

DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2025.1.111

中图分类号: TM46

文献标志码: A

# 阻抗测量的扰动电压自适应控制策略

赵静波<sup>1</sup>, 周 前<sup>1</sup>, 杨文莉<sup>2</sup>, 马俊鹏<sup>2</sup>(中国电源学会会员)

(1. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 南京 211103; 2. 四川大学电气工程学院, 成都 610065)

**摘要:** 阻抗实测的测量过程中由于待测系统阻抗值变化范围大, 无法预先评估注入扰动幅值的大小, 对扰动能量自适应调整十分必要。以串联注入扰动电压的阻抗实测装置为研究对象, 提出基于扰动电流反馈的扰动电压自适应调整策略。通过实时检测响应的扰动电流幅值来调整扰动电压幅值, 实现了扰动能量自适应调整, 扰动电压及响应的扰动电流均控制在待测系统稳态点的10%以内, 半实物实时仿真验证了所提控制策略的有效性。

**关键词:** 宽频振荡; 阻抗测量; 小扰动信号; 自适应控制

## Adaptive Control Strategy of Disturbance Voltage for Impedance Measurement

ZHAO Jingbo<sup>1</sup>, ZHOU Qian<sup>1</sup>, YANG Wenli<sup>2</sup>, MA Junpeng<sup>2</sup>, *Member, CPSS*

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211103, China; 2. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** In the impedance measurement process, since the inverter impedance varied widely, the magnitude of injection disturbance cannot be evaluated in advance. Therefore, it is necessary to adjust the disturbance energy adaptively. The impedance measurement device of disturbance voltage injected in series is taken as the research object, and an adaptive adjustment strategy of disturbance voltage based on disturbance current feedback is proposed. The magnitude of disturbance voltage is adjusted by detecting the responding disturbance current in real time, thus realizing the adaptive adjustment of disturbance energy. Both the disturbance voltage and responding disturbance current are controlled to be within 10% of the steady-state point of the system under test. The effectiveness of the proposed control strategy was verified by hardware-in-the-loop simulations in real time.

**Keywords:** Broadband oscillation; impedance measurement; small disturbance signal; adaptive control

随着新能源渗透率的提高, 电力系统的运行特性和行为特征进一步复杂化, 逆变器与电网之间、逆变器与逆变器之间的交互作用导致宽频振荡事故频发<sup>[1-2]</sup>。阻抗分析法<sup>[3-5]</sup>是分析宽频振荡现象的重要方法, 获取准确的端口阻抗模型是应用阻抗分析法的前提, 因此基于小扰动信号的宽频阻抗实测

技术成为研究热点。

阻抗测量技术分为被动测量法<sup>[6-9]</sup>和主动测量法<sup>[10-19]</sup>。被动测量法通过提取待测系统自身背景谐波进行阻抗计算, 由于设计良好的并网逆变器背景谐波含量低, 易导致被动测量法精度低; 主动测量法通过向待测系统注入扰动信号, 并提取扰动电压和电流来计算阻抗值, 测量精度高, 应用广泛。然而, 待测系统阻抗幅值变化范围大, 阻抗特性复杂<sup>[20-22]</sup>, 在串联注入扰动电压的阻抗实测装置中, 注入扰动电压幅值难以预先确定, 一旦注入的扰动电压不合理, 将激发扰动电流的谐振, 一方面破坏

收稿日期: 2022-03-11; 修回日期: 2022-04-19; 录用日期:

2022-05-24; 网络首发日期: 2022-07-04

基金项目: 国网江苏省电力有限公司科技资助项目(J2021009)

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. under the grant J2021009

待测系统的稳定运行,另一方面待测系统的阻抗测量值也会因偏离稳态点过多而不准确,阻抗实测结果将失去意义,因此对扰动能量进行自适应调整十分必要。文献[11-16]采用不同结构的扰动注入装置输出正弦扰动量,扰动幅值均采用开环控制方式,极易触发电流谐振,测量过程的失稳及失准风险难以避免;为缩短测量时间,文献[17-18]以 Chirp 信号作为扰动信号,然而 Chirp 扰动幅值仍为开环控制方式;文献[19]为提高阻抗拟合精度,采用二叉树法对扫描频率进行自适应调整,然而该方法将测量点密布在阻抗尖峰处,在不对扰动能量采取自适应调整的情况下,极易触发待测系统谐振,引发测量装置与待测系统失稳;文献[18,23]指出,阻抗实测过程中应规避在系统谐振频率处注入扰动信号,然而实际工况下,系统谐振点未知,难以预先规避。

为解决上述问题,本文提出 1 种基于扰动电流反馈的扰动电压自适应控制策略,保证阻抗实测精度的同时,将扰动电压及扰动电流含量均限制在稳态值的 10%以内。通过半实物实时仿真验证了所提控制策略的有效性。

## 1 大功率阻抗实测装置

### 1.1 装置拓扑

图 1 为阻抗实测装置及待测系统总体结构示意图,测量点置于新能源发电设备出口处(线电压为 690 V),阻抗实测装置由扰动注入单元、信号处理单元和阻抗拟合单元构成。图中:  $T_h$  为双向晶闸管,用于控制扰动注入电路的投切;  $z_g$  为电网侧等效阻抗;

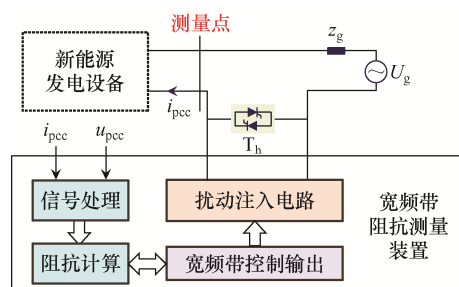


图 1 阻抗实测装置及待测系统整体结构示意图

Fig. 1 Schematic of impedance measurement device and overall structure of system under test

$U_g$  为电网电压;  $i_{pcc}$  和  $u_{pcc}$  分别为测量点电流和电压。

图 2 为扰动注入电路拓扑,扰动注入电路采用交-直-交结构,由三相不控整流器、双向 DC-DC 电路及单相 H 桥逆变器组成。图中:  $C_1$  为三相不控整流器与双向 DC-DC 之间的电容;  $u_{in}$  为  $C_1$  上的电压;  $C_2$  为双向 DC-DC 与单相 H 桥逆变器之间的电容;  $u_{dc}$  为  $C_2$  上的电压;  $L_{dc}$  为 DC-DC 电路输出端口的电感;  $L_f$  和  $C_f$  分别为 H 桥逆变器输出端的滤波电感和滤波电容;  $i_L$  为流经  $L_f$  的电流;  $u_{dis}$  为  $C_f$  上的电压,即扰动电压。

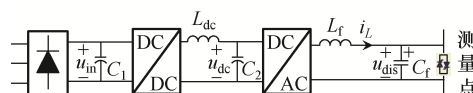


图 2 扰动注入电路拓扑

Fig. 2 Topology of circuit with disturbance injection

### 1.2 投切控制策略

在实际测量过程中,注入扰动电压的阻抗实测装置需串联在待测系统中,为避免阻抗实测装置在投切瞬间对待测系统造成冲击性影响,本文提出了 1 种平滑投切控制策略。阻抗实测装置的工作模式可分为启动模式、测量模式和退出模式,图 3 为阻抗实测装置在 3 种模式下的切换流程。当阻抗实测装置不工作时,通过导通双向晶闸管  $T_h$  将其旁路,待测系统基波电流经  $T_h$  流通,由于  $T_h$  的通态电阻极小,不影响待测系统正常并网运行。当阻抗实测装置进入启动模式后,不控整流器交流侧接通电源,  $C_1$  开始预充电,检测到  $u_{in}$  达到额定值  $V_{in}$  时,将 H 桥上桥臂开关管同时导通,此时基波电流将通过  $T_h$  和  $L_f$  分流,  $L_f$  在基频处的阻抗极小,同样不会对待测系统的稳定运行产生干扰;确保 H 桥上桥臂均导通后将  $T_h$  关断,阻抗实测装置由启动模式进入测量模式,此时控制双向 DC-DC 电路和单相 H 桥逆变器,使得输出扰动电压幅值由 0 逐步增大至目标值,采集测量点信号后,再控制输出扰动电压幅值从目标值减小至 0,查询测量是否结束。若结束则进入退出模式,否则重复上述步骤。当阻抗实测装置进入退出模式后,首先将 H 桥上桥臂同时导通,然后导通  $T_h$ ,确认  $T_h$  导通后,切断三相不控整流电路交流测电源。

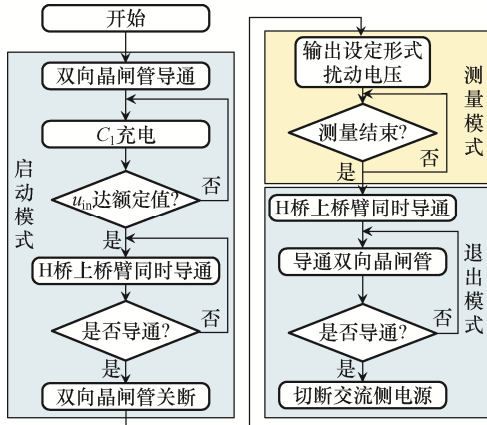


图 3 串联注入扰动电压阻抗实测装置工作模式切换流程  
 Fig. 3 Flow chart of switching of working modes of series injection disturbance voltage impedance measurement device

## 2 扰动电压自适应控制策略

### 2.1 自适应控制策略

不控整流电路从电网吸收三相交流电, 并将其转化为直流电。双向 DC-DC 电路用于给 H 桥逆变器提供稳定的直流电压, 其控制框图如图 4 所示, 采用典型的单电压环闭环控制策略, 其中  $U_{dc,ref}$  为输出直流电压参考值。为避免扰动电压幅值超过待测系统稳态值的 10%, 同时考虑到滤波器上的压降及网侧阻抗  $z_g$  的分压作用, 将  $U_{dc,ref}$  设置为

$$U_{dc,ref} = U_{pcc} \times (10\% + 1\%) \quad (1)$$

式中,  $U_{pcc}$  为测量点电压稳态值。

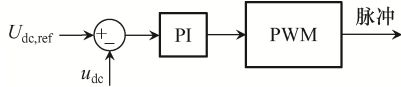


图 4 双向 DC-DC 电路控制框图  
 Fig. 4 Control block diagram of bidirectional DC-DC circuit

H 桥逆变器用于输出给定形式的扰动电压。扰动电压、电流间的相位差取决于待测系统阻抗, 无需特殊处理, 因此相位开环控制, 仅需对幅值进行闭环控制。

图 5 为 H 桥逆变器总体控制框图, 图中:  $U_{m,ref}$  为初始扰动电压幅值参考;  $\Delta u_{m,ref}$  为电压幅值参考修正量;  $u'_{ref}$  为经自适应控制后输出的电压参考值;

$f_h$  为扰动电压频率;  $G_{N1}(s)$  为中心频率为 50 Hz 的陷波器;  $i_h$  为扰动电流;  $i_m$  为扰动电流幅值;  $i'_m$  为  $i_m$  限幅后的值;  $K$  为自适应调整系数。为保证高测量精度, 将  $U_{m,ref}$  设置为

$$U_{m,ref} = U_{dc,ref} \quad (2)$$

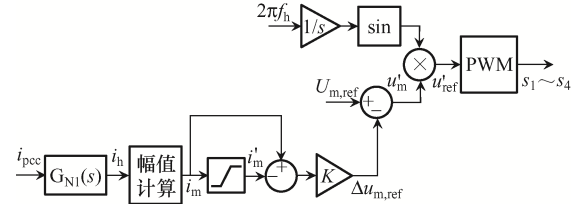


图 5 H 桥逆变器控制框图

Fig. 5 Control block diagram of H bridge inverter

在待测系统阻抗一定的情况下, 响应的扰动电流幅值由注入的扰动电压幅值决定, 为控制扰动电流幅值不超过待测系统稳态电流的 10%, 需要对扰动电压  $u_{dis}$  进行自适应调整。

为实现上述控制目标, 阻抗测量过程中, 对测量点电流  $i_{pcc}$  进行实时检测, 通过中心频率为 50 Hz 的陷波器后, 得到扰动电流  $i_h$ , 然后计算扰动电流幅值  $i_m$ ,  $i_m$  经限幅环节后得到  $i'_m$ , 即

$$i'_m = \begin{cases} i_m & i_m \leq 10\% I_{pcc} \\ I_{m,max} & i_m > 10\% I_{pcc} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $I_{pcc}$  为测量点电流稳态值;  $I_{m,max}$  为电流上限限定值。

为保证扰动电流含量不超过待测系统稳态值的 10%, 将  $I_{m,max}$  设置为

$$I_{m,max} = 10\% I_{pcc} \quad (4)$$

将  $i_m$  与  $i'_m$  作差, 经过比例控制器后, 得到扰动电压幅值参考修正量  $\Delta u_{m,ref}$ , 将其叠加至  $U_{m,ref}$  上即可得到修正后电压幅值参考量  $u'_m$ , 进而生成电压  $u'_{ref}$ 。改变扫描频率时, 待测系统阻抗幅值  $z_x$  随扫描频率的变化而变化, 电压幅值参考量通过上述闭环控制策略进行自适应调整, 实现了扰动电压及扰动电流含量均不超过待测系统稳态值的 10% 的控制目标。

### 2.2 控制参数设计

上述自适应控制策略仅包含自适应调整系数

$K$ ,  $K$  过大会引起扰动电压振荡甚至失稳,  $K$  过小则无法实现在全频段内将扰动电流控制在稳态值的 10% 以内的控制目标。因此, 需要结合待测系统阻抗值可测范围对  $K$  进行整定, 详细设计过程如下。

稳态时, 扰动电压幅值  $u'_m$ 、扰动电流幅值  $i_m$  与待测系统阻抗幅值  $z_x$  之间满足

$$z_x = \frac{u'_m}{i_m} \quad (5)$$

其中扰动电压幅值  $u'_m$  为

$$u'_m = U_{m,\text{ref}} - K(i_m - i'_m) \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)得

$$K = \frac{U_{m,\text{ref}} - z_x i_m}{i_m - i'_m} \quad (7)$$

式(7)中, 当自适应控制策略起作用时,  $i'_m = I_{m,\text{max}}$  为常数, 初始扰动电压幅值参考  $U_{m,\text{ref}}$  也为常数, 因此  $K$  的取值范围由  $i_m$  与  $z_x$  共同决定。

首先分析  $i_m$  对  $K$  取值范围的影响。 $i_m$  为受控量, 对  $i_m$  进行合理约束后才能满足控制目标。在自适应调整过程中  $i_m$  始终略大于  $I_{m,\text{max}}$ , 为尽可能接近控制目标,  $i_m$  应满足

$$i_{m,\text{max}} < i_m \leq i_{m,\text{max}} + A \quad (8)$$

式中:  $A$  为容错系数, 可根据待测系统稳态值进行合理选取。

根据式(8)可得, 在满足控制目标的前提下,  $K$  的取值范围为

$$K \geq \frac{U_{m,\text{ref}} - z_x (I_{m,\text{max}} + A)}{A} \quad (9)$$

然后分析  $z_x$  对  $K$  取值范围的影响。为便于表述, 令

$$\frac{U_{m,\text{ref}} - z_x (I_{m,\text{max}} + A)}{A} = M(z_x) \quad (10)$$

$z_x$  为外部变量, 取决于待测系统自身特性。 $z_x$  变化范围大, 实际测量过程中, 由于传感器精度限制,  $z_x$  可测范围有限, 可表示为

$$\frac{U_{m,\text{min}}}{I_{m,\text{max}}} \leq z_x \leq \frac{U_{m,\text{max}}}{I_{m,\text{min}}} \quad (11)$$

其中

$$U_{m,\text{max}} = U_{m,\text{ref}} \quad (12)$$

$I_{m,\text{min}}$  与  $U_{m,\text{min}}$  由传感器精度决定, 分别为

$$\begin{cases} I_{m,\text{min}} = I_N A_i \\ U_{m,\text{min}} = U_N A_u \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $I_N$  和  $U_N$  分别为电流传感器和电压传感器的额定值;  $A_i$  和  $A_u$  分别为电流传感器和电压传感器的精度。

将式(11)代入式(10)得

$$M(z_x) \Big|_{z_x = \frac{U_{m,\text{max}}}{I_{m,\text{min}}}} \leq M(z_x) \leq M(z_x) \Big|_{z_x = \frac{U_{m,\text{min}}}{I_{m,\text{max}}}} \quad (14)$$

将式(14)代入式(9)得

$$K \geq M(z_x) \Big|_{z_x = \frac{U_{m,\text{min}}}{I_{m,\text{max}}}} \quad (15)$$

因此, 只要保证  $K$  的取值范围满足式(15), 即可实现在可测阻抗范围内, 扰动电压与扰动电流均不超过待测系统稳态值 10% 的控制目标。 $K$  越大, 阻抗实测装置的稳定性越低, 因此  $K$  取上述范围内的最小值, 即

$$K = M(z_x) \Big|_{z_x = \frac{U_{m,\text{min}}}{I_{m,\text{max}}}} \quad (16)$$

### 3 实验验证

为验证上述控制策略的有效性, 本文采用如图 6 所示的基于硬件在环 HIL(hardware-in-the-loop) 测试系统和快速控制测试器 RCP(rapid control prototyping) 平台进行半实物实时仿真测试。其中, 待测系统及阻抗实测装置主电路在 HIL 中运行, 待测系

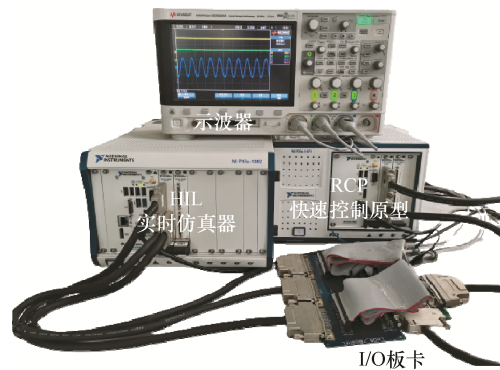


图 6 硬件在环半实物仿真实验平台

Fig. 6 Hardware-in-the-loop semi-physical simulation experiment platform

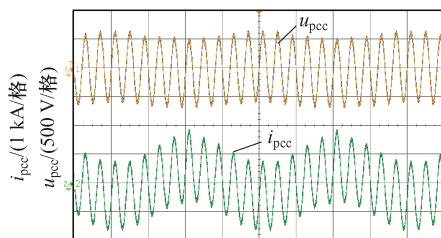
统及阻抗实测装置的控制器在 RCP 中运行, I/O 板卡用于采集 PCC 点电压、电流数据, 示波器用于实时观测波形。

阻抗实测装置的电路参数见表 1, 其中:  $f_s$  为 H 桥的开关频率;  $S_N$  为额定容量;  $U_{dc,N}$  为额定直流电压。

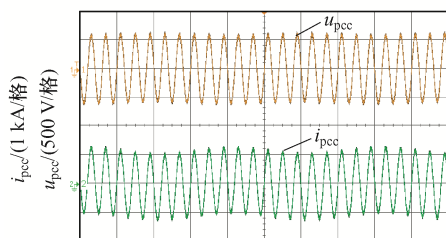
表 1 阻抗实测装置电路参数  
Tab. 1 Circuit parameters of impedance measurement device

参数	数值	参数	数值
$C_1/\mu\text{F}$	4 700	$C_f/\mu\text{F}$	500
$C_2/\text{F}$	2	$f_s/\text{kHz}$	60
$L_{dc}/\mu\text{H}$	0.1	$S_N/\text{kW}$	100
$L_f/\mu\text{H}$	5	$U_{dc,N}/\text{V}$	60

对额定容量为 1 MW 的 LCL 型并网逆变器进行扫频实验, 稳态值  $I_{pcc}=1\ 183\ \text{A}$ 、 $U_{pcc}=563\ \text{V}$ , 设置控制参数  $K=0.05$ 、 $U_{m,ref}=60\ \text{V}$ 。图 7 为采用不同控制策略对待测系统注入 5 Hz 扰动时测量点的电压、电流实验波形, 图 8 为上述波形的频谱, 纵坐标为谐波幅值与基频幅值的比例系数(电压占比与

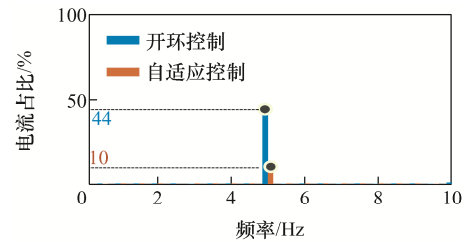


(a) 开环控制

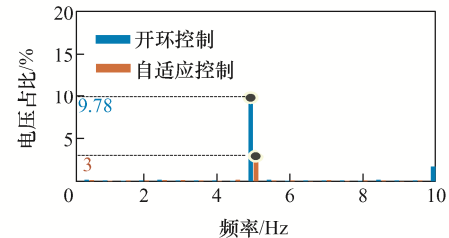


(b) 自适应控制

图 7 不同控制策略注入 5 Hz 扰动电压时的实验波形  
Fig. 7 Experimental waveforms with 5 Hz disturbance voltage injection for 1 MW inverter under different control strategies



(a)  $i_{pcc}$  频谱



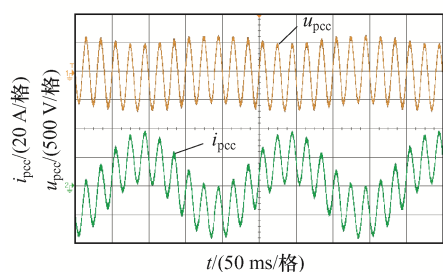
(b)  $u_{pcc}$  频谱

图 8 不同控制策略注入 5 Hz 扰动电压时的频谱  
Fig. 8 Spectra with 5 Hz disturbance voltage injection under different control strategies

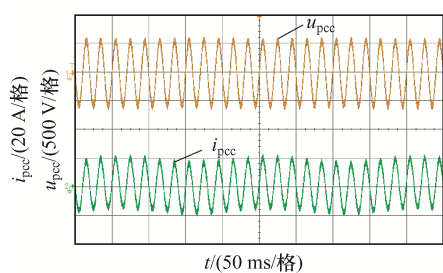
电流占比)。可以看出, 采用开环控制策略时, 向待测系统注入 9.78% 的扰动电压, 由于待测系统在 5 Hz 处的阻抗较小, 响应出了较大的扰动电流, 测量点电流  $i_{pcc}$  中 5 Hz 的谐波含量为 44%, 远远超出小扰动信号范围,  $i_{pcc}$  畸变严重; 采用自适应控制策略后, 扰动电压含量自适应调整为 3%, 此时响应的扰动电流含量为 9.78%, 扰动电压和扰动电流含量均控制在 10% 以内, 验证了所提控制策略的有效性。同时, 电流含量控制在 10% 左右, 实现了注入扰动幅值最大化。

为进一步验证上述控制策略的有效性, 改变待测系统结构及参数, 对 15 kW 定电流控制的 L 型并网逆变器进行相同的阻抗实测实验, 其稳态值  $I_{pcc}=17\ \text{A}$ 、 $U_{pcc}=563\ \text{V}$ , 设置控制参数  $K=1$ 、 $U_{m,ref}=60\ \text{V}$ 。图 9 和图 10 分别为向该待测系统注入 5 Hz 和 1 500 Hz 扰动电压后的实验波形, 上述波形的频谱分析如图 11 所示。可以看出, 开环控制下, 当注入的 5 Hz 扰动电压含量为 10.61% 时, 响应出 99.20% 的扰动电流; 当注入 1 500 Hz 扰动电压后, PCC 点电压、电流谐波含量分别为 11.68%、420.79%。上述 2 种情况下响应的扰动电流极大, 进而导致阻抗实测装置过流, 一旦超出电路元件电流应力

上限，阻抗实测装置将烧毁。采用自适应控制策略后，PCC 点电流谐波含量显著下降，均控制在



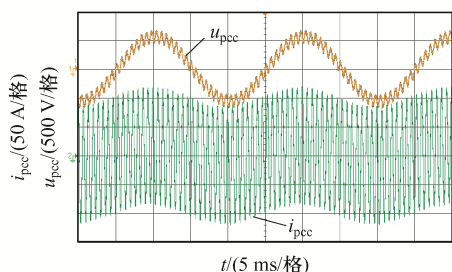
(a) 开环控制



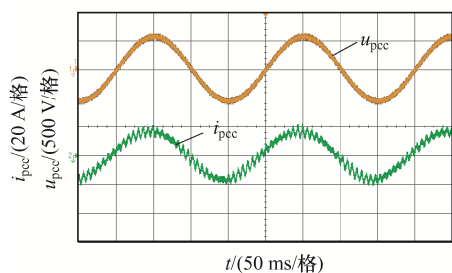
(b) 自适应控制

图 9 不同控制策略注入 5 Hz 扰动电压时 15 kW 逆变器的实验波形

Fig. 9 Experimental waveforms with 5 Hz disturbance voltage injection for 15 kW inverter under different control strategies

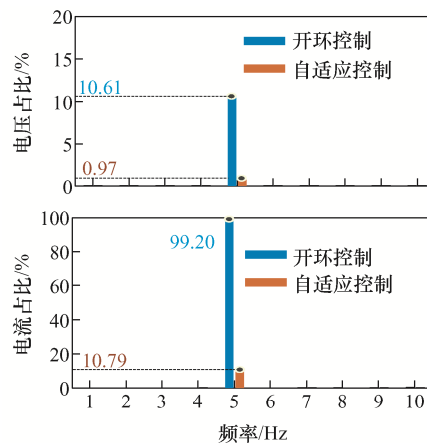


(a) 开环控制

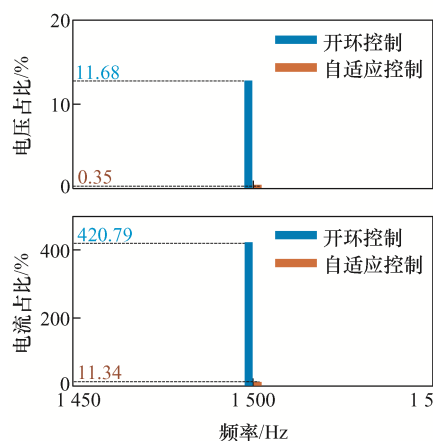


(b) 自适应控制

图 10 不同控制策略注入 1 500 Hz 扰动电压时的实验波形  
Fig. 10 Experimental waveforms with 1 500 Hz disturbance voltage injection under different control strategies



(a) 注入 5 Hz 扰动电压



(b) 注入 1 500 Hz 扰动电压

图 11 不同控制策略注入扰动电压时的频谱  
Fig. 11 Spectra with disturbance voltage injection under different control strategies

10%左右，有效抑制了待测系统阻抗极小诱发的装置过流，实现了阻抗实测装置在全频段内的安全稳定运行。

表 2 对比分析了 2 种扫频策略下的扫频精度 (互导纳  $Y_{21}(s)$ )及阻抗实测装置电流过流系数  $k$ ，其中相对误差  $\Delta_x/\% = |(\text{理论值} - \text{测量值})/\text{理论值}|$ ， $x = M$  表示幅值相对误差， $x = P$  表示相位相对误差。令待测系统稳态电流峰值为  $I_{DUT}$ ，流经阻抗实测装置的电流峰值为  $i_{IMU}$ ，定义过流系数  $k = i_{IMU}/I_{DUT}$ 。

由表 2 可以看出，在采取开环控制策略测量频率为 75、1 500 和 2 000 Hz 阻抗时，由于待测系统在这些频率处的阻抗较小，注入 10% 的扰动电压足以激发较大的扰动电流响应，导致流过阻抗实测装

表 2 不同扫频方法实测精度及过流系数对比

Tab. 2 Comparison of measurement accuracy and overcurrent coefficient between different frequency sweep methods

扫频策略	$f_H/\text{Hz}$	$\Delta_M/\%$	$\Delta_p/\%$	$k$
开环控制	5	0.266 4	0.455 6	1.91
	75	0.333 7	0.220 0	2.01
	200	0.122 1	0.308 9	1.23
	500	0.065 6	0.132 8	1.04
	1 000	0.394 4	0.114 1	1.99
	1 500	0.500 6	0.087 7	5.91
	2 000	0.408 1	0.020 9	2.33
闭环控制	5	0.267 2	0.458 1	1.08
	75	0.333 3	1.786 6	1.16
	200	0.144 9	0.289 0	1.09
	500	0.013 7	0.171 3	1.05
	1 000	1.361 7	0.348 2	1.08
	1 500	4.230 0	1.736 0	1.07
	2 000	3.734 3	0.321 4	1.17

置的电流峰值超过待测系统稳态电流峰值的 2 倍, 进而超过阻抗实测装置电路元件的电流应力上限, 烧毁阻抗实测装置。在采取闭环控制策略后, 注入 75、1 500 和 2 000 Hz 扰动电压后, 阻抗实测装置的过流系数分别从 2.01、5.91、2.33 降至 1.16、1.07、1.17, 有效抑制了阻抗实测装置过流倍数, 实现了阻抗实测装置实时过流保护。同时, 2 种方式下的阻抗实测相对误差在大部分频段内基本一致, 且均在 5% 以内, 验证了本文所提策略在实现过流保护的同时, 仍可实现高精度阻抗实测。

图 12 为采用自适应控制策略对待测系统进行扫频实验后逆变器导纳矩阵<sup>[20]</sup>的实测结果, 其中,

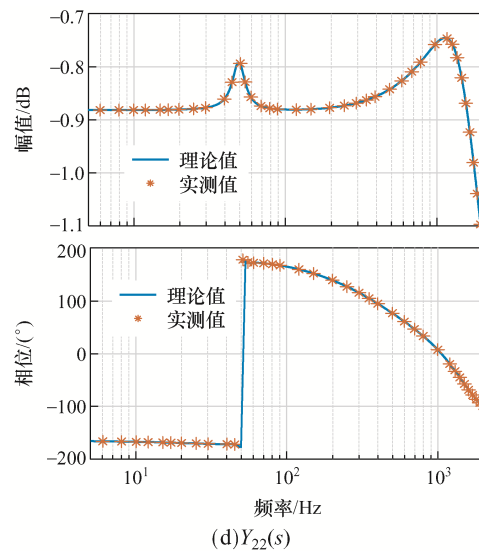
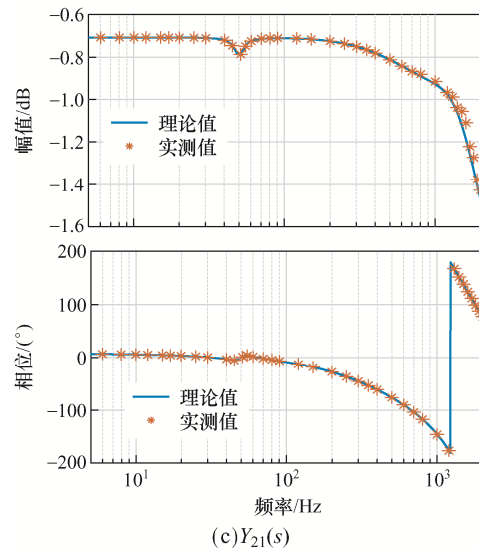
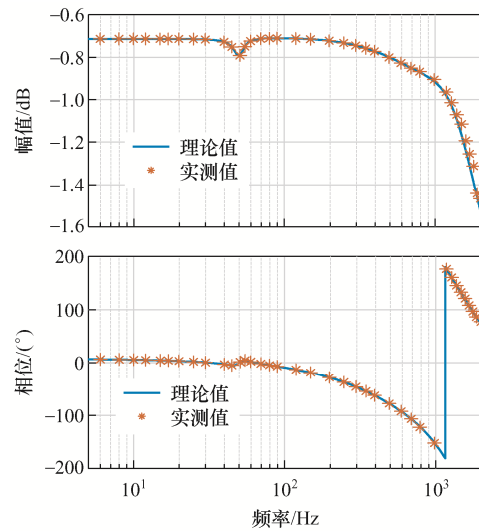
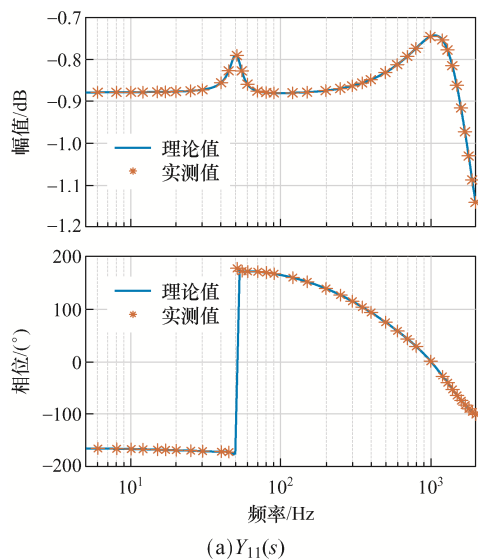


图 12 阻抗实测结果

Fig. 12 Impedance measurement results

$Y_{11}(s)$ 及 $Y_{22}(s)$ 为自导纳,  $Y_{21}(s)$ 及 $Y_{12}(s)$ 为耦合导纳。可见, 测量值与理论值拟合度高, 验证了本文所提阻抗实测方法的有效性。

## 4 结论

为解决大功率阻抗实测过程中扰动电压幅值难以预先选取的问题, 本文提出了 1 种基于扰动电流反馈的扰动电压自适应控制方法。通过实时检测扰动电流幅值, 实现了扰动电压幅值自适应调整, 即使在待测系统阻抗大幅变化的工况下, 亦可保证扰动电压及扰动电流均控制在 10%以内, 实现了扰动电压和扰动电流的双约束。通过实验验证了所提策略的正确性, 得出如下结论。

(1)通过扰动量的自适应调节, 在待测系统阻抗大幅变化的情况下, 可有效规避扰动电流过大引发的待测系统失稳风险, 扰动信号的频率选取不受待测系统阻抗特性的影响, 解决了扰动频率选取难的问题。

(2)通过对扰动电压的自适应调节, 限制了输出扰动电流强度, 有效规避了待测系统阻抗值极小(串联谐振点)诱发的阻抗实测装置过流问题, 阻抗实测装置在全频段内可安全稳定运行, 扩大了阻抗实测装置的稳定运行范围。

(3)在控制扰动电压及扰动电流不超限的同时, 保证扰动最大值维持在 10%稳态值附近, 实现了小扰动注入的最大化, 提高了阻抗实测精度。

## 参考文献:

- [1] 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): 4719-4731.  
Ma Ningning, Xie Xiaorong, He Jingbo, et al. Review of wide-band oscillation in renewable and power electronics highly integrated power systems [J]. Journal of Power Supply, 2020, 40(15): 4719-4731. (in Chinese)
- [2] 樊陈, 姚建国, 张琦兵, 等. 英国“8·9”大停电事故振荡事件分析及思考[J]. 电力工程技术, 2020, 39(4): 34-41.  
Fan Chen, Yao Jianguo, Zhang Qibing, et al. Reflection and analysis for oscillation of the blackout event of 9 August 2019 in UK [J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(4): 34-41. (in Chinese)
- [3] 马一峰, 杨乐, 贾晟, 等. 可再生能源微网电源小信号稳定性分析[J]. 电源学报, 2023, 21(3): 70-75.  
Ma Yifeng, Yang Le, Jia Sheng, et al. Analysis of small signal stability of micro-grid power supply with renewable energy [J]. 2023, 21(3): 70-75. (in Chinese)
- [4] Zhang Chen, Cai Xu, Rygg A, et al. Sequence domain SISO equivalent models of a grid-tied voltage source converter system for small-signal stability analysis [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 33(2): 741-749.
- [5] Shah S, Parsa L. Impedance modeling of three-phase voltage source converters in DQ, sequence, and phasor domains [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(3): 1139-1150.
- [6] Pérez-Estévez D, Doval-Gandoy J. Grid Impedance identification using the VSC switching ripple [C]// 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Baltimore, MD, USA, 2019: 1506-1513.
- [7] Miao Zheyu, Tong Hao, Yao Wenxi, et al. Online measurements of high-band grid impedance using variable frequency carrier based PWM schemes [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2021, 7(1): 128-139.
- [8] Ciobotaru M, Teodorescu R, Rodriguez P, et al. Online grid impedance estimation for single-phase grid-connected systems using PQ variations [C]// 2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference. Orlando, FL, USA 2007: 2306-2312.
- [9] Liserre M, Blaabjerg F, Teodorescu R. Grid Impedance estimation via excitation of LCL filter resonance [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, 43(5): 1401-1407.
- [10] Jia Ke, Wei Hongsheng, Bi Tianshu, et al. An islanding detection method for multi-DG systems based on high-frequency impedance estimation [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(1): 74-83.
- [11] 肖冬华, 胡海涛, 潘鹏宇, 等. 高速列车 dq 阻抗测量方法及其装置设计[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(22): 7230-7240.  
Xiao Donghua, Hu Haitao, Pan Pengyu, et al. dq Impedance measurement method and its device design of high-speed train [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(22): 7230-7240. (in Chinese)
- [12] Jaksic M, Shen Zhiyu, Cvetkovic I, et al. Multi-level

- single-phase shunt current injection converter used in small-signal  $dq$  impedance identification [C]// 2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Fort Worth, TX, USA, 2014: 2775-2782.
- [13] 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.
- [14] 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. (in Chinese)
- [15] 年珩, 李萌, 陈亮, 等. 采用多正弦信号注入的宽频带并网逆变器频率耦合特性测量方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(22): 7408-7420.  
Nian 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. (in Chinese)
- [16] Liu Qiujiang, Wu Mingli, Li Jing, et al. Frequency-scanning harmonic generator for (inter) harmonic impedance tests and its implementation in actual  $2 \times 25$  kV railway systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(6): 4801-4811.
- [17] Hu Haitao, Pan Pengyu, Song Yitong, et al. A novel controlled frequency band impedance measurement approach for single-phase railway traction power system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(1): 244-253.
- [18] Shen Zhiyu, Jaksic M, Mattavelli P, et al. Three-phase AC system impedance measurement unit (IMU) using chirp signal injection [C]// 2013 Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Long Beach, CA, USA, 2013: 2666-2673.
- [19] 岳小龙, 卓放, 张政华, 等. 电力电子系统阻抗测量的分段二叉树法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(24): 76-83.  
Yue Xiaolong, Zhuo Fang, Zhang Zhenghua, et al. Segmented binary tree method for power electronic system impedance measurement [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(24): 76-83. (in Chinese)
- [20] Wang Xiongfei, Harnefors L, Blaabjerg F. Unified impedance model of grid-connected voltage-source converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(2): 1775-1787.
- [21] Xue Tao, Lü Jing, Li Yan, et al. A comprehensive study on impedance models of grid-tied voltage-source converters [C]// IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Singapore, 2020: 3118-3125.
- [22] 王赞程, 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-phase LCL-type grid-connected inverters based on harmonic linearization [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5890-5898, 6033. (in Chinese)
- [23] 黄耀. 新能源并网逆变器序阻抗建模及其阻抗测量研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.  
Huang Yao. Research on sequential impedance modeling and impedance measurement of new energy grid-connected inverter [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020. (in Chinese)



赵静波

## 作者简介:

赵静波(1982—), 男, 硕士, 高级工程师。研究方向: 大电网完全稳定分析。E-mail: 1418412034@qq.com。

周前(1978—), 男, 博士, 研究员级高工。研究方向: 多直流馈入混联系统稳定运行。E-mail: chaoz@163.com。

杨文莉(1997—), 女, 硕士研究生。研究方向: 大功率阻抗实测装置控制策略研究。E-mail: scu\_ywl@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。

(责任编辑: 耿越)