

电流模式 SEPIC 变换器倍周期分岔现象研究*

李冠林[†] 李春阳 陈希有 牟宪民

(大连理工大学电气工程学院, 大连 116023)

(2011 年 12 月 28 日收到; 2012 年 2 月 12 日收到修改稿)

以 SEPIC 变换器中前置电感电流为控制对象, 建立了 SEPIC 变换器断续电流模式下的离散时间模型, 并分析了不动点的稳定性. 通过相轨图、功率谱图以及分岔图, 发现电路中存在一种特殊的倍周期分岔现象——电路的运行状态经历了 1 倍周期、2 倍周期、4 倍周期再到 2 倍周期、4 倍周期, 最终进入混沌状态. 实验结果与仿真结果相一致, 证实了 SEPIC 变换器在断续电流模式下存在这种倍周期分岔现象.

关键词: SEPIC 变换器, 断续电流模式, 倍周期分岔, 混沌

PACS: 05.45.-a

1 引言

近年来, 国内外对低阶功率开关变换器中的非线性现象已进行了比较广泛和深入的研究, 通过仿真与实验证实了在 Buck, Boost, Buck-Boost 等低维变换器中存在的分岔、混沌等现象^[1-9]. 高维 SEPIC 变换器具有可升降压, 输入输出电流脉动小, 传输效率高, 输出和输入电压极性相同等优点, 在升降压直流变换器电路、功率因数校正电路和光伏发电系统中得到了广泛应用^[10,11]. 然而, 与低维 DC-DC 变换器相比, 高维 SEPIC 变换器结构上更加复杂, 因而具有更丰富的非线性现象. 迄今为止, 有关 SEPIC 变换器中分岔与混沌现象的研究成果鲜有报道^[12]. 自文献 [13] 首次报道了 SEPIC 变换器中的分岔与混沌现象, 刘芳等人对电压模式 SEPIC 变换器和电流模式 SEPIC 变换器中的分岔行为、低频振荡以及分岔控制等方面进行了研究^[14-17]. 此外, 周宇飞等人通过数值仿真和电路仿真观察到耦合有干扰信号的电流模式 SEPIC 变换器中的间歇现象^[18,19].

目前, 对电流模式 SEPIC 变换器的研究均以变换器中两电感电流之和为控制对象, 通过建立连续导电 (CCM) 模式下 SEPIC 变换器的模型来进行分析. 以电感电流之和为控制对象加大了进行

电路实验的难度, 因而以往的研究多是给出仿真结果^[12-19]. 鉴于此, 本文以 SEPIC 变换器中前置电感电流为控制对象, 从状态方程出发, 首先建立此电流控制下 SEPIC 变换器断续电流模式 (DCM) 离散时间模型. 通过对变换器中的非线性现象进行仿真和分析, 发现变换器中存在一种特殊的倍周期分岔现象, 电路系统的运行状态经历了周期、2 倍周期、4 倍周期再到 2 倍周期、4 倍周期, 最终进入混沌状态. 这与以往的倍周期分岔过程是不同的, 在其他变换器中未见有报道. 最后, 在实验中得到相图、功率谱图、采样输出波形以及分岔图, 观察到 SEPIC 变换器中丰富的动力学行为演化过程. 通过外围采样保持器实现分岔参数控制和电感电流采样绘制了电感电流分岔图, 证实了这种倍周期分岔现象的存在.

2 电流模式控制 SEPIC 变换器建模及稳定性分析

2.1 电路工作原理

电流模式控制 SEPIC 变换器电路原理如图 1 所示. 电路工作原理如下: 选择电感 L_1 上的电流为控制信号, 通过与参考电流 I_{ref} 比较产生开关驱动信号. 周期开始前, 在时钟脉冲作用下开关 S 导

* 国家自然科学基金 (批准号: 50877007) 和中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: DUT10LK12) 资助的课题.

[†] E-mail: lglhit@dlut.edu.cn

通, 电感电流 i_{L1} 和 i_{L2} 线性增加, 当电感电流 i_{L1} 峰值达到参考电流 I_{ref} 时, 开关 S 断开, 电感电流 i_{L1} 和 i_{L2} 线性减小直到下一个周期开始. 根据开关管 S 和二极管 D 的状态, 电路会出现三种工作模式: 1) 开关 S 导通, 二极管 D 截止; 2) 开关 S 断开, 二极管 D 导通; 3) 开关 S 断开, 二极管 D 截止. 当电路工作于模式 3 时电路中两电感电流之和 $i_S(i_{L1} + i_{L2} = i_S)$ 为 0.

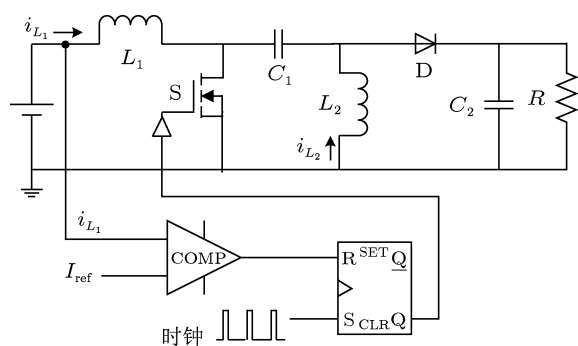


图 1 电流模式控制 SEPIC 变换器框图

与低维等开关变换器不同的是, SEPIC 变换器连续电流模式 (CCM) 和断续电流模式 (DCM) 是以两电感电流之和 i_S 是否为 0 为标准. 本文中 SEPIC 变换器工作于 DCM 模式下, 电路中电感电流波形示意图如图 2.

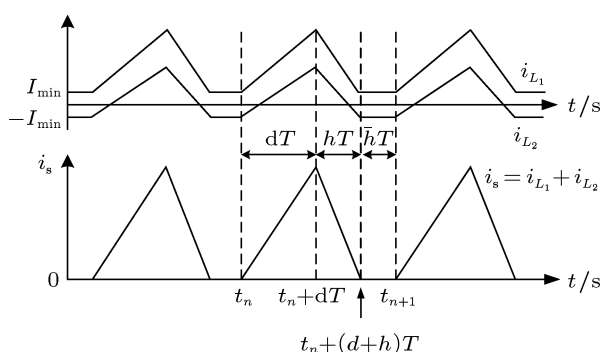


图 2 电感电流波形示意图

由电感电流之和 i_S 可以看出变换器工作于不连续导电模式时, 在一个开关周期内电路经历 3 个工作模式, 选取 $\mathbf{x} = [v_{C1} \ v_{C2} \ i_{L1} \ i_{L2}]^T$ 为系统状态变量, 列写电路状态方程如下:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}_1 \mathbf{x} + \mathbf{B}_1 E, & t_n \leq t < t_n + dT, \\ \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}_2 \mathbf{x} + \mathbf{B}_2 E, & t_n + dT \leq t < t_n + (d+h)T, \\ \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}_3 \mathbf{x} + \mathbf{B}_3 E, & \end{aligned} \quad (1)$$

$$t_n + (d+h)T \leq t < t_{n+1},$$

式中, $t_{n+1} = t_n + T$, T 为电路开关周期; dT 为模式 1 持续时间; hT 为模式 2 持续时间; $\bar{h}T$ 为模式 3 持续时间, E 为输入电压, 系数矩阵分别为

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_1 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -1/C_1 \\ 0 & -1/C_2 R & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1/L_2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{A}_2 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1/C_1 & 0 \\ 0 & -1/C_2 R & 1/C_2 & 1/C_2 \\ -1/L_1 & -1/L_1 & 0 & 0 \\ 0 & -1/L_2 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{A}_3 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1/C_1 & 0 \\ 0 & -1/C_2 R & 0 & 0 \\ -1/(L_1 + L_2) & 0 & 0 & 0 \\ 1/(L_1 + L_2) & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{B}_1 &= \mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1/L_1 \\ 0 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{B}_3 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1/(L_1 + L_2) \\ -1/(L_1 + L_2) \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

2.2 离散映射模型

在一个开关周期内, 由状态方程可得到以 x_n 和 d 为变量的离散时间迭代方程, d 代表第 n 个开关周期的占空比.

$$\mathbf{x}_{n+1} = f(\mathbf{x}_n, d) = \Phi_t(d) \mathbf{x}_n + \Psi_t(d) E, \quad (2)$$

其中

$$\begin{aligned} \Phi_t(d) &= \Phi_3(\bar{h}T) \Phi_2(hT) \Phi_1(dT), \\ \Psi_t(d) &= \Phi_3(\bar{h}T) \Phi_2(hT) \\ &\quad \times \int_{t_n}^{t_n+dT} \Phi_1(t_n - \tau) \mathbf{B}_1 d\tau + \Phi_3(\bar{h}T) \\ &\quad \times \int_{t_n+dT}^{t_n+(d+h)T} \Phi_2(t_n + dT - \tau) \mathbf{B}_2 d\tau \\ &\quad + \int_{t_n+(d+h)T}^{t_{n+1}} \Phi_3(t_n + (d+h)T - \tau) \mathbf{B}_3 d\tau \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \Phi_3(\bar{h}T)\Phi_2(hT)M_1(dT)B_1 + M_2(hT)B_2E \\
 &\quad + \Phi_3(\bar{h}T)M_2(hT)B_2 + M_3(\bar{h}T)B_3, \quad = 0, \quad (5)
 \end{aligned}$$

$$\Phi_k(\xi) = e^{A_k\xi} = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n!} A_k^n \xi^n, \quad k = 1, 2, 3,$$

$$M_k(\xi) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n!} A_k^{n-1} \xi^n, \quad k = 1, 2, 3, \quad \bar{h} = 1 - d - h.$$

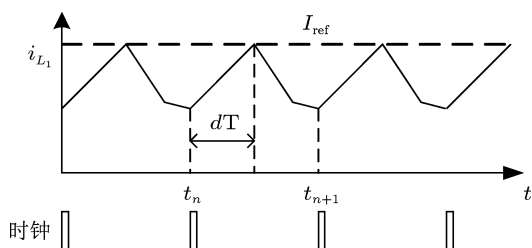
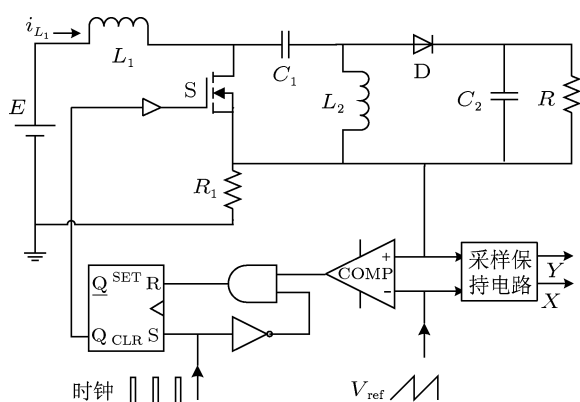


图3 控制信号原理图


 图4 以 i_{L1} 为控制变量的仿真电路图

由图3所示控制信号原理图可知 SEPIC 变换器的开关切换条件可表述为

$$\delta_d(x, t) = i_{L1}(t) - I_{\text{ref}} = 0, \quad (3)$$

其中, $i_{L1}(t) = i_{L1,t_n} + \frac{E}{L_1}dT$, 式中 i_{L1,t_n} 代表电感电流 i_{L1} 在 t_n 时刻的值. 当 $\delta_d < 0$ 时, 开关 S 导通; 当 $\delta_d > 0$ 时, S 断开. 第 n 个开关周期占空比 d 的表达式为

$$d = \frac{I_{\text{ref}} - (i_{L1})_{t_n}}{(E/L_1)T}. \quad (4)$$

由电路中电感电流之间关系, 在模式 2 结束时,

$$\begin{aligned}
 \delta_h(x, t) &= i_{L1}(t) + i_{L2}(t) \\
 &= \alpha^T [\Phi_2(hT)\Phi_1(dT)x_n \\
 &\quad + \Phi_2(hT)M_1(dT)B_1E
 \end{aligned}$$

其中, $\alpha^T = [0, 0, 1, 1]$.

根据 (5) 式, 可以确定出 $h(x_n, d)$. 但 $h(x_n, d)$ 的解析形式很难得到, 可以通过迭代数值计算出 h 的大小. 当 $\delta_h > 0$ 时, 系统处于模式 2, 当 $\delta_h = 0$ 时, 系统处于模式 3.

根据 (2) 式, (4) 式和 (5) 式, 即可确定出 SEPIC 变换器离散时间迭代映射模型.

2.3 不动点稳定性

在离散迭代映射模型的基础上, 进一步采用 Jacobian 矩阵分析系统不动点的稳定性. 设不动点为 $x_n = x(nT) = x[(n+1)T] = x_Q$, 则不动点处的 Jacobian 矩阵为

$$\begin{aligned}
 J(x_Q) &= \frac{\partial f}{\partial x_n} - \frac{\partial f}{\partial d} \left(\frac{\partial \delta_d}{\partial d} \right)^{-1} \frac{\partial \delta_d}{\partial x_n} \\
 &\quad - \frac{\partial f}{\partial h} \left(\frac{\partial \delta_h}{\partial h} \right)^{-1} \frac{\partial \delta_h}{\partial x_n} \Big|_{x_n=x_Q}, \quad (6)
 \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial f}{\partial x_n} &= \Phi_3(\bar{h}T)\Phi_2(hT)\Phi_1(dT), \\
 \frac{\partial f}{\partial d} &= \Phi_3(\bar{h}T)\Phi_2(hT)A_1T\Phi_1(dT)x_n \\
 &\quad - A_3T\Phi_3(\bar{h}T)\Phi_2(hT)\Phi_1(dT)x_n \\
 &\quad + \Phi_3(\bar{h}T)\Phi_2(hT)\Phi_1(dT)TB_1E \\
 &\quad - A_3T\Phi_3(\bar{h}T)\Phi_2(hT)M_1(dT)B_1E \\
 &\quad - A_3T\Phi_3(\bar{h}T)M_2(hT)B_2E \\
 &\quad - T\Phi_3(\bar{h}T)B_3E, \\
 \frac{\partial \delta_d}{\partial d} &= \frac{ET}{L_1}; \quad \frac{\partial \delta_d}{\partial x_n} = [0, 0, 1, 0] = \beta^T, \\
 \frac{\partial f}{\partial h} &= \Phi_3(\bar{h}T) [A_2T - A_3T] \Phi_2(hT)\Phi_1(dT)x_n \\
 &\quad + \Phi_3(\bar{h}T) [A_2T - A_3T] \Phi_2(hT)M_1(dT)B_1E \\
 &\quad + T\Phi_3(\bar{h}T)\Phi_2(hT)B_2E \\
 &\quad - A_3T\Phi_3(\bar{h}T)M_2(hT)B_2E \\
 &\quad - T\Phi_3(\bar{h}T)B_3E, \\
 \frac{\partial \delta_h}{\partial h} &= \alpha^T T [A_2\Phi_2(hT)\Phi_1(dT)x_n \\
 &\quad + A_2\Phi_2(hT)M_1(dT)B_1E + \Phi_2(hT)B_2E], \\
 \frac{\partial \delta_h}{\partial x_n} &= \alpha^T \Phi_2(hT)\Phi_1(dT) \\
 &\quad - \frac{\alpha^T T \Phi_2(hT)\Phi_1(dT) (A_1x_n + B_1E)}{ET/L_1} \beta^T.
 \end{aligned}$$

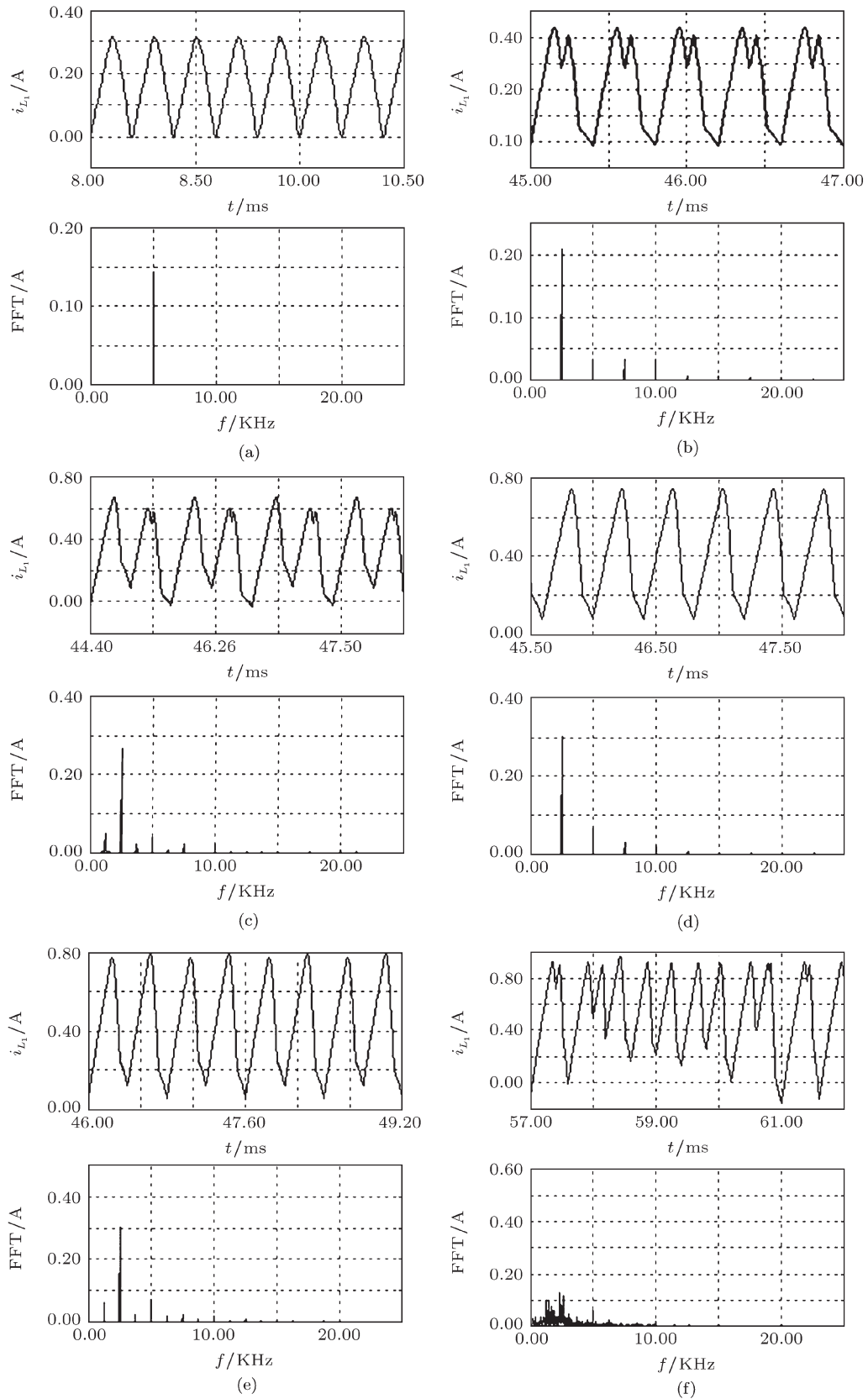


图5 i_{L1} 时域波形和 i_{L1} 功率谱图 (a) 周期 ($V_{\text{ref}} = 0.3 \text{ V}$); (b) 2 倍周期 ($V_{\text{ref}} = 0.4 \text{ V}$); (c) 4 倍周期 ($V_{\text{ref}} = 0.58 \text{ V}$); (d) 2 倍周期 ($V_{\text{ref}} = 0.66 \text{ V}$); (e) 4 倍周期 ($V_{\text{ref}} = 0.75 \text{ V}$); (f) 混沌 ($V_{\text{ref}} = 0.95 \text{ V}$)

Jacobian 矩阵的特征方程为

$$\det(\lambda \mathbf{I} - \mathbf{J}(x_Q)) = 0. \quad (7)$$

根据 (6) 式和 (7) 式, 可以得到对应系统的特征值. 当所有特征值位于单位圆内时, 系统稳定; 若有某个特征值穿越单位圆, 则系统发生分岔. $\lambda_i = -1$ 时, 系统发生倍周期分岔; $\lambda_i = 1$ 时, 系统发生鞍结分岔; 当 $\lambda_i = e^{\pm j\theta}$ ($\theta \in (0, \pi)$) 时, 系统发生 Hopf 分岔.

3 SEPIC 变换器电路仿真分析

在图 1 所示电路框图基础上, 图 4 仿真与实验

电路在设计时内部电流回路增加一个 1Ω 的感应电阻 R_1 , 则流过 L_1 的电流信号同步转化为 R_1 两端的电压信号, 在实验中可通过测量 R_1 两端电压信号来分析 L_1 的电流信号. 根据电路需要以及 RS 触发器自身特点在电路中增加一个反相器和与门电路. 同时, 实验中为后期分岔图的绘制, 主电路外需添加采样保持电路.

电路参数如下: $E = 5 \text{ V}$, $L_1 = 1.52 \text{ mH}$, $L_2 = 1.52 \text{ mH}$, $C_1 = 4.4 \mu\text{F}$, $C_2 = 4.4 \mu\text{F}$, $R = 24 \Omega$, $R_1 = 1 \Omega$. 时钟脉冲频率及占空比为 $f = 5 \text{ kHz}$, $d = 10\%$, 参考电压为锯齿波 $V_{\text{ref}} = 0-1 \text{ V}$, $T = 10 \text{ s}$.

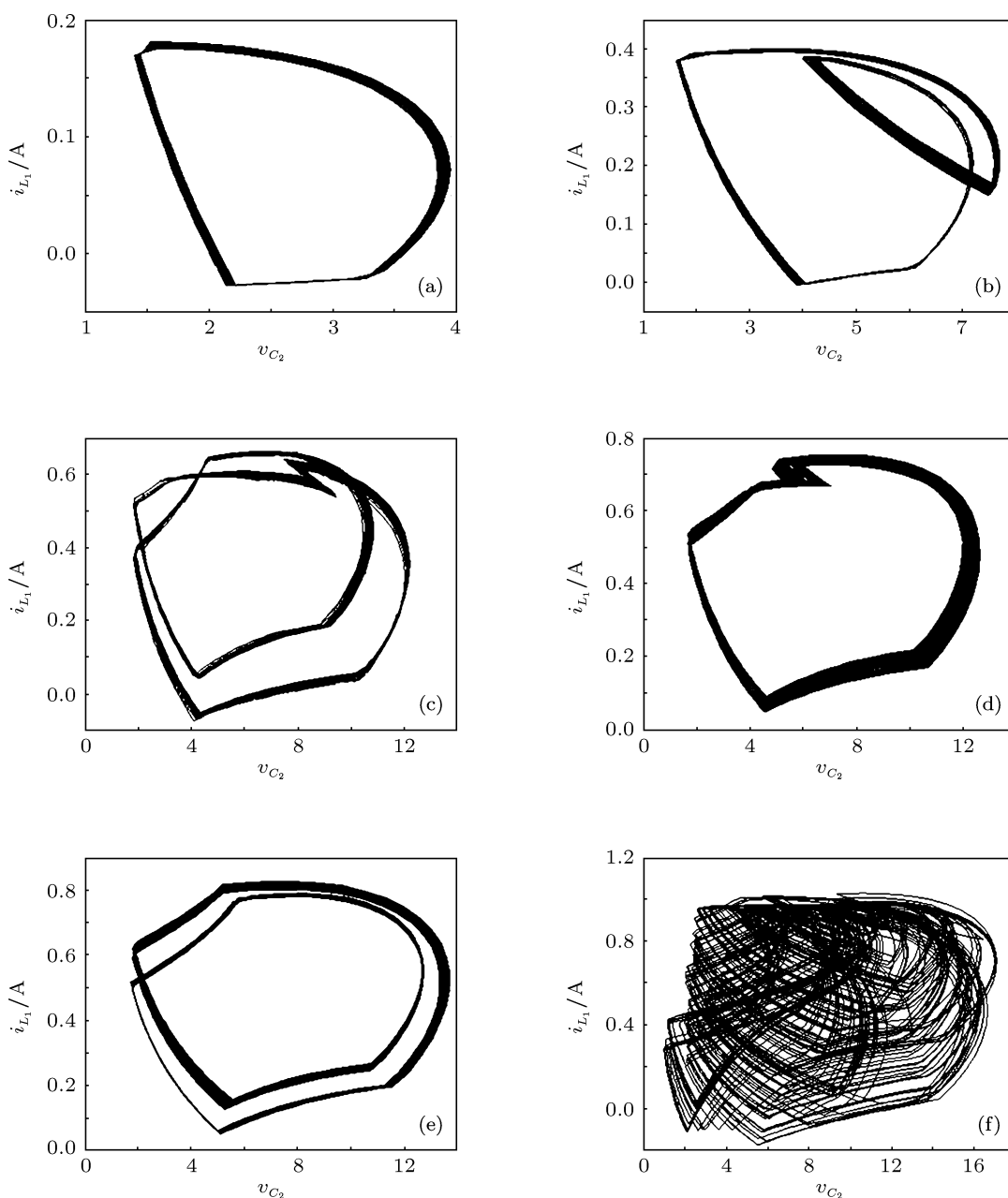


图 6 $v_{C_2} - i_{L_1}$ 相轨图 (a) 周期 ($V_{\text{ref}} = 0.3 \text{ V}$); (b) 2 倍周期 ($V_{\text{ref}} = 0.4 \text{ V}$); (c) 4 倍周期 ($V_{\text{ref}} = 0.58 \text{ V}$); (d) 2 倍周期 ($V_{\text{ref}} = 0.66 \text{ V}$); (e) 4 倍周期 ($V_{\text{ref}} = 0.75 \text{ V}$); (f) 混沌 ($V_{\text{ref}} = 0.95 \text{ V}$)

图 5 为 PSIM 仿真的电感电流 i_{L1} 的时域波形图及其频谱, 图 6 为 $v_{C2} - i_{L1}$ 组成的相轨图. 由图 5 和图 6 可以看出, 随着参考电压 V_{ref} 的缓慢变化, 电路系统在运行中经历了多次周期状态的变化, 最后进入到混沌状态. 电感电流 i_{L1} 呈现出了由周期、2 倍周期、4 倍周期再 2 倍周期、4 倍周期直到混沌的状态. 图 7 为电感电流 i_{L1} 随参考电压 V_{ref} 变化的分岔图. 由图 7 可以看出, 当 V_{ref} 在 0.35 V 附近时电感电流 i_{L1} 发生第一次倍周期分岔, 在 V_{ref} 约为 0.55 V 时电感电流再次发生倍周期分岔进入 4 倍周期, 随后随着参考电压的增加电感电流 i_{L1} 的运行状态从 4 倍周期再次进入 2 倍周期, 在 V_{ref} 约为 0.74 V 时又一次发生倍周期分岔, 最后发生突变进入到混沌状态.

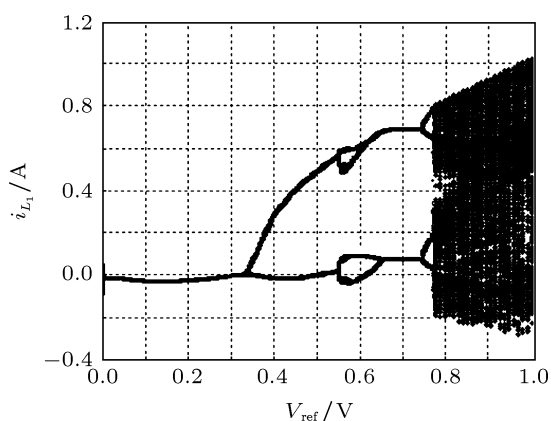


图 7 电感电流 i_{L1} 分岔图

在上述电路参数下, 根据离散映射模型 (2) 式、(4) 式和 (5) 式, 计算出不同参考电压 V_{ref} 作用下的不动点, 并进一步根据 (6) 式和 (7) 式, 计算出这些不动点处的 Jacobian 矩阵的特征值, 如表 1 所示. 由表 1 可见, 电路在 $V_{ref} = 0.36$ V 附近有一个负实数特征值穿越了单位圆, 这说明系统发生了倍周期分岔. 这一结论与电路 PSIM 仿真得到的分岔图相一致.

表 1 周期 1 不动点失稳前后 λ 及系统状态

参考电压 V_{ref}/V	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	系统状态
0.3	-0.5150	-0.1149	$\pm 0.5064i$	0	周期 1
0.32	-0.5559	-0.1263	$\pm 0.4855i$	0	周期 1
0.34	-0.5997	-0.1366	$\pm 0.4645i$	0	周期 1
0.35	-0.6228	-0.1413	$\pm 0.4539i$	0	周期 1
0.36	-1.1945	-0.4638	-0.1517	0	倍周期分岔

4 电路实验研究

实验电路原理图如图 4 所示, 实验电路中功率二极管和功率开关管分别选用 HER207 和 MOSFET (IRF840), 比较器为 LM311, LF398 作为外围采样保持器. 实验中, 电感电流 i_{L1} 通过 1Ω 感电阻转化为大小相等电压值, 通过采样保持器对其进行采样, 分岔参数是通过外围采样电路对参考电压 V_{ref} 进行周期性采样来控制. 两采样电路的采样频率分别设为 5 kHz 与 10 Hz, 其中电感电流 i_{L1} 采

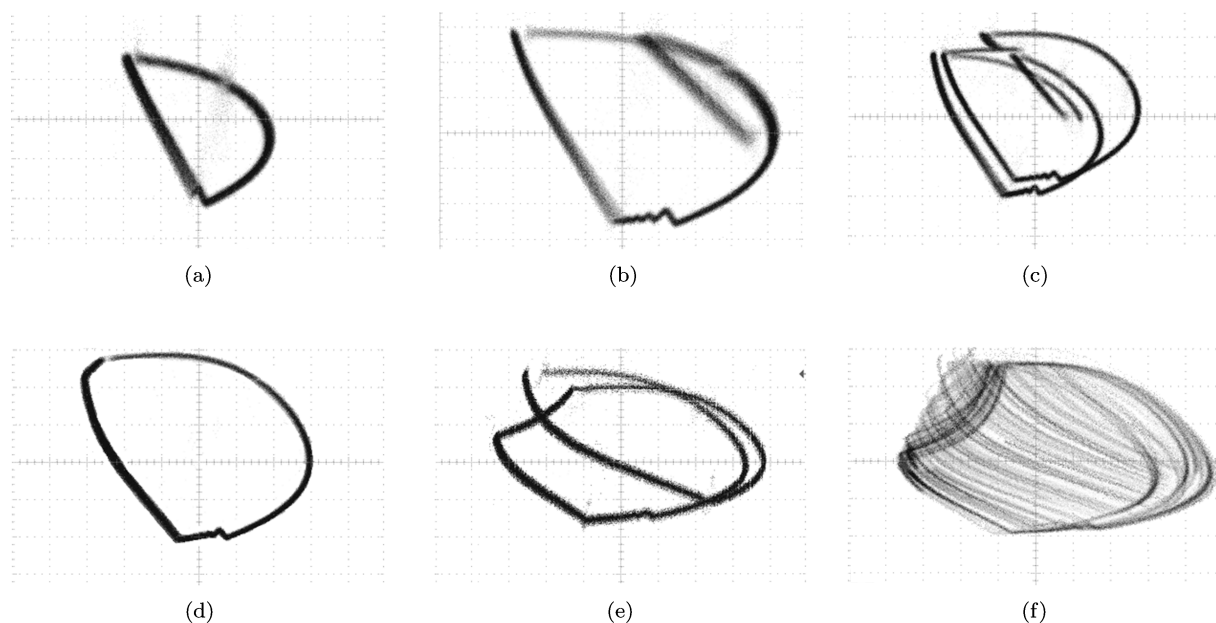


图 8 实验 $v_{C2} - i_{L1}$ 相轨图 (a) 周期 1; (b) 周期 2; (c) 周期 4; (d) 周期 2; (e) 周期 4; (f) 混沌

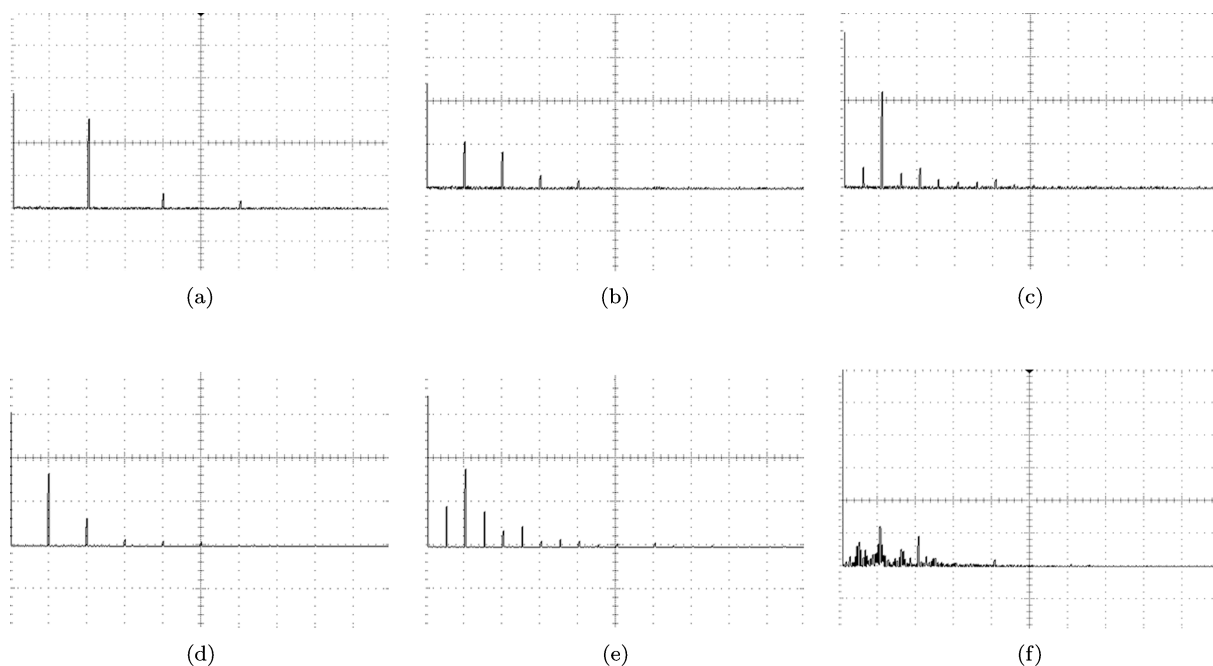


图9 实验电感电流 i_{L1} 功率谱图 (a) 周期 1; (b) 周期 2; (c) 周期 4; (d) 周期 2; (e) 周期 4; (f) 混沌

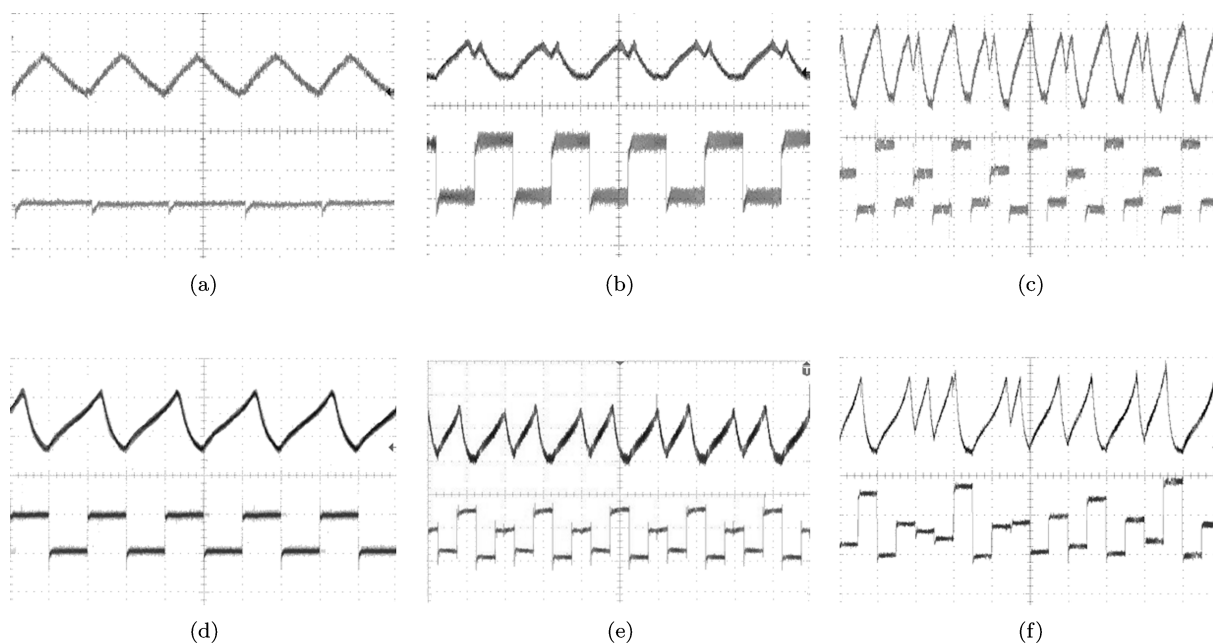


图 10 实验 i_{L1} 时域波形及 i_{L1} 采样输出波形 (a) 周期 1; (b) 周期 2; (c) 周期 4; (d) 周期 2; (e) 周期 4; (f) 混沌

样频率同电路开关频率一致, 保证了对参考电压采样 1 次的同时, 对电感电流进行 500 次采样, 即在每一个分岔参数范围内能够得到 500 个电感电流采样点.

通过示波器观察电感电流 i_{L1} 与电容电压 v_{C2}

组成的相图如图 8 所示, 从实验结果可以看到相图在形态上的演化同仿真结果相一致. 电感电流 i_{L1} 功率谱如图 9 所示. 当系统运行于 n 倍周期状态时 ($n = 1, 2, 4, T = 200 \mu\text{s}$), 其电感电流信号功率谱等间距分布, 在 $1/nT$ 频率处出现谱线尖峰, 如

图 9(a)—(e) 所示. 系统进入到混沌状态时, 电流信号功率谱出现平谱背景和宽峰, 如图 9(f) 所示.

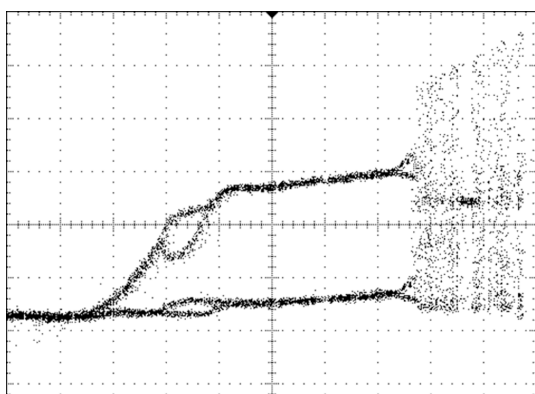


图 11 电感电流 i_{L1} 实验分岔图

电感电流 i_{L1} 时域波形以及采样输出波形如图 10. 由电感电流的采样输出波形可以看出, 当电路系统运行在 1 倍、2 倍、4 倍周期时, 采样电路对电感电流分别进行了 1 次、2 次和 4 次采样, 如图 10(a)—(e) 所示. 从图 10(b), (d) 和 (c), (e) 两组波形可以看出, 具有相同周期的 i_{L1} 时域波形, 其采样点的分布与形状均发生了改变. 同时, 周期信号采样输出波形的形状和分布具有极强的规律性, 当系

统进入到混沌状态时, 采样输出波形的分布杂乱无章, 无规律可循, 如图 10(f) 所示.

将两采样输出信号输入示波器, 观察随电压参数变化电感电流 i_{L1} 的分岔图. 调整示波器图像存储周期同分岔参数周期相同, 保证分岔图像的完整性, 得到图 11 所示分岔图. 实验结果和仿真结果相一致, 证实了以前电感电流为控制对象的 SEPIC 变换器中这种倍周期分岔现象的存在.

5 结论

本文以 SEPIC 变换器中前置电感电流为控制对象, 对此电流模式控制下 SEPIC 变换器中的分岔与混沌现象进行研究. 建立了电路系统的离散映射模型, 并对不动点的稳定性进行了分析. 利用 PSIM 仿真绘制了电路系统的分岔图和功率谱图, 发现电路系统的运行状态经历了一种特殊的倍周期分岔过程, 电路状态经历了 1 倍周期、2 倍周期、4 倍周期再到 2 倍周期、4 倍周期, 最终进入混沌. 这一分岔过程与以往发现的倍周期分岔过程是不同的, 在其他的变换器中未见有报道. 电路的实验结果和仿真结果相一致, 证实了 SEPIC 变换器断续电流模式下存在这种特殊的倍周期分岔现象.

- [1] Aroudi El A, Debbat M, Giral R 2005 *International Journal of Bifurcation and Chaos* **15** 1549
- [2] Tse C K 2004 *Complex Behavior of Switching Power Converters* (Boca Raton: CRC Press LLC) p57
- [3] Zhao Y B, Luo X X, Fang J Q, Wang B H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5022 (in Chinese) [赵益波, 罗晓曙, 方锦清, 汪秉宏 2005 物理学报 **54** 5022]
- [4] 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]
- [5] Zhou Y F, Chen J N, Ke D M 2005 *Acta Electronica Sinica* **33** 915 (in Chinese) [周宇飞, 陈军宁, 柯导明 2005 电子学报 **33** 915]
- [6] Liu W Z, Zhang H, Ma X K 2005 *Proceedings of the CSEE* **25** 43 (in Chinese) [刘伟增, 张浩, 马西奎 2005 中国电机工程学报 **25** 43]
- [7] Wang F Q, Zhang H, Ma X K 2012 *Chin. Phys. B* **21** 020505
- [8] Bao B C, Xu J P, Liu Z 2009 *Chin. Phys. B* **18** 4742
- [9] Dai D, Tse C K, Ma X K 2006 *Chin. Phys.* **15** 2535
- [10] Shen X, Wang H C, Xu J 2010 *Electric Machines And Control* **14** 41 (in Chinese) [沈霞, 王洪诚, 许瑾 2010 电机与控制学报 **14** 41]
- [11] Zhang Y, Gong C Y 2003 *Power Supply Technologies And Application* **6** 605 (in Chinese) [张洋, 龚春英 2003 电源技术应用 **6** 605]
- [12] Liu F, Zhang H, Ma X K 2007 *Transactions of China Electrotechnical Society* **22** 86 (in Chinese) [刘芳, 张浩, 马西奎 2007 电工技术学报 **22** 86]
- [13] Debbat M, Aroudi El A, Giral R, Martinez-Salamero L 2002 *IEEE International Conference on Industrial Technology* Bangkok, Thailand, December 11–14, 2002 p1055
- [14] Liu F, Zhang H 2008 *Transactions of China Electrotechnical Society* **23** 54 (in Chinese) [刘芳, 张浩 2008 电工技术学报 **23** 54]
- [15] Liu F 2007 *Journal of Xian Jiaotong University* **41** 1465 (in Chinese) [刘芳 2007 西安交通大学学报 **41** 1465]
- [16] Liu F 2010 *Chin. Phys. B* **19** 080511
- [17] Liu F 2008 *Chin. Phys. B* **17** 2394
- [18] Wang S B, Zhou Y F, Chen J N, Jiang X D 2008 *Proceedings of the CSEE* **28** 26 (in Chinese) [王诗兵, 周宇飞, 陈军宁, 姜学东 2008 中国电机工程学报 **28** 26]
- [19] Jiang X D, Zhou Y F, Chen J N, Wang S B 2008 *3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications Singapore*, June 3–5, 2008 p833

Study on period doubling bifurcation in current-mode SEPIC converter*

Li Guan-Lin[†] Li Chun-Yang Chen Xi-You Mu Xian-Min

(*Department of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China*)

(Received 28 December 2011; revised manuscript received 12 February 2012)

Abstract

Choosing the current of the front inductor as control object, the discrete time model of single-ended primary-inductor converter (SEPIC) converter working in the discontinuous conduction mode (DCM) is established in this paper, and the stability of the fixed point is analyzed. By studying the phase portrait, power spectrum and bifurcation diagram of the circuitry, a special period-doubling bifurcation phenomenon is found in this circuitry. The circuit experiences period, double period, quadruple period and then double period, quadruple period, finally enters into chaotic condition. The experimental results accord with the simulation results, which confirms that the special period-doubling bifurcation exists in the SEPIC converter working in the DCM.

Keywords: SEPIC converter, discontinuous conduction mode, period-doubling bifurcation, chaos

PACS: 05.45.-a

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50877007), and the Fundamental Research Funds for the Central University (Grant No. DUT10LK12).

[†] E-mail: lgllhit@dlut.edu.cn