

风机接入对系统阻尼特性影响的研究

申盛召¹ 姚秀萍^{1,3} 王维庆^{1,2} 常喜强³ 张东明¹

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047;

2. 教育部可再生能源发电与并网控制工程技术研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830047;

3. 新疆电力调度通信中心, 新疆 乌鲁木齐 830001)

摘要:大规模风电接入电网后,其运行对系统的小干扰稳定性将产生一定的影响,为研究风电在不同运行工况对系统动稳定性的影响。基于 CEPRI9v6 系统算例针对风电场的接入进行了小干扰稳定性仿真研究。深入分析了风电机组在典型阵风、渐变风、随机噪声风速扰动情况下,恒速异步风力发电机组、变速恒频风力发电机组分别接入系统时对系统阻尼特性的影响,并且通过系统仿真算例,验证了分析结果,为大规模风电并网时风电机组选型以及系统稳定分析提供了建设性意见。

关键词:恒速异步风力发电机组; 变速恒频风力发电机组; 风速扰动; 阻尼特性

Abstract: The small signal stability of power grid will be influenced as a result of large - scale wind farms integration into power system. In order to study the impacts of wind power on dynamic stability of the system in different operating conditions , the small signal stability is simulated and researched based on a simple CEPRI9v6 power system aiming at the integration of wind farms. The effects of grid integration of constant speed wind turbine generators and variable speed wind turbine generators on damping characteristics of power system under various wind speed disturbances such as the typical gust wind , ramp wind and noise wind for different wind turbine generators are analyzed respectively. The given analysis results are verified by simulation results of actual power system. The results provide the constructive suggestions for the selection of wind turbine generators during the integration of large - scale wind power system and the analysis of system stability.

Key words: constant speed wind turbine generator; variable speed wind turbine generator; wind speed disturbance; damping characteristics

中图分类号: TM711 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2013)05 - 0001 - 04

0 引言

大规模风电机组并入电网,由于风电是一种间歇性能源,风电场一般位于电网末端,远离负荷中心,周围缺少火电和水电等其他电源的支撑和调节,大规模风电经过远距离输送接入电网后运行方式因风电有无出力而改变了系统特性,风电是否会引起系统的负阻尼和弱阻尼以及对系统阻尼性的影响程度与哪些有关需进行进一步的研究和分析,从而保证系统稳定运行,更大程度地接纳风电。

目前,风电机组常用的有3种,鼠笼式异步风力发电机属于恒速恒频风力发电系统,双馈和直驱风力发电机属于变速恒频风力发电系统,而直驱风机

一般采用多极永磁同步发电机。恒速恒频风力机组的应用相对比较早,许多学者对其并入电网后系统的稳态特性已经做过大量的研究。文献[3]分析了鼠笼异步风电机组的模型,并运用特征值分析的方法进行风电机组的小干扰稳定研究。而中国目前大量研发的风电机组属于变速恒频的风力发电机组,主要有双馈式感应风电机组和直驱式永磁同步风电机组两种类型。对于双馈式感应风机并入电网后系统的阻尼变化情况,有些文献也做过研究,文献[4]简单分析了双馈式感应风机在不同风电出力情况下系统阻尼特性的变化情况。虽然目前很多文献对风电场系统的小干扰稳定问题进行了分析,但主要集中在对鼠笼式异步风力发电机的研究,而对于变速恒频风电机组对系统的阻尼特性研究相对较少,并且没有涉及到不同风速扰动情况下各种风机的小干

基金项目: 国家自然科学基金项目(51267017); 教育部创新团队项目(IRT1258)

扰稳定。

下面分别对鼠笼式异步风机、变速恒频风机并入电网后系统的阻尼特性进行分析,详细研究了不同风速、不同风电出力情况下系统阻尼特性的变化情况,并且通过实际系统仿真算例验证了分析结果,为以后建设风电场并网时风电机组的选型提供参考建议。

1 风电机模型

1.1 鼠笼异步风力发电机组模型

鼠笼异步风力发电机基本环节包括:风能的吸收和转换装置——风力机;起连接和传动作用的装置——轮毂、齿轮箱和传动轴;能量转换装置——异步发电机。其转子转速基本恒定,并网后定子频率与电网一致,且大多数鼠笼式风机设计为定桨距模型如图1所示。

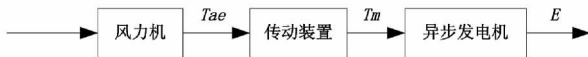


图1 鼠笼异步风电机模型图

1.2 变速恒频风电机模型

双反馈和直驱风力发电机属于变速恒频风力发电系统,其转子转速可以在较大范围内变化。双反馈风机并网后电机定子频率与电网一致,转子通过变频器与电网相连。直驱风机一般采用多极永磁式同步发电机,定子通过变频器与电网相连。大多数变速恒频风机设计为变桨距模型如图2所示。其基本环节包括:风力机、起连接和传动作用的装置、发电机、风电机控制系统。

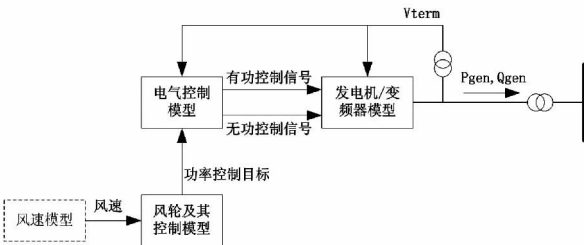


图2 变速恒频风电机模型图

2 小干扰稳定计算分析方法

电力系统小干扰稳定是指系统受到小干扰后,不发生自发振荡或非周期性失步,自动恢复到起始

运行状态的能力。系统小干扰稳定性取决于系统的固有特性,与扰动的大小无关。

从理论上来说,电力系统的小干扰稳定性相当于一阶动力学系统在李亚普诺夫意义下的渐进稳定性。当前,用于研究复杂电力系统小干扰稳定的方法主要是基于李亚普诺夫一次近似法的小干扰。该方法的基本原理如下。

系统的动态特性由下面一组非线性微分方程组描述。

$$\frac{dx}{dt} = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad i = 1, 2, \dots, n$$

在运行点附近线性化,把各状态变量表示为其初始值与微增量之和。

$$x_i = x_{i0} + \Delta x_i$$

将所得方程组在初始值附近展开成泰勒级数,并略去各微增量的二次及高次项,得

$$\frac{d\Delta x_i}{dt} = \sum_{j=1}^n \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \Delta x_j \quad i = 1, 2, \dots, n$$

将其写成如下矩阵形式。

$$\dot{\Delta X} = A \Delta X$$

上式就是描述线性系统的状态方程,其中A为n×n维系数矩阵,成为该系统的状态矩阵。对于由状态方程描述的线性系统,其小干扰稳定性由状态矩阵的所有特征值决定。如果所有的特征值实部都为负,则系统在运行点是稳定的;只要有一个实部为正的实部特征值,则系统在该运行点是不稳定的;如果状态矩阵A不具有正实部特征值但具有实部为零的特征值,则系统在该运行点处于临界稳定的情况。因此,分析系统在某运行点的小干扰稳定性问题,可以归纳为求解状态矩阵A的全部特征值的问题。

采用电力系统综合稳定程序(PSASP)软件对算例系统进行了小干扰稳定性分析。分别从频域和时域进行了仿真,分析了不同风机类型、不同风速扰动、不同风电运行方式对系统小干扰稳定性的影响。

3 仿真分析

在该算例系统中(见图3),发电机1、2、3均为常规机组,均采用双轴模型且发电机2考虑了调速器、调压器、电力系统稳定器等装置的影响,风电场采用单机等值机的建模方式,风机机端电压为0.69 kV,经过两级升压接入220 kV电网。风机模型分

别采用恒速风电机组、变速恒频风电机组。在仿真过程中,考虑了各个机型的风电场不同出力以及在渐变风、阵风、干扰噪声风等不同风速的情况下详细观察了系统阻尼特性的变化过程。风电场出力的增加通过减小系统的同步发电机出力来平衡且运行方式不变化。文献[5]证明了静态稳定和暂态稳定分析中略去快变量的合理性,指出慢动态量是造成系统失稳的主要原因。因此在进行特征值分析时根据机电回路相关比的大小略去了对系统影响较小的离虚轴较远、衰减较快的特征值。由于分析的是低频振荡问题,只保留了频率在0.2~2.5 Hz范围内的机械-电气(机电)振荡模式对应的特征值,从而选出了跟系统稳定影响最大的特征值进行分析比较。

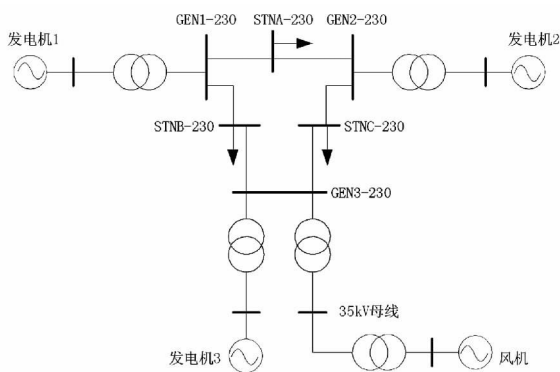


图3 含风电场 CEPRI9v6 算例图

1) 风电场不同出力情况下的阻尼特性

表1、表2列出了两种风机类型出力不同时的主导特征值以及衰减阻尼比。

表1 恒速异步风力机阻尼特性

	特征值	振荡频率	衰减阻尼比
无风电场	-1.787 6 ± 0.723 40	0.115	0.782
风机出力 /40 MW	-1.644 5 ± 0.865 3	0.138	0.841
风机出力 /70 MW	-1.522 1 ± 0.980 8	0.156	0.885
风机出力 /100 MW	-1.390 8 ± 1.107 0	0.176	0.927

从表1的仿真结果可以看出:首先,所有的特征值实部都为负,则系统在运行点是稳定的;其次,风电场接入到电网后,系统的阻尼比比接入前有所增加,即恒速异步风力机组的接入使得系统的阻尼特性有所改善,加强了系统的小干扰稳定;第三,随着风电场出力的增加,系统的阻尼比逐渐增大,即恒速异步风力机组的出力在一定范围内增大,有利于系

统的小干扰稳定。

由于异步发电机不存在功角稳定性问题,当系统发生功率振荡时,异步发电机可以通过转矩-转差特性来适应系统的振荡,能够起到增加系统阻尼的作用。因此,风电场接入电网后,系统的阻尼比有所增加,有利于小干扰稳定性。

表2 双馈式感应风力机阻尼特性

	特征值	振荡频率	衰减阻尼比
无风电场	-1.787 6 ± 0.723 40	0.115	0.927
风机出力 /40 MW	-8.865 9 ± 10.829 3	1.724	0.894
风机出力 /70 MW	-1.343 9 ± 0.673 7	0.107	0.861
风机出力 /100 MW	-1.284 6 ± 0.758 8	0.121	0.633

从表2的仿真结果可以看出:所有的特征值实部都为负,则系统在运行点是稳定的;双馈感应式风电机组接入系统后,系统的阻尼比比接入前有所减小,且随着风机出力的增加,系统阻尼比减小的越大,不利于系统的小干扰稳定。

由于双馈感应发电机是利用变频器控制系统来对转子电流的有功分量和无功分量进行独立控制,实现了发电机输出的有功和无功与连接电网的解耦。当系统发生振荡时,双馈感应发电机的转矩-转差特性对系统的振荡不起作用。因此,双馈风电机组接入电网,不利于系统的小干扰稳定。

2) 风电场不同风速扰动情况下的时域分析

为了分析风速突变情况下各种风机的抗干扰稳定性能,通过PSASP仿真分析软件建立了阵风、渐变风、随机噪声风3种典型风的风速扰动模型,仿真曲线如图4所示。

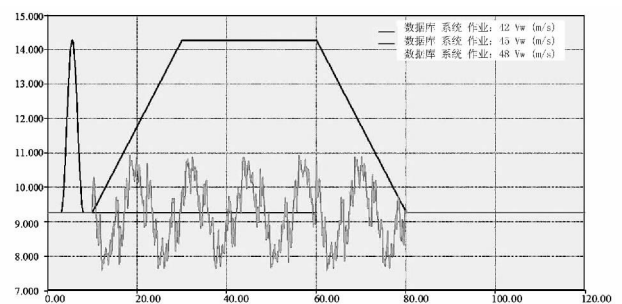


图4 3种典型风扰动曲线

并且在各种风力机组出力相同的条件下,仿真了3种风速扰动时,对系统的小干扰稳定特性。如图5、6、7所示,分别是阵风、渐变风、随机噪声风扰

动时的系统某一母线电压的仿真曲线。

从仿真曲线可以看出,在风电机组出力相同的条件下,3种不同典型风扰动时,变速恒频风力机组的抗干扰性能更好一些。因为鼠笼异步风力发电机组为定桨距角恒速恒频机组,运行中转速基本不变,风力发电机组运行在风能转换最佳状态下的概率比较小,一旦遇到风速扰动,不能自动调节桨距角来适应风速的变化,从而对系统造成的扰动相对较大,不利于系统的小干扰稳定。变速恒频风力发电机组是变桨距角,可以变速运行,运行速度能在一个较宽的范围内调节,使风机风能利用系数得到优化,获得高的利用效率,可以实现发电机较平滑的电功率输出,所以对系统的扰动相对较小,更利于系统的小干扰稳定。

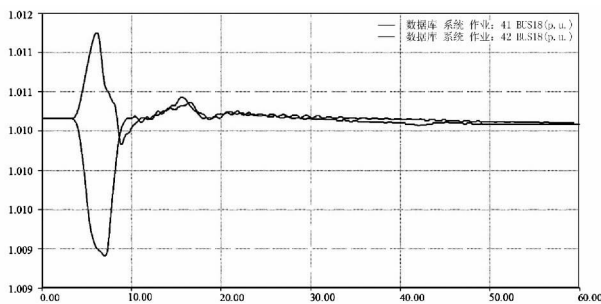


图5 阵风扰动时系统母线电压曲线

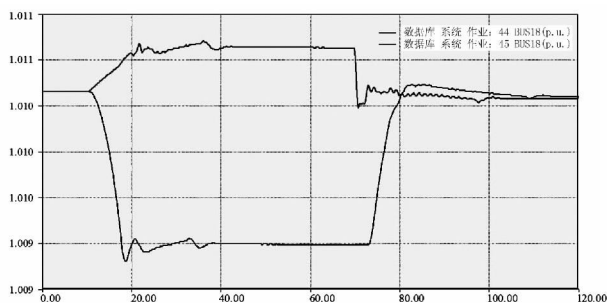


图6 渐变风扰动时系统母线电压曲线

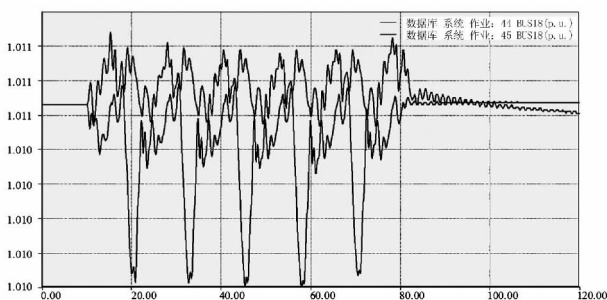


图7 随机噪声风扰动时系统母线电压曲线

4 结 论

详细分析了恒速恒频和变速恒频风力发电机组接入电网后在不同风电出力以及不同风速扰动情况下对系统的阻尼影响。

风机出力不同时,由于异步发电机不存在功角稳定性问题,当系统发生功率振荡时,异步发电机可以通过转矩-转差特性来适应系统的振荡,能够起到增加系统阻尼的作用,系统的小干扰稳定性更好一些。

当风机出力相同,加上风速扰动时,由于变速恒频风机可以变速运行,运行速度能在一个较宽的范围内调节,使风机风能利用系数得到优化,实现发电机较平滑的电功率输出,系统的小干扰稳定性更好一些。

以上分析可以为风电场风机选型以及系统抗干扰性能作一个参考依据,而风机在不同出力以及不同风速扰动共同条件下的小干扰稳定性还需进一步讨论研究。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 汤宏,吴俊玲,周双喜,等. 包含风电场电力系统的小干扰稳定分析建模和仿真[J]. 电网技术, 2004, 28(1): 38-41.
- [3] 关宏亮,迟永宁,戴慧珠,等. 异步风电机组接入系统的小干扰稳定及控制[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(4): 54-58.
- [4] 王忱,石立宝,姚良忠,等. 大规模双馈型风电场的小干扰扰动稳定分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(4): 63-70.
- [5] 刘永强,雷文,吴捷,等. 多时间尺度电力系统的模型降阶及稳定性分析(二): 电力系统的降阶与中长期失稳[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(2): 45-51.

作者简介:

申盛召(1988),男,硕士研究生,研究方向为电力系统稳定与控制;

姚秀萍(1961),女,硕士生导师,高级工程师,研究方向为电力系统稳定与控制、调度自动化。

(收稿日期:2013-06-07)