

文章编号: 0254-0096(2010)03-0373-07

考虑磁路饱和及集肤效应的 异步风力发电机组暂态性能分析

李 辉¹, 赵 斌^{1,2}, 韩 力¹, Chen Z³

(1. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044;

2. 四川电力职业技术学院, 成都 610072; 3. 丹麦奥尔堡大学能源技术学院, 奥尔堡 DK9220)

摘 要: 为准确分析异步发电机不同详细模型对大型风电机组暂态性能的影响, 该文结合 2 个质量块的风力机传动链等效模型, 分别建立了笼型异步发电机考虑主磁路、定转子漏磁路饱和以及集肤效应影响的风电机组数学模型。针对大型风电机组在机械大扰动和电网电压骤降情况下, 利用 Matlab/Simulink 平台对机组在不同数学模型描述时的暂态过程进行了仿真比较。结果表明, 尤其在电网电压骤降时, 电机磁路饱和对机组暂态运行性能的影响较为显著。

关键词: 风力发电; 磁路饱和; 集肤效应; 异步发电机; 暂态

中图分类号: TM614; TM711 **文献标识码:** A

0 引 言

因电网故障而引起的风电场脱网, 将对电力系统带来严重影响。因此, 准确分析大容量风电场及其机组的动暂态过程显得尤为重要^[1-3]。此外, 现有风电机组大都安装保护装置, 而故障电流是其保护动作设定值的重要参量, 因此研究大型风电机组准确数学模型对分析机组定子电流暂态过程及其电磁暂态对风电机组传动链扭矩的变化等也显得非常必要。

大型异步风力发电机组在运行工作中, 由于负载变化以及电网故障, 往往会使笼型异步发电机磁路饱和程度发生变化, 从而引起电机参数的变化, 进而影响发电机组的暂态运行性能。此外, 当电网出现故障时, 电机转子速度的变化可能导致转子电流频率的改变, 由于异步电机的笼型转子结构可能带来的集肤效应也必将导致转子参数的变化。文献^[4~7]报道了考虑电机磁路饱和或集肤效应对大型异步电机运行性能的影响, 但主要针对异步电动机起动或负载变化过程, 并且大都考虑主磁路饱和的影响。然而, 由于异步电机作发电机运行时, 在电网发生故障条件下所引起的定、转子冲击电流, 往往使

得电机饱和程度要高于电动机运行方式, 在这样的情况下, 定、转子漏磁路的饱和程度将会带来重要影响。文献^[8~13]对风力发电机组暂态稳定性和电磁暂态过程分析进行了报道, 但多集中于风力机传动链的等效建模方面^[8,10,12~14], 对异步发电机的建模大都过于简单, 很少有考虑主、漏磁路饱和以及集肤效应等因素对机组暂态行为的分析研究。

为了较准确地分析异步发电机不同详细模型对大型风电机组暂态性能的影响, 本文在 2 个质量块的风力机传动链等效模型的基础上, 首先分别建立了笼型异步发电机考虑主磁路、定转子漏磁路饱和以及集肤效应影响的数学模型。其次, 以额定功率 2MW 的大型异步风力发电机组为例, 利用 Matlab/Simulink 平台对机组在机械大扰动和电网电压骤降情况下分别对不同数学模型描述时的暂态过程进行了仿真比较研究。最后, 结合仿真结果对磁路饱和以及集肤效应对机组暂态性能的影响进行了分析。

1 风力机传动链等效模型

典型风力发电系统的机械传动链由风力机叶片、轮毂、低速传动轴、齿轮箱、高速传动轴和发电机等构成^[12,14], 其示意图如图 1 所示。图中 K_{hg} 、 D_{hg} 分

收稿日期: 2008-08-04

基金项目: 国家自然科学基金(50607022)

通讯作者: 李 辉(1973—), 男, 博士、教授、博士生导师, 主要从事风力发电技术、电机及其系统分析方面的研究。cqwh@163.com

别代表低速传动轴系的柔性和阻尼。

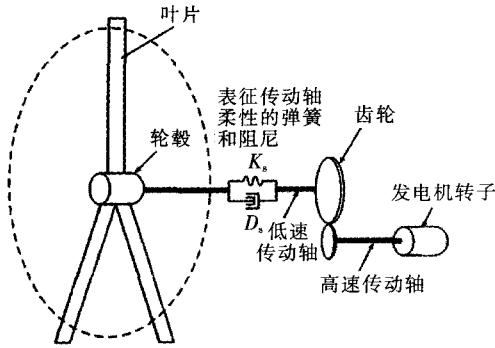


图 1 典型风电系统传动链示意图

Fig.1 Schematic diagram of the drive train of a typical wind energy conversion system

根据研究问题的性质和目的不同,风力机轴系建模的研究方法很多。通常在不需要进行应力分布分析和机械强度设计的情况下,往往可采用等效集中质量法^[8,10,12]。为了考虑风力机传动轴系柔性的影响,本文将风力机和发电机转子分别等效为 1 个质量块,建立 2 个质量块的风力机轴系模型,如图 2 所示。

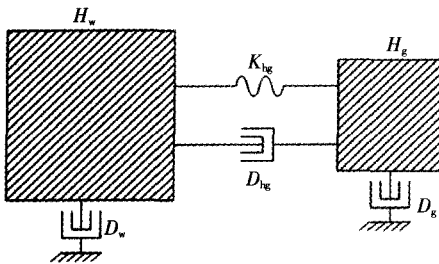


图 2 风力机等效两个质量块模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of a two-mass equivalent model of a wind turbine

其运动方程的数学模型为:

$$\begin{cases} 2H_w \frac{d\omega_w}{dt} = T_w - K_s \theta_s - D_s (\omega_w - \omega_g) - D_w \omega_w \\ 2H_g \frac{d\omega_g}{dt} = K_s \theta_s - T_e + D_s (\omega_w - \omega_g) - D_g \omega_g \\ \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_0 (\omega_w - \omega_g) \end{cases} \quad (1)$$

式中: H_w 、 H_g ——风力机和发电机转子(含齿轮箱)的惯性时间常数; ω_w 、 ω_g ——风力机和发电机电角速度; ω_0 ——系统电角速度基值, $\omega_0 = 2\pi f$; θ_s ——风力机相对于发电机转子的角位移; D_s ——风力机和发电机之间的阻尼系数; D_w 、 D_g ——分别

为风力机和发电机转子自身的阻尼系数; K_s ——传动轴系的刚度系数; T_w 、 T_e ——分别是风力机的机械转矩和发电机的电磁转矩,前者可由风力机的功率特性得到:

$$T_w = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 C_p / \omega_w \quad (2)$$

式中, ρ ——空气密度; R ——风力机叶片半径; v ——风速; C_p ——风能利用系数。

2 考虑不同情况下电机数学模型

为了分析和比较考虑电机磁路饱和及集肤效应对风力发电机组暂态性能的影响,本节分别建立了不考虑电机磁路饱和、考虑主磁路饱和、定转子漏磁路饱和以及集肤效应影响的异步发电机的数学模型。

2.1 不考虑磁路饱和时的电机数学模型

假设笼型异步发电机连接无穷大系统,其电压电流正方向按发电机惯例,定子电压相量与 d 轴重合,即 $u_{sq} = 0$ 。则笼型异步发电机在 d-q 同步坐标系下的暂态电压电流方程标幺值形式为(q 轴超前 d 轴)^[9,11]:

$$\begin{cases} u_{sd} = -R_s i_{sd} - \omega_s \psi_{sq} + \frac{1}{\omega_0} p \psi_{sd} \\ 0 = -R_s i_{sq} + \omega_s \psi_{sd} + \frac{1}{\omega_0} p \psi_{sq} \\ 0 = -R_r i_{rd} - s \omega_s \psi_{rq} + \frac{1}{\omega_0} p \psi_{rd} \\ 0 = -R_r i_{rq} + s \omega_s \psi_{rd} + \frac{1}{\omega_0} p \psi_{rq} \end{cases} \quad (3)$$

式中磁链方程为:

$$\begin{cases} \psi_{sd} = -L_{ss} i_{sd} - L_m i_{rd} \\ \psi_{sq} = -L_{ss} i_{sq} - L_m i_{rq} \\ \psi_{rd} = -L_m i_{sd} - L_{rr} i_{rd} \\ \psi_{rq} = -L_m i_{sq} - L_{rr} i_{rq} \end{cases} \quad (4)$$

式中, R_s 、 R_r ——定、转子电阻; s ——转差率; ω_s ——定子电角频率(标幺值为 1); ω_0 ——系统电角频率基值, $\omega_0 = 2\pi f$; L_{ss} 、 L_{rr} ——分别为定、转子全自感; L_m ——定、转子互感; p ——微分算子, $p = d/dt$ 。

由磁链方程进一步可得定、转子电流为:

$$\begin{cases} i_{sd} = \frac{1}{\Delta} (-L_{rr}\psi_{sd} + L_m\psi_{rd}) \\ i_{sq} = \frac{1}{\Delta} (-L_{rr}\psi_{sq} + L_m\psi_{rq}) \\ i_{rd} = \frac{1}{\Delta} (L_m\psi_{sd} - L_{ss}\psi_{rd}) \\ i_{rq} = \frac{1}{\Delta} (L_m\psi_{sq} - L_{ss}\psi_{rq}) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\Delta = (L_{ss}L_{rr} - L_m^2)$

发电机电磁转矩:

$$T_e = \psi_{sq}i_{sd} - \psi_{sd}i_{sq} \quad (6)$$

2.2 考虑主磁路饱和影响

在不考虑磁路饱和时的电机数学模型基础上,根据电机空载试验数据,可求得空载时气隙磁链随激磁电流变化曲线如图 3 所示。

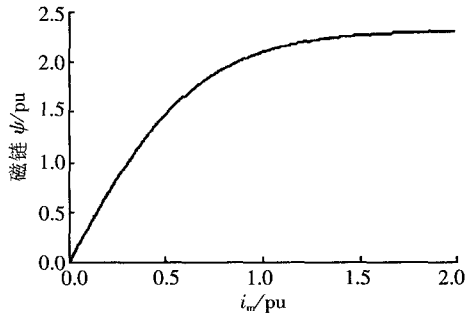


图 3 主磁路随激磁电流变化曲线

Fig.3 Main flux curve with the excited current

考虑主磁路饱和影响的激磁电感则为:

$$L_m = \frac{\psi(i_m)}{i_m} \quad (7)$$

其中激磁电流为:

$$i_m = \sqrt{i_{nd}^2 + i_{nq}^2} \quad (8)$$

式中, $i_{nd} = i_{sd} + i_{rd}$, $i_{nq} = i_{sq} + i_{rq}$ 。

2.3 考虑电机漏磁路饱和影响

为考虑电机漏磁路饱和带来定、转子漏感参数的变化影响,本文采取当定子电流小于额定定子电流 I_s 时,二者取不考虑饱和时的定转子漏感值 L_l ;当定子电流大于额定电压下的堵转电流 I_{sb} 时,取堵转点的饱和值 L_{lb} ;而当定子电流介于二者之间时,按 $(L_l - L_{lb})/(1 - I_{sb})$ 斜率变化^[4]。因此,定、转子漏感随定子电流变化曲线如图 4 所示。

2.4 考虑集肤效应影响

对于 MW 级大功率异步电机,集肤效应将引起转子电阻和定、转子漏电感的变化可表示成随电机

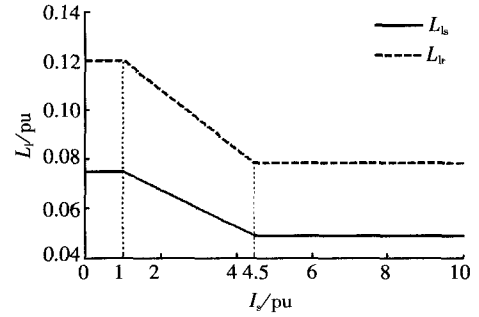


图 4 定转子漏感随定子电流变化曲线

Fig.4 Stator and rotor leakage inductances as a function of stator current

转差率变化特性如下^[15]:

$$R'_r = \begin{cases} R_r & |s| \leq s_m \\ R_r[(K_r - 1)|s| + 1 - K_r s_m]/(1 - s_m) & |s| > s_m \end{cases} \quad (9)$$

$$L'_{lr} = \begin{cases} L_{lr} & |s| \leq s_m \\ L_{lr}[(K_x - 1)|s| + 1 - K_x s_m]/(1 - s_m) & |s| > s_m \end{cases} \quad (10)$$

其中,临界转差率:

$$s_m = R_r \sqrt{\frac{R_s^2 + X_s^2}{(X_m^2 - X_s X_r)^2 + R_s^2 X_r^2}}$$

转子电阻和转子漏感的集肤系数:

$$K_r = \frac{1}{R_r} \left(\frac{1}{\beta} \sqrt{\frac{1}{1 + \tan^2 \varphi_{sc}}} - R_s \right)$$

$$K_x = \frac{1}{L_{lr}} [(R_s + K_r R_r) \tan \varphi_{sc} - L_{ls}]$$

其中, β ——启动电流倍数; φ_{sc} —— $s = 1$ 时的相位角。

按照上述描述的数学模型,由集肤效应引起的转子电阻和转子漏感随电机转差率变化曲线如图 5 所示。

3 风力发电机组暂态性能仿真

为比较分析考虑电机磁路饱和以及集肤效应对异步风力发电机组暂态运行性能的影响,本文以额定功率为 2MW 的笼型异步风力发电机系统为例,对机械大扰动和电网电压骤降情况下的机组暂态行为进行了仿真。图 6 为笼型异步风力发电机系统通过变压器直接接入电网示意图。

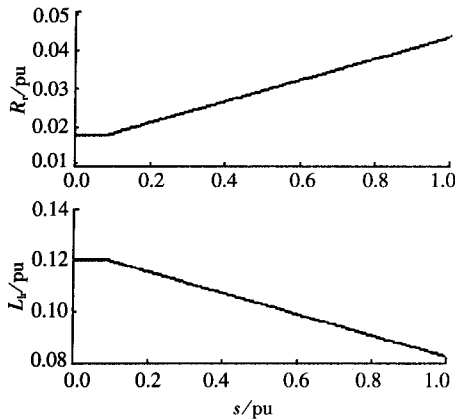


图5 集肤效应引起转子电阻和漏感随转差率变化曲线
Fig.5 The rotor resistance and the rotor leakage inductance as a function of slip considering skin effect

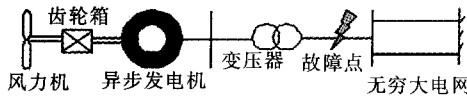


图6 异步风力发电系统示意图

Fig.6 Schematic diagram of a grid-connected wind generator system with a induction generator

其中仿真所用的异步风力发电机组主要参数如下^[16]:

1) 风力机参数

风力机转子惯性常数 $H_w = 2.5s$, 传动轴等效刚度系数 $K_{hg} = 0.3pu/el. rad$ 。考虑阻尼系数一般很小, 在本文的暂态仿真过程中忽略了风力机各个部分阻尼因素的影响。

2) 发电机参数

额定功率 2MW, 额定电压 690V, 额定频率 50Hz, 定子电阻 $R_s = 0.048pu$, 定子漏感 $L_{ls} = 0.075pu$, 转子电阻 $R_r = 0.018pu$, 转子漏感 $L_{lr} = 0.12pu$, 激磁电感 $L_m = 3.80pu$, 发电机惯性常数 $H_g = 0.50s$ 。

3) 变压器参数

原边额定电压 32kV, 电阻 0.0011pu, 漏感 0.032pu, 副边额定电压 690V, 电阻 0.0011pu, 漏感 0.032pu。

4) 采用的考虑主、漏磁路饱和及集肤效应引起的电机参数变化曲线分别如图3~图5所示。

3.1 机械转矩大扰动时机组暂态性能仿真

风力发电机组经常处于风速变化引起的机械扰动之下, 本节用输入转矩的阶越变化模拟机械大扰动的暂态过程, 如图7所示, 机组初始稳定运行在有

功率 0.8pu, 第 1.0s 时由于风速的变化机械转矩突变为 1.2pu, 扰动持续时间为 1.0s, 即在第 2.0s 时机械扰动消失。

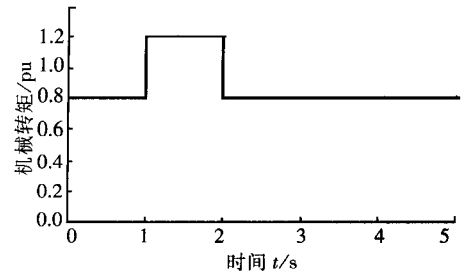


图7 输入机械转矩阶越变化

Fig.7 Step variation of the input mechanical torque

考虑不同电机模型下异步风力发电机组定子电流幅值的暂态响应过程如图8所示。图中 L_m -sat、 L_l -sat、with skineffect 和 Non-sat 分别表示仅考虑主磁路饱和、定转子漏磁路饱和、集肤效应和不考虑磁路饱和和模型时的仿真结果。

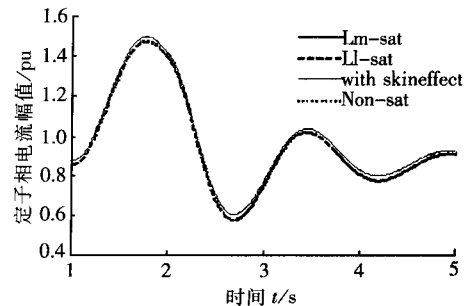


图8 机械扰动时定子相电流的暂态响应

Fig.8 Transient response of stator phase current during a mechanical disturbance

从图中可以看出, 由于机械扰动带来机械转矩的波动, 必然带来定子电流幅值的变化。另外, 由于机械时间常数比电量的时间常数长, 采用电机不同模型描述时, 由机械扰动所带来的定子电流幅值变化差别并不大。

3.2 电网电压骤降时机组暂态性能仿真

假设并网异步风力发电系统稳定运行在额定工况, 电网电压(变压器原边电压)在第 1.0s 时突然骤降为原来的 15%, 故障持续时间为 0.2s, 即在第 1.2s 时故障切除, 其电网电压幅值变化如图9所示。

采用不同电机模型时, 在电网电压骤降下异步风力发电机组定子电流、转子电流幅值、电磁转矩、发电机转速和风力机传动轴系扭矩的暂态响应过程

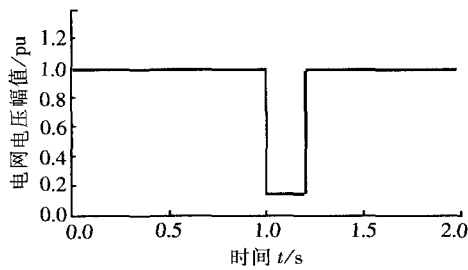
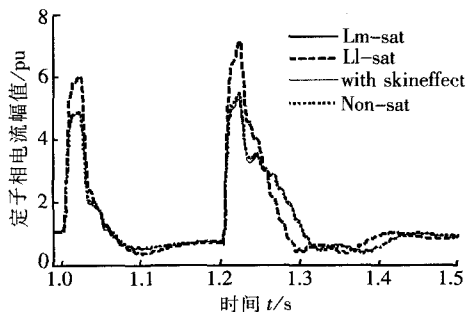


图9 电网电压骤降变化曲线

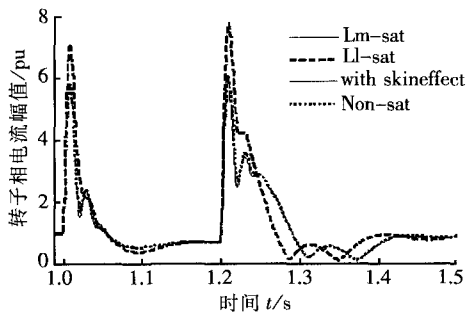
Fig.9 Grid voltage sag curve

如图10所示。

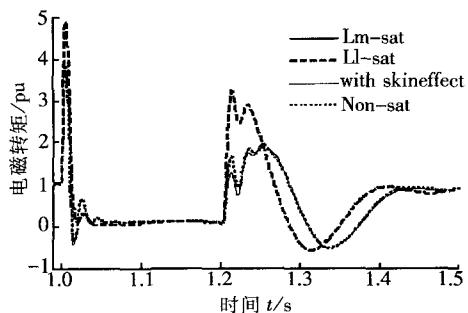
从上述仿真结果的定子电流幅值变化曲线可以看出,发电机在故障恢复阶段有很大的冲击电流,当仅考虑电机漏磁路饱和时其幅值可达到7.2pu,相比



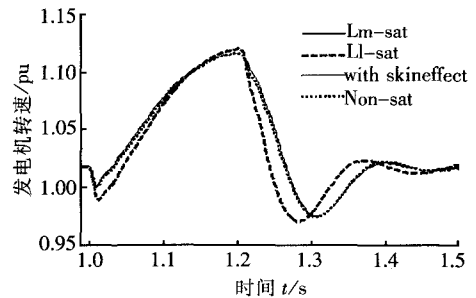
a.定子相电流幅值变化



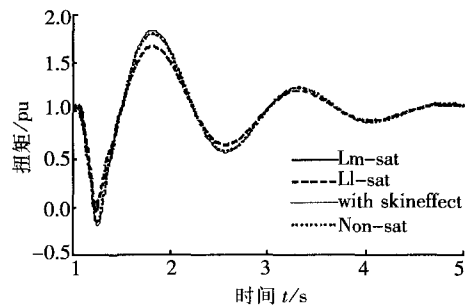
b.转子相电流幅值变化



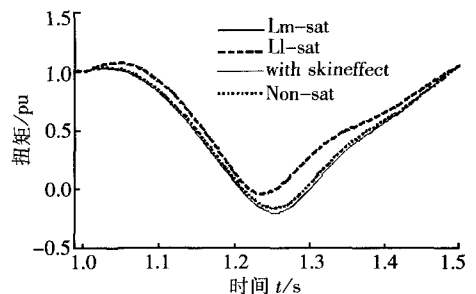
c.发电机电磁转矩变化



d.发电机转速变化



e.风力机轴系扭矩变化



f.风力机轴系扭矩变化放大图

图10 电机不同模型在电网电压骤降85%持续时间0.2s时风电机组的暂态响应

Fig.10 Transient response of wind generator systems using different models when the grid voltage drop is 85% for 0.2 seconds

不考虑漏磁路饱和或仅考虑主磁路饱和时,其幅值显著增大。此外,仅考虑集肤效应时,其电流幅值的变化与采用不考虑磁路饱和时基本一致。另外,与机械大扰动的暂态响应(图8)相比,电网电压骤降时其电流幅值的变化更大。

其次,从转子电流、发电机电磁转矩和电机转速的暂态响应过程也可以看出,与采用其它情况的电机模型相比,采用考虑漏磁路饱和的电机模型时,其暂态量的变化幅值更大。

另外,从风力机传动链轴系的扭矩变化来看,采

用考虑主磁路饱和模型时,其扭矩幅值变化更大。

4 结 论

为了更好地比较研究异步电机不同模型描述时对机组暂态运行性能的影响,在考虑风力机传动轴系柔性因素的 2 个质量块等效模型的基础上,分别建立了考虑主磁路饱和、漏磁路饱和以及集肤效应影响时的电机数学模型,并对额定功率 2MW 的异步风力发电机组在机械转矩大扰动和电网电压骤降下的暂态过程进行了仿真分析。通过仿真结果比较和分析表明:

1) 电网电压骤降比机械大扰动情况对风电机组的暂态运行性能影响更为显著;

2) 在机械扰动情况下,采取电机不同模型时的机组暂态响应基本一致;

3) 在电网电压骤降情况下,电机磁路饱和对机组暂态过程的影响较大。在分析和计算电机暂态运行性能宜选取考虑电机漏磁路饱和的数学模型,而在计算机组传动轴系的扭矩时,宜采取考虑电机主磁路饱和模型。

以上结论将有助于分析大容量风电机组的暂态稳定性以及提供风电机组保护装置和风力机传动轴系重要参数的计算参考。此外,风电机组的数学模型及其对机组暂态运行性能的分析结果也可进一步应用到双馈感应风力发电机系统中。

[参考文献]

- [1] Clemens Jauch Julijia Matevosyan, Thomas Ackermann Sigrid Bolik. International comparison of requirements for connection of wind turbines to power systems[J]. Wind Energy, 2005, 8: 295—306.
- [2] 迟永宁, 刘燕华, 王伟胜. 风电接入对电力系统的影响[J]. 电网技术, 2007, 31(3): 77—81.
- [2] Chi Yongning, Liu Yanhua, Wang Weisheng. Study on impact of wind power integration on power system[J]. Power System Technology, 2007, 31(3): 77—81.
- [3] Chen Z. Issues of connecting wind farms into power systems [A]. 2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific[C], Dalian, China, 2005.
- [4] Bispo D, Martins L, Neto de Resende J T, et al. A new strategy for induction machine modeling taking into account the magnetic saturation[J]. IEEE Trans Ind Appl, 2001, 37: 1710—1719.
- [5] 邓建国, 罗德荣. 电压骤降时三相感应电动机瞬态分析[J]. 电机技术, 2003, (4): 6—13.
- [5] Deng Jianguo, Luo Derong. Transient analysis on three-phase induction motors under sudden drop of supply voltage[J]. Electrical Machinery Technology, 2003, (4): 6—13.
- [6] 谢可夫. 瞬时电压骤降时三相感应电动机瞬态分析[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2003, 26(4): 47—50.
- [6] Xie Kefu. Transient analysis of three 2phase induction motor with momentary voltage dips[J]. Jour Nat Scie Hunan Norm Univ, 2003, 26(4): 47—50.
- [7] 林友杰, 吴汉光. 考虑主磁路饱和时的异步电机 d-q-n 模型[J]. 中小型电机, 2005, 32(6): 11—14.
- [7] Lin Youjie, Wu Hanguang. Asynchronous motor's d-q-n model taking account of main flux circuit saturation[J]. Electric Machines & Control Application, 2005, 32(6): 11—14.
- [8] Li H, Chen Z, Han L. Comparison and evaluation of induction generator models in wind turbine systems for transient stability of power system[A]. 2006 International Conference on Power System Technology[C], Chongqing, China, Powercon, 2006.
- [9] Divya K C, Rao P S N. Study of dynamic behavior of grid connected induction generators[A]. IEEE Power Engineering Society General Meeting [C], Denver, Colorado, USA, 2004, 2200—2205.
- [10] 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): 115—119.
- [10] Li Dongdong, Chen Chen. A study on dynamic model of wind turbine generator sets [J]. Proceeding of CSEE, 2005, 25 (3): 115—119.
- [11] Piegari L, Rizzo R. Study of saturation phenomena on asynchronous generators used in wind farms[J]. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2004, 2: 999—1003.
- [12] Muyeen S M. Transient stability analysis of wind generator system with the consideration of multi-mass shaft model[C]. IEEE PEDS, 2005, 1584—1589.
- [13] 樊艳芳, 晁 勤. 风力异步发电机的建模与仿真[J]. 计算机仿真, 2002, 19(5): 56—58.
- [13] Fan Yanfang, Chao Qin. Modeling and simulation of wind asynchronous-generator[J]. Computer simulation, 2002, 19 (5): 56—58.
- [14] Salman Salman K, Teo Anita L J. Windmill modeling consideration and factors influencing the stability of a grid-connected wind power based embedded generator[J]. IEEE Transactions

On Power Systems, 2003, 18(2): 793—802.

(6): 521—533.

[15] Akhbab M, Fakhro S Q. New model for single unit representation of induction motor loads, including skin effect, for power system stability studies[J]. IEE Proceedings-B, 1992, 139

[16] Akhmatov V, Nielsen A H. Fixed-speed active-stall wind turbines in offshore applications[J]. European Trans. on Electrical Power, 2005, 15(2): 1—112.

TRANSIENT PERFORMANCES ANALYSIS OF WIND TURBINE SYSTEM WITH INDUCTION GENERATOR INCLUDING FLUX SATURATION & SKIN EFFECT

Li Hui¹, Zhao Bin^{1,2}, Han Li¹, Chen Z³

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Sichuan Electric Vocational and Technical College, Chengdu 610072, China; 3. Institute of Energy Technology, Aalborg University, Aalborg DK9220, Denmark)

Abstract: In order to analyze correctly the effect of different models for induction generators on the transient performances of large wind power generation, Wind turbine driven squirrel cage induction generator (SCIG) models taking into account both main and leakage flux saturation and skin effect were proposed. A two-mass lump equivalent model of a wind turbine shaft system was also used to considering shaft flexibility. The transient behaviors of the wind generator system with the different models were investigated and compared with the software platform Matlab/Simulink, under conditions of a large mechanical disturbance and a grid voltage sag, respectively. Simulation results have shown that the effect of the flux saturation is obvious on the transient behaviours of the wind power generator system, especially for a grid voltage sag studies.

Keywords: wind power generation; flux saturation; skin effect; induction generator; transient