

基于 PSAT 的风机接入电网模型的研究*

娄尧林¹, 吴晨曦², 李明富¹, 姜偕富²

(1. 浙江运达风电股份有限公司 风力发电系统国家重点实验室, 浙江 杭州 310012;

2. 杭州电子科技大学 自动化学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 为了分析不同类型的风机接入电网后, 能否与已有电网兼容的问题, 在分析了电力系统仿真软件 PSAT 内置的 5 阶双馈风力发电机组模型及其电压、转速和桨角的控制形式的基础上, 根据某 1.5 MW 双馈风机的机械及电气数据, 建立了风机接入电网模型及接入电网的典型接线形式, 并在潮流计算模块与时域计算功能模块的基础上, 编制了仿真程序, 最后在阵风与湍流风模型下对风机转速、电压、功率的变化进行了动态仿真。仿真及研究结果表明, 运用该方法分析所得结果与实际的风机特性一致, 利用 PAST 内置的风机模型能很好地进行风机接入电网的兼容性分析。

关键词: 风力发电; 电网; 风机模型; 双馈发电机; PAST; 潮流计算

中图分类号: TM614; TH122

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)07-0829-04

Wind turbine grid model based on PSAT

LOU Yao-lin¹, WU Chen-xi², LI Ming-fu¹, JIANG Xie-fu²

(1. State Key Lab of Wind Power System, ZheJiang Windey Co., Ltd., Hangzhou 310012, China;

2. College of Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to analyze that, the different types of wind turbine connected to the grid, whether it is compatible with the existing power grid. After the analysis of inner couplers 5 orders doubly-fed wind turbine model in power system analysis tool (PSAT) and its voltage, speed and pitch angle control forms, using a 1.5 MW doubly-fed wind turbine's mechanical and electrical parameter, a wind turbine connected to the grid model and a typical wiring in the form of a turbine connected to the grid were established. Based on functional modules of the flow calculation and time-domain calculation module, the simulation program was finished. With the gust and turbulence wind model, the dynamic simulation of the speed, voltage, power changes was done. The simulation results show that, it is consistent with the actual characteristics of the wind turbine, the PAST built-in wind turbine grid connected model can be used to the grid compatibility analysis.

Key words: wind energy; grid; wind turbine model; double-fed generator; power system analysis tool (PAST); power flow calculation

0 引言

在进行风电场最大注入功率分析^[1]、含风电场的电网稳定性分析^[2]、电网故障分析^[3]时, 需要分析风机电网模型。目前, 已有不少关于风力发电机组模型研究的文献发表。文献[4]用风机各个机械件和电气件进行建模, 在不同的风速下, 分析了线性化不同的模型; 文献[5]总结了风力发电机组中风轮、传动链、发电机、电力电子变频器以及控制和保护系统等重要环

节的暂态仿真模型, 并讨论了相关模型在风电并网问题研究中的应用方式; 文献[6]给出了双馈机组的 8 阶、5 阶和 3 阶模型, 在 Matlab/Simulink 软件上实现了 3 种模型建模与仿真, 5 阶模型适合大多数既要求较快仿真速度又要求较高精度的研究; 文献[7]以电力系统电磁暂态分析软件 EMTP/ATP 为平台, 采用电机矢量控制技术以及比例、积分调节器串联校正等方法建立了双馈风力发电系统的电磁暂态仿真模型; 文献[8]以电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 为平台, 应用电机矢量控制原理与比例-积分调节器串联校正等

收稿日期: 2012-01-05

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)资助项目(2012CB724404)

作者简介: 娄尧林(1977-), 男, 浙江绍兴人, 主要从事风力发电控制系统、分布式发电方面的研究. E-mail: louyl@chinawiney.com

方法建立基于双馈感应发电机的变速风电机组控制系统模型,并将该模型与 PSCAD/EMTDC 模型库中的已有模型相结合,形成基于双馈感应发电机的变速风电机组动态模型。

这些模型各有特点,但有的是针对风机的载荷计算与风机核心控制器设计的,有的是针对风机内部的局部控制优化设计的,有的是针对电气部分的电磁特性设计的,有的只是在电力系统仿真软件内建立风机模型进行仿真,其正确性有待验证。然而,针对风机接入电网的仿真模型,目前并不多见。

基于上述背景,基于电力系统分析工具包 PSAT,本研究分析双馈风力发电机模型,根据国内某风力发电机组制造厂商的成熟的 1.5 MW 双馈风力发电机组设置参数,进行不同风速模型下风电机组的电压、转速、功率特性的仿真。

1 基于 PSAT 的风机电网模型

PSAT 是近几年开发的一种基于 Matlab 的电力系统静态和动态分析及控制工具箱,它提供如下功能:潮流计算、连续潮流计算、最优潮流计算、小信号稳定性分析和时域仿真等。PSAT 具有 GUI 界面,可以利用 Simulink 元件模型绘制电网接线图。PSAT 的 Simulink 模型中含有风速模型和风机模型,风机模型包括定速风力发电机模型,双馈风力发电机模型和直驱风力发电机模型。本研究采用最常见的双馈风力发电机组进行同机接入电网的建模与仿真。

1.1 双馈风力发电机组模型及参数

双馈发电机组原理框图如图 1 所示。风轮通过齿轮箱连接到双馈感应发电机,发电机通过变频器与电网连接,并实现与电网的解耦。

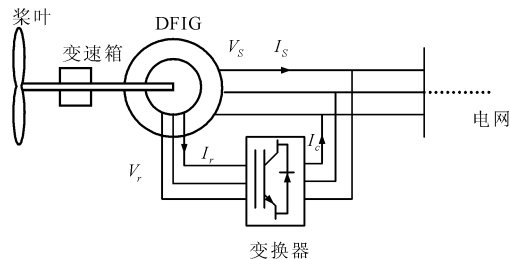


图 1 双馈风力发电机组框图

PSAT 软件所内置的风机模型为 5 阶模型^[9],其 5 个状态变量分别为风速、直轴电流、交轴电流、风轮角速度、风机功角。由于换流器相对于机电暂态过程的快速响应,简化了换流器的动态方程。换流器被看作是理想电流源, i_{dr} 、 i_{qr} 分别为用于转子转速控制和电压控制的两个状态变量(如图 2、图 3 所示),其桨距角控制如图 4 所示。

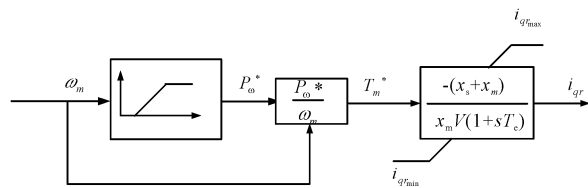


图 2 转子角速度控制框

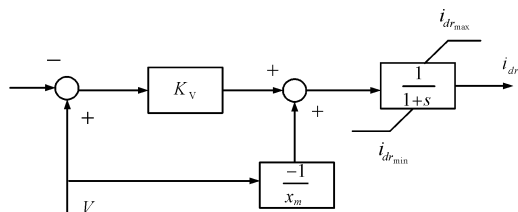


图 3 电压控制框图

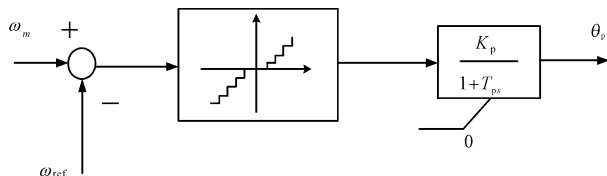


图 4 桨角控制原理

本研究针对国内某 1.5 MW 的双馈风力发电机组进行参数设置:三桨叶,桨叶长度为 37.5 m;轮毂中心高度为 65 m;齿箱速比为 104.5:1;额定功率为 1 500 kW,电压等级为 690 V。本研究在 PSAT 软件环境里设置的该发风力发电机模型如表 1 所示。

1.2 单个风机接入电网的典型形式

目前,国内常见的风机一般在风机出口处通过箱式变压器升压到 10 kV,多个风机汇集到风场升压站,电压等级升为 110 kV 或者 220 kV 与电网相连。本研究在 PSAT 中建立的系统接线图如图 5 所示,BUS1 为 PV 节点。

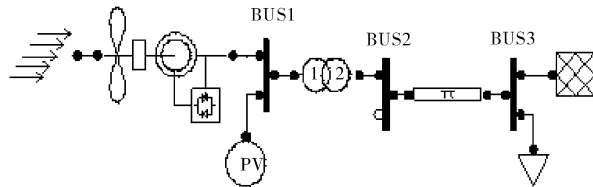


图 5 系统接线图

2 单个风机接入电网的仿真

2.1 方法

本研究利用 PSAT 软件现有的潮流计算程序与时域仿真功能模块,仿真步骤如下:

表 1 双发风力发电机组电气参数

序号	变量	变量描述	单位	参数值
1	S_n	额定功率	MVA	1.5
2	V_n	额定电压	kV	0.69
3	f_n	额定频率	Hz	50
4	r_s	定子电阻	p. u.	0.010 1
5	x_s	定子电抗	p. u.	0.074 7
6	r_R	转子电阻	p. u.	0.003 1
7	x_R	转子电抗	p. u.	0.009 8
8	x_m	励磁电抗	p. u.	5.690 3
9	H_m	风轮转动惯量	kWs/kVA	3
10	K_m	变桨控制增益	-	200
11	T_n	变桨控制时间常数	s	2
12	K_V	电压控制增益	-	0.1
13	T_ζ	功率控制时间常数	s	0.01
14	R	风轮半径	m	37.5
15	p	发电机极数	Int	4
16	n_b	桨叶数量	Int	3
17	η_{GB}	齿箱速比	-	1/104.5
18	$P_{\max}$	最大有功功率	p. u.	1.2
19	$P_{\min}$	最小有功功率	p. u.	-0.1
20	$Q_{\max}$	最大无功功率	p. u.	0.8
21	$Q_{\min}$	最小无功功率	p. u.	-0.7

(1) 设定 PV 节点的初始化有功与电压幅值, 并进行潮流计算, 推算出初始风速;

(2) 以第(1)步求得的初始风速为开始值, 按预定要求设置风速时间序列。风速可以是恒定风速、湍流风、IEC 陈风等;

(3) 利用时域仿真程序, 求解风机在初始状态及给定风速下风机的动态特性。

2.2 风机发电机转速、机端电压、功率的验证

本研究采用了两种风速模型来验证风力发电机组的动态特性:

(1) 风速为阵风, 或者称为墨西哥草帽风, 作为一种极端风速来验证风机的转速及功率等参数的控制情况。该阵风从第 12 s 开始, 持续时间为 8 s, 最大幅值变化为 6 m, 动态响应如图 6 所示。从图 6 所示的转速图上看, 风机转速先是下降, 然后快速上升, 最大发电机转速为额定转速的 0.85 倍, 风机并未出现超速停机(超速停机的限制为 1.1 倍的额定转速)。功率与功角也随着风速的变化, 急剧发生变化, 但极限值均在正常运行范围内, 而且风速稳定后, 这些量并未出现长时间的振荡或者扰动, 说明该风机控制稳定, 而电压的幅值基本不随风速的变化而变化。

(2) 风速服从威布尔分布, 平均风速为 7.5 m/s, 形状系数为 2。风力发电机组的转速、电压、功率及功角都出现了快速变化, 其动态响应如图 7 所示。但各个参量均在合理的范围内, 即均未超出最大值或者最

小值。而且可以观察到风机的各个状态变量, 均未出现大的振荡。

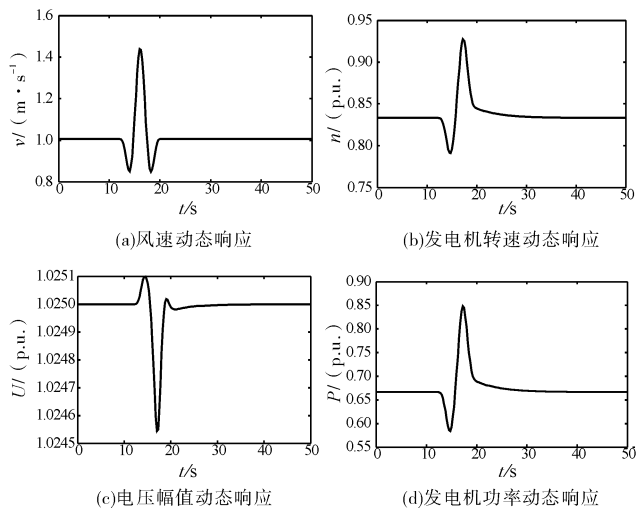


图 6 阵风作用下, 发电机转速、电压、功率的动态响应

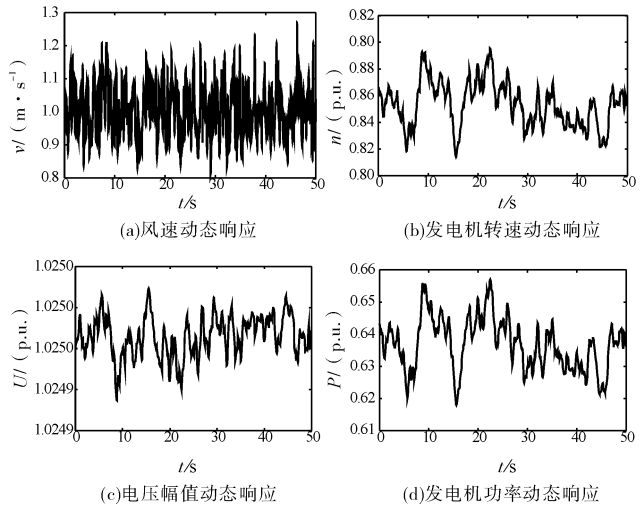


图 7 湍流风作用下, 发电机转速、电压、功率的动态响应

2.3 风机功率曲线仿真

功率曲线是风力发电机组的设计依据, 也是考核机组性能、评估机组发电能力的一项重要指标^[10]。它是发电机输出功率与风速的对应曲线, 反映了风力发电机组的发电效率。功率曲线有动态功率曲线和静态功率曲线。在 PSAT 软件里, 用户可以根据风机模型验证风机动态或静态功率曲线。本研究在这里介绍用于静态功率曲线验证的一个方法。针对如图 5 所示的系统, 本研究设置 PSAT 风速模型为组合风速, 让风速经过斜坡变化(1 m/s, 2 m/s, ..., 25 m/s)进行时域仿真, 求得风速变化时双馈风力发电机的功率曲线, 如图 8 所示。

由图 8 可以看出, 该风机模型在风速达到 3.5 m/s 左右, 风机才能开始发电。而风速达到 11.2 m/s, 才能进

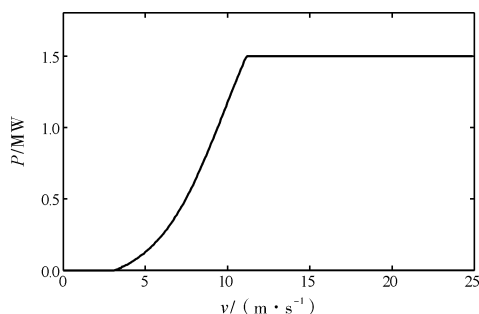


图 8 风机功率曲线图

行满功率发电。该参数基本与风机的实际设计参数一致,表明了风机模型及控制方法的正确性。

3 结束语

本研究提出了利用 PSAT 内置的风机电网模型,根据国内某 1.5 MW 双馈风力发电机组实际设计参数进行了建模,并在两种不同的风速模型下,对风机的转速、电压、功率和功角的动态特性进行了仿真,并对风机的功率曲线模型也进行了仿真。

本研究的主要贡献是:①探讨了风机接入电网的模型,利用 PSAT 软件进行了风机与电网接口的仿真;②以实际的风机设计数据为基础,进行了风机在不同风速模型下的转速、电压、功率与功角的动态响应曲线的仿真;③根据风机接入电网模型,仿真了风机的功率曲线;④利用该风机模型,对风电场的电网接口的

仿真进行了一些初步研究。

参考文献 (References):

- [1] 吴俊玲,周双喜,孙建锋,等. 并网风力大电场的最大注入功率分析[J]. 电网技术, 2004, 28(20): 28-34.
- [2] 张义斌,王伟胜,戴慧珠. 基于 P-V 曲线的风电场接入系统稳态分析[J]. 电网技术, 2004, 28(23): 61-65.
- [3] 向大为,杨顺昌,冉立. 电网对称故障时双馈感应发电机不脱网运行的系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(10): 130-135.
- [4] BOSSANYI E A. GH Bladed Theory Manual 3.82[R]. UK-Bristol: Grand Hassan and Partner Limited, 2009: 13-36.
- [5] 许寅,陈颖,梅生伟. 风力发电机组暂态仿真模型[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(9): 100-107.
- [6] 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.
- [7] 李鹏程,叶林. 基于 EMT_PAT 的双馈式风力发电系统的模型与实现[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(14): 93-98.
- [8] 冯双磊,赵海翔,任普春,等. 基于 PSCAD/EMTDC 的双馈式变速恒频风电机组动态模型仿真[J]. 电网技术, 2007, 31(17): 30-35.
- [9] MILANO F. Power System Analysis Toolbox Documentation for PSAT version 2.0.0[R]. Canada: University of Waterloo, 2006.
- [10] 申新贺,潘东浩,唐继光. 大型风电机组功率曲线的分析与修正[J]. 应用能源技术, 2009(8): 28-34.

[编辑:李 辉]

(上接第 824 页)

数随运行时间长短、工况不同具有一定的不确定性,本研究利用梯度校正参数估算法迭代计算得到转动惯量 J ,从而可以实时修正负载转矩观测器模型。

参考文献 (References):

- [1] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京:机械工业出版社,1997.
- [2] 骆再飞,蒋静坪,曹芳. 交流伺服系统的动态模糊滑模控制策略研究[J]. 机电工程, 2008, 25(11): 68-71.
- [3] 宋亦旭,王春洪,尹文生,等. 永磁直线同步电动机的自适应学习控制[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(20): 151-156.
- [4] 杨依楠,徐进学,王向东. 基于扩张状态观测器的 PMSLM 自抗扰控制[J]. 机电工程, 2008, 25(4): 87-90.
- [5] 刘丙友,凌有铸,杨会成. 基于 H_∞ 控制理论的交流伺服系统控制器设计[J]. 机电工程, 2009, 26(11): 31-33.
- [6] LEE K B, YOO J Y, SONG J H, et al. Improvement of low speed operation of electric machine with an inertia identification using ROELO[J]. **Electric Power Applications, IEE Proceedings**, 2004, 151(1): 116-120.
- [7] XU Dian-guo, WANG Hong, SHI Jing-zhuo. PMSM Servo

System With Speed and Torque Observer[C]//Power Electronics Specialist Conference, 2003. Acaquelco: [s. n.], 2003: 241-245.

- [8] ZHANG Bi-tao, PI You-guo. Enhanced Sliding-Mode Control for Permanent Magnet Synchronous Motor Servo Drive[C]//Control and Decision Conference (CCDC), Taiyuan: [s. n.], 2011: 122-126.
- [9] 杨书生,钟宜生. 永磁同步电机转速伺服系统鲁棒控制器设计[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(3): 84-90.
- [10] LI Hong-kui, WANG Qing-lin. Self-tuning Controller for Servo Motor with an Adaptive Disturbance Observer[C]//2nd International Conference on Advanced Computer Control (ICACC). Harbin: [s. n.], 2010: 277-281.
- [11] ZHENG Ze-dong, FADEL M, LI Yong-dong. A High-Performance Control System of PMSM based on Load Torque Observer[C]//Power Electronics Specialists Conference 2007. Orlando: [s. n.], 2007: 587-592.
- [12] 庞中华,崔红. 系统辨识与自适应控制[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2009.

[编辑:李 辉]