

双馈异步发电机组控制策略的仿真分析

李大虎, 石新春

(华北电力大学 电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 介绍了双馈异步发电机(DFIG)的运行原理, 通过坐标变换建立了DFIG在同步旋转坐标系下的数学模型。采用定子磁链定向矢量控制策略, 建立了基于功率和电流双闭环控制策略模型。并利用Matlab/Simulink仿真软件对控制策略进行仿真, 在仿真模型下进行了最大风能追踪和并网运行特性的研究, 仿真的结果证明了控制算法的正确性和良好的控制性能。

关键词: 风力发电; 双PWM变换器; 双馈异步发电机; 变速恒频

中图分类号: TP39; TM315

文献标识码: A

文章编号: 1671-8410(2011)02-0049-06

Simulation Analysis of Control Strategy for Doubly-fed Induction Generators

LI Da-hu, SHI Xin-chun

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding, Hebei 071003, China)

Abstract: Running theory of the DFIG is introduced, and the mathematics model of DFIG in the synchronous rotary coordinate is established by coordinate transformation. The stator flux oriented vector control strategy is used to build up the control strategy model based on power and current dual-closed-loop control strategy. It is simulated by means of Matlab/Simulink software. The maximum wind tracking and operational characteristics of grid are researched under the simulation model. The simulation results prove the validity of control algorithms and good control performance.

Key words: wind power generation; dual-PWM converter; doubly-fed induction generator; variable-speed constant-frequency

0 引言

近年来, 可再生能源的开发利用越来越受到重视, 而风力发电是最廉价、最有希望的绿色能源, 具有很大的研究价值, 因此, 风力发电技术逐渐成为了研究的热点。其中变速恒频双馈风力发电是20世纪70年代中后期逐渐发展起来的一种新型风力发电技术, 在风力发电方面体现了显著的优越性和广阔的应用前景。近10多年来, 在国家相关部门的大力支持下, 不仅并网风电场的建设迅速发展, 而且风电技术也得到了快速的发展。目前交流励磁双馈发电系统在国内外得到了

广泛应用, 在技术上相对于其他风电系统也具有很大优势。因此, 对交流励磁双馈发电系统的开发和研究已成为未来社会的热点^[1]。

变速恒频风力发电系统允许风力机根据风速的变化以不同的转速旋转, 其优越性在于: 低风速时能够跟踪风速变化, 获得最大风能, 以保证最大的风能利用率; 而在高风速时通过调节风力机的桨距角, 在保证风电机组安全稳定运行的同时能使功率输出更加平稳^[2]。

文献[3-6]分别对双馈异步发电机(DFIG)交流励磁变速恒频的运行机理、发电机的柔性并网技术、交流励磁发电机的矢量控制进行了研究, 不仅提出了正确的理论, 同时进行了实验验证。文献[7-8]根据风力机的特性, 探讨了追踪最大风能的方法, 提出了变速恒频风力发电的有功、无功功率解耦控制策略, 并验证了其正确

收稿日期: 2011-01-06

作者简介: 李大虎(1986-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动, 主要从事风力发电变流技术及风力机控制的研究。

性和可行性。

本文针对交流励磁变速恒频风力发电系统进行了分析,DFIG采用定子磁链定向矢量的控制策略,不仅实现了有功、无功的独立调节,而且实现了不同风速下最大风能追踪;在Matlab仿真软件中搭建了仿真模型,针对DFIG的运行特性进行了仿真研究。

1 DFIG的基本原理

1.1 变速恒频运行基本原理

DFIG作变速恒频风力发电运行时,风力发电系统的典型结构如图1所示。

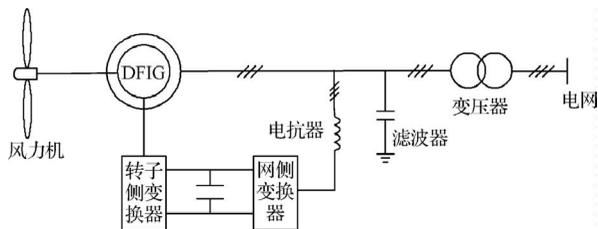


图1 双馈风力发电系统结构框图

Fig. 1 Structure diagram of doubly-fed wind generator

DFIG在结构上类似于绕线式异步电机,旋转电机的定子和转子均安放对称三相绕组,其定子与普通交流电机定子相似,转子绕组由具有可调节频率的对称三相电源激励。运行时,定子侧直接接入三相工频电网,而转子侧通过变频器接入所需低频电流。其定子与转子两侧都有能量的馈送,所以称为双馈电机^[2]。

由电机学基本原理可知如下关系式成立:

$$\left. \begin{aligned} n_1 &= n_r \pm n_2 \\ f_1 &= p \times n_1 / 60 \\ s &= \frac{n_1 - n_r}{n_1} \\ f_2 &= p \times n_2 / 60 = s \times f_1 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: n_1 ——定子磁场的转速; n_r ——DFIG转子的角速度; n_2 ——转子磁场相对于转子的转速; p ——电机的极对数; f_1 ——定子电流的频率; f_2 ——转子电流的频率; s ——DFIG的转差率。

DFIG在超同步速运行时,其转子旋转磁场与转子机械旋转方向相反,此时除定子向电网馈送能量外,转子也向电网馈送一部分电能。

DFIG在亚同步速运行时,其转子旋转磁场与转子机械旋转方向相同,此时定子向电网馈送能量,而转子需要馈入能量。DFIG的励磁可调量有:励磁电流的频率、幅值和相位。可以通过接在转子侧的变频器调节励磁电流频率,保证在变速运行情况下发出恒频电流;也可以通过改变励磁电流的幅值和相位,调节输出的有

功功率和无功功率。

1.2 DFIG的数学模型

在讨论DFIG的数学模型时,按照电动机惯例,并且把转子侧各个物理量折算到定子侧^[3],所建立两相同步旋转坐标系下的数学模型如下:

(1)电压方程

$$\left. \begin{aligned} u_{d1} &= R_1 i_{d1} + p\psi_{d1} - \omega_1 \psi_{q1} \\ u_{q1} &= R_1 i_{q1} + p\psi_{q1} + \omega_1 \psi_{d1} \\ u_{d2} &= R_2 i_{d2} + p\psi_{d2} - \omega_s \psi_{q2} \\ u_{q2} &= R_2 i_{q2} + p\psi_{q2} + \omega_s \psi_{d2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: u_{d1} ——定子 d 轴上的电压; u_{q1} ——定子 q 轴上的电压; u_{d2} ——转子 d 轴上的电压; u_{q2} ——转子 q 轴上的电压; i_{d1} ——定子 d 轴上的电流; i_{q1} ——定子 q 轴上的电流; i_{d2} ——转子 d 轴上的电流; i_{q2} ——转子 q 轴上的电流; ψ_{d1} ——定子 d 轴上的磁链; ψ_{q1} ——定子 q 轴上的磁链; ψ_{d2} ——转子 d 轴上的磁链; ψ_{q2} ——转子 q 轴上的磁链; R_1 ——定子绕组上的等效电阻; R_2 ——转子绕组上的等效电阻; ω_1 ——定子旋转磁场速度; ω_s ——转差角速度 $\omega_s = s\omega_1$ 。

(2)磁链方程式

$$\left. \begin{aligned} \psi_{d1} &= L_1 i_{d1} + L_m i_{d2} \\ \psi_{q1} &= L_1 i_{q1} + L_m i_{q2} \\ \psi_{d2} &= L_m i_{d1} + L_2 i_{d2} \\ \psi_{q2} &= L_m i_{q1} + L_2 i_{q2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: L_1 ——定子自感; L_2 ——转子自感; L_m ——定子和转子之间的互感。

(3)电磁转矩方程式

$$T_e = pL_m (i_{q1} i_{d2} - i_{d1} i_{q2}) \quad (4)$$

式中: T_e ——DFIG的电磁转矩。

2 DFIG的控制策略

为了实现发电机输出电压的频率控制及输出有功、无功功率的独立调节,以及完全实现 d 、 q 轴变量之间的解耦,本系统采用定子磁链定向矢量控制方法^[4]。将参考坐标系放在以同步速度旋转的磁场上,并使 d 轴与定子磁链空间矢量的方向重合,其矢量图如图2所示,图中 A 轴为定子 a 相绕组轴线, a 轴为转子 a 相绕组轴线。

由图2所示的定子磁链定向方式可得:

$$\left. \begin{aligned} \psi_{d1} &= \psi_1 \\ \psi_{q1} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: ψ_1 ——DFIG定子磁链。

将式(5)代入磁链方程(式(3))可以得到:

$$\left. \begin{aligned} \psi_{d1} &= L_1 i_{d1} + L_m i_{d2} = \psi_1 = L_m i_{ms} \\ \psi_{q1} &= L_1 i_{q1} + L_m i_{q2} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

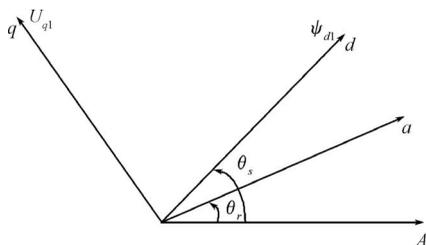


图2 双馈电机定子磁链定向矢量图

Fig. 2 Vector-oriented diagram of doubly-fed motor's stator flux

其中 i_{ms} 定义为广义励磁电流, 则:

$$i_{ms} = \frac{\psi_1}{L_m} \approx \frac{u_1}{L_m \omega_1} \quad (7)$$

式中: u_1 —— 定子电压空间矢量的幅值。

由式(6)可以推得:

$$\left. \begin{aligned} i_{d1} &= \frac{\psi_{d1} - L_m i_{d2}}{L_1} = \frac{L_m (i_{ms} - i_{d2})}{L_1} \\ i_{q1} &= \frac{-L_m}{L_1} i_{q2} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

将式(8)带入式(3)后, 转子磁链方程式可以改写成:

$$\left. \begin{aligned} \psi_{d2} &= \frac{L_m^2}{L_1} i_{ms} + \left(L_2 - \frac{L_m^2}{L_1} \right) i_{d2} \\ \psi_{q2} &= \left(L_2 - \frac{L_m^2}{L_1} \right) i_{q2} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

在忽略定子绕组的情况下, 且保持定子磁链不变, 则由电压方程(式(2))可得:

$$\left. \begin{aligned} u_{d1} &\approx p\psi_1 = 0 \\ u_{q1} &\approx \omega_1 \psi_1 = u_1 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

由此可以看出定子电压矢量 d 轴分量接近于0, 此时定子磁链与定子电压矢量近似垂直, 由此可知当保持电网电压幅值和频率不变时, 定子磁链恒定, 此时定子广义励磁电流不会发生改变, DFIG 定子侧有功功率 P_1 和无功功率 Q_1 分别为:

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= u_{d1} i_{d1} + u_{q1} i_{q1} = u_1 i_{d1} \\ Q_1 &= u_{q1} i_d - u_{d1} i_{q1} = u_1 i_{q1} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

因此可以通过控制定子电流来分别控制定子侧有功和无功分量, 又由于定子电流和转子电流之间存在线性关系, 可以通过控制转子电流来实现有功和无功的解耦控制。

将式(9)代入转子电压方程(2)可得:

$$\left. \begin{aligned} u_{d2} &= R_2 i_{d2} + \sigma L_2 p i_{d2} - \omega_s \sigma L_2 i_{q2} \\ u_{q2} &= R_2 i_{q2} + \sigma L_2 p i_{q2} + \omega_s (\sigma L_2 i_{q2} + L_m^2 i_{m1} / L_1) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

其中 $\sigma = 1 - L_m^2 / L_r L_s$, 定义为漏磁系数。定义转子电压和电流之间交叉耦合的补偿为:

$$\left. \begin{aligned} \Delta u_{d2} &= -\omega_s \sigma L_2 i_{q2} \\ \Delta u_{q2} &= \omega_s (\sigma L_2 i_{q2} + L_m^2 i_{m1} / L_1) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中: u_{d2} —— 转子 d 轴电压补偿分量; u_{q2} —— 转子 d 轴电压补偿分量。

电磁转矩的表达式可改写成:

$$T_e = -p \frac{L_m}{L_1} i_{q2} \psi_1 \quad (14)$$

由以上的公式推导可以看出: 当定义广义励磁电流保持恒定时, 电磁转矩正比于 i_{q2} , 而转子励磁由 i_{d2} 决定。当定子侧功率因数保持为1时, 电动机的励磁电流全部由转子提供, 即 $i_{d1}^* = i_{ms}$, 再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流的 d 轴分量和 q 轴分量, 分别控制电动机的转子励磁和电磁转矩, 这样就实现了双馈电机的有功功率和无功功率的解耦控制^[5-6]。

根据以上的分析可以得出如图3所示的双馈电机定子磁链定向矢量控制系统框图。控制系统采用双闭环的控制结构, 内环采用电流控制环, 而外环采用功率控制环。有功功率和无功功率的参考计算模型可分别得出 P^* 和 Q^* , 通过与有功功率的反馈值 P 和无功功率的反馈值 Q 进行比较, 经过PI环节调节输出定子有功电流和无功电流的参考值 i_{d1}^* 和 i_{q1}^* 。根据定子电流与转子电流之间的关系计算出转子有功电流和无功电流的参考值 i_{d2}^* 和 i_{q2}^* 。然后 i_{d2}^* 和 i_{q2}^* 再与转子电流的反馈信号 i_{d2} 和 i_{q2} 比较, 其差值输入PI电流调节器。调节后的输出电压加上电压补偿分量 u_{d2} 和 u_{q2} 就可以得出转子电压指令 u_{d2}^* 和 u_{q2}^* , 通过坐标变换得出SVPWM的调制信号, 实现对DFIG的控制。

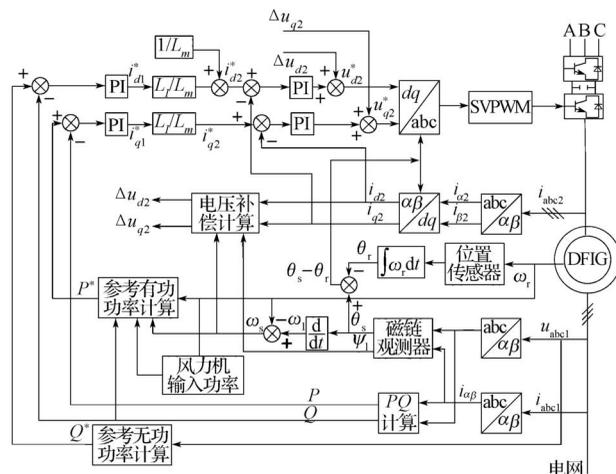


图3 DFIG 定子磁链定向矢量控制框图

Fig. 3 Diagram of DFIG stator flux vector-oriented control

3 DFIG 最大风能追踪控制

自然界风速的随机性会引起风力机输入功率也随

机变化,从图4可以看出,在不同的风速下风力机输出的机械功率随着风轮转速的变化而变化,但各种风速下都对应着一个最大功率点,这一点对应着最大的风能利用系数 $C_{p\max}$ 。由此可知在不同的风速下都存在着最大功率的输出,连接起来就得到了图中的最大功率曲线 P_{opt} 。保证风力机运行在最大功率曲线上,风力机捕获最大的风能并输出最大的机械功率是本文的控制目标^[7-8]。

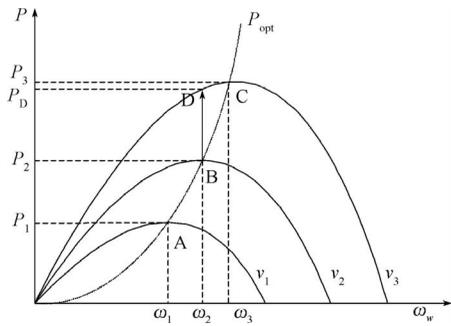


图4 最大风能追踪示意图

Fig. 4 Diagram of maximum wind energy tracking

最大风能捕获的过程如图4所示,如果风力机在风速 v_2 下稳定运行在最大功率曲线 P_{opt} 的B点上,此时DFIG的转速 ω_2 和功率输出 P_2 均处于最佳的运行状态,并且DFIG的输出功率和风力机的输入功率是相等的。当风速由 v_2 突变到 v_3 时,风力机会随着风速的变化由B点突变到D点,输出的机械功率也由 P_2 突变到 P_D 。但此时由于DFIG的机械惯性和调节过程的滞后,发电机仍然在B点运行,此时DFIG的输入机械功率大于发电机输出功率,引起转速的增加,进而使DFIG输出功率逐渐增加。在变化过程中,风力机沿着风速 v_3 下功率曲线DC轨迹运行,而发电机沿着最大风能利用曲线BC轨迹运行。当在风速 v_3 下风力机的输出功率与最佳功率曲线相交于C点时,功率将会再一次平衡,此时在风速 v_3 下DFIG转速稳定在 ω_3 点,风力机输出的功率稳定在 P_3 点。风速突然变小的过程是相反的运行过程。

4 仿真试验分析

4.1 DFIG稳定运行的验证

为了验证并网控制策略的正确性,进行了交流励磁变速恒频风力发电并网仿真的验证,分析了在亚同步速、同步速、超同步速运行时并网控制下网侧电压电流与转子电流。

DFIG的主要参数如下:

额定电压 V_{nom}	690 V
额定转速 n_r	1 500 r/min
极对数 p	2

额定频率 f_{nom}	50 Hz
定子电阻 R_1	0.010 8 p.u.
转子电阻 R_2	0.102 p.u.
定子绕组漏感 L_{l1}	0.102 p.u.
L_{l2}	0.11 p.u.
PWM开关频率 f_{PWM}	2 kHz

由于DFIG转子励磁电流的幅值、相位、相序和频率都是可控的,调节转子励磁就可以使发电机定子端电压与电网电压相同,实现并网,仿真结果如图5~图7所示。

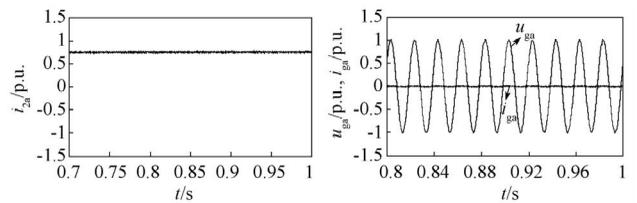


图5 同步速下的运行状态

Fig. 5 Running state under the synchronous speed

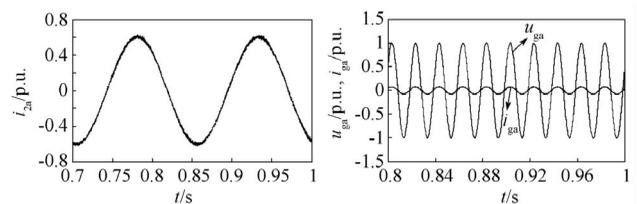


图6 亚同步速下的运行状态

Fig. 6 Running state under the sub-synchronous speed

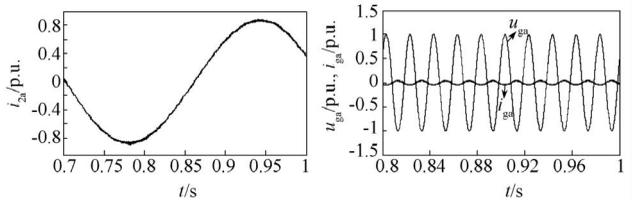


图7 超同步速下的运行状态

Fig. 7 Running state under the super-synchronous speed

图5为DFIG在同步速($n_r=1\ 500$ r/min)下的并网运行状态。从图中可以看出,转子电流 i_{2a} 为一恒定的值,由式(1)可知,当DFIG运行在同步速时定子电流的频率保持在50 Hz,转子电流频率为0,因此为直流电流。图6为DFIG在亚同步速($n_r=1\ 300$ r/min)下的并网运行状态,转子电流频率发生了明显的变化,而电网侧的电压和电流也处于同相位。这不仅保证了网侧换流器在单位功率因数下运行,而且验证了在亚同步速下功率是由电网侧流向DFIG转子侧的。图7为DFIG在超同步速($n_r=1\ 600$ r/min)下的并网运行状态,随着转速的增加,定子电流的幅值和频率都发生了变化,网侧电压电流方向相反。这表明在超同步速下功率由转子侧流向电网。

通过以上的仿真验证了DFIG采用定子磁链定向矢

量控制策略的正确性,实现了DFIG在风速变化时变速恒频运行以及功率的流动特性。

4.2 最大风能追踪控制仿真

为了验证最大跟踪仿真的正确性,并网后通过改变风速进行试验验证。并网后风力机以7 m/s的速度正常运行,运行5 s后风速突变为9.6 m/s。通过在两种不同风速下DFIG的运行特性了解追踪最大风能的过程。

仿真系统的无功功率参考值为0,风力机的最佳叶尖速比 $\lambda_{opt}=8.1$,风力机与DFIG轴之间的齿轮箱增速比 $N=8.34$,此时DFIG角速度 ω_r 与风力机角速度 ω_w 之间的关系为:

$$\omega_r = N\omega_w \tag{14}$$

根据风力机的特性,风速 v 与DFIG最佳角速度 ω_{ropt} 对应关系为:

$$\omega_{ropt} = N \frac{\lambda_{opt} v}{R} = 8.34 \times \frac{8.1 v}{4.3} = 15.7 v \tag{15}$$

式中: R ——风力机叶片半径。

图8是风速的变化过程,在DFIG运行5 s后风速突变为9.6 m/s。图9是在最大风能追踪的控制下,DFIG角速度的变化过程。在风速初始值为7 m/s的运行状态下,DFIG的角速度 ω_r 也处于稳定状态;当运行5 s后风速跳变为9.6 m/s时 ω_r 发生了明显的调整。从风速与双馈电机角速度 ω_r 之间的对应关系可以看出:在风速为7 m/s和9.6 m/s时,DFIG角速度 ω_r 分别为110 rad/s和151 rad/s,仿真结果与计算完全吻合,实现了最大风能追踪控制。

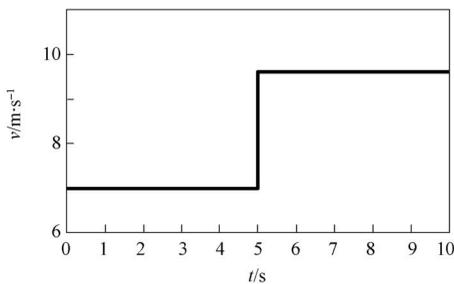


图8 风速
Fig. 8 Wind speed

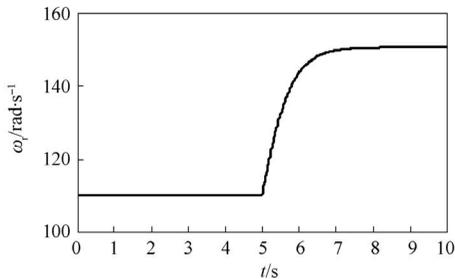


图9 DFIG角速度 ω_r
Fig. 9 Angular velocity of DFIG

化,DFIG的输出转矩和定子有功功率也都随着风速的突变有明显变化,在短暂的调节过程后,定子有功功率按照最大风能追踪原理最终稳定在风力机的最大跟踪曲线上;而无功保持不变。在运行5 s后转矩也发生明显的变化。转矩为负数,表示DFIG处于发电的状态中。

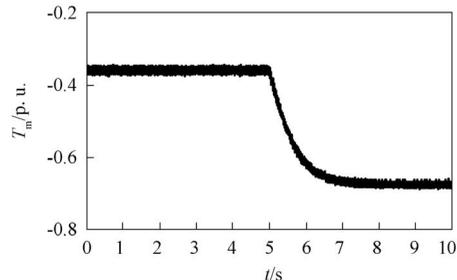


图10 DFIG的输出转矩
Fig. 10 Output torque of DFIG

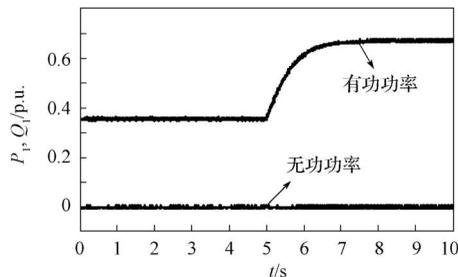


图11 定子有功和无功功率
Fig. 11 P_1 and Q_1

图12和图13分别为风速变化过程中DFIG转子一相电流 i_{2a} 和直流电压 V_{dc} 的变化过程。从图中可以明显看出,当风速变化引起DFIG转速变化时,转子电流不仅在幅值上发生变化,在频率上也有所调整。幅值的改变是跟随风速的变化,并且反映了DFIG输出功率的改变。而

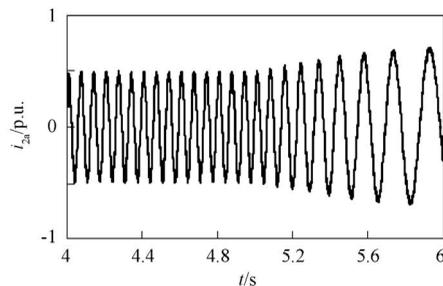


图12 转子一相电流
Fig. 12 One phase current of rotor

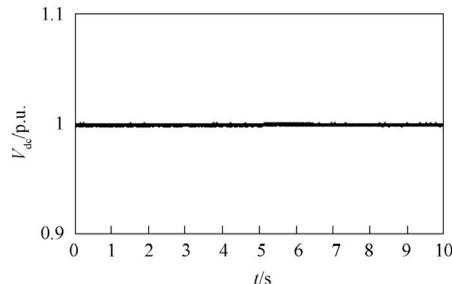


图13 直流电压
Fig. 13 DC voltage

图10和图11分别为最大风能追踪过程中DFIG的输出转矩和定子有功、无功功率的变化。随着风速的变

电机角速度 ω_r 的变化决定了定子电流频率的变化,这也验证了变速恒频的原理。而直流母线电压在风速变化时仅稍有波动,整个过程保持稳定状态。

5 结语

本文对DFIG的定子磁链定向矢量控制方法进行了深入分析,并且推导出了定子有功功率和无功功率解耦控制策略,设计出DFIG的矢量控制系统,并利用Matlab/Simulink软件建立了基于风力机模拟的双馈风力发电系统的仿真模型。分析DFIG并网情况下亚同步、同步、超同步三种运行状态下变速恒频风力发电系统的运行状态,验证了DFIG采用定子磁链定向矢量控制策略的正确性。不同风速下双馈电机转速、转矩、有功及无功的输出特性,验证了最大风能追踪控制和有功、无功独立调节方法的有效性。

参考文献:

- [1] 王承熙,张源. 风力发电[M]. 北京:中国电力出版社,2002.
- [2] 李建林,许洪华. 风力发电中的电力电子变流技术[M]. 北京:机械工业出版社,2008.
- [3] 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.
- [4] 白廷玉. 变速恒频双馈风力发电机矢量控制研究[D]. 保定:华北电力大学,2007.
- [5] 刘其辉,贺益康,赵仁德. 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):43-49.
- [6] Datta R ,Ranganathan V T .Direct power control of grid-connected wound rotor induction machine without rotor position sensors[J]. IEEE Trans. on Power Electronics ,2001 ,16(3) : 390-399 .
- [7] 刘其辉,贺益康,赵仁德. 变速恒频风力发电系统最大风能跟踪控制[J]. 电力系统自动化,2003,27(20):62-67.
- [8] Raju A B ,Chatterjee K ,Fernandes B G. A Simple Maximum Power Point Tracker for Grid Connected Variable Speed Wind Energy Conversion System with Reduced Switch Count Power Converters[J]. IEEE Trans. on Power Systems ,2003 ,18(18) : 803-809.

(上接第34页)

- [28] Wong Man-Chung, Tang Jing, Han Ying-Duo. Cylindrical Coordinate Control of Three-Dimensional PWM Technique in Three-Phase Four-Wired Tri-Level Inverter[J]. IEEE Trans. on Power Electronics , 2003 ,18(1) : 208-220.
- [29] 李杰,陈国呈,王得利,等. 三相PWM整流器直接电流控制中进行SAPWM调制的新方法[J]. 电工电能新技术,2007,26(4):36-40.
- [30] Yao Wen-xi, Lu Zheng-yu, Zhao Rong-xiang, et al. Hysteresis

- Band Control based PWM Strategy of Three-level Neutral Point balance[J]. Proceedings of IEEE APEC, 2005.
- [31] 宋强,刘文华,严干黄,等. 基于零序电压注入的三电平NPC逆变器中点电位平衡控制方法[J]. 中国电机工程学报,2004,24(5):57-62.
- [32] 宋文祥,陈国呈,陈陈. 基于矢量分区的三电平中点波动机理分析的研究[J]. 电工电能新技术,2007,26(4):17-20.
- [33] 薄保中. 三电平逆变器中点电位波动控制方法的研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版),2003,18(6):75-78.

《大功率变流技术》合订本 征订启事

为了更好地满足广大读者朋友的需求,本刊特制作了2010年全年合订本,全年合订本每本50元(含邮费),需要订阅者,可通过邮局汇款或银行转账。数量不多,购买者请在汇款前向编辑部确认。

另:本刊编辑部尚有少量2007年~2009年合订本,定价同上,欲购从速!

联系电话:0731-28498232,28498892

汇款地址:湖南省株洲市石峰区时代路169号 株洲电力机车研究所《大功率变流技术》编辑部

邮编:412001

银行帐号:1903020509024961203

户名:株洲变流技术国家工程研究中心有限公司

开户行:工行株洲市田心支行