

计及螺旋桨负载的船舶电力系统协调控制设计

张利军, 孟 杰, 兰 海

(哈尔滨工程大学 自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 推进负载对船舶电网的暂态稳定性影响是船电系统的主要特征之一. 本文基于非线性鲁棒 L_2 干扰抑制控制方法, 研究了具有螺旋桨负载的船舶电力系统中的励磁与调速的协调控制问题, 在充分分析了柴油发电机组的非线性数学模型及其螺旋桨负载的相互耦合的非线性动态结构特性的基础上, 提出backstepping控制技术与 L_2 干扰抑制相结合的综合协调控制策略来设计控制器. 该控制器在保证系统稳定的条件下, 有效地抑制干扰对发电机系统电压和频率的影响. 仿真表明, 在给系统突加螺旋桨负载的情况下, 该控制器能有效地抑制负载对系统性能的影响, 验证了控制器的有效性.

关键词: 船舶电站; 鲁棒控制; L_2 干扰抑制; backstepping

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Coordinate control design for system of marine diesel engine generator with propeller loads

ZHANG Li-jun, MENG Jie, LAN Hai

(Automation College, Harbin Engineering University, Harbin Heilongjiang 150001)

Abstract: One of the main characteristics is the effect of propellers on transient stability of ship power systems. Based on L_2 disturbance attenuation control method, this paper investigates the coordinate control design for the excitation and speed regulator of ship power systems with propeller loads. Considering nonlinearities and coupling interactions between propeller loads and the marine diesel engine generator, we propose an integrated control scheme combining backstepping technique with L_2 disturbance attenuation method. The controller not only stabilizes the system but also attenuates the disturbance influences on the voltage and frequency of the generator. Simulation shows excellent suppression of the effect on the transient performances of the generators when a load is abruptly applied to the propeller.

Key words: ship power station; robust control; L_2 disturbance attenuation control; backstepping

1 引言(Introduction)

随着船舶电力推进方式的兴起, 研究螺旋桨负载对电网电压与频率的稳定性影响问题受到业界的广泛关注. 船舶电站一般以柴油机作为原动机拖动同步发电机组成柴油发电机组, 其中柴油机与调速器构成的调速系统决定了同步发电机的交流频率, 同步发电机的励磁系统决定了系统的输出电压, 故同步发电机的励磁控制^[1~3]与原动机的转速控制^[3,4]决定了电网的稳定性. 现有的船舶电力系统控制大多仅考虑其中一种方法, 且无论是调速还是调压的控制策略大多利用传统的线性系统的基本方法, 如PID调节方法; 或者系统的线性化技术, 如线性系统的 H_∞ 控制方法等^[3,5]. 然而, 柴油发电机组励磁调压与调速是一对耦合的非线性变量, 其综合控制可以作为改善电力系统暂态稳定性的有效措施. 特别地, 船舶电力系统是一个复杂的非线性系统, 推

进负载与发电机形成强非线性、强耦合的动态特征, 螺旋桨负载的启动对柴油发电机组系统产生明显的非线性参数摄动, 引起系统模型的不确定性, 利用线性控制策略很难达到满意的控制效果. 因此研究船舶电力系统控制问题时应考虑存在模型不确定性的情况下非线性控制问题.

陆上电力系统的非线性控制问题研究已经取得了很大进展, 一些先进的非线性控制设计方法, 如非线性自适应控制、backstepping控制技术得以深入探讨, 系统的非线性影响通过非线性控制器设计得以补偿, 从而使得所设计的控制器具有良好的抗干扰能力^[6,7]. 船舶电力系统的非线性控制问题研究进展缓慢, 研究成果甚少. 其主要原因是与陆上电力系统相比, 船舶负载电压不能看作是无穷大系统母线的恒定电压, 大容量负载对系统的稳定性影响很大, 这就要求所设计的控制器比陆上电力系统具有更强的

鲁棒性和响应速度,从而使得船舶电力系统稳定性问题研究更具有挑战性。

本文利用非线性 L_2 鲁棒控制设计方法,探讨了推进负载对系统电压和频率的影响,以及系统抗外部干扰的能力。首先根据船舶柴油发电机组和推进负载的数学模型的结构特性,深入分析了发电机转子轴、原动机和负载扰动引起的不确定性,及其它们相互耦合影响的非线性关系;然后在此基础上,利用backstepping控制技术的强鲁棒性及其构造Lyapunov函数的能力,结合 L_2 干扰抑制特性,给出基于backstepping的鲁棒 L_2 控制设计方法,该方法能有效地补偿非线性负载对系统动态品质的影响。为了克服系统多输入相互耦合的这一难点,本文基于非线性控制系统的几何设计思想,采取了先分开设计后综合设计的策略,即首先通过引入系统的虚拟输出,把系统分为一个零动态子系统和相对阶为1的

子系统,并分别设计控制器使得每一个子系统稳定,这里采用backstepping方法设计调速器,达到功角与转速的稳定;再通过励磁控制使得系统输出电压稳定;然后通过构造综合Lyapunov函数方法,最终给出鲁棒性更强的调压和调速综合协调控制器。为了验证控制器的抗干扰能力,本文给出了启动螺旋桨负载的系统动态仿真分析,仿真结果表明该控制器能够有效地抑制系统的未知扰动,提高系统的暂态稳定性。

2 船舶电站柴油机系统模型(Model of ship diesel engine power system)

这部分主要分析船舶电站系统的非线性模型结构特性,首先给出发电机^[3]和推进负载系统^[8]的非线性模型,然后进一步分析带有负载和干扰以及发电机系统的动态耦合关系。船舶柴油机系统的系统结构框图如图1所示。

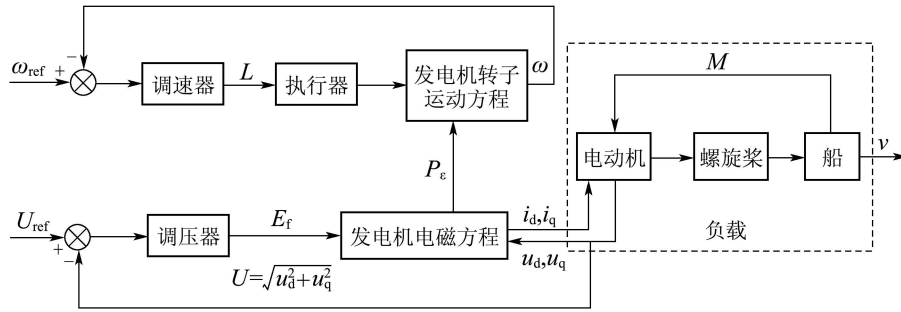


图1 柴油机发电机组控制系统原理图

Fig. 1 Principle diagram of diesel-generator set control system

2.1 同步发电机数学模型(Mathematical model of synchronous generator)

船舶电站柴油机组非线性数学模型^[3]如下:

$$\begin{cases} \dot{\delta} = (\omega - 1)\omega_s, \\ \dot{\omega} = \frac{T_b}{T_a}\omega + \frac{1}{T_a}c_1 + \frac{c_2}{T_a}L - \frac{1}{T_a}\frac{E'_q U}{X'_d} \sin \delta - \\ \frac{1}{T_a}\frac{U^2}{2}\frac{X'_d - X'_q}{X'_d X'_q} \sin(2\delta), \\ \dot{L} = -\frac{L}{T_1} + \frac{K_1}{T_1}u_1, \\ \dot{E}'_q = \frac{1}{T_{d0}}E_{fd} - \frac{1}{T_{d0}}E'_q - \frac{X_d - X'_d}{T_{d0}}I_d. \end{cases} \quad (1)$$

其中: δ 为发电机功率角; ω 同步角速度; E'_q 为 q 轴暂态电势; E_{fd} 为励磁绕组电压; L 执行器输出轴位移; T_1 执行器的时间常数; K_1 是控制增益; X'_d 是发电机的 d 轴定子绕组暂态感抗; X'_q 发电机的 q 轴定子感抗; u_1 为柴油机油门的开度; T_{d0} 发电机励磁绕组的时间常数; U 为发电机组的端电压,它满

足 $U = \sqrt{U_d^2 + U_q^2}$, 这里

$$\begin{cases} U_d = -RI_d + X_d I_q, \\ U_q = -RI_q - X'_d I_d + E'_q. \end{cases} \quad (2)$$

其中: U_d 和 U_q 为定子绕组端电压的 d 轴和 q 轴分量; I_d, I_q 为相应的电流分量; R 为定子绕组电阻; X_d 是发电机的 d 轴定子感抗。系统(1)中的其他系数分别为

$$\begin{aligned} T_a &= \frac{J\omega_{g0}^2}{S_B}, \quad T_b = \frac{60m_1\omega_{g0}^2 - 2\pi Kp\omega_{g0}^2}{2\pi S_B}, \\ \omega_{g0} &= \frac{100\pi}{p}, \quad c_1 = \frac{d_1\omega_{g0}}{S_B}, \quad c_2 = \frac{a\omega_{g0}}{S_B}, \\ d_1 &= b_1 - aL_0, \quad a = \frac{M_1^e}{L_e}. \end{aligned}$$

这里: J 为机组轴系转动惯量; p 为发电机的极对数; ω_{g0} 柴油机轴角速度; K 为与发电机阻尼绕组成正比的阻尼系数; m_1, b_1 是线性常数; S_B 柴油发电机组的额定视在功率; M_1^e 为柴油机的额定扭矩; L_e 为执行器输出轴的额定行程。

2.2 电力推进负载模型(Model of electric propeller's load)

舰船电力推进系统是船舶电力系统重要的大容量负载, 它主要由推进电机和螺旋桨两部分组成, 这里分别给出它们的数学模型.

1) 异步电动机数学模型.

本文讨论的推进电机是异步电动机, 其数学模型如下:

$$\begin{cases} \dot{i} = AI + BU_m, \\ \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{H_0} [x_{ad}(i_{rd}i_{sq} - i_{rq}i_{sd}) - M_C]. \end{cases} \quad (3)$$

其中: $I = [i_{sd} \ i_{sq} \ i_{rd} \ i_{rq}]^T$, 它表示转子与定子的 d 轴和 q 轴电流; ω_m 表示异步电动机转子角速度; M_C 是异步电动机轴上的机械阻力矩; H_0 机械时间常数; x_s 和 x_r 代表定子侧与转子侧电抗; r_s 和 r_r 代表定子与转子的电阻; x_{ad} 是定子、转子互感. 系统(3)中矩阵 $A = A_1A_2$, 其中:

$$A_1 = \begin{bmatrix} x_s & 0 & x_{ad} & 0 \\ 0 & x_s & 0 & x_{ad} \\ x_{ad} & 0 & x_r & 0 \\ 0 & x_{ad} & 0 & x_r \end{bmatrix}^{-1},$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} r_s & x_s\omega_k & 0 & M_1 \\ -x_s\omega_k & r_s & -M_1 & 0 \\ 0 & x_{ad}\omega_k & r_r & M_2 \\ -x_{ad}\omega_k & 0 & -M_2 & r_r \end{bmatrix}^T,$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} x_s & 0 & x_{ad} & 0 \\ 0 & x_s & 0 & x_{ad} \\ x_{ad} & 0 & x_r & 0 \\ 0 & x_{ad} & 0 & x_r \end{bmatrix}, \quad U_m = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

矩阵 A_2 中: $M_1 = (\omega_k - \omega_m)x_{ad}$, $M_2 = (\omega_k - \omega_m) \cdot x_r$, ω_k 为等效同步电机的转子角速度.

2) 螺旋桨数学模型.

船舶和螺旋桨的运动方程为^[8]:

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = \frac{P - R}{m + \lambda}, \\ P = K'_P(1 - t_p)\rho D^2[(1 - \mu)^2v^2 + D^2n^2], \\ R = \frac{1}{2}\rho\Omega\zeta v|v|. \end{cases} \quad (4)$$

这里: $n \neq 0$ 为螺旋桨转速; $v \neq 0$ 为船速; P 为螺旋桨产生的有效推力; m 为船的运动质量; λ 为船舶在前向速度方向上的运动附加质量; t_p 为推力减额系数; ρ 为海水密度; ζ 船总阻力系数; D 为螺旋桨直径; μ 为伴流系数; Ω 为船表面的湿面积; K'_P 推力系数.

根据船舶运动方程理论可得螺旋桨转矩方程:

$$J' = \frac{(1 - \mu)v}{\sqrt{(1 - \mu)^2v^2 + D^2n^2}}. \quad (5)$$

螺旋桨的进速比为

$$M = K'_M\rho D^3[(1 - \mu)^2v^2 + D^2n^2]. \quad (6)$$

这里: $n \neq 0$ 或 $v \neq 0$, K'_M 为扭矩系数. 由船舶运动实验建模知 K'_P , K'_M 都是进速比 J' 的函数^[9]. 由式(4)~(6)得知, 船舶运动方程是关于船速 v 和螺旋桨转速 n 的一个强非线性动态系统.

系统(1)~(6)共同组成了船舶电力系统的复合动态数学模型, 从它们的状态变量的依赖关系可以看出, 不仅柴油发电机组是一个功角 δ 和角速度 ω 的非线性动态系统, 而且异步推进电机与螺旋桨也构成一个复杂的非线性动态系统, 这样, 整个船舶电力系统就成为一个具有强非线性、强耦合的复杂动态系统. 从系统(1)~(6)容易看出负载对发电机的端电压和转速的影响关系: 当起动推进负载时, 船浆模型做为异步电动机的拖动负载产生的负载转矩将改变异步电动机的电流, 电流改变导致发电机的输出电压发生变化, 最终使得发电机的输出功率发生变化, 破坏原有的功率平衡, 引起发电机转速变化. 系统(1)~(6)的逻辑关系如图2所示. 该图能够清晰地表述动态负载对系统稳定性的影响.

2.3 非线性鲁棒数学模型(Robust nonlinear mathematical model)

对于系统(1), 在其工作点 $(\delta_0, \omega_0, L_0, E'_{q0})$ 做坐标变换如下:

$$\begin{cases} x_1 = \delta - \delta_0, \\ x_2 = \omega - \omega_0, \\ x_3 = L - L_0, \\ x_4 = E'_q - E'_{q0}. \end{cases} \quad (7)$$

令 $\omega_0 = 1$, $u_2 = E_{fd}$ 且转子轴以及原动机的扰动量为 $\varepsilon_1, \varepsilon_3$ 和 ε_2 , 则在坐标变换(7)下, 带有扰动量的系统(1)的鲁棒模型为:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \omega_s x_2, \\ \dot{x}_2 &= \frac{T_b}{T_a}(x_2 + \omega_0) + \frac{c_2}{T_a}(x_3 + L_0) - \frac{1}{T_a} \frac{(x_4 + E'_{q0})}{X'_d} U \sin(x_1 + \delta_0) + \frac{1}{T_a} c_1 - \frac{1}{T_a} \frac{U^2}{2} \frac{X'_d - X_q}{X'_d X_q} \sin(2x_1 + 2\delta_0) + \varepsilon_1, \\ \dot{x}_3 &= -\frac{x_3 + L_0}{T_1} + \frac{K_1}{T_1} u_1 + \varepsilon_2, \end{aligned}$$

输出函数, 构造一个零动态子系统, 然后再对双输入系统进行分步设计, 并用L₂干扰抑制法分别设计控制器.

首先选取虚拟输出函数 $y = x_4$, 计算系统输入-输出(u_2, y)的相对阶为1, 令 $y = 0$ 得到系统的零动态子系统如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \omega_s x_2, \\ \dot{x}_2 = \frac{T_b}{T_a}(x_2 + \omega_0) + \frac{c_2}{T_a}(x_3 + L_0) - \frac{1}{T_a} \frac{E'_{q0}}{X'_d} U \sin(x_1 + \delta_0) + \frac{1}{T_a} c_1 - \frac{1}{T_a} \frac{U^2}{2} \frac{X'_d - X_q}{X'_d X_q} \sin(2x_1 + 2\delta_0) + \varepsilon_1, \\ \dot{x}_3 = -\frac{x_3 + L_0}{T_1} + \frac{K_1}{T_1} u_1 + \varepsilon_2. \end{cases} \quad (12)$$

注意到系统(12)是一个含有控制输入 u_1 的零动态系统, 笔者先设计控制器 u_1 使得系统(12)内部稳定, 然后再设计励磁控制器 u_2 , 最终使系统(8)满足耗散不等式(11).

根据L₂鲁棒控制设计思想, 首先令系统的评价函数为

$$z = (q_1 x_2 \quad q_2 x_4). \quad (13)$$

这里 q_1, q_2 是权重因子, 用于调节输出响应.

下面笔者研究不考虑励磁控制的情况下带有输出(13)的系统(12)的调速控制器设计. 存储函数 $V_1(x)$ 将通过backstepping方法逐步构造获得, 再结合不等式(10)设计出调速控制器.

下面给出backstepping设计步骤:

1) 令 $x_1 = e_1$, 取虚拟控制 $x_2^* = -ce_1$, 并令 $V_1 = \frac{\sigma_1}{2} e_1^2, e_2 = x_2 - x_2^*$, 则

$$\dot{V}_1 = \sigma_1 e_1 \dot{e}_1 = \sigma_1 \omega_s e_1 (e_2 - ce_1).$$

2) 令 $V_2 = V_1 + \frac{1}{2} \sigma_2 e_2^2, z_1 = q_1 x_2$, 则

$$\begin{aligned} H_1 = \dot{V}_2 + \frac{1}{2} z_1^2 - \frac{\gamma^2}{2} \varepsilon_1^2 = & -(\sigma_1 \omega_s c - \frac{1}{2} q_1^2 c^2) e_1^2 - (\frac{\gamma}{2} \varepsilon_1 - \frac{\sigma_2}{\gamma} e_2)^2 - \\ & \frac{\gamma^2}{4} \varepsilon_1^2 + \sigma_2 e_2 [\frac{T_b}{T_a}(x_2 + \omega_0) + \frac{1}{T_a} c_1 - \\ & \frac{1}{T_a} \frac{E'_{q0}}{X'_d} U \sin(x_1 + \delta_0) + \frac{c_2}{T_a}(x_3 + L_0) - \\ & \frac{1}{T_a} \frac{U^2}{2} \frac{X'_d - X_q}{X'_d X_q} \sin(2x_1 + 2\delta_0) + c \omega_s x_2 + \\ & \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \omega_s e_1 - \frac{q_1^2}{\sigma_2} ce_1 + \frac{q_1^2}{2\sigma_2} e_2 + \frac{\sigma_2}{\gamma^2} e_2]. \end{aligned} \quad (14)$$

式中令 $a = \sigma_1 \omega_s c - \frac{1}{2} q_1^2 c^2 > 0$, 取

$$\begin{aligned} m &= -cT_b + \frac{\sigma_1}{\sigma_2} T_a \omega_s - c^2 \omega_s T_a - \frac{T_a q_1^2}{\sigma_2} c, \\ n &= \frac{\sigma_2}{\gamma^2} T_a + \frac{T_a q_1^2}{2\sigma_2} + cT_a \omega_s + T_b + T_a, \end{aligned}$$

可得 x_3 虚拟控制

$$\begin{aligned} x_3^* &= -\frac{1}{c_2} [m e_1 + n e_2 - \frac{E'_{q0}}{X'_d} U \sin(e_1 + \delta_0) + c_1 + \\ & T_b \omega_0 - \frac{U^2}{2} \frac{x'_d - x_q}{x'_d x_q} \sin(2e_1 + 2\delta_0)] - L_0. \end{aligned} \quad (15)$$

3) 令 $e_3 = x_3 - x_3^*$, 则

$$\begin{aligned} H_1 = -a e_1^2 - (\frac{\gamma}{2} \varepsilon_1 - \frac{\sigma_2}{\gamma} e_2)^2 - \frac{\gamma^2}{4} \varepsilon_1^2 - \\ \sigma_2 e_2^2 + \frac{\sigma_2 c_2}{T_a} e_2 e_3. \end{aligned}$$

再令 $V_3 = V_2 + \frac{1}{2} \sigma_3 e_3^2, \omega_1 = (\varepsilon_1 \quad \varepsilon_2)^T$, 则

$$\begin{aligned} H_2 = \dot{V}_3 + \frac{1}{2} \|z_1\|^2 - \frac{\gamma^2}{2} \|\omega_1\|^2 = & -a e_1^2 - (\frac{\gamma}{2} \varepsilon_1 - \frac{\sigma_2}{\gamma} e_2)^2 - \frac{\gamma^2}{4} \varepsilon_2^2 - \sigma_2 e_2^2 - \\ & (\frac{\gamma}{2} \varepsilon_1 - \frac{n}{c_2 \gamma} \sigma_3 e_3)^2 - (\frac{\gamma}{2} \varepsilon_2 - \frac{\sigma_3}{\gamma} e_3)^2 + \\ & \sigma_3 e_3 \{ -\frac{x_3 + L_0}{T_1} + \frac{n}{c_2} [\frac{1}{T_a} c_1 + \frac{T_b}{T_a} x_2 - \\ & \frac{1}{T_a} \frac{E'_{q0}}{X'_d} U \sin(x_1 + \delta_0) + \frac{c_2}{T_a}(x_3 + L_0) + \\ & \frac{T_b}{T_a} \omega_0 - \frac{1}{T_a} \frac{U^2}{2} \frac{X'_d - X_q}{X'_d X_q} \sin(2x_1 + 2\delta_0)] + \\ & \frac{K_1}{T_1} u_1 + \frac{\omega_s}{c_2} [-\frac{E'_{q0}}{X'_d} U \cos(e_1 + \delta_0) + (m + nc) - \\ & \frac{X'_d - X_q}{X'_d X_q} U^2 \cos(2x_1 + 2\delta_0)] (e_2 - ce_1) + \\ & \frac{c_2 \sigma_2}{T_a \sigma_3} e_2 + \frac{\sigma_3}{\gamma^2} e_3 + \frac{\sigma_3}{c_2^2 \gamma^2} n^2 e_3 \}. \end{aligned} \quad (16)$$

设计控制器

$$\begin{aligned} u_1 = \frac{e_3 + x_3^* + L_0}{K_1} - \frac{T_1}{K_1} e_3 - \frac{T_1 n}{c_2 K_1} [\frac{1}{T_a} c_1 + \\ \frac{T_b}{T_a}(e_2 - ce_1 + \omega_0) + \frac{c_2}{T_a}(e_3 + x_3^* + L_0) - \\ \frac{1}{T_a} \frac{E'_{q0}}{X'_d} U \sin(e_1 + \delta_0) - \\ \frac{1}{T_a} \frac{U^2}{2} \frac{X'_d - X_q}{X'_d X_q} \sin(2e_1 + 2\delta_0)] - \\ \frac{\omega_s T_1}{c_2 K_1} [(m + nc) - \frac{E'_{q0}}{X'_d} U \cos(e_1 + \delta_0) - \end{aligned}$$

$$\frac{X'_d - X_q}{X'_d X_q} U^2 \cos(2e_1 + 2\delta_0)](e_2 - ce_1) - \frac{c_2 \sigma_2 T_1}{T_a \sigma_3 K_1} e_2 - \frac{\sigma_3 T_1}{\gamma^2 K_1} e_3 - \frac{\sigma_3 T_1}{c_2^2 \gamma^2 K_1} n^2 e_3, \quad (17)$$

那么

$$H_2 = -ae_1^2 - \left(\frac{\gamma}{2}\varepsilon_1 - \frac{\sigma_2}{\gamma}e_2\right)^2 - \frac{\gamma^2}{4}\varepsilon_2^2 - \sigma_2 e_2^2 - \left(\frac{\gamma}{2}\varepsilon_1 - \frac{n}{c_2 \gamma}\sigma_3 e_3\right)^2 - \left(\frac{\gamma}{2}\varepsilon_2 - \frac{\sigma_3}{\gamma}e_3\right)^2 - \sigma_3 e_3^2 \leq 0. \quad (18)$$

根据上述计算过程, 存储函数

$$V_3(x) = \frac{\sigma_1}{2}e_1^2 + \frac{1}{2}\sigma_2 e_2^2 + \frac{1}{2}\sigma_3 e_3^2. \quad (19)$$

这样, 在没有干扰项 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 的情况下, 控制(17)使得当 $t \rightarrow \infty$ 时 $e_1 \rightarrow 0, e_2 \rightarrow 0, e_3 \rightarrow 0$. 由backstepping方法的计算过程获得下列坐标变换:

$$e_1 = x_1, e_2 = x_2 + ce_1, e_3 = x_3 - x_3^*. \quad (20)$$

这里 x_3^* 已经在backstepping方法计算过程中给出. 把式(20)代入式(17), 那么调速控制器变为

$$u_1 = \frac{x_3 + L_0}{K_1} - \frac{T_1 n}{c_2 K_1} \left[\frac{1}{T_a} c_1 + \frac{T_b}{T_a} (x_2 + \omega_0) + \frac{c_2}{T_a} (x_3 + L_0) - \frac{1}{T_a} \frac{E'_{q0}}{X'_d} U \sin(x_1 + \delta_0) - \frac{1}{T_a} \frac{U^2}{2} \frac{X'_d - X_q}{X'_d X_q} \sin(2x_1 + 2\delta_0) \right] - \frac{\omega_s T_1}{c_2 K_1} \left[-\frac{E'_{q0}}{X'_d} U \cos(x_1 + \delta_0) + m + nc - \frac{X'_d - X_q}{X'_d X_q} U^2 \cos(2x_1 + 2\delta_0) \right] x_2 - \frac{T_1}{K_1} (x_3 - x_3^*) - \frac{c_2 \sigma_2 T_1}{T_a \sigma_3 K_1} (x_2 + cx_1) - \frac{\sigma_3 T_1}{\gamma^2 K_1} (x_3 - x_3^*) - \frac{\sigma_3 T_1}{c_2^2 \gamma^2 K_1} n^2 (x_3 - x_3^*). \quad (21)$$

由此可得到在不考虑励磁控制的情况下, 可使系统(8)的前三阶子系统稳定. 下面笔者来设计励磁控制器. 选取整个系统的Lyapunov函数 $V = V_3 + \frac{1}{2}\sigma_4 y^2$, 设计整个系统的耗散不等式, 取 $\omega = (\varepsilon_1 \ \varepsilon_2 \ \varepsilon_3)^T$, 则

$$H = \dot{V} + \frac{1}{2}\|z\|^2 - \frac{1}{2}\gamma^2 \|\omega\|^2 = -ae_1^2 - \left(\frac{\gamma}{2}\varepsilon_1 - \frac{\sigma_2}{\gamma}e_2\right)^2 - \frac{\gamma^2}{4}\varepsilon_2^2 - \sigma_2 e_2^2 - \left(\frac{\gamma}{2}\varepsilon_3 - \frac{\sigma_4}{\gamma}x_4\right)^2 - \left(\frac{\gamma}{2}\varepsilon_1 - \frac{n}{c_2 \gamma}\sigma_3 e_3\right)^2 - \sigma_3 e_3^2 - \frac{\gamma^2}{4}\varepsilon_3^2 - \left(\frac{\gamma}{2}\varepsilon_2 - \frac{\sigma_3}{\gamma}e_3\right)^2 +$$

$$\sigma_4 x_4 \left[\frac{1}{T_{d0}} u_2 - \frac{1}{T_{d0}} (x_4 + E'_{q0}) - \frac{X_d - X'_d}{T_{d0}} I_d + \frac{\sigma_4 x_4}{\gamma^2} + \frac{1}{2} \frac{q_2^2}{\sigma_4} x_4 \right]. \quad (22)$$

为使系统(8)满足式(11), 即

$$H = -\alpha e_1^2 - \left(\frac{\gamma}{2}\varepsilon_1 - \frac{\sigma_2}{\gamma}e_2\right)^2 - \left(\frac{\gamma}{2}\varepsilon_2 - \frac{\sigma_3}{\gamma}e_3\right)^2 - \left(\frac{\gamma}{2}\varepsilon_1 - \frac{n}{c_2 \gamma}\sigma_3 e_3\right)^2 - \left(\frac{\gamma}{2}\varepsilon_3 - \frac{\sigma_4}{\gamma}x_4\right)^2 - \frac{\gamma^2}{4}\varepsilon_2^2 - \sigma_2 e_2^2 - \sigma_3 e_3^2 - \sigma_4 x_4^2 - \frac{\gamma^2}{4}\varepsilon_3^2 \leq 0. \quad (23)$$

从中可得励磁控制律

$$u_2 = (1 - T_{d0})x_4 + E'_{q0} + (X_d - X'_d)I_d - T_{d0} \frac{\sigma_4 x_4}{\gamma^2} - \frac{1}{2} \frac{T_{d0} q_2^2}{\sigma_4} x_4. \quad (24)$$

这样通过零动态子系统的backstepping设计和励磁控制的设计, 可以使得全系统(8)满足耗散不等式, 从而使得系统在工作点稳定并且能有效抑制干扰.

4 仿真分析(Simulation analysis)

为验证控制器(21)(24)在外部负荷扰动下的调节能力, 在稳定运行5s后, 突然启动推进电机动态负载进行系统仿真. 系统的相关参数见表1和表2.

表1 发电机参数

Table 1 Generator parameters

J	S_B	a	ω_{g0}	m_1	K
71.822	1560	-1245	50π	-2.050	5.54
T_a	T_b	c_1	c_2	X'_d	X_d
1.136	-0.4917	1.5146	-0.2154	0.213	2.053
X_q	T_1	R	T_{d0}	K_1	d_1
1.003	0.05	0.011	2.2	0.2	15042

表2 负载与仿真参数

Table 2 Load and simulation parameters

x_s	x_r	x_{ad}	r_s	r_r	H_0
2.03	2.017	1.925	0.0267	0.0214	150
γ	ε_1	ε_2	q_1	q_2	
0.3	1.4	2.2	0.2	0.8	

发电机在突然启动螺旋桨负载情况下的动态响应曲线如图3~5, 曲线中包括功角、角速度, 机端电压状态曲线. 这里螺旋桨负载仿真时作了一些简化处理, 转矩方程采用的是简化处理方程 $M = Kn^2$. 从图3可以看出, 在启动螺旋桨负载时, 机端电压有明显的变化, 但仅用调速控制器

并不能有效地改善发电机机端电压的动态品质。图4、图5是调速/调压综合协调控制作用下的系统的动态响应曲线。仿真结果表明主发电机在启动螺旋桨负载时, 所设计的控制器可以使系统的功角、频率及电压恢复到稳定值。特别是, 通过与未加励磁控制的对比发现, 相比于调速控制手段, 协调控制即能保证系统频率稳定也能保证系统电压稳定, 这说明该协调控制器在保证系统的鲁棒性的同时具有较强的动态稳定性。

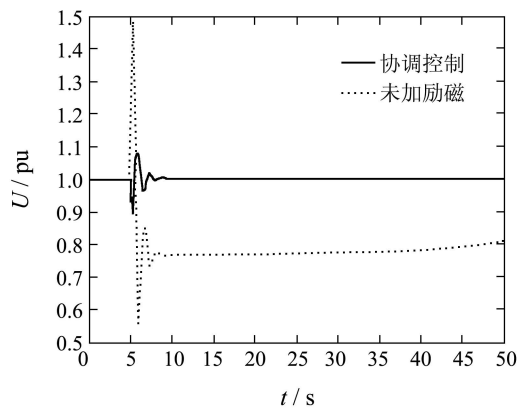


图3 系统机端电压动态响应

Fig. 3 The response of generator terminal voltage

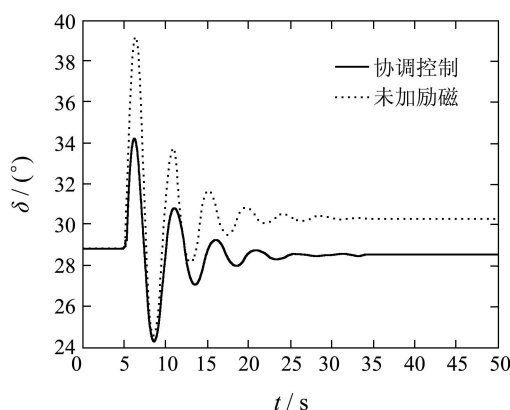


图4 发电机功角响应曲线

Fig. 4 The responses of the generator angle

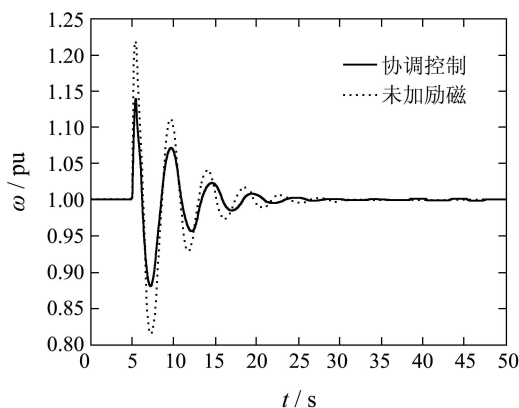


图5 发电机角速度曲线

Fig. 5 The responses of the generator angular velocity

5 结论(Conclusion)

针对船舶电力系统负荷对系统稳定运行有较大影响的特点, 提出一种能有效抑制系统外部干扰的鲁棒控制器设计方法。由于该方法的设计过程没有涉及到任何近似线性化处理, 充分利用了系统的非线性特性, 故该控制策略无论从控制精度上, 还是鲁棒性能上都有很好的控制效果。仿真结果也表明, 该控制器能有效抑制干扰对系统的影响, 保证了船舶电力系统的频率稳定性, 提高了船舶电力系统的暂态品质。

参考文献(References):

- [1] 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 Yuanzhang. *Nonlinear Control of Power Systems*[M]. Beijing: Science Press, 1993.)
- [2] 沈智鹏, 郭晨, 孙才勤. 混合智能控制在船舶电站励磁控制中的应用[J]. 中国航海, 2003, 54(1): 62 - 66. (SHEN Zhipeng, GUO Chen, SUN Caiqing. The application of hybrid intelligent technology in ship power station excitation control[J]. *Navigation of China*, 2003, 54(1): 62 - 66.)
- [3] 黄曼磊, 李殿璞. 船舶电站柴油发电机组 H_∞ 综合控制器的研究[J]. 中国造船, 2004, 45(1): 45 - 54. (HUANG Manlei, LI Dianpu. Research on H_∞ synthetic controller for diesel - generator set of ship power station[J]. *Shipbuilding of China*, 2004, 45(1): 45 - 54.)
- [4] 施振华. 船舶柴油发电机转速神经网络容错控制[J]. 船电技术, 2009, 29(6): 41 - 45. (SHI Zhenhua. Rotation fault tolerant control of ship's diesel engine generator based on artificial neural network[J]. *Marine Electric and Electronic Technology*, 2009, 29(6): 41 - 45.)
- [5] 黄曼磊, 宋克明, 魏志达. 柴油发电机组非线性 H_2/H_∞ 调速器的研究[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(8): 873 - 878. (HUANG Manlei, SONG Keming, WEI Zhida. Nonlinear H_2/H_∞ speed regulator for a diesel-generator set[J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(8): 873 - 878.)
- [6] LIU Y H, CHEN T J, WANG Y Z, et al. Energy-based L_2 disturbance attenuation excitation control of differential algebraic power systems[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 2008, 55(10): 1081 - 1085.
- [7] SHEN T L, MEI S W, LU Q. Adaptive nonlinear excitation control with L_2 disturbance attenuation for power systems[J]. *Automatica*, 2003, 39(1): 81 - 89.
- [8] 李殿璞. 船舶运动与建模[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 326 - 374. (LI Dianpu. *Ship Motion and Modeling*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 326 - 374.)
- [9] 霍峰, 姜新建. 舰船推进电机及螺旋桨负载模拟系统研究[J]. 舰船科学技术, 2007, 29(4): 118 - 122. (HUO Feng, JIANG Xinjian. Study on simulated system of boat's propulsion motor and screw propeller's load[J]. *Ship Science and Technology*, 2007, 29(4): 118 - 122.)

作者简介:

张利军 (1973—), 男, 教授, 博士生导师, 从事非线性控制的研究, E-mail: zhanglj@hrbeu.edu.cn;

孟杰 (1981—), 女, 博士研究生, 船舶电力系统非线性控制, E-mail: mengjieaaaa@163.com;

兰海 (1975—), 男, 副教授, 电力系统控制, E-mail: lanhai@hrbeu.edu.cn.