

文章编号:1000-582X(2008)05-0481-05

风力发电机组暂态模型和稳定性分析方法评价

李 辉, 赵 斌, 韩 力

(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 400030)

摘 要:在分析并网笼型异步发电机暂态稳定性机理的基础上,分别建立了考虑定子电磁暂态的详细模型和忽略定子电磁暂态的简化模型,以及 1 个和 2 个等效质量块的风力机轴系模型。针对上述 4 种不同组合的风力发电机组模型,利用 Matlab/Simulink 对定子 3 相短路故障情况下的机组暂态行为进行了仿真比较。在此基础上,利用一种计算异步发电机临界故障切除转速的传统直接法对临界切除时间进行了估算,并与时域仿真法进行了比较分析。结果表明,风力机轴系不同质量块模型对机组暂态稳定性分析的结果影响很大,采用临界切除转速的传统直接法难于正确估算临界切除时间。

关键词:风力发电;异步发电机;临界切除时间;暂态分析

中图分类号:TM315

文献标志码:A

Assessment of transient models and stability analysis methods for wind power generation units

LI Hui, ZHAO Bin, HAN Li

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology,
Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

Abstract: The transient stability principle of squirrel cage induction generators was analyzed. A detailed generator model (including stator electrical transient), simplified generator model (neglecting stator electrical transient), and one-and two-mass shaft system models were built. Based on the four different wind turbine unit models, the dynamic behaviors were simulated and compared using Matlab/Simulink, under the condition that the generator stator terminal was subjected to a 3-phase short-circuit fault. Furthermore, the critical clearing time (CCT) was calculated and compared using a direct method with the critical clearing speed of induction generator and the simulation method of trial and error. Results show that the different shaft system mass models influence the transient stability analysis of the wind turbine units significantly, and the direct method of CCT estimation based on the critical clearing speed is incompatible.

Key words: wind generation; asynchronous generator; critical clearing time; transient analysis

笼型异步发电机 (squirrel cage induction generator, SCIG) 由于结构简单、维护方便等特点,在大容量风电场中得到广泛应用。随着大容量风电

场接入输电网以及风电在电力系统中所占比例的增加,风力机组的稳定性可能对电力系统的稳定运行产生影响^[1-2]。此外,SCIG 暂态稳定性定义既不同

收稿日期:2008-01-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50607022)

作者简介:李辉(1973-),男,重庆大学副教授,博士,主要从事风力发电技术、电机及其系统分析研究,(Tel)023-65102441;
(E-mail)cqulh@163.com。

欢迎访问重庆大学期刊网 <http://qks.cqu.edu.cn>

于传统的同步发电机的功角稳定性,也不同于电力系统的电压稳定性^[3]。所以有必要对基于 SCIG 的风力发电机组的暂态稳定性进行分析^[1-2,4-5],进一步有效评价其暂态稳定性。

临界切除时间(critical clearing time, CCT)是允许电网故障持续的最长时间,即在该时间内切除故障不会引起机组的失稳。CCT 是判断系统暂态稳定性的一个标准。常规电力系统暂态稳定性评估方法可以划分为时域仿真法和直接法^[6-7]。前者通过对描述系统故障前后的非线性微分方程进行数值计算,来分析系统的暂态稳定性,这种方法需要进行反复仿真,很难用于电力系统稳定性的在线评估。后者利用给定的初始值来判定系统的暂态稳定域,这种方法不需要进行反复仿真,计算速度快,可以获得系统稳定程度的定量信息,已成为电力系统暂态稳定性在线评估的有效方法。

为了分析风力发电机组的暂态稳定性,一些文献介绍了异步发电机暂态稳定性分析的模型和方法^[4-5,8-14]。然而其大都采用时域仿真法。在直接法方面,文献[9]基于发电机 1 阶运动模型,首次提出了一种计算 CCT 的传统直接法。文献[14]考虑了风力机传动轴系柔性对速度的影响,通过计算故障轨迹上 SCIG 的转速并与其临界切除转速相比较,得到 CCT。但是以上方法都是基于电机本身的稳态转矩-转速特性。对考虑风力机特性的异步发电机的暂态稳定极限评价方法有待深入研究。

为了比较和分析基于 SCIG 的风力发电机组暂态稳定性评估方法的有效性,笔者建立了不同的风力机组模型,包括详细和简化的发电机电磁暂态模型以及 1 个和 2 个质量块的传动轴系模型。利用 Matlab/Simulink 对风力发电机组不同模型在 3 相短路故障情况下的动态行为进行了比较分析。利用直接法和时域仿真法,对采用不同模型时在各种初始运行条件下的 CCT 进行了计算和比较。比较分析了适宜于暂态稳定性分析的风力发电机组的模型。

1 基于 SCIG 转矩特性的暂态稳定性

为了从理论上分析并网 SCIG 的暂态稳定性极限,图 1 给出了发电机端部遭受 3 相短路故障时,发电机的稳态转矩-转速和时间-转速示意图。SCIG 转子的 1 阶运动方程为

$$2H \frac{d\omega_g}{dt} = T_m - T_e, \quad (1)$$

式中: H 为风力机组的总体惯性时间常数; ω_g 为发

电机转子电角速度; T_m 为风力机输入机械转矩; T_e 为发电机电磁转矩。

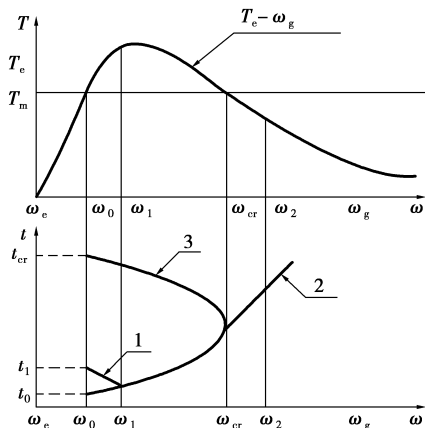


图 1 转矩-转速和时间-转速示意图

在稳态运行情况下,电磁转矩 T_e 等于机械转矩 T_m ,电机稳定运行在高于同步转速 ω_e 的 ω_0 点上,如图 1 所示。当定子发生 3 相短路故障时,如果忽略电磁暂态,可认为 T_e 迅速降为 0,此时 T_m 使得电机转子加速。如果故障在 ω_1 点切除,此时 T_e 迅速回复(假设恢复后电压和故障前电压相同),在此运行点 $T_e > T_m$,则电机转子减速回复到初始运行点 ω_0 ,如图 1 时间-转速曲线中 1 所示。如果故障不是在 ω_1 点而是在 ω_2 点切除,则此时恢复后的 $T_e < T_m$,这样转子将继续加速而失去稳定,如图 1 时间-转速曲线中 2 所示。由此可以看出,如果故障切除点不超过 ω_{cr} ,则电机将不会失速而脱网。图 1 时间-转速曲线 3 为刚好在此临界点切除的故障轨迹。 ω_{cr} 被称为临界切除转速^[9,14],对应的时间 t_{cr} 为临界故障切除时间。很显然,上面所得结论都是依赖于异步电机的稳态转矩-转速曲线。考虑到发电机电磁暂态以及风力机组本身轴系柔性的影响,采用上述方法可能不能准确确定风力机组的暂态稳定极限。

与汽轮发电机组和水轮发电机组相比,风力机与 SCIG 的转动惯量差别非常大,并且风力机和 SCIG 之间的齿轮箱传动是必不可少的,这使得风力发电机组传动轴系存在很大的柔性。当电力系统发生故障时, T_e 立即瓦解,存储在风力机传动轴上的能量转化成发电机转子的动能。根据机械能守恒定律,故障后发电机转子的速度改变可以表示为^[14]

$$\Delta\omega_g = \frac{T_m}{\sqrt{H_g K_s}}, \quad (2)$$

式中: H_g 为发电机转子的惯性时间常数; K_s 是风力机传动轴系刚度系数。

2 风力发电机组模型

2.1 SCIG 暂态模型

假设 SCIG 连接无穷大系统,其电压电流正方向规定按发电机惯例,定子电压相量与 d 轴重合,即 $u_{sq}=0$ 。则 SCIG 在 $d-q$ 同步坐标轴系下的暂态电压电流方程标么值形式为(q 轴超前 d 轴)^[4-5]

$$\left. \begin{aligned} u_{sd} &= -R_s i_{sd} - \omega_s \psi_{sq} + \frac{1}{\omega_b} p \psi_{sd}, \\ 0 &= -R_s i_{sq} + \omega_s \psi_{sd} + \frac{1}{\omega_b} p \psi_{sq}, \\ 0 &= -R_r i_{rd} - s \omega_s \psi_{rq} + \frac{1}{\omega_b} p \psi_{rd}, \\ 0 &= -R_r i_{rq} + s \omega_s \psi_{rd} + \frac{1}{\omega_b} p \psi_{rq}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中磁链方程为

$$\left. \begin{aligned} \psi_{sd} &= -L_{ss} i_{sd} - L_m i_{rd}, \\ \psi_{sq} &= -L_{ss} i_{sq} - L_m i_{rq}, \\ \psi_{rd} &= -L_m i_{sd} - L_{rr} i_{rd}, \\ \psi_{rq} &= -L_m i_{sq} - L_{rr} i_{rq}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: R_s 、 R_r 分别为定、转子电阻; s 为转差率; ω_s 为定子电角频率(标么值为 1); $\omega_b=2\pi f$ 为系统电角频率基值; L_{ss} 、 L_{rr} 分别为定、转子全自感; L_m 为定、转子互感; $p=d/dt$ 为微分算子。

考虑定、转子磁链暂态,以电流和转子电动势为状态变量的 SCIG 详细电磁暂态模型为

$$\left. \begin{aligned} \frac{X'}{\omega_s \omega_b} p i_{sd} &= -\left(R_s + \frac{X-X'}{T_0}\right) i_{sd} + X' i_{sq} + \\ & (1-s) E_d - \frac{1}{T_0} E_q - u_{sd}, \\ \frac{X'}{\omega_s \omega_b} p i_{sq} &= -\left(R_s + \frac{X-X'}{T_0}\right) i_{sq} + X' i_{sd} + \\ & (1-s) E_q - \frac{1}{T_0} E_d - u_{sq}, \\ \frac{1}{\omega_s \omega_b} p E_d &= -\frac{1}{T_0} (E_d - (X-X') i_{sq}) + s E_q, \\ \frac{1}{\omega_s \omega_b} p E_q &= -\frac{1}{T_0} (E_q + (X-X') i_{sd}) - s E_d, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: $X=\omega_s L_{ss}=\omega_s(L_{sl}+L_m)$; $X'=\omega_s\left(L_{ss}-\frac{L_m^2}{L_{rr}}\right)$;

$$T_0 = \frac{\omega_s L_{rr}}{R_r}; E_d = -\frac{\omega_s L_m}{L_{rr}} \psi_{rq}; E_q = \frac{\omega_s L_m}{L_{rr}} \psi_{rd}。$$

发电机的电磁转矩:

$$T_e = E_d i_{sd} + E_q i_{sq}。 \quad (6)$$

如果忽略定子磁链的暂态过程,令 $p\psi_s=0$, 则可得简化电磁暂态模型:

$$\left. \begin{aligned} u_{sd} &= -R_s i_{sd} + X' i_{sq} + E_d, \\ 0 &= -R_s i_{sq} - X' i_{sd} + E_q, \\ \frac{1}{\omega_s \omega_b} p E_d &= -\frac{1}{T_0} (E_d - (X-X') i_{sq}) + s E_q, \\ \frac{1}{\omega_s \omega_b} p E_q &= -\frac{1}{T_0} (E_q + (X-X') i_{sd}) - s E_d. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

2.2 机械传动轴系模型

风力机和 SCIG 之间通过齿轮箱连接,这给轴系带来了很大的柔性。考虑轴系柔性的影响,可以建立 2 个等效质量块的机械传动轴系模型。

$$\left. \begin{aligned} 2H_w \frac{d\omega_w}{dt} &= T_m - K_s \theta_s, \\ 2H_g \frac{d\omega_g}{dt} &= K_s \theta_s - T_e, \\ \frac{d\theta_s}{dt} &= \omega_b (\omega_w - \omega_g), \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: H_w 为风力机的惯性时间常数; ω_w 为风力机的电角速度; θ_s 为风力机转轴相对于发电机转轴的电角位移。

将风力机、齿轮箱、传动轴和发电机转子等效成 1 个集中质量块,则可以得到 1 个质量块的机械传动轴系模型,如式(1)所示。

3 不同风力机组模型暂态仿真分析

为了比较不同风力机组等效模型对其暂态稳定性分析的影响以及基于临界切除转速计算 CCT 的直接法的有效性,笔者对各种模型在不同初始运行条件下的暂态行为进行了比较分析。4 种不同风力机组模型描述如表 1 所示。

表 1 不同风力机组模型

模型符号	发电机模型	机械传动轴系模型
DD	详细模型	2 个质量块模型
RD	简化模型	2 个质量块模型
RS	简化模型	1 个质量块模型
SS	稳态模型	1 个质量块模型

以额定功率为 3 MW 的 SCIG 机组为例进行仿真,图 2 表示该机组通过变压器直接接入无穷大电网的暂态稳定性分析示意图,其主要参数如表 2 所示,其中定转子电阻电感皆为标么值(p. u.)。

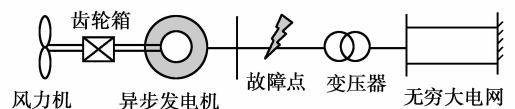


图 2 异步风力发电系统示意图

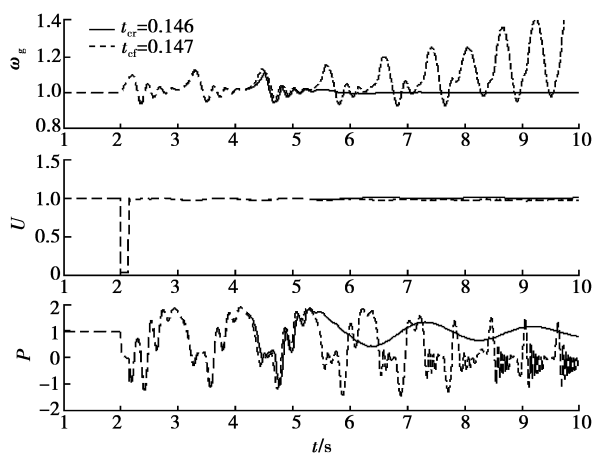
表 2 风力发电系统主要参数

变量	取值
额定功率 P_N/MW	3.00
额定电压 U_N/V	575.00
额定频率 f_N/Hz	60.00
定子电阻 R_s	484.3×10^{-5}
定子漏感 L_{sl}	124.8×10^{-5}
转子电阻 R_r	434.7×10^{-5}
转子漏感 L_{rl}	179.1×10^{-3}
定、转子互感 L_m	6.77
发电机转子惯性时间常数 H_g/s	0.50
风力机的惯性时间常数 H_w/s	4.54
传动轴系刚度系数 K_s	0.30

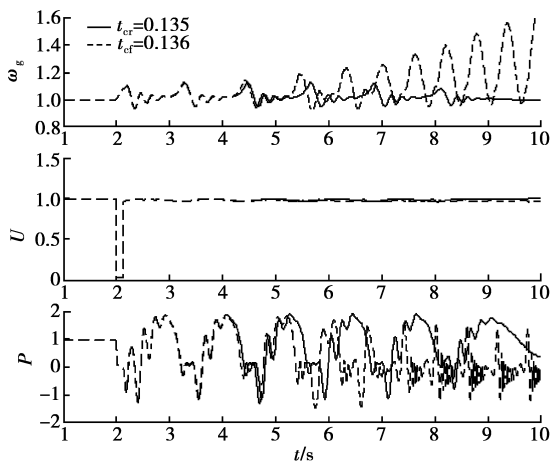
3.1 暂态行为仿真分析

在仿真中,假定初始输入机械转矩为额定转矩,在 $t=2\text{ s}$ 时刻 SCIG 定子端部发生 3 相短路故障。各种不同风力机组模型的发电机转速 ω_g 、定子电压 U 、有功功率 P 在临界点的暂态过程如图 3 所示,其中 t_{cr} 为临界故障切除时间; t_{cl} 为故障切除时间,它们通过反复仿真获得。

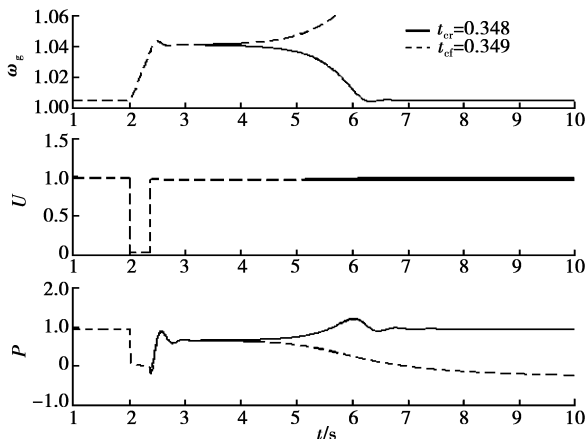
可以看出,基于 2 个质量块轴系模型的风力机组,发电机转速和有功功率在故障切除后发生大幅波动,与 1 个质量块模型的风力机组相比,稳定性降低。尽管 RD 模型相比 DD 模型 CCT 减小,但两者的暂态过程比较接近。SS 模型和 RS 模型的暂态过程也很接近,但是 SS 模型过于简单,有功功率在故障切除时刻几乎不产生波动,并且 CCT 估计过于乐观。RS 模型与 SS 模型相比,由于考虑了转子电磁暂态,有功功率和转速暂态过程产生一定波动。



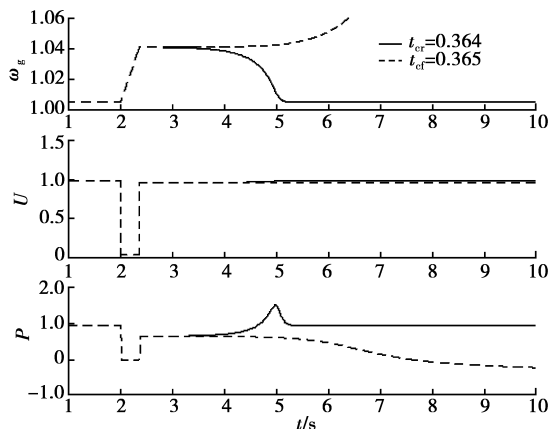
(a)DD 模型



(b)RD 模型



(b)RS 模型



(b)SS 模型

图 3 风力机组不同模型描述时的暂态行为

3.2 CCT 估算

利用传统直接法和时域仿真法,计算和比较了各种风力机组模型在不同输入机械转矩下的 CCT,

详细结果如表 3 所示,其中 CS 表示通过直接法求得,TE 表示通过时域仿真法求得。

表 3 不同风力机组模型的 CCT 计算结果

T_m	DD 模型		RD 模型		RS 模型		SS 模型	
	CS	TE	CS	TE	CS	TE	CS	TE
1.0	0.058, 0.311, 0.571, 0.970, 1.054	0.146	0.056, 0.296, 0.568, 0.965, 1.043	0.135	0.398	0.348	0.363	0.364
0.9	0.072, 0.321, 0.578, 0.985, 1.072	0.435	0.061, 0.302, 0.574, 0.983, 1.061	0.409	0.521	0.468	0.475	0.473
0.8	0.101, 0.351, 0.602, 1.021, 1.101	0.614	0.091, 0.331, 0.592, 1.012, 1.093	0.612	0.682	0.627	0.634	0.631
0.7	0.149, 0.464, 0.641, 1.594, 1.601	0.831	0.141, 0.454, 0.632, 1.581, 1.595	0.822	0.911	0.842	0.854	0.850
0.6	0.721, 1.126, 1.692	1.181	0.695, 1.104, 1.632	1.176	1.284	1.186	1.195	1.192
0.5	1.331, 1.684, 2.272	1.750	1.271, 1.654, 2.252	1.743	1.838	1.754	1.769	1.764

通过对表 3 的分析,可以得出:

1)在相同输入转矩情况下,通过时域仿真,风力机采用 2 个质量块模型比 1 个质量块模型所得的 CCT 要小,并且随着输入转矩的增大,这种差异更加明显,例如,当输入转矩为额定转矩时,RD 模型的 CCT 是 0.135 s,而 RS 模型是 0.348 s。

2)DD 模型和 RD 模型通过直接法所求得 CCT 有好几个不同的值,并且它们都与用时域仿真法所获得的值不相同,因此用直接法求取 CCT 对 DD 模型和 RD 模型是无效的。为了分析产生多个 CCT 的原因,图 4 表示了额定输入转矩情况下,DD 模型和 RD 模型在故障期间转子转速的暂态过程。从图中可以看出,由于齿轮箱的存在,传动轴在故障期间产生扭振,对于 RD 模型,发电机转子转速曲线在故障期间发生多重振荡,所以它与 ω_{cr} 相交于多个点,可得到多个不同的时间值。对于 RS 模型,

转速在故障期间几乎是一条直线,因此它与 ω_{cr} 线只有一个交点。

3)RS 模型由于考虑了转子电磁暂态,通过 2 种方法所得的结果存在一些差异;而对于 SS 模型,2 种方法计算结果几乎一致。

4 结 论

详细研究了适用于 SCIG 风力发电机组暂态稳定性分析的模型和方法,建立了包括不同发电机模型和传动轴系模型的风力机组模型,对 4 种不同模型在 3 相短路情况下的暂态过程进行了比较分析,并用直接法和时域仿真法计算了各模型的 CCT。结果表明:

1)发电机简化模型与详细模型相比,它们对风力机组的暂态行为仿真结果相差不大。采用简化模型得到的 CCT 比采用详细模型小些,这保守的结果使得机组的暂态稳定性分析结果有一定的安全裕度。

2)风力机轴系不同质量块模型对暂态稳定性分析的结果影响很大。1 个质量块模型与 2 个质量块模型相比,后者能够更真实地反映故障后风力机组发生的暂态行为。

3)对于 2 个质量块的轴系模型,采用基于临界切除转速的直接法不能惟一确定 CCT,很难用于 SCIG 风力发电机组暂态稳定性的准确判断。因此,对异步风力发电机组暂态稳定性分析时,有必要考虑风力机柔性连接特点,采用新的暂态稳定性分析方法,这将在后续工作中展开研究。

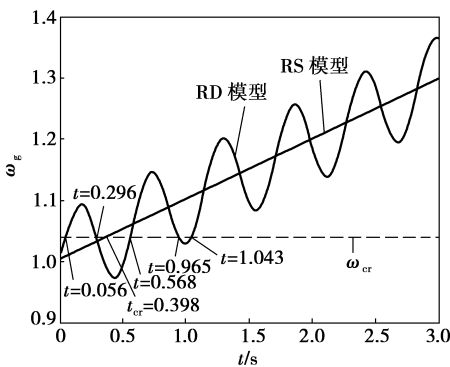


图 4 故障期间的发电机转子转速曲线

- the CSEE, 2003, 23(9):67-70.
- [6] 李红, 马新瑜. 多层前馈神经网络在电力系统谐波测量中的应用[J]. 电测与仪表, 2003, 40(2):15-17.
LI HONG, MA XIN-YU. Application of multi-layer feed-forward neural network for electric system harmonic measurement [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2003, 40(2):15-17.
- [7] 王群, 吴宁, 王兆安. 一种基于人工神经网络的电流谐波量测方法[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(11): 35-39.
WANG QUN, WU NING, WANG ZHAO-AN. A measuring approach of power harmonics based on artificial neural network [J]. Automation of Electric Power System, 1998, 22(11): 35-39.
- [8] 肖雁鸿, 毛筱, 罗瑞琼, 等. 神经网络理论在谐波量测中的应用[J]. 电工技术学报, 2002, 17(2):101-104.
XIAO YAN-HONG, MAO XIAO, LUO RUI-QIONG, et al. The application of neural network theory in the field of harmonic measurement [J]. Transactions of China Electro Technical Society, 2002, 17(2):101-104.
- [9] 汤胜清, 程小华. 一种基于多层前向神经网络的谐波检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(18):90-94.
TANG SHENG-QING, CHENG XIAO-HUA. A harmonic measuring approach based on multilayered feed forward neural network [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(18): 90-94.
- [10] 王小平, 曹立民. 遗传算法—理论、应用与软件实现[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2002.
- [11] HU ZHI-JIAN, CHEN YUN-PING, ZHANG CHEN-XUE. Harmonic real time identification by adaptive neural network based on GPS and network technology[J]. Proceedings of IEEE International Conference on Information Acquisition, 2004, 21(2): 515-519.

(编辑 赵 静)

~~~~~

(上接第 485 页)

## 参考文献:

- [1] CHEN Z. Issues of connecting wind farms into power systems[C]//IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition. Dalian: IEEE/PES, 2005: 14-18.
- [2] INWAI C C, LEE W J, FUANGFOO P, et al. System impact study for the interconnection of wind generation and utility system [J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2005, 41(1):163-168.
- [3] SAMUELSSON O, LINDAHL S. On speed stability[J]. IEEE Trans on Power System, 2005, 20(2): 1179-1180.
- [4] TRUDNOWSKI D J, GENTILE A, KHAN J M, et al. Fixed-speed wind-generator and wind-park modelling for transient stability studies [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(4):1911-1917.
- [5] AKHMATOV V, NIELSEN A H. Fixed-speed active-stall wind turbines in offshore applications [J]. European Trans on Electrical Power, 2005, 15:1-12.
- [6] KUNDUR P, PASERBA J. Definition and classification of power system stability [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(2): 1387-1401.
- [7] FOUAD A A, VITTAL V. Power system transient stability analysis using the transient energy function method[M]. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1992.
- [8] HOLDSWORTH L, WU X G, EKANAYAKE J B, et al. Comparison of fixed speed and doubly-fed induction wind turbines during power system disturbances[J]. IEE Proc Generation, Transmission and Distribution, 2003, 150(3):343-352.
- [9] DIVYA K C, NAGENDRA RAO P S. Study of dynamic behaviour of grid connected induction generators [C] // IEEE Power Engineering Society General Meeting. Denver: IEEE, 2004:2200-2205.
- [10] QUANG Z F, JOOS G, BOON T O. AC power transmission from remote large-scale wind park based on squirrel-cage induction generator [C] // IEEE International Conference on Power System Technology. Singapore: IEEE, 2004:52-57.
- [11] FRANCOISE M, BIKASH C P. Modelling and small-signal analysis of a grid connected doubly-fed induction generator [C] // IEEE Power Engineering Society General Meeting. San Francisco: IEEE, 2005: 1503-1510.
- [12] NOMIKOS B M, VOURNAS C D. Investigation of induction machine contribution to power system oscillations[J]. IEEE Trans on Power System, 2005, 20(2):916-925.
- [13] MOTA W S, BARROS L S, PAMPLONA F M P, et al. Wind generation dynamic simulation connected to an electric power system[C]//IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition. San Paulo: IEEE/PES, 2004:179-184.
- [14] SALMAN S K, TEO A L J. Investigation into the estimation of the critical clearing time of a grid connected wind power based embedded generator[C]//IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition. Yokohama: IEEE/PES, 2002: 975-980.

(编辑 李胜春)