

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2015.01.006

并网双馈风力发电机组整机建模与仿真

杜 静,周云鹏,李成武

(重庆大学 机械工程学院,重庆 400044)

摘 要:为了充分地研究风速波动、风向变化和电网扰动等外部激励对于并网双馈异步风力发电机组影响,利用 Simpack 与 Matlab/Simulink 软件为仿真平台,搭建了某 MW 级风力发电机组联合仿真模型,并结合风电机组在实际运行中的控制策略,对各外部激励与机械系统之间的相互作用关系进行了深入的研究。通过在湍流风条件下的时域计算结果,分析了齿轮副动态啮合力,并求解了在不同外部激励作用下,塔筒产生的振动响应。研究结果为风力机可靠性设计和动态性能优化奠定了基础。

关键词:风力发电机;联合仿真;动态啮合力;振动分析

中图分类号:TH132

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2015)01-0045-11

Modeling and simulation of a grid connected wind turbine with doubly fed induction generator

DU Jing, ZHOU Yunpeng, LI Chengwu

(College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P.R.China)

Abstract: In order to fully research the effects of external excitations, such as wind speed, wind direction and voltage disturbance, on a grid connected wind turbine with doubly fed induction generator, a co-simulation model of MW-class wind turbine system is established by using Simpack and Matlab/Simulink software. Also, by considering the actual control strategies in the process of simulation, the relationship between external excitations and mechanical system is studied. According to time-domain simulation under the turbulent wind condition, the dynamic meshing forces of gears are analyzed. Besides, the vibration responses of tower are calculated under the different external excitations. Research results lay a foundation for dynamic performance optimization and reliability design of a wind turbine.

Key words: wind turbines; co-simulation; dynamic meshing force; vibration analysis

众所周知,风力发电机组长期工作在变速、变载荷的复杂条件下。为了保证可靠的风机设计,长期以来,国内外的学者对风电机组的建模与仿真技术的发展作了巨大的贡献。Helsen 等^[1]分别采用了纯扭转建模技术、六自由度刚体建模技术和多柔体建模技术对风电齿轮箱进行了理论分析,并且通过实验的方法验证了多柔体建模技术的优越性。大连理工大学的孙伟等^[2]运用振型叠加法对齿轮箱系统在内部激励与外部激励综合作用下的振动响应进行了数值仿真,研究了风电齿轮箱非线性耦合动态特性。美国国家可再生能源实验室的 Oyague 等^[3]对 750 kW 风电齿轮箱的受力进行了理论分析和仿真研究。Schlecht 等^[4]考虑了旋转部件的旋转自由度,同时考虑了轴向移动自由度,建立了传动系统模型并进行模态分析。Todorov 等^[5]通过建立

收稿日期:2014-09-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51005255)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(51005255).

作者简介:杜静(1964-),女,重庆大学教授,博士,主要从事风力发电技术研究,(E-mail)dujing@cqu.edu.cn。

10 体 8 自由度风机传动链扭转模型,考虑了齿轮啮合的刚度,并且将气动力作为外部激励,获得了系统的固有频率、模态、扭转振荡的时域数据和幅频特性。Hauptmann 等^[6]运用德国 SIMPACK AG 公司开发的多体系统动力学软件 SIMPACK 建立了风力发电机传动链的多体系统动力学模型,并对传动链进行了模态分析。Li 等^[7]通过建立详细的双馈异步发电机和传动链数学模型,分析和研究了叶片的柔性对于并网风力发电机组暂态稳定性的影响。何玉林等^[8]利用多柔体系统动力学方法,对风电机组传动链进行了振动响应分析。

笔者根据德国劳氏船级社 GL2010 版风电机组认证规范^[9],以 Simpack 与 Matlab/Simulink 为仿真平台,结合柔性多体系统动力学与电机学等建立了 MW 级风电机组联合仿真模型。计算得到了齿轮动态啮合力和塔筒等部件的振动响应。表明了在设计与评估过程中,建立详细的风电机组模型,具有重要的理论价值与实际工程意义。

1 风电机组多体动力学模型

1.1 理论基础

柔性多体系统动力学的建模方法主要分为两大类,即以牛顿-欧拉方法为代表的矢量力学方法和以 Lagrange 方程为代表的分析力学方法。应用最广泛的是利用后者来建立柔性多体系统动力学方程,并用动参考系和弹性变形两组广义坐标来描述系统中柔性体的位移。但由于柔性体具有无穷多个自由度,所以通常采用模态综合法将其离散为有限各自由度的分析模型^[10]。那么,物体的位移(变形)为

$$u = \varphi q, \quad (1)$$

式中: $\varphi = [\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N]$ 为模态向量矩阵, N 为模态数(远小于物体自由度), $q = q(t)$ 为模态坐标。

所以,对于柔性体上任意节点 p 的位置向量有

$$r_p = r_0 + A(s_p + \varphi q), \quad (2)$$

式中: r_0 为体坐标系在惯性参考系中的位置向量, A 为旋转变换矩阵, s_p 为节点 p 相对于体坐标系的位置向量。

则由式(2)对时间的导数可得点 p 的速度与加速度向量:

$$\begin{cases} \dot{r}_p = \dot{r}_0 + \dot{A}(s_p + u_p) + A\dot{\varphi}q, \\ \ddot{r}_p = \ddot{r}_0 + \ddot{A}(s_p + u_p) + 2\dot{A}\dot{\varphi}q + A\ddot{\varphi}q. \end{cases} \quad (3)$$

考虑到节点 p 在柔性体变形前后的位置,方向和模态变化,那么其广义坐标可表示为, $\zeta = [x, y, z, \psi, \theta, \varphi, q] = [r, \varphi, q]$ 。那么节点 p 的速度又可以表示为:

$$\dot{r}_p = [I, B, A\varphi] \begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{\varphi} \\ \dot{q} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

于是柔性体的动能为:

$$T = \frac{1}{2} \int \rho \dot{r}_p^T \dot{r}_p dV = \frac{1}{2} \dot{\zeta}^T M(\zeta) \dot{\zeta}. \quad (5)$$

式(5)中,质量矩阵 $M(\zeta) = \begin{bmatrix} M_{tt} & M_{tr} & M_{tm} \\ M_{tr}^T & M_{rr} & M_{rm} \\ M_{tm}^T & M_{rm}^T & M_{mm} \end{bmatrix}$, 其中下标 t, r, m 分别表示平动、旋转和模态自由度。

则用拉格朗日乘子法建立起来的柔性多体系统动力学方程及约束方程的形式为

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\zeta}} \right)^T - \left(\frac{\partial T}{\partial \zeta} \right)^T + C_{\zeta}^T \lambda = Q_F + Q_V, \\ C(\zeta, t) = 0 \end{cases}, \quad (6)$$

式中: C_{ζ} 为约束的雅可比矩阵, Q_F 为广义主动力向量, Q_V 为速度的二次项广义力向量, C 为相应的约束方程。

1.2 多体动力学仿真平台与模型建立

考虑到商用多体动力学软件 Simpack 在大频段和大幅值覆盖能力上的优势,以 Simpack 为核心建立风电机组整机多体动力学模型^[8]。在建模过程中,为了更有效的反映部件的弹性变形和振动响应,准确地得出风电机组的动力学特性,并且为了节省计算成本,对于柔性较大和需要重点考虑的部件采用了柔性体建模技术,而对于刚性较大的部件采用刚体建模技术。这样就可以有效的反映构件的变形和应力分布情况,并且更真实地分析整机的运行特性。那么,根据 GL2010 认证规范^[9],现将建模所需部件,刚柔属性和自由度的要求整理如表 1 所示。

对于复杂的多体系统建模,绘制结构清晰的拓扑图是十分必要的。文中根据风电机组的实际结构与载荷的传递路线,绘制了如图 1 所示的系统拓扑图。

1.2.1 柔性体建模

在 Simpack 中,复杂柔性体的建立必须借助于 FEMBS 模块导入有限元模型。而 FEMBS 与多种有限元软件建立了接口程序,包括 Ansys、Nastran、Marc、Abaqus 等。在这里,使用 Ansys 作为有限元的分析工具。

在有限元的分析中,常通过大量的节点来表示复杂柔性体的运动,但由此造成了自由度过于巨大,计算耗时长的的问题。所以,为了降低计算成本,在建模过程中,首先采用 Guyan 方法对柔性体进行子结构缩减。子结构的自由度包括了外部自由度和内部自由度,前者附着于主节点上(即多体系统的铰接点),而后者表示了由特征模态所获得的广义自由度之间的动态关系。子结构节点位移,刚度矩阵和载荷列阵可写为如下形式^[11]

$$\begin{bmatrix} K_{dd} \\ K_{id} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_d \\ X_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_d \\ F_i \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中: X_d 、 X_i 分别表示外部自由度与内部自由度,载荷列阵 F 与刚度矩阵 K 也分为与自由度相对应的分块矩阵。

则由式(7)可得:

$$X_i = K_{ii}^{-1} (F_i - K_{id} X_d). \quad (8)$$

将式(8)代入式(7)就可以得到凝聚后的方程为

$$K_d^* X_d = F_d^*, \quad (9)$$

式中, $K_d^* = K_{dd} - K_{di} K_{ii}^{-1} K_{id}$, $F_d^* = F_d - K_{di} K_{ii}^{-1} F_i$ 。从式(9)可以看出,内部自由度已经全部得到凝聚。目前,国内外学者的研究表明,子结构法在有效地减少计算时间的同时不影响计算精度,它对于柔性多体动力学建模是行之有效的^[12]。

主节点作为柔性体与其它部件的铰接点,为了实现力与运动的传递,需要利用多点约束(MPC)的方法将主节点与该柔性体配合表面的从节点联系起来。MPC 包括了刚性多点约束与柔性多点约束,前者在进行数值计算时,会引入额外的刚度,而后者更能反映柔性体的变形。比利时鲁汶大学的 Heirman G 等^[13]在建模时便使用了柔性多点约束方法,讨论了柔性部件对于风电机组齿轮箱的动力学特性的影响。

1.2.2 轴承建模

风力发电机传动链中最重要的柔性为轴承的柔性,根据 Hertz 弹性体接触理论,作用在轴承上的外载荷 $F_{Body,i}$ ($i=1,2,\dots,n$) 与轴承内、外圈之间的相对位移 $X_{Body,i}$ ($i=1,2,\dots,n$) 的关系如式(10)所示。

表 1 风电机组各主要零部件及建模要求

Tab.1 Main components and modeling requirements of the wind turbine

风电机组建模部件	零部件建模要求	零部件自由度
叶片	柔性体	挥舞、拍打
轮毂	刚体	六自由度
主轴	柔性体	六自由度
齿轮箱箱体	刚体	六自由度
行星架	柔性体	六自由度
齿轮轴	柔性体	六自由度
齿轮	刚体	六自由度
齿轮箱弹性支撑	弹簧阻尼力元	移动自由度
发电机联轴器	三段刚体	六自由度
发电机转子	刚体	六自由度
发电机箱体	刚体	扭转、移动自由度
发电机弹性支撑	弹簧阻尼力元	移动自由度
主机架	柔性体	六自由度
轴承	弹簧阻尼力元	全刚度矩阵
塔筒	柔性体	塔底与惯性参考系固联

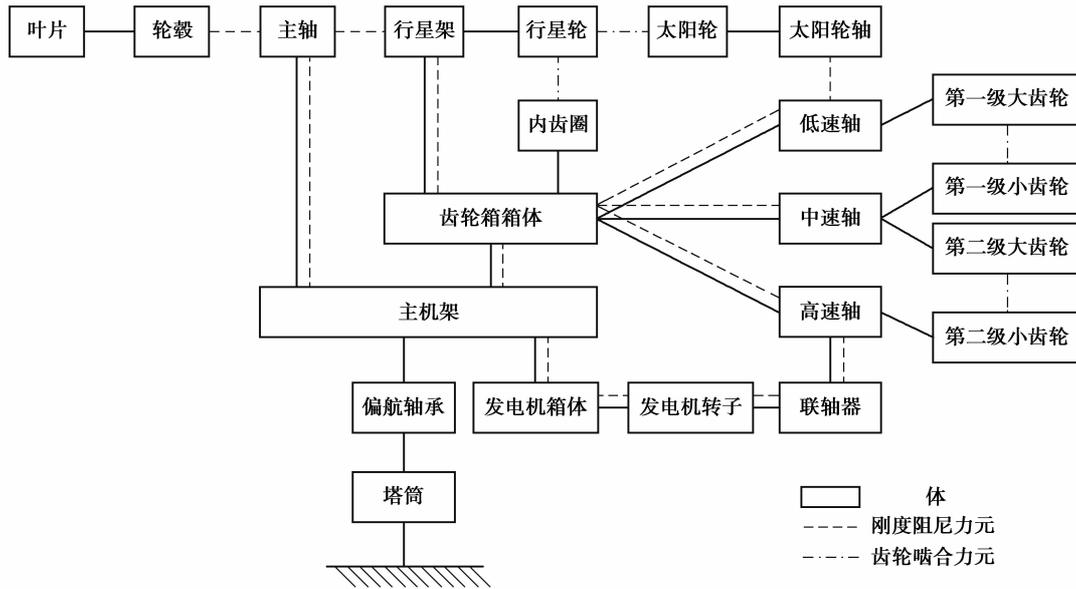


图 1 风电机系统拓扑图

Fig.1 Topological diagram of the wind turbine system

$$\begin{bmatrix} F_{Body,1} \\ F_{Body,2} \end{bmatrix} = K_{bearing} \begin{bmatrix} X_{Body,1} \\ X_{Body,2} \end{bmatrix} + C_{bearing} \begin{bmatrix} \dot{A}_{Body,1} \\ \dot{A}_{Body,2} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中: $F_{Body,1} = [F_{X1} \ F_{Y1} \ F_{Z1} \ M_{X1} \ M_{Y1} \ M_{Z1}]^T$; $F_{Body,2} = [F_{X2} \ F_{Y2} \ F_{Z2} \ M_{X2} \ M_{Y2} \ M_{Z2}]^T$;
 $q_{Body,1} = [x_1 \ y_1 \ z_1 \ \theta_1 \ \rho_{y1} \ \rho_{z1}]^T$; $q_{Body,2} = [x_2 \ y_2 \ z_2 \ \theta_2 \ \rho_{y2} \ \rho_{z2}]^T$ 。

为了更准确的表达出轴承的刚度特性,采用全刚度矩阵来模拟^[8],即:

$$K_{bearing} = \begin{bmatrix} k_{axial,axial} & k_{axial,radial1} & k_{axial,radial2} & 0 & k_{axial,tilt1} & k_{axial,tilt2} \\ k_{radial1,axial} & k_{radial1,radial1} & k_{radial1,radial2} & 0 & k_{radial1,tilt1} & k_{radial1,tilt2} \\ k_{radial2,axial} & k_{radial2,radial1} & k_{radial2,radial2} & 0 & k_{radial2,tilt1} & k_{radial2,tilt2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{tilt1,axial} & k_{tilt1,radial1} & k_{tilt1,radial2} & 0 & k_{tilt1,tilt1} & k_{tilt1,tilt2} \\ k_{tilt2,axial} & k_{tilt2,radial1} & k_{tilt2,radial2} & 0 & k_{tilt2,tilt1} & k_{tilt2,tilt2} \end{bmatrix}$$

1.2.3 齿轮建模

齿轮啮合的时变刚度激励是风电机传动链中最重要的内部激励。本文所采用的 Simpack 齿轮啮合解析力元依据 DIN3990 标准,考虑了齿轮副的材料属性,综合啮合误差和时变啮合刚度,能够较为合理地模拟齿轮啮合的实际情况。

根据上述规范和要求,结合实测参数,建立了风电机刚柔混合多体动力学模型,如图 2 所示。

2 双馈异步发电机电磁暂态方程

假设双馈异步发电机(DFIG)为理想的三相对称电机,不计零轴分量并且忽略磁饱和,规定各绕组电压、电流磁链的正方向符合电动机惯例。通过坐标变换,在两相同步速旋转 $d-q$ 坐标系中建立详细的 DFIG 数学模型^[14-15]。

1)电压方程

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + \rho \psi_{sd} - \omega_1 \psi_{sq} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + \rho \psi_{sq} + \omega_1 \psi_{sd} \\ u_{rd} = R_r i_{rd} + \rho \psi_{rd} - \omega_s \psi_{rq} \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + \rho \psi_{rq} + \omega_s \psi_{rd} \end{cases}, \quad (11)$$

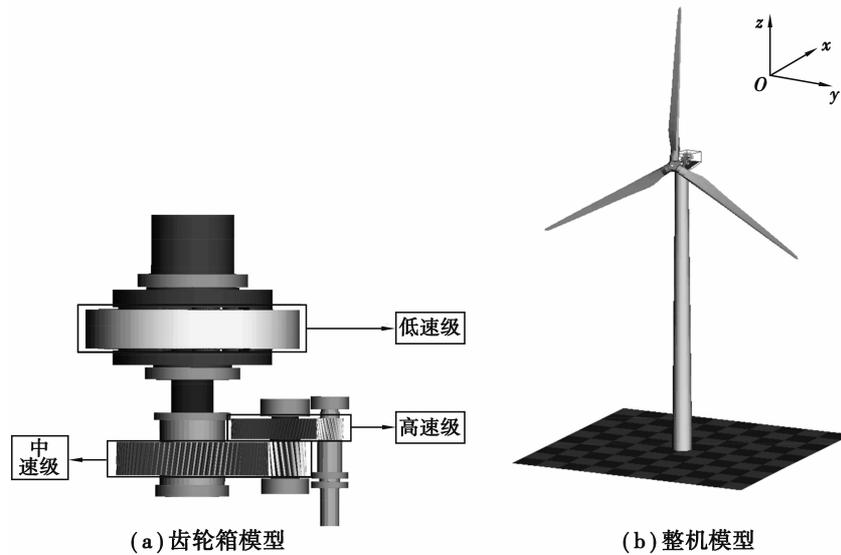


图 2 风电机组刚柔混合多体动力学模型

Fig.2 The rigid and flexible multi-body dynamics model of the wind turbine

式中: u_{sd} 、 u_{sq} 、 u_{rd} 、 u_{rq} 分别为定、转子电压的 d - q 轴分量; i_{sd} 、 i_{sq} 、 i_{rd} 、 i_{rq} 分别为定、转子电流的 d - q 轴分量; ψ_{sd} 、 ψ_{sq} 、 ψ_{rd} 、 ψ_{rq} 分别为定、转子磁链的 d - q 轴分量; ω_1 为定子旋转磁场角速度; ω_s 为转差角速度, $\omega_s = \omega_1 - \omega_r$ (ω_r 为转子电角速度); ρ 为微分算子。

2) 磁链方程

$$\begin{cases} \psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \psi_{rd} = L_m i_{sd} + L_r i_{rd} \\ \psi_{rq} = L_m i_{sq} + L_r i_{rq} \end{cases}, \quad (12)$$

式中: L_m 为 d - q 坐标系同轴等效定子与转子绕组间的互感, $L_m = 1.5L_{ms}$ (L_{ms} 为定子一相绕组交链的最大互感磁通所对应的定子互感值); L_s 为 d - q 坐标系等效两相定子绕组的自感, $L_s = L_m + L_{ls}$ (L_{ls} 为定子漏感); L_r 为 d - q 坐标系等效两相转子绕组的自感, $L_r = L_m + L_{lr}$ (L_{lr} 为转子漏感)。

3) 电磁转矩 T_{em} 方程

$$T_{em} = \frac{3}{2} p L_m (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq}), \quad (13)$$

式中, p 是极对数。

4) 定子功率方程

将发电机定子上的有功功率 P_s 和无功功率 Q_s 用 d - q 坐标系上的分量表示, 则有

$$\begin{cases} P_s = 1.5(u_{sd} i_{sd} + u_{sq} i_{sq}), \\ Q_s = 1.5(u_{sq} i_{sd} - u_{sd} i_{sq}). \end{cases} \quad (14)$$

3 风电机组控制策略

风力发电机控制系统主要由 3 个子系统组成: DFIG 控制系统、变桨控制系统和偏航控制系统。

3.1 DFIG 定子磁链定向控制

借助于定子磁链定向控制技术^[14,16], 通过坐标变换使得转子电流的有功与无功分量获得解耦, 再分别控制这两个分量电流, 实现对 DFIG 有功和无功功率的解耦控制。

将 DFIG 定子磁链方程写成矢量形式,

$$\Psi_s = L_s \mathbf{I}_s + L_m \mathbf{I}_r = L_m \mathbf{I}_{ms}, \quad (15)$$

式中, \mathbf{I}_s 、 \mathbf{I}_r 分别为定转子电流矢量, $\mathbf{I}_s = i_{sd} + j i_{sq}$, $\mathbf{I}_r = i_{rd} + j i_{rq}$; \mathbf{I}_{ms} 为定子的等效励磁电流矢量,

$$\mathbf{I}_{ms} = \left(\frac{L_s}{L_m} \mathbf{I}_s + \mathbf{I}_r \right).$$

当同步速旋转坐标系的 d 轴定向于定子磁链矢量 Ψ_s 时,有

$$\begin{cases} \psi_{sd} = |\Psi_s| = \psi_s = L_s i_{sd} + L_m i_{rd}, \\ \psi_{sq} = 0 = L_s i_{sq} + L_m i_{rq}, \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} i_{msd} = |\mathbf{I}_{ms}| = i_{ms} = \frac{\psi_s}{L_m}, \\ i_{msq} = 0, \end{cases} \quad (17)$$

式中: ψ_s 为定子磁链矢量幅值; i_{ms} 为定子励磁电流矢量幅值。

于是得:

$$\begin{cases} i_{sd} = \frac{L_m}{L_s} (i_{ms} - i_{rd}), \\ i_{sq} = -\frac{L_m}{L_s} i_{rq}. \end{cases} \quad (18)$$

忽略定子电阻,那么定子电压矢量 \mathbf{U}_s 将比磁链矢量超前 90° ,正好落在 q 轴的正方向上。则定子电压方程可写为:

$$\begin{cases} u_{sd} = 0, \\ u_{sq} = |\mathbf{U}_s| = u_s. \end{cases} \quad (19)$$

式中: u_s 为定子电压矢量幅值。那么将式(16)和式(17)代入式(12)中可得:

$$\begin{cases} P_s = -\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} u_s i_{rq}, \\ Q_s = \frac{3}{2} u_s \frac{L_m}{L_s} (i_{ms} - i_{rd}). \end{cases} \quad (20)$$

由式(18)可以看出,采用定子磁链定向后,控制转子电流 q 轴分量就可控制 DFIG 定子输出有功功率,控制转子电流 d 轴分量就可控制 DFIG 向电网输出的无功功率,实现 DFIG 有功和无功功率的解耦控制。所以 DFIG 风电机组的控制主要是通过转子侧变换器电流矢量的控制来实现。

转子磁链可用定子磁链来表示:

$$\begin{cases} \psi_{rd} = \frac{L_m}{L_s} \psi_s + \sigma L_r i_{rd} = \frac{L_m^2}{L_s} i_{ms} + \sigma L_r i_{rd}, \\ \psi_{rq} = \sigma L_r i_{rq}. \end{cases} \quad (21)$$

式中 σ 为发电机漏磁系数, $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_r L_s}$ 。

则转子电压方程为:

$$\begin{cases} u_{rd} = R_r i_{rd} + \sigma L_r \frac{di_{rd}}{dt} - \omega_s \sigma L_r i_{rq}, \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + \sigma L_r \frac{di_{rq}}{dt} + \omega_s \left(\frac{L_m}{L_s} \psi_s + \sigma L_r i_{rq} \right) \end{cases} \quad (22)$$

根据式(22)可以得到基于定子磁链定向矢量控制的转子电流闭环控制策略^[14]。

3.2 统一变桨控制

变桨距系统被用于调节风轮从风中捕获能量的大小,这一过程通过改变桨距角来实现。为了简化变桨控制,这里采用统一变桨控制策略^[17],主要考虑了起动变桨和正常工作时的变桨过程。使用了一个 PID 控制器来实现正常工作时的变桨控制,如图 3 所示。桨距角 β 被限制在最佳桨距角 β_{min} 和最大桨距角 β_{max} ,其最大变桨角速度为 $\Delta\beta_{max}$ 。

3.3 偏航控制

偏航控制共包含 4 种状态:分别是手动偏航,自动对风偏航,自动解缆和停止偏航。在自动对风偏航过程中,水平轴风力发电机组的偏航系统通过检测风向信号,计算其与机舱位置的夹角与方向,如果夹角超过

一定数值时(本文根据所研究的机型数据设为 $\pm 12^\circ$),则由控制系统发出信号,偏航机构执行动作,已达到使机舱快速对准风向的目的。如果夹角在允许范围以内,则机舱保持既定方向。

风力机偏航系统控制框图如图 4 所示^[17]。

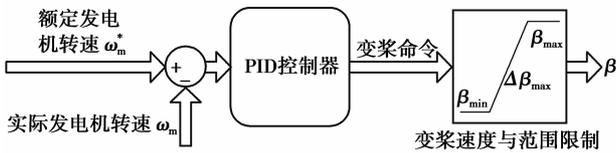


图 3 变桨控制框图

Fig.3 Pitch control block diagram

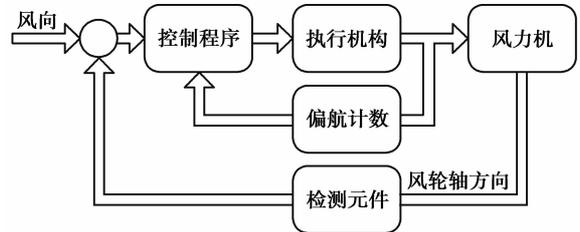


图 4 偏航控制框图

Fig.4 Yaw control block diagram

综上所述,在 Matlab/Simulink 中建立了电机方程及控制系统模型,并且通过 Simat 模块与 Simpack 进行实时的数据交换,实现联合仿真,如图 5 所示。

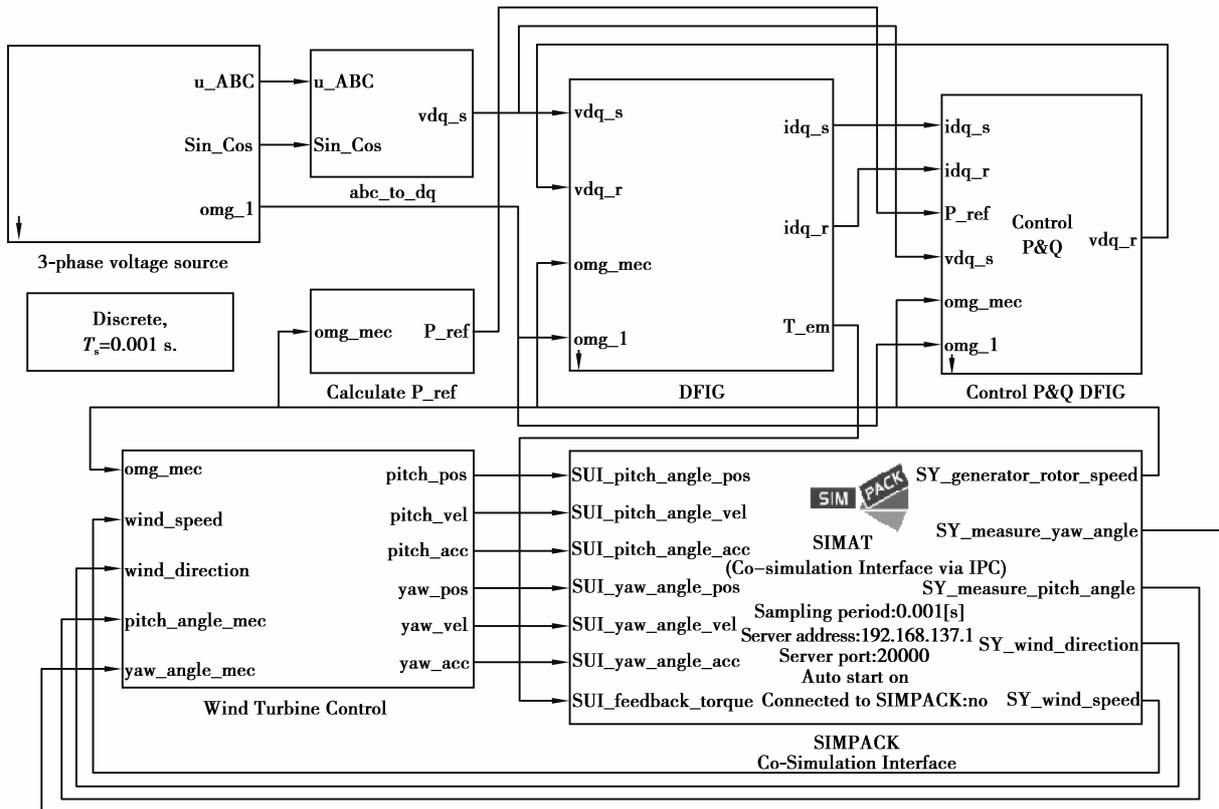


图 5 发电机及控制系统模型

Fig.5 Generator and control system model

4 仿真分析

为了计算气动转矩,Simpack 需要读取风速文件,该文件利用大气湍流数学模型生成。常用的湍流模型包括 von Karman 模型,改进 von Karman 模型和 Kaimal 模型。尽管这 3 种模型的自频谱和交叉频谱函数的形式稍有不同,但人们普遍认为他们能够合理地描述大气湍流。笔者利用 Kaimal 模型得到了 60 s 的风速时间历程曲线,如图 6 所示,其平均风速分别为 12 m/s 和 18 m/s,湍流强度均为 20%。

发电机主要参数如表 2 所示,风力机主要参数如表 3 所示。

表 2 DFIG 主要参数

Tab.2 Main parameters of DFIG

参数	取值
额定功率 P^*/MW	1
电网电压 u_s/kV	0.69
电网频率 f_1/Hz	50
额定发电机转速 $\omega_m^*/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	188.5
定子电阻 R_s/Ω	0.031
定子漏感 L_s/H	0.09
转子电阻 R_r/Ω	0.03
转子漏感 L_r/H	0.14
定转子互感 L_m/H	0.025
极对数 p	2

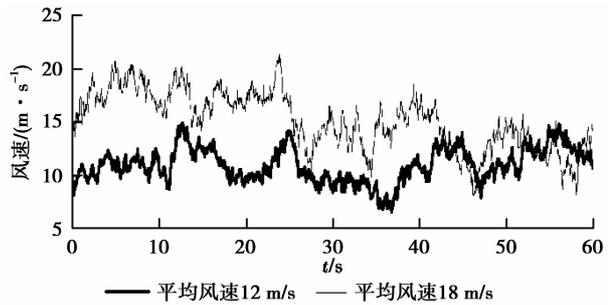


图 6 风速时间历程曲线

Fig.6 Time history curves of wind speed

表 3 风力机主要参数

Tab.3 Main parameters of wind turbine

参数	取值
空气密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1.225
切入风速 $v_{in}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	3.5
额定风速 $v_{rated}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	12
切出风速 $v_{out}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	25
最大变桨角速度 $\Delta\beta_{max}/((^\circ) \cdot \text{s}^{-1})$	9.5
桨距角变化范围 $\beta_{min} \sim \beta_{max}/(^\circ)$	2.6~90
最大偏航角速度 $\Delta Yaw_{max}/((^\circ) \cdot \text{s}^{-1})$	1

4.1 风力发电机组性能仿真

分别对图 6 所示 2 种湍流风条件下风力发电机组模型进行时域分析,则风力机性能仿真结果如图 7~8 所示。从分析结果看出,在风速波动的情况下,系统通过发电机控制和变桨控制,在风速较低时实现了最大风能追踪,在风速较高时,使发电机各参数不超过最大值,保证系统的安全运行。

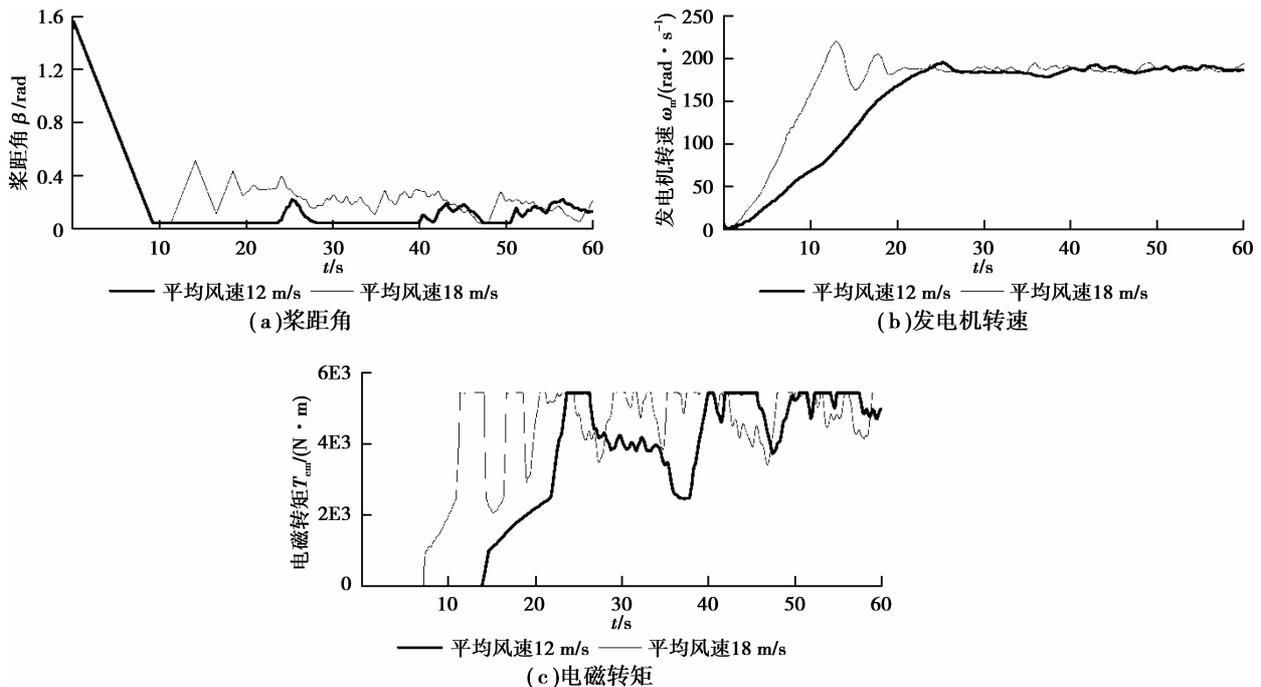


图 7 风力机桨距角、发电机转速和电磁转矩曲线

Fig.7 Curves of pitch angle, rotate speed and electromagnetic torque

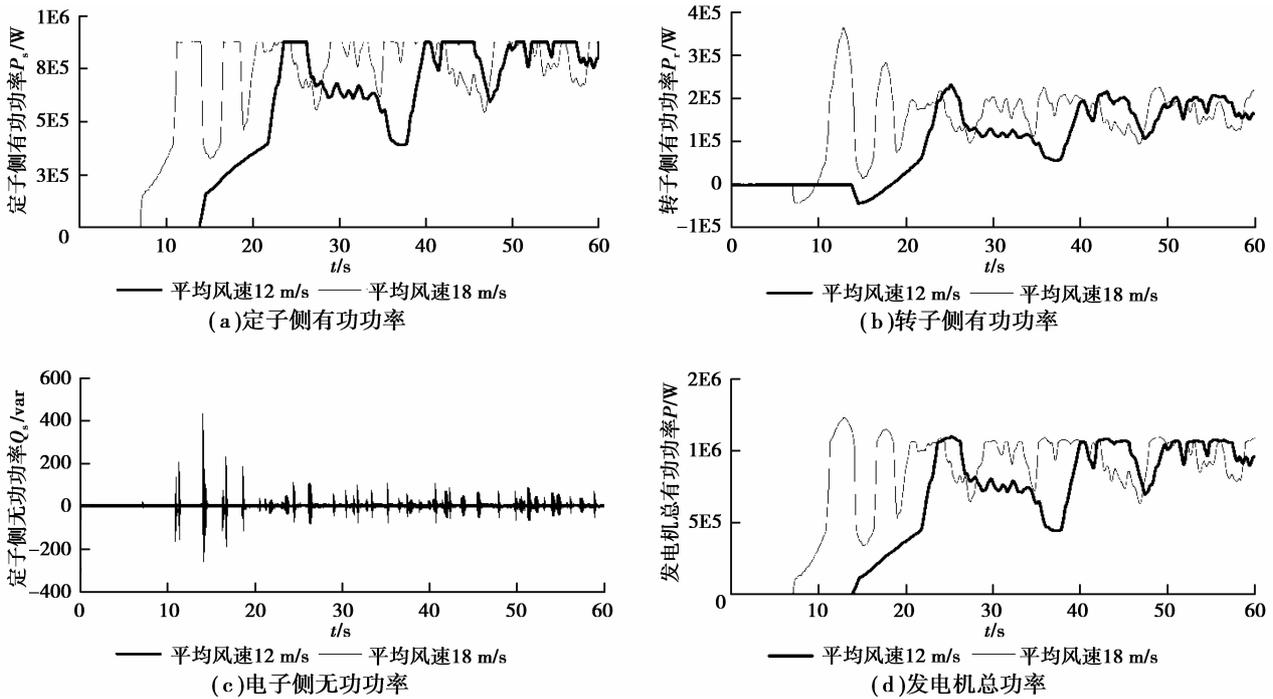


图 8 发电机有功与无功功率
Fig.8 Active and reactive power of wind power generator

4.2 湍流风条件下的齿轮动态啮合力

根据时域分析结果,从齿轮啮合力元中可以提取齿轮副切向、径向和轴向啮合力,并借此计算出齿轮总的啮合力。由于篇幅有限,这里只给出高速级齿轮啮合力的计算结果和幅值统计结果,分别如图 9、10 所示。从分析结果可以看出,齿轮啮合力由于风速波动的影响,具有很大的时变性,其统计结果可以为以后的可靠性分析提供条件。

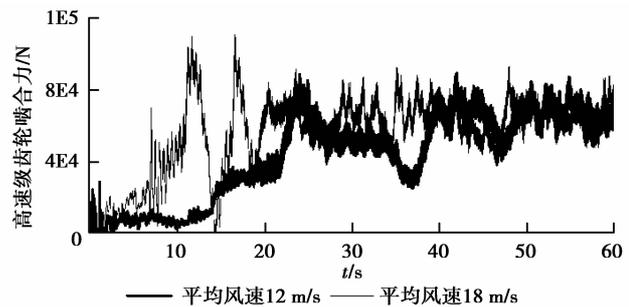


图 9 高速级齿轮动态啮合力
Fig.9 Dynamic meshing force of high speed gears

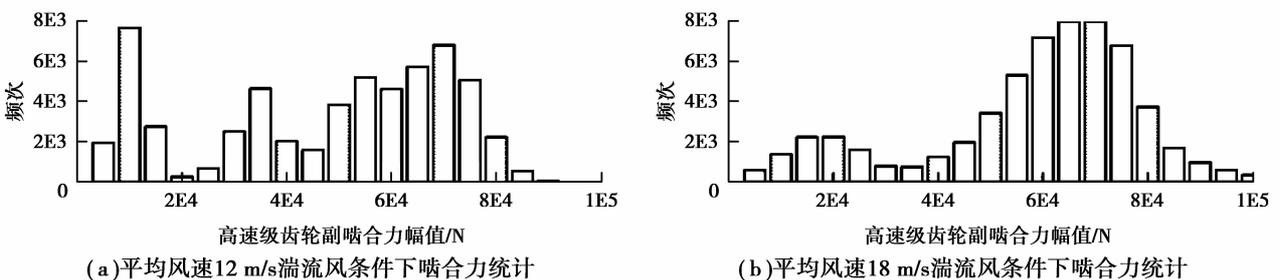


图 10 高速级齿轮动态啮合力幅值统计
Fig.10 Amplitude statistics of dynamic meshing force of high speed gears

4.3 塔筒动态响应分析

4.3.1 风速波动对于塔筒振动的影响

风速的波动将会引起塔筒的振动,根据时域分析结果,给出了发电机达到额定转速之后的塔筒顶部横向振动(沿 x 轴与 y 轴振动的合成)曲线,如图 11 所示。

4.3.2 电网扰动对于塔筒振动的影响

在平均风速 12 m/s 湍流风作用下,假设在 30 s 时,电网电压跌落 80%,持续时间 1 s,如图 12 所示。并且假设在仿真过程电网电压骤降没有触及保护装置动作,及控制系统仍然正常工作,且在故障切除后使发电机恢复

到正常运行。电压跌落将改变发电机转速转矩,如图 13 所示,其造成的冲击将加剧塔筒的振动,如图 14 所示。

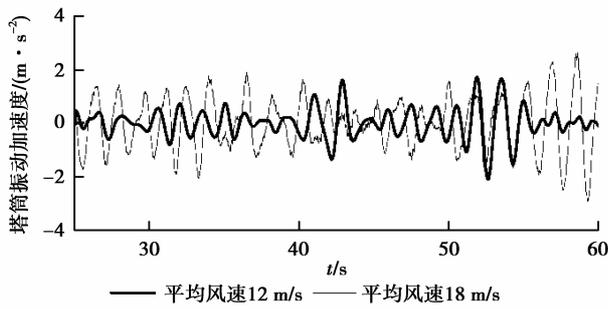


图 11 塔筒顶部横向振动加速度

Fig.11 Acceleration of horizontal vibration on top of tower

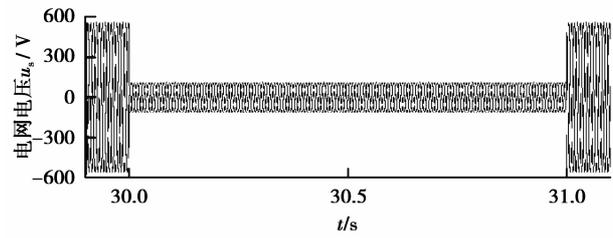
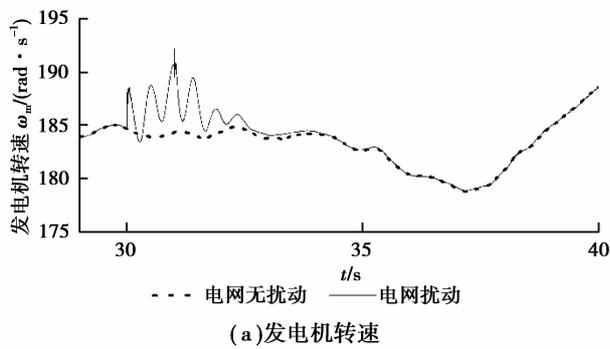
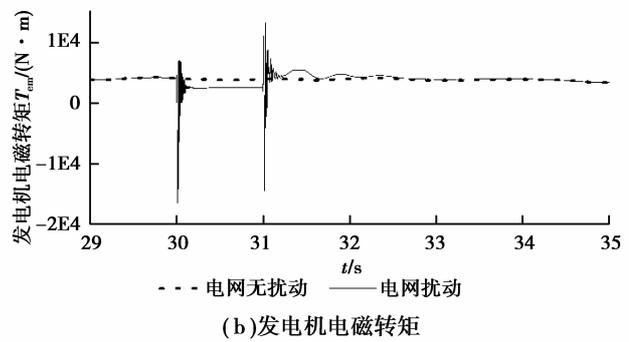


图 12 电网电压

Fig.12 Grid voltage



(a)发电机转速



(b)发电机电磁转矩

图 13 电压跌落时发电机转速转矩响应

Fig.13 Torque response of generator when voltage sags

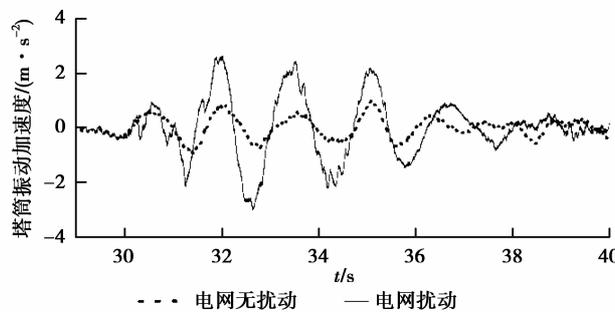


图 14 电压跌落时塔筒顶部横向振动加速度

Fig.14 Acceleration of horizontal vibration on top of tower when voltage sags

4.3.3 风向变化对于塔筒振动的影响

在平均风速 12 m/s 湍流风作用下,假设在 25 s 时,风向由 0°变为 30°,偏航机构执行动作,风向角与偏航角如图 15 所示,塔筒的振动曲线如图 16 所示。

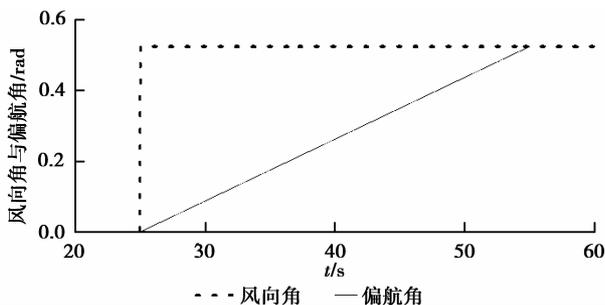


图 15 风向角与偏航角

Fig.15 Wind direction and yaw angle

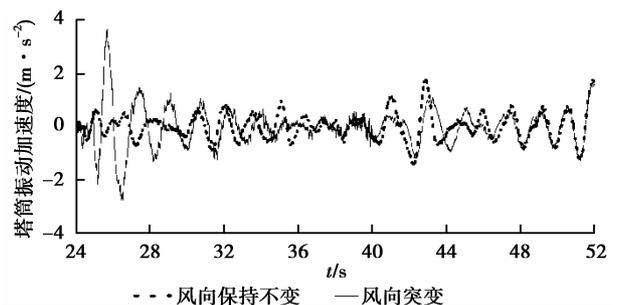


图 16 塔筒顶部横向振动加速度

Fig.16 Acceleration of horizontal vibration on top of tower

5 结 论

以 MW 级双馈风力发电机组为研究对象,利用 Simpack 建立系统多体动力学模型,并借助 Matlab/Simulink 建立发电机和控制器模型,实现了风电机组整机的联合仿真,并对不同湍流风条件下的模型进行时域分析,验证了控制系统的有效性。同时计算了齿轮动态啮合力和塔筒的振动,结果显示了外部激励不仅会使齿轮啮合力具有很大的时变性,也会使塔筒的振动加剧,影响系统的稳定。因此,在风电机组的设计和分析过程中,建立详细的仿真模型是非常必要的。

参考文献:

- [1] Helsen J, Vanhollenbeke F, Marrant B. Multibody modelling of varying complexity for modal behaviour analysis of wind turbine gearboxes[J]. *Renewable Energy*, 2011, 36(11): 3098-3113.
- [2] 孙伟, 赵飞. 大型风电齿轮箱系统耦合动态特性研究[J]. *振动与冲击*, 2012, 31(8): 16-23.
SUN Wei, ZHAO Fei. Dynamical coupling characteristics of a large wind turbine gearbox transmission system[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(8): 16-23.
- [3] Oyague F. Gearbox reliability collaborative (GRC) description and loading[R]. Washington DC: Department of Energy, National Renewable Energy Lab, 2011.
- [4] Schlecht B, Demtroder J, Schulze T. Multibody-system-simulation of drive trains of wind turbines [M]. [S. l.]: AGMA, 2002.
- [5] Todorov M, Dobrev I, Massouh F. Analysis of torsional oscillation of the drive train in horizontal-axis wind turbine[C]// *Advanced Electromechanical Motion Systems & Electric Drives Joint Symposium*, 2009, Lille, France. [S. l.]: IEEE, 2009: 1-7.
- [6] Hauptmann S, Mulski S, Kühn M, et al. Advanced drive train modeling in a virtual wind turbine using the multibody simulation code Simpack [C]// *Proceedings of the European Wind Energy Conference*, 2007, Milan. [S. l.]: European Wind Energy Association, 2007: 1074-1079.
- [7] Li H, Zhao B, Yang C. Analysis and estimation of transient stability for a grid-connected wind turbine with induction generator[J]. *Renewable Energy*, 2011(36): 1469-1476.
- [8] 何玉林, 黄伟, 李成武. 大型风力发电机传动链多柔体动力学建模与仿真分析[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(1): 61-69.
HE Yulin, HUANG Wei, LI Chengwu. Flexible multibody dynamics modeling and simulation analysis of large-scale wind turbine drivetrain[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(1): 61-69.
- [9] Germanischer Lloyd. Guideline for the certification of wind turbines edition 2010[S]. Hanburg: Germanischer Lloyd, 2010.
- [10] 黄文虎. 多柔体系统动力学[M]. 第一版. 北京: 科学出版社, 1996: 74-97.
- [11] 马少坤, 于淼, 崔皓东. 子结构分析的基本原理和 ANSYS 软件的子结构分析方法[J]. *广西大学学报*, 2004, 20(2): 150-153.
MA Shaokun, YU Miao, CUI Haodong. The basic principle of substructure analysis and the technique of substructure analysis with the software of ANSYS[J]. *Journal of Guangxi University*, 2004, 20(2): 150-153.
- [12] 包学海, 池茂儒, 卢耀辉. 基于子结构法的车辆系统刚柔混合动力学建模方法研究[J]. *铁路机车车辆*, 2009, 29(3): 8-11.
BAO Xuehai, CHI Maoru, LU Yaohui. Research on vehicle system dynamics model of rigid-flexible mixture based on substructure method[J]. *Railway Locomotive & Car*, 2009, 29(3): 8-11.
- [13] Helsen J, Heirman G, Vandepitte D. The influence of flexibility within multibody modeling of multimegawatt wind turbine gearbox [C]// *ISMA 2008, International Conference on Noise and Vibration Engineering*, September 15-19, 2008, Leuven, Belgium. Leuven: [s. n.], 2008: 15-17.
- [14] 贺益康, 胡家兵. 并网双馈异步风力发电机运行控制[M]. 第一版. 北京: 中国电力出版社, 2012: 59-89.
- [15] Akhmatov V. The induction generator for wind power generation[M]. Brentwood, UK: Multi-science Publishing Company, 2005: 210-215.
- [16] 李辉, 叶仁杰, 韩力. 电网电压跌落下双馈风力发电机组暂态性能的比较分析[J]. *太阳能学报*, 2010, 31(6): 775-781.
LI Hui, YE Renjie, HAN Li. Comparison and analysis of transient performances for double-fed induction generator wind turbine under grid voltage dip[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2010, 31(6): 775-781.
- [17] 姚兴佳. 风力发电机组理论与设计[M]. 第一版. 北京: 机械工业出版社, 2013: 303-307.