

基于系数线性化模型的逆变器分岔与混沌现象研究

周林, 龙崦平, 郭珂, 李怀花, 杜金其

(重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400030)

摘要: 以带 LC 滤波器的逆变器为研究对象, 分析了二阶逆变器系统中出现的分岔现象。鉴于二阶系统的复杂性, 在传统建模方法的基础上提出了一种基于系数线性化的离散模型, 简化了系统建模、稳定性分析以及数值仿真验证的运算过程。运用 Jacobian 矩阵稳定性分析方法对 2 种模型的差异性进行了对比分析, 并得到了单参数和双参数下系统的运行稳定域。数值仿真结论表明, 所提简化离散模型能很好地分析出系统运行的稳定参数域, 且在复杂程度、运算量以及运算速度方面较传统离散模型有着明显优势。

关键词: 逆变器; 系数线性化; 离散模型; Jacobian 矩阵; 稳定参数域; 分岔; 混沌; 稳定性

中图分类号: TM 464

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.07.017

0 引言

逆变器是电力电子系统中的核心部分, 广泛应用于电力电子电路中。尤其随着现阶段新能源发电、高压直流输电以及智能电网等的不断发展, 逆变器的应用领域得到了更广泛的推广。然而, 由于逆变器属于非线性系统, 在其实际运行过程中已经发现了一系列复杂行为, 如电磁噪声、器件的间歇性振荡以及系统突然崩溃现象等, 严重影响系统的稳定性^[1-3]。因此, 有必要深入研究逆变器中出现的非线性行为, 为系统的设计和运行提供指导。

从 20 世纪 90 年代至今, 针对 DC/DC 变换器中出现的分岔与混沌现象已经有了广泛的研究, 并取得了一定的研究成果^[4-8], 为后续更深入的研究奠定了基础。关于 H 桥中出现的分岔与混沌现象研究在 21 世纪初才起步, Robert 等在 2002 年首次分析了电流模式下 H 桥直流斩波器中的边界碰撞分岔现象, 并建立了 H 桥变换器的离散模型^[9]。之后又将混沌控制引入到 H 桥中, 以达到扩大系统运行稳定域的目的^[10-11]。在此基础上, 有学者对边界碰撞分岔的机理进行了更深入的研究^[12-13]。然而, 这些研究都是以 H 桥直流斩波器为研究对象, 其实质仍然属于 DC/DC 变换器的研究范畴。目前对于 DC/AC 逆变器中出现的分岔现象研究甚少^[14-15]。2009 年王学梅等将正弦信号作为参考量, 首次研究了比例调节下 H 桥逆变器中出现的分岔与混沌现象^[14], 将混沌研究由斩波器推广到逆变器中, 并在文献^[15]中引入了快变和慢变 2 种尺度, 建立了 H 桥正弦逆变器的快变

和慢变离散模型, 对其混沌行为进行了更深入的研究。

值得注意的是, 上述对 H 桥的非线性研究都是以一阶系统为研究对象, 其离散建模过程相对简单, 计算量小, 数值仿真速度快。然而将传统建模方法引入到更高维系统的分析时^[16], 发现其复杂程度和运算量明显加大, 且仿真速度也相应变慢, 导致传统建模方法的实用性下降。

鉴于上述弊端, 本文将传统建模方法中出现的矩阵指数函数运算简化为基本的矩阵运算, 提出了一种基于系数线性化的离散建模方法。以电流模式下带 LC 滤波器二阶系统为研究对象, 分别运用传统建模方法以及本文提出的系数线性化建模方法得到了系统的 2 种离散模型。采用 Jacobian 矩阵法对系统进行稳定性分析, 对比分析了 2 种模型的差异性, 突出了本文所提简化模型的优越性。最后通过系统分岔图、折叠图和相轨迹图对稳定性分析结论进行了数值仿真, 以验证基于系数线性化离散模型的有效性, 为复杂系统的设计提供有效参考。

1 逆变器离散模型的建立

典型的 H 桥逆变器工作原理如图 1 所示, 由电压源 E 、开关管 $V_{T1}—V_{T4}$ 、 LC 滤波器以及电阻负载 R 组成。在控制部分, 把逆变器输出电流与参考电流 i_{ref} 进行比较, 将误差信号送至比例调节器, 再通过三角波调制后送至 PWM 驱动电路产生驱动信号以控制

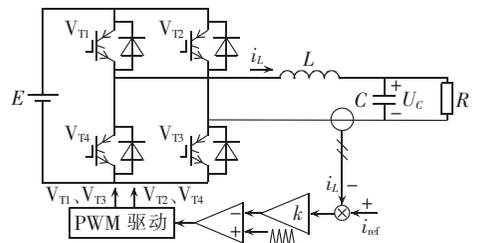


图 1 逆变器原理图

Fig.1 Schematic diagram of inverter

收稿日期: 2012-05-31; 修回日期: 2013-04-17

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2011-AA05A301); 重庆市自然科学基金资助项目(cstcjjA90001)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2011AA-05A301) and the Natural Science Foundation Project of CQCSTC(cstcjjA90001)

各个开关管的工作状态。

在逆变器工作的一个开关周期 T 内,系统存在 2 种工作状态:状态 1 为 V_{T1} 和 V_{T3} 导通, V_{T2} 和 V_{T4} 关断;状态 2 为 V_{T2} 和 V_{T4} 导通, V_{T1} 和 V_{T3} 关断。式(1)、(2)分别为对应的状态方程。

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = -\frac{1}{L}U_C + \frac{E}{L} \\ \frac{dU_C}{dt} = \frac{1}{C}i_L - \frac{1}{RC}U_C \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = -\frac{1}{L}U_C - \frac{E}{L} \\ \frac{dU_C}{dt} = \frac{1}{C}i_L - \frac{1}{RC}U_C \end{cases} \quad (2)$$

其中,状态变量为电感电流 i_L 和电容电压 U_C 。设

$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} i_L \\ U_C \end{bmatrix}$,则系统状态方程可表示为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}_1\mathbf{X} + \mathbf{B}_1E \\ \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}_2\mathbf{X} + \mathbf{B}_2E \end{cases} \quad (3)$$

$$\mathbf{A}_1 = \mathbf{A}_2 = \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & -1/L \\ 1/C & -1/(RC) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} -1/L \\ 0 \end{bmatrix}$$

根据频闪映射建模方法的主要思想:以时钟周期为频闪采样间隔,将第 $(n+1)$ 个开关时刻的状态变量值表示成第 n 个开关时刻的值。由式(3)可知 H 桥逆变器在频闪映射下的主电路离散模型为:

$$\mathbf{X}_{n+1} = \mathbf{p}_1\mathbf{X}_n + \mathbf{p}_2E \quad (4)$$

其中, $\mathbf{p}_1 = e^{AT}$; $\mathbf{p}_2 = e^{A(1-d_n)T}(e^{Ad_nT} - I)\mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}_1 + [e^{A(1-d_n)T} - I]\mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}_2$, d_n 表示第 n 个开关周期内的占空比,其值由控制部分决定,具体可表示为:

$$d_n = \begin{cases} 0 & d_n < 0 \\ D + k(i_{\text{ref}n} - \sigma\mathbf{X}_n) & 0 \leq d_n \leq 1 \\ 1 & d_n > 1 \end{cases} \quad (5)$$

其中, D 为常数, k 为比例调节系数, $\sigma = [1 \ 0]$, $i_{\text{ref}n}$ 表示参考电流在第 n 个开关点的值。式(4)、(5)即为通过传统建模方法得到的整个系统的离散模型。

观察上述离散模型可知, $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2$ 中都含有矩阵指数函数 e^{At} 。与一阶系统不同,此时的矩阵 \mathbf{A} 为二阶矩阵,在对系统进行稳定性分析和数值仿真验证时需要进行矩阵指数函数运算,其运算过程显然较一阶系统复杂,且进行计算机仿真时占用内存空间大,运算速度也受到限制,尤其是在大型复杂的系统中随着矩阵 \mathbf{A} 阶数的增加,上述离散模型的弊端尤显突出。

鉴于此,本文提出了一种基于系数线性化的离散模型,将上述矩阵指数运算转化成线性运算,在不失精度的前提下,简化计算过程,提高其运算速度。具体实现方法如下。

根据矩阵指数函数展开式

$$e^{At} = I + At + \frac{1}{2!}A^2t^2 + \dots + \frac{1}{n!}A^nt^n + \dots \quad (6)$$

将指数运算转化为线性运算,则有:

$$\begin{cases} e^{AT} \approx I + AT \\ e^{Ad_nT} \approx I + Ad_nT \\ e^{A(1-d_n)T} \approx I + A(1-d_n)T \end{cases} \quad (7)$$

可以推出,主电路的系数线性化离散模型为:

$$\mathbf{X}_{n+1} = \mathbf{p}'_1\mathbf{X}_n + \mathbf{p}'_2E \quad (8)$$

其中, $\mathbf{p}'_1 = I + AT$, $\mathbf{p}'_2 = \mathbf{B}_1d_nT + \mathbf{A}_1\mathbf{B}_1d_n(1-d_n)T^2 + (1-d_n)T\mathbf{B}_2$ 。

可见,式(8)、(5)构成了系统的系数线性化离散模型。对比式(4)可知,系统离散模型的系数已经不存在矩阵指数函数,取而代之的是简单的矩阵运算,因此大幅简化了后续对系统进行稳定性分析以及数值仿真验证的工作量。

2 逆变器的稳定性分析

根据上述所得的离散模型,本节利用 Jacobian 矩阵法对系统进行稳定性分析,以期得到系统的运行稳定域,并就上述 2 种离散模型的差异性进行对比分析,以体现本文所提简化模型的优越性。

Jacobian 矩阵稳定性分析是研究系统运行稳定域的常用方法,对于离散系统 $\mathbf{X}_{n+1} = f(\mathbf{X}_n, d_n)$,其 Jacobian 矩阵可以表示为:

$$\mathbf{J}(\mathbf{X}_Q, D_Q) = \frac{\partial f}{\partial \mathbf{X}_n} + \frac{\partial f}{\partial d_n} \frac{\partial d_n}{\partial \mathbf{X}_n} \Big|_{\mathbf{X}_n = \mathbf{X}_Q, d_n = D_Q} \quad (9)$$

其中, \mathbf{X}_Q, D_Q 表示系统的单周期稳态解,其值可以通过数值迭代的方法利用 $\mathbf{X}_Q = f(\mathbf{X}_Q, D_Q)$ 求得。

Jacobian 矩阵的最大模特征值 $|\lambda_{\text{max}}|$ 即可反映系统的稳定状态:当 $|\lambda_{\text{max}}| < 1$ 时,系统处于稳定状态;当 $|\lambda_{\text{max}}| > 1$ 时,系统开始不稳定。因此 $|\lambda_{\text{max}}| = 1$ 为系统稳定与不稳定的分界点,即可以通过分析随着分岔参数值的变化,系统 Jacobian 矩阵最大模特征值的变化情况来判断系统的运行稳定性。

根据系统离散模型和式(9),可以推出系统的 Jacobian 矩阵表达式。传统离散模型的 Jacobian 矩阵为:

$$\mathbf{J}_1 = e^{AT} + Te^{A(1-d_n)T}(\mathbf{B}_2 - \mathbf{B}_1)Ek\sigma \Big|_{\mathbf{X}_n = \mathbf{X}_Q, d_n = D_Q} \quad (10)$$

系数线性化离散模型对应的 Jacobian 矩阵可表示为:

$$\mathbf{J}_2 = I + AT + [\mathbf{B}_1T + \mathbf{A}\mathbf{B}_1T^2(1-2d_n) - T\mathbf{B}_2]Ek\sigma \Big|_{\mathbf{X}_n = \mathbf{X}_Q, d_n = D_Q} \quad (11)$$

本文选择比例调节系数 k 为分岔参数对系统进行稳定性分析,其他系统参数选择如下: $E = 350 \text{ V}$, $R = 10 \ \Omega$, $L = 8 \text{ mH}$, $C = 20 \ \mu\text{F}$, $T = 50 \ \mu\text{s}$, $D = 0.4$, $i_{\text{ref}n} = 5 \sin(2\pi f_s nT)$ (其中 $f_s = 50 \text{ Hz}$, 为参考电流频率; n 为以开关频率对参考电流进行采样时的开关周期数)。

利用 MATLAB 编程可以得到随着分岔参数 k 的变化,系统 Jacobian 矩阵最大模特征值的变化曲线,如图 2 所示。

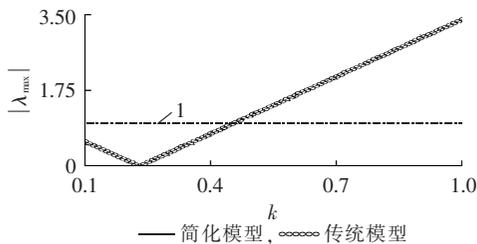


图 2 k 参数稳定性分析图

Fig.2 Chart of stability analysis for k parameter

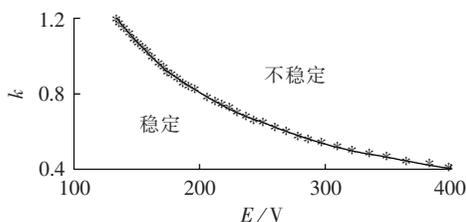
由图 2 可知,在 k 从 0.1 变化到 1 的过程中,系统 Jacobian 矩阵的最大模特征值由小于 1 逐渐变化到大于 1,可以得到系统的稳定与不稳定的分界点出现在 $k=0.46$ 处。同时,2 种方法所得到的系统稳定性变化曲线高度一致,但在仿真步长等其他条件不变的情况下,其数值仿真完成时间如表 1 所示。可以发现采用系数线性化离散模型的计算速度比传统模型快,耗时短,可见对传统离散模型的系数进行线性化后,降低了稳定性分析运算量,实用性更强。

表 1 仿真时间对比

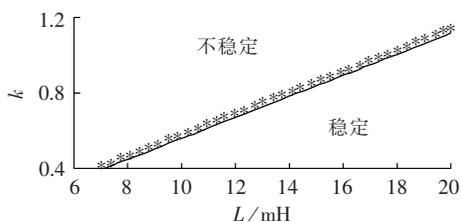
Tab.1 Comparison of simulation time

分岔参数	仿真时间/s	
	传统模型	简化模型
k	12.7	1.1
k/E	435.8	19.0
k/L	271.6	12.9
E/L	296.5	13.9

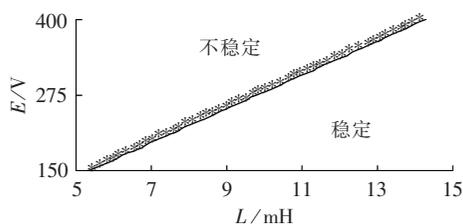
为进一步验证本文所提的系数线性化离散模型的优越性,本文还分别选择了系统输入端的电压 E 、输出端的滤波电感 L 以及控制端比例调节系数 k 作为分岔参数,研究了双分岔参数下系统运行的稳定参数域分布,其他参数设置同上,则所得结果见图 3。



(a) k/E 参数 ($L=8$ mH)



(b) k/L 参数 ($E=350$ V)



(c) E/L 参数 ($k=0.7$)

— 简化模型, ***** 传统模型

图 3 双参数稳定性分析图

Fig.3 Chart of stability analysis for double parameters

图 3 各图显示了随着系统双参数的同时变化,系统运行的稳定参数域的变化情况。可以看出,根据 2 种模型所得的系统运行稳定域划分吻合得很好。当输入电压 E 和比例调节系数 k 增大时,系统的稳定域逐渐减小;而当滤波电感 L 增大时,系统的运行稳定域亦逐渐增大。由于需控制 2 个参数的变化,其稳定性分析过程的运算量大幅增加。在仿真过程中,如表 1 所示,可以明显地发现本文所提简化模型的运算速度远快于传统模型。显然,系数线性化离散模型的正确性和实用性得到了很好的验证。

3 数值仿真验证

上述稳定性分析结论得到了系统运行的稳定参数域,因此有必要对上述理论分析的结论进行仿真验证。为更形象地描述系统状态随着分岔参数的变化而变化的情况,本节选择与第 2 节相同的系统参数,首先利用分岔图法对系统从稳定到混沌状态的演化过程作进一步的分析,再通过折叠图法和相轨迹图法对系统的稳定参数域进行验证。

3.1 系统分岔图分析

分岔图是分析动力学系统中出现的复杂行为的有效工具,该方法能形象地反映出随着分岔参数的变化,系统由稳定到分岔再进入混沌状态的具体演化过程。就本文系统而言,其具体实现方式如下:在不同分岔参数值下,根据系统离散模型进行迭代运算,对迭代稳定后的电感电流正弦波每个周期固定时刻的值(如正弦波的 90° 处)进行采样,并保留采样点,采样 30 个正弦周期后绘成以分岔参数为横坐标、电感电流采样值为纵坐标的分岔图。根据本文所提的系数线性化模型,利用 MATLAB 编程得到了系统关于比例调节系数 k 的分岔图,如图 4 所示。

从上述分岔图中可以看出,系统的稳定域分界点在 $k=0.46$ 处,与前述 Jacobian 稳定性分析的结论一致。随着 k 的继续增大,系统进入了分岔状态,当 $k>0.55$ 时,图中显示电感电流采样点在一定区域内出现了密集且具有相似的层次结构,表示系统已经处于混沌状态。

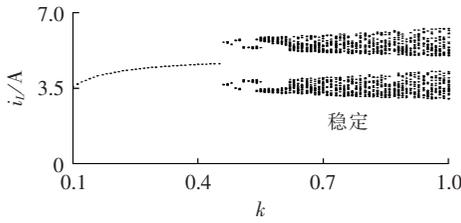


图 4 系统分岔图

Fig.4 Bifurcation diagram of system

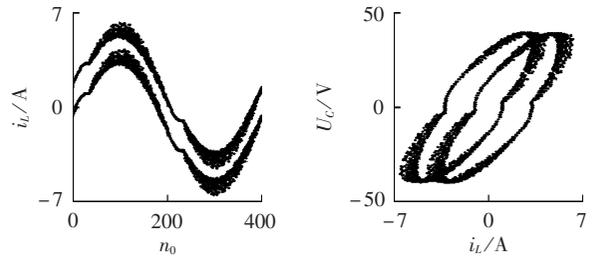
3.2 系统稳定域验证

选取任意初值代入系统的离散方程进行迭代,略去过渡过程,将稳定后状态变量的数个周期按采样时刻对齐后折叠,得到一个周期的波形,即为系统的折叠图,它能形象地反映出系统的运行状态。当所得折叠图都重合于 1 条单值曲线时,系统处于单周期稳定状态;当折叠图重合于 2 条曲线时,对应系统处于二周期分岔状态;当折叠图出现杂乱的不重合的曲线时,系统已经进入了混沌状态。

相轨迹图反映的是系统解曲线在相空间上的投影。如果所得相轨迹图是一条封闭的曲线,则系统工作在单周期稳定状态;如果相轨迹图出现 m 条封闭曲线,此时系统工作在 m 周期状态;若相轨迹图中有无数条封闭的曲线,即无数混乱的曲线,则系统处于混沌状态。

利用 MATLAB 根据系统折叠图以及相轨迹图的实现方法,选择不同系统工作状态下的分岔参数值,画出系统对应的折叠图和相轨迹图,如图 5 所示,其中 n_0 表示一个正弦周期内的开关周期数。

从图 5 各子图中可以看出,当 $k=0.4$ 时,所得折叠图重合于一条单值曲线,相轨迹图也是一条封闭的曲线,此时对应系统的稳定状态;当 $k=0.48$ 时,折叠图出现了 2 条曲线,且相轨迹图也出现了 2 条封闭的曲线,可见此时系统处于二周期分岔状态;当 $k=$



(c) 混沌态($k=0.9$)

图 5 数值仿真图

Fig.5 Diagrams of numerical simulation

0.9 时,所得的电感电流波形折叠后不重合,而是出现了杂乱的正弦波形,其相轨迹图也出现了大量不规则点,因此可断定此时系统已经进入了混沌状态。

综上所述,数值仿真结果很好地验证了稳定性分析的正确性,也验证了本文提出的基于系数线性化离散模型的有效性。

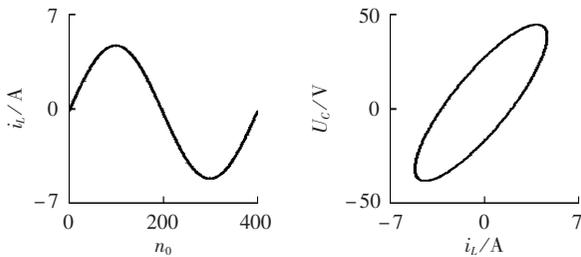
4 结论

本文对二阶逆变器中的分岔与混沌现象进行了深入研究,对传统一阶系统的离散建模方法作了改进,提出了一种基于系数线性化的离散建模方法。将传统模型中的矩阵指数函数运算转化为基本的矩阵运算。通过 2 种离散模型对系统进行稳定性分析,研究结论表明,本文所提的基于系数线性化离散模型的建模方法在保证精度的同时大幅降低了系统稳定性分析的复杂程度,提高了运算速度,证明了其有效性和实用性,这种优越性在高阶更大型复杂的系统中尤为明显。

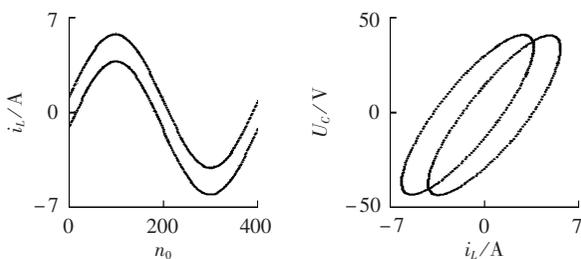
本文的研究结论为实际电力电子系统的设计提供了重要参考和借鉴,对实际工程中更复杂系统的简化运算分析具有重要的意义。

参考文献:

- [1] HAMILL D C,JEFFERIES D J. Subharmonics and chaos in a controlled switched-mode power converter[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems,1988,35(8):1059-1061.
- [2] BANERJEE S,CHAKRABARTY K. Nonlinear modeling and bifurcations in the Boost converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,1998,13(2):252-260.
- [3] 马西奎,李明,戴栋,等. 电力电子电路与系统中的复杂行为研究综述[J]. 电工技术学报,2006,21(12):1-10.
MA Xikui,LI Ming,DAI Dong,et al. Reviews of research on complex behavior of power electronic circuits and systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2006,21(12):1-10.
- [4] BERNARDO M D,GAROFALO F,GLIELMO L,et al. Switchings, bifurcations,and chaos in DC/DC converters[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems,1998,45(2):133-141.
- [5] TSE C K M,LAI Y M M,IU H H C. Hopf bifurcation and chaos in a free-running current-controlled Cuk switching regulator[J]. IEEE Transactions on Circuit and Systems,2000,47(4): 448-457.



(a) 稳定态($k=0.4$)



(b) 分岔态($k=0.48$)

- [6] TSE C K, BEMARDO M D. Complex behavior in switching power converters[J]. Proceedings of the IEEE, 2002, 90(5):768-781.
- [7] 罗晓曙, 汪秉宏, 陈关荣, 等. DC-DC Buck 变换器的分岔行为及混沌控制研究[J]. 物理学报, 2003, 52(1):12-17.
LUO Xiaoshu, WANG Binghong, CHEN Guanrong, et al. Research on bifurcation behavior and chaos control in DC-DC Buck converter[J]. Acta Physica Sinica, 2003, 52(1):12-17.
- [8] 郑连清, 申滔, 池俊峰. 断续导通模式下 Buck 变换器的混沌分析及其滑模控制[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(7):30-35.
ZHENG Lianqing, SHEN Tao, CHI Junfeng. Chaos analysis and sliding mode control of Buck converter operating in discontinuous conduction mode[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(7):30-35.
- [9] ROBERT B, ROBERT C. Border collision bifurcations in a one-dimensional piecewise smooth map for a PWM current-programmed H-bridge inverter[J]. Int J Control, 2002, 75(16):1356-1367.
- [10] 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 and Systems, 2003, 50(8):1125-1129.
- [11] FEKI M, ROBERT B, IU H H C. A proportional plus extended time-delayed feedback controller for a PWM inverter[C]//35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Aachen, Germany: IEEE, 2004:3317-3320.
- [12] 王学梅, 张波. H 桥直流斩波变换器边界碰撞分岔和混沌研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(9):22-27.
WANG Xuemei, ZHANG Bo. Mechanism of border-collision bifurcations and chaos in H-bridge direct current chopper[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(9):22-27.
- [13] WANG X M, ZHANG B, QIU D Y. Bifurcations and chaos in H-bridge DC chopper under peak-current control[C]//IEEE Conference on Electrical Machines and Systems. Guangzhou, China: IEEE, 2008:2173-2177.
- [14] 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.
- [15] 王学梅, 张波, 丘东元. H 桥正弦逆变器的快变和慢变稳定性及混沌行为研究[J]. 物理学报, 2009, 58(4):2248-2254.
WANG Xuemei, ZHANG Bo, QIU Dongyuan. The fast-and-slow-scale stabilities and chaotic motion of H-bridge sine inverter[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(4):2248-2254.
- [16] LI M, DAI D, MA X K, et al. Fast-scale period-doubling bifurcation in voltage-mode controlled full-bridge inverter[C]//IEEE International Symposium on Digital Object Identifier. Seattle, WA, USA: [s.n.], 2008:2829-2832.

作者简介:

周 林(1961-), 男, 四川隆昌人, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为电力电子与电力传动;

龙崦平(1988-), 男, 江西吉安人, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动(E-mail: longyanpinggy@163.com)。

Bifurcation and chaos of inverter system based on coefficient linear model

ZHOU Lin, LONG Yanping, GUO Ke, LI Huaihua, DU Jinqi

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: With the inverter with LC filter as the research subject, the bifurcation occurred in second order inverter system is studied. A discrete model with coefficient linearization based on traditional modeling method is provided to reduce the complexity of second order system and simplify the operations of system modeling, stability analysis and numerical simulation. The Jacobian matrix stability analysis is applied to analyze the differences between two models and achieve the stability region of system with single or double parameters. Numerical simulation indicates that, with the simplified model, the system stability region can be obtained effectively, much better than that with traditional model in complexity, operation load and speed.

Key words: electric inverters; coefficient linearization; discrete model; Jacobian matrices; stability region; bifurcation(mathematics); chaos theory; stability