

基于Matlab/Simulink的双馈感应风力发电机组建模和仿真研究

徐希望 李庚银

(华北电力大学 电气与电子工程学院 北京 102206)

Modeling and Simulation of Doubly-Fed Induction Wind Power System Based on Matlab/Simulink

XU Xi-wang, LI Geng-yin

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

ABSTRACT: Targeting the doubly-fed wind power system, this paper establishes the overall mathematical model composed of wind turbine, drive system, double-fed induction generator, stator flux orientation vector control tactics, maximum power point tracking tactics. By applying the simulink in the matlab software, and based on the mathematical model mentioned above, the paper also sets up a double-fed wind power system simulation model, and taking two step-up wind speeds as examples, simulation studies are made on the dynamic characteristics of the model with the grid connected. The simulation studies show that the model realizes the maximum power point tracking and decoupling control of power, and the double-fed wind power system has satisfactory dynamic characteristics, thus proving that the model established is correct and valid.

KEY WORDS: wind power generation; doubly fed wind power generator; vector control; maximum wind energy tracking; decoupling control

摘要:以双馈风力发电机组为研究对象,建立了包括风力机、传动部分、双馈感应发电机、定子磁链定向的矢量控制策略、最大风能捕获策略的整体数学模型;应用matlab软件中simulink工具,以建立的数学模型为基础搭建了双馈风力发电机组仿真模型,并以两次阶跃风速为例对所建模型并网后运行特性进行了仿真研究。实现了双馈风力发电机组的最大风能捕获和功率解耦控制,仿真结果表明,双馈风力发电机组具有良好的运行特性,同时验证了所建模型的正确性和有效性。

关键词:风力发电;双馈风力发电机;矢量控制;最大风能捕获;解耦控制

0 引言

风能是一种清洁的可再生能源,在能源日益枯

竭和环境污染日益严重的今天,对风能的开发利用具有非常重要的意义,风力发电在世界范围内得到了迅速发展。双馈风力发电机组如图1所示。双馈感应电机(doubly-fed induction generator, DFIG)定子直接并入电网,转子通过双向变频器与电网连接。这种结构比定桨距失速型风机具有更高的风能利用效率;转子励磁方式使所需变频器容量只是机组额定功率的一部分,使得整机成本大大降低,还可以实现有功、无功功率的灵活控制,对电网可以起到无功补偿的作用;变桨系统通过调节桨叶节距角而改变风轮的气动特性,机组控制方式更加灵活。由于这个原因双馈风力发电机组得到了广泛的推广^[1-4]。

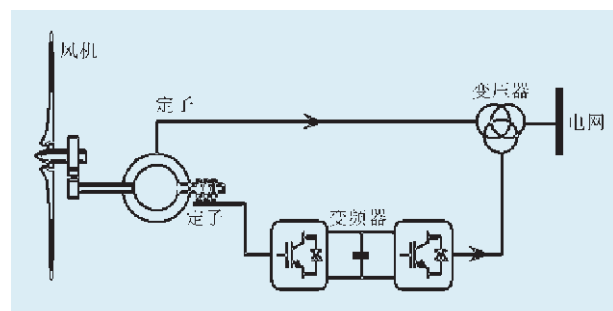


图1 双馈风力发电机组结构

本文对双馈风力发电机的数学模型做了详细推导,给出了坐标系的数学模型;采用定子磁链定向(SFO)的矢量控制技术详细推导了控制方程,实现了功率解耦控制;在定桨距的情况下讨论了基于参考有功功率的最大风能捕获方法;基于Matlab/Simulink平台建立了双馈风力发电系统的仿真模型。

基金项目:国家科技支撑计划项目(2008BAA14B05)。

1 双馈风力发电机组数学模型

1.1 风力机和传动部分数学模型

风力机的机械输入转矩 T_w 与风速 V_w 的关系通过空气动力学得出^[5]：

$$T_w = \frac{\rho \pi R^3 V_w^2 C_p(\theta, \lambda)}{2\lambda} \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{\omega_w R}{V_w} \quad (2)$$

其中 ρ 为空气密度 R 为风力机叶片半径 θ 为桨叶的桨距角 λ 为叶尖速比 C_p 是与 θ, λ 有关的风能利用系数 ω_w 是风力机叶片转速。当风速小于切入风速或大于切出风速时输出为0。

C_p 由厂家提供 经验公式为

$$C_p(\theta, \lambda) = 0.22(116/\beta - 0.4\theta - 5)e^{\frac{-12.5}{\beta}} \quad (3)$$

其中 $\beta = 1 / (\frac{1}{\lambda + 0.08\theta} - \frac{0.035}{\theta^3 + 1})$

风能利用系数-叶尖速比 ($C_p-\lambda$) 如图2所示。对于给定的叶片桨距角, 不同的叶尖速比对应的风能利用系数相差较大, 且只有一个固定的最佳叶尖速比能使风能利用系数达到最大值。由式(2)可知, 在风速不断变化的情况下要保持最佳叶尖速比就必须使得风力机机械转速 ω_w 随风速而变化, 只有保持最佳叶尖速比才能保证最大风能捕获。

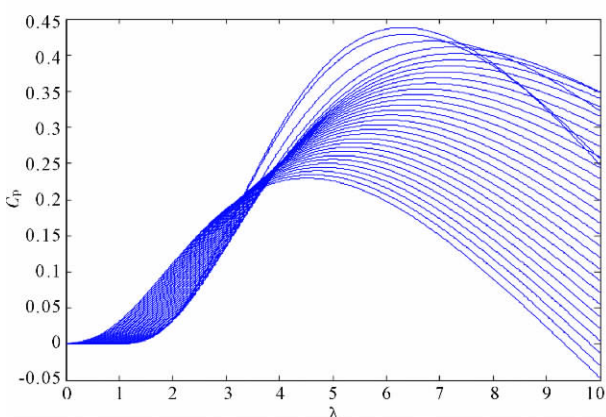


图2 风能利用系数-叶尖速比

从轮毂到发电机转子之间的机械传动部分在硬度和阻尼系数被忽略时, 可用一质量块的实用模型来描述^[6-7], 如式(4)所示。

$$T_{gen} - T_{wtr} = J_{dl} \frac{d\Omega_{gen}}{dt} \quad (4)$$

式中 J_{dl} 为等效转动惯量 T_{wtr} 为等效风轮转矩 T_{gen} 为转子转矩 Ω_{gen} 为转子机械角速度。

1.2 双馈感应发电机数学模型

在建立数学模型时, 定子侧采用发电机惯例, 定子电流以流出为正, 转子侧采用电动机惯例, 转子电流以流入为正。

定子绕组电压方程为：

$$\begin{cases} u_{d1} = P\psi_{d1} - \omega_1\psi_{q1} - R_1 i_{d1} \\ u_{q1} = P\psi_{q1} - \omega_1\psi_{d1} - R_1 i_{q1} \end{cases} \quad (5)$$

转子绕组电压方程为：

$$\begin{cases} u_{d2} = P\psi_{d2} - \omega_s\psi_{q2} + R_2 i_{d2} \\ u_{q2} = P\psi_{q2} - \omega_s\psi_{d2} + R_2 i_{q2} \end{cases} \quad (6)$$

式中 $u_{d1}, u_{q1}, u_{d2}, u_{q2}$ 分别为定转子电压的 d, q 分量 $i_{d1}, i_{q1}, i_{d2}, i_{q2}$ 分别为定转子电流的 d, q 分量 $\omega_s = \omega_1 - \omega_r$ 为 d, q 坐标系相对于转子的角速度。

磁链方程为：

$$\begin{cases} \psi_{d1} = -L_1 i_{d1} + L_m i_{d2} \\ \psi_{q1} = -L_1 i_{q1} + L_m i_{q2} \\ \psi_{d2} = -L_m i_{d1} + L_2 i_{d2} \\ \psi_{q2} = -L_m i_{q1} + L_2 i_{q2} \end{cases} \quad (7)$$

式中 $\psi_{d1}, \psi_{q1}, \psi_{d2}, \psi_{q2}$ 分别为定转子磁链的 d, q 轴分量 L_1 为 d, q 坐标系下两相定子绕组间的等效互感 L_m 为 d, q 坐标系下同轴定转子绕组间的等效互感 L_2 为 d, q 坐标系下两相转子绕组间的等效互感。

将式(7)代入(5)、(6)得电流与电压之间的关系：

$$\begin{bmatrix} u_{d1} \\ u_{q1} \\ u_{d2} \\ u_{q2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_1 - L_1 P & \omega_1 L_1 & L_m P & -\omega_1 L_m \\ -\omega_1 L_1 & -R_1 - L_1 P & \omega_1 L_m & L_m P \\ -L_m P & -L_m P & R_2 + L_2 P & -\omega_s L_2 \\ -\omega_s L_m & -L_m P & \omega_s L_2 & R_2 + L_2 P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d1} \\ i_{q1} \\ i_{d2} \\ i_{q2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中 P 为微分符号。

电磁转矩方程为：

$$T_{em} = \frac{3}{2} N_p L_m (i_{q1} i_{d2} - i_{d1} i_{q2}) \quad (9)$$

功率方程为：

$$\begin{cases} P_1 = \frac{3}{2} (u_{d1} i_{d1} + u_{q1} i_{q1}) \\ Q_1 = \frac{3}{2} (u_{q1} i_{d1} - u_{d1} i_{q1}) \\ P_2 = \frac{3}{2} (u_{d2} i_{d2} + u_{q2} i_{q2}) \\ P_2 = \frac{3}{2} (u_{q2} i_{d2} - u_{d2} i_{q2}) \end{cases} \quad (10)$$

式中 P_1 、 Q_1 为定子侧向电网输出有功无功 P_2 、 Q_2 为转子侧从电网输入有功无功。

1.3 矢量控制策略

矢量控制理论由德国的 F. Blaschke 于 1971 年提出, 矢量控制技术使得交流调速真正获得了如同直流调速同样优良的理想性能。经过 20 多年的工业实践的考验、改进与提高, 目前已达到成熟阶段。它通过电机统一理论和坐标变换理论把交流电动机的定子电流分解成磁场定向旋转坐标系中的励磁分量和与之相垂直的转矩分量^[8-10]。分解后的定子电流励磁分量和转矩分量不再具有耦合关系, 对它们分别控制, 就能实现交流电动机磁通和转矩的解耦控制, 使交流电动机得到可以和直流电动机相媲美的控制性能^[5,7,11-12]。

DFIG 定子绕组直接连在无穷大电网上, 可以近似地认为定子的电压幅值、频率都是恒定的, 本文采用定子磁链定向(SFO)的矢量控制。

定子磁链定向时, 假定定子磁链矢量与 d 轴方向一致。

$$\begin{cases} \psi_{d1} = \psi_1 \\ \psi_{q1} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

可以忽略定子电阻, 得到:

$$\begin{cases} u_{d2} = p i_{d2} (L_2 - \frac{L_m^2}{L_1}) - \omega_s i_{q2} (L_2 - \frac{L_m^2}{L_1}) + R_2 i_{d2} \\ u_{q2} = p i_{q2} (L_2 - \frac{L_m^2}{L_1}) + \omega_s [\frac{L_m}{L_1 \omega_1} u_1 + (L_2 - \frac{L_m^2}{L_1}) i_{d2}] + R_2 i_{q2} \end{cases} \quad (12)$$

考虑到转子电压电流并未完全解耦, 再设:

$$\begin{cases} u_{d2}' = p i_{d2} (L_2 - \frac{L_m^2}{L_1}) + R_2 i_{d2} \\ u_{q2}' = p i_{q2} (L_2 - \frac{L_m^2}{L_1}) + R_2 i_{q2} \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \Delta u_{d2} = -\omega_s i_{q2} (L_2 - \frac{L_m^2}{L_1}) \\ \Delta u_{q2} = \omega_s [\frac{L_m}{L_1 \omega_1} u_1 + (L_2 - \frac{L_m^2}{L_1}) i_{d2}] \end{cases} \quad (14)$$

式中 u_{q2}' 、 u_{d2}' 为实现转子电压电流解耦控制的解耦项 Δu_{q2} 、 Δu_{d2} 为消除转子电压电流交叉耦合的补偿项。

定子侧功率方程为:

$$\begin{cases} P_1 = \frac{3}{2} \frac{L_m u_1}{L_1} i_{q2} \\ Q_1 = \frac{3}{2} (\frac{L_m u_1}{L_1} i_{q2} - \frac{u_1^2}{L_1 \omega_1}) \end{cases} \quad (15)$$

由式(15)可看出通过控制转子电流的 q 轴分量

就可控制定子绕组有功的输出, 同样通过控制转子电流的 d 轴分量就可控制定子绕组无功的输出。

通过矢量控制技术, 加上消除交叉耦合的补偿项我们就可以实现有功无功的解耦控制。这也是矢量控制技术应用广泛的原因^[13]。

1.4 最大风能捕获

要控制机组的转速来实现最大风能捕获, 可以检测当前的风速并计算出最佳转速后进行转速控制, 这实际上是一种直接转速控制的方法, 控制目标明确, 原理简单。但现场中风速的准确检测比较困难, 实现起来存在很多问题, 风速检测的误差会降低最大风能捕获的效果^[14-15]。在实际应用中, 可以通过控制策略和控制方法的改进来避免风速的检测。这种方案省去了风速检测装置, 提高了系统的运行性能。本文采用了一种通过 DFIG 功率控制来实现最大风能捕获的方案, 即通过控制 DFIG 输出有功功率来控制 DFIG 的电磁阻转矩, 从而间接地控制机组的转速。该方案不需要风速的检测。为实现最大风能捕获, 应依据风力机最佳功率曲线和风力机转速计算 DFIG 的有功参考值^[7,16-21]。

在某一固定风速 V 下, 随着风力机机械角速度 ω_w 的变化, 风能利用系数 C_p 的值也会相应的变化, 从而使风力机输出的机械功率 P 变化。

由式:

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p(\theta, \lambda) V_{\text{wind}}^3 \quad (16)$$

可求得:

$$P = \frac{1}{2} \frac{\rho \pi R^5 C_{p\max}(\theta, \lambda)}{\lambda^3} \omega_w^3 \quad (17)$$

不同的风速对应不同的功率 P 与风力机机械角速度 ω_w 的曲线, 曲线为最佳叶尖速比 λ 时达到最大值, 把所有最大值连成一条曲线即为最佳功率曲线。此时有:

$$P_{\max} = \frac{1}{2} \frac{\rho \pi R^5 C_{p\max}(\theta, \lambda)}{\lambda_{\text{opt}}^3} \omega_w^3 \quad (18)$$

式中 λ_{opt} 为最佳叶尖速比。

考虑损耗, DFIG 的功率关系如下式:

$$\begin{cases} P_{e1} = P_1 + P_{\text{cu1}} + P_{\text{fe1}} \\ P_e = P_{e1} - P_{e2} \\ P_{e2} = s^* P_{e1} \\ P = P_e + P_{\text{ms}} \end{cases} \quad (19)$$

式中 P_{e1} 、 P_{e2} 、 P_e 为定、转子及气隙电磁功率, P_{ms} 为风

力机机械损耗 P_{cu1} 为定子铜耗 P_{fe1} 为发电机铁耗 s 为滑差。

忽略机械损耗、铁耗,由式(18)和(19)可得:

$$P_1^* = \frac{P_{\max}}{1-s} - P_{cu1} \quad (20)$$

式中:

$$\begin{cases} P_{cu1} = 3I_1^2 R_1 \\ I_1 = \frac{S_1}{3U_1} = \frac{(P_1^2 + Q_1^2)^{1/2}}{3U_1} \end{cases} \quad (21)$$

将式(18)、(21)代入(20)

$$\frac{R_1}{3U_1^2} P_1^{*2} + P_1^* + \frac{R_1}{3U_1^2} Q_1^2 - \frac{1}{1-s} P_{\max} = 0 \quad (22)$$

式(22)改写为:

$$AP_1^{*2} + BP_1^* + C = 0 \quad (23)$$

式中:

$$\begin{cases} A = \frac{R_1}{3U_1^2} \\ B = 1 \\ C = \frac{R_1}{3U_1^2} Q_1^2 - \frac{1}{1-s} P_{\max} \end{cases} \quad (24)$$

对式(23)求解,有实解条件为:

$$B^2 - 4AC \geq 0 \quad (25)$$

方程的解为:

$$P_1^* = \frac{1}{2A} (-B + \sqrt{B^2 - 4AC}) \quad (26)$$

式(26)即为控制系统有功功率参考值。

2 双馈风力发电机组整体仿真分析

2.1 双馈风力发电机组整体仿真图

包括功率外环和电流内环的整体仿真Simulink实现如图3所示。整个系统采用双闭环结构,外环为功率控制环,内环为电流控制环。在功率内环中,有功功率指令 P_1^* 、无功功率指令 Q_1^* 与功率反馈值 P_1 、 Q_1 进行比较,差值经PI型功率调节器运算,输出定子电流无功分量及有功分量指令 i_{q1}^* 、 i_{d1}^* ,由式(27)计算得到转子电流的无功分量和有功分量指令 i_{q2}^* 、 i_{d2}^* 、 i_{q2}^* 、 i_{d2}^* 和转子电流反馈量比较后的差值送入PI型电流调节器,调节后输出电压分量 u_{q2}^* 、 u_{d2}^* ;按式(13)加上电压补偿分量后就可获得转子电压指令 u_{q2}^* 、 u_{d2}^* ,得到转子的励磁电压,从而实现变速恒频及有、无功功率的调节控制。

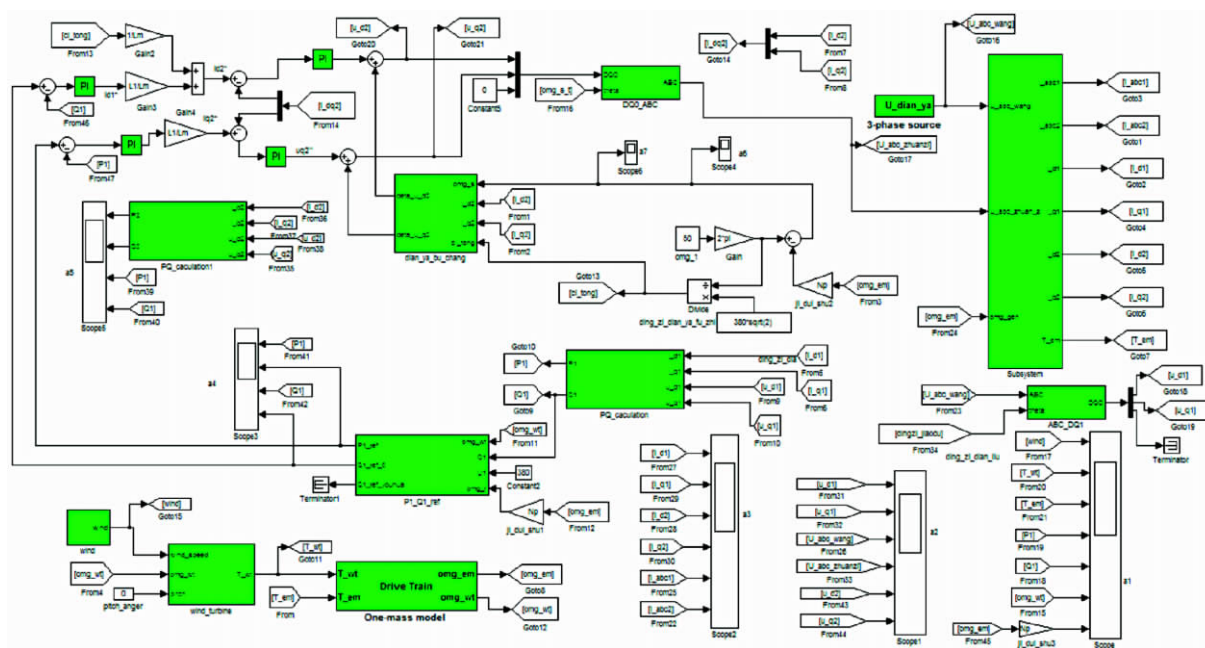


图3 整体仿真Simulink实现

$$\begin{cases} i_{d2} = \frac{L_1}{L_m} i_{d1} + \frac{u_1}{L_m \omega_1} \\ i_{q2} = \frac{L_1}{L_m} i_{q1} \end{cases} \quad (27)$$

2.2 双馈风力发电机组整体仿真分析

仿真采用的参数:额定功率为15 kW,定子额定电压380V/50Hz,极对数 N_p 为3 $R_1=0.379 \Omega$ $R_2=0.314 \Omega$,

$L_1=0.0438\text{ H}$ $L_2=0.0449\text{ H}$ $L_m=0.0427\text{ H}$,折算到高速侧的转动惯量 $J=0.1\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。叶片半径 R 为 4.3 m ,齿轮箱变比 7.846 ,参考无功功率设为 0 。由式(3)计算得最大风能系数为 0.4382 ,最佳叶尖速比为 6.32 。

本文在进行PI控制器参数整定时采用先电流内环再功率外环的顺序,即把电流内环的PI参数整定好后,再加上功率外环,整定功率外环上的PI参数。 d 轴和 q 轴电流PI参数相同,积分系数 300 ,比例系数 10 。无功功率PI参数,积分系数 100 ,比例系数 5 。有功功率PI参数,积分系数 0.7 ,比例系数 0.005 。

为了反映发电机组3种运行状态:次同步运行、同步运行、超同步运行,采用两次阶跃风速模型对双馈风力发电机组进行了仿真研究,在 1.5 s 以前风速为 4 m/s , 1.5 s 时跳跃到 6 m/s ,在 2 s 时风速再次跳跃到 10 m/s 。

对于DFIG来说,应满足的是:励磁频率(也即转差频率)应能反应转子的转速变化使得其频率之和为电网同步频率。仿真结果如图4所示。

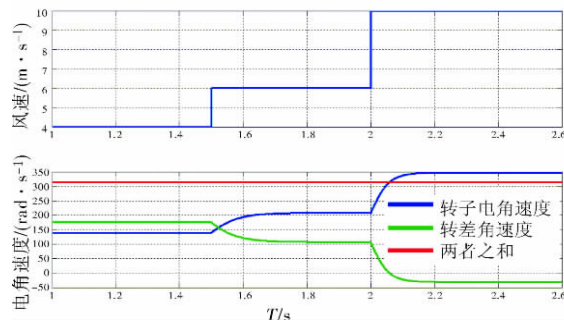


图4 风速变化时各电角速度的关系

在最大风能捕获控制情况下,随着风速的变化,风力机机械角速度不断调整,以保持最佳叶尖速比,从而达到最大风能利用,图5为风力机机械角速度和转子电角速度的变化过程。

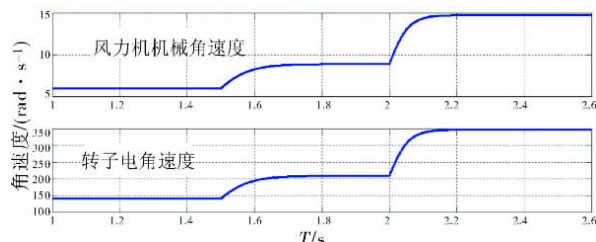


图5 角速度变化

最大风能捕获过程中,风力机机械转矩和发电机电磁转矩变化的情况如图6所示,图中电磁转矩

为正说明GFIG处于发电状态。进入转子的机械转矩与电磁转矩如图7所示。

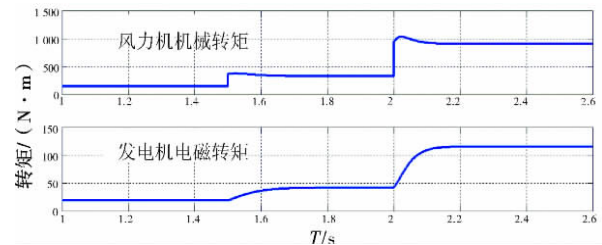


图6 机械、电磁转矩变化

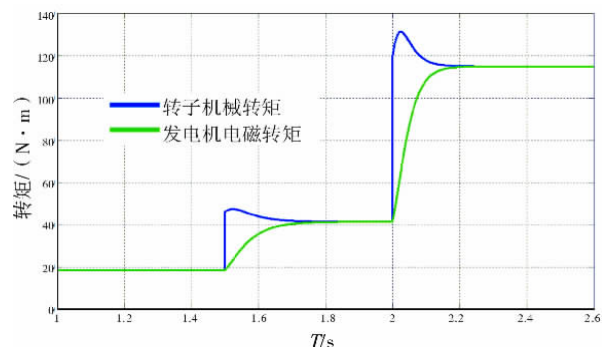


图7 进入转子的机械转矩与电磁转矩

最大风能捕获过程中,实际有功功率与参考有功功率变化的情况如图8所示,从图8可看出,风速增大时参考有功功率和实际有功功率都相应地增大,采用本文的控制策略,可以实现最大风能捕获,使DFIG运行在最佳功率曲线上。实际无功功率与参考无功功率变化的情况如图9所示,在参考无功功率设为 0 的情况下,无功功率维持在 0 附近。

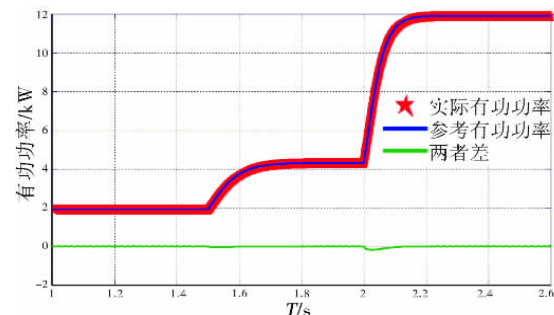


图8 定子侧实际有功功率与参考有功功率

DFIG定转子有功功率的变化如图10所示,由图可看出,当转差角速度为负值时转子吸收负的有功功率,也即输出正的有功功率,转差越小,功率越小。DFIG发出的功率是由定子输出功率减去转子吸收功率。

DFIG定转子发出无功功率如图11所示,与图4

的转差角速度比较表明,DFIG吸收的无功与转差密切相关,转差正的越小DFIG吸收的无功功率越小。转差负的越大DFIG发出的无功功率越小。

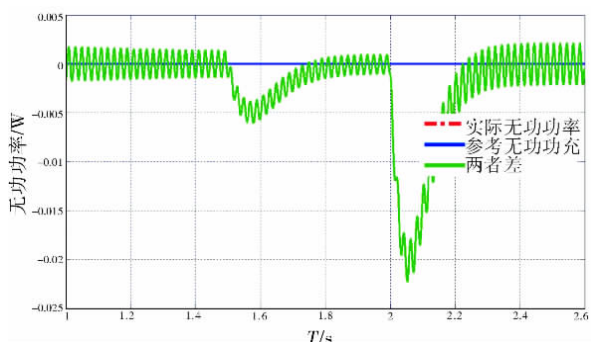


图9 定子侧实际无功功率与参考无功功率

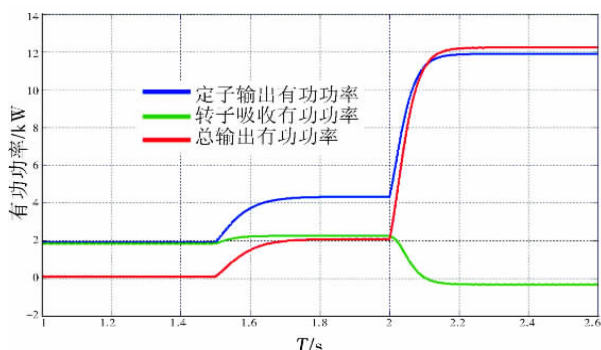


图10 DFIG发出有功功率

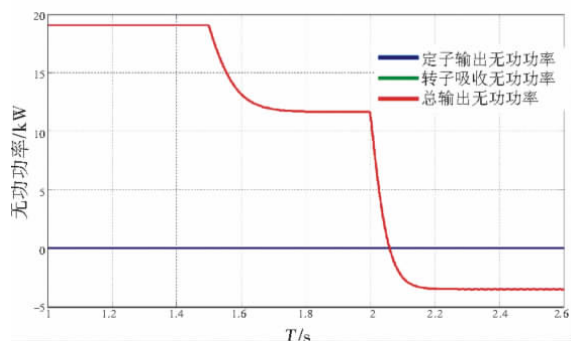


图11 DFIG发出无功功率

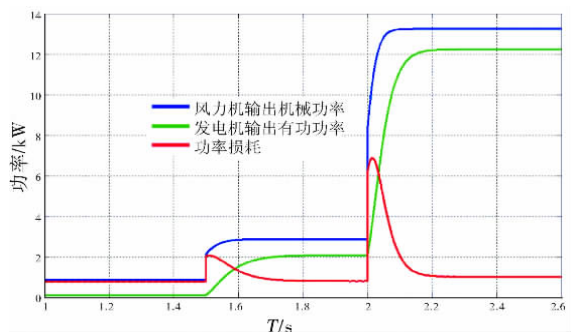


图12 风力机输出的机械功率与DFIG输出有功功率

图12所示的是风力机输出的机械功率与DFIG输出有功功率,其差为功率损耗,需说明的是,在功率突变调整过程中风力机输出的机械功率与DFIG输出有功功率之差不全是功率损耗,有部分以机械能的形式储存在转子内。

图13、14所示为转差与电压、电流的对比,由图所示,随着风速的增加励磁电流频率不断变化(转子转速越来越大),转子由次同步变到超同步(仿真结果显示在2.06秒时转差为0),转子转速为同步速时,励磁电流为直流,即励磁电流频率为0。当转子转速变化时,通过改变励磁电流的频率来保证定子电流频率的恒定,这就是变速恒频的基本原理。随着转子转速的变化,定子电流幅值和转子电压幅值发生明显的变化,在电网电压恒定的条件下,定子电流幅值的变化反映了功率的变化。

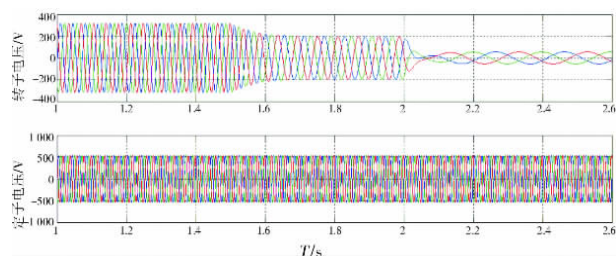


图13 定子电压变化

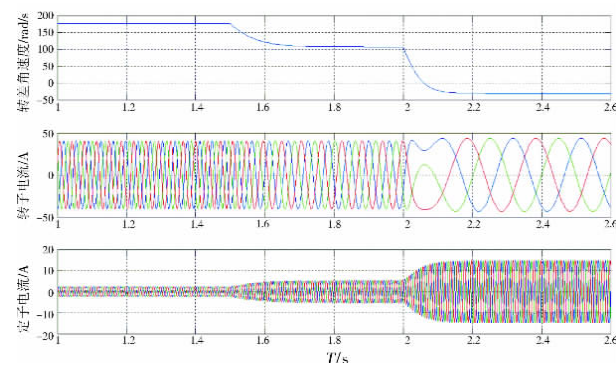


图14 定子电流变化

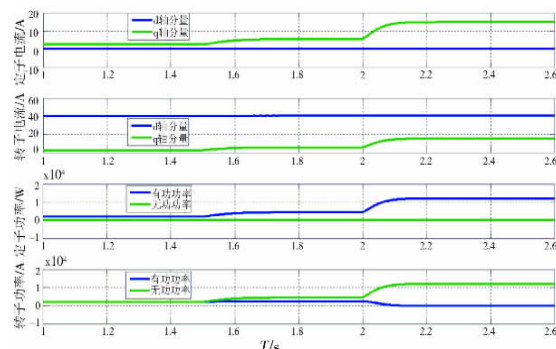


图15 功率与电流dq轴分量

图15是功率与电流 dq 轴分量的对比。本文采用定子磁链定向(SFO)的矢量控制,可以实现定子功率的解耦控制。有功功率与 d 轴分量有关,无功与 q 轴分量有关。

3 结语

本文基于Matlab/Simulink 软件实现了双馈风力发电机组并网后运行的动态仿真,为了反映发电机组三种运行状态:次同步运行、同步运行、超同步运行,采用两次阶跃风速模型对双馈风力发电机组进行了仿真研究,实现了最大风能捕获和解耦控制,仿真结果表明双馈风力发电机组具有良好的运行特性,同时验证了所建模型的正确和有效性。本文所基于Matlab/Simulink建立的模型为对双馈风力发电机组作进一步的研究奠定了良好的基础。

参考文献

- [1] 李俊峰,时璟丽.国内外可再生能源政策综述与进一步促进我国可再生能源发展的建议[J].可再生能源,2006,125(1):1-6.
- [2] Soderholm G, Klaassen. Wind Power in Europe: A Simultaneous Innovation-diffusion Model. Environ Resour Econ, 2007, 36(2): 163-190.
- [3] Soter Stefan, Ralf Wegener. Development of Induction Machines in Wind Power Technology. 2007 IEEE IEMDC May 2007, 2: 1491-1495.
- [4] 李娜.无刷双馈风力发电机并网运行的策略及仿真[J].现代电子技术,2009,32(22):180-182.
- [5] 迟永宁.大型风电场接入电网的稳定性问题研究[D].北京:中国电力科学研究院,2006.
- [6] 雷亚洲, Gordon Lightbody. 国外风力发电导则及动态模型简介[J].电网技术,2005,29(12):27-32.
- [7] 刘其辉.变速恒频风力发电系统运行与控制研究[D].杭州:浙江大学,2005.
- [8] 刘晓宇,张润和,武海涛.变速恒频风力发电系统中矩阵变换器的仿真研究[J].现代电子技术,2009,32(19):176-180.
- [9] 王辉,程坦.直流斩波电路的Matlab/Simulink仿真研究[J].现代电子技术,2009,32(3):174-175.
- [10] 朱春华,王建国. Matlab/Simulink在DC-DC变换器仿真中的应用[J].现代电子技术,2008,31(18):23-25.
- [11] el-helw HM, Tennakoon SB. Vector Control of a Doubly Fed Induction Generator for Standalone Wind Energy Application. Wind Power to the Grid -EPE Wind Energy Chapter 1st Seminar, 2008. EPE-WECS 2008, 1-6.
- [12] 张武荣.异步电机矢量控制研究[D]. 硕士论文.沈阳工业大学,2007.
- [13] 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.
- [14] 李娜.天刷双馈风力发电机并网运行的策略及仿真[J].现代电子技术,2009,32(22):180-182.
- [15] 申宽育.中国的风能资源与风力发电[J].西北水电,2010(1):76-81.
- [16] 李东东,陈陈.风力发电机组动态模型研究[J].中国电机工程学报,2005,25(3):116-119.
- [17] 卞松江,吕晓美,相会杰,等.交流励磁变速恒频风力发电系统控制策略的仿真研究[J].中国电机工程学报,2005,25(6):57-62.
- [18] 胡家兵,贺益康,刘其辉.基于最佳功率给定的最大风能追踪控制策略[J].电力系统自动化,2005,29(24):32-38.
- [19] 刘其辉,贺益康,张建华.交流励磁变速恒频风力发电机的最优功率控制[J].太阳能学报,2006,27(10):1015-1020.
- [20] 彭国平,李帅,鱼振民,等.小型风电系统最大功率跟踪的研究[J].西安交通大学学报,2004,38(4):357-360.
- [21] Bratcu AI, Munteanu I, Ceanga E, Epure SAES. Energetic Optimization of Variable Speed Wind Energy Conversion Systems by Extremum Seeking Control. EUROCON 2007. The International Conference on "Computer as a Tool" 2007, September 9-12.

收稿日期:2010-04-16。

作者简介:

徐希望(1985—),男,硕士研究生,研究方向为风电场并网技术。

(编辑 徐花荣)