

DC-DC 变换器的符号时间序列描述及模块熵分析*

王学梅^{1)†} 张 波¹⁾ 丘东元¹⁾ 陈良刚¹⁾

1) 华南理工大学电力学院, 广州 510640)

2) 湖南工业大学电气与信息工程学院, 株洲 412008)

(2008 年 1 月 28 日收到, 2008 年 5 月 8 日收到修改稿)

本文提出了一种采用符号时间序列和熵理论分析 DC-DC 变换器非线性行为的方法. 该方法首先用离散时间序列描述非线性连续系统, 然后将其转换为由简单字符构成的符号序列, 再用信息学方法计算出该符号序列的模块熵, 从而得到一种新的可量化的非线性动力学行为统计指标. 文中以一阶电压反馈 DCM 和二阶电流反馈 CCM Boost 变换器为例进行研究. 研究表明, 模块熵这种粗粒化的统计分析方法, 能够量化 DC-DC 变换器的倍周期分岔和混沌行为, 且能够准确地确定混沌行为的发生, 是一种尚未在 DC-DC 变换器中提出的简单、实用的分析方法.

关键词: 符号时间序列, 符号动力学, 模块熵, Lyapunov 指数

PACC: 0545

1. 引 言

近二十年来, 混沌动力学在数学、物理和工程领域得到了广泛地研究, 其中混沌信号产生、混沌控制和反控制以及混沌同步等成为研究的热点问题^[1-6], 这些热点问题的研究在信息技术、电力电子、生物医学等应用领域取得了较大的成果.

DC-DC 变换器是一个强非线性系统, 现有研究证明在一定的工作和参数条件下, 系统会出现各种分岔如倍周期分岔, Hopf 分岔, 边界碰撞分岔和混沌运动^[7-11]. 现有 DC-DC 变换器的混沌研究方法中, 主要有 Lyapunov 指数、雅克比矩阵法等. 但对于高维映射, 迭代映射方程、不动点和 Jacobian 矩阵求取均存在困难. 因此对于电力电子变换器, 解析方法分析混沌存在较大的难度.

从时间序列研究混沌, 始于 Packard 等人提出的相空间重构理论, 主要采用 Lyapunov 指数、维数和熵这三种特征量来刻画混沌吸引子^[12]. 这三种方法的共同优点是准确, 但对于 DC-DC 变换器需要仔细选择计算方法且计算量较大.

符号动力学是形式上最为简单的一种严格数学方法, 是实际动力系统的高度概括和抽象^[13], 符号序列以最简单的方式描述了系统的动力学特征, 提

供了一种研究复杂动力系统运行状态的手段, 已经成功地应用到医学、电化学和密码学等领域的非线性研究中^[14-20]. 符号分析方法在电力电子变换器混沌的研究中才刚刚起步, 文献 [9, 10] 在这方面作了初步的探索. 从电路拓扑出发, 用“0”(占空比 < 1) 和“1”(占空比 = 1) 构造符号序列检测到边界碰撞的发生, 但标准倍周期分岔不会出现占空比为 1 的情况, 因此这种方法对倍周期分岔导致的混沌显然无能为力, 只能判断边界碰撞引起的混沌现象.

本文首先用频闪法(按一定的采样时间对系统状态量进行离散化)获得系统的离散时间序列, 然后对其进行符号化, 引入描述符号序列总体统计特征的模块熵, 尝试简化混沌行为的分析方法和分析过程, 同时达到识别和量化非线性系统倍周期分岔和混沌行为的目的. 文中具体以一阶电压反馈 DCM (不连续导电模式) 和二阶电流反馈 CCM (连续导电模式) Boost 变换器为例, 对倍周期分岔和混沌行为进行了的定量描述, 研究结果证明了本文思路的正确性和可靠性. 提出的方法与 Lyapunov 指数和雅克比矩阵法相比具有计算方法简单、样本数少的特点, 且能够弥补 Lyapunov 指数方法无法确定周期次数的缺点, 更适合电力电子开关变换器这类复杂非线性系统的研究.

* 国家自然科学基金(批准号 60474066)和广东省自然科学基金(批准号 05103540)资助的课题.

† E-mail: wang_xuemei@mail.scut.edu.cn

2. 时间序列符号化和模块熵

2.1. 时间序列符号化

符号序列分析方法首先对系统的离散时间序列进行符号化, 然后选择一个合适的字长编码(滑动时间窗), 编码后计算不同字的概率直方(即不同字出现的频率), 其过程可用图 1 说明^[21]. 图中的小圆圈代表待分析系统的采样值, 将采样值分割成上下两部分, 上部分的采样值用“1”表示; 下部分的采样值用“0”表示, 由此形成一个二进制序列, 选择一个字长编码(图中为 3 位)转换成十进制的代码序列, 然后计算该代码符号序列的直方图, 系统的动力学特性就转变为对这个直方图的统计学规律的研究.

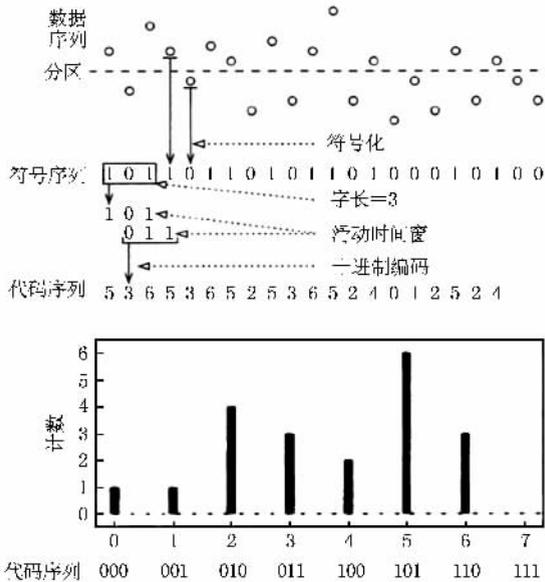


图 1 时间序列符号化示意图

可以看出, 当分区界限改变时, 有可能使符号序列发生较大的变化. 因此选择一种适当的分区方法对符号序列的分析至关重要. 下面以一个简单的单峰映射 Logistic 为例说明时间序列符号化方法.

Logistic 系统可以描述为

$$x_{n+1} = \mu x_n (1 - x_n), \quad (1)$$

其返回映射见图 2.

对应于图 2, 可采用拓扑判据进行分区. 这种分区方法是: 将相空间分隔成 q 个不相连的子集, 给每个子集标注一个符号. 图 2 中, 临界点 C 将映射分成两个单调的分支, 一个单调上升, 一个单调下降, 即 $q = 2$. 任意给定初值 x_0 , 代入(1)式不断进行

迭代, 可得到其离散数值序列 $\{x_0, x_1, \dots, x_n, \dots\}$. 令

$$s_n = \begin{cases} 0, & x_n \leq x_C, \\ 1, & x_n > x_C, \end{cases} \quad (2)$$

其中 x_C 是临界点 C 的横坐标, 由此形成一个由“0”和“1”组成的二进制符号序列 $\{s_0, s_1, \dots, s_n, \dots\}$. 图 3(a) 是 Logistic 映射的离散数值序列, 图 3(b) 是符号化后得到的符号序列直方图, 从直方图中可以看出 Logistic 映射的符号概率分布.

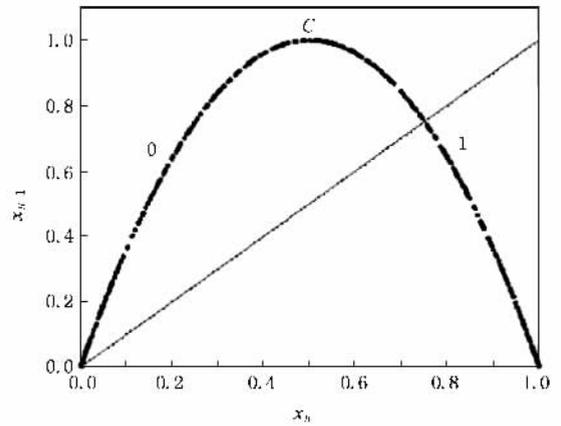


图 2 Logistic 的返回映射 ($\mu = 4$)

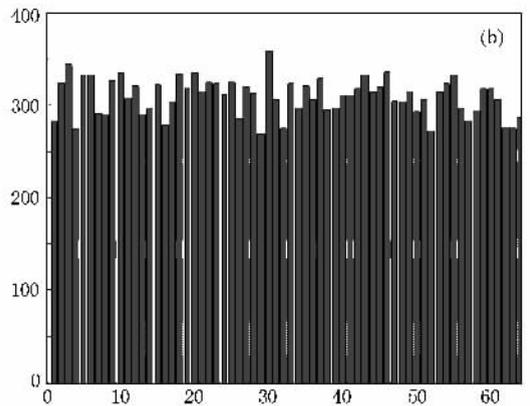
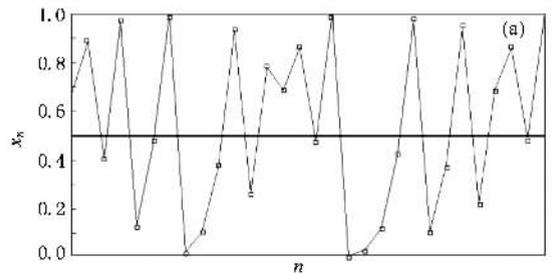


图 3 Logistic 的离散数值序列和符号序列直方图 (a) 离散数值序列 (b) $\mu = 4$ 时的符号序列直方图, 横坐标为二进制符号序列所对应的十进制数, 纵坐标为每一种代码出现的次数(6 位字长, 样本数 20000)

目前,时间序列的分区方法也是研究的热点问题,且没有一个统一的分区方法^[22-25].分区的选择对分析结果有重要的影响,分区方法要根据实际对象具体确定^[26].分区和符号化将混沌系统变成一个遍历的信息源,因此可以采用信息论来分析这种转换.

2.2. 模块熵

定义:对于符号动力系统,字长为 L 的二进制符号序列的模块熵为

$$H_{BS}(L) = - \sum_{n=1}^N p_n \log_2 p_n, \quad (3)$$

其中 p_n 是第 n 个二进制符号字在直方图中的概率,且 $N = 2^L$.特别地,当某个 $p_n = 0$ 时,规定 $0 \cdot \log_2 0 = 0$.

就本质而言,模块熵是在二进制符号规则下定义的一种信息熵,因为取以 2 为底的对数,模块熵的单位为比特.

当信号规律性强的时候,有序度高,复杂度低,此时相应的熵值较小;反之,信号杂乱无章,复杂度高,熵值也高.因此,模块熵通过计算不同二进制符号序列的产生概率,量化了动力系统的复杂度,反映了符号序列总体的统计特征.

此外,模块熵具有以下性质^[18,27]:

- 1) 常数符号序列的熵为 0;
- 2) 熵最大值等于 L ;
- 3) 随字长 L 的增加,熵值增加;
- 4) 当符号动力系统处于周期运动且周期数 $m < L$ 时,有 $H_{BS}(\text{periodic}) = \log_2 m$.

证明:

1) 常数符号序列意味着整个序列只有一种符号,且概率为 1,其他符号序列的概率均为 0,因此常数符号序列的熵为 0.

2) 根据信息论,在离散情况下,各事件等概率发生时,信息熵具有极值性 $H_S(p_1, p_2, \dots, p_N) \leq H_S\left(\frac{1}{N}, \frac{1}{N}, \dots, \frac{1}{N}\right) = \log N$.因此,对于字长为 L 的二进制符号序列,模块熵的最大值 $H_{BS(\max)} = \log_2 2^L = L$.从信息论的观点认为,这时的动力系统具有完全随机性.

3) 由于对数的单调上升性,字长 L 越大,即集合中不同符号序列的数目越大,其熵值就越大.

4) 当符号动力系统处于周期运动时, $p_1 = p_2 = \dots = p_m = 1/m$,所以 $H_{BS}(\text{periodic}) = \log_2 m$.

显然,从性质 1) 和 4) 可以判断系统是否是周期

运动;从性质 2) 可以判断系统是否是随机运动或伪随机运动,若有熵值等于 L ,则必为随机,而是否混沌,则还需借助混沌的其他性质如初值敏感性来判断,即微小初值变化是否引起熵的变化.此外若系统本身是确定性系统,也可以由确定系统出现的内随机现象即混沌现象规律来确定.

这里要说明的是,模块熵的值首先取决于字长 L ,其次取决于 p_n 的分布形态,因此其结果与符号化的方法和精度的选择密切相关.在实际研究中具体字长的选择可根据经验来获得, L 太短会丢失一些确定信息,太长会把噪声引进来.研究表明,当 L 大于一定数值后,熵值变化不大趋于饱和.熵只是从统计角度来区分时间过程的复杂性,表征动力系统的差异或变化,而不是描述吸引子的全貌,因此只需较短的数据就可以估计出来.

3. DCM Boost 变换器的模块熵

以 Boost 变换器为例,分别计算一阶电压反馈不连续导电(DCM)模式和二阶电流反馈连续导电(CCM)模式下的模块熵,说明模块熵对 DC-DC 变换器倍周期分岔和混沌分析的适用性,由此证明它是一个新的 DC-DC 变换器混沌分析的量化指标.

3.1. 一阶 DCM Boost 变换器模块熵

电压型 DCM Boost 变换器如图 4 示.图中 E 为输入电压, X 为期望的稳态输出电压, D 为期望的稳态占空比, k 为反馈增益.电压型 DCM Boost 变换器工作状态可以用一阶迭代映射方程来近似描述为^[7]

$$x_{n+1} = f(k, x_n) = \alpha x_n + \frac{\beta h(d_n) \gamma E^2}{x_n - E}, \quad (4)$$

其中, x_n 代表第 n 次迭代的电容电压(取 $i_L = 0$ 时); α 和 β 为系统参数; $h(d_n)$ 为具有饱和特性的占空比,它可用下式表示

$$h(d_n) = \begin{cases} 0, & d(x_n) < 0, \\ 1, & d(x_n) > 1, \\ d(x_n), & \text{其他}, \end{cases} \quad (5)$$

上式中, $d(x_n) = D - k(x_n - X)$.

采用文献[7]的参数,(4)式的返回映射可以描绘为图 5.该映射存在显著的结构特性——临界点(谷点)不变,即分区不依赖于分岔参数,因此其符号的划分可以采用 2 节介绍的拓扑分区方法,定义单

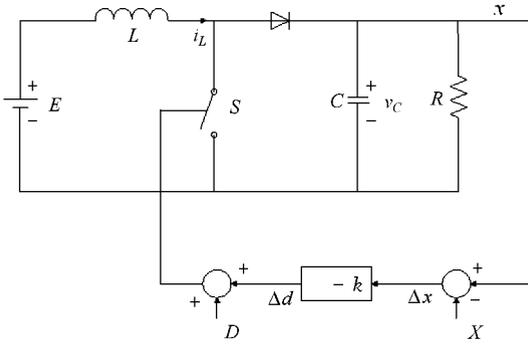


图 4 电压反馈型 DCM Boost 变换器

调上升支为“0”,单调下降支为“1”,临界点 $C = 26.4$, 临界点可定义为“0”也可定义为“1”.

$$s_n = \begin{cases} 1, & ix_n < 26.4, \\ 0, & ix_n \geq 26.4. \end{cases} \quad (6)$$

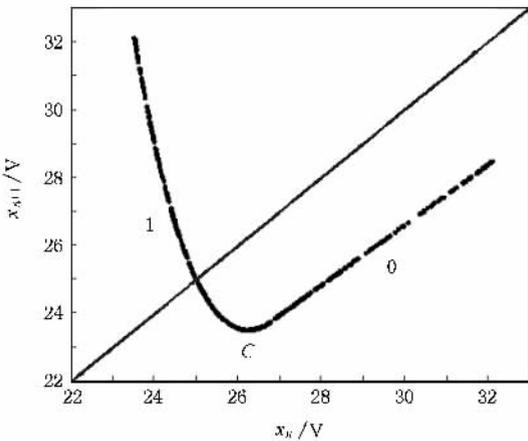


图 5 DCM Boost 变换器返回映射, 临界点 $x_C = 26.4$, $k = 0.16$

采用 8 位字长编码, 选取样本数 3000, 图 6 是反馈增益 $k = 0.16$ 时的符号序列概率直方图, 采用(3)式计算其模块熵值为 6.72. 进一步分析不同 k 值下的模块熵, 如图 7 所示.

从图 7 可以明显看出: 1) 当熵值保持恒定时(见图中水平线), 变换器运行于周期态, 且随周期数增加, 熵值增加; 2) 当熵值随 k 增加而无序变化时, 出现了类似随机运动, 总体呈上升趋势; 3) 熵值变化始终小于字长 L .

从符号动力学的角度可以分析周期窗符号序列的形成规律. 图 5 可以看出, 只有在映射的下降支才可能出现与对角线相交的情况, 因此稳定的周期 1 的符号序列一定是“1”的循环, 同时, 也只有下降支才可能产生倍周期分岔, 因为只有下降支才可能出

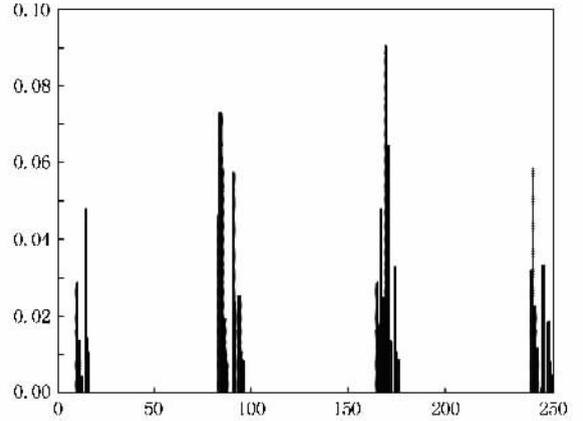


图 6 DCM Boost 变换器符号序列概率直方图($k = 0.16$), 横坐标为 8 位二进制符号对应的 256 种情况, 纵坐标为每一种符号的出现概率

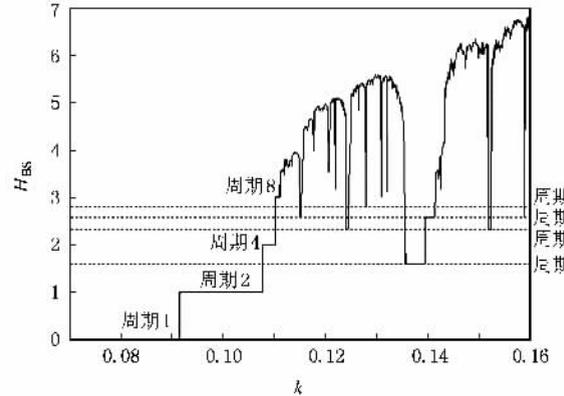


图 7 DCM Boost 的模块熵(仿真步长 $k = 0.0001$)

现失稳边界 $f' = -1$ 的情况, 可将这个一位代码的循环表示成

$$(1)^\infty$$

同理, 周期 2 应为 2 位符号代码的循环, 且首位为“1”:

$$(11)^\infty \text{ 和 } (10)^\infty$$

根据符号动力学理论, 对于单峰映射, 在满足保序和保奇偶的情况下, 做如下符号替换^[28, 29]:

$$1 \rightarrow 10$$

$$0 \rightarrow 11$$

可得到周期 4 的符号序列

$$(1010)^\infty \text{ 和 } (1011)^\infty$$

这样一直重复下去, 可得到整个倍周期分岔序列的符号序列, 由于受字长 L 的限制, 这里仅将部分结果记录到表 1. 从表中可以看出, 对于同一个周期, 出现了两种不同的符号序列, 如周期 2, 同时出现了

(11)[∞]和(10)[∞],从概率直方的角度分析,周期1的(1)[∞]和周期2的(11)[∞]是一样的,亦即熵一致,这说明符号序列不会因为过分岔点而发生改变,所以符号动力学并不能确定分岔点的位置^[28].

表1 模块熵分析

周期数	符号代码	熵值
周期1	(1) [∞]	0
周期2	(11) [∞] (10) [∞]	0 1
周期4	(1010) [∞] (1011) [∞]	1 2
周期8	(10111011) [∞] (10111010) [∞]	2 3
混沌	不存在确定的序列	不定
周期3	(101) [∞]	1.585
周期5	(10110) [∞]	2.322
周期6	(101110) [∞]	2.585
周期7	(1011011) [∞]	2.807

结合图7,从图中可以清楚地看出存在周期1,2,4和8的倍周期分岔过程,由于字长的限制,大于8的周期轨道不能准确地判定.图中虚线为周期3,5,6和7所对应的模块熵数值,从模块熵曲线与虚线的重叠部分,可以清楚说明出现的周期窗口及其确切的周期数.这与模块熵的性质(4)是完全吻合的.

图8为图7的局部放大,是两条初值有微小差别模块熵曲线.位于周期窗口时,两条曲线完全重合,当k>0.1112后,两条曲线出现了不重合的交错现象,意味着初值的微小差别引起了熵值变化,很好地吻合了混沌的标志——初值敏感性,这也是混沌运动区别于随机运动的一个重要标志.因此,在DC-DC变换器这样的确定系统出现具有初值敏感性的类似随机现象必定是混沌,可认为当k=0.1112为混沌出现的临界点,与DCM Boost变换器Lyapunov指数(图9)分析结果完全一致.

进一步对比图9和图7, Lyapunov指数图能够准确确定周期轨道的分岔点(图中与0线相切的尖峰)却不能辨别周期是几; Lyapunov指数从正到负,意味着混沌运动中所蕴含的周期窗,但从图中同样不能分辨周期窗的周期数,而模块熵图中周期轨道和熵值存在一一对应关系(见表1),可以准确探明确切的周期轨道,弥补了Lyapunov指数的不足.

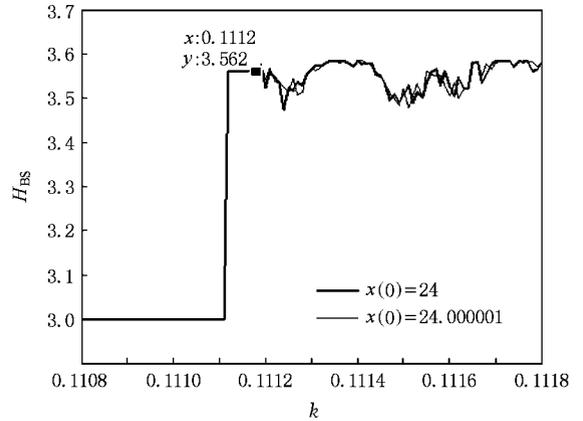


图8 微小初值变化的模块熵的局部放大(仿真步长k=0.00001)

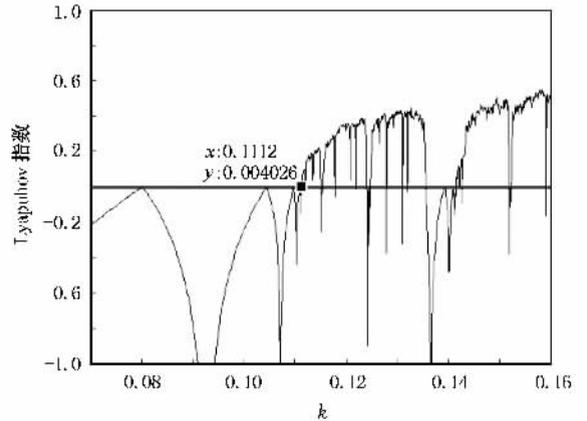


图9 DCM Boost变换器Lyapunov指数图

3.2. 二阶CCM Boost变换器模块熵

电流峰值控制CCM Boost电路如图10所示,其中I_{ref}为参考电流.该电路出现了倍周期分岔、边界碰撞和混沌现象,采用频闪映射可得到其二阶迭代方程^[11]

$$\begin{aligned}
 i_{n+1} &= e^{-kt'_n} (A_1 \sin \omega t'_n + A_2 \cos \omega t'_n) + E/R, \\
 v_{n+1} &= E + e^{-kt'_n} [(A_1 kL + A_2 \omega) \cdot \sin \omega t'_n \\
 &\quad + (A_2 k - A_2 \omega) L \cos \omega t'_n]. \tag{7}
 \end{aligned}$$

其中*i*, *v*分别为电感电流和电容电压, $k = 1/2RC$, $\omega = \sqrt{1/LC - R^2}$, $t_n = I(I_{ref} - i_n)YE$, $t'_n = T - t_n$, $A_1 = \frac{kI(I_{ref} - E/R) + E - v_n e^{-2kt_n}}{\omega L}$, $A_2 = (I_{ref} - E/R)$.

设

$$i' = I_{ref} - i_L, \tag{8}$$

采用文献11的参数,可得到不同I_{ref}下*i'*的返回映

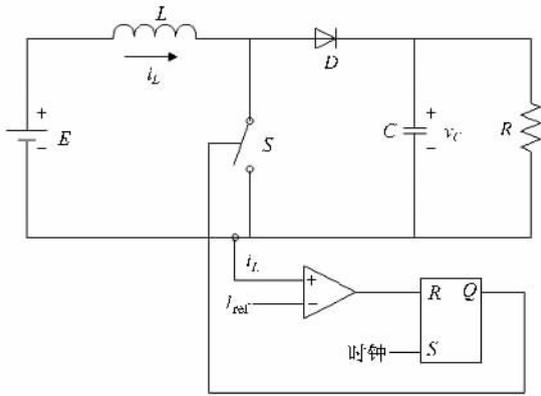


图 10 电流反馈型 Boost 变换器

射,如图 11 这个映射类似一个倒置的 Tent 映射,亦具有明显的拓扑分区特点——临界点不变。

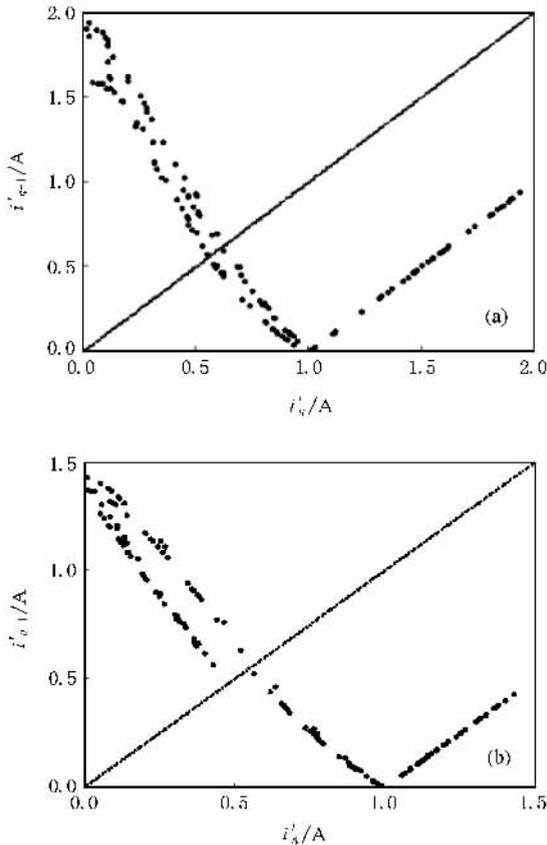


图 11 不同参考电流下的 i_L^* 返回映射,临界点为 1A (a) $I_{ref} = 4A$ (b) $I_{ref} = 3A$

按照以下方法定义符号：

$$s_n = \begin{cases} 1, & i'_n \leq 1, \\ 0, & i'_n > 1, \end{cases} \quad (9)$$

采用 2 节的方法可得到系统的符号化时间序列

和不同 I_{ref} 下的模块熵(图 12)。图 13 是系统的最大 Lyapunov 指数图^[11],比较二者,同样验证了模块熵对二阶 CCM Boost 变换器的正确性和有效性。

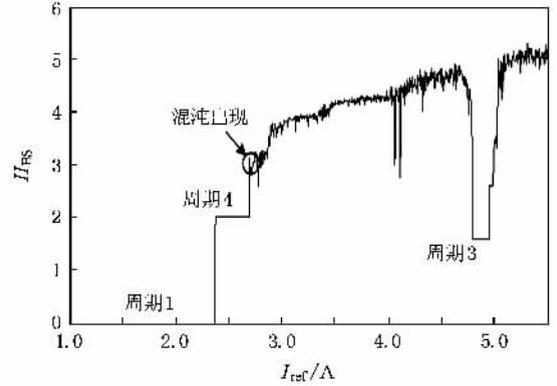


图 12 数值仿真的模块熵图(6 位字长,样本数 3000,仿真步长 0.0001)

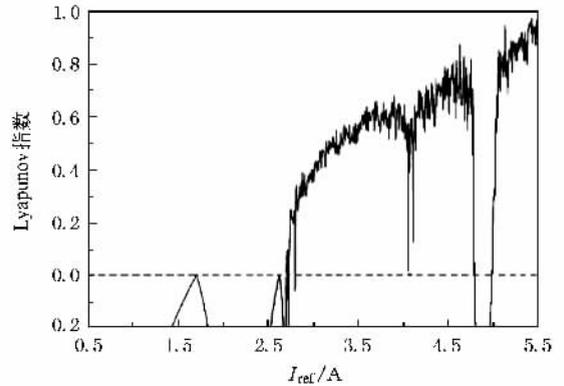


图 13 CCM Boost 变换器 Lyapunov 指数图

4. 结 论

本文提出了一种采用符号时间序列和熵理论分析 DC-DC 变换器非线性行为的方法.给出了描述符号序列总体统计特征的模块熵定义及其性质,以此作为非线性系统的倍周期分岔和混沌行为识别的一种新方法.该方法应用于一阶电压反馈 DCM 和二阶电流反馈 CCM Boost 变换器的分岔及混沌的分析结果表明,基于模块熵的混沌符号时间序列分析方法不但适用于简单的一阶动力系统,同样适用于二阶系统.由于周期轨道和模块熵值之间存在明确一一对应量化关系,模块熵能够准确地确定周期和混沌行为的发生,且克服 Lyapunov 指数方法无法确定周期次数的缺点,同时具有计算方法简单、样本数少的

优点,更适合电力电子开关变换器这类复杂非线性系统的研究.

- [1] Lü J H , Chen G R 2006 *Int. J. Bifurcation and Chaos* **16** 775
- [2] Lü J H , Chen G R , Cheng D , Celikovsky S 2002 *Int. J. Bifurcation and Chaos* **12** 2917
- [3] Lü J H , Han F , Yu X , Chen G 2006 *Automatica* **40** 1677
- [4] Chen G R , Yu X 2003 *Chaos Control : Theory and Applications* (Berlin : Springer)
- [5] Li R H , Xu W , Li S 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 598 (in Chinese)
[李瑞红、徐 伟、李 爽 2006 物理学报 **55** 598]
- [6] Guan X P , Fan Z P , Zhang Q L , Wang Y Q 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2216 (in Chinese) [关新平、范正平、张群亮、王益群 2002 物理学报 **51** 2216]
- [7] Tse C K 1994 *IEEE Trans. Circuits and Syst. I* **42** 16
- [8] Zhang B , Qu Y 2003 *Proceedings of the CSEE* **23** 99 (in Chinese)
[张 波、曲 颖 2003 中国电机工程学报 **23** 99]
- [9] Dai D , Ma X K , Li X F 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2729 (in Chinese) [戴 栋、马西奎、李小峰 2003 物理学报 **52** 2729]
- [10] Li M , Ma X K , Dai D , Zhang H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1084 (in Chinese) [李 明、马西魁、戴 栋、张 浩 2005 物理学报 **54** 1084]
- [11] Deane J H B 1992 *IEEE Trans. Circuits and Syst. I* **39** 680
- [12] Lü J H , Lu J A , Chen S H 2002 *Analysis and Applications of Chaos Time Series* (Wuhan : Wuhan University Press) p9 (in Chinese)
[吕金虎、陆君安、陈士华 2002 混沌时间序列的分析及其应用 (武汉 : 武汉大学出版社) 第 9 页]
- [13] Zheng W M 1994 *Applied Symbolic Dynamics* (Shanghai Scientific and Technological Education Publishing House) p4 (in Chinese)
[郑伟谋 1994 实用符号动力学 (上海 : 上海科技教育出版社) 第 4 页]
- [14] Freund J A *et al* 2001 *Phys. Rev. E* **63** 1910
- [15] Tang X Z , Tracy E R , Boozer A D , Brauw A de , Brown R 1995 *Phys. Rev. E* **51** 3871
- [16] Tang X Z , Tracy E R , Brown R 1997 *Physica D* **102** 253
- [17] Godelle J , Letellier C 2000 *Phys. Rev. E* **62** 7973
- [18] Kurths J 1995 *Chaos* **5** 88
- [19] Álvarez G , Montoya F , Romera M , Pastor G 2003 *Phys. Lett. A* **311** 172
- [20] Piccardi C 2006 *Chaos* **16** 043115
- [21] Letellier C 2008 *Chaos , Solitons & Fractals* **36** 32
- [22] Davidchack R L , Lai Y C , Bollt E M , Dhamala M 2000 *Phys. Rev* **61** 1353
- [23] Daw C S , Finney C E , Kennel M B 2000 *Phys. Rev. E* **62** 1912
- [24] Leeuwen P 2007 *Chaos* **17** 015119
- [25] Daw C S , Finney C E , Tracy E R 2003 *Rev. Scientific Instruments* **74** 915
- [26] Bollt E M , Stanford T , Lai Y , Zyczkowski K 2001 *Physica D* **154** 259
- [27] Wackerbauer R , Witt A , Atmanspacher H , Kurths J , Scheingraber H 1994 *Chaos , Solitons & Fractals* **4** 133
- [28] Hao B L 1993 *Starring with Parabolas An Introduction to Chaotic Dynamics* (Shanghai : Shanghai Scientific and Technological Education Publishing House) p44 (in Chinese) [郝柏林 1993 从抛物线谈起-混沌动力学引论 (上海 : 上海科技教育出版社) 第 44 页]
- [29] Hao B L 1989 *Elementary Symbolic Dynamics and Chaos in Dissipative Systems* (Singapore : World Scientific) p15

Symbolic time series characterization and block entropy analysis of DC-DC converters^{*}

Wang Xue-Mei^{1,2)†} Zhang Bo¹⁾ Qiu Dong-Yuan¹⁾ Chen Liang-Gang¹⁾

¹⁾ *Electric Power College, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China*

²⁾ *Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412008, China*

(Received 28 January 2008 ; revised manuscript received 8 May 2008)

Abstract

A method based on symbolic time series and entropy theory is proposed to analyse the nonlinear behaviours of DC-DC converters. Firstly, the nonlinear continuous system is described by a discrete time series, which is then transferred to a symbol series composed of simple characters; and the series' block entropy is calculated by means of informatics methodology; consequently, a new quantifiable statistical index is obtained. This study takes a one-order voltage feedback DCM and a two-order current feedback CCM Boost converter as examples, and the results illustrate that the coarse-grained statistical method of block entropy, which can quantify the period-doubling and chaos behaviours in DC-DC converters and precisely confirm the appearance of chaos, is a simple and practical analysis method which has not been used in DC-DC converters yet.

Keywords : symbolic time series, symbolic dynamics, block entropy, Lyapunov exponent

PACC : 0545

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60474066) and the Natural Science Foundation of Guangdong Province, China (Grant No. 05103540).

[†] E-mail : wang.xuemei@mail.scut.edu.cn