

风电机组等效模型对机组暂态稳定分析结果的影响

李辉¹, 韩力¹, 赵斌¹, 陈哲²

(1. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆市沙坪坝区 400044;
2. 丹麦奥尔堡大学能源技术学院, 奥尔堡 DK9220)

Effect of Equivalent Models of Wind Turbines on Analysis Results of Transient Stability for Wind Generator Systems

LI Hui¹, HAN Li¹, ZHAO Bin¹, CHEN Zhe²

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology (Chongqing University), Shapingba District, Chongqing 400044, China; 2. Institute of Energy Technology, Aalborg University, Aalborg DK9220, Denmark)

ABSTRACT: By using equivalent lump mass method, a three-mass wind turbine equivalent model is presented considering both the bending flexibility of blades and the torsional flexibility of the drive-train shaft between the wind turbine and induction generator. Combined with the electrical transient models of a grid-connected squirrel cage induction generator (SCIG), during a grid voltage drop and a mechanical large disturbance, the transient stability of two wind generator systems with rated power 330 kW (MADE-AE30) and 3 MW are investigated, respectively. Simulation results are also compared with those of the typical single-mass and two-mass equivalent models of wind turbines. The effects of the different bending flexibility of blades and the different position of blades breakpoint on the electrical transient stability of the rated power 3 MW wind turbine are also analyzed. The results show that the proposed equivalent model of wind turbine is essential and valid to analyze accurately the transient stability of wind turbine systems.

KEY WORDS: wind power generation; transient stability; squirrel cage induction generator; wind turbine; blade flexibility; drive-train shaft; equivalent models

摘要: 该文应用等效集中质量法, 建立了同时考虑风力机叶片弯曲柔性以及风力机和发电机之间传动轴扭转柔性的风力机3个质量块等效模型。结合并网笼型异步发电机的电磁暂态模型, 以额定功率330 kW(MADE-AE30)和3 MW的风力发电机组为例, 在电网电压骤降和机械大扰动下, 与风力机传统1个、2个质量块等效模型的机组暂态稳定性进行了

仿真比较。分析了叶片不同弯曲柔性、不同折断点位置对3 MW风电机组电暂态稳定性的影响。结果表明, 该文建立的风力机等效模型对准确分析风力发电机组暂态稳定性是必要和有效的。

关键词: 风力发电; 暂态稳定性; 笼型异步发电机; 风力机; 叶片柔性; 传动轴; 等效模型

0 引言

兆瓦(MW)级大型风力发电机和上百MW级大型风电场的发展已成为风力发电总容量增长的最主要因素。随着风电在电力系统中所占比重的逐步增加, 大容量风电场与电力系统的相互作用和影响也随之加大^[1-4], 风电技术的研究热点正从小容量单机的风力发电技术向大容量系统级方向发展, 从研究大容量风电场的稳态行为过渡到其接入输电网后的动、暂态行为^[5-7], 准确分析和研究大容量风电场的暂态稳定性及其机组的暂态过程显得尤为重要。

在现有运行大容量风电场中, 异步风力发电机组包括笼型异步发电机和双馈异步发电机^[5-20]。这些风力发电机组大都并网运行, 经常处于电力系统的各种扰动之下及风速变化的机械大扰动过程中。虽然风力发电机组轴系的长度不及汽轮发电机, 但在异步风力发电机组中, 风力机和发电机之间的齿轮箱传动是必不可少的, 风力机和发电机之间传动链的柔性必将产生机组暂态过程中的扭矩振荡^[8-9,12]; 与常规同步发电机组不同, 风力机转动惯量通常远远大于发电机转动惯量。因此, 有必要深入研究并网异步风力发电机组的暂态稳定性及风力机等效模

基金项目: 国家自然科学基金项目(50607022)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50607022).

型对机组暂态稳定性分析结果的影响。

目前,国内、外对异步风力发电机组的暂态稳定性有一定关注^[5-9,15-20],基于等效集中质量法和动力学方程的建模方法正被应用。国内对风电机组的静、动态稳定性模型有些研究^[12-14,20],但对风电机组的暂态模型和暂态稳定性分析很少。在分析风力发电机组暂态稳定性时,通常采用2种风力机的等效模型:①将风力机和发电机组等效为1个质量块,建立机组的刚性模型^[6-7,16-19];②将风力机和发电机转子各自等效为1个集中质量块,研究机组2质量块轴系模型的暂态稳定性^[5,8,15-18],但以上分析都是基于风力机传动轴柔性对机组暂态稳定性的影响。随着风力发电机组单机容量的增加,风力机叶片直径逐渐增大,如2~3 MW额定容量的风力机,其叶片直径通常约为80~100 m,叶片弯曲柔性对机组暂态稳定性的影响程度如何值得研究。虽然文献[9]提出考虑叶片柔性对机组暂态稳定性的影响,将风力机叶片沿中间折断点分成叶片顶部和根部,叶片顶部看成1个质量块,叶片根部包括轮毂、传动轴、齿轮箱和发电机在内等效成另外1个质量块。然而,该模型忽略了风力机传动轴柔性对机组暂态稳定性的影响。

本文尝试采用等效集中质量方法,提出一种既考虑风力机叶片弯曲柔性和风力机传动轴扭转变性的风力机等效3个质量块模型,结合异步发电机的详细电磁暂态模型,建立了较完善的异步风力发电机组暂态稳定性分析模型。以额定功率330 kW和3 MW笼型异步风力发电机组为例,在电网电压骤降和机械大扰动下,分别对机组的暂态稳定性进行仿真分析,并与传统1个质量块和2个质量块的风力机等效模型进行比较。最后,根据本文提出的暂态稳定性分析模型,以3 MW风电机组为例,针对叶片不同弯曲柔性、不同折断点位置即叶片惯性常数对机组暂态稳定性的影响进行比较。

1 风力机等效模型

典型风力发电系统的机械传动链由风力机叶片、轮毂、低速传动轴、齿轮箱、高速传动轴和发电机等构成^[9,16],其示意图如图1所示。考虑叶片弯曲柔性及轮毂和发电机之间低速传动轴的柔性,本文将3个风力机叶片等效成1个质量块 H_b ,轮毂等效为1个质量块 H_h ,齿轮箱和发电机转子等效为1个质量块 H_g ,提出的等效3个质量块风力机模型示意图如图2所示。

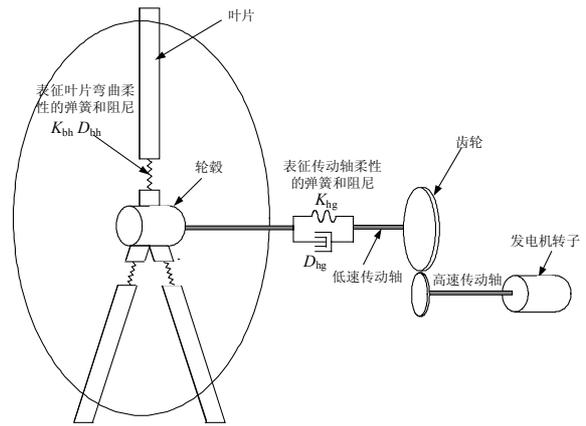


图1 典型风电系统传动链示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the drive train of a typical wind energy conversion system

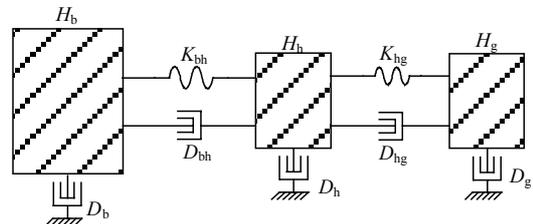


图2 3个质量块的风力机等效模型示意图
Fig. 2 Schematic diagram of the proposed three-mass equivalent model of a wind turbine

将风力机低速轴各量折算到发电机转子的高速侧,用标么值形式表示的等效3个质量块风力机动力学方程为

$$\begin{cases} 2H_b \frac{d\omega_b}{dt} = T_w - K_{bh}\theta_a - D_{bh}(\omega_b - \omega_h) - D_b\omega_b \\ 2H_h \frac{d\omega_h}{dt} = K_{bh}\theta_a - K_{hg}\theta_b + D_{bh}(\omega_b - \omega_h) - D_{hg}(\omega_h - \omega_g) - D_h\omega_h \\ 2H_g \frac{d\omega_g}{dt} = K_{hg}\theta_b - T_g + D_{hg}(\omega_h - \omega_g) - D_g\omega_g \\ d\theta_a/dt = \omega_0(\omega_b - \omega_h) \\ d\theta_b/dt = \omega_0(\omega_h - \omega_g) \end{cases} \quad (1)$$

式中: H_b 、 H_h 、 H_g 分别为风力机叶片、轮毂和发电机转子(含齿轮箱)的集中等效质量块的标么值惯性常数; ω_b 、 ω_h 、 ω_g 分别为3个质量块的电角速度; $\omega_0 = 2\pi f$ 为系统电角速度基值; θ_a 、 θ_b 分别为风力机叶片相对于轮毂的角位移及轮毂相对发电机转子的角位移; D_{bh} 、 D_{hg} 分别为风力机叶片与轮毂、轮毂和发电机之间的阻尼系数; D_b 、 D_h 、 D_g 分别为3个等效质量块自身的阻尼系数; T_w 、 T_g 分别为风力机的机械转矩和发电机的电磁转矩; K_{bh} 为风力机叶片和轮毂之间的等效刚度系数; K_{hg} 为轮毂和发电机之间低速传动轴系等效刚度系数,其值一般可通过

轴系的扭振频率估算^[5,8,9]。

$$K = \frac{8\pi^2 f_T^2}{\omega_0} \cdot \frac{H_1 H_2}{H_1 + H_2} \quad (2)$$

式中： f_T 为风力机机械扭振频率，通常取值范围为 0~10 Hz^[9]； H_1 、 H_2 分别为对应轴系 2 个质量块的惯性常数。

便于比较分析，图 3 画出了考虑风力机传动轴柔性因素的传统 2 个等效质量块模型及将风力机和发电机看成刚性连接的等效 1 个质量块模型的示意图。

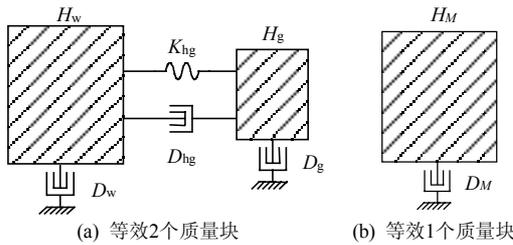


图 3 传统 2 个质量块和 1 个质量块风力机等效模型示意图
Fig. 3 Schematic diagram of the traditional two-mass and single-mass equivalent models of a wind turbine

在传统等效 2 个质量块的风力机模型图 3(a) 中，通常将风力机和轮毂等效为 1 个质量块，齿轮箱和发电机转子等效为另 1 个质量块，其动力学方程为

$$\begin{cases} 2H_w \frac{d\omega_w}{dt} = T_w - K_{hg}\theta_b - D_{hg}(\omega_w - \omega_g) - D_w\omega_w \\ 2H_g \frac{d\omega_g}{dt} = K_{hg}\theta_b - T_g + D_{hg}(\omega_w - \omega_g) - D_g\omega_g \\ \frac{d\theta_b}{dt} = \omega_0(\omega_w - \omega_g) \end{cases} \quad (3)$$

式中： H_w 、 H_g 分别为等效风力机和发电机转子(含齿轮箱)质量块的标幺值惯性常数； $H_w=H_b+H_h$ ； ω_w 、 ω_g 为 2 个等效质量块的电角速度； D_w 为等效风力机的自身阻尼系数。

在传统等效 1 个质量块的风力机等效模型图 3(b) 中，视风力机叶片、轮毂、齿轮箱和发电机转子等效为 1 个质量块，其运动方程为

$$2H_M \frac{d\omega_M}{dt} = T_m - T_g - D_M\omega_M \quad (4)$$

式中： $H_M=H_b+H_h+H_g$ 为等效 1 个质量块的标幺值惯性常数； D_M 为等效质量块自身的阻尼系数； ω_M 为等效质量块的电角速度。

2 异步发电机电磁暂态模型

假设异步发电机连接无穷大系统，其电压电流正方向按发电机惯例，定子电压相量与 d 轴重合，即 $u_{sq}=0$ 。则笼型异步发电机在 d - q 同步坐标轴系下的暂

态电压电流方程标幺值形式为^[5,8,19](q 轴超前 d 轴)

$$\begin{cases} u_{sd} = -R_s i_{sd} - \omega_s \psi_{sq} + D \psi_{sd} / \omega_0 \\ 0 = -R_s i_{sq} + \omega_s \psi_{sd} + D \psi_{sq} / \omega_0 \\ 0 = -R_r i_{rd} - s \omega_s \psi_{rq} + D \psi_{rd} / \omega_0 \\ 0 = -R_r i_{rq} + s \omega_s \psi_{rd} + D \psi_{rq} / \omega_0 \end{cases} \quad (5)$$

其中磁链方程为

$$\begin{cases} \psi_{sd} = -L_{ss} i_{sd} - L_m i_{rd} \\ \psi_{sq} = -L_{ss} i_{sq} - L_m i_{rq} \\ \psi_{rd} = -L_m i_{sd} - L_{rr} i_{rd} \\ \psi_{rq} = -L_m i_{sq} - L_{rr} i_{rq} \end{cases} \quad (6)$$

式中： R_s 、 R_r 为定、转子电阻； s 为转差率； ω_s 为定子电角频率(标幺值为 1)； L_{ss} 、 L_{rr} 分别为定、转子全自感； L_m 为定、转子互感； D 为微分算子。

考虑定转子磁链的电磁暂态，以电流和转子电动势为状态变量的异步发电机电磁暂态模型^[19]为

$$\begin{cases} \frac{X'}{\omega_s \omega_b} D i_{sd} = -(R_s + \frac{X - X'}{T_0}) i_{sd} + X' i_{sq} + (1-s)E_d - \frac{1}{T_0} E_q - u_{sd} \\ \frac{X'}{\omega_s \omega_b} D i_{sq} = -(R_s + \frac{X - X'}{T_0}) i_{sq} + X' i_{sd} + (1-s)E_d - \frac{1}{T_0} E_q - u_{sd} \\ \frac{1}{\omega_s \omega_b} D E_d = -\frac{1}{T_0} [E_d - (X - X') i_{sq}] + s E_q \\ \frac{1}{\omega_s \omega_b} D E_q = -\frac{1}{T_0} [E_q + (X - X') i_{sd}] - s E_d \end{cases} \quad (7)$$

式中： $X=\omega_s L_{ss}=\omega_s(L_{s\sigma}+L_m)$ ； $X'=\omega_s(L_{ss}-L_m^2/L_{rr})$ ； $T_0=L_{rr}/\omega_s R_r$ ； $E_d=-\omega_s L_m \psi_{rq}/L_{rr}$ ； $E_q=\omega_s L_m \psi_{rd}/L_{rr}$ 。发电机的电磁转矩：

$$T_g = E_d i_{sd} + E_q i_{sq} \quad (8)$$

3 不同等效模型时机组暂态稳定性分析

3.1 仿真模型参数

为了验证本文提出的 3 个等效质量块风力机模型的有效性和必要性，对 3 个等效质量块(WT3)、仅考虑传动轴系柔性的 2 个等效质量块(WT2)以及不考虑风力机柔性因素的 1 个等效质量块模型(WT1)，分别结合笼型异步发电机的详细电磁暂态模型，建立了 3 种不同的异步风力发电机组的暂态仿真模型。以额定功率 330 kW(MADE-AE30)和 3 MW 的并网异步风力发电机组为例(分别代表小、大容量)，对机

组在电网电压骤降和大机械扰动下的暂态行为进行仿真分析。图4表示并网异步风力发电机系统通过变压器连接电网示意图。其中，风力机、发电机和变压器等主要参数如表1~3所示。考虑阻尼系数一般很小，本文在暂态仿真过程中忽略了风力机各个部分阻尼因素的影响。

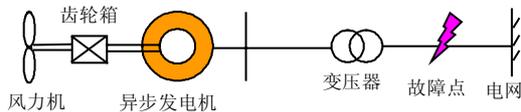


图4 并网异步风力发电机系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of a grid-connected SCIG wind turbine system

表1 330 kW (MADE-AE30) 风力发电机组参数

Tab. 1 Parameters of the 330 kW (MADE-AE30) wind generator system

| 发电机参数 | | 风力机参数 | |
|------------------|---------|--------------|-------|
| 额定功率/kW | 330 | H_b/s | 2.28 |
| 额定电压/V | 690 | H_t/s | 0.26 |
| 额定频率/Hz | 50 | K_{bt}/pu | 3.18 |
| R_s/pu | 0.007 8 | K_{btg}/pu | 0.318 |
| $L_{s\sigma}/pu$ | 0.079 4 | — | — |
| R_r/pu | 0.007 8 | — | — |
| $L_{r\sigma}/pu$ | 0.115 8 | — | — |
| X_m/pu | 4.104 | — | — |
| H_g/s | 0.52 | — | — |

表2 3 MW 风力发电机组参数^[19]

Tab. 2 Parameters of the 3 MW wind generator system

| 发电机参数 | | 风力机参数 | |
|------------------|-----------|--------------|-----|
| 额定功率/MW | 3 | H_b/s | 4 |
| 额定电压/V | 690 | H_t/s | 0.5 |
| 频率/Hz | 50 | K_{bt}/pu | 0.3 |
| R_s/pu | 0.004 843 | K_{btg}/pu | 0.3 |
| $L_{s\sigma}/pu$ | 0.124 8 | — | — |
| R_r/pu | 0.004 347 | — | — |
| $L_{r\sigma}/pu$ | 0.179 1 | — | — |
| X_m/pu | 6.77 | — | — |
| H_g/s | 0.54 | — | — |

表3 变压器参数

Tab. 3 Parameters of the transformer

| 参数 | 原边 | 副边 |
|--------|---------|---------|
| 额定电压/V | 32 000 | 690 |
| 电阻/pu | 0.001 1 | 0.001 1 |
| 漏抗/pu | 0.032 | 0.032 |

3.2 电网电压骤降时机组暂态稳定性

假设并网异步风力发电机系统稳定运行在额定工况，电网电压(变压器原边电压)在第0.5 s时突然骤降为原来的50%，故障持续时间为0.5 s，即在时间第1.0 s时故障切除。采用不同风力机等效模型时，2个额定功率330 kW和3 MW风力发电机组的有功功率、叶片弯曲扭矩和轴系扭矩、发电机转速和风力机转速的暂态响应过程分别如图5(a)和5(b)所示。

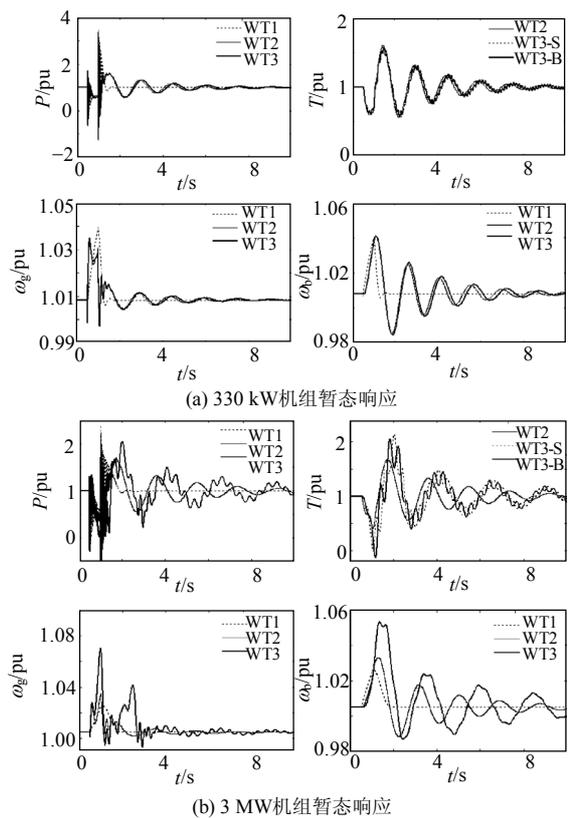


图5 风力机不同等效模型在电网电压骤降50%持续时间0.5 s时风电机组的暂态响应

Fig. 5 Transient response of the power wind generator systems using different equivalent models when the grid voltage drop is 50% for 0.5 s

图中WT1、WT2和WT3分别表示采用1个、2个和3个质量块风力机等效模型时的暂态响应过程。其中WT3-S和WT3-B则分别表示采用3个等效质量块模型时传动轴系和叶片弯曲柔性的扭矩变化曲线。

从仿真结果可看出，无论是330 kW还是3 MW的风电机组，当采用WT2和WT3等效模型时，在电网电压骤降下风力机扭矩出现较大波动，导致故障切除后机组有功功率、发电机和风力机转速都出现了较大的振荡。然而，当采用WT1等效模型时，由于没有考虑风力机柔性因素的影响，故障切除后机组有功功率和风力机转速几乎没有出现振荡。此外，从图5(a)可以看出，采用WT2和WT3等效模型时，330 kW风电机组暂态响应变化趋势基本吻合，说明了本文建立的WT3模型的有效性。但是，在同样故障条件下，对于3 MW风力发电机组的暂态响应而言，由于考虑了叶片柔性因素，采用WT3等效模型时机组有功功率、风力机扭矩、发电机和风力机转速的波动时间更长，振荡幅值更大。如图5(b)所示，在故障切除时刻，采用WT3模型时电机转速最大振幅已达1.07 pu，而采用WT2时仅为1.035 pu。说明随

着风电机组容量的增加，电网电压骤降对机组暂态稳定性的影响更为严重。

另外，机组在相同初始运行工况和电网电压故障条件下，通过时域仿真求得330 kW机组采用WT1、WT2和WT3模型时，系统保持暂态稳定性的故障临界切除时间分别为2.52、2.28、2.25 s；而对于3 MW机组，其值则分别为1.09、0.72、0.59 s。图6显示了在相同电网电压故障条件下，故障持续时间变为0.6 s时3 MW风电机组的暂态响应。

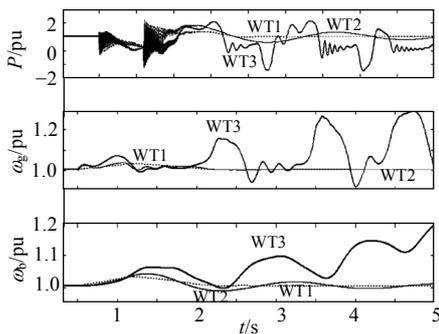


图 6 风力机不同等效模型在电网电压骤降50%持续时间0.6 s时3 MW风电机组的暂态响应

Fig. 6 Transient response of the 3 MW rated power wind generator system using different equivalent models when the grid voltage drop is 50% for 0.6 s

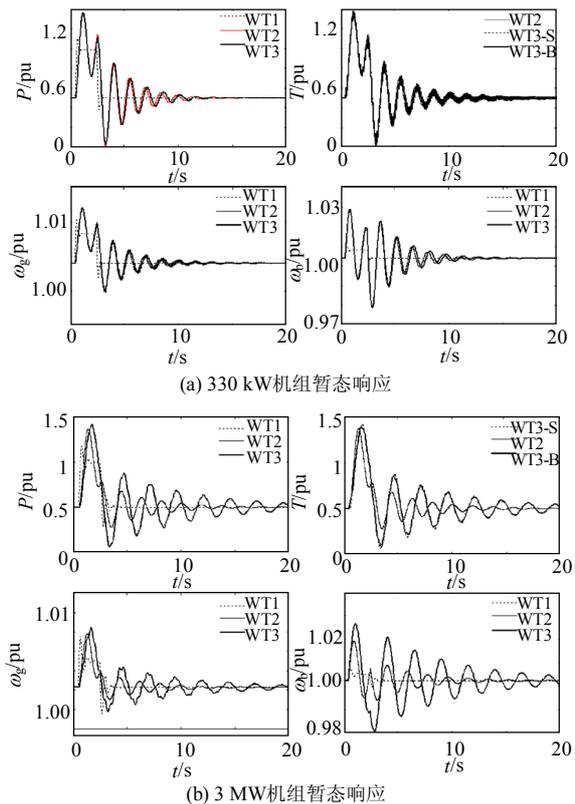
从图6可以看出，由于仿真选择的故障切除时间为0.6 s，大于WT3模型得到的故障临界切除时间(0.59 s)，采用WT3模型时风电机组出现了暂态不稳定，即机组有功功率、发电机转速和风力机转速出现了不收敛的振荡。

在相同电网电压故障下，通过对上述不同容量机组分别采用3种不同风力机等效模型暂态行为的仿真及故障临界切除时间的比较，结果表明，WT1模型忽略了风力机柔性连接因素，其暂态稳定性分析结果过于乐观；WT2和WT3模型对于330 kW风力发电机机组的暂态稳定性分析结果基本一致，但对于3 MW异步风力发电机组而言，WT2和WT3模型得到的暂态稳定分析结果相差较大，仅考虑传动轴柔性的WT2模型将得到不准确或较为乐观的结果。

3.3 机械转矩大扰动时机组暂态稳定性

为了分析如风速突然变化等机械大扰动对风力机不同等效模型时机组暂态稳定性分析结果的影响，下面仍然以330 kW和3 MW风力发电机组数据为例，对机组在机械转矩大扰动下的暂态响应进行仿真比较。假设机组初始稳定运行在有功功率为0.5 pu，在第0.5 s时由于风速的变化使机械转矩从0.5 pu突变为1.0 pu，扰动持续时间为2 s，即在第2.5 s

时机械扰动消失。采用风力机不同等效模型得到的机组暂态响应如图7所示。从仿真结果可看出，当风电机组遭受机械大扰动时，由于忽略了风力机的柔性连接，采用WT1模型时机组暂态响应很少出现波动，扰动消除后机组很快就恢复到初始运行工况。对于330 kW风电机组的暂态响应过程，采用WT2和WT3模型时基本上得到了一致的分析结果；而在3 MW风电机组的暂态响应曲线中，与WT2模型的结果比较，WT3模型机组各个相应的暂态量波动时间更长，但波动的最大振幅相差不是很大。如图7(b)机械扰动消失后风力机转速的最大波动幅值为1.025 pu，而采用WT2模型时为1.02 pu。另外，从图7也可看出，与330 kW风电机组暂态响应曲线比较，在相同机械扰动下，3 MW风电机组的有功功率、发电机和风力机转速波动时间更长。此外，与电网电压故障相比，机械大扰动对相同风力机等效模型和相同容量的风电机组而言，其影响相对较小。



(a) 330 kW机组暂态响应

(b) 3 MW机组暂态响应

图 7 风力机不同等效模型在机械扰动时风电机组的暂态响应

Fig. 7 Transient response of the power wind generator systems using different equivalent models during a mechanical disturbance

4 叶片柔性及惯性常数对机组暂态稳定性影响

上述仿真分析表明，在电网电压故障下，考虑

叶片弯曲柔性对大容量并网异步风电机组的暂态稳定性准确分析至关重要。对此,以3 MW风力发电机组为例,利用3个质量块等效风力机模型进一步分析叶片弯曲刚度系数和叶片折段点位置(即叶片和轮毂之间惯性常数的比例)对机组暂态稳定性的影响。

假定风力发电机组初始稳定运行在额定工况,电网电压故障仿真条件和前面相同,图8给出了风力机叶片刚度系数分别为0.03、0.3和3.0时,3 MW风电机组有功功率、电机转速和风力机转速的暂态响应过程。其中,传动轴的刚度系数保持0.3不变。从图8仿真结果可见,叶片弯曲刚度系数取0.03时机组出现了暂态不稳定;而刚度系数取0.3和3.0时,机组仍然能保持暂态稳定。在相同故障条件下,通过时域仿真求得叶片刚度系数分别取0.03、0.3和3.0时,机组保持暂态稳定的故障临界切除时间分别对应为0.42、0.59和1.03 s。因此,从图8仿真结果和3个故障临界切除时间值比较,可以看出叶片弯曲柔性对机组电暂态稳定性影响较大。叶片刚度系数越小,即叶片弯曲柔性越大时,机组暂态稳定性的裕度越小。这也进一步说明了大容量风电机组由于风力机叶片加长,其弯曲柔性增加,导致对机组暂态稳定性的影响更大。

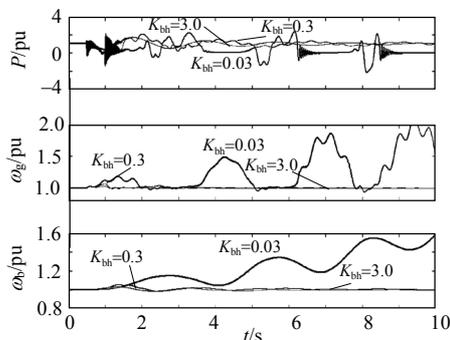


图8 取不同叶片刚度系数电网电压骤降50%持续时间0.5 s时3 MW风电机组暂态响应

Fig. 8 Transient response of the 3 MW rated power wind generator system using different stiffness coefficient when the grid voltage drop is 50% for 0.5 s

为了进一步分析叶片折段点位置对电网电压故障下机组暂态稳定性的影响,本文在保持风力机总惯性常数和刚度系数不变的条件下,对叶片和轮毂取不同惯性常数时机组暂态行为进行了仿真研究。电网电压故障仿真条件和前面相同,取不同惯性常数时机组的暂态响应如图9所示。从图9仿真结果可以看出,虽然在同样故障条件下采用不同惯性常数时,机组仍然能保持暂态稳定。但当风力机惯性常数取 $H_b=4$, $H_h=0.5$ 时,机组有功功率、发电机和

力机转速的波动幅值更大,振荡时间更长;而当其分别取 $H_b=2$, $H_h=2.5$ 和 $H_b=0.5$, $H_h=4$ 时,机组各量的振荡幅值相对较小。机组在相同运行工况和电网电压故障条件下,通过时域仿真求得上述不同惯性常数组下系统保持暂态稳定的故障临界切除时间分别为0.59、0.75和0.79 s。因此,从图9仿真曲线和3个故障临界切除时间值比较可看出,叶片折段点位置对机组暂态稳定性的影响也比较大。当叶片惯性常数降低,轮毂惯性常数增加,即叶片折段点位置靠近叶片顶部时,机组的暂态稳定性将有所提高。

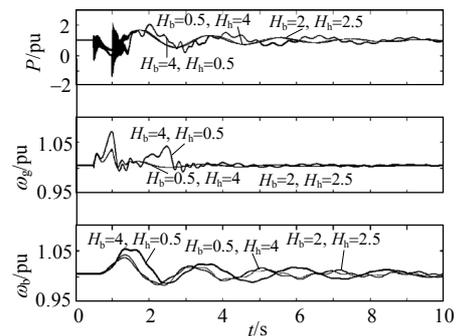


图9 取不同叶片惯性常数电网电压骤降50%持续时间0.5 s时3 MW风电机组暂态响应

Fig. 9 Transient response of the 3 MW rated power wind generator system using different inertia constant when the grid voltage drop is 50% for 0.5 s

5 结论

在研究风力发电机组暂态稳定性的风力机等效模型的基础上,应用等效集中质量法建立了一种同时考虑风力机叶片弯曲柔性及风力机和发电机之间传动轴扭转柔性的风力机3个质量块等效模型。结合并网笼型异步发电机的电暂态模型,对额定容量330 kW和3 MW的并网异步风力发电机组在电网电压骤降和机械转矩大扰动时的暂态过程进行了仿真分析,并与传统1个、2个质量块的风力机等效模型对暂态稳定分析结果进行了比较和验证。最后,利用本文提出的3个质量块等效模型对叶片弯曲柔性及叶片和轮毂的惯性常数(即叶片折段点位置)对机组暂态稳定性影响也进行了分析。仿真结果和对比分析表明:

(1) 无论是来自电网电压故障还是机械大扰动,采用1个质量块的风力机等效模型将不能准确分析风力发电机组的暂态稳定性。

(2) 随着单机容量的增加,叶片弯曲柔性对机组暂态稳定性的影响更为显著。叶片弯曲柔性越大,叶片折段点位置越靠近轮毂,机组的暂态稳定裕度

越低。在准确研究大容量异步风力发电机组暂态稳定性分析时,有必要采用本文提出的3个质量块等效模型。

(3) 与小容量风电机组相比,相同故障条件对大容量风电机组的暂态稳定性影响更大。与电网电压骤降的暂态稳定性分析结果相比,机械大扰动对相同风力机等效模型和相同容量的风力发电机组暂态行为影响相对较小。

以上结论将有助于分析大容量风电场的暂态稳定性及研究风电场和电力系统之间的暂态行为,风力机等效模型及其对机组暂态稳定性分析结果的影响还可进一步应用到双馈感应风力发电机系统中。

参考文献

- [1] Clemens Jauch Julijia Matevosyan, Thomas Ackermann Sigrid Bolik. International comparison of requirements for connection of wind turbines to power systems[J]. Wind Energy, 2005, 8(3): 295-306.
- [2] Chen Z. Issues of connecting wind farms into power systems[C]. 2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference& Exhibition: Asia and Pacific, Dalian, China, 2005.
- [3] 杨秀媛, 肖洋, 陈树勇. 风电场风速和发电功率预测研究[J]. 中国电机工程学报 2005, 25(11): 1-5.
Yang Xiuyuan, Xiao Yang, Chen Shuyong. Wind Speed and generated power forecasting in wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 1-5(in Chinese).
- [4] 陈树勇, 戴慧珠, 白晓民. 风电场的发电可靠性模型及其应用[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(3): 26-29.
Chen Shuyong, Dai Hui Zhu, Bai Xiaoming. Reliability model of wind power plants and its application [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(3): 26-29(in Chinese).
- [5] Ledesma P, Usaola J, Rodriguez J L. Transient stability of a fixed speed wind farm[J]. Renewable Energy, 2003, 28(9): 1341-1355.
- [6] Sun Tao, Chen Z, Blaabjerg F. Transient stability of DFIG wind turbines at an external short-circuit fault [J]. Wind Energy, 2005, 8(3): 345-360.
- [7] 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.
- [8] Akhmatov V, Nielsen A H. Fixed-speed active-stall wind turbines in offshore applications[J]. European Trans. on Electrical Power, 2005, 15(2): 1-112.
- [9] Trudnowski D J, Khan J M, Petritz E M. Fixed-speed wind generator and wind park modeling for transient stability studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(4): 1911-1917.
- [10] 李晶, 宋家骅, 王伟胜. 大型变速恒频风力发电机组建模与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 100-105.
Li Jing, Song Jihua, Wang Weisheng. Modeling and dynamic simulation of variable speed wind turbine with large capacity [J]. Proceeding of the CSEE, 2004, 24(6): 100-105(in Chinese).
- [11] 刘其辉, 贺益康, 张建华. 交流励磁变速恒频风力发电机的运行控制及建模仿真[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5): 43-50.
Liu Qihui, He Yikang, Zhang Janhua. Operation control and modeling simulation of ac-excited variable-speed constant-frequency (AEVSCF) wind power generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5): 43-50(in Chinese).
- [12] 李东东, 陈陈. 风力发电机组动态模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 115-119.
Li Dongdong, Chen Chen. A study on dynamic model of wind turbine generator sets[J]. Proceeding of the CSEE, 2005, 25(3): 115-119 (in Chinese).
- [13] 吴学光, 张学成, 印永华, 等. 异步风力发电系统动态稳定性分析的数学模型及其应用[J]. 电网技术, 1998, 22(6): 68-72.
Wu Xueguang, Zhang Xuecheng, Yin Yonghua, et al. Application of models of the wind turbine induction generators (WTGs) to wind power system dynamic stability analysis[J]. Power System Technology, 1998, 22(6): 68-72 (in Chinese).
- [14] 汤宏, 吴俊玲, 周双喜. 包含风电场电力系统的小干扰稳定分析建模与仿真[J]. 电网技术, 2004, 28(1): 38-41.
Tang Hong, Wu Junling, Zhou Shuangxi. Modeling and simulation for small signal stability analysis of power system containing wind farm [J]. Power System Technology, 2004, 28(1): 38-41(in Chinese).
- [15] Samuelsson O, Lindahl S. On speed stability [J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2005, 20(2): 1179-1180.
- [16] Salman S K, Teo A L J. Windmill modeling consideration and factors influencing the stability of a grid-connected wind power based embedded generator [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(2): 793-802.
- [17] Martins M, Perdana A, Ledesma P, et al. Validation of fixed speed wind turbine dynamic models with measured data[J]. Renewable Energy, 2007, 32(8): 1301-1315.
- [18] Chen Z. Characteristics of induction generators and power system stability[C]. The Eighth International Conference of Electrical Machines and Systems(ICEMS), Nanjing, China, 2005.
- [19] LI H, Chen Z, Han L. Comparison and evaluation of induction generator models in wind turbine systems for transient stability of power system[C]. 2006 International Conference on Power System Technology(POWERCON), Chongqing, China, 2006.
- [20] 蔺红, 晁勤. 风力发电系统简单建模及稳定性分析[J]. 新疆大学学报, 2001, 18(1): 60-64.
Lin Hong, Chao Qin. Simply built model and analysis of stability on the system of windmill generating electricity [J]. Journal of Xinjiang University, 2001, 18(1): 60-64 (in Chinese).



李 辉

收稿日期: 2007-07-24。

作者简介:

李 辉(1973—), 男, 博士, 副教授, 方向为风力发电技术, 电机及其系统分析, lih@iet.aau.dk; cqulh@163.com;

韩 力(1963—), 男, 博士, 副教授, 方向为新型电机及其控制;

赵 斌(1983—), 男, 硕士研究生, 方向为风力发电及其电力系统稳定性;

陈 哲(1955—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 方向为可再生能源利用、电力电子技术、电力系统分析等。

(责任编辑 王剑乔)