

# 双馈感应发电机准同期并网技术的研究<sup>\*</sup>

徐源源<sup>1,2</sup>, 黄 石<sup>1</sup>, 向大为<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044;

2. 重庆市电力公司 沙坪坝供电局, 重庆 400030)

**摘 要:** 作为主流风力发电技术, 双馈感应发电机具有变速恒频运行, 优越的暂、稳态运行性能及相对较小的励磁容量等特点。随着风电机组单机容量的增大, 其并网问题越来越受到人们的重视。结合双馈感应发电机并网运行的特点, 模拟传统同步发电机准同期并网方法, 对现有基于矢量控制的双馈感应风力发电机功率控制策略进行了适当修改。新方法在实现发电机组快速、安全并入电网的同时, 简化了控制器的硬件和软件复杂性。为验证改进的准同期并网控制原理的正确性, 建立了双馈感应风力发电系统 MW 级仿真模型及 15 kW 试验机组。仿真与试验研究验证了准同期并网技术的正确性和可行性, 从而为该技术的工程实际运用奠定了相应的理论基础。

**关键词:** 双馈感应风力发电机; 风力发电; 准同期并网

**中图分类号:** TM346 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-6540(2009)07-0044-05

## A Study on Synchronized Cut-in Technology of Doubly-Fed Induction Generator Wind Turbine

XU Yuan-yuan<sup>1,2</sup>, HUANG Shi<sup>1</sup>, XANG Da-wei<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Shapingba Power Supply Bureau, Chongqing Electrical Power Co., Chongqing 400030, China)

**Abstract:** As a mainstream wind power generation technology, doubly-fed induction generator (DFIG) features variable-speed-constant-frequency operation, excellent transient and steady states performance and partial rated excitation converter. Since the rating of wind turbine unit is growing continuously, the cut-in problem gradually becomes a concern in wind power industry. By emulating the cut-in process of traditional synchronous generator, a synchronized cut-in method suitable for DFIG wind turbine is investigated. According to the operating characteristics during grid cut-in transient, the existing vector control based DFIG power strategy was properly modified. While the new method can start up DFIG and connect it into grid rapidly and safely, the complexity of hardware and software in the controller is simplified. Simulation model with a 2MW DFIG and test rig with a 15 kW DFIG were built. The validity and feasibility of the method were confirmed by simulation as well as experiment. It is hoped that the study in this paper could provide a theoretical basis for industry application of this technology.

**Key words:** doubly-fed induction generator (DFIG); wind power; synchronized cut-in

## 0 引 言

双馈感应发电机可实现变速恒频运行, 具有优越的稳态和暂态运行性能及相对较小的励磁容量, 特别适用于风力、变水头水力发电及抽水蓄能等可再生能源发电系统。与此同时, 通过最佳原

动机效率跟踪控制还能提高风电机组的风能利用率。因此, 双馈感应发电机已成为主流应用的风力发电机<sup>[1-8]</sup>。

随着风电机组单机容量的增大, 其并网冲击问题越来越受到人们的重视<sup>[8-11]</sup>。过大的冲击不仅会引起电网电压大幅下降, 还可能对发电机组

<sup>\*</sup>重庆市科委自然科学基金计划资助项目 (CSTC2007BB0113)

机械部件 (例如:塔架、桨叶、增速器等)造成损坏。如果并网冲击时间持续过长,可能威胁其他挂网机组的正常运行甚至导致系统崩溃。因此,采用合理可行的并网技术是个不可忽视的问题。

文献 [9, 10]介绍了变速恒频风力发电机软并网控制的方法。现有方案模拟传统同步发电机准同期并网的方法。发电机并网前,通过适当的励磁控制产生与电网电压相序、幅值、频率及相位相同的定子空载电压。当检测到发电机满足同期并网条件后立即合闸并网,并网过程无冲击。但是这些方案均要求实时检测定子与电网电压,并判定发电机是否满足同期并网条件,增加了控制器的硬件和软件的复杂性。为满足无冲击并网的要求,进一步提高系统的技术与经济性能,有必要对双馈感应发电机的并网控制技术进行深入研究。

由于具有变速恒频运行、有功无功解耦、抗扰动能力强及动态性能良好等优点,目前并网运行的双馈感应风力发电机通常采用矢量控制策略对定子有功、无功功率进行控制。在此基础上风电机组能够实现最佳风能跟踪运行,并对电网无功功率提供支持<sup>[4, 6, 12, 13]</sup>。能否在现有矢量控制系统的基础上进行适当修改,满足发电机安全、快速并网的要求,基于这种基本思想,本文结合双馈风力发电机的运行特点,对通用定子功率矢量控制算法进行了适当调整,实现发电机快速、安全并网运行。与传统并网技术不同,本文分析的双馈发电机准同期并网技术既可以避免系统增加新的硬件,又可以简化控制算法,具有一定的技术和经济优势。

### 1 矢量控制原理

作为双馈感应风力发电机准同期并网技术的基础,有必要首先对矢量控制原理进行简单介绍。双馈感应风力发电系统如图 1 所示,励磁电源由两个脉宽调制 (PWM)变频器经中间直流环节连接而成。由于 PWM 变频器的电压与电流能够在四象限内任意调节,因此通过适当地控制,双 PWM 变频器既能由转子从电网输入功率,也可向电网输出功率,实现能量双向流动。

励磁电源中电网侧变频器的主要功能是控制中间直流母线电压同时调节网侧变频器的功率因数,而发电机的实际运行状态则是通过转子侧变

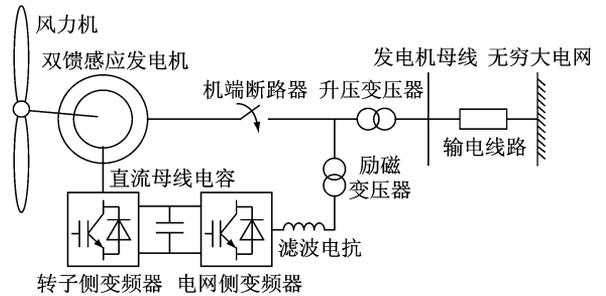


图 1 双馈感应风力发电系统

频器进行控制。

转子侧变频器一般采用定子磁链定向的矢量控制策略。图 2 表明了定子磁链与参考轴系的关系。其中  $d$  轴与定子磁链重合,而  $q$  轴滞后  $d$  轴 90 电角度。在定子磁链定向条件下,发电机转子电流的  $dq$  轴分量与定子电流的  $dq$  轴分量之间存在一一对应的关系。通过转子励磁电压分别控制转子电流  $dq$  轴分量,即可达到控制定子无功与有功功率的目的。

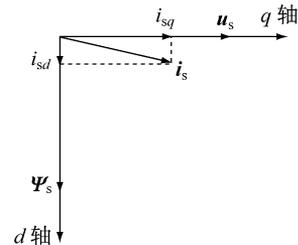


图 2 参考轴系与定子磁链

基于定子磁链定向的矢量控制器原理框图如图 3 所示。控制器采用双闭环结构,内环是转子电流控制环,而外环则是定子有功与无功功率控制环。其中电流内环引入了去耦补偿项,以消除

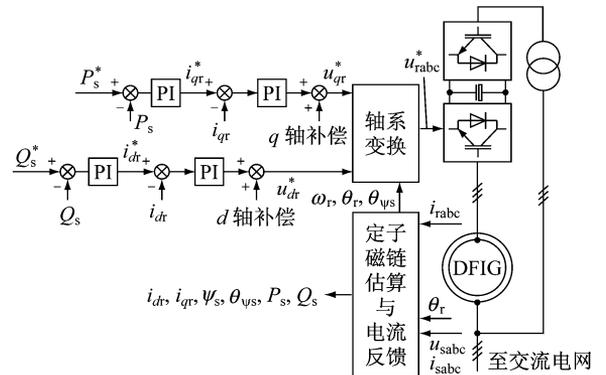


图 3 定子磁链定向的矢量控制器框图

$d, q$ 轴耦合量对转子电流控制的影响。为实现最佳风能跟踪运行,根据风力机机械特性可计算出最大风能利用系数条件下发电机定子有功与转速的关系: $P_s = f(\omega_r)$ 。将该特性作为发电机的机械特性进行控制,在与风机机械特性的共同作用下,发电机组能够在一定风速变化范围内尽量保持最大风能利用系数,从而实现最佳风能效率跟踪运行。

## 2 准同期并网控制方法

随着桨叶气动性能的不断改进,目前绝大多数卧轴式风力机都具有良好的自启动能力,一般在风速大于  $4 \text{ m/s}$  的条件下即可通过风力机控制,使机组自启动到额定转速附近。

本文分析的双馈感应发电机准同期软并网技术的基本思想是:当原动机拖动机组进入正常转速运行范围内时,通过励磁对定子空载电压的幅值、频率及相位进行控制,使得定子空载电压满足准同期并网条件,然后将发电机并入电网。并网过程中发电机定子电压的幅值、频率、相位与电网电压相同,并网过程对电网和机组均无冲击。

由于实现了机电解耦,因此与传统同步发电机不同,双馈感应发电机在并网过程中无需保持严格同步转速运行。只要在正常转速运行范围内,双馈发电机均可在变速条件下实现准同期并网。这不仅缩短了机组启动并网的时间,还提高了并网成功率。

发电机准同期软并网励磁控制的基本工作原理如图 4 所示,其中  $U_s$  是定子空载电压,而  $U_g$  是电网电压,即机端断路器电网侧电压。根据测得的电网电压信号可确定定子磁链空间矢量的位置,并将  $d$  轴按定子磁链定向。相应地,  $q$  轴则在空间滞后  $d$  轴  $90^\circ$ : 在定子磁链定向条件下,通过励磁电压控制  $d, q$  轴转子电流等于指令值 ( $i_{d_r}^* = I_m = \psi_m / L_m, U_g / L_m, i_{q_r}^* = 0$ )。一旦转子  $d, q$  轴电流达到指令值,发电机定子电压与电网电压的幅值、频率及相位将达到一致,自动满足准同期并网条件。双馈感应发电机转子具有三相对称绕组,因此转子励磁电压空间矢量可在空间任意调节。这使得机组能够在变速运行条件下实现无冲击软并网。

基于定子磁链定向的矢量控制原理框图(见

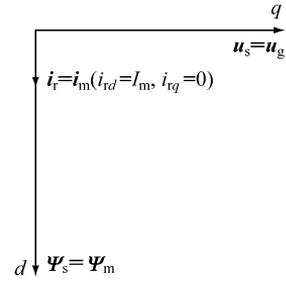


图 4 空载运行时双馈感应发电机空间矢量图

图 3),本文分析的双馈感应风力发电机准同期软并网的基本过程为:首先通过原动机拖动机组加速到额定运行区间 ( $\omega_{min}, \omega_{max}$ );然后设定矢量控制器电流内环的  $d, q$  轴转子电流指令分别为:  $i_{d_r}^* = \psi_m / L_m, i_{q_r}^* = 0$ ;当转子  $d, q$  轴电流响应达到指令值时,双馈感应发电机满足同期并网条件,控制器发出指令并网合闸;最后在并网成功后,切换控制算法投入功率外环,发电机迅速进入定子功率解耦控制的正常运行阶段。

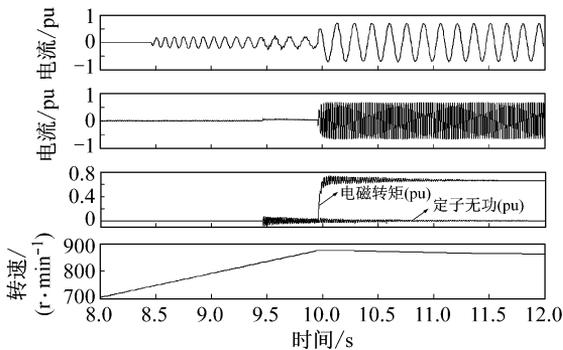
由于通过励磁调节就能控制发电机的空载运行状态,因此本文分析的准同期软并网方案无需同时对定子与电网电压进行测量与比较。这样,一方面避免了测量定子空载电压的麻烦,另一方面也省去了判断同期条件的麻烦,减少了机组并网运行的软、硬件复杂性、节约了启动时间。

## 3 仿真研究

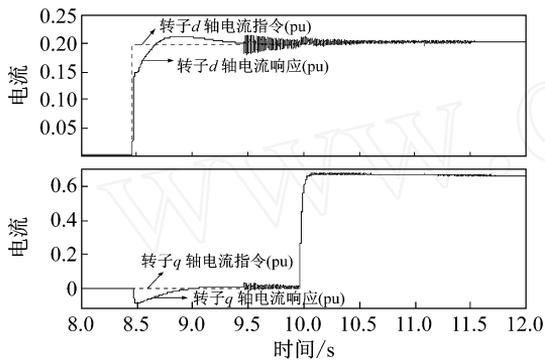
为验证双馈感应发电机准同期软并网控制方法的正确性,本文对  $2 \text{ MW}$  商用双馈感应风力发电机进行了仿真分析,结果如图 5 所示。

由仿真结果可知:在风力条件允许的条件下,风力机拖动机组加速,当机组转速大于最小运行转速  $\omega_{min} = 750 \text{ r/min}$  时(约  $8.5 \text{ s}$  时),立即投入发电机转子侧变频器(图 5(a))。在定子磁链定向矢量控制下,转子  $d, q$  轴电流逐渐跟踪指令(图 5(b)),同时定子电压与电网电压在频率、幅值及相位上的差别逐渐减小(图 5(c))。当转子电流达到指令值  $i_{d_r} = \psi_m / L_m = 0.2 \text{ pu}, i_{q_r} = 0 \text{ pu}$  时(约  $9.5 \text{ s}$  时),发电机基本满足准同期并网条件后合闸并网。如图 5(a)所示,并网过程对电网和发电机组几乎无冲击。并网成功后(约  $10 \text{ s}$  时),发电机立即投入定子功率控制。最终在与风力机共同作用下,机组将逐渐稳定在  $850 \text{ r/min}$  附近

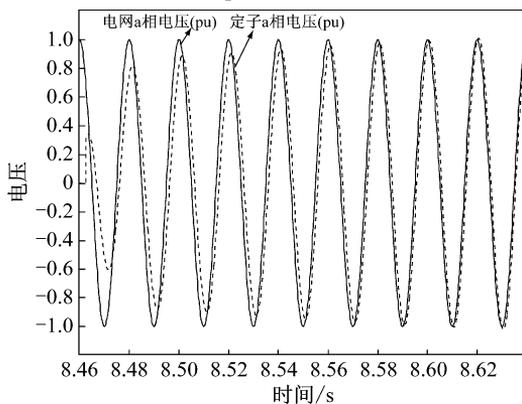
正常运行。



(a) 双馈感应发电机变量



(b) 转子  $dq$  轴电流指令与响应



(c) 并网前电网电压与定子电压变量

图 5 双馈感应风力发电机准同期并网过程仿真结果

根据仿真结果,并网过程中发电机始终处于变速运行状态。但是,在励磁控制作用下,转子电流的频率、幅值及相位将跟踪机组转速相应变化,从而保证机组在变速过程中满足准同期并网条件,实现无冲击软并网。

进一步分析可以发现发电机并网及定子功率调节暂态过程中,电机内部将出现幅值很小的暂

态分量(如定、转子电流以及电磁转矩)。这些暂态分量主要是由定子磁链暂态直流分量引起的。突变的运行条件将在定子绕组中产生定子磁链暂态分量。在系统内部电气阻尼的作用下,它们将随着定子磁链暂态直流分量的衰减而逐渐减弱。

## 4 试验研究

为进一步验证准同期并网控制技术的正确性与可行性,建立了双馈感应发电机试验系统。系统采用 15 kW 绕线式感应电机模拟双馈感应发电机,其转子绕组通过 PWM 变频器供电。风力机由基于矢量控制的感应电动机进行模拟并拖动发电机组旋转。系统利用 dSPACE 实时控制平台对发电机定、转子电流,定子电压及转子位置角进行测量,并根据控制算法对转子侧 PWM 变频器进行实时控制。dSPACE 开发平台以图形建模的方式在 MATLAB Simulink 中完成准同期控制算法。在 MATLAB 环境中编译为可执行代码后,控制算法可下载到目标计算机中运行。根据准同期并网的工作原理,当控制器检测到发电机转速大于最低正常运行转速后,立刻触发转子侧变频器并按准同期并网控制算法控制发电机组并入电网。

如图 6 所示,在试验过程中,首先控制原动机模拟风力机的作用拖动机组逐渐加速。当转速上升超过发电机最小运行转速时(1 050 r/min),转子侧 PWM 变频器迅速投入,按指令控制转子  $dq$  轴电流分量。空载并网运行时,转子无功分量  $i_{qr}$  用于励磁,其大小正比于定子空载电压的幅值,而转子有功分量  $i_{dr}$  则控制为零。由于定子磁链定向的作用,发电机空载定子电压的频率与相位能够在转子加速运行的条件下自动跟踪电网电压的频率与相位。当转子  $dq$  轴电流分量达到指令值时( $t=2.4$  s),发电机达到理想并网条件,机端断路器合闸,发电机并入电网。与此同时切换控制算法投入功率外环,发电机迅速进入正常运行下的定子功率控制模式。试验结果表明,在准同步并网控制下,发电机能够在起动加速过程中迅速并入电网,并网过程无冲击。

## 5 结 语

本文分析了双馈感应风力发电机准同期并网

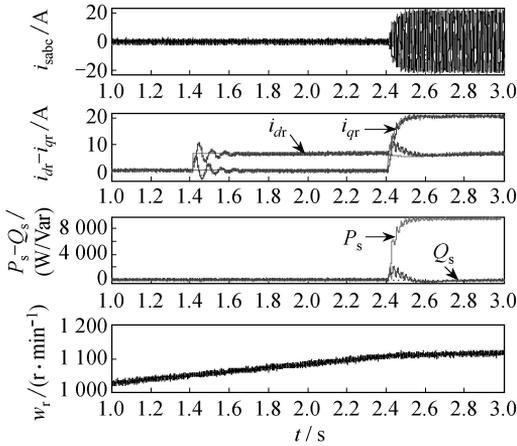


图 6 双馈感应发电机准同期并网试验结果

技术。与传统同步发电机不同,双馈电机可通过励磁调节控制定子空载电压的幅值、频率及相位,在变速运行条件下实现准同期并网。该方法基于通用的矢量控制技术,具备无需测量定子电压、控制简单、快速并网及冲击小等优点。

为验证准同期并网控制原理的正确性,本文建立了双馈感应风力发电系统的 MW 级仿真模型及 15 kW 试验机组。数值仿真与试验结果表明:在准同期并网控制下,双馈发电机组能够在加速过程中迅速调节定子空载电压,满足发电机理想并网条件,实现无冲击软并网。仿真与试验研究验证了准同期并网技术的正确性与可行性,为该技术的工程实际运用提供了相应的理论参考。

【参考文献】

[ 1 ] 杨顺昌,廖勇. 交流励磁发电机运行及控制原理 [J]. 电工技术学报, 1997, 12(10): 21-25.  
 [ 2 ] Morel L, Godfroid H, Mirzaian A, et al Double-fed induction machine: converter optimization and field oriented control without position sensor [C] IEE Proc-Electr Power Appl, 1998, 145(4): 365-368.

[ 3 ] Muller S, Deicke M. Doubly-fed induction generator systems for wind turbines [J]. IEEE Industry Application Magazine, 2002(5): 26-33.  
 [ 4 ] 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, 23(11): 122-125.  
 [ 5 ] 李晶,宋家骅,王胜伟. 大型变速恒频风力发电机组建模与仿真 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 100-105.  
 [ 6 ] Michael Hughes F, Olimpo Anaya-Lara, Nicholas Jenkins, et al Control of DFIG-based wind generation for power network support [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(4): 1958-1966.  
 [ 7 ] Xiang Da-wei, Yang Shun-chang, Ran Li Ride-through control strategy of a doubly fed induction generator for symmetrical grid fault [C] Proceedings of the CSEE, 2006, 26(3): 164-170.  
 [ 8 ] 向大为. 双馈感应风力发电机特殊运行工况下励磁控制策略的研究 [D]. 重庆:重庆大学电气工程学院, 2006.  
 [ 9 ] 刘其辉,贺益康,卞松江. 变速恒频风力发电机空载并网控制 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 6-11.  
 [ 10 ] 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, 18(13): 55-58.  
 [ 11 ] 叶杭冶. 风力发电机组的控制技术 [M]. 2版. 北京:机械工业出版社, 2006.  
 [ 12 ] Pena R, Clare J, Asher GM. A doubly fed induction generator using back-to-back PWM converter and its application to variable-speed wind-energy generation [C] IEE Proc EPA, 1996, 143(3): 231-241.  
 [ 13 ] Petersson A, Hamefors L, Thiringer T. Evaluation of current control methods for wind turbines using doubly-fed induction machines [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2005, 20(1): 227-235.

收稿日期: 2009-02-01

中文核心期刊      中国学术期刊(光盘版)      全国优秀科技期刊

中国科学引文数据库来源期刊      中国学术期刊综合评价数据库来源期刊

网址: motor-abc.chinaelc.cn