

变速恒频风力发电机组励磁变频器的研究

苑国锋, 柴建云, 李永东

(清华大学电机系, 北京市 海淀区 100084)

STUDY ON EXCITATION CONVERTER OF VARIABLE SPEED CONSTANT FREQUENCY WIND GENERATION SYSTEM

YUAN Guo-feng, CHAI Jian-yun, LI Yong-dong

(Dept. of Electrical Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: A doubly-fed induction generator wind power system controlled by TMS320LF2407A and TMS320VC33 was developed. Based on the analysis of control strategy of the system, this paper used respectively voltage oriented and stator flux oriented vector control in grid side and rotor side of the converter. Some control methods, such as variable speed constant frequency(VSCF) technology, synchronizing control, are studied experimentally. Experimental results show that soft synchronizing can be implemented when the generator speed is within the permitted range and active/reactive power can be regulated independently. And the system can be applied to wind power generation system with megawatts level rated power.

KEY WORDS: Electric machinery; Wind generation; Back-to-back converter; VSCF

摘要: 研制了一套基于TMS320LF2407A和TMS320 VC33双DSP的风力发电系统。在分析了该系统控制方法的基础上,建立了交直交变频器网侧电压定向以及转子侧定子磁场定向的矢量控制系统模型。对系统的变速恒频控制、并网控制技术进行了实验研究,结果表明,该系统能够在发电机允许的速度范围内实现软并网,输入输出有功、无功功率可以独立调节,适合于兆瓦级风力发电系统。

关键词: 电机; 风力发电; 交直交变频器; 变速恒频

1 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了各国学者的广泛关注和重视^[1]。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^[2]。双馈风力发电系统是一种较合适的变速恒频方案^[3-4],其发电机的定子绕组接入工频电网,通过改变转子绕组供电电源的频率、幅值、相位、相序来实现变速恒频控制,

由于该方案的变频器只传递转差功率,所以其容量可以大大降低。

目前,双馈变速恒频风力发电系统所用变频装置通常有交交变频器^[5-6]或交直交变频器^[7-8]。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,目前已经被电压型交直交变频器所替代。近年来也有文献对矩阵变换器应用在双馈风力发电系统中进行研究^[9-10],但是由于矩阵变换器使用的器件数目较交直交变频器多,器件承受的耐压高,并且其输入输出控制不解耦,这些缺点在一定程度上限制了其在风力发电中的应用。

本文根据风力发电的特点研制了一套基于双DSP的电压型交直交双馈风力发电系统,该系统的变频器网侧采用电压定向的矢量控制,变频器转子侧则采用定子磁场定向的矢量控制。实验结果表明,该系统具有功率双向流动的能力,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,并且可以宽范围运行,能够实现风能以及其他不稳定能源的高质量发电。

2 系统构成

基于双 DSP 的电压型交直交双馈风力发电系统框图如图 1 所示。整个系统由双馈发电机、电压型交直交双向 PWM 变频器、双 DSP 控制器、并网保护装置以及虚拟变速风机 5 个部分构成。

系统中的双馈发电机是一台绕线式异步发电机。电压型交直交双 PWM 变频器则由两个背靠背三相整流/逆变器组成,二者之间由带有电容支撑的直流母线连接,其中的功率器件采用 IPM 模块,该变频器的一侧通过三相电感接入电网,另一侧则通

软并网。

图 5 为并网运行时定子相电压和定子相电流的稳态波形，图中的电压和电流相位差为 180° ，表明发电机向电网输出有功功率，且定子侧的功率因数为 1，这说明该系统具有良好的输出特性，可以供给电网低谐波、高功率因数的电能。

图 6 显示了发电机转速从亚同步速到超同步速变化时转子两相电流动态波形，在转速发生变化时，发电机转子电流的频率和相序都相应改变以保证定子电压频率恒定。图 7(a)是并网后发电机有功功率突然给定然后突然减小到零时通过实测电压电流换算得到的发电机有功功率和无功功率波形；图 7(b)是转子励磁电流给定突变时发电机有功功率和无功

功率的波形，由图可见，基于交直交型双馈变速恒频风力发电系统可以实现有功功率和无功功率的解耦控制，并且发电机的功率因数可以调节。

图 8 是系统在亚同步速和超同步速发电时网侧电压电流稳态波形，图中网侧电流波形接近正弦且功率因数约为 1。该实验表明该系统变频器的网侧整流器具有良好的输入特性，能量能够双向流动，满足双馈变速恒频风力发电的要求。图 9 是系统网侧

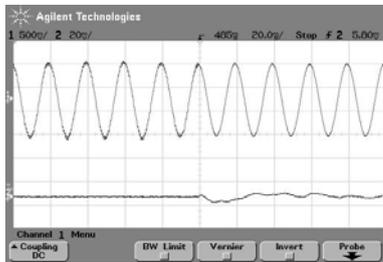


图 4 发电机并网时定子电压（上方）和定子电流（下方）
Fig. 4 Stator phase voltage(top) and current(bottom) at synchronization

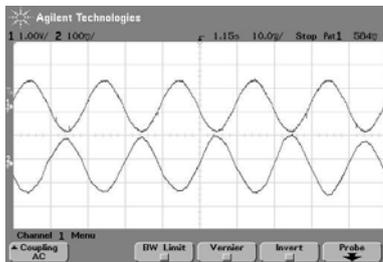


图 5 并网运行时定子相电压（上方）和定子相电流（下方）
Fig. 5 Stator phase voltage(top) and current(bottom) after synchronization

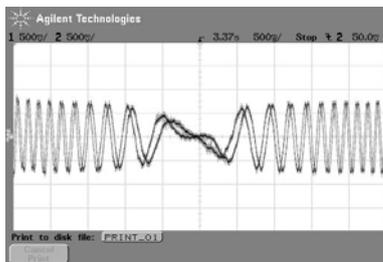
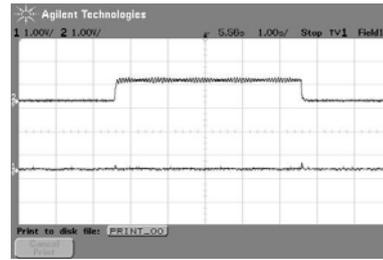
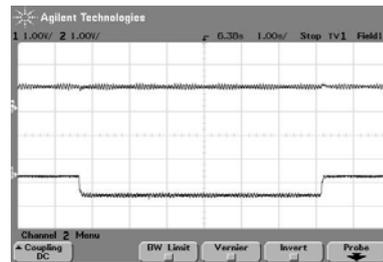


图 6 发电机转速从亚同步速到超同步速变化转子两相电流
Fig. 6 Two-phase rotor currents responding to rotation speed varying from sub-synchronization to sup-synchronization



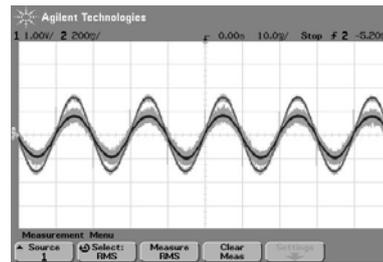
(a)有功突变



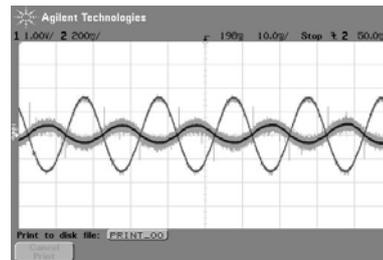
(b)无功突变

图 7 发电机有功(上方波形)无功(下方波形)功率的阶跃响应

Fig. 7 Step responses of stator active(top)/reactive(bottom) power



(a)亚同步速



(b)超同步速

图 8 网侧电压电流

Fig. 8 Voltage and current of grid side

变频器投入直流母线的动态响应波形,从实验结果可以看出,该系统的变频器的直流母线电压可以跟踪给定电压并保持稳定,具有良好的动态性能。

在该系统上的并网以及运行实验表明,在基于双 DSP 的电压型交直交双馈变速恒频风力发电系统中,发电机的定子侧和变频器网侧都可以运行在单位功率因数并且变频器的能量可以双向流动,同时输入输出电流波形可以保持正弦,该系统可以保证风力发电的电能质量。

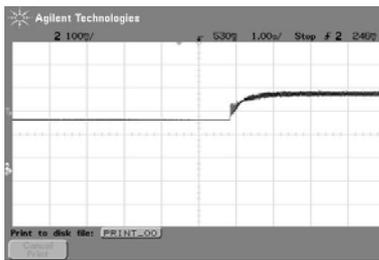


图9 变频器网侧整流器投入时直流母线动态响应
Fig.9 Dynamic response of DC link during starting

6 结论

本文针对变速恒频风力发电的特点研制了一套基于双 DSP 的电压型交直交变速恒频双馈风力发电系统。结合该系统的特点,本文建立交直交变频器网侧电压定向以及转子侧定子磁场定向的矢量控制系统模型,并在此基础上进行了实验研究。实验结果表明,交直交变速恒频双馈风力发电系统具有良好的动态和稳态性能,其系统输入输出功率因数可调,可以有效地控制和调节发电机输出功率,并且可以避免发电机并网和解列过程对电网和风轮机造成电气与机械冲击,尤其适合于功率超过兆瓦的大型风力发电装置。

参考文献

- [1] Muller S, Deicke M, De Doncker R W. Doubly fed induction generator systems for wind turbines[J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2002, 8(3): 26-33.
- [2] 林成武, 王凤翔, 姚兴佳. 变速恒频双馈风力发电机励磁控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 122-125.
Lin Chengwu, Wang Fengxiang, Yao Xingjia. Study on excitation control of VSCF doubly fed wind power generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 122-125.
- [3] Hansen L H, Blaabjerg F, Christensen H C *et al.* Generators and power electronics technology for wind turbines[C]. IEEE Proceeding of IECON'01, 2001.
- [4] 李辉, 杨顺昌, 廖勇. 并网双馈发电机电网电压定向励磁控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 159-162.
Li Hui, Yang Shunchang, Liao Yong. Studies on excitation control of power system voltage oriented for doubly fed generators connected to an infinite bus[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 159-162.
- [5] Yamamoto M, Motoyoshi O. Active and reactive power control for doubly fed wound rotor induction generator[J]. IEEE Transactions on power electronics, 1991, 6(4): 624-629.
- [6] 赵荣祥, 尹强, 许大中. 磁场定向交流励磁电机调速调功系统研究[J]. 电工电能新技术, 1998, 17(1): 15-19.
Zhao Rongxiang, Yin Qiang, Xu Dazhong. A novel magnet-field-oriented control system for the AC excited motor drives[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 1998, 17(1): 15-19.
- [7] Datta R, Ranganathan V T. Decoupled control of active and reactive power for a grid connected doubly fed wound rotor induction machine without position sensor[C]. IEEE-IAS Annual Meeting, Oct. 1999.
- [8] Pena R, Clare J C, Asher G M. Doubly fed induction generator using back to back PWM converter and its application to variable speed wind energy generation[J]. IEE Proceeding on Electric Power Applications, 1996, 143(3): 231-241.
- [9] 黄科元, 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.
Huang Keyuan, He Yikang, Bian Songjiang. Doubly fed wind power generation system excited by matrix converter[J]. Proceeding of the CSEE, 2002, 22(11): 100-105.
- [10] Zhang L, Watthanasarn C. A matrix converter excited doubly-fed induction machine as a wind power generator[C]. Seventh International Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives. Sept., 1998.
- [11] 辜承林, 韦忠朝, 黄声华, 等. 对转子交流励磁电流实行矢量控制的变速恒频发电机[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(2): 119-124.
Gu Chenglin, Wei Zhongzhao, Huang Shenghua *et al.* VSCF generator with vector control for rotor A.C.exciting current[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(2): 119-124.
- [12] Hopfensperger B, Atkinson D J, Lakin R A. Stator flux oriented control of a doubly fed induction machine with and without position encoder[J]. IEE Proc. Electr. Power Appl., 2000, 147(4): 241-250.
- [13] 张笑微, 李永东, 刘军. PWM 整流器控制策略的研究[J]. 电工技术杂志, 2003, 22(12): 57-59.
Zhang Xiaowei, Li Yongdong, Liu Jun. Current Control Strategies of Three phase AC-DC Voltage Source PWM Converter[J]. Electrotechnical Journal, 2003, 22(12): 57-59.

收稿日期: 2004-11-18。

作者简介:

苑国锋(1979-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为变速恒频风力发电系统控制技术;

柴建云(1961-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电机及其控制;

李永东(1962-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电气自动化和电机控制。