

# 笼型风电机组结构的风力发电系统运行仿真分析

赛尔山伙加·居曼<sup>1</sup>, 常喜强<sup>2</sup>, 郭小龙<sup>2</sup>, 张新燕<sup>1</sup>

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆, 乌鲁木齐 830047;

2. 国网新疆电力调度控制中心, 新疆, 乌鲁木齐 830003)

**摘要:** 在当今世纪能源日渐短缺、气候变化和环境日益恶化的全球背景下, 风能作为一种清洁、可再生能源受到了高度的关注。介绍了笼型异步风力发电系统的类型和基本工作原理, 并针对笼型异步风力发电系统建立了动态数学模型。其次, 在 Matlab/Simulink 仿真环境下构建风电场并网系统的模型, 通过仿真分析, 研究笼型异步风力发电系统的稳定机理; 并通过对风速扰动、线路断线故障、线路短路故障等各种扰动下的系统运行状况进行动态仿真, 最后针对仿真结果提出提高系统稳定性的措施。

**关键词:** 笼型风电机组; 风力发电; 系统运行; 电压稳定性; 动态仿真

**Abstract:** In the present century, energy is getting shorter, climate is changing and environment is becoming increasingly worse, so under this background, wind energy, a kind of clean and renewable energy sources, has attracted extensive attention. The type and basic working principle of cage asynchronous wind power generation system are introduced, and the dynamic mathematical model of cage asynchronous wind power generation system is established. Then, the model of wind power grid system is built using Matlab/Simulink. Through the simulation analysis, the stabilizing mechanism of cage asynchronous wind power generation system is studied, and the dynamic simulation of system operating condition is carried out under different disturbances such as wind speed variation, line breaking fault and short-circuit fault. Finally some conclusions are obtained, and the measures to increase the stability of cage asynchronous wind power generation system are proposed.

**Key words:** cage-type wind turbine generator system; wind power generation; system operation; voltage stability; dynamic simulation

中图分类号: TM614 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2016)02-0010-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2016.02.003

## 0 引言

由于传统的化石能源正在逐渐枯竭, 风能作为一种储量巨大的可再生绿色能源, 得到全世界的广泛重视和快速发展。随着风电的迅速发展, 大规模风电场的陆续出现, 风电装机容量在电力系统中所占的比例越来越大, 风力发电对电力系统的影响也逐渐增大, 严重故障情况下甚至会引起系统不稳定。因此, 对各种扰动下的鼠笼式异步风力发电系统能否维持稳定运行进行研究, 以及如何提高其运行的稳定性是十分必要的<sup>[1-2]</sup>。

在 Matlab/Simulink 仿真环境下构建风电场并网系统的模型, 而风电场并网系统是由鼠笼式异步

发电机构成的。研究笼型风电机组结构的风力发电系统的电压失稳机理, 以及通过对线路断线故障、风速扰动、线路短路故障等各种扰动下的系统运行状况进行动态仿真, 详细分析各种仿真过程, 最后得出一些有意义的结论, 并提出提高笼型风电机组结构的风力发电系统稳定性的措施。

## 1 风力发电机组动态数学模型

风力发电机组动态数学模型是由风速模型、风力机模型、传动机构模型以及异步发电机模型组成, 见图 1<sup>[3]</sup>。

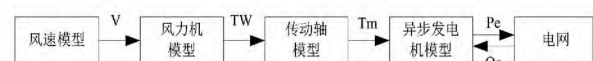


图 1 风力发电机组基本模型

基金项目: 大规模风电光伏接入电网无功电压优化控制与综合评价技术研究(SGXJ0000DKJS1440234)

### 1.1 风速模型

风速具有明显的间歇性和随机性,在一般情况下,根据统计规律分析,风电场风速符合威布尔(Weibull)分布。

$$f(V) = \frac{K}{A} \left(\frac{V}{A}\right)^{K-1} e^{-\left(\frac{V}{A}\right)^K} \quad (1)$$

式中:  $V$  是风速;  $f(V)$  是风速分布函数;  $A$ 、 $K$  分别是威布尺度系数和形状系数。为了精确描述风速间歇性和随机的特点,通常采用4种形式的风速来模拟实际风速变化情况:基本风  $V_A$ 、阵风  $V_B$ 、渐变风  $V_C$  和随机风  $V_D$ 。

### 1.2 风力机与传动部分模型

1) 风能转换模型。风轮机主要包括齿轮箱、轮毂、叶片和传动轴等传动装置<sup>[4]</sup>。叶片的作用是将风能转换成机械转矩。风力机的机械转矩关系式如式(2)。

$$T_w = \frac{1}{2\lambda} \pi \rho C_p R^3 V_w^2 \quad (2)$$

式中:  $T_w$  为风力机的机械转矩;  $\rho$  为空气密度;  $C_p$  为风力机转换效率系数;  $R$  为叶片半径;  $V_w$  为作用于叶片的风速;  $\lambda$  为叶尖速比,  $\lambda = \omega R / V_w$  (其中:  $R$  为叶片半径;  $\omega$  为风力机转速)。

2) 传动机构的模型<sup>[5]</sup>。风力机组的传动机构由轮毂、齿轮箱和传动轴组成。轮毂连接叶片和齿轮箱,轮毂具有较大的惯性,齿轮箱和联轴器传递风力机和异步发电机之间的转矩,传动部分的模型为

$$\frac{dT_m}{dt} = \frac{1}{\tau_h} (T_w - T_m) \quad (3)$$

式中:  $T_m$  为传动机构输出转矩;  $T_w$  为传动机构输入转矩;  $\tau_h$  为风力机惯性时间常数。在简化模型中把齿轮箱位理想的刚性齿轮组,传动轴的惯量等效到发电机转子中。

3) 桨距角控制系统<sup>[6-7]</sup>。风轮机风能转换效率系数是叶尖速率比和桨距角的函数。一旦风速变化风轮机运行点将发生变化,为了保证风能的转换效率和风轮机的平稳输出,把风轮机的桨距进行调整。风力发电机中桨叶的控制方式主要有两种:一种是定桨距风机,另一种是变桨距风机。变桨距控制系统一般用式(4)表示。

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{1}{\tau} (\beta_{ref} - \beta) \quad (4)$$

式中:  $\beta$  为桨距角;  $\beta_{ref}$  为由当前转速求得的桨距角的参考值;  $\beta_{ref}$  是  $C_p$  与  $\lambda$  的函数,表示为  $\beta_{ref} = \zeta(C_p, \lambda)$ ;

$\lambda$ );  $\tau$  为变桨距控制系统的惯性时间常数。

### 1.3 异步发电机的模型

大量的研究表明,异步发电机的三阶机电暂态模型能较准确地描述其动态过程,如式(5)所示<sup>[8]</sup>。

$$\begin{cases} T'_{d0} \frac{dE'_x}{dt} = -E'_x + (X - X') I_{sy} + 2\pi f_0 S T'_{d0} E'_y \\ T'_{d0} \frac{dE'_y}{dt} = -E'_y + (X - X') I_{sx} + 2\pi f_0 S T'_{d0} E'_x \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $E'$  为暂态电势 (p. u.);  $E'_x$ 、 $E'_y$ 、 $I_x$ 、 $I_y$  分别是暂态电势的实部和虚部、定子电流的实部和虚部;  $X = X_1 + (X_2 X_m / X_2 + X_m)$  为等效暂态电抗 (p. u.);  $T'_{d0} = (X_2 + X_m) / 2\pi f_0 r_2$  为转子绕组的时间常数;  $s$  为转差率。

异步发电机的转子运动方程为

$$\frac{ds}{dt} = \frac{1}{T_j} (M_E + M_m) \quad (6)$$

式中:  $M_m$  为发电机的机械转矩;  $M_E$  为电磁转矩;  $T_j$  为发电机的转子惯性时间常数。于是发电机的电磁转矩方程为

$$\begin{cases} P_e = -R_e [\dot{E}' \dot{I}_s] \\ M_e = P_e / \omega \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $P_e$  为发电机的电磁功率 (p. u.);  $R_e$  表示取实部;  $\omega$  为发电机角速度 (p. u.)。

## 2 基于 Matlab/Simulink 的异步风电场仿真

### 2.1 仿真系统概述

应用 Matlab/Simulink 仿真环境搭建的仿真系统模型,以某个风电场中的8台额定容量为1.5 MW的鼠笼式风力发电机组为例,系统拓扑结构如图2所示。其中将每两台鼠笼式异步风力发电机当作1台  $2 \times 1.5$  MW 的鼠笼式异步风力发电机组来看,于是,风电场有3台  $2 \times 1.5$  MW 风力发电机组构成的总装机容量为9 MW 的模型。每台  $2 \times 1.5$  MW 风力发电机组的出口电压为575 V,经过升压变压器将其升压到25 kV,然后通过25 km 双回输电线路输送,并与120 kV 无穷大系统相连。

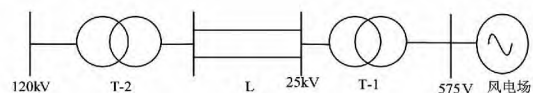


图2 笼型异步风力发电系统图

## 2.2 仿真分析<sup>[9-11]</sup>

首先研究了电压失稳机理,然后分别对风速扰动、线路断线故障以及线路短路故障3种状况下对风电系统的动态过程进行仿真,并且分析其对风电系统的稳定性和规律。

### 2.2.1 电压失稳机理研究

1) 把25 km的输电线路假设成单回输电线路,在仿真过程中风速保持额定风速不变,额定风速为9 m/s,  $t=3$  s时输电线路出现三相短路故障,0.12 s后切除故障,仿真时长为5 s。

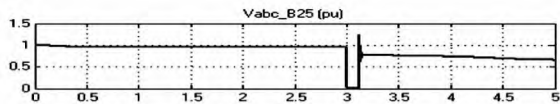


图3 电压失稳机理仿真图

从图3仿真曲线易知,系统发生故障时母线电压大幅下降,0.15 s故障切除后母线电压先有所回升,随后边振荡边电压持续下降,最后电压失去稳定。

2) 与1)同等条件下,增大风电机组惯性时间常数  $H(s)$ ,母线电压的动态仿真图如图4所示。

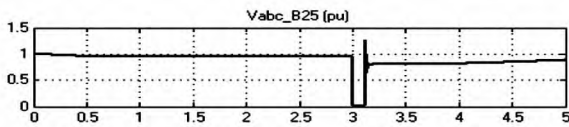


图4 增大风电机组惯性时间常数  $H(s)$  的母线电压仿真图

与图3相比,0.15 s故障切除后母线电压开始回升,紧接着经过短暂振荡持续上升,电压重新恢复到原来的状态,电压依然保持稳定。

### 2.2.2 风速扰动

假设以8 m/s的最初时刻风速开始,经过3 s的上升时间,风速达到11 m/s,但在  $t=2$  s时刻时出现渐变风,渐变风的风速幅值为3 m/s,仿真时间为20 s。

1) 当25 km输电线路为双回输电线路时,进行仿真系统分析,仿真结果如图5所示。

由图5可知,在风电系统双回输电线路状况下,电机的转速和有功功率随着风速的增大而逐渐增大,当风速上升到11 m/s时,风电场出口25 kV母线电压和风力发电机的无功功率随着风速的增大而减小。出现一段时间的波动,随后风力发电机的有功功率、无功功率、风电场出口25 kV母线电压和转速均达到某一稳定值并都稳定下来,因此,系统没失稳。

2) 与1)相同条件下,当25 km的双回输电线路改为单回输电线路时,15 s时发生三相短路,故障

0.1 s后切除。仿真结果如图6所示。

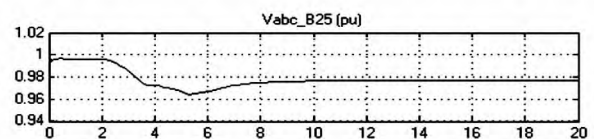
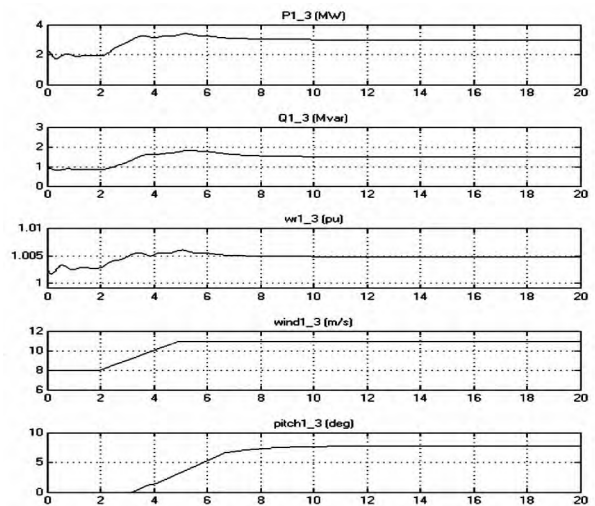


图5 双回输电线路时的风电系统仿真图

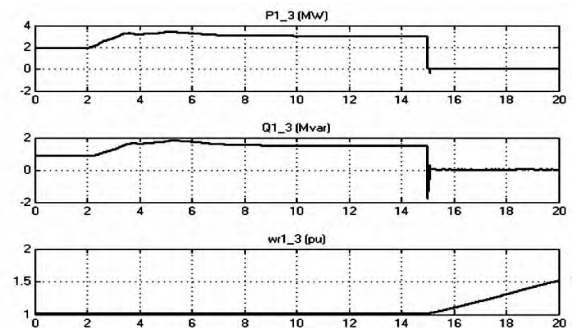


图6 单回输电的风电系统仿真图

由图6得知,输电线路是单回输电线路情况下,当风速上升到11 m/s时,风力发电机的有功功率和无功功率经过一段时间的变化后均迅速下降为0,风力发电机转速逐渐增大,系统崩溃。因此,系统失去稳定。

3) 与1)相同条件下,当风速达到14 m/s时,仿真结果如图7所示。

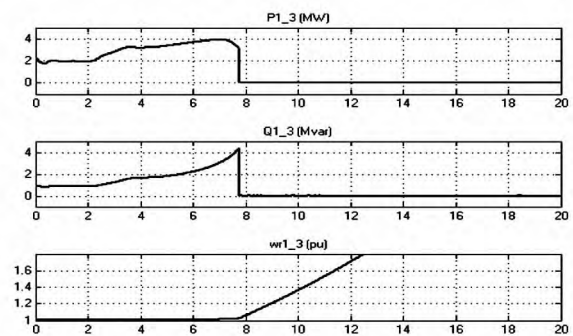


图7 双回输电的风电系统仿真图

由图 7 可知,在输电线路为双回输电线路情况下,当风速上升到 14 m/s 时,双回输电线路系统的性质与以上单回输电线路系统的性质相似。

4) 与 3) 相同条件下,在风电场出口处接入容量为 7 MVA 的无功补偿装置 STATCOM 后进行仿真,仿真时长为 50 s,结果如图 8、图 9 所示。

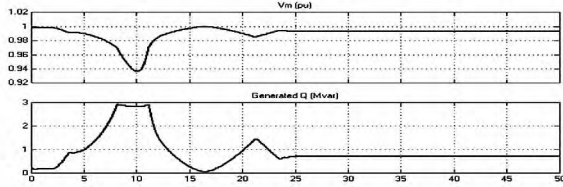


图 8 双回输电的风电系统中的 STATCOM 的仿真图

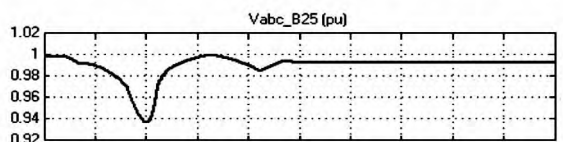
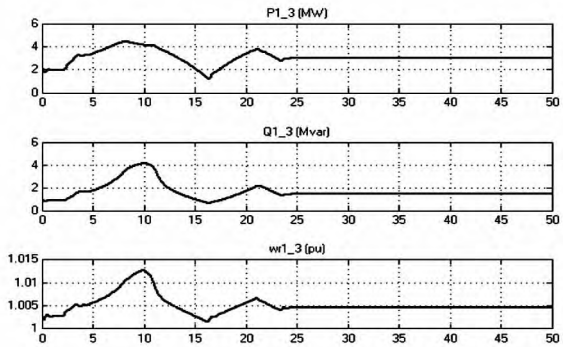


图 9 双回输电的风电系统接入 STATCOM 后的仿真图

由图 8 可知,在仿真过程中无功补偿装置 STATCOM 发出无功。由图 9 可知,在双回输电线路的风电系统接入 STATCOM 的情况下,当风速由 8 m/s 变到 14 m/s 时,随着风速的增大风力发电机的转速和有功功率逐渐增大;同时风力发电机的风电场出口 25 kV 母线电压和无功功率减小,经过一段时间的波动后,所有参数都在某一值稳定下来;因此,整个系统没失稳。

### 2.2.3 断线故障过程仿真

假设仿真过程中额定风速保持 9 m/s 不变,当仿真运行到 4 s 时,在 25 km 双回输电线路中的其中一回发生断线故障,仿真结果如图 10 所示。

由图 10 可知,当双回输电线路其中一回发生断线故障时,风力发电机的各个参数经过一段时间的波动后,都在某一稳定值附近稳定下来,因此,系统没有失稳。

### 2.2.4 短路故障

假设风速保持在额定风速 9 m/s 不变,当系统运行到 6 s 时,发生短路故障,仿真时间为 20 s。

1) 当近母线端发生三相短路故障时,系统运行到 0.09 s 后切除故障,仿真结果如图 11 所示。

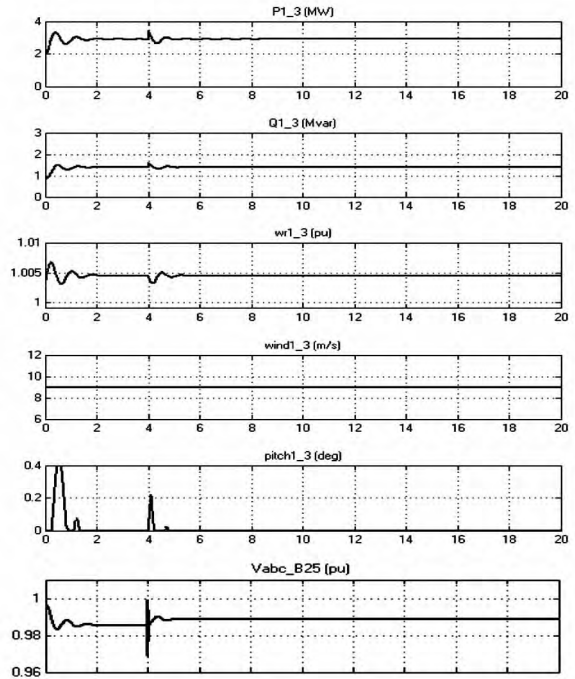


图 10 双回输电线路中的其中一回发生断线故障后的仿真图

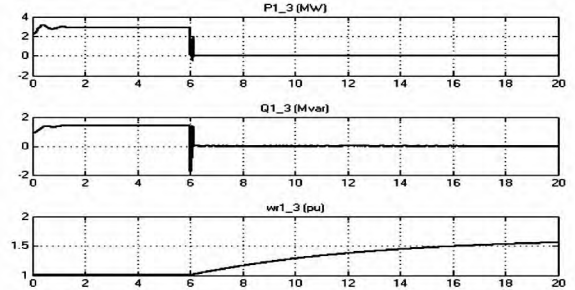


图 11 近母线端发生三相短路故障时的系统仿真图

由图 11 可知,在近母线端 6 s 时发生三相短路故障的情况下,风力发电机的有功功率和无功功率在一段时间的变化后均立刻下降为 0,发电机的转速会不断增大,系统崩溃。因此,整个系统失稳。

2) 在近母线端发生单相接地短路故障时,故障 0.09 s 后切除,系统仿真结果如图 12 所示。

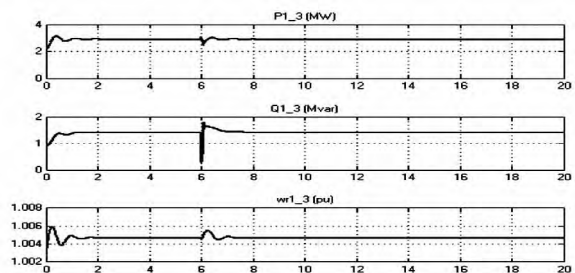


图 12 近母线端发生单相接地短路故障时的系统仿真图

由图 12 得知,近母线端 6 s 时发生单相接地短

路故障的情况下,当故障切除时间为 0.09 s 时,风力发电机的有功功率和无功功率以及转速在在一段时间的上下波动后,其都在某一稳定值范围稳定下来。因此,整个系统没有失稳。

3) 在远离母线端发生三相短路故障时,故障 0.09 s 后切除,系统仿真结果如图 13 所示。

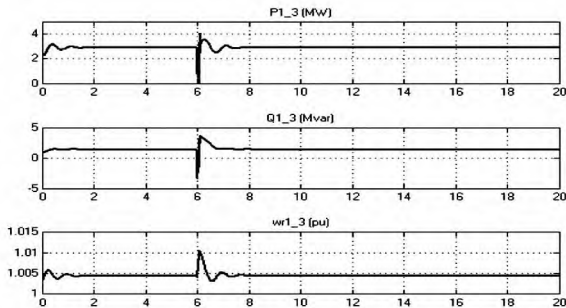


图 13 远母线端发生三相短路故障时的系统仿真图

由图 13 得知,在远母线端发生三相短路故障的状况下,其性质与近母线端发生单相接地短路故障时的性质相似。

4) 与 1) 相同条件下,在风电场出口接入 7 MVA 的无功补偿装置 STATCOM 后进行仿真,其结果如图 14、图 15 所示。

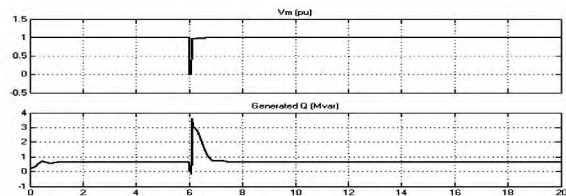


图 14 风电系统中的 STATCOM 仿真图

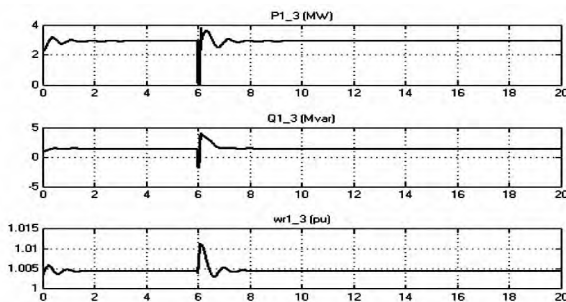


图 15 风电场出口接入 STATCOM 后系统的仿真图

由图 14 得知,在仿真过程中无功补偿装置 STATCOM 发出无功;由图 15 得知,当近母线端 6 s 时发生三相短路故障时,风电系统接有无功补偿装置 STATCOM 下的性质与以上的性质相类似。

5) 与 4) 相同条件下,故障 0.12 s 后切除,系统仿真结果如图 16、图 17 所示。

由图 16 得知,在仿真过程中无功补偿装置 STATCOM 发出负无功;由图 17 得知,当故障切除时

间为 0.12 s 时,风力发电机的有功功率和无功功率在一段时间的变化后迅速下降为 0,发电机转速不断增大。因此,整个系统失稳。

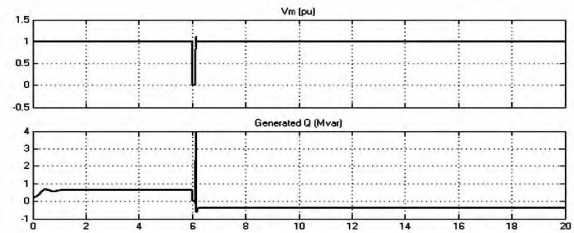


图 16 近母线端发生三相短路故障时  
风电系统的 STATCOM 仿真图

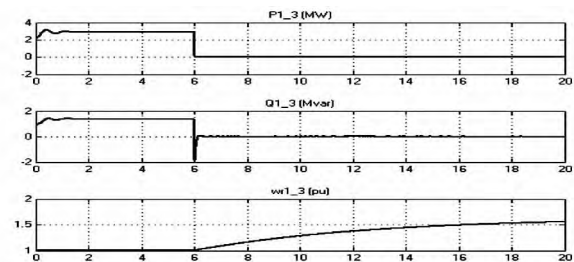


图 17 近母线端发生三相短路故障时  
接入 STATCOM 后系统的仿真图

### 3 结 论

对由笼型异步风力发电机组组成的简单风电系统进行了动态仿真分析。主要结论如下:

1) 由于鼠笼式风力发电机相当于一个无功负荷,需要从系统中吸收无功功率,所以需要在风电场出口安装无功补偿装置,这里选择用 STATCOM,通过仿真结果易知,对于一个失稳的风电系统,当接有无功补偿装置后,可以达到系统稳定运行。

2) 在相同风速扰动情况下,双回输电线路比单回输电线路更有利于系统的稳定。因此,优化设计输电线路、增强线路的网架结构,有利于风电系统的稳定。

3) 在相同的故障点和故障切除时间情况下,故障越严重越会影响系统稳定性。

4) 在相同故障情况下,系统故障切除时间越短,越有利于风电系统的稳定。

针对以上结论,提出以下几种提高鼠笼式异步风力发电系统的稳定性的措施: 1) 改善风电机组的机械参数; 2) 优化网架结构; 3) 采用变桨距控制; 4) 添加动态制动电阻; 5) 添加动态无功补偿装置; 6) 快速切除故障。

(下转第 28 页)

数 231 C - T1 通道即为安装在 C 相间隔组合气室与母线气室间盆式绝缘子的超声波探头,图 13( b) 显示放电类型为盆式绝缘子放电。由于故障电流较大,1 号主变压器保护动作,GIS 设备停电,放电现象消失,所以只能对放电初期信号进行采集。

将故障间隔 GIS 转检修后解体检查,发现绝缘子内部出现长且深的裂纹,与超声波检测系统检测结果一致。

## 6 结 论

所设计的基于 TMS320 单片机的 1 000 kV GIS 超声波在线检测系统,采用空间时间差的方法进行局部放电故障定位,采用灵敏度高的超声波传感器和基于 AD620 的前置放大电路图,通过带通滤波器排除外界振动干扰,能够有效检测金属尖端、自由颗粒、悬浮电、盆式绝缘子故障等绝缘缺陷,但此检测法现场要在 GIS 外壳和盆式绝缘子上安装多个传感器。

### 参考文献

[1] 邱毓昌. GIS 装置及其绝缘技术[M]. 北京: 水利电力出版社, 1994.

(上接第 14 页)

### 参考文献

[1] 张瑞明, 张新燕. 基于普通异步发电机和双馈风力发电机静态数学模型的系统静态电压稳定性研究[J]. 电网技术, 2011( 1): 175 - 179.

[2] 闫存富, 孔令云, 路素青. 小型风力发电机常见故障分析[J]. 电源技术, 2014( 12): 2451 - 2452.

[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.

[4] 范高峰, 赵海翔, 王伟胜, 等. 基于恒速风电机组的风电场并网过程仿真[J]. 电网技术, 2007, 31( 14): 20 - 23.

[5] 辜承林, 陈乔夫, 熊永前. 电机学第二版[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2005.

[6] DlgSILENT Gmb H. Dynamic Modelling of Doubly - fed Induction Machine Wind Generators [R]. Technical RePort , Aug 2003.

[7] 李钢, 慈建斌, 李洪星, 等. 基于 PSCAD/EMTDC 的风

出版社, 1994.

[2] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京: 中国经济出版社, 2005.

[3] 周广, 刘勇, 金正波, 等. 1 000 kV HGIS 在线特高频技术在局放监测的应用[J]. 华中电力, 2011, 24( 5): 57 - 62.

[4] Lundgaard, L. E., G. Tangen, B. Skyberg, et al. Acoustic Diagnosis of GIS; Field Experience and Development of Expert System [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2013, 28( 1): 287 - 293.

[5] 罗勇芬, 孟凡凤, 李彦明. 局部放电超声波信号的检测及预处理[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40( 8): 964 - 968.

[6] Hasegawa y, Izumi K, Kobayshi A, et al. Investigation on Phenomena Caused by Insulation Abnormalities in Actual GIS [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9( 2): 796 - 804.

作者简介:

汤会增(1982), 硕士研究生、工程师, 从事电力设备在线检测技术研究和超特高压变电运维管理工作。

(收稿日期: 2015 - 11 - 19)

光互补并网发电系统建模与仿真[J]. 电源技术, 2014( 10): 1893 - 1897.

[8] 院海, 晁勤, 吐尔逊. 基于 PSCAD 的并网型风机建模及仿真[J]. 可再生能源, 2008, 26( 2): 15 - 18.

[9] Trudnowski D J, Gentile A, Khan J M, et al. Fixed Speed Wind Generator and Wind Park Modeling for Transient Stability Studies [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19( 4): 1911 - 1917.

[10] 魏巍, 王渝红, 李兴源, 等. 大型风电场建模及接入甘肃嘉酒电网仿真分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33( 18): 96 - 101.

[11] 韩肖清, 胡月星, 张伟, 等. 基于 MATLAB 的并网风电场动态仿真[J]. 太阳能学报, 2008( 2): 175 - 179.

作者简介:

赛尔山伙加·居曼(1989), 硕士, 主要研究风发电及并网技术;

张新燕(1964), 博士研究生、教授、硕士生导师, 主要从事风力发电技术、风机并网故障分析、故障诊断等方面的研究工作。

(收稿日期: 2015 - 11 - 12)