

船舶电力推进永磁容错电机模糊自适应 PI 控制^{*}

白洪芬¹, 朱凌宇²

(1. 上海海事大学 航运技术与控制工程交通运输行业重点实验室, 上海 201306;

2. 北部湾大学 海运学院, 广西 钦州 535011)

摘 要: 永磁容错电机(FTPMM)综合了永磁同步电机和开关磁阻电机的优点,可作为电推船的推进电机。在研究船用 FTPMM 结构及数学模型的基础上,对电机采用模糊自适应 PI 控制。误差大时,增加误差控制作用的权重,提高系统响应速度;误差小时,增加误差变化量控制作用的权重,使系统尽快进入稳态。通过仿真对比分析了模糊自适应 PI 控制策略相较于普通 PI 控制的优越性,并验证了其在船舶电力推进系统中应用的可行性。

关键词: 船舶电力推进; 永磁容错电机; 模糊 PI 控制; 自适应控制

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2019)02-0010-05

Fuzzy Adaptive PI Control of Fault-Tolerant Permanent Magnet Motor Applied in Electric Propulsion Ship^{*}

BAI Hongfen¹, ZHU Lingyu²

(1. Key Laboratory of Marine Technology and Control Engineering, Ministry of Communications, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China;

2. Maritime College, Beibu Gulf University, Qinzhou 535011, China)

Abstract: Fault-tolerant permanent magnet motor (FTPMM) combines the merits of permanent magnet synchronous motor and switch reluctance motor, so it can be used as the propulsion motor of electric propulsion ship. On the basis of analyzing the structure and mathematical model of FTPMM, the fuzzy adaptive PI control strategy was proposed. During the control process, if the error was large, the control weight of error would be increased so as to improve the response speed; if the error was small, the control weight of the change of error would be raised, so that the system could reach the steady state as soon as possible. The simulation model of electric propulsion ship system using the fuzzy adaptive PI control strategy in propulsion motor was built in MATLAB/simulink. From the simulation results, it was proved that the dynamic and static properties of FTPMM were improved in comparison with the traditional PI control, and the fuzzy adaptive PI control was suitable for the application in marine electric propulsion system.

Key words: marine electric propulsion; fault-tolerant permanent magnet motor (FTPMM); fuzzy PI control; adaptive control

0 引 言

电力推进和电力作动系统具有控制灵活、环境污染小等优点,在电推船舶等领域得到广泛的应用^[1]。作为主要动力源的推进电机及其控制系

统若发生故障,会影响整个船舶系统的运行性能,甚至造成重大损失。因此,在电推船中推进电机系统须具有故障容错能力。

在电推船中,推进电机主要有同步电机、异步电机、永磁电机等^[2]。采用开关磁阻电机(SRM)

^{*} 基金项目: 广西教育厅高校中青年教师基础能力提升项目(2017KY0800, 2018KY0601); 广西壮族自治区级大学生创新训练项目(201711607042)

作者简介: 白洪芬(1988—),女,博士,讲师,研究方向为永磁电机控制、船舶电力推进。

作为推进电机的电推船也开始出现^[3]。具有容错控制能力、效率高、可靠性高的永磁容错电机(FTPMM)综合了永磁同步电机(PMSM)和SRM的优点^[4],可以满足船舶电推系统的要求。

在电机控制中,一般采用PID控制,其简单、成熟、适用范围广,主要适用于线性系统或简化为线性系统的非线性系统。智能控制,如模糊控制、自适应控制、神经网络控制等,更适用于非线性的FTPMM控制系统,能提高系统的控制品质及适应性、鲁棒性^[5]。结合智能控制可改善传统PID控制中参数优化整定困难的问题。文献[6]表明模糊控制器能通过隶属函数优化PID控制器的参数。文献[7-8]在PMSM中采用模糊自适应PID控制,文献[9]在SRM的直接瞬时转矩控制中采用模糊自适应PI控制,均通过仿真验证了模糊自适应控制可以有效减小转矩脉动,改善系统的动态性和鲁棒性。

本文在研究电推船舶系统和FTPMM结构的基础上,提出模糊自适应PI控制策略,通过仿真对比分析模糊自适应PI控制策略相较于普通PI控制的优越性,并验证该控制策略在船舶电力推进系统中应用的可行性。

1 船舶电力推进系统

1.1 电推船控制系统结构

电推船控制系统结构如图1所示。给定转速和实际转速作差后,通过模糊PI控制模块作用到*q*轴电流*i_q*上,然后经过电流滞环跟踪控制模块,产生脉宽调制(PWM)波,经H桥逆变器,控制推进电机转动,FTPMM通过带动螺旋桨转动对船产生水平方向的推力,同时螺旋桨所受到的海风、海浪、水流等阻力和扰动再反作用到FTPMM上^[10]。

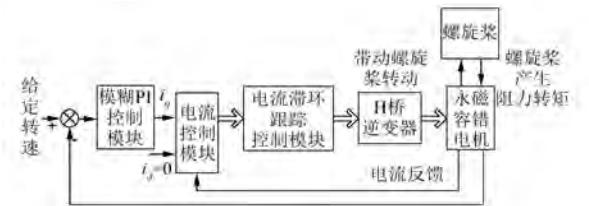


图1 船舶电力推进电机控制系统原理

1.2 FTPMM 结构及数学模型

FTPMM 因其特殊的结构而具有故障容错能力,即电机驱动系统发生故障后,在一定时间内电

机能够继续维持正常运行。其特殊的结构如表1所示^[11]。本文所选用的三相12槽4极FTPMM的结构如图2所示。

表1 FTPMM 结构特点

结构特点	实现效果
单层集中绕组	物理隔离
每个定子槽中仅包含单相绕组实现物理隔离	热隔离
表贴式离心磁钢转子结构	磁隔离
深而窄的特殊槽口设计	相电抗较大
H桥驱动电路供电	电气隔离



图2 三相12槽4极FTPMM结构

FTPMM H桥逆变电路如图3所示。电机各相绕组相互独立、无中性点,不仅实现了电气隔离,还增加了器件的可靠性,可以保证电机在一相发生故障时,不会影响到其他相的正常工作,为电机的容错控制能力提供了物理结构条件^[12]。

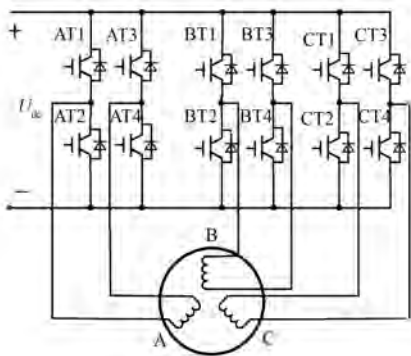


图3 三相FTPMM H桥逆变电路

FTPMM 在*d-q*坐标系下的电压、磁链、转矩和运动方程分别为

$$\begin{cases} U_d = Ri_d + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - p\omega_m\psi_{sq} \\ U_q = Ri_q + \frac{d\psi_{sq}}{dt} + p\omega_m\psi_{sd} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \psi_{sd} = L_d i_d + \sqrt{\frac{3}{2}} \psi_f \\ \psi_{sq} = L_q i_q \end{cases} \quad (2)$$

$$T_e = p(\psi_{sd} i_q - \psi_{sq} i_d) = p\left(\sqrt{\frac{3}{2}} \psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q\right) \quad (3)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_e - T_L - B\omega \quad (4)$$

式中: 下标 d, q ——直轴量和交轴量;

下标 s ——定子量;

p ——极对数;

p ——微分算子;

U, i, ψ, L ——电压、电流、磁链、电感;

R ——定子电阻;

ψ_f ——永磁体磁链;

ω_m ——转子机械角速度;

ω ——转子电角速度;

T_e, T_L ——电磁转矩和负载转矩;

J ——转动惯量;

B ——黏滞摩擦因数。

在 FTPMM 矢量控制中, 采用 $i_d = 0$ 控制, 则式(3)可变形为

$$T_e = \sqrt{\frac{3}{2}} p \psi_f i_q \quad (5)$$

由式(5)可知, 电机输出的电磁转矩 T_e 与交轴电流 i_q 成正比, 可通过控制 i_q 来控制 T_e 。

1.3 螺旋桨特性

螺旋桨通过与水之间的相互作用产生推动船舶前进所需的动力及电机的负载转矩。螺旋桨的推力 P 和转矩 T_L 为^[13]

$$P = K_p \rho n^2 D^4 \quad (6)$$

$$T_L = K_M \rho n^2 D^5 \quad (7)$$

式中: K_p, K_M ——螺旋桨的推力系数和转矩系数, 均为螺旋桨进速比的函数;

ρ ——海水密度;

D, n ——螺旋桨直径和螺旋桨转速。

船舶运动时, 船机桨系统的运动模型为

$$(M + \Delta M) \frac{dv_s}{dt} = P_e - F_r \quad (8)$$

式中: M ——船体质量;

ΔM ——船体运动时附着在船上与船一起运动的水的质量, 通常取船体总质量的

5% ~ 15%;

v_s ——船舶航速;

F_r ——船舶阻力。

在船型确定且航行条件一定的情况下, 船舶阻力只与船速有关, 其表达式为

$$F_r = r v_s^z \quad (9)$$

式中: r ——阻力系数;

z ——指数, 一般对于船速不高的船舶, 取 $z=2$ 。

综上所述, 船机桨模型如图4所示。

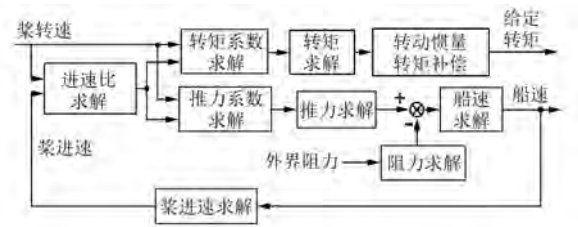


图4 船舶螺旋桨负载模型

2 模糊自适应 PI 控制策略

2.1 模糊自适应控制系统

模糊自适应 PI 控制结构如图5所示。

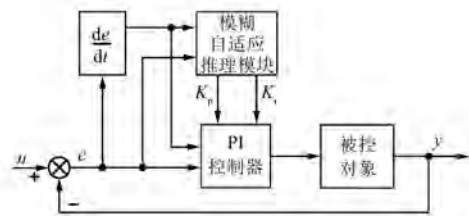


图5 模糊自适应 PI 控制结构

模糊自适应 PI 控制模块以误差 e 和误差变化量 ec 作为输入, 通过系统需求找出 PI 参数 K_p 、 K_i 与 e, ec 间的模糊关系, 并在运行过程中持续对 e, ec 进行检测, 从而根据模糊规则实时调整 K_p 、 K_i , 以满足不同情况下对控制参数的不同要求, 最终实现系统良好的控制性能。

2.2 模糊控制器的设计

根据模糊自适应 PI 控制的原理, 设计模糊自适应 PI 控制器。

(1) 设输入输出变量的模糊子集均为: $\{NB, NM, MS, ZO, PS, PM, PB\}$, 论域均为: $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$ 。

(2) 选择隶属函数为三角形隶属函数,如图 6 所示。

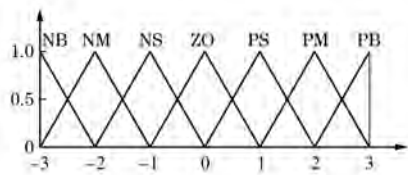


图 6 隶属函数

(3) 设定模糊控制规则。通过大量参考电机控制试验,设定模糊控制规则如表 2、表 3 所示。

表 2 K_p 模糊控制规则

$\begin{matrix} e \\ ec \end{matrix}$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	NS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表 3 K_i 模糊控制规则

$\begin{matrix} e \\ ec \end{matrix}$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	ZO	ZO	ZO
NM	NB	NB	NS	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	ZO
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PM
PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

根据模糊控制规则表 2、表 3 得出 ΔK_p 、 ΔK_i 的值,则可计算得到调节后的 k_p 、 k_i 。

$$\begin{cases} K_p = K_{p0} + \Delta K_p \\ K_i = K_{i0} + \Delta K_i \end{cases} \quad (10)$$

控制系统按照图 7 所示的工作流程图实现 PI 控制器参数的自动修改校正。

3 仿真研究

为了验证上述模糊自适应 PI 控制策略的正

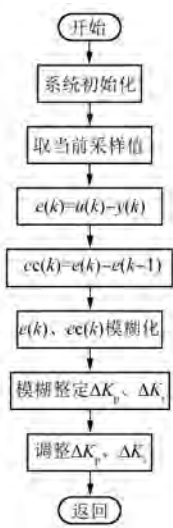


图 7 模糊自适应 PI 控制器工作流程图

确性及整个电推船舶系统的可行性,根据图 1 及表 2、表 3 的模糊控制规则在 MATLAB R2012a 中搭建仿真模型。

3.1 电机仿真分析

在仿真过程中,0.3 s 时负载转矩由 2.3 N·m 突变为 0,0.6 s 时转速由 500 r/min 突变为 1 500 r/min,0.9 s 时负载转矩再由 0 突变为 2.3 N·m。仿真运行时间设为 1.2 s,相关波形如图 8~图 10 所示。

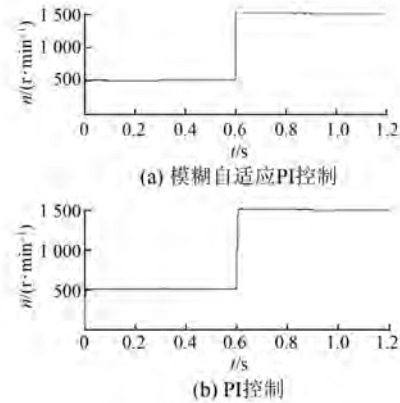


图 8 电机转速波形图

由图 8 可知,在转速和负载转矩突变时,转速可以很快地响应,并调整到正常运行模式。对比图 8(a)和图 8(b)可知,模糊 PI 控制的响应时间比 PI 控制稍快,且波动稍小。

由图 9 可知,在转速和负载转矩突变时,电机转矩同样可以很快地响应,调整到正常运行模式。

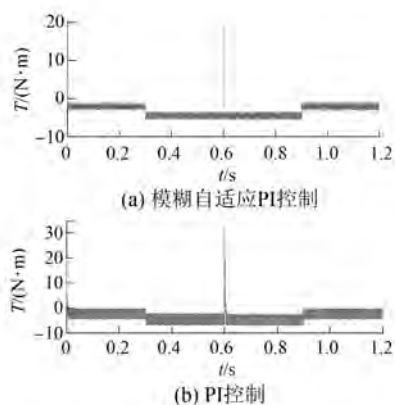
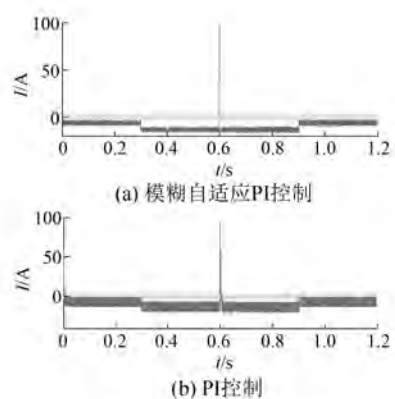


图9 电机转矩波形图

图10 电机 dq 轴电流波形图

对比图 9(a) 和图 9(b) 可知,模糊 PI 控制中,转矩的波动明显小于 PI 控制。

由图 10 可知, q 轴电流的变化趋势同转矩完全一致,进一步验证了式(5)的正确性。同样地,通过对比图 10(a) 和图 10(b) 可知,模糊 PI 控制中, q 轴电流的波动明显小于 PI 控制。

3.2 电力推进船舶系统仿真分析

船速曲线如图 11 所示。在初始时刻,螺旋桨的推力逐渐减小,船舶阻力逐渐增大,船舶加速运行。随着船速的不断增大,船舶阻力迅速增加,螺

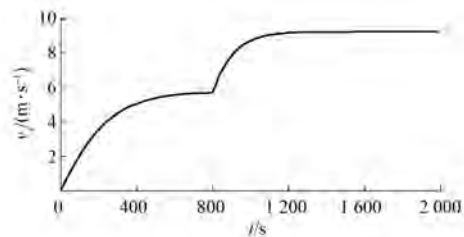


图11 船速曲线

旋桨的推力逐渐减小,直到推力和阻力相等时,船速稳定。

由图 11 可知以永磁容错电机为推进电机的电推船可以正常运行,即 FTPMM 用在电推船舶系统中是可行的。

4 结 语

作为电推船的推进电机,FTPMM 具有体积小、功率密度高和转矩脉动小等优点。模糊自适应 PI 控制中参数优化通过模糊逻辑控制器的隶属函数的优化来实现,简化了运算。在推进电机结构和船机桨模型清楚的基础上,详细设计了模糊控制器,并通过仿真对比分析了模糊自适应 PI 控制策略相较于普通 PI 控制的优越性,并验证了其在电推船舶系统中应用的可行性。在对可靠性和安全性要求较高的电推船中,具有容错能力的推进电机逐渐成为未来绿色航运、绿色船舶的主要研究方向。

【参考文献】

- [1] BAI H F, ZHU J W, QIN J F. Performance study of three-phase fault-tolerant permanent magnet motor drive for marine propulsion system based on structure design[J]. Journal of Ship Research, 2017, 61(1): 23.
- [2] 华斌,周艳红,谢冰若,等.电机技术在舰船电力推进系统中的应用研究[J].微电机,2015,48(5): 101.
- [3] MITRA A, EMADI A. On the suitability of large switched reluctance machines for propulsion applications [C] // 2012 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 2012.
- [4] 白洪芬,朱景伟,孙军浩.电力推进船舶永磁容错电机矢量控制策略对比分析[J].哈尔滨工程大学学报,2017,38(9): 1484.
- [5] 全龙虎,王继东,崔赫日,等.基于 PSO 的 PMSM 模糊 PI 速度控制器设计[J].控制工程,2016,23(5): 629.
- [6] QU W, ZHANG Z X, SUN X X. Research on PMSM fuzzy PI control system [C] // 2nd International Conference on Sensors, Measurement and Intelligent Materials, 2013: 628.
- [7] 原杰,赵永瑞,周茂浩,等.永磁同步电机模糊 PID 控制建模与仿真[J].系统仿真技术,2013,9(4): 361.

(下转第 19 页)

3 结 语

本文提出了一种无电压限幅环节的无传感器 PMSM FOC 框图,搭建了仿真模型对改进方法在 SVPWM 过调制时的运行情况进行仿真研究。对比传统 FOC 框图和改进 FOC 框图在无传感器 PMSM 系统中的运行情况发现:在 SVPWM 过调制的情况下,改进 FOC 框图拓宽了系统可稳定运行的最高转速范围,提高了系统的控制性能。

【参考文献】

- [1] 童力,邹旭东,丰树帅,等.基于预测无差拍算法的永磁同步发电机无传感器控制[J].电工技术学报,2013,28(3): 17.
- [2] 王磊,李颖晖,朱喜华.存在扰动的永磁同步电机混沌运动模糊自适应同步[J].电力系统保护与控制,2011,39(11): 33.
- [3] 李彪,李黎川.基于高性能磁链算法的永磁同步电动机无位置传感器控制[J].电工技术学报,2016,31(11): 59.
- [4] 卢东斌,欧阳明高,谷靖,等.电动汽车永磁同步电

(上接第 9 页)

- [5] 王同旭,马鸿雁,聂沐晗.电梯用永磁同步电机 BP 神经网络 PID 调速控制方法的研究[J].电工技术学报,2015,30(增刊 1): 43.
- [6] 万东灵,赵朝会,王飞宇,等.基于 Super-twisting 滑模永磁同步电机驱动的转速和转矩控制[J].电机与控制应用,2017,44(10): 42.
- [7] 许波,朱焜秋.自适应非奇异终端滑模控制及其在 BPMSM 中的应用[J].控制与决策,2014(5): 833.
- [8] 张晓光,赵克,孙力,等.永磁同步电机滑模变结构调速系统动态品质控制[J].中国电机工程学报,

(上接第 14 页)

- [8] 张云红,曾成碧,吴传来,等.模糊控制在永磁同步电机调速系统中的应用[J].微电机,2012,45(7): 69.
- [9] 王勉华,彭田野,胡春龙.基于模糊自适应 PI 控制的 SRM 直接瞬时转矩控制系统[J].电机与控制应用,2014,41(6): 1.
- [10] 刘胜,张玉廷,余辰光.船舶电力推进系统电机组三维模糊控制[J].中国电机工程学报,2012,32(3): 117.
- [11] ZHU J W, ERTUGRUL N, SOONG W L. Fault remedial strategies in a fault-tolerant brushless permanent magnet AC motor drive with redundancy

机最优制动能量回馈控制[J].中国电机工程学报,2013,33(3): 83.

- [5] 臧晓笛,田德文.低开关频率下永磁同步电机弱磁区电流谐波抑制[J].大功率变流技术,2016(6): 1.
- [6] 袁登科,徐延东,李秀涛.永磁同步电动机变频调速系统及其控制[M].北京:机械工业出版社,2015: 4-6.
- [7] 彭泓,孔德伟,靳明智.永磁同步电机无速度传感器矢量控制系统[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2017,36(6): 635.
- [8] 梁艳,李永东.无传感永磁同步电机矢量控制系统概述[J].电气传动,2003(4): 4.
- [9] 邵俊波,王辉,黄守道,等.一种表贴式永磁同步电机无位置传感器低速控制策略[J].中国电机工程学报,2017,37(5): 1.
- [10] 张云亮,张兆旭,曹永军,等.永磁同步电机无传感器矢量控制系统设计[J].自动化与信息工程,2016,37(3): 7.
- [11] 田铭兴,励庆孚,王曙鸿.交流电机坐标变换理论的研究[J].西安交通大学学报,2002,36(6): 568.

收稿日期: 2018-09-17

2011,31(15): 47.

- [9] 毛亮亮,周凯,王旭东.永磁同步电机变指数趋近律滑模控制[J].电机与控制学报,2016,20(4): 106.
- [10] QUAN Z, LIN F Q, JIAN S K. Adaptive enhanced sliding mode control for permanent magnet synchronous motor drives [J]. International Journal of Adaptive Control & Signal Processing, 2016,29(12): 1484.
- [11] 袁雷.现代永磁同步电机控制原理及 MATLAB 仿真[M].北京:北京航空航天大学出版社,2016.

收稿日期: 2018-09-18

[C]//2009 IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2009: 423.

- [12] BAI H F, ZHU J W, QIN J F. Study of fault-tolerant control strategies for a fault-tolerant permanent magnet motor[C]//Proceedings of the 35th Chinese Control Conference, CCC2016, 2016: 6455.
- [13] 秦俊峰,白洪芬,颜泽铎,等.船舶电力永磁同步推进电机空间电压矢量 DTC[J].中国航海,2017,40(4): 25.

收稿日期: 2018-09-17