

分散励磁式船舶电力系统 鲁棒控制器研究

朱志宇, 陆 南

(江苏科技大学 电子信息学院, 江苏 镇江 212003)

摘要: 给出了分散励磁式船舶电力系统柴油机发电机组的数学模型, 明确了模型中各种干扰项的物理意义。将发电机组数学模型线性化后, 增广为广义受控系统, 应用 H_∞ 控制理论, 设计了发电机的分散励磁鲁棒控制器, 并应用线性矩阵不等式 (LMI) 方法, 将 H_∞ 控制器的设计转化为一个线性矩阵不等式约束和线性目标函数的凸优化问题, 对 H_∞ 控制器求解和优化。仿真结果表明, 当电力系统受到干扰后, H_∞ 鲁棒励磁控制器比传统的电力系统稳定 (PSS) 励磁控制器具有更强的抗干扰能力, 并使电力系统在较短时间内恢复稳定。

关键词: 柴油机发电机组; 分散励磁; 鲁棒; H_∞ 控制; 线性矩阵不等式

中图分类号: TM 761; TP 13 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2007)01-0057-04

0 引言

传统的船舶电力系统稳定 (PSS) 控制器采用固定参数, 当船舶电力系统的运行工况或电力系统的参数发生变化时, 它就难以适应这种变化和干扰, 甚至会失去其有效性。

由于鲁棒控制在处理不确定性问题方面具有其他控制方法所没有的优势, 因此在陆上电力系统的稳定控制研究中获得了广泛应用^[1-4], 但是在船舶电力系统稳定性分析中的应用还不多^[5]。其中一个有待解决的问题是: 在建立船舶电力系统的数学模型时, 如何考虑电力系统的不确定性。目前, 常用的不确定系统模型中的干扰项大多缺少明确的物理意义, 以此为根据设计出的鲁棒控制器, 效果并不十分理想。本文给出了分散励磁式船舶电力系统柴油机发电机组的数学模型, 明确了模型中各种干扰项的物理意义; 并尝试采用 H_∞ 控制理论设计了船舶电力系统的鲁棒控制器, 并应用线性矩阵不等式 (LMI) 方法^[6-9], 将 H_∞ 控制器的设计转化为一个线性矩阵不等式约束和线性目标函数的凸优化问题, 对 H_∞ 控制器进行了求解和优化, 通过仿真实验验证了本文提出的船舶励磁鲁棒控制器的抗干扰能力。

1 船舶电力系统的发电机模型

本文的研究对象是由 4 台柴油机发电机组组成的船舶电力系统, 4 台发电机型号完全相同, 因此它们的数学模型相同。这 4 台同步发电机组和电力系统的相互联系见图 1。

以同步旋转坐标为参考系, 发电机采用快速静止晶闸管励磁方式, 忽略原动机的动态过程, 以下是发电机的输出功率:

$$P_{ci} = \frac{E'_{qi} U_i}{X'_{di}} \times \sin(\delta_i - \alpha_i) \quad (1)$$

第 i 台发电机的数学模型可表示为

$$\begin{aligned} \dot{\delta}_i &= \omega_0 \omega_{ri} \\ \dot{\omega}_{ri} &= \frac{1}{2J_i} \left[P_{mi} - D_i \omega_{ri} - \frac{E'_{qi} U_i}{X'_{di}} \sin(\delta_i - \alpha_i) \right] \\ \dot{E}_{qi} &= -\frac{1}{\tau_{d0i}} \left[\frac{X_{di}}{X'_{di}} E'_{qi} + (X_{di} - X'_{di}) \times \right. \\ &\quad \left. \frac{U_i \cos(\delta_i - \alpha_i)}{X'_{di}} + E_{fdi0} + u_{fi} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

式中 δ_i 为转子运行角 (弧度); $\omega_{ri} = \omega_i - 1$ 为转子角速度相对于额定值偏差的标么值; P_{mi} 为柴油机输入机械功率的标么值; E'_{qi} 为同步机 q 轴暂态电势; u_{fi} 为励磁控制器的输出; E_{fdi0} 为励磁电压的稳态值; U_i 和 α_i 分别为机端电压的幅值和相角; D_i 、 τ_{d0i} 、 J_i 和 X'_{di} 分别为阻尼系数、励磁绕组暂态时间常数、发电机组转动惯量及暂态电抗。

柴油机模型的数学模型为标称对象数学模型, 即工作在平衡点附近的系统状态。设此时在平衡点附近出现扰动, 则线性化后的柴油机发电机组数学模型可以表示为

$$\dot{x} = Ax + Bu + Gw \quad (3)$$

式中 $x = [\Delta\delta_i, \Delta\omega_{ri}, \Delta E'_{qi}]^T$ 为状态变量; $u = \Delta u_{fi}$ 是

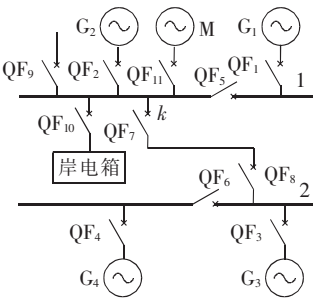


图 1 发电机组与电力系统其他部分的联系

Fig.1 Connections of generators with power system

控制量; $\mathbf{w} = [\Delta P_{mi}, \Delta U_i, \Delta \alpha_i]^T$ 是扰动向量; $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{G}$ 分别为常数矩阵。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 & 0 \\ -\frac{E'_{q10} U_{i0}}{2 J_i J'_{di}} a & -\frac{D_i}{2 J_i} & -\frac{U_{i0}}{2 J_i J'_{di}} b \\ -\frac{X_{di} - X'_{di}}{\tau'_{d0i} X'_{di}} U_{i0} b & 0 & -\frac{X_{di}}{\tau'_{d0i} X'_{di}} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{\tau_{d0i}} \end{bmatrix}^T$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{2 J_i} & -\frac{E'_{q10}}{2 J_i X'_{di}} b & \frac{E'_{q10} U_{i0}}{2 J_i X'_{di}} a \\ 0 & \frac{X_{di} - X'_{di}}{\tau'_{d0i} X'_{di}} a & \frac{X_{di} - X'_{di}}{\tau'_{d0i} X'_{di}} U_{i0} b \end{bmatrix}$$

$$a = \cos(\delta_{i0} - \alpha_{i0}), \quad b = \sin(\delta_{i0} - \alpha_{i0})$$

2 船舶电力系统的 H_∞ 反馈控制器设计

将上述一般受控系统式(3)增广为如图2所示的广义受控系统(图中 $P(s)$ 代表广义被控对象, $K(s)$ 则代表了反馈控制律)^[10-11], 以便应用鲁棒控制理论设计控制器, 则分散励磁式船舶电力系统的数学模型为

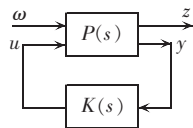


图2 标准 H_∞ 控制问题
Fig.2 Standard H_∞ control

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}_1 \mathbf{w} + \mathbf{B}_2 \mathbf{u} \\ \mathbf{z} &= \mathbf{C}_1 \mathbf{x} + \mathbf{D}_{11} \mathbf{w} + \mathbf{D}_{12} \mathbf{u} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{x} \end{aligned} \quad (5)$$

式中 $\mathbf{x} \in R^n$ 为状态向量; $\mathbf{u} \in R^m$ 为控制输入; $\mathbf{y} \in R^p$ 为测量输出; $\mathbf{z} \in R^r$ 为被调输出; $\mathbf{w} \in R^q$ 为外部扰动, 这里考虑的外部扰动是不确定的, 但具有有限能量, 即 $\mathbf{w} \in L_2$ 。

若式(5)满足: $(\mathbf{A}, \mathbf{B}_2)$ 可稳定, $(\mathbf{C}_1, \mathbf{A})$ 可检测; $\mathbf{D}_{11} = 0$; $\mathbf{D}_{12}^T [\mathbf{C}_1 \quad \mathbf{D}_{12}] = [0 \quad \mathbf{I}]$, 则可引入的状态反馈为

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

式中的 $\mathbf{K}$ 是反馈增益矩阵。此时, 式(5)可变为

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= (\mathbf{A} + \mathbf{B}_2 \mathbf{K})\mathbf{x} + \mathbf{B}_1 \mathbf{w} \\ \mathbf{z} &= (\mathbf{C} + \mathbf{D}\mathbf{K})\mathbf{x} = \mathbf{H}\mathbf{x} \end{aligned} \quad (7)$$

是渐近稳定的, 且闭环传递函数 $\mathbf{T}_{wz}(s)$ 满足

$$\|\mathbf{T}_{wz}(s)\|_\infty = \|\mathbf{H}[s\mathbf{I} - (\mathbf{A} + \mathbf{B}_2 \mathbf{K})]^{-1} \mathbf{B}_1\|_\infty < 1 \quad (8)$$

具有这样性质的控制律(6)称为系统(5)的一个状态反馈 H_∞ 控制律。

定理1 对系统(5), 存在一个状态反馈 H_∞ 控制器, 当且仅当存在一个对称正定矩阵 $\mathbf{X}$ 和矩阵 $\mathbf{W}$, 使得以下的矩阵不等式:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}_2 \mathbf{W} + (\mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}_2 \mathbf{W})^T & \mathbf{B}_1 & (\mathbf{C}_1 \mathbf{X} + \mathbf{D}_{12} \mathbf{W})^T \\ \mathbf{B}_1^T & -\mathbf{I} & \mathbf{D}_{11}^T \\ \mathbf{C}_1 \mathbf{X} + \mathbf{D}_{12} \mathbf{W} & \mathbf{D}_{11} & -\mathbf{I} \end{bmatrix} < 0 \quad (9)$$

成立。进而, 如果矩阵不等式(8)存在一个可行解 $\mathbf{X}^*$ 、 $\mathbf{W}^*$, 则 $\mathbf{u} = \mathbf{W}^*(\mathbf{X}^*)^{-1} \mathbf{x}$ 是系统(5)的一个状态反馈 H_∞

控制器。

对给定的标量 $\gamma > 0$, 为求系统的状态反馈 γ -次优 H_∞ 控制器, 考虑到

$$\|\mathbf{T}_{wz}(s)\|_\infty < \gamma \Leftrightarrow \|\gamma^{-1} \mathbf{T}_{wz}(s)\|_\infty < 1$$

故可以通过用 $\gamma^{-1} \mathbf{C}_1$ 和 $\gamma^{-1} \mathbf{D}_{11}$ 代替矩阵 $\mathbf{C}_1$ 、 $\mathbf{D}_{11}$ 和 $\mathbf{D}_{12}$, 对得到的新系统模型设计标准 H_∞ 控制器得到所求的状态反馈 γ -次优 H_∞ 控制器, 此时, 相应的矩阵不等式(9)为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}_2 \mathbf{W} + (\mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}_2 \mathbf{W})^T & \mathbf{B}_1 & \gamma^{-1} (\mathbf{C}_1 \mathbf{X} + \mathbf{D}_{12} \mathbf{W})^T \\ \mathbf{B}_1^T & -\mathbf{I} & \gamma^{-1} \mathbf{D}_{11}^T \\ \gamma^{-1} (\mathbf{C}_1 \mathbf{X} + \mathbf{D}_{12} \mathbf{W}) & \gamma^{-1} \mathbf{D}_{11} & -\mathbf{I} \end{bmatrix} < 0$$

在上式两边乘矩阵 $\text{diag}\{\mathbf{I}, \mathbf{I}, \gamma \mathbf{I}\}$, 可得与上式等价的矩阵不等式:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}_2 \mathbf{W} + (\mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}_2 \mathbf{W})^T & \mathbf{B}_1 & (\mathbf{C}_1 \mathbf{X} + \mathbf{D}_{12} \mathbf{W})^T \\ \mathbf{B}_1^T & -\mathbf{I} & \mathbf{D}_{11}^T \\ \mathbf{C}_1 \mathbf{X} + \mathbf{D}_{12} \mathbf{W} & \mathbf{D}_{11} & -\gamma^2 \mathbf{I} \end{bmatrix} < 0 \quad (10)$$

因此, 根据定理1, 通过求解以上的线性矩阵不等式可以得到系统式(5)的状态反馈 γ -次优 H_∞ 控制器。

进一步, 基于状态反馈 γ -次优 H_∞ 控制器的存在条件式(10), 建立和求解以下的优化问题:

$$\begin{aligned} \min \quad & \rho \\ \text{s.t.} \quad & \begin{bmatrix} \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}_2 \mathbf{W} + (\mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}_2 \mathbf{W})^T & \mathbf{B}_1 & (\mathbf{C}_1 \mathbf{X} + \mathbf{D}_{12} \mathbf{W})^T \\ \mathbf{B}_1^T & -\mathbf{I} & \mathbf{D}_{11}^T \\ \mathbf{C}_1 \mathbf{X} + \mathbf{D}_{12} \mathbf{W} & \mathbf{D}_{11} & -\rho \mathbf{I} \end{bmatrix} < 0 \quad (11) \\ & \mathbf{X} > 0 \end{aligned}$$

如果该优化问题有解, 则结合定理1, 利用该优化问题的最优解可以得到系统(5)的最优 H_∞ 控制器, 相应的最小扰动抑制度是 $\gamma = \sqrt{\rho}$, 为了尽可能减小扰动给系统带来的不利影响, γ 应该尽量选取较小的值。

问题(11)是一个具有线性矩阵不等式约束和线性目标函数的凸优化问题, 故可以应用 LMI 工具箱中的求解器 mincx 解该优化问题^[12]。

3 分散鲁棒励磁控制器设计

采用 H_∞ 控制理论设计多机船舶电力系统中的励磁控制器, 实现分散鲁棒励磁控制, 可以提高船舶电力系统的稳定性。

下面将以图1所示的4机电力系统为例(其中一台是备用发电机组), 说明船舶电力系统的分散励磁鲁棒控制器的设计方法。参照本文第2节介绍的建模方法, 可以得到图中每台发电机在当前运行状态和元件参数条件下的受扰励磁控制系统的方程:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_i \mathbf{x}_i + \mathbf{B}_i \mathbf{u}_i + \mathbf{G}_i \mathbf{w}_i \quad i=1, 2, 3, 4 \quad (12)$$

根据所期望的控制目标, 为每台发电机选取合理的输出向量 $\mathbf{z}$ 和增益 γ 。

根据上述的 H_∞ 控制理论, 针对各发电机受扰控制系统模型设计控制器, 应用线性矩阵不等式方法求解各发电机相应的反馈增益矩阵 $\mathbf{K}_i$, 从而得到反馈控制律 $\mathbf{u}_i = \mathbf{K}_i \mathbf{x}_i$ ($i=1, 2, 3, 4$)。

4 仿真

为了检验本文的控制方法对船舶电力系统稳定性和动态品质的改善作用,分别采用传统的发电机 PSS 励磁方法和基于 H_∞ 控制理论的励磁方法,进行实验仿真,并对仿真结果进行了比较。船舶电力系统如图 1 所示。首先,根据 PID 方式设计 3 个传统的配有 PSS 的励磁控制器,所选传统励磁控制器的具体实现方式如图 3 所示,其中 $K_A=200, \tau_R=0.01, \tau_A=1, \tau_B=10, K_{STAB}=20, \tau_w=10, \tau_1=0.05, \tau_2=0.05, U_{S,max}=0.2, U_{S,min}=-0.2, E_{fd,max}=7, E_{fd,min}=-6.4; U_S$ 为发电机端电压, E_{fd} 为励磁电压, U_{ref} 为给定电压, $\tau_R, \tau_A, \tau_B, \tau_w, \tau_1, \tau_2$ 为时间常数;各参数单位均为标么值。

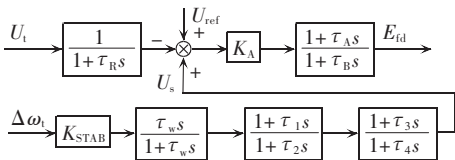


图 3 传统的 PSS 励磁控制器
Fig.3 Traditional PSS excitation controller

根据上述给出的方法,应用 Matlab Toolbox 中的 LMI 工具箱^[12],可求得该控制器的参数为 $\gamma=0.0105$ 以及状态反馈阵 K 。

为了检验鲁棒励磁控制与传统励磁控制在各种运行状况和各种扰动作用下对船舶电力系统稳定性和动态品质的改善作用,考虑下述扰动方案。

假设母线 1 到母线 2 之间的一条交流线路上的 k 点处(参见图 1)在 0.1 s 时发生三相对地短路, 0.08 s 后故障消失,线路恢复正常运行。

图 4~8 是在上述扰动方案作用下的部分仿真结果曲线,图中的曲线 1 表示传统 PSS 励磁的控制结果,曲线 2 表示 H_∞ 鲁棒励磁的控制结果;图 6 的曲线 8 在图 1 中未标出。

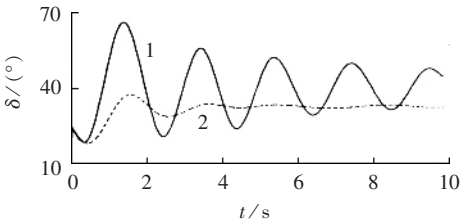


图 4 发电机 G_1 和 G_3 之间的转子相对角
Fig.4 Relative rotor angle between G_1 and G_3

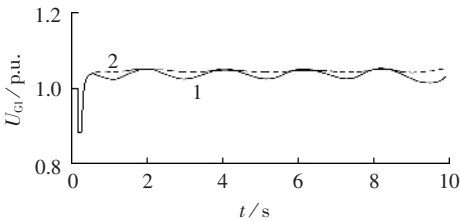


图 5 发电机 G_1 机端电压幅值
Fig.5 Terminal voltage magnitude of G_1

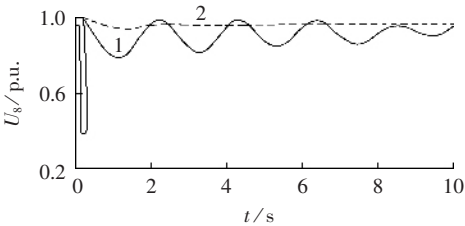


图 6 母线 8 处电压幅值
Fig.6 Voltage magnitude of bus 8

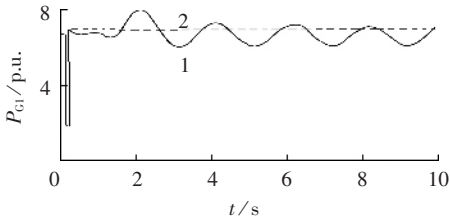


图 7 发电机 G_1 输出的有功功率
Fig.7 Active power output of G_1

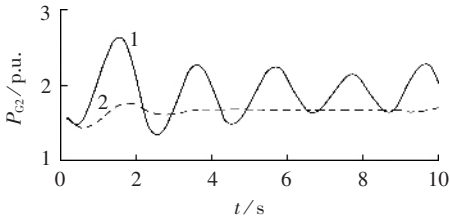


图 8 扰动方案 4 下区域 1 与区域 2 之间
交换的有功功率
Fig.8 Active power interchange between
area 1 and area 2 under scheme 4

图 4 表明, H_∞ 鲁棒励磁控制器能够抑制发电机 G_1 和 G_3 之间的转子相对摆动,而传统 PSS 励磁控制器对干扰的抑制效果不太理想;图 5 表明,在干扰作用下, H_∞ 鲁棒励磁控制器依然能够保证发电机端电压的稳定性;图 6 表明, H_∞ 鲁棒励磁控制器具有更强的维持母线电压的能力;图 7 表明,在 H_∞ 鲁棒励磁控制器控制下,发电机 G_1 输出的有功功率的波动也得到了更明显的抑制;从图 8 中的响应曲线可以很容易看出, H_∞ 鲁棒励磁控制器能够对区域间有功功率交换的振荡起到更明显的抑制作用。

总之,当电力系统受到干扰后, H_∞ 鲁棒励磁控制器比传统的 PSS 励磁控制器更能适应各种干扰的影响,并使电力系统在较短时间内恢复稳定。

5 结论

考虑到船舶电力系统的模型和干扰的不确定,本文给出了船舶电力系统柴油机发电机组的数学模型,明确了模型中各干扰项的物理意义,提出了一种能够有效抑制扰动影响的船舶分散励磁鲁棒控制器方案,针对各发电机受扰控制系统模型设计了 H_∞ 鲁棒励磁控制器,应用线性矩阵不等式方法求解了各发电机相应的反馈增益矩阵 K_i ,从而得到反馈控制律。仿真结果表明, H_∞ 分散励磁鲁棒控制器比传统的 PSS 励磁控制器更能适应电力系统的各种干扰,

并使电力系统在较短时间内恢复稳定,从而提高了船舶电力系统的稳定性。

参考文献:

- [1] 张秀华,张庆灵,谢彦红.一类鲁棒非线性励磁控制器设计的新方法[J].东北大学学报:自然科学版,2004,25(1):17-19.
ZHANG Xiu-hua,ZHANG Qing-ling,XIE Yan-hong. New approach to design nonlinear robust excitation controller [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2004, 25(1): 17-19.
- [2] 余涛,朱守真,沈善德,等.基于扩张状态观测器的电力系统非线性鲁棒协调控制[J].中国电机工程学报,2004,24(4):1-5.
YU Tao,ZHU Shou-zhen,SHEN Shan-de,et al. Extended state observer based nonlinear robust coordinated control of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 1-5.
- [3] 严姝,孙元章,黎雄,等.多机电力系统分散鲁棒励磁控制器的研究[J].电力系统自动化,2000,24(22):21-27.
YAN Shu,SUN Yuan-zhang,LI Xiong,et al. Decentralized robust excitation controller of multi-generator system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(22): 21-27.
- [4] 蔡超豪.非线性 H_∞ 励磁控制器的设计[J].电网技术,2003,27(3):50-52.
CAI Chao-hao. Design of nonlinear H_∞ excitation controller [J]. Power System Technology, 2003, 27(3): 50-52.
- [5] 张冰,刘维亭,王德明.舰船电力系统鲁棒励磁控制器设计与仿真研究[J].船舶工程,2005,24(3):70-73.
ZHANG Bing,LIU Wei-ting,WANG De-ming. Design and simulation of robust excitation controller of electrical power system of warship [J]. Ship Engineering, 2005, 24(3): 70-73.
- [6] 何联,王广雄,于达仁,等.基于LMI的鲁棒 H_∞ 估计器[J].电机与控制学报,2002,6(2):132-134.
HE Lian,WANG Guang-xiong,YU Da-ren,et al. LMI-based robust H_∞ estimator [J]. Electrical Machines and Control, 2002, 6(2): 132-134.
- [7] 胡中骥,施颂椒,翁正新.一类多不确定系统鲁棒 H_∞ 控制器的

LMI 设计方法[J].自动化学报,2002,28(2):192-200.

HU Zhong-ji,SHI Song-jiao,WENG Zheng-xin. LMI approach to robust H_∞ controller design for a class of systems with multi-uncertainties [J]. ACTA Automatic Sinica, 2002, 28(2): 192-200.

- [8] 王广雄,王新生,何联. H_∞ 控制器的LMI算法分析[J].电机与控制学报,2002,6(1):46-49.

WANG Guang-xiong,WANG Xin-sheng,HE Lian. On algorithms of LMI-based H_∞ controller [J]. Electrical Machines and Control, 2002, 6(1): 46-49.

- [9] 富饶,黄琳.基于LMI的 μ 方法及其在电力系统中的应用[J].中国电机工程学报,2002,22(10):7-11.

FU Rao,HUANG Lin. Optimized LMI algorithm for μ analysis and synthesis with application in power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(10): 7-11.

- [10] 薛定宇.反馈控制系统设计与分析——Matlab语言应用[M].北京:清华大学出版社,2000.

- [11] 张敏,罗安,王华昕,等.基于线性化的发电机励磁鲁棒控制器[J].电工技术学报,2002,17(2):84-88.

ZHANG Min,LUO An,WANG Hua-xin,et al. A robust controller for excitation of generator based on linearization [J]. Trans of China Electrotechnical Society, 2002, 17(2): 84-88.

- [12] 张敏,罗安.一类非线性系统鲁棒控制及应用[J].中南大学学报:自然科学版,2003,34(2):188-192.

ZHANG Min,LUO An. Robust controller of the excitation for generator [J]. J CENT SOUTH UNIV TECHNOL, 2003, 34(2): 188-192.

(责任编辑:柏英武)

作者简介:

朱志宇(1971-),男,江苏扬州人,副教授,博士,主要研究方向为舰船电力系统智能控制(E-mail: zzydzz@163.com/zzydzz@yahoo.com.cn);

陆南(1971-),女,江苏无锡人,讲师,硕士,主要研究方向为舰船电力系统、鲁棒控制。

Robust controller of decentralized excitation for ship generator

ZHU Zhi-yu, LU Nan

(School of Electronics and Information, East China Shipbuilding

Institute, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: The mathematic model of decentralized excitation for diesel generator group of the ship power system is deduced, with the physical meanings of all interferences defined. After the mathematic model is linearized and extended into a generalized controllable system, H_∞ control theory is used to design the decentralized excitation robust controller for generators. The LMI (Linear Matrix Inequality) method is then used to solve and optimize the controller by transforming the control rule into a convex optimization problem with linear matrix inequality constraints and linear objective function. Simulations show that, the H_∞ robust excitation controller has better anti-interference ability than traditional power system stability controllers, which makes the power system stable in a shorter time.

This project is supported by the Chinese Defence Advance Research Program of Science and Technology, China (01J25.6.10).

Key words: diesel generator group; decentralized excitation; robust; H_∞ control; linear matrix inequality