

一种描述电力电子电路状态转换的新方法

余义传¹, 王东明², 郑万朗³(1. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 苏州美恩超导有限公司, 江苏 苏州 215000;
3. 河南永城市供电有限责任公司, 河南 永城 476600)

摘要: 在开发采用集成芯片控制的电力电子系统时, 电力电子电路研究人员与嵌入式软件编制人员之间缺乏简单有效的沟通方法。通过对电力电子电路特点的分析, 得到相对于控制器出口“可见”部分电路状态集的组成形式。定义了扩展有限状态机 EFSM (Extended Finite State Machine) 模型, 提出基于 EFSM 的电力电子电路状态转化的描述方法。以带饱和电感的移相式软 PWM 逆变电路为实例, 用 EFSM 模型进行了描述。实例模型体现了电路状态之间转换的连续直观和系统的完整性。此方法简洁有效。

关键词: 电力电子电路; 状态转换; EFSM; 描述方法

A new method for describing the state switching of power electronic circuits

YU Yi-chuan¹, WANG Dong-ming², ZHENG Wan-lang³(1.XJ Electric Co., Ltd, Xuchang 461000, China; 2. Suzhou American Superconductor Co., Ltd, Suzhou 215000, China;
3.Yongcheng Power Supply Co.,Ltd,Yongcheng 476600,China)

Abstract: In the development of power electronic systems controlled by integrated chip, there isn't a simple and effective communication method between power electronic circuits researchers and embedded software designers. Through the analysis of the characteristics of power electronic circuits, this paper draws the constitution form of the circuit states set, which is visible with respect of the issue of the controller. The EFSM (Extended Finite State Machine) model is defined, and a method for describing the state switching of power electronic circuits based on EFSM is proposed. Taking a phase shifting soft PWM inverting circuit with saturation inductance as an example, this paper uses EFSM model to describe it. The example reflects the continuity and straightforwardness of the circuit states switching, and the integrity of the system. This method is simple and effective.

Key words: power electronic circuits; state switching; EFSM; description method

中图分类号: TM13 文献标识码: B 文章编号: 1674-3415(2008)14-0077-03

0 引言

随着电力电子系统的复杂化, 越来越多的系统采用集成芯片进行控制^[1]。在此情况下, 集成芯片的嵌入式编程人员需要熟悉电力电子电路的原理。用于描述电力电子电路状态转换原理的表示方法通常是电力电子专业人员所用的, 对编程人员比较陌生。目前描述电力电子电路状态转换的表示方法有多种^[2]: 1) 电量波形图表示方法; 2) 各时区等效电路图表示方法; 3) 空间矢量图表示方法; 4) 开关函数表示方法; 5) 开关表表示方法^[3]。

寻找一种既适合电力电子电路研究人员又适合嵌入式编程人员的简洁描述方法凸现需求, 如图1所示。本文不考虑饱和电感本身的开关特性、二极管的非线性及电感电流连续和电感电流断续等情况, 这样嵌入式软件编制人员无需透彻理解控制

原理和弥补电力电子电路研究人员所从事的工作, 有利于大型项目的分工合作, 大大减轻嵌入式软件编制人员的额外负担。

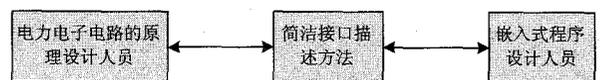


图1 接口描述方法需求图

Fig.1 Demand chart of interface description method

本文提出一种基于扩展有限状态机 (EFSM) 的描述方法。根据电力电子电路的特点定义提出 EFSM 模型, 以带饱和电感的移相式软 PWM 逆变电路^[2]为例, 进行了 EFSM 模型描述。

1 电力电子电路的特点

电力电子电路主要由开关器件 (全控型器件、半控型器件、不可控型器件)、磁性元件 (电感、变

压器、互感器)、电容和电源组成,如图2所示。控制器输出接口的“可见”部分只有全控型器件的开通、关断和半控型器件的开通触发信号。

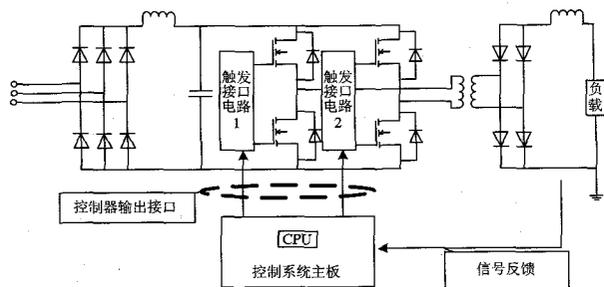


图2 典型 AC-DC-AC-DC 电路拓扑

Fig.2 Topology of typical AC-DC-AC-DC circuit

开关器件的控制开通、关断的时间由控制算法和电路信号决定。每个可控器件的开通或关断都对应系统的一个状态。相对于控制器来说,我们只考虑电路的可控状态(即控制器发出的起作用的触发信号导致的状态)。电路的可控器件数和电路的可控状态数的关系为:

$$N_s = 2^n \times m \quad (1)$$

其中: N_s 表示电力电子电路的可控状态数, n 表示电路包含全控型器件数目, m 表示电路包含半控型器件数目。如果电路不包含半控型器件,则 m 取1。

但是这些状态并非都是有效状态^[4],每一个状态转换都是由某一事件触发,并对应一些电路属性的变化。另外,控制器有一个系统时钟作为设定开通、关断时间点的基准。

2 EFSM 模型定义

扩展有限状态机(EFSM)是有限状态机(FSM)的一个扩展。对于它的定义形式有多种,总体来说是在FSM的基础上增加了变量、操作以及状态迁移的前置条件^[5-7]等。本文根据电力电子电路状态转换的特点对EFSM定义如下:

定义1 一个扩展有限状态机(EFSM)是一个七元组 $EFSM = \langle S, s_0, \Sigma, X, x_0, T, F \rangle$, 其中, S 是一个非空的状态集合, $s_0 \in S$ 是初始状态,也表示复位和重置功能。 Σ 是事件,表示所有事件。 X 表示变量集合, $x_0 \in X$ 是所有变量的初始值。 T 表示转移动作集合。 F 表示接受状态集。

通过指定定义1中列出的7部分,EFSM可以用有向图 $G(V, E)$ 表示,其中 V 表示非空顶点集合(表示 S), E 表示非空边集合(表示 Σ),如图3所示。

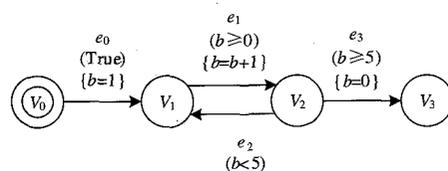


图3 EFSM 模型的有向图举例

Fig.3 Example of directed graph of EFSM model

在图3中, $V = \{v_0, v_1, v_2, v_3\}$, $E = \{e_0, e_1, e_2, e_3\}$, v_0 是初始状态0, v_3 (即F)是接受状态3。 $b, True$ 是变量。事件转移的条件用()里的内容表示,事件执行的动作以{}里的内容表示。当事件的条件满足时,该事件才发生,与事件相关的动作才执行。例如对于事件 e_1 ,只有条件 $b >= 0$ 满足时,事件 e_1 才发生,它的动作 $b = b + 1$ 才执行。同时该EFSM由状态1跳转到状态2。一个路径是连续边序列的非空集合,起点和终点重合的路径是循环(可以while/for语句结构表述)。电力电子电路的控制轨迹(电路状态转换过程)可以用某一路径表示。

3 应用实例

下面以带饱和电感的移相式软PWM逆变电路为例,利用EFSM模型对电路的状态转换过程进行描述。该电路的主电路结构如图4所示(详细原理介绍见参考文献[2])。

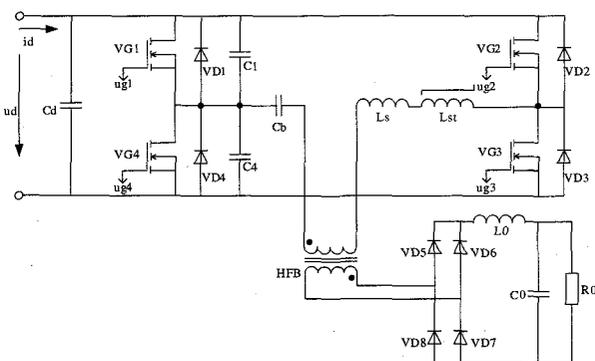


图4 主电路结构

Fig.4 Constitution of main circuit

该电路包含4个全控型器件(IGBT),由式(1)知电路的可控状态数为16个,但由参考文献[2]可知有效状态数为4个。事件是EFSM的一个重要组成部分,要根据电力电子电路的控制规律来进行设计(同见参考文献[2]),它们分别如下。

1) 状态说明

v_0 VG1、VG3 导通且 VG2、VG4 关断状态,此状态为初始状态;

- v_1 VG3 导通且 VG1、VG2、VG4 关断状态;
 v_2 VG1、VG2、VG3、VG4 全关断状态;
 v_3 VG2、VG4 导通且 VG1、VG3 关断状态;
 v_4 VG2 导通且 VG1、VG3、VG4 关断状态。

2) 事件说明

- e_0 VG1、VG3 导通事件;
 e_1 VG1 关断事件;
 e_2 VG3 关断事件;
 e_3 VG2、VG4 导通事件;
 e_4 VG4 关断事件;
 e_5 VG2 关断事件。

3) 变量说明:

x_i VGi ($i=1, 2, 3, 4$) 的触发信号 (0 表示低电平, 1 表示高电平。这里假设 1 时开通, 0 时关断);

t 表示计时时间到。它代表了控制器的系统时钟。

4) 相关参数说明

- t_0 表示 e_0 引发的 0 状态的持续时间;
 t_1 表示 e_1 引发的 1 状态的持续时间;
 t_2 表示 e_2 引发的 2 状态的持续时间;
 t_3 表示 e_3 引发的 3 状态的持续时间;
 t_4 表示 e_4 引发的 4 状态的持续时间;
 t_5 表示 e_5 引发的 2 状态的持续时间。
 $t_0 \sim t_5$ 可以根据实际情况, 由控制器进行实时修改。

5) EFSM 模型

带饱和电感的移相式软 PWM 逆变电路的状态转换的 EFSM 模型如图 5 所示。

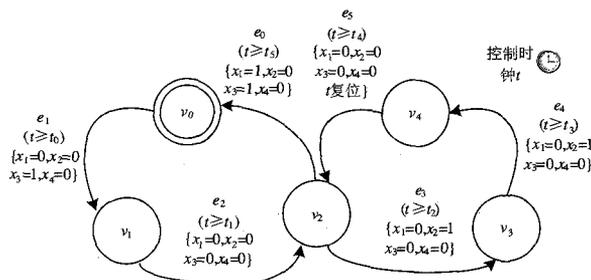


图 5 状态转换的 EFSM 模型

Fig.5 EFSM model of state switching

当到达事件 e_5 引发的状态 v_2 时, 控制时钟 t 复位, 代表一个循环周期结束。

由图 5 可知用 EFSM 模型描述电力电子电路的状态转换过程具有方法简练、电路状态之间的转换连续直观、系统整体性明显等优点。

4 结论

通过分析电力电子电路的特点, 定义了扩展有限状态机 (EFSM) 模型, 提出基于 EFSM 的电路状态转换描述方法。该方法不但体现了电路的可控开关状态转换过程, 而且体现了嵌入式软件的控制流程, 解决了电力电子电路研究人员与嵌入式软件编制人员之间缺乏简单有效沟通方法的问题。该方法具有通用性和可扩展性。

参考文献

- [1] 孙铁成, 王高林, 汤平华, 等. 基于数字信号处理器控制的新型全桥移相式零电压零电流开关 PWM DC-DC 变换器[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(18): 46-50.
SUN Tie-cheng, WANG Gao-lin, TANG Ping-hua, et al. Novel Full-bridge Phase-shift ZVZCS PWM DC-DC Converter Based on DSP Control[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(18): 46-50.
- [2] 林渭勋. 现代电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [3] 王久和, 李华德. 一种新的电压型 PWM 整流器直接功率控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(16): 47-52.
WANG Jiu-he, LI Hua-de. A New Direct Power Control Strategy of Three Phase Boost Type PWM Rectifiers[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(16): 47-52.
- [4] 李轶, 彭永进. 基于有限状态机的电力电子电路仿真方法的研究[J]. 计算机仿真, 2005, 22(9): 92-94, 98.
LI Yi, PENG Yong-jin. Study on Modeling Method of Power Electronic Circuits Based on FSM[J]. Computer Simulation, 2005, 22(9): 92-94, 98.
- [5] 陈祯, 桑楠, 雷航. 一种用于类测试的改进型 EFSM 模型[J]. 计算机应用, 2005, 25(8): 1890-1892.
CHEN Yi, SANG Nan, LEI Hang. An Improved EFSM Model for Class Test[J]. Computer Applications, 2005, 25(8): 1890-1892.
- [6] 于秀山, 于洪敏. 软件测试新技术与实践[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [7] Duale A Y, Uyar M U. A Method Enabling Feasible Conformance Test Sequence Generation for EFSM Models[J]. IEEE Trans on Computers, 2004, 53(5): 614-627.

收稿日期: 2007-11-21;

修回日期: 2008-03-21

作者简介:

余义传 (1975-), 男, 工程师, 主要从事高压直流输电控制系统的研究与应用; E-mail: Yuyichuan@xjgc.com

王东明 (1980-), 男, 助理工程师, 主要从事风力发电及电力电子在风力发电中的研究与应用;

郑万朗 (1971-), 男, 本科, 工程师, 从事变电运行、检修研究管理工作。