

大型变速恒频风电系统的建模与仿真

孙国霞,李啸骢,蔡义明

(广西大学 电气工程学院,广西 南宁 530004)

摘要: 针对兆瓦级变速恒频风力发电系统,基于 Matlab/Simulink 建立了包括风机、传动齿轮、双馈发电机在内的大型风电系统的整体动态数学模型。传统的最大风能捕获算法往往基于最优功率曲线和部分风机参数已知,当上述参数未知或出现扰动时,风电系统的效率会严重降低。针对此不足,基于所建模型设计了变步长最大风能捕获控制器,该控制器采用矢量控制算法,实现了发电机输出有功和无功功率的解耦控制;针对有功功率控制,控制器根据发电机输出转速扰动时,相应输出有功功率的变化变步长地调整系统输入,直到系统运行到最大风能点。仿真结果验证了风电系统模型的正确性以及控制器的有效性。

关键词: 风力发电系统; 双馈发电机; 矢量控制; 最大风能追踪

中图分类号: TM 315

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)10-0069-04

0 引言

在众多的计算机仿真软件中,Simulink 为动态系统的设计与控制策略的开发提供了直观、方便、交互式的图形化集成仿真环境,获得了广大工程研究人员的青睐。

现基于 Simulink 建立了以双馈电机为发电机的大型变速恒频风电系统^[1-3]的整体动态数学模型,该模型包括风机、传动齿轮、发电机、控制器 4 个部分。其中,为提高低风速下的风电系统的运行效率,设计了运用变步长搜索算法的最大风能追踪控制器,该控制器收敛速度快,并且不需要风机系统的任何参数,具有很好的鲁棒性能。

1 风电系统仿真与建模

1.1 风力机模型

风机的输出转矩与风速、叶片转速及其结构参数有关,由风力机的转矩特性方程有^[4-5]

$$T_{wt} = \frac{1}{2} C_q \pi R^3 \rho v^2 \quad (1)$$

式中 T_{wt} 为风轮输出转矩; $C_q = f(\lambda, \beta)$ 为风轮的转矩系数; ρ 为空气密度; v 为风速; R 为风轮半径; $\lambda = \omega_m R / v$ 为叶尖速比; ω_m 为风轮机械角速度; β 为风机桨矩角。

C_q 与桨矩角 β 、叶尖速比 λ 的非线性曲线关系如图 1 所示。

对于水平轴、三桨叶、上风向布置、变速变桨距控制发电机组,根据文献^[6]有

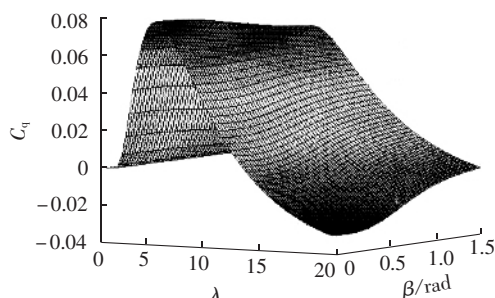


图 1 风力机转矩系数曲线

Fig.1 Torque characteristics of wind turbine

$$C_q = f(\lambda, \beta) = \frac{0.22}{\lambda} \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-12.5/\lambda_i} \quad (2)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.008\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$

1.2 传动齿轮模型

风力机的传动齿轮示意图如图 2 所示,忽略转轴的倔强因数、阻尼因数,由动力学分析,可知轮毂到发电机转子之间的机械传动部分的动态方程^[7-8]为

$$T_{wt} - T_{lss} = J_{wt} \frac{d\omega_t}{dt} \quad (3)$$

$$T_{lss} = K_{gear} T_{hss}$$

式中 J_{wt} 、 ω_t 分别为风机的转动惯量和机械转速;

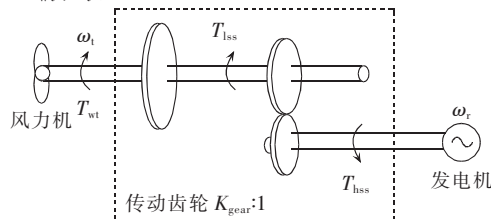


图 2 风力机传动齿轮示意图

Fig.2 Gears of wind turbine

T_{lss} 、 T_{hss} 分别为经过传动齿轮低速轴和高速轴上的机械转矩; K_{gear} 为齿轮箱变比。

1.3 双馈电机模型

基于两相静止(α, β)坐标系建立双馈电机数学模型^[9-11]为

$$\begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{s\beta} \\ u_{r\alpha} \\ u_{r\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s p & 0 & L_m p & 0 \\ 0 & R_s + L_s p & 0 & L_m p \\ L_m p & \omega_r L_m & R_r + L_r p & \omega_r L_r \\ -\omega_r L_m & L_m p & -\omega_r L_r & R_r + L_r p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_{s\alpha} \\ \psi_{s\beta} \\ \psi_{r\alpha} \\ \psi_{r\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$T_e = p_n (\psi_{s\alpha} i_{s\beta} - \psi_{s\beta} i_{s\alpha}) \quad (6)$$

双馈电机的转子运动方程为

$$T_{hss} - T_e = p_n J_{gen} \frac{d\omega_r}{dt} \quad (7)$$

式中 $u_{s\alpha}$ 、 $u_{s\beta}$ 、 $u_{r\alpha}$ 、 $u_{r\beta}$ 分别为定、转子 α 、 β 轴电压; $i_{s\alpha}$ 、 $i_{s\beta}$ 、 $i_{r\alpha}$ 、 $i_{r\beta}$ 分别为定、转子 α 、 β 轴电流; $\psi_{s\alpha}$ 、 $\psi_{s\beta}$ 、 $\psi_{r\alpha}$ 、 $\psi_{r\beta}$ 分别为定、转子 α 、 β 轴磁链; R_s 、 R_r 、 L_s 、 L_r 分别为定、转子的电阻和自感; L_m 为定、转子间的互感; ω_r 为发电机的转速; T_e 、 p_n 、 J_{gen} 、 ω_r 分别为发电机的电磁转矩、极对数、转动惯量和机械转速; $\omega_r = K_{gear} \omega_1$; $p = d/dt$ 。

这里采用 S-Function 来创建上述仿真模型。

1.4 控制器设计

1.4.1 矢量解耦控制器模块

采用电动机惯例,在定子电压矢量定向的旋转(d, q)坐标系下,忽略定子电阻和电网电压波动的影响,即 $u_{qs} = 0$, $u_{ds} = u_s = C_{onst}$, C_{onst} 为常数, u_s 为定子电压幅值,双馈电机的数学模型可简化为^[10-12]

$$\begin{aligned} u_{dr} &= L_r \sigma p i_{dr} + R_r i_{dr} - \omega_s L_r \sigma i_{qr} \\ u_{qr} &= L_r \sigma p i_{qr} + R_r i_{qr} + \omega_s L_r \sigma i_{dr} + \omega_s \frac{L_m}{L_s} \psi_s \end{aligned} \quad (8)$$

式中 u_{ds} 、 u_{qs} 、 u_{dr} 、 u_{qr} 分别为定、转子 d 、 q 轴电压; i_{dr} 、 i_{qr} 分别为转子侧 d 、 q 轴电流; $\psi_s = u_s / \omega_1$ 为定子磁链; $\omega_s = s \omega_1$ 为滑差转速, s 为发电机的滑差频率, $s > 0$ 运行在次同步状态, $s = 0$ 运行在同步状态, $s < 0$ 运行在超同步状态; σ 为漏磁系数, $\sigma = 1 - L_m^2 / (L_r L_s)$ 。

若选择定子侧输出有功 P_s 和无功功率 Q_s 为系统输出,即

$$\begin{aligned} P_s &= u_s i_{qs} = -L_m u_s i_{qr} / L_s \\ Q_s &= u_s i_{ds} = u_s (u_s / \omega_1 - L_m i_{dr}) / L_s \end{aligned} \quad (9)$$

式中 i_{ds} 、 i_{qs} 分别为定子 d 、 q 轴电流。

设计控制器输出电压为

$$\begin{aligned} u_{dr} &= L_r \sigma p i_{dr} + R_r i_{dr} + \Delta u_{dr} \\ u_{qr} &= L_r \sigma p i_{qr} + R_r i_{qr} + \Delta u_{qr} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \Delta u_{dr} &= -\omega_s L_r \sigma i_{qr} \\ \Delta u_{qr} &= \omega_s L_r \sigma i_{dr} + \omega_s L_m \psi_s / L_s \end{aligned} \quad (11)$$

式中 Δu_{dr} 、 Δu_{qr} 为转子侧 d 、 q 轴补偿电压。

可知,经过前馈补偿去除式(11)的补偿电压后,通过调节转子 d 、 q 轴电压可以分别控制转子侧 d 、 q 轴电流,从而实现定子侧有功和无功的解耦控制。相应地,调节器可以采用简单的线性 PI 调节器。

相应地,为实现矢量控制,需要检测定子(电网)电压矢量的位置,设计了锁相环模块,如图 3 所示。该模块利用算式的恒等性,实现了电压矢量相位的动态检测,具有很高的精度和检测速度。

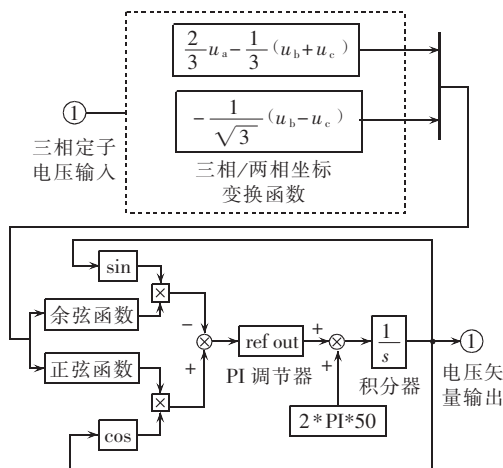


图 3 锁相环模块

Fig.3 Model of PLL

1.4.2 最大风能追踪控制器模块

已有文献对最大风能追踪问题进行了深入研究^[13-14],然而,此类方法往往需要预知风机的参数,因而参数的准确性直接关系到控制效果,针对这一缺点,设计了不依赖于风机参数的最大风能搜索算法。

不同风速下的风机功率-转速曲线如图 4 所示,其中 $v_1 > v_2 > v_3$, 曲线 1、2、3、4 为最优功率曲线, B 、 C 、 D 分别为最大功率点,对应风机的转速和输出功率分别为 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 和 P_a 、 P_b 、 P_c 。可见,不同风速下,风机的输出功率存在唯一的最大值,对应的风机转速为最优转速。

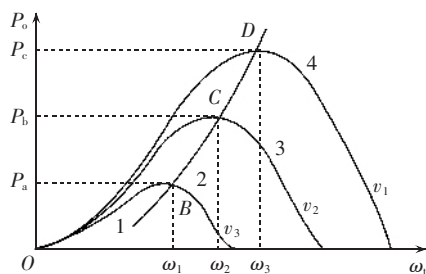


图 4 风力机的功率-转速曲线

Fig.4 Power characteristics of wind turbine

图中, P_0 为风力机输出的机械功率。显然,对应最大功率点有

$$dP_0 / d\omega_1 = 0 \quad (12)$$

忽略损耗的情况下,风电系统的总输出有功功率为

$$P_0 = (1-s)P_s \quad (13)$$

基于式(12)(13),采用离散 S-Function 设计最大风能追踪控制模块,其基本思路为

$$\omega_1 \uparrow \Rightarrow \begin{cases} \text{if } P_s + \omega_1 \frac{\Delta P_s}{\Delta \omega_1} > 0 \Rightarrow \omega_1(k+1) = \omega_1(k) + k_1 \\ \text{else if } P_s + \omega_1 \frac{\Delta P_s}{\Delta \omega_1} < 0 \Rightarrow \omega_1(k+1) = \omega_1(k) - k_2 \\ \text{else if } P_s + \omega_1 \frac{\Delta P_s}{\Delta \omega_1} = 0 \Rightarrow \omega_1(k+1) = \omega_1(k) \end{cases}$$

式中 “↑”表示 ω_1 增大; $k+1$ 、 k 分别表示第 $k+1$ 和 k

步的离散值; k_1 、 k_2 为变步长,是 $\left(P_s + \omega_1 \frac{\Delta P_s}{\Delta \omega_1}\right)$ 的增函数,考虑到系统的复杂性,采取线性增函数。 ω_1 减小时的控制算法与上述类似。

2 仿真结果

在 Matlab/Simulink 下建立上述模型,如图 5 所示,仿真参数如表 1 所示。

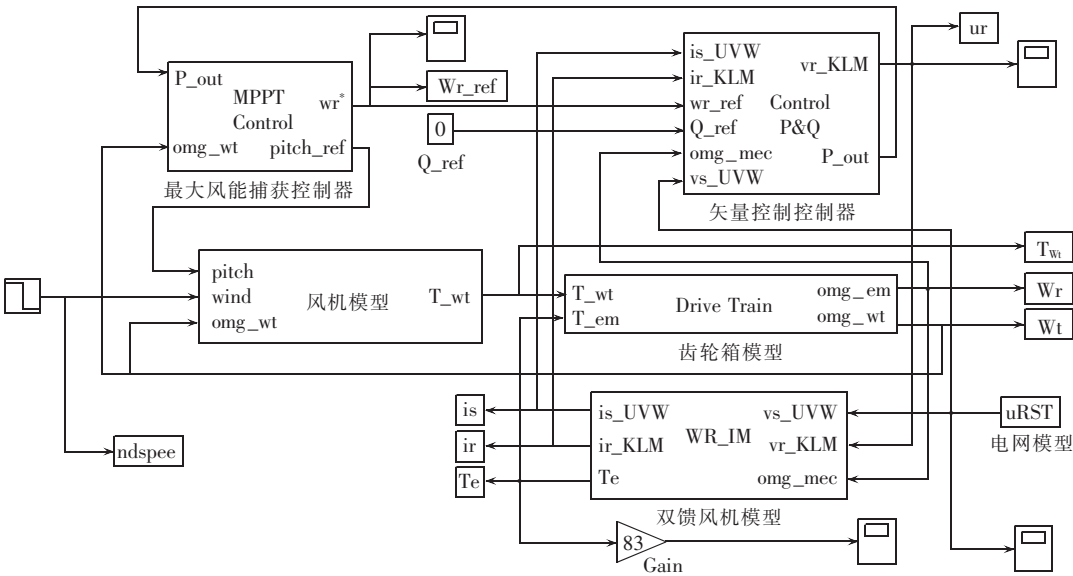


图 5 变速恒频大型风电系统仿真
Fig.5 Simulation of wind generator system

表 1 风电系统参数
Tab.1 Parameters of wind generator system

参数	值	参数	值
R	40 m	L_{ls}	9.55×10^{-5} H
ρ	1.25 kg/m^3	L_{lr}	9.55×10^{-5} H
v_{in}	3 m/s	L_m	0.095 5 H
v_{out}	25 m/s	p_n	2
J_{wt}	$9 \times 10^7 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	P_N	2 MW
J_{gen}	$90 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	u_{sN}	690 V
K_{gear}	83	f_{sN}	50 Hz
R_s	0.01 Ω	i_{rN}	1 700 A
R_r	0.01 Ω		

注: v_{in} 、 v_{out} 分别为风机的切入与切出风速; L_{ls} 、 L_{lr} 分别为定、转子漏电感; P_N 为发电机额定功率; u_{sN} 、 f_{sN} 分别为定子额定电压与频率; i_{rN} 为转子额定电流。

仿真条件为风速在等 50 s 时,从 9 m/s 突变为 8.5 m/s,输出有功功率追踪最大风能点,无功功率输出为零。

仿真结果如图 6~12 所示。

图 6 为风速变化曲线;图 7 为发电机给定转速 ω_r 与实际转速 ω_1 曲线,可见,风速变化时,控制器可以改变电机转速而实现最大风能的跟踪,而且实际转速可以很快跟踪给定。

相应的系统输出有功及定子侧输出有功如图 8

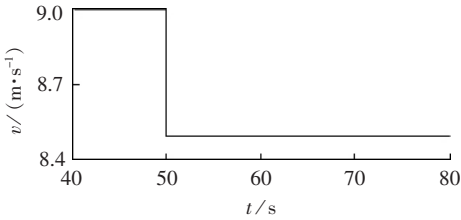


图 6 给定风速曲线
Fig.6 Speed curve of wind

所示, $t < 50$ s 时,定子稳态有功小于系统输出有功。由图 7 发电机转速曲线知,此时发电机转速高于同步转速,转子侧也向外发出有功;同理, $t > 50$ s 时,定子稳态有功大于系统输出有功,此时发电机转速低于同步转速,转子侧从电网吸收有功。

图 9 为定子给定无功 Q_r 与实际输出无功 Q 曲线,可见控制器可以使得系统输出无功为零,即实现定子侧输出电能的功率因数为 1;图 10 为发电机电磁转矩与风机机械转矩曲线, $T_{el} = K_{gear} T_e$ 为发电机传到风机侧的电磁转矩,可见稳态时转矩平衡;图 11 为转子侧 d 、 q 轴电压曲线,稳态时为常数;图 12 为转子侧三相输出电流曲线,可见在 $t = 53$ s 左右,电流发生了换向。由于转子侧电流频率对应发电机的滑差频率,由图 7 可知,此换向点对应发电机的同步转速点。当双馈电机转速从高于同步转速变为低于同步转速时,转子侧电流换向,仿真与理论分析完全一致。

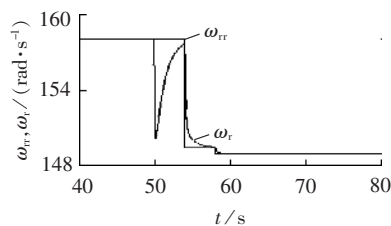


图 7 发电机转速曲线

Fig.7 Rotational speed curve of generator

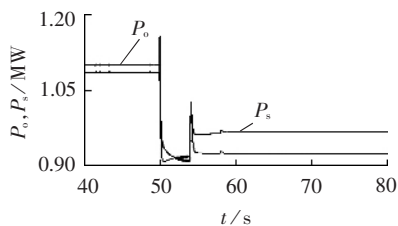


图 8 发电机输出有功功率曲线

Fig.8 Curve of active power output

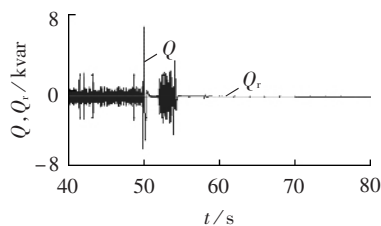


图 9 发电机定子无功功率曲线

Fig.9 Reactive power curve of stator

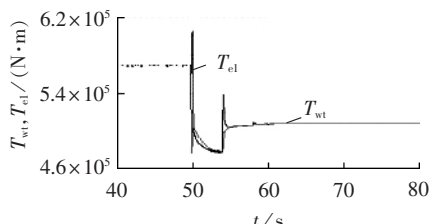


图 10 发电机输出转矩与风力机输出转矩曲线

Fig.10 Curves of generator torque output and turbine torque output

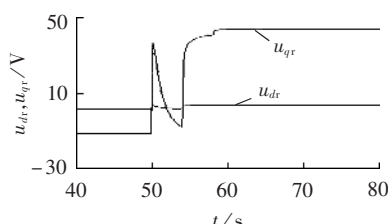


图 11 发电机转子 d、q 轴电压曲线

Fig.11 Voltage curves of generator rotor in d, q axis

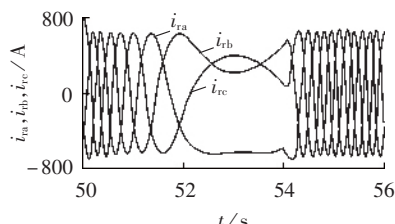


图 12 发电机转子励磁电流曲线

Fig.12 Magnetic current curves of generator rotor

3 结论

基于 Matlab/Simulink 建立了包括风机、传动齿轮、双馈发电机、控制器在内的大型变速恒频风电系统的整体动态数学模型。控制器由 2 部分组成,一为针对双馈发电机的矢量控制器,实现了发电机输出有功和无功功率的解耦控制;二为运用变步长搜索算法的最大风能追踪控制器,提高了低风速下风电系统的运行效率,且该控制器收敛速度快,无需风机系统的任何参数,鲁棒性能好。仿真结果验证了风电系统模型的正确性以及控制器的有效性。

参考文献:

- [1] 何祚麻,王亦楠. 风力发电——我国能源和电力可持续发展战略的最现实选择[J]. 上海电力,2005(1):8-18.
HE Zuo-xiu, WANG Yi-nan. Wind power is the most realistic choice of sustainable development strategy for energy and electric power in our country[J]. Shanghai Electric Power, 2005 (1):8-18.
- [2] 张新房,徐大平,吕跃刚,等. 大型变速风力发电机组的自适应模糊控制[J]. 系统仿真学报,2004,16(3):573-577.
ZHANG Xin-fang, XU Da-ping, LÜ Yue-gang, et al. Adaptive fuzzy control for large-scale variable speed wind turbines[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(3):573-577.
- [3] 陈雷,邢作霞,潘建,等. 大型风力发电机组技术发展趋势[J]. 可再生能源,2003(1):27-30.
CHEN Lei, XING Zuo-xia, PAN Jian, et al. An overview of large grid-connected wind generation system status[J]. Renewable Energy, 2003(1):27-30.
- [4] 王承熙,张源. 风力发电[M]. 北京:中国电力出版社,2002.
- [5] 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.
- [6] SLOOTWEG J G, KLING W L, POLINDER H. Dynamic modelling of a wind turbine with doubly fed induction generator[C]// Power Engineering Society Summer Meeting. [S.l.]:IEEE, 2001: 644-649.
- [7] 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, 1996, 143(3):231-241.

- [8] KOJABADI H M, CHANG L, BOUTOT T. Development of a novel wind turbine simulator for wind energy conversion systems using an inverter-controlled induction motor[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(3):547-552.
- [9] 高景德,王祥珩,李发海. 交流电机及其系统的分析[M]. 北京:清华大学出版社,1993.
- [10] TANG Yi-fan, XU Long-ya. A flexible active and reactive power control strategy for a variable speed constant frequency generating system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1995, 10(4):472-478.
- [11] RABELO B, HOFMANN W. Optimal active and reactive power control with the doubly-fed induction generator in the MW-class wind-turbines[C]//4th IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems. Bali, Indonesia:IEEE, 2001:53-58.
- [12] TANG Yi-fan, XU Long-ya. Stator field oriented control of doubly-excited induction machine in wind power generating system[C]//Proceedings of the 35th Midwest Symposium on Circuits and Systems. Washington, DC, USA: [s.n.], 1992: 1446-1449.
- [13] 刘其辉,贺益康,赵仁德. 变速恒频风力发电系统最大风能追踪控制[J]. 电力系统自动化,2003,27(20):62-67.
LIU Qi-hui, HE Yi-kang, ZHAO Ren-de. The maximal wind-energy tracking control of a variable-speed constant-frequency wind-power generation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(20):62-67.
- [14] 贾要勤,曹秉刚,杨仲庆. 风力发电的 MPPT 快速响应控制方法[J]. 太阳能学报,2004,25(2):171-176.
JIA Yao-qin, CAO Bing-gang, YANG Zhong-qing. A fast response MPPT control method for wind generation[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2004, 25(2):171-176.

(责任编辑:康鲁豫)

作者简介:



孙国霞

孙国霞(1978-),女,俄罗斯族,新疆塔城人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统控制技术(E-mail: sunguoxia0424@sohu.com);

李啸骢(1959-),男,云南昆明人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为控制系统计算机辅助设计、电力系统控制与分析、农业工程自动化等。

Modeling and simulation of variable-speed wind generator system with large capacity

SUN Guo-xia, LI Xiao-cong, CAI Yi-ming

(College of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: A whole dynamic model of a MW-class variable-speed wind generator system is presented with Matlab/Simulink, including wind turbine, drive train and doubly-fed generator. The traditional MPPT(Maximal Power Point Tracking) algorithms are usually based on the knowledge of the maximal power curve and partial parameters of the wind turbine. The efficiency of wind generator system reduces deeply when the above curve or parameters are unknown or changing. A “variable-step searching controller of MPPT” is designed based on the model. The controller uses vector control strategy to realize the decoupled control of active and reactive power outputs and adjusts the system input with a variable step according to the variation of active power output when rotational speed perturbation takes place. Simulation results show that, the model is correct and the controller is valid.

Key words: wind generator system; doubly-fed generator; vector control; maximal power point tracking