

# 无刷双馈感应发电机空载并网电压相位控制策略

郜瑞腾<sup>1</sup>,王淑红<sup>1</sup>,武浩<sup>1</sup>,李佳彬<sup>1</sup>,曹建文<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. 山西天地煤机装备有限公司,山西 太原 030006;

3. 国网山西省电力科学研究所,山西 太原 030001)

**摘要:**提出了基于控制绕组磁链的无刷双馈感应发电机空载并网电压相位控制方法,根据无刷双馈感应发电机的数学模型及控制策略构建了控制系统结构框图。设计了空载并网实验的硬件电路,实现了无刷双馈感应发电机电压相位的实时控制。在此基础上完成了无刷双馈感应发电机在空载并网时对电压幅值、频率、相位的自动调节,能够在满足并网条件时自动并网,提高了系统并网时的快速性和稳定性。不同转速下的空载并网实验结果验证了所提方法的有效性。

**关键词:**无刷双馈感应发电机;控制绕组磁链;空载并网;相位控制

**中图分类号:**TM73 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed23041

## No-load Grid-connected Voltage Phase Control Strategy of Brushless Doubly-fed Induction Generator

GAO Ruiteng<sup>1</sup>, WANG Shuhong<sup>1</sup>, WU Hao<sup>1</sup>, LI Jiabin<sup>1</sup>, CAO Jianwen<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. *Shanxi Tiandi Coal Machine Equipment Co., Ltd.,*

*Taiyuan 030006, Shanxi, China;* 3. *State Grid Shanxi Electric Power*

*Research Institute, Taiyuan 030001, Shanxi, China)*

**Abstract:** A no-load grid-connected voltage phase control method of the brushless doubly-fed induction generator (BDFIG) based on the control winding flux was proposed, the control system structure block diagram was constructed according to the mathematical model and control strategy of BDFIG. The hardware circuit of the no-load grid connection experiment was designed, the voltage phase of BDFIG was controlled in real time. On this basis, the voltage amplitude, frequency, and phase of BDFIG was automatically adjusted, and BDFIG could automatically connect to the grid when the grid connection conditions were met, which improves the rapidity and stability of the system during grid connection. The effectiveness of the proposed method was verified by the no-load grid-connected experimental results of BDFIG at different speeds.

**Key words:** brushless doubly-fed induction generator (BDFIG); control winding flux; no-load grid-connected; phase control

和目前在风电系统得到广泛应用的双馈感应发电机(doubly-fed induction generator, DFIG)相比,无刷双馈电机(brushless doubly-fed machine, BDFM)不需要碳刷及滑环,系统工作稳定性高,维护工作量小,大大降低了系统成本,这些优点使得无刷双馈电机在大规模风力发电应用中前景广阔。近十年来在电机本体、数学模型以及控

制策略方面取得了大量研究成果,无刷双馈电机正日益走近商业应用<sup>[1]</sup>。

发电机的柔性并网是其稳定运行的前提,发电机的并网方式主要有空载并网、负载并网和孤岛并网三种。空载并网由于结构简单,得到较多的关注及研究<sup>[2-3]</sup>,本文研究的是无刷双馈感应发电机(BDFIG)的空载并网。

**基金项目:**国家自然科学基金(51477110);山西省重点研发计划(201903D121024)

**作者简介:**郜瑞腾(1994—),男,硕士研究生,Email:1440125292@qq.com

为了实现发电机的柔性并网,减小并网时定子侧的冲击电流,国内外学者对DFIG的空载并网做了比较深入的研究。比较主流的控制方法有基于定子磁链定向<sup>[4-6]</sup>和基于电网电压定向<sup>[7-8]</sup>的矢量控制方法。文献[9-10]采用基于模糊PI的矢量控制方法,减小了电机参数对系统的影响,提高了系统的稳定性。

和DFIG相比,BDFIG无论在电机结构还是工作原理上都不尽相同,因此其并网方法也必须另辟蹊径。目前对BDFIG并网控制方法的研究相对较少。文献[11-13]采用基于功率绕组定子磁链定向的矢量控制方法实现BDFIG的并网,该方法将功率绕组定子磁链矢量方向与同步旋转坐标系 $d$ 轴重合,此时定子电压矢量落在 $q$ 轴上,从而简化BDFIG的数学模型,并对功率绕组电压进行控制,最终实现并网。但矢量控制需要进行坐标变换,控制系统结构复杂。文献[14]提出基于控制绕组磁链的空载并网方法,该方法无需坐标变换,不依赖电机参数,控制系统结构简单,但该方法只实现了BDFIG电压幅值和频率的控制,没有实现相位的控制,并网时BDFIG电压相位的控制需由准同期并网装置辅助实现,使得系统结构复杂,不能实现自动并网。

本文提出了BDFIG电压相位的控制方法,并构建了控制系统的结构框图。该方法能实时调节BDFIG功率绕组电压相位,使其跟随电网电压相位,并可以调节电压幅值与频率,从而实现BDFIG的自动并网,有效提高了并网稳定性,简化了系统结构,实验结果验证了该方法的可行性。

## 1 BDFIG的结构及数学模型

### 1.1 BDFIG的结构

BDFIG有定子及转子两个部分,与普通感应电机不同的是BDFIG定子侧有两套绕组,分别是功率绕组(power winding, PW)和控制绕组(control winding, CW),功率绕组直接与电网相连,控制绕组通过变频器与电网连接,其结构框图如图1所示。无刷双馈发电机的转子主要有笼型和磁阻式两种,前者由于结构简单而得到较多的研究。

BDFIG转速 $n$ 与频率和极对数的关系如下式所示:

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

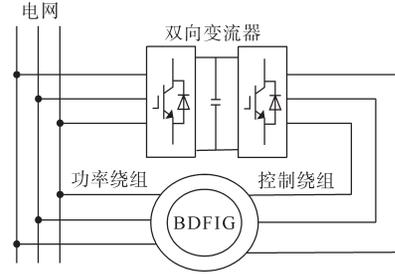


图1 无刷双馈感应发电机结构示意图

Fig.1 Structure of BDFIG

式中: $f_p, f_c$ 分别为功率绕组和控制绕组的频率; $p_p, p_c$ 分别为功率绕组和控制绕组的极对数。

式(1)中,超同步运行时取“+”,亚同步运行时取“-”。由式(1)可见,当转速 $n$ 变化时,可以通过改变控制绕组频率 $f_c$ 来保证功率绕组频率 $f_p$ 保持不变,从而实现变速恒频发电。

### 1.2 BDFIG的数学模型

BDFIG的数学模型较多,为了方便起见,本文采用控制绕组静止坐标系下的数学模型,如下所示:

$$u_p = R_p i_p + d\Psi_p/dt - j(p_p + p_c)\omega_r \Psi_p \quad (2)$$

$$u_c = R_c i_c + d\Psi_c/dt \quad (3)$$

$$u_r = R_r i_r + d\Psi_r/dt - jp_r \omega_r \Psi_r \quad (4)$$

$$\Psi_p = L_p i_p + L_{pr} i_r \quad (5)$$

$$\Psi_c = L_c i_c + L_{cr} i_r \quad (6)$$

$$\Psi_r = L_r i_r + L_{pr} i_p + L_{cr} i_c \quad (7)$$

式中: $i, u, \Psi$ 分别为电流、电压和磁链矢量; $\omega$ 为电角速度; $L$ 为自感; $R$ 为电阻; $L_{pr}$ 为功率绕组与转子间的互感; $L_{cr}$ 为控制绕组与转子间的互感;下标 $p, c, r$ 分别表示功率绕组、控制绕组和转子绕组。

## 2 基于控制绕组磁链的BDFIG空载并网电压相位控制策略

### 2.1 控制绕组磁链

本文提出的电压相位控制方法基于控制绕组磁链控制,控制绕组磁链矢量如图2所示。

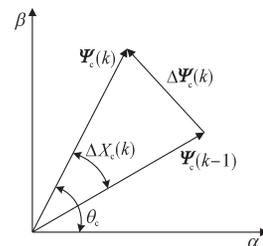


图2 控制绕组磁链

Fig.2 Control winding flux linkage

图2中, $\Psi_c(k)$ 为 $k$ 时刻的CW磁链矢量, $\theta_c$ 为其相位; $\Psi_c(k-1)$ 为上一个采样周期(即 $k-1$ 时

刻)的CW磁链矢量; $\Delta\Psi_c(k)$ 为相邻两个采样周期的CW磁链矢量增量。将CW磁链相邻两个采样周期的幅值增量用 $K_s(k)$ 表示,相位增量用 $\Delta X_c(k)$ 表示,则可以得出 $\Psi_c(k)$ 的表达式如下:

$$\Psi_c(k) = e^{j\Delta X_c(k)} [1 + K_s(k)] \Psi_c(k-1) \quad (8)$$

磁链相位增量 $\Delta X_c(k)$ 由静态相位增量 $\Delta X_{st}(k)$ 和动态相位增量 $\Delta X_d(k)$ 组成,如下式<sup>[15]</sup>:

$$\Delta X_c(k) = \Delta X_{st}(k) + \Delta X_d(k) \quad (9)$$

其中

$$\Delta X_{st} = 2\pi f_c \cdot T_{PWM} \quad (10)$$

式中: $T_{PWM}$ 为采样周期。

## 2.2 基于控制绕组磁链的BDFIG空载并网电压相位控制策略

由式(4)~式(7)可以得出 $\Psi_c$ 与 $\Psi_p$ 之间的关系如下:

$$\Psi_c = -K_c \Psi_p + L_c^* i_c \quad (11)$$

其中

$$K_c = \frac{L_{pr} L_{cr}}{L_r L_p - L_{pr}^2} \quad (12)$$

$$L_c^* = \frac{L_p L_c L_r - L_{cr}^2 L_p - L_{pr}^2 L_c}{L_p L_r - L_{pr}^2} \quad (13)$$

式中: $K_c$ 为常数; $L_c^*$ 为CW短路等效漏电感。与式(13)对应 $L_c^*$ 的等效电路图如图3所示。

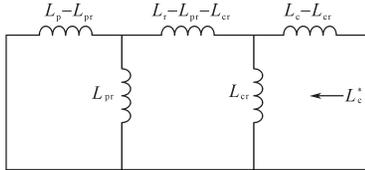


图3 CW短路等效漏电感等效电路图

Fig.3 Equivalent circuit diagram of CW short circuit equivalent leakage inductance

由图3可见, $L_c^*$ 是在功率绕组短路情况下,从控制绕组看进去的电感,具有漏电感的性质,数值较小。因此,式(11)中的 $L_c^* i_c$ 具有漏磁链的性质,可以忽略不计,则式(11)可以写为如下的形式:

$$\Psi_c = -K_c \Psi_p \quad (14)$$

忽略式(2)、式(3)中的电阻 $R_p$ 和 $R_c$ ,并代入式(14)中可以得出 $u_p$ 与 $\Psi_c$ 之间的关系如下<sup>[14]</sup>:

$$u_p = \frac{j\omega_p}{K_c} \Psi_c \quad (15)$$

由式(15)可见,功率绕组电压幅值与控制绕组磁链幅值为线性关系。功率绕组电压相位与控制绕组磁链相位相差 $90^\circ$ ,即控制 $\Psi_c$ 的相位就可以间接控制 $u_p$ 的相位,使其与电网电压同相

位,从而满足BDFIG空载并网的条件。

由图2知, $\Psi_c$ 的相位 $\theta_c$ 可以通过其相位增量 $\Delta X_c(k)$ 来控制。由式(9)可知, $\Delta X_c(k)$ 由 $\Delta X_d(k)$ 和 $\Delta X_{st}(k)$ 控制。将式(1)改写为下式:

$$f_c = f_p \mp n(p_p + p_c)/60 \quad (16)$$

由式(16)和式(10)可知,功率绕组频率 $f_p$ 和BDFIG的转速 $n$ 决定了控制绕组的频率 $f_c$ ,即 $\Delta X_{st}(k)$ ,或者说BDFIG的转速 $n$ 和控制绕组的频率 $f_c$ 使功率绕组频率 $f_p$ 与电网频率 $f_c$ 保持一致,即 $f_p = f_c$ 。那么,可以通过控制 $\Delta X_d(k)$ 使BDFIG功率绕组电压与电网电压同相位,其系统结构如图4所示。图4中,电网电压相位 $\theta_c$ 与BDFIG的PW电压相位 $\theta_p$ 之差经过PI<sub>1</sub>控制器得到动态相位增量 $\Delta X_d$ ,动态相位增量与静态相位增量 $\Delta X_{st}$ 相加即可得到CW磁链相位增量 $\Delta X_c$ 。

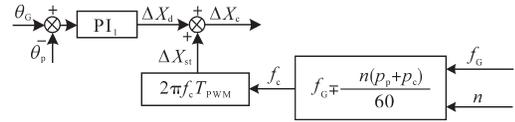


图4 BDFIG电压相位控制结构框图

Fig.4 Voltage phase control structure block diagram of BDFIG

## 3 控制器的设计与实现

### 3.1 空载并网控制器的设计

由2.2节及式(8)~式(16),提出空载并网的结构框图如图5所示。

图5中,虚线框中的部分即为图4,实现功率绕组电压频率和相位的控制,虚线框上面的支路实现电压幅值的控制。电网电压幅值 $|u_c|$ 与BDFIG的PW电压幅值 $|u_p|$ 之差经过PI<sub>2</sub>控制器得到CW磁链幅值给定 $|\Psi_c^*|$ , $|\Psi_c^*|$ 与反馈 $|\Psi_c|$ 比较后经过PI<sub>3</sub>控制器得到CW磁链的幅值增量 $K_s$ 。

由CW磁链的幅值增量 $K_s$ 和相位增量 $\Delta X_c$ 以及观测所得的CW磁链的 $\alpha$ 和 $\beta$ 分量 $\Psi_{ac}$ 和 $\Psi_{bc}$ ,经过下式可以得到CW磁链增量 $\Delta\Psi_{ac}$ 和 $\Delta\Psi_{bc}$ :

$$\Delta\Psi_{ac} = \Psi_{ac} [(1 + K_s) \cos \Delta X_c - 1] - (1 + K_s) \Psi_{bc} \sin \Delta X_c \quad (17)$$

$$\Delta\Psi_{bc} = \Psi_{bc} [(1 + K_s) \cos \Delta X_c - 1] - (1 + K_s) \Psi_{ac} \sin \Delta X_c \quad (18)$$

根据 $\Delta\Psi_{ac}$ 和 $\Delta\Psi_{bc}$ 以及观测的 $i_{ac}$ 和 $i_{bc}$ ,通过下式可以求得CW电压 $u_{ac}$ 和 $u_{bc}$ <sup>[15]</sup>:

$$u_{ac} = \Delta\Psi_{ac} / T_{PWM} + R_c i_{ac} \quad (19)$$

$$u_{bc} = \Delta\Psi_{bc} / T_{PWM} + R_c i_{bc} \quad (20)$$

最后由SVPWM模块驱动逆变器输出CW所需的电压,从而达到理想的控制效果。



件,在满足并网条件后发出并网信号,通过并网信号处理模块来控制并网接触器的动作,实现自动并网。BDFIG由西门子变频器控制的异步电动机拖动,相关参数为: $u_{cN}=380\text{ V}$  (15 Hz), $u_{pN}=380\text{ V}$  (50 Hz), $n=350\sim 650\text{ r/min}$ , $p_p/p_c=2/4$ , $i_{cN}=8.76\text{ A}$ , $i_{pN}=17.53\text{ A}$ , $T_e=227.9\text{ N}\cdot\text{m}$ , $R_c=5.00\ \Omega$ , $R_p=0.87\ \Omega$ , $R_r=1.703\times 10^{-4}\ \Omega$ , $L_c=1.102\text{ H}$ , $L_p=0.325\text{ H}$ , $L_{cr}=6.160\times 10^{-3}\text{ H}$ , $L_{pr}=4.436\times 10^{-3}\text{ H}$ , $L_r=9.766\times 10^{-5}\text{ H}$ 。

### 4.2 实验结果

在图8所示的实验平台上完成了BDFIG超同步(650 r/min)及亚同步(400 r/min)运行状态的空载并网实验。

并网完成后,将BDFIG切换到发电运行模式。为了方便起见,发电运行模式时,本文采用了BDFIG的间接功率控制策略<sup>[16]</sup>,该控制策略的内环和本文提出的空载并网结构框图的内环相似。并网模式和发电运行模式的切换示意图如图9所示。模式切换开关1和开关2投向上方时,为空载并网方式,投向下时为发电运行模式。

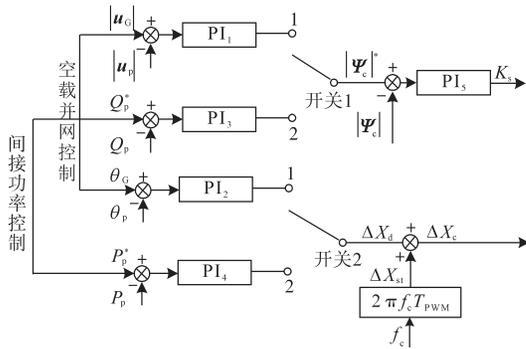


图9 控制策略切换示意图

Fig.9 Schematic diagram of control strategy switching

#### 4.2.1 超同步实验结果

BDFIG超同步空载并网实验结果如图10~图15所示。 $t=0.67\text{ s}$ 时系统运行空载并网控制; $t=3.09\text{ s}$ 时BDFIG完成并网,系统运行间接功率控制; $t=3.59\text{ s}$ 时BDFIG向电网输出有功功率。

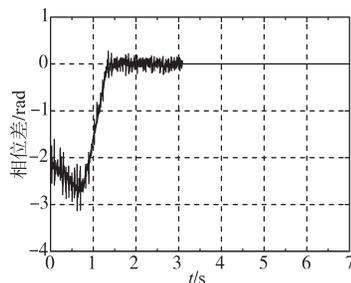


图10 电网电压与BDFIG电压相位差(超同步)

Fig.10 Voltage phase difference between grid and BDFIG(supersynchronous)

图10为电网电压与BDFIG电压的相位差,在切入空载并网程序前,BDFIG的电压相位不受控,与电网电压的相位差逐渐变大, $t=0.67\text{ s}$ 切入并网程序后,BDFIG的相位与电网电压的相位差逐渐减小, $t=3.09\text{ s}$ 时满足并网条件完成并网,BDFIG与电网的电压相位差稳定为零。图11为BDFIG功率绕组线电压 $U_{AB}$ ,由该图可见,BDFIG端电压在切入空载并网程序后稳定上升,达到电网电压后保持不变,完成并网后与电网电压相等。

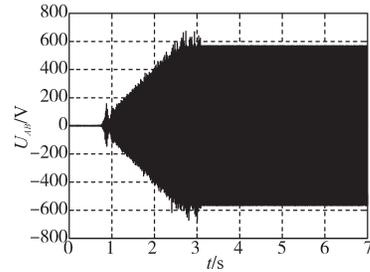
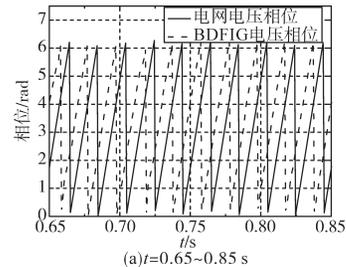


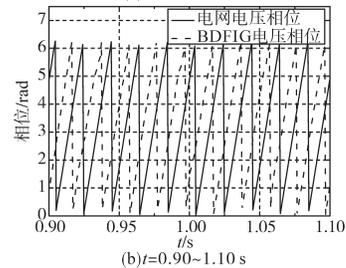
图11 BDFIG单相线电压(超同步)

Fig.11 BDFIG single-phase line voltage(supersynchronous)

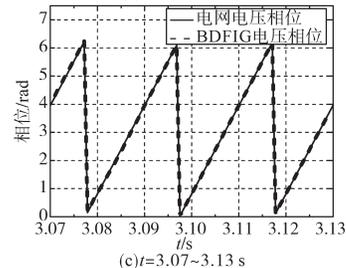
图12为系统从切入并网程序到完成并网的时间段中不同时刻BDFIG电压与电网电压的相位。从图中看出,通过电压相位控制策略,BDFIG功率绕组电压由超前电网电压相位逐渐调整为与电网电压同相位,完成并网后,两者完全相同。



(a) $t=0.65\sim 0.85\text{ s}$



(b) $t=0.90\sim 1.10\text{ s}$



(c) $t=3.07\sim 3.13\text{ s}$

图12 不同时间段下的电网电压与BDFIG电压相位

Fig.12 Voltage phase between grid and BDFIG in different time

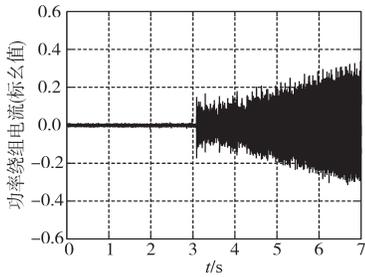


图13 功率绕组电流(超同步)

Fig.13 Power winding current(supersynchronous)

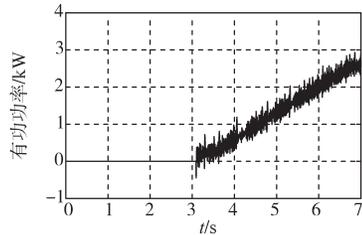


图14 有功功率(超同步)

Fig.14 Active power(supersynchronous)

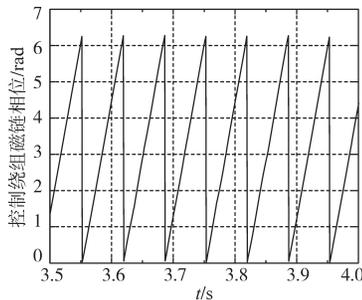


图15 控制绕组磁链相位(超同步)

Fig.15 Control winding flux phase(supersynchronous)

图13为BDFIG的功率绕组电流,并网前PW电流为零,并网时PW电流有短时冲击,冲击电流为0.18(标么值),完成并网后随着输出功率的增加,PW电流增加到定值。图14为BDFIG功率绕组输出的有功功率,并网时由于电流的抖动,有功功率也出现轻微的抖动, $t=3.59$  s时,BDFIG有功功率逐渐增加,最终增加到2.5 kW。图15为BDFIG的控制绕组磁链相位,并网后CW磁链相位周期为66.7 ms,即 $f_c$ 为15 Hz。

#### 4.2.2 亚同步实验结果

图16~图20为BDFIG亚同步空载并网的实验结果。 $t=0.84$  s时系统运行空载并网控制; $t=3.17$  s时BDFIG完成并网,系统切入间接功率控制; $t=3.67$  s时BDFIG开始向电网发送有功功率。

图16为电网电压与BDFIG电压的相位差。图17为电网电压与BDFIG电压的相位,可以看出,切入并网程序后,BDFIG电压相位由超前调节为跟随电网电压相位。图18为BDFIG功率绕组线电压 $U_{AB}$ 。图19为BDFIG功率绕组的电流。图20

为BDFIG控制绕组磁链相位,可以看出其相序与超同步时的相序相反,且此时 $f_c$ 为10 Hz。从实验结果可以看出,BDFIG亚同步下的空载并网过程与超同步下的空载并网过程相似,不再赘述。

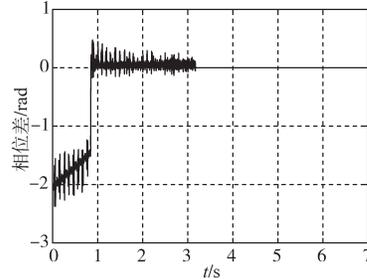


图16 电网电压与BDFIG电压相位差(亚同步)

Fig.16 Voltage phase difference between grid and BDFIG(sub-synchronous)

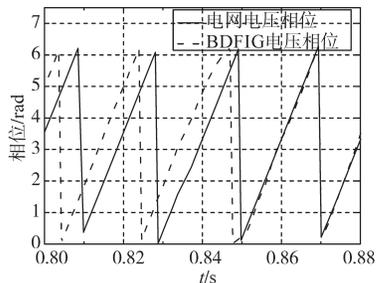


图17 电网电压与BDFIG电压相位(亚同步)

Fig.17 Voltage phase between grid and BDFIG(sub-synchronous)

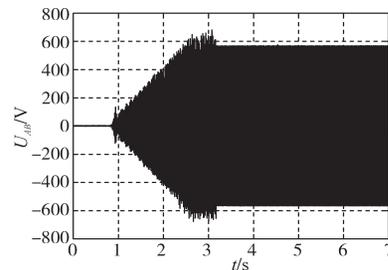


图18 BDFIG单相线电压(亚同步)

Fig.18 BDFIG single-phase line voltage(sub-synchronous)

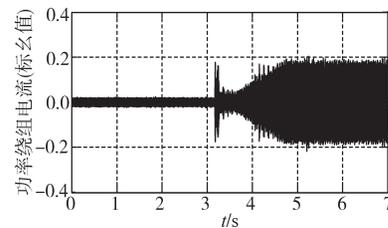


图19 功率绕组电流(亚同步)

Fig.19 Power winding current(sub-synchronous)

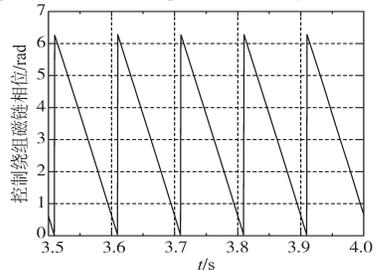


图20 控制绕组磁链相位(亚同步)

Fig.20 Control winding flux phase(sub-synchronous)

## 5 结论

本文提出一种基于控制绕组磁链的无刷双馈感应发电机空载并网电压相位控制方法及控制系统结构。实验结果表明,该方法能动态调节BDFIG电压相位,实现对电压幅值、相位和频率的实时调节,并在满足并网条件后自动并网。该方法无需坐标变换,不依赖电机参数,控制系统结构简单,实现方便。

### 参考文献

- [1] Cheng Ming, Han Peng, Buja Giuseppe, *et al.* Emerging multi-port electrical machines and systems: past developments, current challenges, and future prospects[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(7): 5422-5435.
- [2] 兰飞,姚知洋,黎静华,等. 双馈风力发电机空载并网运行控制建模与仿真研究[J]. *电力建设*, 2016, 37(9): 123-131.  
Lan Fei, Yao Zhiyang, Li Jinghua, *et al.* Modeling and simulation of no-load cutting-in operation control for doubly-fed induction generator[J]. *Electric Power Construction*, 2016, 37(9): 123-131.
- [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.  
Zeng Zhiyong, Wang Qingling, Feng Jing. No-load cut-in control strategies for DFIG based on stator voltage space vector close loop[J]. *Electric Drive*, 2010, 40(6): 3-7, 19.
- [4] 张文娟. 变速恒频双馈风力发电空载并网实验研究[J]. *宝鸡文理学院学报(自然科学版)*, 2018, 38(2): 91-93, 100.  
Zhang Wenjuan. Experimental study on the no-load cutting-in of the variable-speed constant-frequency doubly-fed wind power generator[J]. *Journal of Baoji University of Arts and Sciences (Natural Science)*, 2018, 38(2): 91-93, 100.
- [5] 刘其辉,谢孟丽. 双馈式变速恒频风力发电机的空载及负载并网策略[J]. *电工技术学报*, 2012, 27(10): 60-67, 78.  
Liu Qihui, Xie Mengli. Strategies of grid-connection of doubly-fed variable-speed constant-frequency wind power generator with no-load and with load[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2012, 27(10): 60-67, 78.
- [6] 王君瑞,吉炫玮,张晋宁,等. 双馈风力发电系统空载比例谐振并网控制[J]. *电力电子技术*, 2017, 51(4): 43-45.  
Wang Junrui, Ji Xuanwei, Zhang Jinning, *et al.* Idle load proportional resonant grid connection control for doubly-fed wind power generation system[J]. *Power Electronics*, 2017, 51(4): 43-45.
- [7] 刁亮,王丹,郭磊,等. 双馈发电机空载并网的神经网络积分滑模控制[J]. *太阳能学报*, 2017, 38(12): 3385-3391.  
Diao Liang, Wang Dan, Guo Lei, *et al.* Neural network based integral sliding mode control of doubly-fed induction generator for no-load grid connection[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2017, 38(12): 3385-3391.
- [8] 李滨,李岚,贺惟明. 双馈发电机空载并网仿真建模及实验[J]. *太原理工大学学报*, 2016, 47(1): 57-61.  
Li Bin, Li Lan, He Weiming. Simulation modeling and experiment of the no-load grid-connection of doubly-fed generator[J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2016, 47(1): 57-61.
- [9] 张文娟. 带自调整因子的双馈风力发电空载并网模糊控制[J]. *机械与电子*, 2018, 36(5): 50-53.  
Zhang Wenjuan. Fuzzy control for no-load cutting-in of doubly-fed wind power generator with self-tuning factor[J]. *Machinery & Electronics*, 2018, 36(5): 50-53.
- [10] 康忠健,陈天立,王升花,等. 基于模糊控制的双馈风力发电空载并网技术研究[J]. *电气传动*, 2010, 40(1): 47-50.  
Kang Zhongjian, Chen Tianli, Wang Shenghua, *et al.* Study on idle load grid-connection control of doubly feeding wind-power system based on fuzzy-control[J]. *Electric Drive*, 2010, 40(1): 47-50.
- [11] Yan Xiaoming, Cheng Ming. A robust grid synchronization method for cascaded brushless doubly fed induction generator [C]//The 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2019.
- [12] 綦慧,潘全成. 双馈风电模拟系统空载并网控制与试验研究[J]. *电气自动化*, 2018, 40(6): 34-37, 41.  
Qi Hui, Pan Quancheng. Research on control and test of no-load grid-connection of the doubly-fed wind power simulation system[J]. *Electrical Automation*, 2018, 40(6): 34-37, 41.
- [13] 梁佳琦,方彦军. 微网下双馈风力发电系统并网运行研究[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2018, 51(2): 172-177.  
Liang Jiaqi, Fang Yanjun. Study of grid-connected operation of doubly-fed induction generation system under microgrid[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2018, 51(2): 172-177.
- [14] 王景轩,王淑红,王一帆,等. 基于控制绕组磁链控制的无刷双馈感应发电机空载并网策略[J]. *电气传动*, 2020, 50(12): 41-47.  
Wang Jingxuan, Wang Shuhong, Wang Yifan, *et al.* No-load cutting-in strategy for brushless doubly-fed induction generator based on the control of control winding flux linkage[J]. *Electric Drive*, 2020, 50(12): 41-47.
- [15] Zhang Ailing, Wang Xin, Jia Wenxia, *et al.* Indirect stator-quantities control for the brushless doubly fed induction machine[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, 29(3): 1392-1401.
- [16] 赵荣理,张爱玲,田慕琴,等. 笼型转子无刷双馈发电机的间接功率控制[J]. *电机与控制学报*, 2019, 23(9): 1-8.  
Zhao Rongli, Zhang Ailing, Tian Muqin, *et al.* Indirect power control strategy for brushless doubly-fed induction generator[J]. *Electric Machines and Control*, 2019, 23(9): 1-8.

收稿日期:2021-01-30  
修改稿日期:2021-04-28