

文章编号:1671-251X(2011)09-0056-05

DOI:CNKI:32-1627/TP.20110828.1427.014

无刷双馈发电机及其控制策略的仿真研究

马诗洋

(中国矿业大学信电学院, 江苏 徐州 221008)

摘要:给出了无刷双馈发电机的转子机械速 $dq0$ 数学模型和定子同步速 MT 数学模型;提出了一种无刷双馈发电机空载并网控制策略,该策略根据定子同步坐标系下无刷双馈发电机有功功率、无功功率给定值,最终得出控制侧定子绕组的电压给定值,将该值进行 $2r/3s$ 变换后输入 SVPWM 调制模块,得到的 PWM 信号用于控制机侧变流器开关管的通断,从而产生定子控制绕组所需的电压、电流;在 Matlab/Simulink 环境下搭建了无刷双馈发电机及其控制仿真模型,并对无刷双馈发电机在空载、并网状态下的动态性能进行了仿真研究。仿真结果验证了所搭建模型及空载并网控制策略的正确性、有效性。

关键词:风力发电;无刷双馈发电机;变速恒频;空载并网控制;Matlab 仿真

中图分类号:TD60 文献标识码:A 网络出版时间:2011-08-28 14:27

网络出版地址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20110828.1427.014.html>

Simulation Research of Brushless Doubly-fed Generator and Its Control Strategy

MA Shi-yang

(School of Information and Electrical Engineering of CUMT., Xuzhou 221008, China)

Abstract: A $dq0$ model based on rotor mechanical velocity reference and a MT model based on stator synchronous velocity reference of brushless doubly-fed generator were given and a grid control strategy without load of brushless doubly-fed generator was proposed. The basic idea of the control strategy is using the given value of active and reactive power of the generator under stator synchronous velocity reference to calculate given voltage of stator windings at the control side, then inputting the calculated result after $2r/3s$ transformation into SVPWM modulation model to generate PWM signal for controlling turn-on and turn-off of switching tube of converter at generator side so as to generate required voltage and current of stator control windings. Models of brushless doubly-fed generator and its control system were established in Matlab/Simulink software, and dynamic performances of the generator were simulated in cases of no load and grid. The simulation results verified correctness and effectiveness of the models and the control strategy.

Key words: wind power generation, brushless doubly-fed generator, variable speed constant frequency, grid control without load, Matlab simulation

0 引言

在大功率风力发电领域,双馈发电机因能有效减少变频器容量而具有无可比拟的优越性。目前工业环境下主要采用双馈感应发电机,即有刷双馈发电机。无刷双馈发电机(BDFG)相对于有刷双馈发

电机取消了滑环和电刷,可维护性好,适用于比较恶劣的场合,在变速恒频风力发电领域具有较好的应用前景^[1]。

参考文献[2]通过分析有刷双馈发电机数学模型的建立过程,首次系统地建立了无刷双馈发电机的数学模型,为无刷双馈发电机控制策略的建立奠定了基础。参考文献[3]在参考文献[2]的基础上,对无刷双馈发电机的模型进行了更深入的研究。本文通过研究无刷双馈发电机数学模型,提出一种无

收稿日期:2011-06-03

作者简介:马诗洋(1987-),男,江苏镇江人,硕士研究生,研究方向为风力发电技术。E-mail:mashiyang1987@163.com

刷双馈发电机空载并网控制策略,并通过空载和并网状态下无刷双馈发电机的仿真研究验证了该控制策略的正确性。

1 无刷双馈发电机的数学模型

1.1 转子机械速坐标系数学模型

在转子机械速 $d-q$ 坐标系下,无刷双馈发电机数学模型为^[4]

$$\begin{cases} u_{pds} = r_{ps} i_{pds} - p_p \Omega_m (l_{ps} i_{pqs} + l_{pm} i_{pqr}) + \frac{d}{dt} (l_{ps} i_{pds} + l_{pm} i_{pqr}) \\ u_{pqs} = r_{ps} i_{pqs} + p_p \Omega_m (l_{ps} i_{pds} + l_{pm} i_{pqr}) + \frac{d}{dt} (l_{ps} i_{pqs} + l_{pm} i_{pqr}) \\ u_{cds} = r_{cs} i_{cds} - p_c \Omega_m (l_{cs} i_{cqs} + l_{cm} i_{cqr}) + \frac{d}{dt} (l_{cs} i_{cds} - l_{cm} i_{pqr}) \\ u_{cqs} = r_{cs} i_{cqs} + p_c \Omega_m (l_{cs} i_{cds} - l_{cm} i_{pqr}) + \frac{d}{dt} (l_{cs} i_{cqs} + l_{cm} i_{pqr}) \\ 0 = (r_{pr} + r_{cr}) i_{pdr} + \frac{d}{dt} [l_{pm} i_{pds} - l_{cm} i_{cds} + (l_{pr} + l_{cr}) i_{pqr}] \\ 0 = (r_{pr} + r_{cr}) i_{pqr} + \frac{d}{dt} [l_{pm} i_{pqs} + l_{cm} i_{cqs} + (l_{pr} + l_{cr}) i_{pqr}] \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_{pds} 、 u_{pqs} 分别为功率侧定子电压 d 轴、 q 轴分量; r_{ps} 、 r_{cs} 分别为功率侧、控制侧定子电阻; i_{pds} 、 i_{pqs} 分别为功率侧定子电流 d 轴、 q 轴分量; p_p 、 p_c 分别为功率绕组、控制绕组极对数; Ω_m 为机械转速; l_{pm} 、 l_{cm} 分别为功率侧、控制侧定子与转子间互感; i_{pdr} 、 i_{pqr} 分别为功率侧转子电流 d 轴、 q 轴分量; l_{ps} 、 l_{cs} 分别为功率侧、控制侧定子自感; u_{cds} 、 u_{cqs} 分别为控制侧定子电压 d 轴、 q 轴分量; r_{pr} 、 r_{cr} 分别为功率侧、控制侧转子电阻; i_{cds} 、 i_{cqs} 分别为控制侧定子电流 d 轴、 q 轴分量; l_{pr} 、 l_{cr} 分别为功率侧、控制侧转子自感。

电磁转矩方程为

$$T_e = \frac{3}{2} [p_p l_{pm} (i_{pqs} i_{pdr} - i_{pds} i_{pqr}) - p_c l_{cm} (i_{cqs} i_{pdr} + i_{cds} i_{pqr})] \quad (2)$$

式中: T_e 为电磁转矩。

运动方程为

$$J \frac{d\Omega_m}{dt} = T_e - T_L - R_n \Omega_m \quad (3)$$

式中: J 为转动惯量; R_n 为摩擦系数; T_L 为负

载转矩。

1.2 定子同步速坐标系数学模型

定子同步速 MT 坐标系下无刷双馈发电机的数学方程为^[2]

$$\begin{cases} u_{pMs} = -r_{ps} i_{pMs} + \omega_p (l_{ps} i_{pTs} - l_{pm} i_{pTr}) + \frac{d}{dt} (-l_{ps} i_{pMs} + l_{pm} i_{pTr}) \\ u_{pTs} = -r_{ps} i_{pTs} - \omega_p (l_{ps} i_{pMs} - l_{pm} i_{pMr}) + \frac{d}{dt} (-l_{ps} i_{pTr} + l_{pm} i_{pMr}) \\ u_{cMs} = r_{cs} i_{cMs} + \omega_c (l_{cs} i_{cTs} + l_{cm} i_{pTr}) + \frac{d}{dt} (l_{cs} i_{cMs} - l_{cm} i_{pMr}) \\ u_{cTs} = r_{cs} i_{cTs} + \omega_c (-l_{cs} i_{cMs} + l_{cm} i_{pMr}) + \frac{d}{dt} (l_{cs} i_{cTs} + l_{cm} i_{pTr}) \\ 0 = \omega_s (l_{pm} i_{pTs} - l_{cm} i_{cTs} - l_r i_{pTr}) + r_r i_{pMr} + \frac{d}{dt} (-l_{pm} i_{pMs} - l_{cm} i_{cMs} + l_r i_{pMr}) \\ 0 = \omega_s (-l_{pm} i_{pMs} - l_{cm} i_{cMs} + l_r i_{pMr}) + r_r i_{pTr} + \frac{d}{dt} (-l_{pm} i_{pTs} + l_{cm} i_{cTs} + l_r i_{pTr}) \end{cases} \quad (4)$$

式中: u_{pMs} 、 u_{pTs} 分别为功率侧定子电压的 M 轴、 T 轴分量; i_{pMs} 、 i_{pTs} 分别为功率侧定子电流的 M 轴、 T 轴分量; ω_p 、 ω_c 分别为功率侧、控制侧转速; i_{cMs} 、 i_{cTs} 分别为控制侧定子电流的 M 轴、 T 轴分量; i_{pMr} 、 i_{pTr} 分别为功率侧转子电流的 M 轴、 T 轴分量; u_{cMs} 、 u_{cTs} 分别为控制侧定子电压的 M 轴、 T 轴分量。

2 无刷双馈发电机空载并网控制策略

在 MT 坐标系中,根据赤木瞬时功率理论,无刷双馈发电机的功率侧瞬时有功功率 P 和无功功率 Q 的表达式为^[2,4]

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2} (u_{pMs} i_{pMs} + u_{pTs} i_{pTs}) \\ Q = \frac{3}{2} (u_{pTs} i_{pMs} - u_{pMs} i_{pTs}) \end{cases} \quad (5)$$

稳态时认为定子磁链 ψ_{ps} 恒定不变,根据所需的有功功率、无功功率给定值 P^* 、 Q^* ,结合电网电压 u_{pm} ,可以算出定子功率绕组电流 M 、 T 轴分量的给定值 i_{pMs}^* 、 i_{pTs}^* :

$$\begin{cases} i_{pMs}^* = -\frac{2Q^*}{3u_{pm}} \\ i_{pTs}^* = -\frac{2P^*}{3u_{pm}} \end{cases} \quad (6)$$

根据计算所得的 i_{pMs}^* 、 i_{pTs}^* 值,结合功率侧转子绕

组磁链方程,可得到功率侧转子电流给定值 i_{pMr}^* 、 i_{pTr}^* :

$$\begin{cases} i_{pMr}^* = \frac{l_{ps} i_{pMs}^* - \psi_{ps}}{l_{pm}} \\ i_{pTr}^* = \frac{l_{ps} i_{pTs}^*}{l_{pm}} \end{cases} \quad (7)$$

将计算所得的 i_{pMs}^* 、 i_{pTs}^* 、 i_{pMr}^* 、 i_{pTr}^* 代入式(4)中的最后两个等式,可以得到控制侧定子电流给定值 i_{cMs}^* 、 i_{cTs}^* :

$$\begin{cases} i_{cMs}^* = \frac{r_r i_{pTr}^* - l_{pm} i_{pMs}^* + l_r i_{pMr}^*}{\omega_s l_{cm}} \\ i_{cTs}^* = \frac{r_r i_{pMr}^* + l_{pm} i_{pTs}^* - l_r i_{pTr}^*}{\omega_s l_{cm}} \end{cases} \quad (8)$$

最后将得到的 i_{cMs}^* 、 i_{cTs}^* 、 i_{pMr}^* 、 i_{pTr}^* 值代入式(4),可得到控制侧定子绕组所需要的电压给定值 u_{cMs}^* 、 u_{cTs}^* :

$$\begin{cases} u_{cMs}^* = (r_{cs} + l_{cs} p) i_{cMs}^* + \omega_c (l_{cs} i_{cTs}^* + l_{cm} i_{pTr}^*) \\ u_{cTs}^* = (r_{cs} + l_{cs} p) i_{cTs}^* - \omega_c (l_{cs} i_{cMs}^* - l_{cm} i_{pMr}^*) \end{cases} \quad (9)$$

空载运行时, $i_{pMs}^* = 0$, $i_{pTs}^* = 0$ 。式(7)和式(9)可分别简化为

$$\begin{cases} i_{pMr}^* = -\frac{\psi_{ps}}{l_{pm}} \\ i_{pTr}^* = 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} u_{cMs}^* = (r_{cs} + l_{cs} p) i_{cMs}^* + \omega_c l_{cs} i_{cTs}^* \\ u_{cTs}^* = (r_{cs} + l_{cs} p) i_{cTs}^* - \omega_c (l_{cs} i_{cMs}^* - l_{cm} i_{pMr}^*) \end{cases} \quad (11)$$

根据式(9)或式(11), u_{cMs}^* 、 u_{cTs}^* 经过 $2r/3s$ 变换后可得到 u_{cas}^* 、 $u_{c\beta s}^*$, 将其作为 SVPWM 调制模块的输入量, 经过控制器运算得到变流器所需要的 PWM 信号, 控制机侧功率变换器开关管的开通、关断, 从而产生定子控制绕组所需要的电压电流, 使得定子功率侧电压与电网电压保持一致, 实现无刷双馈发电机的变速恒频发电。

3 仿真与分析

仿真中设定无刷双馈发电机参数: 摩擦系数 $B=0.04$, 转动惯量 $J=0.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 极对数、定子自感、定子电阻、转子电阻、转子自感和互感分别为 $p_p=3$, $l_{ps}=0.15576 \text{ H}$, $r_{ps}=2.665 \text{ } \Omega$, $r_{pr}=2.5212 \text{ } \Omega$, $l_{pr}=0.15576 \text{ H}$, $l_{pm}=0.14543 \text{ H}$, $p_c=3$, $l_{cs}=0.1073 \text{ H}$, $r_{cs}=2.638 \text{ } \Omega$, $r_{cr}=2.273 \text{ } \Omega$, $l_{cr}=0.1073 \text{ H}$, $l_{cm}=0.1066 \text{ H}$; 功率绕组接 380 V 、 50 Hz 的三相工频电源。在 Matlab/Simulink7.0 环境下搭建无刷双馈发电机仿真模型。

3.1 基于转子机械速坐标系的无刷双馈发电机仿真与分析

设定功率绕组与控制绕组均接三相交流电源, 且无刷双馈发电机运行处于双馈运行状态。当无刷双馈发电机的控制绕组与功率绕组相序相反时, 控制绕组电压频率 $f_c < 0$, 发电机转速小于同步速, 此时发电机处于亚同步运行状态; 当无刷双馈发电机的控制绕组和功率绕组相序相同时, $f_c > 0$, 发电机转速大于同步速, 此时发电机处于超同步运行状态。

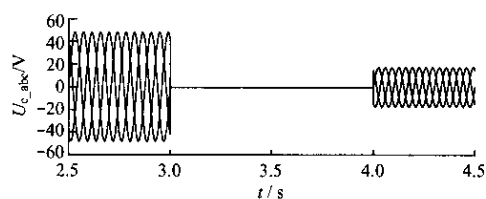
由于无刷双馈发电机的控制侧不直接接入电网, 而是通过变流器接入电网, 所以需要注意控制绕组电压和频率的选取。这里采用最优压频控制, 即控制绕组的输入电压和频率的比值保持恒定。压频比的选择应适中, 若压频比太小, 不能产生足够的转矩使发电机进入同步运行; 若压频比太大, 则容易使发电机产生振荡而不能稳定^[5]。

控制绕组在 $t=0 \text{ s}$ 、 $t=3 \text{ s}$ 、 $t=4 \text{ s}$ 时分别施加频率为 8 Hz 、 0 Hz 、反相序 5 Hz 的电压, 由式(12)可知发电机分别运行于亚同步速 420 r/min 、同步速 500 r/min 、超同步速 550 r/min 。

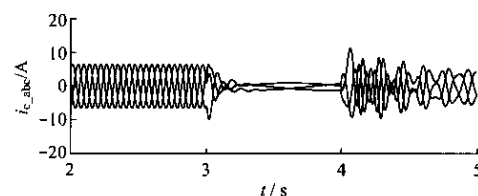
$$n = 60 \frac{f_p \pm f_c}{p_p + p_c} \quad (12)$$

式中: f_p 为功率绕组电压频率。

此时控制绕组上的电压、电流仿真波形分别如图1所示, 发电机转速、电磁转矩的动态曲线如图2所示。由于电压频率较高, 为便于分析, 这里只截取部分仿真波形。



(a) 电压波形



(b) 电流波形

图1 转子机械速坐标系下无刷双馈发电机控制绕组的电压、电流局部仿真波形

从图1、图2可看出, 调节控制绕组供电电压的幅值和频率即可调节控制绕组的电流, 进而改变发

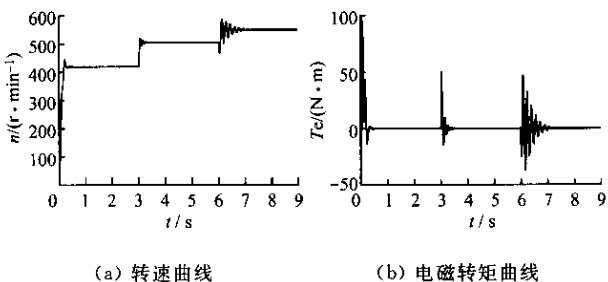


图2 转子机械坐标系下无刷双馈发电机的
转速、电磁转矩动态曲线

电机的电磁转矩,最终实现调节转速的目的。发电机在稳定运行时,其转速与定子绕组的供电电压频率符合式(12)的关系,从而验证了发电机模型的正确性。

3.2 空载状态下无刷双馈发电机系统仿真

空载运行时,无刷双馈发电机的定子功率绕组

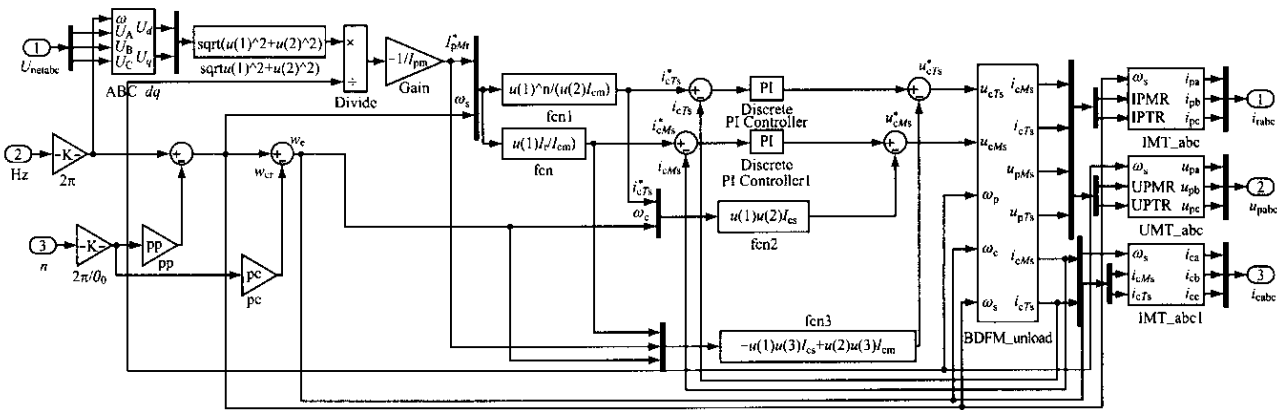


图4 空载状态下的无刷双馈发电机系统控制仿真模型

给定转速:初始时刻为亚同步速 300 r/min,1 s 后变为同步速 500 r/min,1.5 s 后变为超同步速 700 r/min。图 5、图 6 分别给出了空载状态下无刷双馈发电机在给定转速下控制绕组电流和功率绕组电压仿真波形。从图 6 可看出,功率绕组的电压保持恒压恒频,在转速变化时发生轻微的震荡,但能很快恢复稳定,说明系统动态性能良好。

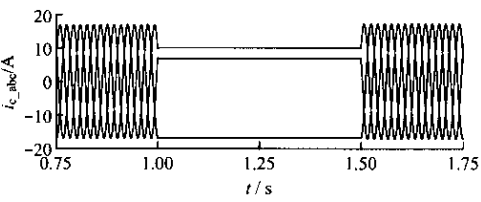


图5 空载状态下无刷双馈发电机控制绕组
电流局部仿真波形

图 7 为 i_{cMs} 、 i_{cTs} 跟踪曲线。从图 7 可看出, i_{cMs} 、 i_{cTs} 能很快跟踪到指令值 i_{cMs}^* 、 i_{cTs}^* 。

相电流为零。在给定 350 r/min 转速下稳态运行,检测定子功率绕组空载电压与电网电压在波形、幅值、相位上是否一致,为并网状态下发电机系统仿真做准备。

建立无刷双馈发电机系统仿真及控制模型,分别如图 3、图 4 所示。

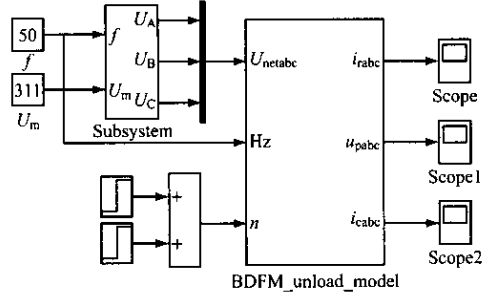


图3 空载状态下的无刷双馈发电机系统仿真模型

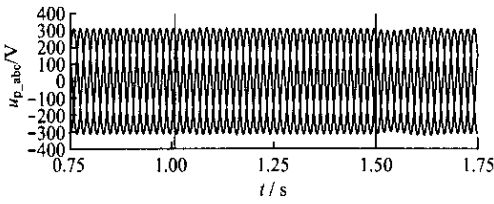
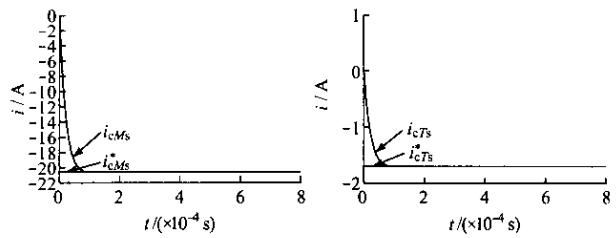


图6 空载状态下无刷双馈发电机功率绕组
电压局部仿真波形



(a) i_{cMs} 跟踪曲线

(b) i_{cTs} 跟踪局部放大曲线

图7 i_{cMs} 、 i_{cTs} 跟踪曲线

图 8 为无刷双馈发电机功率绕组 A 相空载电压与电网 A 相电压的误差曲线,体现了这两个电压

之间相一致的调节过程。从图8可看出,随着转速的突变,两者的差值很快稳定下来,满足并网要求,说明了所采用的空载并网控制策略具有一定的实用价值,可应用于并网控制实验。

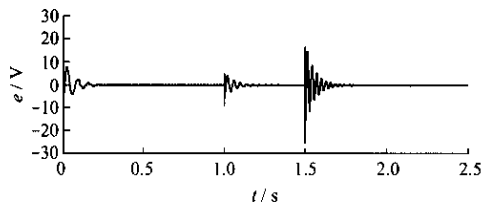
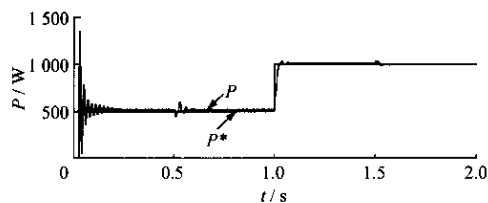


图8 无刷双馈发电机功率绕组A相空载电压与电网A相电压的误差曲线

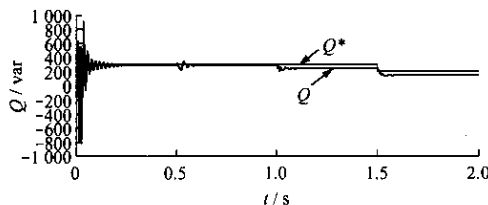
3.3 并网状态下无刷双馈发电机系统仿真

并网运行时,有功功率给定为 $t=1\text{ s}$ 时由500 W上升到1 000 W,无功功率给定为 $t=1.5\text{ s}$ 时由200 var下降到100 var,转速给定为 $t=0.5\text{ s}$ 时由200 r/min上升到450 r/min。

图9(a)给出了无刷双馈发电机功率侧的输出有功功率和给定有功功率,图9(b)给出了输出无功功率和给定无功功率。从图9可看出,输出功率和给定功率存在一定的稳态误差,但是在可接受的范围内,可通过修改PI参数来降低误差。



(a) 有功功率



(b) 无功功率

图9 并网状态下无刷双馈发电机系统的功率侧输出功率与给定功率

图10、图11分别为并网状态下无刷双馈发电机系统的控制侧和功率侧定子电流仿真波形。从图10可看出,在0.5 s转速发生变化时,控制侧定子电流的频率和相位相应地发生了变化;在功率侧给定有功功率和给定无功功率发生改变时,控制侧

定子电流的幅值也相应改变,以满足功率侧变速恒频发电的需要。从图11可看出,转速变化时,功率侧定子电流基本不变;当给定有功功率发生变化时,功率侧的定子电流幅值会发生变化。

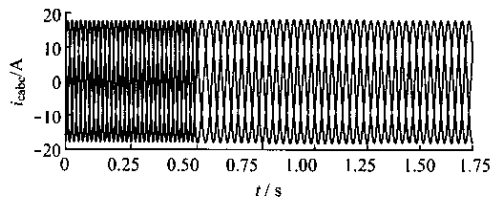


图10 并网状态下无刷双馈发电机系统的控制侧定子电流局部仿真波形

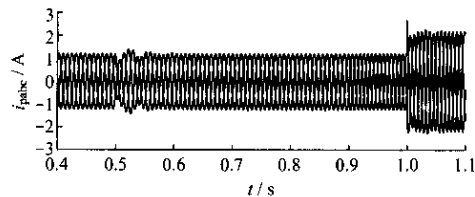


图11 并网状态下无刷双馈发电机系统的功率侧定子电流局部仿真波形

4 结语

在Matlab/Simulink环境下建立了无刷双馈发电机的仿真模型,并对无刷双馈发电机在不同运行方式下的动态特性进行了仿真研究。仿真结果表明,提出的无刷双馈发电机空载并网控制策略是正确、有效的,且无刷双馈发电机定子功率绕组能输出符合电网要求的电能,为其应用于风力发电系统奠定了理论基础。

参考文献:

- [1] 许洪华,郭金东,鄂春良.世界风电技术发展趋势和我国未来风电发展探讨[J].电力设备,2005,6(10):106-108.
- [2] 阳锦刚.级联式无刷双馈风力发电机的研究[D].杭州:浙江大学,2007.
- [3] 卞松江.变速恒频风力发电关键技术研究[D].杭州:浙江大学,2003.
- [4] 卞松江,贺益康,潘再平.级联式无刷双馈电机的建模与仿真[J].中国电机工程学报,2001(12):33-36.
- [5] 邓先明,王冬冬,马志勋,等.无刷双馈电动机最优压频控制策略[J].工矿自动化,2009(8):66-68.
- [6] 刘航航,韩力.无刷双馈电机控制策略发展综述[J].微特电机,2010(9):69-73.