

无刷双馈风力发电机直接转矩控制系统研究

刘伟¹, 沈宏², 高立刚³, 荣海舟¹

(1. 广东天联集团有限公司, 广东 广州 510600; 2. 河南科技学院机电学院, 河南 新乡 453003; 3. 中国水电顾问集团西北勘测设计研究院, 陕西 西安 710065)

摘要: 提出一种基于直接转矩控制的无刷双馈风力发电机的控制方法, 建立了包括风力机, 机械传动部分和无刷双馈电机的无刷双馈风力发电系统的整体仿真模型。该系统根据风速变化通过直接控制无刷双馈发电机的电磁转矩, 以达到风力机运行的最佳叶尖速比, 从而实现风力机在低风段的最大风能追踪控制。

关键词: 风力发电; 无刷双馈电机; 直接转矩控制; 最大风能追踪

Study on direct torque control of brushless doubly-fed machines used for wind power generation

LIU Wei¹, SHEN Hong², GAO Li-gang³, RONG Hai-zhou¹

(1. Guangdong Tianlian Group Co. Ltd, Guangzhou 510600, China; 2. Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China; 3. Hydrochina Xibei Engineering Corporation, Xi'an 710065, China)

Abstract: A control method based on direct torque control of brushless doubly-fed wind generation system is presented. A model which includes wind turbine, gear-box, and brushless doubly-fed machines for this system is set up. As wind change, by means of controlling the electromagnetic torque of brushless doubly-fed machines, the best tip speed ratio of wind turbine is realized, and eventually the generating operation mode with maximal wind energy capture comes true.

Key words: wind power generation; brushless doubly-fed machines; direct torque control; maximal wind energy capture

中图分类号: TM315 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)05-0077-05

0 引言

近年来, 随着风力发电技术的发展, 国内外许多学者都将目光投向了无刷双馈电机(BDFM)^[1-8]。无刷双馈电机是一种结构简单、坚固可靠、异同步通用的电机, 可在无刷情况下实现双馈, 同时具有功率因数可调, 效率高的特点, 在变速恒频发电领域具有更大的优越性, 特别适合于海上风电场等恶劣环境中^[9]。

目前主要存在两种控制方法用于控制 BDFM, 基于磁场定向的矢量变换控制和直接转矩控制^[10]。利用矢量变换控制无刷双馈电机, 文献[2-4,8]进行

了深入的探讨和研究。和矢量变换控制相比, 直接转矩控制不需要进行坐标变换, PWM 调制和位置传感器, 因此直接转矩控制系统简单可靠, 同时有对于电机参数扰动不敏感等特点^[9]。本文结合变速恒频风力发电的特点建立了 BDFM 数学模型以及基于直接转矩控制系统的仿真模型, 采用上述控制模型, 通过调节无刷双馈发电机的电磁转矩, 使风力机运行在最佳叶尖速比, 实现最大风能追踪。

1 无刷双馈发电机的 DTC 控制原理

考虑直接转矩控制的特点, 无刷双馈电机的数学模型应建立在转子 d-q 坐标系上, 如式(1)所示。

$$\begin{bmatrix} U_{qp} \\ U_{dp} \\ U_{qc} \\ U_{dc} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_p + DL_{sp} & P_p \omega_r L_{sp} & 0 & 0 & DM_{pr} & P_p \omega_r M_{pr} \\ -P_p \omega_r L_{sp} & r_p + DL_{sp} & 0 & 0 & -P_p \omega_r M_{pr} & DM_{pr} \\ 0 & 0 & r_c + DL_{sc} & P_c \omega_r L_{sc} & -DM_{cr} & P_c \omega_r M_{cr} \\ 0 & 0 & -P_c \omega_r L_{sc} & r_c + DL_{sc} & P_c \omega_r M_{cr} & DM_{cr} \\ DM_{pr} & 0 & -DM_{cr} & 0 & r_r + DL_r & 0 \\ 0 & DM_{pr} & 0 & DM_{cr} & 0 & r_r + DL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qp} \\ i_{dp} \\ i_{qc} \\ i_{dc} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: r_p , L_{sp} , M_{pr} 分别为功率绕组的电阻, 功率绕组的自感和功率绕组和转子之间的互感; r_c , L_{sc} ,

M_{cr} 为控制绕组相应参数; r_r, L_r, ω_r 分别为转子电阻, 转子电感和转子机械角速度; p_p, p_c 分别为功率绕组极对数和控制绕组极对数; $u_{qp}, u_{dp}, u_{qc}, u_{dc}, i_{qp}, i_{dp}, i_{qc}, i_{dc}, i_{qr}, i_{dr}$ 为电压和电流的瞬时值; 下标 ‘p’ 表示功率绕组, ‘c’ 表示控制绕组, ‘r’ 表示转子, ‘q’ 表示 q 轴分量, ‘d’ 表示 d 轴分量; ‘D’ 为对时间的微分。

电机的运动方程为

$$D\omega_r = (T_e - T_g - K_d\omega_r) / J \quad (2)$$

式中: J, K_d 为电机转子机械惯量, 转子阻尼系数; T_g, T_e 分别为机械转矩和发电机的电磁转矩。

无刷双馈电机在运行时相当于一台 $2(P_p + P_c)$ 极绕组转子感应电机, 其转矩公式可以表示为:

$$T_c = \frac{3(P_p + P_c)L_{sp}}{2(L_{sp}L_{sc} - L_r)} |\psi_p| |\psi_c| \sin \delta \quad (3)$$

式中: ψ_p, ψ_c 为功率绕组和控制绕组的磁链, δ 为它们之间的夹角。

$$\psi_{dp} = \int (U_{dp} - I_{dp}r_p) dt \quad (4)$$

$$\psi_{qp} = \int (U_{qp} - I_{qp}r_p) dt \quad (5)$$

$$\psi_p = \sqrt{(\psi_{dp})^2 + (\psi_{qp})^2} \quad (6)$$

功率绕组直接接入电网, 电压幅值不变, 电阻压降相对于功率绕组端电压很小, 所以功率绕组磁链 ψ_p 基本不变, 根据上式, 在直接转矩控制中, 可以保持控制绕组磁链 ψ_c 不变, 通过控制绕组的电压矢量来控制控制绕组磁链 ψ_c 的旋转速度, 从而改变磁通角 δ 的大小, 达到改变转矩的目的^[11]。关于电压矢量和磁链和关系, 文献[12]中已有详细论述, 在此不再重复。

图 1 为无刷双馈发电机直接转矩控制系统的结构框图。该系统采用转矩, 磁链双闭环控制方案。功率绕组和控制绕组的相电压和相电流作为磁链转矩估计模块的输入, 磁链转矩估计模块的输出 ψ_c, T_e 分别与磁链给定 ψ_{c_ref} 和转矩给定 T_{e_ref} 比较并进行滞环输出。逆变器输出的电压矢量由磁链误差 $\Delta \psi_c$, 转矩误差 ΔT_e 和控制绕组磁链位置角 ϕ 共同决定。如图 2 所示本文将电压矢量圆分为六个扇区, 表 1 为电压矢量选择表, 磁链调节器和转矩调节器根据磁链和转矩的参考值与实测值的差量 (↑ 为增加, ↓ 为减小) 的不同状态决定输出的电压空间矢量。

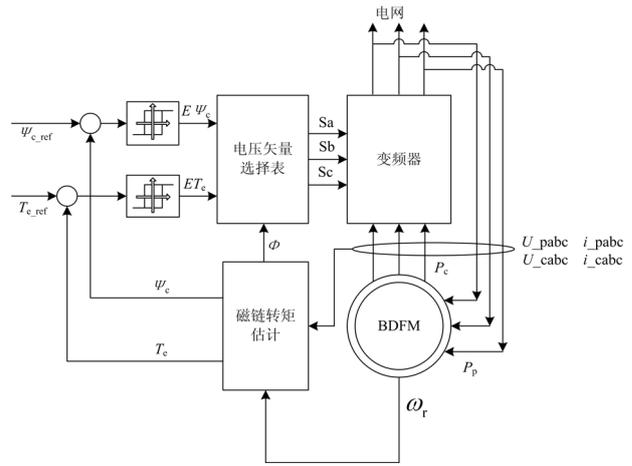


图 1 无刷双馈发电机直接转矩控制系统框图
Fig.1 Block scheme of the direct torque control system for BDFM

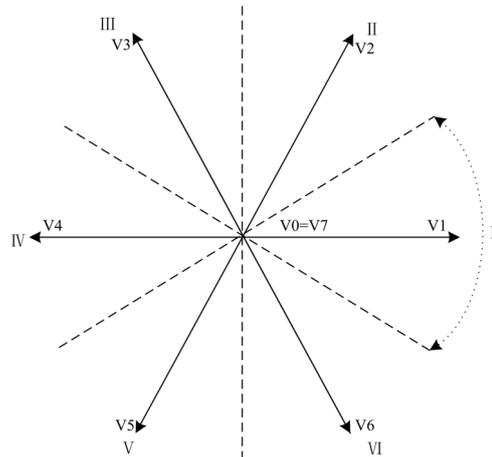


图 2 电压矢量圆
Fig.2 Voltage sectors configure

表 1 电压矢量选择表

Tab.1 Voltage vector table

ψ_c	T_c	扇区	扇区	扇区	扇区	扇区	扇区
		I	II	III	IV	V	VI
ψ_c	$T_c \uparrow$	V2	V3	V4	V5	V6	V1
	$T_c \downarrow$	V6	V1	V2	V3	V4	V5
ψ_c	$T_c \uparrow$	V3	V4	V5	V6	V1	V2
	$T_c \downarrow$	V5	V6	V1	V2	V3	V4

2 无刷双馈风力发电系统仿真模型

2.1 磁链转矩估计

控制绕组的磁链幅值与相角通过 d-q 分量计算得到:

$$\psi_c = \sqrt{(\psi_{dc})^2 + (\psi_{qc})^2} \quad (7)$$

$$\Phi = \arctan(\psi_{qc} / \psi_{dc}) \quad (8)$$

其中幅值作为磁链调节器的反馈量, 相角用于确定控制绕组磁链所在区间。

转矩估计的公式为:

$$T_e = P M_{pr} (i_{qp} i_{dr} - i_{dp} i_{qr}) + P_c M_{cr} (i_{qc} i_{dr} + i_{dc} i_{qr}) \quad (9)$$

其中: $i_{dr} = (-L_{sc} i_{dc} + \psi_{dc}) / M_{cr}$, $i_{qr} = L_{sc} i_{qc} - \psi_{qc} / M_{cr}$ 。

2.2 风力机模型

风力机通过叶轮捕获风能, 将风能转换为轮毂上的机械转矩。风力机吸收风能产生的转矩为:

$$T_w = 0.5 \rho \pi C_T (\beta, \lambda) V_w^2 R^3 \quad (10)$$

式中: ρ 为空气密度; R 为叶片半径; V_w 为风速; C_T 为风能利用系数; β 为桨距角; $\lambda = \omega_m R / V_w$ 为叶尖速比; ω_m 为风力机机械角速度; T_w 为风力机轴上的机械转矩。

2.3 机械传动部分模型

为了简化模型, 本文把从轮毂到发电机转子之

间的连接轴和齿轮箱近似用一阶惯性环节来描述:

$$T_w - k_g T_e = J_w D \omega_m \quad (11)$$

$$\omega_r = k_g \omega_m \quad (12)$$

式中: J_w 为等效的惯性时间常数; K_g 为齿轮箱变速比; T_e 为发电机电磁转矩; T_w 为风力机轴上的机械转矩; ω_m 为风力机机械角速度; ω_r 为发电机机械转矩; D 为对时间的微分。

2.4 BDFM 直接转矩控制系统仿真模型

根据上述无刷双馈发电机模型, 风力机模型和机械传动模型, 利用 Matlab/Simulink 仿真工具建立控制系统仿真模型如图 3 所示。为了实现最大风能追踪控制, 本文假定空气密度 $\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$, 风速可准确测量。根据风力机的特性, 风速 V 下 BDFM 的理论最佳速度为:

$$n_{opt} = \frac{30 \lambda_{opt} V}{\pi R} K_g \quad (13)$$

将理论最佳速度 n_{opt} 与实际的发电机转速 n 作为转矩参考模块的输入, 再经过 PI 调节器得到转矩的参考值^[13]。

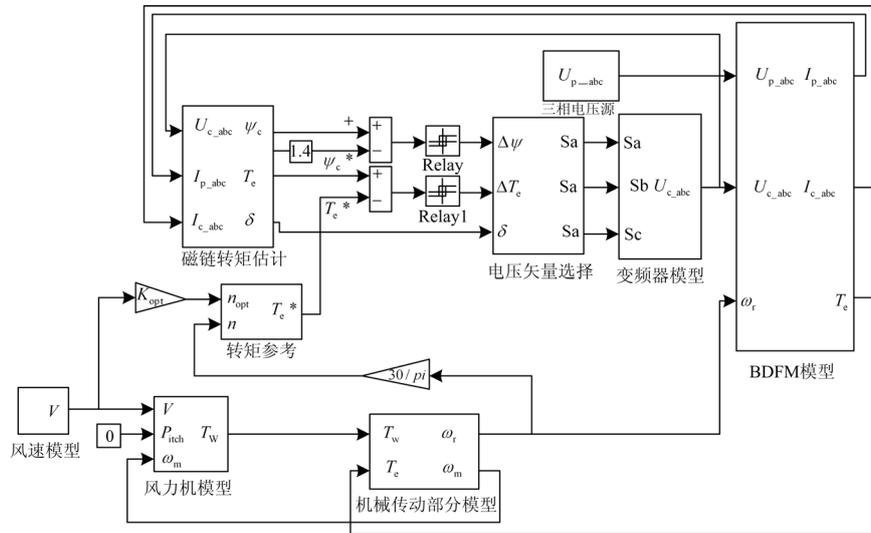


图 3 无刷双馈风力发电直接转矩控制系统

Fig.3 BDFM wind generation power control system

3 仿真结果及其分析

仿真参数选取算法为 ode23, 选取可变步长, 最大步长 0.001。

无刷双馈电机参数如表 2 所示。

风力机参数选择: 额定功率 15 kW, 最大风能利用系数 $C_{pmax} = 0.34$, 最佳叶尖速比 $\lambda_{opt} = 9$, 叶片半

径 $R = 6 \text{ m}$ 。齿轮箱变比 $K_g = 8$ 。

仿真开始时风速为 6 m/s, 1 s 后突变为 7 m/s, 在 2 s 时又为 6 m/s, 如图 4 所示。根据式(13)可以得到发电机理论最佳转速 n_{opt} 在风速为 6 m/s 时为 687 r/min, 7 m/s 时为 802 r/min。图 5 为无刷双馈发电机的转速曲线, 从图 5 可以看出, 发电机很好地跟踪到了最佳转速。

表 2 无刷双馈电机参数

Tab.2 BDFM electrical parameters

	功率绕组	控制绕组	转子绕组
电阻/ Ω	0.435	0.435	1.63
自感/mH	71.38	65.33	142.8
互感/mH	69.31	60.21	

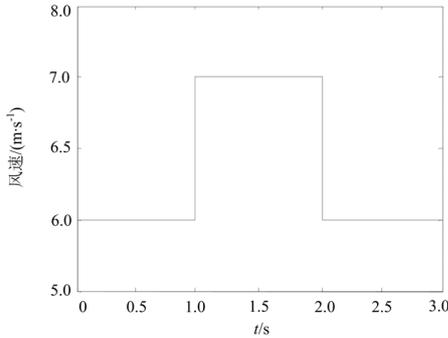


图 4 风速曲线
Fig.4 Wind curve

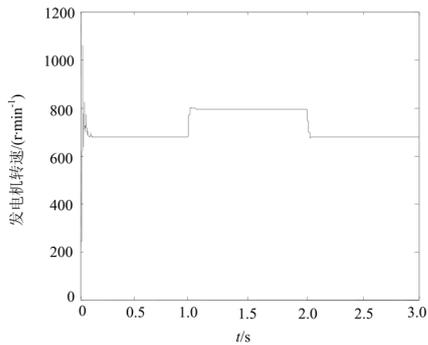


图 5 无刷双馈发电机转速曲线
Fig.5 BDFM's speed curve

图 6 和图 7 分别为功率绕组和控制绕组的电流曲线。由图 6 和图 7 可以看出，当风速由 6 m/s 变为 7 m/s 时，功率绕组电流频率不变，但是幅值增大，控制绕组电流频率和幅值都发生变换。

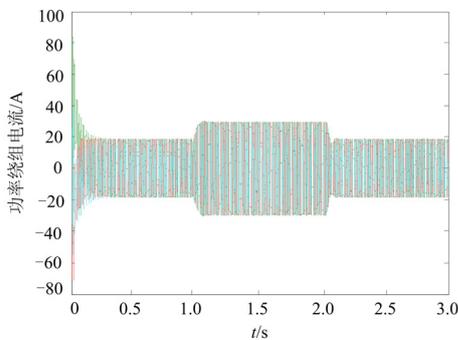


图 6 功率绕组电流曲线图
Fig.6 Current curve of the power winding

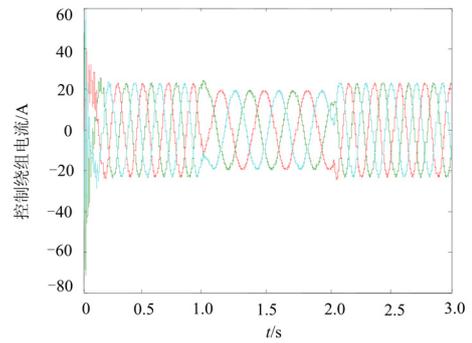


图 7 控制绕组电流曲线图

Fig.7 Current curve of the control winding

从图 8 可以看出，当风速由 6 m/s 变为 7 m/s 时，发电机的有功功率由 3.3 kW 变为 4.7 kW，无功功率由 9.7 kVA 变为 16.1 kVA。

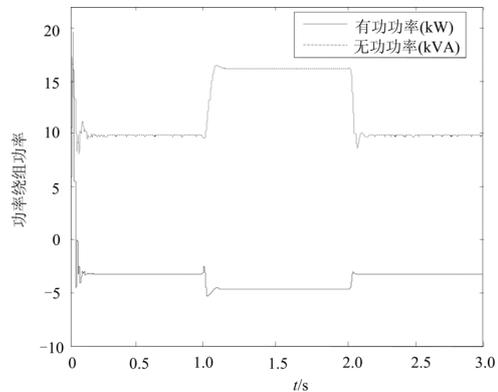


图 8 功率绕组功率曲线图

Fig.8 Power curve of the power winding

4 结论

本文建立了基于直接转矩控制的无刷双馈风力发电系统模型，仿真结果表明将直接转矩控制应用于无刷双馈发电系统中，可以实现低风段的最大风能跟踪，具有控制简单和易于实现的优点，同时为以后研究无刷双馈风电发电系统和电网之间的相互影响奠定基础。

参考文献

[1] 黄守道, 王毅, 王耀南, 等. 无刷双馈电机风力发电控制系统与仿真研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2004, 31(1): 37-40.
HUANG Shou-dao, WANG Yi, WANG Yao-nan, et al. Brushless Doubly-Fed Machine Wind Power Generation Control System and Its Simulation [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2004, 31(1): 37-40(in Chinese).

[2] 黄守道, 王耀南, 王毅, 等. 无刷双馈电机有功和无功

- 功率控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4):87-93.
- HUANG Shou-dao, WANG Yao-nan, WANG Yi, et al. A Study of Active and Reactive Power Control for Brushless Doubly-fed Machine[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 87-93 (in Chinese).
- [3] 王琦, 陈小虎, 纪延超, 等. 同步坐标下的无刷双馈风力发电机控制系统[J]. 南京理工大学学报, 2006, 30(6): 673-678.
- WANG Qi, CHEN Xiao-hu, JI Yan-chao, et al. Control System in Brushless Doubly-fed Wind Power Generation System Based on Synchronous Reference[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2006, 30(6): 673-678 (in Chinese).
- [4] 王琦, 陈小虎, 纪延超, 等. 基于双同步坐标的无刷双馈风力发电系统的最大风能追踪控制[J]. 电网技术, 2007, 31(3): 82-87.
- WANG Qi, CHEN Xiao-hu, JI Yan-chao, et al. Maximal Wind Energy Tracing Control for Brushless Doubly-Fed Wind Turbine Based on Dual Synchronous Coordinates [J]. Power System Technology, 2007, 31(3): 82-87(in Chinese).
- [5] McMahan R A, Roberts P C, Wang X, et al. Performance of BDFM as Generator and Motor[J]. IEE Proc-Elects Power Appl, 2006, 153(2).
- [6] Roberts W X, McMahan P C, R A. Studies of Inverter Ratings of BDFM Adjustable Speed Drive or Generator Systems[A]. in: Power Electronics and Drives Systems[C]. 2005.
- [7] Jovanovic M G, Betz R E. Power Factor Control Using Brushless Doubly Fed Reluctance Machines[A]. in: Industry Applications Conference[C]. 2000.
- [8] HUANG Shou-dao, Huang Kewan, Zhou Lawn, et al. A Study of the Control Strategy on Rotor Field Orientation for Brushless Doubly-Fed Machine[A]. in: Power Electronics and Motion Control Conference[C]. 2000.508-513.
- [9] Izaskun Sarasola, Javier Poza, Miguel Angel Rodriguez, et al. Direct Torque Control for Brushless Doubly Fed Induction Machines[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2007:1496-1501.
- [10] Domenico Casadei, Francesco Fiofumo, Giovanni Serra, et al. FOC and DTC: Two Virable Schemes for Induction Motors Torque Control[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2002, 17(5): 779-787.
- [11] 刘晓鹏, 张爱玲, 樊双英. 无刷双馈电机直接转矩控制策略的研究[J]. 微特电机, 2006(3): 25-31.
- LIU Xiao-peng, ZHANG Ai-ling, FAN Shuang-ying. Study on the Strategy of Direct Torque Control for Brushless Doubly-fed Machines[J]. Micro Motor, 2006 (3): 25-31.
- [12] 李夙. 异步电动机直接转矩控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994. 35-50.
- LI Su. Direct Torque Control for Induction Machines [M]. Beijing: China Machine Press, 1994. 35-50.
- [13] 叶杭冶. 风力发电机组的控制技术(第二版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006. 156-174.
- YE Hang-ye. The Control Technology for the Wind Turbine, Second Edition[M]. Beijing: China Machine Press, 2006. 156-174.

收稿日期: 2009-03-15; 修回日期: 2009-04-25

作者简介:

刘伟(1983-), 男, 硕士研究生, 现从事电力系统设计工作; E-mail: liuwei2@gedi.com.cn

沈宏(1972-), 男, 讲师, 研究方向为电工学理论与电力系统测量与控制;

高立刚(1982-), 男, 硕士研究生, 现从事电力系统设计工作。

(上接第 76 页 continued from page 76)

- [7] 周鹗. 电机学[M].北京: 水利电力出版社, 2008.
- [8] 原治安. 电压互感器断线原理与应用[J]. 电子自动化设备, 2009, 29(8): 153-156.
- YUAN Zhi-an. Principle and Application of Loss-of-potential Logic[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(8): 153-156.

作者简介:

刘东超(1980-), 男, 硕士, 工程师, 从事电力系统开关保护等研究; E-mail: liudc@nari-relays.com

李铁仲(1960-), 男, 学士, 工程师, 从事电力系统继电保护;

张哲(1973-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统继电保护。

收稿日期: 2009-11-17; 修回日期: 2009-12-17