

单相三电平 H 桥逆变器分岔现象的研究*

刘洪臣[†] 王云 苏振霞

(哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 哈尔滨 150001)

(2013 年 8 月 19 日收到; 2013 年 9 月 12 日收到修改稿)

三电平逆变器相较于传统的两电平逆变器具有输出电压谐波畸变率小、开关管电压应力小等优点, 因而在大功率场合受到了越来越多的关注. 本文针对一种复合式单相三电平逆变器, 对其中的分岔和混沌现象进行了深入的研究, 建立了电流闭环比例控制下的一阶离散模型, 得到了不同时间段内的频闪映射模型. 以比例系数 k , 负载电阻 R , 负载电感 L 及输入电压 E 为变化参数, 研究了三电平逆变器的分岔现象: 通过分岔图和李雅普诺夫指数谱分析了慢变尺度下比例系数、负载电感、负载电阻和输入电压对系统动态性能的影响; 通过折叠图直观地观测到了快变尺度下不同比例系数、负载电感所导致的分岔过程. 最后搭建了 Matlab/Simulink 仿真模型, 得到了电流闭环比例控制时电流 i 的时域波形, 仿真结果与理论分析相一致. 研究表明, 正确选择单相三电平逆变器的电路参数对于其稳定运行具有重要意义.

关键词: 三电平逆变器, 频闪映射, 分岔, 混沌

PACS: 05.45.-a, 05.45.Pq, 05.45.Ac

DOI: 10.7498/aps.62.240506

1 引言

电力电子电路是一个强非线性时变系统, 存在着丰富的非线性现象, 如次谐波振荡、周期跳跃、拟周期运动、分岔和混沌等现象. 研究表明, 非线性行为具有不确定性, 会导致系统运行状态无法预测, 甚至造成系统在临界状态下突然崩溃. 因此, 在各行各业对电力电子系统与设备的功能、可靠性要求日益提高的今天, 深入研究电力电子电路的非线性现象对于深入理解非线性的运行机制, 并利用新的非线性控制策略指导解决实际的工程问题具有重要意义.

20 世纪 80 年代末, Hamill 和 Deane^[1] 提出了 DC/DC 变换器中的分岔和混沌现象. 近 30 年来, 随着混沌动力学理论的发展与完善, 特别是近十余年来, 混沌控制理论和方法的提出为 DC/DC 变换器这一复杂系统的分析与控制开创了新的途径. 国内外研究者相继在不同类型 DC/DC 变换器中发

现了倍周期分岔、边界碰撞分岔、Hopf 分岔等各种途径导致的混沌现象, 并建立了一套行之有效的研究方法, 如利用数值迭代方法建立 DC/DC 变换器的离散映射模型和雅可比矩阵判断系统的稳定性^[2-9].

以上非线性研究都是以 DC/DC 变换器为主体研究对象, 其他类型的变换器较少涉及. Robert 等首次在文献 [10—12] 中建立了工作在 DC/DC 状态下的一阶 H 桥电路的离散模型, 分析了其稳定性, 为将非线性研究对象从 DC/DC 变换器转向 DC/AC 变换器奠定了基础. 国内的学者对工作于 DC/AC 状态的 H 桥逆变器进行了更加深入的研究^[13-20]. 文献 [13] 分析了二阶 H 桥逆变电路在比例积分闭环控制下的快尺度和慢尺度稳定性; 文献 [14] 应用频闪映射图、分岔图和折叠图的方法分析了一阶 H 桥式正弦逆变电路在比例单闭环控制下的非线性行为, 提出了慢变稳定性定理, 分析了快变和慢变稳定性的关系; 文献 [15] 研究了电压型逆变器的分岔和低频振荡现象; 文献 [19] 分析了基于周期性

* 国家自然科学基金 (批准号: 51107016)、国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2013CB035605) 和黑龙江省博士后科研启动金 (批准号: LHB-Q12086) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: fenmiaoh@hit.edu.cn

扩频技术的单相 H 桥逆变器中的非线性现象.

目前,在电力电子电路新型拓扑结构研究领域,多电平变换器由于可以减小输出电压的谐波畸变率、减小输出滤波器的尺寸以及降低开关管的电压应力,在高压大功率领域受到越来越多的关注.2005年,王兴华和阮新波^[20]提出了一种复合式单相全桥中点箝位三电平逆变器,它由一个三电平桥臂和一个两电平桥臂组合而成,相较于传统的两个桥臂都采用三电平结构而言,控制简单、易于实现,适用于中小功率场合的单相逆变器.本文对该拓扑结构的单相逆变器进行了非线性分析,建立了基于电流比例控制的单相三电平逆变器的离散模型,运用折叠图、分岔图和李雅普诺夫指数谱描述了三电平逆变器的分岔现象和混沌行为.通过本文的分析,可以得到单相三电平逆变器的稳定运行范围,对于其稳定运行具有一定的指导意义,并为研究其他类型的 DC/AC 变换器的非线性行为打下了基础.

2 单相三电平逆变器的离散模型

2.1 单相三电平逆变器电流闭环工作原理

图 1 是复合式单相全桥三电平逆变器的电流闭环工作原理.将参考电流 i_{ref} 与负载电流 i 比较后进行比例控制得到调制信号 u_r ,当控制器为比例控制器时,调制信号 u_r 计算方法如下:

$$u_r = \begin{cases} k \times (i_{refn} - i_n) & (i_{refn} \geq 0) \\ k \times (i_n - i_{refn}) & (i_{refn} < 0) \end{cases},$$

式中, k 为比例系数, i_{refn} 为正弦参考电流在每个采样时刻的值.由于开关占空比具有饱和特性,此处需对调制信号 u_r 进行限幅:

$$u_r = \begin{cases} 0 & (u_r \leq 0) \\ u_r & (0 < u_r < 1) \\ 1 & (u_r \geq 1) \end{cases}.$$

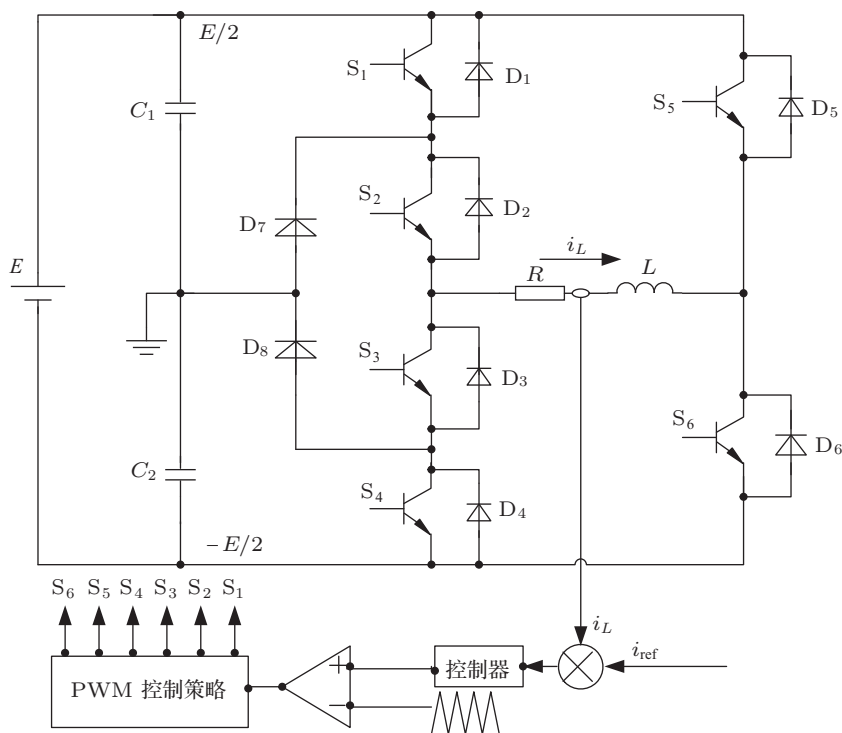


图 1 单相三电平逆变器的工作原理

将调制信号 u_r 与载波比较进行脉冲宽度调制 (PWM) 控制,得到 6 个开关管的驱动信号.单相三电平逆变器的 PWM 控制策略如图 2 所示.将调制波 u_r 与两个频率、幅值相等的三角载波 u_{tri1} 和 u_{tri2} 进行比较,得到两个脉冲信号 A_1, B_1 ,同时用

基准波直接与零电压比较得到脉冲信号 C_1 ,然后用这三个脉冲信号 A_1, B_1, C_1 经过一系列逻辑门来得到各个开关管的开关情况.各个开关管的开关逻辑: $S_1 = A_1 \& C_1 + \bar{B}_1 \& \bar{C}_1$; $S_2 = \bar{S}_4$; $S_3 = \bar{S}_1$; $S_4 = A_1 \& \bar{C}_1 + \bar{B}_1 \& C_1$; $S_5 = \bar{C}_1$; $S_6 = C_1$.

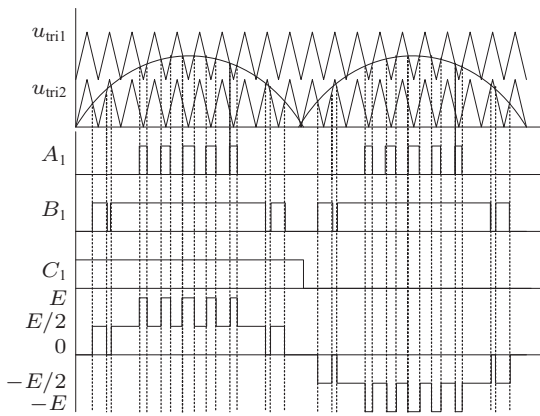


图2 单相三电平逆变器 PWM 控制原理

2.2 单相三电平逆变器离散建模

设单相三电平逆变器的母线电压为 E , 两个桥臂间的输出电压为 v_{AB} . 当 v_{AB} 输出为 $\pm E, \pm E/2, \pm 0$ 时分别定义为 1, 1/2, 0 电平, 同时定义电感电流由 A 点流向 B 点为电感电流的正方向. 根据开关管的导通状况可将其分为 6 种开关模态, 再根据电感电流方向不同分为 12 种工作状态.

以模态 1 为例, 当 S_1, S_2 和 S_6 导通时为开关模态 1, 此时 $u_{AB} = +E$, u_{AB} 输出电平为 1. 当 $i_L > 0$ 时, i_L 流经 S_1, S_2, R, L 和 S_6 , 由电源向负载提供能量; 当 $i_L < 0$ 时, i_L 流经 D_6, R, L, D_2 和 D_1 续流. 其他模态类似.

该电路拓扑中只有电感电流 i 一个状态变量, 因此 6 个开关模态可以用 6 个一阶微分方程表示. 6 种开关模态及对应的状态方程如表 1 所示.

表 1 单相三电平 H 桥逆变器的开关模态

开关模态	导通开关	输出电平 u_{AB}	状态方程
模态 1	S_1, S_2, S_6	$+E$	$\frac{di}{dt} = -\frac{R}{L}i + \frac{E}{L}$
模态 2	S_2, S_3, S_6	$+\frac{E}{2}$	$\frac{di}{dt} = -\frac{R}{L}i + \frac{E}{2L}$
模态 3	S_3, S_4, S_6	$+0$	$\frac{di}{dt} = -\frac{R}{L}i + 0$
模态 4	S_3, S_4, S_5	$-E$	$\frac{di}{dt} = -\frac{R}{L}i - \frac{E}{L}$
模态 5	S_2, S_3, S_5	$-\frac{E}{2}$	$\frac{di}{dt} = -\frac{R}{L}i - \frac{E}{2L}$
模态 6	S_1, S_2, S_5	-0	$\frac{di}{dt} = -\frac{R}{L}i - 0$

当 $i_{ref} > 0$ 时, 输出电平 $u_{AB} \geq 0$, 由表 1 可以看出开关 S_6 一直处于导通状态; 反之 $i_{ref} < 0$ 时, 开关 S_5 一直处于导通状态.

采用频闪映射建模的方法, 将状态变量 i 在 $n+1$ 时刻的采样值 i_{n+1} 用 n 时刻的采样值 i_n 来表示. 在不同的时间段内频闪映射模型不同, 可以分为如图 3 所示的四段.

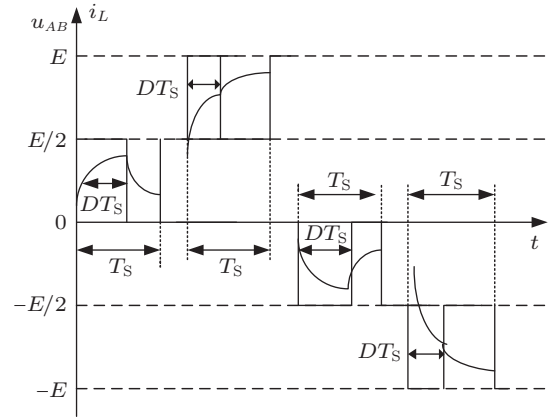


图3 负载电流波形和输出电压波形

当 $i_{refn} > 0, u_r < 0.5$ 时, 输出电压 u_{AB} 为 $+E/2$ 和 0, 以载波周期作为频闪采样周期, 由模态 2 和 3 的状态方程得到电感电流的频闪采样模型为

$$i_{n+1} = \left(i_n - \frac{a}{2}\right)e^{-\frac{T_s}{b}} + \frac{a}{2}e^{(D_n-1)\frac{T_s}{b}},$$

式中, $a = E/R, b = L/R, D_n$ 为第 n 个开关周期的占空比, $D_n = 2u_r, T_s = 1/f_s$ 为三角载波的周期.

当 $i_{refn} > 0, 0.5 < u_r < 1$ 时, 输出电压 u_{AB} 为 $+E$ 和 $+E/2$, 由模态 1 和 2 的状态方程得到电感电流的频闪采样模型为

$$i_{n+1} = (i_n - a)e^{-\frac{T_s}{b}} + \frac{a}{2}e^{(D_n-1)\frac{T_s}{b}} + \frac{a}{2},$$

其中, $D_n = 2(u_r - 0.5)$.

当 $i_{refn} < 0, u_r < 0.5$ 时, 输出电压 u_{AB} 为 $-E/2$ 和 0, 由模态 5 和 6 的状态方程得到电感电流的频闪采样模型为

$$i_{n+1} = \left(i_n + \frac{a}{2}\right)e^{-\frac{T_s}{b}} - \frac{a}{2}e^{(D_n-1)\frac{T_s}{b}},$$

其中, $D_n = 2u_r$.

当 $i_{refn} < 0, 0.5 < u_r < 1$ 时, 输出电压 u_{AB} 为 $-E/2$ 和 0, 由模态 4 和 5 的状态方程得到电感电流的频闪采样模型为

$$i_{n+1} = (i_n + a)e^{-\frac{T_s}{b}} - \frac{a}{2}e^{(D_n-1)\frac{T_s}{b}} - \frac{a}{2},$$

其中, $D_n = 2(u_r - 0.5)$.

3 系统稳定性分析

对于 DC/AC 逆变电路的非线性现象可以采用快变和慢变两种尺度来分析其稳定性. 快变稳定性分析是以开关频率为观察点观察逆变器输出的分岔和混沌现象, 而慢变稳定性分析是指以调制波为周期研究其稳定性. 本文采用分岔图、折叠图和李雅普诺夫指数谱等方法, 以比例系数 k , 负载电阻 R , 负载电感 L 及输入电压 E 来分析单相三电平 H 桥逆变器中不同参数对系统性能的影响, 其中分岔图和李雅普诺夫指数谱属于慢变方法, 折叠图属于快变方法. 最后用 Matlab/Simulink 搭建时域模型, 以比例系数为例, 得到不同 k 值时电流的时域波形.

3.1 分岔图与系统的稳定性

分岔图是研究变换器非线性现象的重要方法, 其构造方法是基于离散时间映射而产生的庞加莱截面, 以庞加莱截面的某个状态变量作为分岔图的一维坐标, 另一维坐标则对应分岔参数的变化. 通过分岔图可以清楚地观测到系统随分岔参数的变化而发生的动态特性的改变.

选取电路参数如下: $E = 400$ V, $R = 20$ Ω , $L = 20$ mH, $i_{\text{ref}} = 5 \sin(100\pi t)$ A, $f_s = 5$ kHz, 通过连续采样 20 个周期的同一固定位置 (这里选取 $\pi/2$ 处), 给出以比例系数 k 为分岔参数的分岔图, 如图 4 所示. 从图 4 中可以看出, 在比例系数从 0 到 1 变化时, 系统从稳定的运行状态逐渐向混沌状态转变. 当 $k < 0.53$ 时, 所有的采样结果重合到一点, 因此系统处于稳定的周期 1 状态; 当 $0.53 < k < 0.54$ 时, 每次的采样结果变成了两个点, 说明系统出现了倍周期分岔; 而当 $k > 0.54$ 时, 采样结果在一定区域内密集分布, 并具有自相似结构, 表明系统激变进入混沌状态.

为了准确说明分岔出现的位置, 进一步分析其李雅普诺夫指数谱. 根据李雅普诺夫指数的定义, k 的范围从 0.1 到 1, 取步长为 0.0002, 在每个 k 值下连续采样 100 个正弦周期, 得到固定点处的李雅普诺夫指数谱, 如图 5 所示. 由图 5 可以看出, 当 $k < 0.53$ 时, $S < 0$, 系统处于稳定周期 1 状态; 当 $k = 0.53$ 时, $S = 0$, 表明系统出现了分岔, 与图 4 中

的第一个分岔点对应; 接着 S 减小, 并且一直小于零, 直到 $k = 0.56$ 时 $S = 0$, 表明系统出现了第二个分岔点; 此后随着 k 的增大, 李雅普诺夫指数一直大于零, 系统进入混沌状态.

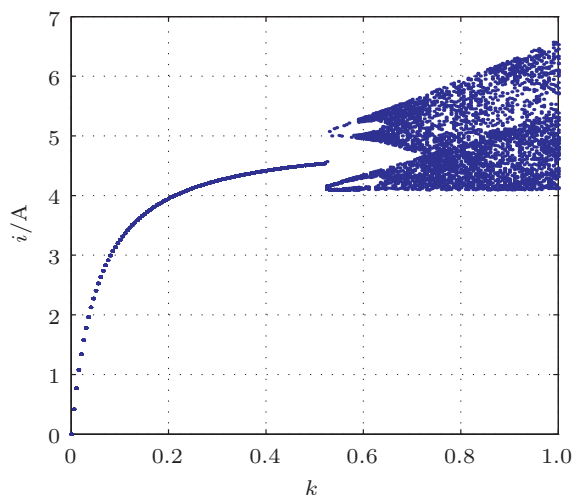


图 4 电流 i 随比例系数 k 变化的分岔图

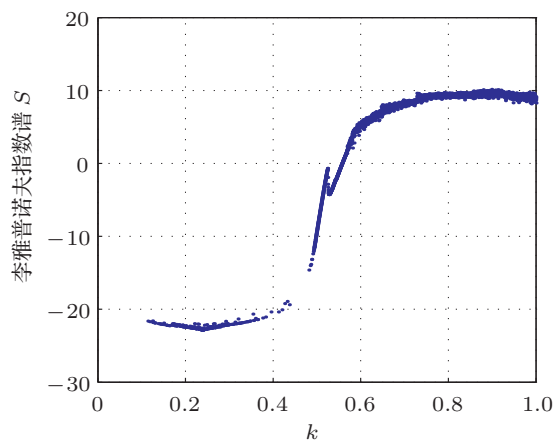


图 5 电流 i 随比例系数 k 变化的李雅普诺夫指数谱

一般情况下, 当电流控制的逆变器电路参数固定后, 能够引起逆变器工作状态发生变化的参数除了比例系数 k 外, 还有负载电阻 R , 负载电感 L 和输入电压 E 等参数. 现有文献对于逆变器非线性行为的研究主要集中在比例系数 k , 而其他参数对于系统性能的影响则鲜有涉及. 下面以负载电阻 R , 负载电感 L 和输入电压 E 作为分岔参数, 研究单相三电平逆变器在上述外部参数发生变化时的非线性行为.

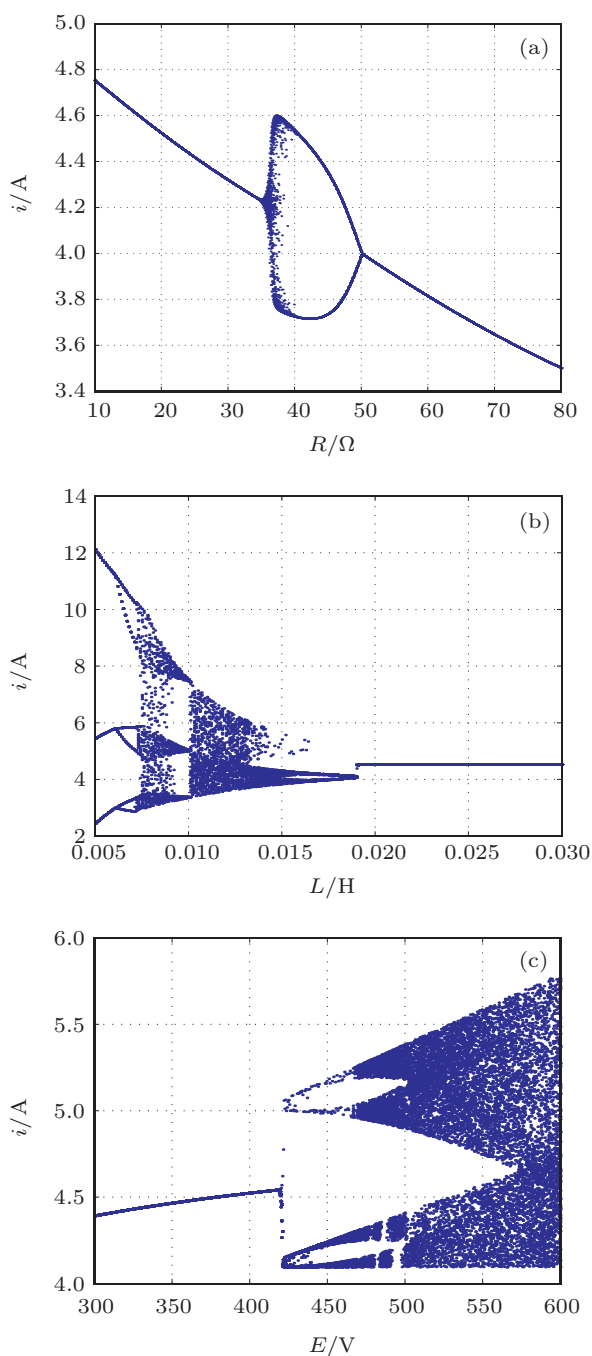


图6 电流 i 随不同外部参数变化的分岔图 (a) 负载电阻 R ; (b) 负载电感 L ; (c) 输入电压 E

固定 $E = 400 \text{ V}$ 和比例系数 $k = 0.5$, 选取 $i_{\text{ref}} = 5 \sin(100\pi t) \text{ A}$, $f_s = 5 \text{ kHz}$, 分别以负载电阻 R 和电感 L 作为分岔参数, 令负载电阻 R 从 10Ω 到 80Ω 变化, 电感负载 L 从 5 mH 到 30 mH 变化, 分别得到电感电流随两者变化的分岔图如图 6(a) 和 (b) 所示. 从图 6(a) 中容易看出, 当负载电阻 R 增大时, 系统在 $R = 36 \Omega$ 左右时由稳定的周期 1 状态直接进入混沌态; 当 R 进一步增大时, 系统又重新退回到周期 2, 并进入稳定状态. 由图 6(b) 可知, 系统

随着负载电感 L 的变化将会表现出复杂的非线性动力学行为, 随着电感 L 的减小, 系统从周期 1 状态经倍周期分岔为周期 2, 再到周期 4 进而激变为混沌状态. 但是这种混沌状态并没有一直保持, 而是突然退化为周期 6 状态, 再进入明显的周期 3 窗口. 研究表明, 这种现象为切分岔, 切分岔之前的混沌称为阵发混沌.

固定比例系数 $k = 0.5$, 选取电路参数 $R = 20 \Omega$, $L = 20 \text{ mH}$, $i_{\text{ref}} = 5 \sin(100\pi t) \text{ A}$, $f_s = 5 \text{ kHz}$, 令输入电压 E 从 300 V 变化到 600 V , 步长为 0.5 V , 得到电感电流 i 随输入电压 E 变化的分岔图, 仿真结果如图 6(c) 所示. 从图中容易看出, 随着输入电压的增大, 系统经历稳定的周期 1 状态到出现周期 2 分岔, 并在 423 V 左右进入混沌状态.

由以上分析可知, 输入电压 E , 负载电阻 R 和负载电感 L 等外部参数对于系统的性能都会产生影响, 因此在实际设计时要合理地选择电路参数, 防止不规则现象的发生.

3.2 折叠图与系统稳定性

折叠图可以直观地判断系统何时出现分岔和混沌现象, 它避免了雅可比矩阵依赖于平衡点的缺点. 其绘制步骤如下: 选取任一初值代入离散映射模型开始迭代, 略去前面的过渡过程, 将稳定后的 20 个正弦周期按采样时刻对齐后折叠, 以此步骤得折叠图. 本文以不同比例系数 k 和负载电阻 R 为例, 绘制出电流波形的折叠图, 如图 7 和图 8 所示.

由图 7(a) 可知, 当 $k = 0.25$ 时, 20 个正弦波的每一个采样点都完全重合, 因此形成一条光滑的正弦曲线, 此时系统处于稳定的周期 1 状态. 图 7(b) 是 $k = 0.53$ 时的折叠图, 采样点形成两条正弦波曲线, 系统出现分岔, 处于周期 2 状态. 由图 7(c) 不难看出, 当 $k = 0.8$ 时, 波形则变成了采样点的密集填充, 说明 $k = 0.8$ 时, 系统处于混沌状态, 并且系数越大系统越不稳定. 折叠图非常直观地表现了单相三电平逆变器在不同比例系数 k 下的动力学演变过程.

从图 8 中则可以清楚看到, $R = 30 \Omega$ 和 $R = 55 \Omega$ 时, 折叠图呈一条光滑的正弦曲线形态, 而 $R = 48 \Omega$ 时, 采样点则形成了两条正弦曲线, 说明此时系统处于周期 2 状态, 与上节中的分岔图能够很好地符合.

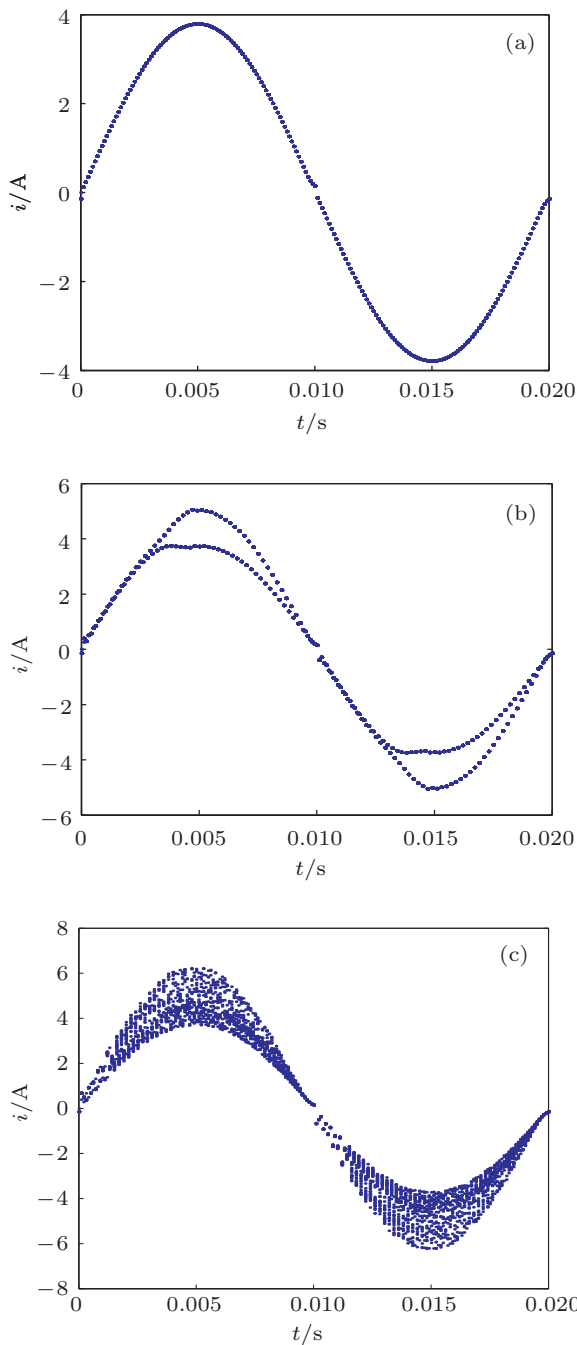


图7 不同比例系数 k 下电流 i 的折叠图 (a) $k = 0.25$; (b) $k = 0.53$; (c) $k = 0.8$

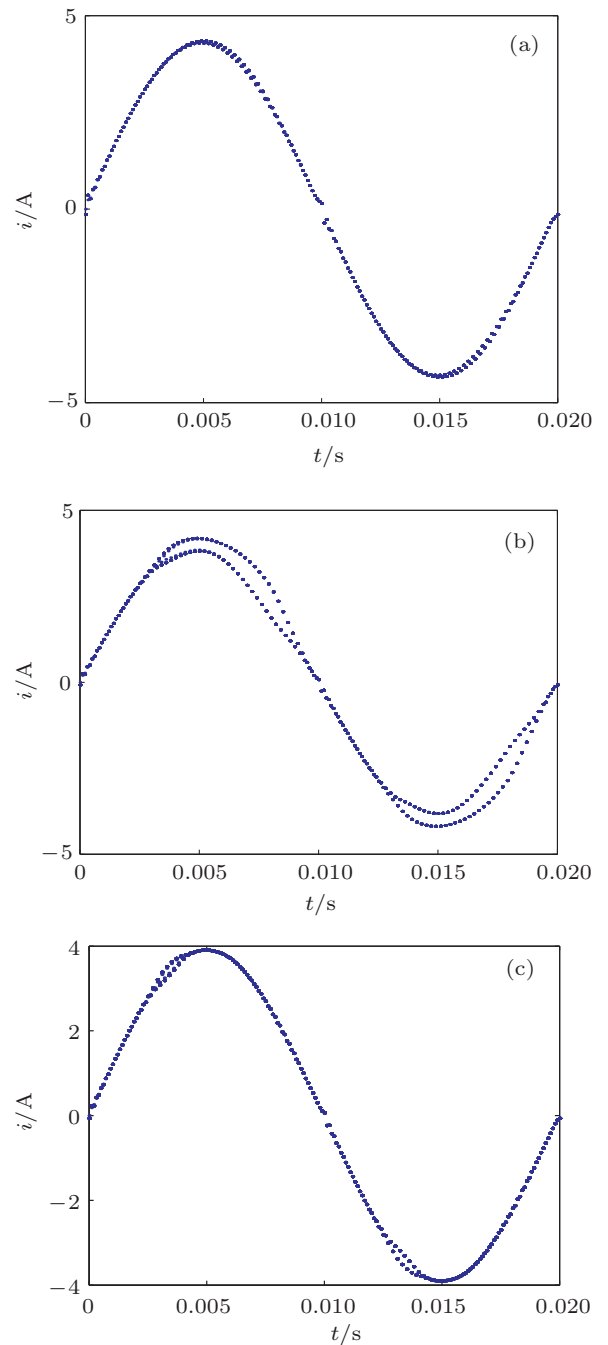


图8 负载电阻 R 不同时电流 i 的折叠图 (a) $R = 30 \Omega$; (b) $R = 48 \Omega$; (c) $R = 55 \Omega$

3.3 时域波形验证

参照图 1 所示的单相三电平逆变器的原理图, 对电路采用电流单闭环控制, 在 Matlab 软件的 Simulink 平台中搭建符合实际电路运行条件的仿真模块. 仿真模块所选取的电路参数与此前研究比例系数 k 变化时负载电流的分岔图部分所选取的参数一致, 调整比例增益的大小, 即可得到不同 k

值时电感电流 i 随时间变化的时域波形图, 输出结果如图 9 所示, 图 9 的右上方为虚线部分的放大.

由图 9 中不难看出, 随着比例增益 k 的增大, 电感电流 i 的振荡范围不断增大, 输出纹波不断增加, 逆变器出现了从稳定到不稳定的过程. 图 9(a) 是 $k = 0.25$ 时的时域波形, 逆变器的工作周期等于时钟周期, 逆变器处于稳定工作状态; 图 9(b) 是 $k = 0.53$ 时的时域波形图, 系统的工作周期变

为时钟周期的两倍,出现了倍周期分岔;图 9(c) 是 $k = 0.8$ 时的时域波形图,工作周期显得杂乱无章,

系统处于不稳定的混沌状态. 这与前面得出的结论相一致,证明了离散映射模型的正确性.

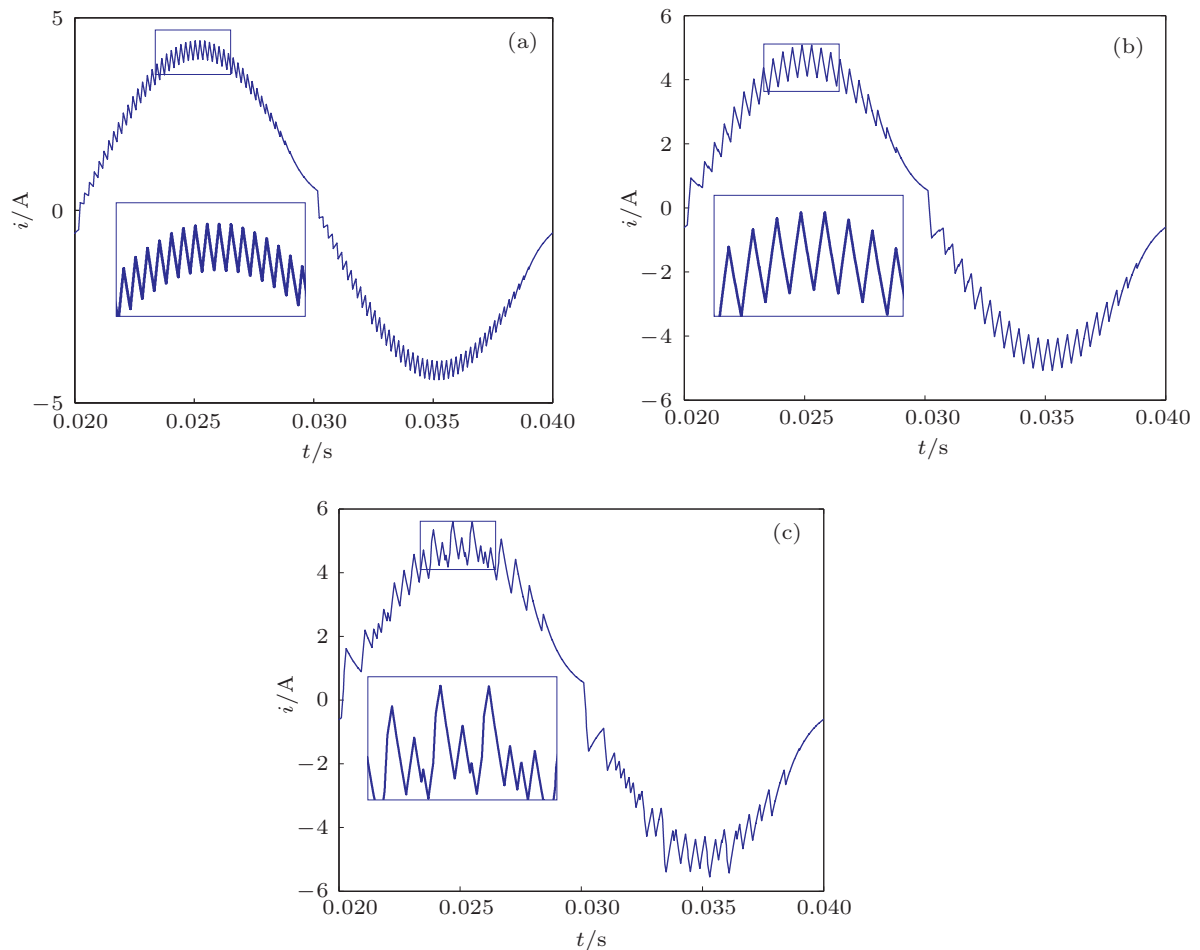


图 9 不同比例系数 k 下电流 i 的时域图与局部放大图 (a) $k = 0.25$; (b) $k = 0.53$; (c) $k = 0.8$

4 结论

单相三电平逆变器相较于传统的两电平逆变器具有输出电压谐波畸变率小、开关管电压应力小等优点,但是也存在不可忽视的非线性行为. 本文针对一种复合式单相三电平逆变器,对其动力学行为进行了深入的研究,建立了电流闭环比例控制下的一阶离散模型,得到了不同时间段内的频闪映射模型;通过折叠图、分岔图和李雅普诺夫指数谱分析了不同比例系数 k , 负载电阻 R , 负载电感 L

和输入电压 E 对于系统稳定性的影响,并搭建了 Matlab/Simulink 仿真模型,得到了电流闭环比例控制时电流 i 的时域波形,进而验证了理论分析的正确性. 研究表明,复合式单相三电平逆变器是典型的非线性系统,鲁棒性较弱,其运行状态不仅受比例系数 k 的影响,还受输入电压 E , 负载电阻 R 和电感 L 等外部参数的影响. 因此,在实际应用中应合理选取电路参数,确保系统工作在稳定状态. 本文的研究结果对于正确设计和调试单相三电平桥逆变器具有重要的指导意义和应用价值.

[1] David C H, David J J 1988 *IEEE Trans. Circ. Syst.* **35** 1059
 [2] Deane J H B 1992 *IEEE Trans. Circ. Syst.* **139** 680
 [3] Tse C K, Chan W C Y 1995 *26th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference Atlanta, GA, USA, June 18–22, 1995* p608

[4] Zhou Y F, Qiu S S, Chen J N 2004 *Proceedings of the CSEE* **24** 96 (in Chinese) [周宇飞, 丘水生, 陈军宁 2004 中国电机工程学报 **24** 96]
 [5] Zhang B 2005 *Transactions of China Electrotechnical Society* **20** 1 (in Chinese) [张波 2005 电工技术学报 **20** 1]

- [6] Zhao Y B, Luo X S, 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]
- [7] Li S N, Zhang H, Ma X K, Li M 2006 *J. Xi'an Jiaotong Univ.* **40** 454 (in Chinese) [李胜男, 张浩, 马西奎, 李明 2006 西安交通大学学报 **40** 454]
- [8] Bao B C, Xu J P, Liu Z 2008 *J. Univ. Electron. Sci. Technol. China* **37** 397 (in Chinese) [包伯成, 许建平, 刘中 2008 电子科技大学学报 **37** 397]
- [9] Li G L, Li C Y, Chen X Y, Mou X M 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 170506 (in Chinese) [李冠林, 李春阳, 陈希有, 牟宪民 2012 物理学报 **61** 170506]
- [10] Robert B, Robert C 2002 *Int. J. Contr.* **75** 1356
- [11] Iu H H C, Robert B 2003 *IEEE Trans. Circ. Syst.* **150** 1125
- [12] Robert B, Feki M, Iu H H C 2006 *Int. J. Bifurc. Chaos* **16** 113
- [13] Li M, Dai D, Ma X K 2008 *Circ. Syst. Signal Process.* **27** 811
- [14] Wang X M, Zhang B 2009 *Trans. China Electrotech. Soc.* **24** 101 (in Chinese) [王学梅, 张波 2009 电工技术学报 **4** 101]
- [15] Lei B, Xiao G C, Wu X L, Qi Y R 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 090501 (in Chinese) [雷博, 肖国春, 吴旋律, 齐元瑞 2011 物理学报 **60** 090501]
- [16] Sun Y, Li M Y 2011 *J. Xi'an Univ. Technol.* **27** 92 (in Chinese) [孙媛, 李敏远 2011 西安理工大学学报 **27** 92]
- [17] Hu N H, Zhou Y F, Chen J N 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 130504 (in Chinese) [胡乃红, 周宇飞, 陈军宁 2012 物理学报 **61** 130504]
- [18] Wu J K, Zhou L W, Lu W G 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 210202 (in Chinese) [吴军科, 周维维, 卢伟国 2012 物理学报 **61** 210202]
- [19] Liu H C, Li F, Yang S 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 110504 (in Chinese) [刘洪臣, 李飞, 杨爽 2013 物理学报 **62** 110504]
- [20] Wang X H, Ruan X B 2005 *Proceedings of the CSEE* **25** 73 (in Chinese) [王学华, 阮新波 2005 中国电机工程学报 **25** 73]

Bifurcation phenomena in single-phase three-level inverters*

Liu Hong-Chen[†] Wang Yun Su Zhen-Xia

(School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

(Received 19 August 2013; revised manuscript received 12 September 2013)

Abstract

Compared with traditional two-level inverter, three-level inverter has the advantages of low output voltage harmonic distortion, and small switch voltage stress, so it attracts more and more attention in high power applications. In this paper, the bifurcation and chaos in a single-phase three-level inverter are studied. The one-dimensional discrete iterated mapping model under proportional control is established, and the stroboscopic maps in different periods of time are obtained. The bifurcation phenomena in the single-phase three-level inverter are studied when the proportional coefficient k , load resistance R , load inductance L and input voltage E are used as changing parameters. Effects of all these parameters on the system dynamical performances are analyzed on a slow scale using the bifurcation diagram and Lyapunov index spectrum. The bifurcation processes on a fast scale caused by changing values of proportional coefficient and load resistance are visually observed using folded diagram. Finally, the time-domain waveforms with different proportional coefficients are obtained by Matlab/Simulink, which corresponds with the theoretical analysis. The results show that the correct circuit parameters of single-phase three-level inverter are very important for its stable operation.

Keywords: three-level inverter, stroboscopic mapping, bifurcation, chaos

PACS: 05.45.—a, 05.45.Pq, 05.45.Ac

DOI: 10.7498/aps.62.240506

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51107016), the National Basic Research Program of China (Grant No. 2013CB035605), and the Postdoctoral Scientific Research Staring Foundation of Heilongjiang Province, China (Grant No. LHB-Q12086).

[†] Corresponding author. E-mail: femiao@hit.edu.cn