

文章编号: 1001-0920(2011)12-1808-05

带有 SMES 和电力推进负载的舰船电力系统鲁棒协调控制

张利军¹, 孟杰¹, 兰海¹, 刘艳红²

(1. 哈尔滨工程大学 自动化学院, 哈尔滨 150001; 2. 郑州大学 电气工程学院, 郑州 450001)

摘要: 基于 Hamilton 函数方法, 研究具有超导储能装置 SMES 的舰船电网中的协调控制问题. 在充分分析了柴油机组的非线性数学模型、SMES 及其推进电机负载相互耦合的非线性动态结构特性的基础上, 通过预置状态反馈完成了耗散 Hamilton 实现, 并基于耗散实现设计了 SMES 和调速与励磁协调控制器. 该控制器结构简单, 物理意义明确. 仿真结果表明, 所设计的控制器能有效提高系统的暂态稳定性.

关键词: 舰船电力系统; 超导储能装置; 电力推进; Hamilton 函数方法

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Robust coordinated control for ship power systems with SMES and power thruster loads

ZHANG Li-jun¹, MENG Jie¹, LAN Hai¹, LIU Yan-hong²

(1. Automation College, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. Electric Engineering College, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China. Correspondent: MENG Jie, E-mail: mengjieaaaa@163.com)

Abstract: A coordinated control problem of ship power system with superconducting magnetic energy storage(SMES) is addressed based on Hamilton function method. Firstly, nonlinear modeling of marine diesel engine generator, SMES modeling and truster load modeling are analyzed sufficiently, and coupling relations among them are formulated. Then Hamilton realization of the modeling of the generator is obtained by using a pre-feedback technique. As such, the controllers with SMES are designed to perform speed adjustment and excitation adjustment via Hamilton dissipation theory. The designed controllers have simple structure and tangible physical meanings. Finally, simulation results show that the proposed control can effectively improve the transient performance of the power systems.

Key words: ship power system; SMES; power thruster; Hamilton function

1 引言

电力推进是舰船推进技术发展的方向. 大功率电动机的引入将对舰船电力系统在适合大负载变动方面提出新的要求^[1]. 水面舰船武器要求通过充电系统从电网吸收能量, 并在毫秒数量级以极大功率释放脉冲电能, 这些都要求舰船电网具有包括能量储存、大功率释放及能量高效高速控制的技术. 而超导储能装置(SMES)可长期无损耗地储存能量, 并且有功/无功交换可以 4 个象限独立进行; 通过变流器连接电网, 响应速度可达到几毫秒至几十毫秒; 并可在短时间内输出大量功率, 特别适合给脉冲负荷供电^[2]. 因此, 研究 SMES 与发电机的协调控制技术是当前舰船电力系统控制问题研究的主要方向.

船舶电力系统是一个复杂的非线性系统, 非线性主要表现在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等. 由于传统的线性控制策略很难达到满意的控制效果, 需建立包含 SMES 的电网模型, 利用 SMES 可补偿发电和用电之间的功率不平衡程度的特点, 调整发电机组向电网送出的功率以及负荷点从系统吸收的功率, 从而提高电网的稳定性.

Hamilton 函数方法能在控制器设计过程中充分利用系统内在的结构特点, 所设计的控制器结构简单, 易于实现, 近年来在电力系统稳定控制的研究中有大量应用^[3-5]. 通过利用 Hamilton 函数方法, 文献 [4]

收稿日期: 2010-07-25; 修回日期: 2010-09-14.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61174047); 教育部博士点基金项目(20102304110003); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(HEUCFT1005, HEUCF110438).

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; 孟杰(1981-), 女, 博士生, 从事电力系统非线性控制的研究.

研究了非线性微分数系统的协调控制问题; 文献 [6] 研究了带有 SMES 和汽门控制的协调问题. 但是, 包含推进电机负载和 SMES 的电力系统控制问题目前没有得到研究.

本文全面考虑舰船电网的负载变动对系统电压及频率的影响, 建立包含 SMES 及推进电机负载的多机电网模型, 利用 Hamilton 函数控制方法加以设计, 使得发电机在励磁、调速的协调控制下, 达到良好的稳定效果. 根据 Hamilton 控制方法的设计思想, 首先针对非线性控制系统, 构造系统的 Hamilton 能量函数, 通过预置反馈完成系统的 Hamilton 实现, 并且选择适当的反馈控制矩阵, 得到非线性动态系统的控制策略. 为验证控制器的抗干扰能力, 本文对启动螺旋桨负载情况进行仿真. 仿真结果表明, 该协调控制器能有效抑制系统的未知扰动, 从而提高系统的暂态稳定性.

2 包含 SMES 和电力推进负载的舰船电力系统模型

下面主要分析舰船电力系统的非线性模型结构特性. 首先给出发电机、SMES 和推进电机负载系统的非线性模型; 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. 本文将舰船电力系统电源由分散在不同地点的电站等价为一个柴油发电机组进行研究. 其简化系统如图 1 所示, 其中 LOAD1 代表静负载. 系统的控制原理如图 2 所示.

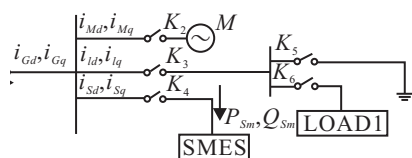


图 1 舰船电网简化结构图

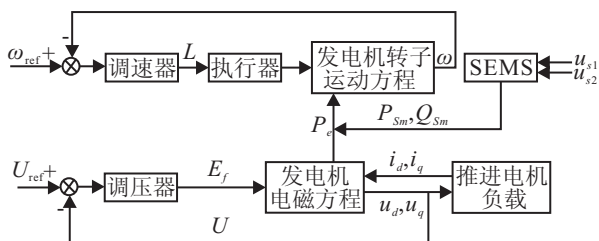


图 2 控制原理框图

2.1 同步发电机数学模型

船舶电站柴油机组非线性数学模型^[7]如下:

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

其中: 定子绕组端电压的 d 轴和 q 轴分量表示如下:

$$\begin{aligned} u_d &= -RI_d + X_d I_q, \\ u_q &= -RI_q - X'_d I_d + E'_q, \\ U &= \sqrt{u_d^2 + u_q^2}. \end{aligned}$$

这里: 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 为执行器输出轴位移; T_1 为执行器的时间常数; K_1 为控制增益; X'_d 为发电机的 d 轴定子绕组暂态感抗; X_q 为发电机的 q 轴定子感抗; u_g 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_d, 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 为发电机的 d 轴定子感抗. 系统 (1) 中的其他系数分别为

$$T_a = \frac{J\omega_{g0}^2}{S_B}, T_b = \frac{60m_1\omega_{g0}^2 - 2\pi Kp\omega_{g0}^2}{2\pi S_B},$$

$$\omega_{g0} = 100\pi/p, c_1 = d_1\omega_{g0}/S_B, c_2 = a\omega_{g0}/S_B,$$

$$d_1 = b_1 - aL_0, a = M_1^e/L_e.$$

这里: J 为机组轴系转动惯量; p 为发电机的极对数; ω_{g0} 为柴油机轴角速度; K 为与发电机阻尼绕组成正比的阻尼系数; m_1, b_1 为线性常数; S_B 为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; T_{d0} 为发电机励磁绕组的时间常数; L_0 为执行器输出轴的空载行程.

2.2 SMES 模型

本文采用如下二阶动态模型^[6]:

$$\begin{cases} \dot{P}_{Sm} = -\frac{1}{T}P_{Sm} + \frac{1}{T}u_{S1}, \\ \dot{Q}_{Sm} = -\frac{1}{T}Q_{Sm} + \frac{1}{T}u_{S2}. \end{cases} \quad (2)$$

其中: u_{S1}, u_{S2} 为 SMES 的控制量; P_{Sm}, Q_{Sm} 分别为 SMES 向系统输入的有功和无功功率; T 为 SMES 的时间常数. u_{S1}, u_{S2} 可改变发电机组向电网送电机组送出的功率以及负荷点从系统吸收的功率, 从而提高电网的稳定性.

SMES 与系统接口方程为

$$P_{Sm} = u_d i_{Sd} + u_q i_{Sq}, Q_{Sm} = u_q i_{Sd} - u_d i_{Sq},$$

$$i_{Gd} = i_{Sd} + i_{1d} + i_{Md}, i_{Gq} = i_{Sq} + i_{1q} + i_{Mq},$$

$$P_e = P_{Sm} + P_L,$$

$$P_L = \frac{E'_q U}{T_d X'_d} \sin \delta + \frac{U^2}{2} \frac{X'_d - X_q}{X'_d X_q} \sin 2\delta.$$

2.3 负载模型

船舶电站的负载分为静态负载和动态负载. 静态负载主要指船舶的电热和照明设备等; 动态负载主要指电动机拖动装置.

2.3.1 推进电机负载

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,这里分别给出其数学模型.

1) 永磁同步电动机数学模型^[8]

本文讨论的推进电机是永磁同步电动机,其数学模型如下:

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

其中: ω_r 为转子角速度; n_p 为极对数; ϕ 为永久磁铁产生的磁通; J 为转子惯量; B 为阻尼系统; M 为负载转矩; R_s 为定子电阻; L_m 为励磁电感(d 轴与 q 轴相同); i_d , i_q 和 u_d , u_q 分别为定子电流矢量和定子电压矢量的 d 轴与 q 轴分量.

2) 螺旋桨数学模型

船舶和螺旋桨的运动方程为^[9]

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

其中: $n \neq 0$ 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 为上推力系数.

根据船舶运动方程理论可得,螺旋桨的进速比为

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

螺旋桨转矩方程为

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

其中: $n \neq 0$ 或 $v \neq 0$, K'_M 为扭矩系数. 由船舶运动实验建模可知, K'_P , K'_M 都为进速比 J' 的函数^[9]. 由式(4)~(6)可知,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.

2.3.2 静态负载模型

以同步发电机的 d - q 轴作为参考系,静负荷的动态微分方程^[7]一般表示为

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{1d} \\ \dot{i}_{1q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_e/L_e & \omega \\ -\omega & -r_e/L_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L_e & 0 \\ 0 & 1/L_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix},$$

其中 r_e 和 l_e 为负载电阻和电感. 从上式变量可看出,静态负载与发电机系统(1)有强非线性耦合关系.

3 Hamilton 能量函数方法控制器设计

3.1 耗散 Hamilton 系统理论简述

对于广义 Hamilton 系统

$$\begin{cases} \dot{x} = [J(x) - R(x)]\nabla H + g_1(x)u + g_2(x)\omega, \\ z = h(x)g_1^T(x)\nabla H. \end{cases} \quad (7)$$

其中: $R(x) \geq 0$, $H(x) > 0$, $h(x)$ 为权重矩阵, $x \in R^n$, $u \in R^m$, $\omega \in R^s$. 给定干扰抑制水平 $\gamma > 0$, 将 $z = h(x)g_1^T(x)\nabla H$ 作为罚信号, 有如下引理:

引理 1 对于系统(7)及给定的干扰抑制水平 $\gamma > 0$, 若

$$R(x) + \frac{1}{2\gamma^2}[g_1(x)g_1^T(x) - g_2(x)g_2^T(x)] \geq 0, \quad (8)$$

则 L_2 干扰抑制问题可由以下控制律完成:

$$u = -\left[\frac{1}{2}h^T(x)h(x) + \frac{1}{2\gamma^2}I_m\right]g_1^T(x)\nabla H. \quad (9)$$

并且沿由式(7)和(9)组成的闭环系统的轨线有如下 γ -耗散不等式成立:

$$\begin{aligned} \dot{H} + dH \left[R - \frac{1}{2\gamma^2}(g_2(x)g_2^T(x) - g_1(x)g_1^T(x)) \right] \nabla H \leq \\ \frac{1}{2}\{\gamma^2\|\omega\|^2 - \|z\|^2\}. \end{aligned} \quad (10)$$

根据引理 1, 应用耗散 Hamilton 能量函数方法设计非线性稳定控制器. 首先将系统表示为广义 Hamilton 能量系统(7)的形式, 然后验证引理条件(8), 再应用式(9)设计系统控制器.

3.2 励磁与调速综合协调鲁棒控制设计

下面针对系统(1), 按照以上提到的设计思路将系统表示成 Hamilton 系统形式, 并设计励磁与调速协调的稳定控制策略.

首先引入系统的干扰项将系统(1)表示成以下鲁棒数学模型:

$$\dot{\delta} = (\omega - 1)\omega_s,$$

$$\dot{\omega} = \frac{T_b}{T_a}\omega + \frac{1}{T_a}c_1 + \frac{c_2}{T_a}L - \frac{1}{T_a}\left(\frac{E'_d U}{X'_d} \sin \delta + P_{Sm} + \frac{U^2}{2} \frac{X'_d - X_q}{X'_d X_q} \sin 2\delta\right) + \omega_1,$$

$$\dot{L} = -\frac{L}{T_1} + \frac{K_1}{T_1}u_g + \omega_2,$$

$$\dot{E}'_q = \frac{1}{T_{d0}}E_{fd} - \frac{1}{T_{d0}}E'_q + \frac{X_d - X'_d}{T_{d0}X'_d}U \cos \delta + \omega_3,$$

$$\dot{P}_{Sm} = -\frac{1}{T}P_{Sm} + \frac{1}{T}u_{S1} + \omega_4,$$

$$\dot{Q}_{Sm} = -\frac{1}{T}Q_{Sm} + \frac{1}{T}u_{S2} + \omega_5, \quad (11)$$

其中 ω_i ($i = 1, 2, \dots, 5$) 为系统的干扰项.

下面记

$$x_1 = \delta, \quad x_2 = \omega - \omega_0, \quad x_3 = L - L_0, \quad x_4 = E'_q,$$

$$x_5 = P_{Sm}, \quad x_6 = Q_{Sm}, \quad u_1 = (K_1/T_1)u_g,$$

$$u_2 = \frac{1}{T_{d0}} E_{fd}, \quad u_3 = \frac{1}{T} u_{S1}, \quad u_4 = \frac{1}{T} u_{S2}, \quad \frac{T_b}{T_a} = a,$$

$$\frac{1}{T_a} c_1 + \frac{T_b}{T_a} \omega_0 = b, \quad \frac{c_2}{T_a} = c, \quad \frac{c_2}{T_a} = c, \quad \frac{1}{T_a} = d,$$

$$\frac{U}{T_a X'_d} = e, \quad \frac{1}{T_a} \frac{U^2}{2} \frac{X'_d - X'_q}{X'_d X'_q} = f, \quad \frac{1}{T_1} = g,$$

$$\frac{1}{T_{d0}} = h, \quad \frac{X_d - X'_d}{T_{d0} X'_d} U = i, \quad \frac{1}{T} = j,$$

则系统变为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \omega_s, \\ \dot{x}_2 = ax_2 + b + c(x_3 + L_0) - dx_5 - \\ \quad ex_4 \sin x_1 - f \sin 2x_1 + \omega_1, \\ \dot{x}_3 = -gx_3 - gL_0 + u_1 + \omega_2, \\ \dot{x}_4 = u_2 - hx_4 + i \cos x_1 + \omega_3, \\ \dot{x}_5 = -jx_5 + u_3 + \omega_4, \\ \dot{x}_6 = -jx_6 + u_4 + \omega_5. \end{cases} \quad (12)$$

系统平衡点为

$$x_0 = (x_{10}, x_{20}, x_{30}, x_{40}, x_{50}, x_{60})^T =$$

$$(\delta_0, 0, L_0, E'_{q0}, 0, 0).$$

满足

$$\begin{cases} b + cL_0 - eE'_{q0} \sin \delta_0 - f \sin 2\delta_0 = 0, \\ -hE'_{q0} + i \cos \delta_0 = 0. \end{cases}$$

另设

$$\begin{cases} u_1 = -cx_2 + v_1, \\ u_2 = v_2, \\ u_3 = -dx_2 + v_3, \\ u_4 = v_4. \end{cases} \quad (13)$$

系统(12)重记为

$$\dot{x} = [J(x) - R(x)] \nabla H + g_1(x)v + g_2(x)\omega. \quad (14)$$

其中 $a < 0$. 因此, R 正定; $x = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6]^T$; $z = h(x)g_1^T(x)\nabla H$. 这里

$$h(x) = \text{Diag}\{r_1, r_2, r_3, r_4\} > 0;$$

$$J(x) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & c & 0 & -d & 0 \\ 0 & -c & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & d & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$R(x) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -a/\omega_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & i/e & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & j & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & j \end{bmatrix};$$

$$\nabla H = \begin{bmatrix} ex_4 \sin x_1 - b + f \sin 2x_1 \\ \omega_s x_2 \\ x_3 + L_0 \\ \frac{eh}{i} x_4 - e \cos x_1 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix};$$

$$g_1(x) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; g_2(x) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$v = [v_1 \ v_2 \ v_3 \ v_4]^T; \quad \omega = [\omega_1 \ \omega_2 \ \omega_3 \ \omega_4 \ \omega_5]^T.$$

构造系统的能量函数

$$H(x) = -ex_4 \cos x_1 - bx_1 - \frac{f}{2} \cos 2x_1 + \frac{\omega_s}{2} x_2^2 +$$

$$\frac{1}{2}(x_3 + L_0)^2 + \frac{eh}{2i} x_4^2 + \frac{1}{2} x_5^2 + \frac{1}{2} x_6^2.$$

由此可以看出, 式(12)符合(7)的形式, 并验证(8)成立, 由式(9)可设计控制器为

$$v = -\left[\frac{1}{2}h^T(x)h(x) + \frac{1}{2\gamma^2}I_m\right]g_1^T(x)\nabla H.$$

将其代回式(13)可得

$$\begin{cases} u_1 = -cx_2 + \left(\frac{1}{2}r_1^2 + \frac{1}{2\gamma^2}\right)(x_3 + L_0), \\ u_2 = \left(\frac{1}{2}r_2^2 + \frac{1}{2\gamma^2}\right)\left(\frac{eh}{i}x_4 - e \cos x_1\right), \\ u_3 = -dx_2 - \left(\frac{1}{2}r_3^2 + \frac{1}{2\gamma^2}\right)x_5, \\ u_4 = -\left(\frac{1}{2}r_4^2 + \frac{1}{2\gamma^2}\right)x_6. \end{cases} \quad (15)$$

从控制器的结构可以看出, 该控制器的结构比采用 L_2 ^[6]鲁棒控制器的结构简洁, 更易于工程实现.

4 仿真分析

为验证控制器(15)在外部负荷扰动下的调节能力, 在发电机稳定运行 1s 后, 突然启动推进电机动态负载进行系统仿真. 系统的相关参数如表 1 和表 2 所示.

表 1 负载参数

n_p	ϕ	B	J	R_s	L_0
2	0.341	0.0058	0.00132	1.47	5.33

表 2 发电机参数

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	
1.003	0.05	0.011	2.2	0.2	

发电机在机械功率扰动情况下的动态响应曲线如图3和图4所示. 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, 此时螺旋桨转矩方程(6)可简化为^[10]

$$M = Kn^2.$$

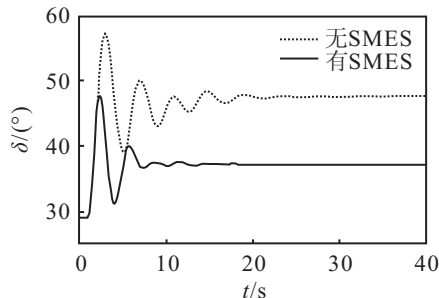


图3 发电机功角曲线

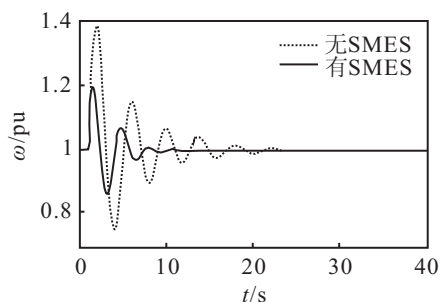


图4 发电机角速度曲线

由仿真结果可以看出, 所设计的控制器可使系统的功角、频率恢复到额定值. 图3和图4给出了发电机在启动螺旋桨负载时, 有SMES与没有SMES下的状态仿真曲线, 可以看出协调控制不但能保证系统频率稳定和功角稳定, 而且改善了系统的响应速度和暂态性能. 从图3和图4可以看出, 在启动相同较大扰动的螺旋桨负载时, 含有SMES的系统能在10s内恢复稳定, 响应时间比没有SMES的协调控制小, 从而提高了系统的稳定裕度.

5 结论

本文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, 提出了一种能有效抑制系统外部干扰的控制器设计方法. 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, 该控制策略无论从控制精度, 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干扰对系统的影响, 保证船舶电力系统的频率稳定性, 从而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 Q, Sun Y Z. Nonlinear control of power systems [M]. Beijing: Science Press, 1993.)
- [2] 戴陶珍, 范则阳, 李敬东, 等. 超导磁储能系统在舰船电力系统中的应用前景及其关键课题[J]. 中国工程科学, 2002, 4(6): 16-28.
(Dai T Z, Fan Z Y, Li J D, et al. Prospects and key points for applying SMES to electric power system in ships [J]. Engineering Science, 2002, 4(6): 16-28.)
- [3] Wang Y, Guo G, Hill D J, et al. Robust decentralized nonlinear controller design for multimachine power systems [J]. Automatica, 1997, 33(9): 1725-1733.
- [4] Liu Y H, Li C W, Wu R B. Feedback control of nonlinear differential algebraic systems using Hamiltonian function method [J]. Science in China, Series F: Information Sciences, 2006, 49(4): 436-445.
- [5] Cheng Dai-zhan, Xi Zai-rong, Hong Yi-guang. Energy-based stabilization of forced hamiltonian systems and its application to power systems[J]. Control Theory & Applications, 2006, 17(6): 798-802.
- [6] Wang Y Z, Feng G, Cheng D Z, et al. Adaptive L_2 disturbance attenuation control of multi-machine power systems with SMES units[J]. Automatica, 2006, 42(7): 1121-1132.
- [7] 黄曼磊. 鲁棒控制理论及应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2007.
(Huang M L. Robust control theory and applications [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2007.)
- [8] 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 X H. Model reference adaptive backstepping control of permanent magnet synchronous motors [J]. Control and Decision, 2008, 23(3): 341-345.)
- [9] 李殿璞. 船舶运动与建模[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 326-374.
(Li D P. Ship motion and modeling [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 326-374.)
- [10] 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, 4(29): 118-122.
(Huo F, Jiang X J. Study on simulated system of boat's propulsion motor and screw propeller's load [J]. Ship Science and Technology, 2007, 4(29): 118-122.)