

Cuk型光伏发电直流变换器的仿真研究

文/国网宁夏电力公司宁东供电公司 邵李斌 吕琨璐
山东科技大学 李承振

信息电子技术与电力电子技术的进步,给电力电子器件创造了巨大发展空间,同时也推动了开关电源技术的进步。DC-DC变换器广泛用于通信、计算机及手机等电子设备的开关电源,而Buck电路和Boost电路是直流斩波电路最基本的两种拓扑结构,基于这两种电路组合而成的升降压斩波电路虽可以升压亦可以降压,但因输入输出电流不连续及存在的纹波成分较高而使得变换器的效率较低。新型的Cuk变换器是基于Cuk电路演变而来,其输入输出关系与升降压完全相同,突出优点是输入输出电流较平滑,有效降低了纹波,降低了对滤波电路的要求,非常适合应用到光伏发电系统和蓄电池充电控制系统中。

Cuk型变换器的工作原理

Cuk变换器是一种输出电压可大于或小于输入电压的单管非隔离直流变换器。其主电路如图1所示,Cuk变换器的主电路由全控型器件IGBT开关、电感 L 、电容 C 、负载电阻 R 及二极管构成。 E 为输入直流电压, U_o 为输出直流电压

1. 工作过程分析

当斩波开关 T 导通时, $E-L_1-T$ 和 $R-L_2-C_1-T$ 回路分别流过电流,输入端 E 向电感 L_1 提供能量,电容 C_2 上的电压使二极管

VD 反偏截止,电容 C_1 向负载和 L_2 提供能量,负载获得反极性的能量,该电路的等效电路如图2(a)所示;斩波开关 T 断开时 $E-L_1-C_1-VD$ 和 $R-L_2-VD$ 回路分别流过电流,电感 L_1 的感应电动势

改变方向,电源和电感 L_1 联合对电容 C_1 充电,二极管 VD 正偏而导通,在此期间 L_2 经 VD 向负载释放能量。该电路的等效电路如图2(b)所示,相当于开关 T 在电容 C_1 两边交替切换。

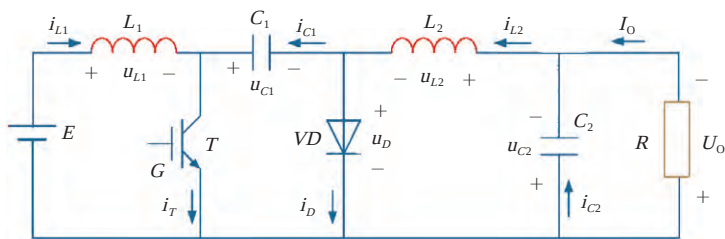
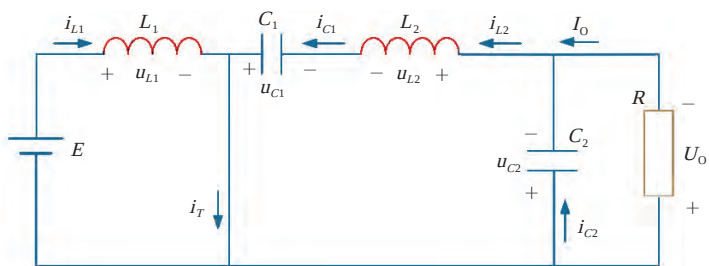
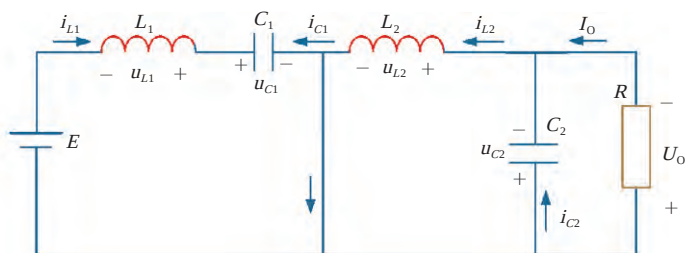


图1 Cuk斩波电路的拓扑结构图



(a) T导通VD截止



(b) VD导通T截止

图2 连续导电模式Cuk斩波电路等效图

2. Cuk 斩波电路连续导电模式下的电压和电流波形

如图3所示。

3. 主要参数的基本数量关系

由流过二极管VD的电流是否连续, Cuk 变换器的工作模式有

三种: 连续导电模式、断续导电模式及临界连续导电模式。为计算分析方便, 假设所有的开关器件为理想开关, 无功率损耗, 输入功率和输出功率相等; 电容C的值很大, 使得电压的脉动很小。

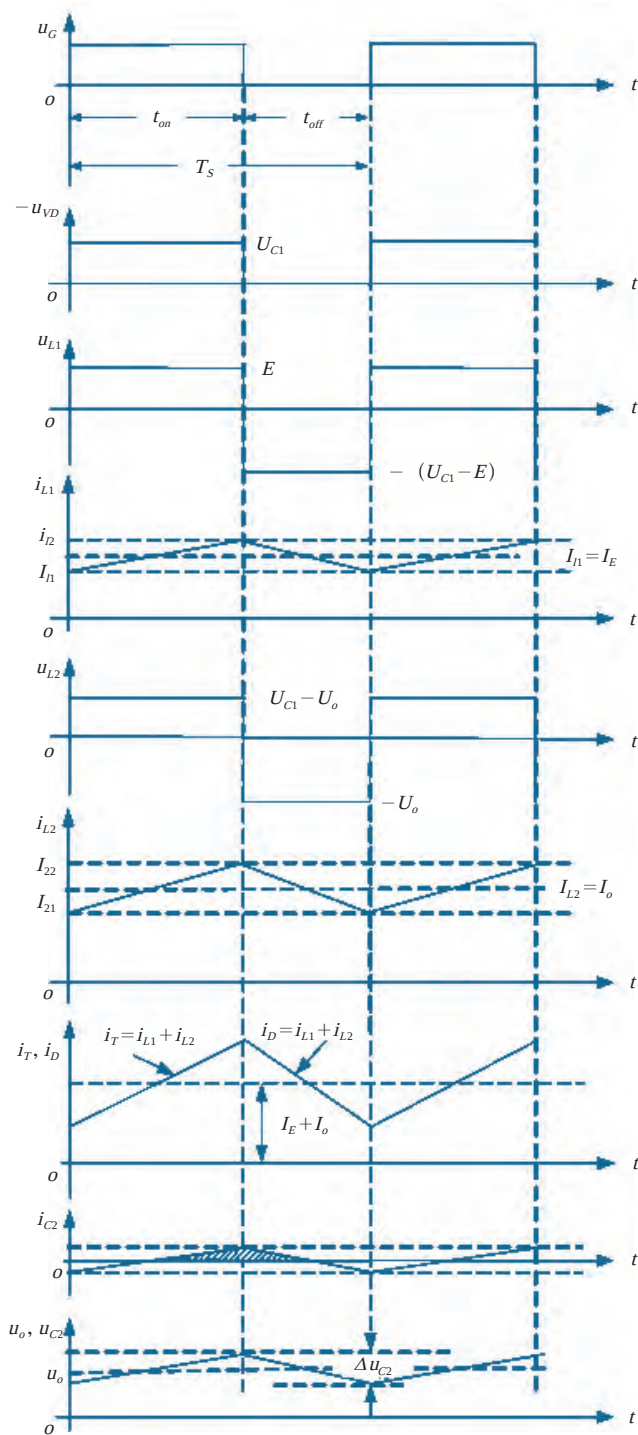


图3 Cuk斩波电路的工作波形图

在稳态时, 由于电容C1上的电压保持不变, 且为 U_{C1} , 则电感 L_1 和 L_2 的电压在一周期内的积分等于零。

由图3波形可知, 在 t_{on} 期间 $U_{L1} = E$; 在 t_{off} 期间 $U_{L1} = E - U_{C1}$, 因而对电感 L_1 有

$$EDT_s + (E - U_{C1})(1 - D)T_s = 0$$

可得

$$\frac{D}{1 - D} = \frac{U_{C1} - E}{E}$$

对电感 L_2 , 在 t_{on} 期间 $U_{L2} = U_{C1} - U_o$; 在 t_{off} 期间 $U_{L2} = -U_o$, 同样有

$$(U_{C1} - U_o)DT_s + (-U_o)(1 - D)T_s = 0$$

$$\frac{D}{1 - D} = \frac{U_o}{U_{C1} - U_o}$$

$$U_{C1} = \frac{1}{D} U_o$$

由上面两个电压关系式得

$$U_o = \frac{D}{1 - D} E$$

假设电路所有元件无损耗, 根据功率守恒定则, 则有 $P_E = P_o$ 或 $E I_E = U_o I_o$, 则

$$I_o = \frac{D}{1 - D} I_E$$

虽然输出电压的极性与电源电压极性相反。这一输入输出关系与升降压斩波电路完全相同, 但Cuk电路的明显优点是其输入电源电流和输出负载电流都是连续的, 没有阶跃变化, 有利于对输入输出进行滤波。

Cuk 型变换器的仿真

Simulink 是Matlab 的一个最强大的工具箱之一, 它提供了一个建立模型方块图的图形用户接口, 这

个创建过程只需单击和拖动鼠标操作就能完成，SimPowerSystems 为 Matlab/Simulink 下电力系统仿真模块集，它可以满足电路、电工、电

子的仿真。根据Cuk变换器的主电路，建立仿真模型如图4所示。

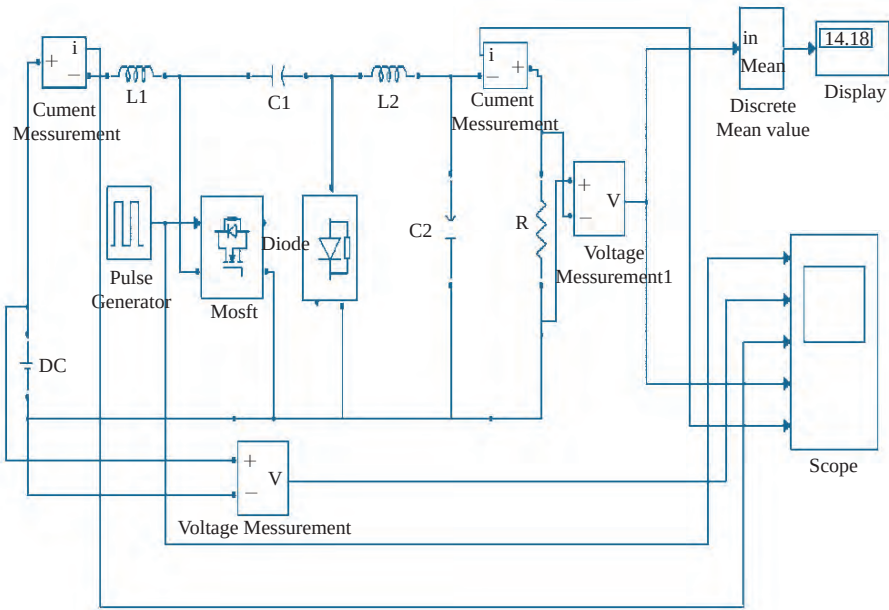


图4 Cuk 型变换器的仿真模型图形

1. Cuk电路模型参数选择
本次设计的Cuk直流变换器是应用到反恐排爆机器人的光伏发电系统中，所以相关参数应该符合太阳能电池板和机器人使用要求，具体详见如表1所示。
结合上面技术要求并依据相关公式可计算出主要元器件参数如下：输入电压DC用来模拟光伏组件输出电压，开关器件

选择MOSFET，电感 $L_1 = 1.125 \times 10^{-2} \text{H}$ ，电感 $L_2 = 3.75 \times 10^{-3} \text{H}$ ，电容 $C_1 = 2.94 \times 10^{-3} \text{F}$ ，电容 $C_2 = 2.94 \times 10^{-4} \text{F}$ ，电容 $C_2 = 1 \times 10^{-6} \text{F}$ ，负载电阻设定 $R = 10 \Omega$ 比较合适，各器件其他参数采用默认值，触发频率 $f = 50 \text{ kHz}$ ，仿真时间设定为 0.3 s ，仿真算法选用采用变步长模式中的ode23tb。

2. 具体仿真实验参数设置
本论文选择3组有代表的实验值进行Cuk电路的理论验证和结果修正。
(1) 占空比 $D = 0.375$ ，输入电压 $E = 25$ 时，实现降压变换。
(2)占空比 $D = 0.5$ ，输入电压 $E = 15$ 时，实现稳压变换。
(3)占空比 $D = 0.625$ ，输入电压 $E = 15$ 时，实现升压变换。
试验结果如表2所示。

表1 相关参数

输入电压/V	5-30
输出电压/V	10-30
输入电流/A	≤ 3.2
输出电流/A	0.02-6
输出纹波电压	$1\%U_o$

表2 试验结果

组别	占空比D	输入电压/V	输入电压/V (理论值)	输出电压/V (仿真结果)	输出电压误差 (%)
1	0.375	25	15	13.57	10.54
2	0.5	15	15	13.78	8.85
3	0.625	15	25	23.22	7.67

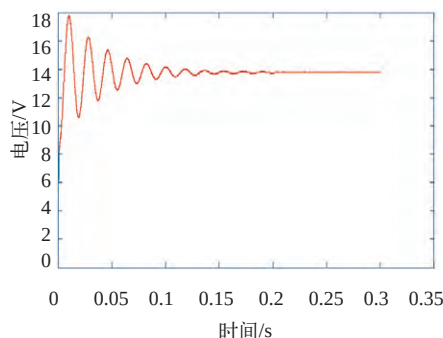
Matlab 仿真波形如下图5所示。

3. 仿真结果分析及结果修正

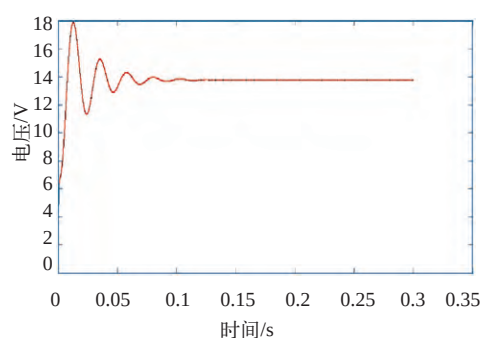
由以上波形图可知，一方面，

Cuk电路其输入电源电流和输出负载电流都是连续的，且脉动很小，验证了理论分析的正确性；另一方面，

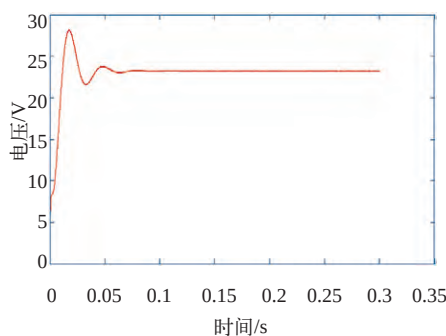
在推导 C_{UK} 电路的输出电压计算公式时，我们将各器件和电路设定为理想器件和理想电路致使其输出电压和理



(a) 组别1仿真结果



(b) 组别2仿真结果



(c) 组别3仿真结果

图5 Matlab仿真波形

论计算电压之间误差还是比较大的。

针对仿真结果误差，可增加一个闭环反馈控制环节，采集 C_{UK} 变换器的输出电压与设定值进行比较，将其差值送到PID调节器进行整定，然后输出一个控制信号，来改变占空比从而改

变输出电压，使其达到理论设定值。

结束语

本文在分析Cuk变换器的基础上，推导了主要参数的数量关系，通过建立Cuk变换器的Simulink仿

真模型，由仿真图形直观地验证了Cuk变换器的性能优于基本的升降压斩波电路，验证了Cuk变换器的输出输入电压关系基本与理论一致，但同时也存在较大误差，并提出了实用性强的解决办法。EA

(上接第51页)

电压波动和闪变》中明确规定，对于35 kV出线的光伏电站而言，其一旦接入电网后，则应分别以2 h、0.11作为长时闪变测量周期与测试值，本研究中的某光伏电站已达到该项要求。

4. 电压不平衡度分析

光伏电站一旦接入电网，其公共连接点位置处的电压不平衡度必须小于《GB/T15543-2008电能质量三相电压不平衡》中所规定的范围值（电压不平衡度小于2%），

本研究中，按照相关规定及操作流程对某光伏电站进行35 kV出线三相电压不平衡度的测试后，发现其测试值为0.2，也已符合要求。

5. 功率分析

由于日夜温差及季候变化等自然因素的影响，光伏发电极易产生较强的输出功率随机波动现象，即随着温度特性、太阳辐射量以及灰尘损失等因素的变化而变化，从而无法有效保证发电稳定性。在对某光伏电站进行实时测试的当

天，天气晴朗，高温（达37℃），风向为124.78°，最大光照度则为200LUX左右，若从功率曲线观察，则不难发现，在晴朗天气下，发电功率可随日照强度的变化而变化，且呈单峰曲线的形状，且在10:00~14:00时间段内达到峰值，当无光照时，输出功率基本为0。由于在本研究中，某光伏电站的输出功率属于纯有功功率，功率因素为恒定系数1，因此，其并不具备功率调节能力。EA