

定桨恒频风电机组机网扭振的建模与机理

王瑞琳¹, 解 大¹, 王西田¹, 张延迟^{2,3}

(1. 上海交通大学 电气工程系, 上海 200240;

2. 华东理工大学 自动化系, 上海 200237;

3. 上海电机学院 电气工程系, 上海 200240)

摘要: 报告了风力机组机网扭振问题的研究现状, 指出了研究并网大型风力机组机网扭振问题的必要性。针对定桨恒频双速异步风力发电机, 建立了研究风力发电机和电网之间扭振相互作用的统一机电动态模型; 利用有限元分析法对风机叶片进行了建模, 将风力机机械部分(包括叶片、低速轴、齿轮箱、高速轴、转子组成的旋转系统)等效为柔性连接的三质量块模型, 计算了机械旋转系统的固有频率; 对电气部分(包括发电机定子和电网)在 $dq0$ 坐标系下进行了建模。在电磁暂态仿真软件中建立了仿真模型, 通过在输电线路始端设置三相接地短路故障, 激发了风力发电机的机网扭振现象。对扭振曲线进行频域分析, 发现了扭振频率与计算得出的机械旋转系统固有频率相吻合, 验证了模型的准确性。

关键词: 定桨恒频双速异步风力发电机; 机网扭振; 有限元分析法; 建模; 三质量块模型

中图分类号: TM 315

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2010)03-0020-05

0 引言

风电^[1-9]机网扭振相互作用主要包括大型风力发电机组自身的电力电子控制装置(如双馈技术和永磁直驱技术中采用大功率变流器、双速异步发电机中采用的快速无功补偿器等)的快速动作引起的机网扭振, 电网非特征谐波引起的机网扭振, 以及电力系统故障或操作引起的冲击性扭振。

本文针对并网型定桨恒频双速异步风电机组, 研究其机网扭振作用。定桨恒频双速异步风力发电机直接接入电网, 通常采用并联电容或动态快速无功补偿装置提供无功功率, 由于其与电网联系紧密, 因此受到电网接口影响的可能就较为明显。此外由于电容器对于谐振有着放大作用, 风力发电机接入的并联电容部分值得关注。这里将所研究的对象抽象为简单的单机对无穷大系统模型, 建立了机网扭振的统一机电模型, 并在此基础上进行仿真分析。

1 并网定桨恒频风力发电机组机网扭振建模

对于机网扭振相互作用, 研究对象是由风力发电机的旋转系统、发电机及电网组成的一个大系统, 为了尽可能准确地清晰地分析电网和风力发电机相互作用所引起的轴系机械振动, 通常采用如图 1 所示的系统模型。

图 1 中异步发电机的旋转系统包括叶片、低速轴、齿轮箱、高速轴、发电机转子, 而发电机的定子通过电缆与无穷大电力系统相连, 发电机出口的并联

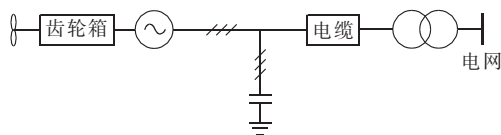


图 1 并网风力机组机网扭振等效系统

Fig.1 Equivalent system of grid-connected wind turbine-generator set with torsional vibration

补偿电容起到无功补偿的作用。输电线路等效为 RLC 串联模型, 在有些情况下, 还会在线路中串联电容以提高输送距离。以下建立机械部分和电气部分的动态模型。

1.1 风电机组旋转系统模型

与汽轮发电机组的轴系扭振机械系统模型相似, 风力发电机的轴系也可以用多个集中质量块和联结它们的理想弹簧所组成的质量-弹簧模型来表示。目前在风力发电机的动态特性研究中, 通常采用两质量块轴系模型^[10-13], 即叶片、低速轴和齿轮箱等效为一个质量块, 发电机转子等效为另一个质量块。文献[12]研究了减缓由串补电容引起的风力机组机网扭振的方法: 利用灵活交流输电技术(FACTS)和静态无功补偿器(SVC), 在分析与仿真的过程中风力机机械传动部分均采用了两质量块模型。文献[13]采用三质量块模型对比研究了几种不同形式的变速风力发电系统, 分析了它们在不断变化的风速时间序列下的转矩特性, 但是没有给出具体的动态数学模型。但是考虑到风电机组轴系特性以叶片为主导, 叶片与轮毂的连接柔性大, 若将叶片和低速轴部分等效为一个质量块则太过粗略。

为此本文考虑采用图 2 所示的三质量块轴系等效模型, 分别表示风机叶片、低速轴部分、高速轴部分。

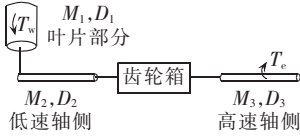


图 2 风电机组轴系等效示意图

Fig.2 Equivalent shaft system of wind turbine-generator set

上述模型中, D_i 和 M_i 分别表示第 i 个质量块的自阻尼系数和转动惯量。齿轮箱表示为简化的理想变速特性, 其变比为 n_g 。低速侧向高速侧归算时, 转动惯量和阻尼系数均除以 n_g^2 ; 反之, 高速侧向低速侧折算则需乘以 n_g^2 。

低速轴和高速轴可以直接参考汽轮发电机组轴系的等效建模方法, 由轴的结构尺寸和材料特性参数可以计算出等效质量块的转动惯量 (M_2, M_3) 和刚度系数 (K_2, K_3)。不过对风机叶片的等效转动惯量 (M_1) 和刚度系数 (K_1), 目前还没有较为准确的实用计算方法; 考虑到风机叶片的主模态固有频率 f_b 可以通过试验测定, 本文提出以下等效参数计算方法。

a. 用有限单元法计算等效转动惯量:

$$M_1 = \sum_{i=1}^N m_i r_i^2 \quad (1)$$

式中 m_i 为沿径向划分的单元的质量, r_i 为单元至旋转中心的半径, N 为划分单元的数目。

b. 采用以下公式计算等效刚度系数:

$$K_1 = (2\pi f_b)^2 M_1 \quad (2)$$

一般来说, 用有限单元法计算的等效转动惯量 M_1 以及试验测定的主模态固有频率 f_b 都是比较准确的, 因此采用上述方法得到的等效模型参数是比较准确可靠的。

得到风电机组轴系的 3 个等效质量块的转动惯量和刚度系数之后, 可以建立图 3 所示的模型。图中两质量块之间的连接刚度可由下式计算:

$$\begin{cases} \frac{1}{K_{12}} = \frac{1}{K_1} + \frac{1}{2K_2} \\ \frac{1}{K_{23}} = \frac{1}{K_3} + \frac{1}{2K_2} \end{cases} \quad (3)$$

$$A_M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{K_{12}}{M_1} & \frac{K_{12}}{M_1} & 0 & \frac{D_1+D_{12}}{M_1} & \frac{D_{12}}{M_1} & 0 \\ \frac{K_{12}}{M_2} & -\frac{(K_{12}+K_{23})}{M_2} & \frac{K_{23}}{M_2} & \frac{D_{12}}{M_2} & -\frac{(D_{12}+D_2+D_{23})}{M_2} & \frac{D_{23}}{M_2} \\ 0 & \frac{K_{23}}{M_3} & -\frac{K_{23}}{M_3} & 0 & \frac{D_{23}}{M_3} & -\frac{(D_{23}+D_3)}{M_3} \end{bmatrix}$$

$$X_M = [\Delta\theta_1, \Delta\theta_2, \Delta\theta_3, \Delta\omega_1, \Delta\omega_2, \Delta\omega_3]^T, \quad B_M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/M_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1/M_1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T, \quad u_M = [\Delta T_w, \Delta T_e]^T$$

其中, 下标 M 表示机械部分。

为了求得风力发电机轴系的固有频率, 可以通

根据图 3 所示的质量块-弹簧模型, 利用小扰动分析法, 得到该模型的线性化方程如式 (4) 所示。方程中所有量均为折算至低速侧的值。

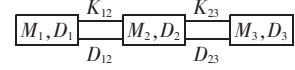


图 3 风电机组轴系三质量块模型

Fig.3 Three-mass model of shaft system

$$\begin{cases} \Delta\dot{\theta}_1 = \Delta\omega_1 \\ \Delta\dot{\theta}_2 = \Delta\omega_2 \\ \Delta\dot{\theta}_3 = \Delta\omega_3 \\ M_1 \Delta\dot{\omega}_1 = \Delta T_w - D_1 \Delta\omega_1 - D_{12} (\Delta\omega_1 - \Delta\omega_2) - K_{12} (\Delta\theta_1 - \Delta\theta_2) \\ M_2 \Delta\dot{\omega}_2 = -D_2 \Delta\omega_2 - D_{12} (\Delta\omega_2 - \Delta\omega_1) - D_{23} (\Delta\omega_2 - \Delta\omega_3) - K_{23} (\Delta\theta_2 - \Delta\theta_3) - K_{12} (\Delta\theta_2 - \Delta\theta_1) \\ M_3 \Delta\dot{\omega}_3 = -\Delta T_e - D_3 \Delta\omega_3 - D_{23} (\Delta\omega_3 - \Delta\omega_2) - K_{23} (\Delta\theta_3 - \Delta\theta_2) \end{cases} \quad (4)$$

在式 (4) 中, $\Delta\theta_1, \Delta\theta_2, \Delta\theta_3, \Delta\omega_1, \Delta\omega_2, \Delta\omega_3$ 依次为 3 个质块的旋转角和角速度微变量。 ΔT_w 和 T_e 分别为风力发电机叶片所受到的风力矩微变量和转子所受到的电磁转矩微变量。 M_1, M_2, M_3 分别为质块 1、2、3 的转动惯量, D_1, D_2, D_3 分别为质块 1、2、3 的阻尼系数, D_{12}, D_{23} 为每 2 块质量块之间的互阻尼。其中 M_3, T_e, D_3, D_{23} 均为质块 3 由高速侧折算至低速侧以后的值。假设 $M'_3, T'_e, D'_3, D'_{23}$ 为质块 3 未折算前的值。对于转动惯量, 折算前后质块的动能保持不变; 对于阻尼系数, 折算前后能量损耗不变; 对于转矩, 折算前后功率不变。不难得出折算前后的参数有如下关系式 (5) 成立:

$$\begin{cases} M_3 = M'_3 n_g^2 \\ T_e = T'_e n_g \\ D_3 = D'_3 n_g^2 \\ D_{23} = D'_{23} n_g^2 \end{cases} \quad (5)$$

式 (1) 可以化为标准状态方程式如式 (6) 所示:

$$\dot{X}_M = A_M X_M + B_M u_M \quad (6)$$

过求取状态方程 $\dot{X}_M = A_M X_M$ (相当于此是旋转系统无外力作用处于自由扭振状态) 的特征值来确定。对于

三质量块系统,求出的特征值应该是三对共轭复数,其中每一对共轭特征值的虚部绝对值对应系统的一个固有频率,实部表征该固有频率的振荡模态的阻尼特性,而特征向量则反映轴系各质量块的相对振幅和相位关系(即振型)。如果电网在某些情况下在这些频率上对旋转系统产生激励作用引发共振,则可能损坏叶片、齿轮箱等^[14]。

1.2 电气部分动态模型

1.2.1 双速异步发电机动态模型

双速异步发电机模型在三相对称的情况下, $dq0$ 方程组如下^[15]:

$$\begin{cases} u_{ds} = X_{ss} \dot{i}_{ds} + X_m \dot{i}_{dr} + R_s i_{ds} - \omega_r X_{ss} i_{qs} - \omega_r X_m i_{qr} \\ u_{qs} = X_{ss} \dot{i}_{qs} + X_m \dot{i}_{qr} + R_s i_{qs} + \omega_r X_{ss} i_{ds} + \omega_r X_m i_{dr} \\ u_{dr} = X_m \dot{i}_{ds} + X_{rr} \dot{i}_{dr} + R_r i_{dr} \\ u_{qr} = X_m \dot{i}_{qs} + X_{rr} \dot{i}_{qr} + R_r i_{qr} \\ T_e = X_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \\ M'_3 \dot{\omega}_r = T_e - T_m \end{cases} \quad (7)$$

其中, u 为电压; i 为电流;下标中,s表示定子侧;r表

示转子侧, d 表示直轴, q 表示交轴; R_s 为发电机定子电阻; X_s 为发电机定子电抗; R_r 为发电机转子电阻; X_r 为发电机转子电抗; X_m 为发电机激磁电抗; $X_{ss} = X_s + X_m$, $X_{rr} = X_r + X_m$; ω_r 为转子电角速度;其他参数与1.1节中定义一致。式(7)中 ω_r 和式(4)中的 ω_3 有如下关系:

$$\Delta\omega_r = n_p n_g \Delta\omega_3$$

其中, n_p 为发电机的极对数。

同机械部分建模过程一样,式(7)经过变换和线性化可以解得异步发电机的状态空间方程。这里选取电流为状态变量,使得整体的状态方程更加简洁:

$$\mathbf{X}_G = [\Delta i_{ds}, \Delta i_{qs}, \Delta i_{dr}, \Delta i_{qr}]^T$$

其中,下标G表示发电机的各项参数,下同。

式(7)经过变换和线性化以后,可以写成如式(8)所示的标准状态方程的形式:

$$\dot{\mathbf{X}}_G = \mathbf{A}_G \mathbf{X}_G + \mathbf{B}_G \mathbf{u}_G \quad (8)$$

其中,输入的控制变量为

$$\mathbf{u}_G = [\Delta\omega_1, \Delta u_{ds}, \Delta u_{qs}, \Delta u_{dr}, \Delta u_{qr}]^T$$

系数矩阵为

$$\mathbf{A}_G = \begin{bmatrix} \frac{X_s X_{rr}}{k X_m} & -\frac{\omega_{r0} X_{ss} X_{rr}}{k X_m} & \frac{X_{ss} X_{rr} R_r}{k X_m^2} - \frac{R_r}{X_m} & -\frac{\omega_{r0} X_{rr}}{k} \\ \frac{\omega_{r0} X_{ss} X_{rr}}{k X_m} & \frac{R_s X_{rr}}{k X_m} & \frac{\omega_{r0} X_{rr}}{k} & -\frac{R_r X_{ss} X_{rr} + k R_r X_m}{k X_m^2} \\ -\frac{R_s}{k} & \frac{\omega_{r0} X_{ss}}{k} & \frac{R_r X_{ss}}{k X_m} & \frac{\omega_{r0} X_m}{k} \\ -\frac{\omega_{r0} X_{ss}}{k} & -\frac{R_s}{k} & -\frac{\omega_{r0} X_m}{k} & \frac{R_r X_{ss}}{k X_m} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_G = \begin{bmatrix} -\frac{X_{rr}}{k X_m} & 0 & \frac{X_{rr} X_{ss}}{k X_m^2} + \frac{1}{X_m} & 0 & -\frac{X_{ss} X_{rr} i_{qs0} + X_{rr} X_m i_{qr0}}{k X_m} \\ 0 & -\frac{X_{rr}}{k X_m} & 0 & \frac{1}{X_m} + \frac{X_{ss} X_{rr}}{k X_m^2} & \frac{X_{ss} X_{rr} i_{ds0} + X_{rr} X_m i_{dr0}}{k X_m} \\ \frac{1}{k} & 0 & -\frac{X_{ss}}{k X_m} & 0 & \frac{X_m i_{qr0}}{X_m} + \frac{X_{ss} i_{qr0}}{k X_m^2} \\ 0 & \frac{1}{k} & 0 & 0 & -\frac{X_{ss} i_{ds0} + X_m i_{dr0}}{k} \end{bmatrix}$$

其中, ω_{r0} 为初始转速; i_{qs0} 、 i_{ds0} 、 i_{qr0} 、 i_{dr0} 分别为发电机相应的初始定子电流和转子电流分量; $k = X_m - X_{rr} X_{ss} / X_m$ 。

1.2.2 输电线路至无穷大系统在 $dq0$ 坐标系下的模型

输电线路中的参数包括机端并联电容,串联RLC等效环节。在这里为了简单,忽略输电线路的电容参数,即输电线路等效为RL串联模型。需将 abc 坐标系转化到 $dq0$ 坐标系下^[16]。同样,将方程线性变换后,可以得到式(9)所示的标准状态方程:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}}_{RL} = \mathbf{A}_{RL} \mathbf{X}_{RL} + \mathbf{B}_{RL} \mathbf{u}_{RL} \\ \dot{\mathbf{X}}_C = \mathbf{A}_C \mathbf{X}_C + \mathbf{B}_C \mathbf{u}_C \end{cases} \quad (9)$$

RL线路的状态变量为 $\mathbf{X}_{RL} = [\Delta i_{ds}, \Delta i_{qs}]^T$,输入控制量为 $\mathbf{u}_{RL} = [\Delta u_{ds}, \Delta u_{qs}]^T$,状态方程参数如下:

$$\mathbf{A}_{RL} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega_0 \\ -\omega_0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_{RL} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix}$$

并联电容C的状态变量为 $\mathbf{X}_C = [\Delta u_{ds}, \Delta u_{qs}]^T$,输入

控制量为 $\mathbf{u}_C = [\Delta i_{ds}, \Delta i_{qs}]^T$ 。

状态方程参数如下:

$$\mathbf{A}_C = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 \\ -\omega_0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_C = \begin{bmatrix} 1/C & 0 \\ 0 & 1/C \end{bmatrix}$$

1.3 统一的机电动态模型

将式(6)(8)(9)联立,将部分参数消去,全部系统可写成一个统一的标准状态方程如式(10)所示:

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A} \mathbf{X} + \mathbf{B} \mathbf{u} \quad (10)$$

状态变量为

$$\mathbf{X} = [\mathbf{X}_M, \mathbf{X}_G, \mathbf{X}_{RL}, \mathbf{X}_C]^T$$

式(10)即为统一的机电模型。

2 仿真结果及分析

2.1 系统参数计算

针对国产750 kW机组的实际参数进行计算,可以得到如表1所示的参数列表。仿真中可以忽略互阻尼的作用,传动比 $n_g = 75$ 。

表 1 风力机组机械部分参数表
Tab.1 Mechanical parameters of wind turbine-generator set

参数	数值	参数	数值
M_1	712010 kg·m ²	D_2	0.008 N·m·s/rad
M_2	8863 kg·m ²	D_3	0.008 N·m·s/rad
M_3	33796 kg·m ²	D_{12}	0
K_{12}	6.77×10 ⁷ N·m/rad	D_{23}	0
K_{23}	1.17×10 ⁷ N·m/rad	n_g	75
D_1	0.01 N·m·s/rad		

根据表 1 计算出式(6)中 A_M , 根据 1.1 节中所述方法求出机械旋转系统的 2 个固有频率: $f_1=2.8613$ Hz, $f_2=19.4878$ Hz。这 2 个频率是折算至低速侧的值。发电机及等效电路参数如表 2 所示。

表 2 发电机及线路参数
Tab.2 Electrical of parameters of wind turbine-generator set

参数	数值	参数	数值
定子电阻 R_s	0.011 60 Ω	转子漏抗 X_r	0.020 92 Ω
定子漏电抗 X_s	0.023 66 Ω	线路电阻 R	0.04 Ω
激磁电抗 X_m	0.338 70 Ω	线路电抗 X_L	0.4 Ω
转子电阻 R_r	0.026 90 Ω	并联补偿电容 C	1 200 μ F

2.2 仿真结果及分析

在风速为 12.5 m/s 的条件下,对图 1 所示的系统建模在 Matlab 和 PSCAD 双重验证下进行仿真。12.5 s 时,发电机出口发生三相短路故障,持续 0.02 s。得到发电机电磁转矩曲线见图 4(a),叶片转速曲线见图 4(b),电磁转矩和叶片转速在故障后均减幅振动,在经过一段时间后趋于稳定直线。

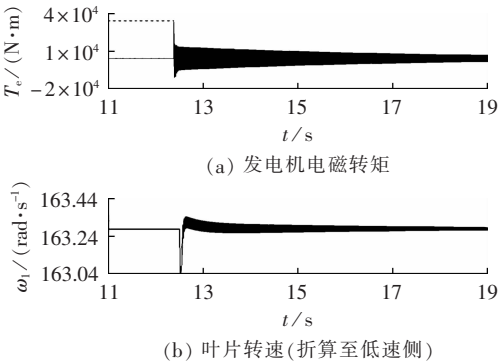


图 4 发电机出口短路时电磁转矩曲线和叶片转速曲线
Fig.4 Electromagnetic torque curve and blade speed curve when three-phase grounding fault occurs at generator outlet

经过频率分析,测得图 4 所示转速和转矩的振动频率 $f=212.776$ Hz。将此频率折算至低速侧,与 2.1 节中计算得出的轴系旋转系统振荡频率接近,即 $f=n_g f_1$ 。由图 4 可以看出,电磁转矩在正常情况下仅为 0.4×10^4 N·m 左右,短路后,瞬时的电磁冲击转矩达到了 3.5×10^4 N·m 左右,冲击过后电磁转矩在很长一段时间内保持为 1.5×10^4 N·m 左右,分别是正常情况下的 7 倍和 3 倍以上。过大的转矩对风机的旋转系统造成巨大的威胁,可能导致齿轮箱损坏、叶片折断等严重情况。

3 结论

本文介绍了研究并网风力发电机机网扭振作用所需要的统一机电模型。针对定桨恒频双速异步风力发电机,建立了单机对无穷大系统的动态小信号模型。在给定风速的情况下,得出了发电机出口短路时发电机转子的转矩曲线。仿真结果证实了在风电机组旋转系统的固有振动频率上,电网可能对其产生激励作用,从而激发轴系剧烈的扭振而导致严重后果。

参考文献:

[1] 施鹏飞. 2007 年国内外风电发展情况[J]. 可再生能源,2008, 26(3):7-12.
SHI Pengfei. Wind annual data report summary 2007[J]. Renewable Energy Resources,2008,26(3):7-12.

[2] 孙元章,吴俊,李国杰. 风力发电对电力系统的影响[J]. 电网技术,2007,31(20):55-60.
SUN Yuanzhang,WU Jun,LI Guojie. Influence research of wind power generation on power systems [J]. Power System Technology, 2007,31(20):55-60.

[3] WU Jinru,JIN Wen. Power demand forecast and development strategy for the period of 2005-2030[J]. Electricity,2007,18(4): 25-31.

[4] IEEE Committee Report. Reader's guide to subsynchronous resonance[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992,7(1): 150-157.

[5] IEEE Committee Report. Fourth supplement to a bibliography for the study of subsynchronous resonance between rotating machines and power systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems,1997,12(3):1276-1282.

[6] 鲍文,王西田,于达仁,等. 汽轮发电机组轴系扭振研究综述[J]. 汽轮机技术,1998,40(4):193-203.
BAO Wen,WANG Xitian,YU Daren,et al. A review on the study of turbine-generator shaft torsional oscillations[J]. Turbine Technology,1998,40(4):193-203.

[7] 余颖辉,张保会. 汽轮发电机组轴系扭振研究的发展与展望[J]. 电力系统自动化,1999,23(1):56-60.
YU Yinghui,ZHANG Baohui. Development and prospect of research on turbine-generator shaft torsional oscillation[J]. Automation of Electric Power Systems,1999,23(1):56-60.

[8] 何成兵,顾煜炯,杨昆. 汽轮发电机组扭振模型和算法综述[J]. 华北电力大学学报,2003,30(2):56-60.
HE Chengbing,GU Yujiong,YANG Kun. Summarization on torsional vibration model and algorithm of turbo generator unit [J]. Journal of North China Electric Power University,2003,30(2): 56-60.

[9] 周长春,徐政,王冠. 多机电力系统扭振相互作用的研究综述[J]. 电网技术,2004,28(6):1-6.
ZHOU Changchun,XU Zheng,WANG Guan. A survey on torsional interaction in multi-machine power grid[J]. Power System Technology,2004,28(6):1-6.

[10] 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):116-117.
LI Dongdong,CHEN Chen. A study on dynamic model of wind turbine generator sets[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(3): 116-117.

[11] 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.

- [12] VARMA R K, AUDDY S, SEMSEDINI Y. Mitigation of subsynchronous resonance in a series-compensated wind farm using FACTS controllers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(3): 1645-1654.
- [13] PAPATHANASSIOU S A, PAPADOPOULOS M P. Dynamic behavior of variable speed wind turbines under stochastic wind [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 12(4): 1617-1623.
- [14] 伯顿. 风能技术[M]. 武鑫, 译. 北京: 科学出版社, 2007: 59-65.
- [15] 高景德, 王祥珩, 李发海. 交流电机及其系统的分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 318-327.
- [16] 余耀南. 动态电力系统 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1985: 136-150.

(责任编辑: 康鲁豫)

作者简介:

王瑞琳(1988-), 女, 湖北襄樊人, 硕士研究生, 从事电力系统 FACTS 研究和电力系统仿真 (**E-mail**: rainy405@sjtu.edu.cn);

解 大(1969-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 副教授, 博士, 从事电力系统 FACTS 研究和电力系统仿真 (**E-mail**: Xieda@sjtu.edu.cn);

王西田(1973-), 男, 陕西西安人, 副教授, 博士, 从事电网机网扭振研究;

张延迟(1967-), 男, 北京人, 副教授, 博士研究生, 从事并网型风力发电机和电力系统仿真。

Modeling and mechanism of torsional vibration of grid-connected wind generator

WANG Ruilin¹, XIE Da¹, WANG Xitian¹, ZHANG Yanchi^{2,3}

(1. Electrical Engineering Department, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Automation Department, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China;

3. Electrical Engineering Department, Shanghai Dianji University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Papers on the torsional vibration of grid-connected wind generator are reviewed and its necessity is pointed out. The unified electromechanical models of grid-connected stalled wind generator are established for torsional vibration study. The finite element analysis is employed to model the blades and the mechanically rotating system, including the blades, low speed shaft, gear box, high speed shaft and generator rotor, is modeled as three softly-connected masses to calculate its inherent frequency. The electrical part, including generator stator and grid, is modeled in $dq0$ coordinates. The simulation model is built with the electromagnetic transient simulation software and the torsional vibration is excited by setting a three-phase grounding fault at the beginning end of transmission line. The simulated torsional vibration curves are analyzed in frequency domain, which shows the vibration frequency is consistent with the calculated inherent frequency and proves the correctness of the established models.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China(50807036).

Key words: stalled wind turbine; torsional vibration; finite element analysis; modeling; three-mass model