Vol.25 No.8 Apr. 2005 ©2005 Chin.Soc.for Elec.Eng.

文章编号: 0258-8013 (2005) 08-0090-05 中图分类号: TM614 文献标识码: A 学科分类号: 470-40

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-toback 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 是目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^[34],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 过滑环和电刷接入双馈发电机的转子绕组。并网保 护装置包括转子接触器和定子接触器两个部分,正 常运行时定子并网接触器接受来自控制器发出的并 网或者解列信号正常并网解列,如果双馈发电机组 的线路或机端发生线间或对地短路以及因转速过高 或过低造成发电机转子过压等故障时,则需要采取 保护措施,强制发电机脱离电网,保护过程中,首 先通过控制器发出解列信号断开定子侧的并网接触 器,并同时封锁转子励磁变频器的 PWM 输出信号, 在经一段时间衰减延时后,再发出断开转子接触器 的信号。系统中虚拟的变速风轮由一台直流电机和 SIEMENS 公司的 SIMOREG 可控硅直流调速系统 构成。

近年来,数字信号处理器(DSP)在各种电力电子 设备中得到了越来越广泛地应用,为了实现高性能 变速恒频风力发电的矢量控制,高性能的控制器是 必需的。本实验系统采用 TI 公司 TMS320LF2407A 定点 DSP 和 TMS320VC33 浮点 DSP 构成控制核心, 其中 LF2407A 主要负责与外设之间的数据交换、 PWM 信号以及并网解列信号的生成,VC33 主要用 于核心算法的实现;双 DSP 处理器之间的数据共 享,时序配合由双口 RAM 通过中断来完成,这样可 以保证控制的实时性;另外,双 DSP 控制板还采用 CPLD 作为程序存储器、数据存储器以及 I/O 空间 的地址译码和读写控制。



Fig. 1 Schematic of doubly fed induction generator wind power system

3 双馈电机矢量控制

3.1 双馈电机矢量控制原理

当把同步旋转坐标系的*d* 轴放在定子磁场上, 定子和转子侧都取电动机惯例时,双馈发电机的数 学模型为^[11-12]

$$u_{sd} = R_s i_{sd} + \mathbf{D} \psi_{sd} - \omega_s \psi_{sq} \tag{1}$$

$$u_{sq} = R_s i_{sq} + D\psi_{sq} + \omega_s \psi_{sd}$$
(2)

$$u_{rd} = R_r i_{rd} + D\psi_{rd} - \omega_{sl}\psi_{rq}$$
(3)

$$u_{rq} = R_r i_{rq} + D\psi_{rq} + \omega_{sl}\psi_{rd}$$
(4)

$$\psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} = L_m i_{ms} = \psi_s \tag{5}$$

$$i_{sq} = -L_m / L_s i_{rq} \tag{6}$$

$$\psi_{rd} = L_m^2 / L_s i_{ms} + \sigma L_r i_{rd} \tag{7}$$

$$\nu_{rq} = \sigma L_r i_{rq} \tag{8}$$

$$T_e = -p_n L_m^2 / L_s i_{ms} i_{rq} \tag{9}$$

式中 $u_{sd}, u_{sq}, u_{rd}, u_{rq}$ 分别为定转子 d, q 轴电压; $i_{sd}, i_{sq}, i_{rd}, i_{rq}$ 分别为定转子 d, q 轴电流; $\psi_{sd}, \psi_{sq}, \psi_{rd}, \psi_{rq}$ 分别为定转子 d, q 轴磁链; ψ_s 为定 子磁链; R_s, L_s 分别为定子的电阻和自感; R_r, L_r 分 别为转子的电阻和自感; L_m 为定、转子间的互感; i_{ms} 为定子广义励磁电流; $\sigma = 1 - L_m^2 / L_s L_r$ 为漏磁系 数; ω_s 为同步角速度; ω_{sl} 为滑差角速度; p_n 为电 机极对数; D为微分算子。

发电机正常运行时,定子电阻上的压降相对于 电网电压而言很小,可以忽略不计,则由式(2)可见, 定子磁链与定子电压存在如下关系

$$\psi_s = \psi_{sd} \approx u_{sq} / \omega_s \tag{10}$$

由式(10)可知,当电网电压幅值和频率不变时, 定子磁链将保持恒定且与定子电压矢量近似垂直, 定子广义励磁电流 *i_{ms}*大小不变。将式(7)、(8)分别 代入式(3)、(4),则有

$$u_{rd} = R_r i_{rd} + \sigma L_r di_{rd} / dt - \omega_{sl} \sigma L_r i_{rq}$$
(11)

$$u_{rq} = R_r i_{rq} + \sigma L_r \frac{\mathrm{d}i_{rq}}{\mathrm{d}t} + \omega_{sl} \frac{L_m^2}{L_s} i_{ms} + \omega_{sl} \sigma L_r i_{rd} (12)$$

图 2 为风力发电机的控制框图。当定子广义励 磁电流保持恒定时,电磁转矩正比于 *i_{rq}*,而转子励 磁由 *i_{rd}* 决定。当定子侧功率因数被控制为 1 时,发 电机的励磁电流全部由转子提供,即 *i^{*}_{rd}* = *i_{ms}*,这样, 就可实现发电机电磁转矩和转子励磁之间的完全解 耦控制。在经过前馈补偿去除由反电动势引起的交



Fig. 2 Vector control structure for doubly fed induction generator

叉耦合项后,可以通过调节转子电压的 d 轴分量和 q 轴分量分别控制发电机的转子磁链和电磁转矩。 据此,可以确定双馈异步风力发电机的控制框图 2。

3.2 并网控制

传统的风力发电机组通常采用额外的电力电子 并网装置来避免并网时的冲击电流,而变速恒频双 馈风力发电机系统则可以通过调节转子电流实现软 并网和软解列。一般的,变速恒频系统软并网需要 经过起动和并网运行两个阶段。在起动阶段,当风 速达到切入风速并维持一段时间后,风轮机带动发 电机升速达到发电机的最小运行速度。这时,励磁 变频器投入工作,控制定子绕组的空载端电压跟随 电网电压,并迅速达到同步,此过程中发电机采用 电压控制,即发电机处于空载状态,通过控制转子 励磁电流的幅值、相位和频率使并网条件自动得到 满足。进入并网运行阶段后,控制器根据实际的风 速和电网的要求动态调节发电机输出的有功功率和 无功功率。

双馈发电机的解列过程与并网过程相反。正常 解列时,可通过风轮机和发电机的控制,逐步卸去 发电机的负载,使发电机在接近空载的状态下脱网。 应当特别注意,脱网必须在发电机允许的运行转速 范围内进行。

4 网侧整流器矢量控制

对于电压型交直交双馈风力发电系统而言,变 频器网侧整流器的高性能控制是必需的。为此我们 首先在两相同步旋转坐标系下建立三相电压型 PWM整流器的数学模型^[13]

$$\mathbf{D}\begin{bmatrix} i_d\\ i_q\\ u_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega_e & -\frac{S_d}{L}\\ -\omega_e & -\frac{R}{L} & -\frac{S_q}{L}\\ \frac{S_d}{C_d} & \frac{S_q}{C_d} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d\\ i_q\\ u_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{u_d}{L}\\ \frac{u_q}{L}\\ -\frac{I_{do}}{C_d} \end{bmatrix}$$
(13)

式中 u_d, u_q 分别为网侧 d, q 轴电压; i_d, i_q 分别为网 侧 d, q 轴电流; u_{dc} 为直流母线电压; R、L分别为变 频器网侧的输入电阻和输入电感; C_d 为直流母线电 容; S_d, S_q 为两相同步旋转坐标系下等效开关函数; ω_e 为电源电压的角频率; I_{do} 为负载电流,即流向转子侧逆变器的电流。

当把同步旋转坐标系的d轴取为与A相电压相

量重合时, 网侧整流器输入有功功率和无功功率分 别为

$$\begin{cases} P = u_d i_d + u_q i_q = u_d i_d \\ Q = u_d i_q - u_q i_d = u_d i_q \end{cases}$$
(14)

从式(14)我们可知,当电网电压恒定时,控制d 轴电流即可控制网侧输入的有功功率,控制q轴电流 即可控制网侧输入的无功功率。重写式(13)前两式 整理)可得变频器网侧整流器前端电压方程式为

$$\begin{cases} u_{dl}^{*} = -(Ri_{d} + L\frac{\mathrm{d}i_{d}}{\mathrm{d}t}) + \omega_{e}Li_{q} + u_{d} \\ u_{ql}^{*} = -(Ri_{q} + L\frac{\mathrm{d}i_{q}}{\mathrm{d}t}) - \omega_{e}Li_{d} \end{cases}$$
(15)

风力发电系统中,一般要求网侧整流器运行在 单位功率因数状态,此时 q 轴电流应为 0。由此, 在同步旋转坐标系中网侧整流器可以采用 PI 调节 进行电流控制,即通过控制 d 轴电流控制整流器的 有功功率,控制 q 轴电流控制网侧整流器的无功功 率,其控制框图如图 3 所示。



图 3 网侧变频器矢量控制框图 Fig. 3 Vector control structure for grid side converter

5 实验结果

为了验证基于双 DSP 的电压型交直交双馈变 速恒频系统在风力发电应用中的优势及采用的矢量 控制策略的有效性,本文在该系统上进行了并网以 及运行实验,对整个系统的输入输出特性、动静态 性能进行了研究。

图 4 给出了并网实验中发电机定子绕组端电压 和定子电流的实测波形,从图中可以看出,并网瞬 间冲击电流很小。该实验表明,电压型交直交双馈 变速恒频风力发电系统在采用电压控制的并网方法 时,其发电机定子的端电压和电网电压在幅值、相 位和频率各方面具有很好的一致性,严格满足并网 条件,在发电机允许的转速变化范围内均可以实现 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



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

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



(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





图 8 网侧电压电流 Fig. 8 Voltage and current of grid side

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电功率, 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

- 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 研究[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 reaactive 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]. Electrote-

收稿日期:2004-11-18。 作者简介:

chnical Journal, 2003, 22(12): 57-59.

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。