_2\|_2 = \text{Trace} \left( \frac{1}{2} (T(j\omega)T^*(j\omega) + T^*(j\omega)T(j\omega)) \right)^{1/2} < \gamma_0 \quad (14)$$

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

3)  $H_2/H$  控制:闭环系统极点位于左半开复平面,且使得性能指标  $\|T\|_\infty^2 + \|T_2\|_2^2$ 最小化。

按照 `msfsys` 函数的约定,其输入的系统矩阵(参看式(12))为:

$$P = \text{ltisys}(A, [B_{1E}, B_2], [C_{1F}, C_2], [D_{11}, D_{12F}, D_{21}, D_{22}])$$

应用 `msfsys` 函数求解  $H_2/H$  状态反馈控制器  $K$ :

$$[gopt, h2opt, K] = \text{msfsyn}(P, [r(1), r(2)], [0 \ 0 \ 0 \ 1], I)$$

式中:  $r(1)$ 为评价信号  $z_2$  的维数,  $r(2)$ 为控制输入  $u$  的维数, `gopt`为从  $w$ 到  $z$  闭环系统的性能指标, `h2opt`为从  $w$ 到  $z_2$  闭环系统的性能指标,  $K$ 为所求状态反馈控制器的反馈系数。对于被控对象(9)、(10),得出:

$$u = Kx = [k_1, k_2, k_{pe}, k_{pi}]^T [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}]^T + P_e V_1 \int x_1 dt \quad (15)$$

由式(15)和式(5)、(6)解得单机-无穷大电力系统的  $H_2/H$  状态反馈控制器控制律

$$V_f = \frac{T_{d0} X_{d\Sigma}}{V_s \sin \delta} \left[ \frac{H}{T_{d0}} Kx - V_s^2 \left( \frac{X_d - X_q}{X_{d\Sigma} X_{q\Sigma}} \right) \cos 2\delta \right] - \frac{T_{d0} E_q \cos \delta}{\sin \delta} + \frac{T_{d0}}{T_d} E_q - \frac{X_d - X_q}{X_{d\Sigma}} V_s \cos \delta \quad (16)$$

2 数字仿真

在图 1 的单机-无穷大 230 kV 系统中,发电机 200MW、13.8 kV、 $H = 12.9$  s、 $D = 0.075$ 、 $X_d = 1.652$ 、 $X_q = 0.209$ 、 $T_{d0} = 6.55$  s、 $X_T = 0.0584$ 、 $X_L = 0.0532$ 、 $V_s = 1.0$ , 初始运行点为:  $P_{e0} = 0.706$ 、 $\delta_0 = 42.6^\circ$ 、 $\omega_0 = 314.16$  rad/s、 $E_{q0} = 0.936$ 、 $V_{f0} = 1.05$  (以上未标单位的均用额定标么值)。

今设计发电机  $H_2/H$  状态反馈励磁控制器。

在式 (9)中,设  $|D|=0$ 、 $|H|=0$ 、 $|R_V|=0$ 、 $|S_V|=0$ ,其含不确定性的数学模型的系数矩阵为:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -0.0058 & -24.3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.171 & 0 & 0.129 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -0.00129 & -2.7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.038 & 0 & 0.0144 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_2 = [0 \ 0 \ 0 \ 0.412 \ 2 \ 0]^T$$

$$B_2 = [0 \ 0 \ -0.00412 \ 0]^T$$

在式 (9)、(10)中选取  $B_1$ 、 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $D_{12}$ 、 $D_{22}$ 为

$$B_1 = [0 \ 24.3 \ 0.412 \ 0.129]^T$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} 6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D_{12} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0.01]^T$$

$$D_{22} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0.01]^T$$

在式 (11)中,取

$$E = \begin{bmatrix} 0.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.2 \end{bmatrix}$$

$$F_a = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.0064 & -13.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.19 & 0 & 0.0714 & 0 \end{bmatrix}$$

$$F_b = [0 \ 0 \ -0.0206 \ 0]^T$$

并取  $\gamma = 100$ ,  $B_{1E} = [0 \ B_1 \ E]$ ,  $C_{1F} = [C_1; F_a]$ ,  $D_{11} = \text{zeros}(9, 5)$ ,  $D_{12F} = [D_{12}; F_b]$ ,  $D_{21} = \text{zeros}(5, 5)$ 。应用 `mfssysm` 函数,  $r(1) = 5$ ,  $r(2) = 1$ ,得  $H_2/H$  状态反馈控制器的增益为:

$$K = [139.7, 64.12, -266.0, -634.0],$$

$$g_{opt} = 7.1554, h_{2opt} = 1.2611。$$

将其代入式 (15)、(16),便可得出发电机  $H_2/H$

励磁控制器的控制律。

类似地可求得最优  $H_2$  控制器的增益为  $K = [73.32, 33.99, -203.7, -250.3]$ ,  $g_{opt} = [ ]$ ,  $h_{2opt} = 0.3347$ 。

设定故障为线路 1/2 处三相短路,故障时间为  $0.1 \sim 0.25$  s,利用 MATLAB/PSB 搭建模型,加入  $H_2/H$  状态反馈控制器,进行仿真,部分变化曲线见图 3,其中图 3(a)为发电机的转子运行角 (deg),图 3(b)为发电机频率 (Hz),图 3(c)为发电机功率 (pu),图 3(d)为发电机端电压 (pu),横坐标均为时间 (s)。实线为  $H_2/H$  控制,虚线为 PD 控制。可以看出,  $H_2/H$  保性能控制对维持系统电压和阻尼区域间功率振荡有很好的效果。

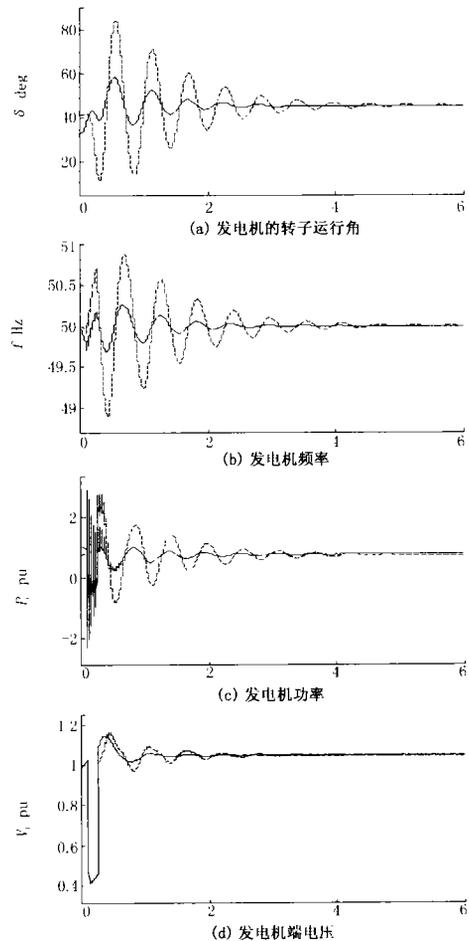


图 3 系统短路故障仿真响应曲线

Fig 3 Simulated response curves of system short circuit

设机组转动惯量  $H$  在  $14.2 \text{ s} \sim 12.9 \text{ s} \sim 11.6 \text{ s}$  范围摄动,图 4 为发电机功率在 1 s 时突然增加 10% 的响应曲线,图 4(a)、(b)为最优  $H_2$  控制,振荡曲线分散;图 4(c)、(d)为  $H_2/H$  保性能控制,各

振荡曲线相差不大,表现出  $H_2/H$  控制对参数摄动的鲁棒性。

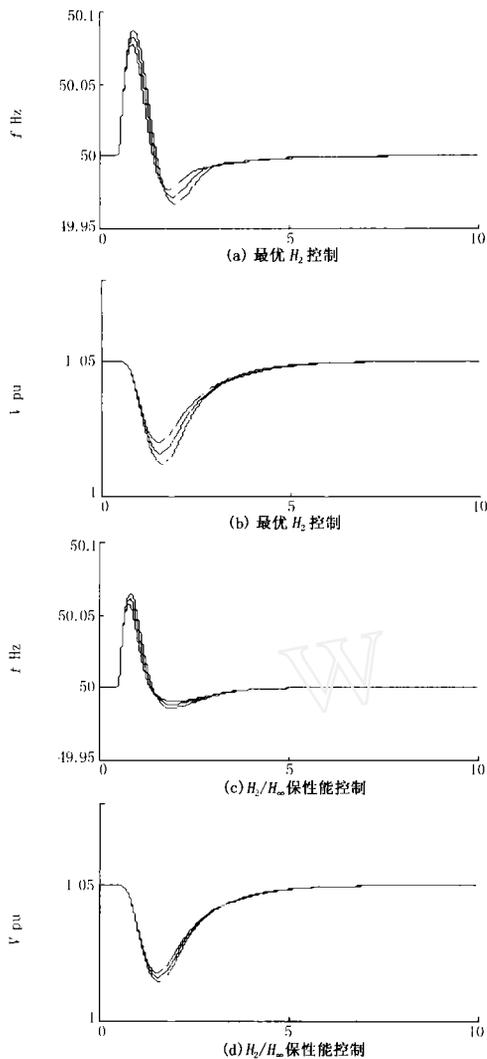


图 4 功率突然增加 10% 仿真响应曲线

Fig 4 Simulated response curves of power increased suddenly

正如大多数干扰抑制问题一样,理论上很难解决反馈系数  $K$  的最优性问题,通常的方法只能依赖于仿真和实验,所以要选取不同的加权系数组合进行  $K$  值计算,可以说  $K$  值的优化离不开工具箱的使用。

### 3 结论

本文将  $H_2/H$  保性能控制应用于发电机励磁控制设计,在系统建模和控制器设计过程中考虑了不确定性对系统的影响。建立了含不确定因素的数学模型,采用解线性矩阵不等式方法,得出发电机励磁的  $H_2/H$  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,可使系统很快平息振荡,有效地提高系统暂态稳定,改善系统的动态性能,又能满足故障切除后电压精度的要求。这种方法利用 MATLAB/LMI 工具箱解题及进行控制器参数的优化,计算方便,便于实际应用。

### 参考文献:

- [1] 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 Zhong-hong, HAN Ying-duo. Transmission System Optimal Control [M]. Beijing: Science Press, 1982
- [2] 卢强,孙元章. 电力系统非线性控制 [M]. 北京: 科学出版社, 1993  
LU Qiang, SUN Yuan-zhang. Power System Nonlinear Control [M]. Beijing: Science Press, 1993
- [3] 申铁龙. H 控制理论及应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1996  
SHEN Tie-long. H Control Theory and Its Application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1996
- [4] 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 Sheng-wei, SHEN Tie-long, LIU Kang-zhi. Modern Robust Control Theory and Its Application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003
- [5] 王德进.  $H_2$  和  $H$  优化控制理论 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2001.  
WANG De-jin.  $H_2$  and  $H$  Optimal Control Theory [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2001.
- [6] 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. Robust Control——Linear Matrix Inequality Processing [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002
- [7] Palhares R M, Peres P L D. LMI Approach to the Mixed  $H_2/H$  Filtering Design for Discrete-time Uncertain Systems [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2001.
- [8] Gahinet P, Nemirovski A, Laub A J, et al. LMI Control Toolbox for Use with Matlab [M]. The Math Works Inc, 1995.

收稿日期: 2005-02-28; 修回日期: 2005-04-11

作者简介:

蔡超豪 (1965 - ), 男, 副教授, 从事电力系统供用电及其控制的教学与研究。Email: loremr@yahoo.com.cn

(下转第 52 页 continued on page 52)

- CHEN Zhong-ren, WU Wei-ning, CHEN Jia-hong, et al Development of a New Measuring-control System of Automatic Arc-suppression Device [J]. Relay, 2005, 33 (1): 64-67.
- [3] 蔡旭,李仕平,杜永忠,等. 变阻尼调匝式消弧线圈及接地选线装置 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(10): 85-90
- CAI Xu, LI Shi-ping, DU Yong-zhong, et al An Integrated Controller of Multi-tap Arc-suppression with Variational Damp and Detection of Earth Fault Feeder [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (10): 85-90
- [4] 蔡旭,刘杰. 偏磁式消弧线圈的动态调谐装置 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (15): 53-56
- CAI Xu, LIU Jie Dynamic Resonance Adjusting Device of Arc-suppression Coil with Magnetic Bias [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26 (15): 53-56
- [5] 李景禄,林玉怀,陈忠仁,等. ZXB 系列自动跟踪补偿消弧装置 [J]. 中国电力, 1998, 31 (8): 42-44.
- LI Jing-lu, LIN Yu-huai, CHEN Zhong-ren, et al ZXB Series Arc Suppression Device with Automatic Following Compensation [J]. Electric Power, 1998, 31 (8): 42-44.
- [6] 李景禄,刘春生,孙春雷,等. 自动跟踪补偿消弧装置
- 的并联运行 [J]. 供用电, 1998, 15 (4): 25-28
- LI Jing-lu, LIU Chun-sheng, SUN Chun-lei, et al Parallel Operation of Automatic Tracking Compensation Arc-suppression Apparatus [J]. Distribution & Utilization, 1998, 15 (4): 25-28
- [7] 陈忠仁,吴维宁,陈家宏,等. 自动补偿消弧装置并联运行方式 [J]. 高电压技术, 2005, 31 (3): 41-43.
- CHEN Zhong-ren, WU Wei-ning, CHEN Jia-hong, et al Study on Parallel Modes of Automatic Compensation Arc-suppression Device [J]. High Voltage Engineering, 2005, 31 (3): 41-43

收稿日期: 2005-02-25; 修回日期: 2005-07-18

作者简介:

陈忠仁 (1971 - ), 男, 工程师, 研究方向为配电网自动化技术; E-mail: chenchen0520@163.com

吴维宁 (1964 - ), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统监控技术和电磁兼容技术;

张勤 (1958 - ), 男, 高级工程师, 研究方向为高压测量和电力系统自动化。

### Study on tuning principle of multi-tap automatic compensation arc-suppression device

CHEN Zhong-ren<sup>1</sup>, WU Wei-ning<sup>2</sup>, ZHANG Qin<sup>2</sup>, CHEN Jia-hong<sup>2</sup>

(1. Zhongshan Polytechnic College, Zhongshan 528404, China;

2. Wuhan High Voltage Research Institute, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In view of some problems on forthcoming tuning method, such as low measurement accuracy and not being adaptive to parallel operation in ring distribution system, this paper proposes a new tuning method for multi-tap automatic compensation arc-suppression devices, using resonance method coupling curve-fitting. With the new method, high measurement accuracy is acquired and parallel operation of arc-suppression coils in ring distribution system is easy to implement. It needs no communication between each other. The experiment and operation results are satisfactory.

**Key words:** multi-tap; automatic compensation arc-suppression device; tuning principle

(上接第 48 页 continued from page 48)

### $H_2/H$ guaranteed cost control of excitation system

CAI Chao-hao

(Shenyang Institute of Engineering, Shenyang 110136, China)

**Abstract:** In the paper, the design of excitation controller for single-machine infinite-bus power system based on  $H_2/H$  guaranteed cost control theory and direct feedback linearization is presented. The robust control model with uncertain parameters is established. The  $H_2/H$  control rule is obtained by MATLAB/LMI toolbox. The analysis demonstrates the control method possesses good adaptability and robustness. It can improve the stability of the power system and satisfy the requirement of voltage regulation accuracy.

**Key words:** excitation controller;  $H_2/H$  guaranteed cost control; LMI approach