

基于电压闭环的双馈风力发电软切入控制

方太勋, 吴小丹, 杨 浩, 周启文

(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要: 传统的风力发电并网技术在并网瞬间会产生很大的冲击电流, 严重威胁发电机及电力系统的安全。为研究空载并网技术, 设计了一套 30 kW 变速恒频双馈异步风力发电机励磁控制实验系统。根据交流励磁变速恒频风力发电的运行特性, 采用背靠背变流器作为双馈异步发电机(DFIG)的励磁源。分析了基于旋转坐标系下的 DFIG 的数学模型, 采用定子磁链定向方式的空载并网算法, 由于 DFIG 在空载运行过程中需要消耗一部分无功来建立磁场, 因此传统开环控制过程会引起定子电压控制精度不足, 为此提出采用电压闭环控制方式提高空载并网过程中的定子电压精度。实验表明, 该控制方法可以有效减小 DFIG 在并网过程中产生的冲击电流, 实现控制过程软切入。

关键词: 交流励磁; 变速恒频; 矢量控制; 空载并网; 电压闭环

中图分类号: TM 315

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2011)02-0090-04

0 引言

交流励磁变速恒频是风力发电领域中应用较为广泛的一类技术, 它可以实现功率的解耦控制和最大风能的跟踪控制, 且其变流器具有容量小的优势^[1-4]。通过对双馈异步发电机(DFIG)的转子进行交流励磁控制实现在定子侧输出电流的变速恒频。传统 DFIG 控制技术采用交/交变流器, 但是其功率因数低, 谐波含量大, 结构和驱动控制复杂, 而背靠背(back-to-back)双向 PWM 变流器具有功率因数可调、转子和电网之间能量双向流动的优点, 因此应用于双馈型风力发电系统中既可以运行于超同步转速状态, 也可以运行于亚同步状态。

在兆瓦级的风电机组中, 其并网方式一般可以采用空载并网技术, 目的在于减小并网过程中的电流冲击, 从而减小风力发电并网过程中对电网的冲击, 使系统更加安全稳定地运行, 对减小电机的冲击振动以及延长运行寿命等方面都有很大的好处。在并网后可以通过调节电机转子励磁电流控制电机的输出功率, 而作为功率变换环节的电力电子变流器容量却相对较小。本文在推导基于电动机惯例下的 DFIG 空载数学模型基础上, 研究了其空载并网控制原理, 给出了基于定子磁链定向控制的并网策略, 同时引入电压闭环控制以提高定子电压控制精度, 从而达到减小并网冲击的目的。最后在搭建的样机上进行了实验研究, 并给出了相关实验结果。

1 dq 坐标系下 DFIG 空载数学模型

为推导 DFIG 的空载并网模型, 将电机控制中的矢量控制技术引入变速恒频风力发电控制系统中,

建立两相旋转 dq 坐标系统, 同步旋转坐标系中采取定子磁链定向^[5-7], 将定子磁链定向于 d 轴, d 轴逆时针旋转 90° 为 q 轴方向, 如图 1 所示。

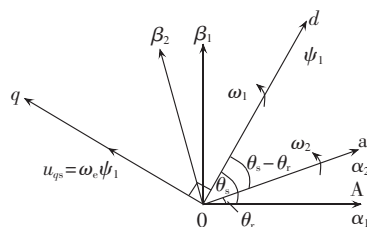


图 1 DFIG 矢量控制坐标变化

Fig.1 Coordinates transformation for DFIG vector control

图 1 中, α_1 、 β_1 为两相静止坐标系, α_1 轴为定子 A 相绕组轴线正方向; α_2 、 β_2 为以转子旋转角速度 ω_2 为参考的两相旋转坐标系, α_2 轴为转子 a 相绕组轴线正方向; θ_r 为 α_2 轴与 α_1 轴的夹角, 其角度由光电编码器给出; dq 坐标系为两相同步旋转坐标系, d 轴与 α_1 轴的夹角为 θ_s , 其角度由控制系统软件对电网电压磁链的锁相定位得到。

忽略 DFIG 定、转子电阻, 在电动机惯例下^[6-9], DFIG 的定、转子磁链方程为

$$\begin{cases} \psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \\ \psi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \\ \psi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \end{cases} \quad (1)$$

DFIG 的定、转子电压方程为

$$\begin{cases} u_{ds} = R_s i_{ds} + p \psi_{ds} - \omega_1 \psi_{qs} \\ u_{qs} = R_s i_{qs} + p \psi_{qs} + \omega_1 \psi_{ds} \\ u_{dr} = R_r i_{dr} + p \psi_{dr} - \omega_2 \psi_{qr} \\ u_{qr} = R_r i_{qr} + p \psi_{qr} + \omega_2 \psi_{dr} \end{cases} \quad (2)$$

其中, R_s 、 R_r 为定、转子绕组电阻; L_s 、 L_r 、 L_m 为 dq 坐标系

下定、转子等效自感和互感; $u_{ds}, u_{qs}, u_{dr}, u_{qr}$ 为定、转子电压的 d, q 轴分量; $i_{ds}, i_{qs}, i_{dr}, i_{qr}$ 为定、转子电流的 d, q 轴分量; $\psi_{ds}, \psi_{qs}, \psi_{dr}, \psi_{qr}$ 为定、转子磁链的 d, q 轴分量; ω_1, ω_s 分别为同步转速和转差; p 为微分算子。

DFIG 空载并网前,其定子电流为 0,将 $i_{ds}=i_{qs}=0$ 代入式(1)可得空载状态时的 DFIG 磁链电压方程:

$$\begin{cases} \psi_{ds} = L_m i_{dr} \\ \psi_{qs} = L_m i_{qr} \\ \psi_{dr} = L_r i_{dr} \\ \psi_{qr} = L_r i_{qr} \end{cases} \quad (3)$$

将式(3)代入 DFIG 的定、转子电压方程式(2),得到 DFIG 在空载并网控制时的定、转子电压方程:

$$\begin{cases} u_{ds} = R_s i_{ds} + p L_m i_{dr} - \omega_1 L_m i_{qr} \\ u_{qs} = R_s i_{qs} + p L_m i_{qr} + \omega_1 L_m i_{dr} \\ u_{dr} = R_r i_{dr} + p L_r i_{dr} - \omega_s L_r i_{qr} \\ u_{qr} = R_r i_{qr} + p L_r i_{qr} + \omega_s L_r i_{dr} \end{cases} \quad (4)$$

2 定子磁链定向下的空载并网控制原理

对 DFIG 而言,其并网的实质就是监测当前电网电压和转子位置的信息,通过对变流器的控制输出转子励磁电压,使得 DFIG 产生与电网电压严格同步的定子电压,在满足并网要求时并入电网。为了便于控制,将现代电机控制中的矢量技术引入 DFIG 的空载并网控制。

仍然对 DFIG 采用电动机惯例,建立两相旋转坐标系,并且采用定子磁链定向,将两相旋转坐标系的 d 轴定向在定子磁链方向,由于工频条件下电机定子电阻很小,因此可以忽略,此时在电动机惯例下定子电压矢量在相位上将超前定子磁链 90° ,位于 q 轴的正方向。由于采取定子磁场定向,因此有 $\psi_{ds}=\psi_1, \psi_{qs}=0, u_{qs}=u_1$ 。则式(3)可以化为

$$\begin{cases} i_{dr} = \psi_1 / L_m = u_{qs} / (\omega_1 L_m) \\ i_{qr} = 0 \\ \psi_{dr} = L_r i_{dr} \\ \psi_{qr} = L_r i_{qr} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可见,在 DFIG 并网控制过程中,转子

电流的 q 轴分量应为 0,转子电流的 d 轴分量应为恒定的广义励磁电流 $u_{qs}/(\omega_1 L_m)$,将式(5)代入转子电压方程式(4)后得:

$$\begin{cases} u_{dr} = R_r i_{dr} + p L_r i_{dr} \\ u_{qr} = \omega_s L_r i_{dr} \end{cases} \quad (6)$$

式(5)(6)给出了交流励磁 DFIG 的空载并网控制策略,而式(6)是在理想情况下得到的,实际控制过程中的转子 q 轴分量不可能为 0,因此用式(4)作为控制方程更加准确。图 2 给出了交流励磁变频恒速 DFIG 的空载并网控制系统原理,在检测电网电压后计算相关的定子磁链和磁链位置,对转子励磁电流进行闭环控制,由于转子励磁电压存在交叉耦合,因此在闭环控制的基础上还需要补偿一定的转子电压分量。

3 定子电压闭环控制的空载并网控制

式(4)给出了基于定子磁链定向下的空载并网控制算法,但是式(4)是建立在理想情况即电机无任何损耗下的,由于电机在空载并网时建立磁场的过程中会消耗一部分无功功率,而无功功率又和转子励磁电流的 d 轴分量相关,因此式(4)给出的控制原理属于电压开环控制,由于是开环控制,定子电压的控制精度必然受到影响。图 3(a)给出了电压开环控制下的定子电压和电网电压波形(图中, u_{As} 为双馈定子 A 相电压; u_{Agrid} 为双馈网侧 A 相电压);图 3(b)给出了转子励磁电流的 d, q 轴分量(标么值)。可见,由开环控制产生的励磁电流建立的定子电压比电网电压幅值要小,这正是由于 d 轴励磁电流中的一部分被用于维持双馈电机空载时的无功消耗,从而造成真正用于建立定子电压的 d 轴励磁电流偏小,这样的结果必然导致空载并网时产生较大的定、转子冲击电流,显然不利于 DFIG 的安全运行。

采用定子电压开环控制难以保证空载并网过程中的定子电压精度,为此在控制系统中引入定子电压的闭环控制(见图 4)。图中, u_{qgrid} 为定子磁链定向下电网电压的 q 轴分量; u_{qs} 为定子磁链定向下 DFIG

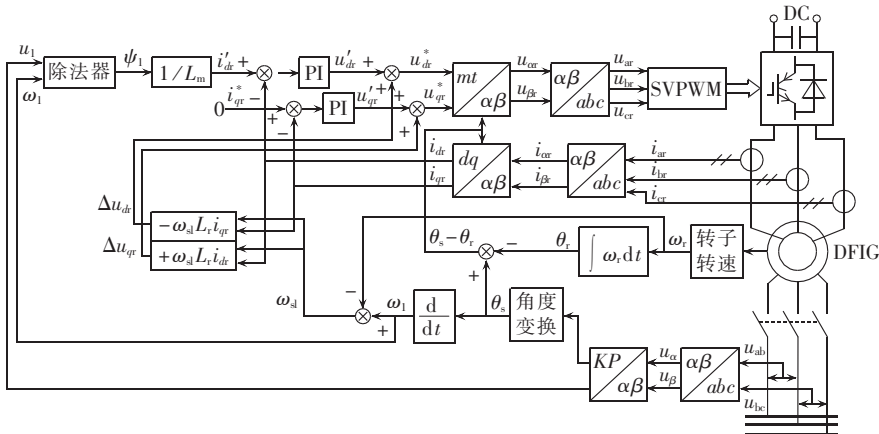


图 2 变速恒频 DFIG 空载并网控制原理图

Fig.2 Block diagram of no-load cutting-in control for VSCF DFIG

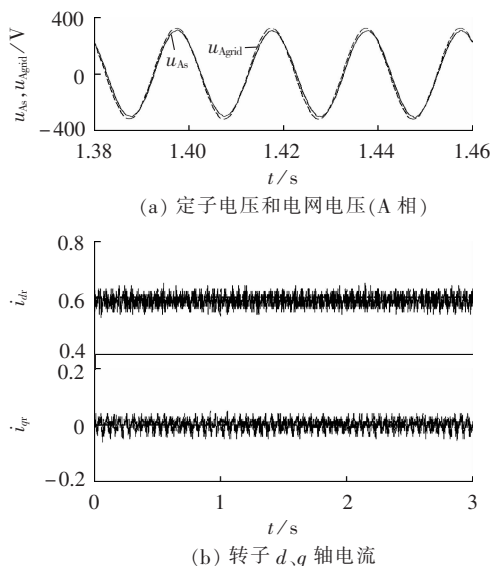


图 3 发电机空载电压及并网过程转子电流(电压开环)

Fig.3 Generator no-load voltage and rotor current at cutting-in moment(voltage open-loop)

定子电压的 q 轴分量。

在这种策略的控制中,转子电流的 q 轴参考分量 i_{qr}^* 仍然为 0,而转子电流的 d 轴分量 i_{dr} 由在广义励磁电流的基础

上引入电网电压与定子电压之差的 PI 调节值后得到。在定子磁链定向后的 dq 坐标系下,定子电压和电网电压的 d 轴分量为 0。而其 q 轴分量为电压矢量的幅值,且并网励磁过程中通过对转子电流的 d 轴分量进行控制建立定子电压,为此将定子电压和电网电压的 q 轴分量引入 PI 调节器,输出即为转子 d 轴参考电流的静态误差补偿量 Δi_{dr}^* 。由于引入了定子电压和网侧电压之差的反馈控制,其控制精度较高,在并网合闸的过程中其冲击亦较小。

4 实验研究

为验证所研究控制算法的正确性,搭建了 30 kW 变速恒频风力发电控制系统。在该系统中,由异步电动机带动 DFIG 模拟变风速运行,DFIG 的转子励磁系统由背靠背双向 PWM 变流器构成。双向 PWM 变流器采用全控型器件 IGBT,调制方式为 SVPWM,其中网侧变流器控制为整流器运行方式^[10-13],开关频率 3000 Hz;机侧变流器控制为逆变器运行方式,开关频率 2000 Hz。DSP 控制板卡核心控制器为 TI 浮点控制器 TMS28346,CPU 管理板卡运行 LINUX 操作系统负责板卡之间信号收集传递、后台通信、故障录波等程序,CPU 管理板卡和 DSP 控制板卡通过控制装置内部 CAN 网进行通信。

DFIG 的参数为:额定功率 30 kW,定子额定电压 380 V,定子额定电流 71 A,转子额定电流 72 A,极对数为 2,同步转速 1500 r/min,转子绕组电阻

$R_r=0.103 \Omega$,定子绕组电阻 $R_s=0.097 \Omega$,转子绕组电感 $L_r=27.81 \text{ mH}$,定子绕组电感 $L_s=27.46 \text{ mH}$,转子开路电压 314 V。背靠背变流器参数:输入交流额定线电压 380 V,额定线电流 45.58 A,直流母线电压 600 V,直流侧电容 3400 μF ,交流滤波电感 2.5 mH,功率器件为 IGBT(SKM150GB12T4)。

图 5 给出了 DFIG 在转速为 1200 r/min 亚同步时电压闭环控制下的定子电压和电网电压波形,可看出由于闭环控制使得电压控制精度比电压开环控制高,且实际的转子 q 轴电流也比开环控制时要大。图 6 给出了电压闭环控制下的空载并网的转子和定子电流,可见在并网过程冲击较小且持续时间很短。

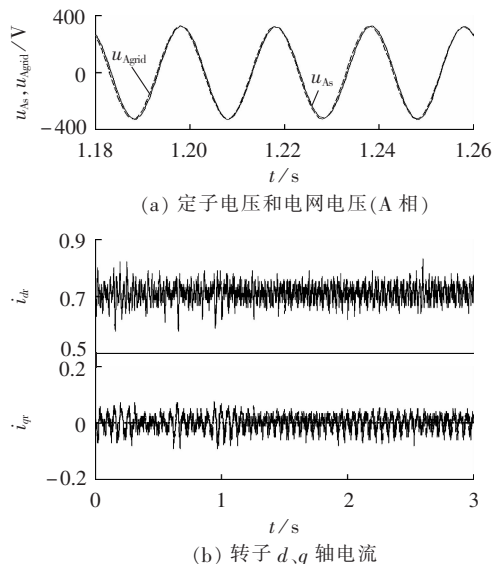


图 5 发电机空载电压及并网过程转子电流(电压闭环)

Fig.5 Generator no-load voltage and rotor current at cutting-in moment(voltage close-loop)

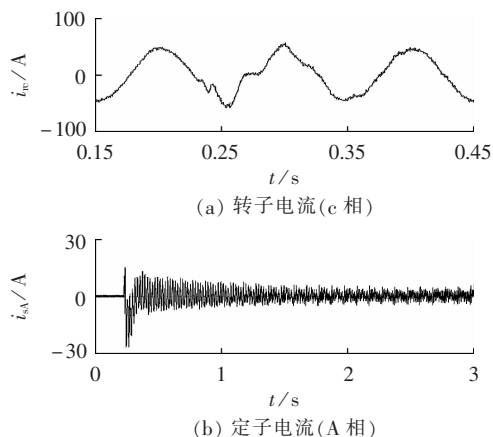


图 6 发电机空载并网过程定、转子电流(电压闭环)

Fig.6 Stator and rotor currents at no-load cutting-in moment(voltage close-loop)

5 结论

实现“软切入”控制是实现双馈风力发电控制的重要前提,目前主要采用“空载并网”的控制方式,由于 DFIG 励磁过程中存在的无功损耗,因此采用开环控制时在空载并网过程中会出现定子电压和电网电

压的静态误差,这个误差使得并网过程中产生一定的冲击电流。本文采用电压闭环控制技术,将开环控制过程中的静态误差自动引入调节系统从而减小空载并网过程中的静态电压差值。实验表明处于空载励磁运行中的DFIG需要一部分无功消耗,而采用所提出的电压闭环控制技术后,可以有效消除开环控制中产生的静态误差从而减小并网过程中的冲击,增强了DFIG的运行安全可靠。

参考文献:

- [1] BOLDEA I, TUTELEA L, SERBAN I. Variable speed electric generators and their control: an emerging technology[J]. Journal of Electrical Engineering, 2002, 1(3): 20-28.
- [2] PENA R, CLARE J C, ASHER G M. Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation[J]. IEE Proceedings: Electric Power Application, 1996, 143(3): 231-241.
- [3] 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.
LIU Qihui, HE Yikang, BIAN Songjiang. Study on the no-load cutting-in control of the Variable-Speed Constant-Frequency (VSCF) wind-power generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 6-11.
- [4] 孟岳勇, 谢少军. 基于DSP的异步风力发电机电阻软并网控制器的设计[J]. 电气开关, 2003, 41(6): 27-30.
MENG Yueyong, XIE Shaojun. Design of the grid connection controller for wind turbine asynchronous generator based on DSP[J]. Electric Switchgear, 2003, 41(6): 27-30.
- [5] 杨淑英, 张兴, 张崇巍, 等. 基于自适应谐振调节器的变速恒频风力发电双馈驱动研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(14): 96-101.
YANG Shuying, ZHANG Xing, ZHANG Chongwei, et al. Study on adaptive resonant regulator-based doubly fed driver for variable-speed constant-frequency wind-power generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(14): 96-101.
- [6] 李晶, 宋家骅, 王伟胜. 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.
LI Jing, SONG Jiahua, WANG Weisheng. Modeling and dynamic simulation of variable speed wind turbine with large capacity[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 100-105.
- [7] 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.
- [8] 刘其辉, 贺益康, 张建华. 交流励磁变速恒频风力发电机的运行控制及建模仿真[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5): 43-50.
LIU Qihui, HE Yikang, ZHANG Jianhua. Operation control and modeling-simulation of AC-Excited Variable-Speed Constant Frequency (AEVSCF) wind power generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5): 43-50.
- [9] 刘其辉, 贺益康, 张建华. 交流励磁变速恒频风力发电机并网控制策略[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(3): 51-55, 70.
LIU Qihui, HE Yikang, ZHANG Jianhua. Grid connection control strategy of AC-excited variable-speed constant-frequency wind power generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(3): 51-55, 70.
- [10] 张崇巍, 张兴. PWM整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 112-128.
- [11] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 59-76.
- [12] WANG Xu, HUANG Kaizheng, WANG Wanwei. Modeling and simulation research for three-phase voltage source PWM rectifier[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(19): 5204-5207.
- [13] 伍小杰, 罗悦华, 乔树通. 三相PWM电压型整流器控制技术综述[J]. 电工技术学报, 2005, 20(12): 7-12.
WU Xiaojie, LUO Yuehua, QIAO Shutong. A control technical summary of three-phase voltage-source PWM rectifiers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(12): 7-12.

(实习编辑: 李莉)

作者简介:

方太勋(1973-), 男, 湖北随州人, 高级工程师, 研究方向为电力电子技术、继电保护控制;

吴小丹(1982-), 男, 江苏宜兴人, 硕士研究生, 研究方向为电力电子技术、风力发电控制(E-mail: wuxd@nari-relays.com);

杨浩(1980-), 男, 湖北荆州人, 硕士研究生, 研究方向为电力电子技术、风力发电控制。

Soft cutting-in control based on voltage close-loop for doubly-fed wind power

FANG Taixun, WU Xiaodan, YANG Hao, ZHOU Qiwen
(NARI-Relays Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: Traditional control methods of wind power generation may produce high impact current at cutting-in moment, which threatens the safety of generator and power system. In order to study the soft grid-connection technology, the experimental excitation control system of a 30 kW VSCF (Variable Speed Constant Frequency) DFIG (Doubly Fed Induction Generator) is designed. According to the operational characteristics of AC excited VSCF wind power generation, the back-to-back converter is used as the excitation source of DFIG. Based on the analysis of DFIG mathematical model in rotating coordinates system, the stator flux-oriented mode is applied in no-load cutting-in algorithm. As partial reactive power is consumed to establish magnetic field in the no-load operation of DFIG, the traditional open-loop control method may cause the inaccuracy of stator voltage. The voltage close-loop control mode is proposed to improve the accuracy of stator voltage at no-load cutting-in moment. Experimental results show that the proposed control method effectively reduces the impact current and realizes the soft cutting-in.

Key words: AC excitation; VSCF; vector control; no-load cutting-in; voltage close-loop