

风力发电机对配电网影响的比较分析

冯希科¹, 邵能灵¹, 宋凯²

(1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240; 2. 上海市电力公司, 上海 200240)

摘要: 以同步和异步风力发电机为研究对象, 分析其在恒速恒频和变速恒频发电方式下, 并入配电网后对电网相关参数的影响。通过对风力发电机的研究, 建立了风速、风力涡轮机和传动机构的数学模型^[1,2], 并用 Matlab/Simulink 搭建风力发电机模型和电网模型。在输入风速发生变化过程中, 仿真并观测发电机的输入机械转矩、转速、机端电压和电流, 以及发电机输出有功和无功的变化情况。对不同发电方式下的结果作了简单分析, 为进一步研究并网和控制技术提供依据。

关键词: 双馈异步发电机; 风力涡轮机; 风力发电机; 并网; 仿真

Comparative analysis on the impact of the wind generator connected to the distribution network

FENG Xi-ke¹, TAI Neng-ling¹, SONG Kai²

(1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. Shanghai Electric Power Co.,Ltd, Shanghai 200240, China)

Abstract: This paper studies synchronous and asynchronous generator under Constant Speed Constant Frequency(CSCF) and Variable Speed Constant Frequency(VSCF) generation technologies and analyzes the impact of relevant parameters on the power grid when it is connected to the distribution network. Through the research on the wind generator, the model of wind speed, wind turbine and drive gear is established^[1,2] and then wind generator model and power grid model are built based on MATLAB/Simulink. When the wind is in the process of changes, this paper simulates and observes the changes of the generator's input mechanical torque, rotor speed, stator voltage and current, output active power and reactive power. The results of different generation technologies are analyzed which provides the basis for the further study of parallel-in and control technology.

This work is supported by Program for New Century Excellent Talents in University(No.07SG11) and the "Dawn" Program of Shanghai Education Commission.

Key words: double-fed asynchronous generator; wind turbine; wind generator; parallel in; simulation

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)21-0025-06

0 引言

目前世界各国都在加大力度开发风能、太阳能、核能、潮汐能、生物能等新能源。由于风能资源丰富、不污染环境、投资少、风电场运行简单等优点, 使得近年世界风电的发展非常迅速。我国也计划到 2020 年将我国的风电装机容量提高到 2 000 万千瓦, 占到我国发电总装机容量的 2%。由于风力的随机性和间歇性, 使得风力发电的有功输出亦具有随机性。这样就对电网的参数产生一定影响。尤其是近年来, 风电场规模不断增大, 风力发电机的单机容量不断增加,

已经达到兆瓦级。因此, 风电场的并网发电对电网产生的影响就不容忽视。

目前主要的风力发电方式分为恒速恒频和变速恒频两种。恒速恒频风机主要采用异步发电机发电, 在风速发生变化时, 通过控制回路保持发电机转速恒定, 使风机输出频率恒定的电流。这种风力发电方式在风速发生变化时, 风能利用效率较低。而采用同步发电机和双馈异步发电机的变速恒频风力发电方式, 能够根据风速变化, 改变发电机转速, 提高风能利用效率。同步发电机的变频装置需要串入电网, 变频器容量要和发电机容量相同, 成本较高。双馈异步发电机的变频装置通过控制异步发电机的转子回路并入电网, 变频器所需容量较小, 造价相

基金项目: 上海市曙光计划资助项目 (07SG11); 新世纪优秀人才支持计划资助

对较低。因此，近年来采用双馈异步发电机的变速恒频发电方式得到迅速发展^[3]。本文主要研究不同发电方式对电网参数的影响，为进一步研究其并网和控制提供依据。并用 Matlab/Simulink 搭建风机及电网模型，仿真并分析了两种风力发电方式下，风机并入电网后对电网相关参数的影响^[4-7]。

1 风力发电机的数学建模

风力发电机的数学模型主要包括风速模型、风力涡轮机模型、传动机构模型以及同步和异步发电机模型^[8]。同步和异步发电机使用 Matlab/ Simulink 中的模块，这里不再建立其数学模型。

1.1 风速模型

风能具有随机性和间歇性的特点，为了较精确的描述风能，本文采用国内外使用较多的风力四分量模型，分别为基本风 V_1 、阵风 V_2 、渐变风 V_3 和随机风 V_4 。

(1) 基本风 V_1 ：在风轮机正常运行过程中一直存在，基本上反映了风电场平均风速的变化。它可以由风电场测风数据所得的威布尔分布参数近似确定。

$$V_1 = A \cdot \Gamma(1+1/K) \quad (1)$$

式中： V_1 为基本风速(m/s)， A 、 K 分别为威布尔分布的尺度参数和形状参数； $\Gamma(\bullet)$ 为伽马函数。

基本风速用 Simulink 中的常量模型模拟如图 1。

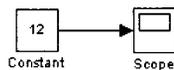


图 1 基本风的模型图
Fig.1 Model of mean wind

(2) 阵风 V_2 ：描述风速的突然变化特性。

$$V_2 = \begin{cases} 0 & (t < T_{1G}) \\ V_s & (T_{1G} \leq t \leq T_{1G} + T_G) \\ 0 & (t > T_{1G} + T_G) \end{cases} \quad (2)$$

其中：

$$V_s = (\max G / 2) \{1 - \cos 2\pi[(t/T_G) - (T_{1G}/T_G)]\}.$$

式中： V_2 ， T_{1G} ， T_G ， $\max G$ 分别为阵风风速(m/s)，启动时间(s)，周期(s)和最大值(m/s)。

取参数 $T_{1G}=1$ ， $T_G=1$ ， $\max G=5$ ，阵风可以

用如图 2 中的 Simulink 模块搭建：

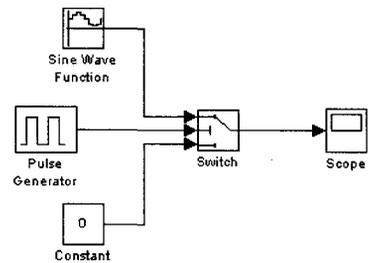


图 2 阵风的模型图

Fig.2 Model of gust wind

(3) 渐变风 V_3 ：描述风速的渐变特性。

$$V_3 = \begin{cases} 0 & (t < T_{1R}) \\ V_\gamma & (T_{1R} \leq t \leq T_{2R}) \\ \max R & (T_{2R} \leq t \leq T_{2R} + T_R) \\ 0 & (t > T_{2R} + T_R) \end{cases} \quad (3)$$

其中：

$$V_\gamma = \max R [1 - (t - T_{2R}) / (T_{1R} - T_{2R})].$$

式中： V_3 ， $\max R$ ， T_{1R} ， T_{2R} ， T_R 分别为渐变风速(m/s)，最大值(m/s)，起始时间(s)，终止时间(s)和保持时间(s)。

取参数 $\max R=5$ ， $T_{1R}=1$ ， $T_{2R}=2$ ， $T_R=2$ ，渐变风可以用 Simulink 搭建模型如图 3。

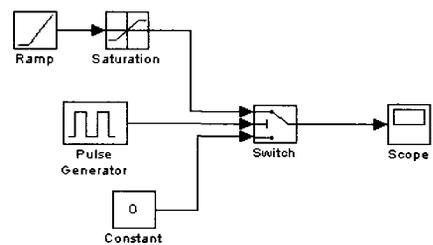


图 3 渐变风的模型图

Fig.3 Model of ramp wind

(4) 随机风 V_4 ：用来描述制定相对高度上风速变化的随机特性，用随机噪声风速成分来表示。

$$V_4 = 2 \sum_{i=1}^N [S_v(\omega_i) \Delta \omega]^{1/2} \cos(\omega_i t + \varphi_i) \quad (4)$$

$$\text{其中：} \begin{cases} \omega_i = (i - \frac{1}{2}) \cdot \Delta \omega \\ S_v(\omega_i) = \frac{2K_N F^2 |\omega_i|}{\pi^2 [1 + (F\omega_i / \mu\pi)^2]^{3/4}} \end{cases}$$

式中: φ_i 为 $0 \sim 2\pi$ 之间均匀分布的随机变量; ω_i 为第 i 个分量的角频率; $\Delta\omega$ 为随机变量的离散间距; K_N 为地表粗糙系数; F 为扰动范围(m^2); μ 为相对高度的平均风速(m/s); $S_v(\omega_i)$ 为第 i 个随机变量的振幅。

综合以上四种风速成分, 模拟实际作用在风轮机上的风速 V 为

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 \quad (5)$$

1.2 风力涡轮机数学模型

风力涡轮机实现风能向机械能的转换, 是实现风能发电的重要设备。风轮机主要由叶片、传动轴、齿轮变速箱、发电机、尾翼和塔架等构成。定桨距风轮机一般连接有三个叶片, 叶片的形状与曲线按空气动力学原理设计, 使得风轮机能够实现风能与其机械能之间的最大转换。

风轮机的吸收功率 P_w 是风速的函数, 可以表示为:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho C_p A V_w^3 \quad (6)$$

式中: V_w 为风速 (m/s); $C_p = f(\lambda, \beta)$ 为风能利用系数, $\lambda = \frac{\Omega R}{V_w}$ 为风轮机叶尖速比, β 为叶桨距角; ρ 为空气密度 (kg/m^3); $A = \pi R^2$ 为叶片扫掠面积。

由风力驱动而产生的叶片转矩可以表示为:

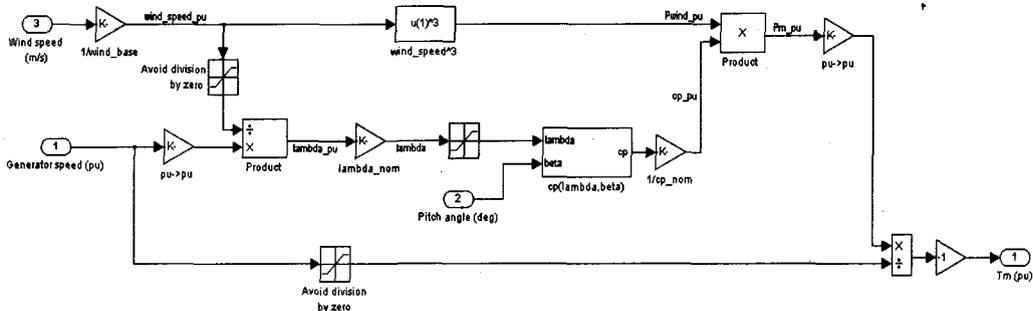


图 4 风力涡轮机的模型图

Fig.4 Model of wind turbine

传动机构的 Simulink 模型图搭建如图 5。

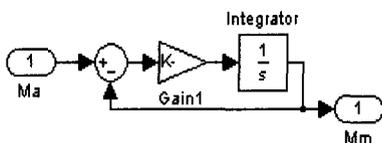


图 5 传动机构的模型图

Fig.5 Model of drive gear

$$M_a = \frac{1}{2} \pi \rho C_p R^3 \frac{V_w^2 \Omega_N}{\lambda P_N} \times 10^{-3} = \frac{P_w}{\Omega} \times \frac{\Omega_N}{P_N} \quad (7)$$

式中: M_a 为风轮机叶片转矩 (p.u.); R 为叶片半径(m); Ω_N 为风轮机额定机械角速度(rad/s); P_N 为风轮机额定功率(kW); P_N/Ω_N 为风力机额定机械转矩 ($N \cdot M$)。

根据贝兹极限理论, 风能利用系数最大不超过 0.593。又由于 λ 直接影响叶片的能量捕获, 只有在 λ 为某一值时, 风能利用系数 C_p 才能达到最大。对于恒速风轮机, 由于叶片转速不变, 使得在风速发生变化时, λ 不会保持在最佳值, 风能与机械能之间的转化效率较低。而变速风轮机可以通过控制机构, 根据变化的风速改变叶片转速, 从而改变 λ 值, 提高风能的利用效率。

用 Simulink 搭建风力涡轮机模型如图 4 所示。

1.3 传动机构模型

风轮机和发电机之间有传动机构连接, 传动机构一般由轮毂、传动轴和齿轮箱组成。在建模中, 一般用一阶惯性环节表示其特性。传动机构的运动方程可以表示为式 (8)。

$$\frac{dM_m}{dt} = \frac{1}{T_k} (M_a - M_m) \quad (8)$$

式中: M_a 为传动机构输入转矩, 也即风轮机输出转矩; M_m 为传动机构输出转矩; T_k 为轮毂时间常数(s)。

2 并网风力发电机模型

2.1 基于 Simulink 的风力发电机并网模型

通过 Matlab/Simulink 搭建风电机模型和电网模型并仿真, 其中恒速恒频发电方式采用鼠笼式异步发电机, 变速恒频发电方式采用永磁同步发电机和双馈异步发电机。三种不同的风力发电形式具体

模型搭建如图 6 所示。

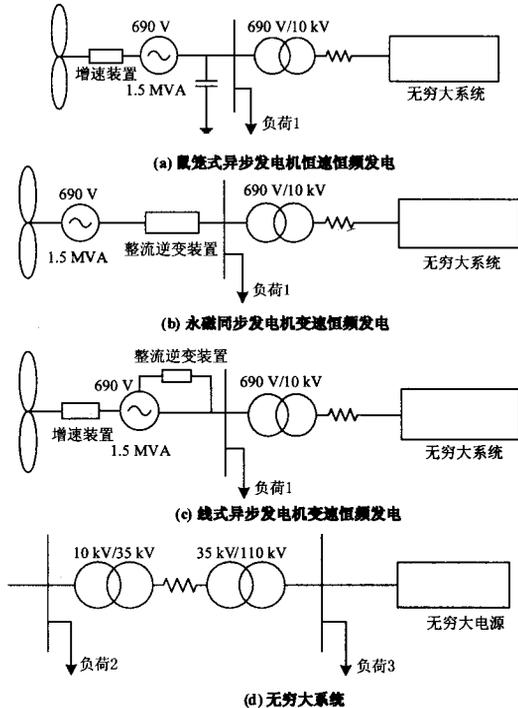


图 6 风力发电机与无穷大系统连接示意图

Fig.6 Wind generator connected with infinite-bus system

表 1 显示了本文所要仿真的三种风力发电形式的特性。其中，鼠笼式异步发电机采用恒速恒频发电方式，发电机发出额定线电压为 690 V，频率为 50 Hz 的电。由于异步机在发出有功同时吸收无功，所以需要无功补偿装置进行无功补偿^[15,16]。而永磁同步发电机和绕线式异步发电机，也即双馈异步发电机采用变速恒频发电方式。同步发电机转速随风速变化而变化，经整流逆变装置，永磁同步发电机将发出的电流先经过整流，再逆变为工频电流。而双馈异步发电机的变频装置通过控制异步发电机的转子回路，使发电机发出的定子电流变为 50 Hz 的电流进行并网。

2.2. 风电机与系统的相关参数

(1) 由于仿真结果得出结论的相似性，本文采

表 1 三种风力发电形式的特性比较

Tab.1 Characteristics comparison of three types of wind generation

发电机类型	增速装置	无功补偿装置	整流逆变装置	发电机转速
鼠笼式异步发电机	有	有	无	恒定
永磁同步发电机	无	无	与定子串联	变化
绕线式异步发电机	有	无	与转子串联	变化

用风速模型为基本风与阵风的叠加进行仿真。风速输入设为初始基本风速 8 m/s，从 1 s 开始输入阵风，阵风幅值为 4 m/s，持续 1 s 时间；发电机端并联电容器以补偿无功，补偿无功功率为 450 kvar。

(2) 风力涡轮机参数，取额定风速为 12 m/s，额定机械输出容量为 1.5 MW。

(3) 取鼠笼式异步发电机容量为 1.5 MVA，线电压为 690 V，额定频率为 50 Hz。取永磁同步发电机定子电阻为 2.875 Ω，电磁感应系数 0.175 Wb。取绕线式异步发电机的额定功率为 1.5 MVA，发电机出口电压有效值为 690 V，额定频率为 50 Hz。为了减小发电机并网时对电网的冲击，在 0.5 s 时转速稳定后再并网。

(4) 无穷大系统取为 110 kV 电源经输电线路和变压器降压为 35 kV 和 10 kV 后，经过 10 kV 母线与风力发电机相连接。

3 并网风力发电机的仿真与分析

由已搭建好的风力发电机并网模型，调整参数设置，仿真结果如图 7。

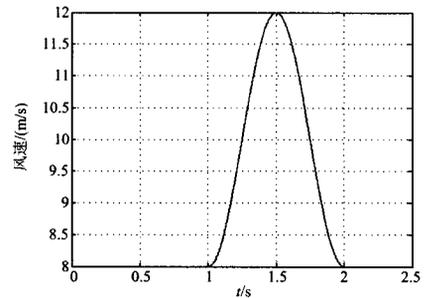


图 7 风速曲线图

Fig.7 Wind speed curve

图 7 为仿真的风速曲线图，0~1 s 为恒定风速，1~2 s 为在恒定风速基础上加上阵风，仿真风力发电机在风速发生变化时电压、电流、有功和无功功率的变化情况。

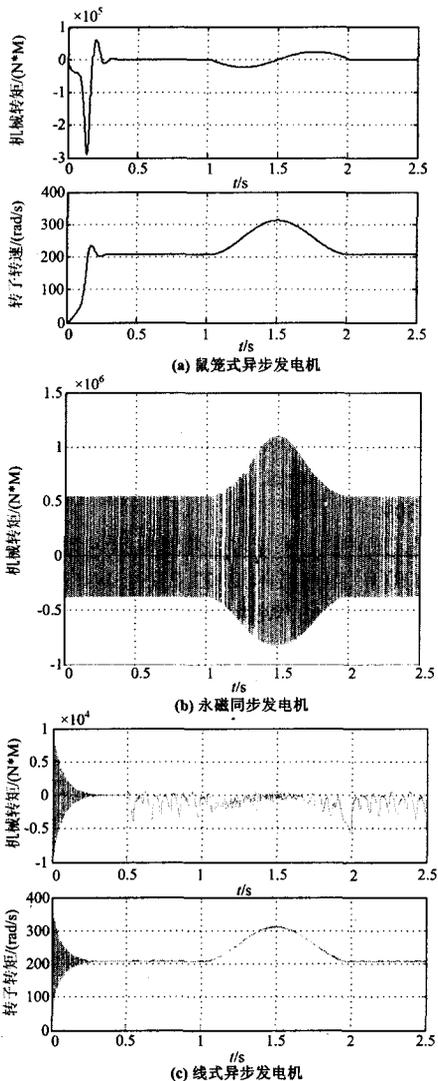


图8 发电机输入机械转矩和转子转速变化曲线图

Fig.8 Input mechanical torque and rotor speed curve of the generator

从图8的鼠笼式异步发电机的输入机械转矩可以看出,在基本风输入,风力机处于启动阶段时,由于其输出机械转矩与风速的二次方成正比,其输出机械转矩迅速变为一个绝对值较大的负值,风机启动以后,发电机转子处于转动状态,由于惯性作用,此时发电机的输入机械转矩稳定为一个很小的负值。1s时在基本风速基础上加上了阵风,即周期为2s的正弦函数,由于风力机输出机械转矩与风速的二次方成正比,此时风力机的输出机械转矩变为周期为1s的正弦函数。双馈异步发电机的转子转速追踪风速变化,因此发电机的输入机械转矩,也即驱动发电机转动的机械转矩,在一个范围内小幅度的震荡,不断地改变着发电机转子的转速。

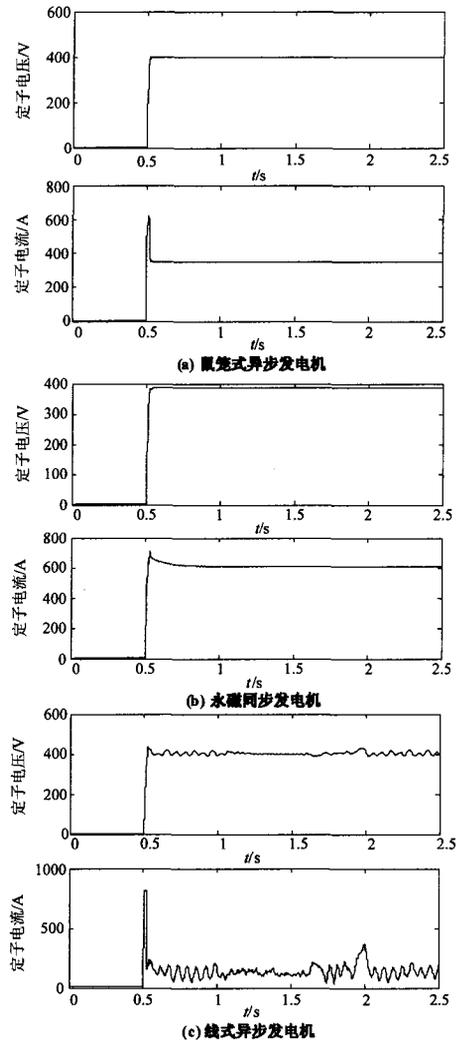


图9 发电机定子电压和电流变化曲线图

Fig.9 Stator's voltage and current curve of the generator

由图9可以看出,将风力发电机并入无穷大电网后,由于风力发电机出口额定电压为690V,即额定相电压约为398V,所测量的发电机定子电压能很快上升至出口处额定电压,并且处于稳定状态。在出现阵风时,绕线式异步发电机的转速跟随风速变化,提高了风能利用系数,此时发电机吸收的能量处于不断变化过程中,双馈异步发电机的电压和电流也处于波动状态。双馈异步发电机所并电网为无穷大电网,端电压变化范围较小,其输出电流由于输出功率不断变化而有一定波动。

在图10中的双馈异步发电机的并网稳定时间较恒速恒频发电方式的时间长。出现阵风时,在双馈异步发电机的控制环节作用下,发电机吸收能量跟随风速能量变化,其输出能量处于不断的调节中,因此其功率输出图形呈锯齿状,波动幅度较大。

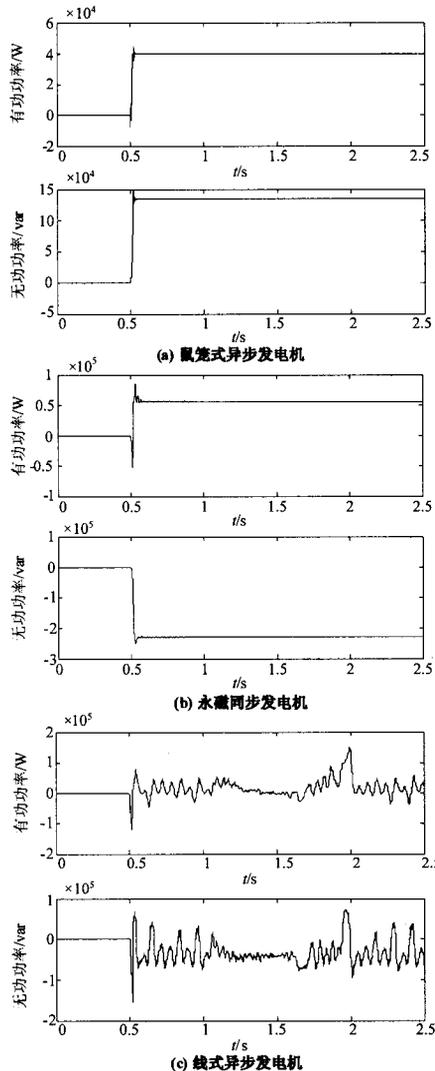


图 10 发电机输出有功和无功曲线图

Fig.10 The output active and reactive power curve of the generator

通过以上对恒速恒频和变速恒频发电方式的仿真可以看出，恒速恒频发电方式较稳定，在并网瞬间电压、有功和无功功率波动较小；且当风速在一定范围内发生变化时，风力发电机的发出功率变化很小。永磁同步发电机的变速恒频发电方式，在并网时和风速发生变化时，发出功率变化也很小。绕线式异步发电机的变速恒频发电方式，也即双馈异步发电机，在并网时对发电机发出的电流、有功和无功有很大的扰动；在恒定风速基础上出现阵风时，由于提高风能利用系数，发电机发出的有功和无功也跟随风能变化而变化。

4 结论

近些年，由于变频装置技术的改进和成本的下

降，双馈异步发电机成为风力发电机的主要发展方向，双馈异步发电机的变速恒频发电方式，能在风速低于额定风速时，保持最佳叶尖速比，提高风能利用系数，发电机发出的功率能够跟随风的能量变化而变化，提高了风能利用效率。但是需要研究更加理想的控制策略使发电机输出的电压和频率稳定，才能使变速恒频的发电方式并网质量最佳。

参考文献

- [1] 张云竹, 熊光煜. 级联式无刷双馈电机的建模与仿真[J]. 电力学报, 2006, 21(3): 307-309.
ZHANG Yun-zhu, XIONG Guang-yu. Modeling and Simulation of the Cascade Brushless Doubly-fed Machine[J]. Journal of Electric Power, 2006, 21(3): 307-309.
- [2] 李晶, 王伟胜, 宋家骅. 变速恒频风力发电机组建模与仿真[J]. 电网技术, 2003, 27(9): 14-17.
LI Jing, WANG Wei-sheng, SONG Jia-hua. Modeling and Dynamic Simulation of Variable Speed Wind Turbine[J]. Power System Technology, 2003, 27(9): 14-17.
- [3] 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, 25(12): 27-32.
LEI Ya-zhou, Gordon Lightbody. An Introduction on Wind Power Grid Code and Dynamic Simulation[J]. Power System Technology, 2005, 25(12): 27-32.
- [4] Sebastian R, Quesada J. Distributed Control System for Frequency Control in a Isolated Wind System[J]. Renewable Energy, 2006, 31: 285-305.
- [5] Joselin Herbert G M, Iniyana S, Sreevalsan E, et al. A Review of Wind Energy Technologies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2007, 11: 1117-1145.
- [6] Haslam S J, Crossley P A, Jenkins N. Design and Field Testing of a Source Based Protection Relay for Wind Farms[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14(3): 818-823.
- [7] 尹明, 李庚银, 周明, 等. 双馈感应风力发电机组动态模型的分析与比较[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(13): 22-27.
YIN Ming, LI Geng-yin, ZHOU Ming, et al. Analysis and Comparison of Dynamic Models for the Doubly Fed Induction Generator Wind Turbine[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(13): 22-27.
- [8] 蔺红, 晁勤. 并网型风力发电机的建模与仿真[J]. 可再生能源, 2006, 4: 63-65.
LIN Hong, CHAO Qin. Model Building and Simulation for Grid-connected Wind-turbine Generator[J]. Renewable Energy, 2006, 4: 63-65.

(下转第 94 页 continued on page 94)

- 出版社, 2005.532-559, 561-612.
- [5] 求是科技. CPLD/FPGA 应用开发技术与工程实践[M]. 北京:人民邮电出版社, 2005.23-36, 359-372.
- [6] 王阳光, 游大海, 徐天奇. 微机继电保护中频率测量的 CPLD 实现[J]. 继电器, 2005, 33(20):19-22.
WANG Yang-guang, YOU Da-hai, XU Tian-qi. CPLD Realization of Frequency Measure in Digital Relay Protection Equipment[J]. Relay, 2005, 33(20):19-22.
- [7] 王文静, 何顶新. DSP与SED1335的接口设计及控制实现. 微机发展[J], 2005, 15(2):126-129.
WANG Wen-jing, HE Ding-xin. DSP-SED1335 Interface Design and Control Implementation[J]. Microcomputer Development, 2005, 15(2):126-129.
- [8] 彭启琮, 管庆, 等. DSP 集成开发环境—CCS 及 DSP/BIOS 的原理与应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2004.250-382.
- [9] 王建勋, 杨梅, 纪延超. 一种递推式单次谐波快速傅立叶算法[J]. 继电器, 2003, 31(5):14-15.
WANG Jian-xi, YANG Mei, JI Yan-chao. A Recursive Fast Fourier Transform of Single Harmonic Component[J]. 2003, 31(5):14-15.
- [10] 黄恺, 孙苓生. 继电保护傅氏算法中滤除直流分量的一种简便算法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(4):50-51.
HUANG Kai, SUN Ling-sheng. A Compact Algorithm for Filtering Decaying DC Component in Relay Protection Fourier Algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(4):50-51.
- [11] 崔伟成, 王民钢, 杨尧. TMS320F240DSP 片内 Flash 串行加载及校验技术[J]. 电子测量技术, 2007, 3(3):71-73.
CUI Wei-cheng, WANG Min-gang, YANG Yao. Serial Loading and Verification Technology of TMS320F240DSP on-chip Flash Based on SCI[J]. Electronic Measurement Technology, 2007, 3(3):71-73.
- [12] 罗欣, 刘震. TMS320F28xDSP 片内 Flash 的在线编程技术[J]. 仪表技术与传感器, 2005, 7:40-43.
LUO Xin, LIU Zhen. In-application Programming Technology of On-chip Flash in TMS320F28xDSP[J]. Instrument Technique and Sensor, 2005, 7:40-43.

收稿日期: 2008-11-11; 修回日期: 2008-12-12

作者简介:

陈铸华(1976-), 男, 硕士研究生, 讲师, 研究方向为电力系统微机继电保护、变电站综合自动化与配电自动化; E-mail: chenzhuhua66666@163.com

彭红海(1972-), 男, 博士研究生, 讲师, 研究方向为电力系统微机继电保护、变电站综合自动化与配电自动化;

李 晓(1975-), 女, 汉, 硕士研究生, 讲师, 研究方向为电力系统微机保护、电能质量分析与控制技术。

(上接第 30 页 continued from page 30)

- [9] Song Y D, Dhinakaran B, Bao X Y. Variable Speed Control of Wind Turbines Using Nonlinear and Adaptive Algorithms[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2000, 85: 293-308.
- [10] Sandra Eriksson, Andreas Solum, Mats Leijon, et al. Simulations and Experiments on a 12 kW Direct Driven PM Synchronous Generator for Wind Power[J]. Renewable Energy, 2008, 33: 674-681.
- [11] 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.
LIU Qi-hui, HE Yi-kang, ZHANG Jian-hua. Operation Control and Modeling-simulation of AC-excited Variable-speed Constant-frequency(AEVSCF) Wind Power Generator[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2006, 26(5): 43-50.
- [12] 叶杭冶. 风力发电系统控制技术[M]. 北京:机械工业出版社, 1998.
- [13] Xiang Da-wei, Ran Li, Bumby J R, et al. Coordinated Control of an HVDC Link and Doubly Fed Induction Generators in a Large Offshore Wind Farm[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(1): 463-471.
- [14] Santoso Surya, Le Ha Thu. Fundamental Time-domain Wind Turbine Models for Wind Power Studies[J]. Renewable Energy, 2007, 32: 2436-2452.
- [15] 伍小杰, 王晶鑫, 乔树通. 异步风力发电机软并网过渡过程研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(4): 80-83.
WU Xiao-jie, WANG Jing-xin, QIAO Shu-tong. Study on Transition Process of Soft Cut-in of Wind Turbines System[J]. Proceedings of Electric Power System and Automation, 2007, 19(4): 80-83.
- [16] Baroudi J A, Dinavahi V, Knight A M. A Review of Power Converter Topologies for Wind Generators[J]. Renewable Energy, 2007, 32: 2369-2385.
- [17] 范高锋, 王纯琦, 乔元, 等. SVC补偿型定速风电机组模型及其特性分析[J]. 电网技术, 2007, 31(22): 64-68.
FAN Gao-feng, WANG Chun-qi, QIAO Yuan, et al. Model of Fixed Speed Wind Turbine with SVC and Its Characteristic Analysis[J]. Power System Technology, 2007, 31(22): 64-68.

收稿日期: 2008-11-18; 修回日期: 2009-02-23

作者简介:

冯希科(1984-), 男, 硕士研究生, 研究方向为风力发电技术, 配电系统继电保护; E-mail: esport06@163.com

邵能灵(1972-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护, 电力系统安全控制。