

用 CUK 电路实现功率因数校正的研究

赵志伟

(南京气象学院 电子信息与应用物理系, 江苏 南京 210044)

摘要: 主要研究了在不连续电容电压(DCVM)条件下, CUK 电路的工作原理及特点。理论分析得出了 CUK 电路具有固有的功率因数校正和软关断开关特性。仿真和实验结果证明了理论分析的正确性。

关键词: CUK 变换器; 功率因数; 电压应力

中图分类号: TM 133 **文献标识码:** A

常见的交直流变换是用全桥整流电路, 后接一个大的电解电容。如果负载是感性负载而非纯阻性负载, 就会出现电压电流不同相的问题, 即功率因数小于 1。另外, 还存在着不同程度的谐波。为提高功率因数, 出现了不同类型的 DC-DC 变换电路。本文讨论的 CUK 变换器是由恒定开关频率控制的变换器, 选择合适的器件参数, 可使输入电流与输入电压保持同相, 功率因数接近于 1, 谐波失真度也得到一定控制。

1 工作原理

图 1 是 CUK 变换器原理电路。假设 L_1 和 L_2 足够大, 变换器不会进入不连续电流状态; 又假设 C 足够小, 可以完全放电。变换器不同开关阶段的等效电路见图 2, 图 3 是电容 C 在不同开关阶段的电压波形。该电路具有 3 个基本工作模式。假设在开关管 S 导通之前电容电压达到最大值, 电感 L_2 上的电流 i_{L2} 通过续流二极管 D 流向负载 R_L 。

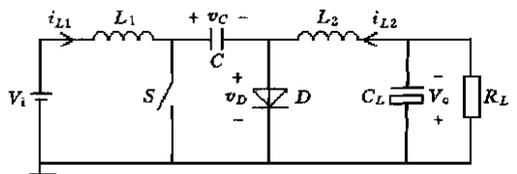


图 1 CUK 变换器原理电路

Fig. 1 The principle circuit of CUK converter

工作模式 1 ($0 \sim D_1T$): 开关周期开始, $t=0$, 开关管 S 导通, D 关断。输入电压 V_i 加在 L_1 上, 电感 L_1 励磁, 同时电容 C 上储存的能量通过开关管 S 转移到 L_2 上, C 上电压下降, 在 $t=D_1T$ 时, $v_c=0$ (图 2a)。

工作模式 2 ($D_1T \sim DT$): $t=D_1T$ 时, $v_c=0$, 二极管 D 开始导通, 电感 L_2 上电流通过 D 提供给负载 R_L , 该模式阶段 C 维持在零电压状态。 V_i 继续通过 S 给 L_1 充电 (图 2b)。

工作模式 3 ($DT \sim T$): $t=DT$ 时, 开关管 S 截止, L_1 给电容 C 充电。在 $t=T$ 时, v_c 达到最大值 (图 2c)。

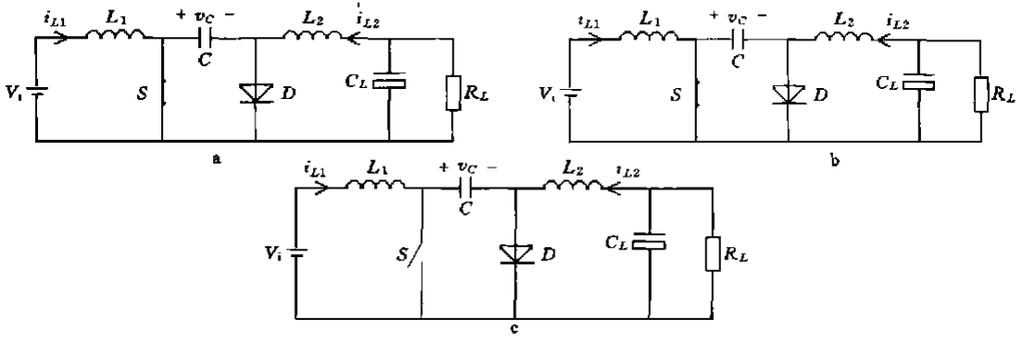


图 2 3 个工作模式的等效电路

a. 工作模式 1; b. 工作模式 2; c. 工作模式 3

Fig. 2 Equivalent circuits for the 3 operating modes

a. the first stage (mode 1); b. the second stage (mode 2); c. the third stage (mode 3)

2 直流特性

由于 L_1 、 L_2 较大, 相应的纹波电流很小, 通过 L_1 、 L_2 的电流 i_{L1} 和 i_{L2} 可用平均电流 I_{L1} 、 I_{L2} 表示。由图 3 得出

$$v_C = \begin{cases} \frac{I_{L1}(1-D)T - I_{L2}t}{C}, & 0 \leq t < D_1T; \\ 0, & D_1T \leq t < DT; \\ \frac{I_{L1}(t - DT)}{C}, & DT \leq t < T. \end{cases} \quad (1)$$

这里 T 是开关周期, D 是其占空比。又因电容 C 上释放的电应等于吸收的电, 故有

$$D_1 = \frac{I_{L1}}{I_{L2}}(1-D). \quad (2)$$

由(1)式得电容 C 和二极管 D 上的平均电压分别为

$$V_C = \frac{1}{T} \int_0^T v_C dt = \frac{1}{T} \left[\int_0^{D_1T} v_C dt + \int_{D_1T}^{DT} v_C dt + \int_{DT}^T v_C dt \right] = \frac{T}{2C} I_{L1} (1-D)(1-D+D_1); \quad (3)$$

$$V_D = \frac{1}{T} \int_0^T v_D dt = \frac{1}{T} \int_0^{D_1T} -v_C dt = -\frac{T}{2C} I_{L1} (1-D) D_1. \quad (4)$$

因此, 有

$$V_o = -V_D = \frac{T}{2C} I_{L1} (1-D) D_1; \quad (5)$$

$$V_i = V_C + V_D = \frac{T}{2C} I_{L1} (1-D)^2. \quad (6)$$

$$\text{设} \quad M = \frac{V_o}{V_i} = \frac{D_1}{1-D}. \quad (7)$$

另一方面, 由图 1, 得

$$I_{L2} = \frac{V_o}{R_L}, \quad (8)$$

由(6)式得

$$I_{L1} = \frac{2f_s C V_i}{(1-D)^2}, \quad (9)$$

由(2)、(6)、(7)式得

$$D_1 = \frac{2R_l f_s C}{2R_l f_s C}. \quad (10)$$

此处 f_s 是开关频率, $f_s = 1/T$ 。

由(9)得变换器的输入阻抗为

$$R_i = \frac{V_i}{I_{L1}} = \frac{(1-D)^2}{2f_s C}. \quad (11)$$

对于给定的占空比 D , (11) 式中的实际输入阻抗是恒定的, 且是阻性的。因此, 工作在不连续电容电压方式下的 CUK 变换器具有固有的功率因数校正能力。

工作在不连续电容电压方式的条件是

$$D_1 < D. \quad (12)$$

CUK 变换器的缺点之一是它的开关管有相对大的开通电压应力, 由式(1)知开关管电压应力 V_{stress} 等于电容电压的最大值

$$V_{\text{stress}} = \frac{I_{L1}}{C}(1-D)T = \frac{2}{1-D}V_i. \quad (13)$$

由上式也看出, 开关管的电压应力与负载无关。

3 设计依据

经过桥式整流后的输入电压为(图4)

$$V_i = V_m \sin 2ft. \quad (14)$$

此处 V_m 为交流输入电压的幅值, f 为其频率。

(1) 输入、输出电压之间的关系。半个交流电压周期的输入能量 E_i 为

$$E_i = \int_0^{\frac{T}{2}} V_i I_{L1} dt. \quad (15)$$

由式(9)、(14)、(15)式得

$$E_i = \int_0^{\frac{T}{2}} \frac{2f_s C V_i^2}{(1-D)^2} dt = \frac{f_s C V_m^2}{2f(1-D)^2}. \quad (16)$$

另一方面, 在相同的半个周期里传送到负载的能量为

$$E_o = \frac{T_{in} V_o^2}{2R_L}. \quad (17)$$

式中 T_{in} 为交流输入电压的周期。

由于输出端有大的电解电容 C_L , 可认为输出电压 V_o 是不变的。忽略电路内部功耗, 结合式(16)和(17), 理想情况下的输出电压 V_o 为

$$V_o = \frac{D_1}{1-D} \frac{V_m}{2} = M V_{\text{rms}}. \quad (18)$$

式中的 V_{rms} , 指输入电压的有效值。

(2) 电容 C 的选择。为保证变换器工作在不连续电容电压状态, 必须满足不等式(12), 即

$$\frac{2R_l f_s C}{2R_l f_s C} < D \quad C < \frac{D^2}{2R_l f_s}. \quad (19)$$

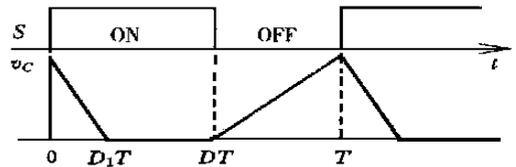


图3 不同开关阶段的电容电压波形

Fig. 3 Capacitor's voltage at different switch stages

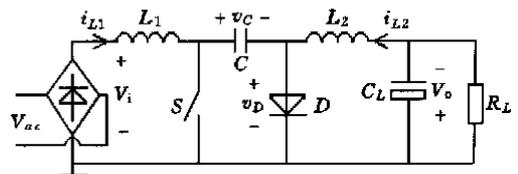


图4 CUK 变换器和桥式整流电路

Fig. 4 Experiment circuit

结合(10)、(12)式,知 C 较小时,电路易工作在 DCVM 状态。另外,负载越小,也越易满足 DCVM。

(3) 电感 L_1 和 L_2 的选择。电感 L_1 在交流电压下会产生一定的感抗。但若 L_1 不是特别大,对变换器的功率因数就没有什么影响。另一方面, L_1 和 L_2 应取得大一些,以满足平滑开关频率作用下的变换器输出低纹波电流的要求。

因此,要求输入电阻大于由 L_1 产生的感抗,而且由 L_1C 和 L_2C 回路构成的固有频率应小于电路的开关频率。亦即

$$2 L_1 f > R_i; \quad \frac{1}{L_1 C L} > f_s^2; \quad \frac{1}{L_2 C L} > f_s^2。$$

(4) 开关器件的选择。从(13)和(19)可以看出,开关管承受的电压应力与输入电压及开关频率的占空比 D 有关。 D 较小时,电压应力小,但 I_{L1} 也减小,其感抗 L_1 增大,导致功率因数降低。因此,要选择一合适的 D ,以兼顾电压应力和功率因数的要求。

4 仿真结果

基于上述设计规则,选定开关频率 $f_s = 22$ kHz,占空比 $D = 0.40$,负载电阻 $R_L = 20 \Omega$,输入电压 $V_i = 150 \sin(100t)$ (频率 $f = 50$ Hz), $L_1 = 2.7$ mH, $L_2 = 800 \mu$ H, $C = 0.01$ F, $C_L = 5000$ F。这些参数保证了变换器工作在 DCVM 状态。开关管选用了 IRFP450,二极管 D 选用 MUR820。对图 4 所示的电路仿真结果见图 5、图 6(用 pspice 5.0 仿真软件)。

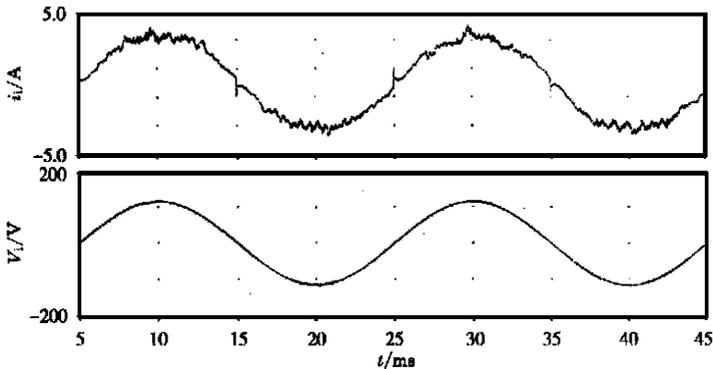


图 5 输入电压 V_i 、输入电流 i_i 的仿真波形

Fig. 5 Input voltage and current resulted from simulation

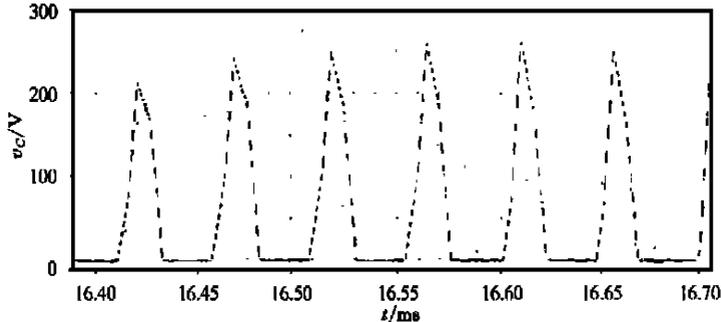


图 6 电容电压 v_c 的仿真波形

Fig. 6 Capacitor's voltage resulted from simulation

由图 5、图 6 可见, 输入电压和电流完全同相, 电容 C 上的电压 v_c 工作在 DCVM 状态。

图 7 示出了不同输入电压条件下的功率因数(PF)及总谐波失真度(THD)的仿真结果。

在 50 ~ 200 V 的输入电压范围内, 功率因数均达 99 %, 而谐波失真度均小于 8 %, 亦即 CUK 电路的高功率因数及低 THD 有一个相当宽的输入电压范围。

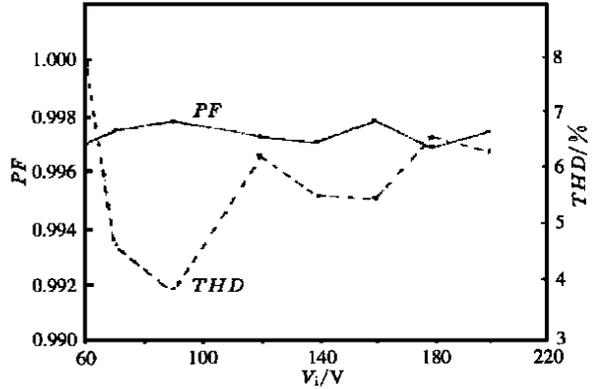


图 7 输入电压和电流的 PF 及 THD 关系曲线

Fig. 7 PF and THD as a function of input voltage resulted from simulation

5 实验结果

在一实验装置上对 CUK 变换器的性能进行了测试。CUK 变换器位于全桥整流电路与感性负载之间。

图 8 所示的是未加 CUK 变换器时的输入交流电压经全桥整流后实测的电流电压波形, 取样电阻为 0.1 Ω 。从图上可以看出, 电流滞后电压约 35 $^\circ$ 。图 9 是加了 CUK 变换器后在同一测试点得到的输入电压和电流波形。与仿真结果基本相同, 功率因数接近于 1。

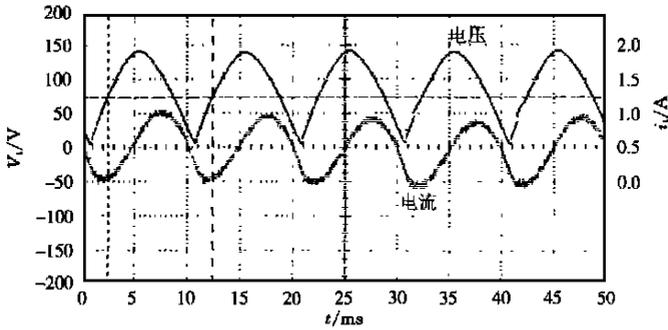


图 8 未加 CUK 电路时输入电压电流的波形

Fig. 8 Input voltage and current resulted from experiment without CUK converter

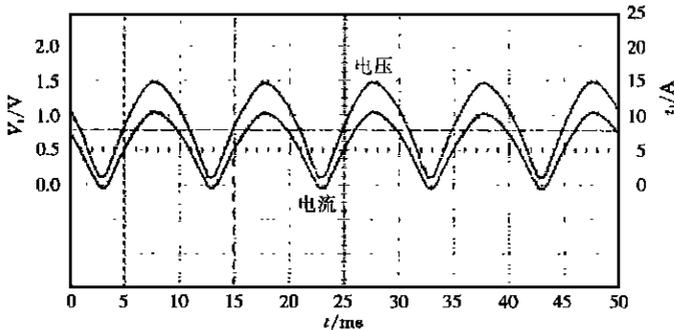


图 9 实测输入电压电流的波形

Fig. 9 Input voltage and current resulted from experiment after adding CUK converter

图 10 示出了 CUK 变换器工作时开关管所承受的电压 v_{ds} 和驱动电压 v_{gs} 波形。可以看出, 当驱动电压降为低电平时, 开关管不是立即关断, 而是进入软关断状态, 关断损耗很小。但是开

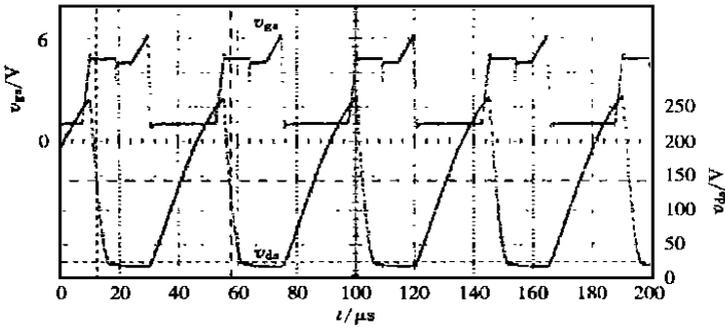


图 10 开关管承受的电压 v_{ds} 和驱动电压 v_{gs} 波形

Fig. 10 Power device's switch waves

关管承受了较高的开通电压, 开通损耗相对比较大。

6 结 论

(1) CUK 电路具有固有的功率因数校正能力。特别是在深度 DCVM 工作方式下, 功率因数十分接近于 1。

(2) 具有软关断的开关特性, 因此可望解决少子载流器件(诸如 IGBT 之类)关断时所造成的功耗。

(3) 该电路具有较低的开关电流应力和低的电流纹波, 适合于要求低电压、大电流且电流纹波较小的场合。

参 考 文 献

- [1] 荷希才. 新型开关电源及其应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1997.
- [2] 叶治政. 开关稳压电源[M]. 北京: 高等教育出版社, 1989.
- [3] Lin B, Lee Y S. Power-factor correction CUK converter in discontinuous-capacitor-voltage mode operation[R]. IEEE transaction on industrial electronics, 1997, 44(5): 648 ~ 653.

A Study of Power-Factor Correction Using CUK Converter

Zhao Zhiwei

(Department of Electronic Information and Applied Physics, NIM, Nanjing 210044)

Abstract: The working principle and characteristics of CUK converter in discontinuous-capacitor-voltage mode are studied. Theoretical analysis shows that the CUK circuit has inherently the features of power-factor correction and soft turn-off switching. Results from simulation and experiment are reported to support the theoretical analysis.

Key words: CUK converter, power factor, voltage stress