风力发电中 LCL 型单相并网逆变器的稳定性分析

曹　娜[1]，朱春华[1]，于　群[1]，董　骊[2]

（1. 山东科技大学 电气与自动化工程学院，山东 青岛 266590；
2. 福建工程学院 信息科学与工程学院，福建 福州 350118）

摘　要：为了解决由于 LCL 型并网逆变器比例控制系统参数设置不当导致风力发电系统不稳定问题，以并网电流和电容电流双闭环比例控制下 LCL 型单相 H 桥并网逆变器为例，运用频闪映射方法分别建立了系统主电路和控制电路离散迭代模型，根据 Jacobian 矩阵特征值法分析控制参数对系统稳定性的影响并对系统稳定域进行划分。在 MATLAB/Simulink 中搭建系统平均模型，通过仿真获得的电流时域波形、电流-电压相位图、电流谐波谱分析图直观形象的分析验证理论分析与模型的正确性。研究结果对并网型 LCL 逆变器控制参数设计，避免系统不稳定现象出现具有一定的参考价值。

关键词：LCL 型并网逆变器；频闪映射；离散模型；Jacobian 矩阵；Simulink 仿真

中图分类号：TN929.5　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1672-3767(2017)03-0075-08

Stability Analysis of Single-phase Grid-connected Inverter with LCL Filter in Wind Power

CAO Na[1], ZHU Chunhua[1], YU Qun[1], DONG Li[2]

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 2. School of Information Science and Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou, Fujian 350118, China)

Abstract: To solve the instability of wind power generation system caused by the improper control system parameter setting of grid-connected inverter with LCL filter, this paper took the single-phase H-bridge grid-connected inverter with LCL filter under grid-connected current and capacitance current control as an example and established a discrete iteration model of main circuit and control circuit by using stroboscopic map. The change of system stability along with the change of control parameters was analyzed according to the eigenvalues of Jacobian matrix and the system stability domain was divided. A system average model was established with MATLAB/Simulink ro verify the correctness of theoretical analysis and the model with the current time domain waveform, current-voltage phase diagram and current harmonic spectrum analysis chart obtained from Simulink simulation. This study can provide reference for the parameter design of grid-connected inverter with LCL filter and for the avoidance of system instability.

Key words: grid-connected inverter with LCL filter; discrete model; stroboscopic map; Jacobian matrix; Simulink simulation

逆变器是目前广泛应用的一种开关器件，属于典型的非线性元器件。在一定参数下运行会出现分岔、混沌等复杂的非线性现象，影响系统稳定性。早在上世纪 90 年代，国内外学者开始对变换器中的非

收稿日期：2016-06-24

作者简介：曹娜(1971—)，女，山东新泰人，博士，硕士生导师，研究方向为风力发电机系统及其控制等.
E-mail：caona_2006@163.com
朱春华(1991—)，女，山东昌邑人，硕士研究生，研究方向为电力系统稳定性分析，本文通信作者。E-mail：18765927118@sina.cn

线性行为进行研究，但是主要研究对象为 DC-DC 变换器，少许文献对 DA-AC 变换器非线性行为进行研究。文献[1-2]首次研究了 DC-AC 变换器中的非线性行为，将非线性行为研究从 DC-DC 变换器延伸到 DC-AC 变换器，但文中参考电流是直流量，其实质仍为 DC-DC 变换器。文献[3-4]运用频闪映射的方法，研究了电感电流比例控制下含有 L 型滤波器、电阻负载的单相 H 桥逆变器中的分岔与混沌现象。文献[5]对电感电流 PI 控制方式下，含有 RL 负载的光伏发电系统中单相 H 桥逆变器的分岔现象进行了分析。文献[6]对电感电流比例控制下含有 LC 型滤波器、电阻负载的单相 H 桥逆变电路的快尺度稳定性及慢尺度稳定性进行分析。

随着新能源发电技术的发展，逆变器作为新能源并网系统的关键组成部分，其非线性特性开始被深入研究。逆变器主要通过电感型、电感电容型滤波器滤波后再并网，LCL 型滤波器在高频状态下呈现高阻态，被广泛应用于大功率场合。文献[7]研究了含有 LC 型滤波器、并网电流控制下的光伏并网逆变器中的非线性动力学行为。文献[8]运用频闪映射的方法，通过分岔图、折叠图等仿真图，研究控制参数对含有 LCL 型滤波器、并网电流 PI 控制方式下的单相 H 桥逆变器稳定性的影响。文献[9]通过 Jacobian 矩阵方法对含有电压前馈的并网电流和电容电流双闭环比例控制方式下的的单相 H 桥并网逆变系统中低频振荡现象进行了分析。

目前，含有 LCL 型滤波器的双馈变速风电机组逆变器应用越来越广泛，LCL 型逆变器的非线性行为研究较少。为了降低模型的复杂度，加快系统响应速度，本研究选择并网电流和电容电流双闭环比例控制 LCL 型逆变器为研究对象。通过频闪映射的方法，推导并网电流和电容电流双闭环比例控制 LCL 型逆变器离散迭代模型，理论计算不同比例控制参数下 Jacobian 矩阵对应的最大模特征值，根据最大模特征值分析控制参数对系统稳定性的影响，划分系统稳定域，最后通过 MATLAB/Simulink 时域仿真验证模型与理论分析的正确性。

1 LCL 型并网逆变器模型建立

1.1 并网逆变器工作机理

风力发电机组并网就是通过变流器把发电机和电网联接起来，将发电机产生的电能不断地输送到系统中。变流器中逆变器的主要作用就是将直流电转换为与电网电压、频率、相位一致的交流电，实现并网。本文主要研究含有 LCL 型滤波器的单相全桥逆变器，其原理如图 1 所示。其中，E 直流侧电压，$S_1 \sim S_4$ 为 IGBT，输出端经 LCL 后并入电网 $u_g = U_m \sin(2\pi f_s t)$，其中 U_m 为电网电压幅值，f_s 为电网频率，L_1、L_2 和 C 构成 LCL 滤波器，R_1 和 R_2 为电阻。

对于控制回路，采用并网电流和电容电流双闭环控制方式[10]，并网电流外环用来保证并网时高功率因数，电容电流内环可以增加阻尼、抑制系统谐振。由于主要分析控制回路中比例控制参数对逆变器稳定性的影响，为了简化模型，忽略电网电压对入网电流的影响，所以采用单独比例控制方法。

图 1 中，$i_{ref} = I_m \sin(2\pi f_s t)$ 为并网电流 i_2 参考值，并网电流 i_2 与参考值 i_{ref} 比较产生的误差信号 i_e，误差信号通过比例调节器输出 i_m 作为电容电流内环参考值，电容电流 i_c 与 i_m 比较产生的误差信号 i_{ec}，通过比例调节输出 i_n，i_n 通过 SPWM 调制产生 IGBT 控制信号。S_1、S_3 的逻辑状态相同表示为：$S_1 = S_3 = S$；S_2、S_4 的逻辑状态相同并且与 S_1、S_3 相反表示为：$S_2 = S_4 = \overline{S}$。

$$S = \begin{cases} 0, nT \leqslant t < nT + d_n T \\ 1, nT + dnT \leqslant t \leqslant (n+1)T \end{cases} 。 \quad (1)$$

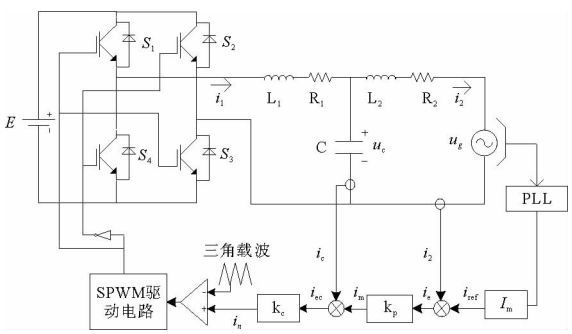

图 1 LCL 型并网单相全桥逆变器原理图

Fig. 1 Schematic diagram of single-phase grid-connected inverter with LCL filter

图 2 为 SPWM 波产生原理，i_H 表示载波信号最大值，i_L 表示载波信号的最小值。调制信号 i_n 与三角载波信号 i_{tri} 进行比较，当 $i_n > i_{tri}$ 时，输出高电平 1，使 S_1、S_3 导通，S_2、S_4 关断，系统对应状态一；当 $i_n < i_{tri}$ 时，输出高电平信号 1，使 S_2、S_4 导通，S_1、S_3 关断，系统处于状态二。若 d_n 为占空比，可以表示为：

$$d_n = \frac{1}{2}\left(1 + \frac{i_n}{i_H}\right)。\tag{2}$$

其中，i_n 由控制部分得到：

$$i_n = [(i_{ref} - i_2)k_p - (i_1 - i_2)]k_c。\tag{3}$$

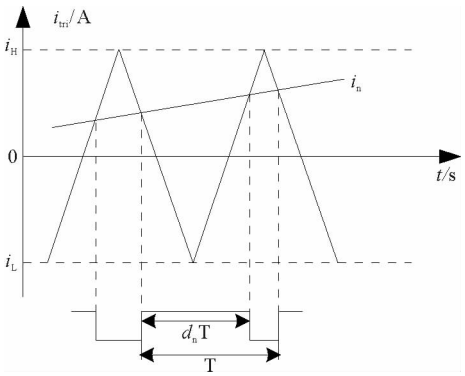

图 2　逆变器工作状态图

Fig. 2　Working state diagram of inverter

选择逆变器侧电流 i_1、并网电流 i_2 以及电容电压 u_c 为状态变量，在不同运行状态下，系统主电路的状态方程分别为：

状态一：

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{x}}{\mathrm{d}t} = \boldsymbol{A}_1\boldsymbol{x} + \boldsymbol{B}_1 E \quad (n\mathrm{T} \leqslant t < d_n\mathrm{T} + n\mathrm{T})；\tag{4a}$$

状态二：

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{x}}{\mathrm{d}t} = \boldsymbol{A}_2\boldsymbol{x} + \boldsymbol{B}_2 E \quad (nt + d_n\mathrm{T} \leqslant t \leqslant (n+1)\mathrm{T})。\tag{4b}$$

其中，$\boldsymbol{x} = [i_1, i_2, u_c]$，$\boldsymbol{A}_1 = \boldsymbol{A}_2 = \boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R_1}{L_1} & 0 & -\frac{1}{L_1} \\ 0 & -\frac{R_2}{L_2} & \frac{1}{L_2} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix}$，$\boldsymbol{B}_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} \\ -\frac{u_g}{L_2 E} \\ 0 \end{bmatrix}$，$\boldsymbol{B}_2 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_1} \\ -\frac{u_g}{L_2 E} \\ 0 \end{bmatrix}$。

根据 IGBT 工作状态，系统的工作状态可以描述为[9]：

$$\begin{cases} \frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} = -\frac{R_1}{L_1}i_1 - \frac{1}{L_1}u_c + \frac{2S-1}{L_1}E, \\ \frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t} = -\frac{R_2}{L_2}i_2 + \frac{1}{L_2}u_c - \frac{u_g}{L_2}, \\ \frac{\mathrm{d}u_c}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{C}(i_1 - i_2)。 \end{cases}\tag{5}$$

式中，S 为 IGBT 逻辑状态。

1.2　系统离散迭代映射模型建立

对一个系统进行非线性行为分析的前提条件是要建立系统的离散化模型。运用频闪映射法推导建立 LCL 型并网逆变器的离散迭代模型。该方法的主要思想[8]为：以开关周期为采样的步长，在一个周期内，用周期初始时刻的状态变量表示本周期末的状态变量。

主电路状态方程(4)对应的频闪映射下的离散迭代公式如下：

$$\begin{cases} \boldsymbol{x}(t_n + d_n\mathrm{T}) = \boldsymbol{\varphi}_1(d_n\mathrm{T})\boldsymbol{x}(t_n) + \int_0^{d_n\mathrm{T}} \boldsymbol{\varphi}_1(t_n + d_n\mathrm{T} - \tau)\boldsymbol{B}_1 E\mathrm{d}\tau, t \in [t_n, t_n + d_n\mathrm{T}] \\ \boldsymbol{x}(t_{n+1}) = \boldsymbol{\varphi}_2(\bar{d}_n\mathrm{T})\boldsymbol{x}(t_n + d_n\mathrm{T}) + \int_0^{d_n\mathrm{T}} \boldsymbol{\varphi}_2(t_n + \mathrm{T} - \tau)\boldsymbol{B}_2 E\mathrm{d}\tau, t \in [t_n + d_n\mathrm{T}, (n+1)\mathrm{T}] \end{cases}。\tag{6}$$

式中，$\bar{d}_n = 1 - d_n$，$\boldsymbol{\varphi}_1(d_n\mathrm{T}) = \mathrm{e}^{\boldsymbol{A}_1 d_n\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{\varphi}_2(\bar{d}_n\mathrm{T}) = \mathrm{e}^{\boldsymbol{A}_2 \bar{d}_n\mathrm{T}}$。根据上述迭代公式即可得到系统第 n 个开关周期起始时刻的状态变量值与其周期末状态变量值之间的关系，即为系统的离散迭代模型。

因此，主电路的离散方程为：

$$\boldsymbol{x}_{n+1}=e^{\boldsymbol{A}\mathrm{T}}\boldsymbol{x}_n+e^{\boldsymbol{A}\bar{\mathrm{d}}_n\mathrm{T}}(\mathrm{e}^{\boldsymbol{A}d_n\mathrm{T}}-\boldsymbol{I})\boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{B}_1E+(\mathrm{e}^{\boldsymbol{A}\bar{\mathrm{d}}_n\mathrm{T}}-\boldsymbol{I})\boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{B}_2E。\tag{7}$$

式中，$\bar{d}_n=1-d_n$，$\boldsymbol{I}$ 为三阶单位矩阵。

根据图 2 可知，第 n 个开关周期内 d_n 表达式如下：

$$d_n=\begin{cases}0 & (d_n\leqslant 0)\\ 0.5+0.5[(i_{\mathrm{refn}}-i_2)k_{\mathrm{p}}-(i_1-i_2)]k_{\mathrm{c}} & (0<d_{\mathrm{n}}<1)\\ 1 & (d_{\mathrm{n}}\geqslant 1)\end{cases}。\tag{8}$$

其中：k_{p}、k_{c}—电流、电压控制比例调节参数；i_{refn}—参考电流；i_1—逆变器侧输出电流；i_2—并网电流。

综上所述，主电路离散迭代模型式(7)和式(8)构成了 LCL 型单相逆变器系统的离散模型。

与文献[8-9]相比，本研究忽略了电网电压对入网电流的影响，仅采用比例控制方法，大大简化了离散模型推导过程，提高了系统的响应速度，并且推导出的模型仅含有比例控制参数一个控制变量，针对性强。

2 系统稳定性分析

由逆变器离散迭代模型可以看出，当直流电源 E、电网电压 u_{g}、电网频率 f_{s}、L_1、L_2 和 C、R_1、R_2 主电路组成部分参数确定后，系统稳定性将由控制系统的比例控制参数决定。不同比例控制参数下，系统 *Jacobian* 矩阵最大模特征值不同。如果最大模特征值模大于 1 时，则判定系统处于不稳定状态，否则判定系统稳定[11]。

特征根轨迹法是控制理论中对系统进行分析的基本方法，是一种典型的图解方法。特征根轨迹图直观形象的描述系统的特征方程的根在 S 平面上的分布状况，以此为依据对系统稳定性分界状态进行预测。因此，用根轨迹法分析系统的稳定性比其他方法更为方便形象。

用占空比 d_n 替代式(5)中的 S[12]，就可得到系统的平均模型：

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t}=-\dfrac{R_1}{L_1}i_1-\dfrac{1}{L_1}u_{\mathrm{c}}+\dfrac{2d_{\mathrm{n}}-1}{L_1}E,\\ \dfrac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t}=-\dfrac{R_2}{L_2}i_2+\dfrac{1}{L_2}u_{\mathrm{c}}-\dfrac{u_{\mathrm{g}}}{L_2},\\ \dfrac{\mathrm{d}u_{\mathrm{c}}}{\mathrm{d}t}=\dfrac{1}{C}(i_1-i_2)。\end{cases}\tag{9}$$

根据系统平均模型求得系统的平衡点 $\boldsymbol{X}_{\mathrm{Q}}=(I_{1\mathrm{Q}},I_{2\mathrm{Q}},U_{\mathrm{CQ}})$ 表示如下：

$$\begin{cases}I_{1\mathrm{Q}}=\dfrac{Ek_{\mathrm{c}}k_{\mathrm{p}}i_{\mathrm{ref}}-u_{\mathrm{g}}}{Ek_{\mathrm{c}}k_{\mathrm{p}}+R_1+R_2},\\ I_{2\mathrm{Q}}=I_{1\mathrm{Q}},\\ U_{\mathrm{CQ}}=I_{2\mathrm{Q}}R_2+u_{\mathrm{g}}。\end{cases}\tag{10}$$

平衡点处对应的占空比为：

$$D_{\mathrm{Q}}=0.5+0.5[(i_{\mathrm{ref}}-I_{2\mathrm{Q}})k_{\mathrm{p}}-(I_{1\mathrm{Q}}-I_{2\mathrm{Q}})]k_{\mathrm{c}}。\tag{11}$$

系统雅可比矩阵为：

$$\boldsymbol{J}=\left(\frac{\partial\boldsymbol{x}_{n+1}}{\partial\boldsymbol{x}_n}+\frac{\partial\boldsymbol{x}_{n+1}}{\partial d_n}\frac{\partial\mathrm{d}_{\mathrm{n}}}{\partial\boldsymbol{x}_n}\right)\Bigg|_{\substack{x_n=x_{\mathrm{Q}}\\ d_n=D_{\mathrm{Q}}}}=e^{\boldsymbol{A}\mathrm{T}}+\mathrm{T}e^{\boldsymbol{A}(1-D_{\mathrm{Q}})\mathrm{T}}\begin{bmatrix}-\dfrac{Ek_{\mathrm{c}}}{L_1} & \dfrac{E(k_{\mathrm{c}}-k_{\mathrm{c}}k_{\mathrm{p}})}{L_1} & 0\\ 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix}。\tag{12}$$

根据式(10)～(12)可求出系统的 Jacobian 矩阵的特征值，通过系统最大模特征值与 1 的关系来判断系统是否稳定。

选定系统参数为：$E=350$ V，$L_1=2.0$ mH，$R_1=2.0$ Ω，$L_2=0.8$ mH，$R_2=0.1$ Ω，$C=15$ uF，$i_{\mathrm{H}}=1$ A，$i_{\mathrm{L}}=-1$ A，$I_{\mathrm{m}}=5$ A，$U_{\mathrm{m}}=311$ V，$f_{\mathrm{s}}=50$ Hz，$f=20$ kHz，$k_{\mathrm{c}}=0.12$。通过 Matlab 编程数值仿真获得 k_{p} 变化时的系统根轨迹如图 3，计算得出的特征值以及特征值对应的最大模值如表 1 所示。

由图 3 中可知，系统存在三个特征值（一个为实数，另外两个为共轭复数）。随着 k_p 的逐渐增大，一个特征值在实轴上变化，另外两个互为共轭复数的特征值逐渐远离实轴，最后穿出单位圆。从表 1 中可以看出，当 $k_p<1.423$ 时，三个特征值其模值都小于 1，判定系统稳定；当 $k_p=1.423$ 时，互为共轭复数的两个特征值其模值刚好为 1，判定系统处于临界稳定（Hopf 分岔）；当 $k_p>1.423$ 时，互为共轭复数的两个特征值其模值大于 1，判定系统不稳定。

通过上述分析，可以最大模特征值为依据对系统稳定域进行划分。$k_p<1.423$ 时，系统处于稳定状态，为系统稳定域；$k_p>1.423$ 时，系统首先发生 Hopf 分岔，然后出现发散现象，所以 $k_p>1.423$ 为系统不稳定区域。

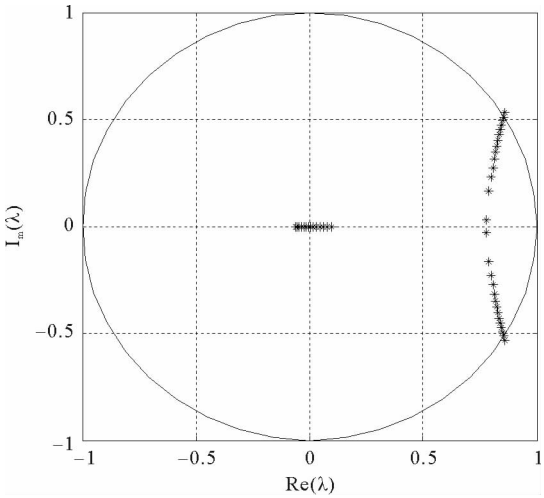

图 3　k_p 变化时系统的特征根轨迹

Fig. 3　Variation of system eigenvalues along with k_p

表 1　不同 k_p 值下对应的最大模特征值以及系统稳定性

Tab. 1　Variation of Jacobian matrix eigenvalues along with k_p

k_p	特征值		$\lvert\lambda_{max}\rvert$	稳定性
1.300	−0.045 2	0.850 8±0.493 7i	0.983 7	稳定
1.400	−0.053 5	0.855 0±0.512 8i	0.997 0	稳定
1.423	0.055 4	0.855 9±0.517 1i	1.000 0	临界稳定
1.425	−0.055 6	0.856 0±0.517 5i	1.000 2	不稳定
1.450	−0.057 6	0.857 0±0.522 1i	1.003 5	不稳定
1.500	−0.061 5	0.859 0±0.531 0i	1.009 8	不稳定

3　基于平均模型的 Simulink 时域仿真与结果分析

通过根轨迹图对系统稳定性进行分析具有计算速度快，可以给出系统稳定域的特点，但在实际中应用还不广泛，主要原因在于该方法对模型限制较多，计算误差较大。而时域仿真方法从时域的角度对系统稳定性进行更加直观的分析，分析结果更精确，实用性和应用范围比较广，但是计算速度慢，无法给出稳定域。下面通过时域仿真来认识系统稳定性变化现象，对根轨迹法预测的系统稳定域以及模型的正确性进行验证。

在 Simulink 中搭建系统平均模型，通过时域仿真获得的状态变量时域波形、相位图以及谐波谱验证离散迭代模型和通过 Jacobian 矩阵最大模特征值法划分的稳定域的正确性。

为了仿真结果具有代表性，从运用 Jacobian 矩阵最大模特征值法对系统划分的稳定域、不稳定域以及稳定与不稳定的临界状态情况下各选择一个控制参数。选择对应于系统稳定、临界稳定和不稳定三个状态下的控制参数 $k_p=1.300$、$k_p=1.423$、$k_p=1.500$ 进行仿真，得电流 i_2 波形、电流 i_2 与电容电压 u_c 相位图以及电流 i_2 谐波谱如图 4、5、6 所示。

由图 4(a)可以看出，当 $k_p=1.300$ 时，系统雅可比矩阵特征值最大模小于 1，电流 i_2 的时域波形为周期为 0.02 s 的标准正弦波，每个周期电流波形完全相同；由图 4(b)可以看出，电流 i_2 与电容电压 u_c 相位图为单一圆环，每个周期的并网电流与电容电压完全重合，说明系统处于周期稳定状态；由图 4(c)电流 i_2 的谐波谱可以看出，电流 i_2 中谐波分量较少，波形畸变率为 0.04%，满足电能质量要求。这种状态称为系统的安全正常状态，等式约束条件和不等式约束条件都满足要求，而且系统存在一定的安全裕度。

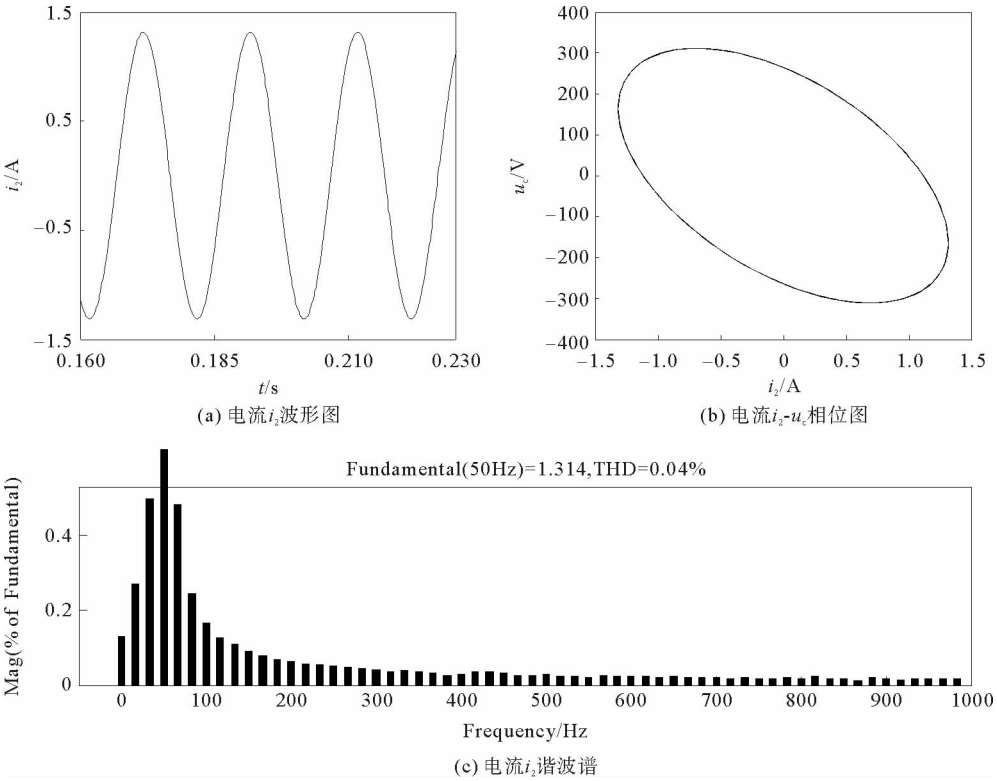

图 4　k_p＝1.300 时仿真结果

Fig. 4　Simulation results when k_p is 1.300

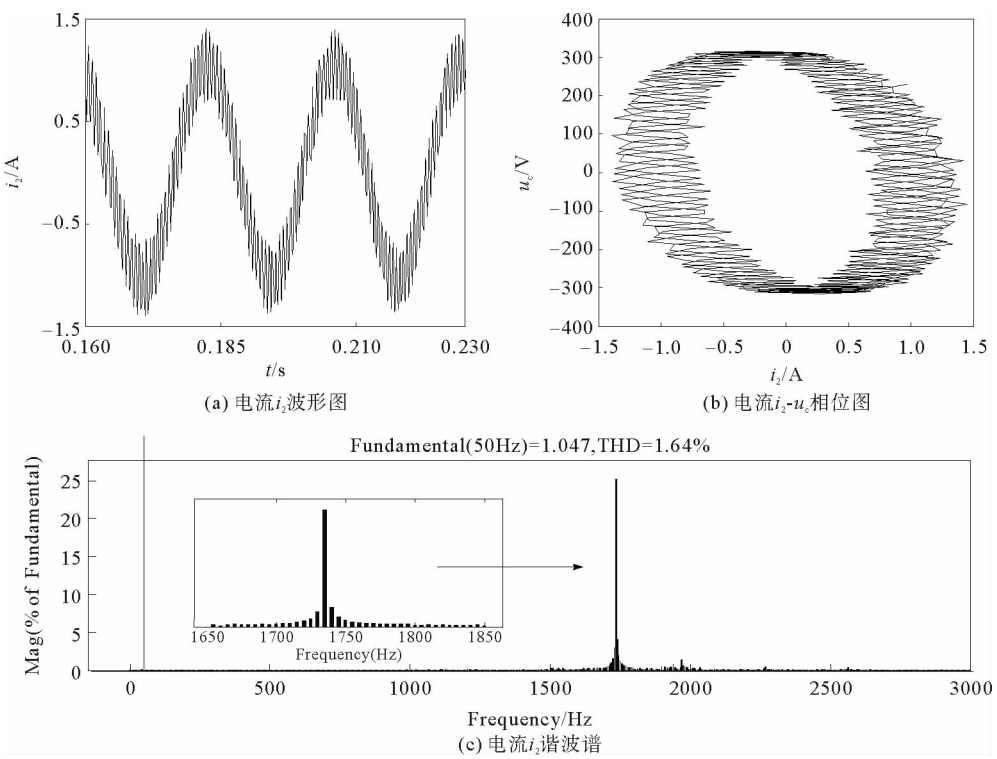

图 5　k_p＝1.423 时仿真结果

Fig. 5　Simulation results when k_p is 1.423

由图 5(a)可以看出，当 $k_p=1.423$ 时，系统雅可比矩阵特征值最大模等于 1，电流 i_2 的时域波形为周期为 0.02 s 的正弦波，但从时域图可以看出电流 i_2 处于振荡状态，数值在稳定波形图 4(a)附近上下波动；电流 i_2 与电容电压 u_c 相位图也不再是单一圆环，而是存在振荡现象的环形，如图 5(b)所示；图 5(c)电流 i_2 的谐波谱显示此时电流 i_2 中波形畸变率为 1.64%，振荡波形频率为 173 5 Hz，此时处于一种临界稳定的状态，电流波形会一直振荡下去，不衰减也不增幅。通过分析可以看出系统发生低频振荡现象时，系统发生 Hopf 分岔现象(雅克比矩阵特征值最大模为 1)。这时系统处于临界稳定状态，虽然没有带来严重的后果，但是系统中多状态变量已越限，系统不等式约束条件不能得到满足，如果不采取有效措施，情况会进一步恶化，甚至造成严重的后果。

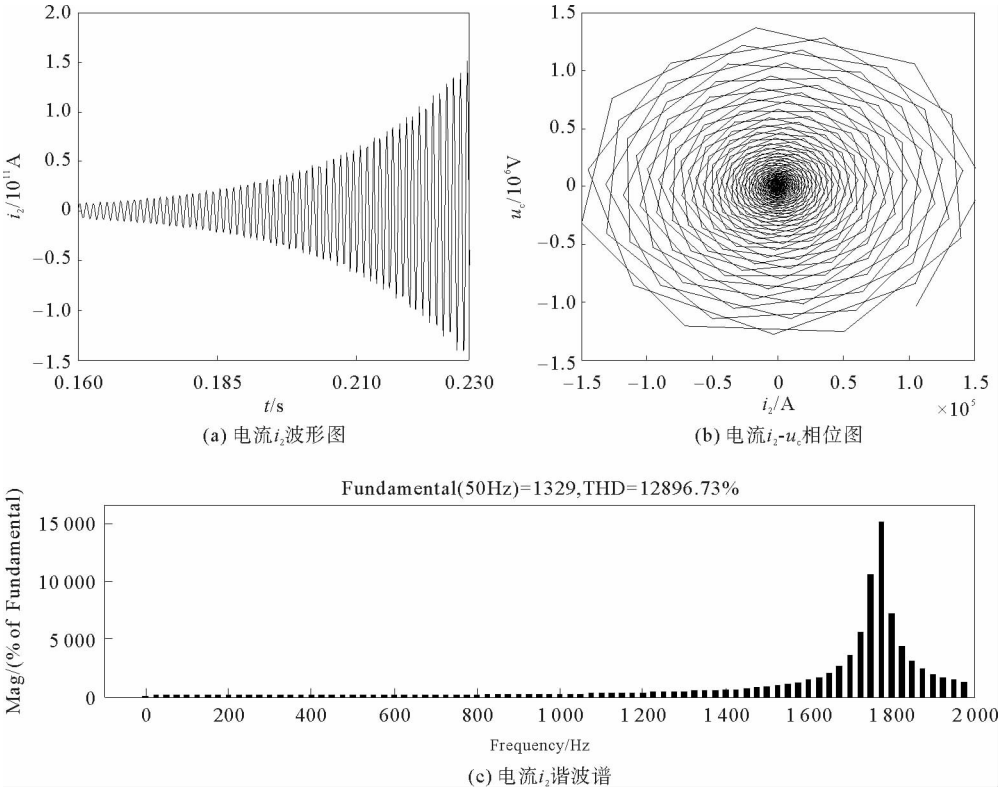

图 6　$k_p=1.500$ 时仿真结果

Fig. 6　Simulation results when k_p is 1.500

由图 6(a)可以看出，当 $k_p=1.500$ 时，系统雅可比矩阵特征值最大模大于 1，电流 i_2 的时域波形处于发散状态，幅值越来越大，说明控制电路不再起作用，电流 i_2 不稳定；电流 i_2 与电容电压 u_c 相位图如图 6(b)所示，相位图为不断向外扩散的圆形，说明电流 i_2 与电容电压 u_c 幅值不断扩大，系统处于不稳定状态；图 6(c)电流 i_2 的谐波谱显示此时电流 i_2 中波形畸变率很大，波形已完全失真，系统处于崩溃状态。这种状态下，系统的等式和不等式约束条件都不满足要求，必须通过恢复状态来恢复到系统的稳定状态。实际中应该避免这种状态的出现，以免造成系统崩溃。

通过上述分析可以看出，随着比例控制参数 k_p 的增大，系统由稳定状态过渡到临界稳定状态继而过渡成发散状态，与前文基于 Jacobian 矩阵特征值法分析结论相同。当系统处于发散状态时，波形畸变严重，幅值也远远超出额定值，造成电气设备损坏等严重后果。所以在逆变器参数设计时，应该尽量避免发散现象的出现。

本文模型与仿真方法能够准确分析不同比例控制参数下系统的稳定性。与文献[8]方法的比较结果如表 2 所示。

表 2 与文献[8]方法的比较

Tab. 2 Comparison with method in literature [8]

比较项目	文献[8]	本文
模型	并网电流比例积分控制型 LCL 逆变器	并网电流和电容电流双闭环比例控制 LCL 型逆变器
稳定性分析方法	系统分岔图	Jacobian 矩阵最大模特征值法
其他		FFT 进行谐波分析,获得更加准确的波形畸变率

通过上述分析可以看出,所建立的模型为并网电流和电容电流双闭环比例控制具有较好的实用性,采用单独比例控制方式,大大降低了计算量,提高计算速度。采用 Jacobian 矩阵最大模特征值法能准确预测系统稳定域。通过 FFT 对时域波形进行谐波分析,分析结果更加直观准确,更能有效地分析控制参数对系统稳定性的影响。

4 结论

本研究基于频闪映射的方法推导了并网电流和电容电流双闭环比例控制 LCL 型逆变器的离散迭代模型。利用 Jacobian 矩阵特征值法分析得出比例控制参数对系统稳定性存在一定的影响,随着比例控制参数增大,系统从稳定过渡到临界稳定继而演变为不稳定状态。通过特征值根轨迹图对系统的稳定域进行预测,通过 Simulink 时域仿真法直观准确的验证稳定域预测的准确性和离散迭代模型的正确性,同时当系统处于临界稳定(Hopf 分岔)状态时,系统发生低频振荡现象。将 Jacobian 矩阵特征值法和 Simulink 时域仿真方法相结合,更有效的对系统稳定性进行分析。研究对 LCL 型并网逆变器参数设计,避免系统出现不稳定现象具有一定的参考价值,为下一步三相 LCL 型逆变器稳定性分析奠定基础。

参考文献:

[1]IU H H C,ROBERT B. Control of chaos in a PWM current-mode H-bridge inverter using time-delayed feedback[J]. IEEE Transactions on Circuits System I Fundamental Theory and Applications,2003,50(8):1125-1129.

[2]ROBERT B,FEKI M,IU H H C. Control of a PWM inverter using proportional plus extended time-delayed feedback[J]. International Journal of Bifurcation and Chaos,2006,16(1):113-128.

[3]YANG P,ZHEND Q,XU Z,et al. Research on nonlinear phenomena of single-phase H-bridge inverter[C]//IEEE Pes Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. IEEE,2015:1-6.

[4]王学梅,张波. 单相 SPWM 逆变器的分岔及混沌现象分析[J]. 电工技术学报,2009,24(1):101-107.
WANG Xuemei,ZHANG Bo. Study of bifurcation and chaos in single-phase SPWM inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2009,24(1):101-107.

[5]代璐,龙崦平. PI 调节下光伏逆变器的分岔与混沌现象研究[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(24):89-94.
DAI Lu,LONG Yanping. Study of bifurcation and chaos for photovoltaic inverter with PI controller[J]. Power System Protection and Control,2012,40(24):89-94.

[6]周林,龙崦平,郭珂,等. 基于系数线性化模型的逆变器分岔与混沌现象研究[J]. 电力自动化设备,2013,33(7):100-104.
ZHOU Lin,LONG Yanping,GUO Ke,et al. Bifurcation and chaos of inverter system based on coefficient linear model[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(7):100-104.

[7]廖志贤,罗晓曙,黄国现. 光伏并网逆变器的非线性动力学研究[J]. 广西师范大学学报(自然科学版),2013,31(4):1-6.
LIAO Zhixian,LUO Xiaoshu,HUANG Guoxian. Non-linear dynamics model and chaotic behavior of the single-phase full bridge photovoltaic grid-connected inverter[J]. Journal of Guangxi Normal University:Natural Science Edition,2013,31(4):1-6.

[8]尚佳宁,边境,李虹,等. 基于频闪映射的 LCL 型并网逆变器的稳定性分析[J]. 电工技术学报,2014(增 1):250-256.
SHANG Jianing,BIAN Jing,LI Hong,et al. The stability analysis of grid-connected inverter with LCL filter based on the stroboscopic map[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2014(S1):250-256.

(下转第 90 页)

[10]肖露,崔晋龙.基于MATLAB的刀具角度测量[J].制造技术与机床,2014(10):127-129.
XIAO Lu,CUI Jinlong. Cutting tool angle measurement based on MATLAB[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool,2014(10):127-129.

[11]张法全,路立平,沈满德,等.单目视觉目标距离测量方法研究[J].光子学报,2009(2):453-456.
ZHANG Faquan,LU Liping,SHEN Mande,et al. Study on the measurement method of monocular vision object distance [J]. Acta Photonica Sinica,2009(2):453-456.

[12]陈彦军,张学典.基于MATLAB图像处理的角度测量误差分析的研究[J].计算机科学,2015,42(6A):203-204,208.
CHEN Yanjun,ZHANG Xuedian. Research on error analysis of angle measurement based on MATLAB image processing [J]. Computer Science,2015,42 (6A):203-204,208.

(责任编辑:李 磊)

(上接第82页)

[9]周林,龙崦平,张密,等.带LCL滤波器的单相并网逆变器低频振荡现象分析[J].电力自动化设备,2014,34(1):67-71.
ZHOU Lin,LONG Yanping,ZHANG Mi,et al. Analysis of low frequency oscillation in single-phase grid-connected inverter with LCL filter[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(1):67-71.

[10]徐志英,许爱国,谢少军.采用LCL滤波器的并网逆变器双闭环入网电流控制技术[J].中国电机工程学报,2009,29(27):36-41.
XU Zhiying,XU Aiguo,XIE Shaojun. Dual-loop grid current control technique for grid-connected inverter using an LCL filter[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(27):36-41.

[11]郑连清,鲁思男.Boost PFC变换器快时标分岔的控制方法[J].电力自动化设备,2013,33(10):68-73.
ZHENG Lianqing,LU Sinan. Control of fast-scale bifurcation in Boost PFC converter[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(10):68-73.

[12]彭秋波,盘宏斌,刘勇,等.LCL型三相并网逆变器双闭环解耦控制器设计[J].电工技术学报,2014,29(4):103-110.
PENG Qiubo,PAN Hongbin,LIU Yong,et al. Design of dual-loop decoupling controller in LCL three-phase grid-connected inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2014,29(4):103-110.

(责任编辑:李 磊)