

# 交流励磁变速恒频风力发电系统控制策略的仿真研究

卞松江<sup>1</sup>, 吕晓美<sup>1</sup>, 相会杰<sup>1</sup>, 刘连根<sup>2</sup>, 梁冰<sup>1</sup>

(1. 辽宁工程技术大学电气工程系, 辽宁省阜新市 123000;  
2. 株洲电力机车研究所, 湖南省株洲市 412001)

## MODELING AND SIMULATION OF AC EXCITED VSCF IN WIND POWER SYSTEMS

BIAN Song-jiang<sup>1</sup>, LÜ Xiao-mei<sup>1</sup>, XIANG Hui-jie<sup>1</sup>, LIU Lian-gen<sup>2</sup>, LIANG Bing<sup>1</sup>

(1. Dept. of E E, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning Province, China;  
2. Zhuzhou Electric Locomotive Research Institute, Zhuzhou 412001, Hunan Province, China)

**ABSTRACT:** The paper introduced principle of AC excited VSCF in wind power systems and the vector control technique oriented by the stator flux of the generator. The author made a simulation model in Matlab/Simulink, and did simulation in several conditions such as no load, integrating with power grid, independently modulation of the active and reactive power and capture of the maximum wind power. The simulation results show that analysis is right and have very important guidance signification on experimental systems.

**KEY WORDS:** Wind power generation; AC excited; Variable speed constant frequency (VSCF); Oriented by the stator flux; Vector control

**摘要:** 介绍了交流励磁变速恒频 (Variable Speed Constant Frequency, VSCF) 风力发电系统运行的基本原理及发电机的定子磁链定向矢量控制技术。在此基础上, 以 Matlab/Simulink 为工具, 建立了系统仿真模型, 进行了发电机空载运行、并网、有功、无功功率独立调节、最大风能捕获运行等工况的仿真研究, 仿真结果证明理论分析正确, 对系统的实验研究具有一定的理论指导意义。

**关键词:** 风力发电; 交流励磁; 变速恒频; 定子磁链定向; 矢量控制

### 1 引言

在矿产资源日渐短缺及环境污染日益严重的今天, 世界各国都把发展可再生“绿色”能源——风能作为本国能源战略的重点, 我国也不例外。目前, 世界风电市场上风力发电机组的控制技术有定桨距失速调节技术、变桨距调节技术、主动失速调节技术、变速恒频技术 4 种<sup>[1-2]</sup>。本文对交流励磁变速恒频风力发电系统进行了详细的理论分析并建

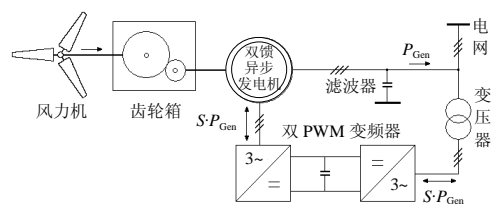
立了系统完整的仿真模型, 对变速恒频系统空载、并网等几种运行工况进行了仿真研究, 得出了具有理论指导意义的结果<sup>[3-5]</sup>。

### 2 变速恒频运行的基本原理

交流励磁变速恒频风力发电系统结构框图如图 1 所示。由风力机、齿轮箱、变压器、双 PWM 变频器、双馈异步发电机、滤波器等几部分构成。由交流异步发电机的基本原理可得下列关系<sup>[6]</sup>

$$f_s = \frac{np}{60} \pm f_r \quad (1)$$

式中  $f_s$  为定子电流频率, Hz;  $n$  为转子转速, r/min;  $p$  为电机的极对数;  $f_r$  为转子电流频率, Hz。



注:  $P_{Gen}$ —发电机发出功率;  $S \cdot P_{Gen}$ —经变频器流动的转差功率

图 1 系统结构框图

Fig. 1 The structure frame of the system

当发电机的转速  $n$  小于定子旋转磁场的同步转速  $n_s$  时, 处于亚同步运行状态, 此时变频器向发电机转子提供交流励磁, 定子发出电能给电网, 式(1)中  $f_r$  取正号; 当  $n$  大于  $n_s$  时, 处于超同步运行状态, 此时发电机同时由定子和转子发出电能给电网, 变频器的能量逆向流动, 式(1)中  $f_r$  取负号; 当  $n$  等于  $n_s$  时, 处于同步运行状态, 此时发电机作为同步电机运行,  $f_r = 0$ , 变频器向转子提供直流励磁。图中

PWM 整流—PWM 逆变双 PWM 变频器能够满足交流励磁发电机的运行要求, 实现转差功率在发电机转子与电网间的双向流动<sup>[7]</sup>。

由式(1)知, 当发电机转速  $n$  变化时, 若控制转子供电频率  $f_r$  相应变化, 可使  $f_s$  保持恒定不变, 与电网频率保持一致, 就实现了变速恒频控制, 这就是交流励磁发电机变速恒频运行的基本原理。

### 3 定子磁链定向矢量控制策略研究

按发电机惯例列写的定子同步速  $MT$  两相坐标系下发电机的数学模型为

定子电压方程

$$\begin{cases} u_{Ms} = -r_s i_{Ms} + \omega_1 y_{Ts} - \dot{y}_{Ms} \\ u_{Ts} = -r_s i_{Ts} - \omega_1 y_{Ms} - \dot{y}_{Ts} \end{cases} \quad (2)$$

转子电压方程

$$\begin{cases} u_{Mr} = r_r i_{Mr} - \omega_s y_{Tr} + \dot{y}_{Mr} \\ u_{Tr} = r_r i_{Tr} + \omega_s y_{Mr} + \dot{y}_{Tr} \end{cases} \quad (3)$$

定子磁链方程

$$\begin{cases} y_{Ms} = l_s i_{Ms} - l_m i_{Mr} \\ y_{Ts} = l_s i_{Ts} - l_m i_{Tr} \end{cases} \quad (4)$$

转子磁链方程

$$\begin{cases} y_{Mr} = -l_m i_{Ms} + l_r i_{Mr} \\ y_{Tr} = -l_m i_{Ts} + l_r i_{Tr} \end{cases} \quad (5)$$

电磁转矩方程

$$T_e = \frac{3}{2} p l_m (i_{Ms} i_{Tr} - i_{Ts} i_{Mr}) \quad (6)$$

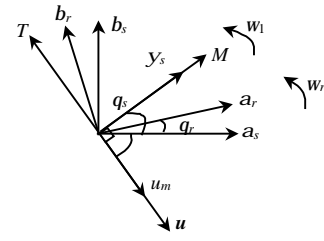
式中  $u$ 、 $i$ 、 $y$ 、 $T_e$ 、分别为电压、电流、磁链、电磁转矩;  $p$  为电机的极对数;  $r$ 、 $l$  分别为电阻、电感;  $\omega_1$  为定子同步电角速度;  $\omega_s$  为转差电角速度,  $\omega_s = \omega_1 - \omega_r = s \cdot \omega_1$ ;  $\omega_r$  为转子电角速度,  $s$  为转差率; 下标  $s$ 、 $r$  分别表示定子、转子分量; 下标  $m$  表示定转子间相互作用量; 下标  $M$ 、 $T$  分别表示  $M$ 、 $T$  轴分量。

由于交流励磁发电机的定子总是接在工频 50Hz 的大电网上, 此频率下定子绕组的电阻比其电抗小很多, 可忽略不计。这样, 以定子磁链来定向, 定子磁链与定子电压矢量间的相位正好差  $90^\circ$  电角度, 使得控制相当简单, 在实时控制系统中得到广泛应用。

如图 2 所示, 当选择定子磁链方向为同步旋转坐标系  $M$  轴方向后, 有

$$\begin{cases} y_{Ms} = y_s \\ y_{Ts} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

略去定子电阻后, 对发电机惯例来说有



注:  $a_s$ 、 $b_s$ —一定子上静止两相坐标轴, 其中  $a_s$  与定子  $a$  相轴线重合;  $a_r$ 、 $b_r$ —转子上两相坐标轴, 以转子电角速度  $\omega_r$  相对定子旋转, 其中  $a_r$  与转子  $a$  相轴线重合;  $M$ 、 $T$ —一定子两相坐标轴, 其旋转速度为同步电角速度  $\omega_1$ ;  $u$ —一定子三相电压综合矢量;  $q_s$ 、 $q_r$ —一定子、转子两相坐标轴的电角位移;  $y_s$ —一定子磁链幅值

图 2 定子磁场定向示意图

Fig. 2 The sketch of vectors of stator magnetic-field

$$u_s = e_s = -\frac{dy_s}{dt} \quad (8)$$

那么相电压矢量将比磁链矢量滞后  $90^\circ$ , 正好落在  $T$  轴的负方向上。由于定子接于恒定的电网上, 电压综合矢量长度为常数。采用模不变型变换矩阵, 在两轴坐标系中, 相电压综合矢量的模仍为三相系统的相电压幅值  $u_m$ 。所以有

$$\begin{cases} u_{Ms} = 0 \\ u_{Ts} = -u_m \end{cases} \quad (9)$$

将式(7)、(9)代入式(2)并略去定子电阻, 得

$$\begin{cases} \dot{y}_s = 0 \\ y_s = u_m / \omega_s \end{cases} \quad (10)$$

可见定子磁链也是恒定不变的。

两相坐标系下瞬时有功功率、无功功率可写为

$$\begin{cases} p = \frac{3}{2} \cdot [u_{Ms} \ u_{Ts}] \cdot \begin{bmatrix} i_{Ms} \\ i_{Ts} \end{bmatrix} = \frac{3}{2} (u_{Ms} i_{Ms} + u_{Ts} i_{Ts}) \\ q = \frac{3}{2} \cdot [u_{Ts} \ -u_{Ms}] \cdot \begin{bmatrix} i_{Ms} \\ i_{Ts} \end{bmatrix} = \frac{3}{2} (u_{Ts} i_{Ms} - u_{Ms} i_{Ts}) \end{cases} \quad (11)$$

由于两相系统中定子的  $M$ 、 $T$  轴分量均为直流, 所以上式也可以认为是平均功率的表达式。将式(9)代入上式, 可得平均功率

$$\begin{cases} P = -3/2 u_m i_{Ts} \\ Q = -3/2 u_m i_{Ms} \end{cases} \quad (12)$$

由式(4)得

$$\begin{cases} i_{Mr} = (-y_s + l_s i_{Ms}) / l_m \\ i_{Tr} = l_s i_{Ts} / l_m \end{cases} \quad (13)$$

由转子磁链方程式(5)得

$$\begin{cases} y_{Mr} = -\frac{l_m}{l_s} y_s + l_r (1 - \frac{l_m^2}{l_s l_r}) i_{Mr} = -a y_s + b i_{Mr} \\ y_{Tr} = l_r (1 - \frac{l_m^2}{l_s l_r}) i_{Tr} = b i_{Tr} \end{cases} \quad (14)$$

再由转子电压方程式(3)得

$$\begin{cases} u_{Mr} = r_r i_{Mr} - w_s y_{Tr} + \dot{y}_{Mr} = (r_r + b \frac{d}{dt}) i_{Mr} - \\ \quad b w_s i_{Tr} = u'_{Mr} + \Delta u_{Mr} \\ u_{Tr} = r_r i_{Tr} + w_s y_{Mr} + \dot{y}_{Tr} = (r_r + b \frac{d}{dt}) i_{Tr} - \\ \quad a w_s y_s + b w_s i_{Mr} = u'_{Tr} + \Delta u_{Tr} \end{cases} \quad (15)$$

式中  $u'_{Mr}$ 、 $u'_{Tr}$  为实现转子电压、电流解耦控制的解耦项； $\Delta u_{Mr}$ 、 $\Delta u_{Tr}$  为消除转子电压、电流交叉耦合的补偿项。这样将转子电压分解为解耦项和补偿项后，既简化了控制，又能保证控制的精度和动态响应的快速性。有了  $u_{Mr}$ 、 $u_{Tr}$  后，就可通过  $2f/3f$  变换得到三相坐标下转子电压量

$$\begin{bmatrix} u_{ar} \\ u_{br} \\ u_{cr} \end{bmatrix} = T^{-1}(q_s - q_r) \cdot \begin{bmatrix} u_{Mr} \\ u_{Tr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(q_s - q_r) & -\sin(q_s - q_r) \\ \cos(q_s - q_r - \frac{2}{3}\pi) & -\sin(q_s - q_r - \frac{2}{3}\pi) \\ \cos(q_s - q_r + \frac{2}{3}\pi) & -\sin(q_s - q_r + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{Mr} \\ u_{Tr} \end{bmatrix} \quad (16)$$

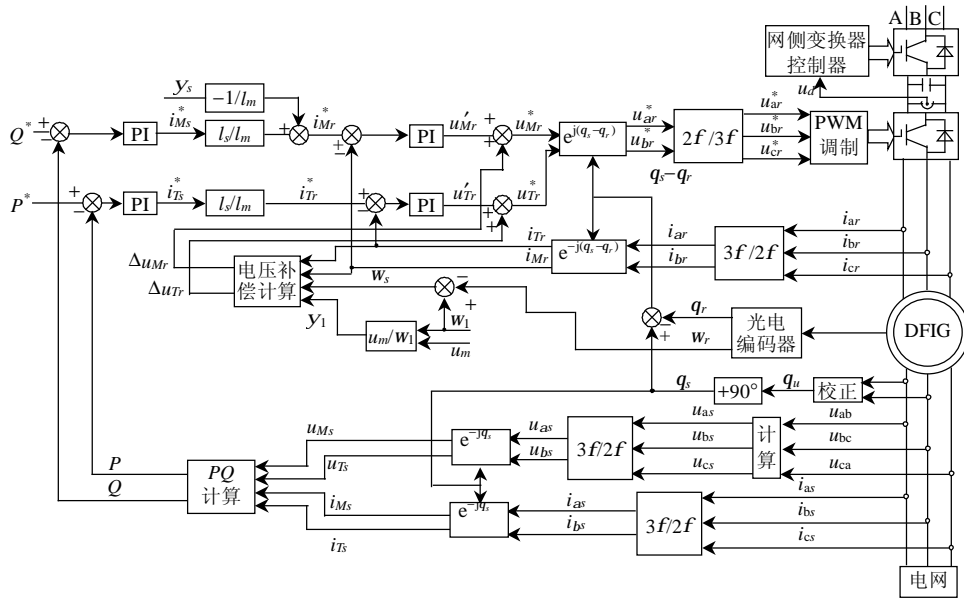


图 3 交流励磁变速恒频发电机定子磁链定向矢量控制框图  
Fig. 3 The vector control frame oriented by the stator flux of the AC excited VSCF

### 4 变速恒频风力发电系统控制策略的仿真研究

#### 4.1 风力机的仿真模型

风力机是整个风力发电系统能量转换的首要部件，它用来截获流动空气所具有的动能，并将风力机叶片迎风扫掠面积内的一部分空气的动能转

这个转子三相电压分量值就可以用作产生 PWM 波所需的指令信号，用于控制逆变主电路开关管通断，产生所需频率、大小、相位的三相交流励磁电源。

式(11)~(16)组成了交流励磁发电机定子磁链定向矢量控制的基本关系式，系统的控制框图如图 3 所示。可见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。在功率环中，有功功率指令  $P^*$ 、无功功率指令  $Q^*$  与功率反馈值  $P$ 、 $Q$  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  $i_{Ms}^*$  和  $i_{Ts}^*$ ； $i_{Ms}^*$  和  $i_{Ts}^*$  按式(13)计算得到转子电流的无功分量和有功分量指令  $i_{Mr}^*$  和  $i_{Tr}^*$ ； $i_{Mr}^*$ 、 $i_{Tr}^*$  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  $u'_{Mr}$ 、 $u'_{Tr}$ ；加上电压补偿分量后就可获得转子电压指令  $u_{Mr}^*$ 、 $u_{Tr}^*$ ，经旋转变换后得到发电机转子三相电压控制指令  $u_{ar}^*$ 、 $u_{br}^*$ 、 $u_{cr}^*$ ；将它们作为调制波与三角载波比较以产生 SPWM 脉冲去控制主电路开关管 IGBT 的通断，从而实现变速恒频及有、无功功率的独立调节控制<sup>[8]</sup>。

换为有用的机械能，所以它不仅决定了整个风力发电系统装置有效功率的输出，而且直接影响机组的安全稳定运行。

据风力机空气动力学特性，风力机输入功率为<sup>[9]</sup>

$$P_w = 1/2 \cdot (r \cdot Sv) \cdot v^2 = 1/2 r S v^3 \quad (17)$$

式中  $r$  为空气密度， $1.25\text{kg/m}^3$ ； $S$  为风力机叶片迎风扫掠面， $\text{m}^2$ ； $v$  为空气进入风力机扫掠面以前

的风（即未扰动风速），m/s。

由于通过风轮旋转面的风能不是全部都被风轮吸收利用，因此定义一个风能利用系数  $C_p$

$$C_p = P_m / P_w$$

其中， $P_m$  为风力机输出的机械功率； $P_w$  为输入风轮面内的功率。所以风力机的机械输出功率为

$$P_m = C_p P_w = \frac{1}{2} r S v^3 C_p = \frac{\pi}{8} r D^2 v^3 C_p \quad (18)$$

式中  $D$  为叶片的直径，m。

风能利用系数  $C_p$  是表征风力机效率的重要参数，是一个与风速、叶片转速、叶片直径均有关系的量。为在不考虑叶片转速和直径的条件下对叶片

性能作更普遍讨论，还可定义出风力机的另一个重要参数叶尖速比  $\lambda$ ，即叶片叶尖线速度与风速比

$$\lambda = RW/v = R2\pi n/(60v) \quad (19)$$

式中  $R$  为叶片的半径，m； $W$  为叶片旋转的角速度，rad/s； $n$  为叶片的转速，r/min。

利用这些关系式，构造出风力机的仿真模型如图4所示。由于没有实际风机的数据，参考资料模拟了一条风机特性曲线。在最优输出功率曲线上，风速为6.5m/s时，对应的发电机稳定转速为1300r/min；风速为7m/s时，对应的发电机稳定转速应为1400r/min，后面的仿真结果将通过这两点验证风力机是否实现了最大风能捕获运行<sup>[10]</sup>。

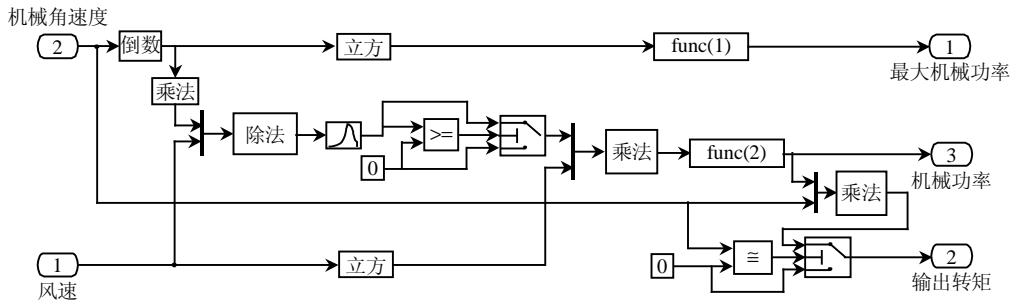


图4 风力机的仿真模型  
Fig. 4 The simulation model of the wind turbine

4.2 系统的仿真模型

以前面所述的控制策略及原动机仿真模型为基础，以MATLAB中的Simulink及Power System Block为工具，构建了交流励磁变速恒频风力发电系统的仿真模型，如图5所示。系统并网前后发电机的运行状态和运行控制均不相同，并网前

空载运行，实施并网控制；并网后发电运行，实施最大风能追踪控制，具体控制策略如上所述。为此，仿真过程分为两个阶段来进行，先做空载仿真，满足并网要求后，再做并网仿真，图中上下两个方块即分别是两种状态下系统的仿真模型。

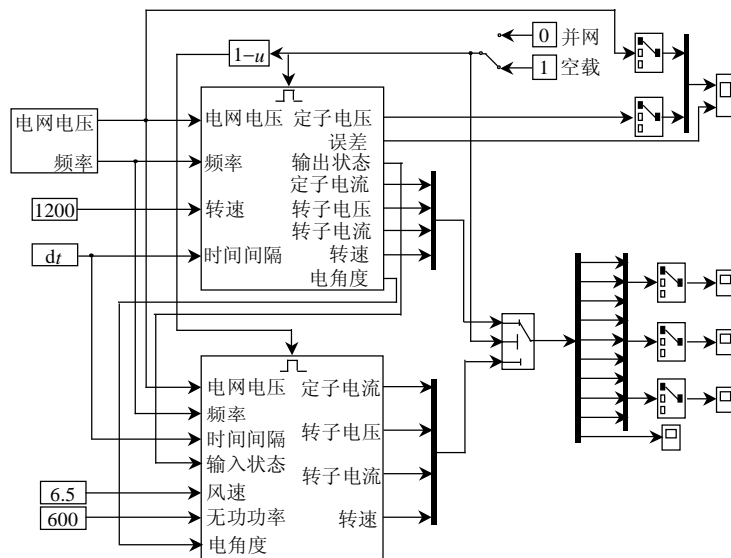


图5 交流励磁变速恒频风力发电系统仿真框图  
Fig. 5 The simulation frame of the AC excited VSCF wind power

### 4.3 系统仿真结果

在前述仿真模型基础上，对系统空载运行调节过程、并网过渡过程、有功、无功独立调节过程进行了仿真研究。并网前，取电网电压信息（幅值、频率、相位）作控制依据提供给发电机控制系统，调节发电机的励磁，控制发电机的输出电压满足并网条件以进行并网操作；并网成功后切换为发电控制策略，追踪最大风能运行，实现有功、无功功率的独立调节。

#### (1) 并网过程仿真

发电机在 1200r/min 转速下空载稳态运行 3s 后并网，空载调节过程、效果及并网时刻转子电流过渡过程波形如图 6 所示，可见图 6(a)中  $i_{Mr}$  很快跟到  $i_{Mr}^*$  上， $i_{Tr}$  也很快稳定且几乎为零，这与前述的控制策略是相符的；图 6(b)中定子 a 相输出电压  $u_{as}$  与电网 a 相电压  $u_{anet}$  的误差在半个周波之内就达到 10V 以下，说明调节过程较快、精度较高；由图 6(c)可见并网过程中，转子 a 相电流  $i_{ar}$  没有太大的冲击，过渡比较平稳，对电网不会造成太大影响，完全满足并网要求。

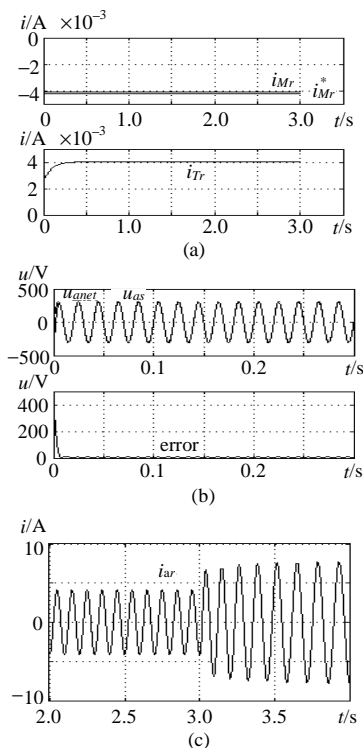


图 6 并网过程仿真波形

Fig. 6 The simulation curves of merging into network

#### (2) 无功调节过程仿真

并网后，无功功率给定值为 600var，8.5s 时无功给定由 600var 上升至 1200var，12.5s 后下降为

600var，15.5s 时仿真结束。仿真期间，保持风速为 6.5m/s 不变。仿真结果如图 7 所示，图 7 (a)给出了只改变无功功率的给定时，有功功率  $P$  和无功功率  $Q$  的变化情况，可见有、无功功率的实际值很好地追踪了各给定值，调节中相互不干扰，很好地实现了解耦；相应的转子电流  $M$ 、 $T$  轴分量变化情况如图 7(b)所示，也只有无功分量  $i_{Mr}$  绝对值有所增大，而有功分量  $i_{Tr}$  不变，说明无功功率可独立调节，同时可以看到转子电流两分量也很好追踪了给定的变化；发电机转速波形如图 7(c)所示，基本上没变化，保持 6.5m/s 风速所对应的最佳转速 1300r/min，这进一步说明了无功调节过程中，有功功率的确不变化。

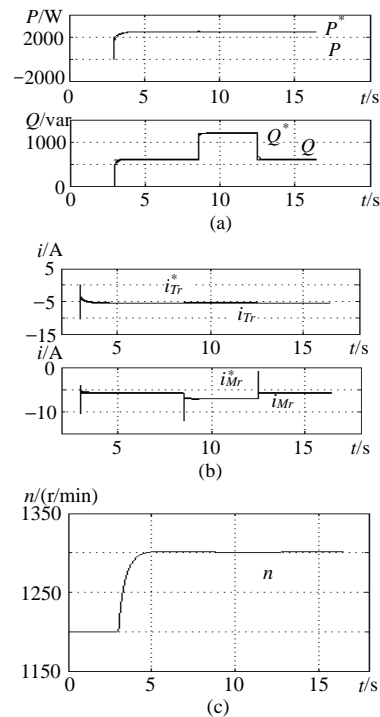


图 7 无功调节过程仿真波形

Fig. 7 The simulation curves of adjusting reactive power

#### (3) 有功调节过程仿真

并网后，风速给定为 6.5m/s，8.5s 时风速由 6.5m/s 改变为 7m/s，12.5s 又变回 6.5m/s，16.5s 时仿真结束。仿真期间，设定无功功率为 600var 不变。仿真结果如图 8 所示，只改变风速的给定，当风速由 6.5m/s 变为 7m/s 时，有功功率  $P$  将有所增大，有功功率  $P$  和无功功率  $Q$  的变化情况如图 8(a)所示，有、无功功率的实际值很好地追踪了各给定值；相应的转子电流  $MT$  分量变化情况如图 8(b)所示，也只有有功分量  $i_{Tr}$  绝对值有所增大，而无功分量  $i_{Mr}$  不变，说明有功功率可独立调节，

同时可以看到转子电流两分量也很好地追踪了给定的变化;发电机转速波形如图8(c)所示,当风速给定由6.5m/s变为7m/s时,电机转速由6.5m/s风速所对应的最佳转速1300r/min变为7m/s风速所对应的最佳转速1400r/min,当风速给定由7m/s变回6.5m/s时,电机转速也由1400r/min变回6.5m/s风速对应的最佳转速1300r/min。说明在风速的变化过程中,机组遵循最大风能捕获的机理运行<sup>[11-14]</sup>。

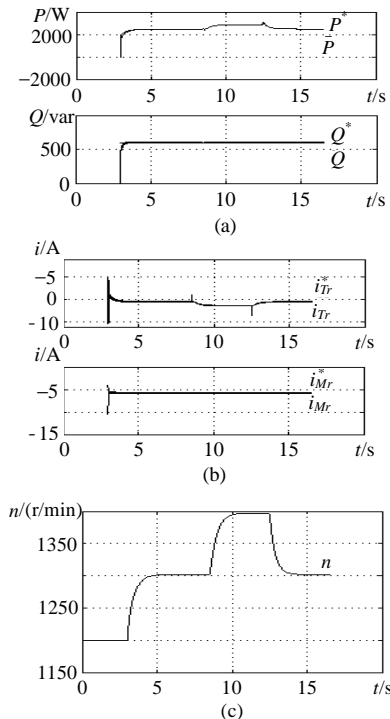


图8 有功调节过程仿真波形

Fig. 8 The simulation curves of adjusting active power

## 5 结论

针对交流励磁变速恒频风力发电系统建立了完整的仿真模型,进行了并网前发电机空载电压调节、并网条件检验、并网过渡过程以及并网后追踪最大风能捕获的变速恒频发电运行仿真研究。风电系统仿真模型能很好地模拟实际的运行工况,仿真结果证明了提出的控制策略、构建的风力发电系统可以实现定子磁链定向的解耦控制,实现发电机的有功功率和无功功率的独立调节,满足变速恒频风力发电的需要,为以后控制策略的实施奠定了理论基础。

## 参考文献

- [1] 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.  
Bian Songjiang. Research on the key technology of VSCF in wind power systems[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003.
- [2] 卞松江, 潘再平, 贺益康. 风力机特性的直流电机模拟[J]. 太阳

能学报, 2003, 24(3): 360-364.

- Bian Songjiang, Pan Zaiping, He Yikang. The simulation of the fan characteristic by the DC motor[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2003, 24(3): 360-364.
- [3] 倪受元. 风力发电讲座 第二讲风力机的工作原理和气动特性[J]. 太阳能, 2000, 21(3): 12-16.  
Ni Shouyuan. Lecture of Wind power generation Lesson 2, Principle and gas power characteristic of wind turbine[J]. Solar Energy, 2000, 21(3): 12-16.
- [4] 朱振东. 发电机交流励磁变速运行的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 1996.  
Zhu Zhendong. Investigation on AC excited variable speed operation [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 1996.
- [5] 黄科元, 贺益康, 卞松江. 矩阵式变换器交流励磁的变速恒频风力发电系统研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(11): 100-105.  
Huang Keyuan, He Yikang, Bian Songjiang. Investigation of a matrix converter excited varied speed constant frequency wind power generation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(11): 100-105.
- [6] 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.
- [7] 赵仁德, 贺益康, 黄科元, 等. 变速恒频风力发电机用交流励磁电源的研究[J]. 电工技术学报, 2004, 19(6): 1-6.  
Zhao Rende, He Yikang, Huang Keyuan et al. Investigation of AC excitation power supply used in VSCF wind power generator [J]. Transactions of CES, 2004, 19(6): 1-6.
- [8] 马洪飞, 徐殿国, 苗立杰. 几种变速恒频风力发电系统控制方案的对比分析[J]. 电工技术杂志, 2000, (10): 1-4.  
Ma Hongfei, Xu Dianguo, Miao Lijie. Scheme comparison & analysis of four types VSCF wind power generation system[J]. Journal of the CSE, 2000, (10): 1-4.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] R Pena, J C Clare, G M Asher. Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation[J]. IEE Proc. on Power Appl., 1996, 143(3): 231-241.
- [12] 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.
- [13] Tang Y, Xu L. A flexible active and reactive power control strategy for a variable speed constant frequency generating system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1996, 10(4): 472-478.
- [14] 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]. Electric Power Applications, IEE Proceedings, 1996, 143(3): 231-241.

收稿日期: 2005-07-19.

作者简介:

卞松江(1970-), 男, 副教授, 博士后, 研究方向为电力电子技术及其应用;

吕晓美(1981-), 女, 硕士研究生, 研究方向为交流电机及其运动控制。