DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.3.212　　**中图分类号**：TM46　　**文献标志码**：A

基于谐振分流的单相串联型大功率阻抗测量装置

张春林，马俊鹏(中国电源学会会员)，王顺亮，刘天琪

(四川大学电气工程学院，成都 610065)

摘要：串联型阻抗测量装置SIMD(series impedance measurement device)通过注入电压扰动测量新能源并网逆变器的阻抗。然而，待测逆变器的额定基波电流会流过SIMD，限制其开关频率。为此，提出了基于谐振分流的串联型阻抗测量装置，所提拓扑结构及控制策略在保证5 Hz~1 kHz范围内阻抗测量精度的基础上，实现了基波电流基本不流过SIMD，使SIMD只承受较小的扰动电流的目标。同时，采用基于单相电压扰动注入的阻抗测量方法，实现三相逆变器阻抗测量，提高了装置能量密度及测量效率。最后，通过半实物实验验证了所提拓扑及其控制策略的有效性。

关键词：宽频振荡；阻抗测量装置；单相扰动电压注入；谐振分流

Single-phase Series High-power Impedance Measurement Device Based on Resonance Shunt

ZHANG Chunlin, MA Junpeng, *Member*, *CPSS*, WANG Shunliang, LIU Tianqi

(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The series impedance measurement device (SIMD) measures the impedance of a new energy grid-connected inverter by injecting voltage disturbances. However, the rated fundamental current of the inverter under test will flow through the SIMD and thus limit the switching frequency. To address this issue, an SIMD based on resonance shunt is proposed. The proposed topology and control strategy ensure the impedance measurement accuracy in the range of 5 Hz–1 kHz, and achieve a goal that the fundamental current hardly flows through the SIMD and thus the SIMD only bears a small disturbance current. At the same time, an impedance measurement method based on single-phase voltage disturbance injection is adopted to realize the impedance measurement of a three-phase inverter, which improves the device's energy density and measurement efficiency. Finally, the validity of the proposed topology and control strategy was verified by hardware-in-the-loop experiments.

Keywords: Broadband oscillation; impedance measurement device; single-phase disturbance voltage injection; resonance shunt

随着新能源发电容量的快速增长，电力电子设备与电网的耦合加剧，使得宽频振荡事故频发[1-2]。阻抗分析法是分析此类宽频振荡现象的重要工具[3-4]，其将并网逆变器-电网耦合系统视为2个独立的子系统，基于子系统的阻抗模型，利用Nyquist等稳定性判据分析互联系统的稳定性。阻抗测量方法被广泛应用于获取新能源并网逆变器的阻抗模型。

已有研究大多在公共连接点PCC(point of common coupling)注入测量频率及其耦合频率的三相对称电压或电流扰动，通过提取PCC点扰动电压及扰动电流分量计算待测系统阻抗，且当耦合频率为负时需改变扰动电源相序[5]。单相注入扰动可等效为同时向待测系统注入三相正序扰动和三相

收稿日期：2023-04-21；**修回日期**：2023-11-03；**录用日期**：2023-12-13；**网络首发日期**：2024-04-22

基金项目：四川省自然科学基金资助项目(2022NSFSC1904)
This work is supported by Natural Science Foundation of Sichuan Province under the grant 2022NSFSC1904

负序扰动，无需改变电源相序，在保证测量结果精确的基础上提高了装置能量密度及阻抗测量效率[6-7]。因此本文采用单相注入扰动的阻抗测量方法，测量三相逆变器输出阻抗。

阻抗测量装置可分为串联电压注入[8-11]和并联电流注入[12-13]。与 PCC 点并联的并联型阻抗测量装置向待测系统注入扰动电流。由于并联分流，当电网阻抗远低于待测系统时，几乎所有扰动电流都流入电网，待测系统没有受到扰动使得阻抗测量不准确，因此并联型阻抗测量装置适用于高电网阻抗的情况[8-9,14]。串联型阻抗测量装置 SIMD(series impedance measurement device)串联接入电网与待测系统之间，通过向待测逆变器注入扰动电压，测量其等效阻抗[15]。由于串联分压，当电网阻抗远大于待测系统时，几乎所有扰动电压均降落在电网上，因此 SIMD 适用于低电网阻抗的情况[8-9,14]。新能源发电系统常与强电网相连，SIMD 常用于测量其等效阻抗。由于 SIMD 串联接入电网，导致 SIMD 需要耐受待测系统的额定基波电流。当大量基波电流流过 SIMD 时，损耗增加，导致开关设备的温度上升，限制了 SIMD 的开关频率[16]，增加了 SIMD 的成本及体积。

为解决上述问题，本文提出了基于谐振分流的单相串联型阻抗测量装置。通过引入谐振支路，在不影响阻抗测量精度的前提下，减少流经 SIMD 的基波电流。所提拓扑及其控制策略有效抑制了流经 SIMD 的基波电流，提高了开关频率和装置能量密度，同时保证了阻抗测量精度。首先描述基于谐振分流的单相串联型大功率阻抗测量装置的测量原理及其数学模型；其次描述所提拓扑的控制策略；再次介绍待测三相逆变器的复矢量阻抗模型；然后对所提拓扑及其控制策略进行了半实物实验验证；最后对全文进行了总结。

1　装置测量原理及数学模型

1.1　IMD 的测量原理

单相扰动电压注入测量三相并网逆变器等效阻抗的测量装置示意如图 1 所示，阻抗测量装置 IMD(impedance measurement device)串联接入电网与待测系统。通过单相注入扰动电压，采集 PCC 点电压(u_{oa}、u_{ob}、u_{oc})及电流(i_{ga}、i_{gb}、i_{gc})，电压、电流数据经过处理后即可获得待测三相并网逆变器的阻抗模型。图中：u_g为电网电压；Z_g为电网阻抗。

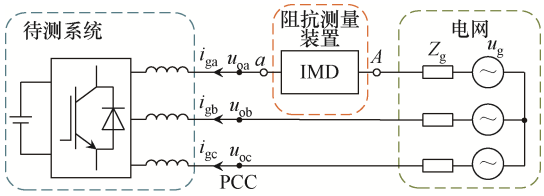


图 1　阻抗测量装置示意

Fig. 1 Schematic of impedance measurement device

图 2 为基于谐振分流的串联型阻抗测量装置的结构，通过引入 LC 谐振支路，基频电流几乎不流过 SIMD。图中：L_f为滤波电感；C_f为滤波电容；L_2、C_2分别为谐振支路的电感、电容；R_1、R_2、R_c为对应支路的等效电阻；v_{dc}为逆变器直流侧电压；u_{inv}为 H 桥逆变器输出电压；i_{SIMD}为流过 SIMD 的电流；u_c为 SIMD 输出电压；i_1为流过滤波电感的电流；i_2为流过谐振支路的电流。LC 谐振支路的谐振频率为电网频率ω_0，可表示为

$$L_2C_2 = 1/\omega_0^2 \tag{1}$$

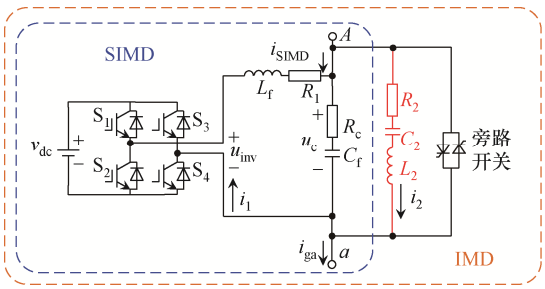
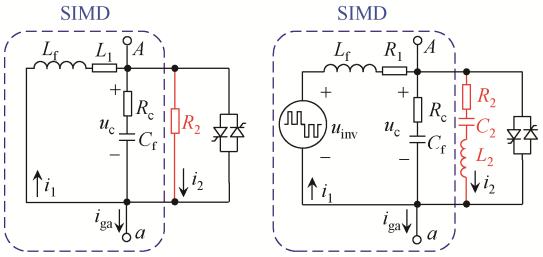


图 2　IMD 结构

Fig. 2 Structure of IMD

理想情况下，图 2 中的 H 桥逆变器可等效为谐波源。根据叠加定理，分析 IMD 的基频等效回路时，谐波源被短路，如图 3(a)所示。此时谐振支路阻抗等于电阻 R_2，远小于 SIMD 的阻抗，SIMD 在基频处被 LC 谐振支路短路，因此基波电流几乎不流过 SIMD。图 3(b)为 IMD 的扰动频率等效回路，基波电源 u_g 被短路，此时，谐振支

路阻抗较大，可视为开路，不影响 SIMD 的扰动电压注入。



(a) 基频等效回路 (b) 扰动频率等效回路

图 3 IMD 的等效回路

Fig. 3 Equivalent circuits of IMD

1.2 IMD 的数学模型

由图 2 得到 IMD 的状态空间方程为

$$\dot{\boldsymbol{x}}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{A}_1 & \boldsymbol{A}_2\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\cdot\boldsymbol{x}+\boldsymbol{B}\boldsymbol{u} \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{x}=\begin{bmatrix}i_1 & u_{\mathrm{cf}} & i_2 & u_{\mathrm{c2}}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$，$u_{\mathrm{cf}}$、$u_{\mathrm{c2}}$ 分别为电容 C_{f} 和 C_2 的电压；$\boldsymbol{u}=\begin{bmatrix}u_{\mathrm{inv}} & i_{\mathrm{ga}}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$；$\boldsymbol{A}$、$\boldsymbol{B}$ 为状态矩阵，

$$\boldsymbol{A}_1=\begin{bmatrix}-\dfrac{R_1+R_{\mathrm{c}}}{L_{\mathrm{f}}} & 1/C_{\mathrm{f}}\\ -\dfrac{1}{L_{\mathrm{f}}} & 0\\ \dfrac{R_{\mathrm{c}}}{L_{\mathrm{f}}} & -1/C_{\mathrm{f}}\\ 0 & 0\end{bmatrix},\quad \boldsymbol{A}_2=\begin{bmatrix}\dfrac{R_{\mathrm{c}}}{L_2} & 0\\ 1/L_2 & 0\\ -\dfrac{R_2+R_{\mathrm{c}}}{L_2} & 1/C_2\\ -\dfrac{1}{L_2} & 0\end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}1/L_{\mathrm{f}} & -R_{\mathrm{c}}/L_{\mathrm{f}}\\ 0 & 1/C_{\mathrm{f}}\\ 0 & R_{\mathrm{c}}/L_2\\ 0 & 0\end{bmatrix}。$$

由式(2)可得，IMD 在静止坐标系下的数学模型如图 4 所示。

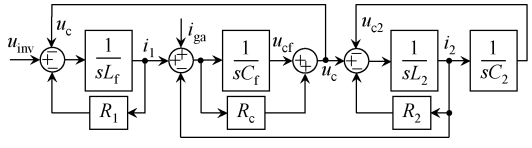


图 4 IMD 的数学模型

Fig. 4 Mathematical model of IMD

2 控制策略

为实现宽频扰动注入，本拓扑的控制目标设定为：①抑制流过滤波电感电流 i_1 的基频分量；②滤波电容电压 u_{c} 可输出在 5 Hz~1 kHz 频率范围内幅值可控的扰动电压分量。针对控制目标，本文采用基于比例谐振 PR(proportional resonance)控制的双闭环控制，如图 5 所示。

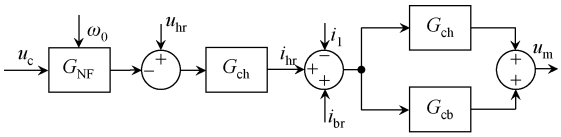


图 5 双闭环控制策略

Fig. 5 Double closed-loop control strategy

滤波电容电压 u_{c} 通过基频陷波器滤除基频电压分量后与扰动电压参考值 u_{hr} 作差，其偏差量经电压外环 PR 控制得到输出电流内环的扰动电流参考 i_{hr}。i_{hr} 与基波电流参考 i_{br} 之和作为电流内环的参考信号，其与滤波电感电流 i_1 的误差信号，通过分别控制扰动电流与基波电流的 2 个并联 PR 控制生成调制波 u_{m}。谐波 PR 控制器和基波 PR 控制器的传递函数可表示为

$$\begin{cases}G_{\mathrm{ch}}=K_{\mathrm{Ph}}+\dfrac{K_{\mathrm{Rh}}s}{s^2+\omega_h^2}\\ G_{\mathrm{cb}}=K_{\mathrm{Pb}}+\dfrac{K_{\mathrm{Rb}}s}{s^2+\omega_0^2}\end{cases} \tag{3}$$

式中：ω_h 为扰动电压角频率，h 为谐波次数；K_{Ph} 和 K_{Pb} 为比例系数；K_{Rh} 和 K_{Rb} 为谐振系数。

为实现抑制流过 SIMD 基波电流的控制目标，将基波电流参考值设为 0。扰动电压参考 u_{hr} 的幅值 U_{hm} 为待测系统稳态电压的 1%~10%，可表示为

$$\begin{cases}i_{\mathrm{br}}=0\\ u_{\mathrm{hr}}=U_{\mathrm{hm}}\sin(\omega_h t)\end{cases} \tag{4}$$

电阻 R_2 的存在导致谐振支路在基频处的阻抗不为 0，u_{c} 上会有基波压降。使用陷波器滤除 u_{c} 的基频分量，使得 i_{hr} 的基频分量为 0，以此保证内环的电流参考中没有基频分量，陷波器的传递函数为

$$G_{\mathrm{NF}}=\frac{s^2+2\xi_2\omega_0 s+\omega_0^2}{s^2+2\xi_1\omega_0 s+\omega_0^2} \tag{5}$$

式中，ξ_1 和 ξ_2 为陷波系数。

为了限制流过 SIMD 的基波电流，可以通过双

闭环控制来增加 SIMD 的基频等效阻抗。所提拓扑及控制策略的数学模型如图 6 所示。根据图 6 可以得到基于所提控制策略的系统阻抗模型为

$$Y_{\mathrm{SIMD}}=\frac{i_{\mathrm{ga}}-i_2}{u_{\mathrm{c}}}=\frac{1}{Z_{C_{\mathrm{f}}}}+\frac{1+G_{ci}G_{\mathrm{d}}G_{\mathrm{NF}}G_{cv}}{Z_{L_{\mathrm{f}}}+G_{ci}G_{\mathrm{d}}} \tag{6}$$

式中：$Z_{L_{\mathrm{f}}}$ 和 $Z_{C_{\mathrm{f}}}$ 分别为滤波电感和滤波电容所在支路的阻抗；G_{cv} 为 IMD 电压外环传递函数；G_{ci} 为 IMD 电流内环传递函数；G_{d} 为控制器延时，$G_{\mathrm{d}}=\mathrm{e}^{-1.5T_{\mathrm{s}}s}$，$T_{\mathrm{s}}$ 为采样时间。

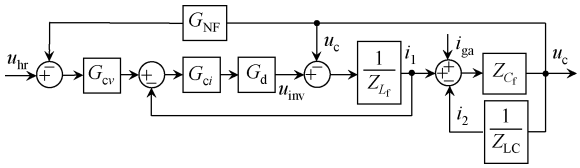


图 6　所提拓扑及其控制策略的数学模型

Fig. 6 Mathematical model of proposed topology and its control strategy

图 7 为注入 10 Hz 扰动电压时，SIMD 的等效导纳幅值$|Y_{\mathrm{SIMD}}|$和谐振支路导纳幅值$|Y_{\mathrm{LC}}|$。可以看出，50 Hz 处的$|Y_{\mathrm{SIMD}}|$远小于$|Y_{\mathrm{LC}}|$。由于支路导纳越大，流过的电流越大，因此，流过 SIMD 的基波电流远小于流过谐振支路的基波电流，进而从理论上验证了所提控制策略的正确性。

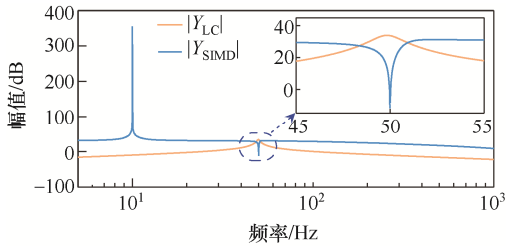


图 7　注入 10 Hz 扰动电压时，SIMD 和谐振支路的导纳比较

Fig. 7 Comparison of admittance between SIMD and resonance branch when 10 Hz disturbance voltage is injected

3　待测系统的阻抗模型

图 8 为采用定电流控制的三相并网逆变器结构，图中：L_1 为滤波电感；U_{dc} 为逆变器直流侧电压。逆变器输出电压经 PLL 环节得到电网相角 θ，逆变器输出电流经 Park 变换后得到电流的 dq 轴分量 $\boldsymbol{i}_{odq}$，其与电流参考 $\boldsymbol{I}_{odq\mathrm{ref}}$ 的误差信号经比例积分 PI(proportional integral)控制和反 Park 变换后得到调制波信号 u_{om}。基于三相定电流控制的并网逆变器的复矢量阻抗模型[17]为

$$\begin{bmatrix}\hat{\boldsymbol{i}}_{g\alpha\beta}\\ \mathrm{e}^{\mathrm{j}2\theta}\overline{\hat{\boldsymbol{i}}_{g\alpha\beta}}\end{bmatrix}=\underbrace{\begin{bmatrix}\boldsymbol{Y}_1(s) & \boldsymbol{Y}_2(s)\\ \boldsymbol{Y}_3(s) & \boldsymbol{Y}_4(s)\end{bmatrix}}_{\boldsymbol{Y}(s)}\begin{bmatrix}\hat{\boldsymbol{u}}_{o\alpha\beta}\\ \mathrm{e}^{\mathrm{j}2\theta}\overline{\hat{\boldsymbol{u}}_{o\alpha\beta}}\end{bmatrix} \tag{7}$$

式中：$\hat{\boldsymbol{i}}_{g\alpha\beta}$ 和 $\hat{\boldsymbol{u}}_{o\alpha\beta}$ 分别为电流和电压的 $\alpha\beta$ 轴小扰动分量；$\overline{\hat{\boldsymbol{i}}_{g\alpha\beta}}$ 和 $\overline{\hat{\boldsymbol{u}}_{o\alpha\beta}}$ 分别为 $\hat{\boldsymbol{i}}_{g\alpha\beta}$ 和 $\hat{\boldsymbol{u}}_{o\alpha\beta}$ 的共轭分量；$\boldsymbol{Y}(s)$ 为频率耦合导纳矩阵。

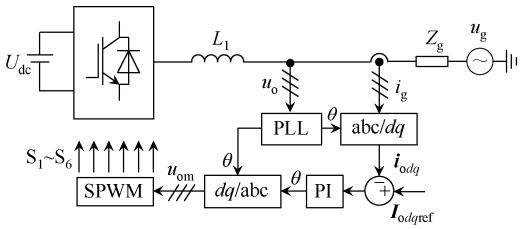


图 8　三相并网逆变器

Fig. 8 Three-phase grid-connected inverter

4　实验验证

为验证所提拓扑及其控制策略的正确性，按照图 1、图 2 和图 8 搭建实验电路，相关实验参数见表 1。在远宽能源实时仿真实验平台进行实验验证，实验平台如图 9 所示，其中主电路及待测新能源逆变器在硬件在环测试系统 HIL(hardware-in-the-loop)中运行，所提拓扑控制器及待测逆变器控制器在快速控制测试器平台 RCP(rapid control prototyping)中运行，I/O 板卡用于采集 PCC 点电压电流数据，示波器用于观测波形。

表 1　实验参数

Tab. 1 Parameters of experiment

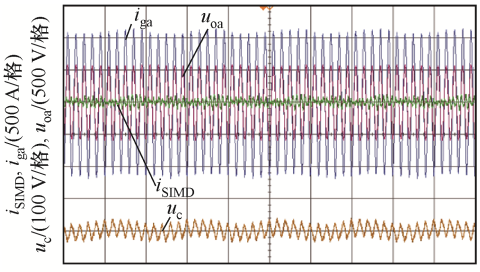
参数	数值	参数	数值
L_{f}/μH	40	L_1/μH	150
R_1/mΩ	10	f_{s}/kHz	10
C_{f}/μF	200	f_0/Hz	50
R_{c}/mΩ	0.1	U_{dc}/V	1 500
L_2/mH	2	v_{dc}/V	100
C_2/mF	5.1	u_{g}/V	563
R_2/mΩ	20	$\boldsymbol{I}_{odq\mathrm{ref}}$/A	1 183+j0



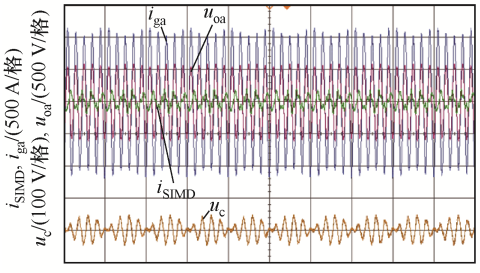
图 9 实时仿真实验平台

Fig. 9 Real-time simulation experimental platform

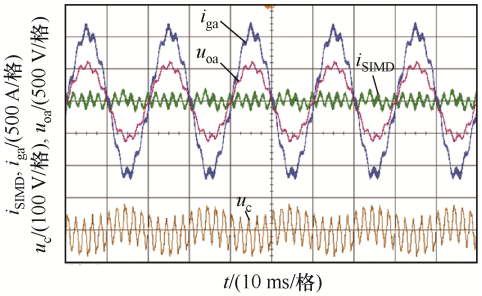
图 10 为注入扰动电压频率为 5 Hz、40 Hz、500 Hz、1 kHz 时，被测系统电压 u_{oa} 和电流 i_{ga}、SIMD 电压 u_c 和流过 SIMD 的电流 i_{SIMD} 的波形。可以看出，流经 SIMD 的基波电流远小于 i_{ga} 的基波电流。即使是注入基频附近即频率为 40 Hz 的扰动电压，也能达到满意的谐振分流效果。当没有谐振支路时，i_{ga} 与 i_{SIMD} 相等，所有电网电流都将流经 SIMD。



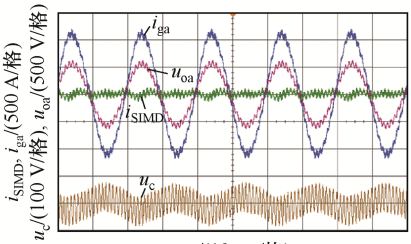
(a) 注入5 Hz电压



(b) 注入40 Hz电压



(c) 注入500 Hz电压



(d) 注入1 kHz电压

图 10 单相扰动电压注入实验波形

Fig. 10 Experimental waveforms under single-phase disturbance voltage injections

图 11 为有关 i_{SIMD} 和 u_c 的详细信息，其中下标 b 和 m 分别代表基频分量和峰值。可见，i_{SIMD} 的基频分量远小于额定基波电流 1 183 A，i_{SIMD} 的峰值电流也远低于 1 183 A，表明该方法有效抑制了流经 SIMD 的基波电流。SIMD 输出电压 u_c 的基波分量在不同的扰动注入频率下相同，说明通过谐振支路的基波电流被控制为恒定值。

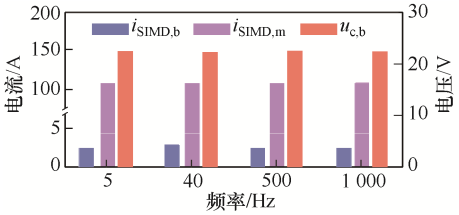
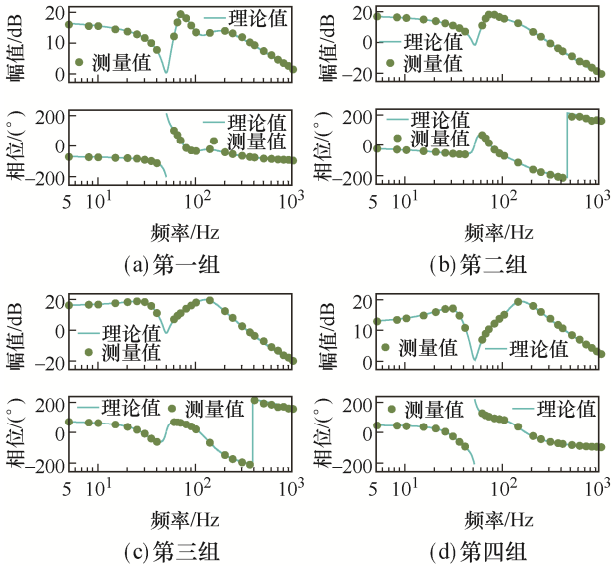


图 11 SIMD 电压电流分析

Fig. 11 Analysis of SIMD voltage and current

图 12 为待测三相并网逆变器等效导纳测量值



(a) 第一组　(b) 第二组

(c) 第三组　(d) 第四组

图 12 等效导纳的测量

Fig. 12 Measurement of equivalent admittance

与理论值的对比，从图中可得理论值与测量值基本吻合，验证了装置测量阻抗的有效性。

5　结语

本文提出 1 种基于谐振分流的单相串联型阻抗测量装置。通过实验结果可得，所提拓扑及控制策略可以明显抑制流过 SIMD 的基波电流；通过 SIMD 的峰值电流远低于待测逆变器的额定电流，从而可以提高开关频率以注入高频扰动；所提拓扑及其控制策略实现了高精度的三相并网逆变器阻抗测量。

参考文献：

[1] 孙华东, 许涛, 郭强, 等. 英国“8·9”大停电事故分析及对中国电网的启示[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6183-6191.
Sun Huadong, Xu Tao, Guo Qiang, et al. Analysis on blackout in Great Britain power grid on August 9th, 2019 and its enlightenment to power grid in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6183-6191. (in Chinese)

[2] Zhan Ying, Xie Xiaorong, Liu Huakun, et al. Frequency-domain modal analysis of the oscillatory stability of power systems with high-penetration renewables [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(3): 1534-1543.

[3] 徐海亮, 张伟杰, 林鸿彬. 一种提高并网逆变器无源性的阻抗重塑方法[J]. 电源学报, 2025, 23(3): 269-279.
Xu Hailiang, Zhang Weijie, Lin Hongbin. Impedance remodeling method for improving passivity of grid-connected inverters [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(3): 269-279. (in Chinese)

[4] Liao Yicheng, Wang Xiongfei, Wang Xiao. Frequency-domain participation analysis for electronic power systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(3): 2531-2537.

[5] Liao Yicheng, Wang Xiongfei. Stationary-frame complex-valued frequency-domain modeling of three-phase power converters [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 1922-1933.

[6] 张煜昕. 考虑频率耦合效应的三相变流器阻抗测量研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
Zhang Yuxin. Research on impedance measurement of three-phase converter considering frequency coupling [D]. Chongqing: Chongqing University, 2019. (in Chinese)

[7] 赵静波, 马俊鹏, 王顺亮, 等. 一种基于单相扰动注入的并网逆变器阻抗建模方法: CN114564821B[P]. 2024-05-31.

[8] 陈司懿, 胡海涛, 肖冬华, 等. 基于多电平滞环电流控制的牵引供电系统可控宽频带阻抗测量技术[J]. 电工技术学报, 2024, 39(9): 2771-2783.
Chen Siyi, Hu Haitao, Xiao Donghua, et al. Controllable broadband impedance measurement technology of traction power supply system based on multilevel hysteresis current control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(9): 2771-2783. (in Chinese)

[9] 赵静波, 周前, 杨文莉, 等. 阻抗测量的扰动电压自适应控制策略[J]. 电源学报, 2025, 23(1): 111-119.
Zhao Jingbo, Zhou Qian, Yang Wenli, et al. Adaptive control strategy of disturbance voltage for impedance measurement [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(1): 111-119. (in Chinese)

[10] Jaksic M, Boroyevich D, Burgos R, et al. Modular interleaved single-phase series voltage injection converter used in small-signal *dq* impedance identification [C]// 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Pittsburgh, PA, USA, 2014: 3036-3045.

[11] Liu Zeng, Cvetkovic I, Shen Zhiyu, et al. Imbalance mechanism and balancing control of DC voltages in a transformerless series injector based on paralleled H-bridge converters for AC impedance measurement [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(8): 8175-8189.

[12] 杨文莉, 马俊鹏, 孙瑞婷, 等. 基于扰动电压定向的自适应电流源侵入式序阻抗测量[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(12): 122-128.
Yang Wenli, Ma Junpeng, Sun Ruiting, et al. Intrusive sequence impedance measurement of adaptive current source based on disturbance voltage orientation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(12): 122-128. (in Chinese)

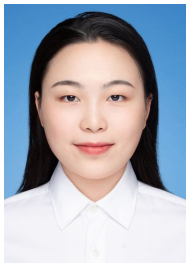
[13] Jakšić M, Shen Zhiyu, Cvetković I, et al. Medium-voltage impedance measurement unit for assessing the system stability of electric ships [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(2): 829-841.

[14] 潘鹏宇. 高速铁路车网系统宽频带阻抗测量方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.
Pan Pengyu. Reseaech on wideband impedance measurement for train-network system of high-speed railway [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022. (in Chinese)

[15] Zhou Sizhan, Wen Bo, Burgos R, et al. A seamless transition control method for series voltage injection of transformerless perturbation injectors [C]// 2021 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Phoenix, AZ, USA, 2021: 2510-2513.

[16] Wang Gangyao, Wang Fei, Magai G, et al. Performance comparison of 1 200 V 100 A SiC MOSFET and 1 200 V 100 A silicon IGBT [C]// 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Denver, CO, USA, 2013: 3230-3234.

[17] 冯麟, 马俊鹏, 王顺亮, 等. 考虑采样过程的换流器混杂宽频导纳模型[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(16): 6017-6027, 6176.
Feng Lin, Ma Junpeng, Wang Shunliang, et al. Hybrid broadband model of converter output admittance with digital sampling process [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(16): 6017-6027, 6176. (in Chinese)



张春林

作者简介：

张春林(1999—)，女，硕士。研究方向：电力电子与电力传动。E-mail：chunlinzhang1999@163.com。

马俊鹏(1990—)，男，中国电源学会会员，通信作者，博士，副教授。研究方向：并网变换器建模与控制。E-mail：jma@scu.edu.cn。

王顺亮(1987—)，男，博士，副教授。研究方向：高压直流输电，多电平变流器，电力电子，电力电子化电力系统。E-mail：slwang@scu.edu.cn。

刘天琪(1962—)，女，博士，教授。研究方向：电力系统稳定与控制，高压直流输电，柔性直流电网。E-mail：tqliu@scu.edu.cn。

(责任编辑：郭凯凯)