

基于符号序列描述的一类分段光滑系统中分岔现象与混沌分析

李 明¹⁾ 马西奎¹⁾ 戴 栋²⁾ 张 浩¹⁾

¹⁾ (西安交通大学电气工程学院, 西安 710049)

²⁾ (香港理工大学电子及资讯工程学系, 香港)

(2004 年 5 月 31 日收到, 2004 年 7 月 19 日收到修改稿)

从拓扑序列出发, 提出了描述 DC/DC 变换器一类分段光滑系统中的分岔现象和混沌行为的符号序列方法. 根据最大子序列的性态判别分岔的类型, 以及检测边界碰撞分岔的发生. 例如, 当发生倍周期分岔时, 最大子序列保持不变; 当发生边界碰撞分岔时, 最大子序列发生变化, 混沌态则没有最大子序列. 研究表明, 占空比是表征 DC/DC 变换器一类分段光滑系统动力学行为的一个最本质的量, “饱和非线性”是引起边界碰撞分岔产生的根本原因.

关键词: 符号序列, 分岔, 混沌, 分段光滑系统

PACC: 0545

1. 引 言

分段光滑系统是一类很容易产生各种分岔现象和混沌的非线性系统. 在自然科学和工程领域中, 存在大量的分段光滑系统^[1], 研究其中的分岔与混沌不仅有重要的理论意义, 还具有很大的应用价值.

电力电子系统由于开关和二极管的引入, 成为典型的分段光滑系统. 随着时间的演化, 这类系统会经历拓扑结构的不断变化, 呈现出一系列复杂动力学行为, 如分岔与混沌^[2,3]. 分岔是通向混沌运动的前兆, 因此分岔的研究尤为重要. 当发生“标准型”分岔时, 系统的稳定性会改变^[4], 一般采用中心流形定理和规范型方法等进行分析. 当系统的一个或多个参数发生变化时, 其结构发生变化(在 DC/DC 变换器中, 这种“结构”的变化即电路拓扑序列的改变)会引起边界碰撞分岔现象的发生.

对于 DC/DC 变换器一类分段光滑系统而言, 常采用某种采样方式将其转化为一种分段光滑的离散时间映射^[5,6], 例如同步映射、异步映射和频闪映射. 以往的研究集中在对系统状态变量(如电感电流或输出电压)上, 通过绘制分岔图、时序图、相图和功率谱图, 计算系统 Lyapunov 指数, 以及观察发生分岔时的映射雅可比矩阵的特征值变化等方法分析系统

的非线性特性^[1,5-10]. 然而, 对于其中的边界碰撞分岔现象的分析, 目前还没有一般的方法. Tse 等人在研究电压型 buck 变换器系统中的边界碰撞分岔时, 认为“饱和非线性”(saturating nonlinearity)是引起边界碰撞分岔的根本原因^[3]. 本文以占空比为研究对象, 采用一种符号序列的方法来揭示系统的分岔和混沌行为与电路的拓扑序列之间的关系, 以及符号序列与“饱和非线性”之间的内在联系.

2. DC/DC 变换器中的分岔类型和通向混沌的道路

由于电路拓扑结构的转换和反馈控制策略的作用, 使得 DC/DC 变换器一类分段光滑系统呈现出准周期、倍周期分岔、边界碰撞分岔、间歇性分岔和混沌等丰富的非线性动力学行为. 一般而言, DC/DC 变换器中有两种类型的分岔^[3]:

(1) 标准型分岔, 以系统稳定性的改变为特征, 如倍周期分岔、鞍结分岔和 Hopf 分岔;

(2) 边界碰撞分岔, 以系统拓扑结构序列的改变为特征.

标准型分岔也称之为“光滑型”分岔, 一般由光滑动力系统所产生. 当发生分岔时, 系统不发生拓扑序列的改变. 边界碰撞分岔也称之为“非光滑型”分岔, 因为描述系统动力学行为的函数在分岔点处是