

双脉宽调制变换器励磁的变速恒频风电系统^{*}

孙海生, 任永峰, 李含善

(内蒙古工业大学 信息工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要: 采用双脉宽调制 (PWM) 变换器作为双馈感应发电机 (DFIG) 变速恒频风力发电系统的励磁电源, 分析了变换器数学模型及系统的控制策略。网侧变换器采用电网电压定向控制策略, 目的是保持直流母线电压稳定和网侧单位功率因数运行, 实现能量的双向流动; 转子侧变换器采用定子磁链定向控制策略, 以实现最大风能捕获和定子无功功率的调节。利用 MATLAB 软件建立了仿真模型。仿真结果表明, 网侧在整流和逆变状态都能实现单位功率因数运行; 双馈电机转速能快速跟踪风速变化; 电机在亚同步、同步、超同步三种状态运行时, 转子电流频率满足变速恒频运行条件; 同时实现了定子无功功率的独立调节。

关键词: 双脉宽调制变换器; 双馈感应发电机; 变速恒频

中图分类号: TM315 文献标识码: A 文章编号: 1673-6540(2009)07-0039-05

VSCF Wind Power Generation System Excited by Double-PWM Converter

SUN Hai-sheng, REN Yong-feng, LI Han-shan

(College of Information Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Huhhot 010051, China)

Abstract: Adopting double-PWM converter as AC-supply of variable speed constant frequency wind power system based on doubly fed induction generator, the mathematic model of converter and the control strategies of system are analyzed. Grid-side adopts the control strategy of grid voltage orientation to achieve the stability of DC-link voltage, unity power factor of grid-side and bi-direction flowing ability of energy. Rotor-side adopts the control strategy of stator flux orientation to achieve maximum wind-energy capturing and adjustment of reactive power of stator. Simulated model is built by using software MATLAB. Simulated results show that grid-side can be ran at unity power factor both rectified state and reverse state, the speed of DFIG can track wind speed quickly, rotor current satisfies the condition of VSCF and system achieves independent adjustment of reactive power of stator.

Key words: double-PWM converter; doubly-fed induction generator (DFIG); variable speed constant frequency

0 引言

风能是一种非常具有开发潜力的可再生能源, 近年来风力发电技术已经得到各国学者的广泛关注。风力发电技术中的变速恒频发电方式是当前风力发电技术的发展方向。双馈感应发电机 (DFIG) 作为风力发电机具有变速运行范围宽, 励磁电源容量小及有功和无功功率可以灵活控制的特点, 因此双馈电机变速恒频风力发电系统成为研究的热点。

在基于 DFIG 的变速恒频风电系统中, 如何控制其转子电压或电流的幅值、频率及相位, 并实

现能量的双向流动是控制的关键^[1]。因此选择合适的励磁变频器及采用哪种控制方式^[2-3]显得尤为重要。目前可用于变速恒频风电系统的励磁电源有交交变频器、双脉宽调制 (PWM) 变换器和矩阵变换器^[4]。交交变频器输出电压谐波多, 输入侧功率因数低, 使用功率元件数量多, 现已很少采用。近年来出现的矩阵变换器主电路简单, 采用全控型开关器件, 具有优良的输入、输出特性, 输出频率不受限制, 能量可以双向流动, 变换效率较高。但由于矩阵变换器所用开关器件数目较双 PWM 变换器所用器件多, 器件承受的耐压高, 并且输入、输出控制不解耦, 这些缺点一定程度上限

* 内蒙古自治区自然科学基金重大项目 (200711020801)

制了其在风力发电中的应用。

为了克服以上两种变换器的缺点,可采用双 PWM 变换器作为变速恒频风电系统的励磁电源。文献 [5, 6] 以双 PWM 变换器作为励磁电源研究了 DFIG 系统的控制策略。本文在分析双 PWM 变换器数学模型的基础上对变速恒频风电系统的控制策略进行了分析,并作仿真验证。仿真结果表明,本系统具有能量双向流动能力,其输入输出功率因数可以独立调节,具有较小的输入输出谐波,能够实现风能的高质量发电。

1 变速恒频风力发电系统控制策略

1.1 转子侧变换器定子磁链定向控制策略

因为 DFIG 的定子绕组直接接在无穷大电网上,可以近似地认为定子的电压幅值、频率都是恒定的,所以异步双馈电机一般采用定子磁链定向控制策略,如图 1 所示。此时, d, q 轴上的磁链分量分别为: $\psi_{ds} = \psi_s, \psi_{qs} = 0$ 。由于 DFIG 定子侧频率为工频,定子电阻远小于定子电抗,可以忽略,则 $R_s = 0$, DFIG 感应电动势近似等于定子电压。因为感应电动势 e_1 落后 ψ_s 90° ,故 e_1 位于 q 轴负方向,有 $u_{ds} = 0, u_{qs} = U_s$,其中 U_s 为定子电压矢量的幅值,当定子端并入理想电网后, U_s 等于电网电压矢量,为常数。

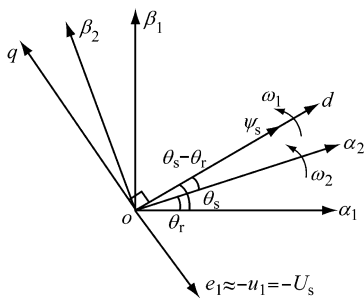


图 1 定子磁链定向坐标变换

根据以上讨论,且忽略定子电阻压降,即可得到双馈电机的磁链方程、电压方程和功率方程^[7-8]:

$$\begin{cases} \psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \Rightarrow i_{ds} = \frac{\psi_{ds} - L_m i_{dr}}{L_s} \\ \psi_{qs} = 0 = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \Rightarrow i_{qs} = -\frac{L_m i_{qr}}{L_s} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} u_{ds} = 0 \\ u_{qs} = \omega_s \psi_{ds} = U_s \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} u_{dr} = R_r i_{dr} + \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) \frac{di_{dr}}{dt} - \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) \omega_s i_{qr} + \frac{L_m}{L_s} \frac{d\psi_s}{dt} \\ u_{qr} = R_r i_{qr} + \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) \frac{di_{qr}}{dt} + \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) \omega_s i_{dr} + \frac{L_m}{L_s} \omega_s \psi_s \\ \begin{cases} P = u_{ds} i_{ds} + u_{qs} i_{qs} \\ Q = u_{ds} i_{qs} - u_{qs} i_{ds} \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $u_{ds}, u_{qs}, u_{dr}, u_{qr}$ ——分别为定、转子电压的 d, q 轴分量;

$i_{ds}, i_{qs}, i_{dr}, i_{qr}$ ——分别为定、转子电流的 d, q 轴分量;

ω_s —— dq 坐标系定子相对于转子的电角速度,即转差电角速度, $\omega_s = \omega_1 - \omega_r$;

L_m —— dq 坐标系定、转子绕组间的互感;

L_s, L_r ——分别为 dq 坐标系等效二相定、转子绕组的自感。

在定子磁链定向矢量控制策略下:

$$\begin{cases} P = u_1 i_{qs} \\ Q = -u_1 i_{ds} \end{cases} \quad (5)$$

根据 DFIG 数学模型,可以得出转子侧 PWM 变换器控制策略框图如图 2 所示。

整个系统为双闭环结构,内环为转子电流控制环,由 i_{dr}, i_{qr} 两个控制通道组成,电流误差经调节后输出电压控制量,叠加 u_{dr}, u_{qr} 前馈电压补偿量,即可得到同步旋转坐标系中的转子电压控制量,再经坐标变换得到双馈电机转子二相静止电压控制指令 u_r^*, u_r^* ,经 SVPWM 后产生所需的励磁电压及电流。外环为转速控制环,根据当前风速计算出对应于风力机最佳叶尖速比的转速值作为转速环的给定,和电机转速反馈值比较后的差值送入转速控制器,输出为转子 q 轴电流的给定值。 d 轴电流的给定值可以根据电网对风电系统的无功要求计算得出。通过给定不同的转子 d 轴电流即可实现不同的无功功率输出。

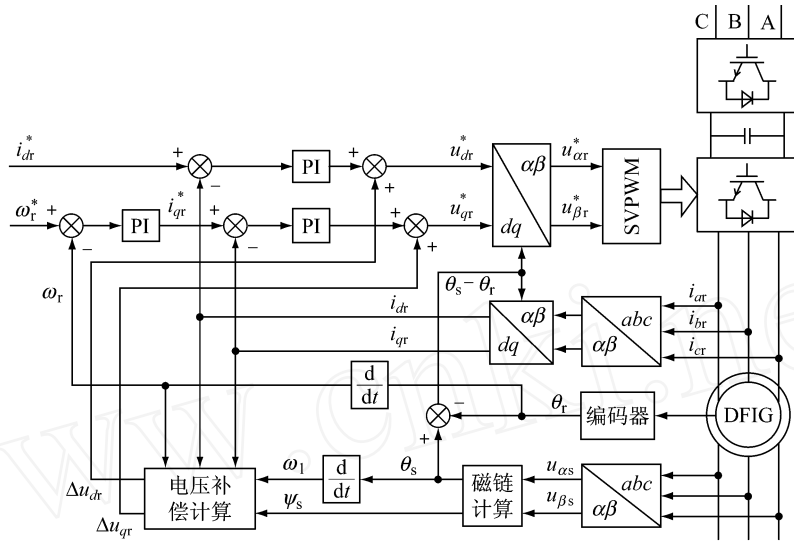


图 2 定子磁链定向控制系统框图

1.2 网侧变换器电网电压定向控制策略

网侧变换器控制系统的目的是为转子侧变换器的功率双向流动提供通道,同时实现网侧单位功率因数或可变功率因数运行。为简化控制算法,应用空间坐标变换,将同步旋转 dq 坐标系 d 轴定向于电网电压矢量 u_s 的方向上,得电网电压的 dq 分量为:

$$\begin{cases} u_d = u_s \\ u_q = 0 \end{cases} \quad (6)$$

输入电流满足:

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = -Ri_d + \omega L i_q + u_s - u_{dr} \\ L \frac{di_q}{dt} = -Ri_q - \omega L i_d - u_{qr} \end{cases} \quad (7)$$

式中: u_{dr}, u_{qr} 为整流器交流侧电压的 d, q 轴分量。

为消除 d, q 轴间电流耦合和电网电压扰动,引入电流反馈 $L i_q$ 和 $-L i_d$ 进行解耦,并引入电网电压进行前馈补偿,从而实现 d, q 轴电流的独立控制,控制框图如图 3 所示。网侧 PWM 变换器也采用双闭环控制,电压外环控制三相 PWM 整流器直流侧电压,直流电压给定与反馈的误差经电压控制器,输出有功电流给定 i_d^* ,其值决定有功功率的大小,符号决定有功功率的流向。电流内环 d 轴分量按照电压外环输出的电流指令进行电流控制, q 轴分量可以人为自动给定。为实现功率因数为 1 的整流或逆变,应使无功电流分量 $i_q^* = 0$ 。

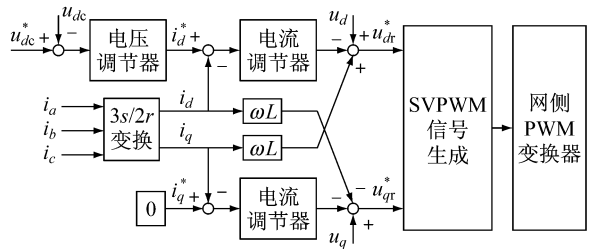


图 3 网侧变换器控制框图

上述网侧变换器控制策略允许直流母线电压在能量流动方向发生改变时有较大的波动,若要减小直流母线电压的波动,可以采用文献 [9, 10] 介绍的控制策略。

2 系统仿真

为了验证系统设计的正确性,用 MATLAB6.5 软件对系统进行仿真,系统仿真模型如图 4 所示。其中网侧变换器控制系统仿真模型包含在 subsystem1 中,转子侧变换器控制系统仿真模型包含在 subsystem2 中,风机模型包含在 wind turbine 中。

表 1 为变速恒频风电系统的参数。系统的初始状态为零,电机的同步转速为 1500 r/min。当风速为 6.75 m/s 时,电机的最佳转速为同步转速。

图 5 给出了电机转速跟踪风速的动态过程。从图中可以看出,电机转速快速跟踪风速变化,从而实现了最大风能的捕获。

图 6 为电机转速在亚同步、同步、超同步三种状态运行时转子三相电流的波形。从图中可看

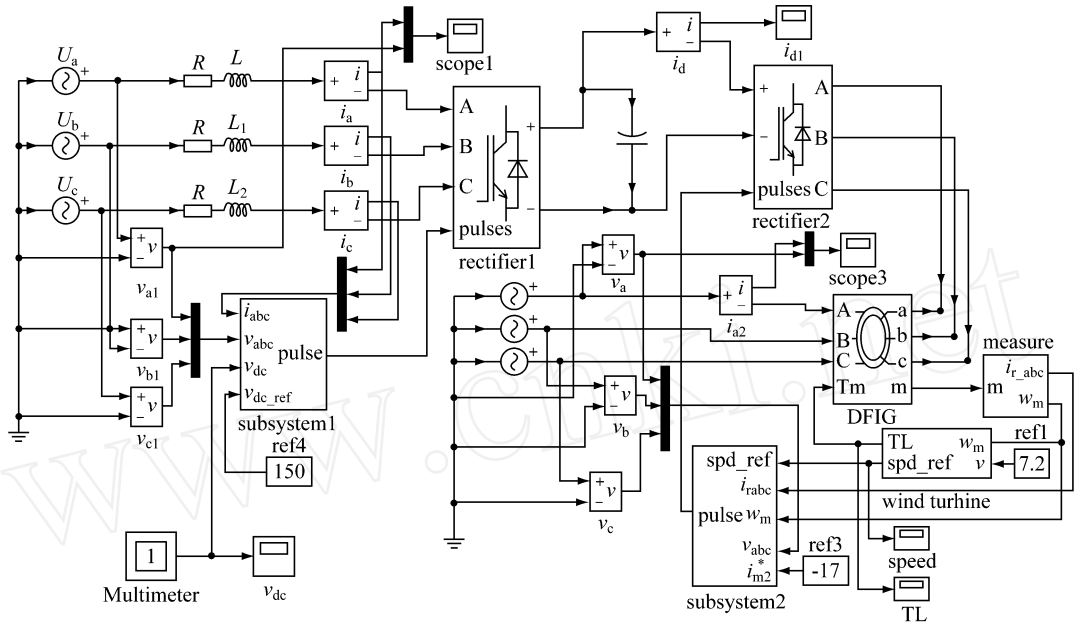


图 4 系统仿真模型

表 1 系统参数设置一览表

系统	参数设置
双馈电机	额定功率 2.5 kW, 定子额定电压 220 V, 定子额定频率 50 Hz, 四极, 定子电阻 0.435, 定子漏感 2 mH, 转子电阻 0.816, 转子漏感 2 mH, 互感 69.31 mH, 转动惯量 0.089 kg·m ² 。
风力机	风轮半径 2.15 m, 额定功率 2.5 kW, 最佳叶尖速比 8, 最佳风能利用系数 0.4, 齿轮箱增速比 6.254。
双 PWM 变流器	进线电感 6 mH, 等效电阻 0.5, 滤波储能电容 2200 μF。
其他	电网线电压 380 V, 频率 50 Hz, 直流母线电压 150 V, PWM 开关频率 50 Hz。

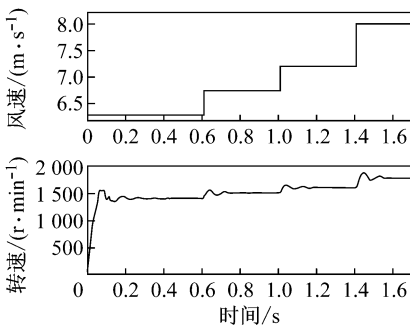
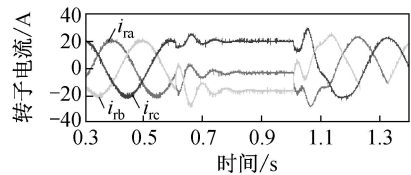
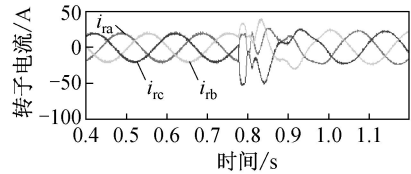


图 5 转速跟踪风速过程

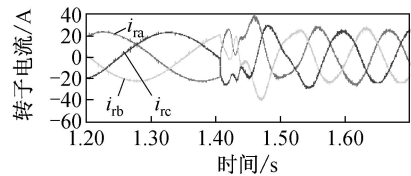
出,当电机运行状态发生改变时转子电流进行了换相,转子电流频率满足双馈电机变速恒频运行条件。



(a)转速由亚同步向同步、超同步变化



(b)转差率由 -10%向 10%变化



(c)转速由 1600 r/min向 1750 r/min变化

图 6 转子三相电流波形

图 7 为直流电压的动态过程。给定直流电压为 150 V,系统为零初始状态下开始建立直流电压,电机运行于亚同步状态,直流电压快速稳定到给定值;0.6 s时电机由亚同步运行变为超同步运行,直流电压经过一段时间后仍稳定在给定值。

图 8 给出了电机在亚同步和超同步运行时网

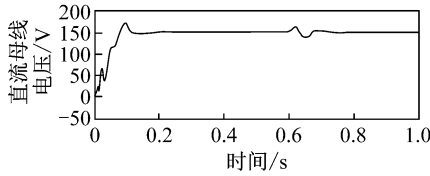


图7 直流侧电压动态过程

侧 A 相输入电流和电压的波形。从图中可以看出,当电机亚同步运行时,网侧输入电流和电压同相位,网侧变换器处于整流状态;当电机超同步运行时,网侧输入电流和电压反相位,网侧变换器处于逆变状态。不管是何种运行状态,网侧始终保持单位功率因数。

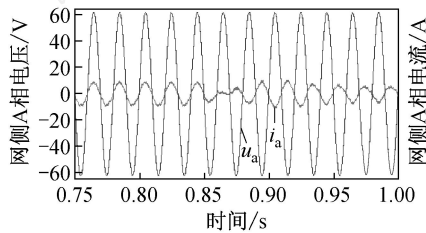


图8 网侧 A 相输入电流和电压波形

图 9 给出了转子 d 轴电流由 -15 A 转变为零时定子有功无功及 A 相电压和电流波形。从图中可以看出,当转子 d 轴电流为 -15 A 时,定子无功功率为零,定子只输出有功功率,定子电压和电流保持反相位,即:当转子 d 轴电流变为零时,定子有功功率保持不变,无功功率发生跳变,定子电压和电流相位发生改变。由此可见,通过调节转子 d 轴电流可以调节定子无功功率。

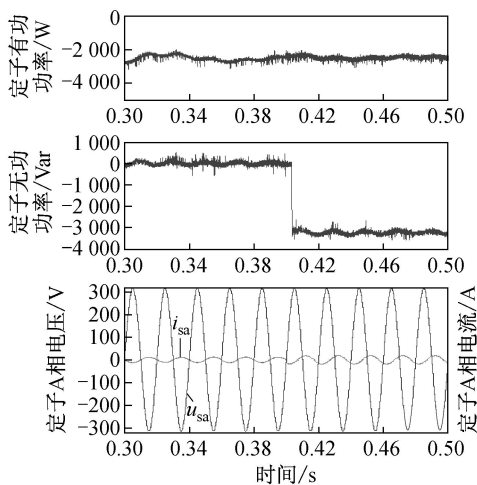


图9 定子无功控制波形

3 结 语

本文在双 PWM 变换器励磁的基础上,进行了 DFIG 变速恒频风力发电系统控制策略的分析,并依此建立了仿真模型,进行了仿真试验。通过对仿真结果的分析,得出此变速恒频风电系统具有良好的动态和稳态性能,系统输入输出功率因数可调整为单位功率因数,可以有效地调节发电机输出功率,对后期风力发电系统的研究有重要意义。

【参考文献】

- [1] Muller S, Deiche M, De Doncker R W. Doubly fed induction generator systems for wind turbines [J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2002, 8 (3): 26-33.
- [2] 伍小杰,柴建云,王祥珩. 变速恒频双馈风力发电系统交流励磁综述 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (23): 92-96.
- [3] 郭金东,赵栋利,林资旭,等. 变速恒频双馈风力发电机励磁电源控制技术 [J]. 电力电子技术, 2007, 41 (4): 1-3.
- [4] 苑国锋,柴建云,李永东. 变速恒频风力发电机组励磁变频器的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (8): 90-94.
- [5] Piergiovanni La Seta, Peter Schegner. New control scheme for doubly-fed induction generators to improve transient stability [C]. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2007: 1-10.
- [6] Zhou Y, Bauer P, Ferreira J A, et al. Control of DFIG under unsymmetrical voltage dip [C]. IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2007: 933-938.
- [7] 郭金东,赵栋利,林资旭,等. 兆瓦级变速恒频风力发电机组控制系统 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (6): 1-6.
- [8] 谢震,张兴,曹仁贤,等. 双馈风力发电用交直交变频器控制策略的研究 [J]. 太阳能学报, 2007, 28 (8): 825-829.
- [9] 陆城. 变速恒频风力发电用双 PWM 变换器的协调控制 [D]. 北京:中国科学院研究生院, 2004.
- [10] 王锋,姜建国. 风力发电机用双 PWM 变换器的功率平衡联合控制策略研究 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 11, 26 (22): 134-139.

收稿日期: 2009-02-20