

基于Hamilton函数方法的船舶发电机组综合协调控制

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, 船舶电力系统的稳定性研究也因此比陆上电力系统更具有挑战性. 本文基于Hamilton能量理论控制方法, 研究了具有螺旋桨推进负载的船舶电力系统的励磁与调速的综合协调控制问题. 在充分分析了柴油发电机组及其螺旋桨负载的非线性耦合模型的结构基础上, 通过构造Hamilton能量函数, 给出保持系统稳定的综合协调控制律. 特别地, 不同于已有的结果, 该控制律清晰地给出了螺旋桨转速对控制器性能影响的函数关系. 仿真表明, 在分别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, 验证了控制器的鲁棒性.

关键词: 船舶电站; Hamilton能量理论; 励磁控制; 螺旋桨推进负载

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Integrated coordination control of marine generators based on Hamilton function approach

ZHANG Li-jun, MENG Jie, LAN Hai

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

Abstract: The propeller load is a crucial factor affecting the transient stability of the marine power system. This makes the stability study of marine power system more challenging than that of the land power systems. Based on Hamilton control theory of energy, an integrated coordination control of generator excitation and speed regulation is investigated for the marine power systems with propeller loads. After analyzing the nonlinear coupling between the marine diesel generator and the propeller load, we develop the stabilizing integrated control law by constructing the Hamilton energy function. Being different from other existing control laws, this one explicitly provides the functional relation between the propeller revolution and control performances. Simulation results show the effective suppression of the impact from the propeller load to the system performance.

Key words: ship generator; Hamilton energy theory; excitation control; speed-adjusting control propeller loads

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, 其中柴油机及其调速器构成的调速系统用于调节同步发电机的交流频率, 同步发电机的励磁系统用于调节系统的输出电压, 这种同步发电机的励磁控制系统^[1,2]与原动机的转速控制系统^[3~7]的有机结合是调节电网稳定性的主要策略, 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. 然而, 现有的船舶电力系统控制策略大多仅考虑其中的一种方法, 而忽略了发电机组励磁调压与原动机调速的双重控制功能, 这一方面是因为控制性能要求不高, 另一方面是因为励磁调压与原动机调速是一对耦合的非线性变量, 控制

难度增大. 现有的船舶电力系统调速或调压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, 如线性系统的控制方法等^[2~5], 而且所设计的控制器并未能真正体现螺旋桨负载对系统稳定性的影响.

事实上, 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扰动, 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该考虑存在模型不确定性情况下非线性的控制问题. 然而, 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

收稿日期: 2010-09-02; 收修改稿日期: 2010-12-04.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61174047); 教育部博士点基金资助项目(20102304110003); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(HEUCFT1005); 中央高校基本科研业务费自由探索计划资助项目(HEUCF110438).

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具有一定的挑战性.

Hamilton能量函数方法从能量存储、消耗和转换的观点看待系统, 通过能量重构或结构重组来设计控制器, 所设计的控制器能充分利用系统的模型特点, 且结构简单易于实现, 近年来在陆上电力系统中得到成功应用^[6~10].

本文基于Hamilton能量函数控制设计思想, 研究了保证系统稳定运行的协调控制器设计方法. 首先深入地分析了船舶柴油发电机组及其推进负载的数学模型的结构特征, 探究了它们相互耦合影响的非线性关系; 然后在此基础上, 利用Hamilton能量系统

理论, 结合系统的模型特征给出了动态系统非线性稳定控制器的设计方法, 该方法能有效地补偿非线性负载对系统动态品质的影响. 为了给出螺旋桨负载对控制性能影响的显式解, 利用backstepping控制设计技术, 给出了包含螺旋桨转速的控制律. 论文以启动螺旋桨负载的动态变化曲线为外部扰动进行仿真分析, 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, 首先给出发电机和推进负载系统的非线性模型^[5], 然后进一步分析负载与发电机系统的动态耦合关系. 船舶柴油机系统的系统结构如图1所示.

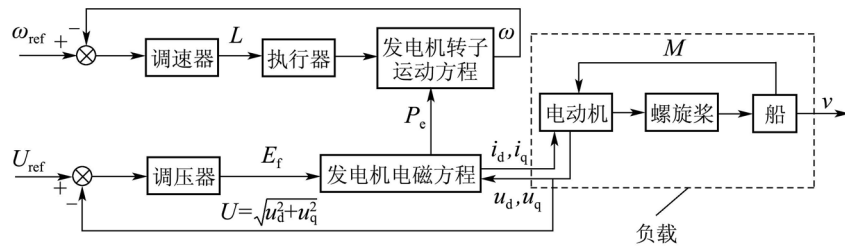


图1 柴油机发电机组控制系统原理图

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^[5]如下:

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

其中: δ 为发电机功率角; ω 为同步角速度; E'_q 为 q 轴暂态电势; E_{fd} 为励磁绕组电压; L 是执行器输出轴位移; T_1 是执行器的时间常数; 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 是发电机的 q 轴定子感抗; u_1 为柴油机油门的开度; T_{d0} 为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 $U = \sqrt{U_d^2 + U_q^2}$, 其中

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

这里: 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

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

这里 J 为机组轴系转动惯量; p 为发电机的极对数; ω_{g0} 是柴油机轴角速度; 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 是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 , L_0 分别为执行器输出轴的额定和空载行程.

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

船舶电力推进系统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.

2.2.1 永磁同步电动机数学模型(Model of permanent magnet synchronous motors)

本文讨论的推进电机是永磁同步电动机, 其数

学模型^[11]如下:

$$\begin{cases} \dot{\omega}_r = \frac{3n_p\phi}{2J}i_q - \frac{B}{J}\omega_r - \frac{M}{J}, \\ \dot{i}_q = -\frac{R_s}{L_m}i_q - n_p\omega_r i_d - \frac{n_p\phi}{L_m}\omega_r + \frac{1}{L_m}u_q, \\ \dot{i}_d = -\frac{R_s}{L_m}i_d + n_p\omega_r i_q + \frac{1}{L_m}u_d, \end{cases} \quad (3)$$

其中: ω_r 是转子角速度; n_p 是极对数; ϕ 是永久磁铁产生的磁通; J 是转子惯量; B 是阻尼系统; M 是负载转矩; R_s 是定子电阻; L_m 是励磁电感(d 轴与 q 轴相同); i_d, i_q 和 u_d, u_q 分别是定子电流矢量和定子电压矢量的 d 轴与 q 轴分量。

2.2.2 螺旋桨数学模型(Model of propeller load)

船舶和螺旋桨的运动方程为^[12]

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

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 为船总阻力系数; D 为螺旋桨直径; μ 为伴流系数; Ω 为船表面的湿面积; K'_p 为推力系数。

根据船舶运动方程理论可得, 螺旋桨转矩方程

为

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

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: 当启动推进负载时, 船桨模型做为永磁同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)的逻辑关系图如图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。

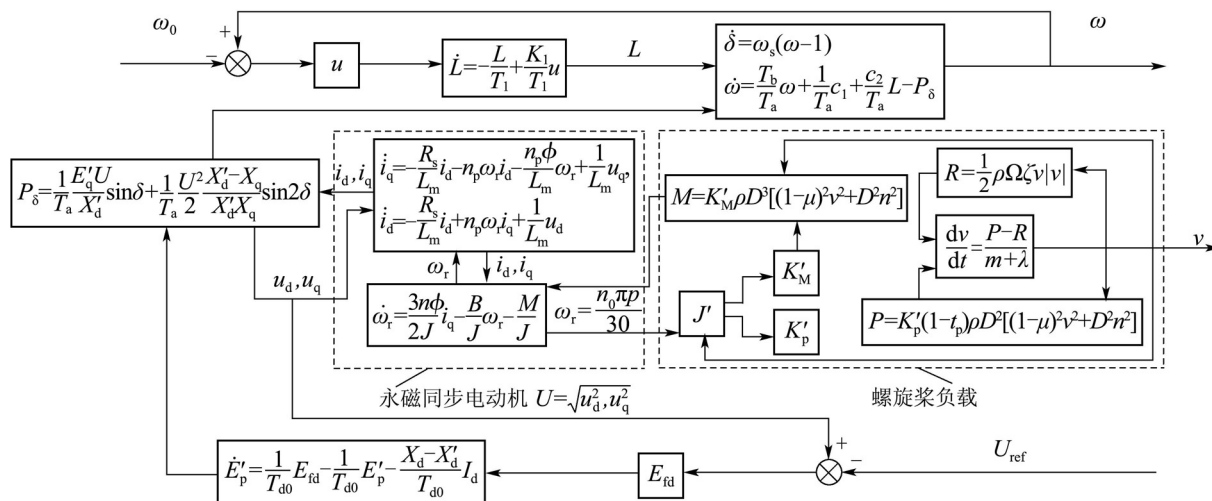


图 2 带有螺旋桨负荷的柴油发电机组系统结构框图

Fig. 2 Structure diagram of marine diesel engine generator with propeller loads

2.3 柴油机组非线性数学模型(Nonlinear mathematical model of diesel engine power system)

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 $\omega_0 = 1, u_2 = E_{fd}$, 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, 系统(1)变为

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \omega_s x_2, \\ \dot{x}_2 &= \frac{T_b}{T_a}(x_2 + \omega_0) + \frac{c_2}{T_a}(x_3 + L_0) + \\ &\frac{1}{T_a}c_1 - \frac{1}{T_a} \frac{(x_4 + E'_{q0})}{X'_d} U \sin(x_1 + \delta_0) - \end{aligned} \quad (8a)$$

$$\frac{1}{T_a} \frac{U^2}{2} \frac{X'_d - X_q}{X'_d X_q} \sin(2x_1 + 2\delta_0), \quad (8b)$$

$$\dot{x}_3 = -\frac{x_3 + L_0}{T_1} + \frac{K_1}{T_1} u_1, \quad (8c)$$

$$\dot{x}_4 = \frac{1}{T_{d0}} u_2 + \frac{1}{T_{d0}} \frac{X_d - X'_d}{X'_d} U \times \cos(x_1 + \delta_0) - \frac{1}{T_{d0}} (x_4 + E'_{q0}). \quad (8d)$$

显然, 系统(8)是四阶双输入的非线性数学模型. 基于此模型, 控制目标是: 通过设计控制输入信号 u_1 和 u_2 来控制柴油机的执行器输出轴位移 x_3 和 q 轴暂态电动势 x_4 , 使得发电机的功角、转速和电压达到理想的工作点 $\omega_0, \delta_0, E'_{q0}$. 这里采Hamilton能量系统理论的综合控制设计策略进行研究.

3 基于Hamilton能量函数方法的协调控制设计(Coordination control based on Hamilton function)

3.1 Hamilton系统理论简述^[6](Brief description of methods of Hamilton system)

对于仿射非线性系统

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t)) + G(x(t))u(t), \\ y(t) = h(x(t)), \end{cases} \quad (9)$$

式中: $x \in \mathbb{R}^n$ 表示状态变量, u 表示控制输入信号, y 表示系统的输出信号. $f(x), G(x)$ 和 $h(x)$ 均为适当维数的函数向量或函数矩阵.

定义 1 对于仿射非线性动态系统(9), 若存在下有界函数 $H(x)$, 使其表示为

$$\dot{x} = M\nabla H + G(x(t))u(t) \quad (10)$$

的形式, 其中 ∇H 为函数 $H(x)$ 的梯度, 则称非线性动态系统(10)为广义受控Hamilton系统, 函数 $H(x)$ 为该系统的一个Hamilton能量函数.

引理 1 对于广义受控Hamilton系统(10), 如果可以将其表示为

$$\begin{cases} \dot{x} = (J - R)\nabla H + G(x(t))u, \\ y = G^T(x(t))\nabla H, \end{cases} \quad (11)$$

这里 J 与 R 分别为反对称矩阵与半正定矩阵, 并且系统(11)是零状态可检测的, 则存在控制律

$$u = -KG^T\nabla H, \quad (12)$$

式中 K 为正定矩阵, 使得非线性动态系统(11)在平衡点处渐近稳定.

根据引理1, 应用Hamilton能量函数方法设计非线性稳定控制器, 首先要将系统表示为广义Hamilton能量系统(11)的形式, 然后验证零状态可

检测条件, 再应用式(12)设计系统控制器.

3.2 励磁与调速综合协调控制设计(Coordinated control design based on excitation and speed regulation)

下面针对系统(8), 按照上面提到的设计思路, 将系统表示成Hamilton系统形式, 并给出励磁与调速协调的稳定控制策略.

构造系统的能量函数

$$H = \frac{1}{2} T_a \omega_s x_2^2 + \frac{1}{2(X_d - X'_d)} [(x_4 + E'_{q0}) - \frac{X_d - X'_d}{X'_d} U \cos(x_1 + \delta_0)]^2 + \frac{1}{2} (x_3 + L_0)^2 + \frac{X'_d - X_q}{4X'_d X_q} U^2 (1 - \cos(2x_1 + 2\delta_0)) + \frac{X_d - X'_d}{2(X'_d)^2} U^2 (1 - \cos^2(x_1 + \delta_0)) + (T_b \omega_0 + c_1)(\pi - \delta). \quad (13)$$

可将原系统动态模型表示为广义受控Hamilton系统的形式

$$\dot{x} = M_1 \nabla H + G_1 u, \quad x \in \mathbb{R}^4, \quad u \in \mathbb{R}^2, \quad (14)$$

这里:

$$M_1 = \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{T_a} & 0 & 0 \\ -\frac{1}{T_a} & T_a^2 \omega_s & \frac{c_2}{T_a} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{X_d - X'_d}{T_{d0}} \end{pmatrix},$$

$$\nabla H = \begin{pmatrix} (T_b \omega_0 + c_1) + \mathcal{X} \\ T_a \omega_s x_2 \\ x_3 + L_0 \\ \frac{x_4 + E'_{q0}}{X_d - X'_d} - \frac{U}{X'_d} \cos(x_1 + \delta_0) \end{pmatrix},$$

$$G_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{K_1}{T_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_{d0}} \end{pmatrix},$$

其中: $\mathcal{X} = \frac{x_4 + E'_{q0}}{X'_d} U \sin(x_1 + \delta_0) + \frac{X_d - X'_d}{2X'_d X_q} \times U^2 \sin(2x_1 + 2\delta_0)$.

从矩阵的结构容易看出, 它不符合式(11)的形式, 为此, 首先设计一个预反馈如下:

$$u_1 = -\frac{c_2}{T_a} x_2 + v_1, \quad (15)$$

这里 v_1 是一个新的参考输入, 则系统(14)变为式(11)的形式:

$$\dot{x} = (J_1 - R_1)\nabla H + G_1\tilde{u}, \quad \tilde{u} = [v_1 \ u_2]^T, \quad (16)$$

这里:

$$J_1 = \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{T_a} & 0 & 0 \\ -\frac{1}{T_a} & 0 & \frac{c_2}{T_a} & 0 \\ 0 & -\frac{c_2}{T_a} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$R_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{T_b}{T_a^2\omega_s} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{X_d - X'_d}{T_{d0}} \end{pmatrix}.$$

这里由于 $T_b < 0$, 所以 R_1 是半正定矩阵, 又根据式(11)知, 系统(16)的输出方程为

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{K_1}{T_1}(x_3 + L_0) \\ \frac{1}{T_{d0}}(\frac{x_4 + E'_{q0}}{X_d - X'_d} + \frac{U}{X'_d} \cos(x_1 + \delta_0)) \end{pmatrix}.$$

结合预反馈控制项(15), 由式(12)可得协调控制律:

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{c_2}{T_a}x_2 \\ 0 \end{pmatrix} + (-K \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}). \quad (17)$$

设正定矩阵 $K = \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix}$, 这里 k_1, k_2 可以根据需要进行设计.

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{c_2}{T_a}x_2 - k_1\frac{K_1}{T_1}(x_3 + L_0) \\ -\frac{k_2}{T_{d0}}[\frac{x_4 + E'_{q0}}{X_d - X'_d} + \frac{U}{X'_d} \cos(x_1 + \delta_0)] \end{pmatrix}. \quad (18)$$

将式(18)(15)代入系统(8)得到

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \omega_s x_2, \\ \dot{x}_2 &= \frac{T_b}{T_a}(x_2 + \omega_0) + \frac{c_2}{T_a}(x_3 + L_0) + \frac{1}{T_a}c_1 - \\ &\quad \frac{1}{T_a} \frac{(x_4 + E'_{q0})}{X'_d} U \sin(x_1 + \delta_0) - \\ &\quad \frac{1}{T_a} \frac{U^2}{2} \frac{X'_d - X_q}{X'_d X_q} \sin(2x_1 + 2\delta_0), \\ \dot{x}_3 &= \frac{K_1}{T_1} \left\{ -\frac{c_2}{T_a}x_2 - k_1\frac{K_1}{T_1}(x_3 + L_0) \right\} - \\ &\quad \frac{x_3 + L_0}{T_1}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_4 &= \frac{1}{T_{d0}} \left\{ -\frac{k_2}{T_{d0}} \left[\frac{x_4 + E'_{q0}}{X_d - X'_d} + \frac{U}{X'_d} \cos(x_1 + \delta_0) \right] \right\} - \frac{1}{T_{d0}}(x_4 + E'_{q0}) + \\ &\quad \frac{1}{T_{d0}} \frac{X_d - X'_d}{X'_d} U \cos(x_1 + \delta_0). \end{aligned} \quad (19)$$

进一步可写为

$$\dot{x} = (J_1 - R_1)\nabla H - G_1 K G_1^T \nabla H, \quad (20)$$

则由引理1得系统(20)渐近稳定. 为了提高系统的暂态性能, 这里取

$$k_2 = T_{d0}(X_d - X'_d), \quad (21)$$

则系统(19)的第4个方程为

$$\dot{x}_4 = -\frac{2}{T_{d0}}(x_4 + E'_{q0}).$$

它是一个线性形式. 根据上面的设计策略, 给出下面的定理.

定理 1 对于非线性系统(8), 采用控制律(18)和(21), 可使闭环系统在平衡点渐近稳定.

证 在控制律(18)和(21)的作用下, 重记闭环反馈系统(16)为

$$\dot{x} = (J_1 - R_1 - G_1 K G_1^T)\nabla H,$$

其中 J_1, R_1 同上. 令

$$H_1(x) = H(x) - H(x_e) > 0,$$

其中 $H(x_e) = 0$, 则

$$\begin{aligned} \dot{H}_1(x) &= \dot{H}(x) = (\nabla^T H)\dot{x} = \\ &= (\nabla^T H)(-R)(\nabla H) + \\ &= (G^T \nabla H)^T (-K)(G^T \nabla H). \end{aligned}$$

由于 K 为正定矩阵, R 为半正定矩阵, 知 $\dot{H}(x) \leq 0$, 故 $\dot{H}(x)$ 是闭环系统的一个Lyapunov函数.

由 $\dot{H}(x) = 0$ 易推得 $y = 0, u = 0$, 又由系统(8)得系统收敛于最大的不变子集

$$\begin{aligned} \{x \in \mathbb{R}^4 : & -(T_b\omega_0 + c_1) + \\ & \frac{x_4 + E'_{q0}}{X'_d} U \sin(x_1 + \delta_0) + \\ & \frac{X_d - X'_d}{2X'_d X_q} U^2 \sin(2x_1 + 2\delta_0) = 0, \\ & x_2 = 0, \ x_3 = -L_0, \\ & \frac{x_4 + E'_{q0}}{X_d - X'_d} - \frac{U}{X'_d} \cos(x_1 + \delta_0) = 0\}. \end{aligned}$$

易知, 该平衡点正是系统(16)的平衡点, 所以式(16)满足零状态可检测条件, 故受控非线性系统(8)在式(18)的控制下可以收敛到平衡点.

4 推进负载对机端电压的影响分析(Effect of propeller load to the terminal voltage)

注意到控制器(18)中含有机端电压变量 U , 它受螺旋桨负载的影响. 下面分析带有螺旋桨负载的永磁同步发电机系统对机端电压的影响. 针对系统(3), 以机端电压分量 u_d, u_q 为控制输入, 以螺旋桨转速为输出给出螺旋桨转速对机端电压的量化分析. 从而最终完成由发电机到负载的综合控制器(18).

这里对螺旋桨进行简化, 只考虑满载船舶在静水中无外力约束时的船舶自由航行特性, 这时, 进速比为常值、阻转矩系数也为常值. 此时螺旋桨转矩方程(5)简化为^[13]

$$M = Kn^2. \quad (22)$$

现在, 若设螺旋桨转速为 n_0 , 则永磁同步机转子角速度为 $\omega_{m0} = \frac{n_0 \pi p}{30}$. 下面应用backstepping方法设计永磁同步电机控制器. 因为式(3)不是递推标准形式, 所以选取变量 $y = i_d - i_d^*$, 这里 i_d^* 为参考输入值, 若令 $y = 0$, 则系统(3)的零动态二阶模型为

$$\begin{cases} \dot{\omega}_r = a_m i_q - b_m \omega_r - c_m, \\ \dot{i}_q = -d_m i_q - n_p \omega_r i_d^* - e_m \omega_r + f_m u_q, \end{cases} \quad (23)$$

其中:

$$a_m = \frac{3n_p \phi}{2J}, \quad b_m = \frac{B}{J}, \quad c_m = \frac{M}{J}, \\ d_m = \frac{R_s}{L_m}, \quad e_m = \frac{n_p \phi}{L_m}, \quad f_m = \frac{1}{L_m}.$$

对于系统(23)取 $\hat{\omega}_r = \omega_r - \omega_{m0}$, 并引入虚拟控制变量 $\alpha = -k_\alpha \hat{\omega}_r + \frac{1}{a_m}(b_m \omega_{m0} + c_m)$, 构造坐标变换

$$\begin{cases} e_1 = \hat{\omega}_r, \\ e_2 = i_q - \alpha. \end{cases} \quad (24)$$

新系统为

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = a_m i_q - b_m(e_1 + \omega_{m0}) - c_m, \\ \dot{e}_2 = -d_m i_q - n_p(e_1 + \omega_{m0})i_d^* - \\ e_m(e_1 + \omega_{m0}) + f_m u_q + \\ k_\alpha [a_m i_q - b_m(e_1 + \omega_{m0}) - c_m]. \end{cases} \quad (25)$$

设Lyapunov函数

$$V_1 = \frac{1}{2} \sigma_1 e_1^2, \quad V_2 = V_1 + \frac{1}{2} \sigma_2 e_2^2,$$

求得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= -(a_m \sigma_1 k_\alpha + \sigma_1 b_m) e_1^2 + a_m \sigma_1 e_1 e_2, \\ \dot{V}_2 &= -(a_m \sigma_1 k_\alpha + \sigma_1 b_m) e_1^2 + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\sigma_2 e_2 [-n_p(e_1 + \omega_{m0})i_d^* - d_m i_q + \\ &k_\alpha (a_m i_q - b_m(e_1 + \omega_{m0}) - c_m) - \\ &e_m(e_1 + \omega_{m0}) + f_m u_q + \frac{\sigma_1 a_m}{\sigma_2} e_1]. \end{aligned}$$

取控制器

$$\begin{aligned} u_q &= L_m n_p (e_1 + \omega_{m0}) i_d^* + d_m L_m i_q - L_m e_2 - \\ &k_\alpha L_m (a_m i_q - b_m(e_1 + \omega_{m0}) - c_m) + \\ &L_m e_m (e_1 + \omega_{m0}) - \frac{a_m \sigma_1 L_m}{\sigma_2} e_1, \end{aligned} \quad (26)$$

此时

$$\dot{V}_2 = -(a_m \sigma_1 k_\alpha + \sigma_1 b_m) e_1^2 - \sigma_2 e_2^2 < 0.$$

另取Lyapunov函数 $V_3 = V_2 + \frac{1}{2} \sigma_3 y^2$, 则

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 &= -(a_m \sigma_1 k_\alpha + \sigma_1 b_m) e_1^2 - \sigma_2 e_2^2 + \\ &\sigma_3 y [-d_m i_d + n_p(e_1 + \omega_{m0})i_q + f_m u_d]. \end{aligned}$$

取

$$\begin{aligned} u_d &= R_s i_d - L_m n_p (e_1 + \omega_{m0}) i_q - \\ &L_m (i_d - i_d^*), \end{aligned} \quad (27)$$

则 V_3 的导数为

$$\dot{V}_3 = -(a_m \sigma_1 k_\alpha + \sigma_1 b_m) e_1^2 - \sigma_2 e_2^2 - \sigma_3 y^2 < 0.$$

这时推进系统(3)渐进稳定. 把满足式(26)(27)的 u_q, u_d 代入控制器(18), 就获得含有螺旋桨推进负载的船舶电站柴油机综合协调控制器. 注意到, 从控制器(18)的结构中可以看到, 调速和调压控制律明显受到螺旋桨转速的影响.

5 仿真分析(Simulation analysis)

为验证控制器(18)在外部负荷扰动下的调节能力, 在发电机稳定运行5s后, 分两种情况进行系统仿真. 假设1: 永磁同步电机转速从100 rad/s上升到200 rad/s; 假设2: 永磁同步电机转速从200 rad/s下降到100 rad/s. 系统的相关参数见表1和表2.

表1 发电机参数

Table 1 Generator parameters

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 负载参数

Table 2 Load parameters

n_p	ϕ /Wb	B /(N·ms·rad ⁻¹)	J /(N·ms ²)	R_s /Ω	L_0 /mH
2	0.341	0.0058	0.00132	1.47	5.33

发电机在机械功率扰动情况下的动态响应曲线如图3~8所示.

图4和图5是发电机在假设1情况下的动态仿真曲线.

图6和图7是发电机在假设2条件下的动态仿真曲线, 曲线中包括功角、角速度状态曲线.

图8是系统的机端电压动态曲线.

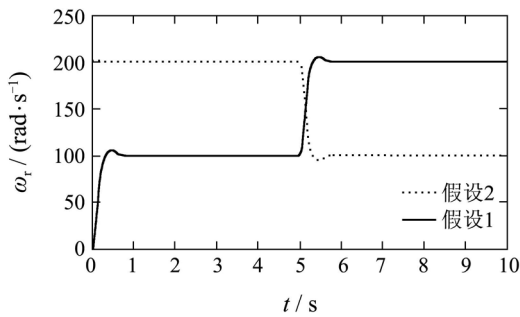


图 3 同步电机的角速度

Fig. 3 The responses of the angular speed of permanent magent synchronous motor

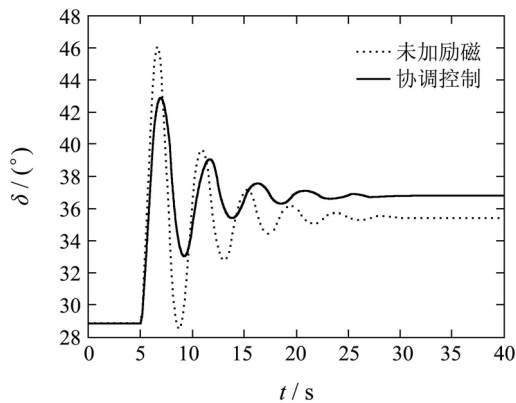


图 4 发电机功角响应曲线

Fig. 4 The responses of the generator power angle

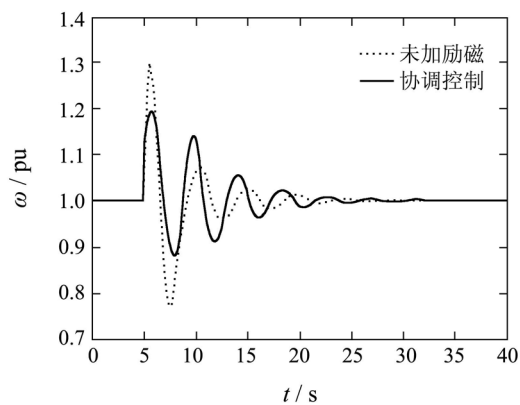


图 5 发电机角速度曲线

Fig. 5 The responses of the generator angular speed

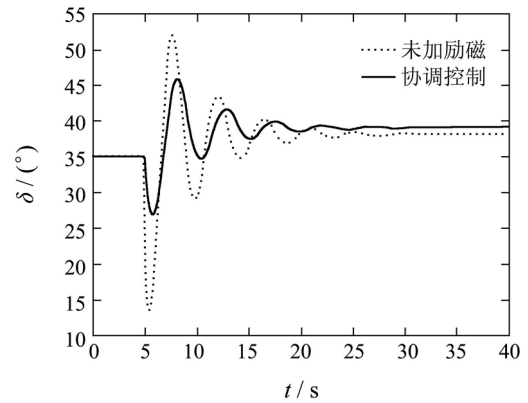


图 6 发电机功角响应曲线

Fig. 6 The responses of the generator power angle

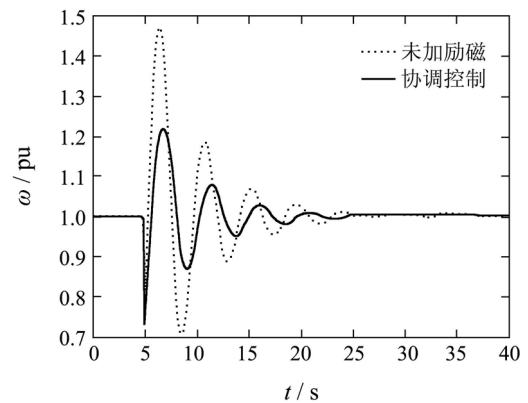


图 7 发电机角速度曲线

Fig. 7 The responses of the generator angular speed

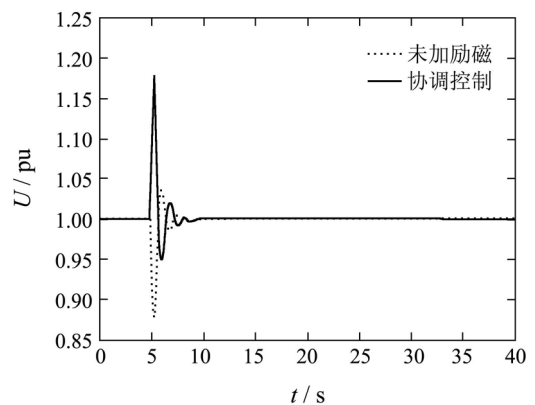


图 8 发电机的机端电压响应曲线

Fig. 8 The response of generator terminal voltage

仿真结果可以看出, 所设计的控制器可以使系统的功角、频率及电压恢复到额定值. 图4~8给出了发电机在启动螺旋桨负载时, 有励磁控制与没有励磁控制下的状态仿真曲线, 可以看出相比仅仅用调速控制器, 综合协调控制不但能够保证系统频率稳定和电压稳定, 而且改善了系统的响应速度和暂态性能.

6 结论(Conclusions)

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,而且有相对简洁的表达形式.仿真结果表明,该控制器能有效抑制推进负载对系统稳定性的影响,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.混合智能控制技术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 Caiqin. The application of hybrid intelligent technology in ship power station excitation control[J]. *Navigation of China*, 2003, 54(1): 62-66.)
- [3] 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.)
- [4] 孙勇,李志民,于继来.船舶电站柴油机最小熵调速控制器的设计[J].电力系统及其自动化学报,2009,21(1): 8-11.
(SUN Yong, LI Zhimin, YU Jilai. Design for diesel engine speed regulation controller of ship power station based on minimum entropy control[J]. *Proceedings of the Electric Power System and Its Automation*, 2009, 21(1): 8-11.)
- [5] 黄曼磊,李殿璞.船舶电站柴油发电机组 H_∞ 综合控制的研究[J].中国造船,2004,45(1): 45-54.
(HUANG Manlei, LI Dianpu. Research on H_∞ synthetic controller for diesel-generat or set of ship power station[J]. *Shipbuilding of China*, 2004, 45(1): 45-54.)
- [6] HAO J, WANG J, CHEN C, et al. Nonlinear excitation control of multi-machine power systems with structure preserving models based on Hamiltonian system theory[J]. *Electric Power Systems Research*, 2005, 74(1): 401-408.
- [7] 马进,席在荣,梅生伟,等.基于Hamilton能量理论的发电机汽门与励磁非线性稳定控制器的设计[J].中国电机工程学报,2002,22(5): 88-93.
(MA Jin, XI Zairong, MEI Shengwei, et al. Nonlinear stabilizing controller design for the steam-valving and excitation system based on Hamiltonian energy theory[J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2002, 22(5): 88-93.)
- [8] LIU Y H, LI C W, WANG Y Z. Decentralized excitation control of multi-machine multi-load power systems using Hamiltonian function method[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2009, 35(7): 919-925.
- [9] LIU Y H, LI C W. Feedback control of nonlinear differential algebraic systems using Hamiltonian function method[J]. *Science in China Series F: Information Sciences*, 2006, 49(4): 436-445.
- [10] XI Z R, CHENG D Z, LU Q, et al. Nonlinear decentralized controller design for multimachine power systems using Hamiltonian function method[J]. *Automatica*, 2002, 38(4): 527-534.
- [11] 张兴华.永磁同步电机的模型参考自适应反步控制[J].控制与决策,2008,23(3): 341-345.
(ZHANG Xinghua. Model reference adaptive backstepping control of permanent magnet synchronous motors[J]. *Control and Decision*, 2008, 23(3): 341-345.)
- [12] 李殿璞.船舶运动与建模[M].北京:国防工业出版社,2008.
(LI Dianpu. *Ship Motion and Modeling*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.)
- [13] 霍峰,姜新建.舰船推进电机及螺旋桨负载模拟系统研[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,主要研究方向为船舶电力系统非线性控制, E-mail: mengjieaaaa@163.com;

兰海 (1975—),男,副教授,主要研究方向为电力系统控制, E-mail: lanhai@hrbeu.edu.cn.