# 改进的新能源发电设备阻抗特性测量方法

赵建勇',李晗',吴敏',马润生²,赵文强²,余紫薇'

(1.浙江大学 电气工程学院,浙江 杭州 310027;2.国网青海省电力公司电力科学研究院,青海 西宁 810003)

摘要:首先,分析了新能源发电设备进行阻抗建模的重要意义,说明了现有的阻抗模型建立方法。针对商 用阻抗测量装置存在的灵活匹配度低、扰动信号单一、扰动频率固定以及测量结果无法在PC界面实时显示等 问题,讨论了适用于新能源发电设备阻抗测量的实验系统设计方法。从设计内容、设计依据、分析难点以及解 决方法等方面阐述了新型阻抗测量系统的实现方案。随后,结合讨论的设计方法,以Venable阻抗测量装置为 基础平台,设计了基于扰动谐波注入法的新能源发电设备阻抗测量系统,该实验系统能够发生三路可灵活调 节频率、幅值和相位的独立正弦波,并能够对测量结果进行实时传输计算和图像化展示。最后,通过实验证明 了所提方法的有效性。改进的新能源发电设备阻抗特性测量方法将改善现有阻抗测量装置存在的缺陷,为新 能源发电系统及电网系统稳定性控制等研究应用提供平台基础,在特性各异的新能源发电设备的阻抗测量领 域具有良好的适用性。

关键词:新能源发电;阻抗建模;阻抗测量;实验系统 中图分类号:TM930 文献标识码:A DOI:10.19457/j.1001-2095.dqcd23945

Improved Impedance Measurement Method of New Energy Power Generation Equipment

ZHAO Jianyong<sup>1</sup>, LI Han<sup>1</sup>, WU Min<sup>1</sup>, MA Runsheng<sup>2</sup>, ZHAO Wenqiang<sup>2</sup>, YU Ziwei<sup>1</sup>
(1. School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China;
2. State Grid Qinghai Electric Power Company Electric Power Research Institute, Xining 810003, Qinghai, China)

Abstract: Firstly, the significance of impedance modeling for new energy power generation equipment was analyzed, and the existing impedance modeling methods were explained. Aiming at the problems of low flexible matching degree, single disturbance signal, fixed disturbance frequency and the inability of real-time measurement results on the PC interface of commercial impedance measurement devices, the experimental system design method suitable for impedance measurement of new energy power generation equipment was discussed. The realization scheme of the new impedance measurement system was described from the aspects of design content, design basis, analysis difficulties and solution. Then, taking the Venable impedance measurement device as the basic platform, a new impedance measurement system based on the disturbance harmonic injection method was designed. The experimental system can generate three independent sine waves that can be flexibly adjusted in frequency, amplitude and phase, and can perform real-time transmission calculation and graphical display of the measurement results. Finally, the effectiveness of the new equipment was proved by experiments. The new impedance measurement system can improve the defects of existing impedance measurement devices and provide a platform for research applications such as new energy power generation systems and grid system stability control. It has good applicability in the field of impedance measurement of new energy power generation equipment with different characteristics.

Key words: new energy power generation; impedance modeling; impedance measurement; experimental system

随着双碳时代的到来,各行各业都在谋求和 加速绿色低碳转型。在能源发展的新形势下,绿

基金项目:浙江省教育厅科研项目资助(Y202045591);浙江大学实验技术研究项目(SJS202006);

国网青海省电力公司科技项目(10600003069)

作者简介:赵建勇(1987—),男,博士研究生,讲师,Email:jyzhao@zju.edu.cn

通讯作者:李晗(1999—),男,博士研究生,Email:156314221@qq.com

色、高效、稳定、安全的电力需求促进了风、光等 清洁新能源的开发利用。然而,各类新能源发电 设备接入电网后,将与电网、其它新能源发电设 备相互作用,并可能导致电网出现宽频带范围内 的复杂振荡现象<sup>[1-2]</sup>。新能源发电设备-电网互联 系统可通过阻抗模型进行电路等效。因此,为了 保障电网的安全稳定运行,促进新能源消纳,研 究分析新能源发电设备的阻抗特性、基于阻抗特 性研究新能源接入电网的系统稳定性与控制技 术十分关键<sup>[3-5]</sup>。

新能源发电设备-电网互联系统的稳定性取 决于两者阻抗关系,因此,新能源发电设备的阻 抗模型是进行稳定性研究的基础。现阶段,阻抗 模型可以通过理论建模和实验测量两种途径获 得<sup>[6-7]</sup>。考虑到新能源发电设备种类繁多、控制各 异、结构复杂、参数灰/黑箱化等特征,推导并建立 各类新能源发电设备的解析阻抗模型耗时并容 易出现错误,且系统内部参数多不可知。因此, 如何通过外部测量设备得到测试对象较为精确 的实测阻抗特性成为近几年的研究热点<sup>[8-9]</sup>。

## 1 阻抗测量装置使用现状分析

根据对国内外新能源发电装置阻抗测量技术相关的市场调研和文献查阅分析,在阻抗测量方面,国内外目前有Venable,Omicron LAB,Keysight Technologies等厂家生产和配套相应的频率响应分析仪/阻抗分析仪系统。浙江大学电气工程学院为促进学科发展,保持浙江大学在新能源发电设备阻抗建模研究及电网稳定性分析领域的领先步伐,于2018年购置了"Venable 频率响应分析仪",如图1所示。



图1 Venable四通道频率响应分析仪 Fig.1 Venable four-channel frequency response analyzer 系统主要包括频率信号扰动发生装置、隔离 放大器、隔离变压器等部分。阻抗测量是由测量 仪器产生频率扰动信号,经过功率放大器、隔离 变压器等环节加入被测对象所在的强电回路,再 由频率响应/阻抗分析仪的测量通道测量被测对 象的相关信号,并进行频率响应分析,通过逐频 电气传动 2022年 第52卷 第8期

率点扫描获得一定频率范围内的被测对象的频 率/阻抗特性。其原理如图2所示。





Fig.2 Principle of impedance measurement based on frequency response analyzer

该设备有效促进了阻抗建模领域的科研发展,产生了多项科研成果。但是,在深度使用该 仪器的过程中,也发现了多项问题。典型问题 如:系统造价高、功能集成度高、开放性低、不利 于针对特性各异的各类新能源发电设备开展精 确的阻抗测量的试验等。同时,在调研和对比其 他同类产品后发现,目前的新能源发电装置阻抗 测量装备等还存在以下技术问题:

1)目前企业生成的装置无法灵活配置、匹配 被测对象特征的频率扰动信号,对于新能源发电 设备阻抗的准确测量影响较大;

2)现有的频率响应/阻抗分析仪的频率扰动 信号均为单一扰动信号,在应用于三相交流系统 测量时具有一定的局限性;

3)现有的频率响应/阻抗分析仪在进行逐频 率点扫描时,频率扰动信号的频率点来源于固定 设置,因此面临着关注频段频率测量间隔不足、 非关注频段测量点过多测试导致速度缓慢的问 题,且扰动信号幅值相位在逐频率点扫描时固定 不变,存在某些频段信噪比较低,而薄弱频段可 能激发系统振荡的问题;

4)现有的频率响应/阻抗分析仪通常只能通 过固定计算方式得到单输入单输出的频率响应/ 阻抗波特图,而新能源发电设备特征各异,统一 的且不可灵活配置的数据处理、信息提取方式存 在着适用性受限的问题。

# 2 阻抗测量系统改进目标

#### 2.1 阻抗测量系统改进目标选取依据

针对上节分析的问题,需要通过调研常用的 各类新能源发电设备频率响应/阻抗测量的实际 需求,总结和改进目前频率响应/阻抗分析仪的新 方面进行改进。

能源发电设备阻抗测量技术,探索设计以安全可 靠为原则,以精确性、快速性、灵活性和开放性为 特点的频率扰动信号,并安全稳定地驱动功率放 大器,实现新能源发电设备阻抗的准确测量与分 析,建立基于频率响应/阻抗分析仪的新能源发电 设备阻抗测量系统,可满足实验实践与工程应用 的实际需求,并最大化保证设备的使用寿命和系 统在实际运行中的经济效益。具体可以从测量 系统的扰动信号、测量精度以及数据处理等几个

现有 Venable 阻抗测量装置为厂商最新产品 之一,同上一代产品相比,实现了三相电路阻抗 测量的功能。但是,该仪器同样存在扰动信号输 出单一、扰动信号频点固定等问题。例如:只有 单一扰动信号施加通道,要求电源或电网三相电 路完全对称,不具备各类复杂环境下阻抗数据测 量功能。因此,应在原实验平台基础上设计新的 扰动施加电路,满足三相不对称等各类情况下的 阻抗测量需求及上位机数据处理功能,同时,为 应对各类复杂环境可能给装置造成的故障影响, 需增加必需的反馈保护装置,保证实验平台的安 全性和可靠性。

#### 2.2 阻抗测量系统改进目标设定

新能源发电设备阻抗测量系统立足于新能 源发电工程领域的技术需求和规范,以现有电力 系统阻抗测量仪器为载体,以实现各类电力装置 阻抗建模的特殊数据测量需求为目标,使原有仪 器增加相应的测量功能,适应于新能源发电设备 阻抗建模的特殊科研需求。因此,系统在改进设 计时可以参考如图3所示的思路。





Fig.3 The improvement design of the measurement system 本系统的构建以原实验平台为载体,基于频 率响应测量与分析技术,总体结构包括上层数据 监控系统、中间层软件控制系统和底层阻抗测量 硬件装置系统3个部分。其中,底层阻抗测量硬 件装置系统包括数据采集单元、频率扰动信号发 生单元、功率放大器单元、隔离变压器单元。中 间层软件控制系统包括数据传输与处理模块、三 路可编程频率扰动信号控制模块、反馈控制模块 等。为了提升灵活性和开放性,打造良好的用户 友好体验,还配置了上层数据监控系统,具体由 系统监控单元和人机交互控制系统组成,实现测 量指令由用户灵活配置、测量结果多类型展示。

### 3 阻抗测量系统设计内容及设计方案

#### 3.1 阻抗测量系统设计内容

阻抗测量系统设计时要依托于现有频率响 应分析仪、功率放大器与隔离变压器装置系统, 以新能源发电设备为研究对象,基于频率响应测 量与分析技术,设计并实施新能源发电设备阻抗 测量系统。实验平台的主要设计内容包括软件、 硬件、数据监控以及阻抗测量计算几部分。

#### 3.1.1 设计功能模块

从精确性、快速性、灵活性和开放性的要求 出发,设计软件控制系统的功能模块。功能模块 主要包括对现有频率响应分析仪改进后的数据处 理模块、频率扰动信号控制模块与反馈控制模块。 具体的,通过改进三路可编程信号的控制策略,实 现用户个性化的频率扰动信号的灵活配置,满足 各类特征各异的三相新能源发电系统频率响应特 性/阻抗特性的准确测量需求;充分利用和发挥现 有的硬件采样资源的作用,进行扰动电压的反馈 控制系统设计,从而避免因频率扰动激发被测系 统振荡而造成的设备损坏等安全稳定问题。

3.1.2 实现硬件系统单元模块

从系统的安全可靠运行原则出发,实现硬件 系统各单元模块。在硬件模块中,数据采集单元 实现对被测对象电压电流信息采集;频率扰动信 号发生单元产生所设定的频率扰动控制信号输 出,并驱动功率放大器;功率放大器与隔离变压 器串接,则经过功率放大器放大的频率扰动信号 可通过隔离变压器加入被测对象所在的强电回 路。由此可见,硬件系统主要实现测量系统的数 据采集、硬件驱动、信号放大与扰动注入等功能。 3.1.3 设计数据通信与数据监控系统

为了实现系统中各个单元之间的信息实时 采集和控制信号传递,采用分层式结构设计数据 通信与数据监控系统,实现系统软硬件系统的数 据交换以及人机交互控制。为了保证控制信号 与强电回路的隔离,频率扰动信号控制系统与扰 动信号发生单元采用串行外围设备接口(serial peripheral interface, SPI)通信,并通过四通道驱动 12位数字模拟转换器(digital to analog converter, DAC)用于产生可编程的三路可编程的双极性扰 动信号。系统监控单元主机与频率扰动控制系 统通过相关通讯协议实现内部通信网络的通信 传递,电压电流测量信号传输至监控单元主机进 行数据监控分析。通过在监控单元主机开发上 位机配套程序,实现上述监控单元与软件控制系 统的数据交互。

3.1.4 提出改进的新能源发电设备阻抗特性测 量策略

目前,基于扰动注入的新能源发电设备阻抗 测量的基本思路是:当新能源发电设备运行至稳 态工况时,在新能源设备的稳态正弦工作轨迹上 叠加一个扰动频率下的小信号扰动电压,通过扰 动注入硬件装置注入待测设备,小扰动电压会在 待测新能源设备系统端口激发出电流响应,对待 测设备的端口电压电流进行数据采样,在对采样 得到数据进行傅里叶分析和对称分量处理,所得 到的该扰动频率下的电压扰动与电流响应之间 的比值定义为系统在该频率处的阻抗。通过改 变扰动频率,重复以上步骤进行扫频测量,即可得 到一定范围内的新能源发电设备的阻抗特性。新 能源发电设备阻抗测量的基本原理如图4所示。



- 图4 扰动注入的新能源发电设备阻抗测量的基本原理
- Fig.4 The basic principle of disturbance injection impedance measurement of new energy power generation equipment

然而,在新能源发电设备阻抗研究分析中, 发现新能源发电设备的阻抗具有耦合关系,使得 传统的单相序单频率点的阻抗测量结果不再适 用。具体的,新能源发电设备的非线性控制结构 使其具有频率耦合的特征,体现为两个频率的阻 抗相互耦合<sup>[10]</sup>。设电网基频为*f*<sub>1</sub>,频率耦合特征 表现为当在并网点施加频率为*f*<sub>p</sub>的正序电压扰 动,除了产生同频率的正序电流响应分量之外, 还会产生(f<sub>p</sub>-2f<sub>1</sub>)的负序电流响应分量。频率耦 合特性一般由导纳矩阵的形式来表示:

$$\boldsymbol{Y} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{Y}_{11} & \boldsymbol{Y}_{12} \\ \boldsymbol{Y}_{21} & \boldsymbol{Y}_{22} \end{bmatrix}$$
(1)

其中,Y<sub>11</sub>与Y<sub>22</sub>为序导纳,Y<sub>21</sub>与Y<sub>12</sub>可以表征频率耦 合程度的强弱,其幅值越大,则表示频率耦合程 度越强。

另外,当新能源发电设备运行于不平衡工况时,新能源发电设备的正、负序同频率的阻抗也存在相互耦合的关系<sup>[11]</sup>。此外,一些复杂的新能源发电设备由于其内部的复杂谐波特性,在阻抗测量时也会存在多频率点相互耦合的情况<sup>[12]</sup>。

因此,为了适应新能源发电设备阻抗存在的 相序耦合、频率耦合特征,在进行新能源设备阻 抗特性计算时,需要设计适用于测量系统的新型 计算方法:

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{p} & I_{n} \\ I_{p2} & I_{n2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{p} & V_{n} \\ V_{p2} & V_{n2} \end{bmatrix}^{-1}$$
(2)

由式(2)可知,测量频率耦合导纳矩阵需要 注入两组线性无关的扰动信号。一般的做法是, 第1次注入频率为 $f_p$ 的正序扰动,相应地提取被 测设备端口相同频率的电压与电流分量,定义为  $V_p, I_p$ 。此外还要提取频率为( $f_p-2f_1$ )的负序电 压、电流分量,定义为 $V_{p2}, I_{p2}$ 。第2次注入频率为 ( $f_p-2f_1$ )的负序扰动,提取被测设备端口电压与电 流信号中频率为( $f_p-2f_1$ )的负序分量,定义为 $V_{n2}$ ,  $I_{n2}$ ;以及频率为 $f_p$ 的正序分量 $V_n, I_n$ 。在获得上述 测量信号后,通过式(2)可测得频率耦合导纳矩 阵的4个元素<sup>[13]</sup>。

新的计算方法不仅需要考虑处理当前扰动 频率下的数据信息,还需要具备阻抗模型维度、 耦合关系自定义的功能,根据用户需求灵活设置 处理和存储的频率序列。因此,需要新的阻抗测 量系统不仅能够灵活匹配频率信息,还需要对测 量数据进行实时运算,实现对阻抗的准确测量。 同时,为了避免测量未知特征的设备阻抗时遗漏 关键的耦合信息,需要具备频谱分析显示的功 能,通过图形化界面化的方式显示被测设备的频 率响应特性。

#### 3.2 阻抗测量系统实现方案

阻抗测量系统设计时需要综合利用信号分 析与处理、控制理论和新能源发电系统等相关的 知识和工具,针对现有新能源发电设备阻抗测量 平台设计上的不足,基于频率响应/阻抗分析仪研制一种新型的以安全可靠为原则,以精确性、快速性、灵活性和开放性为特点的新能源发电设备 阻抗测量系统实验平台,实现对各类新能源发电 设备频率响应/阻抗特性的准确测量和分析。在 构建新能源发电设备阻抗测量实验系统时,主要 体现科研应用与工程实践相结合的特点,实验系 统设计的技术路线如图5所示。





具体的设计技术路线如下:

1)在前期的系统总体结构与方案设计阶段, 综合考虑新能源发电设备的阻抗测量技术要求。 首先通过广泛调研以及查阅资料,掌握国内外频 率响应分析/阻抗测量技术相关工程应用系统的 研究现状,通过横向对比分析各种装置和技术的 优缺点,吸取各种装置和控制策略的优良性能。 同时针对各类新能源发电设备的频率响应/阻抗 特征进行需求分析,以此为标准制定系统的研发 目标。基于前期调研结果进行研究内容和实施 形式的深入探讨,并根据研发目标,统筹制定实 验应用系统的总体设计框架。

2)在中期的功能模块设计与实现阶段,需要 充分研究现有频率响应/阻抗分析系统的设计原 理及技术指标,结合各类新能源发电设备阻抗测 量的具体需求,设计和实现系统的硬件部分、软 件部分和数据监控部分。

系统硬件部分是实验应用的基础,需要从系 统的安全可靠的运行原则出发,采用模块化设计 思路实现测量系统的数据采集、硬件驱动、信号 放大与扰动注入等功能。具体的,硬件系统中的 数据采集单元实现对被测对象电压电流信息采 集;频率扰动信号发生单元产生所设定的频率扰 动控制信号输出,并驱动功率放大器;功率放大 器与隔离变压器串接,则经过功率放大器放大的 频率扰动信号可通过隔离变压器加入被测对象 所在的强电回路。

系统软件部分从精确性、快速性、灵活性和 开放性的要求出发,采用模块化设计思路实现系 统的数据传输与数据处理、频率扰动信号控制与 反馈控制。具体的,通过改进三路可编程信号的 控制策略,实现用户个性化的频率扰动信号的灵 活配置,满足各类特征各异的三相新能源发电系 统频率响应特性/阻抗特性的准确测量需求;充分 利用和发挥现有的硬件采样资源的作用,进行扰 动电压的反馈控制系统设计,从而避免因频率扰 动激发被测系统振荡而造成的设备损坏等安全 稳定问题。

系统数据监控部分采用分层式结构进行设 计,实现系统软硬件系统的数据交换以及人机交 互控制。为了保证控制信号与强电回路的隔离, 频率扰动信号控制系统与扰动信号发生单元采 用SPI通信,并通过四通道驱动12位DAC用于产 生可编程的三路可编程的双极性扰动信号。系 统监控单元主机与频率扰动控制系统通过相关 通信协议实现内部通信网络的通信传递,电压电 流测量信号传输至监控单元主机进行数据监控 分析。通过在监控单元主机开发上位机配套程 序,实现监控单元与软件控制系统的数据交互。

3)在后期的系统联调和测试优化阶段,主要 是基于系统硬件、软件、数据监控的模块化设计 与调试结果,进行系统级模块联调测试,以典型 的多类型新能源发电设备为测试对象,对测量系 统实验平台进行试验调试,并结合实验案例的测 试结果进行理论分析,不断反馈优化系统设计和 模块实现,提升系统阻抗测量的精确性、快速性、 灵活性和开放性。同时,针对系统试验测试中出 现的异常故障,进一步完善系统的故障保护控制 系统设计,保障系统能够安全可靠运行。

#### 4 实验结果

为了验证文中所提方法的有效性,借助实验 室现有 Venable-7001,搭建了基于扰动谐波注入 法的新能源发电装置阻抗测量实验平台。设计 基于 STM32 和 AD9959 芯片的扰动信号发生电 路<sup>141</sup>,可以生成三路幅值、频率和相位可调的独立 正弦波;设计基于USB的信号采集电路,可将采 集数据发送至上位机PC存储于Excel表格,后续 可以在Matlab中对采集数据进行信号波形还原 和快速傅里叶变换(fast fourier transform,FFT), 提取待求频率下的电压电流数据得到测量系统 阻抗。同时,通过LabVIEW设计了与系统硬件平 台对应的图形化界面,实现上位机与控制器以及 采集电路的通信,方便用户下达操作指令和监控 数据,操作界面简洁,人机交互友好。

采用实验室无源三相RL电路作为阻抗测量 对象进行实验,被测对象中,电阻阻值为9.8  $\Omega$ , 电感标称值为26.7 mH。原阻抗测量实验平台由 于存在信号发生频率固定不可灵活配置的问题, 难以对实验对象进行多频率逐点测量。同时其 无法将测量数据实时传输到PC端进行监控和计 算。而通过在改进的实验平台用户界面写入命 令,即可灵活控制扰动电路输出三路频率、幅值、 相位可调节正弦信号并通过功率放大器和隔离 变压器注入待测对象,并将实测数据通过USB传 输至PC端进行图像化展示和计算。其中,三路 正弦信号经放大后幅值为10V,相位互差120°, 在1~1000 Hz频率范围进行34组实验。通过示 波器对施加的放大信号进行观测,图6为采样得 到在 LabVIEW 中的 A 相电感电压和电阻电压波 形。实验采集测量得到的数据表格如表1所示。



图 6 上位机界面测量A 相波形 Fig.6 The A-phase waveforms measured by the upper computer interface

计算得到电感平均值为 24.8 mH, 计算误差 为 7.12%。绘制电感阻抗波特图如图 7 中数据点 所示。测量得到的幅频特性基本为一条直线, 相 频特性曲线在高频段基本为水平直线, 而在低频 段有明显下垂, 这是由于电感本身带有 0.55 Ω 左 右的电阻, 而在低频段电感阻值很低, 导致整体 呈现阻性, 随着频率升高, 电感阻抗增大, 整体呈 现感性。为了更好地反映实验结果, 通过 Matlab

电气传动 2022年 第52卷 第8期

	表1	实验采集数据	
	Tab.1	Experimental datas	
组次	频率/Hz	电感阻抗/Ω	电感值/mH
1	2	0.52∠34.12°	43.2
2	4	0.74∠54.21°	31.7
3	5	0.95∠63.54°	27.1
4	10	1.95∠73.80°	30.2
5	15	2.20∠77.91°	23.3
6	20	2.96∠80.32°	23.0
7	25	3.79∠81.57°	23.8
8	30	4.43∠82.44°	23.6
9	35	5.26∠83.08°	23.5
10	40	5.96∠83.43°	23.5
11	45	6.66∠83.73°	23.6
12	50	7.62∠83.93°	23.7
13	55	9.94∠84.20°	28.5
14	100	15.83∠83.03°	25.3
15	145	23.33∠81.73°	25.4
16	190	29.74∠81.50°	24.9
17	235	35.90∠81.73°	24.3
18	280	51.50∠82.12°	29.2
19	325	58.61∠82.33°	28.7
20	370	66.03∠82.51°	28.3
21	415	72.79∠82.72°	27.9
22	460	79.84∠82.83°	27.6
23	505	70.72∠83.04°	22.2
24	550	76.39∠83.10°	22.0
25	595	81.84∠83.16°	21.9
26	640	87.35∠83.16°	21.7
27	685	92.93∠83.19°	21.6
28	730	98.13∠83.2°	21.4
29	775	104.11∠83.19°	21.3
30	820	109.08∠83.18°	21.2
31	865	115.14∠83.14°	21.1
32	910	120.04∠83.14°	20.9
33	955	125.21∠83.13°	20.9
34	1 000	131.27∠83.06°	20.8



对实验电路进行仿真,电感由 26.7 mH 的电感和 0.55 Ω 电阻代替,得到频率响应为图 7 中曲线。

可以看到实验测量结果与仿真结果基本吻合。 通过测量三相RL实验证明了本套测量系统确实 具备产生三相独立可灵活配置正弦波以及能够 对电压电流数据实时采集并运算得到阻抗响应 的功能。

### 5 结论

本文分析了新能源发电装置进行阻抗建模 的重要意义,说明了现有的阻抗模型建立方法及 优缺点,并针对现阶段广泛使用实验测量建立阻 抗模型方法进行了详细分析,讨论了改进的新能 源发电设备阻抗特性测量方法以及适用于新能 源发电设备阻抗测量的实验系统改进设计方法, 阐述了实验系统的目标设定依据、设计内容以及 实现方案。最后结合文中讨论的设计方法,依托 于现有阻抗测量设备 Venable-7001,搭建了基于 扰动谐波注入法的新能源发电装置阻抗测量实 验平台。该实验平台具备以安全可靠为原则,以 精确性、灵活性和开放性为特点的频率扰动信 号,能够实现三路可灵活调节频率、幅值和相位 的独立正弦波信号发射并配备安全稳定的功率 放大器和隔离变压器以接入电网,采用数据采集 卡可提供最多达8路差分输入采样,采样精度高, 实现新能源发电设备阻抗的准确测量与分析。 同时,实验系统设计了基于LabVIEW的图形化界 面,方便用户灵活配置扰动信号,监测波形数据。

通过在实验平台展开对无源三相RL电路的 实验,测取到了电感阻抗波特图,实验结果证明 了实验系统测量的准确性和有效性。新型阻抗 测量系统的设计以及新能源发电设备阻抗测量 方法的改进,将改善现有阻抗测量装置及测量方 法存在的缺陷,为高校科研人员在新能源发电系 统及电网系统稳定性控制等研究应用提供平台 基础,有利于开展新能源发电设备在各种场景下 的阻抗建模及稳定性控制实验。

#### 参考文献

- 李明节,于钊,许涛,等.新能源并网系统引发的复杂振荡问题及其对策研究[J]. 电网技术,2017,41(4):1035-1042.
   Li Mingjie, Yu Zhao, Xu Tao, *et al.* Study of complex oscillation caused by renewable energy integration and its solution[J]. Power System Technology,2017,41(4):1035-1042.
- [2] 马宁宁,谢小荣,贺静波,等.高比例新能源和电力电子设备 电力系统的宽频振荡研究综述[J].中国电机工程学报, 2020,40(15):4720-4732.

Ma Ningning, Xie Xiaorong, He Jingbo, *et al.* Review of wideband oscillation in renewable and power electronics highly integrated power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40 (15):4720–4732.

[3] 陈新,王赟程,龚春英,等.采用阻抗分析方法的并网逆变器
 稳定性研究综述[J].中国电机工程学报,2018,38(7):2082-2094.

Chen Xin, Wang Yuncheng, Gong Chunying, *et al.* Overview of stability research for grid-connected inverters based on impedance analysis method[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38 (7):2082–2094.

[4] 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.

[5] 吕敬,董鹏,施刚,等.大型双馈风电场经 MMC-HVDC并网的次同步振荡及其抑制[J].中国电机工程学报,2015,35 (19):4852-4860.

Lü Jing, Dong Peng, Shi Gang, *et al.* Subsynchronous oscillation and its mitigation of MMC-based HVDC with large doubly-fed induction generator-based wind farm integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(19):4852-4860.

 [6] 王赟程,陈新,陈杰,等.基于谐波线性化的三相LCL型并网 逆变器正负序阻抗建模分析[J].中国电机工程学报,2016, 36(21):5890-5898,6033.

Wang Yuncheng, Chen Xin, Chen Jie, *et al.* Analysis of positive-sequence and negative-sequence impedance modeling of three-phaselcl-type grid-connected inverters based on harmonic linearization[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21):5890– 5898,6033.

- [7] 刘斌,李光辉,王甲军,等. 永磁同步风电机组机侧直流阻抗 建模[J]. 电气传动,2020,50(6):109-114.
  Liu Bin, Li Guanghui, Wang Jiajun, *et al.* DC impedance modeling of PMSG wind turbines machine-side model[J]. Electric Drive,2020,50(6):109-114.
- [8] 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 Zhiwei, Chen Yandong, Wu Wenhua, *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.

[9] 刘自鹏,刘增,刘进军.基于并网变流器的脉冲注入型电网 阻抗测量方法的参数设计[J].电源学报,2020,18(2):95-103.

Liu Zipeng, Liu Zeng, Liu Jinjun. Parameter design of impulseinjection-based grid impedance measurement method with grid

(下转第27页)

[J]. IEEE Transaction on Smart Grid, 2018, 9(6):6815-6828.

- [3] Xia Y, Wei W. Power management for a hybrid AC/DC microgrid with multiple sub grids[J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2018, 33(4): 3520-3533.
- [4] 王伟,徐燕芬.适用于功率突变的 MTDC系统改进下垂控 制[J].电气传动,2020,50(8),59-64.
  Wang Wei, Xu Yanfen. Improved droop control strategy for MT-DC system suitable for changed active power[J]. Electric Drive, 2020,50(8),59-64.
- [5] Peyghami S, Mokhtari H. Autonomous operation of a hybrid AC/ DC microgrid with multiple interlinking converters[J]. IEEE Transaction on Smart Grid, 2018,9(6):6480–6488.
- [6] Wang J, Jin C. A uniform control strategy for the interlinking converter in hierarchical controlled hybrid AC/DC microgrids[J].
   IEEE Transaction on Power Electronics, 2018, 65 (8): 6188– 6197.
- [7] Loh P C, Li D. Autonomous operation of hybrid microgrid with AC and DC sub grids[J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2013,28 (5):2214–2223.
- [8] Eghtedarpour N, Farjah E. Power control and management in a hybrid AC/DC microgrid[J]. IEEE Transaction on Smart Grid, 2014,5(3):1494-1505.
- [9] Moayedi S, Davoudi A. Distributed tertiary control of DC microgrid clusters[J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2016,31(2):1717-1733.
- [10] Radwan A, Mohamed Y. Networked control and power management of AC/DC hybrid microgrids[J]. IEEE Systems Journal, 2017, 11(3):1662-1673.
- [11] Wu P, Huang W. A novel design of architecture and control for multiple microgrids with hybrid AC/DC connection[J]. Applied

# (上接第20页)

tied converter[J]. Journal of Power Supply, 2020, 18 (2) : 95-103.

[10] 年珩,徐韵扬,陈亮,等.并网逆变器频率耦合特性建模及系统稳定性分析[J].中国电机工程学报,2019,39(5):1421-1432.

Nian Heng, Xu Yunyang, Chen Liang, *et al.* Frequency coupling characteristic modeling of grid-connected inverter and system stability analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39 (5):1421–1432.

- [11] Gong H, Yang D, Wang X. Impact of nonlinear dynamics on converter DQ impedance measurement[C]//2019 20th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COM-PEL). IEEE, 2019:1–6.
- [12] 徐杰雄,王灿,龚文明,等.考虑耦合特性的串联型 MMC 阻抗建模及分析[J/OL].高电压技术:(2021-06-04)[2021-08-26].https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20210213.
  Xu Jiexiong, Wang Can, Gong Wenning, et al. Impedance modeling and analysis of series-connected MMC considering cou-

Energy, 2018, 210: 1002-1016.

- [12] Fang J, Li H, Tang Y, et al. On the inertia of future more electronics power systems[J]. IEEE Journal Emerging Selected Topics Power Electronics, 2019,7(4):2130–2146.
- [13] Eto Joseph H, Undrill John, Roberts Ciaran. Frequency control requirements for reliable interconnection frequency response[D]. Berkley:Lawrence Berkley National Laboratory, 2018.
- [14] Zhong Q, Weiss G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators[J]. IEEE Transation on Industrial Electronics, 2011, 58(4):1259–1267.
- [15] Wu W. A virtual inertia control strategy for DC microgrids analogized with virtual synchronous machines[J]. IEEE Transation on Industrial Electronics, 2017, 64(7):6005–6016.
- [16] Schneider K P, Radhakrishnan N, Tang Y. Improving primary frequency response to support networked microgrid operations [J]. IEEE Transation on Power Systems, 2019, 34(1):659–667.
- [17] Qi G X, Chen A, Chen J. Improved control strategy of interlinking converters with synchronous generator characteristic in islanded hybrid AC/DC microgrid[J]. CPSS Transation on Power Electronics & Application, 2017, 2(2):149–158.
- [18] Rakhshani E, Rodriguez P. Inertia emulation in AC/DC interconnected power systems using derivative technique considering frequency measurement effects[J]. IEEE Transation on Power Systems, 2017, 32(5):3338–3351.
- [19] Vennelaganti S G, Chaudhuri N R. Ratio-based selective inertial and primary frequency support through MTDC grids with offshore wind farms[J]. IEEE Transation on Power Systems, 2018,33(6):7277-7287.

收稿日期:2020-10-21 修改稿日期:2020-12-08

pling effect[J/OL]. High Voltage Engineering: (2021-06-04) [2021-08-26]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.2021 0213.

[13] 年珩,李萌,陈亮,等.采用多正弦信号注入的宽频带并网递 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 Heng, Li Meng, Chen Liang, *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.

[14] 王睿庭.基于 AD9959 与 STM32 的 DDS 扫频信号源设计[J]. 电子测试,2020(10):30-31,59.

Wang Ruiting. Design of DDS sweep signal generator based on AD9959 and STM32[J]. Electronic Test, 2020(10): 30-31, 59.

收稿日期:2021-08-18 修改稿日期:2021-09-02