无刷双馈风力发电机的无速度传感器矢量控制技术

朱云国1,2,张 兴1.刘 淳1.陈红兵1

(1. 合肥工业大学 电气与自动化工程学院,安徽 合肥 230009:

2. 铜陵学院 电气工程系 安徽 铜陵 244000)

摘要:为克服在无刷双馈发电机(BDFG)矢量控制系统中安装速度传感器给控制稳定性和精度带来的不良 影响,提出了基于定子功率侧磁链观测的模型参考自适应转速辨识控制策略。该策略是对 BDFG 功率侧的定 子磁链进行观测得到参考模型,再设计可调模型,利用调节两模型间的误差来估计转速。建立了 MATLAB/ Simulink 环境下控制系统的仿真模型,仿真研究结果表明,所提出的速度自适应观测器可实现在静态和动态 情况下电机速度的精确辨识和有功与无功的解耦控制,并在小功率的无刷双馈发电机平台上进行了实验,结 果验证了控制方案的有效性和可行性。

关键词:风电:无刷双馈发电机:转速:矢量控制:模型参考自适应系统:定子磁场定向

中图分类号: TM 301: TM 614

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.08.021

引言

双馈风力发电机是风力发电领域目前的主流机 型,但双馈风力发电机存在滑环和电刷(需要每年更 换一次),这给系统的稳定运行带来了严重的影响,成 为在海上风电场等要求电机具有高可靠性的场合大 规模应用的主要阻力之一。无刷双馈电机(BDFG)继 承了双馈电机的优点,因应用变速恒频技术,控制变 换器只要处理部分功率,且有功与无功方便可调,由 于运行速度较低,又省去了电刷和滑环,近年来成为 国内外研究的热点问题。BDFG 主要有磁阻型转子 BDFG^[1]和绕线转子 BDFG^[2]。BDFG 的等效电路分 析和基本的电磁关系已有较为详细的研究[3-4]并进 行了建模、仿真与实验[5-6],实现了有功与无功的解 耦控制[7-8]。在 BDFG 采用功率绕组磁链定向的矢 量控制系统中[9-12],功率绕组的电压与电流的坐标变 换角由电网电压矢量角决定。而控制绕组和转子绕 组电压与电流量进行坐标变换时,需要测量转子对于 功率绕组 A 相的空间位置角,一般采用增量式光电编 码器获取转子的位置信息。转子的初始位置跟码盘 的机械安装有关,要通过实验测定的方法获取,每次 装卸码盘之后,需要重新实验测定,很不方便。为弥 补安装速度传感器带来的成本提高和控制稳定性降 低的影响,无速度传感器控制技术在双馈电机上被广 泛研究。由于 BDFG 是由 2 台绕线式异步电机同轴 级联发展而来,与双馈电机相比,在电机结构与电机

收稿日期:2012-06-25;修回日期:2013-06-06 基金项目:国家自然科学基金资助项目(51077034);安徽省科 技厅博士生企业行科研基金资助项目(QYX2012B14)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51077034) and Anhui Provincial Department of Science Doctoral Student Enterprise Line of Scientific Research Fund Project(QYX2012B14)

电磁方程上有着巨大的差别。这种复杂的电磁结构 导致对双馈电机的无速度传感器控制方法不能直接 在 BDFG 上套用。对 BDFG 的速度估计已有一些研 究[13-14].但 BDFG 的闭环速度估计研究物理意义不明 确,对电机的参数有较大的依赖。参考文献[14]实 现了 BDFG 无速度传感器的直接转矩控制,并对定 子电阻进行了辨识,并通过了仿真验证。本文首次在 BDFG 功率绕组静止坐标系数学模型下,采用基于功 率侧磁链的模型参考自适应策略,实现了 BDFG 无速 度传感器矢量控制。仿真表明此方案提出的速度自 适应观测器可以较好地实现转子速度的观测。并且 矢量控制能较好地实现有功功率与无功功率的独立 控制。在小功率的 BDFG 实验平台上进行了验证性的 实验.这为今后 BDFG 无速度传感器的矢量控制策略 研究奠定了良好的理论基础。

BDFG 的模型和矢量控制策略

1.1 BDFG 在 M-T 双同步速坐标系下的建模

BDFG有2套定子绕组:功率绕组直接连接到电 网上,用p表示;控制绕组经背靠背变换器再连接 到电网上,用 c 表示。一套转子绕组用 r 表示。由 BDFG 构成的风力发电系统如图 1 所示。其中变换 器只需负担很小的一部分功率,并且实现控制侧的能

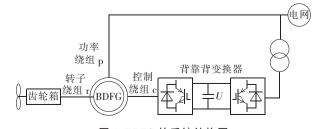


图 1 BDFG 的系统结构图 Fig.1 Structure of BDFG system

量双向流动。M-T 双同步速坐标系是指功率子系统和控制子系统的两相旋转坐标系分别与各自本身的旋转磁场同步旋转。相对三相静止坐标系下的模型而言,在双同步速度两相旋转坐标系中,功率子系统和控制子系统的三相对称交流量都变换成了两相旋转直流量。这样大幅简化了电机的数学模型,还便于 BDFG 控制的实现,这是采用双同步旋转坐标系的突出优点。在 BDFG 采用 M-T 双同步速两相旋转坐标系建立数学模型时,其中的电压、电流及磁链之间的方程为 (功率侧和控制侧均采用电动机惯例) $^{[9,15]}$.

$$\begin{bmatrix} u_{\text{pMs}} \\ u_{\text{pTs}} \end{bmatrix} = R_{\text{sp}} \begin{bmatrix} i_{\text{pMs}} \\ i_{\text{bTs}} \end{bmatrix} + \omega_{\text{p}} \begin{bmatrix} -\psi_{\text{pTs}} \\ \psi_{\text{pMs}} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{\text{pMs}} \\ \psi_{\text{pTs}} \end{bmatrix}$$
(1)

$$\begin{bmatrix} \psi_{\text{pMs}} \\ \psi_{\text{pTs}} \end{bmatrix} = L_{\text{sp}} \begin{bmatrix} i_{\text{pMs}} \\ i_{\text{bTs}} \end{bmatrix} + M_{\text{p}} \begin{bmatrix} i_{\text{pMr}} \\ i_{\text{pTr}} \end{bmatrix}$$
 (2)

$$\begin{bmatrix} u_{\text{cMs}} \\ u_{\text{cTs}} \end{bmatrix} = R_{\text{sc}} \begin{bmatrix} i_{\text{cMs}} \\ i_{\text{cTs}} \end{bmatrix} + \omega_{\text{c}} \begin{bmatrix} -\psi_{\text{cTs}} \\ \psi_{\text{cMs}} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{\text{cMs}} \\ \psi_{\text{cTs}} \end{bmatrix}$$
(3)

$$\begin{bmatrix} \psi_{\text{cMs}} \\ \psi_{\text{cTs}} \end{bmatrix} = L_{\text{sc}} \begin{bmatrix} i_{\text{cMs}} \\ i_{\text{cTs}} \end{bmatrix} + M_{\text{c}} \begin{bmatrix} i_{\text{cMr}} \\ i_{\text{cTr}} \end{bmatrix}$$

$$\tag{4}$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{Mr} \\ u_{Tr} \end{bmatrix} = R_{r} \begin{bmatrix} i_{pMr} \\ i_{pTr} \end{bmatrix} + \omega_{s} \begin{bmatrix} \psi_{Tr} \\ \psi_{Mr} \end{bmatrix} + \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \begin{bmatrix} \psi_{Mr} \\ \psi_{Tr} \end{bmatrix}$$
 (5)

$$\begin{bmatrix} \psi_{Mr} \\ \psi_{Tr} \end{bmatrix} = M_{p} \begin{bmatrix} i_{pMs} \\ i_{pTs} \end{bmatrix} + M_{c} \begin{bmatrix} i_{cMs} \\ i_{cTs} \end{bmatrix} + L_{r} \begin{bmatrix} i_{pMr} \\ i_{pTr} \end{bmatrix}$$
 (6)

$$\omega_{\rm s} = \omega_{\rm p} - P_{\rm p} \omega_{\rm r} = \omega_{\rm c} + P_{\rm c} \omega_{\rm r} \tag{7}$$

其中, R_{sp} 、 L_{sp} 、 M_{p} 、 ω_{p} 和 R_{sc} 、 L_{sc} 、 M_{e} 、 ω_{e} 分别为定子功率绕组和控制绕组的电阻、全自感、互感及电角频率; R_{r} 、 L_{r} 、 ω_{s} 分别为转子电阻、全自感及电角频率; P_{p} 、 P_{e} 分别为功率绕组和控制绕组的极对数; ω_{r} 为转子机械角频率。

总电磁转矩和机械运动方程分别为:

$$T_{\rm e} = 1.5 P_{\rm p} {\rm Im}(\psi_{\rm p}^* i_{\rm p}) + 1.5 P_{\rm c} {\rm Im}(\psi_{\rm c} i_{\rm c}^*) =$$

$$1.5 P_{\rm p} M_{\rm p} (i_{\rm pTs} i_{\rm Mr} - i_{\rm pMs} i_{\rm Tr}) + 1.5 P_{\rm c} M_{\rm c} (i_{\rm cMs} i_{\rm Tr} - i_{\rm cTs} i_{\rm Mr})$$
 (8)

$$T_{\rm e} - T_{\rm L} = J \frac{\mathrm{d}\omega_{\rm r}}{\mathrm{d}t} \tag{9}$$

1.2 BDFG 功率绕组定子磁链定向矢量控制策略

对 BDFG 而言,定子功率绕组直接接在大电网上,其电抗比电阻大很多,故电阻忽略不计,则功率侧定子磁链与定子电压矢量近似互相垂直,把定子磁链矢量定向在 M-T 坐标系的 M 轴上时,T 轴在正旋转方向上超前 M 轴 90°,则定子磁链的 T 轴分量 ψ_{pTs} 为零,按电动机惯例有定子绕组电压矢量超前磁链矢量90°,故电压矢量在 T 轴正方向上。经推导得机侧的变换器控制电流与电压为[$^{[6]}$:

$$\begin{cases} i_{cT_{s}} = (R_{r}i_{pMr}/\omega_{s} + M_{p}i_{pT_{s}} - L_{r}i_{pTr})/M_{c} \\ i_{cMs} = (-R_{r}i_{pTr}/\omega_{s} - M_{p}i_{pMs} - L_{r}i_{pMr})/M_{c} \end{cases}$$
(10)

$$\begin{cases} u_{\text{cMs}} = \left(R_{\text{sc}} + \frac{d}{dt} L_{\text{sc}} \right) i_{\text{cMs}} - \omega_{\text{c}} (L_{\text{sc}} i_{\text{cTs}} + M_{\text{c}} i_{\text{pTr}}) \\ u_{\text{cTs}} = \left(R_{\text{sc}} + \frac{d}{dt} L_{\text{sc}} \right) i_{\text{cTs}} + \omega_{\text{c}} (L_{\text{sc}} i_{\text{cMs}} + M_{\text{c}} i_{\text{pMr}}) \end{cases}$$
(11)

式 (11) 中的 $\left(R_{sc} + \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}L_{sc}\right)i_{cMs}$ 、 $\left(R_{sc} + \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}L_{sc}\right)i_{cTs}$ 就是内环实施电流闭环控制的 2 个 PI 调节环节。

将由式(11)得到的控制侧两电压分量 u_{cds} 、 u_{cTs} 经过 2r/3s 变换为逆变器的调制电压 u_{cabe} ,由背靠背逆变器得到实施矢量控制的控制绕组所需的幅值、频率和相位的控制电压,可实现有功和无功功率的独立解耦控制,并能任意调节功率因数。功率绕组定子磁链定向的矢量控制图如图 2 所示。

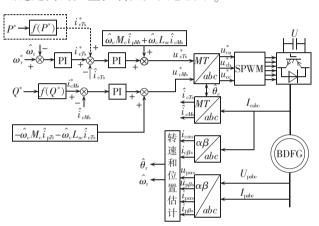


图 2 BDFG 功率绕组磁链定向矢量控制框图 Fig.2 Block diagram of power winding flux-oriented vector control for BDFG

2 BDFG 在功率绕组静止坐标系下的 MRAS 无速度传感器控制

2.1 BDFG 功率绕组静止坐标系下的数学模型

根据交流电机的基本理论,BDFG 在功率绕组 静止坐标系下建立的模型为[15-16]:

$$u_{\rm ps} = R_{\rm sp} i_{\rm ps} + \mathrm{d}\psi_{\rm ps} / \mathrm{d}t \tag{12}$$

$$u_{cs} = R_{sc}i_{cs} + d\psi_{cs}/dt - j(P_p + P_c)\omega_r\psi_{cs}$$
 (13)

$$u_{\rm r} = R_{\rm r} i_{\rm r} + \mathrm{d} \psi_{\rm r} / \mathrm{d} t - \mathrm{j} P_{\rm p} \omega_{\rm r} \psi_{\rm r} \tag{14}$$

$$\psi_{\rm ps} = L_{\rm sp} i_{\rm ps} + M_{\rm p} i_{\rm r} \tag{15}$$

$$\psi_{\rm cs} = L_{\rm sc} i_{\rm cs} + M_{\rm c} i_{\rm r} \tag{16}$$

$$\psi_{\rm r} = L_{\rm r} i_{\rm r} + M_{\rm p} i_{\rm p} + M_{\rm c} i_{\rm c} \tag{17}$$

$$u_{\rm r} = 0 = R_{\rm r} i_{\rm r} + (s - {\rm j} P_{\rm p} \omega_{\rm r}) L_{\rm r} i_{\rm r} +$$

$$(s-jP_p\omega_r)M_pi_{ps} + (s-jP_p\omega_r)M_ci_{cs}$$
 (18)

2.2 基于功率侧定子磁链的 MRAS 速度辨识策略

在 BDFG 的矢量控制系统中,转子绕组接在背靠背变流器上,所加的电压为 PWM 脉冲波,含有丰富的高次谐波,电压量不易测量,而功率侧绕组直接接在大电网上,功率侧的电量容易得到,所以本文采用对功率侧的定子磁链进行观测的方法。基于功率绕组定子磁链观测的 MRAS 转速及位置估算的步骤



如下。

a. 设计参考模型。

根据功率绕组静止坐标系下的电机数学模型, 由式(12)可得到功率侧磁链的参考模型如下.

$$\begin{cases} \psi_{\text{p}\alpha \text{s}} = \int e_{\alpha \text{s}} dt = \int (u_{\text{p}\alpha \text{s}} - R_{\text{s}} i_{\text{p}\alpha \text{s}}) dt \\ \psi_{\text{p}\beta \text{s}} = \int e_{\beta \text{s}} dt = \int (u_{\text{p}\beta \text{s}} - R_{\text{s}} i_{\text{p}\beta \text{s}}) dt \end{cases}$$
(19)

根据式(19)知参考磁链是与转速无关的值,对定子磁链进行观测,是通过理想积分器来完成的,但是在实际应用中由于受到测量噪声、积分初值以及直流偏移等积分器非理想因素的影响,很难实现对磁链的准确观测。本文采用低通滤波器来替代纯积分器,通过将两相静止坐标系下的磁链转换到极坐标系中,再对磁链幅值进行限幅补偿,补偿量的相位与反馈量相同。由于是对功率绕组的定子磁链进行观测,定子接在大电网上,电压与电流均为50 Hz 的电量,所以低通滤波器的截止频率可设为定值,约为额定运行频率的20%,可以有效地消除纯积分环节的直流偏移和初始值的问题。定子磁链观测器的设计见图3。

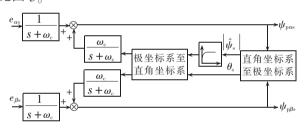


图 3 改进积分器定子磁链观测器

Fig.3 Stator flux observer based on modified integrator

b. 设计可调模型。

由式(18)可知,转子电流为:

$$i_{\rm r} = \frac{M_{\rm p}\psi_{\rm ps} + L_{\rm sp}M_{\rm c}i_{\rm cs}}{M_{\rm p}^2 - L_{\rm sp}L_{\rm r} - \frac{L_{\rm sp}R_{\rm r}}{s - {\rm j}P_{\rm p}\omega_{\rm r}}}$$
(20)

将式(20)代入式(15)得:

$$\psi_{ps} = L_{sp}i_{p} + M_{p} \frac{M_{p}\psi_{ps} + L_{sp}M_{c}i_{cs}}{M_{p}^{2} - L_{sp}L_{r} - \frac{L_{sp}R_{r}}{s - jP_{p}\omega_{r}}}$$
(21)

根据文献[16]知, $s-jP_p\omega_r$ 不论是在稳态还是在 动态都很大,故式(21)中 $\frac{L_{sp}R_r}{s-jP_p\omega_r}$ 可忽略不计,则式 (21)可简化为:

$$\psi_{\rm ps} = \frac{1}{L_{\rm r}} \left[\left(L_{\rm sp} L_{\rm r} - M_{\rm p}^2 \right) i_{\rm ps} - L_{\rm sp} M_{\rm c} i_{\rm cs} \right]$$
 (22)

通过实测的控制侧电流的瞬时值 i_{ca} 、 i_{cb} 、 i_{cc} 首先经 3s/2s 变换得到控制绕组电流在控制绕组两相静止坐标系的值 i'_{cas} 、 $i'_{c\betas}$,再经过坐标变换到功率侧的静止坐标系下的值 \hat{i}_{cas} 、 $\hat{i}_{c\betas}$ 0

$$\begin{bmatrix} i'_{\cos} \\ i'_{\cos} \end{bmatrix} = M_{3s/2s} \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i \end{bmatrix}$$
 (23)

根据图 4 的定子绕组与转子绕组位置关系图,可得控制侧电流在功率绕组两相静止坐标系下的估算值为[15]:

$$\hat{i}_{c\alpha s} = e^{j[(P_p + P_c)(\hat{\theta}_t + \delta) + P_c \gamma]} i'_{c\alpha s}
\hat{i}_{c\beta s} = e^{j[(P_p + P_c)(\hat{\theta}_t + \delta) + P_c \gamma]} (-i'_{c\beta s})$$
(24)

其中, $\hat{\theta}_r = \int \hat{\omega}_r dt$, δ 为转子的初始位置, γ 为功率绕组与控制绕组的初始夹角。

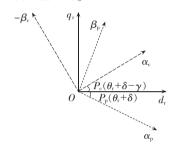


图 4 功率绕组和控制绕组与转子绕组的 位置关系图

Fig.4 Position relationship among power winding, control winding and rotor winding

所以功率绕组定子磁链的观测的可调模型为:

$$\begin{vmatrix} \hat{\psi}_{p\alpha s} = \frac{1}{L_{r}} \left[(L_{sp}L_{r} - M_{p}^{2}) i_{p\alpha s} - L_{sp} M_{c} \hat{i}_{c\alpha s} \right] \\ \hat{\psi}_{p\beta s} = \frac{1}{L_{r}} \left[(L_{sp}L_{r} - M_{p}^{2}) i_{p\beta s} - L_{sp} M_{c} \hat{i}_{c\beta s} \right] \end{aligned}$$
(25)

由上面的推导可知,可调模型中的功率侧磁链与电机的估算转速有关。

c. 定义广义误差。

由式(19)和式(25)可定义在功率绕组两相静止 坐标系下的广义误差信号为:

$$e_{\psi} = \psi_{p\beta s} \hat{\psi}_{p\alpha s} - \hat{\psi}_{p\beta s} \psi_{p\alpha s} \tag{26}$$

d. 估计转速。

根据波波夫稳定理论选择自适应调节机构得到速度的估计式为:

$$\hat{\boldsymbol{\omega}}_{r} = (K_{p} + K_{i}/s)(\psi_{p\beta s}\hat{\psi}_{p\alpha s} - \hat{\psi}_{p\beta s}\psi_{p\alpha s})$$
 (27)
其中, K_{p} 、 K_{i} 分别为 PI 调节器的比例和积分系数。

转子速度和位置估计框图见图 5。

通过上述分析表明,基于功率侧定子磁链的 MRAS 速度辨识策略是在功率绕组两相静止坐标系 下通过与转速无关的参考模型和与估算转速有关的 可调模型来实现对转子机械速的精确估计。

3 仿真研究

在 MATLAB/Simulink 环境下,建立 BDFG 的仿

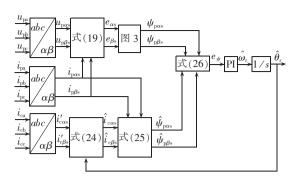


图 5 转子速度和位置估计框图 Fig.5 Block diagram of rotor position and speed estimation

真模型。在 M-T 双同步速坐标系下实现矢量控制,在功率绕组两相静止坐标系下实现转速估计,所用到的仿真参数为: $R_{\rm sp}$ =2.3 Ω , $L_{\rm sp}$ =0.349 8 H, $M_{\rm p}$ =0.003 1 H, $R_{\rm sc}$ =4 Ω , $L_{\rm sc}$ =0.363 7 H, $M_{\rm c}$ =0.002 2 H, $R_{\rm r}$ =1.296 7×10⁻⁵ Ω , $L_{\rm r}$ =4.452 1×10⁻⁵ H, $P_{\rm p}$ = 2, $P_{\rm c}$ =4, $f_{\rm p}$ = 50 Hz, $U_{\rm s}$ = 240 V, J=0.53 N·m·s²/rad。

图 6 显示了所提的方案在静态和动态过程中,发电机转速跟踪的仿真曲线。仿真实验中假定 3 s 之前给定转速为 200 r/min,在 3~4 s 之间转速渐升为 500 r/min,从 9~10 s 之间转速渐升为 800 r/min。由图 6(a)可见实际速度与估计速度曲线几乎重合,可知控制达到了较好的精度和快速性。由图 6(b)可见在电机启动时和电机转速变化时误差相对较大,但稳态时误差能收敛为零,实现精确的转速估计。图 6(c)描述了控制侧电流随转速的变化情况,在电机转速稳定在自然同步转速时(500 r/min)时,控制

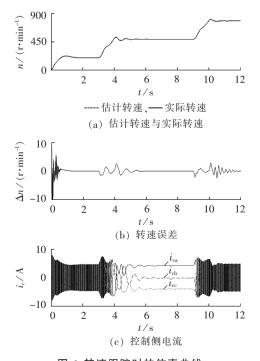
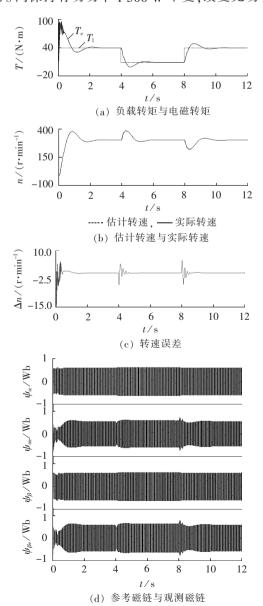


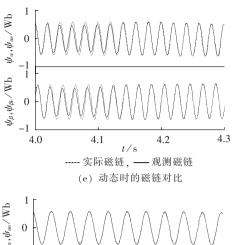
图 6 转速跟踪时的仿真曲线 Fig.6 Simulative waveforms of speed tracking

绕组提供的电流为直流电。在自然转速点两边控制侧的电流会发生相序的改变,实现控制侧的能量双向流动。

图 7 显示了在负载转矩突变时相关仿真波形,图 7(a)中仿真的是电机在负载转矩为 40 N·m 下启动,4 s 时负载转矩突变为 10 N·m,8 s 时转矩变回 40 N·m。图 7(b)显示在负载变化时,转速有波动,引起估计转速与实际转速之间有误差,如图 7(c)所示,转速误差能收敛到零。图 7(d)是功率绕组定子磁链的参考值与观测值的仿真图;图 7(e)是动态时磁链的放大图,磁链的实际值与观测值之间有一定的差别。从仿真看出约 0.12 s 后,差值约为 0;图 7(f)是稳态时对磁链的放大图,从图中可以看出,观测值与参考值完全一样。图 7(d)—(f)中, ψ_{α} 、 ψ_{β} 表示参考磁链, $\psi_{\alpha e}$ 、 $\psi_{\beta e}$ 表示观测磁链。采用无速度传感器的矢量控制实现发电机有功、无功的解耦控制,假定 $0\sim8 \text{ s}$ 间保持有功功率 1500 W 不变,改变无功功率







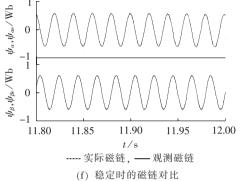


图 7 转矩变化时的相关仿真曲线 Fig.7 Simulative waveforms relative to torque change

分别为 -1 000 var、0、1 000 var,再在 8 s 时将有功变为 3 000 W 而无功不变,仿真图如图 8 所示。从仿真图上看出仿真系统能较好地实现有功功率与无功功率的独立控制,能达到功率因数可调的目的。

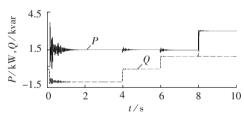


图 8 有功、无功功率独立控制的仿真波形 Fig.8 Simulative waveforms of decoupled active and reactive power controls

4 实验验证

为了进一步验证模型参考自适应无速度传感器控制策略,在实验室 5 kW 的 BDFG 上进行了实验验证,实验以一台 7.5 kW 的高性能变频器带动普通的交流异步电机模拟风力机,异步电机的额定转速为 725 r/min。实验中网侧变流器控制背靠背变流器的并网电流及直流母线电压;机侧变流器控制 BDFG 变速恒频的矢量控制所需的控制侧的电流。以计算速度快、精度高的浮点型数字信号处理器 TI 公司的 DSP TMS320LF28335 为控制核心,控制开关频率选择 5 kHz(通常 DSP 的控制频率为 10 kHz,由于无速

度传感器控制的程序有较多的电压与电流采样和较复杂的运算,不能在一个中断中完成,故实验中降频使用),母线电压设定为 200 V。图 9 为转子机械转速与控制侧的转差角、电流的实验波形图。其中图 9 (a)转速的变化范围为 400~600 r/min,自然同步转速为 500 r/min,可知在 MRAS 控制策略下,估算的速度在发电机转速变化时,能快速地跟踪实际的转速,具有较好的动态响应特性和较高的观测精度。从图 9(b)、(c)知跨越同步速时控制侧的电流改变了相序。从图 9(a)、(b)知实际速度与估算速度几乎完全相同且控制侧的实际转差角与估算转差角也完全相同,实现了用无速度传感器控制 BDFG 的变速恒频风力发电,实验进一步验证了方案的可行性和有效性。

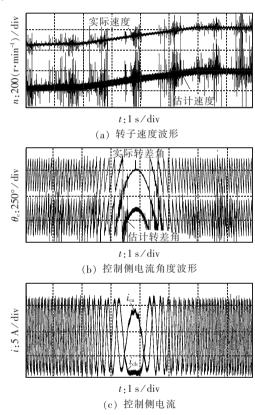


图 9 转速变化时的相关实验波形 Fig.9 Experimental waveforms relative to speed change

5 结论

本文在 BDFG 双同步速数学模型中实现了矢量控制,并首次将功率侧绕组两相静止坐标系下的定子磁链观测模型参考自适应转速辨识控制策略应用于控制系统中,在MATLAB/Simulink 环境下建立了系统的仿真模型,并搭建了实验平台,仿真与实验结果表明所提速度自适应观测器实现了静态和动态情况下的速度精确观测,同时实现了有功和无功功率的独立控制即功率因数可调,控制策略有较强的鲁棒性。



参考文献:

- [1] 龚晟,杨向宇,纪梁洲. 磁阻型无刷双馈电机特殊转子优化设计 [J]. 电力自动化设备,2012,32(8):60-65.
- [2] 阚超豪,王雪帆. 齿谐波法设计的无刷双馈发电机运行范围[J]. 中国电机工程学报,2011,31(24):124-130. KAN Chaohao,WANG Xuefan. Operation range of brushless
 - doubly-fed machine based on slot-harmonics [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(24):124-130.
- [3] 邓先明,姜建国,方荣惠. 笼型转子无刷双馈电机的电磁分析和等效电路[J]. 电工技术学报,2005,20(8):19-23.
 DENG Xianming,JIANG Jianguo,FANG Ronghui. The electromagnetic analysis and equivalent circuit of brushless doubly-fed machine with cage rotor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2005,20(8):19-23.
- [4] 熊飞,王雪帆,张经纬,等. 绕线转子无刷双馈电机的链型等效电路模型[J]. 电工技术学报,2010,25(2):15-21.

 XIONG Fei,WANG Xuefan,ZHANG Jingwei,et al. Chain equivalent circuit model of wound-rotor brushless doubly-fed machine[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2010, 25(2):15-21.
- [5] 张凤阁,王惠军,佟宁泽,等. 新型无刷双馈变速恒频风力发电系统的建模与数字仿真[J]. 太阳能学报,2005,26(5):660-664. ZHANG Fengge,WANG Huijun,TONG Ningze,et al. Modeling and simulation of variable speed constant frequency wind power generating system with doubly-fed brushless generator [J]. Acta Energiae Solaris Sinica,2005,26(5):660-664.
- [6] 阳锦刚,潘再平. 级联式无刷双馈电机的仿真研究[J]. 太阳能学报,2008,29(8):1014-1020.
 - YANG Jingang, PAN Zaiping. Simulation study of cascade brushless doubly-fed generator [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2008,29(8):1014-1020.
- [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 control for brushless doubly-fed machine[J].

Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4):87-93.

- [8] 秦虹,潘再平,阳锦刚. 级联式无刷双馈变速恒频发电机控制策略的仿真研究[J]. 太阳能学报,2009,30(5):565-571. QIN Hong,PAN Zaiping,YANG Jingang. The simulation study on strategy of cascade brushless variable-speed constant-frequency doubly-fed generator[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2009,30(5):565-571.
- [9] SHAO Shiyi, ABDI E, BARATI F, et al. Stator-flux-oriented vector control for brushless doubly fed induction generator[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2009, 56(10):4220-4228.
- [10] 黄悦华,徐阳,周星辰. 基于变论域模糊控制的无刷双馈风力 发电系统空载并网控制[J]. 电力自动化设备,2012,32(2): 99-103
 - HUANG Yuehua, XU Yang, ZHOU Xingchen. Grid connection based on variable universe fuzzy control for no-load BDFG system of wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(2):99-103.
- [11] 刘广忱,王生铁,刘瑞明,等. 无刷双馈发电机风力发电系统的 建模与控制[J]. 微特电机,2009(9):52-56.
 - LIU Guangchen, WANG Shengtie, LIU Ruiming, et al. Modeling and control of wind power generation system with brushless

- doubly-fed generator [J]. Small & Special Electrical Machines, 2009(9);52-56.
- [12] JOVANOVIC M G, DORRELL D G. Sensorless control of brushless doubly-fed reluctance machines using an angular velocity observer[C]//International Conference on PEDS. Bangkok, Thailand; IEEE, 2007;717-724.
- [13] JIN Shi,ZHANG Fengge,WANG Xiuping. Speed sensorless direct torque control of brushless doubly-fed generator for wind power generation[C]//2009 International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices. Chengdu, China; IEEE, 2009;304-307.
- [14] 杨俊华,吕惠子,吴捷,等. 基于波波夫超稳定性的无刷双馈电机直接转矩控制[J]. 中国电机工程学报,2009,29(15):107-113. YANG Junhua,LÜ Huizi,WU Jie,et al. Direct torque control strategy for brushless doubly-fed machines based on Popov hyperstability theory[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(15): 107-113.
- [15] POZA J,OYARBIDE E,ROYE D,et al. Unified reference frame dq model of the brushless doubly fed machine [J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2006,153(5):726-734.
- [16] SHAO Shiyi, ABDI E, MCMAHON R. Dynamic analysis of the brushless doubly-fed induction generator during symmetrical three-phase voltage dips [C] // International Conference on PEDS. Taipei, Taiwan, China; IEEE, 2009; 464-469.
- [17] ZHU Yunguo, ZHANG Xing, LIU Shengyong. Study on speed sensorless vector control of brushless doubly-fed machine [C] // IEEE International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks, Xianning, China: IEEE, 2011:780-783.
- [18] 施凯,黄文新,胡育文,等. 间接磁场定向控制的定子双绕组感应电机风力发电系统[J]. 电力自动化设备,2012,32(11):34-38. SHI Kai,HUANG Wenxin,HU Yuwen,et al. DWIG wind power system with indirect field oriented control[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(11):34-38.
- [19] 阚超豪,王雪帆,熊飞. 转子绕组星-环形拓扑结构无刷双馈电机[J]. 中国电机工程学报,2011,31(3):111-117.

 KAN Chaohao,WANG Xuefan,XIONG Fei. A brushless doubly-fed machine with star-circle rotor winding[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(3):111-117.
- [20] 张凤阁,金石,张武. 基于无速度传感器的无刷双馈风力发电机直接转矩控制[J]. 电工技术学报,2011,26(12):21-27. ZHANG Fengge,JIN Shi,ZHANG Wu. Direct torque control for brushless doubly-fed wind power generator based on speed sensorless[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011,26(12):21-27.
- [21] ZHU Yunguo, ZHANG Xing, LIU Chun, et al. Study on speed sensorless control of brushless doubly-fed wind power generator based on flux linkage of the power winding [C] // International Power Electronics and Motion Control Conference-ECCE Asia. Harbin, China; IEEE, 2013; 2453-2456.

作者简介:

朱云国(1976-),男,安徽安庆人,副教授,博士研究生,主要研究方向为电力电子与电力传动(**E-mail**:zdhkm@tlu.edu.cn); 张 兴(1963-),男,安徽铜陵人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力电子与电力传动、新能源等。

(下转第 136 页 continued on page 136)



络短期电价预测的研究[J]. 继电器,2008,36(1):48-52.

LUO Xin,ZHOU Yuhui,GUO Hongyu. Short-term price forecasting based on chaotic property and phase space reconstructed neural networks[J]. Relay,2008,36(1):48-52.

[18] 曾杰,张华. 基于最小二乘支持向量机的风速预测模型[J]. 电网技术,2009,33(18):66-70.

ZENG Jie, ZHANG Hua. A wind speed forecasting model based on least squares support vector machine [J]. Power System Technology, 2009, 33(18):66-70.

作者简介:

刘亚南(1988-),男,江苏徐州人,硕士研究生,研究方向 为电力系统负荷预测(**E-mail**:lynwyx@163.com);

卫志农(1962-),男,江苏江阴人,教授,博士研究生导师,研究方向为电力系统运行分析与控制、输配电系统自动化等(E-mail;wzn_nj@263.net);

朱 艳(1981-),女,江苏建湖人,研究方向为电力系统自动化(**E-mail**; jiangxie1225@163.com)。

Short-term wind speed forecasting model based on D-S evidence theory

LIU Yanan¹, WEI Zhinong¹, ZHU Yan², SUN Guoqiang¹, SUN Yonghui¹,

YANG Youqing³, QIAN Ying³, ZHOU Jun³

(1. Research Center for Renewable Energy Generation Engineering of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. NARI Technology Development Co., Ltd., Nanjing 210061, China;

3. Chizhou Power Supply Company of Anhui Electric Power Company, Chizhou 247000, China)

Abstract: A combined short-term wind speed forecasting model based on D-S evidence theory is proposed. The forecasting models of time series, BP neural network and support vector machine are adopted to respectively forecast the wind speed. Based on the analysis of forecast errors, D-S evidence theory is applied to fuse these three models. The wind speed data for several days before are taken as the fusion samples to calculate the corresponding basic trust distribution functions, which are then fused. The results of fusion are taken as the weights of the wind speed forecasting model and the wind speed of the day to be forecasted is calculated. Simulative results show that, the proposed combined forecasting model has smaller forecasting error and better effect.

Key words: wind power; time series; BP neural network; support vector machines; D-S evidence theory; forecasting; models

(上接第 130 页 continued from page 130)

Sensorless vector control technology for brushless doubly-fed wind power generator

ZHU Yunguo^{1,2}, ZHANG Xing¹, LIU Chun¹, CHEN Hongbing¹

- (1. College of Electrical and Automatic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
 - 2. Department of Electrical Engineering, Tongling College, Tongling 244000, China)

Abstract: A control strategy applying the model-reference adaptive speed identification is proposed to remove the bad influence of speed sensor on the control stability and accuracy of the vector control system for the BDFG (Brushless Doubly-Fed Generator), which observes the stator flux at BDFG power side to obtain the reference model and design the adjustable model, and then estimates the rotor speed by regulating the error between two models. A simulation model of control system is established with MATLAB/Simulink and the simulative results show the proposed adaptive speed observer realizes the precise speed identification in both static and dynamic conditions and the decoupled control of active and reactive powers. Experiment is carried out on a small-power BDFG platform and the experimental result verifies the feasibility and effectiveness of the proposed control strategy.

Key words: wind power; brushless doubly-fed generator; rotor speed; vector control; model reference adaptive system; stator-flux-oriented