

同步电机在位置随动系统中跟踪误差的分析与研究

王宏文, 孟立新, 吴红星, 侯美杰

(河北工业大学 控制科学与工程学院, 天津 300130)

摘要:位置随动系统的任务是使被控量按同样规律变化并与输入信号的误差保持在规定范围内。同步电机具有响应快、定位准确特点, 将其作为执行机构, 满足系统要求。在建立位置随动系统的等效数学模型基础上, 考虑到跟踪最终位置过程的不确定性和传统PID控制器超调量大, 调节时间长的缺点, 设计了Fuzzy-LQR-PID控制算法来提高位置跟踪精度, 通过Matlab软件对该算法进行仿真, 并由STEP7编程软件编写程序在自主研发的无头轧制多级传动系统的模拟实验台上进行了实验验证。实验结果表明: 该方法设计的系统控制精度明显提高, 可实现同步电机快速精确地跟踪, 位置跟踪误差小于PID控制算法的1/4, 同时优化了控制输入信号, 有着广阔的应用前景。

关键词:线性二次型调节器; PID控制器; 模糊控制; 跟踪误差; Simulink仿真; STEP7

中图分类号: TP275

文献标识码: A

Analysis and Research on Synchronous Motor Tracking Error in the Position Servo System

WANG Hongwen, MENG Lixin, WU Hongxing, HOU Meijie

(School of Control Science and Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: Position servo system's task is to change controlled variable by the same laws and keep the error of the input signal within a specified range. Synchronous motor with fast response and accurate positioning features, which as an actuator, can meet the system requirements. On the basis of the established "equivalent" mathematical models of the position servo control system, taking into account the uncertainty of the final position of the tracking process and the traditional PID controller has many shortcomings such as large overshoot, long regulation time, presented Fuzzy-LQR-PID control algorithm to improve the tracking accuracy. This arithmetic was simulated by Matlab software. Used STEP7 programming software to complete the design process of Fuzzy-LQR-PID control algorithm, and experiment was carried out on the simulation platform of the endless rolling multi-drive transmission system, which was developed by ourselves. The experimental results show that: the control precision of the system designed by the method is improved significantly, the proposed method can realize synchronous motor quickly and accurately tracking, location tracking error is less than 1/4 of PID control algorithm, while optimizing the control input signal, has broad application prospects.

Key words: linear quadratic regulator(LQR); PID controller; fuzzy control; tracking error; Simulink simulation; STEP7

在随动控制系统中的驱动电机要求具有响应速度快、定位准确、转动惯量小等特点。在本实验台的无头轧制工艺过程中, 当后一根钢坯追赶上一根钢坯的时候, 由同步电机驱动的焊机在两个钢坯对接处进行焊接。为了保证钢坯无头轧制的连续性, 钢坯的焊接必须在移动中自动

完成, 整个过程是一个位置随动系统^[1]。焊机的移动速度与钢坯的轧制速度必须严格同步来减小焊接和轧制钢坯间的机械耦合, 这就对系统的位置跟踪特性提出了较高的要求。

对于PID控制方法, 结构简单, 鲁棒性强, 但闭环动态品质对PID增益的变化太敏感, 难以协

调快速性与稳定性之间的矛盾,很难得到最优控制参数;采用线性二次型调节器(LQR)^[2]可得到状态线性反馈的最优控制规律,以跟踪误差为优化目标,易于构成闭环最优控制。在位置随动系统中,由于焊接过程中被追赶钢坯位置的不确定性,导致焊接过程的位置曲线不稳定,由此提出了一种在基于LQR的PID算法之前加入模糊控制器进行动态补偿的方法。本文通过建立位置随动系统的等效数学模型,分别对PID控制器、Fuzzy-LQR控制器、Fuzzy-LQR-PID控制器进行跟踪误差分析,并通过联合仿真以及在模拟实验台上进行运行验证。

1 位置随动系统的数学模型

焊接过程的位置随动系统主要由位置控制器,位置测量元件,传动系统和执行机构组成。以交流电机作为执行机构,以变频器作为控制与放大装置的机电控制系统,由于变频器为矢量控制型,根据交流传动矢量控制思想,将变频器、同步电机和位置测量元件看成一个被控对象,对于永磁同步电机,转子磁通位置与转子机械位置相同,这样通过检测转子实际位置就可以得知电机转子磁链位置,从而使永磁同步电机的矢量控制比起异步电机的矢量控制大大简化。当 $i_d=0$ 时,从电机端口看,永磁同步电机相当于1台他励直流电机^[3]。当磁通 Φ 一定时,通过改变电枢电压可以实现调速。额定励磁下他励直流电动机的电压平衡方程为

$$u_a(t) = L_a \frac{di_a(t)}{dt} + R_a i_a(t) + E_a(t) \quad (1)$$

忽略黏性摩擦以及弹性转矩,直流电机的转矩平衡方程为

$$T_e(t) = T_L(t) = J \frac{dw(t)}{dt} \quad (2)$$

额定励磁下的电枢反电动势 E_a 和电磁转矩 T_e 分别为

$$E_a(t) = C_e w(t) \quad (3)$$

$$T_e(t) = C_m i_a(t) \quad (4)$$

式中: T_L 为包括电机空载转矩在内的负载转矩; J 为电动机轴上的转动惯量; C_e 为电动机的电动势系数; C_m 为电动机的转矩系数。

$$C_m = \frac{30}{\pi} C_e \quad (5)$$

由式(1)~式(5),电机的相关参数为 $P_N = 1.36 \text{ kW}$; $U_N = 400 \text{ V}$; $I_N = 3.4 \text{ A}$; $n_N = 3\,000 \text{ r/min}$;

$R_a = 94.12 \, \Omega$; $L_a = 0.225 \text{ H}$; $J = 1.89 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$; $C_e = 0.05 \text{ V} \cdot \text{s/rad}$ 。则等效的他励直流电机传递函数为

$$G_1(s) = 0.4777 / (4.2525 \times 10^{-7} s^2 + 1.7788 \times 10^{-4} s + 0.02389) \quad (6)$$

由于实际运行时电机转1圈焊机移动5 mm,则其位置与转速的关系为

$$G(s) = (K_g/s) G_1(s) = (5/60 s) G_1(s)$$

随动系统的动态结构图如图1所示。相应的可得出其传递函数为

$$G(s) = 2.3885 / (2.5515 \times 10^{-5} s^3 + 1.06733 \times 10^{-2} s^2 + 1.4334 s) \quad (7)$$

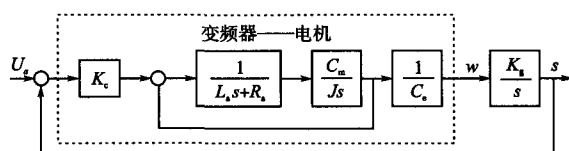


图1 位置随动控制系统的动态结构图

Fig.1 Dynamic structure diagram of location servo control system

2 Fuzzy-LQR-PID控制器的设计

2.1 LQR控制器设计

考虑到式(7)的线性系统,它是可控的或者至少是稳定的,LQR^[4]的基本思想是基于状态方程 $\dot{x} = Ax + Bu$,选定二次型性能指标 $J = \int_0^{\infty} (e^T Q e + u^T R u) dt$,并在选定最优加权矩阵 Q, R 的基础上寻找1个最优的反馈控制规律 $u(t) = Kx(t)$ 的最优反馈增益矩阵 K ,使得在时间区间 $[t_0, \infty]$ 内,将系统从非平衡状态迅速转移到零平衡状态附近。利用庞特里亚金极小值原理,可以使 J 为极小值的最优控制 $u(t) = -R^{-1} B^T P x(t)$,满足Riccati矩阵 $PA + A^T P - PBR^{-1} B^T P + Q = 0$,Matlab提供了较为方便的接口函数来求取Riccati方程,公式为 $[K, P] = lqr(A, B, Q, R)$,其中 A 为系统矩阵, B 为控制矩阵, K 为状态反馈向量, P 为Riccati方程的解, Q, R 为加权矩阵,根据系统要求的跟踪精度和系统的输出功率选定最佳权矩阵^[5]。

2.2 Fuzzy-LQR-PID控制系统

模糊控制可以简化系统设计的复杂性,特别适用于非线性、时变、滞后、模型不完全的系统控制。利用控制法则来描述系统变量间的关系用语言式的模糊变量来描述系统,具有较好的鲁棒性、适应性、强健性及较佳的容错性^[6],充分利用

LQR控制器良好的稳态性能,通过对输入输出信号的误差进行PID控制,又进一步提高了系统的跟踪动态性能,由于钢坯焊接位置曲线的不确定性,将模糊控制器加入到LQR-PID控制器^[7]前对输入信号进行前置滤波^[8],由此提出了Fuzzy-LQR-PID控制算法。由系统的控制要求可知模糊控制器是双输入双输出控制器,以位移 s 和速度 v 为输入信号^[9], u_1 和 u_2 为输出信号。定义量化因子,把 $[-6,6]$ 之间连续变化的量分成用模糊语言表示的不同等级,每个语言变量对应一个模糊集合,用模糊隶属度函数来表示,习惯上正大(PB)取在+6附近;正中(PM)取在+4附近;正小(PS)取在+2附近;零(ZO),取在0附近;负小(NS)取在-2附近;负中(NM)取在-4附近;负大(NB)取在-6附近。模糊隶属度一般定义为三角形形式,其隶属度函数见图2。

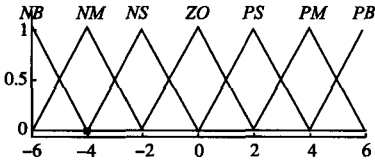


图2 隶属度函数
Fig.2 Membership functions

根据被控对象与控制作用之间的一般变化规律,不同的控制对象的控制规则是变化的。由于不同阶段控制原则,模糊控制器输出信号 u_1 和 u_2 的模糊控制规则见表1和表2。

表 1 模糊规则表 (u_1)

Tab.1 Fuzzy control rule table (u_1)

s	V						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZO	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM
ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB	PB
PB	NO	PS	PM	PB	PB	PB	PB

表 2 模糊规则表 (u_2)

Tab.2 Fuzzy control rule table (u_2)

s	V						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NM	NS	NB	PS	PM	NB
NM	NM	NM	NS	NM	PS	PM	PB
NS	NS	NS	NS	NS	PS	PM	PM
ZO	PB	NS	NS	ZO	PS	PM	PB
PS	PS	NM	NM	PS	PS	PM	PM
PM	PS	PS	PS	PB	PS	PM	PB
PB	NB	PM	PM	PB	PS	PB	PB

3 Matlab仿真与结果分析

在 Matlab 中利用指令“ $[A \ B \ C \ D]=tf2ss$ (num,den)”和“ $k=lqr(A,B,Q,R)$ ”求得式(7)的以下相关矩阵

$$A=\begin{bmatrix} -418 & -561 & 79 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad C=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 936 & 12 \end{bmatrix} \quad B=\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

若取 $R=1 \quad Q=\begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 10 \end{bmatrix}$

可得 $K=[0.012 \ 0 \ 0.023 \ 6 \ 3.162 \ 3]$

由控制仿真图3可得到图4的仿真结果,通

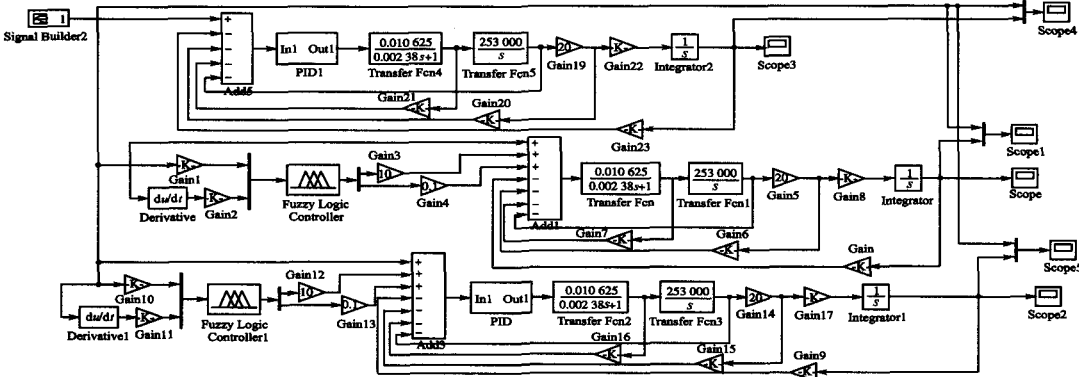


图3 LQR-PID控制、Fuzzy-LQR控制和Fuzzy-LQR-PID控制系统仿真图

Fig.3 LQR-PID control, Fuzzy-LQR control and Fuzzy-LQR-PID control system simulation diagram

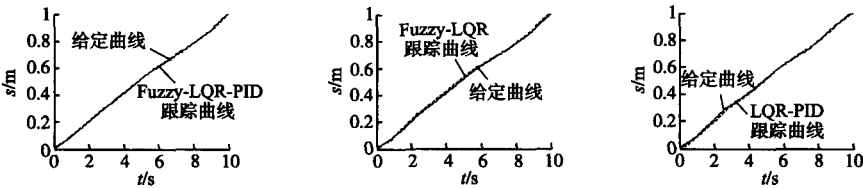


图4 Fuzzy-LQR-PID控制、Fuzzy-LQR控制和LQR-PID控制响应曲线

Fig.4 LQR-PID control, Fuzzy-LQR control and Fuzzy-LQR-PID control response curves

过比较可知Fuzzy-LQR-PID控制的焊机焊接过程的跟踪效果更好。

4 PLC编程并在实验台上进行验证

如图5所示,以S7-400^[10]为核心连接各个模块,其中2台异步电机分别驱动2块钢坯,同步电机驱动焊机,当达到焊接条件时,焊机追踪钢坯完成焊接并通过WINCC组态^[11]软件的人机界面来完成无头轧制模拟实验台的监控任务。在STEP7中完成整个系统的硬件组态和程序设计,逻辑控制和控制策略在西门子S7-400中实现。通过C语言,计算出离线模糊控制查询表见表3、表4。

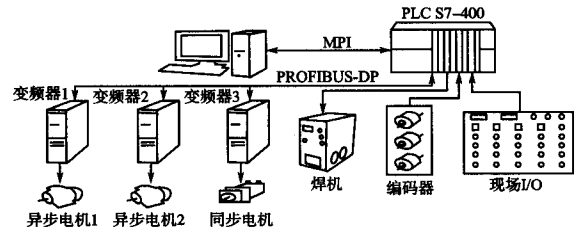


图5 无头轧制模拟实验平台的控制系统分布图
Fig. 5 Distribution diagram of the simulation platform of the endless rolling multi-drive transmission system

表3 模糊规则查询表 (u_1)

Tab.3 Fuzzy rules lookup table (u_1)

s	V												
	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0
-5	-6	-6	-6	-6	-6	-5.5	-5	-4	-3	-2	-1	0	1
-4	-6	-6	-6	-6	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2
-3	-6	-6	-6	-5.5	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3
-2	-6	-6	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
-1	-6	-5.5	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
0	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
1	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	5.5	6
2	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	6	6
3	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	5.5	6	6	6
4	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	6	6	6	6
5	-1	0	1	2	3	4	5	5.5	6	6	6	6	6
6	0	1	2	3	4	5	6	6	6	6	6	6	6

表4 模糊规则查询表 (u_2)

Tab.4 Fuzzy rules lookup table (u_2)

s	V												
	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
-6	-6	-5	-4	-3	-2	-4	-6	-2	2	3	4	-1	-6
-5	-5	-4.5	-4	-3	-2	-3.5	-5	-1.5	2	3	4	2	0
-4	-4	-4	-4	-3	-2	-3	-4	-1	2	3	4	5	6
-3	-3	-3	-3	-2.5	-2	-2.5	-3	-0.5	2	3	4	4.5	5
-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	0	2	3	4	4	4
-1	2	0	-2	-2	-2	-1.5	-1	0.5	2	3	4	4.5	5
0	6	2	-2	-2	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
1	4	0.5	-3	-3	-3	-1	1	1.5	2	3	4	4.5	5
2	2	-1	-4	-4	-4	-1	2	2	2	3	4	4	4
3	2	0.5	-1	-1	-1	1.5	4	3	2	3	4	4.5	5
4	2	2	2	2	2	4	6	4	2	3	4	5	6
5	-2	0.5	3	3	3	4.5	6	5	4	4.5	5	5.5	6
6	-6	-1	4	4	5	6	6	6	6	6	6	6	6

将其存于PLC数据块中并编制1个查询表子程序,每次使用时在子程序中调用即可,本文通过STEP7软件编程实现模糊控制算法^[9]。运行的监控结果见图6~图8。由于本实验台考虑模拟钢坯的宽度为100 mm,焊接最终的误差应该减去100 mm。结果表明Fuzzy-LQR-PID控制在实现钢坯焊机焊接过程中节约10 s左右的时间,跟踪误差在2 mm以内,Fuzzy-LQR跟踪误差在4mm以内,PID控制的跟踪误差在8 mm以内。

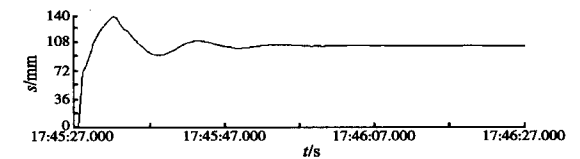


图6 PID控制下的跟踪误差曲线
Fig.6 Tracking error curves under PID control

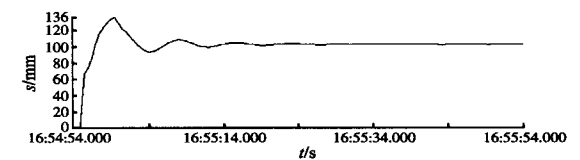


图7 Fuzzy-LQR控制下误差控制曲线
Fig.7 Tracking error curves under Fuzzy-LQR control

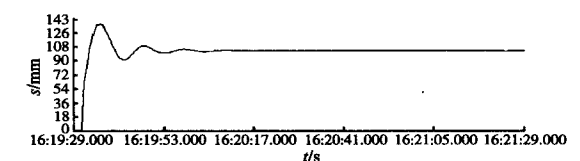


图8 Fuzzy-LQR-PID控制下的误差控制曲线
Fig.8 Tracking error curves under Fuzzy-LQR-PID control

比较3种控制方式,列出表5,可知PID的动态跟踪效果最差,Fuzzy-LQR控制的动态跟踪精度比PID控制的方式提高了2倍。Fuzzy-LQR-PID控制的动态跟踪精度比Fuzzy-LQR控制的跟踪精度提高了2倍,比PID控制的方式提高了4倍。本文提出的算法是可行有效的。

表5 3种算法的性能参数比较

Tab.5 Comparison of performance parameters of three kinds of algorithms

	超调量/%	上升时间/s	调节时间/s	稳态误差/mm
PID	38.6	9	22	8
Fuzzy-LQR	36	7	17	4
Fuzzy-LQR-PID	34.5	7	15.4	2

5 结论

1) Matlab 软件具有高效的数值计算及符号计算功能;功能丰富的应用工具箱(如信号处理工具箱、通信工具箱等),为用户提供了大量方便实用的处理工具,组建各个模块建立模拟真实环境下相关参数变化和干扰,快速准确地验证控制系统的可行性。

2) LQR 控制使选定的目标达到最优,但抗扰性差。PID 控制原理简单,使用方便适应性强,鲁棒性强。从仿真结果看:将模糊控制, LQR 控制与 PID 控制相结合,使系统响应速度更快,调节时间更短,跟踪精度更高,完全符合焊接过程中对位置随动系统的要求,具有一定的实际意义。

参考文献

- [1] 王宏文,刘通学,刘丽,等.无头轧制多级传动模拟实验平台的研究与开发[J].制造业自动化,2008,30(1):23-26.
- [2] 吴受章.最优控制理论与应用[M].北京:机械工业出版社,2008.
- [3] 陈伯时.电力拖动自动控制系统[M].第3版.北京:机械工

业出版社,2003.

- [4] Miller, Daniel E. Near optimal LQR Performance for a Compact Set of Plants [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2006, 51(9): 1423-1439.
- [5] 刘豹.现代控制理论[M].第2版.北京:机械工业出版社,2000.
- [6] 李少远,王景城.智能控制[M].第2版.北京机械工业出版社,2009.
- [7] 张明月,杨洪波,贾宏光.基于降维观测器的电动舵机 PID_LQR 控制[J].计算机测量与控制,2013,21(7): 1800-1803.
- [8] Vimala Vindhya, Venkat Reddy. PID-Fuzzy Logic Hybrid Controller for a Digitally Controlled DC-DC Converter[C]//International Conference on Green Computing, Communication and Conservation of Energy (ICGCE), 2013: 362-366.
- [9] 王霞,朱景伟.基于模糊PI控制的无刷直流电机调速系统[J].电气传动,2014,44(1):63-69.
- [10] 廖常初. S7-300/400 PLC 应用技术[M].北京:机械工业出版社,2008.
- [11] 西门子(中国)有限公司自动化与驱动集团.深入浅出西门子 WinCC V6[M].第2版.北京:北京航空航天大学出版社,2004.

收稿日期:2015-05-12

修改稿日期:2015-10-19

(上接第54页)

4 结论

本文针对永磁同步风力发电系统在电网电压不平衡时网侧变流器存在PI控制器参数不易整定,并且需要分离电流的正负序分量,带来不必要的延时和误差,系统结构复杂等问题,提出了一种新的控制策略。将RBF神经网络自整定PI控制器和准PR控制器引入到网侧变流器的控制中,RBF神经网络自整定PI控制器解决了PI控制器的参数整定问题,适应性更强,准PR控制器可对正负序分量同时控制,进而减小了误差与延时,简化了控制系统结构,提高了控制系统性能。仿真的对比分析结果表明了本文提出的控制策略的正确性与有效性。

参考文献

- [1] 李建林,许洪华.风力发电中的电力电子变流技术[M].北京:机械工业出版社,2008.
- [2] Chong Ng, Li Ran, Jim Bumby, Unbalanced-grid-fault Ride-through Control for a Wind Turbine Inverter[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 2008, 44(3): 845-856.
- [3] Song H S, Nam K. Dual Current Control Scheme for PWM Con-

verter Under Unbalanced Input Voltage Conditions[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 1999, 46(5): 953-959.

- [4] Conroy J F, Watson R. Low-voltage Ride-through of a Full-converter Wind Turbine with Permanent Magnet Generator[J]. IET Renew. Power Gen, 2007, 1(3): 182-189.
- [5] 陈毅东,杨育林,王立乔,等.电网不对称故障时全功率变流器风电机组控制策略[J].电力系统自动化,2011,35(7):75-80.
- [6] 肖磊,黄守道,黄科元,等.不对称电网故障下直驱型永磁风力发电系统网侧变流器的运行与控制[J].电工技术学报,2011,26(2):173-180.
- [7] 章玮,王宏胜,任远,等.不对称电网电压下三相并网型逆变器的控制[J].电工技术学报,2010,25(12): 104-110.
- [8] 陈西寅.电网电压不平衡下永磁直驱风力发电系统运行与控制研究[D].重庆:重庆大学,2012.
- [9] Yongsug Suh, Lipo Thomas A. Control Scheme in Hybrid Synchronous Stationary Frame for PWM AC-DC Converter Under Generalized Unbalanced Operating Conditions [J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 2006, 42(3): 825-835.
- [10] 邱道尹,张凌云,顾波,等.基于径向基神经网络的双馈风力发电机低电压穿越控制研究[J].华北水利水电学院学报,2013,34(6):100-105.

收稿日期:2015-05-25

修改稿日期:2015-10-12