

1.5MW 变速恒频双馈风力发电机组励磁控制系统试验研究

苑国锋 李永东 柴建云 姜新建
(清华大学电力系统国家重点实验室 北京 100084)

摘要 设计了一套 1.5MW 变速恒频双馈异步风力发电机组励磁控制系统。在分析了其控制策略的基础上,对系统的并网性能、并网运行后稳态以及动态特性等进行了试验研究,结果表明,该系统能够在发电机设计的速度范围内实现软并网,输出有功、无功功率可以独立调节,适合于 1.5MW 变速恒频双馈风力发电机组励磁控制系统。

关键词: 风力发电 变速恒频 双馈发电机 交/直/交变流器
中图分类号: TM614

Experimental Investigation on Excitation Control System of 1.5MW Variable Speed Constant Frequency DFIG Wind Generator System

Yuan Guofeng Li Yongdong Chai Jianyun Jiang Xinjian

(The State Key Laboratory of Power System Tsinghua University Beijing 100084 China)

Abstract A 1.5 megawatts(MW) excitation control system of variable speed constant frequency(VSCF) doubly-fed induction generator(DFIG) for wind turbine was developed. Based on the analysis of control strategy, the synchronization, steady and dynamic performance are studied experimentally. Experimental results show that soft synchronizing can be implemented when the generator speed is within the designed range and active/reactive power can be regulated independently. The excitation control system can be applied to 1.5 MW level wind power generation system.

Keywords: Wind generation, VSCF, DFIG, back-to-back converter

国家科技支撑计划资助项目(2006BAA01A19)。

收稿日期 2007-08-20 改稿日期 2008-03-18

1 引言

最近二十年间,风力发电技术发展迅速^[1],兆瓦级变速恒频双馈风力发电机组在风力发电中得到了广泛的应用,目前已经成为世界各国风力发电场的主流机型。变速恒频双馈风力发电系统按功能可以划分为发电机励磁控制系统、桨距控制系统以及主控系统三部分,其中发电机励磁控制系统是整个机组机电能量转换的核心,励磁控制技术是其中的难点。为实现大功率风电机组励磁控制系统的国产

化,研究大功率变速恒频双馈风力发电机组系统的励磁控制技术,具有非常重要的意义^[2]。

本文研制了一套适用于 1.5MW 变速恒频双馈风力发电机组的励磁控制系统,并在该系统上进行了一系列的试验研究。该系统采用背靠背电压型变流器结构,其网侧整流器采用电压定向的矢量控制策略,转子侧逆变器则采用定子磁链定向的矢量控制策略。在该系统上的试验结果表明,该系统具有能量双向流动的能力,其输出功率因数可以调节,能满足风力发电的系统变速恒频运行需求,是一套适合于 1.5MW 双馈风力发电机组的励磁控制系统。

2 励磁控制系统原理

变速恒频双馈风力发电系统的励磁控制是通过连接在双馈发电机转子侧的变流器来实现的, 本文所研究的背靠背电压型变流器典型结构图如图 1 所示, 其励磁控制主要包括连接在双馈发电机转子侧逆变器的控制、连接在电网侧的整流器控制以及系统并网控制三个部分。

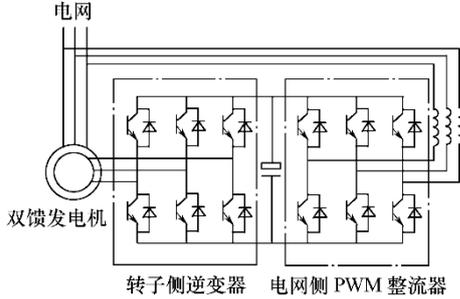


图 1 双馈发电机励磁变频器框图

Fig.1 Excitation converter structure of DFIG system

2.1 双馈电机数学模型

双馈发电机是一个非线性、强耦合、多变量的系统, 其机电能量的转换是通过基波磁场来完成的, 因此为了简化数学模型, 通常只考虑双馈发电机气隙基波磁场的作用, 并忽略铁损和铁磁的非线性、绕组的集肤效应以及定转子绕组电阻的温升, 据此在同步旋转坐标系下, 当定子和转子都取电动机惯例时, 双馈发电机的数学模型为^[3-4]

$$u_{sd}=R_s i_{sd}+D \psi_{sd}-\omega_s \psi_{sq} \quad (1)$$

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

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

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

$$\psi_{sd}=L_s i_{sd}+L_m i_{rd} \quad (5)$$

$$\psi_{sq}=L_s i_{sq}+L_m i_{rq} \quad (6)$$

$$\psi_{rd}=L_m i_{sd}+L_r i_{rd} \quad (7)$$

$$\psi_{rq}=L_m i_{sq}+L_r i_{rq} \quad (8)$$

$$T_e=p_n L_m (i_{sq} i_{rd}-i_{sd} i_{rq}) \quad (9)$$

式中 R_s, R_r, L_s, L_r ——定、转子的电阻和自感;

L_m ——定、转子间的互感;

$u_{sd}, u_{sq}, u_{rd}, u_{rq}$ ——定、转子 dq 轴电压;

$i_{sd}, i_{sq}, i_{rd}, i_{rq}$ ——定、转子 dq 轴电流;

$\psi_{sd}, \psi_{sq}, \psi_{rd}, \psi_{rq}$ ——定、转子 dq 轴磁链;

T_e ——发电机的电磁转矩;

ω_s ——同步角速度;

ω_{sl} ——转差角速度;

p_n ——极对数;

D ——微分算子。

2.2 转子侧逆变器控制策略

当把同步旋转坐标系的 d 轴定向在定子磁链上时, 定子磁链的 q 轴分量 ψ_{sq} 为 0。式 (5) ~ 式

(9) 可简化为

$$\psi_{sd}=L_s i_{sd}+L_m i_{rd}=L_m i_{ms}=\psi_s \quad (10)$$

$$i_{sq}=-\left(L_m / L_s\right) i_{rq} \quad (11)$$

$$\psi_{rd}=\left(L_m^2 / L_s\right) i_{ms}+\sigma L_r i_{rd} \quad (12)$$

$$\psi_{rq}=\sigma L_r i_{rq} \quad (13)$$

$$T_e=-p_n\left(L_m^2 / L_s\right) i_{ms} i_{rq} \quad (14)$$

式中 i_{ms} ——定子广义励磁电流;

ψ_s ——定子磁链的幅值;

σ ——漏磁系数, $\sigma=1-L_m^2 / L_s L_r$ 。

定子磁链的幅值和角度可以通过下面的方法获得

得

$$\psi_{s\alpha}=\int\left(u_{s\alpha}-R_s i_{s\alpha}\right) d t \quad (15)$$

$$\psi_{s\beta}=\int\left(u_{s\beta}-R_s i_{s\beta}\right) d t \quad (16)$$

$$\psi_s=\sqrt{\psi_{s\alpha}^2+\psi_{s\beta}^2} \quad (17)$$

$$\theta_s=\tan^{-1}\left(\psi_{s\beta} / \psi_{s\alpha}\right) \quad (18)$$

式中 $\psi_{s\alpha}, \psi_{s\beta}$ ——定子磁链 $\alpha \beta$ 轴分量;

$u_{s\alpha}, u_{s\beta}$ ——定子电压 $\alpha \beta$ 轴分量;

$i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ ——定子电流 $\alpha \beta$ 轴分量;

θ_s ——定子磁链和 α 轴的角度。

进一步推导可得发电机定子输出的有功功率和无功功率的表达式

$$P_s=-p_n \omega_s\left(L_m^2 / L_s\right) i_{ms} i_{rq} \quad (19)$$

$$Q_s=p_n \omega_s L_m^2 / L_s i_{ms}\left(i_{ms}-i_{rd}\right) \quad (20)$$

式中 P_s, Q_s ——发电机定子的有功和无功功率。

当定子广义励磁电流保持恒定时, 发电机的有功功率正比于 i_{rq} , 无功功率由 i_{rd} 决定, 分别控制转子 dq 轴电流就可实现发电机的有功功率和无功功率的解耦。在经过前馈补偿去除由反电动势引起的交叉耦合项后, 可以通过调节转子电压的 dq 轴分量分别控制发电机的有功功率和无功功率。

将式 (12)、式 (13) 分别代入式 (3)、式

(4), 则有

$$u_{rd}=R_r i_{rd}+\sigma L_r d i_{rd} / d t-\omega_{sl} \sigma L_r i_{rq} \quad (21)$$

$$u_{rq} = R_r i_{rq} + \sigma L_r \frac{di_{rq}}{dt} + \omega_{sl} \left[\left(\frac{L_m^2}{L_s} \right) i_{ms} + \sigma L_r i_{rd} \right] \quad (22)$$

如图 2 所示。

据此，可以确定转子侧逆变器的矢量控制框图，

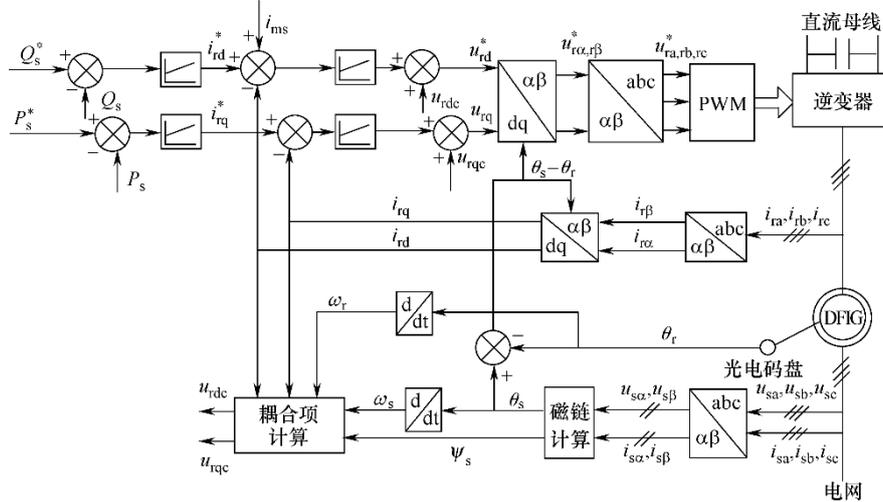


图 2 转子侧逆变器矢量控制框图

Fig.2 Vector control scheme for rotor side inverter

2.3 电网侧整流器矢量控制

变速恒频风力发电励磁控制系统中网侧整流器的主要作用是在能量流动过程中保持直流母线电压恒定以及减少变频器输入侧的谐波。

在两相同步旋转坐标系下建立网侧电压型 PWM 整流器的数学模型 [5-6]

$$D \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \\ u_{dc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -R/L & \omega_e & -S_d/L \\ -\omega_e & -R/L & -S_q/L \\ S_d/C_d & S_q/C_d & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \\ u_{dc} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} u_d/L \\ u_q/L \\ -I_{do}/C_d \end{pmatrix} \quad (23)$$

式中 R, L ——变频器网侧的输入电阻和输入电感；

C_d ——直流母线电容；

S_d, S_q ——两相同步旋转坐标系下等效开关函数；

u_d, u_q ——电网电压 dq 轴分量；

i_d, i_q ——整流器电流 dq 轴分量；

ω_e ——电源电压的角频率；

I_{do} ——负载电流。

当把同步旋转坐标系的 d 轴取为与 A 相电压向量重合时，网侧整流器输入有功功率和无功率分别为

$$\begin{cases} P = u_d i_d + u_q i_q = u_d i_d \\ Q = u_d i_q - u_q i_d = u_q i_q \end{cases} \quad (24)$$

从式 (24) 可知，当电网电压恒定时，分别控制 dq 轴电流就可以控制整流器输入的有功功率和无功功率。重写式 (23) 前两式整理可得变频器网侧整流器前端电压方程式为

$$\begin{cases} u_{d1} = -(Ri_d + L di_d/dt) + \omega_e Li_q + u_d \\ u_{q1} = -(Ri_q + L di_q/dt) - \omega_e Li_d \end{cases} \quad (25)$$

式中， u_{d1}, u_{q1} 为整流器前端电压 dq 轴分量。由此，电网侧整流器的控制框图如图 3 所示。

2.4 系统并网控制

变速恒频系统的并网控制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且风轮机带动发电机升速达到发电机的最小运行速度时，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。

3 试验系统结构

本文研制的 1.5MW 变速恒频双馈异步风力发电机励磁控制试验系统框图如图 4 所示。该励磁控

制系统由 1.5MW 双馈发电机、交直交双向变流器、滤波器、双数字信号处理器 (Digital Signal Processor, DSP) 控制器、并网装置以及保护装置构成。试验系统中的拖动变频器采用西门子 6SC2323—0DE 电流源变频器, 拖动电动机型号为

1LA1567—4QK402, 额定功率 2MW。

试验系统的发电机采用兰州电机责任有限公司制造的双馈风力发电机, 其额定功率为 1.5MW, 定子侧额定电压为 690V, 定子额定电流 1089A, 转子

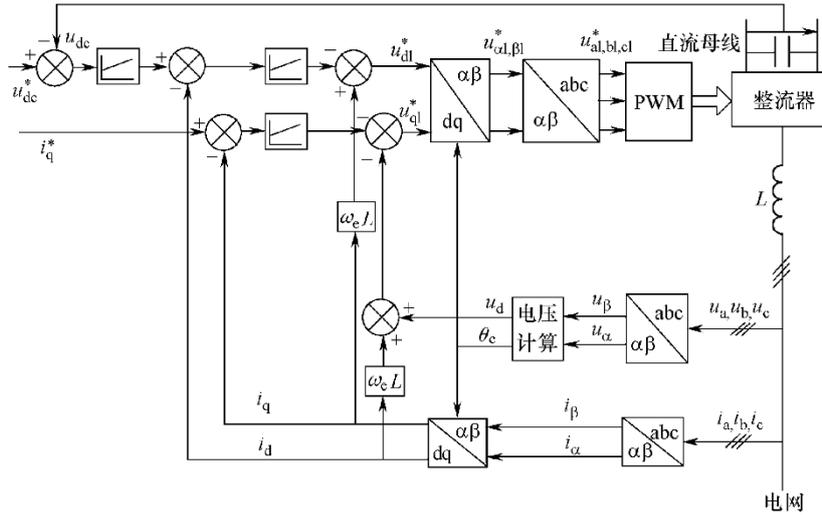


图 3 电网侧整流器矢量控制框图

Fig.3 Vector control scheme for grid side rectifier

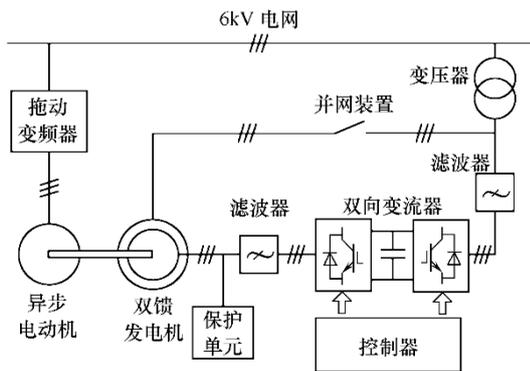


图 4 双馈异步风力发电励磁控制试验系统框图

Fig.4 Scheme of DFIG excitation control system

堵转开路电压 2003V, 转子额定电流 380A, 发电机额定功率转速点为 1800r/min。

连接于双馈风力发电机转子和电网之间的双向变流器由两个结构完全相同的三相全控桥通过直流母线以背靠背形式组成, 分别置于电网侧和发电机的转子侧; 变流器开关器件选用 1700V 等级的绝缘栅双极晶体管 (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT), 转子侧最大输出电流为 580A。变流器的控制器采用 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、脉宽调制 (Pulse Width Modulation, 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。为了保证变流器具有较强的抗电磁干扰能力和故障保护能力, 主控制器与变流器主回路开关器件的驱动电路之间全部采用光纤通信, 变流器主回路的传感器信号与主控制板之间也采用光电隔离。

并网装置正常运行时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, 位于发电机转子侧的保护装置投入并封锁变流器, 同时控制器发出解列信号断开定子侧的并网接触器, 使发电机脱离电网。

4 试验结果

本节将给出所研制的 1.5MW 变速恒频双馈励磁控制系统并网性能、动静态性能等方面地面模拟试验的结果。除了特殊说明以外, 本试验中的试验结果采用 YOKOGAWA 公司示波录波仪 DL750 进行记录。

4.1 并网性能试验

风力发电机的并网特性是风力发电系统的一个重要性能指标, 为此本文进行了发电机系统的并网试验, 通过检测并网时的定转子冲击电流测试并网

性能。图 5 给出了发电机励磁控制系统在 1800r/min

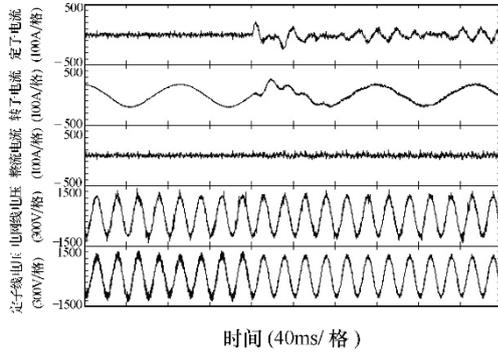
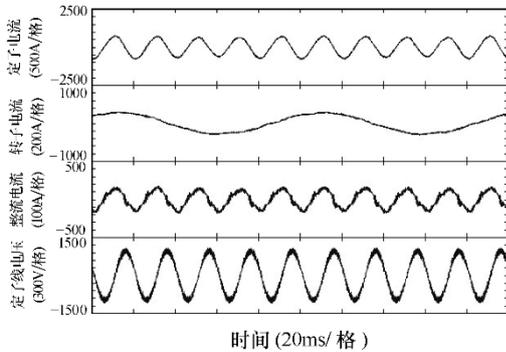


图 5 发电机并网试验
Fig.5 Synchronization experiment

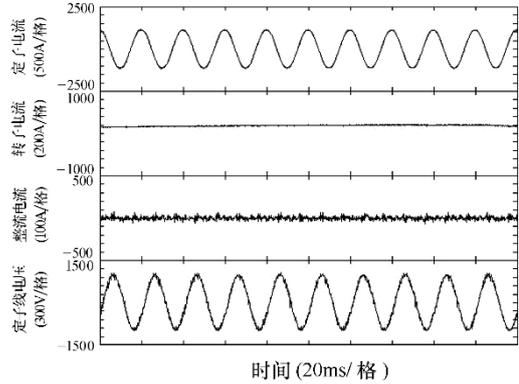
时并网试验的试验结果。从图中可以看出，并网瞬间定子冲击电流约为 300A（峰值），小于定子额定电流，而转子电流在并网时轻微振荡后迅速恢复正常，该试验表明所研制的励磁控制系统可以控制发电机定子端电压和电网电压在幅值和频率方面具有很好的一致性，严格满足并网条件，在系统设计的转速变化范围内可以实现软并网。

4.2 稳态性能试验

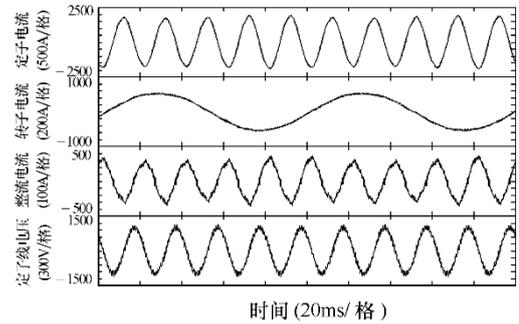
图 6 给出了励磁控制系统并网运行的试验结果。图 6a 是亚同步速 1200r/min 时的试验波形，此时发电机的定子输出有功功率和励磁系统向电网输送的有功功率分别为 570kW 和 457kW，该转速点设计的定子输出功率系统输出功率分别为 564kW 和 447kW；图 6b 是同步速 1500r/min 运行时的试验



(a) 1200r/min 亚同步速运行



(b) 1500r/min 同步速运行



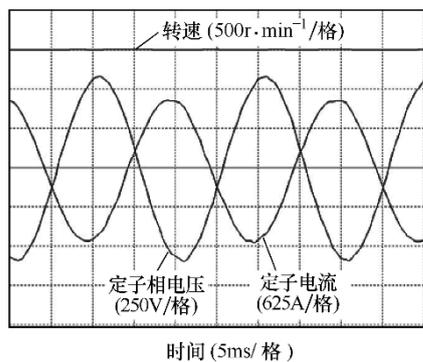
(c) 1800r/min 超同步速运行

图 6 并网运行试验

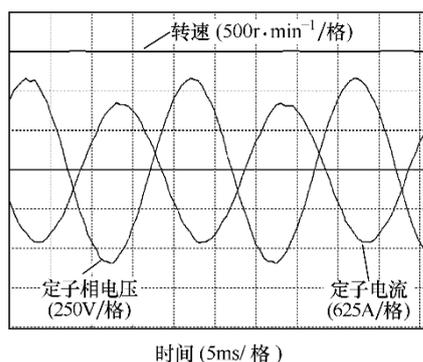
Fig.6 Running experiment

波形，此时发电机定子输出有功功率 870kW，系统输出有功功率 866kW，该工况下发电机定子设计有功功率为 875kW，系统设计有功功率 871kW；图 6c 是超同步速 1800r/min 运行时系统满功率发电的试验波形，此时发电机定子输出有功功率为 1290kW，系统向电网输送的有功功率为 1526kW，该转速点设计定子输出功率和系统输出有功功率分别为 1269kW 和 1520kW。从图中可以看出，在整个速度范围内，励磁控制系统都达到预先设计的发电容量，能满足变速恒频风力发电的运行要求。

在完成了励磁控制系统满负载发电运行试验的基础上，本文对系统的功率因数调节进行了试验研究。图 7 是在同步转速 1500r/min 维持有功功率给定不变而改变无功功率给定时定子输出功率因数调节试验结果。图 7a 中定子功率因数滞后 0.9，发电机定子输出有功功率 885kW，系统输出有功功率 877kW；图 7b 中定子功率因数领先 0.9，发电机定子输出功率 882kW，系统输出功率 877kW；从试验数据中可以看出，当输出功率因数改变时，发电机输出有功功率基本维持恒定，说明了系统可以通过有功和无功的解耦控制有效地调节定子输出端的功率因数。



(a) 功率因数滞后 0.9



(b) 功率因数超前 0.9

图 7 发电机功率因数调整试验

Fig.7 Power factor regulation experiment

4.3 动态性能试验

图 8 显示了发电机转速从超同步速到亚同步速变化时系统试验波形。从图中可以看出，随着转速的下降，减少发电机的有功功率给定，发电机的定子输出有功功率减小，整流侧的有功功率先减小后增大，能量流向发生了变化，发电机的转子电流的频率相应改变以保证定子侧的变速恒频输出，整个系统具有较好的动态性能。

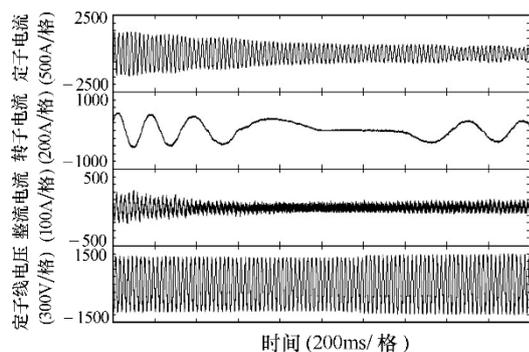


图 8 发电机转速从超同步速下降到亚同步速的试验波形

Fig.8 Rotation speed varying from super-synchronization to sub-synchronization experiment

5 结论

为实现大功率风电机组励磁控制系统的国产化，本文研制了一套适用于 1.5MW 变速恒频双馈风力发电机组的励磁控制系统。对其控制策略进行了研究，并在此基础上进行了系统的并网、负载运行、变速运行以及功率因数调节试验。试验结果表明，该系统具有功率双向流动的能力，其输出功率因数可以调节，系统输入输出谐波含量低，能满足风力发电的变速恒频的要求，适合大容量变速恒频双馈风力发电机组励磁系统的配套。

参考文献

- [1] Muller S, Deicke M, De Doncker Rik W. Doubly fed induction generator systems for wind turbines[J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2002, 8(3): 26-33.
- [2] 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.
Guo Jindong, Zhao Dongli, Lin Zixu, et al. Research of the megawatt level variable speed constant frequency wind power unit control system[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(6):1-6.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
Yuan Guofeng, Chai Jianyun, Li Yongdong. Study of three-phase PWM rectifier for AC-excitation[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(8): 90-94.
- [6] 黄科元, 贺益康, 胡奇峰. 交流励磁用三相 PWM 整流器的研究 [J]. 浙江大学学报, 2004, 38(1): 48-51.
Huang Keyuan, He Yikang, Hu Qifeng. Study on

excitation converter of variable speed constant
frequency wind generation system[J].Journal of
Zhejiang University, 2004, 38(1): 48-51.

作者简介: 苑国锋 男, 1979 年生, 博士, 主要研究方向为变速恒
频风力发电系统控制技术。李永东 男, 1962 年生, 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。