第 50 卷 第 1 期：370-386 高电压技术 Vol.50, No.1: 370-386
2024 年 1 月 31 日 High Voltage Engineering January 31, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20230452

并网逆变器非线性特性建模及稳定性研究综述

许津铭[1]，凌子涵[1]，程　成[1]，钱　强[2]，谢少军[1]
（1. 南京航空航天大学自动化学院，南京 211106；2. 河海大学能源与电气学院，南京 211100）

摘　要：并网逆变器作为连接新能源分布式发电和电网之间的关键接口，发挥着将电能高效、高质量馈入电网的重要作用。随着新能源渗透率的持续提高，并网点处电网存在诸如高电网阻抗、丰富的低频谐波、电压幅值/频率波动甚至故障等复杂状况。鉴于并网逆变器本质上是一个多输入、强耦合的非线性系统，沿用传统的线性建模与分析方法已难以解释工程中的复杂谐波振荡现象，并网逆变器的稳定性分析及其稳定运行受到巨大挑战。为此，该文首先具体阐述了线性与非线性和系统受扰大小之间的关系，指出大干扰稳定性分析更依赖于非线性建模及分析方法的应用。在此基础上，对已见诸报道的并网逆变器稳定性分析方法进行了归纳和对比。然后，详细阐述了稳定性分析方法在并网逆变器特定非线性环节中的应用。最后，总结并讨论了现有研究的不足，以期进一步促进“双高”背景下并网装置非线性建模和稳定性分析的研究。

关键词：并网逆变器；非线性；大干扰稳定性；锁相环；饱和限幅；复杂电网

Overview on Nonlinear Modeling and Stability Analysis of Grid-tied Inverters

XU Jinming[1], LING Zihan[1], CHENG Cheng[1], QIAN Qiang[2], XIE Shaojun[1]
(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;
2. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: The grid-tied inverter, which serves as a key interface that connects the renewable-energy-based distributed power generation and the grid, plays a major role in feeding electrical energy into the power grid with high efficiency and quality. However, with the increasing penetration rate of renewable energies, the point of common coupling of the inverter suffers complex grid conditions such as large grid impedance, rich background harmonics, grid voltage fluctuations, frequency derivation or even grid faults. In view of the fact that the grid-tied inverter is essentially a nonlinear system with multiple inputs and strong coupling, it is difficult to explain the complex harmonic oscillation phenomenon using the traditional linear modeling and stability analysis methods, which poses great challenges to the stability analysis and stable operation of the grid-tied inverter. Therefore, this paper first clarifies the relationship between nonlinearity and large-disturbance stability, indicating that the large-signal stability analysis depends more on the application of nonlinear modeling and analysis methods. On this basis, several reported nonlinear stability analysis methods in grid-tied inverters are summarized and compared. Furthermore, the application of stability analysis methods with respect to specific nonlinear factors in grid-tied inverters is elaborated. Finally, the limitations of the existing studies are discussed in order to further promote the research on nonlinear modeling and stability analysis of grid-tied inverters in “double high” power systems.

Key words: grid-tied inverter; nonlinearity; large-disturbance stability; phase-locked loop; saturation limiter; complex grid conditions

0　引言

大力推广含高比例新能源发电、高比例电力电子并网装置(即“双高”)的分布式发电系统具有重大价值和现实意义，也是促进新能源大规模应用、推动电力系统转型、实现我国“双碳”目标的重要举措[1]。然而，随着新能源渗透率不断提高，长距离输电线路、变压器漏感等在公共耦合点(point of common coupling, PCC)处引入了不可忽略的电网阻抗，电网逐渐呈现出弱电网甚至是极弱电网特性，严重威胁系统稳定性和可靠性[2-3]。此外，大扰动如短路、设备切入切出等可能造成电网电压波动甚至电网故障。总之，考虑到 PCC 处电网通常存在高电网阻抗、丰富的电网电压背景谐波、电网电压波动、频率偏移、相位跳变甚至电网故障等现象，新能源

基金资助项目：国家自然科学基金(52277184)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52277184).

发电系统存在失稳风险，导致无法并网或频繁离网。并网逆变器(grid-tied inverter, GTI)作为分布式新能源发电和电网之间的接口，其性能优劣在很大程度上会影响系统的稳定性和新能源分布式发电规模的增长[4-5]。因此，如何保障并网逆变器的稳定运行是一个巨大的挑战。

针对逆变器并网稳定性问题，国内外学者已经展开了对并网系统小干扰和大干扰稳定性问题的分析研究。目前并网逆变器的小干扰稳定性分析方法已较为成熟[6]，大干扰稳定性问题近几年来也开始得到广泛关注。然而，受限于逆变器自身非线性特征以及相关分析手段的欠缺，目前研究仍然存在一些不足，包括但不限于：

1）受扰下逆变器线性简化建模的合理性仍存在疑问。并网逆变器是一个高阶非线性系统[7-8]，若受到大信号瞬态扰动时，逆变器将偏离其稳态工作点，此时线性化的分析方法和手段将难以适用，线性化模型也可能是不准确的[9-10]；如何保证实际装置在暂态过程的稳定，并能够运行到新的稳态工作点，仍然是目前的一大挑战。

2）并网逆变器自身存在大量非线性环节，包括三角函数运算、饱和限幅、参数不确定分布等，传统线性分析方法对非线性环节近似处理的合理性本身就存在疑问。近些年也多有电网电压跌落下锁相环(phase-locked loop, PLL)暂态同步失稳[11-15]、瞬态调制饱和导致的灾难性分岔现象[16]、环路限幅及饱和引起的等幅振荡[17-18]等报道，而这些失稳问题借助线性理论通常很难解释。并网逆变器的一些非线性因素是复杂电网下小/大干扰失稳的重要诱因之一[8,19]。因此，有必要利用非线性分析手段研究逆变器的复杂振荡机理。

鉴于并网逆变器非线性特性与并网稳定性是紧密相关的，如何准确地建模和分析这样含多个非线性环节的并网装置是保证系统稳定运行的关键。本文以分布式发电系统中广泛应用的跟网型逆变器为例，对国内外并网逆变器典型非线性建模和稳定性分析方法进行综述。本文首先描述了并网逆变器建模和小/大干扰稳定性的基本问题，指出需要探索适用于大干扰情形的非线性分析方法。然后，重点对并网逆变器现有稳定性分析方法进行了总结归纳。在此基础上，详细介绍了并网逆变器典型非线性因素建模及非线性分析方法的应用。最后，讨论了现有研究在非线性建模和稳定性分析方面的不足，为未来分布式发电稳定可靠并网提供指导。

1　问题描述

1.1　系统建模

并网逆变器是典型的非线性系统。一个非线性系统可以表示为一组非线性微分方程的形式[10]，即：

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{x}}{\mathrm{d}t}=f(\boldsymbol{x},\boldsymbol{u},t) \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{x}=[x_1, x_2,\cdots, x_n]$为选取的 n 个状态变量向量；$\boldsymbol{u}$ 为输入向量；t 为时间。并网逆变器是一个非自治非线性系统，通过选取合适的非时变状态变量，可以将其转化为自治非线性系统，时间 t 不显含在方程中。通过对非线性系统在平衡点附近线性化，可以将其转换为一组常微分方程的形式，即：

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{x}}{\mathrm{d}t}=\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)\Bigg|_{(\boldsymbol{x}=\boldsymbol{x}_\mathrm{e})}\boldsymbol{x}+\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)\Bigg|_{(\boldsymbol{u}=\boldsymbol{u}_\mathrm{e})}\boldsymbol{u} \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{x}_\mathrm{e}$ 和 $\boldsymbol{u}_\mathrm{e}$ 代表平衡点处的值。如果选取一个控制律 $\boldsymbol{u}=g(\boldsymbol{x})$，则式(2)可以进一步转化为：

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{x}}{\mathrm{d}t}=\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)\Bigg|_{(\boldsymbol{x}=\boldsymbol{x}_\mathrm{e})}\boldsymbol{x}=\boldsymbol{A}_{n\times n}\boldsymbol{x} \tag{3}$$

式中：矩阵 $\boldsymbol{A}$ 为 n 阶系统在平衡点处的 Jacobian 矩阵，式(3)也是线性系统的状态空间描述[20]。

非线性系统通常含有多个平衡点，线性化的系统只是非线性系统在特定平衡点邻域内的近似表达，不能反应非线性系统在其他平衡点处以及大范围内的动态特性[10]。

1.2　并网逆变器模型和稳定性的关系

随着电力电子并网装置的大量接入，电力系统的动态特性发生了深刻的变化。近年来国内外学者已经尝试将电力电子设备带来的新型稳定性问题纳入到经典电力系统稳定性中，并提出了一些新的分类方法，详细可参考文献[21-23]。

在电力系统稳定性分类方法中，根据扰动大小分为小干扰稳定性和大干扰稳定性。文献[22]也指出，大干扰稳定性主要包括大干扰角度/同步稳定性和电压稳定性。对跟网型逆变器而言，远端电网通常比较稳定，尽管 PCC 点处可能存在电压稳定性问题，但目前的主要挑战是角度/同步稳定性[11-15]和电磁动态下的稳定性[24]，因此，本文重点关注并网逆变器在小/大扰动下的稳定性问题。

类比电力系统对小/大扰动的分类，并网系统稳定性同样可以分为稳态工作点附近的小干扰稳定性和短路故障等大扰动引起的大干扰稳定性。小干扰

稳定性主要研究逆变器在平衡点附近(即 $\boldsymbol{x}$ 接近 $\boldsymbol{x}_e$)受小扰动时的特征。此时，式(2)的线性模型是较为可靠的，进而可以利用经典控制理论的方法分析系统的小干扰稳定性。

大干扰稳定性重点关注受大扰动后系统状态变量的大范围转移特性，及能否保证暂态过程的稳定性。需要强调的是，在特定扰动范围内，大干扰稳定的系统必然是小干扰稳定的[5]。小干扰稳定性的研究是一种折衷，目前来说仍鲜有适用于大扰动非线性动态分析简单、准确的方法[5]。线性模型和非线性模型的关系如图 1 所示。

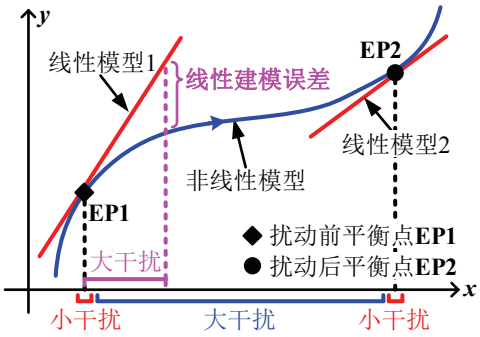


图 1 线性模型与非线性模型的关系

Fig.1 Relationship between linearized model and nonlinear model

一方面，当并网逆变器受到较大的暂态扰动时，状态变量 $\boldsymbol{x}$ 已经远离初始平衡点 EP1 并向着新的平衡点 EP2 移动。在扰动前后的 2 个工作点处，可以对模型进行线性化处理，以进行平衡点处的小干扰稳定性分析。然而，从初始平衡点运动到新平衡点的过程中，平衡点处的线性化模型和非线性模型存在较大误差。因此，扰动前后的线性模型均无法表征式(1)的非线性系统。

另一方面，线性稳定性分析难以揭示大干扰过程中的系统动态。即使受扰前后线性化的系统均是小干扰稳定的，并网逆变器也仍然存在大干扰暂态失稳的风险。为说明分析的正确性，对小干扰线性化理论在大干扰稳定性分析中的适用性进行初步仿真测试，逆变器结构图见附录 A 图 A1，逆变器以单位功率因数并网运行，电网侧串入电感模拟弱电网条件(短路比为 3.44)，其余参数见附录 A 表 A1。

附录图 A2(a)给出了不同电网电压幅值 U_s 下，线性化建模的特征根分布。在 0.36~1 的电网电压(标幺值)下系统特征根均具有负实部，线性方法判断系统可以稳定运行。从仿真测试结果来看，如附录图 A2(b)所示，系统均可以在 U_s=1.0(标幺值)和 U_s=0.36(标幺值)下稳定运行，进网电流波形质量良好，说明此时系统是小干扰稳定的。但是，当电网电压标幺值从 1.0 迅速跌落至 0.36 后，如附录图 A2(c)所示，系统大干扰失稳，进网电流也出现振荡，与线性方法判断结果不相符。因此，线性化的分析方法仅适用于小干扰情形，并不适用于探究受较大扰动的并网装置暂态特性，大干扰下线性化的精度大幅降低，甚至会给出错误的预测结果。总之，采用非线性分析方法研究系统稳定性问题是更为严谨的途径[25]。正如文献[5]指出，非线性是系统小干扰和大干扰稳定性的本质区别所在。针对复杂电网下并网逆变器易受小/大干扰失稳的问题，有必要详细研究适用于宽扰动范围下的非线性分析方法。

2 应用于并网逆变器的稳定性分析方法

本章重点综述了现有应用于并网逆变器的一些线性和非线性分析方法，以指导系统在小干扰和大干扰下的稳定性分析。

2.1 线性分析方法

目前并网逆变器较为成熟的线性分析方法主要包括基于线性模型的特征根分析[26-27]和 Nyquist 稳定性分析[28-30]。特征根分析法是一种时域的分析方法，基于式(2)平衡点处的线性化状态空间模型，只要矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的所有特征根严格位于左半复平面内，则该线性系统是稳定的，且原非线性系统在平衡点处是渐近稳定的[10]。特征根分析法可以清晰说明引起小干扰失稳的具体主导状态变量、振荡频率等，但是仅适用于线性时不变(linear time-invariant, LTI)系统和参数已知的白盒系统。Nyquist 稳定性分析是基于传递函数的频域稳定性分析方法，通过建立逆变器的输出阻抗模型，利用级联系统稳定性判据分析小干扰稳定性[2]。该方法将逆变器和电网等效成 2 个独立系统级联形式，特别适用于分析控制器参数未知的黑盒系统，但也存在多频耦合分析复杂、难以反映子系统内各控制回路相互作用等不足[6]。

2.2 非线性分析方法

如 1.2 节所述，线性分析方法仅适用于小干扰稳定性研究，当并网逆变器的稳态工作点发生偏移时，线性化的方法均需要重新研究稳定性；此外，大干扰暂态过程也很难借助上述线性分析方法体现。非线性的方法由于可以建模大干扰动态而得到了国内外学者的关注研究。

2.2.1　等面积法

等面积法(equal-area criterion, EAC)原本是传统单机无穷大系统暂态稳定性分析较为成熟的方法，由于同步发电机(synchronous generator, SG)和 PLL 在同步机制方面的相似性，EAC 法被较早地引入到研究暂态同步稳定性中[31-33]。EAC 法示意图如图 2 所示。图 2 中，R_g，L_g 为电网阻抗的阻性和感性分量，i_{gd} 和 i_{gq} 分别为入网电流 i_g 的 d、q 轴分量，U_s 为电网电压的幅值，ω_0 是电网基波角频率，δ 为 PLL 输出相角与电网电压相角的差值。

类比 SG，电网电压跌落前后的轨迹分别为 $U_s\sin\delta$ 和 $U_{s1}\sin\delta$，记作等效电磁功率。$R_gi_{gq}+\omega_0L_gi_{gd}$ 为等效机械功率。如果跌落程度过大，即 $|R_gi_{gq}+\omega_0L_gi_{gd}|>U_s\sin\delta$，此时系统不存在平衡点，$\delta$ 将一直加速失稳；反之，如果平衡点存在，锁相环的输出频率 ω_{pll} 会经历增加和减小的过程。若加速区域面积 A_{acc} 大于减速区域的面积 A_{dec}，δ 将越过不稳定工作点 δ_c，系统失稳；反之，δ 将经过短暂振荡后回到新的稳态工作点 δ_b，系统保持稳定。

尽管传统等面积法较为清晰直观，但是由于其在暂态同步稳定性分析中忽略了 PLL 中的非线性阻尼项，而不同工况下阻尼项正负不定，因此容易出现较大判断误差，难以准确预测并网逆变器是否失稳。文献[34]指出，当逆变器遭受严重(或轻度)电网故障时，传统 EAC 法的分析通常是激进(或保守)的。因此，已有一些文献提出了改进 EAC 法[35]、迭代 EAC 法[36]等，较充分地考虑了 PLL 非线性阻尼特性，稳定域估计精度有较大提高，保守性较低，但计算也更为复杂。EAC 法目前仅适用于二阶类同步机系统的分析，难以引入到并网逆变器高阶复杂系统的大干扰稳定性研究中。

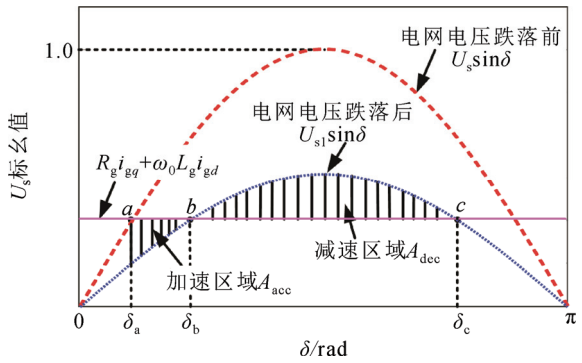


图 2　等面积法示意图

Fig.2　Equal-area criterion

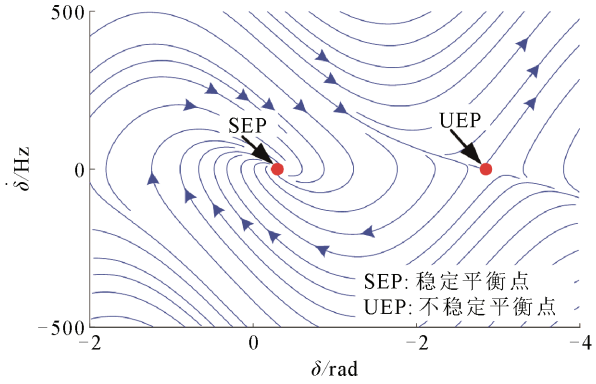


图 3　相图法示意图

Fig.3　Phase portrait method

2.2.2　相图等图形化方法

相图法是非线性系统理论中研究二阶系统的图形化方法[10]，根据相轨迹是否能收敛到稳定平衡点(stable equilibrium point, SEP)，系统稳定；反之，若轨迹越过不稳定平衡点(unstable equilibrium point, UEP)来判断系统稳定性，分析清晰直观，如图 3 所示。图 3 中，若轨迹收敛到稳定平衡点，则系统将失稳。

传统 PLL 是典型的二阶非线性系统，相图法提供了较好的数值分析手段。针对等面积法在 PLL 暂态同步稳定性分析中的不足，文献[37]较早地借助相图法展开研究。近年来，已有一些文献采用相图法研究系统的大干扰稳定性[37-39]，并对暂态下的系统参数设计和优化给出了一些有价值的建议。

此外，分岔、极限环(limit cycle, LC)和混沌等都是非线性系统典型的可图形化非线性现象[10]，特别适用于分析线性方法难以解释的振荡问题。目前针对电力电子变换器的固有非线性特性，一些研究将非线性的分岔和混沌理论引入到逆变器中分析各类次谐波和周期振荡等现象[40]。针对 PLL 非线性动力学，文献[34]发现了 3 种不同类型的分岔，包括广义鞍节点、Hopf 和同宿分岔。文献[41-42]发现了 PLL 引入的不稳定极限环，并证明了其唯一性。文献[43-44]分别在电压环和电流环时间尺度下研究了系统参数影响导致的分岔现象。总之，分岔，极限环等图形化方法为各类非线性振荡现象提供了另一个角度的思考。

通常相图法仅针对一阶或二阶系统展开研究，但针对高阶系统同样可以绘制相图并投影在二维或三维平面上，这在文献[45]中被称为广义相图法，但其本质还是一种针对高阶系统的数值求解方法。虽然相图等图形化方法在评价非线性系统稳定性方

面是直观有效的，但是其仅仅针对特定的参数进行分析，难以引入一般规律，而且每次进行稳定性分析都要进行相图研究，分析不具备普遍性。要克服这一问题，并系统地找到平衡点的吸引域(domain of attraction, DOA)，需要采用 Lyapunov 方法。

2.2.3 Lyapunov 方法

Lyapunov 方法主要包括 Lyapunov 第一法(间接法)和 Lyapunov 第二法(直接法)。对于一个任意阶非线性系统，得到其精确解析解通常极其复杂，且绝大多数情况是不可能的，但是 Lyapunov 方法绕开了求解微分方程的过程，直接判定解的稳定性[10]。尤其是 Lyapunov 直接法，其可以针对特定系统给出解析稳定域，有利于并网逆变器的参数设计。

1）Lyapunov 第一法(间接法)

Lyapunov 第一法把非线性系统在平衡点附近进行线性化，间接地分析其稳定性[10]。通过求解线性化方程在平衡点处的 Jacobian 矩阵：

$$\boldsymbol{J}=\left(\begin{array}{ccc}\dfrac{\partial f_1}{\partial x_1} & \cdots & \dfrac{\partial f_1}{\partial x_n}\\ \vdots & & \vdots\\ \dfrac{\partial f_n}{\partial x_1} & \cdots & \dfrac{\partial f_n}{\partial x_n}\end{array}\right)_{\boldsymbol{x}=\boldsymbol{x}_e} \tag{4}$$

式中：$x_i(i=1, 2, \cdots, n)$为系统的 n 个状态变量；$f_i(i=1, 2, \cdots, n)$为非线性函数；$\boldsymbol{x}_e$ 为系统的平衡点。对于平衡点处的 Jacobian 矩阵，可以求解其行列式 $\det(\lambda\boldsymbol{I}-\boldsymbol{J})$，$\boldsymbol{I}$ 是 n 维单位矩阵，通过计算行列式可以获得系统的特征方程和特征根，这样就可以采用特征根分析法研究平衡点附近的小干扰稳定性，存在稳定平衡点的前提是特征值 $\lambda_i(i=1, 2, \cdots, n)$均有负实部。Lyapunov 第一法可以用来评价平衡点的稳定性。然而，其并没有给出平衡点 DOA 的任何反映，因此需要借助 Lyapunov 直接法。

2）Lyapunov 第二法(直接法)

Lyapunov 第二法则指出，若非线性系统某个平衡状态是渐近稳定的，则其自身的能量将随时间 t 不断衰减，直至能量趋于极小值，系统也趋于平衡状态。考虑自治系统 $\dot{\boldsymbol{x}}=f(\boldsymbol{x})$，若 $\boldsymbol{x}=\boldsymbol{0}$ 是方程的一个平衡点，$W\&\mathbb{R}^n$ 是包含原点的一个定义域，设 $V(\boldsymbol{x})$ 是区域 $W\to\mathbb{R}$ 的连续可微函数，且满足：

$$\begin{cases}V(\boldsymbol{0})=0\\ V(\boldsymbol{x})>0, \forall \boldsymbol{x}\in W-\{\boldsymbol{0}\}\\ \dot{V}(\boldsymbol{x})=\nabla V\cdot f(\boldsymbol{x})<0, \forall \boldsymbol{x}\in W-\{\boldsymbol{0}\}\end{cases} \tag{5}$$

则称系统在平衡点 $\boldsymbol{x}=\boldsymbol{0}$ 是渐近稳定的。$V(\boldsymbol{x})$称为 Lyapunov 函数。此外，DOA 是非线性系统的一个重要属性，对应于收敛到 SEP 的一组状态的初始值。对于一个区域 Ω 满足表达式

$$\Omega=\left\{\boldsymbol{x}\in\mathbb{R}^n\left|\begin{cases}0<V(\boldsymbol{x})\le V_{cr}\\ \dot{V}(\boldsymbol{x})<0\end{cases}\right.\right\}, \Omega\subset W \tag{6}$$

则 Ω 描述了平衡点 DOA 中的正不变集。V_{cr} 表示系统最大 Lyapunov 函数。根据式(6)可以找到 DOA 的估计值。目前针对 PLL 暂态同步稳定性，已有较多文献运用 Lyapunov 方法，从不同角度构造了 Lyapunov 函数，并给出了 DOA 的估计[46-49]。

3）Lyapunov 衍生方法

国内外学者也研究了一些基于 Lyapunov 理论的衍生方法在微电网系统中的应用[50-51]。其中，由 Takagie 和 Sugeno 两位学者于 1985 年提出的 T-S 模糊模型为复杂非线性系统分析提供了一种简化方法[52]。基于 T-S 模糊理论的线性矩阵不等式(linear matrix inequalities, LMI)方法也在各类并网系统中研究较多[45,53-55]。其他 Lyapunov 衍生方法还包括 Branyton-Moster 混合势理论[16,56]、基于遗传算法的块对角二次型 Lyapunov 函数[57]、逆轨迹跟踪法[58]等，文献[50]中进行了详细介绍和案例应用研究，这里不再展开讨论。

尽管 Lyapunov 直接法可以给出系统平衡点的吸引域估计，但该吸引域是保守的，如图 4 所示，估计的稳定域通常是真实稳定域的子集，即使初始点不在估计吸引域内，系统也可以收敛到 SEP。

一些文献针对 PLL 二阶非线性方程，类比同步机方程构造了 Lyapunov 能量函数，但也都是仅考虑了正阻尼情形，稳定域是高度保守的[46-48]。另外，Lyapunov 函数的构造较为困难，缺少系统性的构造方法，对于高阶系统模型，尤其是多台逆变器并联

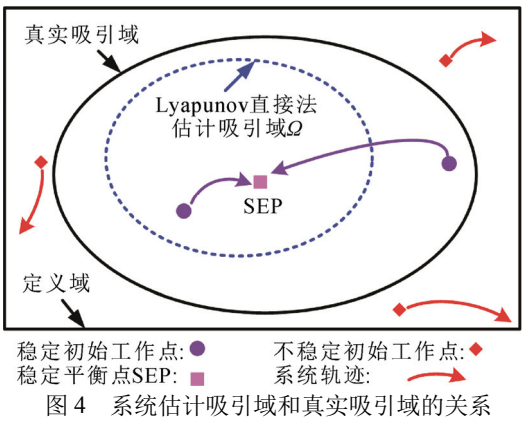


图 4 系统估计吸引域和真实吸引域的关系

Fig.4 Relationship between the estimated domain of attraction and the real domain of attraction of system

系统稳定性分析而言，构造 Lyapunov 函数是十分困难的[5]，这不利于复杂系统的推广和应用。

2.2.4　频域分析方法

上述稳定性分析方法都是基于式(1)的非线性微分方程展开的，由于部分非线性系统可以表示为一个线性环节和非线性单元的闭环反馈连接(也称为 Lur'e 型系统)，如图 5 所示。图 5 中，r 为输入信号，e 为误差信号，y 为输出信号，$G(s)$为系统的线性部分，而 $\psi(\cdot)$则代表系统的非线性部分。因此，若对非线性部分进行适当的处理，则可以采用频域稳定性分析方法，主要包括描述函数法(describing function, DF)、圆判据等。

频域分析方法中得到较多应用的是描述函数法。国内外已有较多文献利用描述函数法对并网逆变器次同步振荡(sub-synchronous oscillation, SSO)或等幅振荡进行研究[17-18,59-60]。描述函数法可以解释极限环现象，适合分析含有非线性饱和环节(PWM 饱和、环路限幅)的振荡问题，物理含义明确且较为清晰直观。然而，描述函数对于非线性部分的近似并不严格，应用时必须考虑其前提条件；且描述函数法只能研究系统的频率响应特性，无法在时域上准确分析。尽管如此，该方法对于近年在新能源发电系统中宽频率范围内出现的各类等幅振荡给出了较好的解释。

另外，频域分析中涉及到一类绝对稳定性理论。假设原点是系统的一个平衡点，非线性部分 $\psi(\cdot)$ 满足扇形区域条件，对于扇形内的所有非线性部分而言，如果原点都是全局一致渐近稳定的，那么就称系统是绝对稳定的[10]；基于绝对稳定理论的圆判据在文献[61-63]中得到应用。文献[61]提出了一种基于广义圆判据和 Lyapunov 稳定性理论的稳定控制方法，推导了系统绝对稳定的等效 LMI 形式和最大化的扇形边界，并设计了非线性反馈补偿信号，保证了逆变器在电网阻抗较大波动下的稳定性和鲁棒性，但是，该方法仅仅是针对所提特殊控制的稳定性优化，并不具备普遍性。文献[62-63]利用圆判据给出了逆变器在特定电网电压和功率区间下的绝对稳定条件，但针对更宽变化范围的非理想电网条件或系统，其适用性还有待进一步研究。

需要强调的是，只要满足非线性扇形有界条件，绝对稳定的系统在特定范围内都是大干扰稳定的，但绝对稳定仅是一个充分条件，不满足圆判据的系统无法判断其稳定性[10,63]。

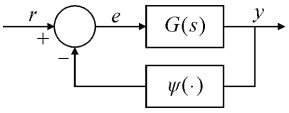


图 5　典型非线性 Lur'e 系统的反馈连接结构

Fig.5　Feedback connection structure of typical nonlinear Lur'e system

2.2.5　非线性解析法和数值法

上述提到的相图法，频域分析方法等都是定性的非线性分析方法，定量方法主要还包括解析法、数值法等。解析方法可以给出非线性近似解的表达式，便于研究系统轨迹和参数之间的关系，如平均法[64]，多尺度法[65]等解析摄动法在 PLL 暂态同步稳定性分析中得到研究。这类近似方法忽略了高阶项，在强非线性或扰动幅值较大时并不准确，而在一般扰动下是可行的。

数值方法需要借助计算机进行大量计算或仿真，如平方和规划法(sum-of-square programming, SOSP)[66-67]、LMI 优化法[68-69]、时域仿真法[70]等。如文献[67]采用 SOSP 法，从最优化 Lyapunov 函数出发，将 DOA 估计问题转化为 SOSP 问题，一定程度上减少了计算量，同时保证了 DOA 估计较 Lyapunov 法更高的精确性。文献[68]则利用文献[71]提出的 LMI 优化法得到较 SOSP 法[67]和 Lyapunov 方法[46]更精确的吸引域，保守性更低。数值法通过计算机辅助计算系统的稳定边界，精确度较高，但实现更为复杂，计算量很大，且缺乏对稳定性机理亘发， 的解释；此外，数值法针对更高阶的系统实现也是更加困难的。

2.2.6　小结

并网逆变器常见的非线性分析方法总结如表 1 所示，在系统适应性、能否直接获得稳定域(稳定性判据)、分析的准确性、失稳机理是否直观、算法的复杂性几个方面进行了对比。就适用性而言，等面积法和频域分析方法仅适用于满足特定条件的系统，有较大的局限性。目前得到较多应用的主要还是相图法、Lyapunov 方法和数值法等。Lyapunov 方法尽管可以适用于任意阶系统的稳定域求解，但对高阶并网逆变器通常是很难构造 Lyapunov 函数的，因此目前仍仅停留于一些低阶非线性系统的稳定域求解。相图法、数值法对于高阶系统的稳定性分析更加准确可靠，但是需要大量计算及计算机辅助求解。总之，非线性分析理论在并网逆变器中的应用目前仍然处于初步探索阶段，且这些方法在复杂系统分析中的适用性还有待研究。

表 1 并网逆变器典型非线性分析方法比较

Table 1 Comparison of typical nonlinear analysis methods for grid-tied inverters

稳定性分析方法	适合系统	是否直接获得稳定域	准确性	失稳机理	方法复杂度
等面积法	二阶类同步机系统	是	较低	直观	较简单
相图等图形化方法	一阶/二阶系统	否	较高	直观	较复杂
Lyapunov 方法	任意阶系统	是	适中	较不直观	较复杂
频域分析方法	Lur'e 型系统	否	较高	直观	适中
解析摄动法	任意阶系统	是	较低	较不直观	较复杂
数值法	任意阶系统	否	高	不直观	复杂

3 考虑并网逆变器非线性环节的建模及分析研究现状

第 2 章已经简要介绍了一些适用于并网逆变器大干扰稳定性的非线性分析方法。本章将结合已有方法具体阐述并网逆变器单个非线性环节的建模和稳定性分析研究。

3.1 并网逆变器及其控制环路

图 6 给出了一种三相并网逆变器典型结构图，控制部分包括直流侧电压控制(direct voltage control, DVC)、交流端电压控制(alternating voltage control, AVC)、交流电流控制(alternating current control, ACC)、锁相环、脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)等。L_f 和 C_f 分别为滤波电感和电容。i_{L1} 是逆变器侧电感电流，u_{PCC} 为三相滤波电容电压，也是 PCC 电压。u_d 和 u_q 为 u_{PCC} 经过 Clarke 及 Park 变换后得到的 d、q 轴分量。i_d 和 i_q 分别为 i_{L1} 经过坐标变换后的 d、q 轴分量。U_{dc} 和 U_{dcref} 分别为直流侧电压及其参考值，U_{tref} 为交流电压参考。i_{dref} 和 i_{qref} 分别为有功和无功电流基准。u_s 为电网电压，R_g 和 L_g 分别为电网阻抗的阻性和感性分量。θ_{pll} 是由 PLL 估计的角度信息。

并网逆变器存在几类典型非线性环节，包括三角函数运算、PWM 饱和、控制环路输出限幅、无源元件参数不确定分布等，如图 6 所示。不同类型非线性因素加上标 1—4 以示区分。

3.2 并网逆变器非线性因素的线性化建模研究现状及其局限性

几十年来，国内外学者对并网逆变器建模及稳定性分析展开了大量基础性研究。受制于有效地分析手段，目前的研究主要是忽略非线性环节的影响或对非线性环节进行线性化处理。目前并网逆变器小干扰建模方法(即平衡点附近的线性化建模)得到了广泛地研究及工程应用，主要包括状态空间模型

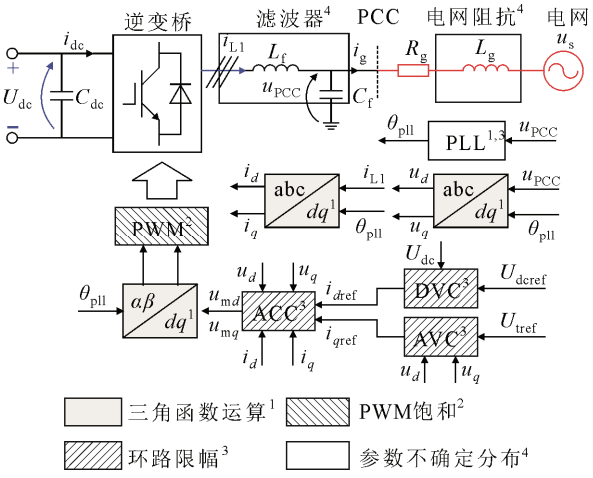


图 6 三相跟网型并网逆变器基本结构图

Fig.6 Structure diagram of three-phase grid-following inverter

(时域)、输出阻抗模型(频域)和幅相模型(频域)等[6]。目前应用较为广泛的小信号模型即阻抗模型，通过在静态工作点处线性化，以便于指导并网逆变器的稳定性分析。其中阻抗模型包括早期提出的诺顿等效模型[2]和在此基础上改进的可变输出阻抗模型[28-30]。在阻抗模型的基础上，三相逆变器的阻抗建模主要包括 3 种形式：dq 轴阻抗回率矩阵模型[72-73]、序阻抗模型[74-75]、相量域模型[76]。此外，一些学者提出的谐波传递函数矩阵[77]、谐波状态空间[78]等计及 PLL 多频段耦合的建模，以及计及 DVC 和 PLL 频率耦合[79]的建模等可以使并网逆变器模型得到进一步拓展和准确化。

尽管现有线性化的建模方法研究较为完善全面，但正如前所述，这些建模仅仅是针对小干扰情形，大扰动情形下线性模型无法描述实际非线性系统。此外，文献[2,28-30]考虑了并网逆变器多个控制环路，建立了线性化阻抗模型，但是 PWM 饱和、环路限幅等非线性因素等均未在模型中得到体现，非线性环节对稳态工作点是否有影响也未提及。鉴于受扰后的模型难以借助线性化模型具体说明，有

必要详细展开计及非线性特性的并网逆变器精确建模以及稳定性分析研究。

3.3　并网逆变器的非线性因素建模

3.3.1　三角函数运算

在三相跟网型并网逆变器控制中，通常采用基于同步旋转坐标系的锁相环(synchronous reference frame PLL, SRF-PLL)作为逆变器和电网之间的同步单元，以实现逆变器输出电压和入网电流的同相[80]。如图 7 所示。$k_{\mathrm{p,pll}}$ 和 $k_{\mathrm{i,pll}}$ 分别为锁相环 PI 控制器的比例增益和积分增益，ω_{pll} 是估计的角频率。

锁相环控制结构中的 Park 变换是一个典型的非线性三角函数变换，且锁相环的输出相角 θ_{pll} 也作为三相并网逆变器 dq 旋转坐标系下的控制角度。因此，锁相环通过 θ_{pll} 耦合到不同控制环路中。在强电网下，锁相环输入 PCC 电压近似为独立的电网电压，锁相环和并网逆变器之间为串联结构，两者可以单独进行分析。然而，弱电网下，锁相环的输入 PCC 电压还包含了电网阻抗上的压降，并网逆变器控制环路、锁相环和电网之间相互耦合，其非线性特性更为复杂[9]。此外，单相并网逆变器 PLL 输出角度生成的电流基准 $i_{\mathrm{ref}}=I_{\mathrm{ref}}\cos\theta_{\mathrm{pll}}$[9]、基于二阶广义积分器的 PLL 非线性频率反馈支路[81]等，也属于非线性三角函数环节。

1）平衡点处的小干扰稳定性分析

在线性化的建模中认为锁相环输入电压相角 θ_{PCC} 和 θ_{pll} 相差很小，即 $\theta_{\mathrm{PCC}}\approx\theta_{\mathrm{pll}}$。令 $\Delta\theta_{\mathrm{PCC}}=\theta_{\mathrm{PCC}}-\omega_0 t$，$\Delta\theta_{\mathrm{pll}}=\theta_{\mathrm{pll}}-\omega_0 t$ 分别为 θ_{PCC} 和 θ_{pll} 与电网电压相角的差值。将正弦和余弦函数小信号化得到：

$$\begin{cases} u_d = U_{\mathrm{PCC}}\cos(\theta_{\mathrm{PCC}}-\theta_{\mathrm{pll}}) \approx U_{\mathrm{PCC}} \\ u_q = U_{\mathrm{PCC}}\sin(\theta_{\mathrm{PCC}}-\theta_{\mathrm{pll}}) \approx U_{\mathrm{PCC}}(\Delta\theta_{\mathrm{PCC}}-\Delta\theta_{\mathrm{pll}}) \end{cases} \tag{7}$$

式中：U_{PCC} 是 PCC 电压幅值。在此基础上，可以得到如图 8(a)所示的 SRF-PLL 小信号模型，并推导得到其闭环传递函数[80]为：

$$G_{\mathrm{pll}}(s)=\frac{\Delta\theta_{\mathrm{pll}}}{\Delta\theta_{\mathrm{PCC}}}=\frac{U_{\mathrm{PCC}}(k_{\mathrm{p,pll}}s+k_{\mathrm{i,pll}})}{s^2+U_{\mathrm{PCC}}(k_{\mathrm{p,pll}}s+k_{\mathrm{i,pll}})} \tag{8}$$

基于 SRF-PLL 的传递函数，可以代入到 3.2 节输出阻抗模型中进行小干扰稳定性分析[28-30]。该模型认为 PCC 电压恒定并对三角函数线性化，仅适用于固定工作点下的小干扰稳定性分析。若电网电压发生波动，则暂态过程中 $\theta_{\mathrm{PCC}}\approx\theta_{\mathrm{pll}}$ 的假设难以满足，线性化的模型将不再适用[25]。

2）大干扰稳定性分析

弱电网和严重故障事件(如电网电压跌落、电网阻抗突变等)下，并网逆变器有可能与电网失去同步(loss of synchronization, LOS)，这类 PLL 主导的暂态同步稳定性问题近几年来也引起了国内外学者的关注[11-15]。大量文献均建立了如图 8(b)所示的考虑 PLL 同步动态的降阶非线性模型。相比于图 8(a)，图 8(b)的模型保留了 SRF-PLL 自身的非线性特性，即保留了式(7)中的非线性三角函数项。此外，图 8(b)也考虑了 PCC 电压与电网阻抗、锁相角相关稳态工作点的准静态关系，较式(8)在暂态下更准确可靠。

根据图 8(b)可以获得计及 SRF-PLL 同步动态的二阶非线性微分方程为：

$$\begin{cases} \dot{\delta}=\Delta\omega \\ H_{\mathrm{pll}}\Delta\dot{\omega}=P_{\mathrm{m,pll}}-P_{\mathrm{e,pll}}-D_{\mathrm{pll}}\Delta\omega \end{cases} \tag{9}$$

式中：$\Delta\omega$ 为锁相环输出角频率与电网角频率的差值；H_{pll}、$P_{\mathrm{m,pll}}$、$P_{\mathrm{e,pll}}$、D_{pll} 分别为 PLL 的等效惯量系数、等效机械功率、等效电磁功率、等效阻尼系数，分别表示为：

$$\begin{cases} H_{\mathrm{pll}}=\dfrac{1-k_{\mathrm{p,pll}}i_{gd}L_{\mathrm{g}}}{k_{\mathrm{i,pll}}} \\ P_{\mathrm{m,pll}}=R_{\mathrm{g}}i_{gq}+\omega_0 L_{\mathrm{g}}i_{gd} \\ P_{\mathrm{e,pll}}=U_{\mathrm{s}}\sin\delta \\ D_{\mathrm{pll}}=\dfrac{k_{\mathrm{p,pll}}U_{\mathrm{s}}\cos\delta}{k_{\mathrm{i,pll}}}-L_{\mathrm{g}}i_{gd} \end{cases} \tag{10}$$

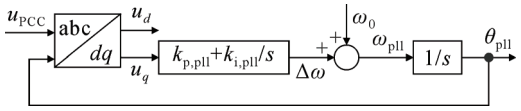
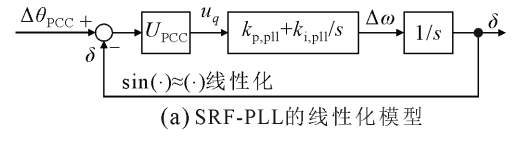
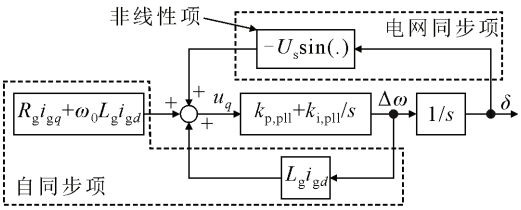


图 7　SRF-PLL 的基本结构框图

Fig.7　Block diagram of SRF-PLL



(a) SRF-PLL的线性化模型



(b) 考虑SRF-PLL同步动态的非线性模型

图 8　SRF-PLL 的模型

Fig.8　Modeling of SRF-PLL

可以看到，式(9)中含有三角函数项、状态变量乘积等非线性项。传统线性分析方法无法揭示方程的非线性动态。因此，国内外学者近几年来采用了各类非线性方法评估 PLL 主导暂态同步稳定性，如第 2 章介绍的等面积法[31-35]、相图法[37-39]、分岔[34]和极限环[34,41-42]等图形化理论、Lyapunov 方法[46-49]、解析摄动法[64-65]、数值计算法[66-69]等。

目前单台逆变器并网场合下，在基于 PLL 的暂态同步稳定性分析和镇定控制方面已取得较多研究成果。文献[9,82]指出，弱电网、PLL 和逆变器控制环相互耦合，图 8(b)将系统等效为一个受控电流源(认为逆变器输出电流完全跟踪给定基准即 $i_{d\mathrm{ref}}=i_d$, $i_{q\mathrm{ref}}=i_q$)，其等效的合理性尚未得到很好的定量分析，若其他环路和 PLL 没有很好地解耦，则这种简化并不成立。因此，有必要对整个并网逆变器系统进行非线性建模及严格的稳定性分析。

3.3.2 PWM 饱和

PWM 环节是并网逆变器控制中的重要部分，用于实现对功率半导体器件合理准确地开关。通常将逆变桥等效为一个常数增益环节 k_{PWM}，如单相并网逆变器中，有 $k_{\mathrm{PWM}}=u_{\mathrm{dc}}/u_{\mathrm{tri}}$。其中，$u_{\mathrm{tri}}$ 为三角载波。逆变器输出电压 u_{inv} 为占空比 D 和直流侧电压 u_{dc} 的乘积。然而，这种假设是基于线性平均模型的。由于占空比的硬限制，即 $D=u_{\mathrm{m}}/u_{\mathrm{tri}}\in[0,1]$，其中 u_{m} 为调制波，实际 u_{inv} 表达式应如式(11)所示，u_{inv} 最大值为直流侧电压 u_{dc}。

$$u_{\mathrm{inv}}=\mathrm{sat}(u_{\mathrm{m}},k_{\mathrm{PWM}})=\begin{cases}-u_{\mathrm{dc}}, & u_{\mathrm{m}}<-u_{\mathrm{tri}}\\ k_{\mathrm{PWM}}u_{\mathrm{m}}, & -u_{\mathrm{tri}}\le u_{\mathrm{m}}\le u_{\mathrm{tri}}\\ u_{\mathrm{dc}}, & u_{\mathrm{m}}>u_{\mathrm{tri}}\end{cases} \quad (11)$$

如图 9 给出了 PWM 模块理想线性平均模型和实际模型的示意图。PWM 是一个典型的饱和非线性环节[10]，对并网逆变器的小干扰和大干扰稳定性都会产生影响。

1）平衡点处的小干扰稳定性分析

即使仅考虑平衡点处的小干扰情形，PWM 饱和作用下，并网逆变器也仍然可能出现一些复杂振荡问题，研究发现 PWM 饱和与电网阻抗[17]、控制器多个参数[43]有关。

目前，针对 PWM 饱和非线性，文献[17]采用基于描述函数的广义 Nyquist 判据(generalized Nyquist criterion, GNC)解释了传统线性理论的负阻尼谐振在实际中表现为等幅振荡而不是发散振荡的原因，并定量求解得到了振荡的幅值和频率。文献

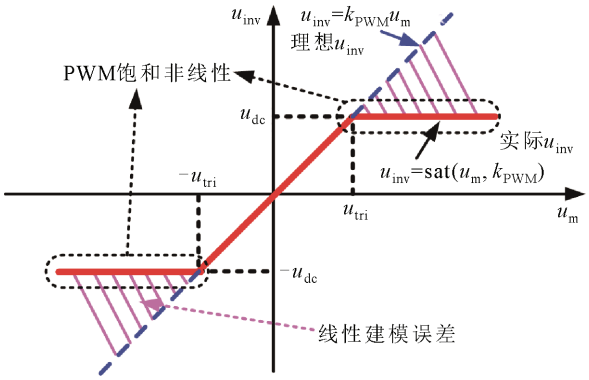


图 9 PWM 线性模型和实际模型

Fig.9 Linear and actual model for pulse-width modulation

[83-84]基于 DF-GNC 提出了一种基于大扰动注入和测量的阻抗模型，用于评估持续高频振荡的幅值。考虑过调制引起的饱和非线性后，持续振荡或谐振本质上是一种极限环[84]，文献[43]也指出无论是否存在 PWM 饱和，持续振荡都应该被视为极限环。

对于特定参数下的 PWM 饱和，描述函数法在饱和限幅建模和小干扰分析中是较为可靠的，但是只是一种非线性近似建模。

2）大干扰稳定性分析

考虑大干扰下 PWM 饱和的影响，文献[16]发现了电网电压跌落下瞬态 PWM 饱和导致的灾难性分岔现象。文献[82]也指出，大干扰暂态过程中，调制信号可能在线性区和饱和区之间反复振荡，更容易激发瞬态 LCL 的谐振问题，逆变器存在失稳风险。文献[85]发现在电流基准突变下 PWM 达到饱和，但仅仅利用 GNC 对饱和非线性进行了分析，并没有从大干扰的角度解释暂态触发饱和的动态过程及失稳机理。

目前现有文献中少有详细研究大干扰下 PWM 可能的频繁触发饱和及退饱和动态。未来还有待进一步展开计及 PWM 饱和的并网逆变器精确建模和非线性分析。

3.3.3 环路输出限幅

通常在并网装置的多个控制环路中需要加入软件限幅环节，以防止误差经过 PI 控制器被不断放大而失控。并网逆变器中的控制输出限幅包括电压电流控制输出限幅、锁相环频率限幅器等。

1）电压电流控制输出限幅

并网逆变器多个环路 PI 控制器软件限幅主要包括 DVC、AVC 控制环的输出电流基准限幅及 ACC 控制环 PI 控制器输出限幅等，如图 10 所示。

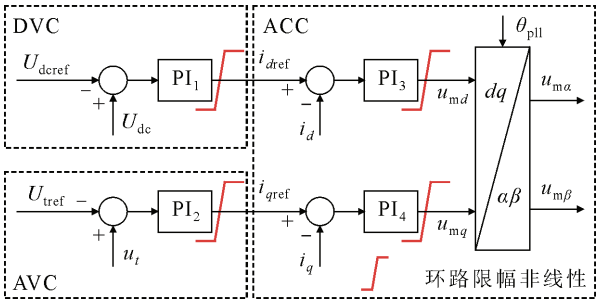


图 10　并网逆变器多环路限幅

Fig.10　Block diagram of multi-control loop limiter nonlinearity in grid-tied inverters

当并网逆变器受到外部扰动时，控制环路在暂态过程/稳定后达到软件设定的限幅值，此时环路限幅的影响不可忽略。

针对平衡点处的小干扰稳定性分析，类似于 PWM 饱和，环路限幅后的系统小干扰特性也会改变，此时描述函数同样适用。文献[59]指出，控制饱和限幅环节的非线性可能会导致风电场的出现持续且幅值不增长的次同步振荡。文献[18]对永磁同步发电机(permanent magnet synchronous generators, PMSG)并网系统进行了建模，同样利用 DF-GNC 方法来分析 SSO，推导了计及电流内环控制器饱和非线性的传递函数模型，并估计了 SSO 的幅值和频率。文献[60]进一步考虑了 *dq* 轴下的电压外环和解耦项。上述文章均表明控制器饱和限幅对持续 SSO 特性有显著影响。类似地，文献[86]分析了考虑功率参考非线性的光伏发电的不稳定性，但考虑的 SSO 是由非线性扰动观察的功率控制回路产生，而非弱电网交互和控制限幅引起的。

针对大干扰稳定性分析，以 DVC 环路为例，电网电压跌落等大扰动下，电流基准 $i_{d\mathrm{ref}}$ 可能迅速增加并达到限幅值 $I_{d\max}$，此时逆变器控制结构切换，DVC 切出系统，系统阶数和特征值均发生变化。而故障恢复后，DVC 可能在某个时间点退出限幅，再次介入控制。因此，故障前、故障中和故障恢复后的动态过程是复杂的，且这种动态可能导致一些非线性分岔现象，如一些文献报道的极限诱导分岔[87]、非光滑分岔[88]、切换型混沌[89]、极限环[18]等。最近也有学者开始关注电压电流环路限幅对锁相环暂态同步稳定性的影响，将限幅环节解析建模进非线性系统中讨论其大干扰稳定性[90-91]。总之，限幅带来的系统控制模式切换对大干扰稳定性会产生较大影响，这是目前研究较少涉及的。

2）锁相环频率限幅器

通常也需要对 PLL 的 PI 控制器输出角频率进行限幅，即频率限幅器(frequency limiter, FL)，以防止并网装置和电网之间频率的不匹配。当逆变器受大扰动时，PLL 输出角频率可能达到限幅值，此时，频率限幅和未限幅的 PLL 模型与系统动态特性并不是一致的。

针对锁相环频率限幅环节，现有研究主要关注限幅对大干扰同步稳定性的影响，并将其建模为开关切换型非线性系统。其中，文献[92]定性分析了 FL 对同步机制的影响并指出：一方面，若大干扰后平衡点存在，则 FL 会通过扩大暂态峰值相角差来恶化同步稳定性，且限幅值越低，同步稳定性越差。另一方面，如果不存在平衡点，那么 FL 会限制暂态相角变化率，并留出更多时间来清除故障，且 FL 值越低，可以容忍的临界清除时间(critical clearing time, CCT)越长。但是，文献[92]并没有给出不同 FL 下的定量分析。借助相图法，文献[93]指出故障阶段和恢复阶段都应考虑 PLL 频率限幅。文献[94-95]利用 Lyapunov 第二法得到了保守解析稳定域。研究表明，在稳定域内的任意切换都是渐近稳定的，且 FL 是一种简单有效提升暂态同步稳定性的方法。文献[96-97]进一步讨论了不同类型 PI 限幅对同步稳定性的影响，并指出带抗饱和限幅器的锁相环有利于系统稳定。

环路限幅普遍存在于并网逆变器控制环路中。现有研究表明，环路限幅对并网逆变器小干扰和大干扰特性均会产生影响，而合理的限幅环节设计将有利于系统的可靠运行。

3.3.4　无源元件参数不确定分布

在并网逆变器中，为滤除逆变桥输出的开关频率次谐波，通常采用 L 滤波器或 LCL 滤波器使输出电流满足并网要求。由于 LCL 型滤波器具备更强的高频谐波抑制能力和更低的成本，因此在近十年得到了广泛应用，但其谐振频率附近的谐振尖峰及相位突变会影响并网逆变器的稳定性，为抑制 LCL 谐振，通常采用无源阻尼或有源阻尼实现谐振抑制。不考虑滤波器寄生电阻，三相并网逆变器每相 LCL 滤波器的谐振频率 f_{rx}(x=a, b, c)可以表示为：

$$f_{\mathrm{r}x}=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{L_{1x}+L_{2x}}{L_{1x}L_{2x}C_x}},x=a,b,c \tag{12}$$

式中：$L_{1x}=L_{1x\mathrm{n}}+\Delta L_{1x}$，$L_{2x}=L_{2x\mathrm{n}}+\Delta L_{2x}$，$C_x=C_{x\mathrm{n}}+\Delta C_x$，分别代表逆变器侧电感、网侧电感和滤波电容；下

标 n 表示无源滤波器标称值；Δ表示其未知值即电感电容参数不确定性。LCL 滤波器谐振频率附近的谐振尖峰以及相位突变会影响并网逆变器的稳定性，电感和电容作为并网逆变器典型的无源元件，其参数不确定分布会引起逆变器谐振频率的波动，从而给其控制稳定性带来极大挑战[98-100]。

并网逆变器的滤波电感磁芯通常选用铁氧体、硅钢片、金属磁粉芯或非晶合金等材料，具有软饱和特性(如磁粉芯、非晶合金等)的磁芯饱和磁通密度高，性能更佳。然而，以三相并网逆变器为例，对称正弦电流输入下三相电感值变化曲线如图 11 所示，图中 L_x 和 i_{Lx}(x=a, b, c)分别为三相电感(可以是逆变器侧电感、网侧电感、电网电感等)及其流过的电流，I_m 为流过电感的正弦电流峰值，L_{max} 和 L_{min} 分别为随电流变化的电感最大值和最小值。

三相电感存在的软饱和非线性特性会导致其感量随电流变化而改变。根据式(12)，电流时变引起的三相电感值不对称波动会导致如下问题：(1)每相滤波器谐振频率在一定范围内波动；(2)各相之间的滤波器谐振频率均不相同，可能会由于频率耦合导致逆变器出现多谐振特性[99]。进一步考虑弱电网下通常也会将电网阻抗等效到网侧电感中计算谐振频率，鉴于电网阻抗也是非线性时变和波动的，逆变器的谐振频率将在更宽范围内变化。基于标称参数设计的并网逆变器可能会因参数失配而导致控制效果变差甚至失稳。

滤波电容通常采用无极性且频率特性良好的薄膜电容。但是，电容电热应力复杂且受运行条件的影响较大，因此可能会导致电容寿命和可靠性降低[101-102]，电容参数也会有一定变化和波动。根据不同的可靠性要求，滤波电容器的最大电容损耗范围为 5%~20%[102]。此外，考虑滤波电容初始参数偏差，电容参数最大波动范围可能达到 20%~30%。

关于滤波器电感电容及电网阻抗的建模，一种方法是建立无源元件具体非线性表达式，这种方法准确但较为复杂[103]。另一种方法是将电感电容分为标称值和不确定值，进而将系统建模为标称模型和不确定性因素总扰动的形式，计及电感电容参数最大波动范围研究逆变器的稳定性[85]。文献[104-106]给出了基于 LMI 和 Lyapunov 直接法的参数不确定分布下的稳定性分析，但是这些方案都是高度保守的，并不适用弱电网下电网阻抗宽范围变化的情况。文献[85]提出了系统含有滤波器不确定参数的闭环

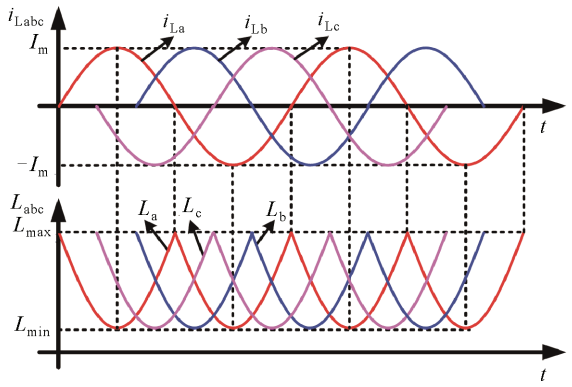


图 11 三相对称正弦电流输入下三相电感值变化曲线

Fig.11 Curves of three-phase inductances versus time with three-phase symmetric current input

特征多项式 Hurwitz 判据，利用非线性 Kharitonov 定理进行稳定性分析，对电网阻抗进行“逐点”分析，保守性较 LMI 方法弱。文献[107]针对系统多个无源元件参数不确定性，利用结构奇异值(structured singular value, SSV)理论(μ 分析)评估系统的鲁棒参数稳定域，结合参数不确定分布，量化了并网逆变器的鲁棒稳定性和失稳风险。

由于非线性电感电容的参数不确定分布对系统稳定性有较大影响，因此如何实现宽范围滤波器参数波动和高电网阻抗下的鲁棒控制需要更深入的研究。此外，目前研究主要关注小干扰下仅针对单个滤波电感、电容、电网阻抗等参数不确定分布的研究[99]，大干扰下，参数不确定是否会对系统产生新的影响也是未知的。未来需要继续深入讨论多个参数不确定分布下的建模和稳定性分析，这对并网逆变器宽范围的鲁棒运行更有意义[107]。

3.4 小结

表 2 总结了并网逆变器典型非线性环节、研究对象及分析方法。非线性特性较为广泛地分布在并网逆变器的硬件电路和软件控制环路中，不同非线性也可能通过不同环路发生耦合，对并网逆变器的小干扰和大干扰稳定性均会产生影响。因此，并网逆变器的非线性特性在建模和稳定性分析中不可忽略。

4 结论与展望

并网逆变器非线性特性建模及稳定性分析近些年来开始得到国内外的关注，相较于传统线性化建模和稳定性分析而言，非线性分析方法应用局限性更强，且更加复杂。此外，目前较多研究仅仅局限于锁相环同步动态下的降阶模型和暂态同步稳

表 2　并网逆变器典型非线性因素及分析方法总结

Table 2　Summary of typical nonlinear factors and analysis methods for grid-tied inverters

非线性特性	研究对象	稳定性分析方法的应用	
		小干扰稳定性	大干扰稳定性
三角函数运算	锁相环、Park 变换、单相 GTI 电流基准生成	特征根分析法、Nyquist 稳定性分析等	等面积法、相图法、Lyapunov 法、解析法、数值法
PWM 饱和	开关管占空比硬限制	描述函数、分岔	分岔、极限环
环路限幅	电压环/电流环输出限幅 锁相环频率限幅	描述函数	分岔、极限环、解析法、数值法
参数不确定分布	滤波器、电网阻抗参数	Lyapunov 法、数值法	—

定性，缺乏装置级及系统级的建模和分析方法。鉴于并网逆变器自身的多时间尺度、非线性、强耦合等特性，本文针对现有研究在新能源并网逆变器非线性建模和稳定性分析中的不足，对未来的研究工作进行展望如下：

1）探索适用于复杂电网条件下并网逆变器非线性分析的新方法。由于并网逆变器是高维且多控制环耦合的，文献[5]指出，考虑其他控制环动态的并网逆变器系统难以从能量角度探索合适的 Lyapunov 函数，因此需要寻求 Lyapunov 方法之外的高阶系统非线性理论(如几何方法[108])。当然，更高维空间的数值计算仍然是很复杂的。此外，这类数值方法也无法说明并网逆变器的失稳机理。因此，有必要探索适合评估高阶并网系统稳定性的非线性分析方法。

2）研究并网逆变器多个非线性因素耦合的建模和分析。目前大部分研究局限于单个非线性环节对并网逆变器稳定性的影响，厘清多个非线性因素的交叉耦合很重要，这也是并网逆变器能否稳定运行的关键之一。尤其在并网逆变器的暂态过程中，多个环路可能会频繁触发饱和限幅，这不仅会改变其原本的动态特征，也增加了稳定性分析的难度[109]。因此，多个、多类非线性因素的复杂交互仍有待未来的深入研究。

3）计及复杂电网及小/大干扰情形，总结并网逆变器主导非线性失稳机制。需要说明的是，非线性特性在不同工况下的强弱是不同的，但现有研究较少关注强弱特性的划分。文献[83]将非线性环节分为硬非线性(PWM 饱和、环路限幅)和软非线性(锁相环)，但是在电网电压跌落等大干扰情形下，锁相环的非线性显然更强。因此，不同非理想电网条件、小/大干扰、并网逆变器控制参数下，非线性强弱都可能有差别。未来有必要综合考虑复杂度、分析精确度、应用场景等，探索硬非线性的精确建模和软非线性的精确线性化建模，为高阶模型的合理简化和稳定性分析提供参考。

4）深入研究并网逆变器多环路耦合的大干扰交互机理。目前国内外用于稳定性分析的模型主要是忽略其他环路动态的降阶模型(如在分析暂态同步稳定性时完全忽略电压环、电流环动态)，但简化模型通常会损失较多环路特征[13]，已有一些初步研究表明，交直流电压环[44,110]、电流环[111-112]等都会对跟网型逆变器的大干扰特性产生较大影响，但目前研究较为零散，仍有待全面、定量的分析。

5）探索多台并网逆变器并联系统的降阶方法。即使单台并网逆变器可以建立计及多环耦合的高阶非线性模型，该模型拓展到多机并联系统的建模也将面临数学模型维数灾。因此，一些降阶方法如奇异摄动法[113]、基于耦合因子的非线性解耦方法[114]等能否为单机乃至多机并网系统模型提供合理的降阶简化还需进一步研究。在保证稳定性分析准确的前提下，实现系统轨迹特征的保稳降维是未来的重要研究方向。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献　References

[1] 舒印彪，陈国平，贺静波，等. 构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究[J]. 中国工程科学，2021，23(6)：61-69.
SHU Yinbiao, CHEN Guoping, HE Jingbo, et al. Building a new electric power system based on new energy sources[J]. Strategic Study of Chinese Academy of Engineering, 2021, 23(6): 61-69.

[2] SUN J. Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(11): 3075-3078.

[3] 张　兴，李　明，郭梓暄，等. 新能源并网逆变器控制策略研究综述与展望[J]. 全球能源互联网，2021，4(5)：506-515.
ZHANG Xing, LI Ming, GUO Zixuan, et al. Review and perspectives on control strategies for renewable energy grid-connected inverters[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(5): 506-515.

[4] 宋国杰，李国进，杨　浩，等. 基于李雅普诺夫函数的微电网下并

网逆变器的自适应控制[J]. 高电压技术，2020，46(12)：4455-4463.
SONG Guojie, LI Guojin, YANG Hao, et al. Adaptive control of grid-connected inverter in microgrid based on Lyapunov function[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(12): 4455-4463.

[5] 曹子恒，肖先勇，李 媛，等. 弱电网下 LCL 型并网逆变器的自适应改进前馈控制策略[J]. 高电压技术，2020，46(5)：1560-1570.
CAO Ziheng, XIAO Xianyong, LI Yuan, et al. Adaptive novel feed-forward control strategy for LCL type grid-connected inverters in the weak grid[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(5): 1567-1576.

[6] XIONG L S, LIU X K, LIU Y H, et al. Modeling and stability issues of voltage-source converter-dominated power systems: a review[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2022, 8(6): 1530-1549.

[7] 袁小明，张美清，迟永宁，等. 电力电子化电力系统动态问题的基本挑战和技术路线[J]. 中国电机工程学报，2022，42(5)：1904-1916.
YUAN Xiaoming, ZHANG Meiqing, CHI Yongning, et al. Basic challenges of and technical roadmap to power-electronized power system dynamics issues[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(5): 1904-1916.

[8] TSE C K, HUANG M, ZHANG X, et al. Circuits and systems issues in power electronics penetrated power grid[J]. IEEE Open Journal of Circuits and Systems, 2020, 1: 140-156.

[9] 程 成，谢少军，谭玲娟，等. 跟网型逆变器的非线性模型及稳定性分析方法[J]. 电力系统自动化，2022，46(6)：137-143.
CHENG Cheng, XIE Shaojun, TAN Lingjuan, et al. Nonlinear model and stability analysis method for grid-following inverter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(6): 137-143.

[10] KHALIL H K. Nonlinear systems[M]. 3rd ed. Upper Saddle River, USA: Prentice-Hall, 2002.

[11] TAUL M G, WANG X F, DAVARI P, et al. An overview of assessment methods for synchronization stability of grid-connected converters under severe symmetrical grid faults[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(10): 9655-9670.

[12] WANG X F, TAUL M G, WU H, et al. Grid-synchronization stability of converter-based resources—an overview[J]. IEEE Open Journal of Industry Applications, 2020, 1: 115-134.

[13] 耿 华，何长军，刘浴霜，等. 新能源电力系统的暂态同步稳定研究综述[J]. 高电压技术，2022，48(9)：3367-3383.
GENG Hua, HE Changjun, LIU Yushuang, et al. Overview on transient synchronization stability of renewable-rich power systems[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3367-3383.

[14] 张 宇，蔡 旭，张 琛，等. 并网变换器的暂态同步稳定性研究综述[J]. 中国电机工程学报，2021，41(5)：1687-1701.
ZHANG Yu, CAI Xu, ZHANG Chen, et al. Transient synchronization stability analysis of voltage source converters: a review[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5): 1687-1701.

[15] 朱 蜀，刘开培，秦 亮，等. 电力电子化电力系统暂态稳定性分析综述[J]. 中国电机工程学报，2017，37(14)：3948-3962.
ZHU Shu, LIU Kaipei, QIN Liang, et al. Analysis of transient stability of power electronics dominated power system: an overview[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 3948-3962.

[16] HUANG M, PENG Y, TSE C K, et al. Bifurcation and large-signal stability analysis of three-phase voltage source converter under grid voltage dips[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(11): 8868-8879.

[17] WANG X H, HE Y Y, QIN K, et al. Impact of controller saturation on instability behavior of grid-connected inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(7): 7739-7750.

[18] XU Y H, GU Z, SUN K. Characterization of subsynchronous oscillation with wind farms using describing function and generalized Nyquist criterion[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4): 2783-2793.

[19] 姜齐荣，王 亮，谢小荣. 电力电子化电力系统的振荡问题及其抑制措施研究[J]. 高电压技术，2017，43(4)：1057-1066.
JIANG Qirong, WANG Liang, XIE Xiaorong. Study on oscillations of power-electronized power system and their mitigation schemes[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(4): 1057-1066.

[20] 陈复扬，姜 斌. 自动控制原理[M]. 2 版. 北京：国防工业出版社，2013.
CHEN Fuyang, JIANG Bin. Principles of automatic control[M]. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2013.

[21] HATZIARGYRIOU N D，MILANOVIĆ J V，RAHMANN C，et al. Stability definitions and characterization of dynamic behavior in systems with high penetration of power electronic interfaced technologies[R]. PES-TR77，Piscataway，USA：IEEE，2020.

[22] 谢小荣，贺静波，毛航银，等. “双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J]. 中国电机工程学报，2021，41(2)：461-474.
XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 461-474.

[23] 孙华东，徐式蕴，许 涛，等. 电力系统安全稳定性的定义与分类探析[J]. 中国电机工程学报，2022，42(21)：7796-7808.
SUN Huadong, XU Shiyun, XU Tao, et al. Research on definition and classification of power system security and stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(21): 7796-7808.

[24] WANG X F, BLAABJERG F. Harmonic stability in power electronic-based power systems: concept, modeling, and analysis[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 2858-2870.

[25] 程 成，谢少军，张晴晴，等. 计及锁相环动态的单相并网逆变器建模及稳定性研究综述[J/OL]. 中国电机工程学报，2023：1-15 [2023-09-26]. http://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee. 222777.
CHENG Cheng, XIE Shaojun, ZHANG Qingqing, et al. Overview of modeling and stability analysis for single-phase grid-connected inverters considering phase-locked loop dynamics[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2023: 1-15[2023-09-26]. http://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee. 222777.

[26] YANG D S, WANG X F. Unified modular state-space modeling of grid-connected voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(9): 9700-9715.

[27] CECATI F, ZHU R W, LISERRE M, et al. Nonlinear modular state-space modeling of power-electronics-based power systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(5): 6102-6115.

[28] 吴 恒，阮新波，杨东升. 弱电网条件下锁相环对 LCL 型并网逆变器稳定性的影响研究及锁相环参数设计[J]. 中国电机工程学报，2014，34(30)：5259-5268.
WU Heng, RUAN Xinbo, YANG Dongsheng. Research on the stability caused by phase-locked loop for LCL-type grid-connected inverter in weak grid condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(30): 5259-5268.

[29] CHEN X, ZHANG Y, WANG S S, et al. Impedance-phased dynamic control method for grid-connected inverters in a weak grid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(1): 274-283.

[30] XU J M, QIAN Q, ZHANG B F, et al. Harmonics and stability analysis of single-phase grid-connected inverters in distributed power generation systems considering phase-locked loop impact[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(3): 1470-1480.

[31] HU Q, FU L J, MA F, et al. Large signal synchronizing instability of PLL-based VSC connected to weak AC grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 3220-3229.

[32] GENG H, LIU L, LI R Q. Synchronization and reactive current support of PMSG-based wind farm during severe grid fault[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(4): 1596-1604.

[33] 张　琛，蔡　旭，李　征. 全功率变换风电机组的暂态稳定性分析[J]. 中国电机工程学报，2017，37(14)：4018-4026.
ZHANG Chen, CAI Xu, LI Zheng. Transient stability analysis of wind turbines with full-scale voltage source converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 4018-4026.

[34] MA R, LI J X, KURTHS J, et al. Generalized swing equation and transient synchronous stability with PLL-based VSC[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2022, 37(2): 1428-1441.

[35] TANG Y J, TIAN Z, ZHA X M, et al. An improved equal area criterion for transient stability analysis of converter-based microgrid considering nonlinear damping effect[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(9): 11272-11284.

[36] LI X L, TIAN Z, ZHA X M, et al. An iterative equal area criterion for transient stability analysis of grid-tied converter systems with varying damping[J/OL]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023: 1-13[2023-09-26]. http://doi.org/10.1109/TPWRS.2023.3241079.

[37] WU H, WANG X F. Transient stability impact of the phase-locked loop on grid-connected voltage source converters[C]// Proceedings of 2018 International Power Electronics Conference. Niigata, Japan: IEEE, 2018: 2673-2680.

[38] WU H, WANG X F. Design-oriented transient stability analysis of PLL-synchronized voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(4): 3573-3589.

[39] XU J M, HU Y, QIAN H, et al. Delay-based phase-locked loop parameters design based on stability region of grid-connected single-phase inverter under grid voltage sags[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(11): 11324-11334.

[40] 刘　芳，刘　威，汪浩东，等. 高比例新能源电力系统振荡机理及其分析方法研究综述[J]. 高电压技术，2022，48(1)：95-113.
LIU Fang, LIU Wei, WANG Haodong, et al. Review on oscillation mechanism and analysis methods of high proportion renewable energy power system[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 95-113.

[41] LU Y Y, DU Z C, LI Y J, et al. Nonlinear damping property and limit cycle of VSC[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(5): 4485-4488.

[42] LI Y J, LU Y Y, TANG Y Y, et al. Conditions of existence and uniqueness of limit cycle for grid-connected VSC with PLL[J/OL]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023: 1-14[2023-09-26]. http://doi.org/10.1109/TPWRS.2023.3238000.

[43] MA R, YANG Z Q, CHENG S J, et al. Sustained oscillations and bifurcations in three-phase voltage source converter tied to AC grid[J]. IET Renewable Power Generation, 2020, 14(18): 3770-3781.

[44] YANG Z Q, MA R, CHENG S J, et al. Nonlinear modeling and analysis of grid-connected voltage-source converters under voltage dips[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(4): 3281-3292.

[45] YU J L, TANG Y, FANG J Y, et al. Stability analysis and improvement of three-phase grid-tied power converters through the generalized phase portraits method[C]// Proceedings of 2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Vancouver, Canada: IEEE, 2021: 2853-2858.

[46] MANSOUR M Z, ME S P, HADAVI S, et al. Nonlinear transient stability analysis of phased-locked loop-based grid-following voltage-source converters using Lyapunov's direct method[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(3): 2699-2709.

[47] TIAN Z, TANG Y J, ZHA X M, et al. Hamilton-based stability criterion and attraction region estimation for grid-tied inverters under large-signal disturbances[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(1): 413-423.

[48] FU X K, SUN J J, HUANG M, et al. Large-signal stability of grid-forming and grid-following controls in voltage source converter: a comparative study[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(7): 7832-7840.

[49] ZHANG Y, ZHANG C, CAI X. Large-signal grid-synchronization stability analysis of PLL-based VSCs using Lyapunov's direct method[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(1): 788-791.

[50] MARX D, MAGNE P, NAHID-MOBARAKEH B, et al. Large signal stability analysis tools in DC power systems with constant power loads and variable power loads—a review[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(4): 1773-1787.

[51] KABALAN M, SINGH P, NIEBUR D. Large signal Lyapunov-based stability studies in microgrids: a review[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(5): 2287-2295.

[52] TAKAGI T, SUGENO M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1985, SMC-15(1): 116-132.

[53] ZHENG H J, YUAN X F, CAI J, et al. Large-signal stability analysis of DC side of VSC-HVDC system based on estimation of domain of attraction[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(5): 3630-3641.

[54] KABALAN M, SINGH P, NIEBUR D. A design and optimization tool for inverter-based microgrids using large-signal nonlinear analysis[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 4566-4576.

[55] ROOS M, NGUYEN P, MORREN J, et al. Direct-quadrature sequence models for energy-function based transient stability analysis of unbalanced inverter-based microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(5): 3692-3704.

[56] ZHENG H J, ZHOU L W, SUN P J, et al. Large-signal stability analysis for VSC-HVDC systems based on mixed potential theory[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(4): 1939-1948.

[57] SULLIVAN C J, SUDHOFF S D, ZIVI E L, et al. Methods of optimal Lyapunov function generation with application to power electronic converters and systems[C]//Proceedings of 2007 IEEE Electric Ship Technologies Symposium. Arlington, USA: IEEE, 2007: 267-274.

[58] GENESIO R, TARTAGLIA M, VICINO A. On the estimation of asymptotic stability regions: state of the art and new proposals[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1985, 30(8): 747-755.

[59] LIU H K, XIE X R, HE J B, et al. Subsynchronous interaction between direct-drive PMSG based wind farms and weak AC networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6): 4708-4720.

[60] WU T H, JIANG Q R, SHAIR J, et al. Inclusion of current limiter nonlinearity in the characteristic analysis of sustained subsynchronous oscillations in grid-connected PMSGs[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(3): 2416-2426.

[61] HOUARI A, RENAUDINEAU H, NAHID-MOBARAKEH B, et al. Large signal stability analysis and stabilization of converters connected to grid through LCL filters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(12): 6507-6516.

[62] CHENG C, XIE S J, QIAN Q, et al. On absolute stability of open-loop synchronized single-phase grid-following inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(10): 10239-10248.

[63] CHENG C, XIE S J, XU J M, et al. Universal absolute stability criterion for single-phase grid-following inverters equipped with orthogonal-normalization-based grid synchronizer[J]. IEEE Transac-

tions on Power Electronics, 2023, 38(7): 9090-9099.

[64] ZHAO J T, HUANG M, YAN H, et al. Nonlinear and transient stability analysis of phase-locked loops in grid-connected converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(1): 1018-1029.

[65] 闫 寒，黄 萌，唐英杰，等. 电网频率扰动下并网变换器系统暂态稳定性分析[J]. 电力系统自动化，2021，45(18)：78-84.
YAN Han, HUANG Meng, TANG Yingjie, et al. Transient stability analysis of grid-connected converter system considering frequency disturbance of power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(18): 78-84.

[66] ZHANG Z Q, SCHUERHUBER R, FICKERT L, et al. Domain of attraction's estimation for grid connected converters with phase-locked loop[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(2): 1351-1362.

[67] ZHANG C, MOLINAS M, LI Z, et al. Synchronizing stability analysis and region of attraction estimation of grid-feeding VSCs using sum-of-squares programming[J]. Frontiers in Energy Research, 2020, 8: 56.

[68] LI X L, WANG Z, LIU Y X, et al. The largest estimated domain of attraction and its applications for transient stability analysis of PLL synchronization in weak-grid-connected VSCs[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(5): 4107-4121.

[69] 何 平，张德政，李 慧，等. 基于 LMI 优化法的多 VSC 接入弱网下的锁相环同步暂态稳定性分析[J]. 电力系统及其自动化学报，2022，34(6)：119-125.
HE Ping, ZHANG Dezheng, LI Hui, et al. Transient stability analysis of PLL synchronization in weak-grid connected multi-VSC based on LMI optimization method[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(6): 119-125.

[70] REZA M, SUDARMADI D, VIAWAN F A, et al. Dynamic stability of power systems with power electronic interfaced DG[C]// Proceedings of 2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition. Atlanta, USA: IEEE, 2006: 1423-1428.

[71] CHESI G. Estimating the domain of attraction for non-polynomial systems via LMI optimizations[J]. Automatica, 2009, 45(6): 1536-1541.

[72] 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.

[73] 张 烨，田慕琴，宋建成，等. 弱电网下计及锁相环影响的并网逆变器输出阻抗重塑[J]. 高电压技术，2021，47(11)：4033-4043.
ZHANG Ye, TIAN Muqin, SONG Jiancheng, et al. Reconstruction of the output impedance of grid-connected inverter considering PLL effect in weak grids[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(11): 4033-4043.

[74] CESPEDES M, SUN J. Impedance modeling and analysis of grid-connected voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(3): 1254-1261.

[75] 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.
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.

[76] 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.

[77] 钱 强，张 犁，谢少军，等. 基于谐波传递函数矩阵的单相并网系统建模研究[J]. 中国电机工程学报，2021，41(12)：4132-4143.
QIAN Qiang, ZHANG Li, XIE Shaojun, et al. Research on the modeling of single-phase grid-connected system based on the harmonic transfer function matrix[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 4132-4143.

[78] LYU J, ZHANG X, CAI X, et al. Harmonic state-space based small-signal impedance modeling of a modular multilevel converter with consideration of internal harmonic dynamics[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(3): 2134-2148.

[79] XU J M, ZHONG J F, KANG J H, et al. Stability analysis and robust parameter design of DC-voltage loop for three-phase grid-connected PV inverter under weak grid condition[J/OL]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023: 1-11[2023-09-26]. http://doi.org/10.1109/TIE. 2023.3277020.

[80] GOLESTAN S, GUERRERO J M, VASQUEZ J C. Three-phase PLLs: a review of recent advances[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(3): 1894-1907.

[81] XU J M, QIAN H, QIAN Q, et al. Modeling, stability, and design of the single-phase SOGI-based phase-locked loop considering the frequency feedback loop effect[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(1): 987-1002.

[82] CHENG C, XIE S J, QIAN Q, et al. Nonlinear modeling and global stability condition of single-phase grid-tied inverter considering SRF-PLL and duty-cycle saturation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(7): 6973-6983.

[83] SHAH S, KORALEWICZ P, GEVORGIAN V, et al. Large-signal impedance-based modeling and mitigation of resonance of converter-grid systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(3): 1439-1449.

[84] SHAH S, PARSA L. Impedance-based prediction of distortions generated by resonance in grid-connected converters[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(3): 1264-1275.

[85] CHENG C, XIE S J, QIAN Q, et al. On stability of time-invariant current controlled weak-grid-tied inverters considering sinusoidal pulsewidth modulation saturation and parameter uncertainties[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(11): 11359-11369.

[86] XIA Y H, YU M, WANG X M, et al. Describing function method based power oscillation analysis of LCL-filtered single-stage PV generators connected to weak grid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(9): 8724-8738.

[87] XING G Z, MIN Y, CHEN L, et al. Limit induced bifurcation of grid-connected VSC caused by current limit[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(3): 2717-2720.

[88] 薛安成，王子哲，付潇宇，等. 基于非光滑分叉的直驱风机次同步振荡机理分析[J]. 电力系统自动化，2020，44(7)：87-92.
XUE Ancheng, WANG Zizhe, FU Xiaoyu, et al. Mechanism analysis of subsynchronous oscillation in direct-driven wind turbine based on non-smooth bifurcation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(7): 87-92.

[89] 薛安成，付潇宇，王嘉伟，等. 双馈风机系统的切换型混沌振荡及其非光滑分岔特性[J]. 电力自动化设备，2020，40(9)：170-176.
XUE Ancheng, FU Xiaoyu, WANG Jiawei, et al. Switched chaotic oscillation and non-smooth bifurcation characteristics of DFIG system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(9): 170-176.

[90] WU T H, JIANG Q R, HUANG M, et al. Synchronization stability of grid-following converters governed by saturation nonlinearities[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(5): 4102-4105.

[91] DING W Z, GENG H, REN B X, et al. The analytical switching modelling method of grid-connected converters for transient stability

analysis[C]// Proceedings of 2022 4th International Conference on Smart Power & Internet Energy Systems. Beijing, China: IEEE, 2022: 287-293.

[92] CHEN J R, LIU M Y, GENG H, et al. Impact of PLL frequency limiter on synchronization stability of grid feeding converter[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(3): 2487-2490.

[93] 王凯伦，邓晓洋，孙雅旻，等. 考虑 PLL 频率限幅的 MMC 风电场故障恢复同步稳定性[J/OL]. 高电压技术，2023：1-11[2023-09-26]. http://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20221890.
WANG Kailun, DENG Xiaoyang, SUN Yamin, et al. Fault recovery stage synchronization stability of MMC wind farm considering PLL frequency limitation[J/OL]. High Voltage Engineering, 2023: 1-11[2023-09-26]. http://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20221890.

[94] LI Y J, TANG Y Y, LU Y Y, et al. Synchronization stability of grid-connected VSC with limits of PLL[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(4): 3965-3976.

[95] TANG Y Y, LI Y J. Common Lyapunov function based stability analysis of VSC with limits of phase locked loop[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(2): 1759-1762.

[96] CHEN J R, GE C C, QIANG D, et al. Impact of frequency anti-windup limiter on synchronization stability of grid feeding converter[J/OL]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2023: 1-11[2023-09-26]. http://doi.org/10.17775/CSEEJPES. 2022.06230.

[97] XING G Z, CHEN L, MIN Y, et al. Effects of PLL frequency limiters on synchronization stability of grid connected VSC and strategy to realize global stability[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2023, 38(3): 2096-2107.

[98] SAFAMEHR H, NAJAFABADI T A, SALMASI F R. Enhanced control of grid-connected inverters with non-linear inductor in LCL filter[J]. IET Power Electronics, 2016, 9(10): 2111-2120.

[99] 李小强，蒋　苏，聂文娟，等. 电感磁芯软饱和特性约束下三相 LCL 型并网变换器单环控制稳定性分析与设计[J]. 中国电机工程学报，2021，41(24)：8585-8599.
LI Xiaoqiang, JIANG Su, NIE Wenjuan, et al. Stability analysis and design of LCL-type grid-connected converters with single-loop control under the constraint of soft saturation characteristics of inductor magnetic core[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(24): 8585-8599.

[100] YUAN W B, WANG Y B, LIU D, et al. Impacts of inductor nonlinear characteristic in multiconverter microgrids: modeling, analysis, and mitigation[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(4): 3333-3347.

[101] WANG H, LISERRE M, BLAABJERG F, et al. Transitioning to physics-of-failure as a reliability driver in power electronics[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2(1): 97-114.

[102] ZHOU D, WANG H, BLAABJERG F. Reactive power impacts on LCL filter capacitor lifetime in grid-connected inverter[J]. IEEE Open Journal of Power Electronics, 2020, 1: 139-148.

[103] MASTROMAURO R A, LISERRE M, DELL'AQUILA A. Study of the effects of inductor nonlinear behavior on the performance of current controllers for single-phase PV grid converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(5): 2043-2052.

[104] OSÓRIO C R D, KOCH G G, PINHEIRO H, et al. Robust current control of grid-tied inverters affected by *LCL* filter soft-saturation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(8): 6550-6561.

[105] MACCARI L A, MASSING J R, SCHUCH L, et al. LMI-based control for grid-connected converters with LCL filters under uncertain parameters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(7): 3776-3785.

[106] KOCH G G, MACCARI L A, OLIVEIRA R C L F, et al. Robust H_∞ state feedback controllers based on linear matrix inequalities applied to grid-connected converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(8): 6021-6031.

[107] CHEN Y Y, PAN S Z, HUANG M, et al. Robust stability assessment of single-phase inverter with multiparameter distributions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(5): 6062-6073.

[108] CHIANG H D, HIRSCH M W, WU F F. Stability regions of nonlinear autonomous dynamical systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1988, 33(1): 16-27.

[109] 王一鸣，孙华东，徐式蕴，等. 外环限幅对 VSC 并网系统大扰动稳定性的影响研究[J/OL]. 中国电机工程学报，2023：1-13[2023-09-26]. http://doi.org/11.2107.TM. 20230308.0939.015. html.
WANG Yiming, SUN Huadong, XU Shiyun, et al. Research on the large disturbance stability of grid-connected VSC system considering the limiter strategy of outer loop[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2023: 1-13[2023-09-26]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM. 20230308.0939.015. html.

[110] LIU T, WANG X F, LIU F C. Impact of DC-link voltage control on transient stability of PLL-synchronized voltage-source converters[C]// Proceedings of 2022 International Power Electronics Conference. Himeji, Japan: IEEE, 2022: 435-439.

[111] CHEN J R, LIU M Y, O'DONNELL T, et al. Impact of current transients on the synchronization stability assessment of grid-feeding converters[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(5): 4131-4134.

[112] HU Q, FU L J, MA F, et al. Analogized synchronous-generator model of PLL-based VSC and transient synchronizing stability of converter dominated power system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(2): 1174-1185.

[113] MA Y M, ZHU D H, ZHANG Z Q, et al. Modeling and transient stability analysis for Type-3 wind turbines using singular perturbation and Lyapunov methods[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(8): 8075-8086.

[114] XIA Y H, WEI W, LONG T, et al. New analysis framework for transient stability evaluation of DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(4): 2794-2804.



许津铭(通信作者)
1987—，男，博士，副教授，博导
主要从事新能源并网发电技术及电力电子化电力系统等方面的研究工作
E-mail: xjinming01@163.com

XU Jinming
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

收稿日期　2023-03-25　修回日期　2023-10-05　　编辑　何秋萍

附录 A

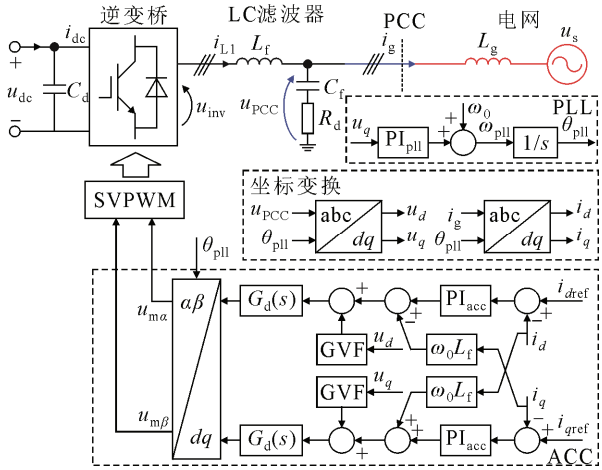


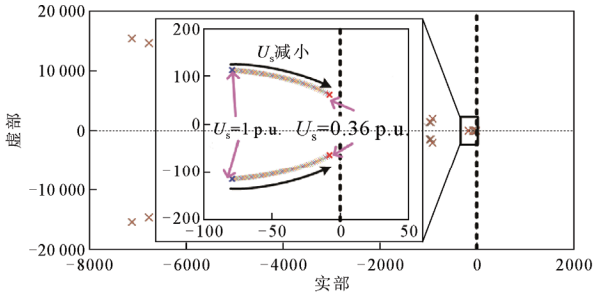
图 A1　三相并网逆变器控制结构图

Fig.A1　Configuration of a three-phase grid-tied inverter

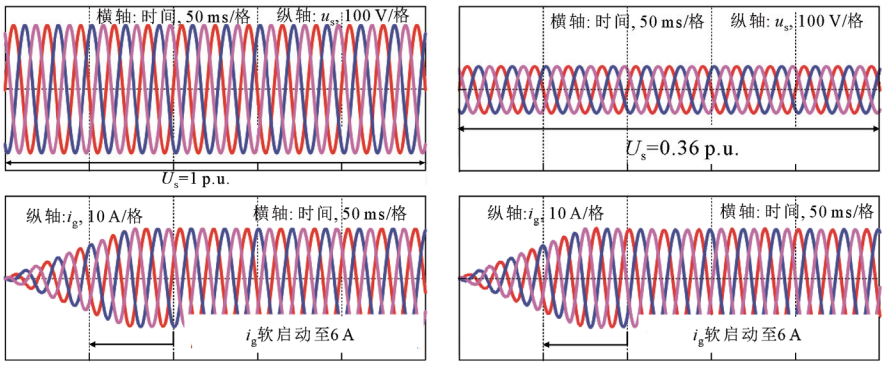
表 A1　三相并网逆变器参数

Table A1　Parameters of a three-phase grid-tied inverter

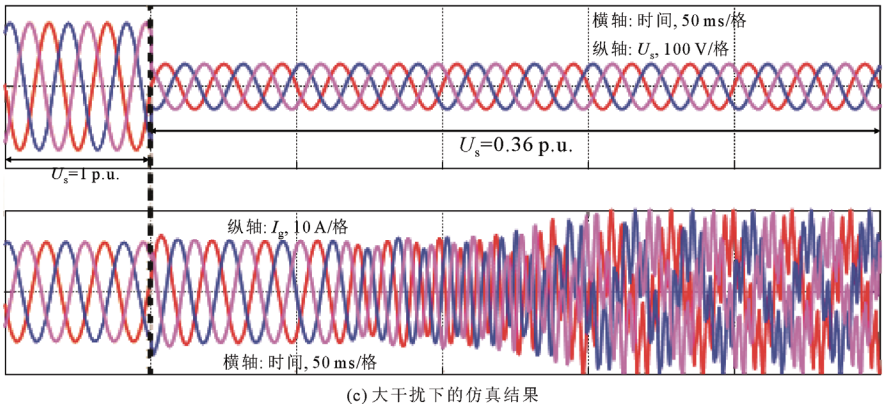
参数	符号	参数值
额定功率	P_{rated}	700 W
直流侧电压	U_{dc}	175 V
电网电压额定值	U_{s}	55 V(RMS)
电网频率	ω_0	100π rad/s
滤波电感	L_{f}	1.2 mH
滤波电容、无源电阻	C_{f}, R_{d}	10 μF, 2.6 Ω
开关频率	f_{sw}	15 kHz
采样频率	f_{s}	15 kHz
ACC 电流控制器	$k_{\text{p,acc}}$, $k_{\text{i,acc}}$	10, 1600
PCC 电压前馈系数	GVF	0.7
锁相环参数	$k_{\text{p,pll}}$, $k_{\text{i,pll}}$	1.9, 200
系统总延时	T_{d}	1.5/f_{s}



(a) 不同电网电压幅值下的系统特征根分布



(b) 小干扰下的仿真结果



(c) 大干扰下的仿真结果

图 A2　大干扰下线性分析方法稳定性错误预测

Fig.A2　Incorrect stability prediction of linear stability analysis under large disturbances