DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2020.02.047

基于 Simulink 的三相异步电动机直接转矩控制系统研究

王旭,唐敦兵,郑杜,傅胜军,王仕存,张区委
(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘　要:基于直接转矩控制工作原理,利用 Simulink 搭建三相异步电动机直接转矩控制系统仿真模型,采用定子磁链轨迹近似圆形的控制方案,对系统进行仿真。仿真结果表明,该直接转矩控制系统仿真模型能够很好地模拟实际调速系统的相关性能,体现了更优越的静动态性能。此外,通过搭建实际调速系统,测量电机转速、转矩参数,验证了仿真模型的有效性。

关键词:三相异步电动机;直接转矩控制;Simulink
中图分类号:TM343　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1671-5276(2020)02-0195-04

Research on Triple-phase Asynchronous Motor Direct Torque Control System Based on Simulink

WANG Xu, TANG Dunbing, ZHENG Du, FU Shengjun, WANG Shicun, ZHANG Quwei
(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Based on the principle of direct torque control, a DTC system model of triple-phase asynchronous motor is constructed with Simulink. And the control scheme making the track of stator flux approximate circle is used to make the simulation analysis of the system. The simulation results show that the DTC system model of triple-phase asynchronous motor can be used to simulate the performance of the real speed regulation system well, and the better dynamic and static properties of the designed system are showed. Besides, the validity of the simulation model is verified by structuring the actual speed regulation system used to measure speed and torque parameters.

Keywords: triple-phase asynchronous motor; direct torque control; Simulink

0　引言

直接转矩控制是继矢量控制之后发展起来的一种高性能交流变频调速技术,由德国学者 M. Depenbrock 于 1985 年首次提出[1]。目前对于直接转矩的研究主要集中在磁链观测模型、转矩脉动以及无速度传感器的研究,且大多采用开关选择表的方法,缺点在于无法控制开关管的导通时间,导致定子磁链存在畸变问题。

本文通过搭建定子磁链 $u-n$ 观测模型,采用定子磁链轨迹近似圆形的方案[2],利用转矩、磁链双闭环控制,保证定子磁链的稳定性和快速性。本文阐述了控制系统的设计思路,基于 Simulink 采用模块化设计,搭建了异步电动机直接转矩控制系统仿真模型,对变速和突变负载两种工况下的定子磁链、电磁转矩、定子电流等参数进行仿真分析,结果验证了系统的可靠性,为实际调速系统的设计与应用提供理论依据。最后,通过设计实际调速系统检测相同工况下的对应参数实验数据,并将其应用在实际设备控制中,进一步验证了本文所设计 DTC 系统的有效性。

1　直接转矩控制系统工作原理

1.1　异步电动机的数学模型

理想条件下,电机在 $\alpha-\beta$ 系下的数学模型为:

$$\boldsymbol{\varphi}_s = \int(\boldsymbol{u}_s - \boldsymbol{i}_s R_s)\,\mathrm{d}t \tag{1}$$

$$\dot{\boldsymbol{\varphi}}_r = \frac{R_r(\boldsymbol{\varphi}_s - \boldsymbol{\varphi}_r)}{L_\sigma} + \omega(\boldsymbol{\varphi}_r) \tag{2}$$

$$T_d = n(\varphi_{s\alpha} i_{s\beta} - \varphi_{s\beta} i_{s\alpha}) \tag{3}$$

式中:$\boldsymbol{\varphi}_s$、$\boldsymbol{\varphi}_r$、$\boldsymbol{u}_s$、$\boldsymbol{i}_s$ 分别为定子磁链、转子磁链、定子电压、定子电流的空间矢量;T_d、R_s、L_σ、ω、n 分别为转矩、定子电阻、漏电感、电角速度、极对数。

1.2　DTC 系统基本原理

DTC 系统采用双闭环控制,通过检测定子电流与电压进行磁链、转矩观测,后经调节器生成调节信号,结合磁链区间判断单元为开关表提供参考依据,控制逆变器的开关状态[3],从而驱动异步电动机。

基金项目:江苏省产学研合作前瞻性联合研究项目(BY2016003-07)
第一作者简介:王旭(1993—),男,安徽阜阳人,硕士研究生,研究方向为机电控制及其自动化。

2　直接转矩控制系统的仿真模型

本控制系统按功能分为 3 大模块:控制模块、逆变模块和电机模块。基于总分总建模思路,利用 Simulink SimPowerSystems模型库设计子系统,采用封装技术封装功能模块[4]。其仿真模型如图 1 所示。

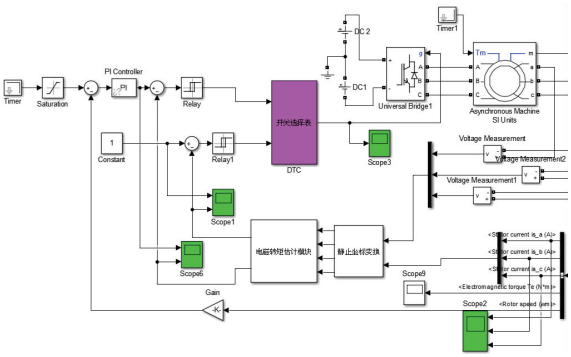


图 1　异步电动机直接转矩控制系统仿真模型

2.1　磁链和转矩观测模块

电机高速运转时,由式(1)可知,$\boldsymbol{u}_s-\boldsymbol{i}_s R_s$ 定子压降影响可忽略不计,可采用 $u-i$ 模型确定定子磁链。电机低速运转时,定子压降引起误差较大[5],无法忽略,只能根据转速来确定定子磁链,可采用 $i-n$ 模型。则:

$$\boldsymbol{\varphi}_s=\frac{(\boldsymbol{i}_s L_\sigma+\boldsymbol{\varphi}_r)}{(1+L_\sigma/L)} \tag{4}$$

为保证观测精度,系统采用 $u-n$ 模型[6]。依据式(1)-式(4)建立磁链、转矩观测模块,定子磁链 $u-n$ 模型展开如图 2 所示。

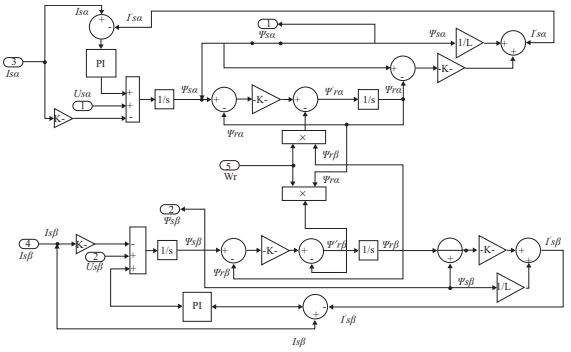


图 2　定子磁链模型

2.2　磁链和转矩调节模块

磁链调节器采用 Bang-Bang 调节[7],如图 3 所示。

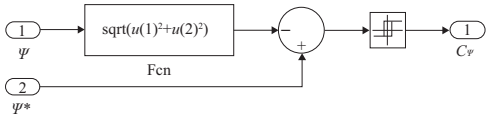


图 3　磁链调节模型

转矩调节模块采用三值比较器,即 2 个施密特触发器,如图 4 所示。

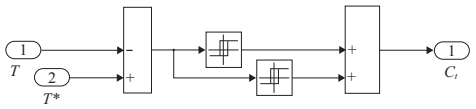


图 4　转矩调节模型

2.3　磁链区间判断单元

磁链区间判断单元模型如图 5 所示,以定子磁链与 $\alpha\beta$ 轴上投影分量的夹角为基础,具体通过创建定子绕组轴线 β_{abc} 坐标系,以定子磁链 $\boldsymbol{\varphi}_s$ 在各坐标系轴上投影分量作为模型输入值,经过正负比较和逻辑运算输出磁链所在扇区编号[8]。

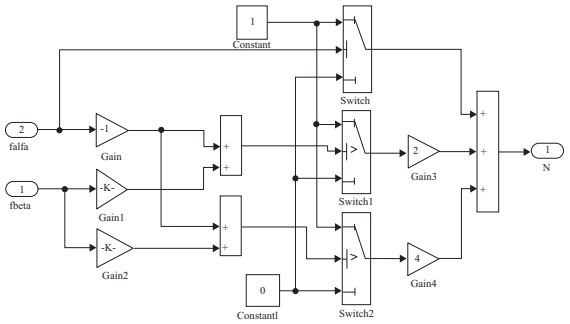


图 5　磁链区间判断单元模型

运算结果与磁链区间关系如表 1 所示。

表 1　运算结果与磁链区间关系

输出	磁链区	输出	磁链区
4	S_1	3	S_4
6	S_2	1	S_5
2	S_3	5	S_6

2.4　单元开关信号选择单元

假设定子磁链 $\boldsymbol{\varphi}_s$ 所在区间为 S_2,磁链逆时针旋转方向为正。电压矢量 $\boldsymbol{u}_4$ 可减小定子磁链幅值,提高旋转速度,增大转矩[9]。由此,当定子磁链位于不同扇区时可选取 4 个空间电压矢量的组合进行磁链、转矩调节[10]。

依据磁链、转矩调节模块、磁链区间判断单元的输出信号,利用 Simulink 中的 Table 模块建立空间电压矢量开关状态表,如表 2 所示。控制系统通过查表方式选择电压矢量[11],实现异步电动机控制。

表 2　空间电压矢量开关状态

C_Ψ	C_t	区间					
		S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
0	-1	101	100	110	010	011	001
	0	000	111	000	111	000	111
	1	001	101	100	110	010	011
1	-1	110	010	011	001	101	000
	0	111	000	111	000	111	000
	1	010	011	001	101	100	110

3　仿真结果分析与实例验证

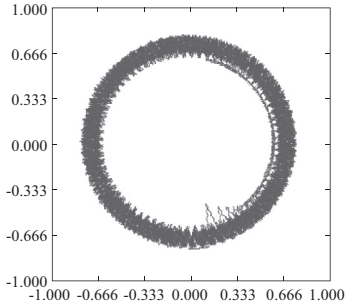
3.1　仿真结果与分析

仿真电机参数:额定功率 $P_N = 7.5\,\text{kW}$,额定线电压 $U = 380\,\text{V}$,额定电流 $I_N = 13.4\,\text{A}$,极对数 $n_p = 2$,额定转速 $n_s = 1\,500\,\text{r/min}$,定子电阻 $R_s = 0.095\,\Omega$,转子电阻 $R_r = 0.074\,\Omega$,定子电感 $L_s = 0.004\,987\,\text{H}$,转子电感 $L_r = 0.005\,513\,\text{H}$,定转子互电感 $L_m = 0.124\,1\,\text{H}$,转动惯量 $J = 0.063\,\text{kg}\cdot\text{m}^2$。

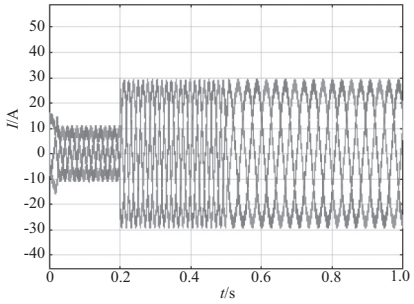
仿真控制参数:定子磁链幅值给定值 $\psi^* = 1\,\text{Wb}$,磁链调节容差为 $\epsilon_1 = \pm 0.01\,\text{Wb}$,转矩调节容差 $\epsilon_2 = \pm 1\,\text{N}\cdot\text{m}$。

仿真工况:负载转矩给定值在 $0 \leqslant t \leqslant 0.2\,\text{s}$ 时为 30 N·m,$t \geqslant 0.2\,\text{s}$ 时为 90 N·m。速度给定值 $0 \leqslant t \leqslant 0.2\,\text{s}$ 为 1 500 r/min,0.5 s 时将转速设定为 750 r/min。仿真结果如图 6 所示。

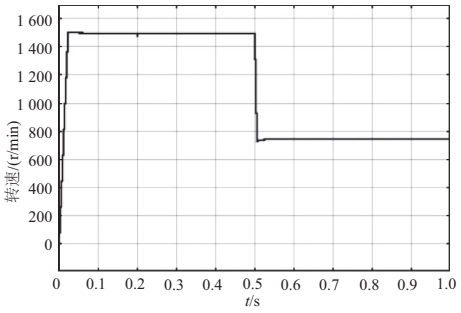
图 6(a)为电机恒速运转状况下的定子磁链轨迹,由图可知轨迹近似圆形。磁链幅值虽有波动,但在动静调节中始终保持在容差 1 Wb 之内,可见采用定子磁链轨迹近似圆形的方案可大大改善磁链轨迹畸变问题。



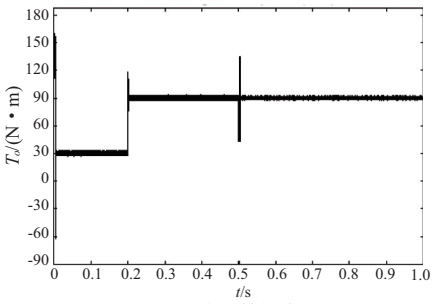
(a) 定子磁链轨迹



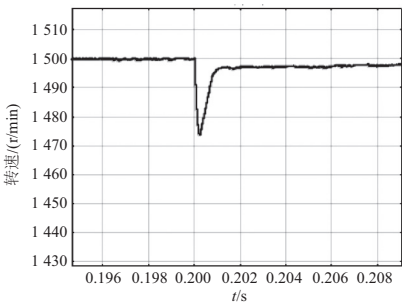
(b) 三相电流波形



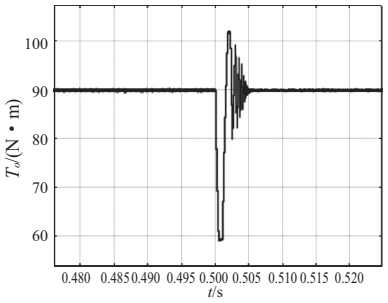
(c) 转速波形



(d) 电磁转矩波形



(e) 突加负载转速局部放大图



(f) 切变速下的转矩局部放大图

图 6　仿真结果

由图 6(b)定子电流波形图可知,电流波形稳定无畸变现象。加载瞬间电流快速上升以满足负载转矩需求,无过载情况。调速过程中,电流幅值稳定无干扰,从而保证电磁转矩恒定。

由图 6(c)-图 6(d)可知,直接转矩控制系统对于转速突变和负载突变两种工况有较快的响应速度,且超调量较小,既保证了动态响应的快速性,又保证了静态时的稳定性,转速、转矩波动均控制在系统设定允许的容差范围之内。

图 6(e)详细展示了负载突变瞬间,由于系统的自动调节,转速虽有波动,但快速恢复为原有给定值,表明系统动态性能较好。图 6(f)详细展示了转速突变瞬间,转矩虽有较大波动,但经滞环比较调节将转速差值 Δn 限制在较小容差范围内。可见设置滞环比较器较小容差能够降低系统转矩调节时间,并提高实际系统转矩的稳定性。

3.2　实例验证

依据前述直接转矩控制系统的理论研究,搭建实际调速系统进行实例验证,如图 7 所示,其示意图如图 8 所示。实际调速系统由 S7-200PLC、C2000 变频器、三相异步电动机、齿辊破碎机、T10F 转矩传感器等组成。其中上位机

实现直接转矩控制算法,应用变频器实现变频调速。PLC 通过采集 T10F 转矩传感器模拟量或频率信号,实现电机转矩、转速检测[12]。

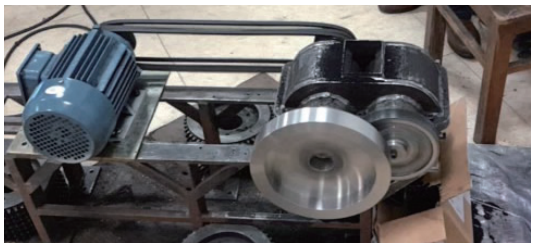


图 7　实际调速系统

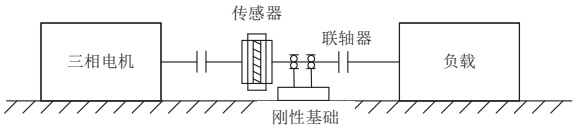
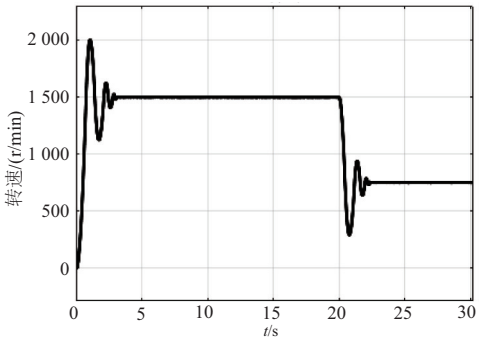


图 8　实际调速系统示意图

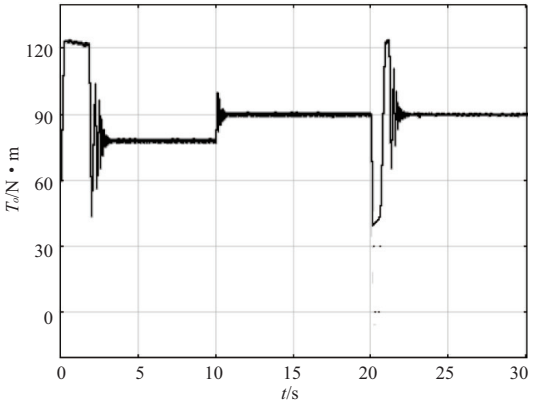
实际工况:三相电机以 1 500 r/min 的运转速度启动,到达指定速度后突变负载 30 N·m。10 s 后调整电机转速为 750 r/min。

实际调速系统数据获取:通过 PLC 周期性采集的转矩模拟量信号和速度脉冲信号,实现实际工况过程数据的提取。根据提取到的实际调速系统的数据处理得到如图 9 所示的过程曲线。由图 9(a)可知,电机启动瞬间,转速快速上升到指定转速 1 500 r/min,突变负载瞬间转速波动性小,验证了实际调速直接转矩控制系统的高静、动态性能。由图 9(b)可知,启动瞬间由于实际系统中电机转动惯量大,且存在破碎机固有负载转矩,电机转矩曲线波动性较大,相对于仿真调速系统有较长的调节周期。突变负载瞬间由于直接转矩的调节,系统有较快的响应速度,快速到达给定负载转矩,且超调量较小。变速瞬间由于破碎机惯性较大,使得转矩有所波动,但经短暂调整后依然保持在给定负载转矩。

根据上述直接转矩控制系统的理论研究以及搭建实际调速系统进行的实例验证,将直接转矩控制系统运用到某公司的煤样制备系统(以下简称制样系统)中,再次验证本文设计的直接转矩控制系统的可行性。制样系统中主要由一、二级齿辊破碎机、三级研磨机、缩分设备、干燥设备和控制柜等组成。其实物图如图 10 所示。

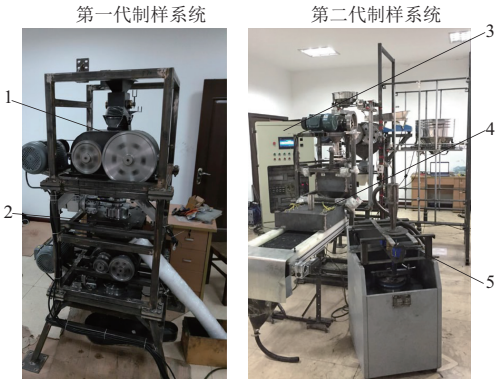


(a) 转速曲线



(b) 转矩曲线

图 9　实际调速系统过程数据曲线



1—齿辊破碎机;2—缩分设备;3—控制柜;
4—干燥设备;5—三级研磨机。

图 10　制样系统实物图

经过检测,煤样制备系统满足规定的技术指标,同时一、二级齿辊破碎机和三级研磨机运用直接转矩控制后,控制效果稳定,达到既定的要求。

综上可知,直接转矩控制系统的两个应用实例,均验证了直接转矩控制系统动态响应的快速性和静态时的稳定性,达到了预期控制效果,进一步验证了本文设计的直接转矩控制系统的可行性。

4　结语

本文基于 Simulink 建立了三相异步电动机调速系统控制模型,仿真结果表明本文所设计系统具有响应速度快、突变负载及调速瞬间波动性小,暂态时间短,定子磁链幅值恒定,系统性能受电机参数影响小等优点,分析验证了直接转矩控制系统方案的可行性,对实际调速系统的设计与应用有重要指导作用。但本文控制方法同样存在不足之处,即存在转矩脉动问题,可通过设计较小容差来改善。最后通过搭建实际调速系统和制样,测量电机转矩与电磁转矩参数实验数据,绘制曲线图,并将直接转矩控制系统运用到制样系统中进行实例验证,进一步验证了本文 DTC 系统的优越性与有效性。

(下转第 202 页)

过中心 O 且与直线O_1O_2垂直的直线l_1与椭圆交于P_3、P_4两点,线段P_3P_4即为椭圆的长径,也即沉积锭坯的直径。直线l_0为喷射成形装置收集器初始位置,即加工沉积锭坯表面的初始位置。h_0为沉积锭坯初始位置与喷嘴所在位置的垂直方向的距离。h_i为所求喷射高度,表示锭坯表面的当前位置与喷嘴之间的垂直距离,在图像中即为P_3或P_4任意一点的纵坐标。

3　系统测试

对系统检测精度和系统稳定性进行了测试。本文实验对象为某公司 SFZD500 生产线。喷射对象生产直径为 500 mm,高度为 1 200 mm 的 7055 铝合金沉积锭坯。1 个锭坯的喷射时间约 50 min。

1）在喷射过程中每隔 3 min(检测间隔 60 mm,下拉速度为 20 mm/min)采集 1 次锭坯图像,进行图像处理获得锭坯直径,共记录 20 组数据。然后由人工在相应位置测量锭坯直径。20 组测试结果表明,锭坯直径检测精度达到 1 mm,算法平均运行时间为 0.83 s。

2）进行整个沉积锭坯生产过程的系统测试,采集图像并处理,记录锭坯直径测量结果,图像采集周期为 1 s。在整个检测过程中,系统工作稳定,符合沉积锭坯实际生产情况。

4　结语

本文基于机器视觉技术研究开发了喷射成形沉积锭坯轮廓在线检测系统,实现对喷射成形生产过程中的锭坯轮廓及其形状特征参数的实时、在线检测和处理。在 SFZD500 喷射成形生产线上对开发的系统进行了检测精度测试和系统稳定性测试。测试结果表明,系统检测精度达到 1 mm,算法平均运行时间为 0.83 s,可满足喷射工艺要求。系统能够长时间稳定运行。

参考文献:

[1] SEOK H K , OH K H , RA H Y , et al. A three-dimensional model of the spray forming method[J] . Metallurgical and Materials Transactions, 1998, 29B(3): 699-708.
[2] 曲迎东, 马振涛, 李晨希, 等. 柱状喷射沉积锭坯图像处理法的精确检测[J]. 沈阳工业大学学报,2009, 31(2): 56-60.
[3] 宋红媛. 喷射沉积管坯的形貌模拟及喷射高度的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
[4] 刘腾. 双喷嘴喷射成形锭坯沉积生长机理研究及参数优化[D]. 南京:南京航空航天大学, 2013.
[5] 项森伟. 高温单晶硅液位和直径视觉检测关键技术及应用研究[D]. 杭州:浙江大学,2018.

收稿日期:2019-01-07

(上接第 198 页)

参考文献:

[1] 刘洋, 史黎明, 赵鲁, 等. 一种基于混合型磁链观测器的异步电机直接转矩控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(10): 157-160.
[2] 杨建飞, 胡育文. 永磁同步电机最优直接转矩控制[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(27): 109-115.
[3] 杨金波, 李铁才, 杨贵杰. 一相开路双三相永磁同步电机建模与控制[J]. 电工技术学报, 2011, 26(10): 167-173.
[4] 吕帅帅, 林辉, 马冬麒. 基于最优占空比调制的永磁同步电机直接转矩控制[J]. 电工技术学报, 2015 (S1):35-42.
[5] 刘皓明, 唐俏俏, 朱凌志, 等. 双馈型风电场参与电压无功调节的分层控制方案[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(24):80-85.
[6] 于海,刘英杰.变频器在电厂中的应用及调试[J]. 电气技术, 2008(9): 97-99.
[7] 张亮, 陈国栋, 蔡旭. 新型高压变频器设计[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(4):55-58.
[8] 朱云国, 张兴, 刘淳, 等. 无刷双馈风力发电机的无速度传感器矢量控制技术[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(8): 125-130,136.
[9] 孙国霞, 李啸骢, 蔡义明. 大型变速恒频风电系统的建模与仿真[J]. 电力自动化设备, 2007,27(10): 69-73.
[10] 朱智勇, 余世明, 施金培. 基于模糊 PI 控制的三相异步电机 Simulink 建模与仿真[J]. 机电工程, 2012, (1): 53-57.
[11] 卜文绍, 王少杰, 黄声华. 三相无轴承异步电机的解耦控制系统[J]. 电机与控制学报, 2011, 15(12) : 32-37,43.
[12] 王斌, 王跃, 郭伟, 等. 基于定子磁链降阶状态观测的永磁同步电机无差拍直接转矩控制系统[J]. 电工技术学报, 2014 (3): 160-171,195.

收稿日期:2018-11-27