

# 控制绕组磁链控制的无刷双馈发电机空载并网

王景轩<sup>1</sup>,王淑红<sup>1</sup>,王一帆<sup>1</sup>,王建华<sup>2</sup>,吴攀<sup>3</sup>,张爱玲<sup>1</sup>

(1. 太原理工大学 电气与动力工程学院,山西 太原 030024;2. 中国能源建设集团山西省电力勘测设计院有限公司,山西 太原 030024;  
3. 国网山西省电力科学研究所,山西 太原 030001)

**摘要:**和双馈感应发电机相比,无刷双馈感应发电机具有更高的可靠性和更低的维修成本,其在变速恒频风力发电系统中的商业应用已指日可待。提出一种在控制绕组静止坐标系实现的无刷双馈感应发电机的空载并网方法。该方法通过对控制绕组磁链矢量的相位增量与幅值增量的控制,实现功率绕组电压和频率的动态调节以满足并网的条件。在解析分析的基础上,构建了空载并网时控制系统的结构框图。实验结果表明,该方法可以满足无刷双馈电机在风力发电系统中实际应用的需求。

**关键词:**无刷双馈感应发电机;空载并网;变速恒频;控制绕组磁链

**中图分类号:**TM315 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed20080

## No-load Cutting-in for Brushless Doubly-fed Generator Based on the Control of Winding Flux Linkage Control

WANG Jingxuan<sup>1</sup>, WANG Shuhong<sup>1</sup>, WANG Yifan<sup>1</sup>, WANG Jianhua<sup>2</sup>, WU Pan<sup>3</sup>, ZHANG Ailing<sup>1</sup>

(1. College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China; 2. China Energy Engineering Group Shanxi Electric Power Engineering Co., Ltd., Taiyuan 030024, Shanxi, China; 3. State Grid Shanxi Electric Power Research Institute, Taiyuan 030001, Shanxi, China)

**Abstract:** Compared with doubly-fed induction generator (DFIG), brushless doubly-fed induction generator (BDFIG) has higher reliability and lower maintenance costs, which is nearly on the market in variable-speed constant-frequency wind power generation systems. A no-load cutting-in method for BDFIG based on the control winding static reference frame was proposed. The dynamic adjustment of the power winding voltage and frequency was realized by controlling the phase increment and the amplitude increment of the winding flux linkage vector control to meet the conditions of the grid connection. Based on the analytical analysis, a block diagram of the control system of the no-load cutting-in was constructed. The experimental results show that the method can meet the needs of the practical application of brushless doubly-fed machines (BDFM) in wind power generation systems.

**Key words:** brushless doubly-fed induction generator (BDFIG); no-load cutting-in; variable speed constant frequency; control winding flux linkage

目前,双馈发电机(doubly-fed induction generator, DFIG)已广泛应用于风电领域,但其碳刷和滑环的存在,加大了系统的维护成本、降低了系统的可靠性。无刷双馈电机(brushless doubly-fed machine, BDFM),具有和双馈电机相似的优点,但由于没有碳刷和滑环,维护成本低,更适合使用在偏远的少维护甚至无维护的风力发电领

域,因而引起人们极大的研究兴趣并取得了大量的研究成果。近十年来电机本体、数学模型以及控制策略的研究表明,无刷双馈电机正日益走近商业应用<sup>[1]</sup>。

深入研究风力发电机并网技术是保障风电机组正常运行的前提。适合变速恒频风电机组的并网方式主要有空载并网、负载并网、直接并

**基金项目:**国家自然科学基金项目资助(51477110)

**作者简介:**王景轩(1995—),男,硕士,Email:wangjingxuan26@163.com

网以及孤岛并网。其中空载并网以其实现简单、性能优良而备受关注,本文的研究内容为空载并网。

众所周知,为避免发电机并网时产生较大的冲击电流和电压波动,发电机投入并联的条件为

- 1)发电机的相序与电网一致;
- 2)发电机的频率与电网相同;
- 3)发电机的激磁电动势与电网电压大小相等相位相同。

目前国内外对 DFIG 空载并网的研究逐步深入,较为成熟的控制方法是基于磁链定向的矢量解耦控制<sup>[2-7]</sup>。该方法依赖电机参数,且需要旋转坐标变换,系统结构复杂。尽管为了改善控制性能及减小对电机参数的依赖,许多先进的控制方法被引入到控制系统<sup>[8-11]</sup>。但本质上都是在  $d-q$  旋转坐标系通过对转子绕组电流的解耦控制实现定子电压的调节以满足并网条件。另一类是基于直接功率控制(direct power control, DPC)的空载并网方法<sup>[12-13]</sup>,该方法不需要电流内环和旋转坐标变换、系统结构简单。DPC算法通常采用滞环控制器,这种方法主要的问题是开关频率不恒定,这将导致功率损耗难以估算、滤波器设计难度增大等问题。

关于无刷双馈电机空载并网技术的研究相对较少,且控制策略本质上都是在  $d-q$  旋转坐标系通过对控制绕组电流的解耦控制实现功率绕组电压矢量的动态调节以满足并网的条件<sup>[14-19]</sup>。和 DFIG 一样,该方法需要旋转坐标变换,系统结构复杂。

本文提出一种在控制绕组静止坐标系实现无刷双馈感应发电机的空载并网方法。该方法通过对控制绕组磁链矢量相位增量、幅值增量的控制实现功率绕组电压矢量的动态调节以满足并网的条件。并在解析分析的基础上构建了空载并网时控制系统的结构框图。该方法无需坐标变换,不依赖于电机参数,系统结构十分简单。实验结果证明了该方法的可行性。

### 1 无刷双馈电机的基本工作原理

无刷双馈发电机的定子由两套绕组组成,分别为功率绕组(power winding, PW)与控制绕组(control winding, CW),两套绕组在设计时采用了不同的极对数以避免其间的直接耦合。无刷双馈电机的转子主要有三种形式,分别为笼型、绕线式和磁阻式。特殊设计的转子可以实现PW

与CW间的间接耦合从而完成能量的转换。本文所研究的是目前应用较多的笼型转子无刷双馈发电机。

无刷双馈发电机通常运行在双馈模式下。此时,其系统结构框图如图1所示,功率绕组(PW)接电网,向电网输入有功及无功功率;控制绕组(CW)通过变频器接电网,通过对控制绕组电压幅值、频率、相序和相位的控制实现功率绕组有功功率及无功功率的控制。

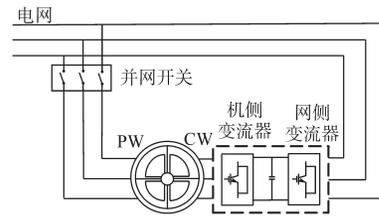


图1 无刷双馈发电机结构  
Fig.1 The structure diagram of BDFIG

图1中,转子转速  $n_r$  与两定子绕组频率及极对数之间的关系为

$$f_p = \frac{n_r(p_p + p_c)}{60} \pm f_c \quad (1)$$

式中: $f$ 为频率; $p$ 为极对数。下标  $p, c$  分别代表 PW, CW。

当式(1)中取“-”时,电机运行在超同步状态下,电机转速越高,  $f_c$  越大;当式(1)中取“+”时,电机运行在亚同步状态,此时功率绕组与控制绕组电流相序相反,  $f_c$  越大,电机转速越低。控制绕组频率为零时的自然同步转速  $n_n$  可表示为

$$n_n = \frac{60 \times f_p}{p_p + p_c} \quad (2)$$

由式(1)可见,当无刷双馈电机作为风力发电机并网运行、由风速引起电机转速变化时,通过调节控制绕组的频率,可使功率绕组频率与电网频率保持一致,实现变速恒频发电。

### 2 无刷双馈电机的数学模型

无刷双馈发电机数学模型有很多种,为了方便起见,本文采用了控制绕组静止坐标系下矢量模型<sup>[20]</sup>:

$$u_p = R_p i_p + \frac{d\Psi_p}{dt} - j(p_p + p_c)\omega_r \Psi_p \quad (3)$$

$$u_c = R_c i_c + \frac{d\Psi_c}{dt} \quad (4)$$

$$u_r = R_r i_r + \frac{d\Psi_r}{dt} - jp_c \omega_r \Psi_r \quad (5)$$

$$\Psi_p = L_p i_p + L_{pr} i_r \quad (6)$$

$$\Psi_c = L_c i_c + L_{cr} i_c \quad (7)$$

$$\Psi_r = L_r i_r + L_{pr} i_p + L_{cr} i_c \quad (8)$$

式中:  $\Psi, i, u$  分别为磁链、电流和电压矢量;  $\omega$  为电角速度。下标 p, c, r 分别为 PW, CW 与转子绕组变量;  $L$  为自感;  $R$  为电阻;  $L_{pr}$  与  $L_{cr}$  分别为转子与 PW, CW 间的互感。

值得注意的是,由于采用的是控制绕组静止坐标系,式(3)~式(8)中所有矢量均以控制绕组角频率旋转。例如,功率绕组电压在控制绕组静止坐标系下可表示为

$$u_p = |u_p| e^{j\omega_c t} \quad (9)$$

式中:  $|u_p|$  为功率绕组电压的幅值。

### 3 基于控制绕组磁链控 BDFIG 空载并网技术的基本原理

将式(8)代入式(5)消去转子磁链  $\Psi_r$ ,再考虑到笼型转子无刷双馈电机转子短路,转子电压  $u_r = 0$ ,可以得到:

$$\begin{aligned} u_r &= [R_r + (\nabla - jp_c \omega_r) L_r] i_r + (\nabla - jp_c \omega_r) L_{pr} i_p + \\ &\quad (\nabla - jp_c \omega_r) L_{cr} i_c \\ &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

式中:  $\nabla = d/dt$  为微分算子。

将式(6)代入式(10),消去  $i_p$ ,可以得到转子电流  $i_r$  的表达式为

$$i_r = \frac{L_{pr} \Psi_p + L_p L_{cr} i_c}{L_{pr}^2 - L_r L_p - \frac{R_r L_p}{\nabla - jp_p \omega_r}} \quad (11)$$

在 CW 静止坐标系下,电机稳态运行时  $\nabla = j\omega_c$ ,无论是暂态还是稳态,上式中,  $\nabla - jp_p \omega_r$  远大于其它项,其倒数很小,因此可以忽略<sup>[21]</sup>。式(11)可重新写为

$$i_r = \frac{L_{pr} \Psi_p + L_p L_{cr} i_c}{L_{pr}^2 - L_r L_p} \quad (12)$$

将式(12)代入式(7),整理后可以得到  $i_c$  与 CW, PW 磁链的关系为

$$\Psi_c = -K_c \Psi_p + L_c^* i_c \quad (13)$$

其中

$$\begin{aligned} K_c &= \frac{L_{pr} L_{cr}}{L_r L_p - L_{pr}^2} \\ L_c^* &= \frac{L_p L_c L_r - L_{cr}^2 L_p - L_{pr}^2 L_c}{L_p L_r - L_{pr}^2} \end{aligned} \quad (14)$$

式中:  $L_c^*$  为 CW 的短路等效漏电感。

CW 短路等效漏电感等效电路图如图2所示。

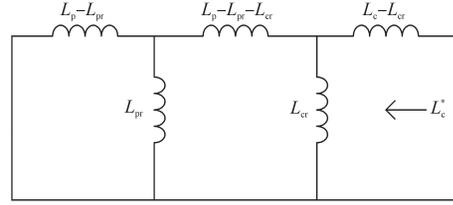


图2 CW 短路等效漏电感等效电路图

Fig.2 Equal circuit diagram of CW short circuit equivalent leakage inductance

将式(13)代入式(4),消去  $\Psi_c$ , CW 电压可以表示为

$$\begin{aligned} u_c &= R_c i_c + \frac{d\Psi_c}{dt} \\ &= R_c i_c + L_c^* \frac{di_c}{dt} - K_c \frac{d\Psi_p}{dt} \end{aligned} \quad (15)$$

式(15)中,电阻压降以及 CW 的短路等效电感压降很小,将其忽略后,式(15)可重新写为下式形式:

$$u_c = -K_c \frac{d\Psi_p}{dt} \quad (16)$$

式(3)中,电阻压降很小,将其忽略后可重新写为

$$u_p = \frac{d\Psi_p}{dt} - j(p_p + p_c) \omega_r \Psi_p = -j\omega_p \Psi_p \quad (17)$$

式(4)中,电阻压降很小,忽略后,式(4)可重写为

$$u_c = \frac{d\Psi_c}{dt} = j\omega_c \Psi_c \quad (18)$$

将式(17)、式(18)代入式(16)可得  $u_p$  与  $\Psi_c$  的关系为

$$u_p = \frac{j\omega_p}{K_c} \Psi_c \quad (19)$$

由式(19)可见,功率绕组电压的幅值和频率由控制绕组磁链决定,通过调节控制绕组磁链的幅值和频率便可以调节功率绕组电压的幅值和频率。

值得强调的是,式(19)是在 CW 静止坐标系观测,当从 PW 静止坐标系观测时,  $u_p$  的频率与电网频率一致。

### 4 控制绕组磁链

图3为控制绕组磁链矢量  $\Psi_c$ 。理想条件下,其端点轨迹为圆形,旋转角频率为  $2\pi f_c$ ,半径由控制绕组磁链幅值  $|\Psi_c|$  决定,在微机控制的离散系统中其端点轨迹近似为多边形,  $\theta_c$  为相位角,  $\Delta X_c$  为相邻的2采样周期内的相位增量。

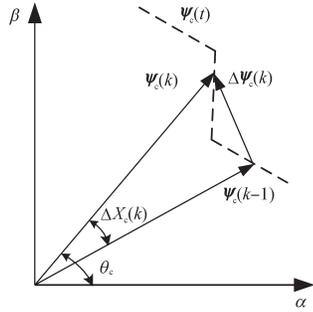


图3 CW磁链矢量

Fig.3 The diagram of CW flux linkage vector

图3中  $k$  与  $k-1$  为相邻的2个采样周期。 $\Delta\Psi_c(k)$  为相邻的2个采样周期CW磁链空间矢量的增量,且

$$\Delta\Psi_c(k) = \Psi_c(k) - \Psi_c(k-1) \quad (20)$$

设  $\Delta X_c(k)$ ,  $K_s(k)$  分别为CW磁链空间矢量在第  $k$  个周期内的相位增量与幅值增量,则  $\Psi_c(k)$  与  $\Psi_c(k-1)$  之间的关系可以表示为

$$\Psi_c(k) = e^{j\Delta X_c(k)} [1 + K_s(k)] \Psi_c(k-1) \quad (21)$$

其中,  $\Delta X_c(k)$  可表示为静态相位增量  $\Delta X_{st}(k)$  与动态相位增量  $\Delta X_d(k)$  之和,即

$$\Delta X_c(k) = \Delta X_{st}(k) + \Delta X_d(k) \quad (22)$$

发电机空载运行时,  $\Delta X_d(k) = 0$ , 静态相位增量  $\Delta X_{st}$  可表示为

$$\Delta X_{st} = 2\pi f_c \cdot T_{pwm} \quad (23)$$

式中:  $T_{pwm}$  为采样周期。

在采样得到电网频率和电机转速后,  $f_c$  由式(1)计算以实现变速恒频发电。

式(21)、式(23)和式(19)表明,通过对CW磁链相位增量与幅值增量的控制便可实现  $\Psi_c$  幅值和频率的动态调节,进一步实现功率绕组电压和频率的动态调节。

### 5 控制器的设计

通过上述分析,可以得到基于控制绕组磁链控制的无刷双馈发电机空载并网的结构框图如图4所示。

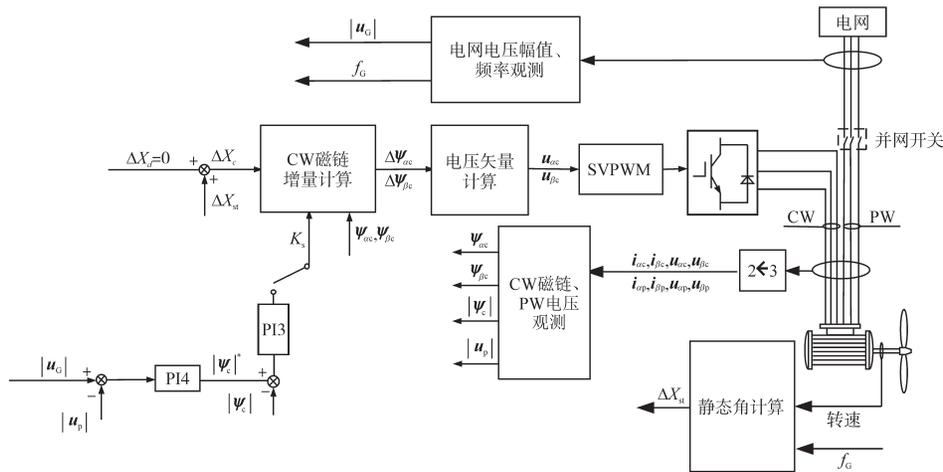


图4 空载并网时的结构框图

Fig.4 Schematic of no-load cutting-in

#### 5.1 控制器设计

图4中,有关变量的下标  $\alpha$  和  $\beta$  分别表示矢量的  $\alpha$  分量和  $\beta$  分量,例如  $i_{ac}$  表示控制绕组电流的  $\alpha$  分量,以此类推。CW磁链的幅值增量的控制过程如下:图4中,电网电压幅值  $|u_g|$  与功率绕组电压  $|u_p|$  之差经过PI调节器4后输出控制绕组磁链的给定值  $|\Psi_c|^*$ , 将其与系统观测得到的  $|\Psi_c|$  做比较后经过PI调节器3得到CW磁链幅值增量  $K_s$ ; 如图4可见, CW磁链的相位增量  $\Delta X_c$  由  $\Delta X_{st}$  控制,如本文第4节所述。

根据  $\Delta X_c$  和  $K_s$  以及观测所得的  $\Psi_{ac}$ ,  $\Psi_{\beta c}$  可求得图4中控制绕组磁链增量如下2式所示<sup>[22]</sup>:

$$\Delta\Psi_{ac} = \Psi_{ac} [(1 + K_s)\cos\Delta X_c - 1] - (1 + K_s)\Psi_{\beta c}\sin\Delta X_c \quad (24)$$

$$\Delta\Psi_{\beta c} = \Psi_{\beta c} [(1 + K_s)\cos\Delta X_c - 1] - (1 + K_s)\Psi_{ac}\sin\Delta X_c \quad (25)$$

由  $\Delta\Psi_{ac}$ ,  $\Delta\Psi_{\beta c}$ ,  $i_{ac}$ ,  $i_{\beta c}$  可求得控制绕组电压的  $\alpha$  和  $\beta$  分量如下2式所示<sup>[22]</sup>:

$$U_{ac} = \frac{\Delta\Psi_{ac}}{T_{PWM}} + R_c i_{ac} \quad (26)$$

$$U_{\beta c} = \frac{\Delta\Psi_{\beta c}}{T_{PWM}} + R_c i_{\beta c} \quad (27)$$

进而通过SVPWM调制,由逆变器输出电压驱动控制绕组。由图4可见,所提方法不必通过

旋转坐标变换在  $d-q$  旋转坐标系下通过对控制绕组电流的解耦控制实现功率绕组电压矢量的动态调节<sup>[14]</sup>,而是在控制绕组静止坐标系实现功率绕组电压矢量的动态调节,系统结构十分简单。

### 5.2 功率绕组电压幅值观测

图4中,采集到电网相电压后进行3/2变换,得到 $\alpha$ 分量和 $\beta$ 分量 $u_{\alpha G}, u_{\beta G}$ ,再根据式计算得到电网电压幅值 $|u_G|$ ;

$$|u_G| = \sqrt{u_{\alpha G}^2 + u_{\beta G}^2} \quad (28)$$

功率绕组电压幅值观测方法与上述方法一致。控制绕组磁链观测方法见文献[13]。

## 6 实验结果

本文提出的方法可以适用于正常运行时采用不同控制方法的系统实现空载并网,如矢量控制、间接功率控制<sup>[20]</sup>等。由于间接功率控制系统的内环结构和图4相同,为了验证本文所提并网方法的可行性,发电机并网后的控制方法采用了间接功率控制方法如图5所示。

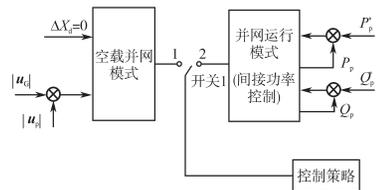


图5 空载并网模式与并网运行模式系统结构框图

Fig.5 Structure diagram for the system of no-load cutting-in mode and grid-connected operation mode

图5中,无刷双馈电机并网后系统发出控制信号,转入并网运行方式,将功率绕组的有功功率 $P_p^*$ 和无功功率 $Q_p^*$ 作为控制变量。 $P_p, Q_p$ 分别为功率绕组经计算得到的有功及无功功率的反馈值。

### 6.1 实验平台

图6为BDFIG实验平台结构框图。

如图6所示,BDFIG实验平台主要包括:输入电抗器、变流器、输出电抗器、采样电路、驱动电路、原动机等,采用DSP(TMS320LF2407A)产生所需要的控制程序;采用由西门子变频器驱动的异步电动机作为原动机拖动BDFIG。BDFIG的具体参数如下: $u_{pN}=380\text{ V}(50\text{ Hz}), u_{cN}=380\text{ V}(15\text{ Hz}), n_r=350\sim 650\text{ r/min}, p_p/p_c=2/4, i_{pN}=17.53\text{ A}, i_{cN}=8.76\text{ A}, T_c=227.9\text{ N}\cdot\text{m}, R_c=5.00\ \Omega, R_p=0.87\ \Omega, R_r=1.703\times 10^{-4}\ \Omega, L_{pr}=4.436\times 10^{-3}\text{ H}, L_{cr}=6.160\times 10^{-3}\text{ H}, L_r=9.766\times 10^{-5}\text{ H}, L_p=0.325\text{ H}, L_c=1.102\text{ H}。$

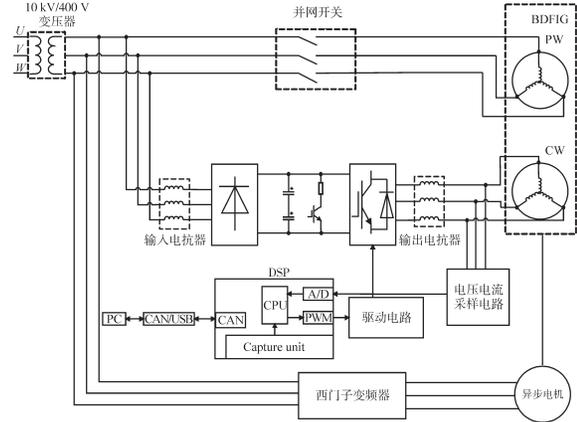


图6 实验平台结构框图

Fig.6 Structure diagram of the test rig

### 6.2 实验结果

为了验证所述方法的可行性,在图6所示的实验平台进行了超同步及亚同步两种运行状态的空载并网实验。

#### 6.2.1 超同步650 r/min空载并网实验结果

图7为超同步650 r/min实验结果图。图7中,BDFIG由异步电动机拖动至650 r/min附近。 $t=0.5\text{ s}$ 时,图5中开关1接至触点1,系统进入空载并网模式, $t=4.358\text{ s}$ 时,图5中开关1接至触点2,无刷双馈发电机并入电网,进入间接功率控制模式,此时 $P_p^*=0, Q_p^*=0$ 。 $t=5\text{ s}$ 时有功功率设定值 $P_p^*$ 由0 kW斜坡变化到2.7 kW,无功功率保持为零。

图7a为功率绕组线电压,图7b为功率绕组及对应的电网线电压。为清晰起见,前者只给出电压的调节过程,后者给出并网过程。图7c为功率绕组机侧及电网网侧电压幅值。

由图7c、图7d可见,电压幅值及控制绕组磁链幅值均能快速跟踪给定值。功率绕组电压幅值和频率与电网电压接近时,准同期自动并网装置检测二者相位,在其相位重合即 $t=4.358\text{ s}$ 时发出指令,闭合并网开关,无刷双馈发电机投入电网如图7b所示。由图7e、图7f可见并网瞬间功率绕组冲击相电流峰值为1.93(标么值),控制绕组冲击相电流峰值为1.08(标么值),二者均小于两倍额定电流。图7h中并网瞬间的有功功率变化是由于功率绕组暂态电流引起的,并由此引起了转速下降,如图7i所示。但由于西门子变频器的调节功能,电机转速很快恢复到设定的转速。图7g为CW磁链相位角 $\theta_c$ ,在并网前后的稳态过程中,其周期约为66.7 ms,对应频率 $f_c$ 为15 Hz;

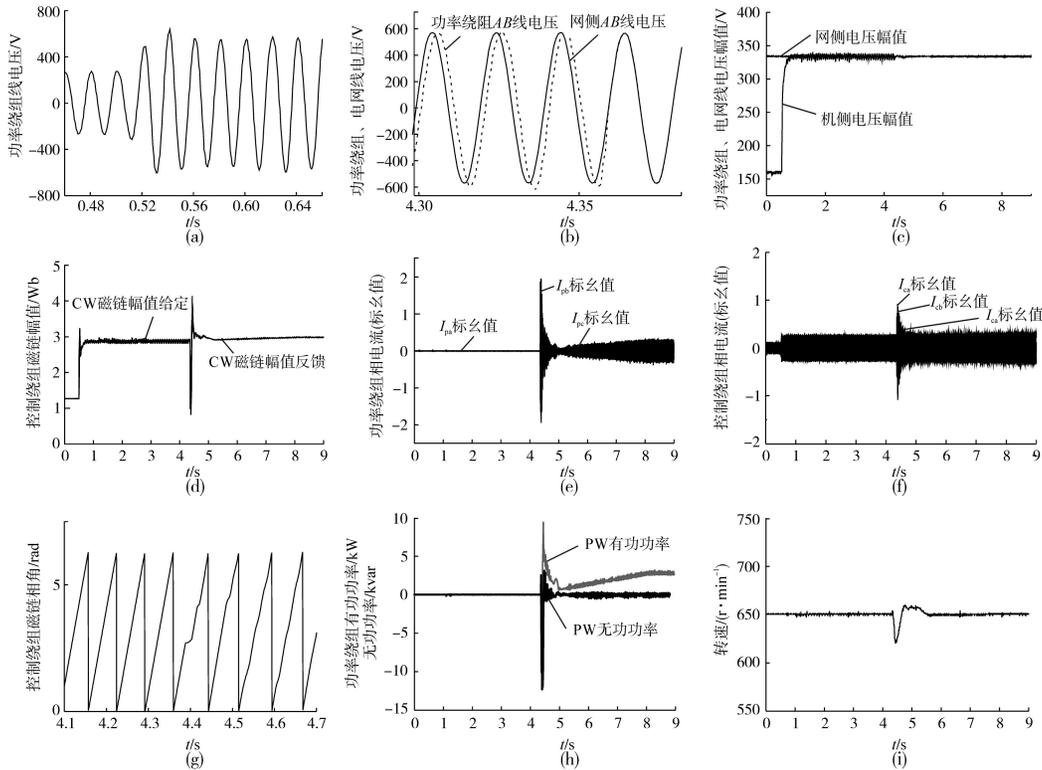


图7 超同步650 r/min实验结果

Fig.7 Experimental result of super-synchronous for 650 r/min

并网的暂态过程中,由于机组转速波动,根据式(1),控制绕组磁链频率进行了相应的调节,以实现变速恒频发电。 $t=5.0\text{ s}$ 时,系统切换至间接功率控制模式, $P_p^*$ 由零斜坡给定至2.7 kW,即无刷双馈发电机向电网发出有功功率2.7 kW,同时无功功率保持为0 kvar,系统保持单位功率因数运行,如图7h所示。由图7d~图7f可分别看出,随着有功功率的增加,电机控制绕组磁链幅值、功率绕组电流及控制绕组电流均有一定的增加并最终运行在稳定状态。

### 6.2.2 亚同步400 r/min空载并网实验结果

给定电机转速为400 r/min,电机处于亚同步运行状态,其余条件与图7相同,实验结果如图8所示。

图8a、图8b为功率绕组与对应电网线电压,其中图8b为图8a中黑色方框部分的放大图,以便于观看,由该2图可以看出,系统在4.0 s时完成并网;由图8c可见,在并网的暂态过程中,机组转速波动约为10 r/min;图8d为CW磁链相位角 $\theta_c$ ,对比图7g,其相序与超同步时相反,且在并网前后的稳态过程中控制绕组磁链的频率为10 Hz,与式(1)相符。

图8d中,在并网的暂态过程中,CW磁链相位角的波动是由转速波动引起的。

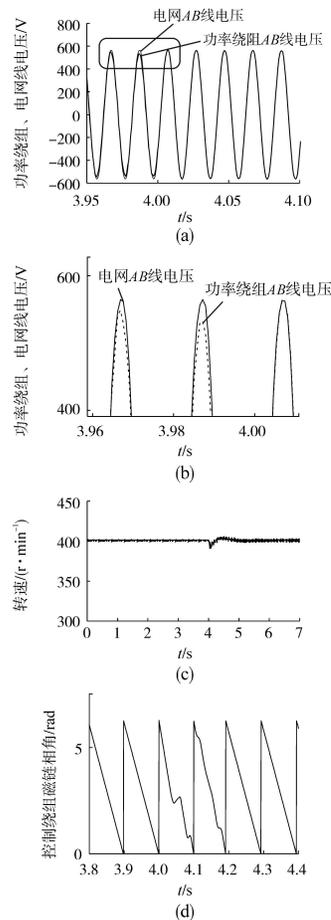


图8 亚同步400 r/min实验结果

Fig.8 Experimental results of sub-synchronous for 400 r/min

## 7 结论

本文提出一种基于控制绕组磁链控制的笼型转子无刷双馈发电机的空载并网方法。实验结果表明,所提方法能够根据系统转速实时调节功率绕组的电压和频率实现变速恒频发电,满足风电系统应用要求,并且能有效避免并网时电流的冲击,对于实现无刷双馈风力发电机的空载并网具有参考价值。

### 参考文献

- [1] Cheng M, Han P, Buja G, *et al.* Emerging Multiport Electrical Machines and Systems: Past Developments, Current Challenges, and Future Prospects[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(7): 5422-5435.
- [2] 吴国祥,马炜,陈国呈,等. 双馈变速恒频风力发电空载并网控制策略[J]. *电工技术学报*, 2007, 22(7): 169-175.
- [3] 曾志勇,王清灵,冯婧. 基于电压矢量闭环双馈风力发电空载并网策略[J]. *电气传动*, 2010, 40(6): 3-7, 19.
- [4] 熊山,黄守道,黄科元,等. 变速恒频双馈风力发电机并网控制[J]. *微特电机*, 2010, 38(12): 52-55, 71.
- [5] Liu Y, Pan Z, Liu X. No-load Cutting-in Control Strategy in Double-fed Induction Generator Without Accurate Magnetic Inductance[C]//International Conference on Electrical Machines and Systems, 2010: 1-5.
- [6] Xiao Y, Lv Y. Pitch-controlled Wind Turbine Synchronized Cutting-in Control and Modeling-simulation[C]//Proceedings of the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2012: 3113-3117.
- [7] 刘其辉,贺益康,张建华. 交流励磁变速恒频风力发电机并网控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2006, 30(3): 51-55, 70.
- [8] 付旺保,赵栋利,潘磊,等. 基于自抗扰控制器的变速恒频风力发电并网控制[J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(3): 13-18.
- [9] 郑雪梅,郭玲,徐殿国,等. 双馈感应发电机空载并网的高阶滑模控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2012, 36(7): 12-16
- [10] 安中全,任永峰,李含善. 基于PSCAD的双馈式风力发电系统柔性并网研究[J]. *电网技术*, 2011, 35(12): 196-201.
- [11] Hou Guolian, Zhao Zhilong, Bai Xu, *et al.* Fuzzy Immune PID Control Used in No-load Grid-connection for Doubly-fed Wind Power System[C]//Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2014: 3134-3138.
- [12] 张虎,张永昌,杨达维. 基于双矢量模型预测直接功率控制的双馈电机并网及发电[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(5): 69-76.
- [13] 马宏伟,许烈,李永东. 基于直接虚功率控制的双馈风电系统并网方法[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(3): 99-105, 10.
- [14] 陈科,艾武,陈冰,等. 无刷双馈电机发电并网控制研究[J]. *微电机*, 2017, 50(3): 43-46, 58.
- [15] 刘利黎,万山明,高举明. 无刷双馈发电机的并网控制研究仿真[J]. *现代电力*, 2015, 32(5): 84-88.
- [16] 何智星. 基于无刷双馈风力发电机的并网控制[D]. 广州: 广东工业大学, 2007.
- [17] 刘愉,韦忠朝,高信迈,等. 无刷双馈发电机的一种标量控制方法[J]. *湖北工业大学学报*, 2014, 29(1): 29-32.
- [18] Hicham Serhoud, Benattous D. Simulation of Grid Connection and Maximum Power Point Tracking Control of Brushless Doubly-fed Generator in Wind Power System[J]. *Frontiers in Energy*, 2013, 7(3): 380-387.
- [19] Broekhof A, Tatlow M, McMahon R. Vector-controlled Grid Synchronization for the Brushless Doubly-fed Induction Generator[C]//7th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2014), 2014: 1-5.
- [20] 高若中. 基于磁链跟踪控制的无刷双馈电机低电压穿越方法的研究与实现[D]. 太原: 太原理工大学, 2017.
- [21] Long T, Shao S, Malliband P, *et al.* Crowbarless Fault Ride-through of the Brushless Doubly Fed Induction Generator in a Wind Turbine under Symmetrical Voltage Dips[J]. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 2013, 60(7): 2833-2841.
- [22] Zhang A, Wang X, Jia W, *et al.* Indirect Stator-quantities Control for the Brushless Doubly Fed Induction Machine[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, 29(3): 1392-1401.

收稿日期:2019-03-27

修改稿日期:2019-04-30