风力发电机组数字孪生系统

房方^{1,2*}, 姚贵山¹, 胡阳^{1,2}, 吴旭涛³, 刘吉臻^{1,4}

1. 华北电力大学控制与计算机工程学院, 北京 102206;

2. 电站能量传递转化与系统教育部重点实验室, 北京 102206;

3. 北京战未科技有限公司, 北京 102206;

4. 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206

* E-mail: ffang@ncepu.edu.cn

收稿日期: 2021-03-07; 接受日期: 2021-06-23; 网络版发表日期: 2021-08-18

国家重点研发计划(编号: 2020YFB1506602)和华能集团总部科技项目(编号: HNKJ20-H88)资助

摘要 规模化并网风电是我国构建以新能源为主体的新型电力系统的主力电源, 其智能化水平直接影响未来电力系统的安全、高效、经济运行. 本文引入信息-物理实时映射思想, 首次构建并实现了风力发电机组的数字孪生系统. 设计了数字孪生系统整体架构, 综合机理与数据方法搭建了各子系统实时动态模型; 通过对数据信息流的有效组织, 解决了风电机组和数字孪生系统之间的数据实时通信、精准映射及可视化呈现问题; 应用多模型数字线程交互技术, 实现了对风电机组整机动态载荷的实时模拟; 通过与在役风电机组实际运行数据的量化对比, 验证了该数字孪生系统的实时性与模型精度, 探讨了其未来应用场景及功能拓展方向.

关键词 风力发电, 数字孪生, 复合建模, 信息-物理系统

1 引言

近年来, 风能在世界能源体系中占据着越来越重要的地位. 国家能源局发布的全国电力工业统计数据显示, 2020年, 我国新增风电装机7167万千瓦, 占新增发电装机总量的37.55%, 并网风电达到2.82亿千瓦^[1]. 同时, 为了实现“30.60”双碳目标, 预计到2030年, 我国太阳能、风电累计装机容量将达到12亿千瓦^[2], 发展势头强劲, 未来前景广阔.

在装机容量快速增长的同时, 风电机组运行监测这一“软保障”也需得到更多的关注. 由于风电场地处偏远, 环境恶劣, 风电机组的运维成本占比较高, 尤其

是海上风电机组, 运维成本高达30%~35%, 风电制造商、运营商和电力调度部门越来越关注这一问题^[3]. 许多学者和机构有针对性地开展了风电机组状态监测、故障诊断与预警等方面的研究和实践. 例如, 文献^[4]阐述了基于物理模型的风力发电机齿轮箱的故障诊断方法; 文献^[5]提出了一种数据驱动的时空融合神经网络, 用于风电机组传感器故障诊断.

运行特性建模(包括机理模型和数据模型)是风电机组检测、诊断和运维研究的基础. 文献^[6]建立了多自由度风机齿轮箱动力学模型, 研究了不确定风载对齿轮箱动力学特性的影响; 文献^[7]提出了基于多信号分类器融合的数据驱动风机状态监测与隔离方案; 文

引用格式: 房方, 姚贵山, 胡阳, 等. 风力发电机组数字孪生系统. 中国科学: 技术科学, 2022, 52: 1582–1594

Fang F, Yao G S, Hu Y, et al. Digital twin system of a wind turbine (in Chinese). Sci Sin Tech, 2022, 52: 1582–1594, doi: 10.1360/SST-2021-0076

献[8]利用模糊增广系统对机组设备故障和运行状态进行了鲁棒估计. 现有文献和软件产品中的风电机组模型多用于机组设计和离线仿真分析, 基本不具备实时运行能力.

随着各大发电集团风电场监控中心的建设和运营, 上百个风电场几千台风机的海量生产运行数据被获得并存储下来, 如何利用好这些紧密关联的数据, 建立多领域、多尺度融合的“机理+数据”模型, 并形成高效的模型应用模式, 为多场景下风电机组的实时监测和智能化运维提供强有力的支持是当前迫切需要解决的问题. 数字孪生技术为解决该问题提供了新的思路.

数字孪生是建模与仿真技术的巅峰应用^[9]. 仿真模型是实现数字孪生体和物理实体实时交互的基础, 贯穿于系统全生命周期各个阶段. 基于多模型数字线程交互技术和高效数据通信技术, 数字孪生系统可实现信息空间和物理空间的无缝集成与实时映射^[10]. 数字孪生系统通过对产品全生命周期的推演, 可实现对整个价值链的虚拟洞察与反馈, 进而支撑真实生产过程和产品的持续优化^[11].

数字孪生技术在电力领域的应用研究初见端倪. 文献[12]在一个新型电网实时在线分析系统的开发过程中, 采用了在线分析数字孪生技术(online analysis digital twin, OADT). 文献[13]针对光伏能量转换单元, 构建了一种基于机理模型的数字孪生系统, 利用孪生模型输出和物理实体输出之间的残差进行故障诊断. 文献[14]提出了可实验数字孪生(experimentable digital twins, EDTs)概念, 构建针对集成、运行、优化等需求的交互式应用场景, 助力企业实现产品全生命周期数字化.

本文将数字孪生技术引入风力发电领域, 设计了风电机组数字孪生系统的总体框架, 通过多学科融合、协同攻关, 率先建立起工程应用级的某2.0 MW在役风力发电机组数字孪生系统.

本文的主要创新点和贡献如下.

(1) 结合我国当前风电发展的现状和技术需求, 系统梳理了风力发电机组数字孪生系统应具备的核心能力, 针对风电机组的实际运维需求, 设计了数字孪生系统整体架构及其功能组成.

(2) 综合叶素动量理论、有限元分析、双质块传动等机理建模方法, 辅助运行数据修正, 针对某在役

2.0 MW风电机组, 建立了包含控制系统和关键部件的机组闭环运行数字孪生模型, 通过多模型数字线程交互技术, 实现了对整机动态载荷的实时模拟.

(3) 构建了风电机组数字孪生平台, 在数据治理、数据交互、支撑平台选取、安全防护机制构建等方面进行了系统性设计, 通过对数据信息流的有效组织, 实现了实际风电机组和数字孪生模型之间的实时通信、精准映射及可视化呈现.

2 风力发电机组数字孪生系统架构设计

2.1 风力发电机组数字孪生系统核心能力

根据当前各行业数字孪生技术的发展趋势^[15], 以及风电机组智能化运行需求, 可以梳理出风力发电机组数字孪生系统应具备的六种核心能力.

(1) 实时物联感知能力: 风电机组运行控制及监测预警需要为数众多的传感器, 用以测量如风速、风向、发电机转速、风轮转速、高低速轴剪切力、齿轮箱油温等参数. 同时, 传感器采集的数据具有多源分散获取、持续实时多频率采样等特征. 因此其数字孪生系统须具备与机组实时、高效、准确、安全的数据交互(同步感知)能力.

(2) 多领域融合精准映射能力: 风力发电机涉及机械、电子、电力等多领域物理过程. 风电机组数字孪生系统应具备的核心能力之一就是融合各关键组件特性, 高精度地对整机动态载荷进行仿真, 实现对风电机组的多领域融合数据映射.

(3) 可视化呈现能力: 可视化是人机交互的第一接口. 数字孪生系统应利用3D图形引擎对风电机组整体及内部关键部件建立精确、多层次的三维动态模型, 进而利用实时运行数据进行可视化渲染, 生动直观地展示风电机组各部件的运行状态, 为风电机组状态监测、故障排查等应用场景提供助力.

(4) 模拟仿真推演能力: 风电机组数字孪生系统需要具备预测未来运行态势的能力, 即给定一些环境预测信息, 如短期风速、风向等, 模型能够对整机各部件特性进行较高准确度的计算推演, 结果可用于风电机组预警、新型控制策略的验证等应用场景.

(5) 模型自主学习更新优化能力: 系统可以利用在线学习算法, 利用实时采集到的运行数据, 进行模型结构和参数的自我学习和持续优化.

(6) 边缘治理能力: 考虑到风电场海量生产数据给远程通信和存储带来的挑战, 在数字孪生系统的应用部署中还应考虑赋予其一定的边缘治理能力, 即通过配置分布式计算资源, 将一部分数据分析处理工作放置在边缘端。

在数字孪生系统研发的初始阶段, 应至少实现前四种能力, 随着数据的积累, 以及应用模式的明晰, 模型自主学习和边缘部署也应逐步丰富完善。

2.2 风力发电机组数字孪生系统整体架构

风电机组数字孪生系统的整体架构如图1所示。该系统以数字孪生平台为中心, 主要包括存储、数据交互、孪生模型及业务系统四个部分。

2.2.1 风电机组运行数据获取

与风电机组连接的目的是实时获取关键运行参数。在保证通信安全的前提下, 数字孪生系统可以利用TCP/IP、UDP等通信方式, 从风电机组的数据采集与监控系统(supervisory control and data acquisition, SCADA)及状态监测系统(condition monitoring system, CMS)实时获得风速、风向数据, 以及相关运行参数和控制指令, 实现数字孪生系统对风电机组运行状态的实时感知。在边缘治理模式下, 数字孪生平台通过空中下载(over the air technology, OTA)等远程升级技术保证边缘数据治理功能的在线更新。

2.2.2 数字孪生平台

数字孪生平台是整个数字孪生系统的核心, 包括四个子系统。

(1) 存储系统。接收并存储风电机组SCADA系统传来的生产运行数据, 同时为其他三个子系统提供数据存取、文件资料检索等服务。

(2) 数据交互系统。对从存储系统获得的风电机组运行源数据, 如风速、风向等进行数据清洗等预处理; 业务系统、孪生模型产生的数据、资料均通过数据交互系统与存储系统进行数据交换, 结合严格的信息安全管控措施, 确保整个系统数据交互的安全性。

(3) 孪生模型系统。孪生模型的建立通常采用机理分析+数据修正方法, 目标是获得高精度的实时仿真效果。模型涉及部件级、机组级、风场级等不同尺度, 服务于不同的应用需求。模型系统中包含智能算法的API接口。

(4) 业务系统。根据应用需求, 完成对风电机组和孪生模型所产生数据的深度挖掘与特征提取, 从而实现运行性能分析、状态监测、故障预警等功能。业务系统也是可视化交互、边缘治理的服务平台。

2.2.3 可视化与人机交互

采用http和websocket双向通信协议, 在各类用户终端, 基于3D图形引擎, 实时动态展示风电机组数字孪生系统运行画面; 通过引入数据可视化技术, 对比展

图1 风力发电机组数字孪生系统整体架构

Figure 1 The framework of wind turbine digital twins system.

示风电机组与其孪生系统的动态响应过程. 可视化界面是人机交互的第一接口, 用户可根据业务需求, 进入特定部件, 观察其运行参数和工作状态, 并依授权对关键控制参数进行调整.

3 风电机组数字孪生模型开发

3.1 风电机组类型及参数

风电机组可以分为风力机, 控制系统, 发电系统三个主要组成部分. 风力机包括叶片、轮毂、机舱和塔筒等; 控制系统包括各种传感器、控制系统和相应的执行机构等; 发电系统包括发电机和辅助设备等.

建模方法采用有限元分析+数据修正, 模型在 Matlab/Simulink 平台上搭建.

本文的建模对象是一款装备三叶片和双馈异步发电机(doubly-fed induction generator, DFIG)的2.0 MW 风电机组, 其基本参数见表1.

风电机组控制功能主要包括发电机转矩控制、叶片变桨控制等. 叶片变桨采用一组PI控制器进行调节. 转矩控制则根据运行区间的变化采用两组不同参数的PI控制器进行调节.

3.2 风电机组关键部件建模

3.2.1 基于叶素动量理论的叶片机理建模

由叶片和轮毂组成的风轮是捕获风能的主要部件. 叶片的翼形, 即叶片剖面, 具体指垂直于叶片长度方向的叶片截面的形状, 直接影响风电机组的风能转换效率. 当前的代表性翼形包括NREL, RISØ, FFA-W

及DU系列翼形等. 风电机组叶片的设计是分段进行的, 不同段可能会采用不同的翼形, 如NREL给出的基准5 MW风机叶片采用了8种翼形^[16].

叶素动量理论^[17]适合用来对分段设计的风机叶片进行精细化机理建模. 如图2(a)所示, 根据叶片弦长、厚度、节距角等翼型特性参数将整段叶片划分为34个气动特性区域来进行有限元分析建模. 在风轮半径 r 处取长度为 dr 的微元称为叶素; 将叶片沿风轮半径划分为不同的微段, 每个微段在风速作用下产生的气动升力和阻力由其翼型所决定; 通过空气动力学方法计算出各微段的受力情况, 则风轮叶片整体所受的气动力矩可由各微段受力叠加求得.

设风轮半径 r 处的叶素, 弦长为 l , 节距角为 β . 如图2(b)所示, 叶素在相对速度为 V_{total} 的风速下受到一斜向上的气动力 dF , 将升力沿与 V_{total} 垂直及平行的方向分解, 得到升力 dL 和阻力 dD . 因为叶素为很小的微元, 其面积可以近似表示为对应弦长与叶素长度之积, 则叶素上的升力和阻力可分别表示为^[17]

$$\begin{aligned} dL &= \frac{1}{2} \rho C_l V_{\text{total}}^2 l dr, \\ dD &= \frac{1}{2} \rho C_d V_{\text{total}}^2 l dr, \end{aligned} \quad (1)$$

式中, C_l 和 C_d 分别为升力系数和阻力系数, ρ 为空气密度. dF 按垂直及平行于风轮旋转平面可以分解为局部风轮推力 dF_a 和转矩 dF_u :

$$\begin{aligned} dF_u &= (dL \sin \varphi - dD \cos \varphi), \\ dF_a &= (dL \cos \varphi + dD \sin \varphi). \end{aligned} \quad (2)$$

风轮转矩由 dF_u 产生, 则叶素上的转矩为

$$\begin{aligned} dQ_r &= r dF_u = r(dL \sin \varphi - dD \cos \varphi), \\ &= \frac{1}{2} \rho V_{\text{total}}^2 (C_l \sin \varphi - C_d \cos \varphi) c r dr, \end{aligned} \quad (3)$$

式中, c 为该叶素的弦长, φ 表示该处气流倾角. 一般情况下三个叶片桨距角相差不大, 所以风轮的总转矩可以表示为叶片上所有叶素转矩 dQ_r 的积分:

$$\begin{aligned} Q_r &= \int dQ_r \\ &= 3 \times \int_{R_{\text{hub}}}^R \frac{1}{2} \rho V_{\text{total}}^2 (C_l \sin \varphi - C_d \cos \varphi) c r dr, \end{aligned} \quad (4)$$

式中, R 为风轮半径, R_{hub} 为轮毂半径.

设水平轴风速为 v_0 , 风轮转速为 Ω , 则基于叶素动

表 1 2.0 MW 风电机组基本参数

Table 1 Nominal parameters of a 2.0 MW wind turbine

属性	参数
叶片长度	54 m
塔筒高度	78 m
切入、额定、切出风速	3 m/s, 9.5 m/s, 25 m/s
风轮切入、额定转速	6 r/min, 15.7 r/min
传动系统	多级齿轮箱
齿轮箱的传动比	114.65
齿轮箱效率	94.4%
发电机额定转速	1800 r/min
发电机功率转换效率	95.0%

图2 (网络版彩图) 风电机组叶片、塔筒整体结构。(a) 叶片塔筒结构示意图; (b) 叶素受力分析; (c) 塔筒力学模型

Figure 2 (Color online) Overall structures of wind turbine blade and tower. (a) Schematic diagram of blade and tower; (b) blade elemental forces analysis; (c) mechanical model of the tower.

量理论得到的风轮转矩可以表示为

$$Q_r = f\{v_0, \Omega, \beta; C_l, C_d, l, r, \varphi; R, R_{hub}\}. \quad (5)$$

为了进行更为准确的风电机组动态载荷计算, 还需要从叶尖叶根损失、塔影效应、尾流影响、风切变影响、叶片弹性形变等方面对具体风机特性参数进行修正^[18], 这里不再赘述。

3.2.2 基于有限元分析的塔筒机理建模

风轮在捕获风能的同时会产生轴向推力, 作用到塔架上便会形成一个耦合振动系统。

风轮的轴向推力可由式(2)中的局部风轮推力 dF_a 积分得到, 设为 F_{shaft} 。根据拉格朗日动力学方程, 风轮轴向推力和塔架之间的耦合振动可以表示为^[18]

$$F_{shaft} + \Delta F_{shaft} = M_m \ddot{x}_{af} + k_t \dot{x}_{af} + c_t x_{af}, \quad (6)$$

式中, ΔF_{shaft} 为风轮气动轴向推力变化量; M_m 为风轮和机舱的质量; x_{af} , $\dot{x}_{af}$, $\ddot{x}_{af}$ 分别为塔架前后方向(风轮轴向)振动的位移、速度和加速度。

由图2(c)表示的塔筒力学模型可以看出, 各段所受的轴向推力由上到下逐渐减小。同样地, 根据塔筒的分布式特性参数将塔筒划分为30个特性区域来建立有限元分析模型。通过计算塔筒上结构动力学载荷, 可以获得塔筒各节点动态平移量、加速度, 塔基前后方

向剪切力等信息。

3.2.3 双质块传动系统

带有齿轮箱的风机传动系统分为低速轴、齿轮箱、高速轴三部分。考虑低速轴的摩擦和扭转形变, 设低速轴为柔性、高速轴为刚性, 则从风轮到发电机的传动系统可以简化为双质块模型^[19]。

$$\begin{cases} J_r \dot{\omega}_r = Q_r - Q_{shaft}, \\ Q_{shaft} = K_s \left(\theta_r - \frac{\theta_g}{N_g} \right) + B_d \left(\omega_r - \frac{\omega_g}{N_g} \right), \\ J_g \dot{\omega}_g = \frac{Q_{shaft}}{N_g} - G_T, \end{cases} \quad (7)$$

式中, ω_r 和 ω_g 分别为风轮和发电机转速; J_r 和 J_g 分别为风轮和发电机转子的等效转动惯量; Q_{shaft} 和 G_T 分别为齿轮箱中间轴的机械转矩和发电机电磁转矩; N_g 为齿轮箱变速比; K_s 和 B_d 分别为低速轴刚度系数和阻尼系数; θ_r 和 θ_g 分别为风轮转子和发电机转子的角位移。由此可建立起从风轮捕获风能到发电机电磁能转化过程的动态耦合模型。

3.3 控制系统结构与参数

为了更准确地模拟风电机组的运行状态, 完整复现机组运行过程, 本文按照图3所示结构, 搭建了风电

图3 风电机组控制系统回路图

Figure 3 Diagram of control loop of wind turbine.

机组数字孪生闭环控制系统。主要包括发电机转矩控制子系统、叶片变桨控制子系统、偏航控制子系统、刹车系统及输出与通信子系统等。

图4为2.0 MW风电机组发电机转速 G_s -转矩 G_T 对应曲线, 可分为5段运行区间: 发电机转速小于1080 r/min (A点)时, 发电机转矩为零, 此时发电机功率也为0; 随着风速增加, 发电机转速大于1080 r/min时通过一组PI控制器升转矩并维持转速在1080 r/min附近; 当转矩大于3.265 kN m时进入BC段, 该段为最优转矩控制区, 对应转矩由实时转速确定:

$$G_T = 0.0028(G_s)^2. \quad (8)$$

当 G_s 达到1800 r/min额定转速进入CD段, 通过第二组PI控制器升转矩并维持转速在额定转速附近; 当风速继续增加使得 G_T 也达到额定值10.876 kN m时, 进行转矩限幅, 同时通过变桨系统调节叶片桨距角来维

持转速在额定值附近。据此控制策略, 以实时测量的风速、机理模型计算输出的上一时刻发电机转速、转矩作为输入参数, 根据5个运行区域自动切换进行发电机转矩控制。

变桨控制子系统也采用一组PI控制器, 主要根据传入的上一时刻发电机转速、转矩信号进行桨距角位置 and 变化速率控制, 风速信号则作为辅助调节信息。在额定功率以下, 叶片桨距角保持为0°, 使风电机组处于最大吸收风能状态。停机或风速大于切出风速时, 调整桨叶角至90°停机位置, 确保风电机组处于安全状态。

参照风电机组偏航系统控制策略, 用60 s风向滤波后的平均值与机舱方向作差, 当偏差大于12°时, 通过一个PID反馈控制回路进行对风操作。

上述孪生模型在Simulink的Real-Time模式下实现与风电机组的同步仿真, 孪生模型与数字孪生平台其他子系统的数据通信通过TCP/IP协议实现。

图4 发电机转速转矩关系曲线

Figure 4 The relation curve of generator speed and generator torque.

3.4 模型验证与数据修正

数字孪生模型的验证与数据修正主要分两个阶段: 机理模型修正阶段和控制系统修正阶段, 各阶段包含的主要内容如图5所示。

第一阶段修正主要针对风电机组本体模型。为了使机理模型准确模拟风电机组的气弹特性, 首先利用风机厂商给出的设备属性参数建立风电机组初始机理模型, 利用频率响应法对模型输出(如振动频率、测点位移)进行处理, 通过比较厂商给定理论响应特性和模型响应特性, 对有限元模型进行参数修正, 直至约束条

图 5 数字孪生模型修正流程图
Figure 5 Flow chart of digital twin model modification.

件收敛。以叶片模型为例, 首先对叶片初始设置的有限元分析节点数及每段中心位置等整体参数进行修正,

再对每段叶片的几何弦长、翼形截面刚度、叶片截面质量密度等局部参数进行修正。

第二阶段修正主要针对控制系统结构和参数。在上述已修正模型的基础上, 加入控制器, 形成风电机组闭环控制系统, 以现场采集到的风速、风向信息作为输入, 进行数字孪生系统的全工况(不同风速段、不同控制区域)闭环仿真, 得到风轮转速、发电机转速、发电机功率、变桨角度等关键参数的动态特性, 通过与实际运行数据的对比和偏差分析, 对数字孪生系统中的控制结构和控制参数进行迭代调整。

4 数字孪生平台

4.1 数字孪生平台功能及实现

作为数字孪生系统运行的基础, 数字孪生平台应具备实时安全的网络通信、数据治理、孪生模型仿真、人机交互动态展示以及智能算法拓展接口等功能。图6给出了数字孪生平台的整体技术架构。

平台开发涉及的语言以Golang、Python、JavaScript、C++为主, 辅以其他脚本语言。支持分布式部署及相应的高并发、高可用需求, 为保证运行的安全性和可靠性, 平台采用linux操作系统。在平台治理方面选用docker作为应用容器引擎, 用Prometheus搭建服务监控系统和时间序列数据库, 用Grafana数据可视化工具对平台性能指标进行统计、监控和告警, 为系统

图 6 数字孪生平台整体技术架构
Figure 6 The overall technical architecture of the digital twin platform.

安全运行提供保障。

数据采集和通讯方式可根据实际业务需求, 结合平台部署方式选择。采用边缘计算方式可将部分仿真、计算以及实效性要求高的业务放在靠近风电机组的边缘侧处理, 为平台侧分担压力; 同时根据业务需求将处理后的数据发送到平台侧。本平台选择k3s进行边缘计算治理, 同时服务端也搭配k3s Server进行云边协同, OTA等远程升级技术可以保证边缘侧的在线更新。如不采用边缘计算、云边协同方式, 则原始数据及相关业务数据经Protobuf这一数据序列化工具处理后通过TCP/IP、MQTT等传输协议发送到平台侧。理想情况下, 风电机组也可通过安全数据传输方式接收来自平台侧的调控指令。

数据治理方面, TimescaleDB被用来构建时序数据库, 其优点是具备原生SQL接口, 有较高的写入效率和存储可靠性; PostgreSQL搭建多种业务的关系型数据库; Minio则用来搭建分布式文件系统。通过以下几个措施实现了数据存取与管理的高效率、实时性: 风电机组运行数据中时序数据占据较大比重, 应用Spark Streaming框架有针对性地实现了高吞吐量的、具备容错机制的实时流数据处理; 应用分布式大数据实时计算引擎Flink保证了系统数据处理时的高吞吐量和低延迟; 硬件方面采用了固态硬盘(solid state disk, SSD)加上对最近时刻数据进行热缓存等方式来保证数据存取的高效率。

数据交互涵盖边缘侧与平台侧的数据交互、平台子系统间的数据交互以及相关业务的数据交互三个方面。数字孪生平台主要从权限管理和防范网络攻击两方面来保证数据交互及整个系统的安全。边缘侧与平台进行数据通信时需要账号密码验证, 进行不同的业务交互时, 平台会分配清晰的用户权限; 业务侧分配具有时效性的token, 所有业务及数据的访问需携带该token进行操作。数字孪生平台主要基于网站应用级入侵防御系统(web application firewall, WAF)对访问进行过滤, 防止CC、SQL注入、CSRF等类型的攻击。在高并发方面主要通过LVS、DNS轮询方式确保系统负载均衡, Supervisr系统监控管理进程等手段保证了整个系统的高可用性。

风电机组数字孪生模型主要包括机理模型和数据驱动的学习模型, 基于Python、C/C++以及相关的依赖库开发, 如numpy、pandas是Python环境下的针对数

组、矩阵运算的数学函数库, 而blitz++与mtl等都是基于C++template的高效数值计算程序库。为孪生模型服务的智能算法接口是数字孪生平台中的一项重要拓展功能, 也是重点发展方向。

4.2 数字孪生系统数据流及实时性

图6中的蓝色箭头指示了数字孪生系统在实时运行时各功能模块之间的数据/信息流。从风电机组采集到的环境信息、运行参数等利用TCP/IP、MQTT等协议传输到数字孪生平台的存储系统, 数字孪生模型通过数据治理模块实时订阅经过预处理的实时运行数据。以在Simulink中运行的数字孪生模型为例, 以客户端身份通过TCP/IP协议从数据治理模块获取风速、风向等信息, 并在Real-Time模式下实现与风电机组的同步仿真。

孪生模型根据前一时刻风电机组的状态进行初始化, 而后启动实时仿真, 并以每0.0125 s输出一组仿真数据的频率通过TCP/IP协议发送给数据孪生平台的存储系统, 供人机交互和可视化呈现等业务使用。风电机组与孪生模型实时产生的运行参数经Web人机交互服务器处理后, 以每1 s一组的频率向Web页面推送, 进行动态展示。用户可以通过访问指定IP同时实时监测风电机组和数字孪生模型的运行状态。经实际验证, 风电机组状态同步仿真和虚实交互两个进程的整体时延小于200 ms, 符合数字孪生系统“实时物联感知”的需求。

5 验证与分析

5.1 孪生模型验证与分析

利用某2.0 MW风电机组的SCADA运行数据, 对本文所建的数字孪生模型进行验证, 该风场SCADA系统的数据采集频率为1 s。模型验证时须输入风速信息, 包括水平方向风速、风向、湍流强度、时间戳等数据。

数字孪生模型除了可以实时产生与SCADA系统对应的部分关键运行参数, 还可以生成丰富的、从SCADA系统无法获取的风电机组动态载荷参数。表2提供了可从本文构建的风电机组数字孪生系统实时获取的典型参数。其中, “可测, 有测点”代表该参数可通过风电机组上安装的传感器测点获取; “不可测”代表

表 2 仿真模型典型参数

Table 2 Typical parameters of the simulation model

参数名称	单位	实际参数情况
风轮转速	r/min	可测, 有测点
发电机转速	r/min	可测, 有测点
发电机转矩	kN m	可测, 有测点
发电机功率	kW	可测, 有测点
叶片桨距角	°	可测, 有测点
偏航角	°	可测, 有测点
叶片节点n处摆震方向剪切力	kN	不可测
叶片节点n处挥舞方向剪切力	kN	不可测
塔筒节点n处前后方向剪切力	kN	不可测
叶片叶根处挥舞方向弯矩	kN m	可测, 无测点
叶片叶根处摆震方向弯矩	kN m	可测, 无测点
塔筒顶端前后方向偏移量	m	可测, 无测点
塔筒顶端左右方向偏移量	m	可测, 无测点
低速轴弯矩	kN m	可测, 无测点

该状态参数在风电机组上不可测量; “可测, 无测点”代表该参数在大多数风电机组上不安装传感器测点, 但可通过加装测点实现参数测量。

为了验证孪生模型在实时仿真时的精度, 从云南大基坡风电厂 2.0 MW 风电机组的历史运行数据中选取了连续 60 条采样序列用于测试。测试之前利用当前时刻前一秒的实际运行数据, 如风轮转速、发电机转速、发电机转矩 (分别为 13.11 r/min, 1503.06 r/min, 6.3457 kN m) 等对孪生模型进行初始化。图 7(a) 所示为 60 条实测风速在 7.4 到 9.1 m/s 范围内的变化情况。图 7(b)~(h) 所示为数字孪生系统在实测风速驱动下的实时模拟情况, 蓝色曲线是孪生模型的仿真结果。从 SCADA 系统中选择风轮转速、发电机转速、发电机功率 (图 7(b)~(d)) 等三个重要可测运行数据 (黄色点线) 进行对比验证。同时对数字孪生模型可模拟、但生产现场无法测量的动态载荷参数, 如叶片摆震方向剪切力、叶片摆震方向应力、叶根挥舞方向弯矩、塔筒顶端前后方向偏移量 (图 7(e)~(h)) 等进行展示。

为了量化分析孪生模型的精度, 本文采用平均绝对百分比误差 (mean absolute percentage error, MAPE) 作为量化指标:

$$\text{MAPE} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \left| \frac{\hat{y}_t - y_t}{y_t} \right| \times 100\%, \quad (9)$$

式中, y_t 代表 t 时刻来自 SCADA 系统的风电机组实际运行数据, $\hat{y}_t$ 则为对应的风电机组数字孪生模型仿真数据。MAPE 指标越小, 仿真精度越高。

从量化指标看, 孪生模型产生的三个重要运行参数均具有较高的精度。风轮转速、发电机转速的准确性最好, 仿真误差分别为 0.7991% 和 0.8085%, 发电机功率误差为 3.4611%。对于实时闭环仿真的数字孪生模型而言, 模型精度既与风电机组当前的运行工况、运行参数测量准确性等有关, 还与建模机理、数据修正机制及控制器参数设置等多个环节有关。

从图 7(b)~(d) 可以看出, 孪生模型在参数变化的动态特性上与实际机组具有较高的一致性。输入风速在第 25 个采样时刻达到峰值, 而孪生模型输出与 SCADA 系统中风轮转速、发电机转速、发电机功率三个参数均在第 29 个采样点达到峰值, 具有一致的惯性特性。从图 7(e)~(h) 可以看出, 风电机组弹性力学参数、位移参数变化的惯性较小, 与风速曲线的峰值基本同步, 均于 25~26 时刻达到峰值, 符合基本物理特性, 进一步验证了孪生模型的正确性。

上述验证和分析表明, 本文构建的风电机组数字孪生系统实现了“多领域融合精准映射”。基于本系统, 还可以在给定未来风速、风向预测信息的情况下, 实现对风电机组运行状态的“仿真推演”。未来将进一步融合数据驱动技术, 使风电机组孪生模型库向更广的领域、更多的应用场景发展, 同时提升“模型自主学习更新优化能力”。

5.2 可视化与人机交互

风力发电机组数字孪生系统采用了多种数据可视化技术, 将由数字孪生体产生的数据与风电机组的实际运行数据进行实时比对。图 8 展示了系统的 web 端可视化界面, 其中图 8(a) 为风电机组数字孪生系统 3D 演示主界面, 图 8(b) 为主要运行参数界面, 图 8(c) 和 (d) 分别为塔筒状态监测预警界面和机舱温度状态监测预警界面。

作为主界面, 图 8(a) 左上方小窗口显示的是风电机组实时运行姿态, 中间为 3D 引擎构建的数字孪生风电机组, 能够形象展示偏航、变桨动态效果。主界面右侧展示了一组与机组姿态相关的运行参数。图 8(b) 以丰富直观的形式展示了环境信息 (气温、风速、风力、风向等)、关键生产参数 (风轮转速、发电机转

图 7 风电机组数字孪生系统参数验证. (a) 风速曲线; (b) 风轮转速验证; (c) 发电机转速验证; (d) 发电机功率验证; (e) 叶片 1 第 2 个有限元节点处摆震方向剪切力; (f) 叶片 1 叶根摆震方向应力; (g) 叶片 1 叶根挥舞方向弯矩; (h) 塔筒顶端前后方向偏移量

Figure 7 Parameters validation of wind turbine digital twin system. (a) Wind speed curve; (b) validation of rotor speed; (c) validation of generator speed; (d) validation of generator power; (e) blade 1 local flapwise shear force at finite element node 2; (f) blade 1 flapwise shear force at the blade root; (g) blade 1 out-of-plane moment at the blade root; (h) tower-top forward-afterward translational deflection.

速、发电机转矩、发电机功率等)、动态载荷参数(塔基前后方向剪切力、叶片叶根处前后方向应力)等。关

键参数曲线图上叠加了风电机组实际运行参数和数字孪生模型的仿真参数, 实现了“虚实对比”, 方便运行、

图 8 风电机组数字孪生系统可视化界面。(a) 可视化展示主界面; (b) 主要参数界面; (c) 塔筒状态监测及预警界面; (d) 机舱温度状态监测及预警界面

Figure 8 The web interface of visual display of wind turbine digital twin system. (a) The main interface of visual display; (b) the main parameters interface; (c) tower condition monitoring and early warning interface; (d) nacelle temperature monitoring and early warning interface.

管理人员对风电机组状态进行实时监测。

图8(c)和(d)展示了利用数据驱动模型开发的塔筒、机舱温度状态监测预警应用场景。除了进行实时状态显示,还利用3D增强渲染技术实现了互动式直观呈现。用户可以在Web端通过缩放按钮深入细致地查看设备不同位置的状态,如机舱中不同位置的设备会根据实际工作温度的差异呈现不同颜色。同时预警界面可按等级、类型进行查看,支持确认告警和导出告警记录等操作。

5.3 未来应用场景及功能拓展

作为一种支撑全生命周期价值提升的先进信息化技术,数字孪生系统的价值并不在其本身的构建,而在于由数字孪生技术衍生出的各种应用场景,以及这些场景为生产过程赋予的新能力。本文构建的风电机组数字孪生系统可以接收实时风速信号,按照预先设置好的控制回路闭环运行,推演出机组未来的运行趋势;也可以接收来自机组实际控制系统的控制指令作为被控对象运行。在此基础上,进一步的应用场景和功能拓展可以包括:

(1) 作为先进控制算法的测试开发平台。如为智能变桨控制、主动降载控制等先进控制策略提供验证环境,实现与实际机组控制性能的对比分析。

(2) 接收来自于风电机组SCADA系统的实际控制指令或者实时风速,与实际风电机组并列运行,为风电机组的状态监测和故障诊断提供参考。

(3) 基于短期风速、风向预测信息模拟运行,可为实际风场的能量管理、电力交易,以及风电机组关键设备的健康趋势分析和故障预警提供支撑。

本文建立的数字孪生模型采取了机理为主、数据修正的方法,与目前大多数基于神经网络的纯数据模型不同,该模型的组成及原理与风电机组的结构和工作机理一一对应,不仅输入输出关系明确,其中间状态的物理意义和关联关系也非常清晰,可有效模拟出如表2所示的一些对风电机组运行有重要影响,但是在实际机组上并未安装测点或无法安装测点的参数变化趋势。基于这些模拟,可以显著提升对机组运行状态和运行性能的感知能力,为机组智能化检测维护、运行控制等提供更为细致、准确的数据支撑,进而指导实际运行。

6 结论

针对风电场数字化系统建设和智能运维需求, 本文研发了一套风力发电机组数字孪生系统. 该系统可以实时、高精度表达风电机组在多种运行工况下, 各关键部件的动态响应特性, 包括整机动态载荷的变化情况, 达到了精准映射风电机组运行状态的目标, 为发电装备数字孪生系统建设提供了一套可供参考的实施方案.

本文构建的数字孪生平台实现了实时物联感知、多领域融合精准映射、可视化呈现、模拟仿真推演等四大核心功能. 作为对数字孪生技术的应用探索, 在未来的工作中还须重点关注智能算法拓展接口、边缘侧治理架构与算法、模型自主学习更新等方面的研究, 研发专用硬件设备, 建立更多符合行业需求的应用场景, 推动数字孪生技术及系统以更加规范的方式快速发展, 为智能化风电建设提供助力.

参考文献

- 1 National Energy Administration. Statistics of China's electric power industry in 2020 (in Chinese). 2021-01-20 [国家能源局. 2020年全国电力工业统计数据. 2021-01-20]
- 2 Pu T J, Chen S, Zhao Q, et al. Framework design and application prospect for digital twins system of energy internet (in Chinese). Proc CSEE, 2021, 41: 2012–2029 [蒲天骄, 陈盛, 赵琦, 等. 能源互联网数字孪生系统框架设计及应用展望. 中国电机工程学报, 2021, 41: 2012–2029]
- 3 Li H, Hu Y G, Li Y, et al. Overview of condition monitoring and fault diagnosis for grid-connected high-power wind turbine unit (in Chinese). Electric Power Autom Equipment, 2016, 36: 6–16 [李辉, 胡姚刚, 李洋, 等. 大功率并网风电机组状态监测与故障诊断研究综述. 电力自动化设备, 2016, 36: 6–16]
- 4 Kusiak A, Zhang Z, Verma A. Prediction, operations, and condition monitoring in wind energy. *Energy*, 2013, 60: 1–12
- 5 Pang Y, He Q, Jiang G, et al. Spatio-temporal fusion neural network for multi-class fault diagnosis of wind turbines based on SCADA data. *Renew Energy*, 2020, 161: 510–524
- 6 He J, Yang S X, Gan C B. Dynamic modeling and fault feature extraction of a wind turbine gearbox under random excitation (in Chinese). J Vib Shock, 2016, 35: 35–40 [何俊, 杨世锡, 甘春标. 随机激励下风机齿轮箱动力学建模及故障特征提取. 振动与冲击, 2016, 35: 35–40]
- 7 Pashazadeh V, Salmasi F R, Araabi B N. Data driven sensor and actuator fault detection and isolation in wind turbine using classifier fusion. *Renew Energy*, 2017, 116: 99–106
- 8 Liu X, Gao Z, Chen M Z Q. Takagi-sugeno fuzzy model based fault estimation and signal compensation with application to wind turbines. *IEEE Trans Ind Electron*, 2017, 64: 5678–5689
- 9 Tao F, Zhang H, Liu A, et al. Digital twin in industry: State-of-the-art. *IEEE Trans Ind Inf*, 2019, 15: 2405–2415
- 10 He X, Ai Q, Zhu T Y, et al. Opportunities and challenges of the digital twin in power system applications (in Chinese). Power Sys Tech, 2020, 44: 2009–2019 [贺兴, 艾芊, 朱天怡, 等. 数字孪生在电力系统应用中的机遇和挑战. 电网技术, 2020, 44: 2009–2019]
- 11 Fang F, Zhang X N, Liang D Y, et al. Digital twin technology for smart power generation and its application modes (in Chinese). Power Gener Technol, 2020, 41: 462–470 [房方, 张效宁, 梁栋场, 等. 面向智能发电的数字孪生技术及其应用模式. 发电技术, 2020, 41: 462–470]
- 12 Zhou M, Yan J, Feng D. Digital twin framework and its application to power grid online analysis. CSEE J Power Energy, 2019, 5: 391–398
- 13 Jain P, Poon J, Singh J P, et al. A digital twin approach for fault diagnosis in distributed photovoltaic systems. *IEEE Trans Power Electron*, 2019, 35: 940–956
- 14 Schluse M, Priggemeyer M, Atorf L, et al. Experimentable digital twins—Streamlining simulation-based systems engineering for industry 4.0. *IEEE Trans Ind Inf*, 2018, 14: 1722–1731
- 15 China Academy of Information and Communications Technology. White paper on digital twin city (2020) (in Chinese). 2020-12 [中国信息通信研究院. 数字孪生城市白皮书(2020年). 2020年12月]
- 16 Jonkman J, Butterfield S, Musial W, et al. Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development. Technical Report. Golden: Natioanl Renewable Energy Laboratory, 2009
- 17 Gao F, Xu D P, Lv Y G. Modeling of wind turbine rotor based on blade element theory (in Chinese). Modern Electric Power, 2007, 6: 52–57 [高峰, 徐大平, 吕跃刚. 基于叶素理论的风力发电机组风轮建模. 现代电力, 2007, 6: 52–57]
- 18 Xia J K, Wang X D, Lu S X, et al. High-power Wind Turbine Control Technology (in Chinese). Beijing: Science Press, 2019. 18–49 [夏加宽, 王晓东, 卢爽瑄, 等. 大功率风力发电机组控制技术. 北京: 科学出版社, 2019. 18–49]

- 19 Wang H P, Liu J Z, Hu Y, et al. Power dispatching tracking of large-inertia wind turbine under full operating conditions based on predictive control (in Chinese). *Power Sys Techno*, 2020, 44: 2520–2528 [王会盼, 刘吉臻, 胡阳, 等. 基于预测控制的大惯量风机全工况功率调度跟踪. *电网技术*, 2020, 44: 2520–2528]

Digital twin system of a wind turbine

FANG Fang^{1,2}, YAO GuiShan¹, HU Yang^{1,2}, WU XuTao³ & LIU JiZhen^{1,4}

¹ School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

² Key Laboratory of Power Station Energy Transfer Conversion and System, Ministry of Education, Beijing 102206, China;

³ Beijing Zhanwei Technology Co. Ltd., Beijing 102206, China;

⁴ State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Sources, Beijing 102206, China

Large-scale grid-connected wind farms have dominated China's new power system, which is primarily based on renewable energy sources, and their intelligence level has a direct impact on the safety, efficiency, and economy of the power system operation. For the first time, a digital twin system for a wind turbine is constructed and implemented using the concept of cyberphysical-based real-time mapping. The overall architecture of a digital twin system is designed; real-time dynamic models of each subsystem are built using a combination of the physical-based methods and data-driven approaches; and real-time communication, accurate mapping, and visualization between the physical wind turbine and digital twin models are realized through effective organization of data information flow. Real-time dynamic load simulation of the entire wind turbine is enabled by multimodel digital thread interaction, and the digital twin system's real-time performance and accuracy are verified by comparing simulation data with operating data from the corresponding physical wind turbine. The future application scenarios and function development of the developed digital wind turbine twin system are also discussed.

wind power generation, digital twin, hybrid modeling, cyber physical system

doi: [10.1360/SST-2021-0076](https://doi.org/10.1360/SST-2021-0076)