

# 基于 CloudPSS-RT 和 RT-Lab 联合实时仿真平台的 在线阻抗分析装置设计\*

曹斌<sup>1,2</sup>, 原帅<sup>2</sup>, 辛东昊<sup>2</sup>

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310058; 2. 内蒙古电力科学研究所, 内蒙古 呼和浩特 010020)

**摘要:** 准确的宽频带阻抗测量是发现和解决未来双高电力系统稳定性问题的重要基础, 但直接向电力系统注入谐波进行测量可能会带来失稳的风险, 而基于半实物仿真技术可以以较低的成本与风险实现较为准确的宽频带阻抗测量。实时仿真器的计算性能和仿真规模取决于目标计算机的计算能力, 仿真精度与规模顾此失彼, 难以兼顾, 并且随着电力系统仿真规模要求的不断提高, 单一的实时仿真系统越来越难以满足大规模仿真的要求。使用多个实时仿真器协同进行联合仿真, 是提高仿真规模的有效途径。首先构建了基于 CloudPSS-RT 和 RT-Lab 联合实时仿真平台的在线阻抗分析装置, 并通过构建光伏与双馈风力发电系统, 验证了在线阻抗分析装置的准确性和有效性。

**关键词:** 阻抗测量; 频率扫描; 联合仿真; CloudPSS-RT; RT-Lab

中图分类号: TM743

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.212441

中文引用格式: 曹斌, 原帅, 辛东昊. 基于 CloudPSS-RT 和 RT-Lab 联合实时仿真平台的在线阻抗分析装置设计[J]. 电子技术应用, 2022, 48(1): 53-58.

英文引用格式: Cao Bin, Yuan Shuai, Xin Donghao. An online impedance analysis device based on CloudPSS-RT and RT-Lab co-simulation test bench[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(1): 53-58.

## An online impedance analysis device based on CloudPSS-RT and RT-Lab co-simulation test bench

Cao Bin<sup>1,2</sup>, Yuan Shuai<sup>2</sup>, Xin Donghao<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

2. Inner Mongolia Electric Power Research Institute, Hohhot 010020, China)

**Abstract:** High penetration of renewable energy in power grid challenges power system operation and stability evaluation, due to the fast dynamic behaviors of power electronic devices. The accurate broadband impedance measurement is one of the critical aspects of power system stability analysis. The impedance measurement method of injecting harmonics to the actual power system may bring the risk of instability. The hardware-in-the-loop simulation technology can achieve accurate broadband impedance measurement with lower cost and risk. The computing accuracy and simulation scale of real-time simulators depend on the computing power of the target computer. As the demands of large-scale power system increase, a single real-time simulation system may not meet the requirements. Co-simulation between multiple real-time simulators is an effective way to increase the scale of the simulation. This paper proposed an online impedance analysis co-simulation framework based on the CloudPSS-RT and RT-Lab platform and verified the accuracy and effectiveness of the co-simulation by constructing a PV and DFIG power generation system.

**Key words:** impedance measurement; frequency sweeping; co-simulation; CloudPSS-RT; RT-Lab

### 0 引言

高比例的可再生能源的消纳和源-网-荷核心设备的“电力电子化”变革, 让电力系统正在形成“高比例可再生能源”和“高比例电力电子设备”的“双高”发展趋势<sup>[1-4]</sup>, 高渗透率下的电力子发电装备与电网的交互影响加剧, 次同步振荡、高频谐振等现象严重制约了大规

模新能源的可靠消纳<sup>[5-7]</sup>。基于频域阻抗分析法建立新能源发电系统的阻抗模型<sup>[8-12]</sup>, 并结合阻抗稳定性判据评估系统稳定性<sup>[13-14]</sup>, 是发现和解决“双高”电力系统稳定性问题的重要方法。而验证所建阻抗模型准确性最简单有效的方法是阻抗测量, 其中谐波扰动注入法可实现较为准确的阻抗测量。常用的谐波扰动注入法包括了电压扰动注入和电流扰动注入<sup>[15]</sup>, 通过向待测系统和电网之间串联、并联注入宽频带电压扰动、电流扰动, 得

\* 基金项目: 内蒙古电力集团(有限)责任有限公司科技项目(内电科技[2021]3号)

到待测装备侧的扰动响应,经阻抗计算得到宽频带阻抗特性曲线。

直接向电力系统注入谐波进行测量可能会带来失稳的风险,而基于半实物仿真技术可以以较低的成本与风险实现较为准确的宽频带阻抗测量。电力系统实时仿真是数字仿真技术和高性能计算技术的产物[16],其计算性能和仿真规模取决于目标计算机的计算能力。同等计算能力下,仿真步长选取得越小,单位时间内的计算量就越大,能实现的仿真规模就越小,仿真精度与规模难以兼顾[17-20]。随着电力系统仿真规模需求的不断提高,单一的实时仿真系统越来越难以满足大规模仿真的要求。使用多个实时仿真器进行联合仿真是提高仿真规模的有效途径[21]。

本文提出了一种基于 CloudPSS-RT 和 RT-Lab 联合实时仿真的在线阻抗分析装置,并在此平台上搭建了风力发电系统与光伏发电系统并进行了仿真。

### 1 基于联合实时仿真平台的在线阻抗分析装置系统架构

图 1 所示为在线阻抗分析装置的系统框架,包括了由 CloudPSS-RT 和 RT-Lab 组成的联合仿真平台与 Impedance Scanner。CloudPSS-RT 和 RT-Lab 各包括一台上位机和一台目标机。上位机用于仿真建模与监控数据,并通过代码转换将模型转化为 C 代码传输至目标机中实时运行。CloudPSS-RT 实时仿真目标机通过使用 SFP(Small Form-factor Pluggable)接口与 RT-Lab 目标机进行连接,并基于 Aurora 收发器协议实现超低延时的高速通信。Impedance Scanner 通过 FPGA 高速通信模块连接数字量/模拟量转换板卡与实时仿真器进行实时数据交换,向待测系统注入扰动或监测待测系统的扰动响应。

图 2 所示为 Impedance Scanner 的在线阻抗分析装置的软件模块组成,Impedance Scanner 由基于 CloudPSS SimStudio 的仿真模块、基于 CloudPSS FuncStudio 的计算

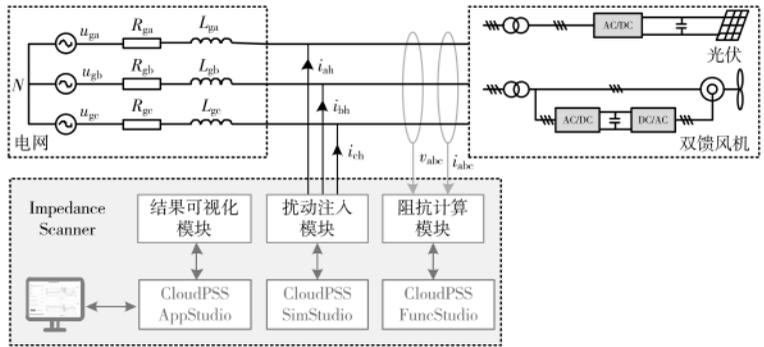


图 2 在线阻抗分析装置的软件模块图

模块与基于 CloudPSS AppStudio 的可视化模块构成。仿真模块用于产生特定的阻抗扫描信号注入待测系统,计算模块用于计算待测系统的扰动响应以得到待测系统宽频带阻抗特性曲线,可视化模块用于阻抗扫描的控制和可视化展示。

### 2 技术基础

#### 2.1 基于传输线解耦法的网络划分方法

传输线解耦法是最经典的接口解耦方法之一。在电磁暂态仿真中,如果电气信号在传输线中的传播延时大于一个仿真步长  $\Delta T$ ,则传输线两边的子网可以被划分为相对独立的子系统。传输线的等效方法如图 3 所示,传输线的每一端口都被等效为阻抗和受控电流源并联的形式。

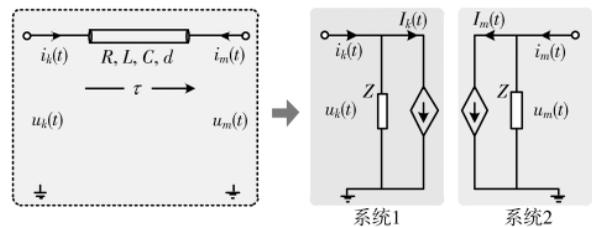


图 3 基于传输线解耦法的网络划分方法

基于 TLM(Transmission Line Model)传输线解耦法,本文建立的联合仿真网络划分架构如图 4 所示。在仿真开始时,模块输出初始值(通常为 0),直到仿真时间超过时间延迟参数。然后,模块开始输出延迟输入。块的延迟必

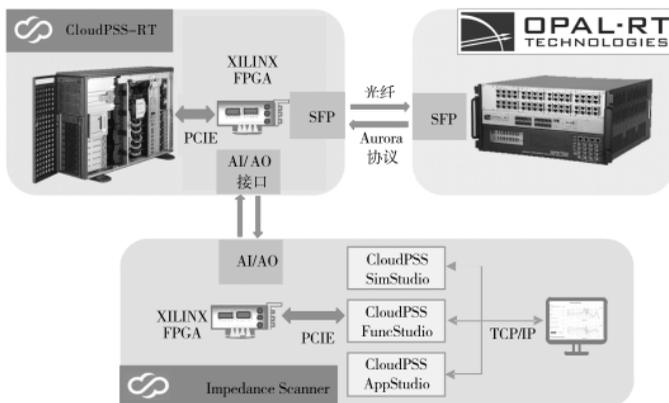


图 1 基于联合实时仿真的在线阻抗分析装置的系统架构图

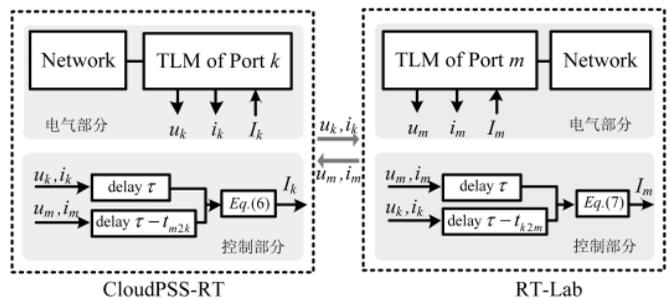


图 4 基于传输线解耦的联合仿真拓扑图

须大于或等于 0,即需要满足联合仿真下的传输线长度。

## 2.2 在线阻抗扫频流程图

图 5 所示为测量三相交流系统中在线阻抗扫描的详细流程图,首先通过仿真模块注入某频率的电压或电流扰动,利用计算模块获取待测系统的扰动响应并计算出该频率处的待测系统阻抗;然后保存该频率点的阻抗值,进行下一个频率的扰动注入,直到完成所有频率扰动的注入。

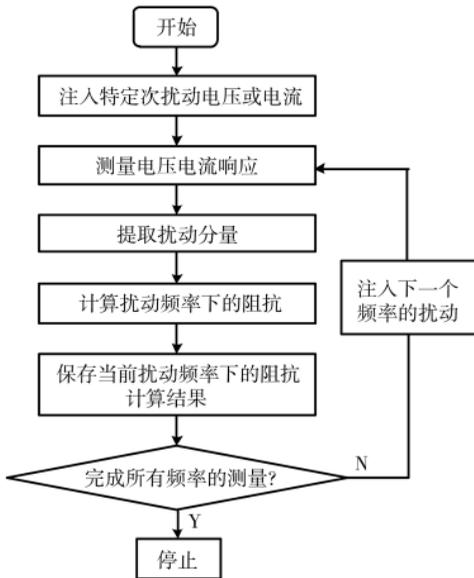


图 5 在线阻抗扫频流程图

## 3 在线阻抗分析装置平台设计

在线阻抗分析装置的可视化界面如图 6 所示,用户可自定义扫频算例、扫频频率范围,以及 1~100 Hz、100~1 000 Hz、1 000~10 000 Hz 各个频率范围的频率增量,实现扫频精度与效率的平衡。

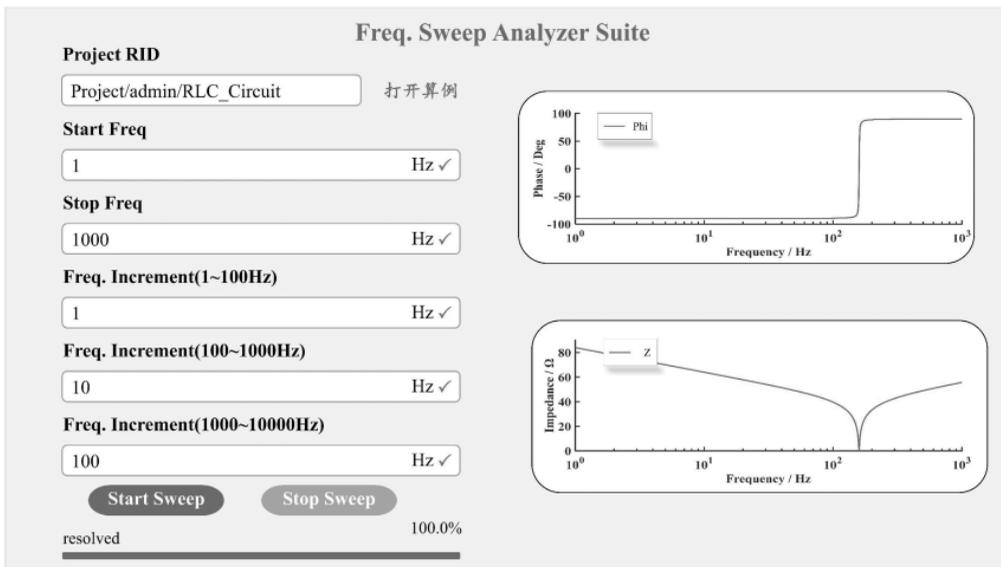


图 6 在线阻抗分析装置的软件界面

如图 7 所示,Online Impedance Scanner 主要基于 Cloud-PSS SimStudio、CloudPSS FuncStudio 与 CloudPSS AppStudio 三个平台设计,CloudPSS AppStudio 应用平台拥有丰富的数据可视化及交互控件,可实现低代码应用高效开发;CloudPSS FuncStudio 计算平台支持多种自定义应用内核灵活接入及调度,可实现用户自定义算法的高效接入;CloudPSS SimStudio 仿真平台拥有强大的项目模型与计算任务管理能力,可实现大规模电磁暂态批量仿真。

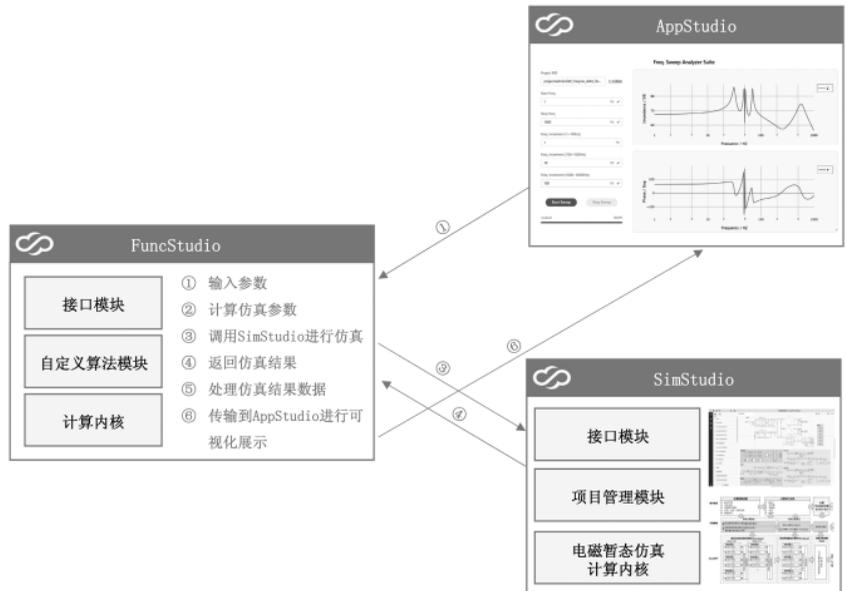


图 7 在线阻抗分析装置的平台设计

本文所设计的阻抗分析装置的平台拥有在线频率扫描与离线频率扫描两种模式。离线频率扫描模式主要包括 5 个步骤:(1)用户在 AppStudio 输入自定义参数,通过通信模块传输参数的 json 文件到 FuncStudio;(2)Func-

Studio 根据输入的参数计算出仿真所需要的参数,并将仿真参数 json 文件传输到 SimStudio;(3)SimStudio 调用 EMTF 仿真内核进行仿真,并将所需 result 数据返回 FuncStudio;(4)FuncStudio 对 SimStudio 返回的端口扰动响应电压电流数据进行处理,计算扰动频率下的系统阻抗;(5)将所得待测系统宽频带阻抗特性曲线传输到 AppStudio 进行可视化展示。在线频率扫描模式下,SimStudio 仅作为扰动注入信号发生器,而 FuncStudio 所处理的端口扰动响应电压电流数据也由 FPGA 实时通信模块输入。

4 测试用例

4.1 离线频率扫描模式验证

为了验证本文所提出的离线扫频工具的有效性,本节利用 PSCAD 自带元件 Harmonic Impedance Component 与离线频率扫描工具进行了对比验证。如图 8 所示,本算例在 RLC 电路的出口交流侧并联了一个谐波电压源,该谐波电压源的幅值为额定电压的 1%,频率从 1 Hz 以 1 Hz 步长增加到 1 000 Hz。

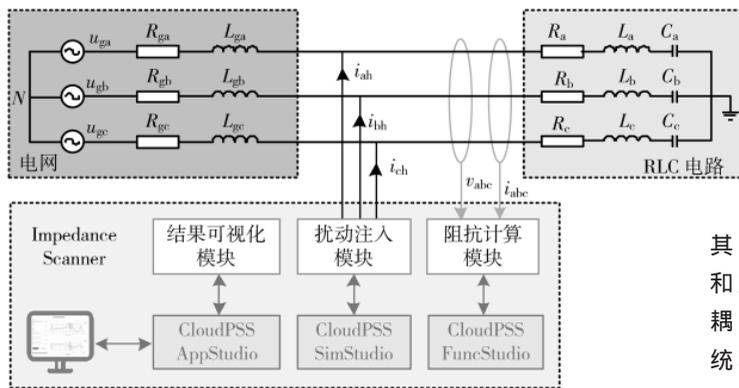


图 8 RLC 电路离线阻抗扫描的系统结构

系统关键参数如表 1 所示,所有测试的仿真步长均为 50 μs。

表 1 RLC 电路基本参数

参数	值	参数	值
a 相电阻/Ω	1	额定线电压/kV	0.5
a 相电感/H	0.1	扰动分量额定电压/kV	0.005
a 相电容/μF	10	系统频率/Hz	50
网侧 a 相电感/H	0.001	网侧 a 相电阻/Ω	0.01

如图 9 所示,Impedance Scanner 离线频率扫描的阻抗和相角曲线与 PSCAD 的阻抗曲线匹配良好,误差很小,验证了 CloudPSS 离线频率扫描工具的准确性。

PSCAD 的阻抗分析元件具有很高的运算速度,但由于该元件会对原仿真拓扑进行简化,例如认为所有的开关元件都处于关闭状态,同步机、感应电机等效为接地电感,电压源等效为开路等,因此无法实现对某一复杂电力拓扑如风机或光伏发电系统的在线扫频分析。

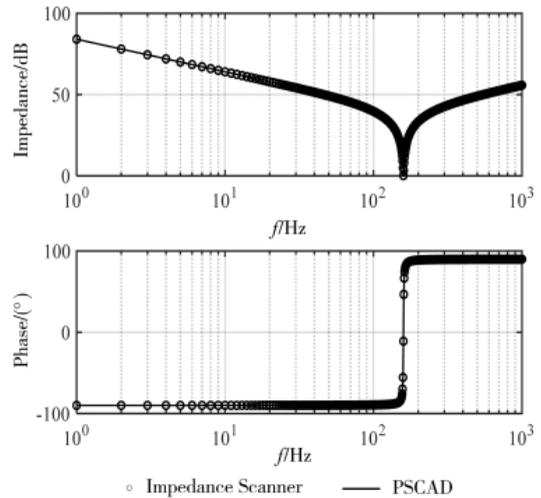


图 9 Impedance Scanner 离线频率扫描与 PSCAD 阻抗分析结果对比

4.2 双馈风力发电系统的在线扫频验证

为了验证本文所提出的在线扫频工具的有效性,基于上述理论,构建了基于 CloudPSS-RT 和 RT-Lab 联合实时仿真平台,建立了双馈风机与光伏发电系统,通过对比在线频率扫描与离线频率扫描两种模式下的仿真结果,验证联合实时仿真平台与在线阻抗分析装置的有效性与准确性。

双馈风力发电系统的拓扑结构如图 10 所示,其中包含 DFIG、三相背对背变流器、变压器、输电线路和交流电网(IEEE-33 节点配电网)。基于 TLM 传输线解耦法对系统进行网络划分,在 RT-Lab 中构建 DFIG 系统和一半传输线,在 CloudPSS-RT 中构建交流电网和另一半传输线。

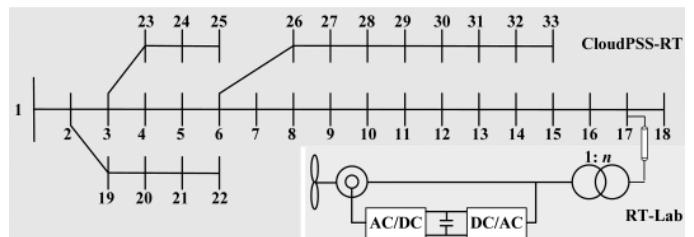


图 10 双馈风力发电系统联合仿真架构

系统关键参数如表 2 所示。

表 2 双馈风力发电系统基本参数

参数	值	参数	值
额定线电压/kV	12.6	励磁电抗/p.u.	2.9
定子电阻/p.u.	0.03	定子漏抗/p.u.	0.18
转子电阻/p.u.	0.016	转子漏抗/p.u.	0.16
直流电容 /mF	10	系统频率/Hz	50
变压器匝数比	23:420	传输线总长度/km	15
变压器额定容量/MVA	10	传输线总电容/p.u.	0.01
传输线总电感/p.u.	0.3	传输线总电阻/p.u.	0.4

如图 11 所示,分别使用联合仿真和离线仿真测试了双馈电机系统在不同频率下的阻抗特性曲线。可以看出,联合仿真的宽带阻抗特性曲线与离线仿真的宽带阻抗特性曲线吻合较好,验证了联合仿真平台和在线频率扫描装置的准确性。

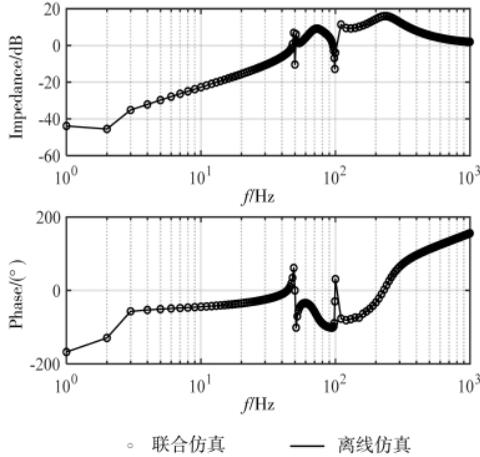


图 11 基于联合仿真与离线仿真的双馈风力发电系统阻抗测试

#### 4.3 光伏发电系统的在线扫频验证

两级光伏发电系统的拓扑结构如图 12 所示,其中包含光伏板、升压变流器、三相 H 桥逆变器、变压器、输电线路和交流电网(IEEE-33 节点配电网)。

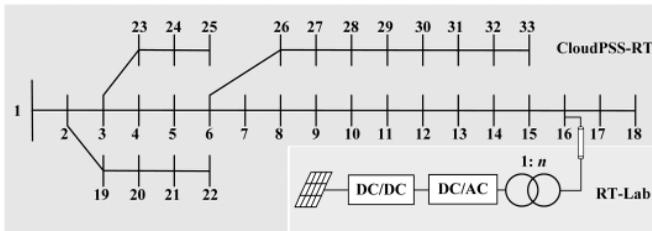


图 12 光伏发电系统联合仿真架构

系统关键参数见表 3。

表 3 光伏发电系统基本参数

参数	值	参数	值
额定线电压/kV	12.6	额定直流电压/kV	0.75
Boost 电路电感/mH	0.5	逆变器滤波电感/mH	1
直流电容/mF	5	系统频率/Hz	50
变压器匝数比	5:84	传输线总长度/km	15
变压器额定容量/MVA	10	传输线总电容/p.u.	0.01
传输线总电感/p.u.	0.3	传输线总电阻/p.u.	0.4

如图 13 所示,分别使用联合仿真和离线仿真测试了光伏系统在不同频率下的阻抗特性曲线。可以看出,TLM 传输线解耦法并没有改变系统的阻抗特性,验证了联合仿真中网络划分的有效性。

#### 4.4 基于联合仿真平台的在线扫频计算效率验证

为了验证本文所提出的在线扫频工具的计算性

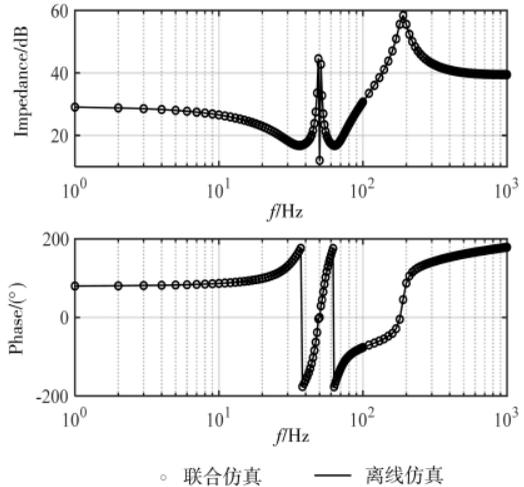


图 13 基于联合仿真与离线仿真的光伏发电系统阻抗测试

能,基于图 12 所示的光伏发电系统联合仿真架构,分别测试了不同扫频次数下在线频率扫描与离线频率扫描两种模式的仿真时长。各个扫频次数下的仿真耗时统计结果如图 14 所示,可以看出,基于联合仿真的在线阻抗扫描装置加速比约为 1:20,计算效率相对于离线仿真装置大幅度提升。

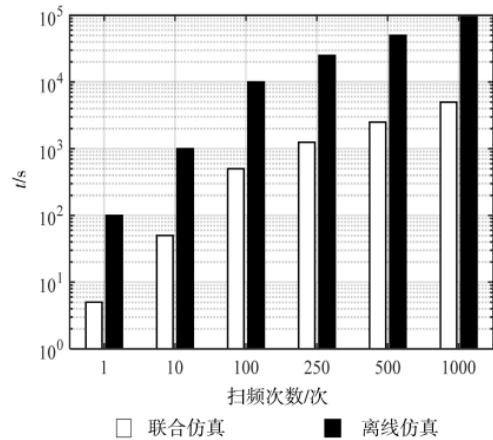


图 14 基于联合仿真与离线仿真的扫频计算效率对比

## 5 结论

本文建立了基于 CloudPSS-RT 和 RT-Lab 联合实时仿真的在线阻抗分析装置,并设计了离线频率扫描与基于联合实时仿真的在线频率扫描两种工作模式。通过对离线频率扫描模式和 PSCAD 频率扫描的仿真结果,验证了离线频率扫描的准确性。进一步,通过对比在线阻抗分析和离线阻抗分析的结果,验证了联合仿真平台与在线频率扫描装置的准确性。

### 参考文献

- [1] 董晓亮,谢小荣,杨煜,等.双馈风机串补输电系统次同步谐振影响因素及稳定区域分析[J].电网技术,2015,39(1):5.
- [2] WU W, ZHOU L, CHEN Y, et al. Sequence-impedance-

- based stability comparison between VSGs and traditional grid-connected inverters[J].IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34: 46-52.
- [3] DENG X, LI H, YU W, et al. Frequency observations and statistic analysis of worldwide main power grids using FNET/GridEye[C]//2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2019: 1-5.
- [4] 张鹏, 毕天姝, 贺静波. 基于模态电流注入方法抑制次同步谐振的阻尼控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(23): 6011-6017.
- [5] DENG X, BIAN D, SHI D, et al. Impact of low data quality on disturbance triangulation application using high-density PMU measurements[J]. IEEE Access, 2019, 7: 105054-105061.
- [6] DENG X, BIAN D, SHI D, et al. Line outage detection and localization via synchrophasor measurement[J]. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2019: 3373-3378.
- [7] 谢小荣, 王路平, 贺静波, 等. 电力系统次同步谐振/振荡的形态分析[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1043-1049.
- [8] ZHANG S, JIANG S, LU X, et al. Resonance issues and damping techniques for grid-connected inverters with long transmission cable[J]. IEEE Trans. Power Electron., 2014, 29: 110-120.
- [9] JIAN S. Small-signal methods for AC distributed power systems—a review[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24: 2545-2554.
- [10] LIAO Y, LIU Z, ZHANG G, et al. Vehicle-grid system modeling and stability analysis with forbidden region-based criterion[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32: 3499-3512.
- [11] CESPEDDES M, SUN J. Impedance modeling and analysis of grid-connected voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29: 1254-1261.
- [12] 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.
- [13] JIAN S. Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26: 3075-3078.
- [14] JAKSIC M, ZHIYU S, CVETKOVIC I, et al. Wide-bandwidth identification of small-signal dq impedances of AC power systems via single-phase series voltage injection[C]// Proceedings of 2015 17th European Conference on Power Electronics and Applications, 2015: 1-10.
- [15] ROINILA T, VILKKO M, SUN J. Online grid impedance measurement using discrete-interval binary sequence injection[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2: 985-993.
- [16] SUN Z, LIU M, LI L, et al. Research on the AC and DC hybrid power system simulation based on RTDS[C]//2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), 2020: 2324-2329.
- [17] JALILI-MARANDI V, ROBERT E, LAPOINTE V, et al. A real-time transient stability simulation tool for large-scale power systems[C]//Power and Energy Society General Meeting, 2012: 1-7.
- [18] DENG X, JIANG Z, SUNDARESH L, et al. A time-domain electromechanical co-simulation framework for power system transient analysis with retainment of user defined models[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 125: 106506.
- [19] DENG X, BIAN D, WANG W, et al. Deep learning model to detect various synchrophasor data anomalies[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14: 5739-5745.
- [20] SONG X, CAI H, JIANG T, et al. Research on performance of real-time simulation based on inverter-dominated power grid[J]. IEEE Access, 2021, 9: 1137-1153.
- [21] LAUSS G, STRUNZ K. Multirate partitioning interface for enhanced stability of power hardware-in-the-loop real-time simulation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66: 595-605.
- (收稿日期: 2021-12-08)
- 作者简介:  
曹斌(1981-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 电网电磁暂态、新能源电力系统。  
原帅(1990-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 电力系统、新能源并网特性。  
辛东昊(1983-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 新能源并网特性测试分析。
-   
扫码下载电子文档
- (收稿日期: 2021-12-06)
- 作者简介:  
刘世超(1995-), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向: 系统监控与分析、Infiniband 网络。  
杨斌(1992-), 男, 博士研究生, 工程师, 主要研究方向: 文件系统、智能存储。  
刘卫国(1975-), 通信作者, 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 高性能计算、大数据处理与分析, E-mail: weiguo.liu@sdu.edu.cn。
-   
扫码下载电子文档

(上接第 52 页)

ACM Symposium on Cloud Computing, 2019: 193-205.

- [13] CHEN S, TANG X, WANG H, et al. Towards scalable and reliable in-memory storage system: a case study with Redis[C]//2016 IEEE Trustcom/BigDataSE/ISPA. IEEE, 2016: 1660-1667.
- [14] 杨斌, 刘世超, 邵明山, 等. Beacon+: 面向 E 级超级计算机的轻量级端到端 I/O 性能监控与分析诊断系统[C]//CCF HPC China, 2021: 1-12.

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所