

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.06.022

变桨驱动电机低频输出的恒压频比优化控制研究

范红伟,余清清,许国东

(浙江运达风电股份有限公司 风力发电系统国家重点实验室,浙江 杭州 310012)

摘要:针对风电机组现场轮毂桨叶吊装困难的问题,对轮毂变桨系统的控制技术、变桨电机等方面进行了研究,提出了一种专供风电机组轮毂现场吊装桨叶的拼桨系统,采用低频输出的恒压频比控制技术,优化恒压频比控制方式和合理设置参变量。利用 matlab/simulink 对 2.0 MW 风电机组轮毂拼桨系统进行建模、仿真,同时利用该模型的控制方式和控制参变量进行了测试。研究结果表明,采用低频输出的恒压频比控制技术,优化配置和合理调节控制系统的转矩补偿量、中间电压和中间频率,既能保证变桨驱动电机的安全,又能充分发挥变桨驱动电机的最佳输出特性,使现场轮毂桨叶安装工作方便、经济、高效。

关键词:变桨驱动电机;恒压频比;输出转矩;仿真

中图分类号:TM315

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)06-0754-06

Optimal control of constant ratio of voltage to frequency for variable pitch drive motor low-frequency output

FAN Hong-wei, YU Qing-qing, XU Guo-dong

(State Key Laboratory of Wind Power System, Zhejiang Windey Co., Ltd., Hangzhou 310012, China)

Abstract: Aiming at the problem of blades were difficult to install in lifting site, control technology and pitch drive motor were researched, a wind turbine hub pitch control system for the blades installing was proposed, the control technology of constant ratio of voltage to frequency for low-frequency output was investigated, the control mode and control variables were optimized. The operation of 2.0 MW wind turbine variable pitch control system was simulated based on Matlab/Simulink, meanwhile, these control variables and control parameters of the model were tested. The results indicate that the optimal mode and reasonable compensation value of the torque control compensation, intermediate voltage and intermediate frequency is not only satisfied the actual conditions to ensure the safety of pitch drive motor but also can play the best output characteristics, so that the blades hub site installation convenient, economical and efficient.

Key words: variable pitch drive motor; constant ratio of voltage to frequency; output torque; simulation

0 引 言

作为新能源的风力发电具有经济、绿色环保、安全等优势越来越受到世界各国的重视^[1-2]。现代风电机组的单机容量越来越大,风轮直径也越来越大。而其中采用电动变桨距控制技术的风电机组因其优越的性能,在大型风电机组中得到广泛应用^[3]。

风电机组轮毂在现场安装桨叶时,基本无满足电动变桨距控制系统的稳态电源,一般选用便捷的柴油机发电提供电源。由于柴油机发电机提供电源的电压幅值波动、电压波形、电压系统的对称性、频率的偏差和稳定性等因素,变桨系统的电气元件及控制线路会受到一定程度的冲击和影响,缩短使用寿命,甚至出现故障和损坏。变桨系统结构复杂,造价昂贵,而且在后期出现的电气元件及控制线路故障和损坏的运

行维护工作比较麻烦、耗费大量时间和财力。针对这种情况,研究人员提出一种不依赖变桨系统的可以宽电压宽频输入,稳态恒频恒压输出,专供风电机组轮毂安装桨叶的拼桨系统,可为变桨驱动电机提供满足要求的稳态恒频恒压电源。与风电机组自身的变桨系统相比,拼桨系统可以宽电压宽频输入,受柴油机发电机提供电源的电压、频率影响较小,而且系统结构简单,体积小,使用和维护检修方便,经济耐用、可不断重复使用。

风电机组轮毂安装桨叶过程中,为满足工况需要,变桨轴承必须在低速下平稳起动、运行和停止。桨叶系统惯量和静阻力比较大,要求有较高的起动转矩,为了尽可能发挥变桨驱动电机在低速下的最佳输出特性,必须对拼桨系统的控制方式和控制参数进行合理配置和优化。

本研究基于恒压频比控制技术,对拼桨系统进行 Matlab/Simulink 建模仿真和试验验证,获得满足工况要求下的变桨驱动电机最优输出特性。

1 恒压频比控制原理及优化

为发挥变桨驱动电机在低速下的最优输出特性,采用恒压频比控制技术^[4-5],在基频以下的调速过程中可以保持电动机气隙磁通基本恒定,保持 $E_1/f = C$,在相同转矩条件下电机的转差率基本不变,使电动机有较好的调速特性和起动性能。但是频率较低时,定子阻抗压降所占比重大,电动机难以保持气隙磁通不变,电动机的最大输出按转矩将随频率的下降而减小。为了使电动机在低频低速时仍有较大的转矩输出,需进行低频电压补偿。在低频时适当提高定子电压,使电动机仍有较大的转矩输出。为了保障电机启动平稳、较好的低频输出特性满足实际工况需要,优化电压补偿的 U/f 曲线,实行分段式恒压频比控制。电压补偿恒压频比曲线如图 1 所示。

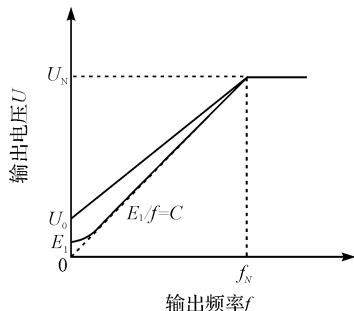


图1 电压补偿恒压频比曲线

优化恒压频比曲线如图 2 所示。

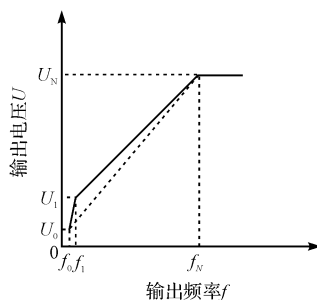


图2 优化恒压频比曲线

如图 2 所示,优化恒压频比曲线的函数表达式为:

(a) $f < f_1$ 时:

$$U_f = \frac{U_1 - U_0}{f_1 - f_0} f + U_0 \quad (1)$$

(b) $f \geq f_1$ 时:

$$U_f = \frac{U_N - U_1}{f_N - f_1} f + U_1 \quad (2)$$

式(1~2)中: U_N —变桨电机额定电压, f_N —变桨电机额定频率, U_0 —最低输出电压, f_0 —最低输出频率, U_1 —中间输出电压, f_1 —中间输出频率, f —输出频率, U_f —输出电压。

变桨驱动电机的输出转矩 T 的表达式为:

$$T = \frac{3PU^2 \cdot \left(\frac{R_r}{s}\right)}{2\pi f \left[\left(R_s + \frac{R_r}{s}\right)^2 + (X_s + X_r)^2 \right]} \quad (3)$$

$$T \approx \frac{3P}{2\pi} \cdot \left(\frac{s}{R_r}\right) \cdot \left(\frac{1}{f}\right) \cdot U^2 \quad (4)$$

$$T \propto U^2 = U_f^2 \cdot K_{\Delta T(x)}^2 \quad (5)$$

式(3~4)中: T —电机输出转矩; U —电机工作电压; P —电机相数; R_s, R_r —电机定子电阻和转子电阻; X_s, X_r —电机定子电感和转子电感; s —转差率; f —工作频率; $K_{\Delta T(x)}$ —转矩补偿系数。

恒定工作频率下变桨电机输出转矩与工作电压及转矩补偿系数的关系,如式(5)所示。将式(2)代入式(5)获得输出转矩与转矩补偿系数、中间电压和中间频率的关系,如下式所示:

$$T \propto \left[U_N - \frac{(U_N - U_1)(f_N - f)}{f_N - f_1} \right]^2 \cdot K_{\Delta T(x)}^2 \quad (6)$$

转矩补偿系数由 $\Delta T(x)$ 函数对应的转矩补偿量获取。转矩补偿量影响补偿电压的变化与对应压频比值的额定电压相关。

通过提高转矩补偿系数、增大中间电压和减小中间频率,可增大电机在输出频率下的输出转矩。实际工况下还要考虑电机的额定电流、工作制和工作环境,以免烧毁电机。因此电机的转矩补偿量、中间电压和

中间频率必须保持在一定的安全范围。

变桨驱动电机拼桨系统低频输出的恒压频比控制基本原理结构如图 3 所示。

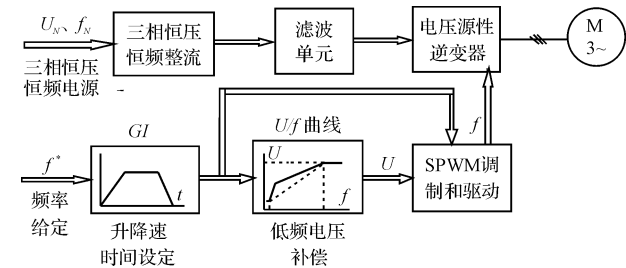


图 3 变桨驱动电机拼桨系统恒压频比控制原理

驱动系统由恒压恒频交流电源、整流单元、滤波单元、逆变单元和控制单元等环节组成。三相恒压恒频交流电源经过整流单元把三相恒压恒频交流电源整流成直流电源,通过中间滤波环节之后,再经过逆变单

表 1 风电机组 2.0 MW SSB 变桨驱动电机参数

参数名称	额定电压 U_N	额定功率 P_N	额定频率 f_N	额定电流 I_N	定子绕组电阻 R_s	定子绕组电感 L_s
参数数值	Y 230 V	9 kW	67 Hz	30 A	0.25 Ω	0.781 7 mH
参数名称	转子绕组电阻 R_r	转子绕组电感 L_r	励磁电感 L_m	转动惯量 J	摩擦系数 F	极对数 P
参数数值	0.19 Ω	1.118 8 mH	26.798 7 mH	0.001 35 kgm ²	0.001 49	2

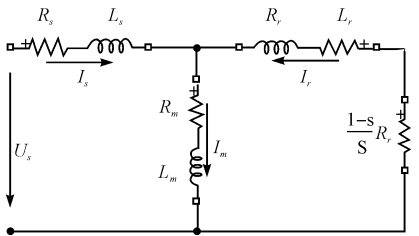


图 4 变桨驱动电机的等效电路

R_s, L_s —定子绕组的电阻、电感; R_r, L_r —转子绕组的电阻、电感; R_m, L_m —励磁电阻、励磁电感; s —转差率

2.1 仿真模型的建立

本研究利用 Matlab/Simulink 强大的仿真和计算能力,根据变桨驱动电机拼桨系统低频输出的恒压频比控制基本原理结构图和变桨驱动电机的等效电路,进行模型设计、仿真和分析^[6-8]。

变桨驱动电机拼桨系统恒压频比控制的仿真模型如图 5 所示。

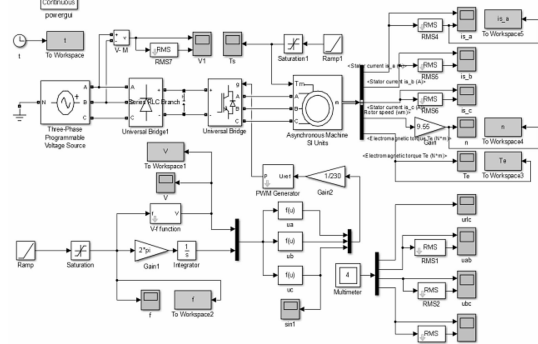


图 5 变桨驱动电机拼桨系统 Matlab/Simulink 模型

元直流电源转化成需要的三相交流电源。控制单元由升降时间设定、 U/f 曲线、SPWM 调制和驱动等环节组成。其中升降速时间设定用来限制电动机的升频速度,避免转速上升过快而造成电流和转矩的冲击,起软起动控制的作用。 U/f 曲线用于根据频率确定相应的电压,以保持压频变比不变 ($U/f = \text{常数}$),并在低频时进行适当的电压补偿。SPWM 和驱动环节将根据频率和电压要求产生按正弦脉宽调制的驱动信号,控制逆变器以实现电动机的变压变频调速。

2 拼桨系统的建模与仿真

目前现场 2.0 MW 风电机组应用较多的 SSB 变桨系统,其变桨驱动电机的参数如表 1 所示。所建立的变桨驱动电机的等效电路如图 4 所示。

模型中恒压频比控制单元的原理如图 2 所示。

Matlab/Simulink 模型仿真参数如表 2 所示。

表 2 Matlab/Simulink 模型仿真参数

仿真算法	仿真精度	最大采样步长	采样时间	起动时间	加载时间
ode23tb	1e-3	1e-5	4 s	1 s	1 s

恒压频比曲线函数模块 v-f function 的函数表达式如式(1)和式(2)所示。

瞬时角度:

$$\theta = \int \omega dt = \int 2\pi f dt \tag{7}$$

电压 U 、瞬时角度 θ 经汇总为一维矢量 $x = [u(1), u(2)]$, 其中的 $u(1)、u(2)$ 依次表示电压、瞬时角度。函数模块 $u_a、u_b、u_c$ 分别用于产生三相调制信号 $u_a、u_b、u_c$, 即:

$$u_a = u(1) \cdot \sin[u(2)] \tag{8}$$

$$u_b = u(1) \cdot \sin\left[u(2) - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right] \tag{9}$$

$$u_c = u(1) \cdot \sin\left[u(2) - \frac{4 \cdot \pi}{3}\right] \tag{10}$$

根据三相调制信号,由 PWM 发生器产生逆变器驱动脉冲,经逆变器得到频率和幅值可调的三相电压,使交流电动机按给定要求起动和运行。

本研究根据表 1 和表 2,完成变桨驱动电机拼桨系统恒压频比控制的仿真模型建立。

2.2 仿真结果及分析

在恒压频比的转速开环控制方式下,本研究通过调节转矩补偿量、中间电压、中间频率等参量改变电压补偿,实现低频下的转矩输出。

当输出频率保持在 10 Hz,中间电压保持在3.4 V,中间频率保持在 0.5 Hz 时,本研究改变转矩补偿量获取对应输出转矩,仿真结果如表 3 所示。

表 3 不同转矩补偿量的仿真输出转矩和运行电流			
转矩补偿量	工作电压/V	输出转矩/Nm	运行电流/A
0.2	39	29	25
0.3	42	34	27
0.4	45	38	29
0.5	48	44	31

由表 3 可知随着转矩补偿量的增大,变桨驱动电机在同一输出频率下的补偿电压增大,输出转矩也不断增大。同时,随着输出转矩的不断增大,运行电流也不断升高。

当输出频率保持在 10 Hz,中间电压保持在4.8 V,转矩补偿量保持在 0.4 时,改变中间频率值获取对应输出转矩,仿真结果如表 4 所示。

表 4 不同中间频率的仿真输出转矩和运行电流			
中间频率/Hz	工作电压/V	输出转矩/Nm	运行电流/A
0.5	47	41	30
0.55	47	40	30
0.71	46	39	29.5
1.40	44	36	28

由表 4 可知随着中间频率的增大,变桨驱动电机在同一输出频率下的补偿电压随之减小,输出转矩也不断减小。同时,随着输出转矩的不断减小,运行电流不断降低。

当输出频率保持在 10 Hz,转矩补偿量保持在0.4,中间频率保持在 0.5 Hz 时,改变中间电压获取对应输出转矩,仿真结果如表 5 所示。

表 5 不同中间电压的仿真输出转矩和运行电流			
中间电压/V	工作电压/V	输出转矩/Nm	运行电流/A
3.4	45	38	29
4.8	47	41	30
6.8	49	43	31
9.8	52	47	35

由表 5 可知随着中间电压的增大,变桨驱动电机在同一输出频率下的补偿电压增大,输出转矩也不断增大。同时,随着输出转矩的不断增大,运行电流也不断升高。

根据仿真结果,通过提高转矩补偿量、增大中间电压和减小中间频率,增大电机在输出频率下的补偿电

压,获得尽可能大的输出转矩。但是实际工况下要考虑电机的额定电流,长时间较大的电压补偿和运行电流,严重影响电机输出性能,甚至烧毁电机。因此电机的转矩补偿量、中间电压和中间频率必须保持在一定的安全范围。根据实际工况要求,变桨驱动电机为短时工作,变桨驱动电机可在较小过电流情况下短时运行。

为实现电机在低速下平稳起动,满足安全的前提下尽可能提高最大输出转矩,本研究对电机的转矩补偿量、中间电压和中间频率进行优化配置和合理调节。根据仿真结果,参量优化后的输出转矩和运行电流如图 6 所示。

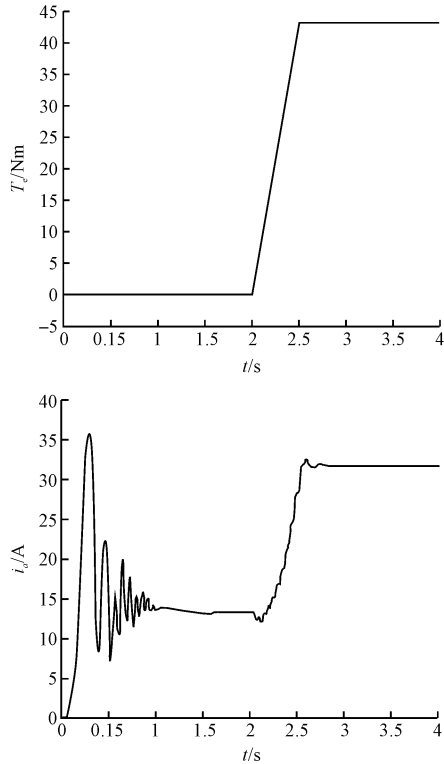


图 6 参量优化后的输出转矩和运行电流

电机在转矩补偿量为 0.4、中间电压为 6.8 V、中间频率为 0.5 Hz 时,电机的最大输出转矩为 43 Nm,运行电流为 31 A。

3 拼桨系统的试验及结果分析

本研究根据恒压频比控制原理和 Matlab/Simulink 建模仿真,利用仿真模型的参变量和 2.0 MW 风电机组 SSB 变桨驱动电机进行试验,对仿真结果进行验证。

3.1 不同转矩补偿值的输出转矩和运行电流

本研究采用输出频率 10 Hz、中间频率 0.5 Hz、中间电压3.4 V,转矩补偿量 0.2、0.3、0.4、0.5 分别进行试验,试验结果如表 6、图 7 所示。

表 6 不同转矩补偿量的试验输出转矩和运行电流

转矩补偿量	工作电压/V	最大输出 转矩/Nm	运行电流/A
0.2	39.0	29	28.2
0.3	42.3	34	31.2
0.4	45.0	38	31.2
0.5	48.0	44	35.6

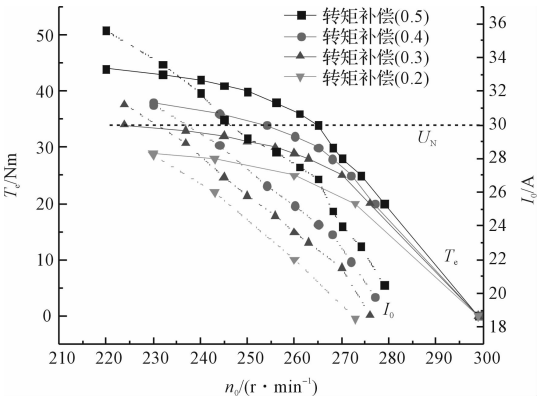


图 7 不同转矩补偿量的输出转矩和运行电流

由表 6 和图 7 可以看出,随着转矩补偿量的增大,变桨驱动电机的最大输出转矩和运行电流不断增大。转矩补偿量为 0.2、0.3、0.4 电机最大输出转矩时的运行电流都在额定电流 30 A 附近,满足短时过电流运行要求;而转矩补偿量为 0.5 电机最大输出转矩时的运行电流过大,因此输出频率 10 Hz、中间频率 0.5 Hz、中间电压 3.4 V 时的转矩补偿量为 0.4 较合适。

3.2 不同中间频率的输出转矩和运行电流

本研究采用输出频率 10 Hz、转矩补偿量 0.4、中间电压 4.8 V、中间频率 0.5 Hz、0.55 Hz、0.65 Hz、0.71 Hz、1.40 Hz 进行试验,试验结果如表 7 和图 8 所示。

表 7 不同中间频率的试验输出转矩和运行电流

中间频率/Hz	工作电压/V	最大输出转矩/Nm	运行电流/A
0.5	46	41	34.9
0.55	46	40	33.8
0.71	45.5	39	31.8
1.40	43.6	36	30.0

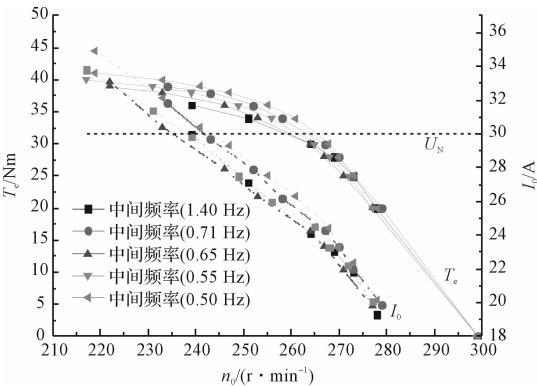


图 8 不同中间频率的输出转矩和运行电流

由表 7 和图 8 可以看出,随着中间频率的增大,变桨驱动电机的最大输出转矩和运行电流不断减小。中间频率为 0.5 Hz、0.55 Hz、0.65 Hz、0.71 Hz 和 1.40 Hz 电机最大输出转矩时的运行电流都在额定电流 30 A 附近,满足短时过电流运行要求,因此输出频率 10 Hz、转矩补偿量 0.4、中间电压 4.8 V 时,中间频率为 0.5 Hz 较合适。

3.3 不同中间电压的输出转矩和运行电流

本研究采用输出频率 10 Hz、中间频率 0.5 Hz、转矩补偿量 0.4、中间电压 3.4 V、3.8 V、4.8 V、6.8 V、9.8 V 进行试验,试验结果如表 8 和图 9 所示。

表 8 不同中间电压的试验输出转矩和运行电流

中间电压/V	工作电压/V	最大输出转矩/Nm	运行电流/A
3.4	45.0	38	31.2
4.8	46.0	41	34.9
6.8	48.0	43	34.8
9.8	50.2	47	37.0

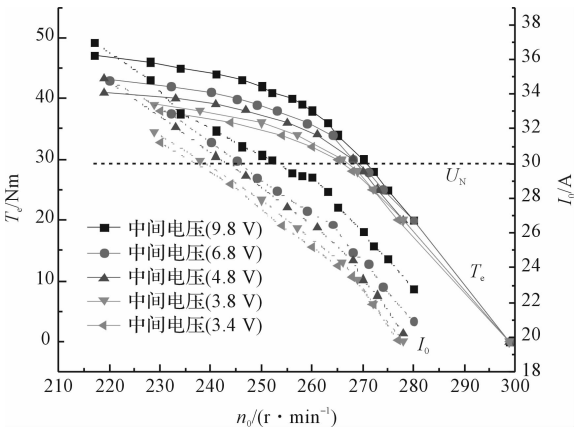


图 9 不同中间电压的输出转矩和运行电流

由表 8 和图 9 可以看出,随着中间电压的增大,变桨驱动电机的最大输出转矩和运行电流也不断增大。相对于图 7 转矩补偿量增加产生的较大的输出转矩增加,中间电压的增加产生的输出转矩增加较小。中间电压为 3.4 V、3.8 V、4.8 V、6.8 V 电机最大输出转矩时的运行电流都在额定电流 30 A 附近,满足短时过电流运行要求;而中间电压为 9.8 V 电机最大输出转矩时的运行电流过大,因此输出频率 10 Hz、中间频率 0.5 Hz、转矩补偿量 0.4 时,中间电压为 6.8 V 较合适。

根据以上试验结果,变桨驱动电机在 10 Hz 输出频率下,本研究选取中间频率 0.5 Hz、中间电压 6.8 V、转矩补偿量 0.4,实现最大输出转矩为 43 Nm,运行电流为 34.8 A,发挥满意的输出性能。试验结果与 Matlab/Simulink 仿真分析结果基本一致,验证了 2.0 MW

风电机组 SSB 变桨驱动电机采用恒压频比控制技术,优化控制方式和合理设置参变量,可以获得较好的低频输出特性。

4 结束语

本研究针对风电机组吊装现场利用变桨系统进行轮毂安装桨叶的缺点,设计了一种专供风电机组轮毂安装桨叶的拼桨系统。

(1)为满足变桨轴承在低速下平稳启动运行和停止,对拼桨系统采用低频输出的恒压频比控制技术,优化低频输出特性。

(2)根据恒压频比控制原理和电机输出转矩数学表达式,推导出恒压频比控制方式下,影响电机输出转矩的主要因素,合理设置转矩补偿量、中间电压和中间频率。

(3)利用 Matlab/Simulink 对拼桨系统进行建模及仿真,并对 2.0 MW 风电机组 SSB 变桨驱动电机拼桨系统进行试验,试验和仿真结果基本一致。

(4)根据仿真和试验结论,对 2.0 MW 风电机组轮毂安装桨叶的拼桨系统进行指导,既能满足实际工况需要和保证变桨驱动电机运行安全,又能发挥驱动器和变

桨驱动电机的性能,提高电机组轮毂安装桨叶效率,减少变桨系统故障,具有一定的经济价值和现实意义。

参考文献(References):

- [1] 叶杭冶. 风力发电机组监测与控制[M]. 北京:机械工业出版社,2011.
- [2] 窦真兰. 大型风机异步变桨技术的研究[D]. 上海:上海交通大学电子信息与电气工程学院,2013.
- [3] 叶杭冶. 风力发电机组的控制技术.[M]. 2 版,北京:机械工业出版社,2006.
- [4] 张燕宾. SPWM 变频调速应用技术[M]. 北京:机械工业出版社,2012.
- [5] 洪乃刚. 电力电子、电机控制系统的建模和仿真[M]. 北京:机械工业出版社,2010.
- [6] 王 晶,翁国庆,张有兵. 电力系统的 Matlab-SIMULINK 仿真及应用[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2012.
- [7] 程启明,李月娥,程尹曼,等. 基于 Matlab/Simulink 交流电机矢量控制系统建模与仿真[J]. 华东电力,2010,38(5):740-744.
- [8] 贾 瑞,康锦萍. 基于 Matlab/Simulink 的异步电机矢量控制系统仿真[J]. 华北电力技术,2011,40(9):18-25.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

范红伟,余清清,许国东. 变桨驱动电机低频输出的恒压频比优化控制研究[J]. 机电工程,2016,33(6):754-759.

FAN Hong-wei, YU Qing-qing, XU Guo-dong. Optimal control of constant ratio of voltage to frequency for variable pitch drive motor low-frequency output[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016,33(6):754-759.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 743 页)

参考文献(References):

- [1] 汝晶炜,向 忠,史伟民. 大流量气动高速开关阀的优化设计[J]. 机电工程,2014,31(10):1282-1286.
- [2] 肖 琼,颜伏伍,邹 华,等. 电控喷油器流量特性试验台的开发与试验分析[J]. 中国机械工程,2005,16(16):1419-1422.
- [3] ABE M, MAEKAWA N, YASUKAWA Y, et al. Quick Response Fuel Injector for Direct-Injection Gasoline Engines[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2012(134):1-5.
- [4] 卢金和,张振东,程 强,等. 电控喷油器的一种新型磁路结构[J]. 中国机械工程,2014,25(17):2305-2308,2309.
- [5] 卢学健,张振东,郭 辉. 汽油发动机电控喷油器结构改进设计[J]. 现代制造工程,2012,34(2):84-87.
- [6] 程 强,张振东,郭 辉,等. 电控汽油喷射器电磁特性仿真与磁路参数优化[J]. 汽车工程,2015,37(6):642-647.
- [7] 杨仁华. 基于 Matlab 遗传算法的汽车鼓式制动器多目标优化设计[J]. 机床与液压,2011,39(23):91-93,97.
- [8] 浦金欢,殷承良,张建武. 遗传算法在混合动力汽车控制策略优化中的应用[J]. 中国机械工程,2005,16(7):648-652.
- [9] CVETKOVIC D, COSIC I, SUBIC A, et al. Improved performance of the electromagnetic fuel injector solenoid actuator using a modeling approach[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2008, 27(4):251-273.
- [10] 颜伏伍,邹 华,肖 琼,等. 喷油器动态过程模拟分析[J]. 武汉理工大学学报,2004,26(12):79-82.
- [11] 郭凤仪,李 靖. 电器学[M]. 北京:机械工业出版社,2013:161-168.
- [12] 郭 辉,张振东,程 强,等. 一种电控喷油器动态时间参数测试方法[J]. 中国机械工程,2012,23(5):626-628.
- [13] 刘 晖,顾宏斌. 高速开关阀非线性模型及其仿真研究[J]. 机械科学与技术,2008,27(7):866-870.
- [14] 雷英杰,张善文,李续武,等. Matlab 遗传算法工具箱及应用[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2005.

[编辑:张 豪]