

基于无刷直流电机的风力机转矩模拟

郭天勇, 赵庚申, 赵耀, 程如岐, 赵二刚, 祁超

(南开大学天津市光电子薄膜器件与技术重点实验室, 天津 300071)

摘要: 针对风力发电技术的研究受到自然条件制约的问题, 该文提出了一种新的利用无刷直流电机来代替风力机的模拟方案, 通过控制无刷电机直流侧电流的方式实现转矩控制, 电流环采用径向基函数神经网络与 PI 调节相结合的控制策略。利用 Matlab/Simulink 建立系统仿真模型, 并搭建了基于 DSP 控制的无刷直流电机+永磁发电机的硬件平台, 仿真和试验结果都与理论转矩相吻合, 并有效降低了无刷电机的转矩脉动。该方法控制简单、精度高, 为实际模拟系统的设计提供了一种新的思路。

关键词: 无刷直流电机, 风力机, 转矩, 模拟, 径向基函数, 永磁发电机, 转矩脉动

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.05.018

中图分类号: TK8; TM3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-05-0111-06

郭天勇, 赵庚申, 赵耀, 等. 基于无刷直流电机的风力机转矩模拟[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 111—116.

Guo Tianyong, Zhao Gengshen, Zhao Yao, et al. Torque simulation of wind turbine based on brushless DC motor[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(5): 111—116. (in Chinese with English abstract)

0 引言

风能作为一种绿色可再生能源, 已经受到世界各国的日益重视, 因此对风能发电技术的研究就显得越来越重要。目前, 在不具备风场条件的实验室大多采用直流电机^[1-4]或异步电机^[5-8]来模拟风力机。由于无刷直流电机采用电子开关线路换相, 具有工作特性好、可靠性高和调速范围广等特点, 可代替直流电机以及异步电机调速等场合, 所以本文采用无刷直流电机进行风力机的转矩模拟。

无刷直流电机是一个多变量、非线性的控制对象, 难以建立精确的数学表达式, 而传统 PI 难以适应参数变化、干扰众多的控制系统, 且难以获得理想的控制效果, 同时由于无刷电机输出转矩具有脉动特性, 文献[9]采用新型 PWM-ON-PWM 调制方式, 需要额外增加三路位置传感器或使用高精度位置检测元件, 增加了系统的复杂度; 文献[10]中逆变桥采用恒通方式, 在逆变桥输入端加上 BUCK 变换器, 增加了系统成本。本文采用基于径向基函数 (radial basis function, RBF) 神经网络和 PI 调节相结合的智能控制方法。RBF 神经网络是一种局部逼近的神经网络, 已证明它能以任意精度逼近任意连续函数^[11], 具有学习速度快且能避免局部极小问题等优点。因此, 将 RBF 神经网络和 PI 相结合在线调整 PI 参数的控制方式可以保证系统的稳定性和提高系统的控制精度, 从而扩大无刷电机的应用范围。

本文首先分析了风力机和无刷电机的特性, 并分别建立了它们的数学模型, 并通过 Matlab/Simulink 建立了

基于无刷直流电机模型的风力机模拟系统, 最后对基于 RBF 神经网络整定的 PI 智能控制算法进行了仿真验证, 并通过基于 DSP 的硬件平台来验证系统的可行性。

1 模拟系统的特性分析

1.1 风力机的特性

由空气动力学, 风力机从风中捕获的机械功率为

$$P = \frac{1}{2} \rho C_p(\lambda, \beta) \pi R^2 V^3 \quad (1)$$

风力机的输出转矩为

$$T = \frac{P}{w_r} = \frac{30 P}{\pi n} = \frac{15 \rho C_p(\lambda, \beta) R^2 V^3}{n} \quad (2)$$

式中, P 为风机输出功率, W ; ρ 为空气密度, kg/m^3 ; R 为风轮半径, m ; V 为风速, m/s ; w_r 为风轮角速度, rad/s ; n 为风轮转速, r/min ; T 为风机输出转矩, Nm ; $C_p(\lambda, \beta)$ 为风能利用系数, 它是叶尖速比 λ 和桨距角 β 的函数^[12-13], 且 $\lambda=w_r R/V$, 它存在一个最优叶尖速比, 若保持其不变, 可实现最大风能捕获。

图 1a 是根据式(2)建立的风力机模型, 当桨距角 $\beta=0$ 时, 根据典型小风力机参数^[14], 利用建立的风力机模型可以得到不同风速对应的风力机输出转矩特性曲线, 如图 1b 所示。

1.2 无刷直流电机的特性

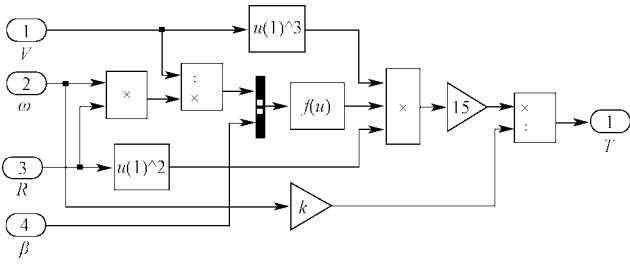
本文是针对电机工作于二相导通, 星形三相六状态方式进行分析, 并假设可忽略电枢绕组的电感和功率开关管导通时间延迟, 无刷电机的电压方程可以简化为

$$U = E + 2 r I_s \quad (3)$$

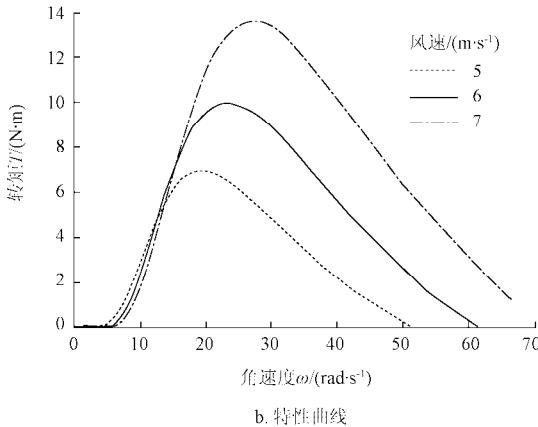
式中, U 为两相绕组之间的端电压, V ; E 为线电动势, V ; r 为每相绕组电阻, Ω ; I_s 为定子电流, A 。

收稿日期: 2010-07-05 修订日期: 2010-09-13

作者简介: 郭天勇 (1981—), 男, 山东泰安人, 博士研究生, 研究方向为光伏与风力发电系统的控制与设计。天津 南开大学天津市光电子薄膜器件与技术重点实验室, 300071。Email: gty_0101@163.com



a. 数学模型



注: ω 为风力机角速度; R 为风轮半径; β 为桨叶节距角; T 为风力机输出转矩

图 1 风力机转矩

Fig.1 Torque of wind turbine

而两相导通时, 电机电磁转矩和线电动势分别为^[15]

$$\begin{cases} T_e = \frac{1}{\omega} (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) = \frac{EI_s}{\omega} = k_T I_s \\ E = k_E n_e \end{cases} \quad (4)$$

式中, ω 为电机转子机械角速度, rad/s; e_a, e_b, e_c 为定子相绕组反电动势, V; i_a, i_b, i_c 为定子相绕组电流, A; n_e 为电机转速, r/min; k_E 为电势常数; k_T 为电磁转矩常数。

在忽略各种损耗的情况下, 可认为电磁转矩即电机的输出机械转矩, 由式(3)和式(4)得

$$T_e = \frac{k_T}{2r} (U - k_E n_e) \quad (5)$$

从上式可以看出, 当电源电压固定并忽略开关管导通压降时, 电机的输出转矩与电机转速为线性关系, 利用 PWM 方式改变电机导通相之间的电压时即可获得一系列斜率相同而截距不同的直线, 如图 2 中虚线所示,

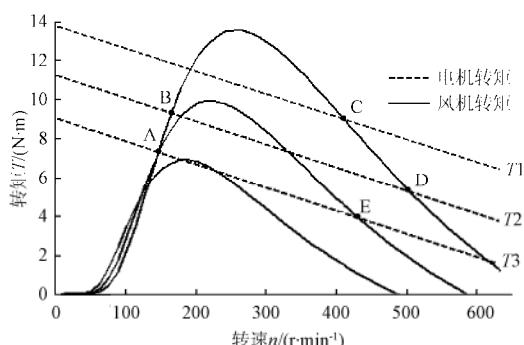


图 2 无刷电机特性曲线

Fig.2 Characteristic curves of brushless DC motors

实线为风力机转矩曲线, 通过控制负载转矩, 使其与电机输出转矩相平衡, 电机才能平稳的运行在两者的交点处, 即风力机的转矩特性曲线上, 从而实现转矩模拟。

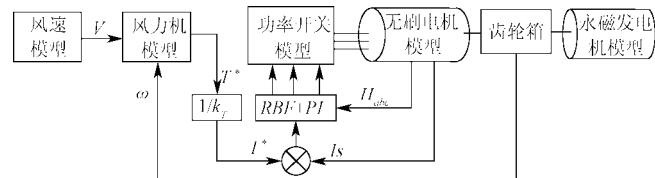
2 风力机转矩模拟系统

2.1 转矩模拟原理

由式(4)和式(5)可以看出, 实现转矩模拟有两种控制方式: 一种是利用转矩与电压和转速的关系; 另一种是利用转矩与定子电流的纯比例关系。

首先, 结合无刷电机特性曲线分析转矩模拟过程^[16], 如图 2 所示, 若电机初始位置在 A 点, 并假定此时电机转矩与负载转矩相同, 若风速不变, 要实现转矩模拟则下一个位置应该在 B 点, 由于电机转速不能突变, 则电机运行曲线由 T_3 转到 T_2 , 此时电机转矩大于风力机转矩, 故需要调整发电机的电流使其负载转矩等于 B 点的转矩, 此时电机转矩大于负载转矩, 则电机加速, 往 B 的方向移动, 并稳定在 B 点; 同理, 若电机初始位置在 C 点, 下一个位置不论是 D 点还是 E 点, 即风速不变或者突变时只需要改变负载转矩使得电机加速, 当电机转矩与负载转矩平衡时系统稳定运行在 D 点或 E 点, 此法涉及变量多, 且控制精度不高。

本文采用控制电流的方式实现转矩模拟, 此法控制简单, 易实现。首先, 风力机模型根据风速模型提供的风速 V 以及经过齿轮箱后的电机转子角速度 ω 计算出风力机的输出转矩 T , 并将其作为参考转矩 T^* ; 然后由电磁转矩系数 k_T 推导出额定定子电流 I_s^* , 将其与霍尔传感器检测的直流侧电流 I_s 进行比较, 电流环采用 RBF 神经网络与 PI 调节相结合的控制方式, 并结合电机霍尔传感器信号 H_{abc} 产生控制功率开关管的 PWM 信号, 以此来控制导通电流, 并结合对负载转矩的控制, 最终实现电机转矩模拟。模拟系统的框图如图 3 所示, 由于电机转速远远高于风力机转速, 故无刷电机和永磁发电机之间需要加入齿轮箱 (变比 $N=1:6$)。



注: V 为风速; ω 为风力机角速度; T^* 为风力机输出参考转矩; I^* 为无刷直流电机定子电流参考值; I_s 为无刷直流电机定子电流; H_{abc} 为无刷直流电机霍尔传感器信号

图 3 模拟系统框图

Fig.3 Block diagram of simulation system

2.2 基于 RBF 神经网络的 PI 控制

RBF 神经网络, 是具有单隐层的两层前馈网络。由于它模拟了人脑局部调整、相互覆盖接受区域的神经结构, 因此, 它是一种局部逼近的网络。它的输入到输出映射是非线性的, 而隐含层到输出层是线性的, 本文采用的 RBF 神经网络结构为 3-8-1, 隐含层节点为高斯函数, 此系统可以提高系统的稳定性和控制精度。

基于 RBF 神经网络的 PI 控制是利用神经网络的在线控制, 根据系统运行状态, 时时调节 PI 控制参数, 以达到系统性能最优化。基于 RBF 神经网络整定的 PI 控制算法如下^[17]。

1) 确定 RBF 辨识网络的输入节点数目 n 、隐含层数目 m 和学习速率 η , 设定网络中心向量 C_j 、基宽向量 b_j 、权值 W_j 的初值。

2) 确定辨识器的性能指标函数

$$J = 0.5 (y_{out}(k) - y_{mout}(k)) \quad (6)$$

式中, $y_{out}(k)$ 为 k 时刻系统实际输出值; $y_{mout}(k)$ 为 k 时刻神经网络的辨识输出值。

3) 采用增量式 PI 控制, 根据采样值, 求出误差

$$error(k) = r_{in}(k) - y_{out}(k) \quad (7)$$

式中, $r_{in}(k)$ 为 k 时刻系统输入值。

PI 输入分别为

$$\begin{cases} x_p = error(k) - error(k-1) \\ x_i = error(k) \end{cases} \quad (8)$$

4) 根据梯度下降法计算出 PI 参数计算出 $u(k)$, 将其作用于被控对象和 RBF 辨识网络。

$$\begin{cases} u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \\ \Delta u(k) = k_p x_p + k_i x_i \end{cases} \quad (9)$$

5) 采用梯度下降法调整权值、隐含层中心矢量和基宽向量。

6) 令 $k=k+1$, 跳转到 (2) 继续执行。

3 仿真与试验结果

基于本文提出的风机模拟策略, 利用 Matlab/Simulink 搭建了系统的整体仿真模型, 如图 4a 所示。其中, 风速模型采用典型的四分量模型^[12,18], 即基本风、阵风、渐变风和随机风; 风力机模型是由图 1a 所示的模型封装而成; 功率开关电子线路有 6 个功率 MOSFET 组成; BLDCM 为电机本体模型, 其内部结构如图 4b 所示, 反电动势利用编写 S 函数实现; 转矩控制系统封装在 PWM 模块, 其中, 调制方式采用 PWM-ON^[19]型, 即导通的 120°内, 前 60°进行 PWM 调制, 后 60°恒通, 此种方式的转矩脉动较小。

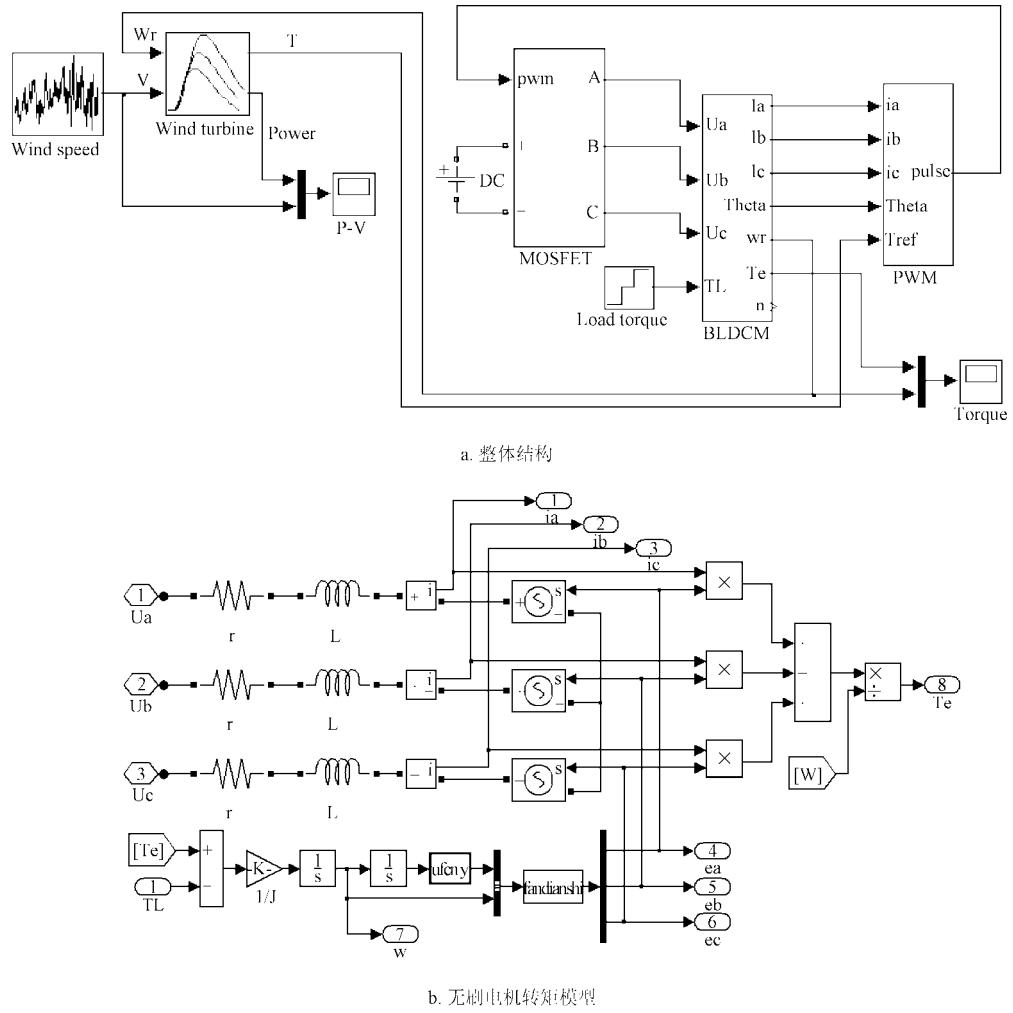


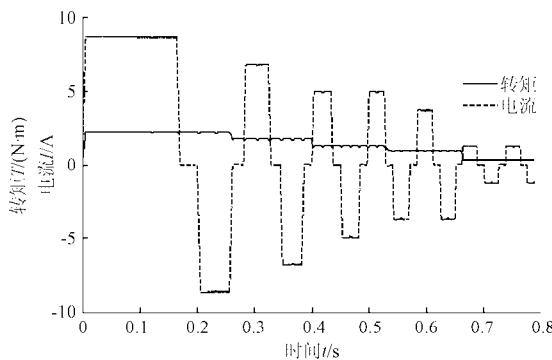
图 4 基于无刷直流电机的风力机模拟系统模型

Fig.4 Wind turbine simulation system model based on brushless DC motor

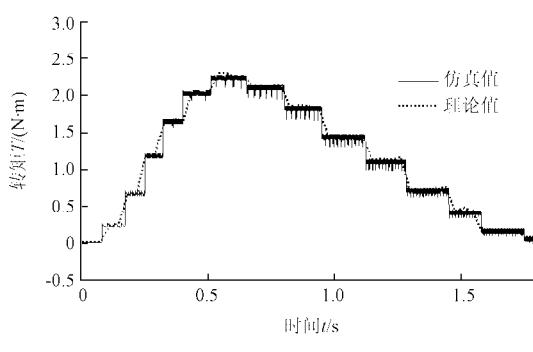
由于减速比的存在, 所以系统仿真时只需电机输出转矩为风力机转矩的 1/6, 则实际系统中就可以获得与风

力机相同的转矩值。图 5a 所示的是风速递减时仿真得到的电机定子相电流和电机转矩曲线, 其中, 电流为矩形

波, 与理想曲线保持一致, 电机转矩有较小脉动; 此时, 风速只包含基本风, 且分别在 0.25、0.4、0.55 和 0.65 s 发生突变; 而图 5b 所示的是基于无刷电机的转矩仿真结果与实际风力机转矩对比, 其中, 风力机转矩是在基本风+随机风的情况下得到的理论值, 从图中可以看出, 当转速较低时, 风力机转矩波动量很小, 且电机的转矩脉动量也较小, 模拟效果理想; 而当转速较高时, 风力机转矩本身就有较大的波动量, 系统仿真得到的脉动量也比较明显。而且从中可以看出, 风力机转矩具有一定的缓冲特性, 即不会发生突变, 而模拟系统由于采用数字控制, 采样点较少所以具有明显的跳变沿。但从整体上看, 本文搭建的模拟系统可以较好的跟踪风力机转矩特性。



a. 风速递减时转矩和电流曲线



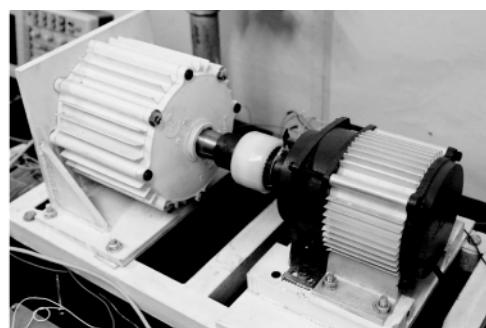
b. 转矩模拟

图 5 基于无刷直流电机的转矩仿真结果

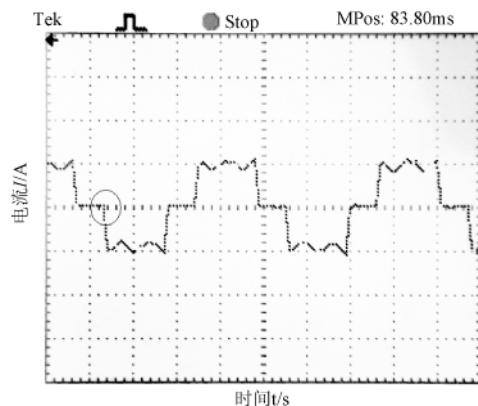
Fig.5 Torque simulation results based on brushless DC motor

本文搭建了一个如图 6a 所示的实际系统, 包括无刷直流电机、永磁发电机和控制电路, 其中, 无刷直流电机的参数为: 额定功率 $P_1=500$ W, 额定电压 $U=48$ V, 额定转速 $n=1800$ r/min, 每相定子绕组电阻 $r=0.2$ Ω , 电感 $L-M=0.0261$ H, 转动惯量 $J=0.005$ $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 。永磁发电机额定功率 $P_2=300$ W。控制电路的核心是 TMS320F2812, 其内部事件管理器具有 PWM 电路和捕捉单元, 从而可以方便的实现 6 路 PWM 信号以及霍尔信号检测功能, 同时可以根据内部定时和计数器获得电机转速, 由于有变比为 1:6 的齿轮箱, 所以电机速度较低, 采用周期法测速; 而电机定子电流通过外加的电流霍尔传感器获得, 功率 MOSFET 选用 IRF3710, 功率管驱动采用 IR2103, 电路所需外部元器件较少, 系统实现比较简单, 控制精度比

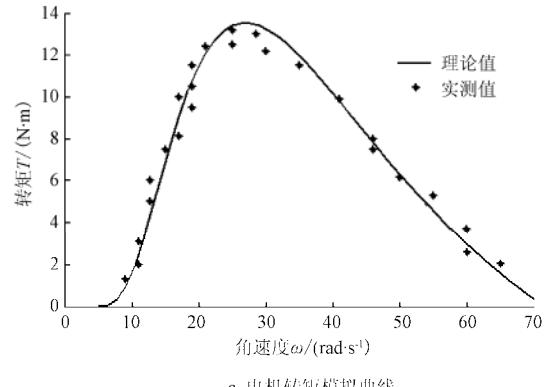
较高且运行可靠。



a. 无刷电机和永磁发电机连接图



b. 电机定子电流波形



c. 电机转矩模拟曲线

图 6 风力机转矩模拟硬件系统及试验结果

Fig.6 Hardware and experimental results of wind turbine torque simulation

图 6b 是电机恒定转矩时的电流试验波形, 从图中可以看出基于 RBF 神经网络整定的 PI 控制方法使得电机换相区电流波形更接近于理想曲线, 如图中圆圈内所示, 没有明显的波动, 从而减小了换相时的转矩脉动, 但传导区仍有少量的脉动, 如波形的正负半周所示。图 6c 是电机转矩模拟曲线, 其中的离散点是由实际系统测得的电机转矩值, 实线是风力机理论转矩, 从图中看出当风力机转矩较小时, 两者比较接近, 而转矩较大时, 个别误差也较大, 与仿真结果也比较吻合。从图中可以看出此系统能较好的实现风力机转矩模拟, 从而验证了系统的可行性和有效性。

4 结 论

在对比风力机和无刷直流电机的转矩特性曲线的基础上, 提出采用电流闭环的控制方式, 且利用 RBF 与 PI 控制相结合的在线调整电流环比例积分系数。建立了模拟系统的仿真模型, 并利用 DSP 设计了无刷电机的控制系统, 包含调速、测速和电流检测等功能。仿真和试验结果表明: 试验转矩数据与理论分析比较接近, 而且系统具有较快的响应速度和较小的转矩脉动, 为后续进行最大风能捕获和变桨距控制技术的研究打下了坚实的基础。

[参 考 文 献]

- [1] 刘其辉, 贺益康, 赵仁德. 基于直流电动机的风力机特性模拟[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(7): 134—139.
Liu Qihui, He Yikang, Zhao Rende. Imitation of the characteristic of wind turbine based on DC motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(7): 134—139. (in Chinese with English abstract)
- [2] 卞松江, 潘再平, 贺益康. 风力机特性的直流电机模拟[J]. 太阳能学报, 2003, 24(3): 360—364.
Bian Songjiang, Pan Zaiping, He Yikang. The imitation of the fan characteristic by the dc motor[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2003, 24(3): 360—364. (in Chinese with English abstract)
- [3] 马洪飞, 张薇, 李伟伟, 等. 基于直流电机的风力机模拟技术研究[J]. 太阳能学报, 2007, 28(11): 1278—1283.
Ma Hongfei, Zhang Wei, Li Weiwei, et al. Research on wind turbine emulation based on DC motor[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2007, 28(11): 1278—1283. (in Chinese with English abstract)
- [4] 贺益康, 胡家兵. 风力机特性的直流电动机模拟及其变速恒频风力发电研究中的应用[J]. 太阳能学报, 2006, 27(10): 1006—1011.
He Yikang, Hu Jiabing. The imitation of wind-turbine characteristic using DC motor in the investigation on VSCF wind-power generation[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2006, 27(10): 1006—1011. (in Chinese with English abstract)
- [5] Hossein M K, Chang Liuchen, Tobie Boutot. Development of a novel wind turbine simulator for wind energy conversion systems using an inverter-controlled induction motor[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(3): 547—552.
- [6] Cardenas R, Pena R. Sensorless vector control of induction machines for variable-speed wind energy applications[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(1): 196—205.
- [7] 乔明, 林飞, 孙湖, 等. 基于异步电机的风力机模拟实验平台的研究[J]. 电气传动, 2009, 39(1): 40—43.
Qiao Ming, Lin Fei, Sun Hu, et al. Development of experimental platform for wind power generation using induction machine[J]. Electric Drive, 2009, 39(1): 40—43. (in Chinese with English abstract)
- [8] 安小丹. 异步电机模拟风轮机的变频调速系统研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
- [9] 韦鲲, 胡长生, 张仲超. 一种新的消除无刷直流电机非导通相续流的 PWM 调制方式[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(7): 104—108.
Wei Kun, Hu Changsheng, Zhang Zhongchao. A novel PWM scheme to eliminate the diode freewheeling of the inactive phase in BLDC motor[J]. Proceeding of the CSEE, 2005, 25(7): 104—108. (in Chinese with English abstract)
- [10] 张晓峰, 胡庆波, 吕征宇. 基于 BUCK 变换器的无刷直流电机转矩脉动抑制方法[J]. 电工技术学报, 2005, 20(9): 72—76.
Zhang Xiaofeng, Hu Qingbo, Lü Zhengyu. Torque ripple reduction in brushless DC motor drives using a BUCK converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(9): 72—76. (in Chinese with English abstract)
- [11] 刘金琨. 先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004: 153—205.
- [12] Anderson P M, Bose A. Stability simulation of wind turbine systems[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1983, 102(12): 3791—3795.
- [13] Slootwet J G, Polinder H, King W L. Dynamic modeling of a wind turbine with doubly fed induction generator[C]. IEEE Power Engineering Society Summer meeting, Vancouver, Jul. 2001: 644—649.
- [14] 刘万琨, 张志英, 李银凤, 等. 风能与风力发电技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 164—165.
- [15] 夏长亮, 张茂华, 王迎发. 永磁无刷直流电机直接转矩控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(6): 104—109.
Xia Changliang, Zhang Maohua, Wang Yingfa. The direct torque control for permanent magnet brushless DC motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(6): 104—109. (in Chinese with English abstract)
- [16] 杜海江, 冯先正, 杨明皓. 基于直流电动机的小型风力机仿真建模及实验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 171—176.
Du Haijiang, Feng Xianzheng, Yang Minghao. Simulation model and experiment research of small wind turbine based on DC motor[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(1): 171—176. (in Chinese with English abstract)
- [17] 夏长亮, 李志强, 王明朝, 等. 基于 RBF 神经网络在线辨识的永磁五刷直流电机单神经元 PID 模型参考自适应控制[J]. 电工技术学报, 2005, 20(11): 65—69.
Xia Changliang, Li Zhiqiang, Wang Mingchao, et al. Single neuron PID model reference adaptive control for PM brushless DC motors based on RBF neural network on-line identification[J]. Transactions of China Electrotechnical society, 2005, 20(11): 65—69. (in Chinese with English abstract)
- [18] Wasynczuk O, Man D T, Sullivan J P. Dynamic behavior of a class of wind turbine generators during random wind fluctuations[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, 100(6): 2837—2845.
- [19] 张相军, 陈伯时. 无刷直流电机控制系统中 PWM 调制方

式对换相转矩脉动的影响[J]. 电机与控制学报, 2003, 7(2): 87—91.
Zhang Xiangjun, Chen Boshi. The different influences of four

PWM modes on commutation torque ripples in brushless DC motor control system[J]. Electric Machines and Control, 2003, 7(2): 87—91. (in Chinese with English abstract)

Torque simulation of wind turbine based on brushless DC motor

Guo Tianyong, Zhao Gengshen, Zhao Yao, Cheng Ruqi, Zhao Ergang, Qi Chao

(Nankai University, Tianjin Key Laboratory of Photo-electronic Thin Film Devices and Technology, Tianjin 300071, China)

Abstract: In order to solve the problem that the study of wind power generation was restricted by nature conditions, this paper proposed a novel simulation scheme by using brushless DC motor instead of wind turbine, the torque imitation was implemented by controlling the DC side current, and the current loop adopted the control method of radial basis function neural network combined with PI control. A system simulation model was built by Matlab/Simulink, and a hardware platform based on brushless DC motor and permanent magnet generator was also established, which was controlled by DSP. Simulation and experimental results were consistent with theoretical torque, and the torque ripple of brushless DC motor was effectively reduced. This control method is simple with high control precision, and can provide a new idea for the design of the simulation system.

Key words: brushless DC motors, wind turbines, torque, simulation, radial basis function, permanent magnet generator, torque ripple