

# 开关电容矩阵DC/DC变换器

钟洪声\*

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

**【摘要】**提出了一种利用开关电容矩阵来实现DC/DC变换的新方法,其过程是将组合开关电容单元排列为一个 $M \times N$ 的矩阵 $SC(M, N)$ ,用一组时序信号控制组合开关,使其工作于充、放电两种状态:充电期输入电压沿矩阵的行充电;放电期矩阵转置,电容上的储能沿矩阵的列向负载放电,实现了电压的变换。设计了一个 $SC(2, 3)$ 的矩阵变换器电路,并进行了理论分析和仿真。

**关键词** 开关电容; 矩阵; 变换器; 仿真

中图分类号 TM464 文献标识码 A

## DC/DC Converter with Matrix of Switched-Capacitors

Zhong Hongsheng

(College of Electronic Engineering, UEST of China Chengdu 610054)

**Abstract** A new method about DC/DC converter with the matrix of switched-capacitors was present in this paper. The method was a matrix  $SC(M, N)$  arrayed  $M \times N$  the group of switches and the capacitors. A clock controls the switches, and it only works in two states. In charging, input voltage  $U_g$  charge to the capacitors along the  $M$  rows. In discharging, the matrix has rotated, and the energy of the capacitors discharge to the load along the  $N$  ranks. So the voltage was been converted. A matrix  $SC(2, 3)$  of circuit was given and analyzed and simulated in the paper.

**Key words** switched-capacitor; matrix; converter; simulation

随着电子技术的进步,对小型化要求越来越高,故提出了功率集成,把开关电容逐步应用到了功率电子电路中。文献[1]提出了一种环形结构的开关电容DC/DC变换器,文献[2]讨论了一种开关电容DC/DC变换器的CMOS设计技术,文献[3]讨论了开关电容DC/DC变换器的谐振驱动问题,文献[4]对开关电容DC/DC变换器进行了理论分析,文献[5]提出了等效电量关系法,文献[6]提出和介绍了部分开关电容的基本结构和方案,本文则提出了一种利用开关电容矩阵来实现DC/DC变换的新方法。

### 1 开关电容矩阵变换器的工作原理

一个 $M \times N$ 的开关电容矩阵如图1所示,它是由1个电容和4个开关组合成一个开关电容单元,并由 $M \times N$ 个开关电容单元构成一个 $M$ 行, $N$ 列排列的开关电容矩阵,文中用符号 $SC(M, N)$ 来表达。

为了简化电路模型,先假设所有的开关是理想的,即开关导通时,导通电阻为 $0 \Omega$ ,等效短路;开关关断时,导通电阻为无穷大,等效开路。另外,矩阵内所有单元的电容完全相等,令其为 $C$ 。

开关阵列由一个同步时钟信号控制,电路仅工作在充电期和放电期两种状态,充、放电电路等效图如图2所示。充电期所有纵向开关导通,横向开关关断,如图2a所示,从图形来看,此时矩阵内所有电容处

2002年7月4日收稿

\* 男 41岁 副教授 硕士 主要从事电路与系统方面的研究

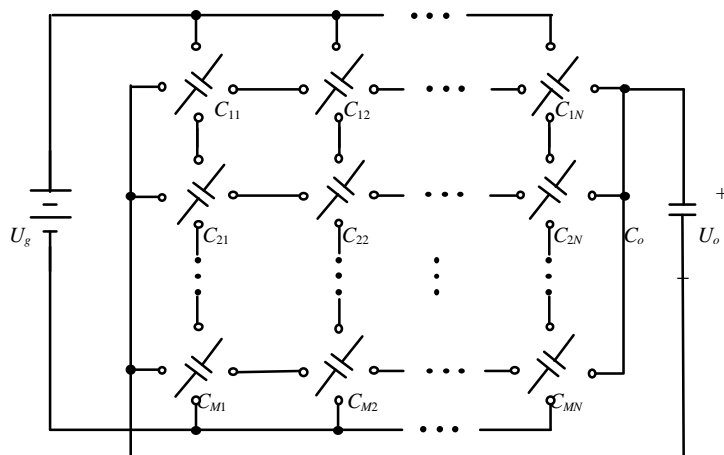


图1 开关电容矩阵工作原理图

于纵向，输入电压  $U_g$  对矩阵内所有电容充电。这时，输入总电容是

$$C_{s1} = \frac{N}{M} C \quad (1)$$

设输入回路的等效电阻(主要是输入电源的内阻)为  $R_s$ ，可得时间常数

$$t_1 = R_s \frac{N}{M} C \quad (2)$$

由于所有电容是相等的，故每个电容充电的速率也相等，为

$$U_c = \frac{U_g}{M} \left( 1 - \exp \frac{t}{t_1} \right) \quad (3)$$

当进入稳态，每个电容上的电压为  $U_c = U_g/M$ ，即输入电压的  $M$  分之一。

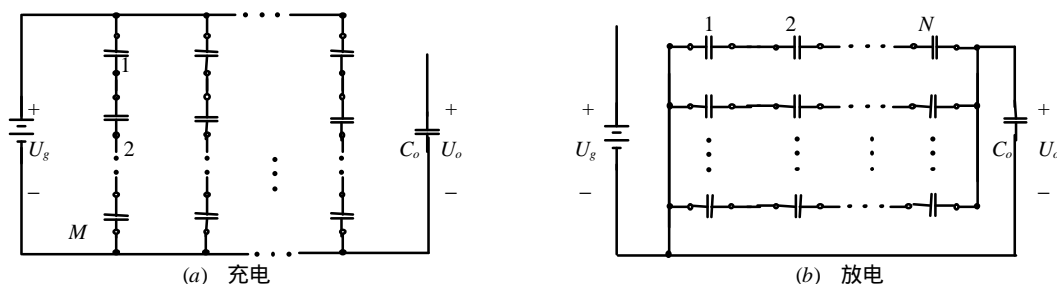


图2 充、放电电路等效图

放电期，所有横向开关导通，纵向开关关断，如图2b所示，从图形看，矩阵内所有电容顺时针转  $90^\circ$ ，处于横向状态。此时电容中储存的能量向输出电容  $C_o$  释放，设负载空载，输出电容  $C_o$  上的电压  $U_o$  不断上升直到与矩阵内等效输出电容  $C_{s2}$  上的电压值保持平衡。此时，输出等效电容为

$$C_{s2} = \frac{M}{N} C \quad (4)$$

输出电容的电压稳态值

$$U_o = N U_c(0) = N \frac{U_g}{M} \quad (5)$$

因此，可得

$$\frac{U_o}{U_g} = \frac{N}{M} \quad (6)$$

空载时，其电压传输比由式(6)确定。从理论上讲，该变换器也可逆向变换，即输入、输出置换，仍可

得式(6)结果, 因此该电路也可被视为直流变压器。

## 2 实例电路分析

设计一个 $SC(2, 3)$ , 即 $M=2, N=3$ 的开关电容矩阵, 具体电路由图3所示。它是由6个单元构成(由于单元之间某些开关功能重叠, 可省略简化), 其开关MOS管的驱动由时钟信号控制, 两路时钟信号如图4所示。上路控制所有纵向的MOS管, 当高电平时, 所有纵向MOS管导通, 即为充电期。下一路控制所有横向的MOS管, 与第一路控制信号互补, 转换期保留一定死区时间, 当下路控制信号高电平时, 所有横向的MOS管导通, 即为放电期。其工作过程可分为以下4个时区:

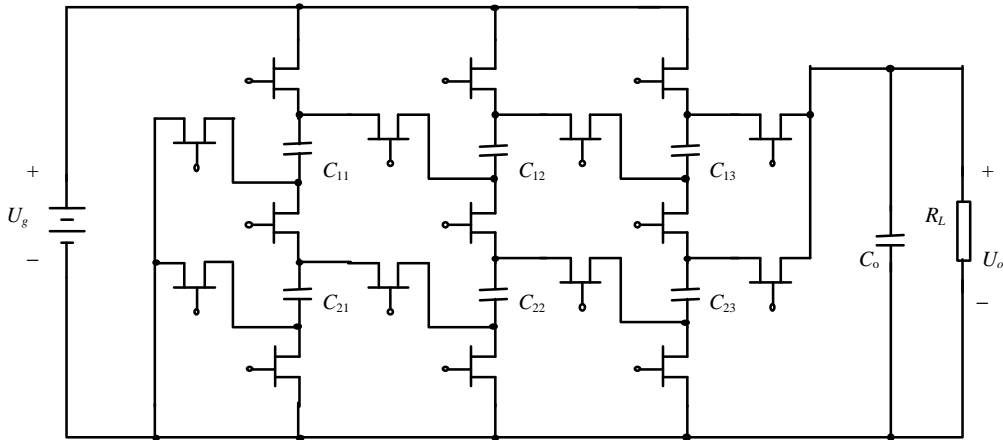


图3  $SC(2, 3)$ 开关电容矩阵实际仿真电路模型

充电期:  $t_1 < t < t_2$ , 所有纵向MOS管导通, 输入电压与开关电容矩阵构成一个充电回路, 所有电容相等, 当电路进入稳态时, 每个电容上的电压均被充满, 等于  $U_g / M$ 。设输入电压是6 V, 此时每个电容上的电压是3 V。

过度区1:  $t_2 < t < t_3$ , 所有MOS管关闭, 因电容的储能特性, 每个电容上电压保持不变, 仍为3 V。

放电期:  $t_3 < t < t_4$ , 所有横向的MOS管导通, 矩阵内所有电容同时将储能向输出电容 $C_o$ 释放。输出电容将被逐步充满, 直到与放电期的矩阵电容上等效电压平衡, 在负载很大时, 可达到9 V。

过度区2:  $t_4 < t < t_5$ , 所有MOS管关闭状态, 等待下一个重复周期。

以上4个状态为一个周期, 不断循环, 如果空载, 即 $R_L$ 是无穷大, 由式(6)可知, 当输入直流6 V时, 可得到输出电压直流9 V。但是, 实际电路中由于负载 $R_L$ 的存在, 输出电压要低于理论值。

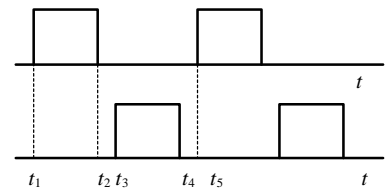


图4 控制时钟信

## 3 实例电路的仿真及分析

图3所示的 $SC(2, 3)$ 开关电容矩阵电路模型, 其主要电路参数是: 单元电容 $C = 3.3 \mu\text{F}$ , 输出电容 $C_o = 10 \mu\text{F}$ , 开关工作频率是50 kHz, 固定占空比 $D = 0.5$ 。取不同的负载 $R_L$ 送入计算机仿真, 仿真软件是orCAD9.0版。设输入电压 $U_g$ 为6 V, 仿真结果, 输出电压 $U_o$ 并没有达到式(6)的理论值9 V, 而是在不同的负载条件下, 输出稳态电压不同, 均低于空载电压9 V, 分析结果如表1所示, 瞬态分析仿真结果如图5所示。可以看出, 当输出电阻 $R_L$ 为30  $\Omega$ 时, 输出电压 $U_o$ 稳态值只能达到6.2 V。所以这种开关电容矩阵电路实际上相当于是一个直流变压器, 输出电压随负载 $R_L$ 的变化而变化。要实现输出稳压可以在输出端外加一个三端稳压器或通过反馈, 控制其占空比或开关频率。

表1 SC(3,2)开关电容矩阵电路相关分析结果

负载 $R_L/\Omega$	输出电压 $U_o/V$	输出功率 $P_i/W$	输入功率 $P_o/W$	转换效率 $\eta/(\%)$
90	7.8	0.68	0.75	90.6
60	7.4	0.91	1.03	88.3
30	6.2	1.28	1.59	80.5

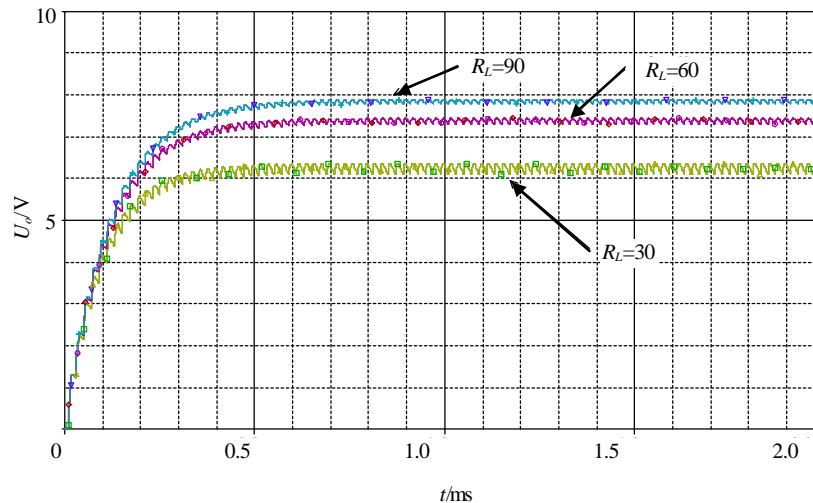


图5 计算机仿真SC(3,2)的输出电压瞬态值

## 4 结束语

本文提出的变换方式不需要传统的磁性元件,不必先将电场能转换到磁场能,因此能流密度高,同时纯开关和电容不损耗能量,故效率高。通过实例分析可知其转换效率可达90%以上。电路结构中开关应用比较多,其整体电路比较复杂,但是每个单元电路可由1个电容和4个开关组合,再由多个单元线性排列组合成矩阵结构,从理论上分析只要设计好单元电路,整个矩阵电路可视为逐一简单复制,特别适合集成电路的设计与工艺。因此,该电路完全集成在一块芯片上是有可能的。

对于这种单片的产品,如果设计为固定的时钟开关,不对其能流进行控制,可视为一个直流变压器。如果设计反馈控制电路,控制占空比或开关工作频率,可容易实现输出稳压。由于开关电容的脉动电流比较大,功率增大会导致效率快速下降,加上集成芯片中电容值较难做大,因此目前开关电容变换器只能应用在较小的功率领域。

## 参 考 文 献

- 1 Noriaki H, Ichirou O, Fumio U. A New ring type switched-capacitors DC-DC converter with low inrush current and low ripple[C]. IEEE PESC, 1998, 1 536-1 542
- 2 Dragan M, Sandeep D. Switched-capacitor DC-DC converters for low-power on chip applications[C]. IEEE PESC, 1999, 54-59
- 3 Brede A, Dragan M. Switched-capacitor DC/DC converters with resonant gate drive[C]. IEEE Transactions on Power Electronics. 1998, 13(5): 892-901
- 4 Marek S M, Dragan M. Performance limits of switched-capacitors DC/DC converters[C]. IEEE PESC, 1995, 1 215-1 221
- 5 刘 健, 陈治明, 钟彦儒. 开关电容DC-DC变换器的分析[J]. 电子学报, 1997, 25(2): 83-85
- 6 王淑亭. 利用电容实现DC/DC变换的研究[J]. 北京轻工业学院学报, 1994, 12(2): 59-64