

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2013.03.010

# 双馈异步风力发电机矢量控制研究

杨广文<sup>1</sup>, 肖强晖<sup>1</sup>, 朱广辉<sup>2</sup>, 刘国平<sup>2</sup>

(1. 湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 湘电集团 风力发电国家重点实验室, 湖南 湘潭 411101)

**摘要:** 根据交流励磁变速恒频风力发电系统的运行特性, 将矢量控制技术应用于双馈异步风力发电机的控制。机侧变流器采用定子磁链定向矢量控制, 网侧变流器采用电网电压定向矢量控制, 2个控制器共同作用, 其工作状态根据双馈异步风力发电机的运行状态自由切换。试验结果表明: 本控制方法能实现功率的双向流动, 保证了双馈异步风力发电机稳定的并网运行。

**关键词:** 双馈异步风力发电机; 矢量控制; 定子磁链定向; 电网电压定向

**中图分类号:** TM301.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2013)03-0046-05

## The Research of Vector Control for Double-Fed Asynchronous Wind Turbine

Yang Guangwen<sup>1</sup>, Xiao Qianghui<sup>1</sup>, Zhu Guanghui<sup>2</sup>, Liu Guoping<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. State Key Laboratory of Wind Power, Xiangtan Electric Manufacturing Group, Xiangtan Hunan 411101, China)

**Abstract:** According to the operating characteristics of AC excitation VSCF wind power generation system, the vector control technology is used for the control of the doubly-fed asynchronous wind turbine. Stator flux oriented vector control is used for generator-side converter, grid voltage oriented vector control is used for grid-side converter, and the two controllers operate together. The working state based on doubly-fed induction wind turbine operation state switches freely. Experimental results show that the control method achieves power two-way flow and ensures the double-fed induction wind turbine stably grid-connected operation.

**Keywords:** double-fed asynchronous wind turbine; vector control; stator flux oriented; grid voltage orientation

## 0 引言

能源是人类赖以生存和发展的重要物质基础。随着人类社会的进步与发展, 人类对能源的需求在不断地增长, 而风能作为潜力巨大的可再生清洁能源, 具有成为未来能源结构中重要组成部分的资源基础<sup>[1]</sup>。我国地大物博, 风能资源储量非常丰富。随着我国风力发电技术的快速发展, 国内建设了一批大规模的并网风力发电工程, 因此, 对于大功率风力发电机组的需求越来越大<sup>[2]</sup>。但是随着风力发电

机组功率地增加, 并入电网时所产生的冲击电流也随之增大, 严重时可能会导致风力发电系统无法接入电网, 这给电力系统的安全运行带来了隐患<sup>[3]</sup>。目前, 大型风力发电机组、双馈感应式变速恒频风力发电机组得到的应用最广, 实现变速恒频双馈风力发电机组无冲击电流并网技术越来越重要<sup>[4]</sup>。

因此, 本文提出了将矢量控制技术应用于双馈异步风力发电机的控制, 介绍了双馈风力发电机组机侧和网侧的矢量控制过程。本方法为后续对低电压穿越的研究奠定了基础。

收稿日期: 2013-03-27

基金项目: 国能科技基金资助项目([2011]276号)

作者简介: 杨广文(1988-), 男, 河南信阳人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为现代电力电子技术及系统,

E-mail: ygwly2012@163.com

# 1 数学模型

在两相任意转速 $\omega$ 旋转 $d-q$ 坐标系中,假定定、转子三相绕组对称且不计零轴分量<sup>[5]</sup>,依据交流电机的坐标变换理论,采用单相幅值不变原则,则双馈异步风力发电机数学模型如下:

$$\begin{cases} \psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd}, \\ \psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq}, \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \psi_{rd} = L_m i_{sd} + L_r i_{rd}, \\ \psi_{rq} = L_m i_{sq} + L_r i_{rq}, \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + p\psi_{sd} - \omega\psi_{sq}, \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + p\psi_{sq} + \omega\psi_{sd}, \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} u_{rd} = R_r i_{rd} + p\psi_{rd} - (\omega - \omega_r)\psi_{rq}, \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + p\psi_{rq} + (\omega - \omega_r)\psi_{rd}, \end{cases} \quad (4)$$

$$T_e = n_p L_m (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq}) \quad (5)$$

式中: $\psi_{sd}, \psi_{sq}, \psi_{rd}, \psi_{rq}$  分别表示定、转子磁链矢量的 $d, q$ 轴分量;

$i_{sd}, i_{sq}, i_{rd}, i_{rq}$  分别表示定、转子电流矢量的 $d, q$ 轴分量;

$u_{sd}, u_{sq}, u_{rd}, u_{rq}$  分别表示定、转子电压矢量的 $d, q$ 轴分量;

$L_m$  为定转子间互感;

$L_s$  为定子自感;

$L_r$  为转子自感;

$p$  为微分算子;

$\omega_r$  为转子转速;

$T_e$  为电磁转矩;

$n_p$  为发电机电对数。

# 2 变流器控制

## 2.1 双馈异步风力发电系统控制结构

双馈异步风力发电机的定子绕组直接与电网相

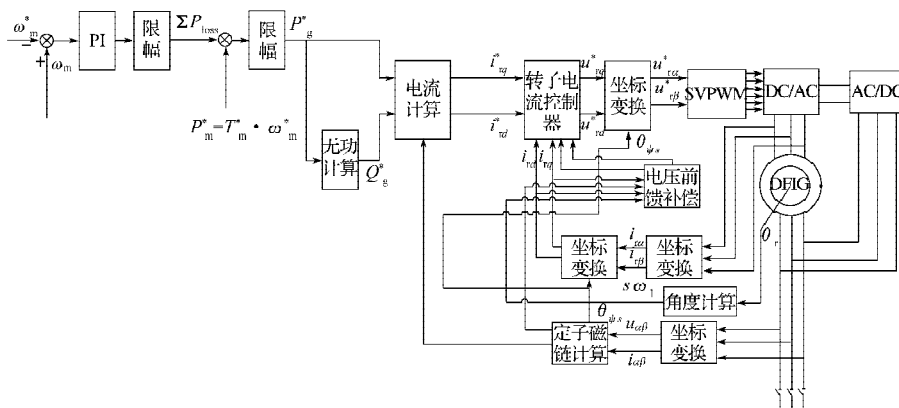


图2 机侧变流器控制结构图

Fig. 2 The control structure diagram of generator-side converter

连<sup>[6]</sup>,转子绕组通过变频器与电网连接,转子绕组电源的频率、电压、幅值和相位按运行要求由变频器自动调节,机组可以在不同的转速下实现恒频发电,以满足用电负载和并网的要求。由于采用了交流励磁,发电机和电力系统构成了“柔性连接”,可以根据电网电压、电流和发电机的转速来调节励磁电流,精确地调节发电机输出电压,使其能满足输出有功和无功的要求<sup>[7]</sup>。

双馈异步风力发电机定子电压是由电网提供,转子电压由变流器提供。该系统允许在限定的较大范围内变速运行。通过控制注入变流器的转子电流频率,变流器对机械频率和电频率之差进行补偿。在正常运行和故障期间,发电机的运转状态由变流器及其控制电路控制<sup>[8]</sup>。该系统的变流器由2部分组成机侧变流器和电网侧变流器,这2部分是彼此独立控制的。有功功率是馈入转子还是从转子提取取决于电机的运行状态,在超同步状态,功率从转子通过变流器馈入电网;而在欠同步状态,功率反方向传送。在2种情况(超同步和欠同步)下,定子都向电网馈电<sup>[9]</sup>。双馈异步风力发电系统控制结构如图1所示。

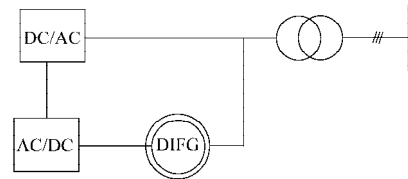


图1 双馈异步风力发电系统控制结构图

Fig. 1 The control structure diagram for double-fed induction wind power system

## 2.2 机侧变流器控制

机侧变流器控制结构采用间接定子磁链定向矢量控制,定子侧采用发电机惯例,转子侧采用电动机惯例<sup>[10-11]</sup>,如图2所示。

在机组工作的最大风速以下，由风力机最佳叶尖速比得到该风速下对应的电机最佳转速 $\omega_m^*$ ，将最佳转速 $\omega_m^*$ 减去电机转速的反馈值 $\omega_m$ ，得到差值 $\Delta\omega_m$ ，经过PI调节模块和限幅模块后，得到有功功率的总损耗 $\Sigma P_{loss}$ ，再将风力机输出的功率 $P_m^*$  ( $P_m^* = T_m^* \cdot \omega_m^*$ ，其中 $T_m^*$ 为转矩的给定值)减去总损耗 $\Sigma P_{loss}$ ，得到差值 $\Delta P$ ，经过限幅模块后，最终得到双馈型风力发电机输出有功功率的给定值 $P_g^*$ 。通过控制转速闭环控制有功和无功的输入、输出，得到

转子电流的 $d$ 轴和 $q$ 轴分量给定值，根据电机转子电流和电网电压的矢量变换得到 $d$ 轴和 $q$ 轴电压的反馈量，通过PI控制，最终得到转子电压 $\alpha, \beta$ 分量给定值，然后经过SVPWM (space vector pulse width modulation) 变换，控制机侧变流器。

### 2.3 网侧变流器控制

网侧变流器控制结构采用电网电压定向矢量控制，其维持直流母线电压的稳定，并控制输入功率因数，如图3所示。

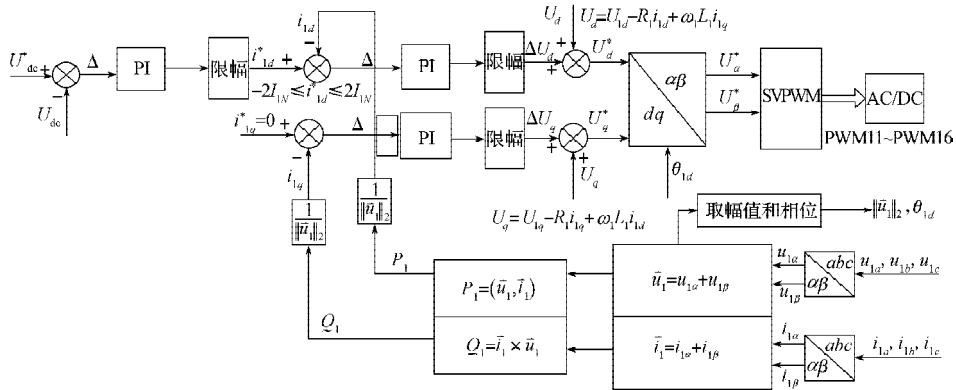


图3 网侧变流器控制结构图

Fig. 3 The control structure diagram of grid-side converter

该控制电路采用电压外环控制和电流内环控制<sup>[10]</sup>，即：

$$\begin{cases} U_d = U_{1d} - R_1 i_{1d} + \omega_1 L_1 i_{1q}, \\ U_q = U_{1q} - R_1 i_{1q} - \omega_1 L_1 i_{1d}. \end{cases} \quad (6)$$

式中：前馈  $U_d, U_q$  是根据稳态给出；  
 $L_1, R_1$  为三相交流输入每相的电感和电阻；  
 $\omega_1$  为电机（电网）同步角速度；  
 $U_{1d}, U_{1q}, i_{1d}, i_{1q}$  分别为交流单相电压、电流矢量

的  $d, q$  轴分量。

## 3 系统仿真及结果分析

利用Matlab/Simulink软件设计双馈异步风力发电系统，如图4所示。系统仿真参数设置为：电机容量2 MW，极对数为2，定子额定电压690 V，定子电阻0.006 001  $\Omega$ ，定子电感0.011 679 H，转子电阻0.004 701  $\Omega$ ，转子电感0.012 043 H。

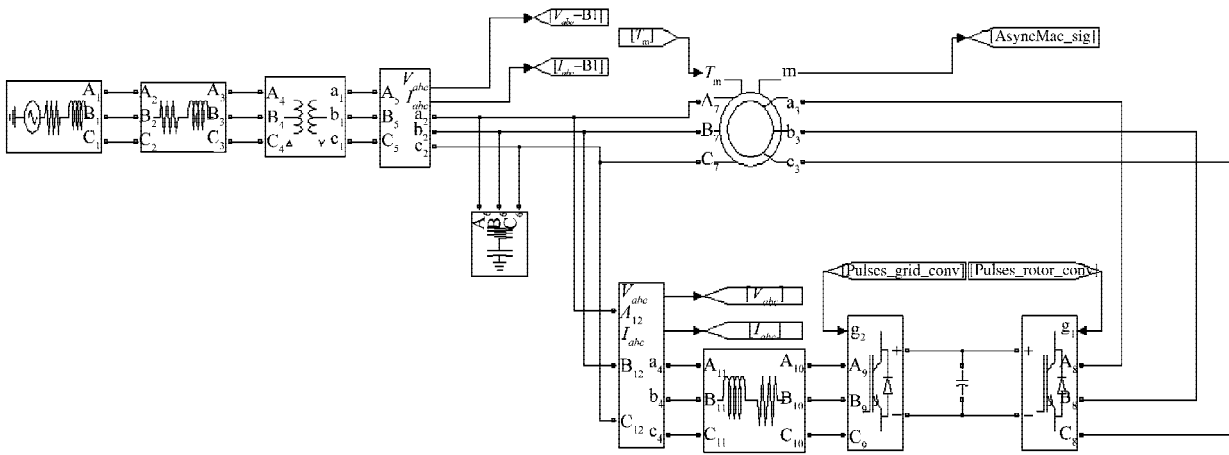


图4 双馈异步风力发电系统仿真主电路图

Fig. 4 The simulated main circuit of double-fed induction wind power system

图5为风速为12 m/s时有功功率和无功功率波形图，发电机采用发电机惯例。

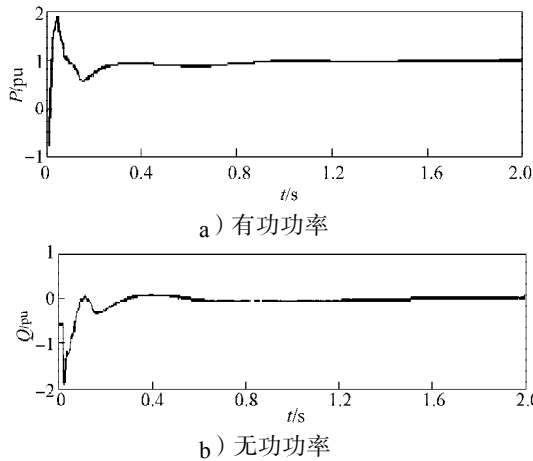


图5 有功功率和无功功率波形图

Fig. 5 The waveform of active power and reactive power

由图5可知,发电机输出的无功功率稳定于零,其全部输出的是有功功率,达到预期输出效果。

图6为直流母线电压波形图。

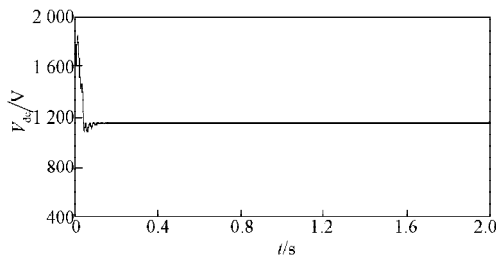


图6 直流母线电压波形图

Fig. 6 The waveform of DC bus voltage

由图6可知,直流母线电压能够快速稳定于额定值。这说明交直流侧功率能快速平衡,网侧变流器的控制能达到预期保持直流母线电压稳定的效果。

图7为定、转子单相电流波形图。图8为定子单相电压波形图。

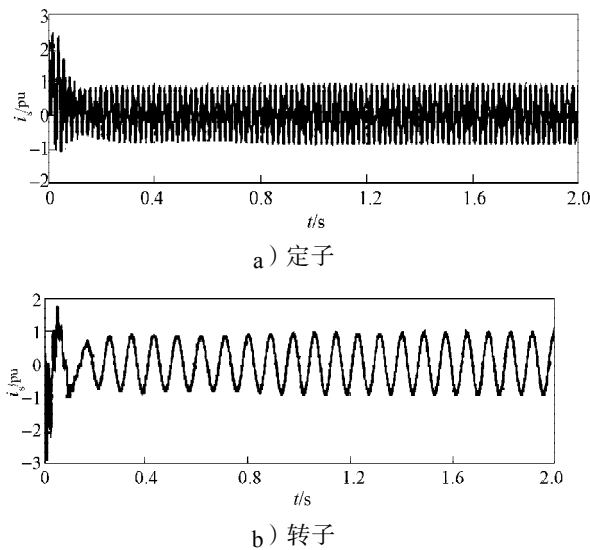


图7 定、转子单相电流波形图

Fig. 7 The stator and rotor single-phase current waveform

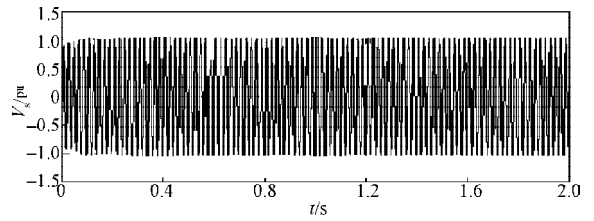


图8 定子单相电压波形图

Fig. 8 The waveform of stator phase voltage

由图7和图8可知,定、转子电流和定子电压为正弦波,达到预期控制的目的。功率、电流和电压能够被稳定平衡地控制,从而保证电机稳定地向电网供电。

根据2 MW双馈异步风力发电系统的参数进行仿真试验,系统仿真测试结果如图9所示。

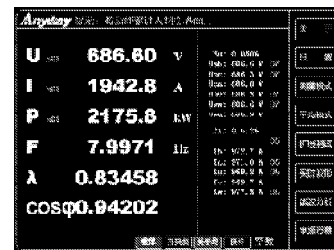


图9 试验实测数据

Fig. 9 The experimental measured data

由图9的试验实测数据可以看出,电压、电流和容量基本达到预期效果。

### 4 结语

本文对2 MW双馈异步风力发电系统进行了理论研究,并在Matlab/Simulink软件实现了双馈异步发电系统的仿真模型,验证了系统的有效性和正确性。试验结果表明,双馈异步风力发电机经过机侧和网侧变流器的矢量控制,系统响应速度较快,可有效控制电机输出的有功功率和无功功率,实现电机有功和无功的解耦控制,保持电机的稳定运行,从而能保证稳定的并网发电。本文为双馈异步风力发电系统的研究提供了理论基础。

### 参考文献:

[1] 贺益康, 郑康, 潘再平, 等. 交流励磁变速恒频风电系统运行研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(13): 55-59.  
He Yikang, Zheng Kang, Pan Zaiping, et al. Investigation on an AC Excited Variable-Speed Constant-Frequency Wind Power Generation System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (13): 55-59.

[2] 刘毅, 谭国俊, 刘敏, 等. 双馈风力发电机并网控

- 制研究[J]. 电力电子技术, 2011, 45(7): 22-23.
- Liu Yi, Tan Guojun, Liu Min, et al. Study on Grid-Connection Control of Doubly-Fed Wind Power Generator [J]. Power Electronics Technology, 2011, 45 (7): 22-23.
- [3] 孙智超. 双馈式变速恒频风力发电系统仿真研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- Sun Zhichao. Simulation of Doubly-Fed Variable Speed Wind Power Generation System[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.
- [4] 赵宇, 王奔, 张喜海, 等. 变速恒频双馈风力发电机并网控制策略仿真研究[J]. 四川电力技术, 2010, 33(2): 7-9.
- Zhao Yu, Wang Ben, Zhang Xihai, et al. Simulation Research of Grid Connection Control Scheme for Variable Speed Constant Frequency Doubly-Fed Wind-Energy Generator[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2010, 33 (2): 7-9.
- [5] 贺益康, 胡家兵, 徐烈. 并网双馈异步风力发电机运行控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012: 52-64.
- He Yikang, Hu Jiabing, Xu Lie. Grid-Connected Doubly-Fed Induction Wind Generator Control[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2012: 52-64.
- [6] 李生虎. 风力电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 80-90.
- Li Shenghu. Wind Power System Analysis[M]. Beijing: Science Press, 2012: 80-90.
- [7] 陈建军. 变速恒频双馈风电机组控制策略研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2012.
- Chen Jianjun. Variable Speed Constant Frequency Doubly-Fed Wind Turbine Control Strategy[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2012.
- [8] 易宏, 蒋铁铮, 徐蓓蓓, 等. 电网故障下交流励磁双馈风力发电机变流器建模与控制[J]. 电力科学与工程, 2012, 28(3): 1-6.
- Yi Hong, Jiang Tiezheng, Xu Beibei, et al. Modeling and Control for AC-Excited Double-Fed Wind Power Generation Converter Under Grid Fault[J]. Electric Power Science and Engineering, 2012, 28 (3): 1-6.
- [9] 万航羽. 风电场模型研究及应用[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
- Wan Hangyu. Aerospace Wind Farm Model Research and Application[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008.
- [10] 彭力, 张宇, 康勇, 等. 高性能逆变器模拟控制器设计方法[J]. 中国电机工程学报, 2006(6): 89-94.
- Peng Li, Zhang Yu, Kang Yong, et al. Design Method of Analog Controller for High-Performance Inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2006 (6): 89-94.
- [11] 胡文, 肖强晖. 双馈风力发电机空载并网控制策略研究[J]. 湖南工业大学学报, 2012, 26(6): 25-29.
- Hu Wen, Xiao Qianghui. Study on No-Load Connected-Grid Control Strategy of Doubly-Fed Wind Power Generator [J]. Journal of Hunan University of Technology, 2012, 26(6): 25-29.

(责任编辑: 邓彬)