

风速前馈与变论域模糊结合的变桨距控制^{*}

金鹏飞, 谢 源

(上海电机学院 电气学院, 上海 201306)

摘 要: 针对传统 PID 变桨距控制难以在大惯性、强耦合的风力发电机组中取得较好的控制效果, 提出了一种风速前馈的变论域模糊变桨距控制方法。根据功率误差及其变化率, 通过模糊推理得到输入与输出论域的伸缩因子, 避免了确定伸缩因子函数模型及其参数的困难; 又采用风速前馈的方式实现桨距角的动态补偿, 提高了系统的响应速度。仿真结果表明: 当风速超过额定风速时, 所提方法能使风力发电机组的转速更加稳定、输出功率更加平稳。

关键词: 风力发电机组; 变桨距; 变论域; 模糊控制; 风速前馈

中图分类号: TM 315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)02-0128-06

Variable Pitch Control with Wind Speed Feed-Forward and Variable Region Fuzzy Controller^{*}

JIN Pengfei, XIE Yuan

(School of Electrical Institute, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China)

Abstract: In order to solve the problem that the traditional PID could not achieve good control effects in the wind turbine with large inertia and strong coupling, a wind speed feed-forward and variable region fuzzy pitch controller was proposed. According to the power error and its rate of change, the contraction-expansion factor was obtained by fuzzy inference. And this method avoid the difficulty of determining the contraction-expansion factor model and its parameters. The dynamic compensation of pitch angle was realized by using the method of wind speed feed-forward, and the response speed of the system had also been improved. The simulation results showed that when the wind speed exceeds the rated wind speed, this method could made the speed and the output power more stable.

Key words: wind turbine; variable pitch; variable region; fuzzy control; wind speed feed-forward

0 引 言

风力发电机组的大型化发展, 推动了变桨距控制技术的进步。当风速超过额定风速时, 改变叶片的桨距角可限制风轮吸收的风能, 维持输出功率的稳定性^[1-3]。PID 控制技术因其简单可靠、且较成熟, 在变桨控制中有较为广泛的应用。但风力发电机组是一个强耦合、非线性的系统, PID 控制难以取得较好的控制效果^[4]。

随着智能控制的发展, 神经网络^[2]、滑模控制^[3-4]、自适应控制^[5]、模糊控制^[6-8]等方法被应

用于变桨控制中。文献[2]将神经网络与 PID 控制相结合, 通过神经网络的自学习能力与权系数调整, 对 PID 控制器参数进行调节。该方法在神经网络反向调节连接权值时, 采取不同的学习率进行参数寻优, 提高了自适应学习的速度, 但运算过程较为复杂。文献[3-4]设计了一种滑模变桨控制器, 能有效控制风力发电机组的转速, 维持输出功率的稳定性。文献[5-6]设计了一种模糊自适应的变桨控制器, 将误差及其变化率作为模糊控制器的输入, 实时调整 PID 参数, 改善了系统的控制性能。文献[7]结合了模糊控制的鲁棒性

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(11304200)

作者简介: 金鹏飞(1993—), 男, 在读硕士研究生, 研究方向为电机控制、风力发电机组变桨控制。

谢 源(1978—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电机控制、风力发电变桨控制、齿轮箱故障诊断等。

和 PID 控制器的准确性,提高了系统的响应速率和准确性,但模糊控制器与 PID 控制器切换的阈值较难确定。一般的模糊控制器的论域和规则固定,在控制对象存在不确定因素以及误差较小时,控制效果并不理想。文献[9-15]针对模糊控制器控制精度不高的问题,研究了一种变论域的模糊控制方法。即在论域模糊划分不变的情况下,根据误差的大小实时改变论域。虽然模糊规则数量并没有增加,但是论域的收缩使得局部规则更加细化,提高了模糊控制器的控制精度。

本文提出了一种风速前馈的变论域模糊变桨距控制方法。在桨距角模糊控制器的基础上,增加了输入输出伸缩因子的模糊控制器。通过伸缩因子模糊控制器实时调整输入输出论域的大小,提高了控制的精度;且通过风速前馈的方式,实现桨距角的动态补偿,提高了系统的响应速率。

1 风力发电机组建模

1.1 风轮模型

由空气动力学可知,风轮捕获的风能为

$$P_w = \frac{\rho}{2} A_r C_p(\lambda, \beta) v^3 \quad (1)$$

式中: P_w ——风力发电机组吸收的风能;

ρ ——空气密度;

A_r ——风轮面积;

C_p ——风能利用系数,极限值 0.593;

λ ——叶尖速比;

β ——桨距角;

v ——风速。

风能利用系数 C_p 是叶尖速比 λ 和桨距角 β 的函数,其拟合函数为^[3]

$$C_p = (0.44 - 0.0167\beta) \sin\left[\frac{\pi(\lambda - 3)}{15 - 0.3\beta}\right] - 0.00184(\lambda - 3)\beta \quad (2)$$

1.2 永磁同步风力发电机建模

在 d - q 旋转坐标系下,可将永磁同步风力发电机的数学模型简化如下^[4,7-8]:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{R_a}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} \omega_e i_q + \frac{1}{L_d} u_d \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R_a}{L_q} i_q - \omega_e \left(\frac{L_d}{L_q} i_d + \frac{1}{L_q} \lambda_0 \right) + \frac{1}{L_q} u_q \end{cases} \quad (3)$$

式中: i_d, i_q —— d, q 轴电流;

R_a ——定子电阻;

L_d, L_q —— d, q 轴电感;

ω_e ——转子电角速度;

λ_0 ——永磁体磁链;

u_d, u_q —— d, q 轴电压。

表贴式永磁同步电机 d, q 轴电感相等,故发电机电磁转矩方程式为

$$T_e = 1.5 p i_q \lambda_0 \quad (4)$$

发电机输出功率为

$$P_e = T_e \omega \quad (5)$$

式中: p ——发电机电极对数;

P_e ——发电机输出功率;

ω ——机械角速度。

1.3 传动系统建模

在永磁同步风力发电机组中,发电机转子转速和风轮的转速一致,其传动链方程为

$$T_m - T_e = J \frac{d\omega}{dt} \quad (6)$$

式中: T_m ——风轮的机械转矩;

J ——风力发电机组的转动惯量。

1.4 变桨执行建模

目前兆瓦级别的风力发电机组大多采用液压和电动的变桨执行机构。变桨执行机构模型可简化为^[5]

$$\frac{\beta}{\beta_c} = \frac{1}{\tau_\beta s + 1} \quad (7)$$

式中: β_c ——给定桨距角;

β ——当前桨距角;

τ_β ——时间常数。

2 控制器设计

风力发电机组是一个大惯性强耦合的非线性系统,常规的 PID 控制算法对于精确的线性系统有较好的控制效果,但难以在风力发电系统中有所建树。一般的模糊控制器虽然鲁棒性较好,但模糊规则的数量限制了其控制精度。文献[13-14]提出了一种变论域伸缩因子函数模型,但该数学模型参数调试较为困难,且鲁棒性较低。论域的变化特性很难由函数模型表现出来,但易于用语言描述,而语言描述刚好是模糊推理的特点。因而用模糊控制器调节伸缩因子,可避免函数模

型选择和参数确定的困难^[9-10]。

本文提出了一种风速前馈的模糊变论域的模糊控制方法。其控制结构如图 1 所示。将功率误差及其变化率分别作为桨距角模糊控制器与伸缩因子模糊控制器的输入。根据模糊规则实时调整输入输出论域的伸缩因子,从而改变桨距角模糊控制器的论域,输出合适的桨距角。同时,通过风速的模糊前馈,实现桨距角的动态补偿,以提高系统的响应速度。

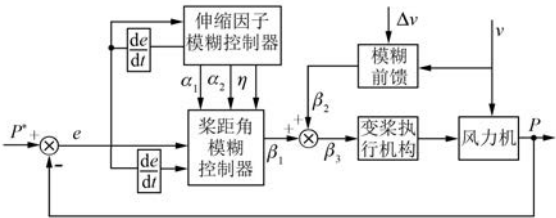


图 1 控制器结构图

2.1 模糊控制器

模糊控制结构如图 2 所示,由模糊化、规则库、推理机和清晰化组成。其中,模糊化的主要作用是将精确的数值映射成论域中的集合。规则库是专家知识、经验的总结,用来存放模糊控制规则,为推理机提供控制规则。推理机是依据模糊规则将输入的模糊量进行模糊推理,从而得到模糊控制量的机构。清晰化是将模糊量转化成精确量的解模糊过程。目前常用的方法主要有:最大隶属度法、中位数法和重心法。其中,重心法考虑了各个因素的影响,具有一定的代表性,故本文采用重心法解模糊。

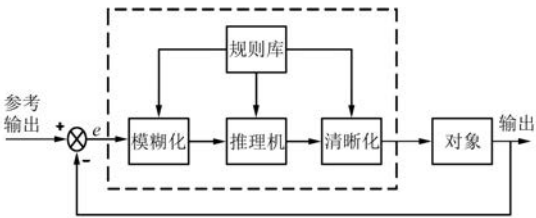


图 2 模糊控制结构图

将误差 e 及其变化率 ec 作为桨距角模糊控制器的两个输入,桨距角 β_1 为输出。 e 、 ec 和 β_1 的模糊子集设定为 $\{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}$,控制量基本论域为 $[-6, 6]$ 。通过设置合适的量化因子,使得输入输出的物理论域都为 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 。

为保证功率输出的平稳性,可采用平滑的高斯型隶属函数。模糊控制规则如表 1 所示。

表 1 模糊控制规则表

ec	e						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PM	PS	Z	Z
NM	PM	PM	PM	PS	PS	Z	Z
NS	PM	PS	PS	PS	Z	Z	Z
Z	PS	PS	PS	Z	NS	NS	NS
PS	Z	Z	Z	NS	NS	NS	NM
PM	Z	Z	NS	NS	NM	NM	NM
PB	Z	Z	NS	NM	NB	NB	NB

2.2 变论域理论分析

在模糊控制器中,若 $R^l: X_1(t) = F_{1j}, X_2(t) = F_{2j}, \dots, X_n(t) = F_{nj}$, 则 $Y_j = G_j (j = 1, 2, \dots, m)$, 其中 $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)^T$ 和 Y 为语言变量, $F_{ij} (i = 1, 2, \dots, n)$ 和 G_j 是模糊集合, l 是规则个数, R^l 是第 l 条规则。利用重心法解模糊,可得

$$f(x) = \frac{\sum_{l=1}^m Y_l \left[\prod_{i=1}^n \mu_{F_{ij}}(x) \right]}{\sum_{l=1}^m \left[\prod_{i=1}^n \mu_{F_{ij}}(x) \right]} \tag{8}$$

式中: $\mu_{F_{ij}}$ —— F_{ij} 的隶属度函数。

模糊控制器的本质是一个插值器。当控制规则数量越多时,基于插值机理得到的响应函数 $F(x)$ 才能充分地逼近期望的响应函数 $f(x)$ ^[9-10]。一般的模糊控制器规则数量有限,因而其控制精度也受到较大影响。

对此,李洪兴提出了一种变论域模糊控制的方法^[9-10],即通过设定值与反馈值误差改变控制器论域的范围。当误差变小时,论域收缩;反之,膨胀。在一般模糊控制中,设输入变量 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$, 输出变量 y 的论域分别为 $X_i = [-E_i, E_i] (i = 1, 2, \dots, n), Y = [-U, U]$ 。 $A_i = \{A_{ij}\} (1 \leq j \leq m) (i = 1, 2, \dots, n)$ 是 X_i 的一个模糊集合, $B = \{B_j\} (1 \leq j \leq m)$ 是 Y 上的一个集合。模糊规则为:若 $x_1(t) = A_{1j}, x_2(t) = A_{2j}, \dots, x_n(t) = A_{nj}$, 则 $y(t) = B_j (j = 1, 2, \dots, m)$ 。

在变论域模糊控制中,变化后的论域为 $X'_i = [-\alpha_i E_i, \alpha_i E_i], Y' = [-\eta E_i, \eta E_i]$, 其中 $\alpha_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 和 η 分别是论域 X_i 和 Y 的伸缩因子,原论域

X_i 和 Y 称为初始论域。论域的膨胀与收缩具体如图 1 所示。

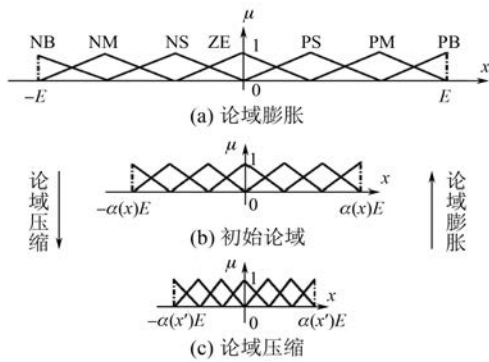


图 3 论域变化图

通过论域的伸缩变换,控制规则的数量并没有增加或减小,但论域的收缩使得控制规则局部细化,间接增加了控制规则的数量,从而提高了控制的精度。

2.3 伸缩因子模糊控制器设计

本文设计了一个二维三输出的伸缩因子模糊控制器。将误差及其变化率作为模糊控制器的输入,其模糊化、论域、子集与桨距角模糊控制器相同。但伸缩因子模糊控制器的输出为误差论域、误差变化率论域以及输出论域的伸缩因子 α_1 、 α_2 、 η 。通过伸缩因子模糊控制器,可以根据误差及其变化率调整 α_1 、 α_2 、 η 的大小,改变输入输出的论域。从而,避免了只调整单个论域给系统造成的论域反复调节的问题^[11]。

在伸缩因子模糊控制器中,将误差和误差变化率的伸缩因子模糊划分为:Z、S、M、B,隶属函数为三角形,其峰值点分别为 0.2、0.4、0.6、0.8。输出论域伸缩因子模糊划分为 Z、S、M、B,隶属函数为三角形,其峰值点分别为 0.5、0.67、0.83、1。控制规则如表 2 所示。

表 2 伸缩因子模糊控制表 $\alpha_1/\alpha_2/\eta$

ec	e						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	B/B/B	B/B/M	M/M/S	S/M/Z	M/M/S	B/B/M	B/B/B
NM	B/B/B	M/B/B	S/S/M	S/S/S	S/S/M	M/B/B	B/B/B
NS	M/M/B	M/M/M	S/S/S	Z/Z/S	Z/Z/M	M/M/M	M/M/B
Z	M/M/M	S/S/M	Z/Z/S	Z/Z/Z	Z/Z/Z	S/S/M	M/M/M
PS	M/M/M	M/M/S	S/S/S	Z/Z/Z	S/S/Z	M/M/S	M/M/M
PM	B/B/M	M/B/M	S/S/S	S/S/Z	S/S/S	M/B/M	B/B/M
PB	B/B/B	B/B/M	M/M/S	S/M/S	M/M/S	B/B/M	B/B/B

表 2 中的模糊规则,反应了误差及其变化率对伸缩因子的影响。其控制规律较难用单一的函数模型所表示,但易于用模糊推理表现出来。该方法避免了函数模型的选择以及参数的确定,减小了工作量,且具有较强的鲁棒性。

2.4 风速前馈模糊控制器

风力发电机组是一个大惯性、非线性的系统,通过风速前馈的方式可实现桨距角的动态补偿,从而提高系统的响应速度^[7]。

在风速前馈模糊控制器中,将上个时刻的风速 $v(k-1)$ 和当前时刻风速与上个时刻风速的差值 Δv 作为控制器的输入,前馈桨距角 β_2 作为输出。其中风速的基本论域为 $[11\text{ m/s}, 25\text{ m/s}]$,模糊论域为 $\{1, 2, 3, 4, 5\}$,对应的模糊子集为 $\{LH, RH, H, VH, EH\}$ 。风速的增量 Δv 的基本论域为 $[-3\text{ m/s}, 3\text{ m/s}]$,其对应的模糊论域为 $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$,模糊子集为 $\{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}$ 。桨距角的变化范围为 $[-4^\circ, 4^\circ]$,为达到较精确的控制效果,输出量的模糊子集和模糊论域分别为 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 和 $\{NB2, NB1, NM2, NM1, NS2, NS1, Z, PS1, PS2, PM1, PM2, PB1, PB2\}$ 。其控制规则如表 3 所示。

表 3 风速前馈模糊控制

Δv	v				
	LH	RH	H	VH	EH
NB	NB2	NB1	NM2	NM1	NS2
NM	NB1	NM2	NM1	NS2	NS1
NS	NM1	NS2	NS1	NS1	NS1
Z	Z	Z	Z	Z	Z
PS	PM1	PS1	PS1	PS1	PS1
PM	PB1	PM1	PS2	PS2	PS1
PB	PB2	PM2	PM1	PS2	PS2

3 仿真与分析

以 2 MW 永磁同步电机为研究对象,在 MATLAB/Simulink 中搭建仿真,其参数具体如表 4 所示。

在仿真中,采用的 200 s 风速波形如图 4 所示。

表 4 2 MW 永磁同步风力发电机参数

参数	数值
风轮半径/m	45
桨叶数	3
风轮转动惯量/(kg·m ²)	411 185
电机转动惯量/(kg·m ²)	18 905.7
额定功率/kW	2 000
定子电阻/Ω	6.7e ⁻³
d、q 轴电感/mH	2.7
定子额定电压/V	690
发电机电对数	30
额定轴转矩/(kN·m)	940
额定转速/(r·min ⁻¹)	9~22.5
最大转速/(r·min ⁻¹)	29
额定风速/(m·s ⁻¹)	11
切入切出风速/(m·s ⁻¹)	3,25
空气密度/(kg·m ⁻³)	1.25

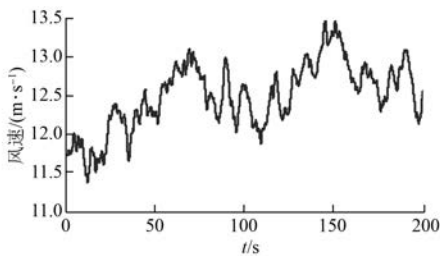


图 4 200 s 风速波形图

对图 4 所示的风速进行仿真,得到结果如图 5~图 7 所示。

图 5 所示为 PID 控制器、模糊控制器、前馈变论域模糊控制器的输出桨距角波形图。从图 5 中可看出,模糊控制器与前馈变论域模糊控制器在初始阶段,输出的桨距角比 PID 控制器输出的桨距角角度大,上升速度快,因而响应更加快速。

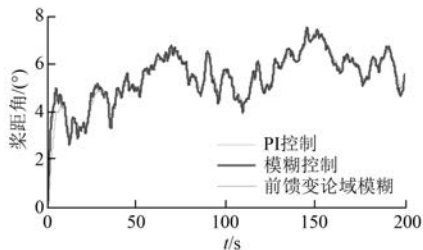


图 5 200 s 内桨距角变化

图 6、图 7 是 3 种控制器的输出功率以及转速的波形图。从图 6~图 7 可看出,当风速超过额定风速时,PID 控制器输出的功率与转速波动幅度较大。模糊控制器与 PID 控制器相比,输出功

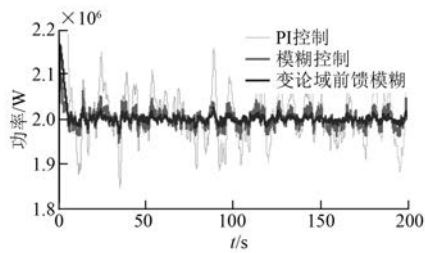


图 6 200 s 内功率曲线图

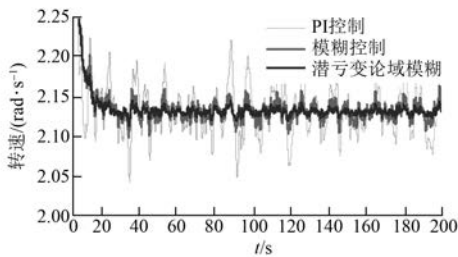


图 7 200 s 内转速波形图

率、转速的波动大大减少,控制效果更好。前馈变论域模糊控制器在风机起动阶段时,由于输出论域的伸缩因子在 0~1 之间,故响应速度要比传统的模糊控制要慢。但正常运行后,输出功率、转速相对于模糊控制器而言,更加平稳,波动幅度更小,稳定性更好。

图 8 所示为前馈桨距角波形图。当风速较大时,桨距角的细微变化对整个系统的输出功率影响很大^[7]。故在图 8 中,虽然前馈的桨距角度较小,但实现了桨距角的动态补偿,提高了系统的响应速度。

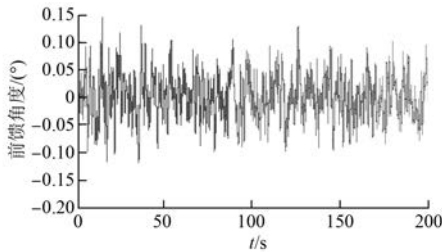


图 8 200 s 前馈桨距角度

4 结 语

在变论域模糊控制中,论域伸缩因子的函数模型及其参数难以确定。本文通过模糊推理,设计了一种伸缩因子模糊控制器。将功率误差及其

变化率作为伸缩因子的模糊控制器的输入,论域伸缩因子作为控制器的输出。通过改变桨距角模糊控制器输入输出论域的方式,避免了单一论域伸缩的反复调节,提高了控制器的控制精度。同时,采用风速模糊前馈的方法,提高了系统的响应速度,具有较好的控制性能。

【参考文献】

- [1] 戴媛媛,贾建芳,张吉宣,等.风力机变桨距控制策略研究[J].自动化仪表,2016,37(11): 20-24.
- [2] 付光杰,胡明哲.基于改进型学习率自适应 BP 神经网络的风力发电变桨距控制技术[J].自动化与仪器仪表,2016(6): 8-10.
- [3] 田勇,张宏立,玛依拉·赛依力.基于滑模变结构的风力机变桨距控制研究[J].华东电力,2011(9): 1438-1442.
- [4] WANG X, ZHU W L, SONG C. Chattering free sliding mode pitch control of PMSG wind turbine[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2014, 47(3): 6758-6763.
- [5] YU H Q, GAO Y, ZHANG H. Fuzzy self-adaptive PID control of the variable speed constant frequency variable-pitch wind turbine system[C] // 2014 IEEE International Conference on System Science and Engineering (ICSSE), Shanghai, 2014: 124-127.
- [6] LU W, GAO Y. Variable Universe Fuzzy Adaptive PID Control in the Digital Servo System[C] // 2016 8th International Conference on Intelligent Human - Machine Systems and Cybernetics (IHMSC),

Hangzhou, 2016: 204-207.

- [7] 郭鹏.模糊前馈与模糊 PID 结合的风力发电机组变桨距控制[J].中国电机工程学报,2010,30(8): 123-128.
- [8] 韦微,陈冉,陈家伟,等.基于功率变化和模糊控制的风力发电机组变速变桨距控制[J].中国电机工程学报,2011,31(17): 121-126.
- [9] 李洪兴,苗志宏,王加银.非线性系统的变论域稳定自适应模糊控制[J].中国科学(E辑),2002,32(2): 211-223.
- [10] 李洪兴.变论域自适应模糊控制器[J].中国科学(E辑),1999,29(1): 32-42.
- [11] 李良峰.变论域模糊控制算法研究[D].成都:电子科技大学,2008.
- [12] ZHENG X L, LIU S, CHEN M J. Vertical movement control for variable vector propeller of submarine based on pitch angle varying[C] // 2015 34th Chinese Control Conference (CCC), Hangzhou, 2015: 171-176.
- [13] 韩兵,周腊吾,陈浩,等.基于变论域模糊控制的大型风电机组偏航系统[J].电工电能新技术,2016,35(8): 15-20.
- [14] 吴记群,魏万华,马慧霞.基于前馈和变论域模糊的联合装置温度控制[J].自动化与仪器仪表,2015(8): 103-105.
- [15] 任海鹏,郭鑫,杨彧,等.光伏阵列最大功率跟踪变论域模糊控制[J].电工技术学报,2013,28(8): 13-19.

收稿日期: 2017-06-20

(上接第 117 页)

- [7] 董久晨,王西田,刘明行,等.自并励静止励磁系统精细建模及仿真[J].电力自动化设备,2016,36(5): 112-117.
- [8] 孟凡刚,杨世彦,杨威.多脉波整流技术综述[J].电力自动化设备,2016,32(2): 9-22.
- [9] 杨冠城.电力系统自动装置原理[M].5版.北京:中国电力出版社,2012.
- [10] 姜建国,乔树通,郜登科.电力电子装置在电力系统中的应用[J].电力系统自动化,2014,38(3): 2-6.
- [11] 郭荣祥,崔桂梅.电力电子应用技术[M].北京:高

等教育出版社,2013.

- [12] 王亮,王文策,程斌,等.基于 Simulink 的发电机励磁系统整流单元的建模与仿真[J].陕西电力,2011(7): 25-28.
- [13] 洪乃刚.电力电子、电机控制系统的建模与仿真[M].北京:机械工业出版社,2010.
- [14] 樊俊,陈忠,涂光瑜.同步发电机半导体励磁原理及应用[M].2版.北京:水利电力出版社,1991.

收稿日期: 2017-06-20

电机与控制应用

中文核心期刊 / 中国科技核心期刊

专业缔造权威 服务创造价值

高效节能 绿色电机

我们专注于

电机技术的研究

电机系统节能的解决方案

电机保护与控制技术的报道



扫描二维码
关注电机与控制应用

《电机与控制应用》创刊于1959年，由上海电器科学研究所（集团）有限公司主办的具有专业权威的电工技术类科技期刊。每月10日出版，国内外公开发售，邮发代号4-199，杂志集电科所在电工行业内，从技术研发、产品检测、标准制定及人才优势等各方面资源，专业服务于行业与用户，为我国中小型电机行业的技术进步与发展做出了巨大的贡献，在中国电机及其应用领域享有很高的影响力。

《电机与控制应用》编辑部
电话：021-62574990-221

地址：上海市武宁路505号
传真：021-32230809

邮编：200063
E-mail: emca@seari.com.cn