

变速恒频双馈风力发电用交直交变流器控制策略的研究

谢震¹, 张兴¹, 曹仁贤², 黄学飞², 张崇巍¹

(1 合肥工业大学电气与自动化工程学院, 合肥 230009; 2 合肥阳光电源有限公司, 合肥 230011)

摘要: 本文概述了变速恒频双馈风力发电用交直交变流器的工作原理, 转子侧变流器采用基于最大功率点跟踪的并网发电解耦控制策略, 网侧变流器采用基于固定开关频率与电网电动势前馈相结合的双闭环控制策略, 构建了 110KW 变速恒频双馈风力发电模拟平台, 经过实验结果分析验证了上述控制策略的有效性和可行性。

关键词: 双馈发电机; 最大功率点跟踪; 解耦控制; 交直交变流器

中图分类号: TM315

文献标识码: A

文章编号:

Study on the control strategy of AC-DC-AC convertor used in variable speed constant frequency wind turbine system driven by doubly fed induction generator

Xie Zhen¹, Zhang Xing¹, Cao Renxian², Huang Xuefei², Zhang Chongwei¹

(¹Hefei University of technology, Heifei 230009, China;

²HeFei Sunlight Power Supply(SPS) Co. Ltd, Hefei 230011, China)

Abstract: The theory of AC-DC-AC convertor for variable speed constant frequency wind turbine system driven by doubly fed induction generator is analyzed in this paper. the control strategy of grid connected based on speed MPPT is used in the rotor convertor, the control strategy with fixed switching frequency and grid voltage forward-fed is used in the grid convertor. 110kw VSCF doubly fed induction generator wind power system is constructed in the laboratory, which realizes the decoupled control of the active power and reactive power for stator output, which proves validity and reliability of control strategy by research and analyse of resulation.

Keywords: Doubly fed induction generator; MPPT; decoupled control; AC-DC-AC convertor

0 引言

在能源危机日益严重的今天, 风能作为一种清洁的、经济可行的绿色可再生能源, 受到人类的广泛关注。近年来风力发电相关技术得到了迅速发展, 随着风力发电单机容量不断增加, 尤其是兆瓦级风力发电机的出现, 变速恒频双馈风力发电系统由于能够实现有功功率, 无功功率的前馈解耦控制^[1-4], 对电网可以起到无功补偿的作用, 而且能够最大限度捕获风能^[5-7], 提高发电效率, 已成为目前风力发电系统的主流方向。

变速恒频双馈风力发电用的转子励磁电源是一个交直交变流装置, 是两个变流器通过中间直流环节的连接。常规设计中这两个变流器分别采用二极管整流器和晶闸管有源逆变器, 存在电流谐波比较大、动态响应慢、损耗大以及不能实现四象限运行等缺点。本系统中对两个变流环节均采用基于全控型器件的四象限运行的 PWM 变流器, 提高系统的动态响应, 减少损耗和冲击, 实现电能的双向传输。转子侧变流器采用一种不依赖于风机参数和空气密度的最大功率点跟踪并网发电控制策略, 网侧变流器采用基于固定开关频率与电网电动势前馈相结合的双闭环控制策略, 实现了发电机定子侧有功、无功的前馈解耦控制和最大风能捕获控制, 而且还实现了网侧变流器单位功率因数正弦波电流并网发电运行。

1 交直交变流器工作原理

变速恒频双馈风力发电系统结构如图1所示，在变速恒频双馈风力发电系统中，双馈发电机定子绕组接入工频电网，转子绕组接入一个频率、幅值、相位都可以调节的三相交流电源，而这个三相交流电源通常采用背靠背交直交四象限变流器。这种系统的关键就是通过对转子馈电的控制实现定子侧恒压恒频的电力输出，当发电机处于亚同步状态时，交直交变流器向发电机转子侧提供正向励磁电流，输入有功功率；当发电机处于超同步状态时，交直交变流器向发电机转子侧提供负向励磁电流，抽取有功功率。实现了能量在网侧和转子侧的双向流动。在控制系统设计中采用两个DSP分别对转子侧变流器和网侧变流器进行控制。交直交变流器具有以下特点：

- 1) 配置的四象限交直交双向变流器的功率仅是系统额定容量的一部分，有利于减小变流器体积，降低系统成本和投资；
- 2) 利用转子侧励磁电流控制定子侧的无功功率；利用转子侧电磁转矩电流控制定子侧的有功功率，实现定子侧有功功率和无功功率的独立调节。
- 3) 网侧变流器能够实现单位功率因数的正弦波控制。

基于以上优点，交直交变流器已成为变速恒频双馈风力发电用变流器的首选方案之一。

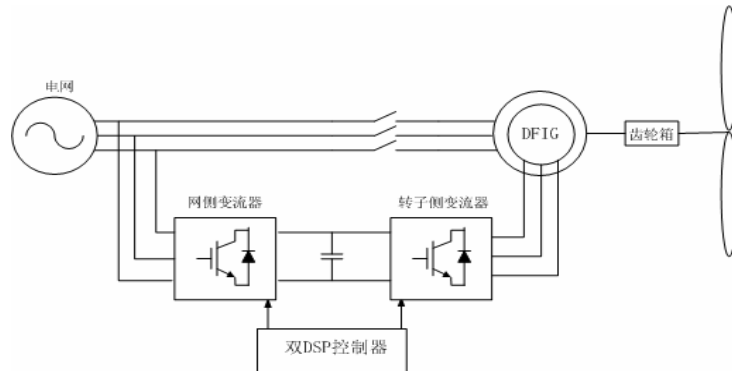


图1 变速恒频双馈风力发电系统结构图

Fig.1 System structure for DFIG

2 转子励磁变流器的控制策略

2.1 定子并网发电的解耦控制策略

将定子侧取发电机的惯例，转子侧取电动机惯例，采用定子磁场定向，由于双馈发电机的定子总是接在工频 50Hz 的大电网上，定子绕组的电阻比其电抗小很多，定子绕组上的压降可以忽略不计。定子磁链与定子电压矢量近似互相垂直，当把 dq 坐标系的 d 轴定向在定子磁链上时，定子磁链的 q 轴分量为零，相电压矢量比磁链矢量滞后 90° ，则和 q 轴的负方向重合。

如果定子磁链保持恒定，则由双馈发电机在同步作标系下的数学模型可得：

$$u_{rd} = R_r i_{rd} + b \frac{di_{rd}}{dt} - b \omega_s i_{rq} \quad (1)$$

$$u_{rq} = R_r i_{rq} + b \frac{di_{rq}}{dt} - a \omega_s \psi_1 + b \omega_s i_{rd} \quad (2)$$

$$\text{式中 } a = \frac{l_m}{l_s}, \quad b = l_r \left(1 - \frac{l_m^2}{l_s l_r}\right)$$

$$u_{rdc} = -b \omega_s i_{rq} \quad (3)$$

$$u_{rqc} = -a \omega_s \psi_1 + b \omega_s i_{rd} \quad (4)$$

双馈发电机的最大风能捕获控制就是通过控制其转速，在风速变化时，使双馈发电机的转速跟随风速变化，保证风机的叶尖速比恒定，此时风机的输出功率最大。风机的最大输出功率还取决于风机的本身特性和空气的密度，由于这些参数的不确定性使得 k 值不可能在任何状态下达到最优，因此会造成最大风能捕获曲线的轨迹偏移，输出功率将有损失，因此采用一种不依赖于风机参数和空气密度的最大风能捕获算法。当风速或转速发生变化都会引起系统输出功率的变化，设第 k 次采样时，功率变化量为 ΔP ，转速变化量为 $\Delta \omega$ ，则转速调节器的指令信号变化方向如表 1 所示，指令信号的大小如式 (8) 所示。

$$|\Delta \omega| = k_i \cdot |\Delta P| \quad (8)$$

当功率变化量 ΔP 小于某一允许给定值时，近似认为系统达到当前风速下的最大功率点，即由图 4 可知在当前风速的最大功率点处 $\frac{dP}{d\omega} = 0$ ，此时速度外环维持当前转速不变。由图 4 可知 k_i 在低风速区值明显大于高风速区值，如果 k_i 值取得过大将会造成在高风速区发电机转矩的脉动，因此考虑到系统的快速性和最大功率点不发生漂移， k_i 应取不同风速区间的最小值。即：

$$k_i < \frac{|\Delta \omega|}{|\Delta P|} \quad (9)$$

表 1 转速指令方向判断

Table 1 selection of the speed direction

判断条件	$\Delta \omega(k-1) = 0$	$\Delta \omega(k-1) > 0$	$\Delta \omega(k-1) < 0$
$\Delta P(k) > 0$	$\Delta \omega(k) > 0$	$\Delta \omega(k) > 0$	$\Delta \omega(k) < 0$
$\Delta P(k) < 0$	$\Delta \omega(k) < 0$	$\Delta \omega(k) < 0$	$\Delta \omega(k) > 0$

如图 4 所示假定在风速 v_2 下，系统最初工作在 P_1 点，如果风速阶跃变化到 v_3 ，产生更高的动力矩使系统加速，速度调节器通过增加发电机的阻力矩提高功率输出，工作点转移到 P_2 点。根据上述算法转速指令将朝增加的方向变化，而为了能够加速系统，发电机阻力矩应该立即减小，使得系统加速。最后发电机阻力矩逐渐增加和风机输出转矩平衡，达到当前风速下的最大功率工作点 P_3 。如果功率采样和最大风能捕获算法的时间与速度调节器的周期相当，将会得到有关功率变化量 ΔP 错误的信息，导致由于发电机转矩的波动而使系统在工作点发生震荡。因此功率采样和风能捕获算法的周期应该大于速度环的周期。本系统中功率采样和风能捕获算法的运行周期四倍于速度环调节周期。

3 网侧变流器的控制策略^[9-10]

网侧变流器采用的是 PWM 固定开关频率的直接电流控制，具有输入电流为正弦波、功率因数可控、能向电网回馈电能等优点。当双馈发电机工作在亚同步状态时，网侧变流器从电网吸收能量，工作在整流状态；当双馈发电机工作在超同步状态时，能量从直流侧回馈到电网，网侧变流器工作在逆变状态。直流母线电压恒定并且具有良好的动态响应能力，网侧单位功率因数控制和输入电流为正弦波是网侧变流器的控制目标。其拓扑与控制结构如图 4 所示。

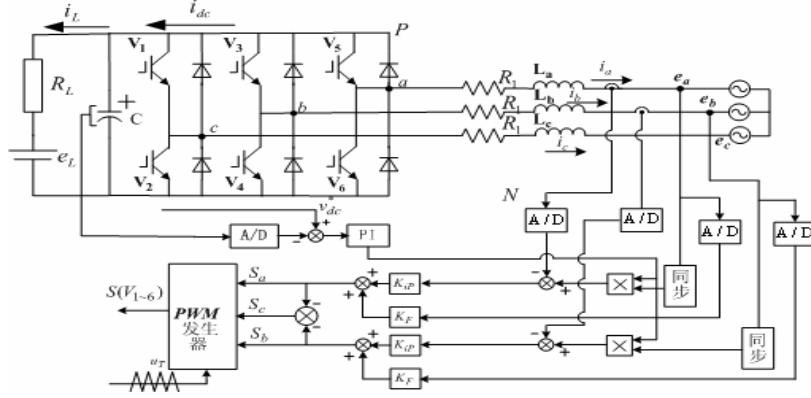


图4 网侧变流器的拓扑与控制结构图

Fig.4 The topology and control of the grid convertor

考虑到电网电动势为三相平稳的纯正弦波电动势，对称且稳定；网侧滤波电感 L 是线性的不考虑饱和；用电阻 R_L 和直流电动势 e_L 串联表示直流侧负载；开关器件为理想开关。根据网侧变流器的工作原理和基尔霍夫电压电流定律，可得其基于开关函数的数学模型：

$$L \frac{di_k}{dt} + i_k R = e_k - (V_{dc} S_k - \frac{V_{dc}}{3} \sum_{k=a,b,c} S_k) \quad (10)$$

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (11)$$

$$e_a + e_b + e_c = 0 \quad (12)$$

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = i_d - i_a s_a + i_b s_b + i_c s_c \quad (13)$$

其中 $S_k = \begin{cases} 1, & (\text{上臂导通, 下臂关断}) \\ 0, & (\text{上臂关断, 下臂导通}) \end{cases} \quad k = a, b, c$

如图4所示，系统采用电流电压双闭环的控制结构，内环为电流环，控制的是交流侧电感的交流电流，为了保证系统的快速响应能力，电流内环采用比例调节器控制，同时为了克服电网电动势的扰动，需要加入电网电动势的前馈控制。以A相为例，图5(a)为电流内环的结构框图。

$e \times \frac{K_{pwm}}{Ts + 1} \times K_F - e = 0$ ，由于开关频率较高，系统工作在幅频特性的高频段，

同时由于变流装置的滞后时间常数 T 同系统工作频带相对应的时间常数相比很小，不会对系统工作频带的性能产生显著影响，可忽略不计。所以可得前馈系数 $K_F = 1/K_{pwm}$ 。

电压外环保证直流母线电压恒定，其控制的目的是为了稳定 PWM 变流器直流侧电压，也是给转子侧变流器提供一个稳定的电压，从而实现能量的双向流动，为了消除系统静态误差，采用防积分饱和的 PI 调节器。在对电流内环等效处理后，图5(b)为电压外环的控制结构等效框图。由于系统含小惯性环节，对系统降阶处理后可得其闭环传递函数如式(14)所示，这是一个典型的二阶系统，按照调节器的模最佳整定原则设计。

$$\frac{K_1 K_s R_d (\tau s + 1)}{\tau (T_1 + K_2 C R_d) s^2 + \tau (K_2 + K_s K_1 R_d) s + K_s K_1 R_d} \quad (14)$$

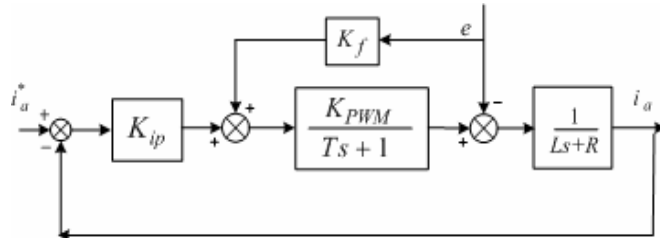


图5(a) 电网电动势前馈控制的电流内环结构框图

Fig.5(a) The current loop control frame with grid voltage forward-fed

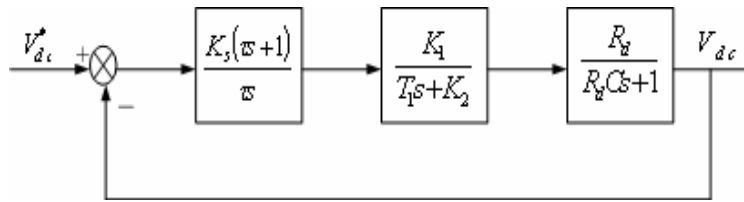


图 5(b) 电压外环控制结构框图
Fig.5(b) The voltage loop control frame

4 实验结果分析

为验证上述控制策略的实用性，在实验室构建了 110KW 的变速恒频双馈风力发电的模拟平台，双馈发电机参数： $P_N:110KW, U_s=380V, I_s=214A, U_r=505V, I_r=132A, n=990r/min, R_s=0.032\Omega, R_r=0.028\Omega, l_s=0.21H, l_r=0.32H, l_m=2.13H$ 。网侧变流器的额定功率为 30KW，直流母线电压 400V，直流侧平波电容 6600uf，网侧电感 0.7mH，额定电流 90A。另外用变频器驱动一台三相鼠笼式异步电机在实验室条件下模拟风力机的特性。控制系统采用双 DSP 的控制结构分别控制转子侧变流器和网侧变流器。

图 6(a)为模拟风速阶跃时，励磁电流 i_{rd} 与电磁转矩电流 i_{rq} 的波形，转子电流 i_{rq} 阶跃变化时，转子电流 i_{rd} 基本保持不变，也就是定子有功功率发生变化时，定子无功功率基本不受影响，图 6(b)为发电机无功发生变化时，转子励磁电流 i_{rd} 与电磁转矩电流 i_{rq} 的波形，也就是定子无功功率发生变化时，定子有功功率基本不受影响，实现了定子有功、无功功率的前馈解耦控制；图 7 为单位功率因数下定子侧 A 相电压、电流波形，此时发电机励磁全部由转子提供，发电机向电网输出的全是有功功率，图 8 为风速阶跃时 i_{rq} 反馈信号和指令信号， i_{rq} 反馈信号基本跟随指令信号，动态响应较快，即发电机能迅速达到当前风速下最大功率点所对应的的转速，较好的追踪最大风能捕获曲线。

图 9(a)为双馈发电机亚同步运行时，网侧 A 相交流电压、电流波形，此时系统运行在正的单位功率因数下，网侧变流器运行在整流状态，能量从发电机定子侧馈入电网，图 9(b)为双馈发电机超同步运行时，网侧 A 相交流电压、电流波形，此时系统运行在负的单位功率因数下，网侧变流器运行在逆变状态，能量分别从发电机转子侧和定子侧馈入电网。实现了网侧单位功率因数的正弦波控制。

5 结束语

本文详细分析了变速恒频双馈风力发电用交直交变流器的工作原理，转子侧励磁变流器采用基于最大功率点跟踪的并网发电解耦控制策略，网侧变流器采用固定开关频率与电网电动势前馈相结合的双闭环控制策略，通过 110KW 变速恒频双馈风力发电模拟平台的结果分析表明，交直交变流器作为变速恒频双馈风力发电用励磁电源的有效性和可靠性，为兆瓦级的风力发电技术的研究提供了良好的平台。

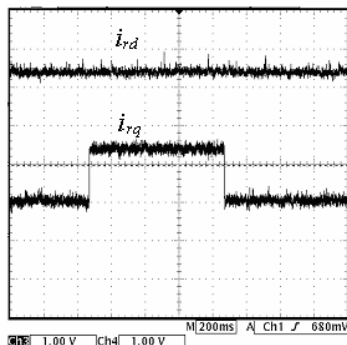


图 6(a) 风速阶跃时 i_{rd} 、 i_{rq}

Fig.6(a) the i_{rd} and i_{rq} with change of wind velocity

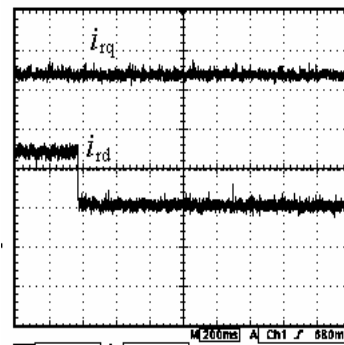


图 6(b) 风速阶跃时 i_{rq} 、 i_{rd}

Fig.6(b) the i_{rq} and i_{rd} with change of wind velocity

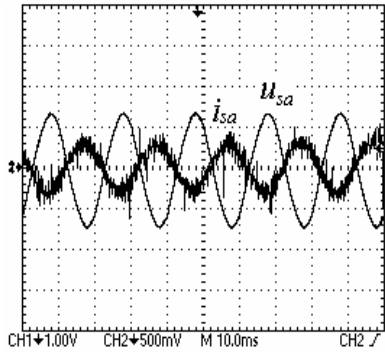


图7 定子电压、电流波形

Fig.7 the stator voltage and current

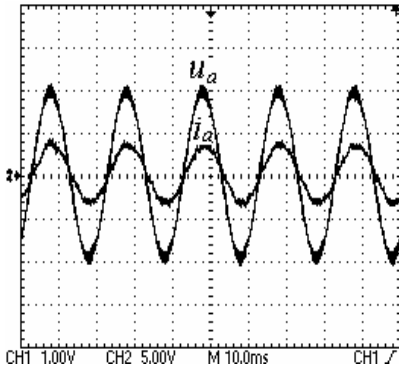


图 9(a) 亚同步网侧电压、电流波形

Fig.9(a) The grid voltage and current in sub-synchronization

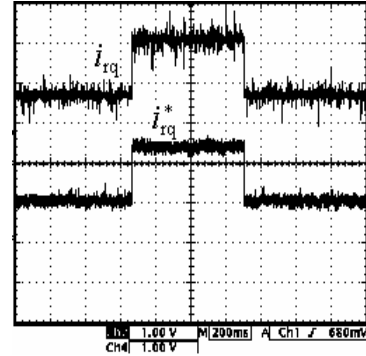


图8 风速阶跃时 i_{rq} 、 i_{rq}^*

Fig.8 the i_{rq} and i_{rq}^* with change of wind velocity

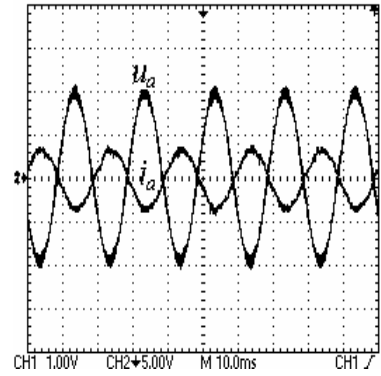


图 9(b) 超同步网侧电压、电流波形

Fig.9(b) The grid voltage and current in sup-synchronization

参考文献

- [1] 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. Electric Power Applications, IEE Proceedings, 1996, 231~241
- [2] Muller S, Deicke M, De Doncker Rik W. Doubly fed induction generator systems for wind turbines. IEEE Industry Applications Magazine. May, 2002, 26~33
- [3] Dajib Datta and V.T. Ranganathan. Decoupled control of active and reactive power for a grid-connected doubly-fed wound rotor induction machine without position sensors Conference Record of the IEEE Industry Application Systems Annual Meeting. pp. 2623~2630, 1999
- [4] Tang Y, Xu L. A flexible active and reactive power control strategy for a variable speed constant frequency generating system. IEEE Trans Power Electronics, 1996, 10(4): 472~478
- [5] Rajib Datta and V. T. Ranganathan. A Method of Tracking the Peak Power Points for a Variable Speed Wind Energy Conversion System. IEEE Transactions on energy conversion. 2003, 3. 163~168
- [6] Wang Q., Chang L.C.. An Intelligent Maximum Power Extraction Algorithm for Inverter-Based Variable Speed Wind Turbine Systems[J]. IEEE Trans. Power Electronics 2004 (19) 1242~1249
- [7] A.B.Raju, K.Chatterjee, B.G.Fernandes. A Simple Maximum Power Point Tracker for Grid connected Variable Speed Wind Energy Conversion System with Reduced Switch Count Power Converters. IEEE, 2003, 6; 748~753
- [8] 秦晓平、王克成, 感应电动机的双馈调速和串级调速 机械工业出版社 1990
- [9] 曹仁贤, 赵为, 屠运武等 变速风力发电系统的电源变换技术[J]. 变频器世界 2004, 11
- [10] 张崇巍, 张兴, PWM 整流器及其控制, 北京: 机械工业出版社, 2002: 62~65