

基于无速度传感器的无刷双馈风力发电机直接转矩控制

张凤阁 金石 张武
(沈阳工业大学电气工程学院 沈阳 110870)

摘要 根据风力机的功率输出特性, 针对无刷双馈风力发电机, 提出了一种基于直接转矩控制方法控制发电机转矩和功率因数来调节有功功率的最大功率跟踪方法。为了提高风电系统的可靠性, 使系统更能适用于恶劣的风场环境, 本文针对无刷双馈发电机复杂的内部磁场关系, 设计了一种新型速度观测器, 通过估算转子磁链同步旋转速度和转差速度来获得发电机转速。此外, 还采用模型参考自适应辨识技术来设计控制绕组磁链观测器, 以提高无刷双馈发电机在全速范围内磁链估计的准确性, 进而改善直接转矩控制系统在控制绕组侧低频时的运行性能。仿真结果验证了所提出的新型转速估算方法的正确性和直接转矩控制方案的可行性。

关键词: 风力发电 无刷双馈发电机 直接转矩控制 转速观测 控制绕组磁链 最大功率跟踪

中图分类号: TM614

Direct Torque Control for Brushless Doubly-Fed Wind Power Generator Based on Speed Sensorless

Zhang Fengge Jin Shi Zhang Wu

(Shenyang University of Technology Shenyang 110870 China)

Abstract A maximal power tracking method through controlling torque and power factor of brushless doubly-fed wind power generator to regulate active power is proposed based on direct torque control (DTC), according to the power output characteristics of wind turbine. Considering the complicated relation of internal magnetic fields of brushless doubly-fed generator(BDFG), a novel speed observer is designed by estimating the rotor flux synchronous rotating speed and slip speed to improve the reliability of wind power generation system in harsh wind field environment. Furthermore, the model reference adaptive identification technology is adopted to design control winding flux observer in order to enhance the accuracy of estimated flux within wide speed range and further to improve the operation performance of the DTC system at the low frequency of the control winding. Simulation results prove the validity and feasibility of the proposed novel speed estimation method and DTC scheme.

Keywords: Wind power generation, brushless doubly-fed generator, direct torque control, speed observation, control winding flux, maximal power tracking

辽宁省科技攻关计划项目(2010220029)。

收稿日期 2010-10-28 改稿日期 2011-03-10

1 引言

随着世界性能源危机的不断加剧, 风能作为清

洁可再生能源备受世界各国的青睐, 风力发电技术也随之得到了迅猛发展^[1]。由于风力发电机并网发电时, 要求其输出频率和电网频率一致, 为了满足这一要求, 目前世界上常采用恒速恒频和变速恒频技术。采用变速恒频(Variable Speed Constant

Frequency, VSCF) 发电方式可实现最大风能捕获, 提高风能利用率, 是风力发电技术的发展趋势^[2-3]。VSCF 系统常采用的发电机有笼型异步发电机、永磁同步发电机和双馈发电机。笼型异步发电机系统所需的变频器容量裕度大于发电机的额定功率, 使其成本、体积和重量都显著增加; 永磁同步发电机采用的永磁材料易退磁, 这将影响发电效率; 双馈发电机仍保留电刷和集电环, 需要经常维护。

无刷双馈发电机 (Brushless Doubly-fed Generator, BDFG) 无需电刷和集电环, 结构简单, 可靠性高, 运行方式灵活, 所需励磁电源容量小, 特别适用于风力水力发电、潮汐发电等可再生能源的开发和利用^[4]。但 BDFG 的定子上有两套极数不同的绕组, 这种复杂的电磁结构使得要对其进行有效控制较普通异步发电机困难很多^[5], 尤其是当风速不断变化时如何捕获最大风能、提高发电效率。目前解决这一问题的主要方法是采用功率绕组磁链定向矢量控制对发电机的有功功率和无功功率进行解耦, 通过独立控制有功功率和无功功率来实现最大功率跟踪^[6-7]。但矢量控制需要坐标变换, 计算量大, 且易受发电机参数变化的影响, 系统鲁棒性差。直接转矩控制 (Direct Torque Control, DTC) 无需磁场定向和矢量变换, 较矢量控制简捷快速, 系统动态响应快。目前, 在风力发电领域中, DTC 技术及其变频器产品主要应用于永磁同步发电机系统和双馈发电机系统^[8], 而关于 BDFG 的 DTC 系统研究文献却寥寥无几。

本文针对 BDFG 特殊的内部磁场关系, 提出采用 DTC 方法控制 BDFG 转矩和功率因数来调节其有功功率, 以跟踪最大功率。但在 DTC 中, 安装速度传感器将增加系统成本, 降低系统可靠性, 使系统不适于恶劣的工作环境, 这与 BDFG 去除电刷和集电环的目的相违背, 因此, 本文提出一种适用于无刷双馈风力发电机 DTC 系统的新型速度观测器。此外, 无刷双馈风力发电机通常运行于同步轻速附近一个较窄的转速范围内, 此时控制绕组侧的励磁电流频率较低, 一般的磁链观测器不能准确地估计出控制绕组磁链, 这将严重影响整个系统的控制效果。本文采用模型参考自适应辨识技术来设计控制绕组磁链观测器, 以提高 BDFG 在全速范围内磁链估计的准确性, 有效地改善了直接转矩控制系统在控制绕组侧低频时的运行性能。

2 BDFG 系统的 DTC 控制思想

VSCF 无刷双馈风力发电系统的结构如图 1 所示, 该系统主要包括风力机、齿轮增速箱和 BDFG。BDFG 的定子有两套极数不同的绕组: 一套是功率绕组, 直接接入工频电网, 用作电能输出; 一套是控制绕组, 通过双向变频器连接电网。

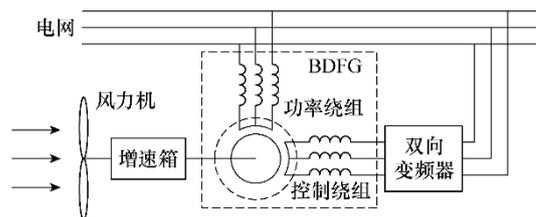


图 1 VSCF 无刷双馈风力发电系统

Fig.1 VSCF brushless doubly-fed wind power generation system

根据风力机运行特性可知, 当风力机叶片桨距角 β (一般 $\beta = 0$) 和风速 v 一定时, 发电机的输入功率 P_m 只与其转速 ω_r 有关^[9], 两者在不同风速下的关系曲线如图 2 所示。可以看出, 对于风速一定的每条曲线, 都有一个最大吸收功率点分别对应一个发电机转速值。本文将利用这种关系, 根据风速变化, 以这些曲线上的最大吸收功率点所对应的转速值作为 DTC 的速度给定, 进而获得转矩给定, 也就是说, 从控制转矩的角度来看, 只要使发电机的实际转矩能快速准确地跟踪给定转矩, 即可获得最大吸收功率。

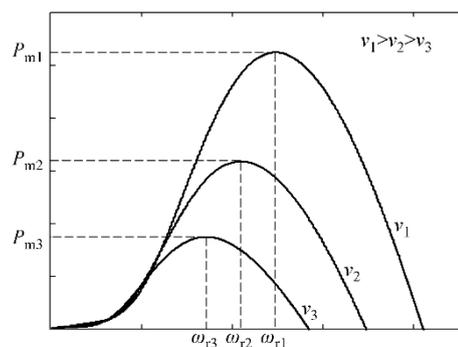


图 2 不同风速下, $P_m-\omega_r$ 的关系曲线

Fig.2 Related plots of $P_m-\omega_r$ under different wind speeds

采用功率绕组 d-q 坐标系, BDFG 的电磁转矩方程为^[10]

$$T_e = \frac{3(p_p + p_c)L_p}{2(L_p L_c - M_{pc}^2)} |\Psi_p| |\Psi_c| \sin \delta \quad (1)$$

式中 p_p, p_c, L_p, L_c ——功率绕组和控制绕组的极对数、自感;

Ψ_p, Ψ_c ——功率绕组和控制绕组的磁链矢量;

M_{pc} ——两套定子绕组之间的互感;

δ ——磁链矢量 Ψ_p 和 Ψ_c 之间的夹角。

功率绕组磁链方程为

$$\Psi_p = \int (\mathbf{u}_p - R_p \mathbf{i}_p) dt \quad (2)$$

式中, $\mathbf{u}_p, \mathbf{i}_p$ 和 R_p 分别为功率绕组的电压矢量、电流矢量和电阻。

由于功率绕组电阻压降 $R_p \mathbf{i}_p$ 对功率绕组电压的影响很小, 可忽略不计, 而功率绕组作为电能输出端, 要求其输出恒频恒压, 即电压 \mathbf{u}_p 的幅值和频率保持不变, 因此可认为功率绕组磁链 Ψ_p 的幅值和旋转速度基本恒定。由式 (1) 可知, 基于直接转矩控制思想, 可保持控制绕组磁链 Ψ_c 的幅值不变, 通过控制施加于控制绕组的电压矢量 \mathbf{u}_{ck} ($k = 1, 2, \dots, 6$) 来控制 Ψ_c 的旋转速度和方向, 从而改变两套定子绕组的磁链矢量夹角 δ , 达到控制转矩的目的。

3 BDFG 转速观测

本文选择两相静止坐标系作为参考坐标系, 图 3 给出了无刷双馈电机在发电状态下不同参考坐标系, 其中, d^s-q^s 为两相静止参考坐标系, d^r-q^r 为固定在转子轴上的旋转坐标系, d^e-q^e 为同步旋转坐标系, 它固定在转子磁链 Ψ_r 上且滞后 d^r-q^r 坐标系一个转差角度 θ_{sl} 。

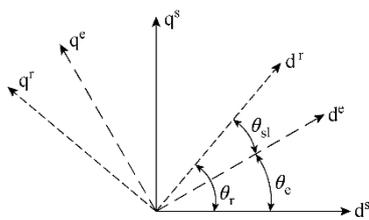


图 3 不同参考坐标系

Fig.3 Vector plots of different reference frames

由图 3 可知, $\theta_r = \theta_e + \theta_{sl}$, 则转子转速为

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} = \frac{d(\theta_e + \theta_{sl})}{dt} = \omega_e + \omega_{sl} \quad (3)$$

由式 (3) 可知, 欲求发电机转速 ω_r , 则需要先估算出转子磁链同步旋转速度 ω_e 和转差速度 ω_{sl} 。

3.1 同步旋转速度 ω_e 的估算

根据图 3, 同步旋转磁链角 θ_e 可表示为

$$\theta_e = \arctan \left(\frac{\Psi_{rq}^s}{\Psi_{rd}^s} \right) \quad (4)$$

则同步旋转速度 ω_e 为

$$\omega_e = \frac{d\theta_e}{dt} = \frac{d}{dt} \left[\arctan \left(\frac{\Psi_{rq}^s}{\Psi_{rd}^s} \right) \right] = \frac{\Psi_{rd}^s \frac{d\Psi_{rq}^s}{dt} - \Psi_{rq}^s \frac{d\Psi_{rd}^s}{dt}}{\Psi_{rd}^s{}^2 + \Psi_{rq}^s{}^2} \quad (5)$$

由式 (5) 可知, 需要先估算出转子磁链 Ψ_r 的 d^s-q^s 轴分量, 才能完成同步速 ω_e 的估算。

在 d^s-q^s 坐标系下, 转子和控制绕组的磁链方程分别为^[11-12]

$$\begin{cases} \Psi_{rd}^s = L_r i_{rd}^s + M_{cr} i_{cd}^s + M_{pr} i_{pd}^s \\ \Psi_{rq}^s = L_r i_{rq}^s - M_{cr} i_{cq}^s + M_{pr} i_{pq}^s \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \Psi_{cd}^s = L_c i_{cd}^s + M_{cr} i_{rd}^s \\ \Psi_{cq}^s = L_c i_{cq}^s - M_{cr} i_{rq}^s \end{cases} \quad (7)$$

式中 L_r ——转子的自感;

M_{pr}, M_{cr} ——功率绕组和控制绕组与转子之间的互感。

将式 (7) 代入式 (6), 整理可得

$$\begin{cases} \Psi_{rd}^s = \frac{L_r}{M_{cr}} (\Psi_{cd}^s - L_c' i_{cd}^s) + M_{pr} i_{pd}^s \\ \Psi_{rq}^s = -\frac{L_r}{M_{cr}} (\Psi_{cq}^s - L_c' i_{cq}^s) + M_{pr} i_{pq}^s \end{cases} \quad (8)$$

式中, $L_c' = L_c - M_{cr}^2 / L_r$ 。

根据式 (8) 可得转子磁链 Ψ_r 的估算值, 进而可以获得同步旋转速度 ω_e 。

3.2 转差速度 ω_{sl} 的估算

在 d^e-q^e 坐标系下, 转子侧电压方程可表示为

$$\frac{d}{dt} \Psi_{rd}^e + R_r i_{rd}^e - (\omega_r - \omega_e) \Psi_{rq}^e = 0 \quad (9)$$

$$\frac{d}{dt} \Psi_{rq}^e + R_r i_{rq}^e + (\omega_r - \omega_e) \Psi_{rd}^e = 0 \quad (10)$$

根据转子磁链方程可得

$$i_{rd}^e = \frac{1}{L_r} \Psi_{rd}^e - \frac{M_{cr}}{L_r} i_{cd}^e - \frac{M_{pr}}{L_r} i_{pd}^e \quad (11)$$

$$i_{rq}^e = \frac{1}{L_r} \Psi_{rq}^e + \frac{M_{cr}}{L_r} i_{cq}^e - \frac{M_{pr}}{L_r} i_{pq}^e \quad (12)$$

将式 (11) 和式 (12) 分别代入式 (9) 和式 (10) 中, 并根据式 (3) 可得

$$\frac{d}{dt} \Psi_{rd}^e + \frac{R_r}{L_r} \Psi_{rd}^e - \frac{M_{cr}}{L_r} R_r i_{cd}^e - \frac{M_{pr}}{L_r} R_r i_{pd}^e - \omega_{sl} \Psi_{rq}^e = 0 \quad (13)$$

$$\frac{d}{dt} \Psi_{rq}^e + \frac{R_r}{L_r} \Psi_{rq}^e - \frac{M_{cr}}{L_r} R_r i_{cq}^e - \frac{M_{pr}}{L_r} R_r i_{pq}^e + \omega_{sl} \Psi_{rd}^e = 0 \quad (14)$$

在 d^e - q^e 坐标系中, 有 $\Psi_{rq}^e = 0$, 且 $d\Psi_{rq}^e/(dt) = 0$, 则 $\Psi_{rd}^e = |\Psi_r|$ 。那么, 由式 (14) 可得转差速度 ω_{sl} 的估算式为

$$\omega_{sl} = \frac{R_r}{L_r |\Psi_r|} (M_{pr} i_{pq}^e - M_{cr} i_{cq}^e) \quad (15)$$

由于本文所提出的理论是建立在两相静止参考坐标系中, 因此需要将 d^e - q^e 坐标系变换到 d^s - q^s 坐标系中。由图 3 可得两个坐标系之间的变换矩阵为

$$\begin{pmatrix} F_d^e \\ F_q^e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_e & \sin \theta_e \\ -\sin \theta_e & \cos \theta_e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_d^s \\ F_q^s \end{pmatrix} \quad (16)$$

则式 (15) 中的 i_{pq}^e 和 i_{cq}^e 可表示为

$$\begin{cases} i_{pq}^e = -i_{pd}^s \sin \theta_e + i_{pq}^s \cos \theta_e \\ i_{cq}^e = -i_{cd}^s \sin \theta_e + i_{cq}^s \cos \theta_e \end{cases} \quad (17)$$

式中, $\sin \theta_e = \Psi_{rq}^s / |\Psi_r|$; $\cos \theta_e = \Psi_{rd}^s / |\Psi_r|$ 。

将式 (17) 代入式 (15) 中, 经整理可得

$$\omega_{sl} = \frac{R_r}{L_r |\Psi_r|^2} [M_{pr} (\Psi_{rd}^s i_{pq}^s - \Psi_{rq}^s i_{pd}^s) - M_{cr} (\Psi_{rd}^s i_{cq}^s - \Psi_{rq}^s i_{cd}^s)] \quad (18)$$

根据式 (18) 即可估算出转差速度 ω_{sl} 。

4 基于自适应辨识的控制绕组磁链观测

在 DTC 中, 磁链观测的准确性直接影响到 DTC 中开关电压矢量选择的正确性, 关系到整个系统的控制效果。此外, 由上节可以看出, BDFG 的无速度传感器控制也是基于控制绕组的磁链来实现的。因此, 精确估算控制绕组磁链在整个控制过程中是至关重要的。本文基于模型参考自适应辨识技术, 设计控制绕组磁链观测器, 以提高 BDFG 在

全速范围内磁链观测的准确性, 尤其在控制绕组侧励磁电流频率较低时。

控制绕组磁链的 d - q 分量分别为

$$\begin{cases} \Psi_{cd} = \int (u_{cd} - R_c i_{cd}) dt \\ \Psi_{cq} = \int (u_{cq} - R_c i_{cq}) dt \end{cases} \quad (19)$$

再根据 BDFG 转子速模型, 可得 BDFG 的参考模型如下

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \end{cases} \quad (20)$$

式中, 状态变量 $\mathbf{x} = (i_c \ \Psi_c)^T$; 控制绕组电流

$i_c = (i_{cd} \ i_{cq})^T$, $\Psi_c = (\Psi_{cd} \ \Psi_{cq})^T$; 输入量为控制绕组电压, 即 $\mathbf{u} = \mathbf{u}_c = (u_{cd} \ u_{cq})^T$; 输出量 $\mathbf{y} = i_c$;

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{A}_{22} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{A}_{11} = (-\sigma L_r R_c - \sigma L_c R_r) \mathbf{I} + \omega_r \mathbf{J},$$

$$\mathbf{A}_{12} = \sigma R_r \mathbf{I} - \sigma L_r \omega_r \mathbf{J}, \quad \mathbf{A}_{21} = -R_c \mathbf{I}, \quad \mathbf{A}_{22} = 0;$$

$$\mathbf{B} = (\mathbf{B}_1 \ \mathbf{B}_2)^T, \quad \mathbf{B}_1 = \sigma L_r \mathbf{I}, \quad \mathbf{B}_2 = \mathbf{I}; \quad \mathbf{C} = (\mathbf{I} \ \mathbf{0});$$

$$\mathbf{I} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{J} = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}; \quad \sigma = 1/(L_c L_r - M_{cr}^2)。$$

根据输入量 \mathbf{u}_c 和输出量 i_c 构造控制绕组磁链的自适应观测器, 通过不断地修正控制绕组电流的观测值 \hat{i}_c 和实测值 i_c 之间的偏差, 使控制绕组磁链的观测值 $\hat{\Psi}_c$ 趋于真实值。

构建如下模型为可调模型

$$\begin{cases} \dot{\hat{\mathbf{x}}} = \hat{\mathbf{A}}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{G}(\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}}) \\ \hat{\mathbf{y}} = \hat{\mathbf{C}}\hat{\mathbf{x}} \end{cases} \quad (21)$$

式中, 上标 “^” 表示参考模型中对应量的观测值; $\hat{\mathbf{x}} = (\hat{i}_c \ \hat{\Psi}_c)^T = (\hat{i}_{cd} \ \hat{i}_{cq} \ \hat{\Psi}_{cd} \ \hat{\Psi}_{cq})^T$; $\hat{\mathbf{y}} = \hat{i}_c = (\hat{i}_{cd} \ \hat{i}_{cq})^T$;

用可调参数 \hat{R}_c 、 \hat{R}_r 和 $\hat{\omega}_r$ 替换矩阵 \mathbf{A} 中的参数 R_c 、 R_r 和 ω_r , 即可得到矩阵观测值 $\hat{\mathbf{A}}$;

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} g_{11} & g_{21} & g_{31} & g_{41} \\ g_{12} & g_{22} & g_{32} & g_{42} \end{pmatrix}^T \text{ 为观测器的增益矩阵。}$$

将状态误差定义为

$$\mathbf{e} = \mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}} \quad (22)$$

则由式 (20) 和式 (21) 可得误差模型为

$$\dot{\mathbf{e}} = \hat{\mathbf{A}}\mathbf{e} - \mathbf{G}\mathbf{e} - \Delta\hat{\mathbf{A}}\hat{\mathbf{x}} \quad (23)$$

式中, $\Delta A = \hat{A} - A$ 。

误差模型 (23) 可进一步写成如下形式

$$\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{M}\mathbf{e} + \mathbf{N}\mathbf{W}' \quad (24)$$

式中, $\mathbf{W}' = \hat{\mathbf{W}} - \mathbf{W} = (\hat{R}_c - R_c \quad \hat{R}_r - R_r \quad \hat{\omega}_r - \omega_r)^T$ 为

可调参数的误差矩阵, 其中,

$\mathbf{W} = (R_c \quad R_r \quad \omega_r)^T$ 为可调参数矩阵,

$\hat{\mathbf{W}} = (\hat{R}_c \quad \hat{R}_r \quad \hat{\omega}_r)^T$ 为可调参数的观测值矩阵;

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} -g_{11} & -g_{12} & \sigma R_r & \sigma L_r \omega_r \\ -g_{21} & -g_{22} & -\sigma L_r \omega_r & \sigma R_r \\ -g_{31} & -g_{32} & 0 & 0 \\ -g_{41} & -g_{42} & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{N} = \begin{pmatrix} \sigma L_r i_{cd} & \sigma L_c i_{cd} - \sigma \hat{\psi}_{cd} & i_{cq} - \sigma L_r \hat{\psi}_{cq} \\ \sigma L_r i_{cq} & \sigma L_c i_{cq} - \sigma \hat{\psi}_{cq} & -(i_{cd} - \sigma L_r \hat{\psi}_{cd}) \\ i_{cd} & 0 & 0 \\ i_{cq} & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

为了研究自适应观测器的稳定性, 本文针对非线性系统 (24), 根据 Lyapunov 稳定性定理来推导自适应率。将 Lyapunov 函数定义为

$$V = \mathbf{e}^T \mathbf{e} + \mathbf{W}'^T \boldsymbol{\lambda}^{-1} \mathbf{W}' \quad (25)$$

式中, $\boldsymbol{\lambda} = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ 。

对 V 求导可得

$$\frac{dV}{dt} = \mathbf{e}^T (\mathbf{M}^T + \mathbf{M}) \mathbf{e} + 2\mathbf{e}^T \mathbf{N} \mathbf{W}' + 2 \frac{d\mathbf{W}'^T}{dt} \boldsymbol{\lambda}^{-1} \mathbf{W}' \quad (26)$$

在这里, 可调参数 R_c 、 R_r 和 ω_r 可以看作是慢变参数, 在一定时间内, 可近似为恒值, 因此可以认为矩阵 \mathbf{W} 是常矩阵。那么, 式 (26) 可重写为

$$\frac{dV}{dt} = \mathbf{e}^T (\mathbf{M}^T + \mathbf{M}) \mathbf{e} + 2\mathbf{e}^T \mathbf{N} \mathbf{W}' + 2 \frac{d\hat{\mathbf{W}}^T}{dt} \boldsymbol{\lambda}^{-1} \mathbf{W}' \quad (27)$$

根据 Lyapunov 稳定性条件, 通过合理设计观测器的增益矩阵 \mathbf{G} , 使式 (27) 中等号右侧第一项为半负定, 而后两项之和为零, 则可使 $dV/(dt)$ 为半负定, 这样就可以保证非线性系统渐近稳定。即

$$\mathbf{M}^T + \mathbf{M} \leq 0 \quad (28)$$

$$2\mathbf{e}^T \mathbf{N} \mathbf{W}' + 2 \frac{d\hat{\mathbf{W}}^T}{dt} \boldsymbol{\lambda}^{-1} \mathbf{W}' = 0 \quad (29)$$

由式 (29) 可得

$$\frac{d\hat{\mathbf{W}}}{dt} = -\boldsymbol{\lambda} \mathbf{N}^T \mathbf{e} \quad (30)$$

对式 (30) 两边同时求积分, 可得

$$\hat{\mathbf{W}} = -\boldsymbol{\lambda} \int \mathbf{N}^T \mathbf{e} dt \quad (31)$$

为提高参数估算过程的动态性能, 这里采用了式 (32) 所示的比例积分自适应率, 则可调参数观测的自适应辨识方案可表示为

$$\dot{\hat{\mathbf{W}}} = \left(\mathbf{K}_p + \frac{\mathbf{K}_I}{s} \right) \mathbf{N}^T \mathbf{e} \quad (32)$$

式中, $1/s$ 为积分项; $\mathbf{K}_p = \text{diag}(K_{p1}, K_{p2}, K_{p3})$ 为比例增益; $\mathbf{K}_I = -\boldsymbol{\lambda}$ 为积分增益。

利用式 (32) 不仅可以有效地辨识控制绕组电阻、转子电阻和转速, 还可以结合观测器增益 g_{ij} ($i = 1, 2, 3, 4; j = 1, 2$) 来控制它们的收敛速度。

5 系统仿真

基于图 4 所示的无刷双馈风力发电机无速度传感器 DTC 系统框图, 在 Simulink 中构建系统模型进行仿真研究。BDFG 的转速给定是通过最大吸收功率点所对应的转速值得到的。而功率因数给定值 p_f^* 是由电网所需的实际值决定的, 一般设为 1, 即无功功率为零, 目的是输出最大有功功率。

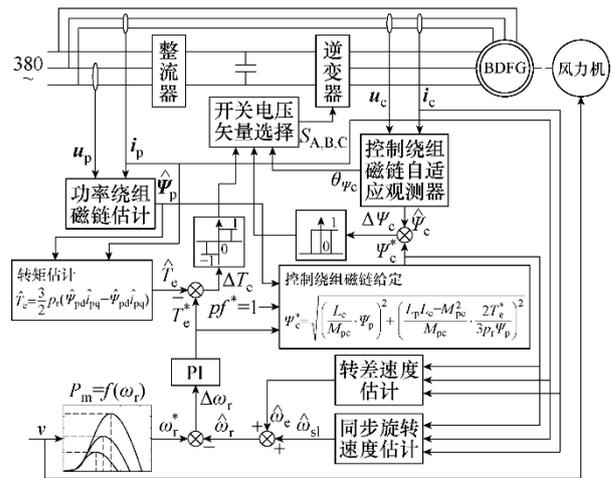


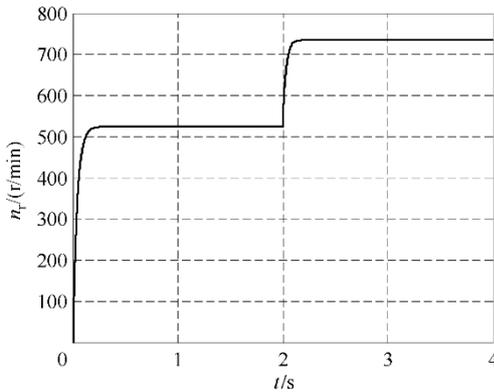
图 4 改进型无刷双馈风力发电机 DTC 系统
Fig.4 Advanced DTC system of brushless doubly-fed wind power generator

BDFG 样机的定子采用 6/2 变极单绕组, 3Y/3Y 联结, 其参数为: 额定功率 15kW, 额定频率 50Hz, 额定电压 380V, $p_p = 3$, $R_p = 0.435\Omega$, $L_p = 71.38\text{mH}$, $M_p = 69.31\text{mH}$, $p_c = 1$, $R_c = 0.435\Omega$, $L_c = 65.33\text{mH}$, $M_c = 60.21\text{mH}$, $R_r = 1.63\Omega$, $L_r = 142.8\text{mH}$, 转动惯量 $J = 0.03\text{kg}\cdot\text{m}^2$,

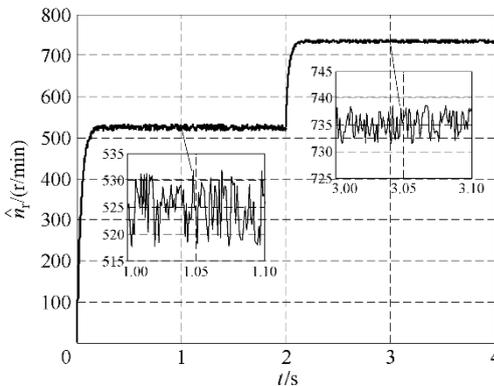
转动阻尼系数 $K_d = 0$ 。风力机采用内蒙古动力机厂生产的 FD7—5K 型风力机，其参数为：额定功率 5kW，风轮直径 7m，最佳叶尖速比 $\lambda_{opt} = 8.9$ ，最大功率系数 $C_{popt} = 0.38$ 。另外，起动风速为 4m/s，额定风速为 9m/s。此外，空气密度为 1.25kg/m^3 ，变速箱增速比为 4.375。

下面对 BDFG 控制绕组侧励磁电流频率较低时的控制系统性能进行仿真分析和比较。设初始风速为 5m/s，计算可得对应的 BDFG 最佳给定转速约为 525r/min，2s 时风速上升至 7m/s，此时对应的发电机最佳给定转速约为 735r/min。在此风速区间内，BDFG 运行于亚同步状态，且在同步速附近一个较窄的转速范围内，控制绕组侧的励磁电流频率较低。

图 5 给出了 BDFG 的实际转速响应曲线和采用本文所提出的新型速度观测方法得到的估计转速曲线。由图 5b 可以看出，在整个运行过程中，速度观测器的输出能快速准确地跟踪给定的最佳转速，但当发电机转速较低时，估测响应曲线出现了相对较大的波动。这是因为速度观测器中的转差速度估算式与负载 R_r 有关，当发电机转速较低时，负载变化对观测系统的影响较大，从而出现了转速估测曲线比转速较高时波动稍大的现象。



(a) 实际转速响应曲线

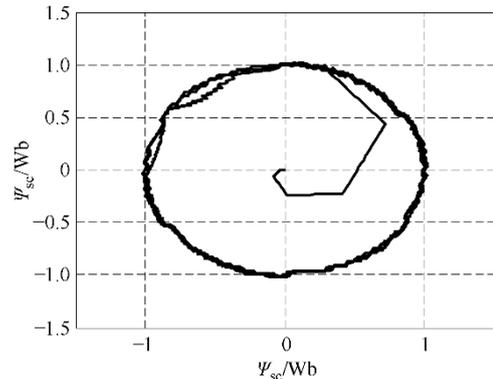


(b) 估计转速响应曲线

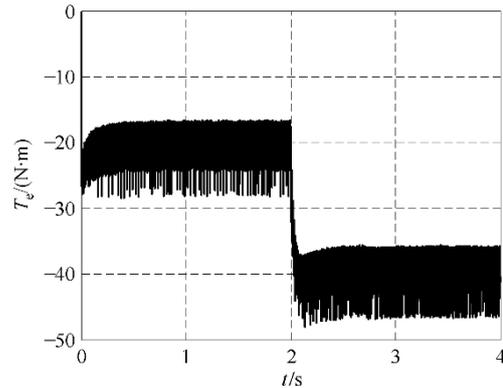
图 5 BDFG 实际转速和估计转速响应曲线

Fig.5 Real speed and estimated speed response plots of BDFG

图 6 和图 7 分别是对基于 $u-i$ 磁链模型的传统 DTC 系统和基于自适应磁链观测方法的改进型 DTC 系统进行仿真所得到的控制绕组磁链轨迹和转矩响应曲线。可以看出，在发电机转速变化过程中，采用自适应辨识技术的控制绕组磁链观测轨迹都能在期望的圆形旋转磁链上，电磁转矩基本上能控制在驱动转矩的理论计算值上，且波动幅度较小，进而使 BDFG 直接转矩控制系统的运行性能得到了改善。



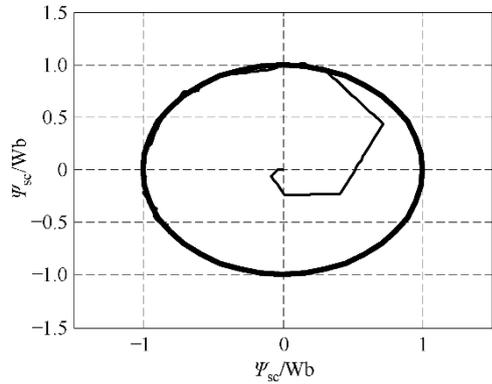
(a) 控制绕组磁链运动轨迹



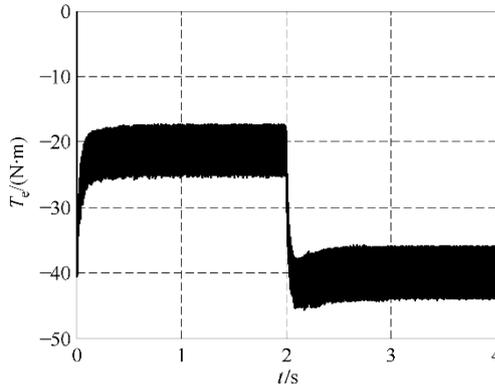
(b) BDFG 电磁转矩

图 6 基于传统 DTC 的系统仿真波形

Fig.6 System simulation plots based on traditional DTC



(a) 控制绕组磁链运动轨迹



(b) BDFG 电磁转矩

图7 基于改进型 DTC 的系统仿真波形

Fig.7 System simulation plots based on advanced DTC

图8和图9分别给出了采用本文所提出的改进型直接转矩控制策略的控制绕组 a 相电流波形和功率变化曲线。仿真结果表明,所设计的控制系统可以实现最大风能跟踪,根据风力机运行特性经计算可知,实际输出功率比较接近理想的最大功率值。

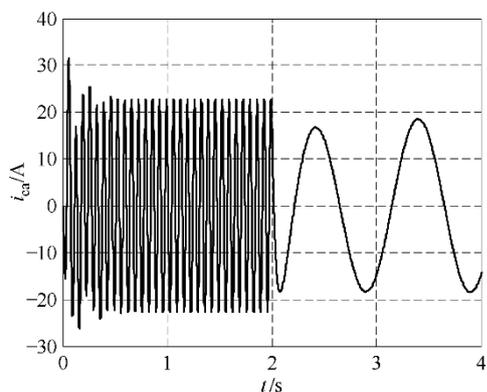


图8 控制绕组 a 相电流波形

Fig.8 Phase a current plot of control winding

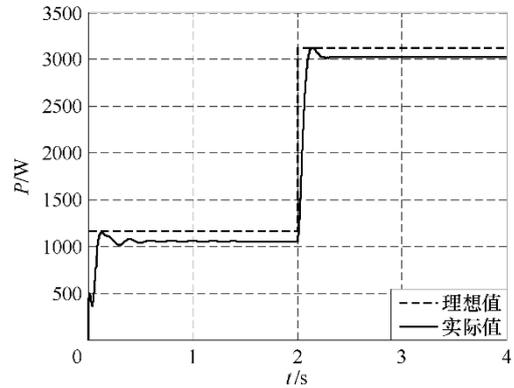


图9 风速变化时理想最大功率曲线与实际输出功率曲线

Fig.9 Plots of ideal maximal power and real output power with wind speed changing

6 结论

由于 BDFG 内部磁场关系非常复杂,使得如何对其进行有效控制成为亟待解决的难点和关键点,尤其是高效发电所要求的最大功率跟踪问题。本文基于 DTC 理论,通过控制发电机转矩和功率因数来实现最大功率跟踪,并针对 BDFG 的特殊结构,提出一种新型无速度传感器控制方法,可提高风电系统在恶劣风场环境下的运行可靠性。此外,还采用自适应观测方法对控制绕组磁链进行估测,以提高 BDFG 在全速范围内磁链估计的准确性,有效地改善了 BDFG 控制绕组侧频率较低时的控制系统运行性能。仿真结果表明,所提出的无速度传感器 DTC 系统具有良好的动静态性能和较强的鲁棒性。

参考文献

- [1] 陈鸣, 杨刚. 风力发电技术及其发展趋势 [J]. 电力学报, 2008, 23(4): 272-275.
Chen Ming, Yang Gang. The wind power generation technology and its development prospect[J]. Journal of Electric Power, 2008, 23(4): 272-275.
- [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 Guoxiang, Huang Jianming, Chen Guocheng, et al. A synthetic control strategy for DFIG wind power generation[J]. Electric Machines and Control, 2008, 12(4): 435-441.
- [3] Li H, Chen Z, Pedersen J K. Optimal power control

- strategy of maximizing wind energy tracking and conversion for VSCF doubly fed induction generator system[C]. CES/IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2006: 1-6.
- [4] 张志刚, 王毅, 黄守道, 等. 无刷双馈电机在变速恒频风力发电系统中的应用 [J]. 电气传动, 2005, 35(4): 61-64.
Zhang Zhigang, Wang Yi, Huang Shoudao, et al. The application study for brushless doubly-fed machine in the variable speed constant frequency generation system[J]. Electric Drive, 2005, 35(4): 61-64.
- [5] Kostyantyn Protsenko, Xu Dewei. Modeling and control of brushless doubly-fed induction generators in wind energy applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(3): 1191-1197.
- [6] 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 Xiaohu, Ji Yanchao, 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.
- [7] 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 Shoudao, Wang Yaonan, 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.
- [8] 李时杰. ABB 变频器在风力发电行业的应用 [J]. 变频器世界, 2008(3): 37-40.
Li Shijie. Application of ABB inverter in wind power generate electricity industry[J]. The World of Inverters, 2008(3): 37-40.
- [9] 杜志伟, 赵峰, 田铭兴, 等. 变速恒频风力发电的最大功率捕获控制研究 [J]. 电气传动, 2007, 37(3): 7-10.
Du Zhiwei, Zhao Feng, Tian Mingxing, et al. Investigation on tracking maximum power point in VSCF wind-power generation system[J]. Electric Drive, 2007, 37(3): 7-10.
- [10] 王凤翔, 张凤阁. 磁场调制式无刷双馈交流电机 [M]. 长春: 吉林大学出版社, 2004.
- [11] Poza J, Oyarbide E, Roye D, et al. Unified reference frame dq model of the brushless doubly-fed machine[J]. IEE Proceedings of Electric. Power Applications., 2006, 153(5): 726-734.
- [12] Sarasola I, Poza J, Rodriguez M A, et al. Direct torque control for brushless doubly-fed induction machines[C]. IEEE International Electric Machines & Drives Conference, 2007, 2: 1496-1501.
-
- 作者简介:张凤阁 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事电机理论、仿真、优化、特种电机和智能控制等方面的教学和科研工作。金石 女, 1981 年生, 博士研究生, 主要研究方向为风力发电、无刷双馈电机、现代控制理论等。