

doi: 10.7690/bgzdh.2020.06.018

PHEV 复合电源系统双向 DC/DC 变换器建模

段翔兮, 冯世林, 龙 呈, 罗荣森

(国网四川省电力公司电力科学研究院, 成都 610065)

摘要: 针对插电式混合动力汽车 (plug-in hybrid electric vehicle, PHEV) 复合电源系统存在的高频动态特性、计算量大和混杂特性等问题, 提出一种双向 DC/DC 变换器的混杂自动机模型。通过分析 PHEV 复合电源系统的工作原理, 根据拉格朗日力学理论, 建立双向 DC/DC 变换器各工作模式的数学模型, 再基于混杂自动机理论并结合离散化处理得到 PHEV 复合电源双向 DC/DC 变换器混杂自动机模型, 并使用仿真实验对其进行验证。仿真结果表明: 该模型计算量适中、跟踪精度高, 能完整地描述系统的各个工作模式, 兼顾了 CCM 模式和 DCM 模式, 具有实际应用价值。

关键词: 复合电源; 插电式混合动力汽车; 双向 DC/DC 变换器; 混杂自动机理论

中图分类号: TP352 **文献标志码:** A

Modeling for Bidirectional DC/DC Converter of PHEV's Hybrid Power System

Duan Xiangxi, Feng Shilin, Long Cheng, Luo Rongsen

(Electric Power Research Institute, State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610065, China)

Abstract: A hybrid automata model of bi-directional DC/DC converter is proposed to solve the problems of high frequency dynamic, large amount of calculation and hybrid characteristics of plug-in hybrid electric vehicle (PHEV) hybrid power system. The working principle of PHEV's hybrid power system is analyzed, the models of each working mode are established based on Lagrangian mechanics, then, based on the theory of hybrid automata and combining with discretization, a hybrid automata model of bi-directional DC/DC converter is established. Simulation experiments are used to verify it. The simulation results show that the hybrid automata model of bi-directional DC/DC converter has the advantages of moderate calculation, high tracking accuracy, it fully describes the various working modes of the system, and the CCM mode and DCM mode are considered, which is in line with the practical application.

Keywords: hybrid power system; plug-in hybrid electric vehicle; bidirectional DC/DC convertor; hybrid automata theory

0 引言

近年来, 新能源汽车因其在节能和环保方面的优势, 在全球范围内得到了迅速发展^[1-2]。PHEV 采用油电混合的模式, 避免了纯电动汽车在电量耗尽时不能及时充电的困境, 符合当前充电设施建设现状。在政府的大力推广下, 许多城市推行了新能源车不限号的政策^[3]。然而, PHEV 复合电源系统依旧是高性能电动汽车发展的瓶颈, 同时其建模与控制也是研究热点^[4]。

复合电源系统由双向 DC/DC 转换器、动力电池和超级电容组成: 动力电池向 PHEV 提供能量, 其功率需求则由超级电容满足; 超级电容作为新型的储能设备, 具有功率密度高、充电循环寿命长和耐低温的特性; 双向 DC/DC 变换器能在保持变换器两端的直流电压极性不变的情况下, 根据需要调节能量双向传输。三者相互配合以满足 PHEV 能量

和功率的需求^[5-7]。

现有复合电源系统相关研究中, 大部分仅建立了动力电池或超级电容的模型而忽略了实现能量转换的双向 DC/DC 变换器^[7]。文献[8]基于切换系统理论, 研究了电感电流连续导通模式 (inductance current continuous mode, CCM) 下变换器模型的能控性、能观性, 但忽略了变换器的电感电流断续模式 (inductance current discontinuous mode, DCM); 文献[9]建立了 DC/DC 变换器的模型—矩阵系数多项式描述模型, 但不适用于描述双向 DC/DC 变换器的整个工作模式; 文献[10-11]分别按离散演化映射法和精确建模法建立了 Buck 变换器的精确离散模型, 但因计算量过大而难以实际应用; 文献[12]建立了一种改进型的变换器平均离散模型, 但是忽略了高频动态特性且未考虑到混杂特性。综上所述: 在对双向 DC/DC 变换器的建模过程中忽略了混杂特性, 未能兼顾 CCM 和 DCM 模式, 或采用简单的

收稿日期: 2020-02-10; 修回日期: 2020-03-23

基金项目: 国网四川省电力公司科技项目 (521997170022); 四川省青年科技创新研究团队基金 (2017TD0019)

作者简介: 段翔兮 (1991—), 男, 四川人, 硕士, 助理工程师, 从事电力电子系统的建模与控制研究。E-mail: 280960081@qq.com。

平均模型忽略了其高频动态特性，缺乏对系统的全面描述^[13-16]。

针对上述问题，笔者提出一种基于拉格朗日力学和混杂自动机理论的双向 DC/DC 变换器混杂自动机模型，通过仿真实验验证了该模型的正确性，并分析了其性能。

1 PHEV 复合电源系统

如图 1 所示，PHEV 复合电源系统由双向 DC/DC 变换器、动力电池和超级电容组成。

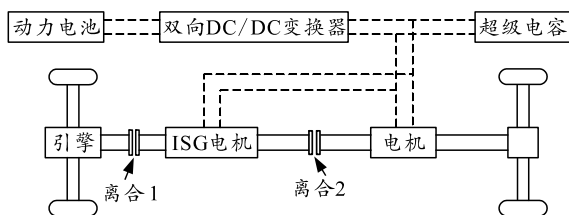


图 1 PHEV 复合电源系统结构

其中，双向 DC/DC 转换器在保持变换器两端的直流电压极性不变的情况下，根据需要调节能量双向传输。在复合电源系统中，双向 DC/DC 变换器搭配不同的能量储存单元，在提高能量储存系统灵活性和效率的同时，也改善了系统的动态性能^[17]。

以图 1 所示的复合电源系统为例，动力电池与双向 DC/DC 变换器先串联，然后再与超级电容一起并联到直流母线。在启动、加速、爬坡功率需求大时，这样的结构有利于超级电容快速输出，在制动时能量能快速回收^[5]。离合器 2 分离时，为纯电驱动模式，此时动力电池和超级电容相互配合完成直驱传动；离合器 2 闭合时，引擎作用于启动/发电一体化电机 (integrated start and generator, ISG)，实现混合驱动，同时 ISG 电机在发电状态向电源系统充电。

以非隔离式的双向 DC/DC 变换器为研究对象，其等效原理如图 2 所示。根据能量存储单元位置的不同，双向 DC/DC 变换器可以工作于 Buck 模式或 Boost 模式，可等效为 Buck 和 Boost 变换器的结合^[17]。当能量储存单元位于高压侧，变换器将其输出电压降低，此时 S1 关断、S2 闭合，双向 DC/DC 变换器工作在 Buck 模式；当能量存储单元位于低压侧，变换器起到将其输出电压升高的作用，此时 S1 闭合、S2 关断，双向 DC/DC 变换器工作在 Boost 模式。在 Buck 模式或 Boost 模式下，双向 DC/DC 变换器的工作具有混杂特性，分为 3 个模态，以开关管的导通和关断及电感电流是否为 0 作为判别条件，分为 CCM 和 DCM。CCM 模式下包含模态 1、

模态 2，即 q_1 、 q_2 ；DCM 模式下包含模态 1、模态 2、模态 3，即 q_1 、 q_2 、 q_3 。双向 DC/DC 变换器的每个模态为连续状态变量，各模态间切换为离散开关变量，同时包含连续状态变量和离散开关变量，相互混杂、相互作用，是典型的混杂系统。

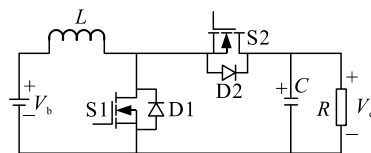


图 2 双向 DC/DC 变换器

复合电源系统的动力电池一般采用锂动力电池，常见的有 Rint 和 Thevenin 等模型。以 Rint 模型为例，其等效原理如图 3 所示，包含直流电源和内阻，其中 U_b 、 R_d 、 i_b 分别为开路电压、内阻及母线电流。

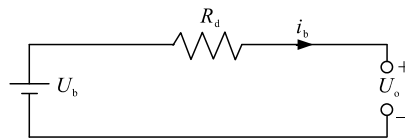


图 3 等效原理

超级电容具有功率密度高的特点。以一种改进的等效电路模型为例， R_1 为超级电容漏电损失的模拟， R_c 为充放电过程中内部能量的热损失和瞬时电压突变的模拟。超级电容等效原理如图 4 所示，其中 U_o 、 R_1 、 i_s 、 i_l 、 i_c 分别表示输出电压、漏内阻、电容电流、漏电阻电流、母线电流。

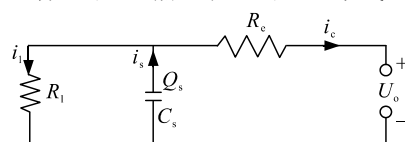


图 4 超级电容

2 拉格朗日力学和混杂自动机理论

2.1 拉格朗日力学

定义一个力学系统。该力学系统的拉格朗日函数 $L: TQ \rightarrow \mathcal{R}$ 。该函数通常被定义为系统的动能 K 减去系统的势能 U ，如下式所示。 Q 为配置空间， TQ 为相空间^[11]。

$$L(q, \dot{q}) = K(\dot{q}) - U(q). \quad (1)$$

该拉格朗日函数的功能被定义为在相应时间 $t \in [0, T]$ 内，对路径 $q(t)$ 的积分，得到下式：

$$S(q) = \int_0^T L(q, \dot{q}) dt. \quad (2)$$

根据定义，拉格朗日动力学可以简单地表示为：对于动力学系统的运动，正确的运动路径有一个固

定值，即沿着正确的路径积分与 1 阶无穷小扰动范围内有相同的值，包括整个运动系统中 2 个固定的时间点 (0 和 T)。该功能为对曲率测量的模拟，并且将路径的曲率极值化。

用一种变分的方法来确定系统运动的路径。将其视为在路径上每一个点处的一个无穷小扰动，路径 q 的变分表示为 δq ，计算对路径 $q(t)$ 引起的变分 δq 的变化如下式：

$$\delta S(q) = \delta \int_0^T L(q(t), \dot{q}(t)) dt = \int_0^T \left[\frac{\partial L}{\partial q} \delta q + \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \delta \dot{q} \right] dt = \int_0^T \left[\frac{\partial L}{\partial q} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) \right] \delta q dt + \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \delta q \right]_0^T \quad (3)$$

在任意时刻的变分 $\delta q(t)$ 中，当始末位形确定 (如 $\delta q(0) = \delta q(T) = 0$)，消掉式(3)中的右边项，拥有固定端点的任意变分 $\delta q(t)$ ，剩下一项在任意时刻一定为 0，则欧拉-拉格朗日方程表示为

$$\frac{\partial L}{\partial q} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) = 0 \quad (4)$$

2.2 混杂自动机理论

混杂自动机模型，实质是存在一个特定的连续时间动态对应每一离散事件的状态。自动机模型是描述离散事件动态的方法。混杂自动机模型是在离散事件状态自动机模型中嵌入连续状态的微分方程，以描述连续时间动态行为^[16]。最终，可由以下的一个六元组来表示：

$$H = (X, Q, F, I, E, G) \quad (5)$$

其中： $X \in R^n$ 为连续状态子空间； $Q = (q_1, q_2, \dots, q_k)$ 为离散状态的有限集合； $F: Q \rightarrow (x \rightarrow R^n)$ 为对应离散状态下内嵌的连续状态微分方程组； $I: Q \rightarrow 2^x$ 为每个离散状态下，连续状态的不变集合； $E \subseteq Q \times Q$ 为离散状态转换集合； $G: E \rightarrow 2^x$ 为当发生离散状态转换时，所定义的边界条件。

在以下 2 种情况下，系统状态会发生改变：当连续状态变量的变化达到边界条件时，将发生离散转移，连续状态变量的变化会脱离不变集合；当系统状态未发生离散转移时，在相应的离散模态内，连续状态变量将根据连续状态方程组变化^[16]。

3 双向 DC/DC 变换器建模

3.1 基于拉格朗日力学的建模

Buck 模式下双向 DC/DC 变换器的等效原理如图 5 所示， q_1 为循环电荷， \dot{q}_1 为电感电流，电容中电荷为 q_c ， q_c/C 为电容电压。为了使用标准形式，

x_1 、 x_2 分别为电感电流和输出电容电压^[19]。

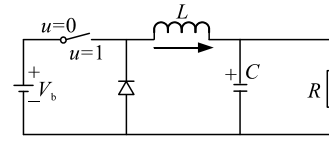


图 5 Buck 模式下等效原理

当 $u=1$ 时，定义 $T_1(\dot{q}_1)$ 和 $V_1(q_c)$ 为 Buck 模式下电路的动能和势能， $F_1(q_c)$ 为电路的耗散函数，根据拉格朗日动力学，则

$$\left. \begin{aligned} T_1(\dot{q}_1) &= L(\dot{q}_1)^2/2 \\ V_1(q_c) &= q_c^2/2C - Eq_1 \\ F_1(\dot{q}_1, \dot{q}_c) &= R(\dot{q}_1 - \dot{q}_c)^2/2 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

当 $u=0$ 时，得

$$\left. \begin{aligned} T_0(\dot{q}_1) &= L(\dot{q}_1)^2/2 \\ V_0(q_c) &= q_c^2/2C \\ F_0(\dot{q}_1, \dot{q}_c) &= R(\dot{q}_1 - \dot{q}_c)^2/2 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

综合式(6)和式(7)，可得

$$\left. \begin{aligned} T_u(\dot{q}_1) &= L(\dot{q}_1)^2/2 \\ V_u(q_c) &= q_c^2/2C - uEq_1 \\ F_u(\dot{q}_1, \dot{q}_c) &= R(\dot{q}_1 - \dot{q}_c)^2/2 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

代入式(1)得

$$L_u = T_u - V_u = L(\dot{q}_1)^2/2 - q_c^2/2C + uEq_1 \quad (9)$$

代入式(4)得

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L_u(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L_u(q, \dot{q})}{\partial q} + \frac{\partial F_u(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}} = 0 \quad (10)$$

整理得到

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1/L \\ 1/C & -1/RC \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E/L \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (11)$$

同理，当 $u=0$ 且电感电流耗尽为 0 时，仅靠电容提供输出电压，此时的数学模型为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -1/RC \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} E \quad (12)$$

为适应复合电源系统控制的数字化，将 Buck 模式下的连续时间模型进行离散化，其中 h 为采样周期，1、2、3 分别表示模态 1、模态 2、模态 3，得到如下表达式：

$$\left. \begin{aligned} x(k+1) &= A_i x(k) + B_i, \quad i=1,2,3, \\ A_1 &= \begin{bmatrix} 1 & -h/L \\ h/C & 1-h/RC \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} Eh/L \\ 0 \end{bmatrix} \\ A_2 &= \begin{bmatrix} 1 & -h/L \\ h/C & 1-h/RC \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ A_3 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1-h/RC \end{bmatrix}, B_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Boost 模式下双向 DC/DC 变换器的等效原理如图 6 所示。同理， x_1 、 x_2 分别代表电感电流和输出电压。

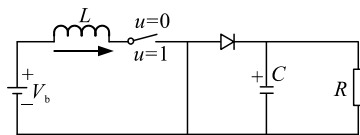


图 6 Boost 模式下等效原理

当 $u=1$ 时，定义 $T_1(\dot{q}_1)$ 和 $V_1(q_c)$ 为 Boost 模式下电路的动能和势能， $F_1(q_c)$ 为电路的耗散函数，则

$$\left. \begin{aligned} T_1(\dot{q}_1) &= L(\dot{q}_1)^2/2 \\ V_1(q_c) &= q_c^2/2C - Eq_1 \\ F_1(\dot{q}_1, \dot{q}_c) &= R(\dot{q}_c)^2/2 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

当 $u=0$ 时，定义 $T_0(\dot{q}_1)$ 和 $V_0(q_c)$ 为 Buck 模式下电路的动能和势能， $F_0(q_c)$ 为电路的耗散函数，则

$$\left. \begin{aligned} T_0(\dot{q}_1) &= L(\dot{q}_1)^2/2 \\ V_0(q_c) &= q_c^2/2C \\ F_0(\dot{q}_1, \dot{q}_c) &= R(\dot{q}_1 - \dot{q}_c)^2/2 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

最终整理得到当 $u=1$ 时，有

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -1/RC \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \end{bmatrix} E \quad (16)$$

当 $u=0$ 且电感电流大于 0 时，有

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1/L \\ 1/C & -1/RC \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \end{bmatrix} E \quad (17)$$

当 $u=0$ 且电感电流耗尽为 0 时，有

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -1/RC \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} uE \quad (18)$$

将 Boost 模式下的连续时间模型进行离散化，其中 h 为采样周期，得到下式：

$$\left. \begin{aligned} x(k+1) &= A_i x(k) + B_i, \quad i=1,2,3, \\ A_1 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1-h/RC \end{bmatrix}, \quad B_1 = \begin{bmatrix} E/L \\ 0 \end{bmatrix} \\ A_2 &= \begin{bmatrix} 0 & -h/L \\ h/C & 1-h/RC \end{bmatrix}, \quad B_2 = \begin{bmatrix} hE/L \\ 0 \end{bmatrix} \\ A_3 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1-h/RC \end{bmatrix}, \quad B_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

由上述所建模型可知：DC/DC 变换器是强非线性系统，同时包含连续状态变量和离散开关变量，其开关过程可以用离散系统描述，而每个工作模式又可以用连续系统描述，是典型的混杂系统。

3.2 基于混杂自动机理论的建模

按照双向 DC/DC 变换器的等效原理图，当

$S1=1$ 、 $S2=0$ 时为 Buck 模式，定义为 q_{10} ；当 $S1=0$ 、 $S2=1$ 时为 Boost 模式，定义为 q_{01} (1 为闭合，0 为关断)。以双向 DC/DC 变换器的 Buck 模式为例，建立其混杂自动机模型如图 7 所示。该模型由相会触发的混杂自动机 H_1 和 H_2 组成；其中 H_1 是一个有限状态机，用来根据 H_2 的连续状态信号 $x(t)$ (离散化后为 $x(k+1)$) 掌控离散事件的转换。定义边界条件 G ，为各模态间切换的边界条件； H_2 连续状态则接收离散状态机 H_1 的输出 $\phi = \{\phi_1 \ \phi_2 \ \phi_3\}$ ，通过边界条件 ϕ 完成各模态的切换，而激活相应的连续状态。

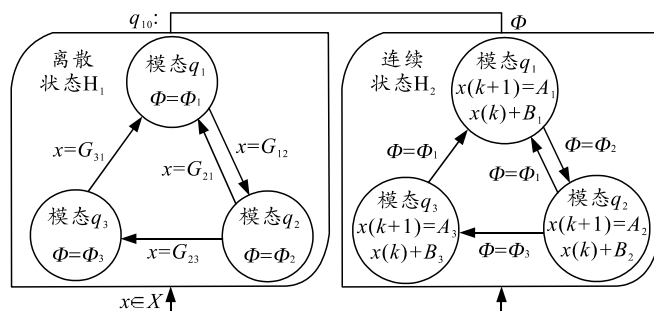


图 7 双向 DC/DC 变换器的混杂自动机模型

4 仿真与分析

笔者仅针对复合电源系统中的双向 DC/DC 变换器实施仿真实验，对混杂自动机模型进行验证，并进一步分析模型的性能。使用 Matlab 软件的 Simulink 平台搭建模拟电路，同时使用 C 语言编写混杂自动机模型的程序，采集电感电流和输出电压作为状态量，并与模拟电路的采集量进行对比。鉴于 Boost 模式和 Buck 模式类似，采集 Buck 模式下的波形图进行对比分析。双向 DC/DC 变换器的电路参数如表 1 所示。

表 1 Buck 模式下双向 DC/DC 变换器主要参数

参数	规格	参数	规格
E/V	20	f/kHz	100
L/mH	1.2	$T/\mu s$	10
$C/\mu F$	100	R/Ω	10

在 0.02 s 的时间内，模拟电路和双向 DC/DC 变换器混杂自动机模型的电感电流波形如图 8 所示。

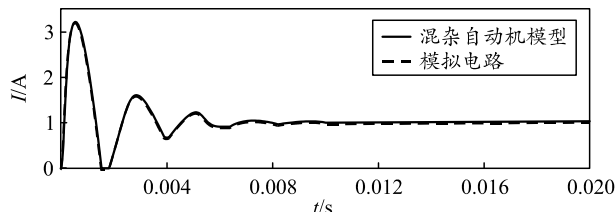


图 8 电感电流全局

系统处于不稳定状态，大约在 0.001 5 s 时进入 DCM 模式，得到的波形如图 9 所示。

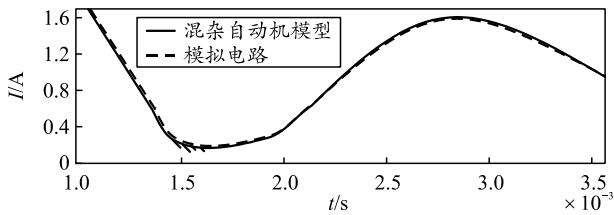


图 9 DCM 模式时电感电流

大约在 0.012 s 时，系统进入稳定状态，输出波形如图 10 所示。

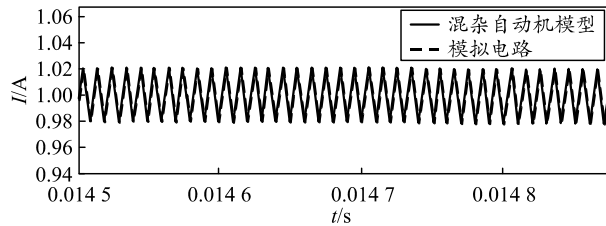


图 10 稳态时电感电流放大

在 0.02 s 内，模拟电路和双向 DC/DC 变换器混合自动机模型的输出电压波形如图 11 所示。

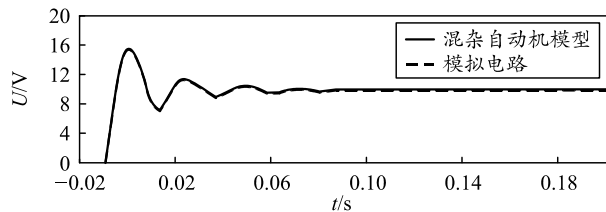


图 11 输出电压

将系统不稳定状态下输出电压的波形放大，得到图 12。将稳态下输出电压波形放大，得到图 13。

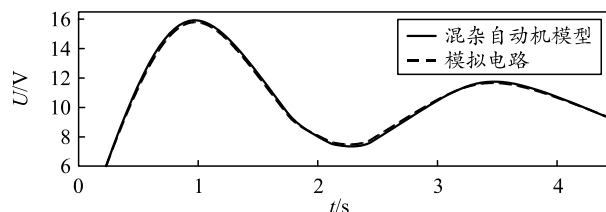


图 12 输出电压局部放大

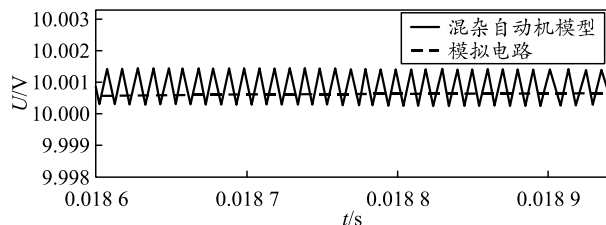


图 13 稳态下输出电压放大

通过分析图 8—13 可以得到：

1) 对比模拟电路与混合自动机模型的电感电流和输出电压可得，笔者建立双向 DC/DC 变换器的混合自动机模型能精确描述系统的动、静态特性；

2) 由图 8 和图 11 可知，笔者建立的混合自动机模型跟踪精度较高，从整体的波形图来看，与模

拟电路的电感电流和输出电压基本吻合；

3) 由图 9 和图 13 可知，当系统进入 DCM 模式时，混合自动机模型仍然跟踪良好。该模型完整地描述了系统的各个工作模式；

4) 由图 10 可见，在稳态时，混合自动机模型的电感电流与模拟电路基本重合，混合自动机模型跟踪精度高且反应了系统电感电流的高频纹波特性；

5) 由图 13 可见，混合自动机模型与模拟电路的输出电压跟踪精度较高，达到了 mV 级别。

5 结束语

仿真结果表明：笔者建立的双向 DC/DC 变换器的混合自动机模型计算量适中、跟踪精确度较高，完整地描述了整个双向 DC/DC 变换器的各个工作模式，兼顾了 Buck 模式、Boost 模式、CCM 模式和 DCM 模式，充分考虑了复合电源系统控制的需求，可为下一步控制策略的实施打下基础。

参考文献：

- [1] 钟童科. 大规模电动汽车的充放电行为及其对电网的影响研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [2] 张昌利, 张亚军, 闫茂德, 等. 双能量源纯电动汽车再生制动模糊控制与仿真[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(2): 233-238.
- [3] XI L H, ZHANG X, ZHANG B D. Modeling and simulation of power-split hybrid system[M]. Applied Mechanics & Materials, 2004: 713-715, 1472-1475.
- [4] LU L G, HAN X B, LI J Q, et al. A review in the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles[J]. Journal of Power Source, 2013, 2016: 272-288.
- [5] 高建平, 赵金宝, 葛坚, 等. 插电式混合动力汽车车载复合电源功率分配策略研究[J]. 图学学报, 2015, 36(4): 603-608.
- [6] AMJADIZ, WILLIAMSON. Power-electronics-based solutions for plug-in hybrid electric[J]. Transactions on Industrial Electronics, 2010, 58(2): 608-616.
- [7] 任丽红. 基于 PNGV 的超级电容蓄电池复合电源的研究[J]. 电源技术, 2013, 37(10): 691-692.
- [8] 胡宗波. 基于切换线性系统 DC/DC 变换器控制基础理论研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2005.
- [9] 杜贵平, 张波, 张涌萍, 等. 基于切换线性系统的 DC/DC 变换器矩阵系数多项式描述模型[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(21): 65-70.
- [10] 张波, 曲颖. DC/DC 变换器分岔和混沌的精确离散模型及实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 99-103.

程对比,该方法在具体操作上还不够精细,仍存在较大的优化空间,特别是对试验条件中的敏感因子确定与控制、自主性能关键影响因素分析与实战环境构建、作战试验定量评估方法、试验数据有效样本量选取等方面还需深入研究。

参考文献:

[1] 美国国家科学院国家研究理事会. 军用无人地面车辆技术的发展[M]. 付梦印,王美玲,译. 北京:国防工业出版社,2009:1.

[2] 刘克俭. 美国未来作战系统[M]. 北京:解放军出版社,2009:38-52.

[3] DARPA. DARPA Grand Challenge[EB/OL]. [2014-09-11]. http://en.wikipedia.org/wiki/DARPA_Grand_Challenge.

[4] KROTKOV E, FISH S. The DARPA PerceptOR evaluation experiments[J]. Auto Robot, 2007, 22(1): 19-35.

[5] LESEMANN M. Testing and evaluation methods for ICT-based safety systems[EB/OL]. [2008-01-01].

(上接第 78 页)

[11] 郑万里, 佃松宜. Buck 变换器的变积分离散时间建模[J]. 计算机仿真, 2015, 32(1): 287-291.

[12] SHORTT D J, LEE F C. Improved switching converter model using averaging and discrete techniques[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1983, 19(2): 190-202.

[13] LIN C, QIU B, CHEN Q. Comparison of current input equivalent circuit models of electrical vehicle battery[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(12): 76-81.

[14] KHARE N, GOVIL R. Modeling automotive battery diagnostics[J]. Power Electronics Technology, 2008, 34(3): 36-41.

(上接第 81 页)

5 结论

笔者以提升火工品压药生产安全性和压药精度为目标,对传统使用气液增压药控制方式进行改进,通过采用带 PN 总线功能的伺服驱动系统,实现实时监控和限制压药力矩。实验结果表明,使用基于 PN 总线技术的伺服压药控制系统能够极大提升压药精度和压药过程的安全性。该技术可广泛应用在各类药剂感度较高的火工品药柱压制生产上。

参考文献:

[1] 叶迎华. 火工品技术[M]. 北京:国防工业出版社,

<http://www.evaluate-project.eu/pdf/evaluate-080402-d11-v14-final.pdf>.

[6] ADAM J, ELENA M. Test arenas and performance metrics for urban search and rescue robots[C]//Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Las Vegas, NV: IEEE, 2003: 3396-3403.

[7] 李胜编译. 美国陆军无人作战系统试验规程[M]. 北京:航空工业出版社,2017:174-271.

[8] 熊光明,高利,吴绍斌,等. 无人驾驶车辆智能行为及其测试与评价[M]. 北京:北京理工大学出版社,2015:188-198.

[9] 史辉,刘向前. 地面无人平台在典型战场环境中的自主机动性能评价研究[J]. 兵工学报,2014,35(增1):17-23.

[10] 王凯. 武器装备作战系统[M]. 北京:国防工业出版社,2012:66-72.

[11] 苏治宝,王宏明,杨甜甜,等. 地面无人作战平台性能评价指标体系[J]. 火力与指挥控制,2012,37(3):562-565.

[15] TANI A, CAMARA M B, DAKYO B, et al. DC/DC and DC/AC converters control for hybrid electric vehicles energy management-ultracapacitors and fuel cell[J]. Industrial Informatics, 2013, 9(2): 686-696.

[16] 高建平,葛坚,赵金宝,等. 复合电源系统功率分配策略研究[J]. 西安交通大学学报,2015,49(7):17-24.

[17] 陈方. 基于超级电容的双向 DC/DC 变换器研究[D]. 杭州:浙江大学,2012.

[18] 余泉. 基于混杂自动机模型的 DC/DC 变换器的控制方法研究[D]. 广州:华南理工大学,2014.

[19] 段翔兮,佃松宜,郑万里. 基于离散演化映射的 DC/DC 变换器混合逻辑动态建模[J]. 电测与仪表,2017,54(3):7-13.

2014:1-3.

[2] 夏建才,刘丽梅. 火工品制造[M]. 北京:北京理工大学出版社,2009:32-36.

[3] 徐文文,毕雪芹,陈超波. 基于 Volterra 级数对火工品起爆过程的辨识[J]. 兵工自动化,2019,38(8):62-65.

[4] 樊学良,赵凤歧,向方容,等. 气液增力技术在火工品生产中的应用[J]. 四川兵工学报,2006,6(5):45-47.

[5] 阮毅,陈伯时. 电力拖动自动控制系统—运动控制系统[M]. 北京:机械工业出版社,2010:25-29.

[6] 刘国海. 现场总线 PROFINET[M]. 北京:电子工业出版社,2007:13-15.

[7] 上海英威腾工业技术有限公司. 英威腾技术指南[Z]. 上海:上海英威腾工业技术有限公司,2018.