

# 基于变结构控制的交流励磁变速恒频风力发电机 励磁控制研究

赵宇<sup>1</sup>, 郭清滔<sup>2</sup>, 王奔<sup>1</sup>, 吴维鑫<sup>1</sup>, 仇乐兵<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031; 2. 福建省电力试验研究院, 福建 福州 350007)

**摘要:** 根据交流励磁变速恒频风力发电系统的特点, 将矢量控制技术应用于双馈发电机励磁控制。双馈异步发电机的数学模型在  $m-t$  坐标系下, 是一个非线性耦合系统。引入逆系统方法将原系统线性化解耦, 构造出伪线性系统。设计伪线性系统的变结构控制律。建立双馈发电机的励磁控制仿真模型。仿真结果表明, 矢量控制与变结构控制相结合的控制策略能够实现系统输出有功功率、无功功率的独立解耦控制。变结构控制与 PI 控制相比, 具有更好的动态响应性能。

**关键词:** 双馈异步发电机; 矢量控制; 变结构控制; 交流励磁

## Research of AC excited VSCF wind power generator excitation control system based on variable structure control

ZHAO Yu<sup>1</sup>, GUO Qing-tao<sup>2</sup>, WANG Ben<sup>1</sup>, WU Wei-xin<sup>1</sup>, QIU Le-bing<sup>1</sup>

(1. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Fujian Electric Power Test & Research Institute, Fuzhou 350007, China)

**Abstract:** According to the characteristic of AC-excited variable speed constant frequency wind power generation, vector control technique is applied to excitation control of doubly fed induction generator (DFIG). The mathematic model of DFIG is a coupling nonlinear system in synchronous rotating  $m-t$  coordinate system. This paper proposes a novel control method. First, the original system model of DFIG is linearized and decoupled to be a pseudo-linear system which is made up of original system and inverse system. Then, the variable structure control laws of the pseudo-linear system is designed. Finally, the excitation control simulation model of DFIG is established. The simulation result demonstrates that the combination of vector control and variable structure control can realize the independent decoupling control of active and reactive power in system output. Compared with PI controller, variable structure controller shows better dynamic response.

**Key words:** doubly fed induction generator; vector control; variable structure control; AC-excited

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)15-0012-06

## 0 引言

随着全世界范围内的能源、环境问题日益严峻, 世界各国都在大力发展“绿色”能源。风能取之不尽、清洁无污染, 是可再生能源中最廉价、最具潜力的能源。近年来, 世界风电技术进入了快速发展时期, 交流励磁变速恒频风力发电方式是目前一个重要的发展方向<sup>[1-2]</sup>。

交流励磁变速恒频风力发电采用交流励磁双馈型异步发电机, 其定子绕组接入工频电网, 转子绕组由一台频率、电压可调的低频交流励磁变频器供给三相低频励磁电流<sup>[3]</sup>。目前已有不少文献应用矢

量控制技术研究了双馈风力发电机的励磁控制策略<sup>[4-6]</sup>。以往的矢量控制策略结合 PI 控制, 来实现双馈发电机励磁控制, 其响应速度较慢, 难以做到精确解耦控制。本文提出了一种矢量控制与变结构控制技术相结合的策略, 研究了双馈风力发电机的励磁控制问题。

## 1 双馈发电机模型和励磁控制策略

### 1.1 双馈发电机 (DFIG) 数学模型

定子侧电压、电流正方向按照发电机惯例, 转子侧电压、电流正方向按照电动机惯例, 可写出双馈发电机在定子同步速  $m-t$  两相坐标系下的数学模

型。

定转子电压方程为:

$$\begin{cases} u_{m1} = -r_1 i_{m1} - p\psi_{m1} + \omega_1 \psi_{t1} \\ u_{t1} = -r_1 i_{t1} - p\psi_{t1} - \omega_1 \psi_{m1} \\ u_{m2} = r_2 i_{m2} + p\psi_{m2} - (\omega_1 - \omega_2) \psi_{t2} \\ u_{t2} = r_2 i_{t2} + p\psi_{t2} + (\omega_1 - \omega_2) \psi_{m2} \end{cases} \quad (1)$$

定转子磁链方程为:

$$\begin{cases} \psi_{m1} = l_1 i_{m1} - l_m i_{m2} \\ \psi_{t1} = l_1 i_{t1} - l_m i_{t2} \\ \psi_{m2} = -l_m i_{m1} + l_2 i_{m2} \\ \psi_{t2} = -l_m i_{t1} + l_2 i_{t2} \end{cases} \quad (2)$$

电磁转矩、运动方程为:

$$\begin{cases} T_e = \frac{3}{2} n_p l_m (i_{m1} i_{t2} - i_{t1} i_{m2}) \\ T_1 - T_e = \frac{J}{n_p} \frac{d\omega_2}{dt} \end{cases} \quad (3)$$

其中:  $r_1$ 、 $r_2$  分别为定转子绕组等效电阻;  $l_1$ 、 $l_2$ 、 $l_m$  分别为  $m$ - $t$  轴定转子绕组自感及互感;  $i_{m1}$ 、 $i_{t1}$ 、 $i_{m2}$ 、 $i_{t2}$ 、 $u_{m1}$ 、 $u_{t1}$ 、 $u_{m2}$ 、 $u_{t2}$  分别为  $m$ - $t$  轴定转子电流与电压;  $\psi_{m1}$ 、 $\psi_{t2}$ 、 $\psi_{m2}$ 、 $\psi_{t2}$  分别为  $m$ - $t$  轴定转子磁链;  $\omega_1$  为定子同步电角速度;  $\omega_2$  为转子电角速度;  $\omega_s = \omega_1 - \omega_2$  为转差角速度;  $p$  为微分算子;  $J$  为转动惯量;  $n_p$  为电机极对数;  $T_e$ 、 $T_1$  分别为电磁转矩和机械转矩。

## 1.2 DFIG 定子磁链定向矢量控制

为了使定子电压的相位、幅值、频率同电网电压保持一致, 满足并网要求, 需要根据电网电压的信息来对转子励磁电流进行控制。由于大容量发电机在工频下电感远大于电阻, 所以电阻可以忽略不计<sup>[7]</sup>。本文选取  $m$  轴方向与定子磁链方向重合, 定子端电压矢量  $u$  滞后磁链矢量  $\psi_1$   $90^\circ$ ,  $u_m$  为三相系统相电压的幅值, 如图 1 所示。

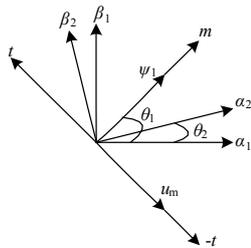


图 1 定子磁场定向示意图

Fig.1 Sketch of vectors of stator magnetic-field

于是, 可得

$$\begin{cases} \psi_{m1} = \psi \\ \psi_{t1} = 0 \\ u_{m1} = 0 \\ u_{t1} = -u_m \end{cases} \quad (4)$$

将式 (4) 代入式 (1), 略去定子电阻, 得

$$\begin{cases} \dot{\psi}_1 = 0 \\ \psi_1 = u_m / \omega_1 \end{cases} \quad (5)$$

可见定子磁链也是恒定不变的。

两相坐标系下瞬时有功、无功功率可写为

$$\begin{cases} p = \frac{3}{2} (u_{m1} i_{m1} + u_{t1} i_{t1}) \\ q = \frac{3}{2} (u_{t1} i_{m1} - u_{m1} i_{t1}) \end{cases} \quad (6)$$

将式 (4) 代入式 (6) 可得平均功率

$$\begin{cases} P = -\frac{3}{2} u_m i_{t1} \\ Q = -\frac{3}{2} u_m i_{m1} \end{cases} \quad (7)$$

由定转子磁链式 (2) 可得

$$\begin{cases} i_{m2} = (-\psi_1 + l_1 i_{m1}) / l_m \\ i_{t2} = l_1 i_{t1} / l_m \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \psi_{m2} = -\frac{l_m}{l_1} \psi_1 + l_2 (1 - \frac{l_m^2}{l_1 l_2}) i_{m2} = -a \psi_1 + b i_{m2} \\ \psi_{t2} = l_2 (1 - \frac{l_m^2}{l_1 l_2}) i_{t2} = b i_{t2} \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{其中: } \begin{cases} a = \frac{l_m}{l_1} \\ b = l_2 (1 - \frac{l_m^2}{l_1 l_2}) \end{cases}$$

最后由式 (1) 得到转子电压方程

$$\begin{cases} u_{m2} = r_2 i_{m2} - \omega_s \psi_{t2} + \psi_{m2} = \\ r_2 i_{m2} + b \frac{di_{m2}}{dt} - b \omega_s i_{t2} \\ u_{t2} = r_2 i_{t2} + \omega_s \psi_{m2} + \psi_{t2} = \\ r_2 i_{t2} + b \frac{di_{t2}}{dt} - a \omega_s \psi_1 + b \omega_s i_{m2} \end{cases} \quad (10)$$

式 (7) ~ (10) 组成了交流励磁发电机定子磁链定向控制的基本关系式。

## 2 双馈发电机励磁控制系统设计

### 2.1 转子电流控制环设计

由转子电压方程式 (10) 可知, 这是一个多输

入多输出的耦合非线性系统，以往矢量控制利用式(10)设计PI调节器，很难做到精确解耦控制。本文采用逆系统线性化非线性控制技术实现系统解耦，然后设计系统的变结构控制器完成控制。

由式(3)可得：

$$\dot{\omega}_s = -\dot{\omega}_2 = -\frac{n_p}{J}(T_1 - T_e) \quad (11)$$

将式(11)代入式(10)，可得转子电压状态方程

$$\begin{cases} \dot{i}_{m2} = (-r_2 i_{m2} + b\omega_s i_{t2} + u_1) / b \\ \dot{i}_{t2} = (-r_2 i_{t2} - b\omega_s i_{m2} + a\omega_s \psi_1 + u_2) / b \\ \dot{\omega}_s = -\frac{n_p}{J}(T_1 - T_e) \end{cases} \quad (12)$$

其中： $T_1$ 为风力机机械转矩， $T_1 = P_m / \Omega$ ； $P_m$ 为风力机输出的机械功率； $\Omega$ 为风力机机械角速度。

取状态变量 $[x_1, x_2, x_3] = [i_{m2}, i_{t2}, \omega_s]$

取控制量 $[u_1, u_2] = [u_{m2}, u_{t2}]$

取输出变量 $[y_1, y_2] = [x_1, x_2]$

可得到转子电压状态变量的表达式

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = (-r_2 x_1 + b x_3 x_2 + u_1) / b \\ \dot{x}_2 = (-r_2 x_2 - b x_3 x_1 + a x_3 \psi_1 + u_2) / b \\ \dot{x}_3 = -\frac{n_p}{J}(T_1 - T_e) \\ y_1 = x_1, y_2 = x_2 \end{cases} \quad (13)$$

$$\text{逆系统为} \begin{cases} u_1 = b\dot{y}_1 + r_2 x_1 - b x_3 x_2 \\ u_2 = b\dot{y}_2 + r_2 x_2 + b x_3 x_1 - a x_3 \psi_1 \end{cases} \quad (14)$$

由逆系统的相对阶的定义可知，此逆系统的相对阶数 $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2) = (1, 1)$ ，相对阶数为2，小于原系统阶数3。这样，这个伪线性系统存在一个隐动态，也就是式(13)中第三式，这个隐动态方程的稳定与否将会影响到整个系统的稳定。这个隐动态的稳定即是转子电角速度 $\omega_2$ 的稳定，将 $\omega_2$ 作为反馈值引入到参考功率计算，通过功率控制环可使这个隐动态稳定，具体原理见功率控制环设计及图3所示。

则在式(14)中，取 $v_1 = \dot{y}_1$ ， $v_2 = \dot{y}_2$ ，把逆系统串联在原系统之后，原系统与逆系统就构成了一个伪线性系统。伪线性系统可解耦成两个独立的子线性系统：

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = v_1 \\ x_1 = y_1 \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = v_2 \\ x_2 = y_2 \end{cases} \quad (16)$$

对于系统(15)，控制器的设计目标是： $x_1 \rightarrow x_1^*$ ，应用变结构控制原理<sup>[8]</sup>，取切换面 $s_1 = x_1 - x_1^*$ ，采用趋近律设计方法，令 $\dot{s}_1 = -k_1 s_1 - \varepsilon_1 \text{sgn}(s_1)$ ，则可得系统的变结构控制律如下：

$$v_1 = k_1(x_1^* - x_1) + \varepsilon_1 \text{sgn}(x_1^* - x_1) + \dot{x}_1^* \quad (17)$$

其中， $\text{sgn}(s_1)$ 为符号函数。

同理可设计系统(16)的控制律：

$$v_2 = k_2(x_2^* - x_2) + \varepsilon_2 \text{sgn}(x_2^* - x_2) + \dot{x}_2^* \quad (18)$$

## 2.2 功率控制环设计

通过式(7)可以实现有功功率、无功功率的解耦，本文对有功功率 $P$ 的控制，是为了实现最大风能追踪，有功功率指令 $P^*$ 需要从风能追踪的角度求取。根据风能追踪的原理<sup>[9-10]</sup>、双馈异步发电机的功率关系可得到 $P^*$ 的计算公式：

$$\begin{cases} P^* = \frac{P_{\max}}{1-s} - \Delta P \\ \Delta P = P_{\text{Cu1}} + P_{\text{Fe1}} + \frac{P'_m}{1-s} \end{cases}$$

其中： $P_{\text{Cu1}}$ 、 $P_{\text{Fe1}}$ 为定子铜耗、铁耗； $s$ 为转差率； $P_{\max}$ 、 $P'_m$ 为风力机的最佳功率、发电机的机械损耗。

图2表示出了最大风能追踪的过程。图中画出了不同风速下定桨距风力机的功率特性曲线，曲线 $P_{\max}$ 为最佳功率曲线，运行在这条线上，风力机就能捕获到最大风能。风速 $V_k$  ( $k=1, 2, 3$ )为三种不同的风速，且 $V_1 > V_2 > V_3$ 。假设在风速 $V_3$ 下风力机稳定运行于曲线 $P_{\max}$ 上的A点，此时风力机输出功率和发电机输入功率相互平衡，均为 $P_a$ ，风力机的稳定转速为 $\omega_1$ 。当风速升至 $V_2$ 时，风力机跳至B点运行，其输出功率由 $P_a$ 突增至 $P_b$ 。由于惯性作用和调节过程的滞后，发电机仍暂时在A点运行，风力机提供的功率大于发电机的输入功率，这样发电机的输入功率大于输出的电磁功率，导致机组的转速上升。在转速上升的过程中，风力机和发电机分别沿着B→C曲线和A→C曲线增速。当到达C点

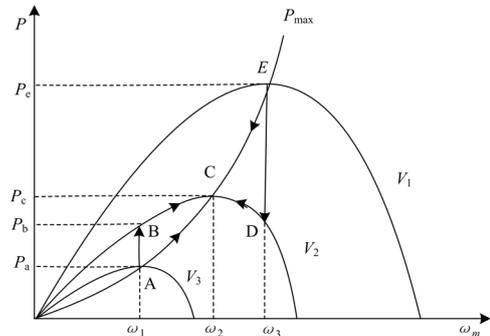


图2 风力机的功率特性

Fig.2 Power characteristics of a wind turbine



10 kW; 额定电压 220 V; 额定频率为 50 Hz; 定子绕组电阻  $R_1=0.2943 \Omega$ ; 转子绕组电阻  $R_2=0.1442 \Omega$ ; 定子自感  $L_1=0.0541 \text{ H}$ ; 转子自感  $L_2=0.0533 \text{ H}$ ; 定转子互感  $L_m=0.0528 \text{ H}$ ; 转动惯量  $J=0.4718 \text{ kgm}^2$ 。

并网前, 取电网电压幅值、频率、相位信息作为控制依据, 经过控制系统调节发电机的转子励磁电压, 控制发电机的输出定子电压, 满足并网条件后进行并网。并网成功后切换为发电控制模式, 实施最大风能追踪控制, 实现有功无功功率的独立调节。

1) 并网过程仿真

发电机在 1 200 r/min 转速下空载稳态运行 1 s 后并网。图 5 (a) 为并网前时段内发电机输出定子电压和电网电压的比较图, 图 5 (b) 为两者误差的绝对值。由图可见在并网控制下, 定子电压逐渐逼近电网电压, 误差迅速变小。

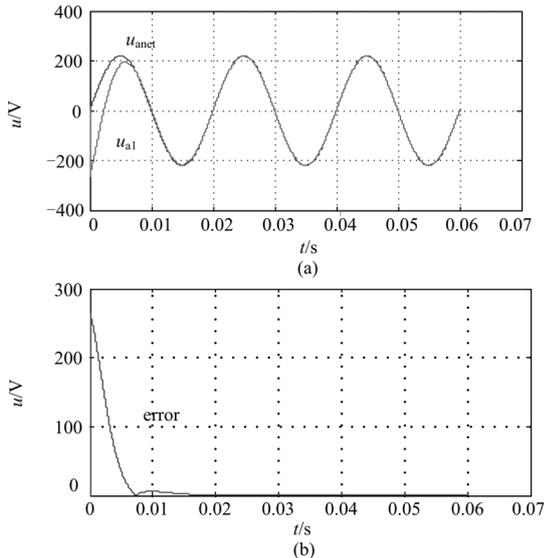


图 5 发电机空载电压、空载电压与电网电压的误差

Fig.5 No-load voltage of generator, error of no-load voltage and grid voltage

2) 并网阶段, 变结构控制与 PI 控制的结果比较

并网后, 无功功率给定定为 600 var, 风速保持 7.5 m/s 不变, 系统进入最大风能控制阶段, 9 s 时结束运行。

图 6 (a)、(c)、(e) 为变结构控制下转子电流波形、转子电流放大波形、转速曲线; 图 6 (b)、(d)、(f) 为 PI 控制下转子电流波形、转子电流放大波形、转速曲线。由图可见转子电流波形, 变结构控制下要比 PI 控制下更加稳定; 转速在变结构控制下响应速度更快, 大约在 5.5 s 时稳定, PI 控制下转

速大约在 6.5 s 时稳定。

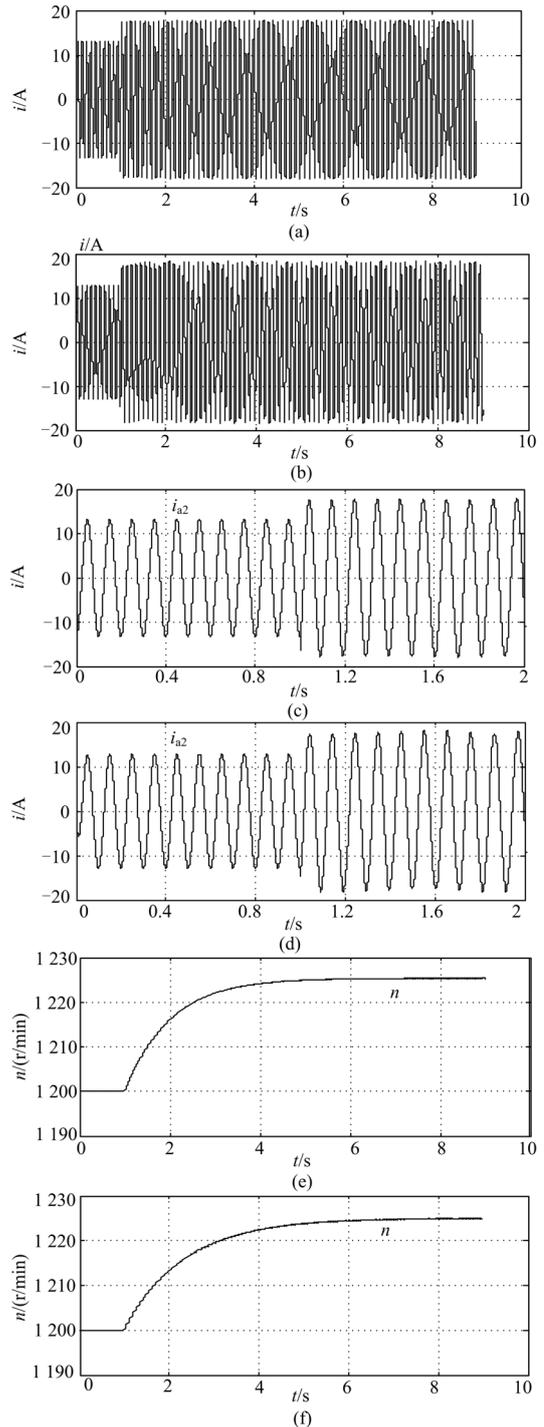


图 6 变结构控制与 PI 控制的仿真结果

Fig.6 Simulation results of variable structure control and PI control

3) 变结构控制下无功功率调节仿真

并网后, 保持风速为 7.5 m/s 不变, 无功功率初始值为 600 var, 8 s 时无功功率由 600 var 上升至 1 200 var, 12 s 时又下降为 600 var, 15 s 时仿真结束。

图 7 (b) 为无功功率变化的波形, 图 7 (a) 为只改变无功功率的给定值时, 有功功率  $P$  的变化情况。由图可见, 有功功率、无功功率的实际值很好地追踪了各自给定值, 调节中相互不干扰, 实现了有功无功功率的解耦控制。

图 7 (c) 为发电机转速波形, 转速稳定后, 保持 7.5 m/s 风速所对应的最佳转 1 225.4 r/min, 也说明了在无功的调节过程中, 有功功率保持不变。

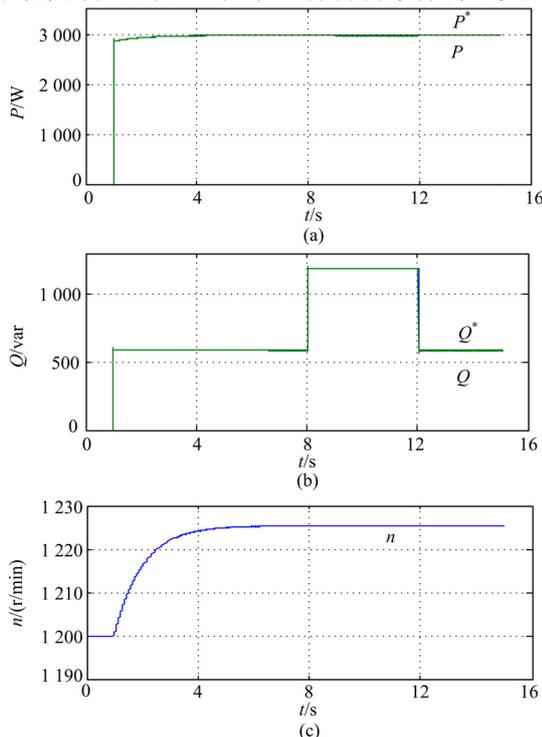


图 7 无功调节过程仿真波形

Fig.7 Simulation curves of adjusting reactive power

#### 4) 变结构控制下有功功率调节仿真

并网后, 无功功率保持为 600 var 不变, 风速初始给定为 7.5 m/s, 10 s 时风速由 7.5 m/s 改变为 8 m/s, 20 s 时又变回 7.5 m/s, 30 s 时仿真结束。

只改变风速的给定值, 当风速由 7.5 m/s 变为 8 m/s 时, 有功功率  $P$  有所增大, 有功功率  $P$  和无功功率  $Q$  的变化情况如图 8 所示, 有、无功功率的实际值能够很好地追踪各自给定值, 有功功率可以独立调节。

图 8 (c) 为转速曲线, 当风速由 7.5 m/s 变为 8 m/s 时, 电机转速由 7.5 m/s 风速所对应的最佳转速 1 225.4 r/min 变为 8 m/s 风速所对应的最佳转速 1 306.8 r/min; 当风速由 8 m/s 变回 7.5 m/s 时, 电机转速又由 1 306.8 r/min 变回 1 225.4 r/min。这表明, 在风速变化的过程中, 控制系统能够实现最大风能捕获。

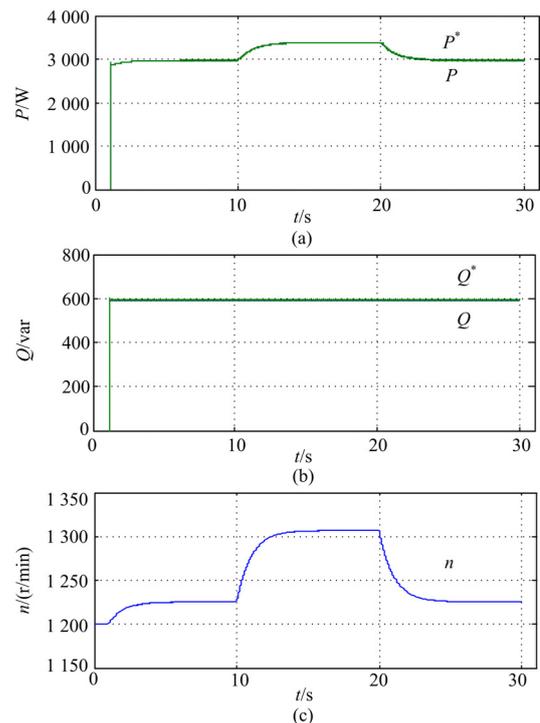


图 8 有功调节过程仿真波形

Fig.8 Simulation curves of adjusting active power

## 4 结论

本文建立了交流励磁变速恒频风力发电系统的完整仿真模型, 采用矢量控制与变结构控制相结合的控制策略, 进行了发电机空载仿真、并网过渡过程和最大风能追踪控制的仿真研究。仿真结果表明, 本文提出的控制策略能够实现系统输出有功无功功率的独立解耦控制, 比以往矢量控制加 PI 控制的策略具有更好的动态响应性能。

## 参考文献

- [1] 王承熙. 风力发电[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [2] 叶杭冶. 风力发电机组的控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [3] Boldea I, Tutulea L, Serban I. Variable speed electric generators and their control: an emerging technology[J]. Journal of Electrical Engineering, 2002, 1 (3): 20-28.
- [4] 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 Cheng-wu, WANG Feng-xiang, YAO Xing-jia. Study on excitation control of VSCF doubly fed wind power generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (11): 122-125.

(下转第23页 continued on page 23)

- 96-99.
- [5] 吕延洁, 张保会, 哈恒旭, 等. 基于暂态量超高速线路保护的发展与展望[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(5): 56-61.  
Lü Yan-jie, ZHANG Bao-hui, HA Heng-xu, et al. Development and prospect of ultra-high speed protection for EHV transmission systems based on fault-generated transients[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(5): 56-61.
- [6] YOU Min, ZHANG Bao-hui, CAO Rui-feng, et al. Study of non-unit transient-based protection for HVDC transmission lines[C]. //Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. 2009.
- [7] 齐先军, 丁明, 温阳东. 一种完全滤除衰减直流分量的短数据窗改进全波傅氏算法[J]. 继电器, 2005, 33(17): 14-16.  
QI Xian-jun, DING Ming, WEN Yang-dong. An improved short data window full-wave Fourier algorithm for completely filtering decaying DC component[J]. Relay, 2005, 33(17): 14-16.
- [8] 曹瑞峰. 高压直流输电线路单端暂态量保护研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2009.  
CAO Rui-feng. Study of non-unit transient-based protection for HVDC transmission lines[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2009.
- [9] 罗隆福, 俞华, 刘福生, 等. 高压直流输电系统中双调谐滤波器参加研究及仿真[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(10): 25-27.  
LUO Long-fu, YU Hua, LIU Fu-sheng, et al. Study on parameters of double tuned filter in HVDC transmission system and its simulation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(10): 25-27.
- [10] 张劲松. 特高压直流平波电抗器的选择[J]. 广东电力, 2006, 19(5): 36-38, 45.  
ZHANG Jin-song. Selection of ultra-high voltage direct current smoothing reactors[J]. Guangdong Electric Power, 2006, 19(5): 36-38, 45.
- [11] 王钢, 李志铿, 李海锋.  $\pm 800$  kV 特高压直流线路暂态保护[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(21): 40-43.  
WANG Gang, LI Zhi-keng, LI Hai-feng. Transient based protection for  $\pm 800$  kV UHVDC transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(21): 40-43.
- [12] 施围, 邱毓昌, 张乔根. 高电压工程基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [13] 魏军, 罗四倍. 基于信号奇异性检测的行波启动元件算法的探讨[J]. 继电器, 2007, 35(21): 1-6.  
WEI Jun, LUO Si-bei. Traveling-wave starting algorithm based on signal singularity detection[J]. Relay, 2007, 35(21): 1-6.
- [14] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.

收稿日期: 2010-03-09; 修回日期: 2010-05-19

作者简介:

张保会(1953-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统继电保护、安全稳定控制和通信等领域; E-mail: bhzhang@mail.xjtu.edu.cn

张嵩(1986-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为高压直流输电线路单端暂态量保护; E-mail: zs19860415@gmail.com

尤敏(1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为高压直流输电线路单端暂态量保护。

(上接第 17 页 continued from page 17)

- [5] 卞松江, 吕晓美, 相会杰. 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(16): 57-62.  
BIAN Song-jiang, Lú Xiao-mei, XIANG Hui-jie. Modeling and simulation of AC-excited VSCF in wind-power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(16): 57-62.
- [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 Qi-hui, HE Yi-kang, BIAN Song-jiang. 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] 侯勇, 童建东. 变速恒频双馈风力发电机并网积分型变结构控制[J]. 电机与控制学, 2008, 12(3): 260-265.  
HOU Yong, TONG Jian-dong. Cutting-in control of variable-speed constant-frequency double-fed wind power generator with integral variable structure control[J]. Electric Machines and Control, 2008, 12(3): 260-265.
- [8] 高为炳. 变结构控制的理论与设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [9] 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 Proc on Power Appl, 1996, 143(3): 231-241.
- [10] 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.

收稿日期: 2009-09-10; 修回日期: 2010-05-13

作者简介:

赵宇(1985-), 男, 硕士研究生, 研究方向为非线性控制技术在风力发电系统中的应用; E-mail: zhaoyu\_u@163.com

郭清滔(1983-), 男, 硕士, 研究方向为发电机及高压相关新技术;

王奔(1960-), 男, 教授, 研究方向为电力系统非线性与变结构控制。