

DC-DC 变换器的最小投影法切换律

肖文勋, 张波

(华南理工大学电力学院, 广东省 广州市 510640)

Switching Rule Based on Min-projection Strategy of DC-DC Converters

XIAO Wen-xun, ZHANG Bo

(Electrical Power College, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong Province, China)

ABSTRACT: Stability study and control design of DC-DC converters are handled easily and efficiently by utilizing piecewise linear systems analysis approach. So this paper models DC-DC converters as switched linear systems, introduces projection strategy conception of switched linear systems, and proposes control strategy of switching rule based on min-projection strategy. Design approach and procedure for the proposed switching rule of DC-DC converters which realizes passive control and global stability are presented. And according to the feature that the proposed switching rule depends on the equilibrium point, the desired equilibrium point is compensated for advancing robust and convergent rate of the proposed switching rules. In addition, a clock delay control is designed to overcome the problem of sliding motion in the min-projection strategy based switching rule. The simulation and experiment results demonstrate that the proposed min-projection strategy based switching rule is generally applicable to the practical DC-DC converters.

KEY WORDS: DC-DC converters; switched linear systems; min-projection strategy; switching rule

摘要: 采用分段线性系统分析方法, DC-DC 变换器的稳定性研究和控制器设计变得十分简单和有效。为此, 该文建立 DC-DC 变换器的切换线性系统模型, 引入切换线性系统投影法的概念, 提出最小投影法切换律的控制策略。具体论述了 DC-DC 变换器实现无源控制与全局稳定性的切换律设计方法与步骤, 并针对该切换律与平衡点相关的特点, 在设计中进行平衡点的补偿以提高切换律的鲁棒性与收敛率。此外, 为解决最小投影法切换律存在的滑模问题, 还进行适合于 DC-DC 变换器的延时切换器设计。仿真和实验结果表明该文提出的最小投影法切换律在实际 DC-DC 变换器中具有普遍适用性。

基金项目: 国家自然科学基金项目(60474066); 广东省自然科学基金重点项目(605103540)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(60474066).

关键词: DC-DC 变换器; 切换线性系统; 最小投影法; 切换律

0 引言

DC-DC变换器从工作特性来看就是一类典型的切换线性系统^[1-8]。DC-DC变换器的每个工作模态对应一个线性系统, 开关管的导通与关断操作其实是线性子系统之间的切换。由于DC-DC变换器这一类切换线性系统的期望平衡点不在子系统平衡点集合里, 而且它的输入是不可控的恒定量, 因此, 对于这类系统的控制, 关键是设计一类切换律, 以控制子系统之间的切换而使系统稳定^[6-9]。

切换线性系统的切换律一般是通过共同 Lyapunov 函数或多 Lyapunov 函数来构造^[7-13], 或如文献[6]提出的通过子系统的向量场与状态向量之间夹角的最小余弦值来构造, 以实现最小纹波控制。但在DC-DC变换器的应用中, 这些切换律很难描述系统的收敛率^[6-13]。而文献[14-15]提出的最小投影法的本质是系统在任意状态始终能选择一个指向平衡点的向量场, 使系统轨迹沿着该向量场收敛至平衡点。最小投影的负方向性表明子系统收敛至平衡点, 而它的幅值表明了收敛的速度, 这给系统收敛率的优化奠定了基础。

本文基于文献[14-15], 提出基于最小投影法的切换律, 以实现切换线性系统的全局稳定性, 并具有快速的收敛率与强鲁棒性。在设计最小投影法切换律中解决了实际 DC-DC 变换器控制策略的几个问题: 1) DC-DC 变换器切换系统模型的一般描述; 2) 根据平衡点, 定义 DC-DC 变换器实现无源控制与全局稳定性的最小投影法切换律; 3) 解决实际运行中 DC-DC 变换器平衡点在负载和输入电压扰动时的补偿问题, 也即设计具有强鲁棒性的切换律

问题；4) 由于DC-DC变换器开关管开关频率的限制，为避免系统在切换面邻域发生滑模，设计切换律的延时控制器。

1 DC-DC变换器的切换线性系统

DC-DC变换器的切换线性系统模型描述为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}_\sigma(\mathbf{x}(t)) = \mathbf{J}(\mathbf{A}_\sigma \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_\sigma) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}_\sigma \mathbf{x}(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中： $\mathbf{x}(t) \in R^n$ 为系统的连续状态变量； $\mathbf{y}(t) \in R^q$ 为输出变量； \mathbf{A}_σ 、 \mathbf{B}_σ 和 \mathbf{C}_σ 均为相应维数的系数矩阵； \mathbf{J} 为储能元件参数定义的系数矩阵； $\sigma \in \{1, 2, \dots, m\}$ 为切换信号，它标志系统的工作模态，当 $\sigma=i$ 时，表示第*i*个子系统 Σ_i 在工作，在任何时刻有且只有1个子系统在工作。

以图1、2的Boost和Buck变换器为例，令电感电流 i_L 和电容电压 u_C 为状态变量，即 $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2]^T = [i_L \ u_C]^T$ ，输出电压 u_O 为输出变量 \mathbf{y} 。

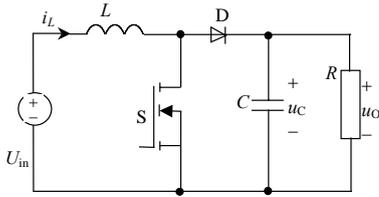


图1 Boost变换器
Fig. 1 Boost converter

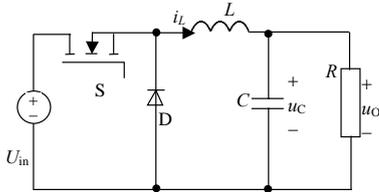


图2 Buck变换器
Fig. 2 Buck converter

Boost变换器的系数矩阵为

$$\begin{cases} \mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C} \end{bmatrix} \\ \mathbf{A}_\sigma = \begin{bmatrix} 0 & -\kappa \\ \kappa & -\frac{1}{R} \end{bmatrix} \\ \mathbf{B}_\sigma = \begin{bmatrix} U_{in} \\ 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{C}_\sigma = [0 \ 1] \end{cases} \quad (2)$$

Buck变换器的系数矩阵为

$$\begin{cases} \mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C} \end{bmatrix} \\ \mathbf{A}_\sigma = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & -\frac{1}{R} \end{bmatrix} \\ \mathbf{B}_\sigma = \begin{bmatrix} U_{in}(1-\kappa) \\ 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{C}_\sigma = [0 \ 1] \end{cases} \quad (3)$$

式(2)、(3)中，当 $\sigma=1$ ，即开关管导通时， $\kappa=0$ 。当 $\sigma=2$ ，即开关管关断时， $\kappa=1$ 。

2 DC-DC变换器最小投影法切换律

2.1 最小投影法切换律

定义1 对于切换线性系统(1)，假设系统的平衡点为原点，其子系统 Σ_σ 的向量场 $\mathbf{f}_\sigma(\mathbf{x})$ 在向量 \mathbf{x} 上的投影定义为

$$\Gamma_\sigma(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^T \mathbf{f}_\sigma(\mathbf{x}) / \|\mathbf{x}\|, \quad \mathbf{x} \neq \mathbf{0} \quad (4)$$

当 $\Gamma_\sigma(\mathbf{x}) < 0$ 时，表明系统沿着向量场 $\mathbf{f}_\sigma(\mathbf{x})$ 不断趋近平衡点，而且投影值越小，系统收敛至平衡点的速度越快。

定义2 切换线性系统在任意状态向量 \mathbf{x} 处的最小投影值定义为

$$\Gamma_m(\mathbf{x}) = \min_{\sigma \in \{1, 2, \dots, m\}} \{\Gamma_\sigma(\mathbf{x})\}, \quad \mathbf{x} \neq \mathbf{0} \quad (5)$$

式中： $\Gamma_\sigma(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^T \mathbf{f}_\sigma(\mathbf{x}) / \|\mathbf{x}\|$ ；状态向量在投影值中的权重系数均为1。故又称 $\Gamma_m(\mathbf{x})$ 为固有最小投影值。

当只考虑向量场 $\mathbf{f}_\sigma(\mathbf{x})$ 在向量 \mathbf{x} 上投影的方向性时，将 $\mathbf{x}^T \mathbf{f}_\sigma(\mathbf{x}) / \|\mathbf{x}\| \leq 0$ 表示为

$$\mathbf{Q}_\sigma = \mathbf{x}^T \mathbf{f}_\sigma(\mathbf{x}) \leq 0, \quad \mathbf{x} \in R^n \quad (6)$$

该处理方法消除了 $\mathbf{x} \neq \mathbf{0}$ 约束，而且不影响各子系统的向量场在任意向量 \mathbf{x} 上投影的方向性。

定义DC-DC变换器切换线性系统(1)的期望平衡点为 \mathbf{x}^* ，根据文献[14]提出的基于最小投影法的稳定性原理9，DC-DC变换器实现全局稳定性的最小投影法切换律设计为

$$\sigma = \arg \min_{\sigma \in \{1, 2, \dots, m\}} \{(\mathbf{x} - \mathbf{x}^*)^T \mathbf{P} \mathbf{f}_\sigma(\mathbf{x})\} \quad (7)$$

并且该切换律满足

$$\begin{aligned} \Omega_\sigma = \{ \mathbf{x} \in R^n \mid \min_{\sigma \in \{1, 2, \dots, m\}} \{(\mathbf{x} - \mathbf{x}^*)^T \mathbf{P} \mathbf{f}_\sigma(\mathbf{x})\} \leq 0 \}, \\ \bigcup_{i=1}^n \Omega_i = R^n \end{aligned} \quad (8)$$

该最小投影法切换律的本质是DC-DC变换器在任意状态始终能选择一个指向平衡点 \mathbf{x}^* 的向量场

$f_\sigma(\mathbf{x})$, 使DC-DC变换器轨迹沿着该向量场 $f_\sigma(\mathbf{x})$ 不断趋近并稳定运行于平衡点 \mathbf{x}^* 。

DC-DC变换器各模态之间的切换面 S_{ij} 定义为

$$S_{ij} = \{\mathbf{x} \in R^n | Q_i \cap Q_j\}, i, j=1, 2, \dots, m, i \neq j \quad (9)$$

由于在切换面 S_{ij} 上 $Q_i=Q_j$, 其中 $Q_\sigma=(\mathbf{x}-\mathbf{x}^*)^T \mathbf{P} \cdot f_\sigma(\mathbf{x}) \leq 0$, 切换面 S_{ij} 又可定义为

$$S_{ij} = \{\mathbf{x} \in R^n | Q_i - Q_j = 0\}, i, j=1, 2, \dots, m, i \neq j \quad (10)$$

由于 DC-DC 变换器可描述成 Hamiltonian 系统^[16-17], 用储能函数构造最小投影法切换律, 以实现无源控制^[18-20], 即在式(7)的切换律中取正定对称矩阵 $\mathbf{P}=\mathbf{J}^{-1}$ 。Boost和Buck变换器实现无源控制的最小投影法切换律对应的切换面分别为

$$S_1 = \{\mathbf{x} \in R^2 | x_1^* x_2 - x_2^* x_1 = 0\} \quad (11)$$

$$S_2 = \{\mathbf{x} \in R^2 | x_1^* - x_1 = 0\} \quad (12)$$

2.2 鲁棒性

实际运行中DC-DC变换器是一类非定常系统, 其平衡点随负载和输入电压的改变而改变。由式(11)、(12)的切换面可知, 采用储能函数构造的最小投影法切换律与平衡点有关, 要设计具有强鲁棒性的切换律, 关键是对期望平衡点的补偿, 使期望平衡点在系统参数改变时仍能真实反映实际系统的平衡点。

平衡点的补偿函数设计为

$$\mathbf{x}_e = K_p(\mathbf{x}^* - \mathbf{x}) + K_i \int (\mathbf{x}^* - \mathbf{x}) dt \quad (13)$$

式中: \mathbf{x}^* 是预设的期望平衡点; K_p 与 K_i 分别为比例项与积分项的正值系数。则补偿后的期望平衡点为

$$\tilde{\mathbf{x}}^* = \mathbf{x}^* + \mathbf{x}_e \quad (14)$$

式(7)的最小投影法切换律改进为

$$\tilde{\sigma} = \arg \min_{\sigma \in \{1, 2, \dots, m\}} \{(\mathbf{x} - \tilde{\mathbf{x}}^*)^T \mathbf{P} f_\sigma(\mathbf{x})\} \quad (15)$$

子系统 Σ_σ 的工作领域为

$$\tilde{Q}_\sigma = \{\mathbf{x} \in R^n | \min_{\sigma \in \{1, 2, \dots, m\}} \{(\mathbf{x} - \tilde{\mathbf{x}}^*)^T \mathbf{P} f_\sigma(\mathbf{x})\} \leq 0\} \quad (16)$$

平衡点补偿函数 \mathbf{x}_e 的引入, 改变了原来实现无源控制的最小投影法切换律的结构, 若 K_p 与 K_i 设计得当, 不仅提高切换律的鲁棒性, 也改善收敛率。

2.3 切换律固有滑模的消除及延时切换器

利用最小投影法切换律控制的切换线性系统, 当其轨迹进入切换面邻域时, 将沿着切换面频繁抖动, 这种现象称为滑模。对于 DC-DC 变换器, 这种滑模意味着开关管频繁地开通和关断, 有可能超出开关管的承受能力。为避免切换线性系统在切换面邻域发生滑模, 并且保证稳态时系统的工作频率

恒定, 这里设计一类时钟延时切换器。

设计频率为 f_c 的窄脉宽时钟为

$$G(t) = \begin{cases} 1, & t \in [\frac{n}{f_c}, \frac{n}{f_c} + \tau] \\ 0, & t \notin [\frac{n}{f_c}, \frac{n}{f_c} + \tau] \end{cases} \quad (17)$$

式中: τ 为时钟脉冲宽度; $n=0, 1, 2, \dots$ 。

以两模态工作的DC-DC变换器为例, 具有时钟延时切换的最小投影法切换律的实现电路与工作原理如图 3 所示。工作子系统的选择由复位置位(reset set, RS)触发器来执行。为便于分析, 令 $\sigma'=1$ 对应 $\sigma=1$; $\sigma'=0$ 对应 $\sigma=2$ 。 u_σ 为开关管的驱动信号。该切换律的工作原理为: 1) 当时钟 $G(t)$ 为高电平时强制使系统切换至关断模态; 2) 当时钟 $G(t)$ 为低电平, 且当前工作子系统是导通模态, 则根据最小投影法切换律选择下一个工作子系统; 3) 当时钟 $G(t)$ 为低电平, 且当前工作子系统是关断模态, 根据RS触发器的特性, 关断模态一直保持到时钟的高电平到来。

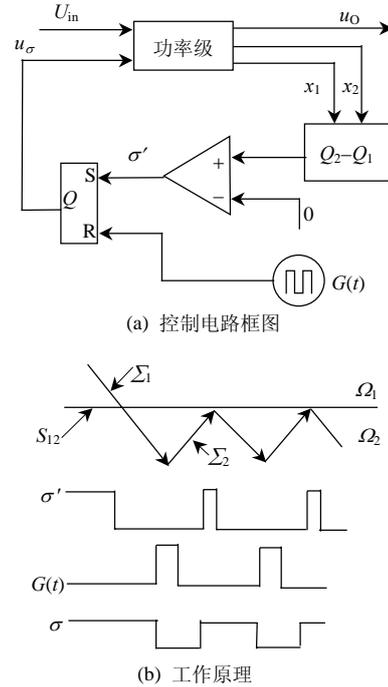


图 3 具有时钟延迟的切换律
Fig. 3 Switching rule with clock delay

3 Boost 和 Buck 变换器切换律设计

以 Boost 和 Buck 变换器为例介绍最小投影法切换律在 DC-DC 变换器中的应用。Boost 和 Buck 变换器的电路参数如表 1 所示, 预设平衡点为

表 1 Boost 和 Buck 变换器电路参数

Tab. 1 Circuit parameters of Boost and Buck converters

变换器	x_1^*/A	x_2^*/V	U_{in}/V	R/Ω	$L/\mu H$	$C/\mu F$
Boost	2	48	24	48	500	180
Buck	2	12	24	6	500	180

$\mathbf{x}^* = [x_1^* \ x_2^*]^T$, 补偿后的平衡点为 $\tilde{\mathbf{x}}^* = [\tilde{x}_1^* \ \tilde{x}_2^*]^T$ 。

兼顾具有全局稳定性, 强鲁棒性与快速收敛率, 并避免滑模的最小投影法切换律的设计步骤:

1) 设计结构如式(15)的切换律。即:

$$\tilde{\sigma} = \arg \min_{\sigma \in \{1,2\}} \{(\mathbf{x} - \tilde{\mathbf{x}}^*)^T \mathbf{P} \mathbf{f}_\sigma(\mathbf{x})\} \quad (18)$$

取正定对称矩阵 $\mathbf{P} = \mathbf{J}^{-1} = \text{diag}[L \ C]$ 。

2) 设计如式(17)的窄脉宽时钟 $G(t)$ 。根据变换器开关频率的要求, 设时钟频率 $f_c = 100 \text{ kHz}$ 。

3) 补偿函数 $\mathbf{x}_e = [x_{1e} \ x_{2e}]^T$, 由于DC-DC变换器的输出电压是预设恒定值, 令 $x_{2e} = 0$, 并设

$$x_{1e} = K_p(x_2^* - x_2) + K_I \int (x_2^* - x_2) dt \quad (19)$$

式中: K_I 主要为实现输出零净差, 为防止积分过快而使系统抖动, K_I 一般远小于开关角频率, 并大于系统固有谐振角频率; 设计 K_p 使最小投影法切换律划分的子系统工作领域满足 $\Omega_1 * \Omega_2 = R^2$ 。这里取 $K_I = 2\pi f_c / 20$, $K_p = 4$ 。

经过平衡点补偿后, $Q_\sigma = (\mathbf{x} - \tilde{\mathbf{x}}^*)^T \mathbf{P} \mathbf{f}_\sigma(\mathbf{x})$, Boost 和 Buck 变换器实现无源控制的最小投影法切换律对应的切换面分别为

$$\tilde{S}_1 = \{\mathbf{x} \in R^2 \mid (x_1^* + x_{1e})x_2 - x_2^*x_1 = 0\} \quad (20)$$

$$\tilde{S}_2 = \{\mathbf{x} \in R^2 \mid (x_1^* + x_{1e}) - x_1 = 0\} \quad (21)$$

为防止电感电流在动态过程中长时间处于大电流, 设控制信号中电感电流的饱和值为 4 A, 即式(20)的 $(x_1^* + x_{1e})x_2 / x_2^*$ 与式(21)的 $(x_1^* + x_{1e})$ 的饱和值为 4。在实际电路中, 饱和值由运放的输出电压饱和值自然实现。

由式(18)所示的最小投影法切换律划分的子系统工作领域如图 4 所示, 该最小投影法切换律在整个领域都有定义, 即 $\Omega_1 * \Omega_2 = R^2$, 因此 Boost 和 Buck 变换器的期望平衡点是全局稳定的。

Boost 和 Buck 变换器切换面上的固有最小投影值 $\Gamma_m(\mathbf{x})$ 分别如图 5(a)、(b)所示, $\Gamma_m(\mathbf{x}) = \min_{\sigma \in \{1,2\}} \{(\mathbf{x} - \mathbf{x}^*)^T \mathbf{P} \mathbf{f}_\sigma(\mathbf{x}) / \|\mathbf{x} - \mathbf{x}^*\|\}$, $\mathbf{x} \neq \mathbf{x}^*$ 。切换面上的固有最小投影值 $\Gamma_m(\mathbf{x})$ 越小表示最小投影法切换律的收敛速度越快, 因此补偿平衡点后的切换律收敛率较补偿前的有显著提高。

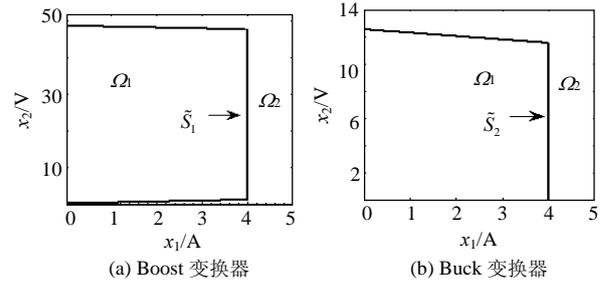


图 4 子系统的工作领域及切换面

Fig. 4 Operation fields of subsystems and switching surface

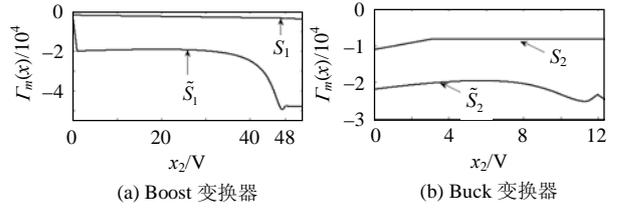


图 5 切换面上的最小投影值

Fig. 5 Min-projection value on the switching surface

4 仿真与实验

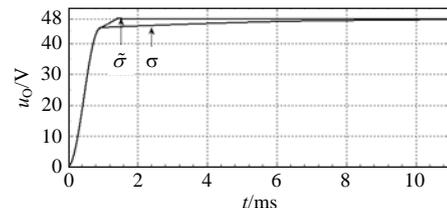
4.1 仿真结果

控制电路如图 3(a)所示。图 6、7 分别给出 Boost 和 Buck 变换器的仿真波形。其中图 6(a)、7(a)分别为切换律 σ 与 $\tilde{\sigma}$ 控制的 Boost 和 Buck 变换器的启动动态响应, 由图可知补偿平衡点后变换器的收敛速度比补偿前的有显著提高, 验证了前面的分析。

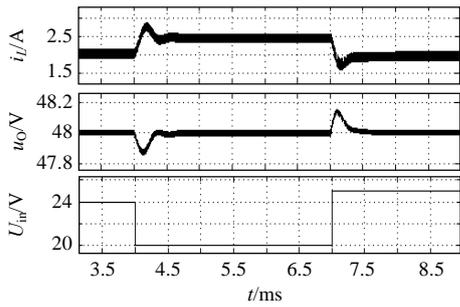
在输入电压与负载大扰动的动态响应中, Boost 变换器输出电压的过调量分别小于 0.4%、0.95% 额定输出电压, 表明 Boost 变换器具有很强的抗输入与输出干扰能力。动态过程中系统经过约 0.3ms 到达新的平衡状态, 并且输出电压稳定于额定值。

Buck 变换器在输入电压大扰动的动态响应中, 输出电压几乎无过冲。当负载有大扰动时, 输出电压过调量小于 2.5% 额定输出电压, 并经过约 0.25ms 到达新的平衡状态, 并且输出电压稳定于额定值。

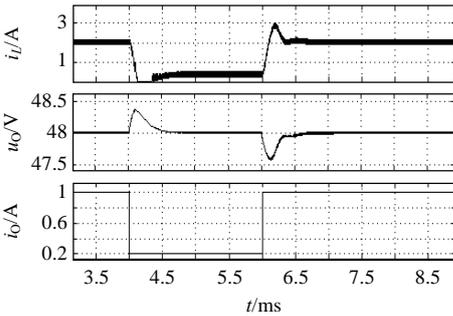
仿真结果表明 Boost 和 Buck 变换器在这种最小投影法切换律的控制下具有全局稳定性与较快收敛率, 并且输出电压对系统参数的变化不敏感, 切换律具有很好的鲁棒性。



(a) 系统启动的动态响应



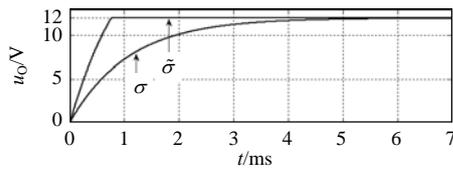
(b) 采用切换律 σ 时输入电压扰动(20~25 V)的动态响应



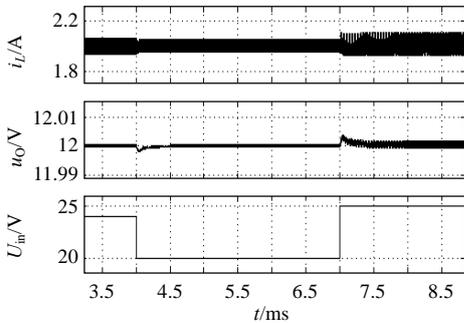
(c) 采用切换律 σ 时负载扰动(0.2~1 A)的动态响应

图 6 Boost 变换器的动态响应

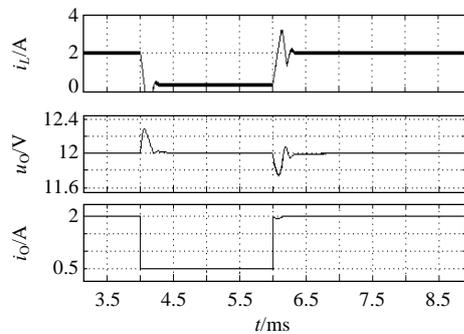
Fig. 6 Dynamic responses of Boost converter



(a) 系统启动的动态响应



(b) 采用切换律 σ 时输入电压扰动(20~25 V)的动态响应



(c) 采用切换律 σ 时负载扰动(0.5~2 A)的动态响应

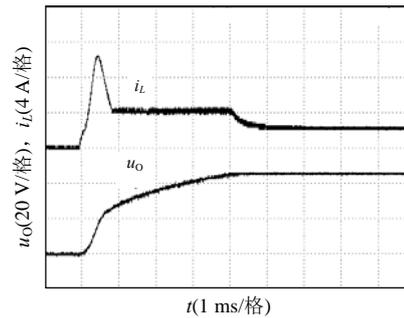
图 7 Buck 变换器的动态响应

Fig. 7 Dynamic responses of Buck converter

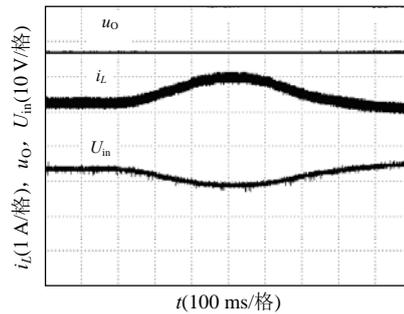
4.2 实验结果

以式(18)所示的最小投影法切换律控制的 Boost 变换器为例进行实验研究。启动动态响应波形如图 8(a)所示,系统从 0 点快速收敛至稳定状态,启动过程输出电压几乎无过调量。由于实际电路中电感、电容和开关等元件存在寄生电阻,使启动调整时间比仿真的稍慢。

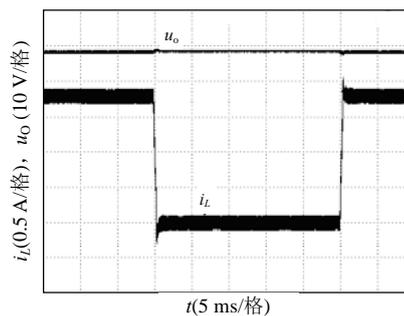
图 8(b)、(c)所示的输入电压和负载扰动的动态响应波形,显示系统具有很强的抗输入和输出干扰能力,验证了前面的理论分析与仿真结果。



(a) 系统启动的动态响应



(b) 输入电压扰动的动态响应波形



(c) 负载扰动(0.2~1 A)的动态响应波形

图 8 Boost 变换器的实验波形

Fig. 8 Experimental waveforms of Boost converter

5 结论

本文建立了 DC-DC 变换器的切换线性系统,应用切换线性系统基于最小投影法的稳定性原理,设计了 DC-DC 变换器实现无源控制的最小投影法切换律,并针对切换律只与平衡点相关的特性设计

鲁棒性切换律,解决了最小投影法切换律固有的滑模问题,使设计的最小投影法切换律适于实际DC-DC变换器的应用。最后设计Boost和Buck变换器的最小投影法切换律,并进行仿真与实验,结果表明本文设计的最小投影法切换律适用于实际DC-DC变换器,并具有良好的稳定性、收敛率和鲁棒性。

参考文献

- [1] Seah C E, Oruganti R. Large signal and steady state analyses of DC-DC power converters[C]. Proceedings of Power Electronics and Drive Systems, Singapore, 1995.
- [2] 胡宗波,张波,邓卫华,等.基于切换线性系统理论的DC-DC变换器控制系统的能控性和能达性[J].中国电机工程学报,2004,24(12):165-170.
Hu Zongbo, Zhang Bo, Deng Weihua, et al. Controllability and reachability of DC-DC converters as switched linear systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 165-170(in Chinese).
- [3] Sun Zhengdong, Shuzhi S G. Switched linear systems: control and design[M]. Germany: Springer, 2005: 9-10.
- [4] 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.
Du Guiping, Zhang Bo, Zhang Yongping, et al. Matrix coefficient polynomial description model of DC-DC converters based on switched linear systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(21): 65-70(in Chinese).
- [5] 马皓,毛兴云,徐德鸿.兼顾电感电流连续导通和断续运行模式的DC/DC电路建模和参数辨识[J].中国电机工程学报,2006,26(5):64-69.
Ma Hao, Mao Xingyun, Xu Dehong. Modeling and parameter identification of DC/DC converters in both CCM and DCM mode[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5): 64-69(in Chinese).
- [6] Matthew S, Gabriel E, Koo T J. Hybrid modelling and control of power electronics[C]. The 6th International Workshop, HSCC, Prague, Czech Republic, 2003.
- [7] Hassibi A, Boyd S. Quadratic stabilization and control of piecewise-linear systems[C]. Proceedings of American Control Conference, Philadelphia, Pennsylvania, 1998.
- [8] Rodrigues L, Boyd S. Piecewise-affine state feedback using convex optimization[C]. Proceedings of American Control Conference, Boston, Massachusetts, 2004.
- [9] Ma Hao, Qi Feng, Zhou Wenqi. Investigation of hybrid modeling and control for DC-DC converters[C]. Proceedings of IPEMC, Shanghai, China, 2006.
- [10] Rubensson M, Lennartson B. Global convergence analysis for piecewise linear systems applied to limit cycles in a DC/DC converter [C]. Proceedings of American Control Conference, Anchorage, AK, 2002.
- [11] Bolzern P, Spinelli W. Quadratic stabilization of a switched affine system about a nonequilibrium point[C]. Proceedings of American Control Conference, Boston, Massachusetts, 2004.
- [12] Gonçalves J M, Megretski A, Dahleh M A. Global analysis of piecewise linear systems using impact maps and surface Lyapunov functions[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2003, 48(12): 2089-2106.
- [13] DeCarlo R, Branicky M, Pettersson S, et al. Perspectives and results on the stability and stabilizability of hybrid systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2000, 88(7): 1069-1082.
- [14] Pettersson S, Lennartson B. Controller design of hybrid systems [C]. International Workshop, HART, Grenoble, France, 1997.
- [15] Pettersson S, Lennartson B. Stabilization of hybrid systems using a min-projection strategy[C]. Proceedings of American Control Conference, Arlington, VA, 2001.
- [16] Sira-Ramírez H, Ortega R, Escobar G. Lagrangian modeling of switch regulated DC-to-DC power converter[C]. Proceedings of the 35th IEEE Conference on Decision and Control, Kobe, Japan, 1996.
- [17] Escobar G, van der Schaft A J, Ortega R. A Hamiltonian viewpoint in the modeling of switching power converters[J]. Automatica, 1999, 35(3): 445-452.
- [18] 慕春棣,梅生伟,申铁龙.非线性系统鲁棒控制理论的一些新进展[J].控制理论与应用,2001,18(1):1-6.
Mu Chundi, Mei Shengwei, Shen Tielong. New developments in robust nonlinear control theory[J]. Control Theory and Applications, 2001, 18(1): 1-6(in Chinese).
- [19] 于海生,赵克友,郭雷,等.基于端口受控哈密顿方法的PMSM最大转矩/电流控制[J].中国电机工程学报,2006,26(8):82-87.
Yu Haisheng, Zhao Keyou, Guo Lei, et al. Maximum torque perampere control of PMSM based on port-controlled Hamiltonian theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(8): 82-87(in Chinese).
- [20] 郝晋,王杰,陈陈,等.基于Hamilton系统理论的结构保持多机电力系统非线性励磁控制[J].中国电机工程学报,2005,25(18):6-12.
Hao Jin, Wang Jie, Chen Chen, et al. Nonlinear excitation control of multi-machine power system with structure preserving models based on Hamiltonian system theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(18): 6-12(in Chinese).



肖文勋

收稿日期:2007-12-19。

作者简介:

肖文勋(1979—),男,博士研究生,研究方向为电力电子非线性控制理论, epwxw@yahoo.com.cn;

张波(1962—),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为电力电子与电气传动、电力电子非线性控制理论等。

(责任编辑 谷子)