

# 外转子永磁风力发电机变速直驱控制系统

姚兴佳, 邵冬, 单光坤, 谢赐骛

(沈阳工业大学 风力发电研究所, 辽宁 沈阳 110023)

**摘要:** 为了提高风能利用率、风力发电能量转换效率, 提出一种新型的外转子永磁风力发电机. 建立了永磁发电机的数学模型, 针对双 PWM 变频器的特点提出了控制策略对变流器进行控制, 通过变流器交-直-交的变换, 将发电机发出的变频变幅值交流电转化为可用的恒定频率的交流电, 并通过对变流器的控制实现了最大风能俘获的功能.

**关键词:** 风力发电; 永磁发电机; PWM 控制

中图分类号: TM614 文献标识码: A

## Variable-speed control for a permanent-magnet generator with exterior rotor

YAO Xing-jia, SHAO Dong, SHAN Guang-kun, XIE Ci-jian

(Wind Energy Institute, Shenyang University of Technology, Shenyang Liaoning 110023, China)

**Abstract:** Exterior rotor generator improves the efficiencies of wind and wind-energy conversion. Its mathematical model is built in this paper. Based on the characteristics of the double PWM frequency changer, we propose a control strategy for controlling the converter. By means of the AC-DC-AC converter, we convert the generator output with varying-frequency and varying-amplitude into a constant-frequency AC for applications. The optimal usage of wind power is also realized.

**Key words:** wind power; PM generator; PWM control

### 1 引言(Introduction)

在变速恒频风力发电系统中, 永磁发电机已得到广泛的应用, 应用于风力发电的永磁发电机可采取多种设计方案, 其中采用外转子结构便是很有特点的一种. 外转子永磁同步发电机的结构将定子固定在电机的中心, 而外转子围绕着定子旋转. 发电机制成后, 磁通基本保持不变. 永磁体安装在发电机转子上. 定子通过全功率变流器与交流电网相连, 发电机变速运行, 提高了风力发电系统的性能<sup>[1,2]</sup>.

### 2 数学模型(Mathematic model)

如图 1 所示, 基于  $d-q$  旋转坐标轴的数学模型与传统的永磁电机电流, 电压模型相同. 发电机电磁转矩方程为

$$T_e = \frac{3}{2}p(\psi_d i_q - \psi_q i_d) = \frac{3}{2}p i_q [i_d(L_d - L_q) + \psi_f]. \quad (1)$$

令定子电流空间相量为  $i_g = i_q - j i_d$ ,  $i_d$  与  $d$  轴间

角度为  $\beta$ , 得  $i_d = i_g \cos \beta$ ,  $i_q = i_g \sin \beta$  有:

$$T_e = \frac{3}{2}p[\frac{1}{2}(L_d - L_q)i_g^2 \sin(2\beta) + \psi_f i_g \sin \beta]. \quad (2)$$

根据式 (2) 知, 发电机的电磁转矩取决于定子电流空间相量  $i_g$ . 控制  $i_g$  来实现对发电机的控制.

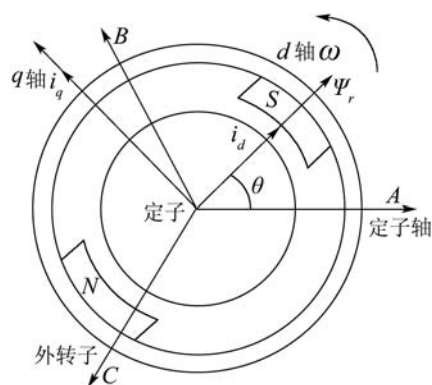


图 1 二极的理想外转子永磁电机示意图

Fig. 1 Two poles outer rotor PMG drawing

### 3 控制系统(Control system)

根据发电机的转矩取决于定子电流的空间矢量  $i_g$ , 而  $i_g$  的大小和相位取决于  $i_d$  和  $i_q$ , 令  $i_d$  和  $i_q$  跟踪指令  $i_d^*$  和  $i_q^*$ , 实现速度和转矩的控制 [3].

图2中速度参考值  $\omega^*$  由最大功率点跟踪算法得出, 根据发电机实际转速和输出有功功率变化得出一个最优的速度  $\omega^*$ , 与实际电机速度相比较, 通过PI控制器得到有功电流参考  $i_d^*$ . 采用磁场定向控制, 使定子电流矢量指向q轴, 从而  $i_d$  为零. 可以通过调节  $i_q$  来控制发电机转矩, 从而改变发电机转速, 跟从最优的  $\omega^*$ , 从而发电机重新达到稳定, 发电机电气转矩等于风机机械转矩. 检测发电机三相电流 ( $i_u, i_v, i_w$ ), 进行旋转坐标变换得 ( $i_d, i_q$ ), 电流环采用PI调节器, 得到所要调制的电压  $u_d^*$  和  $u_q^*$ .  $u_d^*$  和  $u_q^*$  再经过旋转反变换, 即可得到三相PWM调制信号  $u_u^*, u_v^*, u_w^*$ . 直流环节与电网之间的逆变器实际上同电机侧一样, 是一个电压源PWM整流器, 它工作在逆变状态, 因此电流从电网电压的正极流向负极, 电网吸收功率. 其中给定直流电压  $u_{dc}^*$  与实际检测到的直流连接环电压  $u_{dc}$  相比较, 所得误差信号经比例积分控制器调节产生有功参考电流  $i_{sq}^*$ , 而无功功率外环产生无功电流  $i_{sd}^*$ . 控制电压环控制直流电压稳定, 可以使逆变器稳定地向电网传输功率, 而无功功率环控制逆变器输出无功功率, 从

而满足电网对于无功功率的要求. 检测三相电网电压 ( $u_a, u_b, u_c$ ) 和三相电网电流 ( $i_a, i_b, i_c$ ), 通过锁相环PLL检测电网电压位置角  $\theta$ , 根据电网电压位置角对其进行旋转变换, 分别得到 ( $u_{sq}, u_{sd}$ ) 和 ( $i_{sq}, i_{sd}$ ). 由此计算输送到电网的有功功率  $P$  和无功功率  $Q$ :

$$P = u_{sq}i_{sq} + u_{sd}i_{sd}, \tag{3}$$

$$Q = u_{sq}i_{sd} - u_{sd}i_{sq}. \tag{4}$$

电流内环依然采用基于旋转坐标轴的解耦控制, 采用比例积分调节器作为电流环的控制器. 其解耦算式为:

$$u_{sq}^* = (i_{sq}^* - i_{sq})(K_{ip} + \frac{K_{il}}{s}) + \omega \cdot Li_d + u_{sq}, \tag{5}$$

$$u_{sd}^* = (i_{sd}^* - i_{sd})(K_{ip} + \frac{K_{il}}{s}) + \omega \cdot Li_q + u_{sd}, \tag{6}$$

所得的  $u_{sq}^*, u_{sd}^*$  经过旋转反变换, 即得到所需的PWM调制信号电压  $u_a^*, u_b^*, u_c^*$ , 再通过PWM控制器对逆变器开关进行控制. 通过逆变器控制, 保持了直流电压的恒定, 使其能稳定的向电网输送电能, 并且通过电流内环解耦控制, 逆变器输出电流与电网电压的频率始终为一致, 在电网正常运行时, 当无功需求  $Q^* = 0$  时能保持功率因素为一, 并且在特殊情况时能向电网提供无功功率.

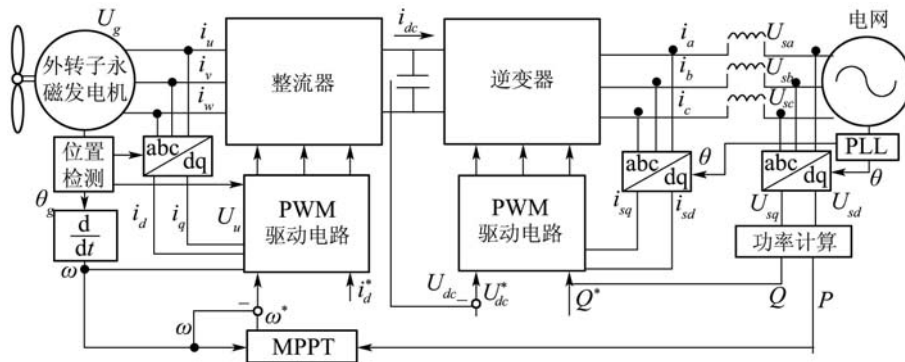


图2 永磁直驱风力发电控制系统框图

Fig. 2 Wind power control system direct with PMG

### 4 仿真研究 (Simulation research)

为了验证本文提出方案的可行性, 应用 MATLAB 软件对整个系统进行仿真, 永磁同步电机的参数如下: 永磁体磁链 0.5 Wb, 极对数 20, 给定转速 3000 r/min, 给定磁链幅值 0.8 Wb, 0.01 s 时加负载 30 N. PI 调节器上限值为 100 N. 仿真结果如图3, 横轴时间为 s.

从仿真结果中可见, 在突加负载之前, 电磁转矩在电动机启动时迅速达到最大值然后快速下降, 稳定在正常值. 在突加负载之后, 电磁转矩经过一个轻微的调整过程, 然后稳定在一个新值, 且转矩脉动小, 转矩控制性能良好.

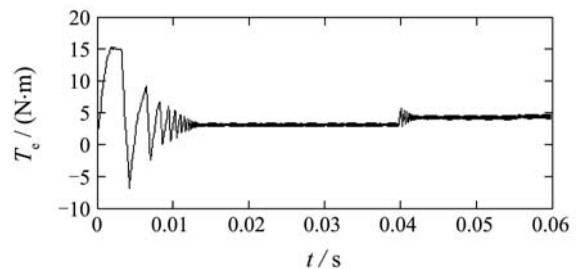


图3 电磁转矩  $T_e$

Fig. 3 Electromagnetism torque  $T_e$

式(11)(12)和(13)就构成了无刷双馈风力发电机的三时间尺度模型。

## 5 结论(Conclusions)

本文利用无刷双馈电机的多时间尺度特征,建立无刷双馈电机的奇异摄动模型。本文的研究成果表明:

1) 将无刷双馈风力发电机视作两台感应电机的组合,有利于建立定子电流频率旋转坐标下的模型,使无刷双馈风力发电机组的并网分析得以简化;

2) 无刷双馈电机具有明显的多时间尺度特征。其中机械变量可视为变化最慢的动态,转子绕组电流次之,定子绕组(含功率绕组和控制绕组)电流变化最快,因此无刷双馈风力发电机模型可视为三时间尺度模型;

3) 本文建立的三时间尺度模型,为无刷双馈电机的降阶奠定了基础。

## 参考文献(References):

- [1] WANG F, ZHANG F, XU L. Parameter and performance comparison of doubly fed brushless machine with cage and reluctance rotor[J]. *IEEE Trans on Industry Application*, 2002, 38(5): 1237 – 1243.
- [2] RUQI L, WALLAN A, SPEE R. Dynamic simulation of brushless doubly fed machines[J]. *IEEE Trans on Energy Conversion*, 1991, 6(3): 445 – 451.
- [3] XU L, LING F, LIPO T A. Transient model of a doubly excited reluctance motor[J]. *IEEE Trans on Energy Conversion*, 1991, 6(1): 126 – 133.
- [4] BOGER M S. General pole number model of the brushless doubly fed machine[J]. *IEEE Trans on Industry Application*, 1995, 3(5): 1022 – 1027.
- [5] 刘永强, 严正, 倪以信, 等. 双时间尺度电力系统动态模型降阶研究(一)—电力系统奇异摄动模型[J]. *电力系统自动化*, 2002, 26(18): 1 – 5.  
(LIU Yongqiang, YAN Zheng, NI Yixin, et al. Study on the order reduction of two-time scale power system dynamical models: part one power system singular perturbation model[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2002, 26(18): 1 – 5.)
- [6] WINKELMAN J R, CHOW J H, ALLEMONG J J, et al. Multi-time scale analysis of a power system[J]. *Automatica*, 1980, 16(1): 35 – 43.

(上接第134页)

## 5 结论(Conclusion)

本文主要研究了基于双PWM变频器的外转子永磁发电机直驱变速恒频风力发电控制技术。建立了外转子永磁电机的数学模型,并提出了变频器的控制策略,从而使发电机能向电网稳定输送功率,其电能频率与电网电能频率能保持一致,相信永磁风力发电系统将在未来大中型风力发电系统中将具备更高效的实用价值和广阔的应用前景。

## 参考文献(References):

- [1] 王承熙, 张源. 风力发电[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.  
(WANG Chenxu, ZHANG Yuan. *Wind Power*[M]. Beijing: Electric Power Publishing Press, 2003.)
- [2] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.  
(TANG Yinyuan. *Modern Magneto Electric Machine Theory and Design*[M]. Beijing: Mechanical Industry Publishing Press, 2002.)
- [3] MUKUND R P. *Wind and Solar Power System*[M]. Boca, Raton: CRC Press, 1999.