

文章编号: 1671-251X(2010)08-0049-05

# 永磁直驱风电机组的建模与仿真

马 威, 包广清

(兰州理工大学电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 针对永磁直驱风力发电机组建立了包括风力机、传动系统、永磁同步发电机、变流器各部分的数学模型; 根据最大风能跟踪原理, 提出了发电机侧和电网侧变流器的控制策略; 在 Matlab/Simulink 仿真环境下建立了永磁直驱风电机组的仿真模型, 对风速阶跃变化时机组运行情况进行了仿真。仿真结果验证了所提出控制策略的正确性和模型的合理性。

**关键词:** 永磁同步发电机; 直驱式风电机组; 网侧变流器; 风速; 数学模型; 仿真

**中图分类号:** TD614; TM315 **文献标识码:** A

## Modeling and Simulation for Direct-drive Permanent Magnet Wind Power System

MA Wei, BAO Guang-qing

(College of Electrical and Information Engineering of Lanzhou University of Technology,  
Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** A mathematical model of direct-drive permanent magnet wind power system was built, which includes wind turbine model, drive train model, permanent magnet synchronous generator model and converter model as well. According to the maximum wind tracking principle, control strategies of converters at generator and power grid sides were put forward. The simulation model of the wind power system was built in Matlab/Simulink software environment, and the case of wind speed stepping change was simulated. The simulation result verified the validity of the control strategy and the feasibility of the model.

**Key words:** permanent magnet synchronous generator, direct-drive wind power system, grid-side inverter, wind speed, mathematical model, simulation

## 0 引言

在变速恒频风力发电系统中, 直驱式永磁同步风电机组(D-PMSCG)与其它类型的风电机组相比, 因省去了增速齿轮箱而使系统具有机组寿命长、维护方便、效率高、控制灵活、稳定性好等优点<sup>[1-2]</sup>。因此, 永磁直驱风电机组成为风力发电技术领域的重要方向。

永磁直驱风电机组的建模与仿真问题是目前研究的热点。参考文献[3]对直驱式永磁同步风电机组的工作原理进行了阐述, 并对机组的数学模型进

行了研究; 参考文献[4]研究了直驱式永磁同步机组的控制问题, 提出了在不同风速下的控制策略; 参考文献[5]和参考文献[6]提出基于最佳电磁转矩给定的最大功率追踪方案和一种适合于永磁同步发电机的转子初始位置检测方法, 提高了直驱式永磁同步风力发电机组最大功率追踪的效果; 参考文献[7]研究了同步风力发电机通过不可控整流和可控逆变联网时的控制问题; 参考文献[8]通过控制功率变换电路中开关器件的开断, 保证该风力发电系统输出有效电压, 实现风力发电系统的最佳功率系数。

本文以变速永磁直驱同步发电机组为研究对象。发电机通过全功率控制的交-直-交电路连接到电网上, 该电路由 PWM 整流器、中间直流电路环节和 PWM 逆变器组成。利用转子磁场定向原理, 建立了永磁同步发电机在  $d-q$  坐标系下的数学模

收稿日期: 2010-05-05

作者简介: 马 威(1981-), 男, 河南项城人, 兰州理工大学在读硕士研究生, 主要研究方向为电路与系统。E-mail: mawei214@126.com

型。根据最大风能跟踪原理,利用仿真软件 Matlab/Simulink 建立了永磁同步风电机组仿真模型,并对风速阶跃变化时机组运行情况进行了仿真研究。仿真结果验证了所建模型和变频器控制策略的有效性。

### 1 永磁直驱风电机组数学模型

永磁直驱风电机组的基本结构如图 1 所示。发电机首先将风能转换为频率和幅值变化的交流电,经过整流之后变为直流,然后经过三相逆变器变换为三相电压和频率均恒定的交流电传递到电网<sup>[9-10]</sup>。

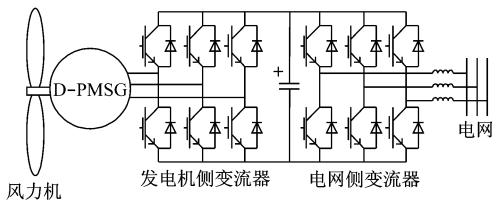


图 1 永磁直驱风电机组的基本结构

#### 1.1 风力机数学模型

风力机的基本原理是利用风轮接收风能,将其转换为机械能,并通过风轮轴输送出去。由空气动力学原理可知,风力机的输出功率  $P_m$  满足:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho V_w^3 C_p(\theta, \lambda) \quad (1)$$

$$\lambda = \omega_r R / V_w \quad (2)$$

式中:  $S$  为桨叶扫风面积;  $\rho$  为空气密度;  $V_w$  为风速;  $\theta$  为桨叶的桨距角;  $\lambda$  为叶尖速比;  $\omega_r$  为风力机转子转速;  $R$  为风力机转子半径;  $C_p$  为与  $\theta$  和  $\lambda$  有关的功率系数,  $C_p(\theta, \lambda)$  曲线表明,当桨距角一定时,在不同的风速和风机转速下,存在一个最优的叶尖速比,使得功率因数最大<sup>[11]</sup>。

由于风力机从风中捕获的功率满足:

$$P_w = T_w \omega_r \quad (3)$$

所以风力机的机械输出转矩  $T_w$  可表示为

$$T_w = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 V_w^2 C_p(\theta, \lambda) / \lambda \quad (4)$$

风电机组轴系统模型为

$$\frac{d\omega}{dt} = (T_e - T_w - B_m \omega) / J_{eq} \quad (5)$$

式中:  $\omega$  为发电机转子转速;  $T_e$  为电磁转矩;  $B_m$  为等效转动惯量;  $J_{eq}$  为转动粘滞系数。

#### 1.2 永磁同步发电机数学模型

根据转子磁场定向得到的同步旋转坐标系下的永磁同步发电机的定子电压方程为<sup>[12]</sup>

$$\begin{cases} u_{sd} = -R_s i_{sd} - L_s \frac{di_{sd}}{dt} + L_s \omega_s i_{sq} \\ u_{sq} = -R_s i_{sq} - L_s \frac{di_{sq}}{dt} - L_s \omega_s i_{sd} + \omega_s \Psi_0 \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $i_{sd}$ 、 $i_{sq}$  和  $u_{sd}$ 、 $u_{sq}$  分别为永磁同步发电机定子输出电流、电压的  $d$  轴和  $q$  轴分量;  $R_s$  和  $L_s$  分别为发电机的定子电阻和电感;  $\Psi_0$  为永磁体的磁链;  $\omega_s$  为同步电角速度。

永磁同步发电机电磁转矩的表达式为

$$T_e = \frac{3}{2} n_p [(L_d - L_q) i_{sd} i_{sq} + i_{sq} \Psi_0] \quad (7)$$

风力发电用永磁同步发电机的永磁体多采用径向表面式分布,即  $L_d = L_q$ , 此时发电机的电磁转矩可简化为

$$T_e = \frac{3}{2} n_p \Psi_0 i_{sq} \quad (8)$$

式中:  $n_p$  为发电机的极对数。

从式(8)可看出,发电机的电磁转矩与定子  $q$  轴电流成正比,因此通过调节  $i_{sq}$  即可调节永磁同步发电机的电磁转矩,进而调节发电机和风力机的转速,使之跟随风速变化,运行于最佳叶尖速比状态。

#### 1.3 变流器模型

由于发电机侧变流器与发电机定子直接相连,忽略变流器产生的高次谐波分量,其数学模型即为式(6)所示的定子电压方程。网侧变流器采用电压矢量定向原理,取  $d$  轴与电网 A 相电压矢量重合,  $d-q$  坐标系随电网电压向量同步旋转,所以网侧变流器在同步旋转坐标系下的数学模型为<sup>[13]</sup>

$$\begin{cases} u_{gd} = S_{gd} u_{dc} = L_g \frac{di_{gd}}{dt} - \omega_y L_g i_{gq} + R_g i_{gd} + e_{gd} \\ u_{gq} = S_{gq} u_{dc} = L_g \frac{di_{gq}}{dt} - \omega_y L_g i_{gd} + e_{gq} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $u_{gd}$ 、 $u_{gq}$  分别为网侧变流器输出电压的  $d$  轴和  $q$  轴分量;  $S_{gd}$ 、 $S_{gq}$  分别为  $d$ 、 $q$  坐标系下的变流器开关量;  $u_{dc}$  为直流母线电压;  $L_g$ 、 $R_g$  分别为网侧变流器进线电抗器的电阻和电感;  $\omega_y$  为电网角频率;  $i_{gd}$ 、 $i_{gq}$  分别为网侧  $d$ 、 $q$  轴电流分量;  $e_{gd}$ 、 $e_{gq}$  为电网  $d$ 、 $q$  轴电压。

### 2 控制策略

本文主要对风速处于启动风速和额定风速之间的变流控制策略进行仿真,包括发电机侧变流器控制和电网侧变流器控制,变桨距系统控制未列入其中。

### 2.1 发电机侧变流器控制策略

根据最大风能捕获原理以及永磁同步发电机的电压方程和电磁转矩表达式,可得到发电机侧变流器的控制框图,如图2所示。

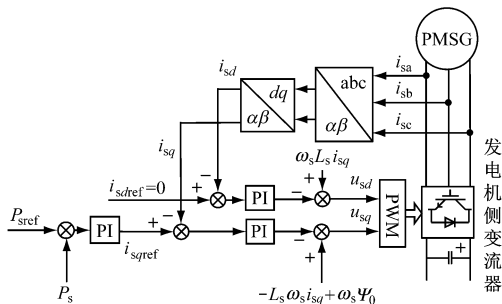


图2 发电机侧变流器的控制框图

图2中, PMSG 表示永磁同步发电机, PI 是一个比例积分调节器。结合发电机的最佳风能跟踪控制原理,永磁同步发电机控制系统外环可采用有功功率的闭环 PI 控制,其调节输出量作为发电机定子电流的  $q$  轴分量给定;控制系统内环则分别实现定子  $d$ 、 $q$  轴电流的闭环控制。在  $q$  轴的有功功率外环控制中,发电机输出的参考有功功率  $P_{sref}$  由发电机的转速确定,与发电机实际输出有功功率  $P_s$  进行差值比较后进行 PI 调节,其输出为  $q$  轴电流的参考值  $i_{sqref}$ 。控制系统内环则分别实现定子  $d$ 、 $q$  轴电流的闭环控制。 $d$ 、 $q$  轴电流参考值与实际反馈值比较后,经过 PI 调节之后,再加入耦合电压项  $\omega_s L_s i_{sq}$  和  $\omega_s \Psi_0 - L_s \omega_s i_{sq}$ ,便可得到最终的  $d$ 、 $q$  轴控制电压分量  $u_{sd}$  和  $u_{sq}$ ,然后通过 PWM 控制技术可得到发电机侧变流器所需的驱动信号,实现功率的传输<sup>[14]</sup>。

### 2.2 电网侧变流器控制策略

通常对电网侧变流器采用电网电压定向的矢量控制,电网侧变流器输出的有功功率和无功功率为

$$\begin{cases} P_g = u_{gd}i_{gd} + u_{gq}i_{gq} \\ Q_g = u_{gd}i_{gq} - u_{gq}i_{gd} \end{cases} \quad (10)$$

电网电压综合矢量定向在  $d$  轴上,则电网电压在  $q$  轴上投影为 0,即  $u_{gq} = 0$ ,则此时有

$$\begin{cases} P_g = u_{gd}i_{gd} \\ Q_g = u_{gd}i_{gq} \end{cases} \quad (11)$$

由式(11)可知,调节电流矢量在  $d$ 、 $q$  轴上的分量就可独立控制变流器的有功和无功功率,实现了有功和无功的解耦<sup>[15]</sup>。其控制框图如图3所示。

由电网侧变流器在  $d-q$  坐标系下的数学模型可知,  $d$ 、 $q$  轴电流除受  $u_{gd}$  和  $u_{gq}$  的影响外,还受到耦合电压  $\omega_s i_{gq} L_g$  和  $-\omega_s i_{gd} L_g$  以及电网  $d$ 、 $q$  轴电压  $e_d$ 、 $e_q$  的影响。对  $d$ 、 $q$  轴电流分别进行 PI 调节控

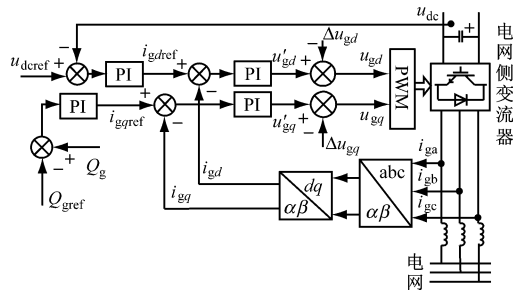


图3 电网侧变流器的控制框图

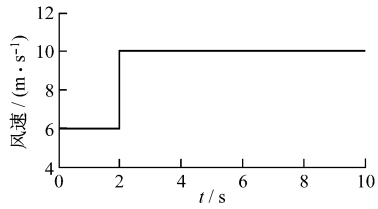
制,得到相应控制电压  $u'_{gd}$  和  $u'_{gq}$ ,并加上交叉耦合电压补偿项  $\Delta u_{gd}$  和  $\Delta u_{gq}$ ,便可得到最终的  $d$ 、 $q$  轴控制电压分量  $u_{gd}$  和  $u_{gq}$ ,然后通过 PWM 控制技术可得到电网侧变流器所需的驱动信号,实现功率的传输。图3中的  $u_{dceref}$  和  $Q_{gref}$  分别为直流设定电压和电网侧设定无功。

### 3 基于 Matlab/Simulink 的 D-PMSG 仿真分析

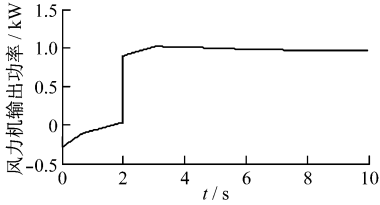
运用 Matlab/Simulink 仿真软件建立 D-PMSG 的仿真模型,部分仿真参数:风力发电机的额定风速为 12 m/s,叶轮半径为 25 m,桨距角为 0,永磁同步发电机的额定功率为 1.5 MW,极对数为 16,定子电阻为 0.28  $\Omega$ ,额定电压为 690 V,频率为 50 Hz,直流侧电压额定值为 1 100 V,直流侧电容为 2 200  $\mu\text{F}$ ,仿真时间为 10 s<sup>[16]</sup>。

当风速在 6~10 m/s 变化过程中,直驱式永磁风电机组相关量的变化情况如图4所示。

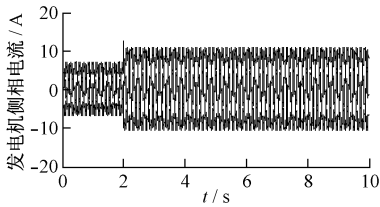
图4(b)表明风力机输出功率跟随风速变化,具有很好的功率输出响应。从图4(c)可看出,在不同风速条件下,永磁同步发电机定子电流输出波形在 2 s 发生跳变后电流趋于稳定,波形均比较接近正弦波。图4(d)和图4(e)给出了风速变化时发电机定子电流的调节特性。在风速变化过程中,永磁同步发电机定子电流  $q$  轴分量有较好的响应,同时  $d$  轴分量略有波动后稳定在 0 附近。验证了  $i_{sd} = 0$  的控制策略,实现了发电机侧  $d$ 、 $q$  电流的解耦。从图4(f)可看出,由于发电机的电磁转矩与定子  $q$  轴电流成正比,因此,随着  $q$  轴电流的跳变,发电机电磁转矩也随之发生跳变,最后达到稳定状态。由图4(g)可知,当风速突变时,电网侧变流器具备较强的维持直流侧电压稳定的能力。在整个风能跟踪控制过程中,直流侧输出电压波动小,在 2 s 后稳定在设定值 1 100 V 附近,响应速度快,达到了电网侧变流器的控制要求。从图4(h)可看出,电网侧变流器实现了单位功率因数控制,使得输出电压、电流波



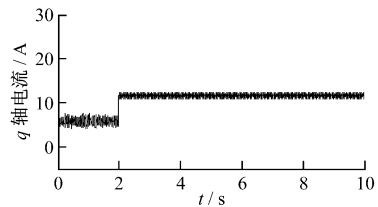
(a) 风速变化曲线



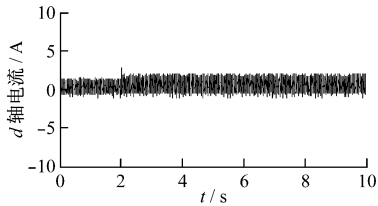
(b) 风力机输出功率曲线



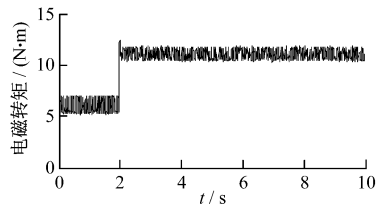
(c) 发电机侧三相输出电流波形



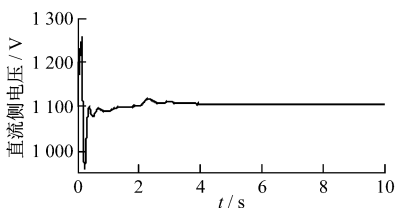
(d) q 轴电流波形



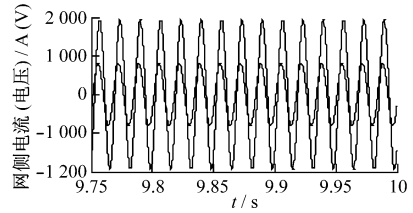
(e) d 轴电流波形



(f) 发电机电磁转矩波形



(g) 直流侧电压波形



(h) 电网侧单相电流、电压波形

图 4 风速在 6~10 m/s 变化过程中, D-PMSG 相关量的变化曲线

形的相位保持一致, 正弦性良好且谐波少, 风电机组具有优良的输出特性, 实现了变速恒频发电运行。

从仿真结果可看出, 运用 Matlab/Simulink 搭建的 D-PMSG 风电机组模型能够正确地反映出机组内部各物理量之间的关系。

### 4 结语

在 Matlab/Simulink 仿真环境下建立了永磁直驱式风电机组的仿真模型, 并分别给出了发电机侧和电网侧变流器的控制方法, 仿真结果验证了所提出控制策略的正确性, 具有良好的动静态控制性能, 使风电能够在不同风速下稳定运行, 电网侧变流器在风速突变引起发电机输出功率变化的情况下能够稳定直流侧电压, 变流器输出有功和无功可实现独立控制以及变速恒频发电运行。对于风电机组动态模型的研究是风电并网的需要, 为进一步分析 D-PMSG 并网后与电力系统之间的相互影响奠定了基础。

### 参考文献:

[1] 张岳, 王凤翔. 直驱式永磁同步风力发电机性能研究[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(1): 78-82.

[2] 包广清, 施进浩, 江建中. 大功率直驱式变速恒频风力发电技术综述[J]. 微特电机, 2008(9): 52-55.

[3] 姚兴佳, 马晓岩, 鲍洁秋. 直驱型变速恒频风力发电机稳态特性[J]. 沈阳工业大学学报, 2009, 31(1): 30-34.

[4] 姚骏, 廖勇, 瞿兴鸿, 等. 直驱永磁同步风力发电机的最佳风能跟踪控制[J]. 电网技术, 2008, 32(10): 11-15.

[5] ESMALI R, XU L, NICHOLS D K. A New Control Method of Permanent Magnet Generator for Maximum Power Tracking in Wind Turbine Application [C]//IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005, San Francisco: 1162-1167.

[6] 赵仁德, 王永军, 张加胜. 直驱式永磁同步风力发电系统最大功率追踪控制[J]. 中国电机工程学报, 2009,

文章编号: 1671-251X(2010)08-0053-03

# 基于 LabVIEW 的矿井提升机健康诊断研究

张祥明, 王 新

(河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454003)

**摘要:** 结合虚拟仪器技术与提升机健康诊断技术, 研究了一种基于 LabVIEW 的矿井提升机健康诊断的方法。该方法利用 LabVIEW 可实现对提升机振动烈度较大的测点信号的采集和存储, 且可对信号进行时域分析、幅度谱分析, 从而实现了提升机的健康诊断。具体的应用测试验证了该方法的实用性与高效性。

**关键词:** 矿井提升机; 状态监测; 振动信号; 健康诊断; 虚拟仪器; LabVIEW

**中图分类号:** TD633 **文献标识码:** A

## Research of Health Diagnosis for Mine Hoister Based on LabVIEW

ZHANG Xiang-ming, WANG Xin

(School of Electrical Engineering and Automation of Henan Polytechnic University,  
Jiaozuo 454003, China)

**Abstract:** Combining with virtual instrument technology and health diagnosis technology of hoister, a method of health diagnosis for mine hoister based on LabVIEW was researched. The method uses LabVIEW to achieve data acquisition and storage of measured points with greater vibration severity of

收稿日期: 2010-04-23

基金项目: 河南省高校科技创新人才支持计划项目  
(2008HASTIT022)

作者简介: 张祥明(1983-), 男, 江西吉安人, 河南理工大学在读  
硕士研究生, 主要研究方向为智能控制与信息处理技术。E-mail:  
zhangxm0796@163.com

29(27); 106-111.

[7] 陈益广, 王志强, 沈勇环. 直驱式方波永磁同步风力发电  
电机控制系统仿真[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(18):  
5849-5853.

[8] 凌禹, 张同庄, 邱雪峰. 直驱式风力发电系统最大风能  
追踪策略研究[J]. 电力电子技术, 2007, 41(7):  
1-2, 5.

[9] 刘其辉, 贺益康, 赵仁德. 变速恒频风力发电系统最大  
风能追踪控制[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(20):  
62-67.

[10] ZENG Qingrong, CHANG Liuchen. Study of  
Advanced Current Control Strategies for Three-phase  
Grid-connected PWM Inverters for Distributed  
Generation Control Applications [C]//IEEE  
Conference on Control Applications, 2005, Toronto:  
1311-1316.

[11] 尹明, 李庚银, 张建成, 等. 直驱式永磁同步风力发电

机组建模及其控制策略[J]. 电网技术, 2007, 31(15):  
61-65.

[12] 严干贵, 魏治成, 穆钢, 等. 直驱永磁同步风电机组的  
动态建模与运行控制[J]. 电力系统及其自动化学报,  
2009, 21(6): 34-39.

[13] 金一丁, 宋强, 刘文华. 直驱永磁同步风电机组的建模  
与仿真分析[J]. 水电自动化与大坝检测, 2008,  
32(5): 47-51.

[14] CHINCHILLA M, ARNALTES S, BURGOS J C.  
Control of Permanent Magnet Generators Applied to  
Variable Speed Wind Energy Systems Connected to  
the Grid [J]. IEEE Trans. on Energy Conversion,  
2006, 21(1): 130-135.

[15] 冯哲峰, 杨恩星, 陈国柱. 直驱永磁风力发电机的单位  
功率因数控制[J]. 机电工程, 2007, 24(9): 70-73.

[16] 张梅, 何国庆, 赵海翔. 直驱式永磁同步风力发电机组  
的建模与仿真[J]. 新能源, 2008, 41(6): 79-83.