

无刷双馈风力发电机模糊功率因数控制与仿真

赵辉, 张宝发, 鲁超

(天津理工大学, 天津市复杂系统控制理论及应用重点实验室, 天津 300384)

摘要: 以变速恒频风力发电为背景, 根据无刷双馈电机原理和模糊控制理论设计了模糊控制器, 应用此模糊控制器对无刷双馈电机发电运行状态的功率因数进行控制, 并在 Simulink 环境下进行了仿真。仿真结果表明, 模糊功率因数控制器很好地追踪了功率因数的变化, 并且保证了功率绕组电流频率不变, 实现了变速恒频发电。

关键词: 无刷双馈电机; 模糊控制器; 变速恒频发电; 仿真模型

Fuzzy power factor controlling and simulation of brushless doubly-fed wind generator

ZHAO Hui, ZHANG Bao-fa, LU Chao

(Tianjin Key Laboratory for Control Theory & Applications in Complicated Systems,

Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract: In the background of VSCF wind power generation, according to BDFM's running principle and the theory fuzzy logic controller, the fuzzy logic controller for BDFM's power factor controlling is established. Under the the Simulink environment, power factor of BDFM's generation operation status applying the proposed fuzzy controller is controlled and the simulation is finished. The simulation results show that the fuzzy power factor controller has a good track of power factor changes, and ensure the frequency of power winding current unchanged to achieve a variable-speed constant frequency power generation.

Key words: BDFM; fuzzy logic controller; variable speed constant frequency; simulation model

中图分类号: TM301 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)20-0096-06

0 引言

风电作为一种绿色电力, 正逐步由辅助能源向主力能源迈进, 而且随着风力发电技术的进步, 单机容量越来越大, 发电成本逐渐降低, 其竞争力愈来愈强。在风力发电技术方面, 可分为恒速恒频风力发电和变速恒频风力发电两类^[1]。恒速恒频风力发电系统采用同步发电机或感应发电机, 不论风速如何变化, 通过一定的调节, 保持风力机转速恒定, 从而实现发电频率的恒定。由于叶尖速比不能一直保持在最佳值, 因而无法实现最大风能捕获, 风能转换效率不高。变速恒频风力发电是一种新型风力发电方式, 它将电力电子技术、矢量变换控制技术和微机信息处理技术引入发电机控制之中, 获得了一种全新的、高质量的电能获取方式。风力机叶轮跟随风速的变化改变其旋转速度, 保持最佳叶尖速

比, 风能利用系数最大, 是目前风力发电技术的发展方向。

在众多变速恒频风力发电系统中, 无刷双馈风力发电优势明显。无刷双馈电机 (Brushless Double-Fed Machine, BDFM) 的定子有两套极数不同的绕组, 一个为功率绕组, 另一个为控制绕组, 这种电机在定子上实现了双馈, 其不仅具有简单的转子结构, 而且具有绕线式转子异步电机和同步电机的优良特性。它克服了笼型转子异步电机变频器容量大的缺点, 也克服了交流励磁双馈电机有滑环和电刷的缺点, 特别适用于风力发电^[2-3]。因此, BDFM 作为一种新型电机, 其研究不断取得进展。

对 BDFM 的控制采用的传统的控制方法有标量控制、直接转矩控制、磁场定向控制等。从传统的控制方法来看, 大多都有精确的公式推导, 都给出了控制量的确切大小, 但是由于电机参数变化等的影响, 控制的效果都不是很理想。BDFM 的电路存在着结构复杂, 谐波含量大, 控制方程式复杂等

基金项目: 天津市高等学校科技发展基金项目 (2006ZD32)

问题, 电机的参数变化对电机的控制影响较大, 因此控制效果远远没有达到很理想的效果。随着现代控制理论的发展, 控制器设计的常规技术正逐渐被广泛使用的人工智能软计算技术所替代, 这些方法具有很多优势, 因此工业界强烈希望开发、生产使用这些方法的系统。目前, 模糊控制理论已成为解决复杂问题的有效手段和方法。本文应用模糊控制理论设计了模糊控制器, 对 BDFM 发电状态的功率因数实现了闭环控制。

1 无刷双馈电机的运行原理

BDFM 系统由两个不同极对数的定子绕组、转子绕组和双向变频器组成^[4]。其中, 一个定子绕组直接连接到电网进行能量传输, 称为功率绕组, 另一定子绕组经变频器连接到电网, 其电压、频率可调, 称为控制绕组, 原理如图 1 所示。下标 p 代表功率绕组, c 代表控制绕组; p_p 、 p_c 分别为功率绕组和控制绕组的极对数。

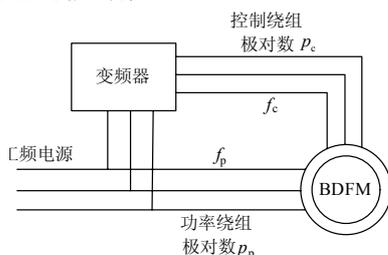


图 1 BDFM 运行原理

Fig.1 BDFM running principle

经过理论推导, 得到转子机械转速 n_r 表达式^[5]为

$$n_r = \frac{60(f_p \pm f_c)}{p_p + p_c}$$

可知, BDFM 的转速由功率绕组、控制绕组的电源频率及极对数决定, 具有同步电机的硬特性。当 p_p 、 p_c 、 f_p 一定时, 改变 f_c 可使电机转速改变。 $f_c=0$ 时电机的转速称为自然同步转速, f_c 取负号的转速称为亚同步速, 反之称为超同步速。可见 BDFM 作电动机运行时, 可通过改变与控制绕组相连的变频器的输出来调节转速, 能够实现无级调速, 其调速的范围与功率绕组和控制绕组的极对数及电源的输出频率有关; 作发电机运行时, 在不同机械转速下调节控制绕组的供电频率, 可保证定子功率绕组输出恒定频率的交流电能, 即实现交流励磁变速恒频发电。

2 模糊控制器设计

模糊控制器是模糊控制系统的核心, 一个模糊

控制系统的性能优劣主要取决于模糊控制器的结构、采用的模糊规则、推理算法及模糊决策方法等因素。一般模糊控制器的组成^[6]如图 2 所示。

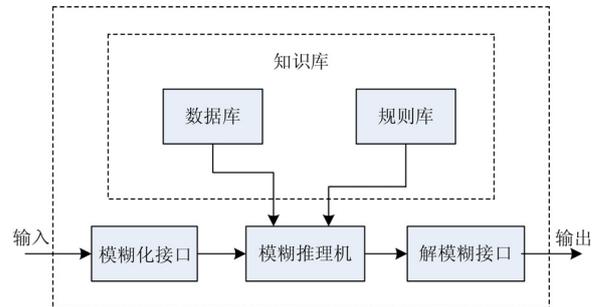


图 2 模糊控制器组成

Fig.2 Composition of fuzzy controller

2.1 结构选择

随着人们对模糊控制器的深入研究, 模糊控制器从单一的结构形式发展成为多种多样的结构形式。从模糊控制器的输入、输出变量的个数多少可以分为单变量模糊控制器和多变量模糊控制器。在模糊控制系统中, 往往把一个变量 (通常是系统某一输出量) 的偏差及偏差变化率作为模糊控制器的输入, 这就组成了二维模糊控制器^[7], 如图 3 所示, 控制器的输入为功率因数的偏差 E 和功率因数偏差变化 EC , 控制器的输出变量为 ΔU ^[8]。由于它能够较严格地反映受控系统中输出变量的动态特性, 因此在控制效果上要比一维模糊控制器好得多, 也是目前采用较广泛的一类模糊控制器。

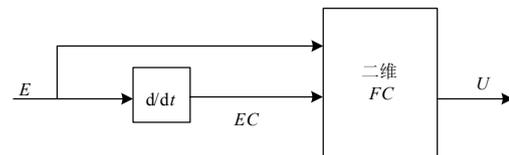


图 3 二维模糊控制器

Fig.3 Two-dimensional fuzzy controller

2.2 知识的获取

首先进行控制电压幅值与功率因数关系的仿真试验。在 Matlab/Simulink 环境下, 按照已建立的 BDFM 模型 (如图 10 中 BDFM 模型), 进行以下仿真实验: 在控制电压幅值 $U=60\text{ V}$ 的基础上, 保持电压频率 10 Hz 不变, 改变控制电压的大小, 来获得功率绕组的功率因数的响应曲线。控制绕组的电压幅值按 60 V 、 80 V 、 85 V 、 90 V 、 95 V 、 100 V 、 105 V 依次上调, 达到 105 V 时再往下调到 60 V , 如图 4 (a) 所示, 这样可以得到以相应的各个稳定状态时的功率因数, 如图 4 (b) 所示。

从图 4 曲线中我们可以得出这样的结论: 通过

改变控制绕组的电压幅值，可以改变功率绕组的功率因数，并且控制电压幅值与功率因数有如下关系：

① 控制绕组的电压幅值上调时，功率绕组的功率因数增大，并且在一定的范围内呈线性的关系。

② 控制绕组的电压幅值下调时，功率绕组的功率因数也随之下调，并且在一定的范围内呈线性的关系。

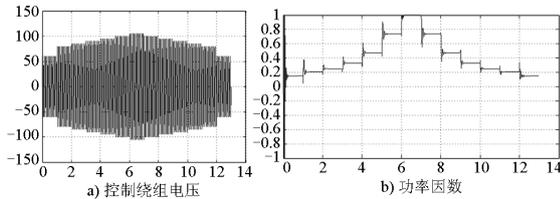


图 4 控制绕组电压幅值与功率因数

Fig.4 Control winding voltage and power factor

在调节控制绕组电压幅值时，无刷双馈电机的转速和转矩变化曲线如图 5 中(a)、(b)所示，可以看出无刷双馈电机在调节功率因数时转矩和转速的波动都较小，并且很快地就收敛于稳定状态，不会引起发散，这是无刷双馈电机可以通过调节控制绕组的电压来调节功率因数的基础。

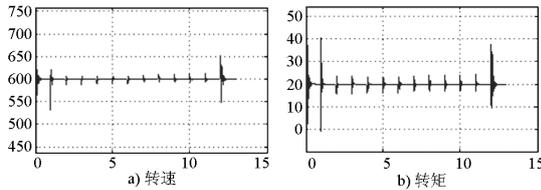


图 5 转速与转矩

Fig.5 Speed and torque

以上控制绕组电压幅值的调节是在控制绕组电压频率不变的情况下实现的，随着控制绕组电压幅值的变化，控制绕组电压的压频比也在变化，进而使控制绕组的磁通发生了变化，如果磁通太小则不能产生足够的转矩使电机进入同步运行；磁通太大则使电机产生振荡而不能稳定。所以控制绕组电压的压频比须在一定的范围内，否则电机将出现振荡。针对压频比范围做了一系列仿真实验，得到表 1 所示结果。

由表 1 可以看出：在亚同步运行状态下，压频比范围随频率的升高基本不变，但在 20 Hz 时压频比范围明显变小；在超同步运行状态下，压频比范围随频率的升高有所增大且范围整体上移。在以上两种运行状态下，随负载转矩的增大，压频比范围有所增大。在电机由亚同步速经自然同步速到达超同步速时，压频比范围扩大，并没有不稳定迹象。反过来说，电机由超同步速经自然同步速变化到亚

同步速时，压频比范围缩小，这可能使电机形成振荡等不稳定现象。

表 1 压频比范围

Tab.1 Range of voltage to frequency ratio

U/f	5 Hz		10 Hz		20 Hz	
	亚同步	超同步	亚同步	超同步	亚同步	超同步
0 N·m	12~6	12~7	12~5	14~7	12~8	27~8
20 N·m	13~5	13~7	11~5	15~6	12~8	29~10
40 N·m	13~5	13~7	11~4	20~5	12~8	31~12

因为控制绕组压频比范围随电压频率及负载转矩变化而变化，所以在调节控制绕组的电压时应注意不要超出压频比范围，在必要的时候应动态改变电压的压频比，以避免电机出现振荡等异常。

通过以上实验和结论，可以基本确定 BDFM 功率因数控制的大致方法。通常情况下，功率绕组的功率因数的变化原因不详，可能是由于电机的内部参数的变化引起的，也可能是由于外部干扰因素引起的，但是根据以上分析得到的经验，我们可以有以下原则。

如果功率绕组的功率因数大于设定的功率因数值，则下控制绕组的电压幅值，差值越大，则下调的电压幅值越大。如果功率绕组的功率因数小于设定的功率因数值，则上调控制绕组的电压幅值，差值越大，则上调的电压幅值也越大。在上调、下调过程中，保证压频比没有超出许可的范围，最终保证功率因数达到设计值。

2.3 参数的确定

选择模糊控制器的输入变量为误差和误差变化率。电机稳定运行时的功率因数范围一般是在 0.45~1.0 之间，这样电机的功率因数的变化范围大致为：-0.5~0.5 之间。我们把误差进一步限定在 -0.3~0.3 之间，将它们分成 7 个等级 { -0.3, -0.2, -0.1, 0, 0.1, 0.2, 0.3 }，于是有误差论域：

$$\{-0.3 -0.2 -0.1 \ 0 \ 0.1 \ 0.2 \ 0.3\}$$

取七个语言值：

$$\{E1 \ E2 \ E3 \ E4 \ E5 \ E6 \ E7\}$$

含义为：

$$\{\text{负大 负中 负小 零 正小 正中 正大}\}$$

记号：{NB NM NS ZO PS PM PB}

同理，设“误差的变化率”的语言值为：

$$\{dE1 \ dE2 \ dE3 \ dE4 \ dE5 \ dE6 \ dE7\}$$

含义为：

$$\{\text{负大 负中 负小 零 正小 正中 正大}\}$$

记号：{NB NM NS ZO PS PM PB}

为了调节的方便和连续性，误差和误差变化率

均选用连续的三角形隶属函数, 如图 6 所示。

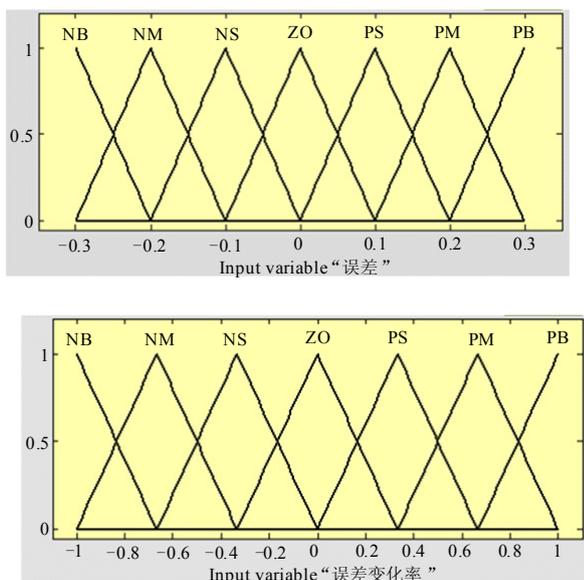


图 6 输入变量
Fig.6 Input variable

根据 2.2 中调节功率因数的经验, 我们可以得到输出的控制量——控制绕组电压幅值 U 。设控制量取七个语言值为 $\{U_1, U_2, U_3, U_4, U_5, U_6, U_7\}$, 含义为:

{负大 负中 负小 零 正小 正中 正大}
记号: $\{NB \ NM \ NS \ ZO \ PS \ PM \ PB\}$
其隶属度函数定义如图 7 所示。

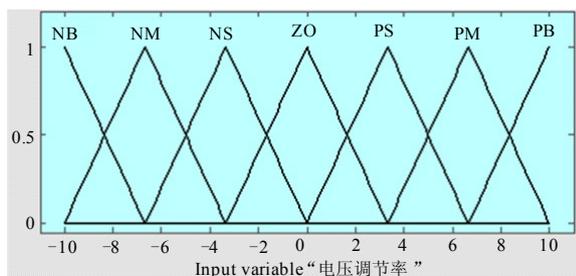


图 7 输出变量
Fig.7 Output variable

2.4 规则表示

此二维结构的模糊控制器, 输入变量是误差 E 和误差变化率 dE , 输出为电压控制量增量 ΔU , 它们均取了 7 个语言值 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$, 由 Mamdani 推理可得到 49 条模糊规则^[9]:

If E is PB and dE is NB then ΔU is ZO
If E is PB and dE is NS then ΔU is NM

...

可以列成模糊控制表, 如表 2 所示。

表 2 模糊控制规则

Tab.2 Rules of fuzzy control

ΔU E	dE	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB		PB	PB	PB	PB	PM	PS	ZO
NM		PB	PB	PM	PM	PM	ZO	ZO
NS		PB	PM	PM	PS	ZO	ZO	NS
ZO		PM	PS	PS	ZO	NS	NS	NM
PS		PS	ZO	ZO	NS	NM	NM	NB
PM		ZO	ZO	NS	NM	NM	NB	NB
PB		ZO	NS	NM	NB	NB	NB	NB

表 2 模糊控制规则表清楚地描述了如下策略^[10]: 当误差 E 为正大 (PB) 时, 如果误差变化 dE 也为正大 (PB), 表明误差正在不断增大, 为迅速减小误差, 应尽快减小控制量 (NB); 如果误差变化为负小 (NS), 即误差已在慢慢减小, 应适当减小控制量 (NM); 如果此时误差正快速减小 (NB), 则为防止超调, 控制量暂时不需变化, 故 ΔU 应为零 (ZO)。

当系统接近于稳态即误差是 PS、ZO、NS 时, 要注意防止过大的超调。总的原则是: 当误差较大时, 控制量的变化使误差迅速减小; 当误差较小时, 除了消除误差以外, 还有考虑系统的稳定性, 防止系统发生不必要的振荡。

根据功率因数误差及功率因数的误差变化率的隶属度函数和控制规则表, 可以得到 BDFM 的控制绕组电压幅值调节规则的图形表示, 如图 8 所示。

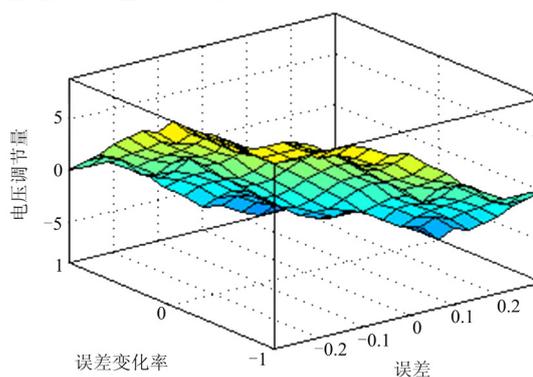


图 8 控制规则表面图

Fig.8 Surface map of control rule

通过以上分析及设计, 构建了 BDFM 的功率因数模糊控制器。利用 Matlab/Simulink 中的 Fuzzy Logic Toolbox, 填入相应的参数就可完成模糊控制器的创建, 进而得到了 BDFM 功率因数模糊控制的总体结构图, 如图 9 所示。

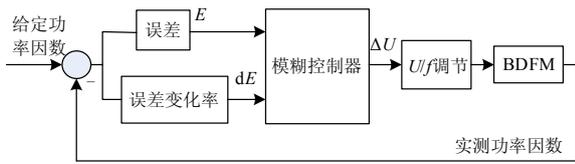


图 9 BDFM 控制系统结构图

Fig.9 Structure diagram of BDFM control system

3 仿真及分析

根据前面建立的模糊控制器及系统结构图，在 Simulink 中建立图 10 所示 BDFM 风力发电状态模糊功率因数控制的仿真模型^[11]。选取仿真算法为 ode45，选取可变步长，最大步长为 0.000 01。由于步长较小，在误差变化率后加上增益 10^4 ，这样保证模糊控制器的输入在正常范围内。仿真所用电机参数如表 3 所示。

表 3 电机参数

Tab.3 Motor parameters

p_p	p_c	L_{sp}/mH	L_{sc}/mH	L_r/mH	$J/(kg \times m^2)$
3	1	71.5	65.5	145	0.03
M_p/mH	M_c/mH	r_p/Ω	r_c/Ω	r_r/Ω	K_d
69.5	60.5	0.5	0.45	1.65	0

仿真分两种情况：给定功率因数变化和给定风速变化。

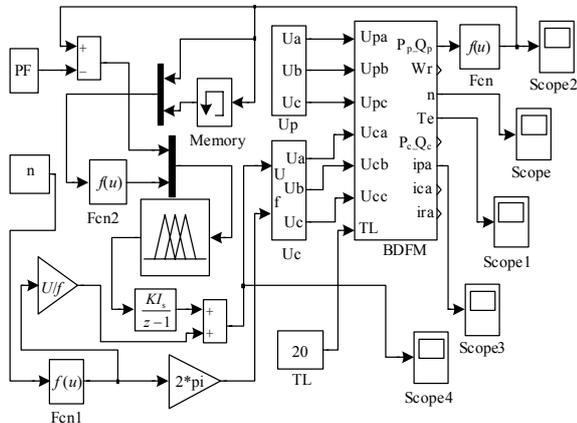


图 10 BDFM 模糊功率因数控制仿真模型

Fig.10 Simulation model for BDFM fuzzy PF controlling

3.1 给定功率因数变化

初始给定的功率因数为 0.5，风速为 600 r/min，驱动转矩为 20 N·m，10 s 时功率因数变为 0.85，20 s 时变到 0.7。期间保持转速 600 r/min、驱动转矩 20 N·m 不变。功率因数、控制绕组电压幅值和电机转速、转矩波形变化如图 11 所示，通过模糊控制器的调节作用，调节控制绕组电压上升或下降，

达到了调节功率因数升或降，很好地跟踪给定值。在功率因数调节过程中电机定子绕组 A 相电流变化如图 12 所示，由于控制绕组电压幅值发生了变化，引起功率绕组电流幅值也发生改变，但其频率未变，从而保证了功率绕组发出恒定的 50 Hz 电流。

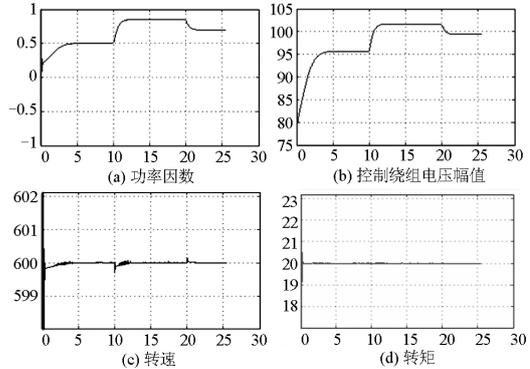


图 11 功率因数变化时电机响应波形

Fig.11 Response waveform when power factor changes

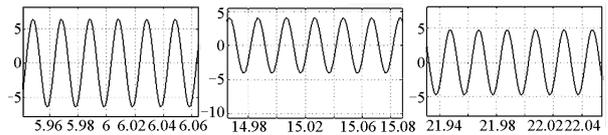


图 12 稳态功率绕组 A 相电流

Fig.12 A-phase steady-state current of power winding

3.2 给定风速变化

BDFM 在 600 r/min 运行 10 s 后，风速给定变为 630 r/min，20 s 时风速变为 555 r/min。期间给定功率因数 0.7 不变，驱动转矩维持 20 N·m 不变。电机功率因数、转速和转矩变化如图 13 所示，可以看出：BDFM 在风力发电中，能适应风速发生较大的变化。在模糊控制器的调节作用下，功率因数很好地跟踪给定值。控制绕组电流的幅值和频率均发生了变化，但功率绕组的电流频率一直

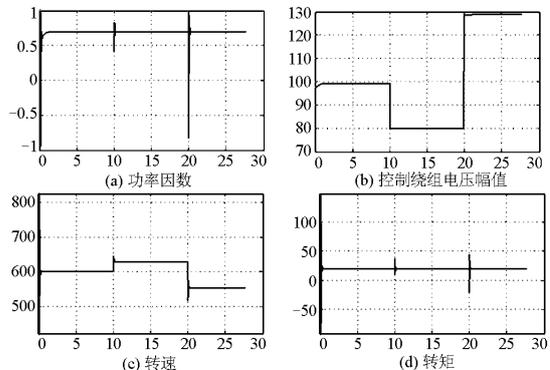


图 13 风速变化时电机响应波形

Fig.13 Response waveform when wind speed changes

未变,如图 14 所示,保证了功率绕组发出恒定的 50 Hz 电流,实现了变速恒频发电。

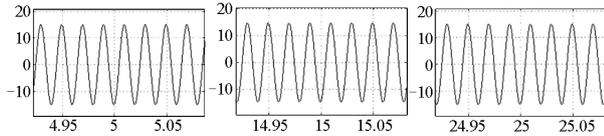


图 14 稳态功率绕组 A 相电流

Fig.14 A-phase steady-state current of power winding

4 结语

根据无刷双馈电机原理和模糊控制理论设计了模糊控制器,应用此模糊控制器对无刷双馈电机发电运行状态的功率因数进行控制,并在 Simulink 环境下进行了仿真。仿真结果表明,模糊功率因数控制器完全满足了控制要求,在给定功率因数变化和给定风速变化两种条件下,很好地跟踪了功率因数,且在两种情况下均保证了功率绕组的电流频率不变,即实现了变速恒频发电。仿真过程中,电机始终运行在亚同步速下。从亚同步速经自然同步速到达超同步速或从超同步速经自然同步速到达亚同步速过程中,电机是否会出现不稳定,还需做进一步的研究。

参考文献

- [1] 尹玲玲,胡育文.交流电机变速恒频风力发电技术[J].电气传动,2005,35(10):7-10.
YIN Ling-ling, HU Yu-wen. Technology of variable-speed constant frequency wind generating used AC machine[J]. Electric Drive, 2005, 35 (10): 7-10.
- [2] 吴国祥,黄建明,陈国呈,等.变速恒频双馈风力发电运行综合控制策略[J].电机与控制学报,2008,12(4):435-441.
WU Guo-xiang, HUANG Jian-ming, CHEN Guo-cheng, et al. A synthetic control strategy for DFIG wind power generation[J]. Electric Machines and Control, 2008, 12 (4): 435-441.
- [3] 段琰璞,李和明.变速恒频无刷双馈风力发电机的建模与仿真[J].电网与清洁能源,2008,24(2):38-41.
DUAN Yan-pu, LI He-ming. Modeling and simulation of brushless doubly-fed generator for wind-energy generating system[J]. Power System and Clean Energy, 2008, 8, 24 (2): 38-41.
- [4] McMahon R A, Wan Xiaoyan, Eshan Abdi-Jalebi, et al. The BDFM as a generator in wind turbines[C]. // EPE-PEMC 2006: 12th International Power Electronics and Motion Control Conference, Proceedings. 2006: 1859-1865.
- [5] 张凤阁,王惠军,于涛,等.无刷双馈调速电机的建模与恒功率角控制策略[J].辽宁工程技术大学学报,2006,25(1):80-83.
ZHANG Feng-ge, WANG Hui-jun, YU Tao, et al. Modeling and constant power angle control strategy of doubly-fed brushless adjusting speed motor[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2006, 25 (1): 80-83.
- [6] 贺廉云.模糊控制系统参数选择对系统性能影响的分析及仿真[J].机床与液压,2008,36(5):361-364.
HE Lian-yun. The analysis and simulation of the influence of fuzzy control system parameters on system performance[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2008, 36 (5): 361-364.
- [7] 董晶,王军政,马立玲.基于模糊控制的电机加载控制方法[J].计算机测量与控制,2006,14(9):1180-1182.
DONG Jing, WANG Jun-zheng, MA Li-ling. Motor loading method based on fuzzy control[J]. Computer Measurement & Control, 2006, 14 (9): 1180-1182.
- [8] 佟玉鹏,戴富坤,陈润年.同步电动机功率因数调节的模糊控制[J].电气传动自动化,2004,26(3):23-25.
TONG Yu-peng, DAI Fu-kun, CHEN Run-nian. Fuzzy control of power factor adjustment for synchronous motor[J]. Electrical Drive Automation, 2004, 26 (3): 23-25.
- [9] 祁征,黄书童.功率因数校正系统的模糊控制及其仿真研究[J].变流技术与电力牵引,2008(2):56-60.
QI Zheng, HUANG Shu-tong. Research of fuzzy control and simulation on the power factor correction system[J]. Converter Technology & Electric Traction, 2008 (2): 56-60.
- [10] 诸静.模糊控制理论与系统原理[M].北京:机械工业出版社,2005.
ZHU Jing. Fuzzy control theory and system principle[M]. Beijing: China Machine Press, 2005.
- [11] 王忠礼,段慧达,高玉峰. Matlab 应用技术——在电气工程与自动化专业中的应用[M].北京:清华大学出版社,2007.
WANG Zhong-li, DUAN Hui-da, GAO Yu-feng. Matlab application technologies—the application in expertise of electrical engineering and automation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.

收稿日期:2009-11-05; 修回日期:2009-12-03

作者简介:

赵辉(1963-),男,博士,教授,硕士生导师,主要研究领域为控制理论应用、电力系统稳定控制;

张宝发(1976-),男,硕士研究生,研究方向为控制理论与控制工程;

鲁超(1984-),男,硕士研究生,研究方向为控制理论与控制工程。