

基于关键频率靶向注入与宽频迁移重构的 风电机组阻抗在线快速测量方法

宗鑫¹, 邓晓洋², 吴林林², 高磊¹, 王潇², 吕敬^{1*}
(1. 上海交通大学电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海 200240;
2. 国网冀北电力有限公司电力科学研究院, 北京 100045)

Online Rapid Impedance Measurement Method for Wind Turbines Based on Key Frequency Targeted Injection and Wideband Transfer Reconstruction

ZONG Xin¹, DENG Xiaoyang², WU Linlin², GAO Lei¹, WANG Xiao², LYU Jing^{1*}

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd. Electric Power Research Institute, Beijing 100045, China)

Abstract: [Objective] Aiming at the technical challenge of balancing the accuracy and efficiency of online wideband impedance measurement of wind turbines, this paper proposes a hybrid measurement method that integrates key frequency targeted high-precision injection and wideband impedance transfer reconstruction. [Methods] Firstly, the standard simulation model was constructed based on the target wind turbines to obtain its all-operating-conditions wideband impedance data model. Secondly, the key frequency point set was screened, and the impedance data of the target wind turbines at the key frequency points were obtained online via targeted injection of single-sine signals. Finally, the discrete key frequency point impedance was extended to the target frequency band by employing transfer reconstruction technology, and fast online measurement of wideband impedance characteristics of the wind turbines was realized. [Results] The effectiveness of the proposed hybrid measurement method was verified by simulation and controller hardware-in-the-loop experiments. The experimental results showed that under the influence of 30 dB noise, the measurement accuracy of the proposed hybrid measurement method was comparable to that of the traditional single-sine frequency sweep method, while the measurement time was

reduced by more than 85%. [Conclusion] The proposed hybrid measurement method significantly reduces the online measurement frequency points while retaining the high-precision advantages of single-sine signal injection, thus effectively improving the measurement efficiency.

Key words: wind turbines; online wideband impedance measurement; transfer reconstruction; hybrid measurement

摘要: [目的] 针对风电机组宽频阻抗在线测量中精度与效率难以兼顾的技术难题, 本文提出一种融合关键频率靶向高精度注入与宽频阻抗迁移重构的混合测量方法。[方法] 首先, 基于目标风电机组构建标准仿真模型, 获取其全工况宽频阻抗数据模型; 然后, 筛选关键频率点集, 并通过单正弦信号靶向注入在线获取目标风电机组在关键频率点的阻抗数据; 最后, 利用迁移重构技术将离散的关键频率点阻抗拓展至目标频段, 实现风电机组宽频阻抗特性的快速在线测量。[结果] 通过仿真与控制器硬件在环试验, 验证了所提混合测量方法的有效性。试验结果表明, 在 30 dB 噪声的影响下, 该混合测量方法的测量精度与传统单正弦扫频法相当, 而测量耗时缩短 85% 以上。[结论] 所提混合测量方法在保留单正弦信号注入高精度优势的同时, 显著减少了在线测量频率点, 从而有效提升了测量效率。

关键词: 风电机组; 宽频阻抗在线测量; 迁移重构; 混合测量

基金项目: 国网冀北电力有限公司科技项目 (52018K240009)

State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd. Science and Technology Project (52018K240009)

0 引言

近年来, 随着世界各国陆续提出并积极推进

“双碳”目标,风电等新能源产业迅猛发展。然而,随着电力系统朝着高比例可再生能源接入和高比例电力电子设备应用的方向演变,其多尺度动态控制过程给电力系统带来的宽频振荡等稳定性问题日益突出,严重威胁电力系统的安全稳定运行和新能源的高效消纳^[1-4]。

阻抗分析方法是目前新能源并网系统宽频振荡分析的有效方法之一,其关键在于准确获取新能源机组和电网的宽频阻抗特性^[5-7]。由于商业保密等因素限制,实际新能源机组普遍呈现“黑/灰箱”特性,控制结构和参数等关键信息难以获取,因此基于理论推导的“白箱”建模方法难以应用于实际。阻抗测量通过向被测系统注入小信号扰动,采集由此产生的响应,在不依赖被测系统内部关键信息的情况下获取其阻抗特性,已成为一种实用且重要的技术途径^[8-9]。

新能源机组的阻抗特性与其出力密切相关,而其出力往往表现出显著的波动性。例如,风电机组的出力在分钟级内最大波动可达 30%。测量精度和测量效率作为阻抗测量的两个关键性能指标,存在着显著的负相关性,因此如何有效兼顾测量精度和效率,成为一大关键挑战。

根据扰动激励源特性,现有阻抗测量方法可分为无源与有源两类。无源测量利用被测系统端口固有的谐波或噪声信号来估测阻抗特性,无需外部扰动源,成本较低但测量精度有限^[10-11]。有源测量通过外部设备向被测系统注入扰动信号以获取阻抗特性,测量精度更高且适用范围更广,因此得到了广泛研究与应用^[12]。有源测量的关键在于扰动信号的设计,其特性直接决定测量精度和效率^[13]。单正弦扰动信号凭借信噪比高、设计原理简单等优势,被广泛应用于新能源机组的宽频阻抗测量^[14-16]。然而,传统单正弦扫频法耗时较长,难以满足新能源机组出力快速变化下对宽频段阻抗测量速度的要求。为此,文献^[17-19]提出了基于随机脉宽调制(Random Pulse Width Modulation, RPWM)和具有固定占空比的脉宽调制(Pulse Width Modulation with a Constant Duty Cycle, CDC-PWM)的宽频阻抗测量方法。RPWM虽然能快速获取宽频阻抗特性,但其非周期性与随机性会导致严重的频谱泄漏,测量精度难以得到保证;而 CDC-PWM 可将频谱能量集中于特定

频率处,有利于提高测量精度,但其高频衰减特性制约了高频段测量精度。针对上述问题,文献^[20-22]采用伪随机二进制序列(Pseudo-Random Binary Sequence, PRBS)和最大长度二进制序列(Maximum-Length Binary Sequence, MLBS),在一定程度上改善了高频段测量精度,但其频谱能量分布仍存在不可控的固有缺陷。文献^[23]提出基于离散区间二进制序列(Discrete-Interval Binary Sequence, DIBS)的阻抗测量方法,通过自主设计频谱能量分布以提高测量精度。然而,上述基于二进制序列的方法不适用于频率耦合特性的测量,因此基于 Chirp 信号^[24]和多正弦信号^[25]注入的阻抗测量方法出现,用于捕捉频率耦合特性,但由于幅值叠加效应,激励强度受限,制约了测量性能的进一步提升。现有阻抗测量方法的性能对比如表 1 所示。

近年来,人工智能技术迅速发展,在阻抗辨识领域取得了显著进展,为阻抗测量技术提供了新的思路。传统神经网络方法,如人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN)^[26]、反向传播神经网络(Back Propagation Neural Network, BPNN)^[27-28]等,通过建立新能源机组运行工况与宽频阻抗之间的非线性映射,获取其多工况阻抗的快速预测。然而,传统神经网络方法通常依赖大量仿真数据,难以应用于实际机组,且模型解释性和复用性较差。针对解释性问题,基于知识-数据融合驱动^[29-31]和物理信息神经网络^[32]的阻抗辨识方法将已知物理知识和机理融入模型构建中,提高了模型的可解释性;针对复用性问题,迁移学习通过源域(解析模型或仿真模型、已知设备)预训练→目标域(实际机组、未知设备)小样本微调机制^[33-36],实现了知识迁移与模型复用,有效缓解了数据稀缺与模型复用性差的问题。然而,上述人工智能方法侧重于阻抗辨识,即通过建立运行工况与阻抗之间的静态映射模型来预测阻抗,未能从阻抗测量的角度出发对精度和效率进行协同优化。此外,现有研究很少考虑实际工程中存在的噪声干扰、目标域频率点选取等问题。因此,人工智能技术在阻抗测量领域仍存在较大的研究空白。

基于此,本文提出了一种融合关键频率靶向

高精度注入与宽频阻抗迁移重构的混合测量方法。首先,通过构建目标风电机组的标准仿真模型,获取其全工况宽频阻抗数据模型;然后,筛选得到关键频率点集,并利用单正弦信号靶向注入,

实现目标风电机组在关键频率点阻抗数据的精准获取;最后,借助迁移重构技术,将离散的关键频率点阻抗拓展至目标频段,从而实现快速且准确的宽频阻抗在线测量。

表 1 现有阻抗测量方法性能对比

Tab. 1 Performance comparison of existing impedance measurement methods

阻抗测量方法	测量精度		测量效率	频谱能量可控性	频率耦合场景适用性	
	低频段	高频段				
传统单正弦扫频法	最高	最高	最低	完全可控	是	
RPWM 信号	最低	最低	最高	完全不可控		
宽带信号注入法 (二进制序列)	CDC-PWM 信号 PRBS、MLBS	高(低于 PRBS、MLBS)	较低(低于 PRBS、MLBS)	中等 (存在高频衰减特性)	部分可控	
	PRBS、MLBS	较高	低	较高	部分可控(存在较弱的高频衰减特性)	否
	DIBS	较高	较高	较高	近乎完全可控(存在杂散频率分量)	
宽带信号注入法(多正弦/Chirp 信号)	中等	中等	中等	完全可控	是	

1 靶向注入-迁移重构混合测量方法

1.1 靶向注入-迁移重构混合测量方法基本框架

针对风电机组宽频阻抗在线快速测量的工程需求,本文提出了一种融合关键频率靶向高精度注入与宽频阻抗迁移重构的混合测量方法,其基本框架及原理如图 1 所示。该框架采用离线训练和在线测量的分阶段协同机制。一方面通过筛选关键频率点进行高精度单正弦信号注入,确保可靠的测量精度;另一方面结合迁移重构技术将离散的关键频率点阻抗数据扩展至宽频段,减少测量频率点数量,实现快速准确地阻抗在线测量。

基于迁移学习的相关理论知识分析:对于风电机组宽频阻抗在线测量问题,源域 D_s 定义为基于标准仿真模型生成的全工况宽频阻抗数据,其任务 T_s 定义为获取标准仿真模型的全工况宽频段阻抗数据模型;目标域 D_T 定义为关键频率点集下目标风电机组的实测阻抗数据,其任务 T_T 定义为目标风电机组的宽频阻抗特性迁移重构。

1.1.1 离线训练阶段

(1)基于目标风电机组的电气特性与拓扑结构,构建标准仿真模型。

受限于商业机密等因素,风电机组的控制系统通常呈现出“黑/灰箱”特性,其内部控制结构

和控制参数难以获取。尽管如此,通过系统运营商仍可获得风电机组的主电路拓扑、电气参数及其基本控制策略。基于上述信息,可借助 Matlab/Simulink 或 PSCAD 等仿真平台构建标准仿真模型。该模型在主电路拓扑、电气参数及主要控制结构方面与目标风电机组基本保持一致,而对于电流解耦控制、有源阻尼控制等附加控制环节均不予考虑。采用常见的控制参数设计方法^[37]设置控制参数,确保标准仿真模型能够在全工况范围内稳定运行。

(2)采用传统单正弦扫频法对标准仿真模型进行全工况宽频阻抗扫描,获取离线阻抗数据集。

首先,确定工况范围,包括有功功率输出和无功功率输出范围。为确保后续建立的预训练模型适用于整个稳态运行区间,并满足电网的无功功率要求,有功功率输出范围设定为 $0 \sim 1$ p.u.,无功功率输出范围设定为电网要求机组输出的最大容性无功至最大感性无功,并具备足够的分辨率。其次,确定扫频范围,即向风电机组端口所注入扰动信号的频率范围,扫频范围必须包含在线测量的目标频段,并具备足够的分辨率。最后,在上述工况范围和扫频范围内,采用扰动注入法测量标准仿真模型的阻抗数据,获取离线阻抗数据集。考虑到离线测量对测量效率的要求较低,为保证

后续预训练模型的精度,应优先选择测量精度最高的传统单正弦扫频法进行测量。离线阻抗数据集的格式为 $\{ \text{输入}: U_{d1}, U_{q1}, I_{d1}, I_{q1}, f_1; \text{输出}: \mathbf{Z}_1 / \mathbf{Y}_1 \}$ 。其中, $U_{d1}, U_{q1}, I_{d1}, I_{q1}$ 和 f_1 分别为标准仿真

模型在全工况下的端口 d, q 轴电压、电流和宽频段离线扫频频率; $\mathbf{Z}_1 / \mathbf{Y}_1$ 为标准仿真模型的端口阻抗/导纳矩阵,可在正负序域或 dq 域下以实部虚部或幅值相角的形式进行表示。

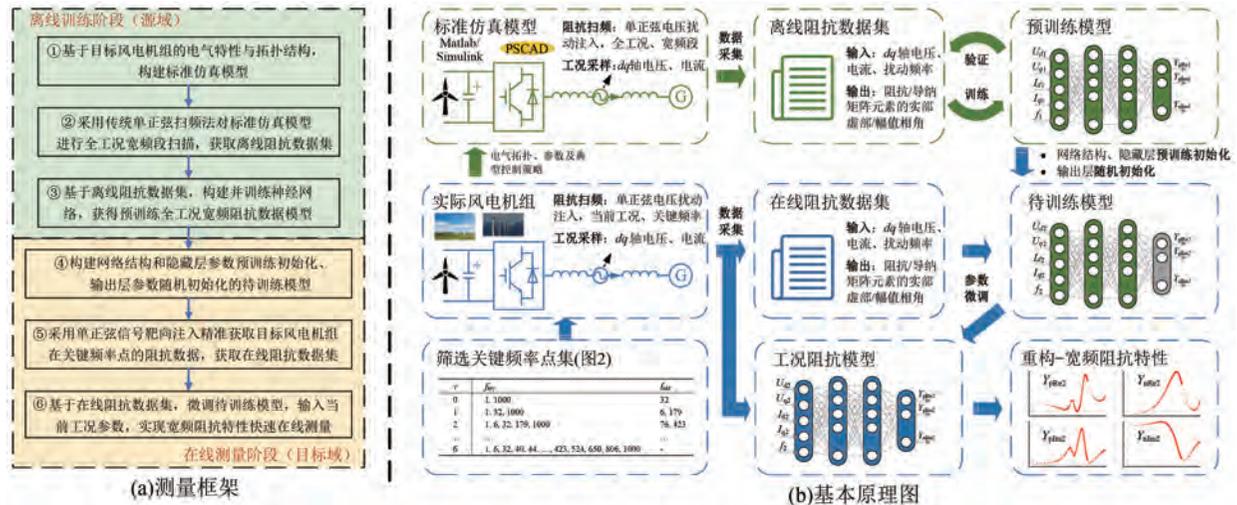


图 1 靶向注入-迁移重构混合测量方法的框架及原理

Fig. 1 Framework and principle of the targeted injection-transfer reconstruction hybrid measurement method

(3) 基于离线阻抗数据集,构建并训练神经网络,获取预训练的全工况宽频阻抗数据模型。

首先,对离线阻抗数据集进行归一化处理,并将其划分为训练集和测试集。其次,构建神经网络模型,设定输入层和输出层的神经元个数分别与输入、输出特征维数保持一致,并设定隐藏层的层数及各层神经元个数^[38]、训练超参数^[39]的初始值,根据神经网络模型的有效性进行调整和优化。然后,基于训练集对所构建的神经网络进行训练,获取标准仿真模型的全工况宽频段阻抗数据模型,即预训练模型。最后,采用决定系数指标对预训练模型的有效性进行验证与评估,以指导预训练模型的结构优化和参数调整,确保预训练模型具有可靠性和适用性。神经网络模型的有效性包括准确性和泛化性两个方面,分别基于训练集和测试集计算决定系数 R^2 来表征。 R^2 的计算式为

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (1)$$

式中: n 为频率点总数; y_i 为通过传统单正弦扫频法得到的阻抗实测值; \hat{y}_i 为预训练模型输出的阻抗预测值; \bar{y} 为平均阻抗实测值。

通常, R^2 范围为 $0 \sim 1$, 其值越接近于 1, 表明

模型的有效性越好。

1.1.2 在线测量阶段

(1) 构建网络结构和隐藏层参数预训练初始化、输出层参数随机初始化的待训练模型。

构建一个新的神经网络模型,使其网络结构与预训练模型一致,隐藏层参数直接继承预训练模型,输出层参数则进行随机初始化,所获得的模型被称为待训练模型。

(2) 通过单正弦信号靶向注入精准获取目标风电机组在关键频率点的阻抗数据,得到在线阻抗数据集。

首先,依据特定机组阻抗特性曲线的变化特征筛选关键频率点集。然后,依次向目标风电机组的端口注入各个关键频率的单正弦信号,获取在线阻抗数据集。在线阻抗数据集的格式与离线阻抗数据集需保持一致,即 $\{ \text{输入}: U_{d2}, U_{q2}, I_{d2}, I_{q2}, f_2; \text{输出}: \mathbf{Z}_2 / \mathbf{Y}_2 \}$ 。其中, $U_{d2}, U_{q2}, I_{d2}, I_{q2}$ 和 f_2 分别为实际风电机组在当前运行工况下的端口 d, q 轴电压、电流和关键频率; $\mathbf{Z}_2 / \mathbf{Y}_2$ 为实际风电机组的端口阻抗/导纳矩阵。

(3) 基于在线阻抗数据集,利用迁移重构技术实现宽频阻抗特性的快速重构,完成宽频阻抗的快速在线测量。

首先,基于在线阻抗数据集,利用迁移学习技术对待训练模型进行参数微调,以获取用于描述实际风电机组在当前运行工况下阻抗特性的工况阻抗模型。然后,将实际风电机组在当前工况下的端口 d 、 q 轴电压、电流和待测频率输入工况阻抗模型,实现由离散关键频率点向目标频段的阻抗重构,完成宽频阻抗的快速在线测量。在参数微调过程中,需设置较小的学习率和训练轮次,避免过拟合导致模型性能下降。测量结束后,采用决定系数或采用幅值、相角的绝对指标 D_a 、 D_p 对测得的宽频阻抗进行评估。 D_a 、 D_p 表达式为

$$\begin{cases} D_a = \max_i \left\{ \left| 20 \lg \left(\left\| \frac{y_i}{\hat{y}_i} \right\| \right) \right| \right\} \\ D_p = \max_i \{ |\angle y_i - \angle \hat{y}_i| \} \times \frac{180^\circ}{\pi} \end{cases} \quad (2)$$

1.1.3 关键频率点集的筛选

关键频率点集的基本筛选原则如下:包含目标频段的上、下限频率点;在目标频段内尽量按对数间隔均匀分布;根据目标风电机组阻抗特性的变化特性对频率点密度进行调整,在阻抗特性变化平缓的频段适当降低频率点密度,在阻抗特性变化剧烈的频段适当提高频率点密度。参考文献[40]的频率自适应调整思路,本文提出了一种关键频率点集筛选方法,具体流程如图2所示。

设第 v 次迭代中筛选得到的关键频率点集为 f_{key}^v ,根据式(3)可计算出预增频率点集 f_{add}^v :

$$f_{add}^v(i) = \sqrt{f_{key}^v(i) \cdot f_{key}^v(i+1)}, i = 1, 2, \dots, L^v - 1 \quad (3)$$

式中: L^v 为 f_{key}^v 的长度。

对于 f_{add}^v 中的每个频率点,分别采用传统正弦扫频法和本文所提靶向注入-迁移重构混合测量方法测量目标风电机组的端口阻抗。若某频率点处两种方法测得的阻抗幅值误差超过设定阈值 A_{th} 或相位误差超过设定阈值 P_{th} ,则将该频率点判定为关键频率点。其中,误差阈值需根据实际测量需求在精度与效率之间进行权衡。为了保证必要的测量精度的前提下,尽可能地提高测量效率,本文参考文献[40]并结合仿真试错,设定 A_{th} 和 P_{th} 分别为 2 dB 和 5° 。将满足判定条件的预增频率点集 f_{addkey}^v 与 f_{key}^v 结合,得到第 $v+1$ 次迭代筛选的关键频率点集 $f_{key}^{v+1} = unique([f_{addkey}^v,$

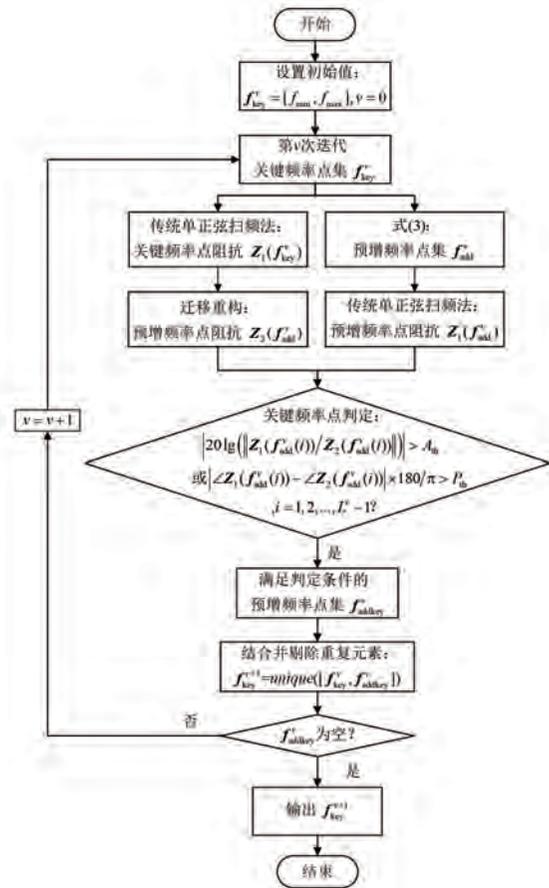


图2 关键频率点集筛选流程
 Fig.2 Flowchart of the key frequency point set screening

f_{key}^v), $unique$ 函数用于剔除重复的频率点。重复上述迭代过程,直至 f_{addkey}^v 为空。 f_{key}^0 的初始值 f_{key}^0 设定为目标频段的上、下限频率点。

上述筛选方法具有普适性。针对不同机型/设备,只需按照图2流程即可自动筛选出适配该机型/设备阻抗特性的关键频率点集,无需额外设计或调整;针对不同工况,考虑到阻抗特性随工况变化的高度一致性,筛选过程无需根据工况变化进行在线更新,因此应离线完成,以减轻在线计算的负担,确保在线测量的效率。

2 仿真分析与试验验证

2.1 系统介绍与案例设计

所提靶向注入-迁移重构混合测量方法可用于风电机组、光伏发电单元和储能等各类电力电子设备的阻抗快速测量。为验证所提方法的有效性,本文以永磁直驱风电机组(Direct-driven

Permanent Magnet Synchronous Generator-based Wind Turbines, D-PMSG-WT) 为例, 其主电路与控制结构如图 3 所示。主电路由 WT、D-PMSG、机侧变流器 (Machine Side Converter, MSC)、直流母线电容、网侧变流器 (Grid Side Converter, GSC) 以及出口滤波器组成。MSC 采用基于转子磁链定

向的矢量控制策略, d 轴采用零 d 轴电流控制, q 轴采用定电磁转矩控制。GSC 采用基于电网电压定向的矢量控制策略, d 、 q 轴外环分别采用直流电压控制、无功功率控制, 直流电压控制用于维持直流侧电压恒定, 无功功率控制用于控制无功功率的输出。

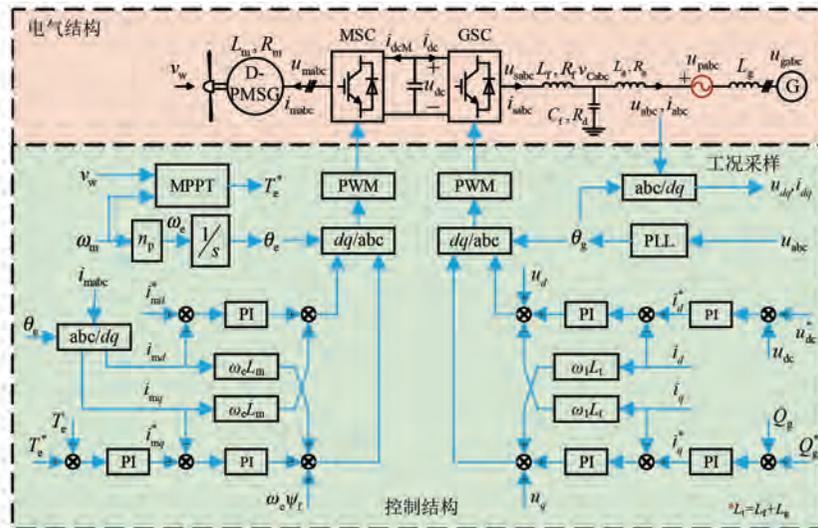


图 3 D-PMSG-WT 的主电路与控制结构

Fig. 3 Main circuit and control structure of D-PMSG-WT

为验证所提方法的可行性与有效性, 基于 Simulink 仿真平台构建两台 D-PMSG-WT 模型, 分别标记为 WT1 和 WT2。其中, WT1 为标准仿真模型, 用于生成源域的全工况宽频阻抗数据; WT2 为目标风电机组, 用于提供目标域的阻抗实测数据。两台机组模型在控制结构和参数上均存在差异, WT1 的 MSC 和 GSC 均未配置前馈控制和解耦控制, 而 WT2 的 MSC 和 GSC 配置了上述附加控制。WT1 和 WT2 参数对比如表 2 所示。

本文所使用的电脑配置如下: CPU 为 Intel (R) Xeon(R) Gold 6254 CPU @ 3.10 GHz; GPU 为 NVIDIA GeForce GTX 1650, 515 GB; RAM 为 1.0 TB。仿真环境为 Matlab R2024b。

2.2 仿真分析

2.2.1 离线训练与模型验证

基于标准仿真模型 WT1, 按如下步骤进行离线训练获取预训练模型。

(1) 设置离线扫频参数。设置有功功率输出 P 范围为 $0 \sim 1$ p.u., 无功功率输出 Q 范围为 $-0.3 \sim 0.3$ p.u., 分辨率为 0.1 p.u., 共计 70 个工况; 设置离线扫频范围为 $1 \sim 1000$ Hz, 低频段 ($1 \sim$

表 2 WT1 和 WT2 参数对比

Tab. 2 Parameters comparison of WT1 and WT2

参数名称	参数值	
	WT1(源域)	WT2(目标域)
锁相环参数 $K_{p,PLL}, K_{i,PLL}$	215.865 6、 23 298.975 5	259.038 7、 33 550.524 7
网侧电流环参数 K_{pi}, K_{ii}	0.095 3、 41.163 8	0.114 4、 59.285 9
直流电压外环参数 K_{pdc}, K_{idc}	2.031 5、 63.218 9	2.437 8、 91.035 2
无功功率外环参数 K_{pq}, K_{iq}	0.009 6、 91.444 4	0.011 5、 131.679 9
机侧电流环参数 $K_{pi,m}, K_{ii,m}$	0.148 5、 64.118 8	0.178 2、 88.011 1
电磁转矩外环参数 K_{pt}, K_{it}	0.014 6、 138.763 8	0.017 5、 199.819 9
机侧滤波电感 $L_f/\mu\text{H}$		70.422 8
机侧滤波电阻 $R_f/m\Omega$		1.106 2
网侧滤波电感 $L_g/\mu\text{H}$		40.000 0
网侧滤波电阻 $R_g/m\Omega$		0.628 3
滤波电容 $C_f/\mu\text{F}$		668.577 8
阻尼电阻 $R_d/m\Omega$		57.826 3
D-PMSG 定子电感 $L_m/\mu\text{H}$		172.000 0
D-PMSG 定子电阻 $R_m/m\Omega$		0.461 0

200 Hz)分辨率为 1 Hz,高频段(225~1 000 Hz)分辨率为 25 Hz,共计 232 个频率点。

(2)全工况宽频段阻抗扫描。采用传统单正弦扫频法测量并记录 WT1 端口的正负序阻抗数据,构建离线阻抗数据集。其数据格式为{输入: U_{dWT1} 、 U_{qWT1} 、 I_{dWT1} 、 I_{qWT1} 、 f_{WT1} ;输出: Y_{WT1} }。其中, U_{dWT1} 、 U_{qWT1} 、 I_{dWT1} 、 I_{qWT1} 和 f_{WT1} 分别为 WT1 的端口 d 、 q 轴电压、电流和宽频段离线扫频频率; Y_{WT1} 为 WT1 的端口导纳矩阵,在正负序域下以实部虚部的形式表示,即 $Y_{WT1} = [Y_{pRe1}, Y_{pIm1}, Y_{nRe1}, Y_{nIm1}]$ 。

(3)数据预处理。采用 Z-score 归一化方法对离线阻抗数据集进行归一化处理,并按工况顺序交错均分为训练集和测试集,分别用于神经网络的训练和验证。

(4)预训练模型的构建与训练。构建一个五输入四输出的 BPNN,隐藏层结构配置为 8-10-12-14-12,采用 Levenberg-Marquardt 优化算法,并设置学习率为 0.003,训练轮数为 800。基于离线训练集进行 BPNN 的训练,从而获得预训练模型。

图 4 展示了训练集工况(P 为 1.0 p.u., Q 为 0)和测试集工况(P 为 0.6 p.u., Q 为 0.3 p.u.)下,WT1 宽频阻抗特性的预训练结果。图中,红色实线为采用传统单正弦扫频法实测的阻抗特性曲线;红色圆圈为预训练模型预测的阻抗特性曲线;黑色实线为预测特性与实测特性之间的误差。可见,预测特性曲线与实测特性曲线高度吻合,误差曲线整体趋近于零; $R^2 \approx 100\%$,表明模型的准确性与泛化性较优。

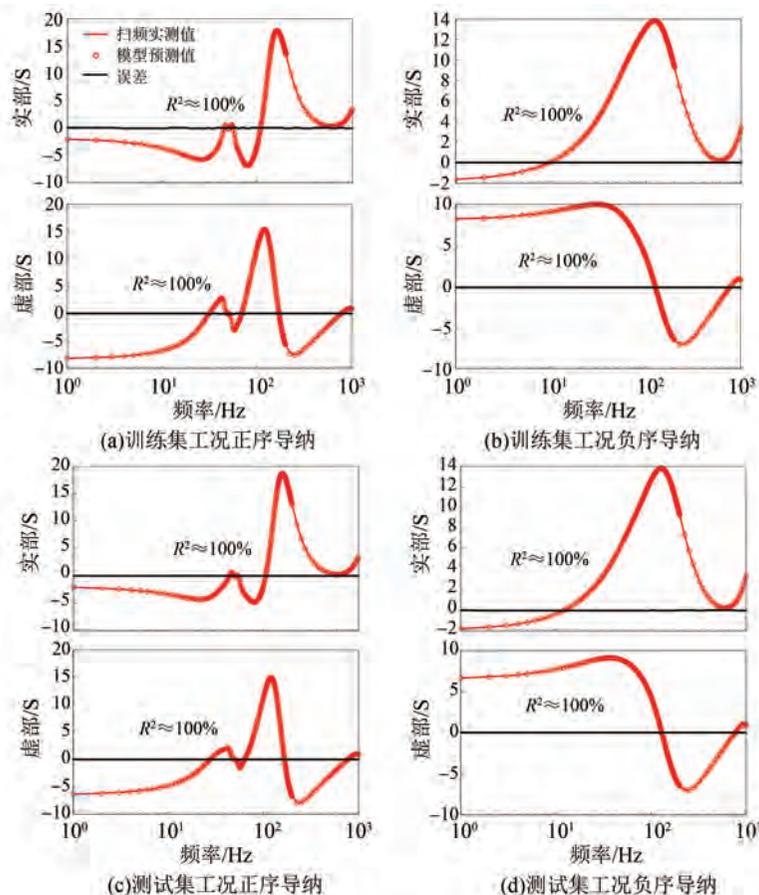


图 4 特定训练集工况和测试集工况下 WT1 宽频阻抗特性预训练结果

Fig. 4 Pre-training results of wideband impedance characteristics of WT1 at a specific training and test set operating condition

2.2.2 在线测量与性能评估

基于目标风电机组 WT2,按如下步骤实现风电机组的宽频阻抗在线测量。

(1)筛选关键频率点集。根据所提关键频率点集筛选方法,得到 25 个关键频率点:1 Hz、6 Hz、14 Hz、21 Hz、32 Hz、36 Hz、40 Hz、44 Hz、

49 Hz、55 Hz、61 Hz、68 Hz、80 Hz、94 Hz、117 Hz、145 Hz、179 Hz、222 Hz、280 Hz、344 Hz、423 Hz、524 Hz、650 Hz、806 Hz 和 1 000 Hz。

(2) 实时工况阻抗扫描与数据归一化。采用传统单正弦扫频法测量 WT2 在关键频率点处的阻抗数据, 获取在线阻抗数据集, 其数据格式与离线阻抗数据集保持一致, 即 { 输入: U_{dWT2} 、 U_{qWT2} 、 I_{dWT2} 、 I_{qWT2} 、 f_{WT2} ; 输出: Y_{WT2} }。其中, U_{dWT2} 、 U_{qWT2} 、 I_{dWT2} 、 I_{qWT2} 和 f_{WT2} 分别为 WT2 的端口 d 、 q 轴电压、电流和关键频率; Y_{WT2} 为 WT2 的端口导纳矩阵, 在正负序域下以实部虚部的形式表示, 即 $Y_{WT2} = [Y_{pRe2}, Y_{pIm2}, Y_{nRe2}, Y_{nIm2}]$ 。同样地, 采用 Z-score 归一化方法对在线阻抗数据集进行归一化处理。

(3) 参数微调。构建一个网络结构和隐藏层参数与预训练模型一致, 输出层参数随机初始化的待训练模型。设置学习率为 $1e-7$, 训练轮次为 300。基于在线阻抗数据集, 对待训练模型进行参数微调, 构建 WT2 在当前运行工况下的宽频阻抗模型。

(4) 阻抗特性快速重构。向宽频阻抗模型输入当前工况下 WT2 的端口 d 、 q 轴电压、电流和目标频段, 将离散的关键频率点阻抗拓展至目标频段 1~1 000 Hz, 实现宽频阻抗特性的快速在线测量。

以额定运行工况为例, WT2 的宽频阻抗测量结果如图 5 所示。图中, 红色实线为采用传统单正弦扫频法实测的阻抗特性曲线; 红色星号为关键频率点处的阻抗; 蓝色虚线为采用本文所提的混合测量方法重构的阻抗特性曲线; 黑色实线为重构特性与实测特性之间的误差。可见, 重构特性曲线与实测特性曲线基本重合, 误差曲线整体接近于零; R^2 平均值为 99.932 8%。

值得注意的是, 图 5 中 10~100 Hz 频段的误差与其他频段相比较为突出, 该现象源于阻抗特性的固有特征。由于该频段涵盖了工频段, 阻抗特性变化剧烈、动态特征丰富, 而所提方法需利用神经网络进行阻抗拟合, 非关键频率点的阻抗依赖于预测, 尽管在关键频率点筛选时已提高该频段的筛选密度, 但由于误差阈值的存在, 仍可能存在部分关键特征未被完全覆盖, 导致神经网络对该频段的预测结果出现相对明显的扰动。但是, 该误差是相对的, 其绝对误差量级很小, 与传统单正弦扫频法相比, 基于决定系数的整体测量精度仅下降 0.07%, 并未对宽频阻抗的测量精度产生实质性影响。相反, 本方法通过显著减少扰动注入次数, 大幅提升了测量效率, 在新能源出力快速波动场景下, 可确保阻抗获取与稳定性分析基于一致的系统工况, 从而保证分析结果的时效性与可靠性。

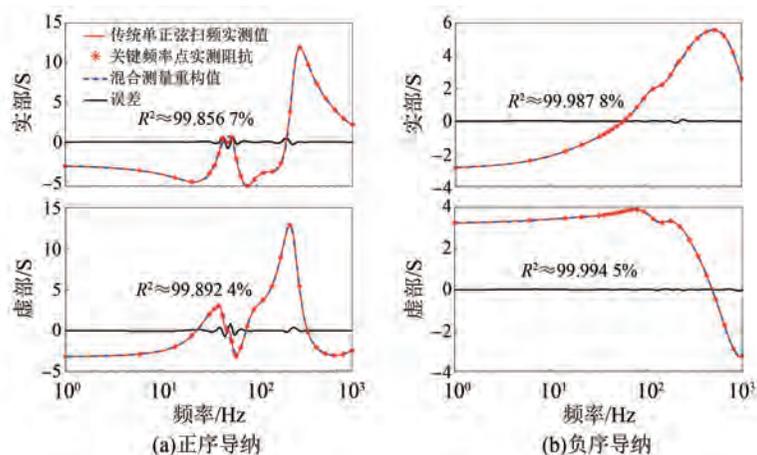


图 5 额定工况下 WT2 宽频阻抗特性测量结果

Fig. 5 Wideband impedance characteristics measurement results of WT2 at rated operating condition

在 10 dB、20 dB 和 30 dB 的高斯白噪声下, 采用所提混合测量方法测量 WT2 在额定工况下的阻抗特性, 结果如图 6 所示。可以看到, 在 10 dB、

20 dB 和 30 dB 的噪声影响下, 所提方法重构的阻抗特性曲线与实测曲线高度吻合, 误差曲线整体趋近于零。 R^2 平均值分别为 99.942 3%、

99.964 7% 和 99.938 6%,基本相等,且与图 5 所示的无噪声条件下的结果相比基本不变。可见,所

提方法保留了单正弦信号所具备的高信噪比特性和高测量精度。

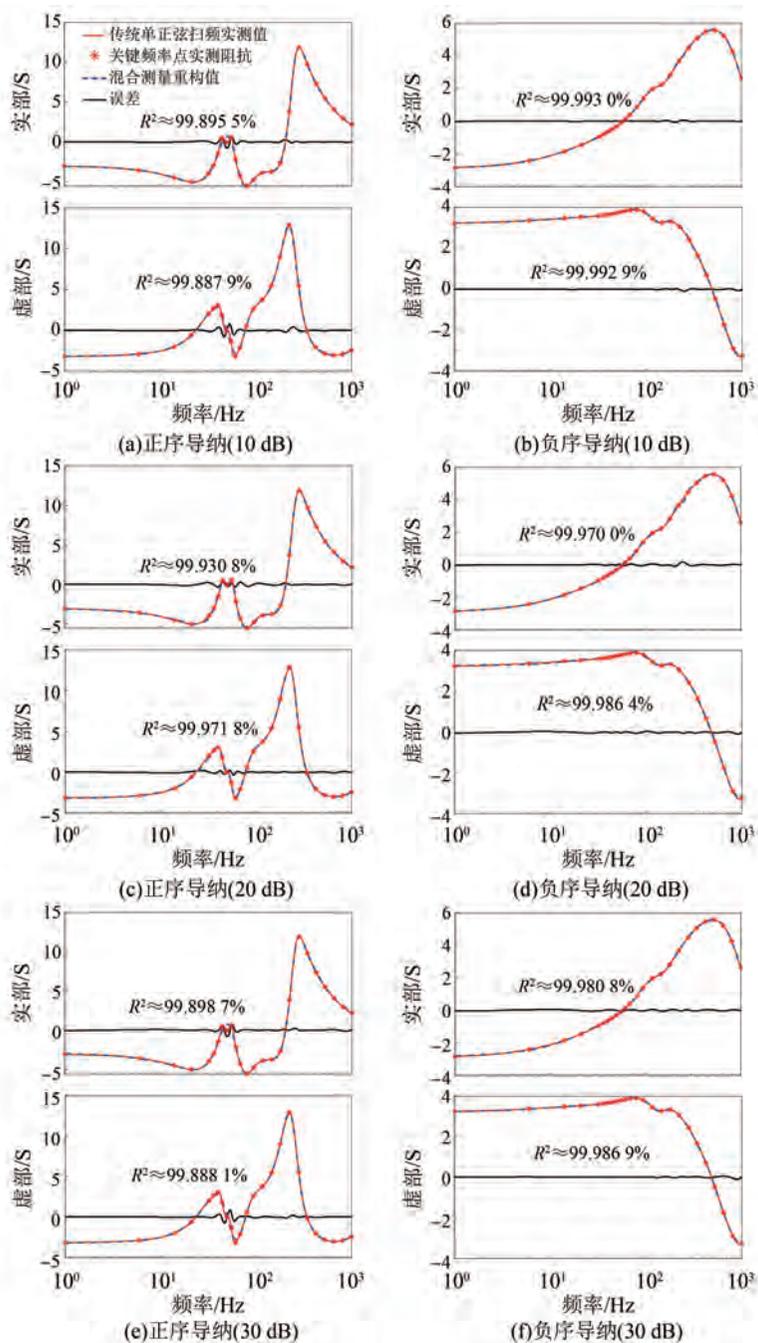


图 6 不同强度高斯白噪声影响下 WT2 宽频阻抗特性测量结果

Fig. 6 Wideband impedance characteristics measurement results of WT2 under the influence of Gaussian white noise with different intensities

2.3 硬件在环试验验证

为进一步验证所提方法在实际应用中的有效性,基于 RTLAB OP5600 实时仿真器和 RTU-BOX205 快速控制原型机搭建了如图 7 所示的控

制器硬件在环 (Controller Hardware-In-Loop, CHIL) 试验平台,其连接逻辑和工作原理如图 8 所示。风电机组的主电路部分在 OP5600 实时仿真器中模拟,而控制算法则在 RTU-BOX205 快速



图 7 CHIL 试验平台

Fig. 7 CHIL experimental platform

控制原型机(搭载 TI DSP TMS320C2834, 主频 300 MHz)中执行。两者通过模拟和数字 I/O 接口构成闭环连接, RTU-BOX205 采样 RTLAB 主电路中的电流和电压信号, 并将生成的数字控制信号传输到 RTLAB 实时仿真器中, 对主电路进行

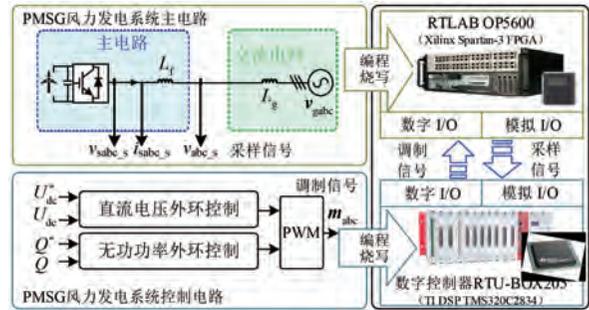


图 8 CHIL 试验平台的连接逻辑与工作原理

Fig. 8 Connection logic and working principle of CHIL experimental platform

控制。

以额定运行工况为例, WT2 的宽频阻抗测量结果如所图 9 所示。可见, 重构特性曲线与实测特性曲线基本重合, 误差曲线整体接近于零; R^2 平均值为 99.891 2%。

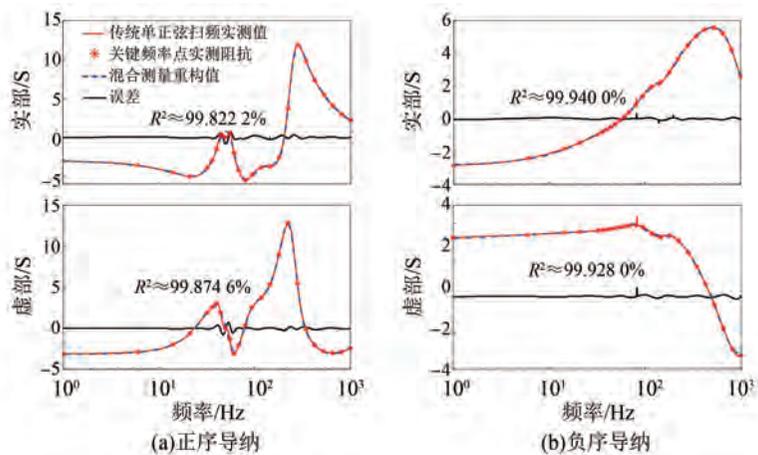


图 9 额定工况下基于 CHIL 试验平台的 WT2 宽频阻抗特性测量结果

Fig. 9 Wideband impedance characteristics measurement results of WT2 at rated operating condition based on CHIL experimental platform

根据能源行业标准《风电场阻抗特性评估技术规范》(NB/T 10651-2021), 以 CHIL 阻抗扫描结果为依据, 对风电机组数字模型阻抗特性准确性进行校核, 幅值的最大偏差为 ± 10 dB, 相位的最大偏差为 $\pm 10^\circ$ 。根据式(2)计算的幅值最大偏差为 2.648 2 dB, 相位最大偏差为 2.375 6°, 均满足技术规范要求。

2.4 与现有方法的性能对比

从扰动注入次数、1~1 000 Hz 全频段测量耗时和测量精度三个维度, 将本文所提混合测量方法与传统单正弦扫频法和 PRBS 注入法进行性能对比, 结果如表3所示。以传统单正弦扫频法为基

表 3 所提方法与传统单正弦扫频法、PRBS 注入法的测量性能对比

Tab. 3 Measurement performance comparison of the proposed method with the traditional single-sine sweep method and the PRBS injection method

性能指标	传统单正弦扫频法	本文方法	PRBS 注入法
扰动注入次数	280	25	1
阻抗测量	仿真	8 211.2	759.2
耗时/s	CHIL 试验	565	70
	R^2 /%	100	99.89
测量精度	幅值偏差/dB	0	2.65
	相位偏差/(°)	0	2.38

准,设其测量精度为 100%,不存在幅值、相位偏差。

由表 3 可知,相较于传统单正弦扫频法,所提方法在保持近乎相同的高测量精度的同时,通过大幅减少扰动注入次数,显著降低了宽频阻抗测量的耗时;相较于 PRBS 注入法,所提方法的测量耗时虽略有增加,但测量精度却得到了显著提升。

3 结语

针对风电机组宽频阻抗在线测量中精度与效率难以兼顾的瓶颈,本文提出了一种融合关键频率靶向注入与宽频阻抗迁移重构的混合测量方法,并设计了一种关键频率点筛选方法。其核心创新在于离线训练与在线测量的分阶段协同机制,该机制有效突破了传统方法在实时性与可靠性方面的局限。最后通过仿真和 CHIL 试验对所提混合测量方法进行了验证,结论如下。

(1)所提混合测量方法充分保留了单正弦信号所具备的高信噪比特性和高测量精度,即使在 30 dB 噪声影响下测量结果的决定系数仍能达到 99.94%,与传统单正弦扫频法的精度相当,较 PRBS 注入法提升了 15% 以上。

(2)相较于传统单正弦扫频法,所提混合测量方法通过减少约 90% 的扰动注入次数,将 1~1 000 Hz 频率范围的阻抗测量时间缩短 85% 以上。

下一步工作将进一步考虑电网背景谐波、电压波动等复杂干扰场景,测试并改进所提方法的鲁棒性,充分论证该方法的工程落地可行性。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

宗鑫主要负责方案实施、试验研究与论文撰写,邓晓洋、吴林林、王潇和吕敬参与了方案设计和论文修改,高磊参与了试验验证和论文校核。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

Zong Xin was mainly responsible for the scheme implementation, experimental research and manuscript writing. Deng Xiaoyang, Wu Linlin, Wang Xiao and Lyu Jing participated in the scheme design and manuscript revision. Gao Lei participated in experimental verification and manuscript review. All authors have read and approved the final version of the manuscript for submission.

参考文献

- [1] 卓振宇,张宁,谢小荣,等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(9): 171-191.
Zhuo Z Y, Zhang N, Xie X R, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191.
- [2] 刘志坚,王伟铭,骆军,等. 基于 MPC 的虚拟同步双馈风机并网系统次同步振荡抑制策略[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(11): 75-84.
Liu Z J, Wang W M, Luo J, et al. Sub-synchronous oscillation suppression strategy for virtual synchronous DFIG grid-connected systems based on MPC [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(11): 75-84.
- [3] Cheng Y Z, Fan L L, Rose J, et al. Real-world subsynchronous oscillation events in power grids with high penetrations of inverter-based resources [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(1): 316-330.
- [4] Rao Y M, Lyu J, Wang Y F, et al. Adaptive mitigation control for wideband oscillations of offshore wind farms with MMC-HVDC system [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2025, 11(1): 208-216.
- [5] 孙士奇,单俊豪,仇志华,等. 并联永磁同步风电机组小干扰稳定性分析[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(3): 38-48.
Sun S Q, Shan J H, Zhang Z H, et al. Small signal stability analysis of parallel permanent magnet synchronous wind turbine [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(3): 38-48.
- [6] 胡璟. 变压器与柴油发电机混合供电系统阻抗建模分析[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(3): 93-

- 98.
- Hu J. Impedance modeling and analysis of hybrid power supply system with transformer and diesel generator [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2022, 49(3): 93-98.
- [7] Gao L, Lyu J, Zong X, et al. Online oscillatory stability assessment of renewable energy integrated systems based on data-driven and knowledge-driven method [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2025, 40(4): 2072-2085.
- [8] Pedra J, Sainz L, Monjo L. Review and improvements to the measurements of the VSC impedance transfer matrix [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2024, 39(2): 1283-1298.
- [9] 李杨, 帅智康, 方俊彬, 等. 基于阻抗测量的多逆变器系统稳定性校验方法[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(11): 95-101.
- Li Y, Shuai Z K, Fang J B, et al. Stability check method for multi-inverter system based on impedance measurement [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(11): 95-101.
- [10] Pan H Y, Yang M, Xie C, et al. A self-perturbation impedance measurement method for grid-connected inverters [C]//2023 IEEE 2nd International Power Electronics and Application Symposium, Guangzhou, China, 2023: 486-490.
- [11] 赵本强, 曾江, 谢宝平, 等. 基于光伏逆变器的电网谐波阻抗测量新技术[J]. *电机与控制应用*, 2024, 51(3): 1-9.
- Zhao B Q, Zeng J, Xie B P, et al. New technology of grid harmonic impedance measurement based on photovoltaic inverter [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2024, 51(3): 1-9.
- [12] 王伟胜, 李光辉, 陈燕东, 等. 新能源发电宽频阻抗测量技术与装备综述[J]. *中国电机工程学报*, 2025, 45(18): 7149-7167.
- Wang W S, Li G H, Chen Y D, et al. Review of broadband impedance measurement techniques and equipment for renewable energy generation [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2025, 45(18): 7149-7167.
- [13] 李萌, 年珩, 胡彬, 等. 应用于新能源发电设备阻抗测量的扰动信号类型综述[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(17): 6296-6316.
- Li M, Nian H, Hu B, et al. Review of perturbation signals applied to impedance measurement of renewable generator [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(17): 6296-6316.
- [14] 万炜, 袁辉, 王冠中, 等. 二次侧注入扰动的变流器次超同步频段广义阻抗测量方法[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(14): 19-25.
- Wan W, Yuan H, Wang G Z, et al. Measurement method for converter generalized impedance in sub- and super-synchronous band based on perturbation on secondary side [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(14): 19-25.
- [15] 谢志为, 陈燕东, 伍文华, 等. 双模式扰动下新能源发电装备的宽频带序阻抗在线精确测量方法[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(9): 2903-2914.
- Xie Z W, Chen Y D, Wu W H, et al. A wide-bandwidth sequence-impedance online precise measurement method for renewable energy generation equipment with dual-mode disturbance [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(9): 2903-2914.
- [16] 蒙志全, 辛焕海, 董炜, 等. 控制系统扰动下并网变流器广义阻抗测量方法[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(18): 5381-5391.
- Meng Z Q, Xin H H, Dong W, et al. Generalized-impedance measurement for grid-connected converters based on perturbation in control system [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(18): 5381-5391.
- [17] Jordan M, Langkowski H, Thanh T D, et al. Frequency dependent grid-impedance determination with pulse-width-modulation-signals [C]//2011 7th International Conference-Workshop Compatibility and Power Electronics, Tallinn, Estonia, 2021: 131-136.
- [18] 杜燕, 吴厚博, 杨向真, 等. 基于 Sobol 拟随机脉宽调制的电网阻抗测量方法[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(2): 148-156.
- Du Y, Wu H B, Yang X Z, et al. Power grid impedance measurement method based on Sobol quasi-random pulse width modulation [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(2): 148-156.
- [19] Pan P Y, Hu H T, Yang X W, et al. Impedance measurement of traction network and electric train for stability analysis in high-speed railways [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33(12):

- 10086-10100.
- [20] Gong H, Wang X F, Yang D S. DQ-frame impedance measurement of three-phase converters using time-domain MIMO parametric identification [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, 36(2): 2131-2142.
- [21] 季振东, 朱述超, 许光强, 等. 基于 PRBS 的中压直流系统宽频阻抗测量装置及其控制[J]. *电力系统自动化*, 2025, 49(9): 199-207.
- Ji Z D, Zhu S C, Xu G Q, et al. Wide-band impedance measurement device for medium voltage DC systems and its control based on pseudo random binary sequence [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2025, 49(9): 199-207.
- [22] Roinila T, Abdollahi H, Sallinen R, et al. Simultaneous measurement of bus impedance and control loop gains in multi-converter systems [C]// 2022 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Detroit, USA, 2022: 1-6.
- [23] Wu J R, Liu Z P, Liu J J. A generalized anti-aliasing algorithm for multi-frequency signals used for impedance measurement of nonlinear systems [C]// 2024 CPSS & IEEE International Symposium on Energy Storage and Conversion, Xi'an, China, 2024: 691-696.
- [24] Weng X, Zhao Z M, Chen K N, et al. Chirp signal injection method and real-time impedance characteristic measurement of electric energy router [J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2022, 10(5): 5564-5577.
- [25] 年珩, 李萌, 陈亮, 等. 采用多正弦信号注入的宽频带并网逆变器频率耦合特性测量方法[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(22): 7408-7420.
- Nian H, Li M, Chen L, et al. Measurement method for broadband frequency coupling characteristics of grid-connected inverter using multi-sine signal injection [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(22): 7408-7420.
- [26] Zhang M F, Wang X F, Yang D S, et al. Artificial neural network based identification of multi-operating-point impedance model [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, 36(2): 1231-1235.
- [27] 王众, 吕敬, 蔡旭. 基于数据驱动的双馈风电机组阻抗辨识及稳定性分析[J]. *电力建设*, 2023, 44(8): 31-40.
- Wang Z, Lyu J, Cai X. Data-driven impedance identification and stability analysis of doubly-fed induction generator based wind turbine [J]. *Electric Power Construction*, 2023, 44(8): 31-40.
- [28] Lyu J, Rao Y M, Wang Z, et al. Data-driven impedance identification and stability online assessment of wind farm connected with MMC-HVDC [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2024, 60(2): 2567-2576.
- [29] 吴滨源, 李建文, 李永刚, 等. 基于知识和数据联合驱动的并网逆变器多工况阻抗获取方法[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(6): 83-91.
- Wu B Y, Li J W, Li Y G, et al. Combined data-knowledge-driven impedance acquisition method for grid-connected inverter under multiple operation conditions [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(6): 83-91.
- [30] 饶仪明, 吕敬, 王众, 等. 基于数据-模型融合驱动的新能源场站宽频阻抗在线辨识及稳定性评估[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(7): 2670-2685.
- Rao Y M, Lyu J, Wang Z, et al. Wideband impedance online identification and stability assessment of renewable power plants based on physics-informed data-driven method [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(7): 2670-2685.
- [31] 高磊, 吕敬, 蔡旭. 小样本数据-知识融合驱动的风电机组有限工况至全工况宽频阻抗在线辨识方法[J/OL]. *中国电机工程学报*, 2025-12-11. <https://link.cnki.net/urlid/11.2107.TM.20250822.0855.004>.
- Gao L, Lyu J, Cai X. Online wideband impedance identification method for wind power system from limited-to-full operating conditions based on few-shot data and knowledge-driven approach [J/OL]. *Proceedings of the CSEE*, 2025-12-11. <https://link.cnki.net/urlid/11.2107.TM.20250822.0855.004>.
- [32] Zhang M F, Xu Q W, Wang X F. Physics-informed neural network based online impedance identification of voltage source converters [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2023, 70(4): 3717-3728.
- [33] Zhang M F, Zhang Y, Xu Q W. Transfer learning based online impedance identification for modular multilevel converters [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2023, 38(10): 12207-12218.
- [34] Rane R, Kermansaravi A, Vergara P P, et al.

- Transfer learning framework for impedance characterization of modular multilevel converters [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2025, 61(2): 2421-2433.
- [35] Li H, Nian H, Zhan L, et al. Few-shot data-driven modeling of unified grid tied VSCs for multioperation impedance identification based on PINN [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2025, 72(7): 6957-6968.
- [36] 刘志坚, 黄建, 骆军. 基于 STFT 图像和迁移学习的次同步振荡源定位方法[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(7): 119-131.
- Liu Z J, Huang J, Luo J. Localization method for sub-synchronous oscillation sources based on STFT images and transfer learning [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(7): 119-131.
- [37] Kunjumammed L P, Pal B C, Gupta R, et al. Stability analysis of a PMSG-based large offshore wind farm connected to a VSC-HVDC [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(3): 1166-1176.
- [38] Yotov K, Hadzhikolev E, Hadzhikoleva S. Determining the number of neurons in artificial neural networks for approximation, trained with algorithms using the Jacobi matrix [J]. TEM Journal, 2020, 9(4): 1320-1329.
- [39] Rom A R M, Ibrahim S, Fadzil A F A, et al. A review of hyperparameter tuning methods in machine learning [C]//2025 6th International Conference on Artificial Intelligence and Data Sciences, West Java, Indonesia, 2025: 1-6.
- [40] Li M, Nian H, Hu B, et al. Adaptive frequency adjustment method for impedance measurement [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(1): 518-531.

收稿日期:2025-12-12

收到修改稿日期:2025-12-26

作者简介:

宗 鑫(2002—),男,硕士研究生,研究方向为新能源并网稳定性分析与控制,hnhr-zongxin@sjtu.edu.cn;

* 通信作者:吕 敬(1985—),男,博士,副教授,研究方向为新能源并网稳定性分析与控制,lvjing@sjtu.edu.cn。