



基于希尔伯特-黄变换的微电网主动小干扰稳定性 评估方法

作者：赖纪东，崔玉妹，苏建徽，徐洁洁，徐珊珊

赖纪东，崔玉妹，苏建徽，徐洁洁，徐珊珊. 基于希尔伯特-黄变换的微电网主动小干扰稳定性评估方法[J/OL]. 电力系统自动化

<https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20230323.1503.008.html>



目 录

CONTENTS

Part 01 研究背景及意义

Part 02 微电网小信号建模及动态特征分析

Part 03 基于 HHT 的小干扰稳定性评估方法

Part 04 仿真与半实物实验验证



1、研究背景及意义

背景

与传统电力系统相比，微电网规模更小、惯性更低且阻尼较弱，系统更易发生振荡失稳。微电网在实际运行中，负荷的投切、可再生能源功率注入的波动性以及线路等参数变化，使得系统时刻遭受小的干扰，导致实际系统的小干扰稳定性动态变化。

意义

然而，离线的理论分析方法无法获取系统实际运行中的动态稳定性信息，实测微电网实际运行状态下的小干扰稳定性信息对预防系统失稳、保障系统稳定运行具有重要意义。



2、微电网小信号建模及动态特征分析

微电网系统中，通过主导振荡模态的频率、模态阻尼等关键参数可判断系统动态稳定性。以两台逆变器组网的微电网系统为例，基于特征值分析法建立两台逆变器并联微电网的小信号模型，获取系统的主导特征根。微电网系统平衡时，abc 三相系统存在相同的特征根，三相系统可近似等效成单相系统分析。选取 i_{Li} 、 u_{oi} 、 i_{Linei} ($i=1,2$) 作为状态变量：

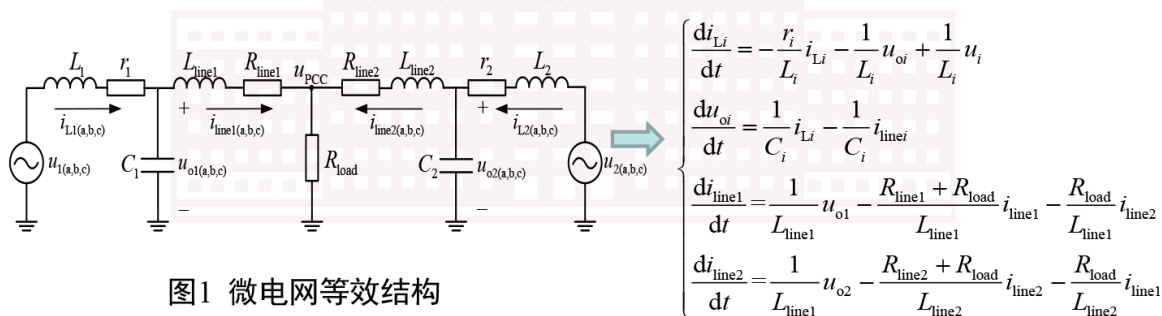
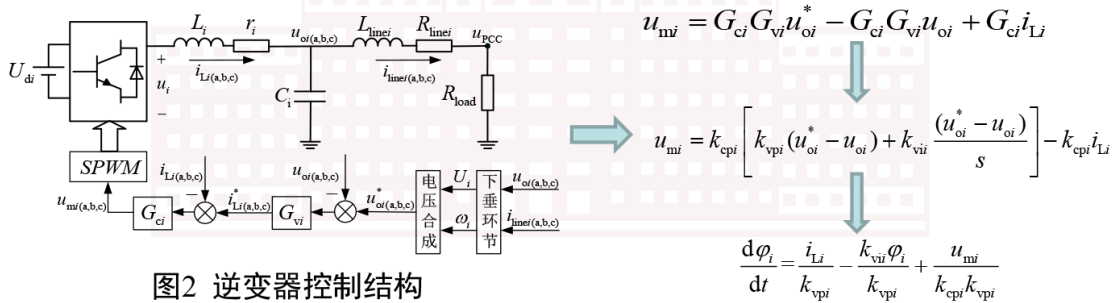


图1 微电网等效结构



2、微电网小信号建模及动态特征分析

单元微电网逆变器采用下垂控制策略，逆变器控制结构如图2所示，其中：SPWM表示正弦脉宽调制。下垂环节经过直接计算获得逆变器端口电压的参考指令 u_{oi}^* ，通过电压、电流级联控制获得逆变器调制波参考电压 u_{mi} 。选择选取具有承接性的电压环输入量 $\frac{d\phi_i}{dt} = u_{oi}^* - u_{oi}$ 作为状态变量：



2、微电网小信号建模及动态特征分析

联立上述公式建立两台逆变器并联微电网的微分方程，将方程组线性化可得到系统的小信号模型：

$$\begin{cases} \frac{d\Delta x}{dt} = A\Delta x + B\Delta u \\ \Delta x = [\Delta i_{L1}, \Delta u_{o1}, \Delta i_{line1}, \Delta \phi_1, \Delta i_{L2}, \Delta u_{o2}, \Delta i_{line2}, \Delta \phi_2]^T \\ \Delta u = \begin{bmatrix} \Delta u_1 \\ \Delta u_2 \end{bmatrix} \end{cases}$$

根据李雅普诺夫第一法，小干扰稳定性由系统线性化后的特征方程根确定。当微电网系统主电路参数及控制参数均确定，可根据上式中计算状态矩阵A的特征根，获取主导振荡模态的阻尼比，以判断系统的小干扰稳定性。



3、基于 HHT 的小干扰稳定性评估方法

- 实际微电网系统中，系统结构及参数会动态变化，无法获得准确参数。本文拟主动向微电网中注入扰动信号，提取响应过程的振荡模态，获得响应阻尼比，以评估微电网的小干扰稳定性。
- 首先，向系统扰动点注入电流脉冲，采集扰动点电压响应；其次，基于HHT方法辨识系统电压响应的参数，主要包括以下两个步骤：
 - 1)采用固有模态分解(EMD)将响应信号分解成若干个固有模态函数/分量(intrinsic mode function, IMF)和残差；
 - 2)利用Hilbert变换辨识主导IMF分量的幅值、衰减因子、振荡频率和初相位；并计算该模态的阻尼比，实现对微电网小干扰稳定性的评估。



3、基于 HHT 的小干扰稳定性评估方法

➤ 响应信号的固有模态分解

EMD可将微电网的响应信号分解成若干个固有模态分量与残差之和，各个IMF分量的频率各不相同，且满足以下两个条件：

- 1)在整个数据序列内，IMF分量的极点数和零点数相差不超过1；
- 2)在任意点处，局部包络线的均值为0。

经EMD后的响应信号可表示为n个固有模态分量和1个趋势分量：

$$x(t) = \sum_{j=1}^n c_j(t) + r_n(t)$$

当注入扰动为直流量时，系统响应会产生一定的直流偏置，经EMD可实现响应中各振荡模态与直流量的有效分离。



3、基于 HHT 的小干扰稳定性评估方法

➤ 振荡模态的Hilbert变换

针对上述EMD获取的主导振荡模态进行Hilbert变换，将振荡模态 $c_j(t)$ 经过冲激响应为 $h(t)=1/(\pi t)$ 的线性系统，得到 $c_j(t)$ 对应的Hilbert变换：

$$\hat{c}_j(t) = h(t) * c_j(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{c_j(\tau)}{t - \tau} d\tau$$

$\hat{c}_j(t)$ 在频域中各频率分量幅值不变，相位出现 -90° 的相移。若微电网中存在 $\delta \pm j\omega$ 的特征根，系统响应的振荡模态与时间的表达式为：

$$c(t) = Ae^{\delta t} \cos(\omega t + \theta) \xrightarrow{\text{Hilbert变换}} \hat{c}(t) = Ae^{\delta t} \sin(\omega t + \theta)$$

瞬时幅值、瞬时相位的表达式为：

$$\begin{cases} a(t) = \sqrt{c^2(t) + \hat{c}^2(t)} = Ae^{\delta t} \\ \varphi(t) = \arctan \frac{\hat{c}(t)}{c(t)} = \omega t + \theta \end{cases}$$



3、基于 HHT 的小干扰稳定性评估方法

➤ 振荡模态的Hilbert变换

- 瞬时幅值 $a(t)$ 表达式两边分别取对数，得到： $\ln a(t) = \delta t + \ln A$
 $\ln a(t)$ 是关于时间的一次函数，利用最小二乘法拟合的一次函数斜率即为衰减因子 δ ，截距为幅值的对数 $\ln A$ 。
- 瞬时相位 $\varphi(t)$ 表达式可知 是关于时间 t 的一次函数，利用最小二乘法拟合瞬时相位关于时间的一次函数，拟合函数的斜率为振荡的角频率 ω ，截距为初相位 θ 。

➤ 阻尼比计算

根据Hilbert变换辨识的幅值 A 、衰减因子 δ 、振荡频率 ω 及初相位 θ 带入阻尼计算公式获得阻尼比：

$$\xi = \frac{-\delta}{\sqrt{\delta^2 + \omega^2}}$$



3、基于 HHT 的小干扰稳定性评估方法

➤ 小干扰稳定性评估方法实施方案

为评估微电网的小干扰稳定性，通过主动向微电网中注入小干扰信号，引起系统的动态响应。考虑到实际工况中，稳定运行的系统难以实现扰动电压的串联，故采用向系统注入电流的方式。扰动点电压变化的幅度由电流变化的幅度和该位置微电网源阻抗决定。因此，对于一个未知系统，注入电流的幅值可由小到大逐渐增加，在不影响系统稳定运行的前提下，直到能够提取出较明显的电压响应。电流注入是一个突变的过程，为给系统足够的响应时间，注入的电流应维持一定时间后撤去。在扰动时间段内，扰动点的电压由微电网稳态电压及电流扰动引起的电压响应叠加而成。为提取出电压响应，将系统中未加扰动的稳态电压看作无衰减的振荡模态，采用Hilbert变换辨识稳态电压的幅值、频率及相位，从而分离出电流扰动的电压响应。



3、基于 HHT 的小干扰稳定性评估方法

➤ 小干扰稳定性评估方法实施方案

为获取电压响应的阻尼特性，采用HHT方法辨识响应过程的相关参数。首先，利用EMD将电压响应的振荡模态与直流分量分离。其次，对分解出的主导振荡模态进行Hilbert变换，辨识振荡模态的幅值、衰减因子、振荡频率及初相位，根据阻尼公式计算出该振荡模态的阻尼比，以主导振荡模态中最小阻尼比评估系统的小干扰稳定性。上述方法具体实施方案流程如图3所示。

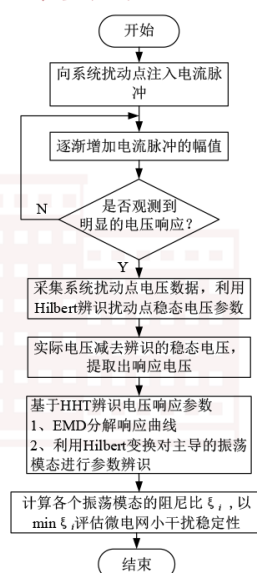


图3 实施方案流程图



4、仿真与半实物实验验证

➤ 仿真验证

当系统外加扰动时，系统的响应将含有负实根及共轭复根的作用。负实根不影响系统稳定性，因而主要辨识共轭复根对应振荡模态的动态过程。以下基于HHT小干扰稳定性评估方法进行仿真验证，首先，向三相PCC注入电流脉冲，提取PCC脉冲电流引起的电压响应。

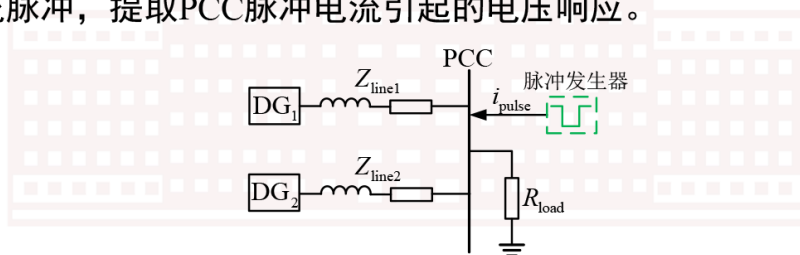


图4 电流脉冲注入系统结构示意图

按照图3实施方案，向三相系统逐渐增加脉冲电流的幅值，在0.5s向PCC注入-8A的电流脉冲，注入时长为60ms，三相选择注入相同的电流脉冲。



4、仿真与半实物实验验证

➤ 仿真验证

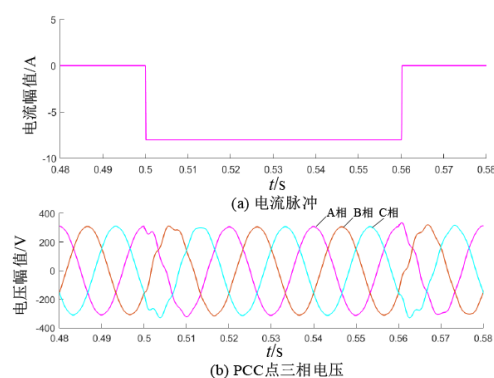


图5 电流脉冲及PCC点三相电压

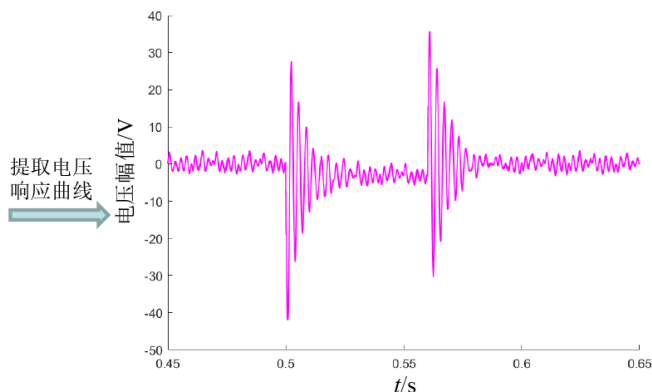


图6 PCC点A相电压响应



4、仿真与半实物实验验证

➤ 仿真验证

电流注入时刻与电流撤去时刻均含有电压响应信号，其振荡频率及阻尼特性等参数均相同。为获得图6所示PCC点响应曲线蕴含的稳定性信息，利用第2节的HHT方法辨识响应曲线的参数。

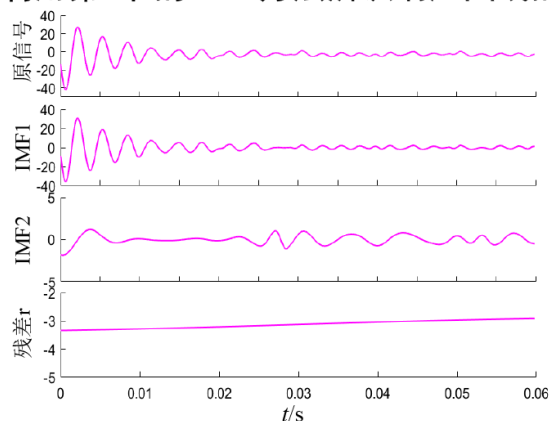


图7 EMD分解

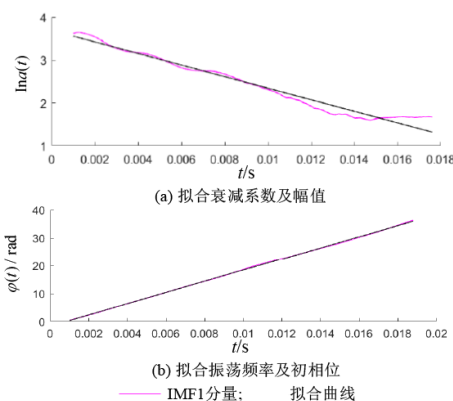


图8 IMF1分量Hilbert变换辨识



4、仿真与半实物实验验证

➤ 仿真验证

为验证辨识参数的正确性，将辨识的参数转化成时域拟合曲线与实际的IMF1分量做比较，对比结果如图9所示。

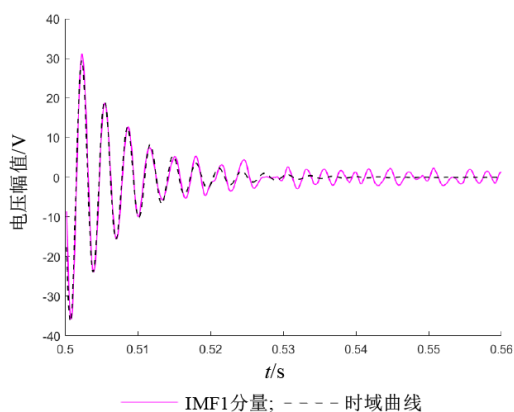


图9 IMF1分量与时域曲线比较

图9显示辨识参数对应的时域曲线与实际响应的主导分量IMF1接近重合，进而验证辨识参数的正确性。为验证本文方法的正确性，将基于HHT方法获取的主导振荡模态参数与特征值分析法得到的主导特征根 $\lambda_{3,4}$ 进行比较。特征根的实部对应振荡的衰减系数，虚部对应振荡的频率。IMF1辨识的参数与系统中特征根 $\lambda_{3,4}$ 比较结果如下表所示。



4、仿真与半实物实验验证

➤ 仿真验证

对比项	IMF1辨识参数	$\lambda_{3,4}$
幅值	40.17	—
衰减系数	-134.83	-137.51
频率(rad/s)	2001.05	2019.66
初相位(rad)	-3.07	—
阻尼比	0.0672	0.0679

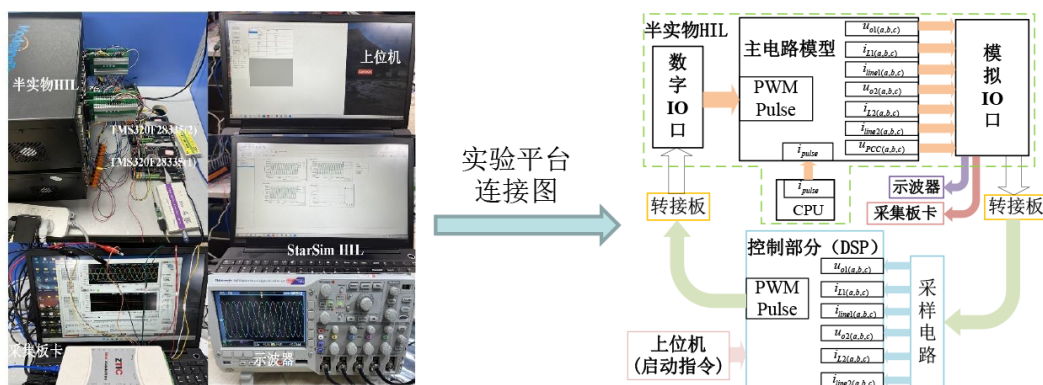
从表中可知，基于HHT辨识的参数与特征根 的参数两者误差在3%以内；两种方法获取的阻尼比0.0672与0.0679，误差为1.1%，说明系统响应中存在与根 对应的振荡模态，且阻尼比大于0.03，系统小干扰稳定性，本文方法与特征值法吻合。上述仿真结果验证了基于HHT方法辨识微电网振荡模态参数及阻尼比的有效性，为评估系统的小干扰稳定性提供参考。



4、仿真与半实物实验验证

➤ 半实物实验验证

StarSim HIL模拟主电路、在DSP28335控制板和上位机编写控制算法、电流脉冲由HIL实时仿真器内部CPU产生、电路参数和控制器参数同仿真设置。搭建两台逆变器并联的微电网半实物平台，对基于HHT主动小干扰稳定性分析方法进行实验验证。



合肥工业大学
HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

4、仿真与半实物实验验证

➤ 半实物实验验证

实验中，通过上位机同时启动两台逆变器运行，待系统稳定运行后，向微电网PCC点注入-8A的脉冲电流，注入时长为60ms，同时采集板卡开始采集电流脉冲及PCC点电压数据。图10为示波器观测的注入电流脉冲前后PCC点三相电压的波形，图11为从A相电压中提取得电流引起的电压响应

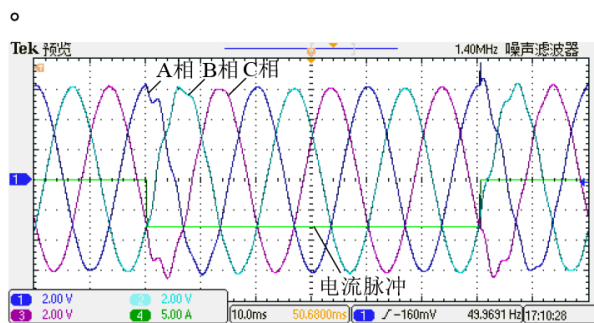


图10 PCC点三相电压波形及脉冲电流

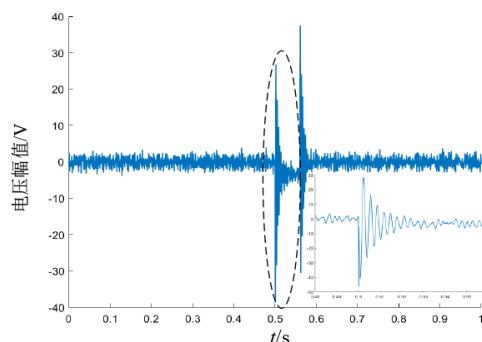


图11 响应曲线

合肥工业大学
HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

4、仿真与半实物实验验证

➤ 半实物实验验证

基于HHT方法辨识图11中脉冲注入时响应曲线的参数，首先对响应曲线进行EMD分解，再对主导振荡模态进行Hilbert变换。

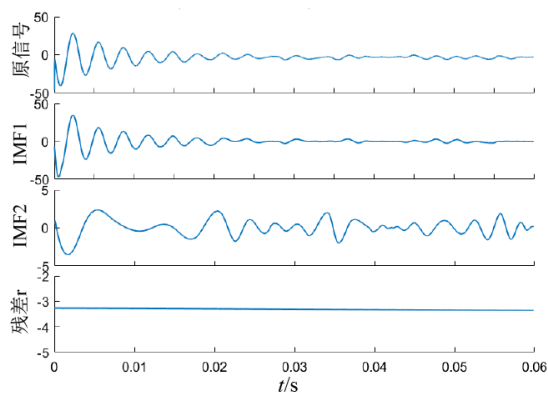


图12 EMD分解

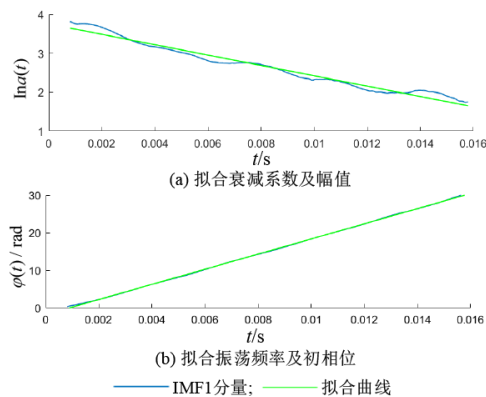


图13 Hilbert变换辨识

合肥工业大学
HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

4、仿真与半实物实验验证

➤ 半实物实验验证

为验证辨识参数的正确性，将辨识参数转化成时域曲线与IMF1分量曲线作比较，其结果如图14所示。

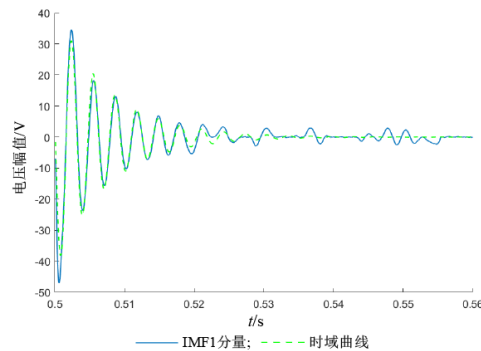


图14 IMF1分量与时域曲线比较

根据上图可知，辨识参数的时域曲线与IMF1分量较为吻合，从而验证了辨识参数的正确性。

合肥工业大学
HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

4、仿真与半实物实验验证

➤ 半实物实验验证

为验证实验方法的正确性，将实验中辨识IMF1的参数和表2中主导特征根的参数进行对比，其结果如下表所示。

对比项	IMF1辨识参数	$\lambda_{3,4}$
幅值	42.66	—
衰减系数	-133.17	-137.51
频率(rad/s)	2014.87	2019.66
初相位(rad)	-3.27	—
阻尼比	0.0660	0.0679

表中IMF1辨识的参数与特征根 的参数误差在4%以内；实验获取的阻尼比0.0660与特征值法获取的阻尼比0.0679，两者误差约为2.8%，可认为两者是同一种振荡模态，且阻尼比大于0.03，系统满足小干扰稳定性要求。以上实验结果与仿真结果一致，进一步说明所提方法的可行性。



➤ 作者简介

- **赖纪东**，男，博士，副教授，硕士生导师，主要研究方向：分布式发电与微电网技术、新型电力变换节能技术。
- **崔玉妹**，女，硕士研究生，现于合肥工业大学电气与自动化工程学院攻读硕士学位，主要研究方向为分布式发电与微电网技术。
- **苏建徽**，男，博士，教授，主要研究方向：分布式发电与微电网技术、新型电力变换节能技术。现任教育部光伏系统工程研究中心副主任。中国可再生能源学会理事，光伏专委会委员，《太阳能学报》编委。
- **徐洁洁**，女，硕士研究生，现已毕业于合肥工业大学电气与自动化工程学院，主要研究方向为分布式发电与微电网技术。
- **徐珊珊**，女，硕士研究生，现于合肥工业大学电气与自动化工程学院攻读硕士学位，主要研究方向为分布式发电与微电网技术。



感谢您的观看！

Thank you for watching!

作者：赖纪东，崔玉妹，苏建徽，徐洁洁，徐珊珊