

文章编号: 1005-0523(2006)04-0040-04

双馈风力发电系统 MPPT 控制技术研究

叶满园

(华东交通大学 电气与电子工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要:介绍了变速恒频风力发电的基本原理, 并采用定子磁链定向的矢量控制方法得到了双馈发电机的矢量控制系统模型. 本文利用 Matlab 软件建立了该系统的仿真模型, 仿真结果验证了这种矢量控制策略既能保证定子输出频率的恒定, 又能达到有功功率和无功功率的独立解耦控制, 同时还能较好地跟踪风力机的最大功率输出.

关键词:变速恒频; 交流励磁双馈发电机; 矢量控制

中图分类号: TM73

文献标识码: A

1 引言

长期以来风力发电主要采用恒速恒频的定桨距风力机, 这种运行方式只能在某一风速时捕获最大风能, 因此风能利用效率很低. 而随着风力发电和电力电子技术的飞速发展, 变速恒频风力发电技术已经逐步取代了恒速恒频技术. 实现变速恒频发电的方法很多^[1,2,4], 其中交流励磁双馈发电机方案具有较大优势. 由于交流励磁变频器只需供给转差功率, 大大减少了对变频器容量的要求; 发电机根据风力机转速变化调节转子励磁电压频率, 以实现恒频输出, 并且通过控制发电机组转速实现最大风能的跟踪和捕获运行.

本文从分析风力机特性出发, 研究能够实现最大风能捕获的风电系统控制方法. 根据双馈型异步发电机的特性, 采用定子磁链定向的矢量变换控制技术, 实现了发电机有功、无功的解耦控制, 以及跟踪风力机的最大功率输出. 系统仿真和试验研究验证了本文提出的控制策略的正确性和有效性.

2 风力机最大风能捕获控制原理

由贝兹(Betz)理论可知, 功率系数 C_p 有个极限值 59%, 并且 C_p 在某一固定风速只有一个最大值.

图 1 是一组在不同风速($v_1 > v_2 > v_3$)下风力机的输出功率特性曲线, P_{max} 是各风速下最大输出功率点的连线, 即最佳功率曲线. 风力机运行在 P_{max} 曲线上将会输出最大功率.

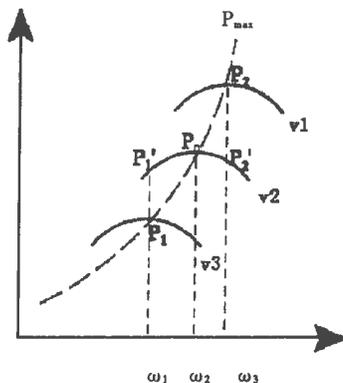


图 1 风力机的功率特性

为实现最大风能追踪控制, 应根据风力机最佳功率曲线和风力机转速 ω_m 来实时计算发电机的输

收稿日期: 2005-10-08

作者简介: 叶满园(1978-), 男, 安徽人, 硕士, 讲师, 研究方向是: 电力电子技术及应用.

出有功功率 P^* 值:

$$\left. \begin{aligned} P^* &= \frac{P_{\max}}{1-s} - \Delta P = \frac{k\omega_m^3}{1-s} - \Delta P \\ \Delta P &= P_{cu1} + P_{Fe1} + \frac{P_m}{1-s} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

按照指令 P^* 控制发电机的输出有功功率, 就可实现最大风能的追踪与捕获.

3 变速恒频发电机 P 、 Q 解耦控制

通过以上分析得知, 风电系统中发电机控制的目标是: ①实现变速恒频运行, 满足电网对电能质量的要求; ②对有功功率 P 和无功功率 Q 进行解耦控制, 以实现最大风能跟踪. 为此采用磁场定向矢量变换控制技术, 通过对励磁双 PWM 变频器各分量电压、电流的调节来实现这个控制过程.

3.1 定子磁链定向双馈发电机数学模型

我们把 $d-q$ 坐标系的 d 轴与定子绕组磁链 Ψ_1 方向重合, 则电机定子端电压 u_1 将在 q 轴的负方向上, 如图 2 所示.

因为 q 轴超前 d 轴 90° , 所以得 $\Psi_{d1} = \Psi_1$ 、 $\Psi_{q1} = 0$. 由于发电机定子侧频率为工频, 定子电阻远小于定子绕组电抗, 因此定子电阻可以忽略不计, 由图 3 可知: $u_{d1} = 0$ 、 $u_{q1} = -u_1$. 从而得发电机电压和磁链方程:

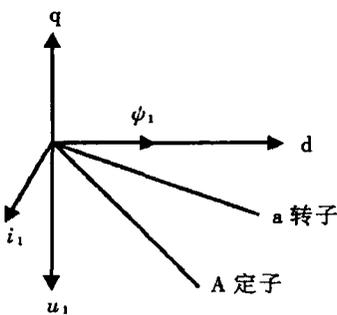


图 2 定子磁链定向矢量图

$$\left. \begin{aligned} \Psi_1 &= \frac{u_1}{\omega_1} \\ p\Psi_1 &= 0 \\ u_{d2} &= \gamma_2 i_{d2} + P\Psi_{d2} - \omega_0 \Psi_{q2} \\ u_{q2} &= \gamma_2 i_{q2} + p\Psi_{q2} + \omega_0 \Psi_{d2} \\ i_{d2} &= \frac{1}{L_m} (L_s i_{d1} - \Psi_1) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} i_{q2} &= \frac{L_s}{L_m} i_{q1} \\ \Psi_{d2} &= -L_m i_{d1} + L_r i_{d2} \\ \Psi_{q2} &= -L_m i_{q1} + L_r i_{q2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

从式(2)可看出, 不计定子电阻影响时, 发电机的定子磁链 Ψ_1 为常数, 其值为定子电压与同步角速度之比.

3.2 发电机矢量变换控制系统结构

由 $u_{d1} = 0$ 、 $u_{q1} = -u_1$ 可得发电机的功率方程: $P_1 = -u_1 i_{q1}$; $Q_1 = -u_1 i_{d1}$. 可以看出, 有功功率 P 和无功功率 Q 分别与定子电流在 d 、 q 轴上的分量成正比, 调节转矩电流分量 i_{q1} 和励磁电流分量 i_{d1} 可分别独立调节 P 和 Q . 图 3 给出了采用变速恒频发电机定子磁链定向的矢量变换控制系统框图.

该系统采用闭环结构控制, 有功功率指令 P^* 按式(1)计算得到, 无功功率指令 Q^* 可根据电网对无功功率的要求计算, 也可从发电机的功率消耗角度来计算. 指令 P^* 、 Q^* 分别与功率反馈值 P 、 Q 进行比较, 差值送给有功、无功功率调节器近些运算, 输出定子电流无功分量及有功分量指令 i_{d2}^* 和 i_{q2}^* . 然后再与转子反馈信号 i_{d2} 和 i_{q2} 进行比较, 用所得到的比较信号对变频器进行控制, 从而实现有功无功的独立调节.

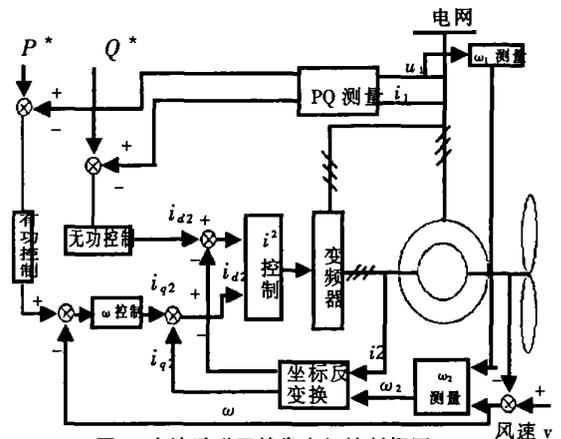


图 3 交流励磁双馈发电机控制框图

4 变速恒频风力发电系统的仿真研究

本文利用 Matlab/Simulink 软件建立了交流双馈电机变速恒频风力发电系统的仿真模型, 如图 4 所示.

仿真所用系统参数为: 额定功率 $P_n = 2.2 \text{ kW}$; 额定电压 $V_n = 220 \text{ V}$; 额定频率 $f_1 = 60 \text{ Hz}$; 电机极对

数 $n_p=2$; 定子绕组电阻 $R_s=0.435 \Omega$; 转子绕组电阻 $R_r=0.816 \Omega$; 定子绕组漏感 $L_s=2 \text{ mH}$; 转子绕组漏感 $L_r=2 \text{ mH}$; 互感 $L_m=69.31 \text{ mH}$; 转动惯量 $J=0.089 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$; 所用风力机参数为: 风轮半径 $R=2.4 \text{ m}$; 最佳叶尖速比值 $\lambda_m=9$; 最大风能利用系数值 $C_{pmax}=0.4$; 齿轮传动比 $N=7.8$.

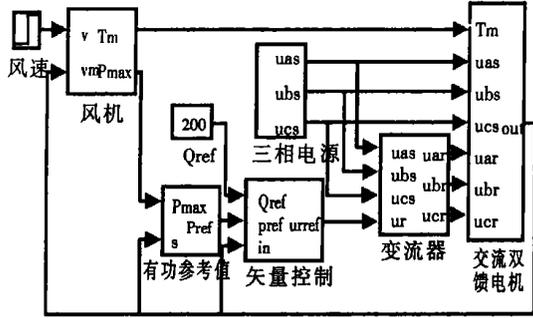


图4 交流双馈电机变速恒频风电系统仿真模型

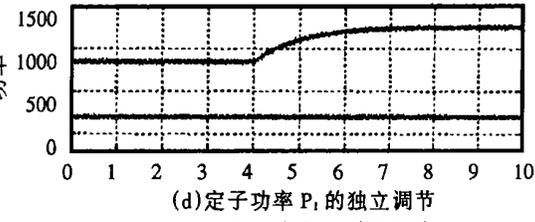
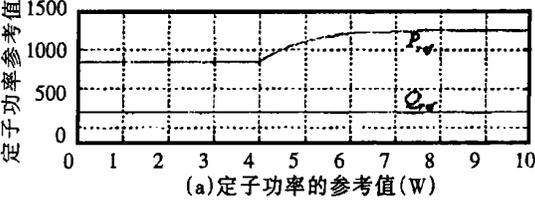
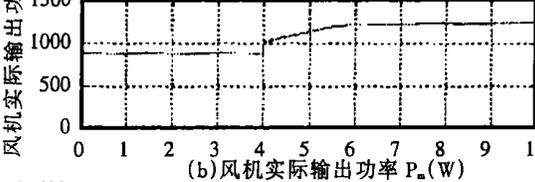
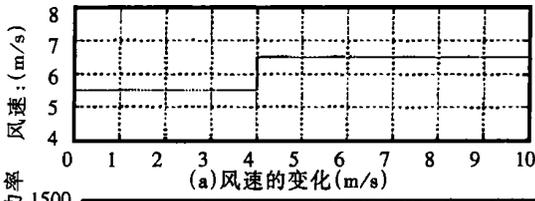


图5 定子功率 P_1 的值(W)

4.1 定子有功功率和无功功率的解耦调节过程

假设系统开始时稳定运行在风速 v_1 等于 5.5 m/s 的情况下, 在 t_1 等于 4 秒时风力发生突变, 风速变为 v_2 等于 6.5 m/s ; t_2 等于 8 秒后, 系统进入另一个稳定状态. 图 6(d) 显示了风速变化情况下的双馈电机定子有功功率 P_1 的独立调节过程. 在 P_1 的调节过程中 Q_1 保持不变. 可以看出系统较好地跟踪了由风机最大输出功率 P_{max} 确定的功率参考值

P_{ref} , 风机实际输出功率 P_m 经过系统调节能够保持在最佳功率点上.

4.2 定子电流的调节过程

图 6 显示了风速变化情况下双馈电机定子电流的变化过程: 风速变大后, 定子电流幅值增加, 但频率恒定. 为更清楚地观察输出频率的恒定, 从风速变化前后的定子电流波形中各截取了一个区间便于观看.

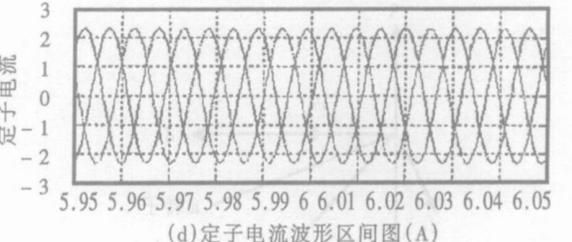
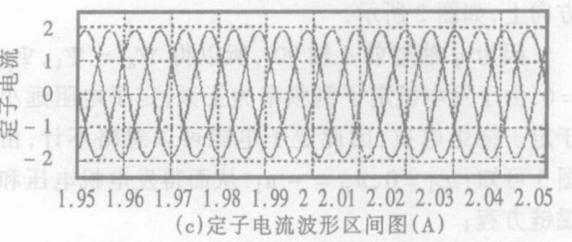
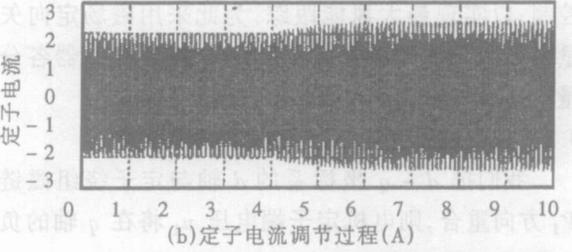
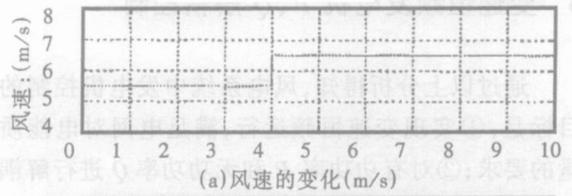
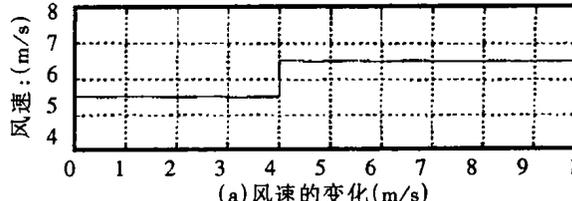


图6 定子电流调节过程

4.3 转子电流的调节过程

图 7(b) 和 (c) 分别为风速变化情况下双馈电机转子转速和转子电流的调节过程. 可见随着发电机转速的变化, 转子电流频率相应地变化, 转速过同步点时其频率为 0.



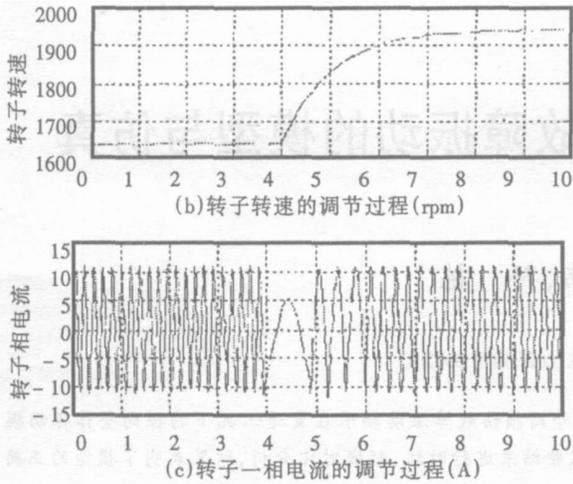
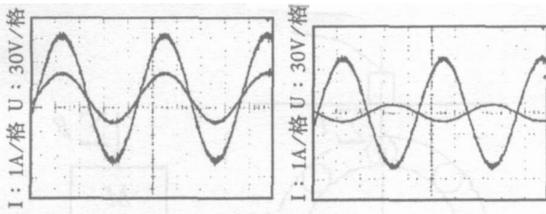


图 7 转子相电流的调节过程

4 双 PWM 变频器变速恒频运行实验

为了进一步研究双 PWM 变频器在变速恒频风力发电机系统中励磁的实际效果,我们还进行了具实验研究,实验参数为:进线滤波电感为 6 mH,电阻忽略不计,直流母线滤波电容为 2 200 μF.以 TI 公司的 DSP320LF2407 控制器为控制平台,为配合转子励磁电压等级,变换器直流母线电压控制在 120~200 V 之间,所得实验波形如图 8 所示.



(a)电阻负载
(b)反电动势
图 8 实验波形

图 8 是网侧变换器稳态时的实验波形,其中图 8(a)为变换器直流侧带 50 Ω 电阻负载时的输入相电压 u_a 和相电流 i_a 波形,可以看出输入电流正弦与输入电压同相位,功率因数近似为 1.图 8(b)为变换器直流侧带 200 V 反电势负载时输入相电压 u_a 和相电流 i_a 波形,由于负载电压高于给定电压,变换器运行在逆变状态,输入电流和输入电压反相位,能量反向流.实验与仿真结果恰好吻合.

5 结束语

本文利用 Matlab/Simulink 软件建立了风力机、双馈电机和矢量控制系统的仿真模型,并进行了仿真.从仿真结果可以看出,采用矢量控制的变速恒频双馈发电机能作出快速响应,并保持良好的跟踪性.双馈电机转速能够跟踪风速变化,保持了输出频率恒定,定子输出有功无功得到了解耦控制,有功功率输出较好地跟踪了风力机的最大输出功率.实验研究验证了定子磁链定向矢量控制策略的正确性.

参考文献:

[1] 廖勇,杨顺昌.交流励磁发电机励磁控制[J].中国电机工程学报,1998,18(2):87~90.
 [2] 黄科远,贺益康,卞松江.矩阵式变换器交流励磁的变速恒频风力发电系统研究[J].中国电机工程学报,2002,22(11):100~105.
 [3] M.T.LqbalA.H.Coonick and L.L.Freris.Dynamic control options for variable speed wind turbines[J].1994,18(1):1~12.

Reserch of Duoble Feed Wind Generation System MPPT Control Technology

YE Man-yuan

(School of Electrical and Electrical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: The thesis presents the principle of VSCF wind Power. In this thesis, we adopt the vector control strategy of stator field-orient and gain a vector control system model of double-feedback generator. What 's more, the whole system model is founded by the software Matlab/simulink. the results of simulation approves that the control of stator active and reactive are decoupled, and the output power can tracks the maximal power of wind turbine.

Key words: variable-speed constant frequency; AC excitation double-feedback generator; vector control