

新能源发电宽频阻抗测量技术与装备综述

王伟胜¹, 李光辉¹, 陈燕东², 何国庆¹, 伍文华²,
肖云涛¹, 郭梓暄¹, 周党生³

- (1. 可再生能源并网全国重点实验室(中国电力科学研究院有限公司), 北京市 海淀区 100192;
2. 电能高效高质转化全国重点实验室(湖南大学), 湖南省 长沙市 410082;
3. 深圳市禾望电气股份有限公司, 广东省 深圳市 518000)

Review of Broadband Impedance Measurement Techniques and Equipment for Renewable Energy Generation

WANG Weisheng¹, LI Guanghui¹, CHEN Yandong², HE Guoqing¹, WU Wenhua²,
XIAO Yuntao¹, GUO Zixuan¹, ZHOU Dangsheng³

- (1. State Key Laboratory of Renewable Energy Grid-integration (China Electric Power Research Institute),
Haidian District, Beijing 100192, China; 2. State Key Laboratory of High-efficiency and High-quality Conversion for
Electric Power (Hunan University), Changsha 410082, Hunan Province, China;
3. Shenzhen Hopewind Electric Co., Ltd., Shenzhen 518000, Guangdong Province, China)

ABSTRACT: With the large-scale integration of global renewable energy generation, broadband oscillation risks in power systems at home and abroad have become increasingly prominent, posing significant threats to the stable and safe operation of the power systems. Impedance-based stability analysis has emerged as an effective methodology for analyzing and mitigating oscillation issues. Accurate acquisition of broadband impedance characteristics serves as the fundamental prerequisite for oscillation analysis, where specialized impedance measurement equipment plays a pivotal role. This paper first conducts a comprehensive review of the historical development of impedance measurement equipment worldwide. Subsequently, measurement principles, topological configurations, practical applications, and performance metrics are systematically analyzed. Finally, the paper provides a comprehensive summary, along with recommendations for technological advances, engineering application, and standard formulation of impedance measurement equipment in the future.

KEY WORDS: renewable energy generation; broadband oscillation; broadband impedance; measurement techniques; measurement equipment

摘要: 随着全球新能源大规模发展, 国内外新能源并网宽频振荡风险日益突出, 严重影响系统安全稳定运行。近年来, 阻抗分析法成为分析与解决宽频振荡问题的有效手段, 宽频阻抗的准确获取是振荡分析的基本前提, 而阻抗测量装备成为阻抗准确获取的关键。该文首先对国内外阻抗测量装备的发展历程进行调研; 然后, 归纳分析阻抗测量装备的测量原理、拓扑结构、应用情况和性能指标; 最后, 给出未来阻抗测量装备技术攻关、工程应用与标准制定的相关建议。

关键词: 新能源发电; 宽频振荡; 宽频阻抗; 测量技术; 测量装备

0 引言

近 20 年来, 全球能源结构向绿色低碳转型, 新能源发电得到飞跃式发展^[1-2]。截至 2024 年底, 全球可再生能源装机容量达到 4 448 GW^[3], 其中太阳能发电装机容量达到 1 865 GW(41.9%), 风电装机容量达到 1 133 GW(25.5%)。随着新能源装机占比提高, 电力系统运行特性发生深刻变化, 逐渐由新能源发电、直流输电采用的电力电子装备主导, 新能源发电对电力系统稳定性的影响愈发显著^[4-7]。自 2009 年以来, 美国得州、德国北海、我国新疆哈密、河北张北等地区陆续发生宽频振荡事件^[8-10], 导致大规模新能源脱网、弃风弃光增加、装备损坏等后果, 严重影响电力系统安全稳定运行。

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(5100-202355730A-3-3-JC)。

Science and Technology Project of State Grid Corporation of China
(5100-202355730A-3-3-JC)。

近年来,阻抗分析法成为分析和解决宽频振荡问题的有效手段^[11-16]。国内外学者开展了大量研究,在阻抗获取^[17-20]、机理分析^[21-25]、抑制策略^[26-31]等方面取得一系列成果。阻抗准确获取是采用阻抗分析法分析和解决宽频振荡问题的基本前提。目前,阻抗获取主要有 3 种方式:解析建模、仿真扫描和现场测量。

在解析建模方面,已理论推导了直驱风电机组^[32-33]、双馈风电机组^[34-36]、光伏发电单元^[37-38]、静止无功发生器^[39](static var generator, SVG)及常规直流输电^[40-41]、柔性直流输电^[42-44]宽频阻抗解析模型,能够定量分析不同控制环节与参数对宽频阻抗特性的影响,也为阻抗特性优化提供设计依据。阻抗解析建模需要基于设备的详细控制结构和参数,而这些是变流器制造商的核心机密不向外提供,导致第三方难以准确建立阻抗解析模型。

在仿真扫描方面,控制硬件在环仿真将变流器控制器视作黑盒,通过仿真扫描得到新能源发电单元的宽频阻抗,解决了控制结构和参数获取难题^[45-48]。然而,阻抗仿真扫描受仿真步长、接口延时、寄生参数等复杂因素影响^[49],存在一定的仿真扫描误差;工程实际中,新能源发电变流器控制版本管理较为混乱,导致控制器在实验室扫描的版本可能与现场不一致,会造成仿真扫描误差显著,导致宽频振荡风险判断不准确。

在现场测量方面,采用阻抗测量装备现场实测,获取新能源发电宽频阻抗^[50-52]。新能源发电单机容量覆盖数千 W 至近 20 MW、场站用 SVG 容量最大达数十 Mvar,端口电压达 35 kV,且并网振荡频率覆盖数赫兹至上千 Hz。因此,阻抗测量装备需同时满足大容量、高电压、宽频率范围等诸多技术挑战。

本文对国内外阻抗测量装备开展调研,首先厘清阻抗测量装备的发展历程;然后,归纳装备的测量原理、拓扑结构、应用情况和性能指标;最后,总结阻抗测量装备的发展现状并提出相关建议。

1 测量装备发展历程

通过调研国内外阻抗测量装备的发展历程,总结发展脉络及里程碑节点。调研时间跨度从 1980 年至今,调研范围包括美国、欧洲、中国相关高等院校、科研机构、仪器仪表厂家及新能源并网检测认证机构。

1.1 美国

从应用领域、测量原理、技术水平等方面,调研美国 Venable 公司、弗吉尼亚理工学院和州立大学、国家可再生能源实验室阻抗测量装备的发展情况。

1) Venable 公司。

1980 年,美国 Venable 公司发明了频率响应分析仪(frequency response analyzer, FRA),并应用于开关电源领域,测试分析反馈环路稳定性^[53]。基于 FRA 的阻抗测量原理如图 1 所示。FRA 输出扰动电压信号 v_{pref} ,并经由功率放大器,向测试系统注入扰动电压 v_p ,通过测量电流响应,获取被测对象宽频阻抗。

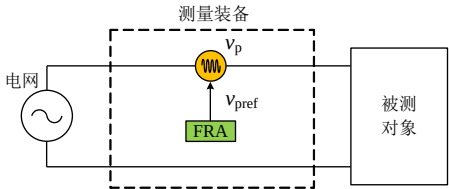


图 1 基于 FRA 的阻抗测量原理

Fig. 1 FRA-based impedance measurement principle

FRA 输出电压幅值范围为 1 mV~10 V、频率范围为 10 μ Hz~40 MHz 的扰动电压信号,并通过功率放大器作用,可实现 5 kW 以内被测对象阻抗测量。Venable Model 6340 FRA 参数如表 1 所示^[54],实物如图 2 所示。

表 1 Venable Model 6340 FRA 参数	
Table 1 Parameters of Venable Model 6340 FRA	
参数	数值
额定电压/kV	0.22/0.11
相数	单相
额定频率/Hz	50/60
最大测量容量/MVA	0.005
测量频率范围/Hz	$1\times10^{-5}\sim4\times10^7$



图 2 Venable Model 6340 FRA 实物图

Fig. 2 Physical Image of Venable Model 6340 FRA

随后,美国 Ridley Engineering、Megger、Keysight 等公司也陆续开始了 FRA 研制^[55-57],促进 FRA 在测量容量、电压等级、频率范围等方面的快速发展。基于 FRA 的阻抗测量给后续电力电子变

流器阻抗测量研究带来了启发。

2) 弗吉尼亚理工学院和州立大学。

2015 年, 美国弗吉尼亚理工学院和州立大学 (Virginia Polytechnic Institute and State University, VT) 电力电子系统研究中心研制了模块化可扩展中压阻抗测量装备, 可对船舶中压交直流电源和负载开展 dq 阻抗测量^[58-59]。基于模块化可扩展中压阻抗测量装备的阻抗测量原理如图 3 所示。图 3(a) 为单相电压扰动下阻抗测量原理, 分别注入不同频率的单相电压扰动 v_{pa} , 然后根据两次扰动下三相电流响应, 获取被测对象宽频阻抗。图 3(b) 为单相电流扰动注入下阻抗测量原理, 与电压扰动相比, 区别在于注入扰动为单相电流扰动 i_{pab} 。

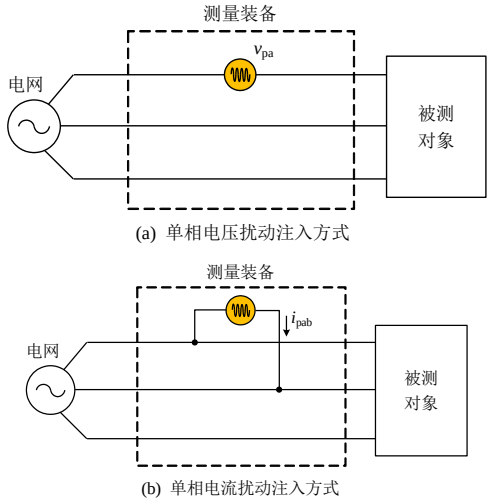


图 3 基于模块化可扩展中压阻抗测量装备的测量原理
Fig. 3 Measurement principle of modular scalable medium-voltage impedance measurement equipment

模块化可扩展中压阻抗测量装备由 3 个 DC/AC 模块并联(电压扰动方式)或串联(电流扰动方式)组成, DC/AC 模块均采用 H 桥变换器, 拓扑结构如图 4 所示。

该装备电压等级为 4.16 kV, 最大测量容量为 2.1 MVA, 测量频率范围为 5~1 000 Hz, 参数如表 2 所示^[59]。2016 年 6 月, 该装备在美国佛罗里达州立大学先进电力系统研究中心, 通过单相电压扰动和单相电流扰动注入, 完成了可控交流电源阻抗实验

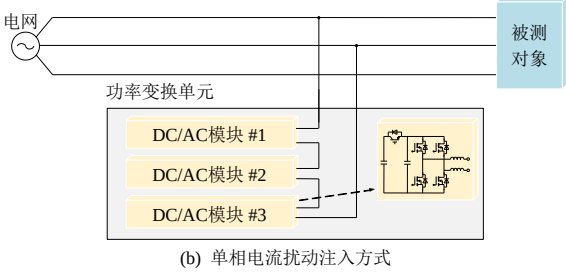
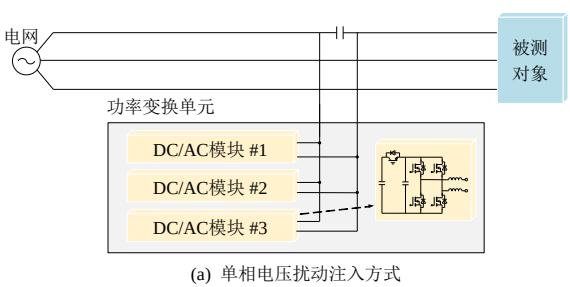


图 4 模块化可扩展中压阻抗测量装备拓扑结构
Fig. 4 Topology of modular scalable medium-voltage impedance measurement equipment

表 2 模块化可扩展中压阻抗测量装备参数
Table 2 Parameters of modular scalable medium-voltage impedance measurement equipment

参数	数值
额定电压/kV	4.16
相数	单相
额定频率/Hz	60
最大测量容量/MVA	2.1
测量频率范围/Hz	5~1 000

室测量^[60-61], 装备如图 5 所示。

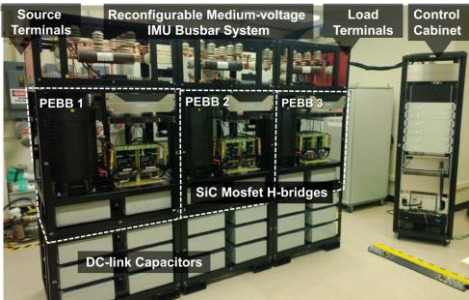


图 5 模块化可扩展中压阻抗测量装备
Fig. 5 Modular scalable medium-voltage impedance measurement equipment

3) 国家可再生能源实验室。

2018 年, 美国国家可再生能源实验室 (National Renewable Energy Laboratory, NREL) 研制了基于电网模拟器的阻抗测量装备, 可开展新能源发电单元、储能单元正序、负序阻抗测量^[62]。基于电网模拟器的阻抗测量原理如图 6 所示。该装备一方面输

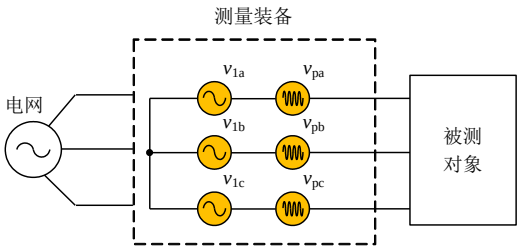


图 6 NREL 基于电网模拟器的阻抗测量原理
Fig. 6 Measurement principle of NREL impedance measurement equipment based on grid emulator

出三相基波电压 v_{1a} 、 v_{1b} 、 v_{1c} ，为被测对象提供额定电压；另一方面输出三相扰动电压 v_{pa} 、 v_{pb} 、 v_{pc} ，通过测量三相电流响应，获取被测对象宽频阻抗。

该装备拓扑结构如图 7 所示，包括输入变压器、功率变换单元和输出变压器 3 部分。功率变换单元由 AC/DC 整流单元和 DC/AC 逆变单元构成，其中 AC/DC 整流单元采用两电平变换器，DC/AC 逆变单元采用 4 个并联 NPC 三电平变换器。

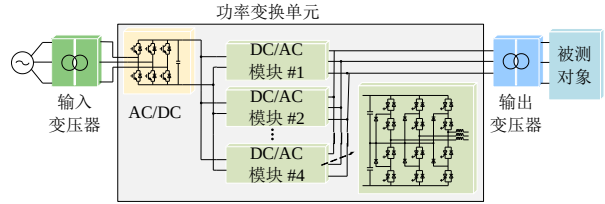


图 7 NREL 基于电网模拟器的阻抗测量装备拓扑结构

Fig. 7 Topology of NREL impedance measurement equipment based on grid emulator

该装备电压等级 13.2kV，最大测量容量 7MVA，测量频率范围 1~1000Hz，参数如表 3 所示^[63]。该装备在美国国家可再生能源实验室完成了 3 个型号风电机组(最大功率 4MW)和 1 个型号储能单元(2.2MW)的阻抗测量^[63-64]，装备如图 8 所示。

表 3 NREL 基于电网模拟器的阻抗测量装备参数

Table 3 Parameters of NREL impedance measurement equipment based on grid emulator

参数	数值
额定电压/kV	13.2
相数	三相
额定频率/Hz	60
最大测量容量/MVA	7
测量频率范围/Hz	1~1000



图 8 NREL 基于电网模拟器的阻抗测量装备

Fig. 8 NREL impedance measurement equipment based on grid emulator

1.2 瑞典

2016 年，瑞典查尔姆斯理工大学(Chalmers Tekniska Högskola, CTH)基于 VSC-HVDC 开展了风电机组正序和负序阻抗现场测量^[65-66]。阻抗测量

原理与图 6 一致。由 VSC-HVDC 作为测量装备，输出三相基波电压 v_{1a} 、 v_{1b} 、 v_{1c} 和扰动电压 v_{pa} 、 v_{pb} 、 v_{pc} 。

该装备拓扑结构如图 9 所示，包括输入变压器、功率变换单元和输出变压器 3 部分。功率变换单元为 AC/DC 整流单元、直流电容、DC/AC 逆变单元构成，其中 AC/DC 整流单元和 DC/AC 逆变单元均采用两电平变换器^[66]。

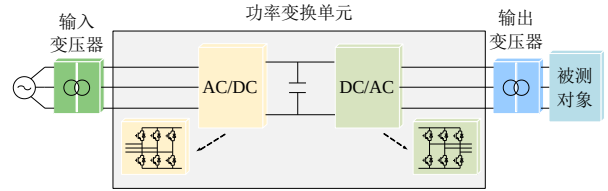


图 9 基于 VSC-HVDC 的阻抗测量装备拓扑结构

Fig. 9 Topology of impedance measurement equipment based on VSC-HVDC

该装备电压等级 10.5kV，最大测量容量 3.5MVA，测量频率范围 10~35Hz，参数如表 4 所示^[65-66]。2016 年 5 月，该装备在瑞典哥德堡港口完成了 Big Glenn 直驱风电机组 3.5MW 有功出力下阻抗现场测量，装备如图 10 所示。

表 4 基于 VSC-HVDC 的阻抗测量装备参数

Table 4 Parameters of impedance measurement equipment based on VSC-HVDC

参数	数值
额定电压/kV	10.5
相数	三相
额定频率/Hz	50
最大测量容量/MVA	3.5
测量频率范围/Hz	10~35



图 10 基于 VSC-HVDC 的阻抗测量装备

Fig. 10 Impedance measurement equipment based on VSC-HVDC

1.3 挪威

2019 年，挪威船级社(Det Norske Veritas Germanischer Lloyd, DNV GL)灵活电网实验室以 EGSTONG 功率放大器为核心，研制了电流扰动注入阻抗测量装备，可开展风电机组正序和负序阻抗

测量^[67]。基于 EGSTONG 功率放大器的阻抗测量原理如图 11 所示。由 RT_LAB 输出扰动信号 i_{paref} 、 i_{pbref} 、 i_{pcref} ，经由功率放大器产生三相扰动电流 i_{pa} 、 i_{pb} 、 i_{pc} ，通过测量三相电压响应，获取被测对象宽频阻抗。

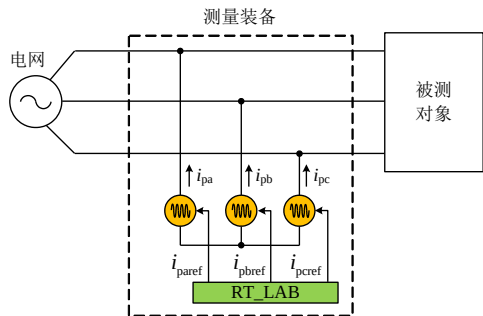


图 11 基于 EGSTONG 功率放大器的阻抗测量原理

Fig. 11 Measurement principle of impedance measurement equipment based on power amplifier of EGSTONG

EGSTONG 功率放大器电压等级 0.48 kV，经输出变压器升压至 35 kV，最大测量容量 15 MVA，测量频率范围 1~1 000 Hz，参数如表 5 所示。2019 年 9 月，该装备在荷兰拜纳姆完成了 3 MW 直驱风电机组 1~1 000 Hz 阻抗实验室测量^[67]，装备如图 12 所示。

表 5 基于 EGSTONG 功率放大器的阻抗测量装备参数
Table 5 Parameters of impedance measurement equipment based on power amplifier of EGSTONG

参数	数值
额定电压/kV	35kV
相数	三相
额定频率/Hz	50/60
最大测量容量/MVA	15
测量频率范围/Hz	1~1 000



图 12 基于 EGSTONG 功率放大器的阻抗测量装备

Fig. 12 Impedance measurement equipment based on power amplifier of EGSTONG

1.4 德国

从应用领域、测量原理、技术水平等方面，调研德国弗劳恩霍夫光伏研究所、风电研究所阻抗测

量装备的发展情况。
1) 弗劳恩霍夫光伏研究所。
2020 年，德国弗劳恩霍夫光伏研究所 (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE) 研制了基于功率放大器的阻抗测量装备，可开展光伏逆变器正序和负序阻抗测量^[68-69]。ISE 基于功率放大器的阻抗测量原理如图 13 所示。RT_LAB 输出基波电压信号 v_{1ref} 和扰动电压信号 v_{pref} ，经由电网模拟器产生三相基波电压 v_{1a} 、 v_{1b} 、 v_{1c} 和扰动电压 v_{pa} 、 v_{pb} 、 v_{pc} ，通过测量三相电流响应，获取被测对象宽频阻抗。

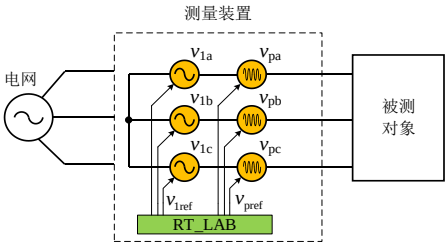


图 13 ISE 基于功率放大器的阻抗测量原理

Fig. 13 Measurement principle of ISE impedance measurement equipment based on power amplifier

该装备电压等级 1 kV，最大测量容量 0.5 MVA，测量频率范围 10~10 000 Hz，参数如表 6 所示^[68-69]。2020 年，该装备在 ISE Multi-Megawatt 实验室完成了 5 个型号光伏逆变器(最大功率 2.5 MW)的阻抗测量，装备如图 14 所示。

表 6 ISE 基于功率放大器的阻抗测量装备参数
Table 6 Parameters of ISE impedance measurement equipment based on power amplifier

参数	数值
额定电压/kV	1
相数	三相
额定频率/Hz	50
最大测量容量/MVA	0.5
测量频率范围/Hz	10~10 000



图 14 ISE 基于功率放大器的阻抗测量装备

Fig. 14 ISE impedance measurement equipment based on power amplifier

2) 弗劳恩霍夫风电研究所。

2023 年底, 德国弗劳恩霍夫风电研究所 (Fraunhofer Institute for Wind Energy Systems, IWES) PQ4wind 风电测试平台投运, 该平台可模拟电网特性, 开展风电变流器正序和负序阻抗测量^[70-71]。基于 PQ4wind 风电测试平台的阻抗测量原理与图 10 一致, 测试平台一方面输出三相基波电压 v_{1a} 、 v_{1b} 、 v_{1c} , 为被测对象提供额定电压; 另一方面输出三相扰动电压 v_{pa} 、 v_{pb} 、 v_{pc} , 通过测量三相电流响应, 获取被测对象宽频阻抗。

该平台拓扑结构与图 7 类似, 区别在于 DC/AC 逆变单元采用了 16 个并联 NPC 三电平逆变器。

PQ4wind 风电测试平台电压等级 1 kV, 最大测量容量 8 MVA, 测量频率范围 40~10 000 Hz, 阻抗测量技术参数如表 7 所示^[70-71]。

表 7 PQ4wind 风电测试平台参数

Table 7 Parameters of PQ4wind test platform

参数	数值
额定电压/kV	1
相数	三相
额定频率/Hz	50
最大测量容量/MVA	8
测量频率范围/Hz	40~10 000

1.5 瑞士

2020 年, 瑞士洛桑联邦理工学院 (École Polytechnique Fédérale de Lausanne, EPFL) 电力电子实验室研制了基于柔性中压扰动注入变换器的阻抗测量装备, 可开展中压交直流电力电子电源和负载 dq 阻抗测量^[72]。基于柔性中压扰动注入变换器的阻抗测量原理如图 15 所示。图 15(a)为三相电压扰动下阻抗测量原理, 通过注入三相电压扰动 v_{pa} 、 v_{pb} 、 v_{pc} , 根据三相电流响应, 获取被测对象宽频阻抗。图 15(b)为三相电流扰动下阻抗测量原理, 与电压扰动相比, 区别在于注入扰动为三相电流扰动 i_{pa} 、 i_{pb} 、 i_{pc} 。

该装备拓扑结构如图 16 所示, 包括输入变压器、功率变换单元两部分。输入变压器采用多绕组移相变压器, 功率变换单元每一相包括 5 个 AC/DC/AC 模块, 每个模块前级采用两电平逆变器整流, 后级采用 H 桥变换器逆变。对于电压扰动, 每相 5 个 AC/DC/AC 模块输出端口先并联, 然后串联接入至电网与被测对象之间。对于电流扰动, 每相 5 个 AC/DC/AC 模块输出端口先串联, 然后并联与被

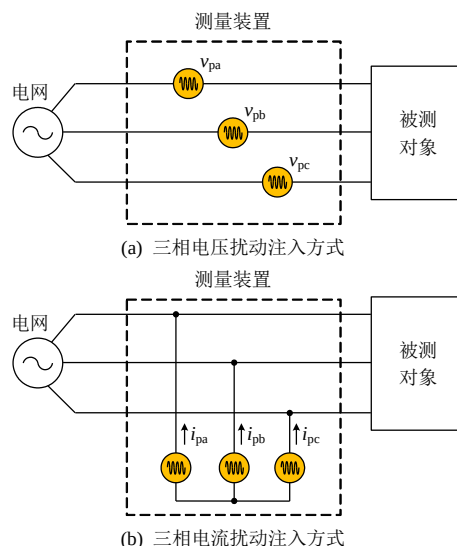


图 15 基于柔性中压扰动注入变换器的阻抗测量拓扑

Fig. 15 Measurement principle of impedance measurement equipment based on flexible medium-voltage perturbation injection converter

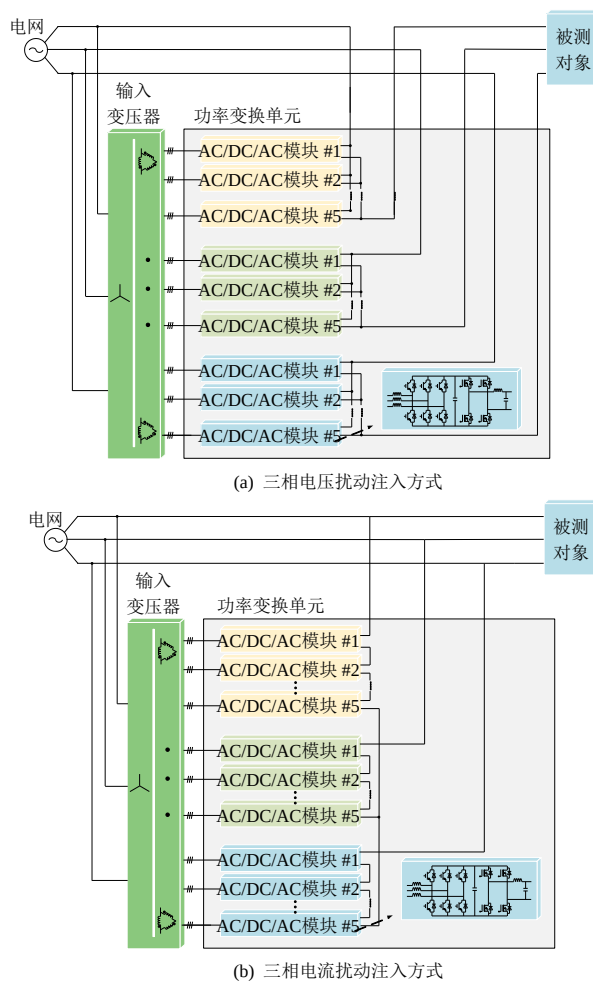


图 16 基于柔性中压扰动注入变换器的阻抗测量装备拓扑结构

Fig. 16 Topology of impedance measurement equipment based on flexible medium-voltage perturbation injection converter

测对象并联接入至电网。

该装备电压等级 6 kV，最大测量容量 10 MVA，测量频率范围 1~4 000 Hz，参数如表 8 所示^[72]。2020 年 10 月，该装备在瑞士联邦理工学院电力电子实验室完成了 0.5 MW 模块化多电平变换器的阻抗测量，装备如图 17 所示。

表 8 基于柔性中压扰动注入变换器的阻抗测量装备参数

Table 8 Parameters of impedance measurement equipment based on flexible medium-voltage perturbation injection converter

参数	数值
额定电压/kV	6
相数	三相
额定频率/Hz	50
最大测量容量/MVA	10
测量频率范围/Hz	1~4 000



图 17 基于柔性中压扰动注入变换器阻抗测量装备
Fig. 17 Impedance measurement equipment based on flexible medium-voltage perturbation injection converter

1.6 中国

从应用领域、测量原理、技术水平等方面，调研湖南大学、中国电力科学研究院、西南交通大学阻抗测量装备的发展情况。

1) 湖南大学。

2021 年，湖南大学国家电能变换与控制工程技术研究中心团队研制了 35 kV/1 MVA 宽频导纳测量装备，可开展新能源发电设备正序和负序阻抗现场测量^[73]。宽频导纳测量原理与图 15(a)一致，通过分别注入正序和负序三相电压扰动 v_{pa} 、 v_{pb} 、 v_{pc} ，根据正序电压扰动下三相电流响应和负序电压扰动下三相电流响应，获取被测对象宽频阻抗。

该装备拓扑结构如图 18 所示，包括输入变压器、功率变换单元和耦合变压器 3 部分。输入变压器采用多绕组移相变压器，功率变换单元每一相由 8 个 AC/DC/AC 模块串联组成，每个模块前级采用两电平变换器整流，后级采用 H 桥变换器逆变。每相 8 个 AC/DC/AC 模块输出端口串联，并经过耦合变压器串联接入至电网与被测对象之间。

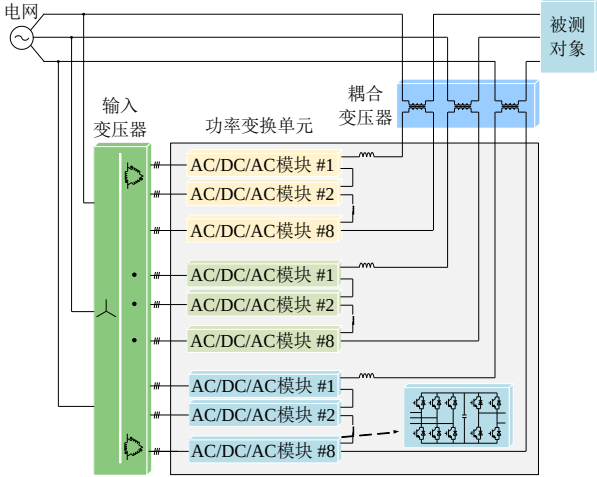


图 18 湖南大学宽频带导纳测量装备拓扑结构
Fig. 18 Topology of broadband admittance measurement equipment of Hunan University

该装备电压等级 35 kV，最大测量容量 10 MVA，测量频率范围 10~1 000 Hz，参数如表 9 所示^[74]。2021 年 8 月，该装备在河北张北完成了 1.5 MW 双馈风电机组阻抗现场测量，装备如图 19 所示。

表 9 湖南大学宽频带导纳测量装备参数

Table 9 Parameters of broadband admittance measurement equipment of Hunan University

参数	数值
额定电压/kV	35
相数	三相
额定频率/Hz	50
最大测量容量/MVA	10
测量频率范围/Hz	10~1 000



图 19 湖南大学宽频导纳测量装备
Fig. 19 Broadband admittance measurement equipment of Hunan University

2) 中国电力科学研究院。

2023 年 8 月，中国电力科学研究院研制了新能源发电单元宽频阻抗测量装备，可开展风电机组、光伏发电单元、储能单元、静止无功补偿器(static var generator, SVG)正序和负序阻抗现场测量^[75-77]。新能源发电单元宽频阻抗测量原理与图 15(a)一致，通过分别注入正序和负序三相电压扰动 v_{pa} 、 v_{pb} 、 v_{pc} ，

根据正序电压扰动下三相电流响应和负序电压扰动下三相电流响应，获取被测对象宽频阻抗。

该装备拓扑结构如图 20 所示，包括输入变压器、功率变换单元和耦合变压器 3 部分。功率变换单元由 AC/DC 整流单元和 DC/AC 逆变单元构成，其中 AC/DC 整流单元采用两电平变换器，DC/AC 逆变单元每一相采用 3 个 H 桥变换器直流侧并联、交流侧串联构成。每相 3 个 H 桥变换器交流端经耦合变压器与滤波电容并联后，接入至电网与被测对象之间。

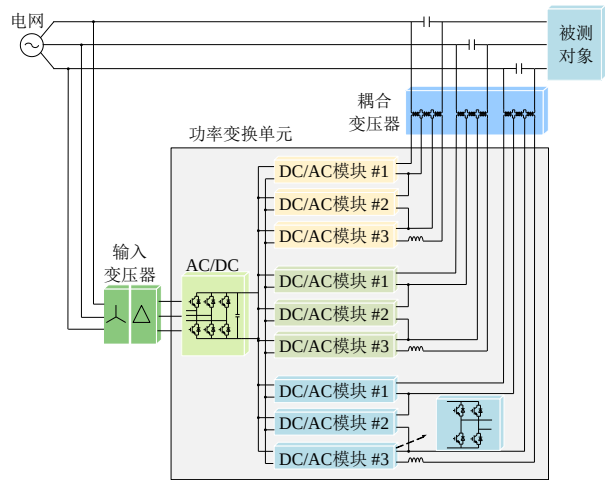


图 20 中国电力科学研究院宽频阻抗测量装备拓扑结构
Fig. 20 Topology of broadband impedance measurement equipment of China Electric Power Research Institute

该装备电压等级 35 kV，最大测量容量 20 MVA，测量频率范围 2~1 000 Hz。2023 年 8 月至 2024 年 8 月，该装备先后完成蒙东赤峰乌套海风电场 1.5 MW 双馈风电机组^[75]、宁夏中卫徐套光伏电站 0.225 MW 光伏发电单元^[76]、陕西定边石涝河风电场 1.5 MW 直驱风电机组、云南巧家白沟林光伏电站 46 Mvar SVG(测量时运行功率 10 Mvar)^[77]、福建霞浦渔洋里储能电站 0.63 MW 储能单元宽频阻抗现场测量。截至目前，共计完成 8 个型号风电机组、5 个型号光伏发电单元、5 个型号储能单元、5 个型号 SVG 的阻抗现场测量，装备如图 21 所示。2025 年 2 月，采用相同技术路线的第二套装备顺利出厂，最大测量容量提升至 40 MVA，测量频率范围拓宽至 2~2 000 Hz，装备参数如表 10 所示。

3) 西南交通大学。

2024 年，西南交通大学能源互联网研究团队研制了 MW 级可控宽频带阻抗测量装备，可开展单相



图 21 中国电力科学研究院宽频阻抗测量装备
Fig. 21 Broadband impedance measurement equipment of China Electric Power Research Institute

表 10 中国电力科学研究院宽频阻抗测量装备参数
Table 10 Parameters of broadband impedance measurement equipment of China electric power research institute

参数	数值
额定电压/kV	35
相数	三相
额定频率/Hz	50
最大测量容量/MVA	40
测量频率范围/Hz	2~2 000

铁路牵引网和电力机车 dq 阻抗现场测量^[78]。MW 级可控宽频阻抗测量原理如图 22 所示。图 22(a)为单相电压扰动下阻抗测量原理，通过注入两次线性无关的单相电压扰动 v_p ，根据两次电压扰动下单相电流响应，获取被测对象宽频阻抗。图 22(b)为单相电流扰动下阻抗测量原理，与电压扰动相比，区别在于注入扰动为单相电流扰动 i_p 。

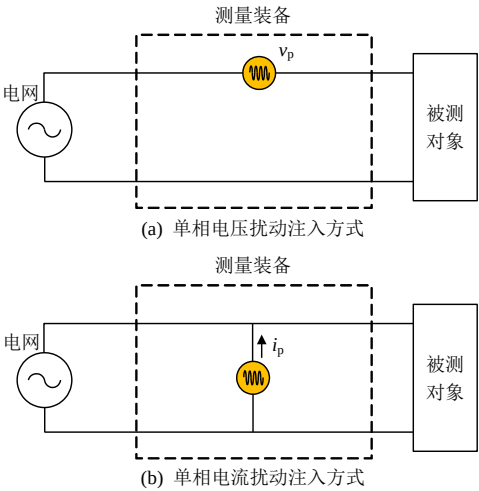


图 22 西南交通大学 MW 级可控宽频阻抗测量原理
Fig. 22 Measurement principle of controllable broadband impedance measurement on MW Scale of Southwest Jiaotong University

该装备拓扑结构如图 23 所示，包括输入变压器、功率变换单元及谐振、保护电路。功率变换单

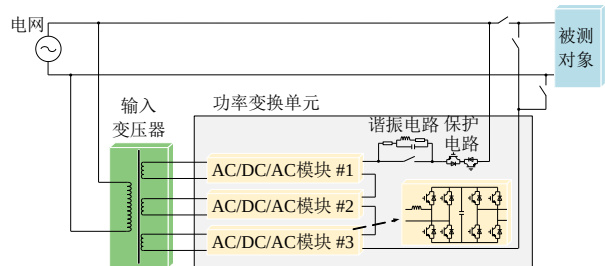


图 23 西南交通大学 MW 级可控宽频阻抗测量装备拓扑
Fig. 23 Topology of controllable broadband impedance measurement on of Southwest Jiaotong University

元包括 3 个 AC/DC/AC 模块，每个模块前级采用 H 桥变换器整流，后级采用 H 桥变换器逆变。3 个 AC/DC/AC 模块输出端口与谐振、保护电路连接后，串联或并联接入至电网与被测对象之间。

该装备电压等级 25 kV，最大测量容量 30 MVA，测量频率范围 1~3 000 Hz，参数如表 11

表 11 西南交通大学 MW 级可控宽频阻抗测量装备参数
Table 11 Parameters of controllable broadband impedance measurement on MW Scale of Southwest Jiaotong University

参数	数值	参数	数值
额定电压/kV	25	最大测量容量/MVA	30
相数	单相	测量频率范围/Hz	1~3 000
额定频率/Hz	50	—	—



图 25 国内外阻抗测量装备发展历程
Fig. 25 Development history of impedance measurement equipment at home and abroad

1980 年，美国 Venable 研制的频率响应分析仪是电力电子装备阻抗测量的最早起源，测量频率范围较宽，配合小功率放大器，可开展 kW 级电力电子变换器阻抗测量，挪威船级社和德国弗劳恩霍夫光伏研究所通过提升功率放大器容量将最大测量容量提升至 MW 级及以上。2016 年，瑞典查尔姆斯理工大学首次采用了背靠背全功率变换变流器，将阻抗测量装备容量提升至 MW 级，但测量频率仅为 10~35 Hz，随后美国国家可再生能源实验室、德国弗劳恩霍夫风电和光伏研究所通过三电平变流器级联将最高测量频率提升至上千 Hz。2016 年，美国弗吉尼亚理工学院和州立大学提出了 H 桥串/并联的耦合注入阻抗测量装备，“小马拉大车”方式实现了 MW 级

所示^[79]。2024 年 7 月，在新开通的渝昆高铁友助村牵引变电所(重庆永川区)完成了铁路牵引网阻抗现场测量^[79]，装备如图 24 所示。



图 24 西南交通大学 MW 级可控宽频带阻抗测量装备
Fig. 24 Controllable broadband impedance measurement of Southwest Jiaotong University

1.7 小结

根据国内外相关高等院校、科研机构、仪器仪表厂家及新能源并网检测认证机构在阻抗测量装备方面的研究进展，国内外阻抗测量装备发展历程如图 25 所示。

船舶电源和负载的单相阻抗测量，西南交通大学采用有源 H 桥级联的耦合注入方案，实现了 30 MVA 单相铁路牵引网和电力机车的阻抗测量。2020 年，瑞士洛桑联邦理工学院首次将耦合注入方案应用于新能源发电的阻抗测量，电压和容量为 10 kV、10 MW。湖南大学和中国电力科学研究院，创新耦合注入拓扑，陆续研制出适用于 35 kV 的 10、20、40 MW 新能源发电宽频阻抗测量装备并开展应用。

2 测量装备对比分析

首先，从扰动形式及扰动注入方式两方面分析阻抗测量原理；然后，从装备实现方案、拓扑组成、功率变换单元 3 方面分析阻抗测量装备拓扑结构；

其次，从应用领域、应用场景、测量对象 3 方面分析阻抗测量装备应用情况；最后，分别按新能源发电变流器阻抗测量、整机阻抗测量的电压、容量、相数、频率上限/下限开展性能指标对比，为后续阻抗测量装备发展提供参考建议。阻抗测量装备多维度信息统计结果如表 12 所示。

表 12 阻抗测量装备信息统计
Table 12 Information statistics of impedance measurement equipment

机构	扰动形式	扰动注入方式	实现方案	拓扑组成	功率变换单元组成	应用领域	应用场景	测量对象	额定电压/kV	测量容量/MVA	频率下限/Hz	频率上限/Hz	相数
美国 Venable 公司	电压扰动	耦合注入	功率放大器	—	—	开关电源	现场	开关电源	0.22	0.005	1×10^{-5}	4×10^7	单相
美国弗吉尼亚理工学院和州立大学	电压/电流扰动	耦合注入	专用装备	功率变换单元	DC/AC	船舶制造	实验室	船舶电源和负载	4.16	2.1	5	1 000	单相
美国国家可再生能源实验室	电压扰动	全功率变换	专用装备	输入变压器 功率变换单元 输出变压器	AC/DC+ DC/AC	新能源发电	现场	风电机组 储能单元	13.2	7	1	1 000	三相
瑞典查尔姆斯理工大学	电压扰动	全功率变换	专用装备	输入变压器 功率变换单元 输出变压器	AC/DC+ DC/AC	新能源发电	现场	风电机组	10.5	3.5	10	35	三相
挪威船级社	电流扰动	—	功率放大器	—	—	新能源发电	实验室	变流器	35	15	1	1 000	三相
德国弗劳恩霍夫光伏研究所	电压扰动	全功率变换	功率放大器	—	—	新能源发电	实验室	变流器	1	0.5	10	10 000	三相
德国弗劳恩霍夫风电研究所	电压扰动	全功率变换	专用装备	输入变压器 功率变换单元 输出变压器	AC/DC+ DC/AC	新能源发电	—	变流器	1	8	40	10 000	三相
瑞士洛桑联邦理工学院	电压/电流扰动	耦合注入	专用装备	输入变压器 功率变换单元	AC/DC/AC	新能源发电	实验室	变流器	6	10	1	4 000	三相
湖南大学	电压扰动	耦合注入	专用装备	输入变压器 功率变换单元 输出变压器	AC/ DC/AC	新能源发电	现场	风电机组	35	10	10	1 000	三相
中国电力科学研究院	电压扰动	耦合注入	专用装备	输入变压器 功率变换单元 输出变压器	AC/DC+ DC/AC	新能源发电	现场	风电机组 光伏发电单元 储能单元	35	40	2	2 000	三相
西南交通大学	电压/电流扰动	耦合注入	专用装备	输入变压器 功率变换单元 谐振、保护电路	AC/ DC/AC	轨道交通	现场	SVG 铁路牵引网电力机车	25	30	1	3 000	单相

2.1 测量原理

按照扰动形式、扰动注入方式对比不同阻抗测量装备的测量原理，并给出基本测量流程。

2.1.1 扰动形式

电压扰动和电流扰动形式阻抗测量原理分别如图 15(a)和(b)所示。根据表 12，调研的 11 个机构中，7 个机构采用电压扰动，1 个机构采用电流扰动，3 个机构综合采用电压/电流扰动。从统计情况看，电压扰动是主流方式。

2.1.2 扰动注入方式

电压扰动信号有耦合注入和全功率变换两种实现方式。耦合注入电压扰动和全功率变换电压扰

动测量原理分别如图 15(a)和图 6 所示。根据表 12，在采用电压扰动的 10 个机构中，6 个机构采用耦合注入电压扰动，4 个机构采用全功率变换电压扰动。从统计情况看，耦合注入是电压扰动主流方式。

2.1.3 基本测量流程

调研的 11 个机构阻抗测量详细执行流程有差异，但基本的测量思路一致，测量流程如下：

- 1) 按阻抗测量频率范围，设定频率 f_p 为频率范围下限值；
- 2) 阻抗测量装备向被测对象注入频率为 f_p 的电压或电流扰动；
- 3) 采集被测对象端口电压、电流数据，并进

行傅里叶变换,提取频率 f_p 的电压分量 $u_p(f_p)$ 和电流分量 $i_p(f_p)$;

4) 利用式(1)计算被测对象阻抗 Z_p ;

$$Z_p = \frac{u_p(f_p)}{i_p(f_p)} \quad (1)$$

5) 按频率步长,依次增大频率 f_p 取值,并重复上述步骤 2) —4),直至达到测量频率范围上限值。

单相系统中被测对象阻抗测量按照上述测量流程执行;三相系统中被测对象的阻抗测量需通过正序扰动注入和负序扰动注入,计算得到被测对象正序阻抗、负序阻抗以及正负序频率耦合阻抗^[80]。

2.2 拓扑结构

按照实现方案、拓扑组成及功率变换单元,分析阻抗测量装备拓扑结构采用情况。

2.2.1 实现方案

基于功率放大器和专用装备的阻抗测量实现方案如图 26 所示。图 26(a)表示信号发生器+功率放大器实现方案,图 26(b)表示专用装备实现方案。图 26(a)中信号发生器可以采用 FRA,也可以采用 RT_LAB 等实时仿真器;功率放大器可以采用 EGSTONG 或其他产品。由表 12 可知,在 11 个机构中,8 个机构采用专用装备,3 个机构采用信号发生器+功率放大器。从统计情况看,采用专用装备实现方案是主流方式。

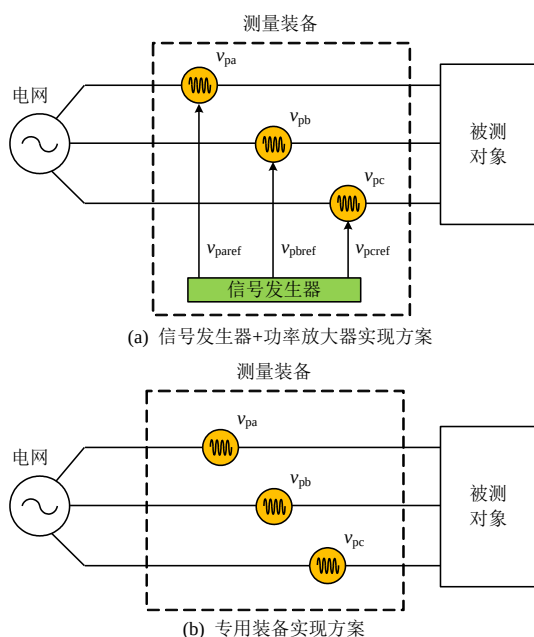


图 26 基于功率放大器和专用装备的阻抗测量实现方案
Fig. 26 Scheme for impedance measurement based on power amplifiers and special equipment

2.2.2 拓扑组成

在采用专用装备开展阻抗测量的 8 个机构中,专用装备拓扑涉及输入变压器、功率变换单元、输出变压器等。8 个机构阻抗测量装备拓扑全部含有功率变换单元,7 个机构拓扑含输入变压器,5 个机构拓扑含输出变压器。从统计情况看,功率变换单元不可缺少,且同时还含输入变压器、输出变压器是阻抗测量装备主流拓扑。

2.2.3 功率变换单元

阻抗测量装备功率变换单元包含 AC/DC 单元和 DC/AC 单元,可集成为单级变换模块(见图 16)或采用两级变换形式(见图 20)。在采用专用装备开展阻抗测量的机构中,8 个机构全部含 DC/AC 单元,7 个机构含 AC/DC 单元。其中,3 个机构集成为 AC/DC/AC 单级变换模块,4 个机构采用 AC/DC+DC/AC 两级变换。从统计情况看,DC/AC 模块不可缺少,且同时含 AC/DC 与 DC/AC 模块是功率变换单元主流组成方案。

综上,调研的 11 个机构中,采用专用装备是阻抗测量装备主流实现方案,专用装备主流拓扑结构同时含有输入变压器、功率变换单元、输出变压器,并且功率变换单元几乎全采用 AC/DC 与 DC/AC 单元。

2.3 应用情况

根据新能源发电、开关电源、轨道交通、船舶制造等不同应用领域,实验室、现场等不同应用场景,以及新能源发电变流器、整机等不同测量对象,分析统计阻抗测量装备应用情况。

2.3.1 应用领域

由表 12 可知,调研的 11 个机构中,美国 Venable 公司研制的 FRA 主要应用于开关电源,美国弗吉尼亚理工学院和州立大学、西南交通大学研制的阻抗测量装备分别应用于船舶制造和轨道交通,其他 8 个机构研制的阻抗测量装备均用于新能源发电。

2.3.2 应用场景

应用于新能源发电领域的阻抗测量装备中,德国弗劳恩霍夫风电研究所的 PQ4wind 风电测试平台尚无公开应用报道;挪威船级社、德国弗劳恩霍夫光伏研究所、瑞士洛桑联邦理工学院 3 个机构开展了阻抗测量装备实验室应用;美国国家可再生能源实验室、瑞典查尔姆斯理工大学、湖南大学、中国电力科学研究院 4 个机构开展了阻抗测量装备现场应用。

2.3.3 测量对象

在新能源发电领域,阻抗测量对象包括变流器,以及风电机组、光伏发电单元、储能单元、SVG等整机。挪威船级社、德国弗劳恩霍夫风电与光伏研究所、瑞士洛桑联邦理工学院4个机构的阻抗测量装备用于变流器阻抗测量。美国国家可再生能源实验室、瑞典查尔姆斯理工大学、湖南大学、中国电力科学研究院4个机构的阻抗测量装备应用于整机阻抗测量。

2.4 性能指标

从新能源发电变流器阻抗测量、整机阻抗测量两个维度,对比分析阻抗测量装备性能指标情况。

2.4.1 变流器阻抗测量

挪威船级社、德国弗劳恩霍夫风电与光伏研究所、瑞士洛桑联邦理工学院4个机构研制的阻抗测量装备均用于新能源发电变流器阻抗测量。根据表12,新能源发电变流器阻抗测量装备技术参数雷达图如图27所示。

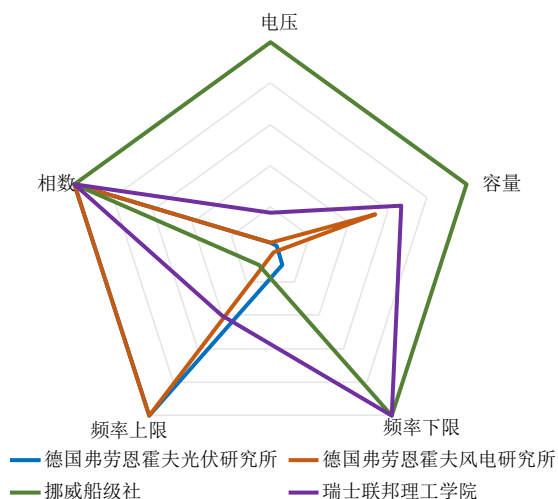


图 27 新能源发电变流器阻抗测量装备技术参数雷达图

Fig. 27 Radar diagram of technical parameters of impedance measurement equipment for renewable energy power converters

由图27可知,4个机构研制出的新能源发电变流器阻抗测量装备技术参数各有侧重。在电压等级和测量容量方面,挪威船级社最高,达到35kV、15MVA;测量频率下限方面,挪威船级社、瑞士洛桑联邦理工学院最优,达到1Hz;测量频率上限方面,德国弗劳恩霍夫风电与光伏研究所最高,达到10000Hz;4个机构均适用于三相阻抗测量。

2.4.2 整机阻抗测量

美国国家可再生能源实验室、瑞典查尔姆斯理工大学、湖南大学、中国电力科学研究院4个机构

阻抗测量装备均用于新能源发电整机阻抗测量。根据表12,新能源发电整机阻抗测量装备技术参数雷达图如图28所示。

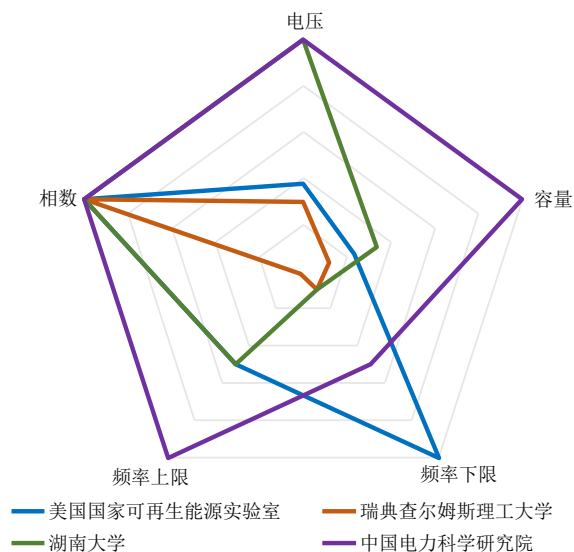


图 28 新能源发电整机阻抗测量装备技术参数雷达图

Fig. 28 Radar diagram of technical parameters of impedance measurement equipment for renewable energy units

由图28可知,4个机构研制出的新能源发电整机阻抗测量装备技术参数各有侧重。在电压等级方面,湖南大学、中国电力科学研究院最高,达到35kV;测量容量方面,中国电力科学研究院最高,达到40MVA;测量频率下限方面,美国国家可再生能源实验室最优,达到1Hz;测量频率上限方面,中国电力科学研究院最高,达到2000Hz。

3 结论与展望

本文对调研内容进行归纳总结,并从理论攻关、工程应用、标准制定3方面给出新能源发电宽频阻抗测量发展建议。

通过调研阻抗测量装备国内外发展历程,对比装备性能与应用情况,得到主要结论如下:

1) 阻抗测量装备最早起源于1980年美国Venable公司研制的频率响应分析仪。该仪器电压等级和测量容量较低,需配合功率放大器实现kW级电力电子变换器阻抗测量。随后,美国、瑞典、挪威、德国、瑞士、中国等国家陆续研制出高压大容量阻抗测量装备,其电压等级达到数十kV,测量容量达到数十MW。

2) 阻抗测量装备应用领域包括新能源发电、开关电源、船舶制造、轨道交通等。开关电源、船舶制造、轨道交通等为直流或单相交流系统,其阻

抗测量装备主要采用单相扰动注入，而新能源发电为三相交流系统，其阻抗测量装备采用三相扰动注入。新能源发电阻抗测量包括变流器测量和整机测量，其测量装备逐渐从全功率变换方式演变至耦合注入方式，以满足大容量新能源阻抗测量需求。

3) 不同新能源发电阻抗测量装备在电压等级、测量容量、频率范围等方面各有侧重，工程实用化应用仍面临不少挑战。扰动激励下被测新能源电压、电流响应易引起机组甚至场站过流、不平衡保护动作，电网谐波与测量装置非理想扰动源特性影响现场实测准确性，高海拔、高湿度地区装备绝缘强度降低等，在不同程度上影响了阻抗测量装备工程应用。

为提升新能源阻抗测量技术水平，推动阻抗测量技术应用，支撑新能源并网稳定运行，从技术攻关、工程应用、标准制定 3 方面提出以下建议：

1) 深入开展阻抗测量装备关键技术攻关。当前阻抗测量装备存在电压等级、容量范围、频率上下限等指标相互制约难题，亟待构建拓扑结构、控制策略协同优化方法，提升测量装备综合性能。针对新能源发电接入弱电网、串补电网、常规直流、柔性直流等不同场景，亟需攻克背景谐波、测量装备、被测新能源强非线性耦合阻抗解耦技术，提升复杂电网环境下现场测量精度。此外，需结合主动注入与被动检测技术，根据电网频谱特征优化扰动注入策略，同步增强测量系统宽频响应与数据自动化处理能力，确保测量的安全性、可靠性和便捷性。

2) 产学研用协同推动阻抗测量规模化工程应用。目前，新能源阻抗测量工程应用尚处于起步阶段，而新能源装机规模快速增长，频发的宽频振荡事件及大量潜在的振荡风险，给现场测量带来迫切需求，国内存在较大的供需失衡问题。亟需构建电网企业、发电集团、设备制造商及科研院所产学研用协同攻关体系，多方携手推动阻抗测量装备模块化设计与规模化量产，并共同完善阻抗测量结果在振荡分析、电磁暂态建模及模型校核等方面的应用。建立电网强度分级、渗透率分层、风险分阶现场测量优先级机制，积极推动新能源阻抗测量纳入型式试验体系，提升工程化应用水平。

3) 深化推进阻抗现场测量国家和国际标准制定。亟需构建适应新能源多形态并网的标准架构，制定面向风电、光伏、储能及 SVG 等装备差异化测试规程集。同时，建立覆盖测试装备准入认证、

运输吊装规范、绝缘性能评估、现场作业规程、风险预警防控、数据采集存储及入库管理全环节技术规范体系。积极申报阻抗测量国际标准，增强我国在国际标准制定的技术主导权。推动形成标准化、流程化、高效安全的阻抗现场测量技术体系，引领新能源发电阻抗实测的大规模工程应用，有效保障新型电力系统新能源高比例并网的安全稳定运行。

参考文献

- [1] United Nations Development Program. Just energy transition: governance needs and implications[R/OL]. [2025-03-22]. https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/2024-01/discussion_paper_-_just_energy_transition_-_governance_needs_and_implications_-_final.pdf.
- [2] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 中国的能源转型[EB/OL]. [2025-03-22]. https://www.gov.cn/zhengce/202408/content_6971115.htm. The State Council Information Office of the People's Republic of China. China's energy transition[EB/OL]. [2025-03-22]. https://www.gov.cn/zhengce/202408/content_6971115.htm (in Chinese).
- [3] International Renewable Energy Agency. Renewable capacity statistics 2025[R/OL]. Abu Dhabi, 2025 [2025-04-05]. <https://www.irena.org/Publications/2025/Mar/Renewable-capacity-statistics-2025>.
- [4] 汪梦军, 郭剑波, 马士聪, 等. 新能源电力系统暂态频率稳定分析与调频控制方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(5): 1672-1693. WNAG Mengjun, GUO Jianbo, MA Shicong, et al. Review of transient frequency stability analysis and frequency regulation control methods for renewable power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1672-1693 (in Chinese).
- [5] 李明节, 陈国平, 董存, 等. 新能源电力系统电力电量平衡问题研究[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 3979-3986. LI Mingjie, CHEN Guoping, DONG Cun, et al. Research on power balance of high proportion renewable energy system[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 3979-3986.
- [6] 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 Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, 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.
- [7] 胡家兵, 袁小明, 程时杰. 电力电子并网装备多尺度切

- 换控制与电力电子化电力系统多尺度暂态问题[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(18): 5457-5467.
- HU Jiabing, YUAN Xiaoming, CHENG Shijie. Multi-time scale transients in power-electronized power systems considering multi-time scale switching control schemes of power electronics apparatus[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(18): 5457-5467(in Chinese).
- [8] ADAMS J, CARTER C, HUANG S H. ERCOT experience with Sub-synchronous Control Interaction and proposed remediation[C]//Transmission and Distribution Conference and Exposition(T&D). Orlando: IEEE, 2012.
- [9] BUCHHAGEN C, RAUSCHER C, MENZE A, et al. BorWin1 - First Experiences with harmonic interactions in converter dominated grids[C]//International ETG Congress 2015, Die Energiewende - Blueprints for the New Energy Age. Bonn: VDE, 2015.
- [10] WANG Weisheng, LI Guanghui, GUO Jianbo. Large-scale renewable energy transmission by HVDC: challenges and proposals[J]. Engineering, 2022, 19: 252-267.
- [11] 张冲, 王伟胜, 何国庆, 等. 基于序阻抗的直驱风电场次同步振荡分析与锁相环参数优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(23): 6757-6767, 7067.
- ZHANG Chong, WANG Weisheng, HE Guoqing, et al. Analysis of sub-synchronous oscillation of full-converter wind farm based on sequence impedance and an optimized design method for PLL parameters[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23): 6757-6767, 7067(in Chinese).
- [12] WU Wenhua, CHEN Yandong, ZHOU Leming, et al. Sequence impedance modeling and stability comparative analysis of voltage-controlled VSGs and current-controlled VSGs[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(8): 6460-6472.
- [13] 雷雨, 李光辉, 王伟胜, 等. 跟网型和构网型新能源并网控制阻抗对比与振荡机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(1): 150-162.
- LEI Yu, LI Guanghui, WANG Weisheng, et al. Comparison of impedance characteristics and oscillation mechanism for grid following and grid forming renewable energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(1): 150-162(in Chinese).
- [14] CESPEDES M, SUN Jian. Impedance modeling and analysis of grid-connected voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(3): 1254-1261.
- [15] WANG Xiongfei, BLAABJERG F. Harmonic stability in power electronic-based power systems: concept, modeling, and analysis[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 2858-2870.
- [16] WANG Xiongfei, BLAABJERG F, WU Weimin. Modeling and analysis of harmonic stability in an AC power-electronics-based power system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(12): 6421-6432.
- [17] WEN Bo, DONG Dong, BOROEYEVICH D, et al. Impedance-based analysis of grid-synchronization stability for three-phase paralleled converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(1): 26-38.
- [18] RYGG A, MOLINAS M, ZHANG Chen, et al. A modified sequence-domain impedance definition and its equivalence to the dq-domain impedance definition for the stability analysis of ac power electronic systems[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2016, 4(4): 1383-1396.
- [19] AMIN M, MOLINAS M. Small-signal stability assessment of power electronics based power systems: a discussion of impedance- and eigenvalue-based methods[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(5): 5014-5030.
- [20] SUN Kun, YAO Wei, FANG Jiakun, et al. Impedance modeling and stability analysis of grid-connected DFIG-based wind farm with a VSC-HVDC[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 1375-1390.
- [21] 陈新, 王赞程, 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(in Chinese).
- [22] 伍文华, 周乐明, 陈燕东, 等. 序阻抗视角下虚拟同步发电机与传统并网逆变器的稳定性对比分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(5): 1411-1420.
- WU Wenhua, ZHOU Leming, CHEN Yandong, et al. Stability comparison and analysis between the virtual synchronous generator and the traditional grid-connected inverter in the view of sequence impedance[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(5): 1411-1420(in Chinese).
- [23] 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): 4720-4731.
- MA Ningning, XIE Xiaorong, HE Jingbo, et al. Review of wide-band oscillation in renewable and power electronics highly integrated power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4720-4731(in Chinese).
- [24] SUN Jian. Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(11): 3075-3078.

- [25] 王国宁, 杜雄, 邹小明, 等. 用于三相并网逆变器稳定性分析的自导纳和伴随导纳建模[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 3973-3981, 4275.
WANG Guoning, DU Xiong, ZOU Xiaoming, et al. Self and accompanying admittance model for three-phase grid-tied inverter stability analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 3973-3981, 4275 (in Chinese).
- [26] 肖云涛, 李光辉, 王伟胜, 等. 新能源基地经 LCC-HVDC 送出系统振荡机理分析与抑制策略(三): 振荡抑制策略[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(12): 4748-4758.
XIAO Yuntao, LI Guanghui, WANG Weisheng, et al. Oscillation mechanism analysis and suppression strategy of renewable energy base connected into LCC-HVDC (Part III): oscillation suppression strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(12): 4748-4758 (in Chinese).
- [27] LI Gaoxiang, CHEN Yandong, LUO An, et al. An inertia phase locked loop for suppressing sub-synchronous resonance of renewable energy generation system under weak grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(5): 4621-4631.
- [28] HUANG Liang, WU Chao, ZHOU Dao, et al. A double-PLLs-based impedance reshaping method for extending stability range of grid-following inverter under weak grid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(4): 4091-4104.
- [29] 李光辉, 王伟胜, 刘纯, 等. 直驱风电场接入弱电网宽频带振荡机理与抑制方法(二): 基于阻抗重塑的宽频带振荡抑制方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(23): 6908-6920.
LI Guanghui, WANG Weisheng, LIU Chun, et al. Mechanism analysis and suppression method of wideband oscillation of PMSG wind farms connected to weak grid(Part II): suppression method of wideband oscillation based on impedance reshaping[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(23): 6908-6920 (in Chinese).
- [30] SHAIR J, XIE Xiaorong, YANG Jianjun, et al. Adaptive damping control of subsynchronous oscillation in DFIG-based wind farms connected to series-compensated network[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(2): 1036-1049.
- [31] XIE Zhiwei, CHEN Yandong, WU Wenhua, et al. Stability enhancing voltage feed-forward inverter control method to reduce the effects of phase-locked loop and grid impedance[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(3): 3000-3009.
- [32] 李光辉, 王伟胜, 张兴, 等. 考虑机侧模型的直驱风电机组序阻抗建模及分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6200-6211.
LI Guanghui, WANG Weisheng, ZHANG Xing, et al. Sequence impedance modeling and analysis of permanent magnet synchronous generator considering machine side model[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6200-6212 (in Chinese).
- [33] 薛涛, 吕敬, 王凯, 等. 海上全功率风电机组精细化阻抗建模及机网侧耦合分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(12): 4303-4318.
XUE Tao, LYU Jing, WANG Kai, et al. Accurate impedance modeling of an offshore full-power wind turbine system and analysis of the coupling characteristics between machine and grid-side systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(12): 4303-4318 (in Chinese).
- [34] VIETO I, SUN Jian. Sequence impedance modeling and analysis of type-III wind turbines[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 33(2): 537-545.
- [35] XU Yunyang, NIAN Heng, WANG Tao, et al. Frequency coupling characteristic modeling and stability analysis of doubly fed induction generator[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 33(3): 1475-1486.
- [36] 李光辉, 王伟胜, 张兴, 等. 双馈风电场并网次/超同步振荡建模与机理分析(一): 考虑功率外环的阻抗建模[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(7): 2438-2448.
LI Guanghui, WANG Weisheng, ZHANG Xing, et al. Modeling and suppression method of sub/super-synchronous oscillation of grid-connected DFIG wind farms(Part I): Sequence impedance modeling and analysis of DFIG wind turbines considering power loop[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(7): 2438-2448 (in Chinese).
- [37] XIA Yanghong, PENG Yonggang, YANG Pengcheng, et al. Different influence of grid impedance on low- and high- frequency stability of PV generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(11): 8498-8508.
- [38] 雷雨, 李光辉, 王伟胜, 等. 计及光伏阵列的光伏发电阻抗建模与特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(13): 5122-5134.
LEI Yu, LI Guanghui, WANG Weisheng, et al. Impedance modeling and characteristics analysis of photovoltaic generation considering photovoltaic array[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(13): 5122-5134 (in Chinese).
- [39] 张昉, 沈梦娇, 陈新, 等. 基于双谐波线性化的级联 H 桥静止无功发生装置序阻抗建模与分析[J]. 电工技术学报, 2019, 34(20): 4334-4346.
ZHANG Yang, SHEN Mengjiao, CHEN Xin, et al. Sequence impedance modeling and analysis of cascaded H-bridge static var generator based on double-harmonic linearization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(20): 4334-4346 (in Chinese).

- [40] 肖云涛, 李光辉, 王伟胜, 等. 新能源基地经 LCC-HVDC 送出系统振荡机理分析与抑制策略(一): 计及受端影响的阻抗建模[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(2): 427-441.
- XIAO Yuntao, LI Guanghui, WANG Weisheng, et al. Oscillation mechanism analysis and suppression strategy of renewable energy base connected into LCC-HVDC (Part I): impedance modeling with the consideration of receiving-end influence[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(2): 427-441(in Chinese).
- [41] NIAN Heng, LIU Yiming, LI Haipan, et al. Commutation overlap characteristic modeling and stability analysis of LCC-HVDC in sending ac grid[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(3): 1594-1606.
- [42] 李光辉, 王伟胜, 郭剑波, 等. 风电场经 MMC-HVDC 送出系统宽频带振荡机理与分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(18): 5281-5297, 5575.
- LI Guanghui, WANG Weisheng, GUO Jianbo, et al. Broadband oscillation mechanism and analysis for wind farm integration through MMC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(18): 5281-5297, 5575(in Chinese).
- [43] LÜ Jing, ZHANG Xin, CAI Xu, et al. Harmonic state-space based small-signal impedance modeling of a modular multilevel converter with consideration of internal harmonic dynamics[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(3): 2134-2148.
- [44] JI Ke, TANG Guangfu, PANG Hui, et al. Impedance modeling and analysis of MMC-HVDC for offshore wind farm integration[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(3): 1488-1501.
- [45] POKHAREL M, GHOSH A, HO C N M. Small-signal modelling and design validation of PV-controllers with INC-MPPT using CHIL[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(1): 361-371.
- [46] SHAIR J, XIE Xiaorong, LI Yunhong, et al. Hardware-in-the-loop and field validation of a rotor-side subsynchronous damping controller for a series compensated DFIG system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(2): 698-709.
- [47] ROINILA T, MESSO T, LUHTALAR, et al. Hardware-in-the-loop methods for real-time frequency-response measurements of on-board power distribution systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(7): 5769-5777.
- [48] 马宁宁, 杜维柱, 刘朋印, 等. 基于控制硬件在环测试的风电次/超同步振荡风险评估[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(15): 5497-5506.
- MA Ningning, DU Weizhu, LIU Pengyin, et al. Risk assessment of sub-/sup-synchronous oscillation for wind turbine based on controller-hardware-in-loop test[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(15): 5497-5506(in Chinese).
- [49] 李光辉, 王伟胜, 刘纯, 等. 基于控制硬件在环的风电机组阻抗测量及影响因素分析[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1624-1631.
- LI Guanghui, WANG Weisheng, LIU Chun, et al. Impedance measurement and influence factors analysis for wind turbines based on control-hardware-in-the-loop[J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1624-1631(in Chinese).
- [50] 张兵. 高压宽频带阻抗测量方法与装备研制[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- ZHANG Bing. High voltage broadband impedance measurement method and equipment development[D]. Changsha: Hunan University, 2019(in Chinese).
- [51] SHAH S, KORALEWICZ P, GEVORGIAN V, et al. Sequence impedance measurement of utility-scale wind turbines and inverters - reference frame, frequency coupling, and MIMO/SISO forms[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2022, 37(1): 75-86.
- [52] 于永军, 许立国, 林子杰, 等. 基于级联 H 桥变流器的风电网宽频带谐波阻抗测量装置[J]. 中国电力, 2022, 55(11): 73-83.
- YU Yongjun, XU Liguang, LIN Zijie, et al. Wide-band harmonic impedance measurement device for wind grid based on cascaded H-bridge converter[J]. Electric Power, 2022, 55(11): 73-83(in Chinese).
- [53] Venable Instruments. Industry benchmark frequency response analyzers[EB/OL]. [2025-03-22]. <https://www.venableinstruments.com/frequency-response-analyzers>.
- [54] Venable Instruments. 63XX frequency response analyzer [EB/OL]. [2025-03-22]. <https://www.venableinstruments.com/products/frequency-response-analyzers/6300-series>.
- [55] Ridley Engineering. About Ridley Engineering[EB/OL]. [2025-03-22]. <https://ridleyengineering.com/the-company.html>.
- [56] Megger. FRAX series sweep frequency response analyzers[EB/OL]. [2025-03-22]. <https://www.megger.com/en-us/products/frax-series-sweep-frequency-response-analyzers>.
- [57] Keysight. Spectrum Analyzers(Signal Analyzers) [EB/OL]. [2025-03-21]. <https://www.keysight.com/us/en/products/spectrum-analyzers-signal-analyzers.html>.
- [58] BOGDAN F, HAUSER J, LANGSTON J, et al. Test environment for a novel medium voltage impedance measurement unit[C]//2015 IEEE Electric Ship Technologies Symposium(ESTS). Old Town Alexandria:

- IEEE, 2015.
- [59] CVETKOVIC I, SHEN Zhiyu, JAKSIC M, et al. Modular scalable medium-voltage impedance measurement unit using 10 kV SiC MOSFET PEBBs[C]//2015 IEEE Electric Ship Technologies Symposium(ESTS) . Old Town Alexandria: IEEE, 2015.
- [60] STEURER M, SCHODER K, LANGSTON J, et al. Testing the megawatt-scale impedance measurement unit at medium voltage levels[R/OL]. USA: Electric Ship Research & Development Consortium. [2025-02-17]. <https://www.esrdc.com/library/testing-the-megawatt-scale-impedance-measurement-unit-at-medium-voltage-levels-final-report-1/>.
- [61] JAKŠIĆ M, SHEN Zhiyu, CVETKOVIĆ I, et al. Medium-voltage impedance measurement unit for assessing the system stability of electric ships[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(2): 829-841.
- [62] SHAH S, KORALEWICZ P, GEVORGIAN V, et al. CGI for impedance characterization of inverter-coupled generation[C]//Fifth International Workshop on Grid Simulator Testing. Tallahassee Florida: NREL, 2018.
- [63] SHAH S, KORALEWICZ P, WALLEN R, et al. Impedance characterization of utility-scale renewable energy and storage systems[C]//2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition(ECCE). Baltimore MD: IEEE, 2019.
- [64] YAN W, SHAH S, GEVORGIAN V, et al. On the low risk of SSR in Type III wind turbines operating in grid-forming control[C]//21st Wind & Solar Integration Workshop. The Hague: IEEE, 2022.
- [65] ESPINOZA N, CARLSON O. Field-test of wind turbine by voltage source converter[J]. Wind Energy Science, 2019, 4(3): 465-477.
- [66] ESPINOZA N. Wind turbine characterization by voltage source converter based test equipment[D]. Gothenburg: Chalmers University of Technology, 2016.
- [67] Promotion Offshores . Demonstration of converter impedance measurement for the stability assessment in converter dominated power systems[EB/OL] . [2025-03-22] . http://www.promotion-offshore.net/fileadmin/PDFs/Press_Release_Demo_DNVGL_Converter_Impedance_Measurement.pdf.
- [68] ROGALLA S, KAISER S, BURGER B, et al. Determination of the frequency dependent Thévenin equivalent of inverters using differential impedance spectroscopy[C]//2020 IEEE 11th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems(PEDG). Dubrovnik, Croatia: IEEE, 2020.
- [69] SCHRÄDER J, KAISER S, JORDAN M, et al. Impedance-based method for predictive stability assessment[C]//A Review. Proceedings of: Tagung Zukünftige Stromnetze | Future Power Grids Conference. Berlin: Communities & Collections, 2024.
- [70] BOROWSKI P, QUISTORF G, JERSCH T, et al. PQ4wind - a novel test bench for component-level wind turbine converter testing[C]//21st Wind & Solar Integration Workshop(WIW 2022) . The Hague , Netherlands: IET, 2022.
- [71] TORBEN J, GESA Q, PHILIPP B. PQ4Wind Project: Pathway to novel large scale grid integration process [R/OL]. [2025-03-22]. <https://www.nrel.gov/grid/assets/pdfs/session9-3-jersch.pdf>.
- [72] PETKOVIĆ M, MILOVANOVIĆ S, DUJIĆ D. Flexible medium-voltage perturbation injection converter for AC and DC system identification[C]//IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Singapore: IEEE, 2020.
- [73] 陈燕东, 曹世骧, 伍文华, 等. 35kV/1MVA 宽频带导纳测量装备与频率耦合导纳测量方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(22): 8701-8719.
- CHEN Yandong, CAO Shixiang, WU Wenhua, et al. 35kV/1MVA Broadband admittance measurement equipment and frequency-coupling admittance measurement method[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(22): 8701-8719(in Chinese).
- [74] 伍文华. 新能源发电接入弱电网的宽频带振荡机理及抑制方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- WU Wenhua. Research on wide-bandwidth oscillation mechanism and suppression methods of renewable energy power generation connected to the weak grid[D] . Changsha: Hunan University, 2019(in Chinese).
- [75] 中国科技网. 国内首次风电机组结构化建模宽频阻抗实测圆满完成[EB/OL]. [2025-03-22]. https://www.stdaily.com/web/gdxw/2023-08/09/content_1931845.html.
- Science and Technology Daily. China's first on-site measurement of wide-frequency impedance for structured modeling of wind turbines successfully completed [EB/OL]. [2025-03-22]. https://www.stdaily.com/web/gdxw/2023-08/09/content_1931845.html(in Chinese).
- [76] 中国科技网. 国内首次光伏发电宽频阻抗现场实证成功[EB/OL]. [2025-03-22]. https://www.stdaily.com/web/gdxw/2023-09/01/content_1934198.html.
- Science and Technology Daily. China's first on-site verification of wide-frequency impedance for photovoltaic power generation achieved success[EB/OL] . [2025-03-22] . https://www.stdaily.com/web/gdxw/2023-09/01/content_1934198.html(in Chinese).

- [77] 中国能源报. 中国电科院发现新能源并网宽频振荡新的激发源[EB/OL]. [2025-03-22]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1804233863430168976&wfr=spider&for=pc>. China Energy News. China Electric Power Research Institute discovers new excitation sources for wide-frequency oscillations in new energy grid integration [EB/OL]. [2025-03-22]. [https://baijiahao.baidu.com/s?id=1804233863430168976&wfr=spider&for=p\(in Chinese\)c](https://baijiahao.baidu.com/s?id=1804233863430168976&wfr=spider&for=p(in Chinese)c).
- [78] 杨向阳, 胡海涛, 肖冬华, 等. 电气化铁路“车-网”系统串/并联双模式宽频谐波扰动产生装置设计与测量方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(13): 5109-5122. YANG Xiangyang, HU Haitao, XIAO Donghua, et al. Design of series/parallel dual-mode wideband harmonic disturbance generator and measurement method for electrified railway ‘train-grid’ system[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(13): 5109-5122(in Chinese).
- [79] 西南交通大学电气工程学院. 西南交通大学何正友、胡海涛教授团队牵头研发国内首套单相 MW 级宽频带阻抗测量仪器并成功试验[EB/OL]. [2025-03-22]. <https://dqxy.swjtu.edu.cn/info/2926/220469.htm>. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University. A team led by Professors He Zhengyou and Hu Haitao from Southwest Jiaotong University has developed China's first single-phase MW-level wide-band impedance measuring instrument and successfully conducted tests on it[EB/OL]. [2025-03-22]. [https://dqxy.swjtu.edu.cn/info/2926/220469.htm\(in Chinese\)](https://dqxy.swjtu.edu.cn/info/2926/220469.htm(in Chinese)).
- [80] 国家能源局. 光伏发电站阻抗特性评估技术规范: NB/T 11344-2023[S]. 北京: 中国电力出版社, 2023. National Energy Administration. Technical specifications for impedance characteristics evaluation of photovoltaic power plants: NB/T 11344-2023[S]. Beijing: China

Electric Power Press, 2023(in Chinese).



王伟胜

在线出版日期: 2025-04-14。

收稿日期: 2025-03-25。

作者简介:

王伟胜(1968), 男, 博士, 教授级高级工程师, 博士生导师, 研究方向为新能源发电与并网技术、电力系统稳定分析和控制, wangws@epri.sgcc.com.cn;

李光辉(1984), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为新能源并网控制与稳定性分析;

陈燕东(1979), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事高密度磁场电磁转化、电力电子化电力系统稳定控制方面的研究工作;

何国庆(1981), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为新能源发电与并网技术;

伍文华(1991), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力电子化电力系统、并网逆变器分析与控制;

肖云涛(1994), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为新能源并网控制与稳定性分析;

郭梓暄(1992), 男, 博士, 工程师, 研究方向为新能源并网建模与稳定性分析;

周党生(1975), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 研究方向为风/光/储发电装置、并网运行与建模技术及机网互动稳定控制技术。

(编辑 乔宝榆, 张蕾)