

# 基于Ostrowski圆盘定理的并网逆变器系统稳定性分析

杨蕾<sup>1</sup>, 黄伟<sup>2</sup>, 郭成<sup>1</sup>, 张丹<sup>2</sup>, 向川<sup>1</sup>, 奚鑫泽<sup>1</sup>, 邢超<sup>1</sup>

(1. 云南电网有限责任公司 电力科学研究院, 云南 昆明 650217; 2. 云南电力调度控制中心, 云南 昆明 650200)

**摘要:** 并网逆变器与电网之间的相互作用是影响并网系统稳定运行的因素之一, 针对并网逆变器系统的稳定性问题, 提出了一种并网逆变器系统稳定性的快速判定方法。首先基于阻抗分析方法得到并网逆变器系统的回率矩阵。其次基于Ostrowski圆盘定理得到回率矩阵的特征值轨迹Ostrowski带, 并根据Ostrowski稳定判据判断系统稳定性。最后在MATLAB/Simulink中搭建仿真模型, 并构建实验平台。仿真和实验结果表明该稳定判据能够有效判定系统是否处于稳定状态, 并且可以快速估计并网逆变器系统的参数稳定域, 为系统参数的选取提供判断依据。

**关键词:** 并网逆变器; 阻抗分析; Ostrowski圆盘定理; 回率矩阵; 参数稳定域

**中图分类号:** TM 464; TM 712

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.16081/j.epae.202112014

## 0 引言

随着并网新能源发电占比的增大, 并网逆变器与电网之间的相互作用以及逆变器之间的交互影响越来越强烈, 会影响新能源发电系统甚至电网的安全稳定运行<sup>[1-2]</sup>。

阻抗分析方法是分析逆变器并网系统稳定性问题的重要方法<sup>[3]</sup>, 该方法将并网系统分为源子系统和负载子系统, 将并网系统等效为线性网络, 并根据各自的参数和控制模型建立其相应的阻抗模型, 最后根据阻抗稳定性判据进行稳定性分析<sup>[4]</sup>。文献<sup>[5]</sup>建立了dq坐标系下的并网逆变器阻抗模型, 得到了电网阻抗与逆变器阻抗之比, 即回率矩阵, 再根据奈奎斯特稳定判据判断其稳定性。文献<sup>[6]</sup>建立了考虑锁相环(PLL)的并网逆变器的dq阻抗模型, 并且分析了控制环和PLL对系统稳定性的影响。文献<sup>[7]</sup>建立了不平衡工况下并网逆变器的阻抗模型, 并基于广义奈奎斯特稳定判据, 提出了在不平衡运行工况下也适用的并网系统稳定性分析方法。文献<sup>[8]</sup>采用多谐波线性化方法推导了三相LCL并网逆变器的阻抗模型, 并基于奈奎斯特稳定判据分析了频率耦合特性对逆变器并网系统的稳定性影响。以上研究基于阻抗分析方法和稳定判据, 分析了PLL、控制环节等对并网系统稳定性的影响, 但是对并网逆变器的阻抗参数与并网系统稳定性间的关系仍需要深入研究。

稳定性判据都是基于特征值来判断系统的稳定性, 为了避免特征值计算的复杂性, 根据矩阵元素估计特征值的分布范围来研究系统稳定性成为了一个

新的研究方向<sup>[9]</sup>。文献<sup>[10]</sup>基于Gerschgorin圆盘定理和李雅普诺夫稳定判据, 对动态系统进行了稳定性分析, 得到了系统稳定的充分条件。文献<sup>[11]</sup>在考虑三相交流系统阻抗模型的非对角元素影响的基础上, 提出了一种基于阻抗模型和Gerschgorin圆盘定理的并网逆变器稳定性判据。针对传统奈奎斯特稳定判据计算量较大的缺点, 文献<sup>[12]</sup>也介绍了基于Gerschgorin圆盘定理和阻抗模型的系统稳定性判据以降低计算量。文献<sup>[13]</sup>基于Gerschgorin圆盘定理对系统特征值的分布范围进行估计, 提出了一种构建参数稳定域的方法, 降低了稳定域的保守性。文献<sup>[14]</sup>利用Gerschgorin圆盘定理和Hicks稳定性理论, 研究了具有分散和集中控制系统的小信号频率稳定性。针对分布式发电机大量存在的电能系统, 文献<sup>[15]</sup>利用Gerschgorin圆盘定理对系统的小信号稳定性进行了分析。文献<sup>[16]</sup>应用Gerschgorin定理和矩阵相似变换, 提出了一种基于特征值估计的谐波共振参数安全域建立方法, 得到了各参数的谐波共振安全区域。文献<sup>[17]</sup>针对并网逆变系统, 将Gerschgorin圆盘定理应用于广义奈奎斯特稳定判据, 在保持阻抗法简洁性的同时, 保证了稳定性判断的准确性。

Gerschgorin圆盘定理对系统特征值的估计较为保守, Ostrowski圆盘定理能够减少估计的保守性, 更好地估计系统特征值。本文基于Ostrowski圆盘定理和奈奎斯特稳定判据对新能源并网系统进行稳定性分析, 并且通过稳定判据估计得到并网逆变器系统参数稳定域, 为系统参数的选取提供了依据。

## 1 新能源并网系统的阻抗建模与分析

光伏并网发电如图1所示, 光伏电池串并联后接入并网逆变器, 并通过并网逆变器将直流转换为

收稿日期: 2021-07-02; 修回日期: 2021-10-22

基金项目: 南方电网重点科技项目(KJDK2018210)

Project supported by the Key Science and Technology Project of China Southern Power Grid(KJDK2018210)

交流接入电网。

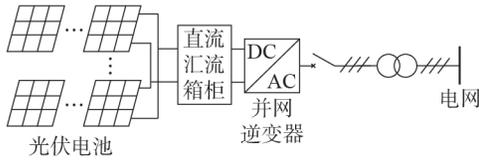


图 1 光伏发电拓扑结构

Fig.1 Topology structure of photovoltaic power generation

当电流控制并网逆变器接入电网时,其与电网组成的等效电路模型如图 2 所示。图中: $I_{out}(s)$ 、 $V_{out}(s)$ 分别为逆变器输出电流、电压; $I_{ref}(s)$ 为电流控制逆变器输入电流参考值; $G_{cl}(s)$ 为逆变器闭环响应输出传递矩阵; $Z_{inv}(s)$ 为逆变器输出阻抗; $Z_{grid}(s)$ 为电网等效阻抗。

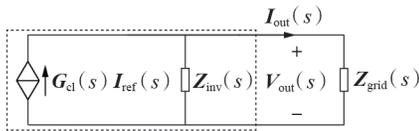


图 2 基于阻抗分析的电流控制逆变器等效模型

Fig.2 Equivalent model of current controlled inverter based on impedance analysis

由图 2 可以推导逆变器的闭环传递函数为:

$$\begin{cases} \frac{I_{out}(s)}{I_{ref}(s)} = G_{cl}(s) \frac{1}{E + L(s)} \\ L(s) = \frac{Z_{grid}(s)}{Z_{inv}(s)} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $L(s)$ 为回率矩阵; $E$ 为单位矩阵。由式(1)可知,当逆变器自身控制稳定时,并网电流的稳定性仅取决于电网阻抗与逆变器阻抗之比,即回率矩阵 $L(s)$ 。

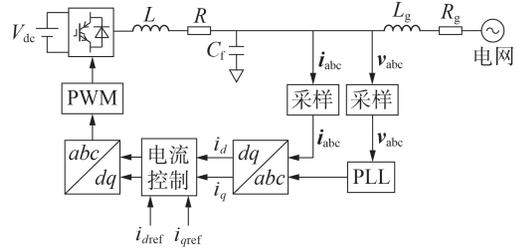
电网在一般情况下呈现阻感性,电网阻抗在 $dq$ 坐标系下可以表示为:

$$Z_{griddq} = \begin{bmatrix} sL_g & -\omega L_g \\ \omega L_g & sL_g \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $Z_{griddq}$ 为电网阻抗矩阵; $L_g$ 为电网等效电感; $\omega$ 为角速度。

并网逆变器及其控制系统的简单线图如图 3(a)所示,由此可以建立并网逆变器在 $dq$ 坐标系下的小信号阻抗模型如图 3(b)所示。图中: $G_{PWM}$ 为并网逆变器的脉宽调制(PWM)增益; $Z_{out}$ 为不包含 PLL 的开环输出阻抗; $V_{dc}$ 为逆变器的输入直流电压; $R_g$ 为电网等效电阻; $L$ 、 $R$ 、 $C_f$ 分别为滤波器电感、电阻和电容; $i_d$ 、 $i_q$ 和 $i_{dref}$ 、 $i_{qref}$ 分别为滤波器输出电流及其参考值的 $d$ 、 $q$ 轴分量; $i_{abc}$ 、 $v_{abc}$ 分别为三相坐标系下滤波器输出电流、电压。考虑 PLL 影响时,系统被分为系统坐标系(S)和控制坐标系(C)这 2 个 $dq$ 坐标系,且 2

个坐标系能够通过转换矩阵进行转换, $\tilde{D}^s$ 、 $\tilde{v}^s$ 、 $\tilde{i}^s$ 分别为系统坐标系下占空比相量、滤波器输出电压相量、电流相量的小信号扰动量<sup>[3]</sup>。



(a) 主电路及其控制框图

(b) 小信号模型

图 3 并网逆变器模型

Fig.3 Model of grid-connected inverter

包含 PLL 和电流控制的并网逆变器小信号模型如图 4 所示。图中: $G_{PLL}^D$ 和 $G_{PLL}^i$ 分别为系统扰动信号作用下电压与控制坐标系下占空比、电流之间的传递函数; $G_{del}$ 为控制器和 PWM 造成的延时传递函数; $G_{ic}$ 为电流控制传递函数; $G_{dec}$ 为解耦控制传递函数; $\tilde{v}^c$ 、 $\tilde{i}^c$ 、 $\tilde{i}_{ref}^c$ 分别为控制坐标系下电压相量、电流相量、电流相量参考值的小信号扰动量。由图 4 可得式(3)所示包含 PLL 和电流控制器的并网逆变器的闭环阻抗 $Z_{ldq}$ 表达式。

$$Z_{ldq} = \frac{Z_{out} + (G_{ic} - G_{dec})G_{del}G_{PWM}}{[G_{PLL}^i(G_{dec} - G_{ic}) + G_{PLL}^D]G_{del}G_{PWM} - E} \quad (3)$$

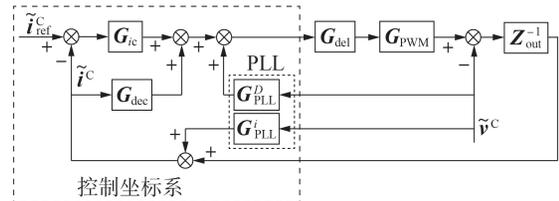


图 4 含 PLL 和电流控制的并网逆变器小信号模型

Fig.4 Small signal model of grid-connected inverter with PLL and current control

$G_{del}$ 、 $G_{ic}$ 、 $G_{dec}$ 的表达式分别为:

$$\begin{cases} G_{del} = \begin{bmatrix} \frac{1-0.5T_{del}s}{1+0.5T_{del}s} & 0 \\ 0 & \frac{1-0.5T_{del}s}{1+0.5T_{del}s} \end{bmatrix} \\ G_{ic} = \begin{bmatrix} k_{pi} + k_{ii}/s & 0 \\ 0 & k_{pi} + k_{ii}/s \end{bmatrix} \\ G_{dec} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega L/V_{dc} \\ \omega L/V_{dc} & 0 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $T_{del}$ 为控制延时; $k_{pi}$ 、 $k_{ii}$ 分别为电流控制器的比

例系数和积分系数。

文献[3]对式(3)中的  $G_{\text{PLL}}^i$  和  $G_{\text{PLL}}^D$  进行了详细推导,在此不再赘述,其表达式为:

$$\begin{cases} G_{\text{PLL}}^i = \begin{bmatrix} 0 & I_q^s G_{\text{PLL}} \\ 0 & -I_d^s G_{\text{PLL}} \end{bmatrix} \\ G_{\text{PLL}}^D = \begin{bmatrix} 0 & -D_q^s G_{\text{PLL}} \\ 0 & D_d^s G_{\text{PLL}} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $I_d^s$ 、 $I_q^s$  分别系统坐标系下电流  $d$ 、 $q$  轴分量;  $D_d^s$ 、 $D_q^s$  分别为系统坐标系下占空比  $d$ 、 $q$  轴分量;  $G_{\text{PLL}}$  为 PLL 的输出角度与  $q$  轴电压之间传递函数,其表达式如式(6)所示。

$$G_{\text{PLL}} = \frac{G_{\text{PLL}}^0}{s + V_d^s G_{\text{PLL}}^0} \quad (6)$$

式中:  $V_d^s$  为系统坐标系下网络电压  $d$  轴分量;  $G_{\text{PLL}}^0$  为 PLL 控制器传递函数,其表达式如式(7)所示。

$$G_{\text{PLL}}^0 = k_{\text{pPLL}} + k_{\text{iPLL}}/s \quad (7)$$

式中:  $k_{\text{pPLL}}$  和  $k_{\text{iPLL}}$  分别为 PLL 控制器的比例系数和积分系数。

## 2 基于圆盘定理的并网逆变器系统稳定性分析

### 2.1 圆盘定理

根据广义奈奎斯特稳定判据:当且仅当传递函数的特征值轨迹逆时针包围点  $(-1, 0)$  的次数等于传递函数的不稳定极点总数时,系统才会闭环稳定。

广义奈奎斯特稳定判据需要计算系统每个频率对应的特征值,以此得到系统特征值轨迹。但是对于相对复杂的电力系统,求取系统矩阵的特征值是一个非常繁琐的过程,且有时并不需要确定特征值的精确值,仅需要确定特征值的大致范围即可。因此许多用矩阵对角元素代替特征值的研究应运而生,圆盘定理就是其中之一。不同于其他研究(如 Bode 图分析法)因忽略非对角元素而造成误差,圆盘定理可以通过矩阵的对角元素和非对角元素直接估计系统特征值的范围。

圆盘定理是基于逆奈奎斯特阵列 INA (Inverse Nyquist Array) 的多变量频域分析的核心,具有对特征值进行估计和定位的优越性。Gersgorin 圆盘定理:设状态矩阵  $A=(a_{xy})$  ( $a_{xy} \in \mathbb{C}^{n \times n}$ ,  $\mathbb{C}$  为复数集合,  $n$  为 Gersgorin 圆盘总数,  $x, y=1, 2, \dots, n$ ), 则  $A$  的全部特征值  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  落在复平面上  $n$  个 Gersgorin 圆盘的并集  $S(A)$  中。  $S(A)$  表达式为:

$$S(A) = \bigcup_{x=1}^n G_x = \bigcup_{x=1}^n \left\{ z \mid |z - a_{xx}| \leq R_x, R_x = \sum_{\substack{y=1 \\ y \neq x}}^n |a_{xy}| \right\} \quad (8)$$

式中:矩阵  $A$  的第  $x$  行对角元素  $a_{xx}$  为 Gersgorin 圆盘  $G_x$  的圆心;  $R_x$  为 Gersgorin 圆盘  $G_x$  的半径,数值上等于

矩阵  $A$  第  $x$  行非对角元素绝对值之和;  $z$  为复平面上的任意复数。

Gersgorin 圆盘定理表明状态矩阵  $A$  的  $n$  个特征值  $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$  都落在其  $n$  个 Gersgorin 圆盘的并集中。对于某一频率,可得相应的 Gersgorin 圆盘,对于频率响应的所有数据,将由一系列 Gersgorin 圆盘的包络线构成 Gersgorin 带,如图 5 所示。Gersgorin 圆盘定理提供了一个基础、简单而重要的系统特征值定位方法,但是其所得到的特征值包含集较为粗糙, Gersgorin 带分析方法较为保守。为了更加详细地研究系统特性,可以使用 Ostrowski 带,其在 Gersgorin 圆盘定理基础上给出了更为精确的特征值包含集。由图 5 可知,基于 Ostrowski 圆盘定理可以以更小的半径得到一条更窄的带域,减少 Gersgorin 圆盘定理估计的保守性。

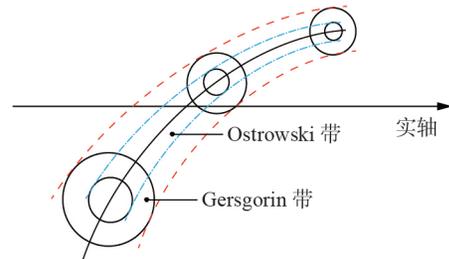


图5 Gersgorin带和Ostrowski带

Fig.5 Gersgorin band and Ostrowski band

Ostrowski 圆盘定理基于 Gersgorin 圆盘定理进行改进:设状态矩阵  $A'=(a'_{x'y'})$  ( $a'_{x'y'} \in \mathbb{C}^{n' \times n'}$ ,  $n'$  为 Ostrowski 圆盘总数,  $x', y'=1, 2, \dots, n'$ ,  $0 \leq |a'_{x'y'}| \leq 1$ ), 至少有一个  $x'$ , 使得  $A'$  的全部特征值  $\lambda'_1, \lambda'_2, \dots, \lambda'_{n'}$  落在复平面上  $n'$  个 Ostrowski 圆盘的并集  $S'(A')$  中。  $S'(A')$  的表达式为:

$$S'(A') = \bigcup_{x'=1}^{n'} G'_{x'} = \bigcup_{x'=1}^{n'} \left\{ z \mid |z - a'_{x'x'}| \leq P_{x'}^{a'} Q_{x'}^{1-a'} \right\} \quad (9)$$

$$\begin{cases} P_{x'}^{a'} = \sum_{\substack{y'=1 \\ y' \neq x'}}^{n'} |a'_{x'y'}| \\ Q_{x'}^{1-a'} = \sum_{\substack{y'=1 \\ y' \neq x'}}^{n'} |a'_{y'x'}| \end{cases} \quad (10)$$

### 2.2 基于 Ostrowski 圆盘定理的参数稳定域估计

根据第1节分析可知,并网逆变器系统的稳定性仅取决于电网阻抗与逆变器阻抗之比,即回率矩阵  $L(s)$ 。基于 Ostrowski 圆盘定理,可以在复平面得到回率矩阵  $L(s)$  对角元素  $L_{dd}(s)$ 、 $L_{qq}(s)$  包含特征值轨迹的 Ostrowski 带,且这些带包含特征值轨迹,则当且仅当  $L(s)$  包含特征值轨迹的 Ostrowski 带逆时针包围点  $(-1, 0)$  的次数等于  $Z_{sdq}$  和  $Z_{ldq}$  的不稳定极点总数时,系统才会闭环稳定。但由于逆变器和

电网单独运行时都是稳定的,不存在不稳定极点,因此当且仅当 $L_{dd}(s)$ 、 $L_{qq}(s)$ 的特征值轨迹 Ostrowski 带不包围点 $(-1,0)$ 时,系统才是稳定的。

由此可得评估并网逆变器系统稳定性的判定步骤如下:

1)通过阻抗建模分析得到式(1)所示的电网阻抗与逆变器阻抗之比,即回率矩阵 $L(s)$ ;

2)获得回率矩阵中对角元素 $L_{dd}(s)$ 、 $L_{qq}(s)$ 多个频率下包含特征值轨迹的 Ostrowski 带;

3)如果包含特征值轨迹的 Ostrowski 带不包围或者覆盖点 $(-1,0)$ ,则系统是稳定的,否则系统不稳定。

对于每一个不同的频率,都会得到2个 Ostrowski 圆,且在该频率下的系统特征值就包含在 Ostrowski 圆内,可以同时得到多个频率下 Ostrowski 圆构成的 Ostrowski 带,如果特征值不包围或者覆盖点 $(-1,0)$ ,则 Ostrowski 带不会包围或者覆盖点 $(-1,0)$ 。

相比于 Bode 图分析法,该稳定性判断方法能够有效地利用矩阵的对角元素和非对角元素,避免了因忽略非对角元素而引起的判断误差;与广义奈奎斯特稳定性判据相比,该方法直接利用矩阵元素估计系统特征值,避免了各个频率下计算特征值的复杂性,也能明显体现系统参数变化对特征值变化的影响。

### 3 仿真及实验验证

#### 3.1 仿真验证

为验证基于 Ostrowski 圆盘定理稳定性判据在并网逆变器系统中的有效性,在 MATLAB / Simulink 中搭建并网逆变器系统的仿真模型,其中相关参数见附录 A 表 A1。

##### 3.1.1 算例 1

按表 A1 中数据设置参数,为对比分析 Gersgorin 带和 Ostrowski 带的区别,首先基于2个圆盘定理,得到逆变器并网系统回率矩阵 $L(s)$ 的特征值轨迹,主要以回率矩阵 $L(s)$ 对角元素 $L_{dd}(s)$ 、 $L_{qq}(s)$ 为例进行分析,所得特征值轨迹曲线如附录 A 图 A1 所示。由图 A1(a)、(b)可知,对角元素 $L_{dd}(s)$ 的 Gersgorin 带和 Ostrowski 带均能够估计系统的特征值,但是相比于 Gersgorin 带, Ostrowski 带具有更小的半径,能够减少 Gersgorin 圆盘定理估计的保守性。由图 A1(b)、(c)可知,回率矩阵 $L(s)$ 对角元素 $L_{dd}(s)$ 、 $L_{qq}(s)$ 的特征值轨迹 Ostrowski 带并不包围或覆盖点 $(-1,0)$ ,根据评估并网逆变器系统稳定性的判定准则可知此时并网逆变器系统稳定。

##### 3.1.2 算例 2

为研究逆变器阻抗参数对并网逆变器系统稳定

的影响,同样以回率矩阵 $L(s)$ 中 $L_{qq}(s)$ 为分析目标,选取逆变器输出电感 $L=0.01$  H,分别选取电阻 $R$ 为 $0.5$ 、 $2$ 、 $4$   $\Omega$ ,仿真得到 $L_{qq}(s)$ 的特征值轨迹 Ostrowski 带如附录 A 图 A2 所示。由图 A2(a)、(b)可知,当逆变器电感值不变、电阻值增大时, $L_{qq}(s)$ 的特征值轨迹 Ostrowski 带发生改变,并且逐渐接近点 $(-1,0)$ ,但并不包围或覆盖点 $(-1,0)$ ,此时系统依然保持稳定。由图 A2(c)可知,当逆变器电阻值增大至一定数值时, $L_{qq}(s)$ 的特征值轨迹 Ostrowski 带将包围或覆盖点 $(-1,0)$ ,此时由稳定性判据可知系统不稳定。同理,当逆变器电阻值不变、电感值发生变化时,同样会存在使逆变器并网系统不稳定的电感值。

电力系统频率(工频为 50 Hz)的正常允许范围为 $49.8\sim 50.2$  Hz,以该频率范围为基础,改变逆变器和电网阻抗值,确定能使系统保持稳定的阻抗值集合。通过多组仿真可以得到保证系统稳定性的逆变器滤波电感、电容和电网阻抗参数的稳定域,并与基于 Gersgorin 圆盘定理稳定性判据得到的参数稳定域进行相应比较,结果如图 6 和附录 A 图 A3 所示。当并网逆变器滤波电感、电容参数和电网阻抗参数在参数稳定域内时,并网系统稳定。

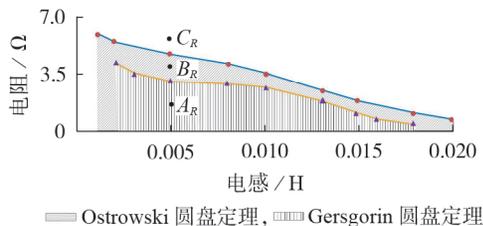


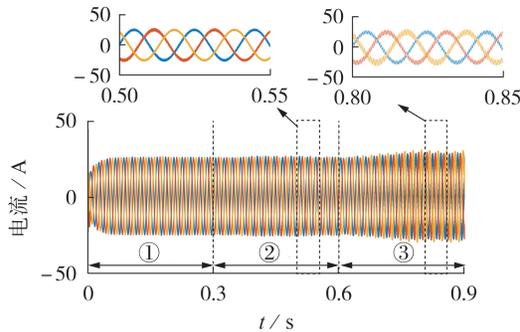
图6 逆变器并网阻抗稳定域

Fig.6 Stability region of impedance for grid-connected inverters

由图 6 可知,相比于 Gersgorin 圆盘定理,基于 Ostrowski 圆盘定理得到的参数稳定域范围明显增大,并且其参数稳定域范围包含基于 Gersgorin 圆盘定理评估的稳定域,说明在有效降低 Gersgorin 圆盘定理保守性的同时,保证了评估参数稳定域的正确性。

为进一步验证基于 Ostrowski 圆盘定理稳定性判据的准确性,搭建并网逆变器系统,并且在图 6 所示逆变器并网阻抗稳定域中选取 $A_R(0.005$  H,  $2$   $\Omega)$ 、 $B_R(0.005$  H,  $4$   $\Omega)$ 、 $C_R(0.005$  H,  $6$   $\Omega)$ 3 点的阻抗值,系统开始运行时并网逆变器阻抗值为点 $A_R$ 所示坐标值,0.3 s 时改变并网逆变器阻抗值为点 $B_R$ 所示坐标值,0.6 s 时切换为点 $C_R$ 所示坐标值,得到图 7 所示并网逆变器输出电流波形。由图可知: $[0,0.3)$  s 内,选取的点 $A_R$ 位于 Gersgorin 圆盘定理和 Ostrowski 圆盘定理估计的稳定域内,系统稳定; $[0.3,0.6)$  s 内,点 $B_R$ 不在 Gersgorin 圆盘定理估计的稳定域内,但是

仍然在 Ostrowski 圆盘定理估计的稳定域内,由图 7 所示波形可知系统仍处于稳定状态;0.6 s 后选取的点  $C_R$  不在稳定域范围内,此时由图 7 所示波形可知系统不稳定。



①  $A_R(0.005 \text{ H}, 2 \Omega)$ , ②  $B_R(0.005 \text{ H}, 4 \Omega)$ , ③  $C_R(0.005 \text{ H}, 6 \Omega)$

图7 逆变器并网阻抗稳定域仿真波形  
Fig.7 Simulative waveform of impedance for grid-connected inverters

同理在图 A3(b)所示电网等值阻抗稳定域中选取  $A_z(0.003 \text{ H}, 1.5 \Omega)$ 、 $B_z(0.006 \text{ H}, 3 \Omega)$ 、 $C_z(0.009 \text{ H}, 4.2 \Omega)$  3 点的阻抗值,同样系统开始运行时电网等值阻抗值为点  $A_z$  所示坐标值,0.3 s 时改变电网等值阻抗值为点  $B_z$  所示坐标值,0.6 s 时切换为点  $C_z$  所示坐标值,得到并网逆变器输出电流波形如附录 A 图 A4 所示。同样由图可知:当电网等值阻抗在 Ostrowski 圆盘定理估计的稳定域内时,系统均保持稳定;当选取的阻抗值不在电网等值阻抗稳定域内时系统不稳定。

### 3.1.3 算例 3

为了分析研究并网逆变器系统控制参数对系统稳定性的影响,分别对系统中的 PLL、电流控制器的比例系数和积分系数进行调整。对应不同的情况,分别用基于 Ostrowski 圆盘定理稳定判据和广义奈奎斯特稳定判据来评估系统的稳定性,并且绘制相应的控制参数安全域,这些区域是使系统稳定的控制参数集。结果如图 8 和附录 A 图 A5 所示,图 8 所示曲线与坐标轴围成的阴影部分为保证系统稳定时的控制参数稳定域。当控制参数位于稳定域内时,所选参数能够保证系统的稳定性,否则不能保证系

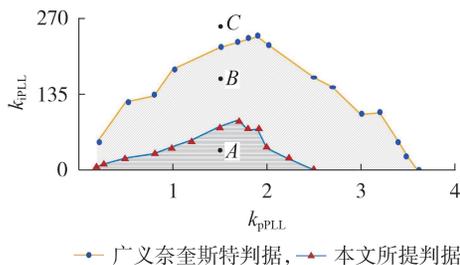


图8  $k_{pPLL}$ - $k_{iPLL}$  稳定域  
Fig.8 Stability region of  $k_{pPLL}$ - $k_{iPLL}$

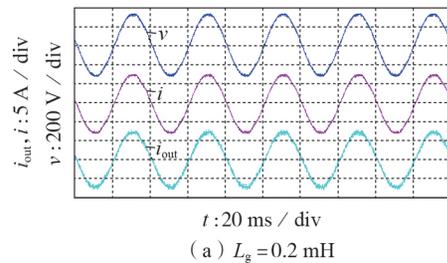
统的稳定性,可以将控制参数是否位于参数稳定域内作为判断依据,合理选择系统控制器参数。由图 8 和图 A5 可知,基于 Ostrowski 圆盘定理稳定判据得到的稳定域是广义奈奎斯特稳定判据所得区域的一个子集,证明了所提方法的正确性和精准性。

在图 8 所示并网逆变器 PLL 控制参数稳定域选取  $A(1.5, 50)$ 、 $B(1.5, 150)$ 、 $C(1.5, 250)$  3 点的控制参数,系统开始运行时 PLL 控制器运行于点  $A$ ,0.3 s 时改变 PLL 控制器的参数,其运行于点  $B$ ,0.6 s 时改变参数使其运行于点  $C$ ,得到并网逆变器输出电流波形如附录 A 图 A6 所示。由图可知:[0,0.3) s 内,点  $A$  位于广义奈奎斯特定理和 Ostrowski 圆盘定理确定的稳定域内,系统稳定;[0.3,0.6) s 内,点  $B$  仍然在广义奈奎斯特定理确定的稳定域内,不在 Ostrowski 圆盘定理确定的稳定域内,但是由波形可知此时系统不稳定;0.6 s 后点  $C$  不在稳定域范围内,系统仍然不稳定。

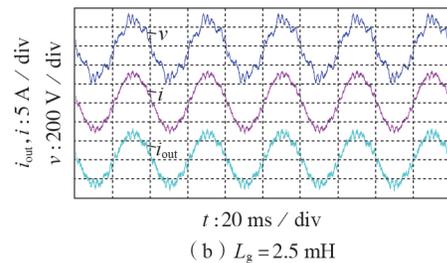
### 3.2 实验验证

为进一步验证基于 Ostrowski 圆盘定理稳定性判据的有效性,通过搭建实验平台进行验证,实验系统结构见图 3(a)。实验平台由额定功率 5 kW 的三相 LCL 逆变器及 45 kW 交流电源构成,逆变器的直流侧电源为 AGP1030,逆变桥采用 CCS050M12CM2 模块,驱动电路采用 CGD15FB45P 模块,实验参数见附录 A 表 A2。

基于 Ostrowski 圆盘定理稳定性判据获得的逆变器滤波器阻抗和电网阻抗的稳定域见附录 A 图 A7。选取逆变器滤波器电感  $L=5.2 \text{ mH}$ ,当电网电感  $L_g=0.2 \text{ mH}$  时,电网阻抗位于稳定域内,实验波形如图 9(a)所示,由于逆变器输出电流三相对称,故仅给



(a)  $L_g = 0.2 \text{ mH}$



(b)  $L_g = 2.5 \text{ mH}$

图9 不同电网阻抗下的实验波形

Fig.9 Experimental waveforms under different power grid impedances

出其中一相的实验结果。由图9(a)可知,逆变器输出电流 $i_{out}$ 以及滤波器输出电流 $i$ 、电压 $v$ 波形畸变程度小,说明逆变器并网系统处于稳定状态。当 $L_g=2.5$  mH时,电网阻抗不在稳定域内,实验波形如图9(b)所示,可以看出此时逆变器输出电流及滤波器输出电流畸变严重,并网系统不稳定。

## 4 结论

本文提出了一种并网逆变器系统稳定性的快速估计方法,首先得到并网逆变器系统的回率矩阵,再基于 Ostrowski 圆盘定理稳定性判据对系统稳定性进行判定。本文搭建了仿真模型和实验平台,仿真和实验结果表明该方法能够有效判断系统的稳定性,并且能够估计并网逆变器及系统的参数稳定域,在有效降低保守性的同时,保证了参数稳定域的正确性,且能够根据参数是否处于稳定域内,为合理选择并网逆变器参数提供判断依据。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 李奕欣,赵书强,马燕峰,等. 三相LCL型并网逆变器的阻抗建模及特性分析[J]. 电力自动化设备,2019,39(7):107-113.  
LI Yixin,ZHAO Shuqiang,MA Yanfeng,et al. Impedance modeling and characteristic analysis of three-phase LCL-type grid-connected inverters[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(7):107-113.
- [2] 刘子腾,徐永海,陶顺. 新能源并网下谐波责任定量评估方法研究现状与展望[J]. 电力自动化设备,2020,40(11):203-213.  
LIU Ziteng,XU Yonghai,TAO Shun. Research status and prospect of harmonic responsibility quantitative evaluation method under grid-connection of new energy[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(11):203-213.
- [3] 刘家源. 新能源并网逆变器的阻抗测量方法研究与装备研制[D]. 长沙:湖南大学,2019.  
LIU Jiayuan. The research of the impedance measurement method of new-energy grid-connected inverter and equipment development[D]. Changsha:Hunan University,2019.
- [4] 曾志杰,肖华锋,高博,等. 并网逆变器小信号建模简化方法与应用[J]. 中国电机工程学报,2020,40(21):7002-7012.  
ZENG Zhijie,XIAO Huafeng,GAO Bo,et al. Simplified small-signal modeling method of grid-connected inverters and its applications[J]. Proceedings of the CSEE,2020,40(21):7002-7012.
- [5] BELKHAYAT M. Stability criteria for AC power systems with regulated loads[D]. West Lafayette,USA:Purdue University,1997.
- [6] WEN B,BOROYEVICH D,BURGOS R,et al. Analysis of  $D-Q$  small-signal impedance of grid-tied inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2016,31(1):675-687.
- [7] 于鸿儒,苏建徽,王一丁,等. 并网逆变器降阶模型及其构建方法的分析与对比[J]. 电力系统自动化,2020,44(10):155-165.  
YU Hongru,SU Jianhui,WANG Yiding,et al. Analysis and comparison of reduced-order model and modeling method for grid-connected inverter[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(10):155-165.

- [8] 武相强,王赞程,陈新,等. 考虑频率耦合效应的三相并网逆变器阻抗模型及其交互稳定性研究[J]. 中国电机工程学报,2020,40(5):1605-1617.  
WU Xiangqiang,WANG Yuncheng,CHEN Xin,et al. Sequence impedance model and interaction stability research of three-phase grid-connected inverters with considering coupling effects [J]. Proceedings of the CSEE,2020,40(5):1605-1617.
- [9] 陈汝斯,林涛,余光正,等. 基于Gerschgorin定理和矩阵相似变换的谐波谐振参数安全域快速估计方法研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(16):4610-4617,4886.  
CHEN Rusi,LIN Tao,YU Guangzheng,et al. Study on fast estimation method of parameter security region of harmonic resonance based on Gerschgorin theorem and matrix similarity transformation[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(16):4610-4617,4886.
- [10] LIU W H,DENG F Q,LIANG J R,et al. Weighted average consensus problem in networks of agents with diverse time-delays[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics,2014,25(6):1056-1064.
- [11] REN Y N,WANG X H,CHEN L,et al. A strictly sufficient stability criterion for grid-connected converters based on impedance models and Gerschgorin's theorem[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2020,35(3):1606-1609.
- [12] 谢玲玲,何方正,孙昌茂. 基于盖尔圆定理的三相并网逆变器系统稳定判据及稳定性分析[J/OL]. 电源学报. [2021-09-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20200817.1437.002.html>.
- [13] 李水天,林涛,盛逸标,等. 面向次/超同步振荡的控制参数稳定域构建[J]. 中国电机工程学报,2020,40(22):7221-7230.  
LI Shuitian,LIN Tao,SHENG Yibiao,et al. Construction of stability region of control parameters against sub/super synchronous oscillation[J]. Proceedings of the CSEE,2020,40(22):7221-7230.
- [14] NAZARI M H,ILIĆ M,LOPES J P. Dynamic stability and control design of modern electric energy systems with large penetration of distributed generators[C]//2010 IREP Symposium Bulk Power System Dynamics and Control. Rio de Janeiro,Brazil:IEEE,2010:1-7.
- [15] HONARVAR NAZARI M,ILIC M,PEÇAS LOPES J. Small-signal stability and decentralized control design for electric energy systems with a large penetration of distributed generators[J]. Control Engineering Practice,2012,20(9):823-831.
- [16] CHEN R S,LIN T,BI R Y,et al. Study on security region of harmonic resonance in parameter field based on fast eigenvalue estimation[C]//2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Boston,MA,USA:IEEE,2016:1-5.
- [17] REN Y N,CHEN L,WANG X H,et al. Study on PLL parameter security region based on Gerschgorin disc theorem and impedance method[C]//8th Renewable Power Generation Conference. Shanghai,China:IEEE,2019:1-5.

## 作者简介:



杨 蕾

杨 蕾(1986—),女,高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统稳定分析与控制(**E-mail**:15911577929@139.com);

黄 伟(1979—),男,高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统运行与分析(**E-mail**:haxwell@163.com)。

(编辑 王欣竹)

## Stability analysis of grid-connected inverter system based on Ostrowski disc theorem

YANG Lei<sup>1</sup>, HUANG Wei<sup>2</sup>, GUO Cheng<sup>1</sup>, ZHANG Dan<sup>2</sup>, XIANG Chuan<sup>1</sup>, XI Xinze<sup>1</sup>, XING Chao<sup>1</sup>

(1. Electric Power Research Institute, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, China;

2. Yunnan Power Dispatching and Control Center, Kunming 650200, China)

**Abstract:** The interaction between grid-connected inverter and power grid is one of the factors that affect the stable operation of grid-connected system. Aiming at the stability of grid-connected inverter system, a fast method to determine the stability of grid-connected inverter system is proposed. Firstly, the return rate matrix of grid-connected inverter system is obtained based on impedance analysis method. Secondly, based on the Ostrowski disc theorem, the characteristic root locus Ostrowski band of the return rate matrix is obtained, and the stability of the system is judged according to the Ostrowski stability criterion. Finally, the simulation model is built in MATLAB/Simulink, and the experimental platform is built. The simulation and experimental results show that the stability criterion can effectively determine whether the system is in a stable state, and can quickly estimate the parameter stability region of grid-connected inverter system, thus providing the judgment basis for the selection of system parameters.

**Key words:** grid-connected inverter; impedance analysis; Ostrowski disc theorem; return rate matrix; parameter stability region

(上接第91页 continued from page 91)

## Optimized Y-source inverter for continuous input current

LIU Hongpeng, LU Zhuang

(Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

**Abstract:** The input current of the traditional Y-source inverter is discontinuous, and the leakage inductance of the coupled inductor will cause the DC bus voltage spike and the voltage gain reduction. To address above issues, an optimized Y-source inverter is proposed, which can achieve continuous input current and suppress the impact of the leakage inductance of the coupled inductor on the inverter performance, and reduce the starting inrush current, the bus voltage spike and the magnetic core size. Moreover, compared with the traditional Y-source inverter, it applies lower shoot-through duty ratio when considering same voltage gain, which expands the modulation ratio range and improves the quality of the output voltage waveform. Besides, an analytical calculation method is adopted to thoroughly analyze the loss problem of the inverter shoot-through duty ratio caused by the leakage inductance of the coupled inductor. Finally, compared with the traditional Y-source inverters, the superiority of the optimized Y-source inverter is verified by simulation and experiment.

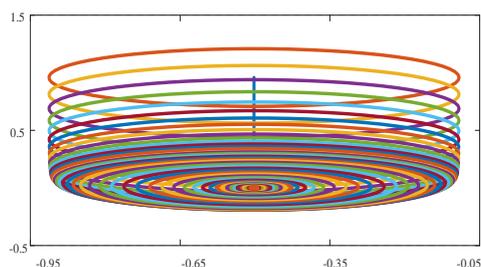
**Key words:** impedance source inverter; Y-source inverter; coupled inductor; voltage stresses; current stresses

## 附录 A

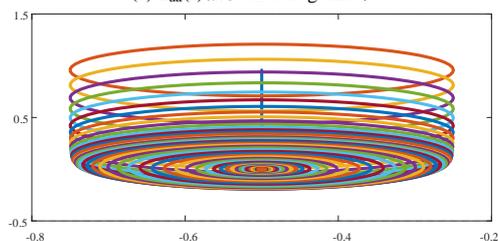
表 A1 系统参数

Table A1 System parameters

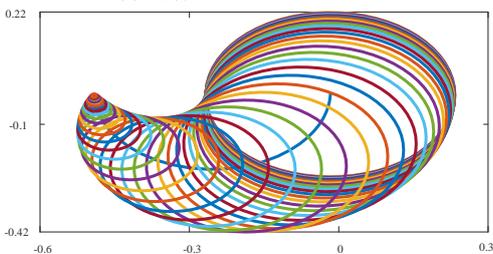
参数	数值	参数	数值	参数	数值	参数	数值
$V_{dc}/V$	600	$i_{dref}/A$	-190	$L_g/H$	0.02	$k_{ipll}$	10
$\omega/(\text{rad s}^{-1})$	$100\pi$	$I_{qref}/A$	0	$V_d^s/V$	300	$k_{pi}$	0.03
$R/\Omega$	0.2	$D_d^s/V$	0.5	$V_q^s/V$	0	$k_{ii}$	0.95
$L/H$	0.01	$D_q^s/V$	0.03	开关频率 $f$	10000	$T_{del}$	1.5/10000
$R_g/\Omega$	0.4	$k_{ppll}$	0.25				



(a)  $L_{dd}(s)$ 根轨迹 Gersgorin 带



(b)  $L_{dd}(s)$ 根轨迹 Ostrowski 带



(c)  $L_{dq}(s)$ 根轨迹 Ostrowski 带

图 A1 回率矩阵包含特征根轨迹的 Gersgorin 带和 Ostrowski 带

Fig.A1 Gersgorin band and Ostrowski band of return rate matrix with characteristic root locus

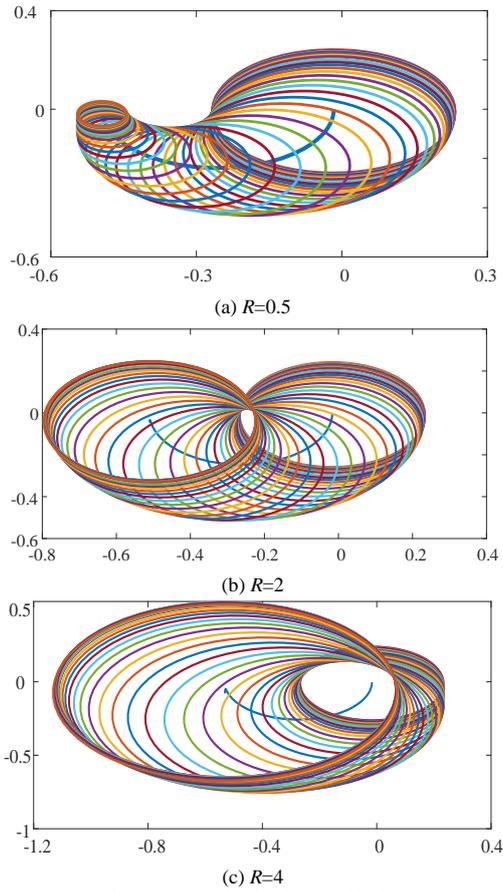


图 A2 不同阻抗下  $L_{qq}(s)$  包含特征根轨迹的 Ostrowski 带

Fig.A2 Ostrowski band of  $L_{qq}(s)$  with characteristic root locus under different impedances

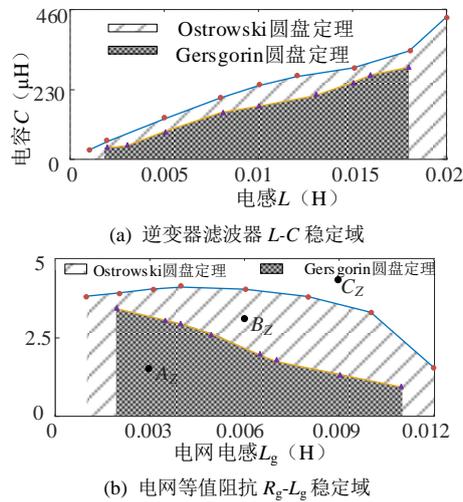


图 A3 并网逆变器和电网阻抗参数稳定域

Fig.A3 Stability region of grid-connected inverter and grid impedance parameters

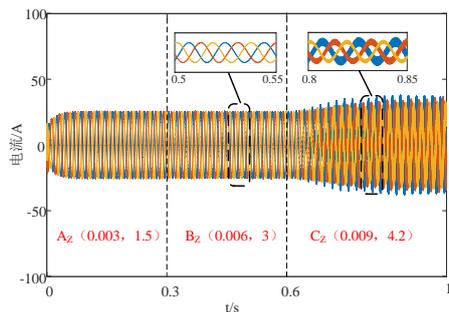


图 A4  $R_g-L_g$  稳定域仿真波形

Fig.A4 Simulative waveforms of  $R_g-L_g$  stability region

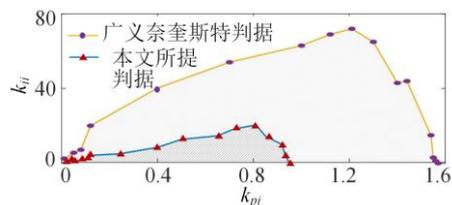


图 A5  $k_{pi}-k_{ii}$  稳定域

Fig.A5 Stability region of  $k_{pi}-k_{ii}$

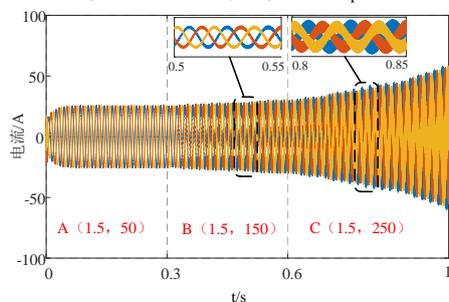


图 A6 控制参数稳定域仿真波形

Fig.A6 Simulative waveforms of control parameter stability region

表 A2 实验参数

Table A2 Experimental parameters

参数	数值	参数	数值
额定功率 $P/\text{kW}$	5	工频 $f_0/\text{Hz}$	50
直流电压 $V_{dc}/\text{V}$	700	开关频率 $f/\text{kHz}$	10
电网电压 $V_g/\text{V}$	220	滤波电容 $C/\mu\text{F}$	5

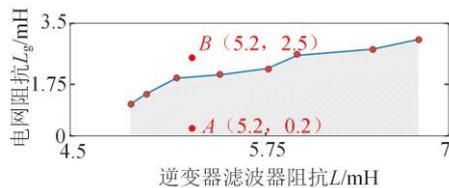


图 A7 阻抗稳定域

Fig.A7 Stability region of impedance