

The Comparison Study of System Damping Characteristics in Different Models of Doubly Fed Induction Generators*

Qiang Lu, Chongtao Li, Zhengchun Du

School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an
Email: luqiang.ee@stu.xjtu.edu.cn

Received: Nov. 19th, 2013; revised: Dec. 10th, 2013; accepted: Dec. 17th, 2013

Copyright © 2013 Qiang Lu et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. In accordance of the Creative Commons Attribution License all Copyrights © 2013 are reserved for Hans and the owner of the intellectual property Qiang Lu et al. All Copyright © 2013 are guarded by law and by Hans as a guardian.

Abstract: The detailed model of DFIG, which includes the model of turbine, the model of rotor side control (RSC) control and the model of grid side converter (GSC) control. Then the detailed modes are reduced to the different degree to get the reduced modes. The reduced models include three different kinds: neglecting the effect of GSC control, which means that the GSC control is an ideal one; neglecting the effect of rotor transient based on the former kind; neglecting all the dynamic effects of DFIG, which are equivalent to the negative impedance. At last, the 10-generator 39-bus New England system is studied to analyze the damping characteristics of detailed model and different reduced models. The results show that: different models have different deviations of the oscillation mode; the more reduced of the model, the bigger error of the result. To a degree, the reduced models of neglecting GSC control and the zero-axis model can be used to replace the detailed model to analyze the damping characteristics of system.

Keywords: Doubly Fed Induction Generator; Small Signal Stability Analysis; Damping Characteristics; PI Control; Reduced Models

双馈风机不同模型下系统阻尼特性对比分析*

陆 强, 李崇涛, 杜正春

西安交通大学电气学院, 西安
Email: luqiang.ee@stu.xjtu.edu.cn

收稿日期: 2013 年 11 月 19 日; 修回日期: 2013 年 12 月 10 日; 录用日期: 2013 年 12 月 17 日

摘 要: 本文首先介绍了双馈风机的详细模型, 其详细模型包括电机部分的模型、转子侧换流器控制部分模型以及电网侧换流器控制部分模型。然后对双馈风机的详细模型进行不同程度的简化以对其进行降阶。其简化模型包括: 1) 忽略电网侧变换器控制作用, 即认为其控制为理想情况; 2) 在(1)的基础上忽略转子磁链的暂态过程, 即所谓的零轴模型; 3) 忽略所有控制作用的负阻抗模型, 即用一个恒定的阻抗代替双馈风机。最后以新英格兰 10 机 39 节点系统为例, 对比分析了双馈风机采用详细模型及不同简化模型时系统的阻尼特性。分析结果表明, 相对于详细模型, 双馈风机的不同的简化模型得到的振荡模态的误差不尽相同, 模型越详细, 误差越小; 忽略网侧变换器与零轴模型这两种简化模型所得的结果偏差较小, 可以在一定程度上代替详细模型对系统进行阻尼特性分析。

关键词: 双馈风机; 小干扰稳定性分析; 阻尼特性; PI 控制; 简化模型

*资助信息: 国家电网公司科技项目“风火打捆能源基地交直流外送协调控制及安全防御系统研究与示范”。

1. 引言

风能的清洁性、低成本、易扩展等特点使得它能够用于解决日益严峻的环境问题以及不断增加的能源需求问题^[1]。

近年来,全世界的风力发电量不断增加,而中国作为世界能源消耗大国,可再生能源特别是风能的发展速度也不断加快。国家能源局公布的 2012 年数据显示,此年中国风电发电量为 1008 亿千瓦时,同比增长 41%,风电发电量约占全国总上网电量的 2.0%,大量地减少了我家的二氧化碳、二氧化硫等气体的排放量。

随着风力发电的容量在电力系统中所占比重不断增加,其对系统的影响也成为国内外关注的对象。文[2]和[3]在分别考虑或未考虑电网侧变换器作用下,对双馈风机与无穷大系统连接的简单电力系统进行了小干扰稳定性分析。文[4]分析了双馈风机的风轮机部分采用不同的质量块模型时系统的小干扰稳定性,而此时风机采用的是全阶详细模型。文[5]研究了双馈风机在降阶模型下的小干扰稳定性。文[6]对一个三机系统进行了小干扰稳定性分析,考虑了风机的不同运行条件下系统特征值的变化。文[7]探讨了大规模双馈风电场并网后对电力系统小干扰稳定性的影响。

目前双馈风机最广泛采用的是 PI 控制,其转子侧换流器的控制是选择 d 轴与定子磁链的方向一致的 dq 坐标变换,这样可以实现有功功率与无功功率的解耦控制并实现最大风功率追踪^[8]。文[9]中通过优化 PI 控制环节的参数以改善系统的动态性能。由于双馈风机在考虑其所有 PI 环节时,微分方程较多,当大规模风机并网时会使得系统状态矩阵阶数较高,计算分析复杂。而当仅关心系统的阻尼特性时,能否对双馈风机的模型进行适当地简化,使用较低阶的模型进行分析和计算?其近似程度又是如何的?这是本文需要研究的问题。

本文首先给出双馈风机的详细模型,包括风机模型以及控制器模型,然后对详细模型进行了不同程度的简化。简化模型包括:不考虑电网侧换流器的模型、不考虑风机的暂态电势变化作用的零轴模型以及双馈风机使用负阻抗的等值模型。基于以上模型分别计算了新英格兰系统的机电振荡模态,并对各种简化模型下系统的机电振荡模态与精确模型求得的结果进

行了对比分析。

2. 双馈风机的控制模型

双馈风机与电网连接结构图如图 1 所示,其定子侧直接与电网连接,而转子则通过换流器与电网进行连接。转子侧换流器的容量为风机容量的 20% - 30%^[9],可以通过调节转子侧的换流器控制风机与电网交换的有功功率与无功功率。

双馈风机 PI 控制的实现基于自身的 dq 轴坐标变换。转子侧控制器的 dq 坐标选择使 d 轴的位置与定子磁链的方向一致,而电网侧则是 d 轴与定子端电压方向一致。

2.1. 详细模型

2.1.1. 双馈风电机组的模型

与同步发电机类似,双馈风机一般不考虑定子电流的暂态过程,这样风机的暂态可以用两个与转子磁链成正比的暂态电势 E'_{qd} 与 E'_{dq} 来表示,也就是所谓的双轴模型。其微分方程为^[8]:

$$\frac{dE'_{qd}}{dt} = -\frac{1}{T'_0} \left(E'_{qd} + (X_s - X'_s) I_{ds} \right) + \omega_s \left(\frac{X_m}{X_r} V_{dr} - (1 - \omega_r) E'_{dq} \right) \quad (1)$$

$$\frac{dE'_{dq}}{dt} = -\frac{1}{T'_0} \left(E'_{dq} - (X_s - X'_s) I_{qs} \right) - \omega_s \left(\frac{X_m}{X_r} V_{qr} - (1 - \omega_r) E'_{qd} \right) \quad (2)$$

其中, $T'_0 = X_r / (\omega_s R_r)$ 为暂态时间常数。 V_{dr} 、 V_{qr} 为转子电压的 d 轴与 q 轴分量。

转子运动方程为:

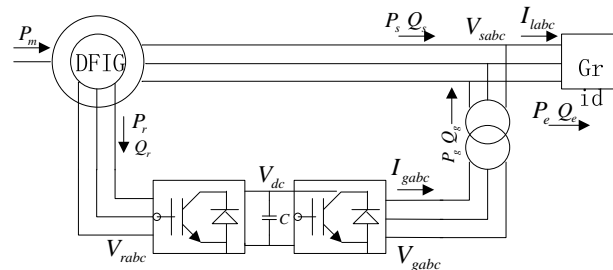


Figure 1. Diagram of the DFIG connected to the grid
图 1. 双馈风机与系统连接图

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{2H_D}(T_m - T_e) \quad (3)$$

其中 T_m 为输入到风机的机械转矩, T_e 为风机输出的电磁转矩。

当考虑电网侧变换器作用时直流电容电压变化的微分方程为:

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{P_r - P_g}{V_{dc}} \quad (4)$$

如图 1 所示, 其中 P_r 为转子侧注入换流器的有功功率, P_g 为电网侧变换器注入电网的有功功率, 它们的差值决定了直流电容上的电压变化。

电网侧变换器进行 dq 变换后有 $V_d = V_s$, $V_q = 0$ 。则可得电网侧变换器与电网连接代数方程为:

$$V_{dg} + X_T I_{qg} - V_s = 0 \quad (5)$$

$$V_{qg} - X_T I_{dg} = 0 \quad (6)$$

其中 X_T 为联络变压器阻抗。

2.1.2. 电网侧变换器控制模型

电网侧变换采用的 d 轴与定子电压方向一致, 解耦后的两个电压 V_{dg} 与 V_{qg} 控制直流电容电压大小及换流器与电网交换的无功功率。 V_{dg} 与 V_{qg} 分别通过两个 PI 环节得到, PI 环节的输入分别选择为直流电容电压偏差以及无功功率偏差, 如图 2 所示。

两个 PI 环节分别为电流控制环与电压控制环。一般情况下控制电网侧换流器与系统交换的无功为零, 即有 $Q_{g_ref} = 0$ 。由于共有四个 PI 控制环, 故网侧变换器的控制环节为 4 阶。

2.1.3. 转子侧变换器控制模型

转子侧变换器的控制主要目标是实现最大风功率追踪。它采用的是 d 轴方向与定子磁链方向一致。

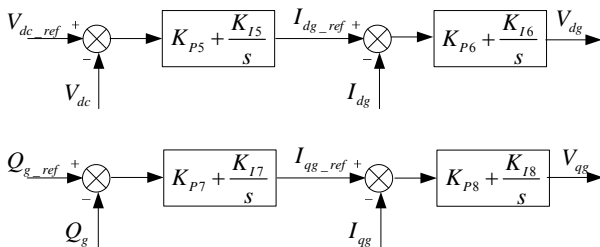


Figure 2. Block diagram for GSC
图 2. 电网侧换流器控制框图

它的控制也通过两个 PI 环节实现, 此控制框图如图 3(a)所示。其中, P_{ref} 为风机输出有功功率参考值, 一般由外部风速确定, 可取 $P_{ref} = C\omega_r^3$ 。

图 3(b)的 2 个 PI 环节用于实现定子侧与电网交换的无功功率控制或者机端电压控制。 Q_{ref} 为风机输出的无功功率的参考值, 此值可选为稳态时风机输出的无功功率。 V_{s_ref} 为机端电压的参考值, 选择为正常运行时的机端电压。而使用定无功控制还是定电压控制则根据实际情况确定。

在此两个目标控制中, 每个控制目标由 2 个 PI 环实现, 故转子侧换流器控制部分的阶数同样为 4。

在详细考虑双馈风机的模型及其控制方程时, 由上可知, 详细模型中双馈风机的阶数为 12 阶。在上述详细模型中, 双馈风机的阶数较高, 分析较为复杂, 可用简化模型对其进行分析。一般风机的简化模型分为 3 种: 不考虑电网侧换流器模型、零轴模型、负阻抗模型。

2.2. 不考虑电网侧换流器的模型

在这里, 不考虑双馈机电网侧换流器的动态作用, 认为其控制为理想状态, 即图 2 的控制目标能实时实现。此时直流电容电压恒定, 电网侧换流器输向电网的无功功率为零, 有功功率等于转子侧输出的有功功率。而转子侧换流器的控制不变, 这样相对于详细双馈机模型, 微分方程除去 4 个 PI 环与直流电容电压变化的微分方程, 阶数降为 7 阶。

2.3. 零轴模型

在不考虑电网侧换流器控制模型的基础上忽略转子的磁链暂态过程, 这样风机的两个暂态电势

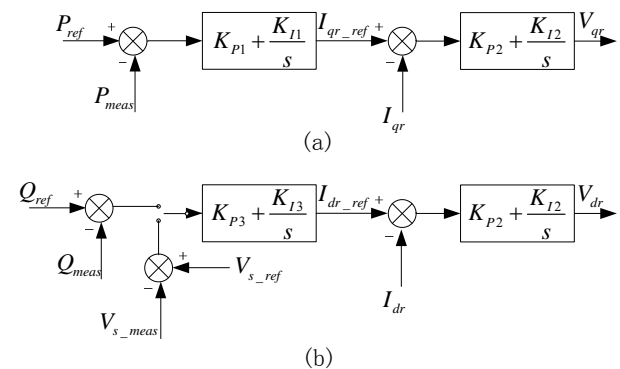


Figure 3. Block diagram for RSC
图 3. 转子侧换流器控制框图

认为保持恒定不变。这种简化的理论依据是转子磁链的暂态过程相对于其它暂态较快，忽略其作用误差不会太大^[10]。此时风机只有一个转子运动方程，而其暂态电势对应的微分方程转化为代数方程。加上转子侧变换器两个 PI 环的 4 个微分方程，此时总阶数降为 5 阶。

2.4. 负阻抗模型

这里对双馈风机作进一步简化，认为其是一个恒定不变的负阻抗模型。其计算式为：

$$Z = -\frac{V_D^2}{P_e - jQ_e} \quad (7)$$

在式(7)中， V_D 为双馈风机的机端电压， P_e 与 Q_e 为风机输出的有功与无功功率。当双馈风机采用此模型时，其状态方程阶数为 0。

3. 阻尼特性分析基础

电力系统的动态行为由一组非线性的微分—代数方程进行描述

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \\ \mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \end{cases} \quad (8)$$

其中， \mathbf{x} 、 \mathbf{y} 分别为状态变量和代数变量。在稳态运行点 $(\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0)$ 处对上式线性化，得

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\mathbf{x}} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{A}} & \tilde{\mathbf{B}} \\ \tilde{\mathbf{C}} & \tilde{\mathbf{D}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \Delta \mathbf{y} \end{bmatrix} \quad (9)$$

消去代数变量 $\Delta \mathbf{y}$ ，系统的状态矩阵表示如下：

$$\mathbf{A} = \tilde{\mathbf{A}} - \tilde{\mathbf{B}}\tilde{\mathbf{D}}^{-1}\tilde{\mathbf{C}}$$

\mathbf{A} 的一对共轭特征值对应一个振荡模态：

$$\lambda = \sigma \pm j\omega \quad (10)$$

特征值的实部刻画了系统对振荡的阻尼，而虚部则指出了振荡的频率。振荡频率 (Hz) 为

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (11)$$

定义阻尼比为

$$\zeta = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \quad (12)$$

它给出了振荡幅值的衰减率和衰减特性。

与同步机转速和功角强相关的模态为系统的机电振荡模态，其频率一般为 0.1 - 2.5 Hz。对于由 m 台同步机组成的互联电力系统中，一般认为系统中的机电振荡模态总数为 $m - 1$ 。对机电振荡模态的判断可以通过机电回路相关比进行^[11]。

4. 算例分析

以图 4 所示的新英格兰系统为例进行双馈风机不同模型下系统的阻尼特性分析。新英格兰系统的模型和参数见^[12]。在分析时，将 G8 换为双馈风机，其参数见文献^[8]，其余 9 台同步机均采用经典模型。

对双馈风机转子侧换流器分别采用定电压控制与定无功功率的控制方式进行分析。并且每一种控制方式均采用详细模型、忽略网侧变换器的简化模型、忽略转子磁链暂态的零轴模型以及负阻抗模型：

定无功控制方式：

模型 1：详细模型；

模型 2：忽略网侧变换器的控制模型；

模型 3：零轴模型；

模型 4：恒定负阻抗模型。

定电压控制方式：

模型 1：详细模型；

模型 2：忽略网侧变换器的控制模型；

模型 3：零轴模型；

模型 4：恒定负阻抗模型。

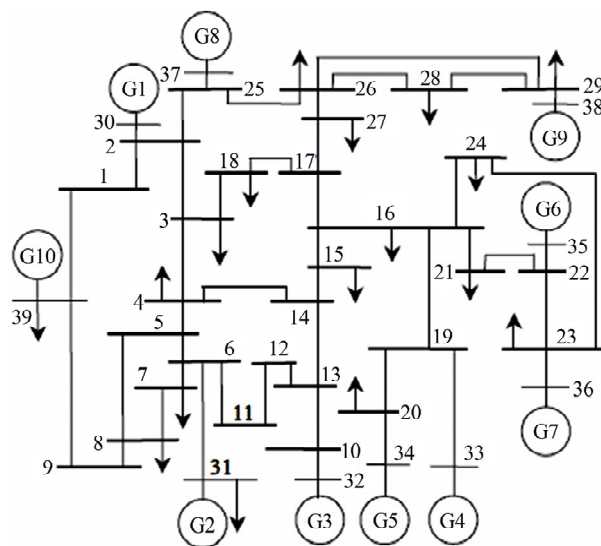


Figure 4. Diagram of the 10-machine New-England
图 4. 新英格兰 10 机 39 节点图

下面将不同双馈风机模型分两组进行分析，第一组为风机采用定无功控制的各种模型加负阻抗模型；第二组为风机采用定电压控制的各种模型外加负阻抗模型。

4.1. 三种定无功控制模型与负阻抗模型

在图 4 中，当把 G8 换为双馈风机时，系统还有 9 台同步机，从而有 8 个机电振荡模态。在这四种模型下，系统的机电振荡模态如图 5 所示，表 1 中给出了不同机电振荡模态的实部、虚部以及风机转速在各模态下归一化后的参与量。

Table 1. Oscillation modes of system when the DFIG adopts constant reactive control
表 1. 定无功控制时不同风机模型下的机电振荡模态

特征值序号	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4	参与量
1					
Re	-0.046	-0.048	-0.048	-0.042	
Im	10.782	10.779	10.779	10.810	0.0061
ζ (%)	0.4266	0.4453	0.4453	0.3885	
2					
Re	-0.076	-0.077	-0.077	-0.072	
Im	9.292	9.290	9.289	9.317	0.0082
ζ (%)	0.8179	0.8288	0.8289	0.7728	
3					
Re	-0.027	-0.029	-0.028	-0.024	
Im	8.624	8.622	8.622	8.646	0.0078
ζ (%)	0.3131	0.3363	0.3247	0.2776	
4					
Re	-0.075	-0.075	-0.075	-0.075	
Im	8.031	8.031	8.031	8.032	0.0006
ζ (%)	0.9338	0.9338	0.9338	0.9337	
5					
Re	-0.059	-0.073	-0.072	-0.033	
Im	7.321	7.297	7.296	7.577	0.2930
ζ (%)	0.8059	1.0004	0.9868	0.4355	
6					
Re	-0.062	-0.062	-0.062	-0.062	
Im	6.610	6.610	6.610	6.614	0.0085
ζ (%)	0.9379	0.9379	0.9379	0.9374	
7					
Re	-0.042	-0.042	-0.042	-0.042	
Im	6.225	6.225	6.225	6.225	0.0002
ζ (%)	0.6747	0.6747	0.6747	0.6747	
8					
Re	-0.045	-0.054	-0.054	-0.031	
Im	3.848	3.824	3.823	4.077	1.0000
ζ (%)	1.1694	1.4120	1.4124	0.7603	

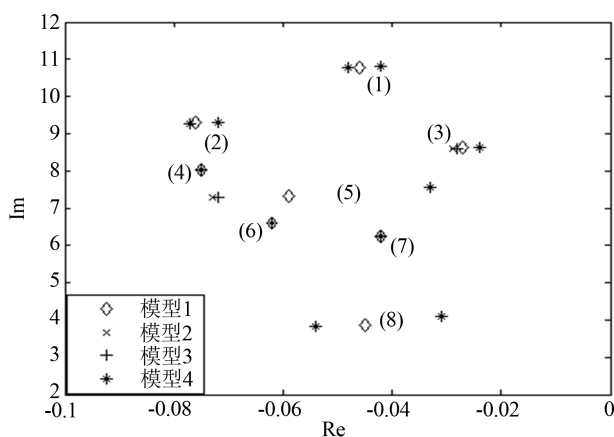


Figure 5. Oscillation modes of system when the DFIG adopts constant reactive control
图 5. 风机定无功控制的机电振荡模态

表 1 中，“Re”为特征值的实部，“Im”表示特征值的虚部，“ ζ ”为该特征值的阻尼比。参与量为风机的转速与模态之间的参与程度。

从风机的参与上看，风电机组对模态 8 和模态 5 的相对参与量较大，因此与精确模型相比，简化模型下这两个模态的偏差最大。

从特征值的虚部上看，对模型 2 和模型 3，特征值的虚部几乎相同，且与模型 1 差别很小。由于特征值的虚部表示了振荡的频率，可见使用模型 2 及模型 3 作为精确模型的近似时，计算的振荡频率偏差很小。而模型 4 则偏差较大，并且其特征值虚部均大于模型 1 的虚部，可见使用模型 4 计算得到的振荡频率略有上升。

特征值的实部表示了模态的衰减快慢等，从图 5 中可见，使用简化模型 2 和模型 3，其特征值实部均较精确模型小。这是由于简化模型 2 和 3 均基于理想情况而得到，可见简化模型下，计算得到的系统阻尼有所增强。而使用负阻抗模型则没有定论。

4.2. 三种定电压控制模型与负阻抗模型

在定电压控制的不同模型下，系统的机电振荡模态如图 6 所示，模态的详细信息见表 2。

风机采用定电压控制的结论与采用定无功功率控制的结论大致相同。对风机参与较大的模态，采用简化模型偏差较大，而使用简化模型 2 以及 3 对其频率的影响均较小，且由于认为控制器的控制能力理想化，因此提高了系统的阻尼。

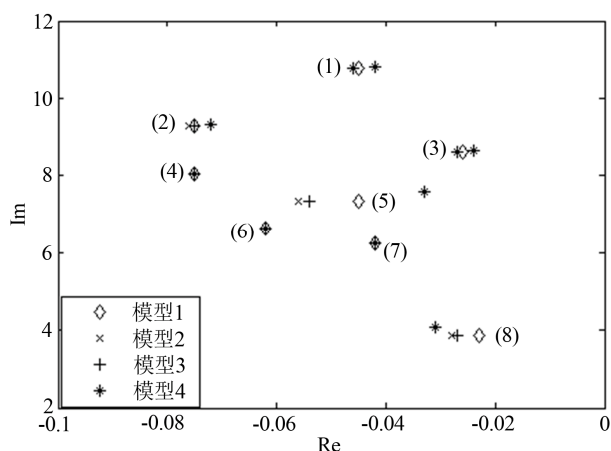


Figure 6. Oscillation modes of system when the DFIG adopts constant voltage control
图 6. 风机定电压控制的机电振荡模式

Table 2. Oscillation modes of system when the DFIG adopts constant voltage control
表 2. 定电压控制时不同风机模型下的机电振荡模式

特征值序号	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4	参与量
Re	-0.045	-0.046	-0.046	-0.042	
1 Im	10.785	10.784	10.784	10.810	0.0061
ζ (%)	0.4172	0.4266	0.4266	0.3885	
Re	-0.075	-0.076	-0.075	-0.072	
2 Im	9.295	9.293	9.293	9.317	0.0084
ζ (%)	0.8069	0.8178	0.8070	0.7728	
Re	-0.026	-0.027	-0.027	-0.024	
3 Im	8.627	8.626	8.626	8.646	0.0081
ζ (%)	0.3014	0.3130	0.3130	0.2776	
Re	-0.075	-0.075	-0.075	-0.075	
4 Im	8.031	8.031	8.031	8.032	0.0007
ζ (%)	0.9338	0.9338	0.9338	0.9337	
Re	-0.045	-0.056	-0.054	-0.033	
5 Im	7.354	7.338	7.337	7.577	0.2894
ζ (%)	0.6119	0.7631	0.7360	0.4355	
Re	-0.062	-0.062	-0.062	-0.062	
6 Im	6.611	6.611	6.611	6.614	0.0079
ζ (%)	0.9378	0.9378	0.9378	0.9374	
Re	-0.042	-0.042	-0.042	-0.042	
7 Im	6.225	6.225	6.225	6.225	0.0002
ζ (%)	0.6747	0.6747	0.6747	0.6747	
Re	-0.023	-0.028	-0.027	-0.031	
8 Im	3.878	3.860	3.862	4.077	1.0000
ζ (%)	0.5931	0.7254	0.6991	0.7603	

另外，使用负阻抗模型进行计算，对风机参与较大的模式，在频率上误差较大。而在阻尼特性上亦没有定论。

5. 结论

本文在风机采用定电压与定无功控制的方式下对详细模型进行了不同程度的简化。最后通过新英格兰系统算例对比分析了详细模型和简化模型下系统的阻尼特性。得到结论如下：

- 1) 与精确模型相比，风机采用简化模型时，其转速相对参与量较大的模式偏差较大。
- 2) 采用零轴或者忽略网侧变换器的简化模型所得到的振荡模式，其频率与详细型几乎一致。
- 3) 采用零轴或者忽略网侧变换器的简化模型时，计算得到的振荡模式均具有较强的阻尼。
- 4) 采用负阻抗模型得到的机电振荡模式在频率上与精确模型差异最大，且得到的频率均较其他模型高。
- 5) 采用的模型越简化，所得到的结果偏差越大。故当我们只对系统机电振荡模式感兴趣时，可以采用忽略网侧变换器控制的模型或者使用零轴模型，这样可以降低双馈机微分方程的阶数并且最大限度的减小得到振荡模式的误差。

6. 致谢

感谢国家电网公司科技项目“风火打捆能源基地交直流外送协调控制及安全防御系统研究与示范”的资助。

参考文献 (References)

- [1] Wang, C., Shi, L.B., Wang, L.M. and Ni, Y.X. (2008) Small signal stability analysis considering grid-connected wind farms of DFIG type. *Power and Energy Society General Meeting- Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, Pittsburgh, 20-24 July 2008, 1-6.
- [2] Li, S.-Y., Sun, Y., Wu, T., Li, Q.-J. and Liu, H. (2010) Analysis of small signal stability of grid-connected doubly fed induction generators. *Power and Energy Engineering Conference*, Chengdu, 28-31 March 2010, 1-4.
- [3] Li, H.M. (2009) Small-signal stability analysis of a grid connected doubly-fed induction generator under decoupled P-Q control. *Power and Energy Engineering Conference*, Wuhan, 27-31 March 2009, 1-4.
- [4] 汤宏, 吴俊玲, 周双喜 (2004) 包含风电场电力系统的小干扰稳定分析建模和仿真. *电网技术*, **1**, 38-41.
- [5] Mei, F. and Pal, B.C. (2005) Modeling and small-signal analysis

- of a grid connected doubly-fed induction generator. *Power Engineering Society General Meeting*, San Francisco, 12-16 June 2005, 2101-2108.
- [6] Rouco, L. and Zamora, J.L. (2006) Dynamic patterns and model order reduction in small-signal models of doubly fed induction generators for wind power applications. *Power Engineering Society General Meeting*, Montreal, 18-22 June 2006, 1-8.
- [7] 王忱, 石立宝, 姚良忠, 王黎明, 倪以信 (2010) 大规模双馈型风电场的小扰动稳定分析. *中国电机工程学报*, **4**, 63-70.
- [8] Pena, R., Clare, J.C. and Asher, G.M. (1996) Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation. *IEE Proceedings of Electric Power Applications*, **143**, 231-241.
- [9] Dong, B.H., Asgarpour S. and Wei, Q. (2011) ANN-based adaptive PI control for wind turbine with doubly fed induction generator. *North American Power Symposium (NAPS)*, Boston, 4-6 August 2011, 1-6.
- [10] Painemal, H.A.P. (2010) Wind farm for power system stability analysis. University of Illinois at Urbana-Champaign, Champaign.
- [11] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖 (2002) 动态电力系统的理论和分析. 清华大学出版社, 北京.
- [12] Pai, M.A. (1989) Energy function analysis for power system stability. Kluwer Academic Publishers, Boston, 250-252.