

永磁同步风力发电系统的分数阶比例积分控制算法研究^{*}

周小壮, 王孝洪, HOANG THI THU GIANG
(华南理工大学 自动化科学与工程学院, 广东 广州 510640)

摘要: 将分数阶比例积分(PI^λ)控制器应用于直驱型永磁同步风力发电系统, 来达到实现系统高性能控制的目的。重点研究了永磁同步风力发电系统的分数阶 PI^λ 控制器参数设计方法。通过分数阶 PI^λ 控制器系统的仿真研究与试验分析, 结果表明: 采用分数阶 PI^λ 控制器的系统具有较快的响应速度和较高的功率输出性能, 具有一定的发展潜力和实用价值。

关键词: 分数阶; 永磁同步电机; 风力发电; 最大功率跟踪

中图分类号: TM 315 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2017)07-0092-06

Direct-Drive Permanent Magnet Synchronous Generator Wind Turbine System Based on Fractional-Order Controller^{*}

ZHOU Xiaozhuang, WANG Xiaohong, HOANG THI THU GIANG
(College of Automation Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In order to achieve high-performance of the control system, fractional-order PI^λ controller was applied to direct-drive permanent magnet synchronous generation (PMSG) wind turbine systems. Focused on the fractional-order PI^λ controller parameters design method of system mentioned above. Through the system simulation and comparative analysis, the result showed that the fractional-order PI^λ controller system had faster response speed and higher power output performance than the integer-order one. The fractional-order PI^λ controller system had certain development potential and practical value in PMSG wind turbine systems.

Key words: fractional-order; permanent magnet synchronous motor; wind power generation; maximum power point tracking

0 引言

在工业控制中, PID 控制凭借原理简单、使用方便和适应性强等优点一直占据主导地位。但如果要实现系统的高性能控制, 经典的 PID 控制(整数阶 PI 控制)就难以实现控制的目标要求。在此背景下, 高性能的控制策略成为了研究热点

之一。为提高系统控制品质, 近年来, 分数阶控制器的研究应用吸引了越来越多的关注。在控制领域, 可考虑用分数阶控制器来设计整数阶控制对象, 从而进一步提高系统的控制性能。分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 控制器, 比经典的 PID 控制器具有更好的控制性能, 这是因为引入了额外的两个参数 λ 和 μ , 控制器增加了两个自由度, 其对调节系统性能

^{*} 基金项目: 广东省教育部产学研结合项目(2012B091100299); 广东省教育厅科技创新重点项目(2012CXZD0008); 广东省高等学校学科与专业建设专项资金(粤财教 2010-275); 广州市番禺区科技攻关项目(2010-Z-12-04; 2011-Z-02-415)

作者简介: 周小壮(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为自动控制应用。

王孝洪(1976—), 男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电力电子技术及其应用。

HOANG THI THU GIANG(1982—), 女, 博士研究生, 研究方向为电力电子技术及其应用。

起到了十分重要的作用^[1], 当 $\mu=0$ 时, 即成为分数阶 PI^λ 控制器, 是 $PI^\lambda D^\mu$ 控制器的一种特殊形式。

本文以永磁同步风力发电系统作为控制目标, 研究分数阶 PI^λ 控制策略。将三相永磁同步发电机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSG) 作为控制对象, 基于分数阶 PI^λ 控制, 研究该系统的最大功率跟踪 (Maximum Power Point Tracking, MPPT) 性能。为了公平地评价分数阶控制器的控制性能, 与按照工程整定方法设计的整数阶 PI 控制器系统的性能进行比较, 并进行对比分析, 验证设计的有效性。

1 直驱型永磁同步风力发电控制系统构成

直驱型永磁同步风力发电系统的功率主电路采用双 PWM 变流器, 如图 1 所示。机侧通过整流器连接 PMSG 及风机, 网侧通过逆变器和电抗器直接连接到电网。系统通过控制机侧变流器实现 PMSG MPPT, 通过控制网侧变流器实现直流母线电压稳定及网侧的单位功率因数控制^[2], 本文主要研究机侧变流器的控制策略。图 2 为控制系统原理框图, 对永磁同步电机采用矢量控制策略。其中, U_a, U_b, U_c 表示机侧定子各相电压, I_a, I_b, I_c 为机侧各相电流, 三相电压与电流通过霍尔传感器采样得到。将相电压和相电流进行 Clarke 变换得到 $U_\alpha, U_\beta, I_\alpha, I_\beta$, 将 $U_\alpha, U_\beta, I_\alpha, I_\beta$ 进行 Park 变换得到 U_d, U_q, I_d, I_q 。对 I_d, I_q 进行调节并且解耦后得到 U_d^*, U_q^* 。对 U_d^*, U_q^* 进行 Park 反变换得到 U_α^*, U_β^* 。 U_α^*, U_β^* 通过空间矢量调制 (Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM) 得到开关器件的控制信号。滑模观测器 (Sliding Mode Observer, SMO) 通过观测定子电压电流信息得到转子位置 θ 和电转速 ω 信号。永磁同步电机在 dq 坐标系下的电压方程为^[3]

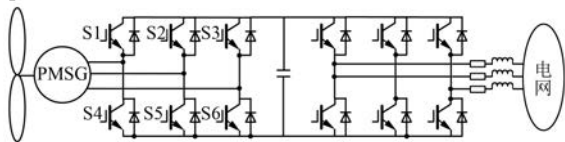


图 1 直驱永磁同步风力发电控制系统拓扑结构

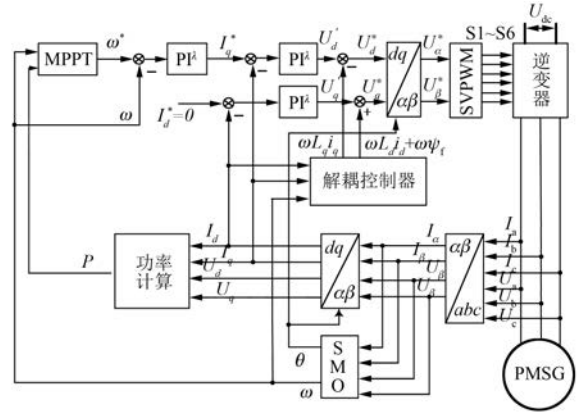


图 2 PMSG 风力发电控制系统控制原理框图

$$\begin{cases} L_d \frac{di_d}{dt} = u_d - R_s i_d + \omega L_q i_q \\ L_q \frac{di_q}{dt} = u_q - R_s i_q - \omega L_d i_d - \omega \psi_f \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)知 i_d 和 i_q 之间存在耦合, 需进行电流解耦控制, 令

$$\begin{cases} u'_d = u_d + \omega L_q i_q \\ u'_q = u_q - \omega L_d i_d - \omega \psi_f \end{cases} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)式, 得

$$\begin{cases} L_d \frac{di_d}{dt} + R_s i_d = u'_d \\ L_q \frac{di_q}{dt} + R_s i_q = u'_q \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)得 i_d 和 i_q 是解耦的, 解耦后可以方便设计控制器, 可将 u'_d 和 u'_q 作为电流环控制器的输出, 然后再结合式(2), 求得实际的电压给定量 u_d^* 与 u_q^* 。

2 分数阶 PI^λ 控制器参数设计

分数阶 PI^λ 控制器的一般形式为

$$C(s) = \frac{U_c(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{K_i}{s^\lambda} \right) \quad \lambda \in (0 \sim 1) \quad (4)$$

当 $\lambda=1$ 时, 即成为经典的整数阶 PI 控制器。

针对永磁同步电机的数学模型, 电流内环可等效为一惯性环节:

$$G_s(j\omega) = \frac{K}{T_s s + 1}$$

对于转速外环, 可等效为 I 型系统:

$$G_s(j\omega) = \frac{K'}{s(T's + 1)}$$

系统开环传递函数为

$$G_k(s) = C(s)G_s(s) \quad (5)$$

设系统开环传递函数的截止频率 ω_c 、相位裕度 φ_m 均已知, 以电流环为例, 为了得到良好的系统稳定性和鲁棒性, 由截止频率和相位裕度出发, 应满足以下三个原则^[5]:

$$\arg[G_k(j\omega)] = \arg[C(j\omega)G_s(j\omega)] = -\pi + \varphi_m \quad (6)$$

$$\frac{d\{\arg[C(j\omega)G_s(j\omega)]\}}{d\omega} = 0 \quad (7)$$

$$|G_k(j\omega_c)| = |C(j\omega_c)G_s(j\omega_c)| = 1 \quad (8)$$

FO-PI 控制器的频率响应为

$$C(j\omega) = K_p \left[1 + \frac{K_i}{\omega^\lambda} \cos\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right) - j \frac{K_i}{\omega^\lambda} \sin\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right) \right] \quad (9)$$

其幅值特性和相位特性表示为

$$\begin{aligned} \arg[C(j\omega)] &= -\arctan \frac{\frac{K_i}{\omega^\lambda} \sin\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right)}{1 + \frac{K_i}{\omega^\lambda} \cos\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right)} \\ |C(j\omega)| &= K_p \sqrt{\left[1 + \frac{K_i}{\omega^\lambda} \cos\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right) \right]^2 + \left[\frac{K_i}{\omega^\lambda} \sin\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right) \right]^2} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{以电流环为例, 根据准则一式(6), 有:} \\ \arg[G_k(j\omega_c)] = \arg[C(j\omega_c)G_s(j\omega_c)] = \\ \arg[C(j\omega_c)] + \arg[G_s(j\omega_c)] = \\ -\arctan \frac{\frac{K_i}{\omega_c^\lambda} \sin\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right)}{1 + \frac{K_i}{\omega_c^\lambda} \cos\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right)} - \arctan(\omega_c T) = \\ \varphi_m - \pi \end{aligned} \quad (12)$$

根据准则二式(7), 有:

$$\begin{aligned} \frac{d\{\arg[G_k(j\omega)]\}}{d\omega} \bigg|_{\omega=\omega_c} = \\ \frac{\lambda K_i \omega_c^{\lambda-1} \sin\left(\frac{\lambda\pi}{2}\right)}{\omega_c^{2\lambda} + 2K_i \omega_c^\lambda \cos\left(\frac{\lambda\pi}{2}\right) + K_i^2} - \frac{T}{1 + (T\omega_c)^2} = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

根据准则三式(8), 有:

$$\begin{aligned} K_p \sqrt{\left[1 + \frac{K_i}{\omega_c^\lambda} \cos\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right) \right]^2 + \left[\frac{K_i}{\omega_c^\lambda} \sin\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right) \right]^2} \cdot \\ \frac{K}{\sqrt{1 + (\omega_c T)^2}} = 1 \end{aligned} \quad (14)$$

因此可根据式(12)~式(14)来确定 K_i 、 λ 、 K_p 三个参数。

由式(3)解耦后可分别设计电流环和转速环的 PI^λ 控制策略。

系统包含 i_d 和 i_q 两个电流环。由于本文采用的是隐极型永磁同步电机, 电感 $L_d = L_q$, 因此它们的控制对象参数相同, 对 i_d 和 i_q 可采用相同的分数阶 PI^λ 控制参数, 如图3所示, 其中具体控制规律为

$$\begin{cases} u'_d = k_{pi} \left(1 + \frac{k_{ii}}{s^{\lambda_i}} \right) (i_d^* - i_d) \\ u'_q = k_{pi} \left(1 + \frac{k_{ii}}{s^{\lambda_i}} \right) (i_q^* - i_q) \end{cases} \quad (15)$$

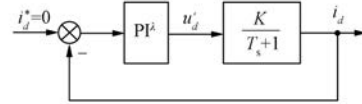


图3 电流 i_d 控制原理图

图3中 $K = 1/R_s$, $T = L_q/R_s$ 。

同理对转速外环(见图4)的分数阶 PI^λ 控制规律为 $i_q^* = k_{pn} \left(1 + \frac{k_{in}}{s^{\lambda_n}} \right) (\omega^* - \omega)$

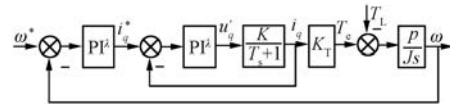


图4 转速环控制原理图

转速环通过 PI^λ 调节得到参考电流 i_q^* 。机侧采用 $i_d = 0$ 磁场定向控制, 电磁力矩和电枢电流成线性关系, 无去磁效应, 控制效率高。通过对电流 i_q 的控制, 实现对 PMSG 输出电磁转矩的控制。

本文采用的永磁同步电机参数如下: 定子电阻 $R_s = 3 \Omega$, 电感 $L_d = L_q = 40 \text{ mH}$, 永磁体磁链 $\psi_f = 0.53 \text{ Wb}$, 极对数 $p = 24$, 转矩系数 $K_T = 1.5 p\psi_f$ 。设定系统截止频率 $\omega_c = 100 \text{ rad/s}$, 相位裕度 $\varphi_m = 160^\circ$, 由上述算法得到电流环参数 $K_{pi} = 5.5$, $K_{ii} =$

35, $\lambda_i = 0.8$ 。作出分数阶 PI^λ 控制器下的系统开环 bode 图如图 5 所示。由 bode 图可知, 系统在 ω_c 处的相位达到极大值, 符合准则二中的鲁棒性要求。

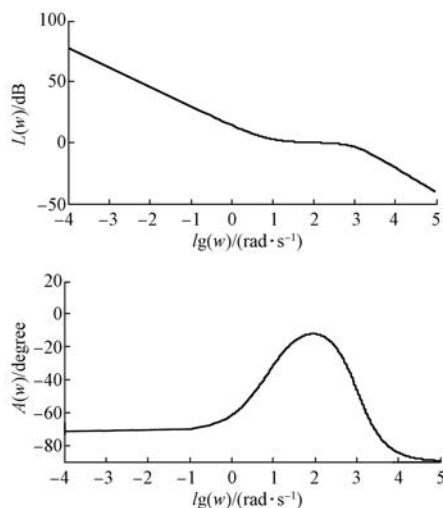


图5 电流环系统开环 bode 图

由以上设计方法, 可先进行电流内环的参数整定, 再进行速度外环的参数整定。

3 MPPT 设计

为了实现最大功率跟踪的目标, 通过判断功率 P 及转速 ω 的增量方向输出转速给定 ω^* [6-9]。整个系统采用功率环、速度环及电流环三闭环控制策略。功率环根据爬山算法输出设定转速, 转速环用于实现转速跟踪, 电流内环根据转速外环的输出指令完成对电流的控制。

根据风机的运转特性可知, 在一定风速 v 下, 风机输出功率 P 取决于风能利用系数 C_p , 在不同的风速下, 只有控制风机转速 n 满足叶尖速比 $\lambda = \lambda_{opt}$, 则 $C_p(\lambda) = C_{pmax}$, 此时可得到不同风速下的最大功率 [10]。功率曲线如图 6 所示。

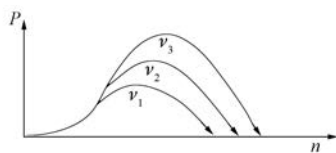


图6 风机特性曲线 ($v_1 < v_2 < v_3$)

本文采用爬山算法来实现最大输出功率跟踪, 如图 7 所示。爬山算法通过对转速给定 ω^* 进行调

整, 以寻找最佳转速, 然后通过转速控制外环跟踪最佳转速设定值, 从而输出最大功率。该算法需要测量功率及转速, 从而输出转速控制指令。

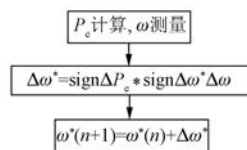


图7 爬山算法示意图

图 7 中功率 $P_e = 1.5(U_d I_d + U_q I_q)$, sign 为符号函数。

如图 6 所示, 当转速增加, 输出功率跟着增加时, 可进一步调大转速给定; 当转速增加但输出功率减少时, 对转速进行反方向调整。基于爬山法的功率跟踪会使转速输出在最大功率点附近抖动。可通过调整转速变化步长 $\Delta\omega$, 减少转速抖动, 以此来实现最佳效果。

4 系统仿真分析

在 MATLAB/Simulink 环境下进行仿真, 检验分数阶 PI^λ 的控制效果。

系统电流环分数阶控制器仿真框图如图 8 所示。

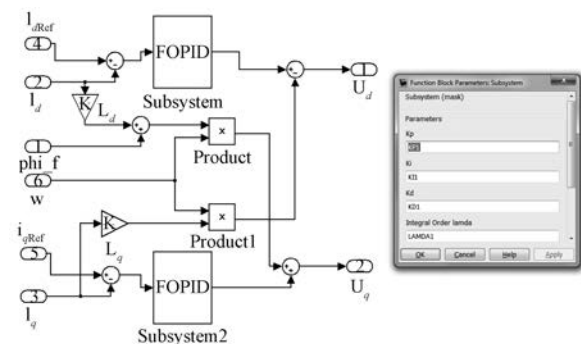


图8 电流环分数阶控制器

为了测试分数阶控制器的效果, 仿真中, 观察电机的相电流波形如图 9 所示。可见电机在 0.05 s 内即达到稳定状态, 起动速度快, 在 $t = 0.15$ s 时突加负载 (50 N·m), 电流在 0.01 s 内到达新的稳定状态, 抗扰动性明显, 电流调节能力强。

为了进一步检验分数阶 PI^λ 控制发电系统的性能, 分别在风速不变和风速变化的情况下进行对比仿真试验, 观察系统的发电功率输出和转速给定信号。

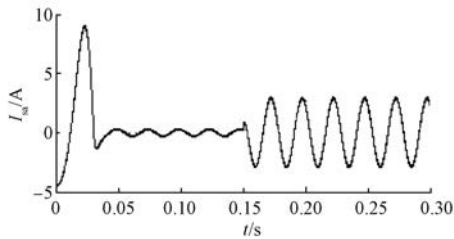


图9 电机起动和突加负载时的相电流波形

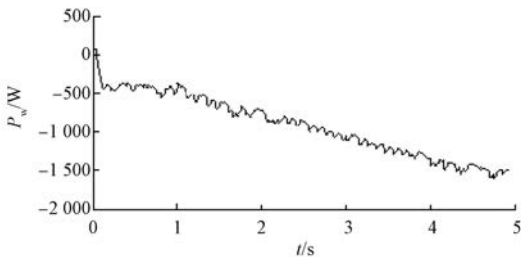


图12 风速变化时分数阶PI^λ控制系统功率输出

当模拟风速保持 12 m/s 恒定不变时,分数阶PI^λ控制发电系统功率输出 P_w 曲线和转速给定 ω^* 曲线分别如图 10、图 11 所示。

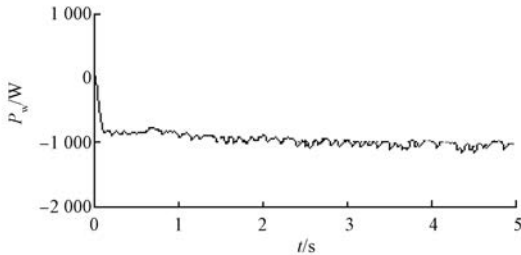


图10 风速不变时分数阶PI^λ控制系统功率输出

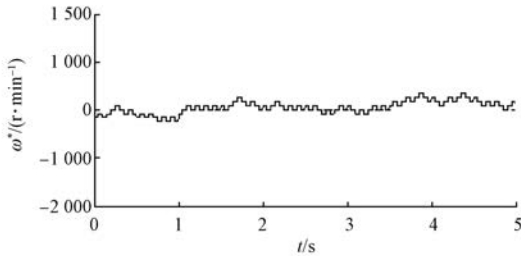


图11 风速不变时分数阶PI^λ控制系统转速给定

由图 11 可知最大功率输出约为 1 000 W,系统的跟踪时间为 2.5 s,同时,分数阶控制系统输出功率平稳。对应最大功率输出的转速给定 ω_m^* 约为 550 r/min,分数阶系统波动较小,最大波动约为 150 r/min,系统抖动较小。

当模拟风速 5 m/s 增大到 15 m/s(从 $t=1$ s 开始增大)时,系统响应曲线分别如图 12、图 13 所示。

在风速突变瞬间($t=1$ s),系统的功率输出和转速给定波动较小,仅为 50 W 和 50 r/min,随着风速的加大,分数阶系统的输出一直较为平滑,显然,在风速变化等扰动较大的情况,分数阶系统的

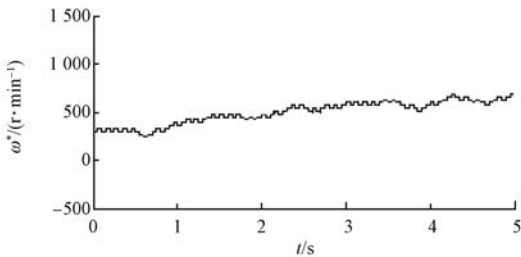


图13 风速变化时分数阶PI^λ控制系统转速给定

鲁棒性较强。

分数阶控制系统不仅响应速度快,转速和功率抖动小,而且面对风速变化情况,能较好地结合 MPPT 模块实现最大功率输出,系统整体输出效能佳,系统鲁棒性强。

5 系统试验

为了检验发电系统的性能,对系统进行发电试验。图 14 为电机的定子电流与滑模观测器的位置角输出波形,可见定子电流稳定,谐波分量极小,分数阶电流控制器控制效果良好。图 15 为发电状态下的电网电压与电流波形图。由图 15 可知,电压与电流反相,发电功率约为 2 000 W,尽管此时功率不是太大(额定功率为 3 500 W),但是电流正弦度仍然较高,可见尽管在低功率情况下系统仍然具有高性能的电流控制效果。

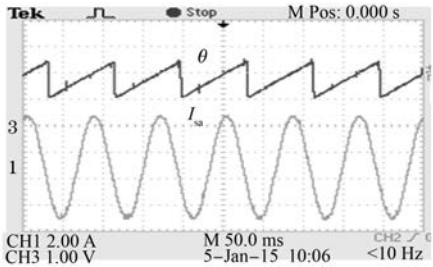


图14 发电状态下电机定子电流与位置角

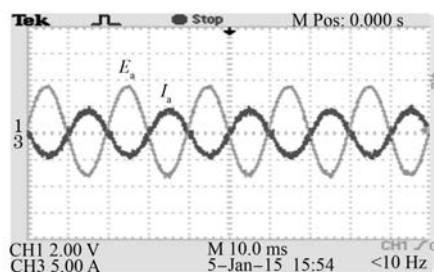


图 15 发电状态下电网电压电流波形

6 结 语

针对直驱型永磁同步风力发电系统,本文设计了基于分数阶 PI^λ 的电流与速度控制器,并进行系统仿真分析与试验。研究表明,基于分数阶的控制系统具有较快的响应速度,基于 MPPT 时间短,转速给定抖动小,电流控制效果较好,系统的整体性能较高。分数阶 PI^λ 控制器适合于高性能永磁同步风力发电系统,具有一定的实用价值。

【参 考 文 献】

- [1] 薛定宇,赵春娜.分数阶系统的分数阶 PID 控制器设计[J].控制理论与应用,2007,24(5): 771-776.

- [2] 周奕鑫,王孝洪,田联房.双 PWM 永磁同步风力发电控制器设计[J].电气传动,2014,44(7): 24-29.
- [3] 陈伯时.电力拖动自动控制系统—运动控制系统[M].3 版,北京:机械工业出版社,2009.
- [4] LI H S, LUO Y, CHEN Y Q. A fractional order proportional and derivative (FOPD) motion controller: tuning rule and experiments [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2010, 18 (2) : 516-520.
- [5] 张碧陶,皮佑国.基于分数阶滑模控制技术的永磁同步电机控制[J].控制理论与应用,2012,29(9): 1193-1197.
- [6] 赵慧敏,李文,邓武.一类分数阶滤波器逼近阶次的选择[J].电机与控制学报,2010,14(1): 90-94.
- [7] CHEN Y Q. A new discretization method for fractional order differentiators via continued fraction expansion [C] // 2003 ASME International Design Engineering Technical Conferences, Chicago, USA, 2003: 1-9.
- [8] 曹军义,曹秉刚.分数阶控制器的数字实现及其特性[J].控制理论与应用,2006,23(5): 791-794.
- [9] 白晶.分数阶模型的离散化方法研究[D].大连:大连交通大学,2009.
- [10] WU B, LANG Y Q, ZARGARI N, 等.风力发电系统的功率变换与控制[M].北京:机械工业出版社,2012.

收稿日期: 2016 -11 -09

(上接第 75 页)

【参 考 文 献】

- [1] 郭新华,温旭辉,赵峰,等.基于电磁转矩反馈补偿的永磁同步电机新型 IP 速度控制器[J].中国电机工程学报,2010,30(27): 7-13.
- [2] 黄科元,周滔滔,黄守道,等.永磁伺服系统基于微分自适应补偿的快速无超调控制策略[J].电工技术学报,2014,29(9): 137-144.
- [3] 王玲芝.改进的永磁同步电机直接转矩控制系统仿真实现[J].电力系统保护与控制,2009,37(19): 65-68.
- [4] 苏玉刚,徐健,谢诗云,等.电场耦合型无线电能传输系统调谐技术[J].电工技术学报,2013,28(11): 189-194.
- [5] 梁骄雁,胡育文,鲁文其.永磁交流伺服系统的抗扰动自适应控制[J].电工技术学报,2011,26(10): 174-180.
- [6] 刘颖,周波,方斯琛.基于新型扰动观测器的永磁同

- 步电机滑模控制[J].中国电机工程学报,2010,30(9): 80-85.
- [7] 李玲玲,朱芬芬,姚致清,等.基于可信度的可靠性度量云模型[J].电力系统保护与控制,2012,40(8): 90-94.
- [8] 王伟华,肖曦.永磁同步电机高动态响应电流控制方法研究[J].中国电机工程学报,2013,33(21): 117-123.
- [9] 陆文斌,姚文熙,吕征宇.基于改进闭环磁链观测器的感应电机无速度矢量控制[J].电工技术学报,2013,28(3): 148-153.
- [10] 刘家曦,李立毅.考虑磁场交叉耦合的内嵌式永磁同步电机初始位置检测技术[J].电工技术学报,2013,28(7): 32-38.
- [11] 张治俊,李辉,张煦,等.基于单/双同步坐标系的软件锁相环建模和仿真[J].电力系统保护与控制,2011,39(11): 138-144.

收稿日期: 2016 -10 -21