

# 双馈变速恒频风力发电机并网控制仿真研究

范立新<sup>1</sup>, 向张颀<sup>2</sup>

(1.江苏方天电力技术有限公司,江苏南京 211102; 2.东南大学电气工程学院,江苏南京 210096)

**摘要:**文章分析了双馈变速恒频发电机的数学模型,并对其并网运行控制策略进行研究。双馈电机使用双PWM变换器为转子侧提供励磁。网侧变换器主要功能是实现单位功率因数控制和稳定直流侧电压,转子侧变换器主要功能是实现风能最大追踪和功率的解耦控制。此外在运行期间风速过大时采用桨距角控制减小原动机出力。最后在Matlab/simulink软件中搭建了风力发电系统仿真模型,通过仿真结果验证了控制策略的可行性。

**关键词:**双馈电机;解耦控制;最大风能追踪;桨距角控制

**中图分类号:** TM315

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1009-0665(2012)00-0039-04

随着能源危机的不断恶化,以风能为代表的的新能源利用技术受到越来越多的关注<sup>[1]</sup>。双馈变速恒频风力发电机作为目前风力发电系统使用的主要机型,其并网运行的控制策略研究是风力发电系统能够广泛应用的基础。双馈风力发电机多采用双PWM变换器为转子提供励磁电流,网侧变换器主要负责稳定直流侧电压和实现单位功率因数控制,转子侧变换器则通过控制励磁电压达到功率解耦控制和最大风能追踪的效果<sup>[2]</sup>。本文在分析双馈电机数学模型的基础上对其控制策略进行了研究,之后在Matlab/simulink软件中建立了相应模型,通过仿真计算验证控制策略的控制效果。

## 1 双馈变速恒频发电机数学模型

### 1.1 dq坐标系下数学模型

建立数学模型时规定定子、转子侧电流采用发电机惯例,将双馈电机三相旋转坐标系下的数学模型转化为dq坐标系下数学模型,变换时采用恒功率变换。数学模型表达式如下<sup>[3]</sup>。

电压方程:

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + p\psi_{sd} - \omega_1 \psi_{sq} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + p\psi_{sq} - \omega_1 \psi_{sd} \\ u_{rd} = R_r i_{rd} + p\psi_{rd} - \omega_s \psi_{rq} \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + p\psi_{rq} - \omega_s \psi_{rd} \end{cases} \quad (1)$$

磁链方程:

$$\begin{cases} \psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \psi_{rd} = L_m i_{sd} + L_r i_{rd} \\ \psi_{rq} = L_m i_{sq} + L_r i_{rq} \end{cases} \quad (2)$$

运动方程:

$$T_e = n_p L_m (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq}) \quad (3)$$

式(1—3)中:下标s为定子侧参数,下标r为转子侧参数。

### 1.2 简化模型

在同步旋转坐标系下DFIG的数学模型是一个5阶模型,在一些场合下需要更进一步地简化,比如在研究DFIG风力发电系统对整个电力系统的影响时,或者研究DFIG风力发电系统自身的稳态运行特性时,通常假定电网电压恒定,而且稳态时DFIG的定子磁链也可认为是恒定的,这样可以忽略定子绕组励磁电流的动态过程,于是式(1)变为:

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} - \omega_1 \psi_{sq} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} - \omega_1 \psi_{sd} \\ u_{rd} = R_r i_{rd} + p\psi_{rd} - \omega_s \psi_{rq} \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + p\psi_{rq} - \omega_s \psi_{rd} \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)可见,DFIG的电压方程由4阶变为2阶,整个DFIG的数学模型也变为3阶,这可以大大降低DFIG模型的复杂程度,有利于并网控制策略的设计。

## 2 双馈电机控制策略

### 2.1 网侧PWM变换器控制策略

PWM整流器的主要优点有:(1)功率可以双向流动。(2)输入电流正弦而且谐波含量少。(3)功率因数可调,可运行在单位功率因数下。(4)在输入电网电压固定的情况下直流母线电压可以调节,且直流母线电压抗负载扰动的稳定性好。网侧变换器可用以下数学模型表示:

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = -Ri_d + \omega L i_q + u_d - u_{rd} \\ L \frac{di_q}{dt} = -Ri_q + \omega L i_d + u_q - u_{rq} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中:L,R为进线电感和电阻; $u_i$ 为控制电压; $u$ 为网侧电压。为了实现解耦控制,可对式(5)进行改

写,且为:

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} + Ri_d = u_{rd} \\ L \frac{di_q}{dt} + Ri_q = u_{rq} \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中:  $\begin{cases} u'_{rd} = -u_{rd} + \omega L i_q + u_d \\ u'_{rq} = -u_{rq} + \omega L i_d + u_q \end{cases}$

根据式(6)可以确立网侧变换器控制策略,通过调节变换器输出电压达到调节电流的目的,控制框图如图1所示。

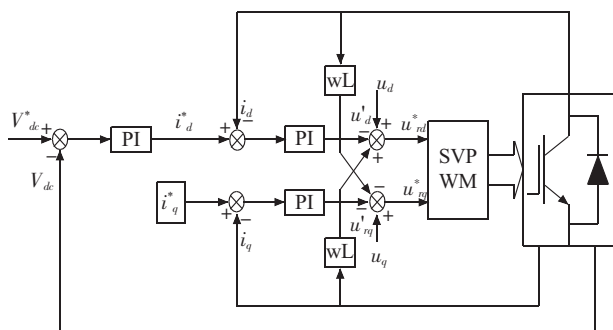


图1 网侧变换器控制框图

### 2.2 转子侧 PWM 变换器控制策略

根据式(4)给出的简化模型,在忽略定子电阻的情况下,将同步旋转坐标系的  $d$  轴定向于定子电压矢量  $u_s$  时,有:

$$\begin{cases} \psi_{sd} = 0 \\ \psi_{sq} = \psi_s \approx -\frac{U_s}{\omega_1} \end{cases} \quad (7)$$

转子电压方程可改写为:

$$\begin{cases} u_{rd} = R_r i_{rd} + \sigma L_r \frac{di_{rd}}{dt} - \omega_s (-\frac{L_m}{\omega_1 L_s} U_s + \sigma L_r i_{rq}) \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + \sigma L_r \frac{di_{rq}}{dt} + \omega_s \sigma L_r i_{rd} \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中:  $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_r L_s}$  为电机漏磁系数。

风力发电系统定桨距运行时的最大风能追踪与风力机的转速密切相关。由于DFIG的转速是风力机转速的  $N$  倍倒为齿轮箱的变比,故也就与DFIG的转速密切相关。只要有效地控制DFIG的转速,就可以使得风力机运行于某一风速所对应的最佳的转速点上,对应着最大的输出功率和最佳的叶尖速比。随着风速的变化,最佳转速与最大功率在坐标系中所对应的点就成为一条最佳功率曲线。最佳功率与风力机转速和DFIG转速有如下关系<sup>[5]</sup>:

$$P_{opt} = K_w \omega_w = K_w \left(\frac{\omega_m}{N}\right)^3 \quad (9)$$

式(9)中:  $K_w = \frac{1}{2} \rho S_w \left(\frac{R}{\lambda_{opt}}\right)^3 c_{p,max}$ , 其中  $\rho$  为空气密

度;  $S_w$  为扫风面积;  $R$  为风机叶片半径;  $\lambda_{opt}$  为最佳叶尖速率比;  $c_{p,max}$  为最大风能利用系数。

由于风速难以准确测量,故电角速度参考值的计算精度不能得到保证。因此,采用有功功率信号参考值进行最大风能追踪,在不计机械损耗的情况下,DFIG定子发出功率的指令为:

$$P^*_{s\_out} = \frac{K_w}{1-s} \left(\frac{\omega_r}{n_p N}\right) 3 - P_{cus} \quad (10)$$

转子电流内环解耦控制中  $d$  轴为有功分量,  $q$  轴为无功分量,一般来说  $q$  轴功率给定值由风电场控制给出,这里取  $i_q^* = 0$ 。  $d$  轴功率给定值则由式(10)给出,与实际定子输出功率相减后送入PI调节器给出  $d$  轴电流给定值  $i_d^*$ 。结合式(8)可以得到如图2所示的基于定子电压定向矢量控制的转子电流闭环控制的框图。这种控制方式在电网电压恒定的情况下能获得较好的性能,具有良好的动静态特性。

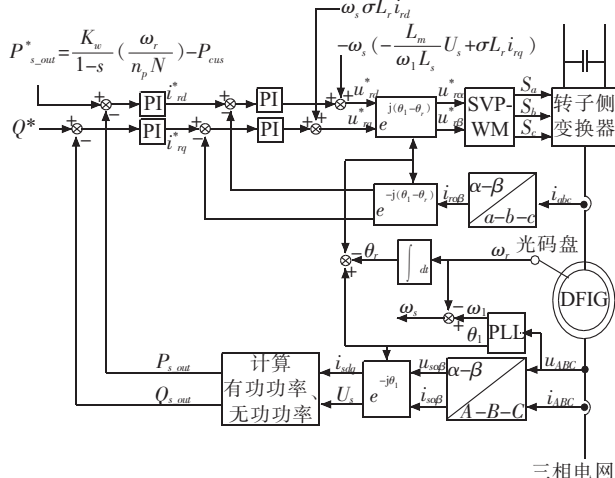


图2 转子侧变换器控制框图

### 2.3 桨距角控制

当双馈发电机的转速或功率接近限时需要对原动机桨距角进行控制,以保证风力发电机安全运行<sup>[6]</sup>。桨距角控制同样采用PI调节器实现,将功率与转速值与给定值比较之后经PI调节器送出桨距角给定值,再通过桨距角伺服系统对桨距角进行调节,从而压抑原动机出力达到控制功率和转速的目的,其控制框图如图3所示。

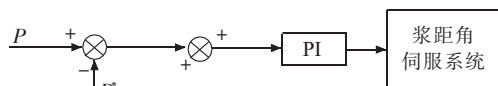


图3 桨距角控制框图

## 3 仿真分析

采用双PWM变换器实现交流励磁的变速恒频双馈风力发电系统的结构图如图4所示,仿真在

Matlab/simulink 中建立了器件和控制系统模型,对双馈电机运行特性进行了模拟。

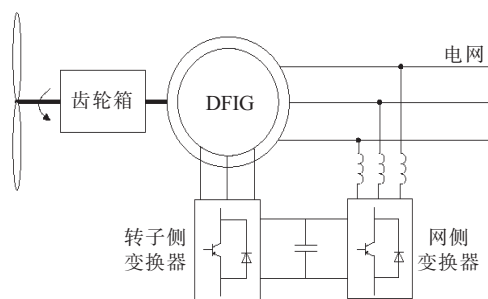


图4 双馈电机结构示意图

### 3.1 网侧变换器仿真结果

网侧变换器主要实现功率的双向流动和对直流环节电容电压的控制。取三相电网电压的相电压为220 V,直流环节的电压参考值 $V_{dc}^*$ 为600 V,进线电感为5 mH,进线电阻为0.2  $\Omega$ ,直流环节电容为2 000  $\mu\text{F}$ 。为了验证PWM变换器的功率双向流动功能,令负载电流在0.5 s时由10 A跃变为-10 A(以流入负载为正方向)。直流环节电压的变化波形如图5所示。可以看到电压在0.5 s时有一个上升。这是由于0.5 s时负载电流从流出电容变为流入电容,导致电容电压升高。电容电压经过0.2 s后又恢复到给定值600 V,说明电容积累的电能通过网侧PWM变换器输送给了电网,验证了控制策略稳定直流环节电容电压的能力。

### 3.2 转子侧变换器仿真结果

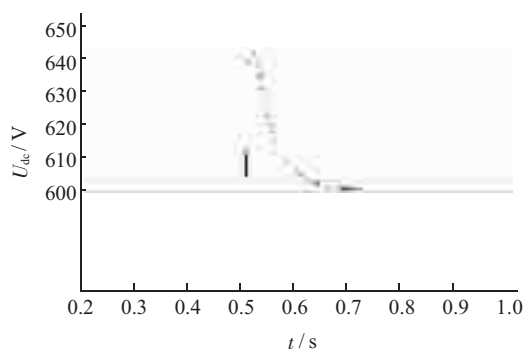


图5 直流环节电压

变速恒频双馈电机参数为:定子电阻 $R_s=0.287 \Omega$ ,转子电阻 $R_r=0.228 \Omega$ ,定子绕组漏感 $L_{ls}=0.8 \text{ mH}$ ,转子绕组漏感 $L_{lr}=0.8 \text{ mH}$ ,定转子绕组互感 $L_m=0.8 \text{ mH}$ 。极对数 $n_p=2$ ,转动惯量 $J=0.09$ (为了使DFIG快速达到稳态运行状态,转动惯量取得较小)。风力机参数为:齿轮传动比 $N=8$ ,叶片半径 $R=4 \text{ m}$ 。仿真系统稳态运行时风速为7 m/s,直流环节电压给定为600 V,此时风力发电系统处于亚同步状态运行。定子侧相电压为220 V。发电机电角速度波形如图6所示。定子A相电压、电流波形如图7所示。

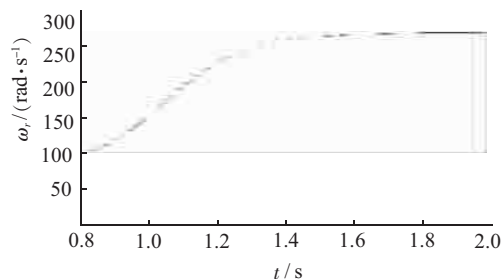


图6 电角速度波形

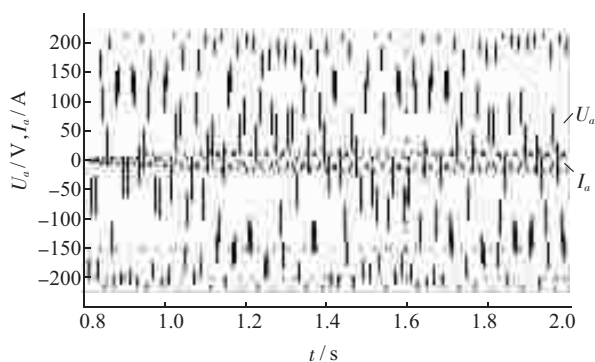


图7 定子a相电压和电流波形

由图6可以看出变速恒频双馈风力发电机进入稳态运行后电角速度稳定在270 rad/s左右,此时发电机处于亚同步运行状态。由图7可以看出定子电流随角速度的增大而增大,最终也进入稳态,且电压和电流同相位(图中电流是以流入定子为正方向,故与电压反相),只发出有功功率。

### 3.3 双馈电机发电系统仿真结果

变换器和DFIG参数与前两小节保持一致,稳态运行0.5 s时风速发生7~12 m/s的跃变,这样可以观测到风力发电机由亚同步转为超同步运行的变化过程以及最大风能追踪的效果,此时双馈发电机运行于变速恒频区,为了观察控制效果未考虑桨距角控制动作的因素。转子电流的波形如图8所示。可以看出转速从次同步转为超同步的过程中转子电流有一段近似直流的过程,说明电机转速正在超越同步速。双馈电机输出功率波形如图9所示。转子侧PWM变换器采取输出功率信号作为反馈的最大风能追踪策略,在桨距角不发生变化的情况下,定子输出的有功功率应与角速度的立方成正比。从图9可以看出双馈电机的输出功率与理论计算的最佳转速和输出功率基本吻合,验证了控制策略的正确性。

当发电机输出功率或转速增大到一定程度时需要启动桨距角控制对其进行限制,以保护发电机器件安全,取定子侧输出功率作为反馈信号,仿真中取 $P_{\max}=20 \text{ kW}$ 。图10给出了风速0.1 s发生7~12 m/s跃变时双馈电机定子输出功率波形。从波形中可以看出桨距角控制起到了较好效果,将定子输出功率限制在给定值20 kW左右。

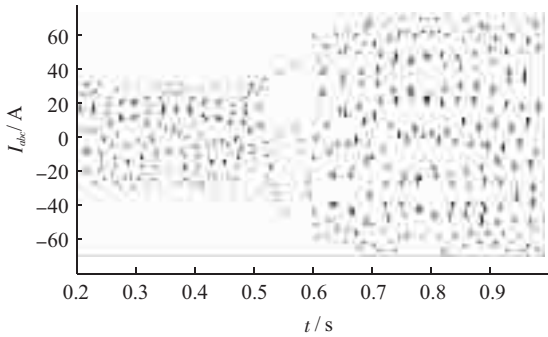


图8 转子三相电流波形

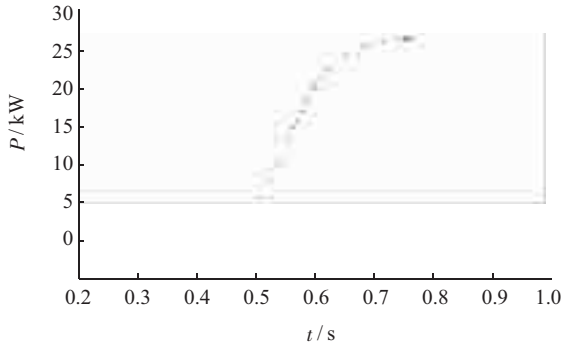


图9 有功输出波形

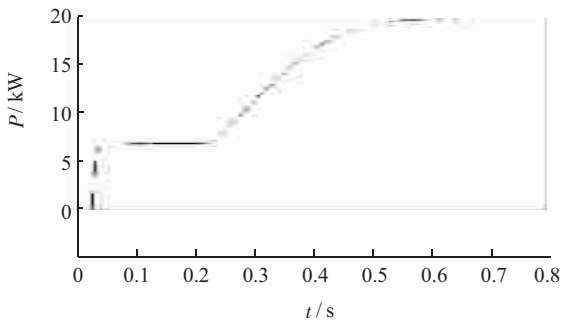


图10 定子输出功率波形

#### 4 结束语

通过对双馈风力发电系统建模和控制策略研究,得到了如下结论:

(1) 网侧 PWM 变换器仿真验证了控制策略可以实现单位功率因数控制,实现功率双向流动,此外通过指定  $q$  轴电流的给定值可以为电网提供一定的无功支持。

(2) 转子侧 PWM 变换器仿真验证了控制策略可以实现功率的  $d, q$  解耦控制,达到变速恒频运行和无功控制的目的。此外通过对  $d$  轴电流给定值的公式推导,可以实现最大风能追踪,确保最大限度利用风能资源。

(3) 桨距角控制仿真验证了桨距角调节对抑制双馈电机定子输出功率的作用,达到了保护双馈发电机的目的。

#### 参考文献:

- [1] PENA R, CLARE J C, ASHER G M. A Doubly Fed Induction Generator Using Back to Back PWM Converters Supplying an Isolated Load from a Variable Speed Wind Turbine [J]. IEEE Proc.-Electr Power Appl, 1996, 143(5):380-387.
- [2] PENA R, CLARE J C, ASHER G M. Doubly Fed Induction Generator Using Back-to-Back PWM Converters and its Application to Variable-Speed Wind-Energy Generation [J]. IEEE Proc.-Electr. Power Appl, 1996, 143(3):231-241.
- [3] 赵仁德. 变速恒频双馈风力发电机交流励磁电源研究[D]. 杭州:浙江大学,2005.
- [4] 杨淑英. 双馈型风力发电变流器及其控制[D]. 合肥:合肥工业大学,2007.
- [5] 叶杭冶. 风力发电机组的控制技术[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
- [6] 叶杭冶. 风力发电系统的设计、运行与维护[M]. 北京:电子工业出版社,2010.

#### 作者简介:

范立新(1966),男,安徽巢湖人,高级工程师,从事继电保护和新能源研究工作;

向张颢(1991),男,江苏扬州人,东南大学电气工程及其自动化在读。

## Simulation Research on Doubly-fed Variable Speed Constant Frequency Wind Generator Paralleling in the Grid

FAN Li-xin<sup>1</sup>, XIANG Zhang-yang<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Frontier Electric Technologies Co.Ltd., Nanjing 211102, China;

2. Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** The mathematical model of doubly-fed variable speed constant frequency motor is analyzed, and the control strategies of parallel operation are researched in this paper. Dual PWM converter is used for rotor side provide excitation by doubly fed motor. Main function of grid side converter is to achieve the control of unity power factor and stabilize of DC voltage, and the main function of rotor side converter is to achieve the maximum power point tracking and decoupling control of power. In addition, the pitch angle is controlled to reduce the prime mover output when the speed of wind is too large during operation. Finally, wind power system simulation model is built in Matlab/Simulink, and the feasibility of the control strategy is shown by the simulation results.

**Key words:** doubly fed motor; decoupling control; maximum power point tracking; pitch control