

# 单周期控制 Cuk 变换器的启动问题与解决方案

姜晓亮, 孙频东, 张忠英

(南京师范大学 电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 开关变换器的单周期控制技术具有动态响应快、开关频率固定、输入扰动抑制能力强等特点. 将单周期控制用于一些拓扑结构较复杂的变换器时, 会给变换器的启动带来问题. 首先分析了单周期控制 Cuk 变换器的启动问题, 然后结合变换器的全局稳定性, 采用固定占空比控制的辅助方案, 很好地解决了启动问题, 实现了 Cuk 变换器的单周期控制. 最后对提出的解决方案进行了仿真分析和实验验证, 仿真和实验结果均表明解决方案是正确与有效的.

[关键词] Cuk 变换器, 单周期控制, 启动问题, 全局稳定性, 辅助时钟

[中图分类号] TP395 [文献标识码] A [文章编号] 1672-1292(2010)03-0030-05

## Solution to Start-up Issue of One-cycle Controlled Cuk Converter

Jiang Xiaoliang Sun Pindong Zhang Zhongying

(School of Electrical and Automation Engineering Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

**Abstract** One-cycle control technique for switched converter is characterized of fast dynamic response, constant switch frequency, good suppression of input perturbation. Start-up issue appears when one-cycle control is employed in some converters with complex topology. At the beginning of this paper, start-up issue of one-cycle controlled Cuk converter was analyzed. Then with consideration of global stability, start-up issue was solved and one-cycle controlled Cuk converter was realized by using the auxiliary scheme of constant duty-ratio control. Finally, simulation analysis and experiment was carried out, and the strategy was confirmed to be correct and effective by the results of simulation and experiment.

**Key words** Cuk converter, one-cycle control, start-up issue, global stability, auxiliary clock

开关变换器的控制方法始终是电力电子技术领域研究的热点问题, 目前最流行的脉冲宽度调制 (PWM) 方法在过去的几十年里已经得到了充分的研究和发展. 而开关变换器本身作为一种强非线性系统, 在采用非线性方法进行控制时, 应该具有更好的动态性能. 正是基于这样的考虑, K. M. Smedley 等人于 1990 年提出了开关变换器的单周期控制技术. 单周期控制具有动态响应快、开关频率固定等特点<sup>[1]</sup>, 并且能够有效地抑制输入扰动, 这是其与一般 PWM 技术的主要区别. 单周期控制技术提出以后, 在交直流调压、功率放大器、有源滤波、功率因数校正等很多领域得到了广泛的研究和应用<sup>[2-5]</sup>, 并且已经出现采用单周期控制技术的功率因数校正专用集成电路. 而 Cuk 变换器作为一种优良的拓扑结构, 具有输入输出电流无脉动、电磁干扰小、输出电压升降、驱动简单等优点, 是一种用最少元件获得较理想变换性能的变换器. 近十年来, Cuk 拓扑结构的应用已经扩展到了交流调压、光伏发电、PWM 整流、无功补偿等诸多领域<sup>[6-9]</sup>, 再次证明了这种拓扑具有蓬勃的生命力和广阔的应用前景. 本文首先讨论了传统单周期控制方案应用于 Cuk 变换器时带来的启动问题, 然后结合 Cuk 变换器全局稳定性的分析, 采用固定占空比控制的辅助方案, 很好地解决了变换器的启动问题, 并实现了 Cuk 变换器的单周期控制. 对所提出的方案进行了仿真分析和实验验证, 结果证明了理论分析与解决方案的正确性与有效性.

### 1 常规单周期控制方案下 Cuk 变换器的启动问题

由于 Cuk 变换器自身的特点, 即采用电容进行能量传递, 因此开关器件的输入量为电容  $C_1$  的端电压,

如图 1 所示. 如果采用常规的单周期控制方案, 即电路上电后, 时钟信号置位  $Q$  端并驱动开关  $S$  导通, 电源电压加到电感  $L_1$  两端, 流经  $L_1$  的电流线形上升; 同时电容  $C_1$  两端电压加到二极管  $D$  两端, 并被取样至积分电路进行积分. 但是由于电路启动时电容  $C_1$  两端电压为零, 因此积分器的输出值永远无法达到比较器的给定值, 从而使 RS 触发器的  $R$  端保持低电平. 当时钟信号变为低电平时,  $S$  端与  $R$  端均为低电平,  $Q$  端始终保持高电平, 即开关  $S$  一直导通, 如图 2 所示. 这种情况不仅使电路无法正常启动, 而且会损坏电路元件.

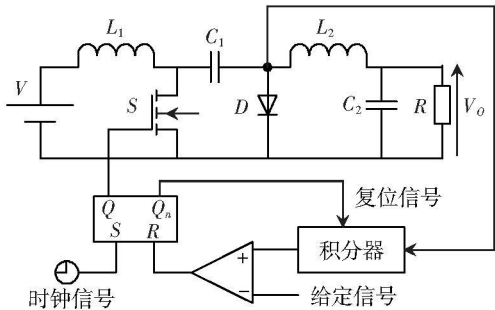


图 1 传统单周期控制的 Cuk 变换器

Fig.1 Traditional one-cycle controlled Cuk converter

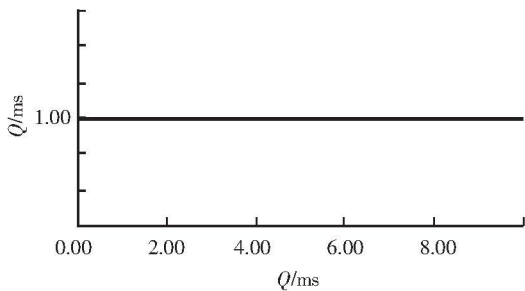


图 2 传统单周期控制方案下  $Q$  端输出

Fig.2 Output of  $Q$  terminal under traditional one-cycle control

由于上述启动问题的存在, 即能量传递电容初始电压为零, 因此为了先对其充电, 控制系统中需要加入辅助时钟. 电路上电后, 由辅助时钟对开关  $S$  进行控制, 电路处于固定占空比控制模式, 称为模式 1; 当电容  $C_1$  两端电压达到某个临界值时, 电路切换到单周期控制模式, 称为模式 2 控制模式的切换点由变换器的全局稳定性决定. 加入辅助时钟后的单周期控制 Cuk 变换器原理图如图 3 所示.

## 2 单周期控制 Cuk 变换器的全局稳定性

所谓全局稳定性, 是指系统动态特性中不存在不稳定定点或不稳定区域. 由于输入量和控制量相互独立, 所以单周期控制的开关是全局稳定的. 然而, 如果单周期控制的开关包含于一个比较复杂的系统, 使得开关的输入量受到系统中其它状态变量的影响, 那么整个系统可能并不具备全局稳定性.

图 4 为 Cuk 变换器的电路结构, 其中  $R_1$ 、 $R_2$  分别为电感  $L_1$ 、 $L_2$  的寄生电阻. 采用开关信号流图<sup>[10]</sup> (SFG) 建模方法可以得到单周期控制 Cuk 变换器的大信号模型如图 5 所示. 根据单周期控制理论, 受控制的开关能够隔离输入信号  $v_{c1}$ , 并将给定信号  $v_{ref}$  完全传递到开关输出端. 开关变量  $v_b$  的平均值及占空比的调制规律分别为:

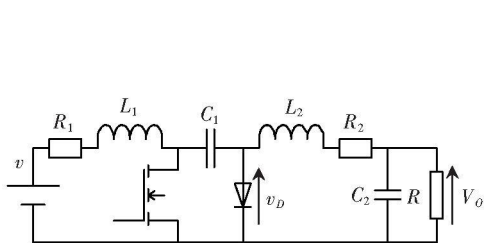


图 4 考虑电感寄生电阻的 Cuk 变换器

Fig.4 Cuk converter with consideration of parasitic resistance of inductor

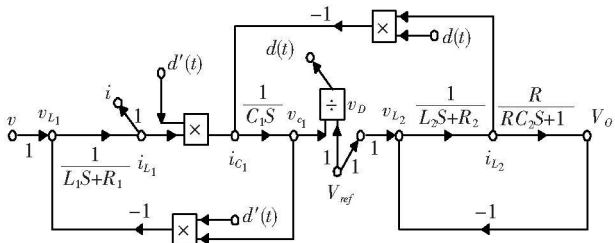


图 5 单周期控制 Cuk 变换器的大信号模型

Fig.5 Large-signal model for one-cycle controlled Cuk converter

$$v_{\text{ref}} = v_{\text{D}} = \frac{1}{T_s} \int v_{\text{C1}} dt = dv_{\text{C1}}.$$

(1)

$$d = \frac{v_{\text{ref}}}{v_{\text{C1}}}.$$

(2)

从大信号模型可以看出,受控制的开关将变换器系统分隔为前后两个闭环:前级闭环为输入环,是一个非线性二阶系统;后级闭环为输出环,是一个线性二阶系统.两环由节点  $i_{\text{L}2}$  与  $i_{\text{C}1}$  之间的通道连接,由于状态变量  $i_{\text{L}2}$  独立于输入环,因此输入环的稳定性并不受输出环动态过程的影响.从图 5 可以得到输入环的状态方程如下:

$$L_1 \frac{di_{\text{L}1}}{dt} = v - R_1 i_{\text{L}1} - d' v_{\text{C1}},$$

(3)

$$C_1 \frac{dv_{\text{C1}}}{dt} = d' i_{\text{L}1} - di_{\text{L}2},$$

(4)

$$d + d' = 1$$

(5)

根据相平面法中奇异点的求取方法,以  $v_{\text{C1}}$  和  $i_{\text{L}1}$  为状态变量,令 (3)、(4) 式左端为零,并结合 (2) 式,得到系统的两个奇异点  $P_1(V_{\text{b}}, I_1)$ 、 $P_2(V_2, I_2)$ :

$$V_1 = (v + 2v_{\text{ref}} + \sqrt{v^2 - 4v_{\text{ref}}R_1 i_{\text{L}2}})/2$$

(6)

$$V_2 = (v + 2v_{\text{ref}} - \sqrt{v^2 - 4v_{\text{ref}}R_1 i_{\text{L}2}})/2$$

(7)

根据 [11] 可知,  $P_2$  为不稳定奇异点,且只有在  $V_2 < v_{\text{C1}} < (v_{\text{ref}}/d_{\text{min}})$  时采用模式 2 控制,其他情况时采用模式 1 控制,才能使系统具备全局稳定性<sup>[11]</sup>,如图 6 所示.

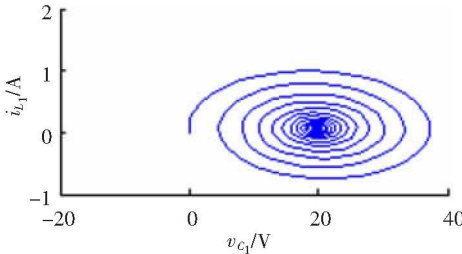


图 6 单周期控制 Cuk 变换器输入环状态轨迹  
Fig.6 State locus of input loop in one-cycle controlled Cuk converter

因此,控制模式的切换点为  $V_2$  切换逻辑表示如下:

模式 1  $v_{\text{C1}} < V_2$   $v_{\text{C1}} > (v_{\text{ref}}/d_{\text{min}})$ ,

模式 2  $V_2 < v_{\text{C1}} < (v_{\text{ref}}/d_{\text{min}})$ .

事实上,电感寄生电阻是比较小的,  $R_1$  一般在  $\text{m}\Omega$  数量级.因此 (7) 式可近似为:

$$V_2 \approx v_{\text{ref}}$$

在实际应用中,切换点设置成比参考电压略大一些即可.

经上述分析可知,从变换器全局稳定的角度考虑,需要采用分段控制的策略,这时也要用到辅助时钟,且信号的占空比为:

$$D_a = d_{\text{max}} = v_{\text{ref}}/V_2$$

所以,辅助时钟具有以下两个功能:

- (1) 保证 Cuk 变换器正常启动,
- (2) 实现固定占空比与单周期的分段控制.

3 仿真与实验

Cuk 变换器单周期控制的实现,需要采用固定占空比控制的辅助方案,以实现分段控制,从而使变换器正常启动并具备全局稳定性.当变换器运行在模式 1 时,采用线性控制方法;当变换器运行在模式 2 时,采用非线性控制方法.仿真与实验电路如图 7 所示.

3.1 仿真分析

使用电力电子专用仿真软件 PSM 6.0 对变换器系统进行仿真,仿真参数为:电源电压 12 V;  $L_1$ 、 $L_2$  分别为 3.9 mH、2.2 mH;  $C_1$ 、 $C_2$  都为 10  $\mu\text{F}$ ;  $R_L$ 、 $C_f$  分别为 10 k $\Omega$ 、5 nF;  $R$  为 100  $\Omega$ ; 开关频率为 20 kHz; 辅助时钟占

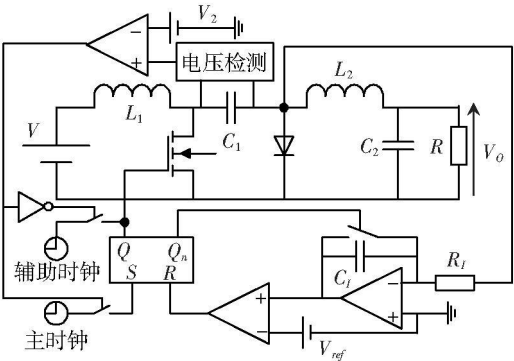


图 7 仿真与实验电路图

Fig.7 Block diagram of simulation and experiment circuit

空比为 0.8 参考电压为 8 V; 仿真过程中选取切换点  $V_2$  为 8.5 V.

图 8(a) ~ (d) 分别为积分器输出波形, 辅助时钟脉冲列, 主时钟脉冲列, 电容  $C_1$  端电压瞬态波形. 从 (b)、(c)、(d) 中可以看出, 辅助时钟帮助变换器正常启动, 电路运行在模式 1; 当电容  $C_1$  端电压达到切换点  $V_2$  时, 电路切换到模式 2 (b)、(c) 中还出现了两种控制模式共存的状态, 这主要是因为在这段共存区域内, 电容  $C_1$  端电压在切换点附近小范围内频繁波动.

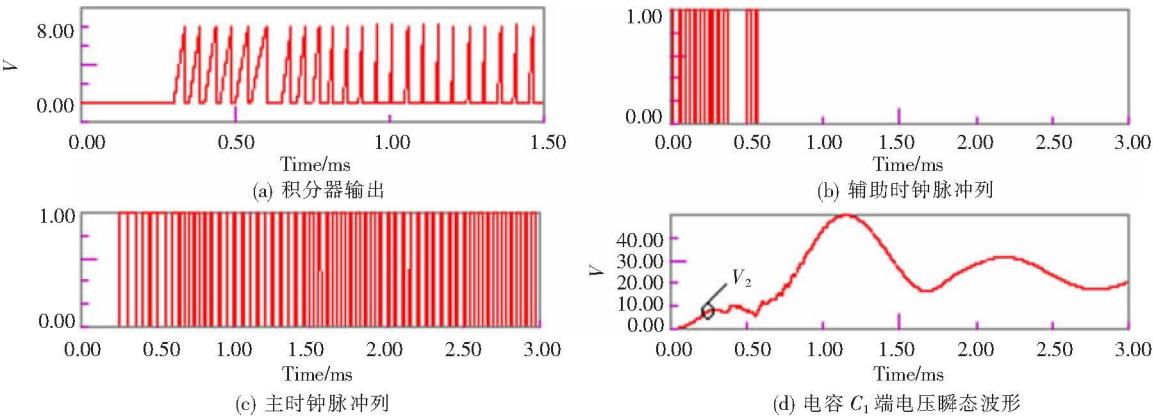


图 8 积分器输出波形, 辅助时钟及主时钟脉冲列, 电容  $C_1$  端电压瞬态波形

Fig.8 Output waveform of integrator, pulse trains of auxiliary clock and main clock, transient waveform of voltage across capacitor  $C_1$

图 9(a)、(b) 分别为负载电压波形及电容  $C_1$  端电压稳态波形. 负载电压等于参考电压 8 V, 而电容  $C_1$  端电压稳态值为 20 V, 等于电源电压与负载电压之和. 由 (b) 可以看出, 电容  $C_1$  端电压峰值约为 50 V, 假设最小占空比  $d_{min}$  限定为 0.1, 则  $(v_{ref}/d_{min})$  为 80 V, 因此一般在变换器正常工作的情况下, 模式 2 的上界切换点可不作处理.

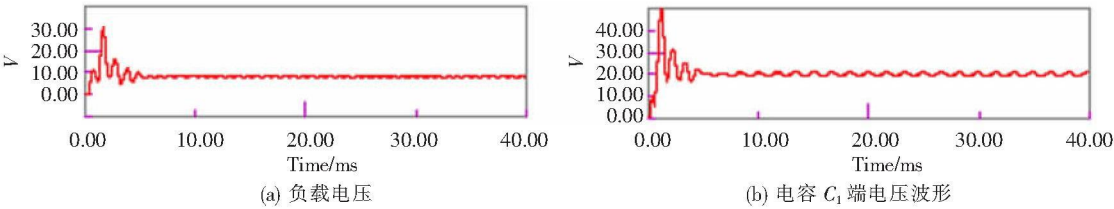


图 9 负载电压波形及电容  $C_1$  端电压波形

Fig.9 Voltage waveforms of load and capacitor  $C_1$

3.2 实验结果

将参考电压设置为 4V, 其余参数与仿真相同. 两路时钟信号由 AT89S51 单片机产生, 频率为 20 kHz, 积分器中的复位开关与两路时钟信号传输的切换开关都采用 HCF4016BE 芯片. 图 10 为积分器输出波形, 图 11 为驱动脉冲, 图 12 为电感  $L_1$ 、 $L_2$  的电流波形.

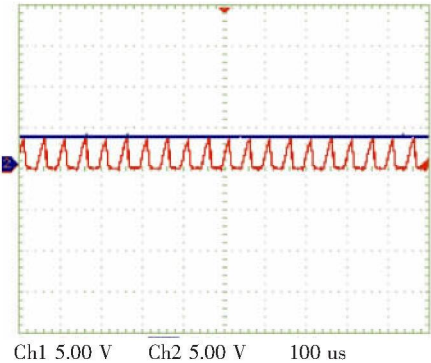


图 10 积分器输出波形与参考电压

Fig.10 Output waveform of integrator and reference voltage

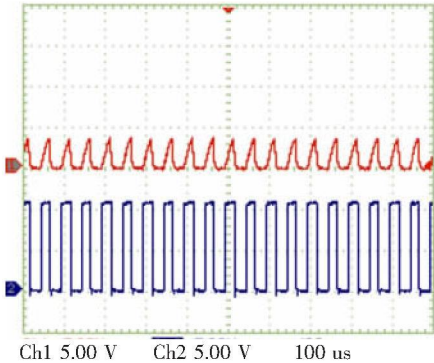


图 11 积分器输出波形与驱动脉冲

Fig.11 Output waveform of integrator and drive pulse

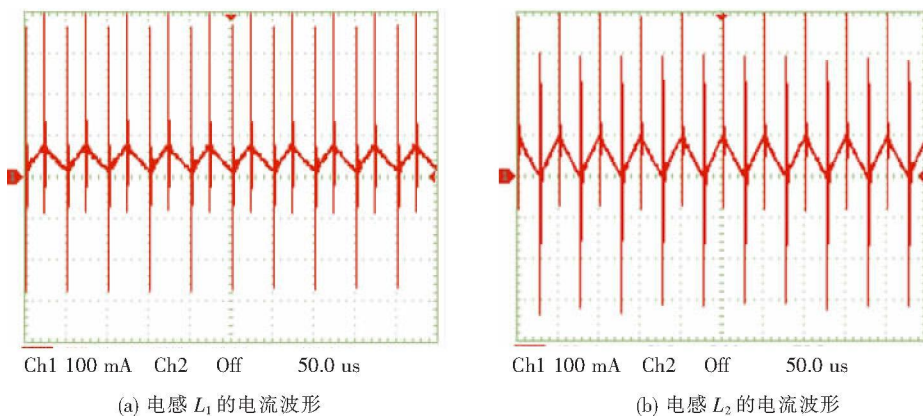


图 12 电感  $L_1$ 、 $L_2$  的电流波形

Fig.12 Current waveform of inductor  $L_1$ 、 $L_2$

## 4 结论

使用传统的单周期控制方法来控制 Cuk 变换器时, 存在电路的启动问题, 不仅使得变换器无法正常启动, 而且可能严重损坏元器件. 在控制电路中加入辅助时钟, 并结合变换器的全局稳定性选择合适的切换点, 采用固定占空比控制与单周期控制的分段控制方案, 不仅解决了变换器的启动问题, 而且使其运行时具有全局稳定性.

### [参考文献] (References)

- [1] Snedley K M, Cuk S. One-cycle control of switching converters[ J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1995, 10(6): 1173-1180.
- [2] Wang L Q, Liu Q. One-cycle controlled single phase AC chopper[ C] //IEEE IPMC' 09, Wuhan, IEEE, 2009, 1768-1771.
- [3] Lai Z R, Snedley K M. A new extension of one-cycle control and its application to switching power amplifiers[ J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1996, 11(1): 99-105.
- [4] Zhou L W, Du X, Hou S Y. A comprehensive analysis of one-cycle controlled single-phase dc side active power filter[ C] //IEEE ICIT' 05, Hongkong, IEEE, 2005, 485-490.
- [5] Wang Y B, Li J W. A novel high-performance single-phase PFC approach based on one-cycle control[ C] //IEEE IECON' 06, Paris, IEEE, 2006, 1763-1768.
- [6] Hoyo J, Alcaiz J, Calleja H. A high quality output AC/AC Cuk converter[ C] //IEEE PESC' 04, Aachen, IEEE, 2004, 2888-2893.
- [7] Knight J, Shirsavar S, Holderbaum W. An improved reliability Cuk based solar inverter with sliding mode control[ J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21(4): 1107-1115.
- [8] Kamnam U, Chunkag V. Analysis and design of a modular three-phase ac to dc converter using cuk rectifier module with nearly unity power factor and fast dynamic response[ C] //IEEE PESC' 08, Rhodes, IEEE, 2008, 1944-1950.
- [9] Fedyczak Z, Strzelecki R, Kasperk R, Skorski K. Three-phase self-commutated static VAR compensator based on Cuk converter topology[ C] //IEEE PESC' 00, Galway, IEEE, 2000, 494-499.
- [10] Snedley K M, Cuk S. Switching flow-graph nonlinear modeling technique[ J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1994, 9(4): 405-412.
- [11] Snedley K M, Cuk S. Dynamics of one-cycle controlled Cuk converters[ J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1995, 10(6): 634-639.

[责任编辑: 刘健]