

基于分时间尺度解耦的风电机组气动-机械动态简化表示方法

谷怀广^{1,2}, 刘 栋^{1,2}, 米志伟^{1,2}, 贾 锋³, 符 杨³, 魏书荣³

(1. 全球能源互联网研究院有限公司 先进输电技术国家重点实验室, 北京 102209; 2. 全球能源互联网研究院有限公司 直流电网技术与仿真北京市重点实验室, 北京 102209; 3. 上海电力大学 电气工程学院, 上海 200090)

摘要:针对现有风电机组建模中气动-机械部分模型对参数依赖大、参数难以获取的问题,基于分时间尺度解耦的原理提出气动-机械动态模型的简化表示方法。首先基于小信号分析方法得出风电机组简化建模的依据并进行误差量化分析,随后基于快慢时间尺度解耦的思想提出一种由风速直接得到发电机转速和输出有功动态的方法,并制定其适应宽风速区间的控制策略。所得气动-机械动态简化模型包含气动、轴系、最大功率跟踪控制,并通过限幅近似模拟变桨作用。该模型既可以直接用于机组发电性能评估,又可以接入任意详细程度的主电气部分模型接口,进而得到用于并网分析的完整机组模型,大幅简化风电机组模型并降低参数依赖。通过将所提模型与详细模型进行对比,验证了简化建模方法的有效性和精确性。

关键词:风电机组;分时间尺度;简化建模;小信号分析;时域仿真

中图分类号:TM 614

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202011027

0 引言

风电已实现大规模开发应用,建立仿真模型、开展仿真分析是一种重要且有效的研究手段。仿真模型的三大要求分别为准确性、简化性和通用性:准确性是一切仿真的必要前提;简化性要求模型简单,仿真效率高;通用性要求模型普遍适用于一类对象,易于与其他模型接口,且易于移植。准确性和简化性在很大程度上相互矛盾,二者之间需要折中考虑^[1]。

风电仿真模型可分为数据驱动模型和机理模型。在数据驱动模型中,风电机组的实测功率曲线通常与制造商提供的风电机组功率曲线存在较大偏差^[2-4]。造成上述现象的原因除了空气密度变化、桨叶磨损等因素外,最主要的原因是制造商提供的风电机组功率曲线由不同风速下的静态工作点描绘得到,并不包含风速动态变化过程中风机最大功率点的跟踪(MPPT)过程。建立机理模型则可准确地还原任意风速时序下的风电机组动态响应和工作状态,但机理模型通常较为复杂、仿真效率低,为此需要开展模型简化研究。

风电机组建模中通常忽略偏航系统及机组塔架和桨叶柔性的影响。在此前提下,风电机组模型包

括风速模型、气动-机械部分模型(风力机气动、轴系、变桨执行机构等)、主电气部分模型(发电机、变流器及滤波单元、变压器、电网等值等)和控制系统模型(MPPT、变桨控制、变流器控制等)这四大部分^[5-7]。电力系统仿真软件中已有较多的风电机组主电气部分模型^[1,8-11],模型选取及其适用条件已较为成熟。不同模型根据各自的适用条件得以应用:如发电机五阶模型适用于电磁暂态分析;忽略定子暂态的三阶模型适用于机电暂态分析^[10];开关模型^[11]可满足电磁暂态仿真需要;忽略开关周期内电力电子器件开关动态的状态空间平均模型^[12]以及模拟变流器交流端口基频及以下频段特性的理想受控电源模型^[13-14]被用于模拟变流器。此外,采用多个专业仿真软件的互联仿真被用于展现风电机组的多学科交叉耦合特性^[15]。除模型结构外,准确获取模型参数是仿真的前提条件,而机组的实际参数通常无法公开获得^[16]。

目前风电机组的气动-机械部分模型在电力系统仿真软件中已有较成熟的固定范式,其中气动模型普遍采用风能利用系数(C_p)模型^[4],轴系模型通常采用计及传动轴柔性的两质量块模型,变桨执行机构通常以从桨距角指令到桨距角的传递函数描述。但现有模型存在以下不足:①包含模块数多,造成单机模型仍显复杂;②模型参数依赖较多且难以获取,如常用的 C_p 气动模型包含8个待定参数^[17],对特定风机建模时需要完整的 C_p 曲线数据方可拟合得到上述参数,但实际风机的 C_p 曲线出于保密原因难以获取;③虽然实际机组会发布其静态工作曲线,但直接以此进行仿真时由于忽略其动态跟踪过程,所

收稿日期:2020-05-24;修回日期:2020-09-25

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目(构建海上风电集群的数字化能源平台的关键技术研究)(4000-20199532A-0-0-00)

Project supported by the Science and Technology Project of SGCC (Research on Key Technology of Building Digital Energy Platform for Offshore Wind Power Cluster) (4000-20199532A-0-0-00)

带来的误差相当大。另一方面,现有模型与实际系统有较大偏差:如传动轴并非一根粗细均匀的轴(对于有齿轮箱的机组还包含多个不同转速的传动轴),可见两质量块模型中的传动轴参数为等效参数,同样难以准确获取;另外,有研究表明由风电机组轴系与电气部分产生的振荡交互概率很低^[18],当不关注扭振本身时可以忽略传动轴柔性。

针对电力系统仿真软件中建立实际机组模型时气动-机械动态简化模型对参数依赖大、参数难以获取并造成整个机组模型结构复杂的问题,本文基于分时间尺度解耦的原理简化风电机组气动-机械系统模型,得到容易与电气部分模型接口的、参数依赖少以及参数易于获取的通用简化建模方法。

1 变速恒频风电机组简化建模的依据

1.1 模型结构

变速恒频风电机组包含永磁直驱全功率变换机组和双馈机组两大类,二者均采用由转子侧变换器 RSC(Rotor Side Converter)和网侧变换器 GSC(Grid Side Converter)构成的背靠背变流器。永磁直驱全功率变换风电机组仅有 1 个并网接口(GSC),双馈机组有 2 个并网接口(定子绕组和 GSC)。变速恒频风电机组模型结构见图 1。图中, v 为风速; β 和 β^* 分别为桨距角及其参考值(上标“*”表示各物理量的参考值,后文变量定义类似); T_a 、 T_e 分别为风力机的机械转矩、发电机的电磁转矩; ω_g 、 ω_l 分别为发电机转速和风力机转速。现有模型通常按此结构对风速、风力机气动、传动轴系、变桨机构、MPPT、发电机、变流器、变流器控制等模块分别建模,并按物理关系相连得到完整的风电机组模型。其中 MPPT 控制为变流器控制模块提供桨距角参考值和电磁转矩(或发电机有功功率)参考值;变桨控制为变桨机构提供桨距角参考值。根据时间尺度将风力发电系统划分为较慢的气动-机械动态系统和较快的电-磁动态系统。

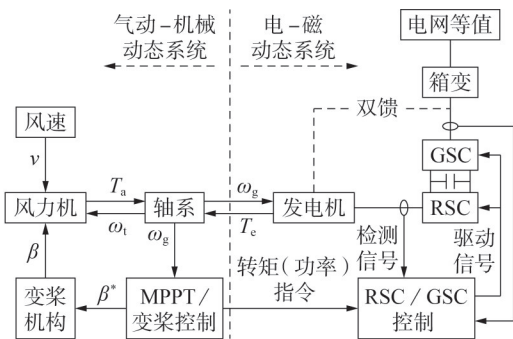


图1 变速恒频风电机组模型的结构框图

Fig.1 Structure block diagram of variable speed constant frequency wind turbine unit model

现有模型不仅结构复杂,而且对参数依赖大。例如经典的气动模型以叶尖速比 λ 和 β 表示 C_p ,使

用前需要先采用真实机组的 C_p 曲线数据对式(1)中的 c_1 — c_8 这8个参数进行辨识。

$$\begin{cases} C_p = (c_1/\gamma - c_2\beta - c_3\beta^4 - c_5)e^{-c_6/\gamma} \\ 1/\gamma = 1/(\lambda + c_7\beta) - c_8/(\beta^3 + 1) \end{cases} \quad (1)$$

1.2 模型简化依据

将发电机和RSC视作1个整体,分析风电机组发电机(永磁同步发电机(PMSG)、双馈感应发电机(DFIG))的动态控制过程,如图2所示。

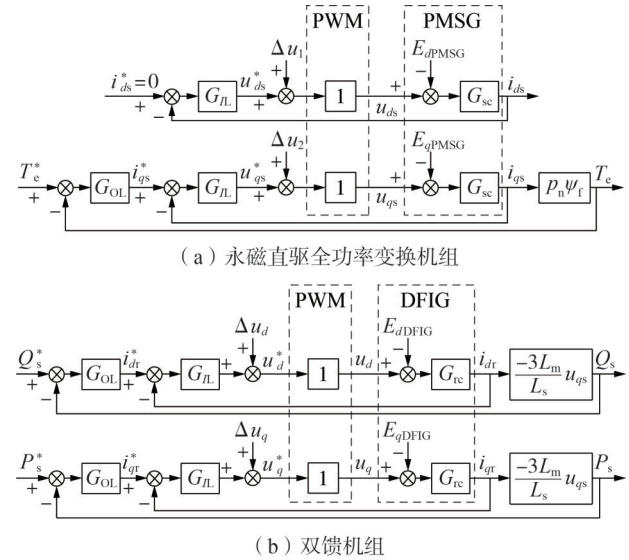


图2 发电机及RSC控制框图

Fig.2 Structure block diagram of generator and RSC

以永磁直驱全功率变换风电机组为例,其控制策略见图2(a),发电机采用PMSG,RSC采用转子磁链定向矢量控制($i_{ds}^*=0$)。图中, i_{ds} 、 i_{qs} 分别为定子电流的 d 轴、 q 轴分量; u_{ds} 、 u_{qs} 分别为RSC交流端口电压的 d 轴、 q 轴分量; E_{dPMSG} 、 E_{qPMSG} 分别为PMSG电势的 d 轴、 q 轴分量; G_{OL} 、 G_{IL} 和 G_{sc} 分别为外环传递函数、电流控制环传递函数和发电机定子电流传递函数; ψ_f 为PMSG的磁动势; p_n 为极对数;脉冲宽度调制(PWM)的开关动态可认为足够快而用“1”表示; Δu_1 、 Δu_2 为解耦补偿项, $\Delta u_1 = -\omega_s L_q i_{qs}$, $\Delta u_2 = \omega_s \psi_f + \omega_s L_d i_{ds}$, ω_s 为同步电角速度, L_d 、 L_q 分别为定子电感 d 轴、 q 轴分量。在 Δu_1 、 Δu_2 的作用下, i_{qs} 的响应函数为:

$$\frac{i_{qs}(s)}{u_{qs}^*(s)} = \frac{1}{L_q s + R_s} \quad (2)$$

其中, R_s 为定子电阻。

G_{OL} 、 G_{IL} 通常采用比例积分(PI)调节器,即:

$$G_{OL} = (k_{p0}s + k_{i0})/s \quad (3)$$

$$G_{IL} = (k_{pi}s + k_{ii})/s \quad (4)$$

其中, k_{p0} 、 k_{i0} 和 k_{pi} 、 k_{ii} 分别为 G_{OL} 和 G_{IL} 的比例、积分系数。 i_{qs} 与 i_{qs}^* 之间的传递函数为:

$$\frac{i_{qs}(s)}{i_{qs}^*(s)} = \frac{k_{pi}s + k_{il}}{L_q s^2 + (R_s + k_{pi})s + k_{il}} \quad (5)$$

T_e 与 T_e^* 之间的传递函数为:

$$\begin{cases} \frac{T_e(s)}{T_e^*(s)} = \frac{D_1(s)}{L_q s^3 + (R_s + k_{pi})s^2 + k_{il}s + D_1(s)} \\ D_1(s) = p_n \psi_f [k_{p0} k_{pi} s^2 + (k_{p0} k_{il} + k_{pi} k_{i0})s + k_{i0} k_{il}] \end{cases} \quad (6)$$

实际系统中内外环PI参数在控制带宽上具有级差^[19],即 $k_{pi} \gg k_{p0}$, $k_{il} \gg k_{i0}$,在典型参数下电磁有功 P_e (或电磁转矩)的传递函数可近似表示为:

$$\frac{P_e(s)}{P_e^*(s)} \approx \frac{1}{\tau_E s + 1} \quad (7)$$

其中, τ_E 为气动-机械动态分析中的等效电气时间常数,可表征RSC和发电机作为整体的响应快慢。

上述推导过程同样适用于图2(b)所示的双馈机组。图中, i_{dr} 、 i_{qr} 分别为转子电流的 d 轴、 q 轴分量; P_s 、 Q_s 分别为定子侧有功、无功功率; G_{re} 为转子电流控制环的传递函数; E_{dDFIG} 、 E_{qDFIG} 分别为DFIG电势的 d 轴、 q 轴分量; L_m 为定转子绕组互感; u_d 、 u_q 分别为变流器交流端口电压的 d 轴、 q 轴分量; Δu_d 、 Δu_q 为解耦补偿项。代入发电机系统及RSC控制参数可得 τ_E 的典型值为5~10 ms。若将轴系表示为转动惯量 J_{sum} 的单质量块模型, ω 为其转速,则转子的运动方程为:

$$J_{sum} d\omega/dt = T_a - T_e \quad (8)$$

将式(8)等号两侧同乘 ω_0 (下标0表示稳态值,后同)并线性化($P_{a0} = P_{e0}$),可得:

$$J_{sum} \omega_0 d\Delta\omega/dt = \Delta P_a - \Delta P_e \quad (9)$$

$$P_a = 0.5\rho\pi R^2 v^3 C_p(\lambda, \beta) = k_a v^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (10)$$

$$\lambda = \omega R/v \quad (11)$$

其中, P_a 为气动功率; $\Delta\omega$ 为 ω 的小扰动量,“ Δ ”表示变量的小扰动量,后同; ρ 为空气密度; R 为桨叶半径。当风速小于额定风速时, $\beta=0$, C_p 可表示为 λ 的一元函数 $C_p(\lambda)$,将式(10)在稳态最优工作点线性化可得:

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial P_a}{\partial v} \right|_{OP0} \Delta v + \left. \frac{\partial P_a}{\partial \omega} \right|_{OP0} \Delta\omega \\ \left. \frac{\partial P_a}{\partial v} \right|_{OP0} = 3k_a C_{p0} v_0^2 - k_a v_0 \omega_0 R \frac{dC_p}{d\lambda} \bigg|_{\lambda_0} \\ \left. \frac{\partial P_a}{\partial \omega} \right|_{OP0} = k_a R v_0^2 \frac{dC_p}{d\lambda} \bigg|_{\lambda_0} \end{cases} \quad (12)$$

又因为MW级风电机组 C_p 曲线顶点处十分平坦, $dC_p/d\lambda \approx 0$, 即:

$$\Delta P_a \approx 3k_a C_{p0} v_0^2 \Delta v \quad (13)$$

最常用的MPPT控制为最优转矩控制^[20],即:

$$P_e^* = k_{opt} \omega^3 \quad (14)$$

$$k_{opt} = 0.5\rho\pi R^5 C_{pmax} / \lambda_{opt}^3 \quad (15)$$

其中, k_{opt} 为风力机参数决定的最优转矩系数; C_{pmax} 为最大风能利用系数,MPPT模式下 $C_{pmax} = C_{p0}$; λ_{opt} 为最佳叶尖速比。联立式(4)和式(14)并线性化可得:

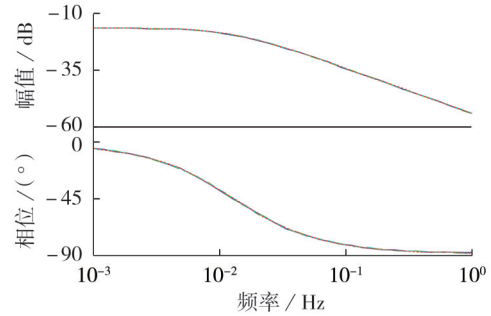
$$\Delta P_e = \frac{3k_{opt} \omega_0^2}{\tau_E s + 1} \Delta\omega \quad (16)$$

结合式(9)和式(13),MPPT和变流器控制下发电机转速和发电机输出有功的动态响应分别为:

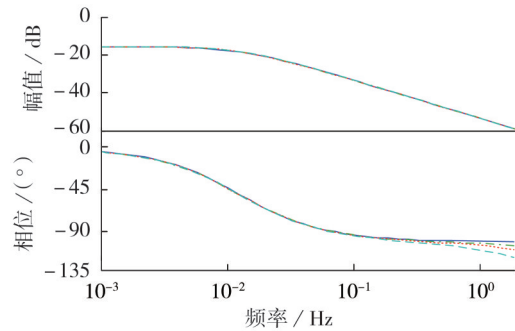
$$\frac{\Delta\omega(s)}{\Delta v(s)} = \frac{3k_a C_{p0} v_0^2 (\tau_E s + 1)}{J_{sum} \omega_0 \tau_E s^2 + J_{sum} \omega_0 s + 3k_{opt} \omega_0^2} \quad (17)$$

$$\frac{\Delta P_e(s)}{\Delta v(s)} = \frac{9k_a C_{p0} v_0^2 k_{opt} \omega_0^2}{J_{sum} \omega_0 \tau_E s^2 + J_{sum} \omega_0 s + 3k_{opt} \omega_0^2} \quad (18)$$

图3给出了 $v_0 = 7$ m/s 时几组不同 τ_E 下的频域特性, $\tau_E = 0$ 表示发电机对其转矩参考值具有理想的跟踪特性, τ_E 越大转矩响应越慢。根据典型风速的功率谱,重点关注的自然风速的波动频段在0.5 Hz以内,图3中给出1 Hz以内的频率特性。图中几条曲线近乎重合,这是由于气动-机械动态主要取决于机组转动惯量,其时间尺度为10 s,快、慢时间尺度之间可充分解耦, τ_E 的影响可忽略不计。不同频段下发电机转速及有功动态产生的相对误差见附录表A1和表A2,由表可知,在所关注的频段内发电机转速及有功动态产生的相对误差均在0.15%以内。



(a) 发电机转速



(b) 发电机有功功率

— $\tau_E = 0$, - - $\tau_E = 5$ ms, ... $\tau_E = 10$ ms, — $\tau_E = 20$ ms

图3 τ_E 对机组动态响应的影响

Fig.3 Impact of τ_E on unit dynamic response

基于上述分析,对于包括风轮气动、轴系、MPPT控制在内的子系统,假定发电机具有式(19)所示的理想响应速度($\tau_E = 0$)而直接得到发电机转速的动

态响应(式(19)的推导考虑了 $P_{a0}=P_{e0}$ 的稳态关系)和式(20)所示的输出有功的动态响应,且这种简化引入的误差可以忽略不计。即:

$$\frac{\Delta\omega(s)}{\Delta v(s)} = \frac{3k_a C_{p0} v_0^2}{J_{\text{sum}} \omega_0 s + 3k_{\text{opt}} \omega_0^2} = \frac{\omega_0}{v_0} \frac{1}{1 + \tau s} \quad (19)$$

$$\frac{\Delta P_e(s)}{\Delta v(s)} = \frac{9k_a C_{p0} v_0^2 k_{\text{opt}} \omega_0^2}{J_{\text{sum}} \omega_0 s + 3k_{\text{opt}} \omega_0^2} = \frac{3k_a C_{p0} v_0^2}{1 + \tau s} \quad (20)$$

$$\tau = \frac{J_{\text{sum}}}{3k_{\text{opt}} \omega_0} \quad (21)$$

其中, τ 为低通滤波时间常数。由上述分析可见发电机转速动态响应和有功动态响应对风速波动体现为一阶低通滤波特性,且二者滤波时间常数一致。

2 基于分时间尺度解耦的机组简化模型

在一些建模需求中,面向并网分析时侧重风电机组与电网之间的电气联系和交互。对于图1所示的气动-机械动态系统,仅需关注其与主电气部分的交互量,即发电机转速、发电机转矩(电功率)参考值以及发电机转矩响应,而气动-机械动态系统内部的叶尖速比、气动转矩、桨距角、传动轴扭矩等中间变量为非必要物理量。

若将MPPT控制模块输出的发电机转矩参考值乘以系数1(即以 $\tau_E=0$ 模拟“发电机+变流器”理想的响应过程)后作为轴系的发电机转矩输入,可以在图1所示气动-机械动态系统内部求得一组发电机转速和电功率。该过程是将电气部分模型完全孤立开后进行的,其实质是基于电-磁动态系统模型和气动-机械动态系统模型分时间尺度解耦原理,依据上节分析结论,所求得发电机转速和电功率与机组实际发电机转速和电功率之间的误差可忽略不计。

下面将基于动态分析结果直接得到发电机转速及其电功率的动态响应,并将所得结果输入电-磁动态系统模型,从而大幅简化风电机组模型。

2.1 气动-机械动态的简化表示方法

发电机转速、风速可以表示为其稳态分量与动态分量之和,即:

$$\omega = \omega_0 + \Delta\omega \quad (22)$$

$$v = v_0 + \Delta v \quad (23)$$

由于风速的稳态分量 v_0 进行低通滤波后仍为 v_0 ,结合式(19)、式(22)和式(23)可得发电机转速的全响应表达式为:

$$\omega = \frac{\omega_0}{v_0} \frac{1}{1 + \tau s} v = \frac{\lambda_{\text{opt}}}{R} \frac{1}{1 + \tau s} v \quad (24)$$

类似地,电功率可以表示为其稳态分量与动态分量之和,即:

$$P_e = P_{e0} + \Delta P_e \quad (25)$$

$$P_{e0} = P_{a0} = k_a v_0^3 C_{p0} \quad (26)$$

由于 $v = v_0 + \Delta v$,并且考虑到对风速的稳态分量 v_0 进行低通滤波后仍为 v_0 ,则有:

$$\left(\frac{v}{1 + \tau s} \right)^3 = \left(v_0 + \frac{\Delta v}{1 + \tau s} \right)^3 = v_0^3 + \frac{3v_0^2 \Delta v}{1 + \tau s} + o(\Delta v) \quad (27)$$

其中, $o(\Delta v)$ 为可忽略的高阶项。结合式(20)、式(25)和式(26)可得发电机电功率的全响应表达式为:

$$P_e = k_a C_{p0} v_0^3 + \frac{3k_a C_{p0} v_0^2}{1 + \tau s} \Delta v = k_a C_{p0} \left(\frac{v}{1 + \tau s} \right)^3 \quad (28)$$

根据式(24)和式(28)可直接由输入风速 v 得到最大功率跟踪段MPPT控制下的风电机组转速和输出有功功率动态,非最大功率跟踪段机组运行于准稳态,以稳态工作点近似模拟风电机组模型,如变桨系统仅在机组超出满发时动作,此时机组运行于额定转速和额定功率,则可通过转速和输出有功的限幅环节实现近似模拟。

2.2 适应宽风速区间的修正

上述推导过程基于小信号分析法,理论上仅适用于线性化稳态工作点附近的仿真场景,即仿真模型仅在较窄的风速区间内保持高精度。当风速变化区间较大时,造成误差的原因是不同稳态工作点下的低通滤波时间常数 τ 互不相同,其中 $J_{\text{sum}}/k_{\text{opt}}$ 为常数, ω_0 为影响 τ 的主要因素,其与稳态风速呈线性关系。以某实际MW级风电机组参数为例,惯量时间常数 H 约为5s($J_{\text{sum}} \approx 2H$), $k_{\text{opt}}=0.34$,由机组的变速范围可得 ω_0 的变化区间为0.7~1.2 p.u.,因此 τ 的变化范围大致为8~14。附录图A1为该范围内传递函数 $1/(1+\tau s)$ 的伯德图,由图A1可知,该范围对应的频段内频率响应近似线性变化。

基于此,设计了由2台低通滤波器构成、权重随当前风速自适应调节的建模方法,如图4所示。图中, P_n 、 ω_n 分别为额定功率、额定转速,作为发电机有功、转速限幅器的最大值,可近似刻画发电机与变流器的出力上限以及额定风速以上区域变桨系统的控制作用; τ_1 、 τ_2 分别为2台低通滤波器按照风速的上限值 v_1 、下限值 v_2 设计的滤波时间常数,由式(21)可以计算得到。以越接近某一风速所对应传递函数权重值越大为原则, τ_1 、 τ_2 对应的权重系数 k_1 、 k_2 如式(29)所示。

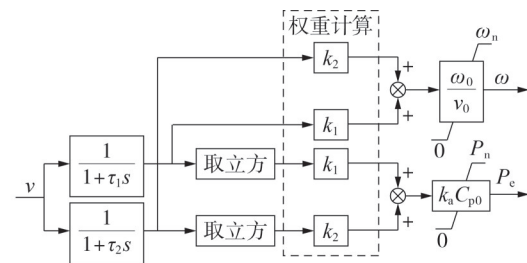


图4 适应宽风速区间修正的气动-机械简化模型

Fig.4 Modified aerodynamic-mechanical simplified model adapting to wide wind speed range

$$\begin{cases} k_1 = 1 - |v - v_1| / (v_2 - v_1) = (v_2 - v) / (v_2 - v_1) \\ k_2 = 1 - |v - v_2| / (v_2 - v_1) = (v - v_1) / (v_2 - v_1) \end{cases} \quad (29)$$

2.3 气动-机械动态系统模型的电气接口

附录图 A2 为气动-机械动态系统简化模型的电气接口示意图及控制策略。气动-机械动态系统模型的电气接口设计方法为:在电-磁动态模型中将发电机设置为转速输入模式,由式(24)所得转速作为发电机的输入转速。对于永磁全功率变换风电机组,以式(28)所得发电机电磁功率作为 RSC 控制器的有功参考值,见图 A2(a);对于双馈机组,发电机输出功率包括定子功率 P_s 和转子功率 P_r ,二者按照转差率自然分配, $P_s = P_e / (1-s)$, $P_r = -sP_s$ 。因此根据转速计算得到转差率 s 后, RSC 以定子有功参考值为 $P_e / (1-s)$ 施加控制,转子绕组及背靠背变流器上将自动分配 $-sP_s$ 的功率,见图 A2(b)。背靠背变换器的功率环和电流环采用常规控制方法。

所提气动-机械动态系统简化模型可与任意详细程度的主电气部分模型接口。研究者可根据需要选择不同详细程度的发电机及变流器模型,并配合相应的变流器控制模型构成完整的风电机组模型。

2.4 简化模型的适用性及参数获取方法

本文在发电机转速和输出有功简化模型的推导过程中同时计及了稳态工作点的动态变化过程,且对不同稳态工作点处小扰动动态特性的差异进行了修正。近似处理过程中会产生一定误差,后文将通过仿真验证所产生的误差在接受范围内。

所提出的气动-机械动态系统简化模型同时考虑了气动、轴系、MPPT 控制在内的动态响应,具有 2 种可能的应用场景:①以电-磁动态系统模型充分响应有功指令值为前提,忽略电气部分模型,直接由风速得到机组转速和有功功率,所提出的气动-机械动态系统简化模型可用于机组的发电性能评估;②所提出的气动-机械动态系统简化模型与电-磁动态系统模型接口构成完整的机组模型,此时所提出的气动-机械动态系统简化模型的输出作为电-磁动态系统模型提供准确的输入,可满足变流器控制策略及机组并网分析的研究需求。

另外,本文所提出的气动-机械动态系统简化模型基于正常发电控制状态下的动态分析得到,并不适用于电网故障暂态。但考虑到机组要求的故障穿越持续时间通常在 625 ms 以内,电-磁动态系统模型对气动-机械动态(主要是发电机转速)的影响非常有限,相较于详细模型,所提出的气动-机械动态系统简化模型对电-磁动态系统模型的功率参考值偏差较小。由于电网故障期间变流器控制主要受电流内环的限幅作用,所提出的简化模型不会对电网故障仿真产生明显影响。

根据上文分析和推导过程,本文所提出的气动-机械动态系统简化模型在获取发电机转速和电功率动态时,仅需已知桨叶半径 R 、风力机最佳叶尖速比 λ_{opt} 、最大风能利用系数 C_{pmax} 以及轴系总转动惯量 J_{sum} 。 λ_{opt} 、 C_{pmax} 可以分别根据机组风速-转速、风速-功率静态工作曲线中变速段的任意点计算得到。另外,若 J_{sum} 无法准确计算,可参照大部分机组的惯量时间常数换算得到,惯量时间常数的变化范围为 [10, 12] s。可见所提方法具有参数依赖度小、参数易于从风电机组的公开数据中获取的优势。

3 仿真实验

在 PSCAD / EMTDC 环境下开展双馈机组和永磁直驱风电机组的仿真,通过与详细模型对比验证本文所提出的气动-机械动态系统简化模型建模方法的正确性。考虑到电-磁动态系统模型并非本文重点,2 组仿真中的电-磁动态系统模型相同,侧重于对比本文所提方法与常规气动-机械动态系统模型的建模方法。详细模型依据图 1 所示模型对各子模块分别建模,变流器采用开关模型和经典的矢量控制,发电机采用电磁暂态模型,MPPT 控制为双环最优转矩控制^[20],风力机的 C_p 曲线从风电仿真软件 Bladed 中提取出 33 组 $C_p(\lambda, \beta)$ 数据构成二维查找表,轴系采用两质量块模型。由图 A2 所示模型结构建立本文所提简化模型。

3.1 永磁直驱全功率变换机组

分别设置 4 种场景进行仿真实验,所提简化模型与详细模型的仿真分析结果如下。

(1) 场景 1:阶跃风速。

设风速为阶跃风速,仿真对比结果见附录图 A3,可见本文所提简化模型与详细模型的仿真结果吻合度很高。详细模型在风速阶跃时刻激发了 1.5 Hz 的轴系扭振;本文所提简化模型基于单质量块模型的推导,并未出现轴系扭振动态现象。

定义一段时间 Δt 内物理量的平均相对误差为:

$$\bar{e}_{relative} = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} (|x - x_b| / x_b) dt \quad (30)$$

其中, x_b 为物理量的基准值,取详细模型仿真结果; x 为物理量的仿真值,取简化模型的仿真结果。则该场景下发电机转速和并网有功功率的平均相对误差分别为 0.205 % 和 0.598 %。

(2) 场景 2:实测湍流风速。

设风速为实测湍流风速,并在该场景下增加纯静态模型的对比分析。纯静态模型的仿真曲线获取过程如下:由风电机组在恒定风速下经所采用的控制策略作用得到静态工作点,将不同风速下的静态工作点制作成离线查找表,通过离线查找表可得稳态转速和功率,仿真对比结果见图 5。图中,发电机

转速 ω_g 、并网有功功率 P_g 均为标么值,后同。可见纯静态模型与详细模型和简化模型的仿真结果误差较大;简化模型与详细模型的仿真结果吻合度很高。该场景的湍流风速下发电机转速及并网有功功率的平均相对误差分别为0.183%和0.635%。

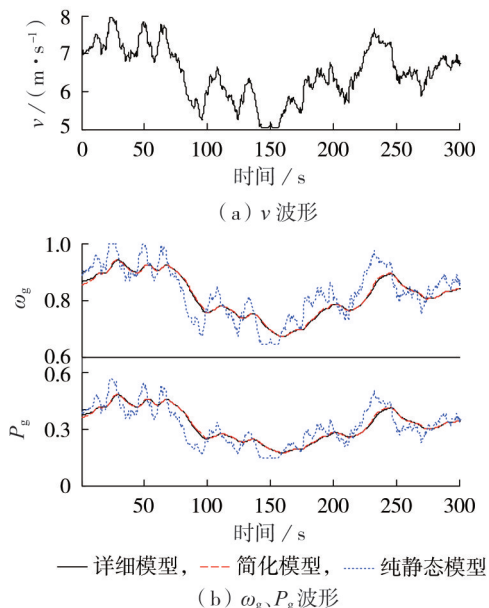


图5 湍流风速下的仿真波形

Fig.5 Simulative waveforms under turbulence wind speed

(3)场景3:宽范围变化的实测湍流风速。

该场景下选取一段宽范围变化的实测湍流风速以验证全风况下的仿真结果,仿真波形如附录图A4所示。所提出的简化模型与机组静态工作点结合可以很好地满足风速变化需求,当风速超出额定风速时机组转速和机组功率在变桨系统的作用下基本稳定在额定转速和额定功率,简化模型与详细模型的仿真结果吻合度很高。

(4)场景4:系统发生三相短路故障。

设电网发生严重三相短路故障,故障跌落至额定电压 U 的20%,持续时间为625 ms,设 I_N 为额定电流。仿真过程中采用恒定风速,故障期间机组注入无功电流,其值为 $1.5(0.9-U)I_N$ (U 为标么值)以支撑电网电压^[19]。该场景下的仿真结果如图6所示。图中,转子有功 P_r 和网侧无功 Q_g 均为标么值,后同。由图6(a)可知,在故障发生时刻 t_2 、故障恢复时刻 t_3 以及直流母线电压恢复时刻 t_4 ,对发电机有功产生了一定暂态影响,但是二者动态过程完全一致,仅在稳态工作点方面存在细微差异,相对误差为0.35%;由图6(b)可知,当详细模型和所提简化模型采用相同的电-磁动态模型时,网侧有功、无功功率的仿真波形基本一致。且考虑到故障持续时间较短,转动惯量巨大的风电机组转速变化很小,因此故障发生对风力机工作点的影响较小。可见,所提出的简

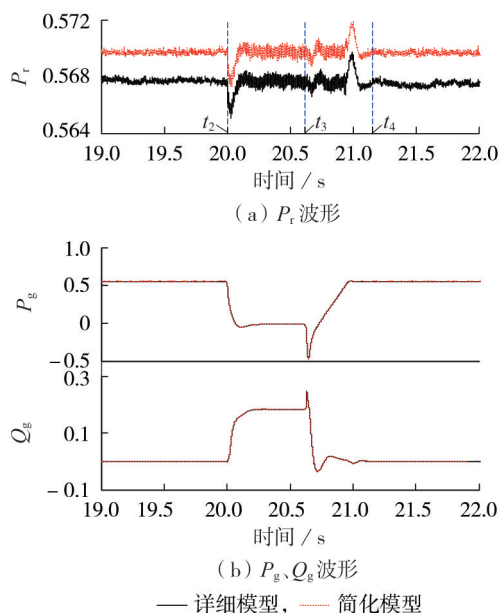


图6 低电压故障穿越期间的仿真波形

Fig.6 Simulative waveforms during low voltage fault ride through

化模型用于电网故障暂态分析时所产生的误差可忽略不计。

3.2 双馈机组

按照图A2(b)建立双馈机组的简化模型,并与双馈机组的详细模型进行对比验证。实测湍流风速下的仿真结果见图7。图中,定子有功 P_s 为标么值。

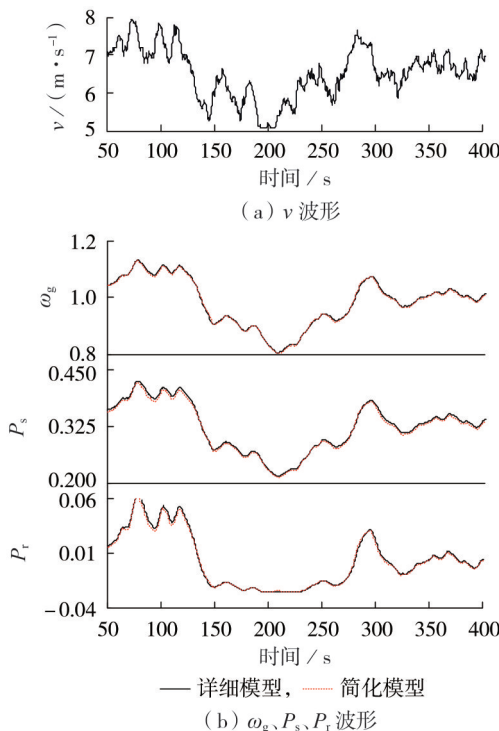


图7 双馈机组在湍流风速下的仿真波形

Fig.7 Simulative waveforms of doubly-fed unit under turbulence wind speed

由图7可知,简化模型与详细模型的仿真结果吻合度很高,有功功率在发电机定子和转子侧变换器之间的分配符合预期。发电机转速、定子有功、转子的平均相对误差分别为0.18%、0.62%、0.71%。

4 结论

基于小信号分析法得出了风电机组模型简化的依据,并根据分时间尺度解耦的思想提出一种直接由有效风速得到机组转速和输出有功功率动态响应的方法。所提简化模型包含风力机、轴系、MPPT控制,频域分析表明这种简化处理产生的误差可忽略不计。所提出的气动-机械动态系统简化模型使得模型结构大幅简化,所需模型参数更少且更容易从公开数据中获取。该模型可以与任意详细程度的电气部分模型接口构成完整的风电机组模型,该模型得到的有功动态也可直接用于发电性能评估。

仿真结果表明所提出的简化建模方法具有同详细模型近乎一致的动/静态特性,发电机转速及机组有功的平均相对误差分别在0.2%和0.6%左右,能较好地满足大部分仿真场景的需求。

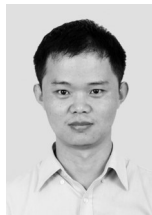
附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 潘学萍,鞠平,吴峰,等. 双馈风电机组模型结构讨论[J]. 电力系统自动化,2015,39(5):7-14.
PAN Xueping, JU Ping, WU Feng, et al. Discussion on model structure of DFIG-based wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(5): 7-14.
- [2] 邵振国,刘懿萱,张嫣. 基于实测数据的风电场风速-功率特性仿射建模方法[J]. 电力自动化设备,2019,39(6):96-101.
SHAO Zhenguo, LIU Yixuan, ZHANG Yan. Affine modelling method of wind speed-power characteristics in wind farm based on measured data[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(6): 96-101.
- [3] 林鹏,赵书强,谢宇琪,等. 基于实测数据的风电功率曲线建模及不确定估计[J]. 电力自动化设备,2015,35(4):90-95.
LIN Peng, ZHAO Shuqiang, XIE Yuqi, et al. Wind power curve modeling based on measured data and uncertainty estimation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4): 90-95.
- [4] 杨茂,杨琼琼. 风电机组风速-功率特性曲线建模研究综述[J]. 电力自动化设备,2018,38(2):34-43.
YANG Mao, YANG Qiongqiong. Review of modeling of wind speed-power characteristic curve for wind turbine[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(2): 34-43.
- [5] KO H S, YOON G G, KYUNG N H, et al. Modeling and control of DFIG-based variable-speed wind-turbine[J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78(11): 1841-1849.
- [6] 蔺红,晁勤. 并网型直驱式永磁同步风力发电系统暂态特性仿真分析[J]. 电力自动化设备,2010,30(11):1-5.
LIN Hong, CHAO Qin. Simulation and analysis of transient characteristics of grid-connected direct-drive wind power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(11): 1-5.
- [7] ERLICH I, KRETSCHMANN J, FORTMANN J, et al. Modeling of wind turbines based on doubly-fed induction generators for power system stability studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(3): 909-919.
- [8] 龚文明,胡书举,许洪华. 一种适用于大型风电场实时仿真的双馈风力发电机响应模型[J]. 电力自动化设备,2014,34(4): 114-119.
GONG Wenming, HU Shuju, XU Honghua. Response model of DFIG for real-time simulation of large-scale wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4): 114-119.
- [9] 张琛,李征,蔡旭,等. 面向电力系统暂态稳定分析的双馈风电机组动态模型[J]. 中国电机工程学报,2016,36(20):5449-5460.
ZHANG Chen, LI Zheng, CAI Xu, et al. Dynamic model of DFIG wind turbines for power system transient stability analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(20): 5449-5460.
- [10] EKANAYAKE J B, HOLDSWORTH L, JENKINS N. Comparison of 5th order and 3rd order machine models for Doubly Fed Induction Generator (DFIG) wind turbines[J]. Electric Power Systems Research, 2003, 67(3): 207-215.
- [11] ZHOU Y, BAUER P, FERREIRA J A, et al. Operation of grid-connected DFIG under unbalanced grid voltage condition[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, 24(1): 240-246.
- [12] 舒德元,李琰,张春朋,等. 基于幅值分布函数的换流器平均化模型及其应用[J]. 电力系统自动化,2016,40(15):73-78.
SHU Dewu, LI Yan, ZHANG Chunpeng, et al. Converter averaged model based on amplitude distribution function and its applications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 73-78.
- [13] 徐力,王刚,侍乔明,等. 直驱永磁风电机组电压暂态简化建模及仿真[J]. 电机与控制应用,2015,42(9):47-51,67.
XU Li, WANG Gang, SHI Qiaoming, et al. A simplified modeling of transient voltage and simulation of direct drive permanent magnet synchronous generator[J]. Electric Machines & Control Application, 2015, 42(9): 47-51, 67.
- [14] SLOOTWEG J G, POLINDER H, KLING W L. Representing wind turbine electrical generating systems in fundamental frequency simulations[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2003, 18(4): 516-524.
- [15] JIA Feng, CAI Xu, LOU Yaolin, et al. Interfacing technique and hardware-in-loop simulation of real-time co-simulation platform for wind energy conversion system[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(12): 3030-3038.
- [16] 黄桦,潘学萍,李佳伟,等. 直驱永磁风电机组LVRT模型参数的整定方法与实试验证[J]. 电力自动化设备,2019,39(4): 155-160.
HUANG Hua, PAN Xueping, LI Jiawei, et al. Parameter setting method and measurement verification of LVRT model for direct drive permanent magnet wind turbine generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(4): 155-160.
- [17] LYDIA M, KUMAR S S, SELVAKUMAR A I, et al. A comprehensive review on wind turbine power curve modeling techniques[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 30: 452-460.
- [18] 谢小荣,刘华坤,贺静波,等. 直驱风机风电场与交流电网相互作用引发次同步振荡的机理与特性分析[J]. 中国电机工程学报,2016,36(9):2366-2372.
XIE Xiaorong, LIU Huakun, HE Jingbo, et al. Mechanism and characteristics of subsynchronous oscillation caused by the interaction between full-converter wind turbines and AC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9): 2366-2372.
- [19] ZHOU D, BLAABJERG F. Bandwidth oriented proportional-integral controller design for back-to-back power converters in DFIG wind turbine system[J]. IET Renewable Power Gene-

ration, 2017, 11(7):941-951.

- [20] 贾锋,蔡旭,李征,等. 提高风电机组发电量的转矩-变桨协调控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(19):5622-5632.
JIA Feng, CAI Xu, LI Zheng, et al. Torque-pitch coordinated control for improving the power production of wind energy conversion system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(19): 5622-5632.



谷怀广

向为海上风电经柔性直流输电接入弱电网的系统稳定性分析与控制技术;

米志伟(1982—),男,河北张家口人,工程师,从事柔性直流输电物理动模仿真、数字物理混合仿真等方面的研究工作;

贾 锋(1988—),男,湖北荆门人,讲师,博士,通信作者,主要研究方向为风力发电建模与并网控制(E-mail: jiafeng@shiep.edu.cn)。

作者简介:

谷怀广(1985—),男,北京人,工程师,硕士,主要研究方

(编辑 王欣竹)

Aerodynamic-mechanical dynamic simplified representation of wind turbine based on timing-scale decoupling

GU Huaiguang^{1,2}, LIU Dong^{1,2}, MI Zhiwei^{1,2}, JIA Feng³, FU Yang³, WEI Shurong³

(1. State Key Laboratory of Advanced Power Transmission Technology, Global Energy Interconnection Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China;

2. Beijing Key Laboratory of DC Grid Technology and Simulation, Global Energy Interconnection Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China;

3. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: In order to solve the problem that the aerodynamic-mechanical part of the wind turbine model depends heavily on the parameters, while the parameters are difficult to obtain, a simplified representation method of the aerodynamic-mechanical dynamic model is proposed based on the principle of timing-scale decoupling. Firstly, based on the small-signal analysis method, the basis for simplified modeling of wind turbine is obtained and the quantitative analysis of error is carried out. Then, based on the idea of fast and slow timing-scale decoupling, a method to directly obtain the generator speed and active power dynamics from the wind speed is proposed, and the control strategy to suit wide wind speed range is formulated. The proposed aerodynamic-mechanical simplified model includes aerodynamics, shafting, and maximum power tracking control, and approximates the pitch effect through limiting amplitude. The model can not only be directly used to evaluate the generation performance of the wind turbine unit, but also can be interfaced with the main electrical model at any level of detail to obtain a complete unit model for grid connection analysis, thereby greatly simplifying the wind turbine model and reducing parameter dependence. By comparing the proposed model with the detailed model, the effectiveness and accuracy of the simplified modeling method are verified.

Key words: wind turbine; timing-scale; simplified modeling; small-signal analysis; time domain simulation

附录

表 A1 不同频段下 τ_E 对 ω_g 动态产生的相对误差

Table A1 Impacts of τ_E on relative error of ω_g under different frequency range

频率/Hz	ω_g 的相对误差/%		
	$\tau_E=5$ ms	$\tau_E=10$ ms	$\tau_E=20$ ms
0.005	0.061 0	0.018 6	0.039 8
0.010	0.115 3	0.128 9	0.106 4
0.050	0.001 7	-0.024 0	-0.041 5
0.100	-0.005 3	-0.016 8	-0.035 9
0.500	-0.005 6	-0.014 2	-0.028 3
1.000	-0.007 7	-0.014 2	-0.026 9

表 A2 不同频段下 τ_E 对 P_e 动态产生的相对误差

Table A2 Impacts of τ_E on relative error of P_e under different frequency range

频率/Hz	相对误差/%		
	$\tau_E=5$ ms	$\tau_E=10$ ms	$\tau_E=20$ ms
0.005	0.064 5	0.019 7	0.042 4
0.010	0.121 6	0.135 4	0.111 7
0.050	0.001 1	-0.024 9	-0.042 7
0.100	-0.005 7	-0.017 1	-0.035 1
0.500	-0.005 2	-0.005 7	0.006 3
1.000	0.000 5	0.018 6	0.105 6

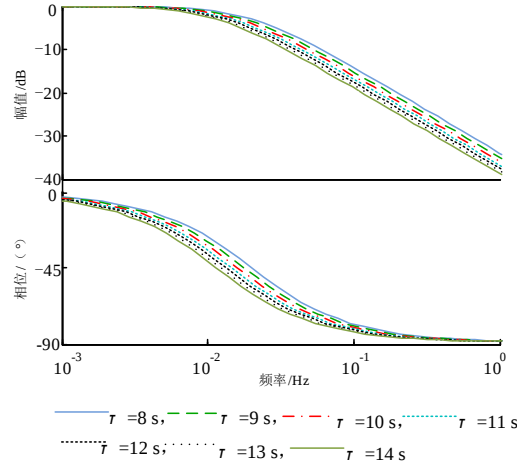
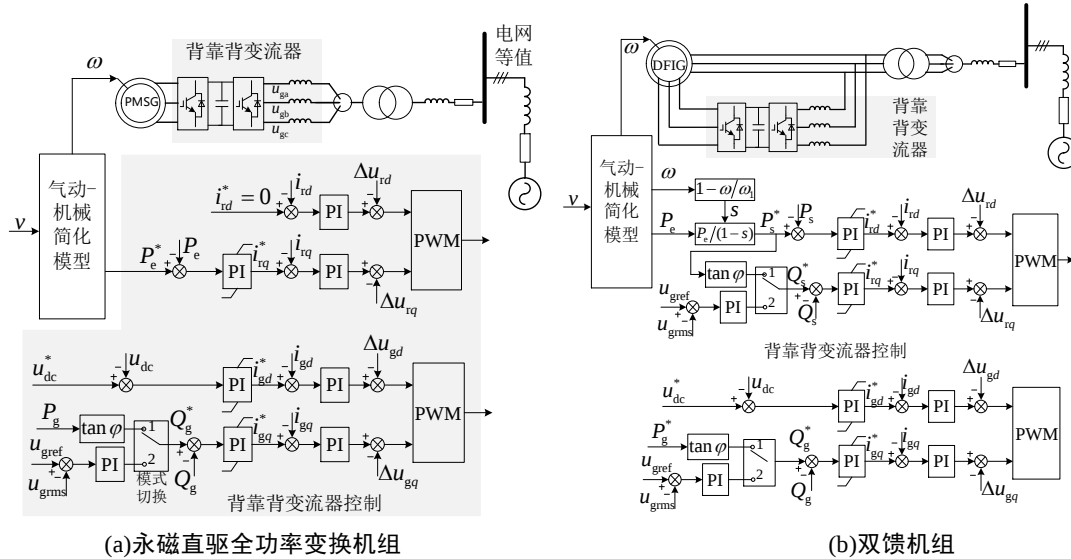


图 A1 τ 对传递函数频率特性的影响

Fig.A1 Impacts of τ on frequency characteristics of transfer function



(a)永磁直驱全功率变换机组

(b)双馈机组

图 A2 气动-机械动态系统简化模型的电气接口示意图及控制策略

Fig.A2 Schematic diagram of aero-mechanical dynamic system simplified model and its control strategy

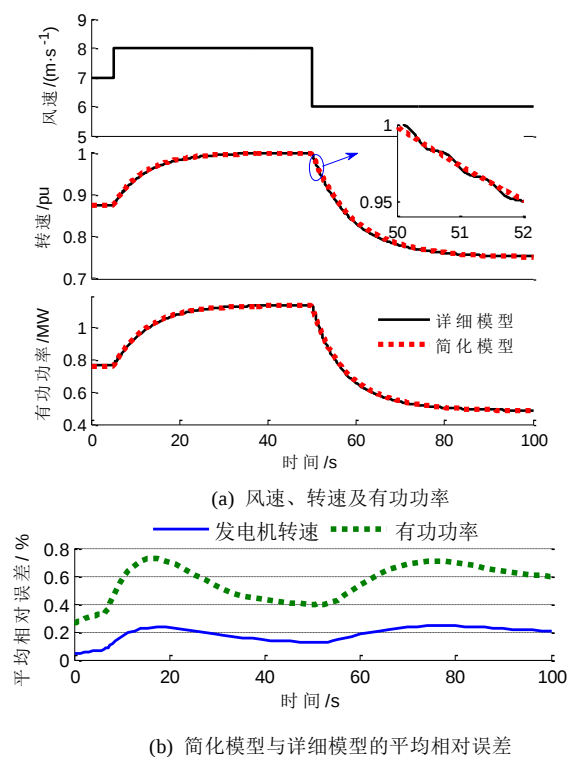


图 A3 阶跃风速下全功率机组的仿真波形

Fig.A3 Simulative waveforms of full power unit under step wind speed

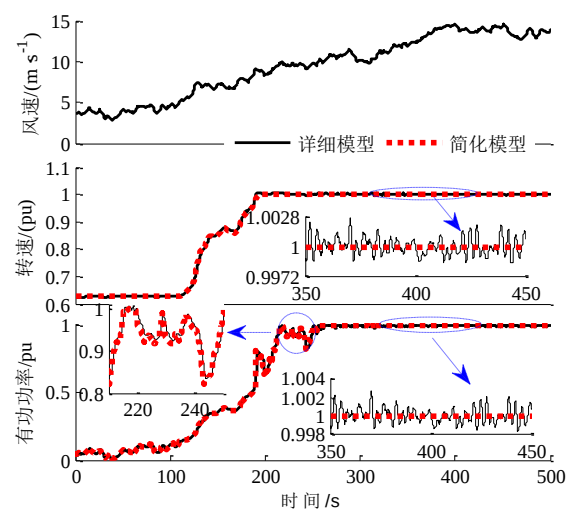


图 A4 全风况下全功率机组的仿真波形

Fig.A4 Simulative waveforms of full power unit under overall wind speed