基于开关电容网络的 DC-DC 变换器

侯世英[1],陈剑飞[1],孙韬[1],王俪蓉[2],王玉峰[2]
（1. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室　重庆　400044;2. 国网重庆市电力公司市区供电分公司　重庆　400015）

摘要　在现有的 DC-DC 变换器中，Buck、Boost 及双向变换器的升降压能力有限，在一定程度上限制了其适用范围。本文提出一种升压型开关电容网络和一种降压型开关电容网络，并在此基础上推演出一系列 DC-DC 变换器：单级升压变换器、单级降压变换器、双向升降压变换器、多输入升压变换器和多级降压变换器。给出了这五类变换器拓扑的推演过程，详细分析了其工作原理，并通过仿真研究证明了理论分析的正确性。

关键词：DC-DC　开关电容　升压　降压
中图分类号：TM464

DC-DC Converters Based on Switched-Capacitor Network

Hou Shiying[1]*,Chen Jianfei*[1]*,Sun Tao*[1] *,Wang Lirong*[2] *,Wang Yufeng*[2]
（1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology Chongqing University　Chongqing　400044　China;2. State Grid Chongqing Electric Power Company Urban Power Supply Branch　Chongqing　400015　China）

Abstract　In existing DC-DC converters, the step-up/step-down capacity of Buck, Boost, and bidirectional converters is limited, which greatly reduces their application sphere. A step-up-protype switched-capacitor network and a step-down-protype switched-capacitor network are proposed in the paper. Thus, a series of DC-DC converters are put forward based on them: the single-stage step-up converter, the single-stage step-down converter, bidirectional step-up/step-down converter, the multi-input step-up converter and the multi-stage step-down converter. Derivation processes of these five converter topologies are presented and corresponding operating principles of them are analysised in detail. Simulation and researches are provided to verify the correctness of the proposed converters.

Keywords：DC-DC, switched-capacitor, step-up, step-down

1　引言

DC-DC 变换器从诞生以来，一直备受电力电子界的青睐，广泛应用于[1]蓄电池充电器、开关电源、不间断供电电源、航空航天、电动汽车和光伏发电、风力发电、燃料电池发电等应用领域[1-6]。按照 DC-DC 变换器中有无变压器来划分，可将 DC-DC 变换器分为隔离型和非隔离型。在非隔离型 DC-DC 变换器中，从最基本的 Buck、Boost、Buck- Boost、Buck/Boost 双向变换器拓扑结构被提出后，专家学者们在此基础上相继派生出了多种 DC-DC 拓扑结构，以弥补和扩大基本 DC-DC 变换器的工作性能，而这样的研究工作将还会继续延续下去。

然而，在许多电压变换领域，要求宽输入或宽输出，或者宽输入、宽输出[7-13]。要实现这些要求，仅仅依靠最基本的 DC-DC 变换器是远远不够的。因此，本文提出了一种升压型开关电容网络和一种降压型开关电容网络，并在此基础上推演出一系列

输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室自主研究项目（2007DA10512711204），输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室自主研究项目（ 2007DA10512709304）和中央高校基本科研业务费项目（ CDJXS12150005）资助。
收稿日期　2012-09-03　改稿日期　2014-06-08

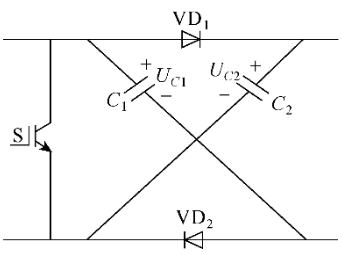
新型 DC-DC 变换器：单级升压变换器、单级降压变换器、双向升 降压变换器、多输入升压变换器和多级降压变换器。详细讲述了它们的推导过程及其工作原理。与传统的 DC-DC 变换器相比，本文提出的五种变换器的升压、降压能力更好，扩展了变换器的适用范围。

2　开关电容网络

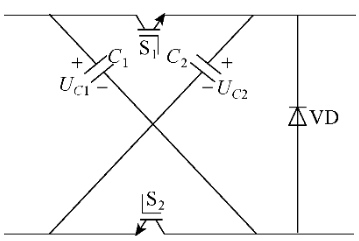
图 1 给出了开关电容网络的电路结构：图 1a 为升压型开关电容网络，图 1b 为降压型开关电容网络。在升压型开关电容网络中，两个交叉电容 C_1 与 C_2 的规格参数相同，二极管 VD_1 与 VD_2 的规格参数也相同；在降压型开关电容网络中，两个交叉电容 C_1 与 C_2 的规格参数相同，开关管 S_1 与 S_2 的规格参数也相同。从而，升压型开关电容网络和降压型开关电容网络均为一个对称型网络，电容 C_1 和 C_2 两端的电压大小相等，即

$$U_{C1} = U_{C2} \tag{1}$$

式中，U_{C1}、U_{C2} 分别代表电容 C_1、C_2 两端的电压。



（a）升压型开关电容网络



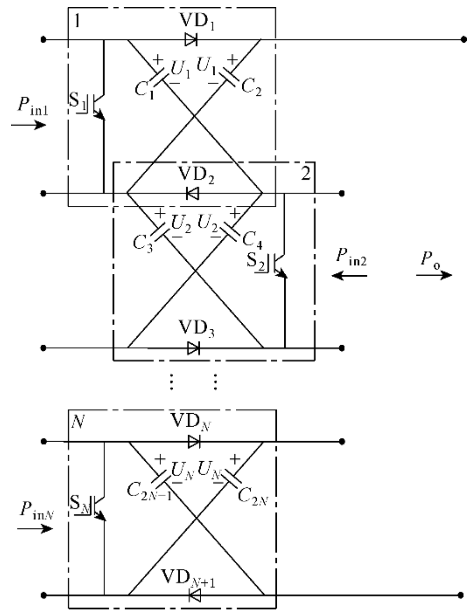
（b）降压型开关电容网络

图 1　开关电容网络

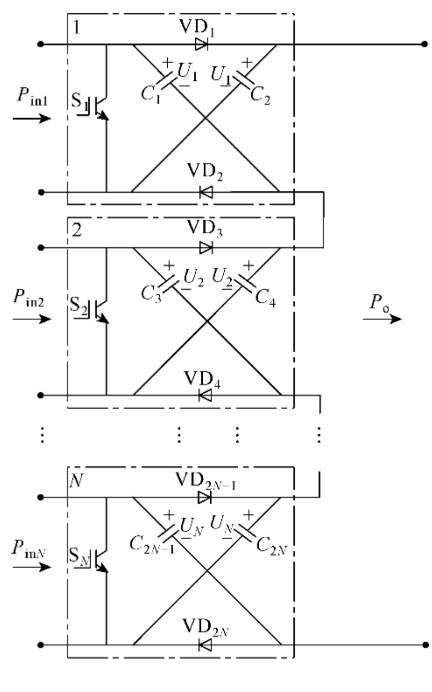
Fig.1　Switched-capacitor network

升压型开关电容网络的基本工作原理为：当开关管 S 导通时，二极管 VD_1、VD_2 关断，电容 C_1、C_2 交叉串联放电；当开关管 S 关断时，二极管 VD_1、VD_2 导通，电容 C_1、C_2 并联充电。通过两个交叉电容串联放电、并联充电的工作特性，能够实现提高变换器升压能力的目的。

另外，基于升压型开关电容网络，本文提出了两种升压型开关电容网络组：升压型开关电容网络并联实现的开关电容网络组，如图 2a 所示；升压型开关电容网络串联实现的开关电容网络组，如图 2b 所示。在图 2 中，共有 N 个升压型开关电容网络，分别标记为网络 1、网络 2、…网络 N。升压型开关电容网络并联，即 N 个升压型开关电容网络互相并联，使得所有升压型开关电容网络的电容电压相同；升压型开关电容网络串联，即 N 个升压型开关电容网络互相串联，所有开关电容网络的电容电压根据输入电源电压的不同而不同。



（a）升压型开关电容网络并联



（b）升压型开关电容网络串联

图 2 升压型开关电容网络组

Fig.2 Set-up-protype switched-capacitor network sets

升压型开关电容网络组的存在，使得变换器拓扑具有以下两个重要特点。

（1）多个开关电容网络可以并联使用，实现能量的快速传递并达到多个网络中电容电压累加升压的目的，可用来构建高增益单输入直流变换器和实现分时供电的多输入高增益直流变换器。

（2）多个开关电容网络也可以串联使用，实现多个网络中电容电压串联累加升压的效果，可用来构建既能实现同时供电又能实现分时供电的多输入高增益直流变换器。

与升压型开关电容网络不同的是，降压型开关电容网络需要同时控制两个开关管，其基本工作原理为：当开关管 S_1、S_2 同时导通时，续流二极管 VD 关断，电容 C_1、C_2 并联放电；当开关管 S_1、S_2 同时关断时，续流二极管 VD 导通，电容 C_1、C_2 交叉串联充电。通过两个交叉电容并联放电、串联充电的工作特性，可得到较小的电压输出。

与升压型开关电容网络组的构成方法相同，若干个降压型开关电容网络并联可以构成降压型开关电容网络组。本文给出了降压型开关电容网络并联的情况，如图 3 所示。多个降压型开关电容网络并联，与多个升压型开关电容网络并联类似，其各个网络的电容电压大小相等。不同的是，降压型开关电容网络组是通过部分电容累加来平分输入电源电压，从而实现变换器的前级降压功能。

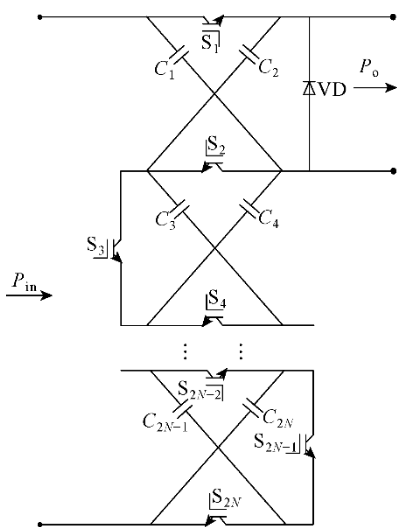


图 3 降压型开关电容网络组

Fig.3 Step-down-protype switched-capacitor network set

3 基于开关电容网络的 DC-DC 变换器

本文结合 Boost 变换器和 Buck 变换器的工作特性，在开关电容网络的基础上，构建了五种 DC-DC 变换器，详细给出了理论分析过程。

3.1 单级升压变换器

在传统 Boost 变换器中，将主开关管 S 替换为升压型开关电容网络，其他元件保持不变，可以得到一种新型升压变换器，如图 4 所示。在图 4 中，该变换器中的电感 L、开关管 S 和二极管 VD_1 或 VD_2 构成传统 Boost 变换器，实现前级升压的作用；同时，通过升压型开关电容网络中两个交叉电容串联放电、并联充电的工作特性，实现该变换器的再次升压。需要说明的是，前级 Boost 升压和升压型开关电容网络升压是同时进行的，所以该变换器是一个单级升压电路，简称为单级升压变换器，其等效电路如图 5 所示。

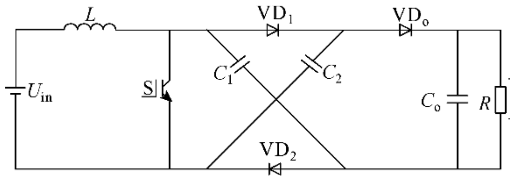
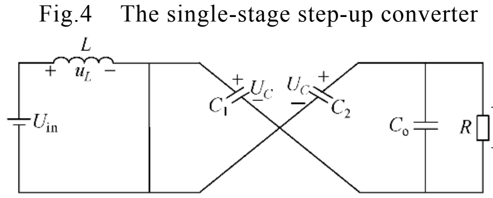
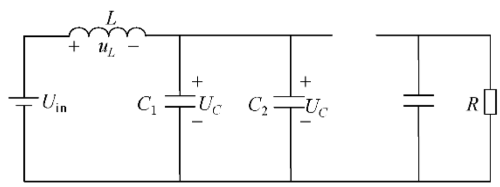


图 4 单级升压变换器

Fig.4 The single-stage step-up converter



（a）开关管 S 导通



（b）开关管 S 关断

图 5 单级升压变换器的等效电路

Fig.5 Equivalent circuits of the single-stage step-up converter

当开关管 S 导通时，二极管 VD_1、VD_2 截止，等效电路如图 5a 所示。此时电容 C_1 与 C_2 交叉串联，电感 L 上的电压及输出电压大小分别为

$$u_L = U_{in} \tag{2}$$

$$U_o = 2U_C \tag{3}$$

当开关管 S 关断时，二极管 VD_1、VD_2 导通，其等效电路如图 5b 所示。此时电容 C_1 与 C_2 并联，由输入电源对其进行充电，电感 L 上的电压大小为

$$u_L = U_{in} - U_C \tag{4}$$

对于电感 L，在一个开关周期内，根据电感伏秒平衡，结合式（2）～式（4）可得升压型开关电容网络的电容电压和单级升压变换器的输出电压大小分别为

$$U_C = \frac{1}{1-D} U_{in} \tag{5}$$

$$U_o = \frac{2}{1-D} U_{in} \tag{6}$$

3.2　单级降压变换器

在传统 Buck 变换器中，将续流二极管替换为降压型开关电容网络，可以得到一种新型降压变换器，如图 6 所示。其中，开关管 S_{in} 与降压型开关电容网络一起实现前级分压的作用；同时，开关管 S_1 或 S_2，与二极管 VD、电感 L 一起构成 Buck 变换器，实现再次降压的作用。同单级升压变换器一样，这两个降压过程是同时进行的，因此，该将变换器简称为单级降压变换器，等效电路如图 7 所示。

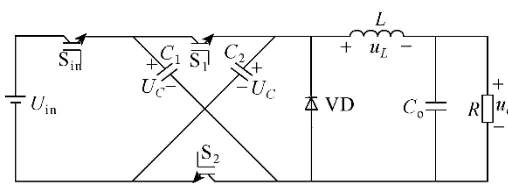
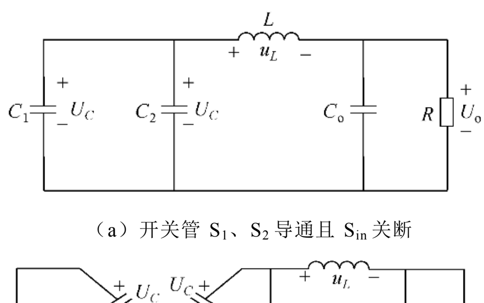
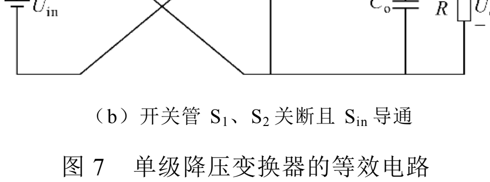


图 6　单级降压变换器

Fig.6　The single-stage step-down converter



（a）开关管 S_1、S_2 导通且 S_{in} 关断



（b）开关管 S_1、S_2 关断且 S_{in} 导通

图 7　单级降压变换器的等效电路

Fig.7　Equivalent circuits of the single-stage step-down converter

当开关管 S_1、S_2 导通且 S_{in} 关断，单级降压变换器的等效电路如图 7a 所示，二极管 VD 关断，降压型开关电容网络中的电容 C_1 与 C_2 并联，向输出端提供能量。此时，电感 L 上的电压大小为

$$u_L = U_C - U_o \tag{7}$$

当开关管 S_1、S_2 关断且 S_{in} 导通，单级降压变换器的等效电路如图 7b 所示，二极管 VD 导通，开关电容网络中的电容 C_1 与 C_2 交叉串联，达到对输入电源串联分压的目的

$$U_{in} = 2U_C \tag{8}$$

电感 L 上的电压大小为

$$u_L = -U_o \tag{9}$$

结合式（7）～式（9）可得降压型开关电容网络的电容电压和单级降压变换器的输出电压大小分别为

$$U_C = \frac{1}{2} U_{in} \tag{10}$$

$$U_o = \frac{D}{2} U_{in} \tag{11}$$

3.3　双向升降压变换器

结合单级升压变换器和单级降压变换器，可得双向升降压变换器，如图 8 所示。

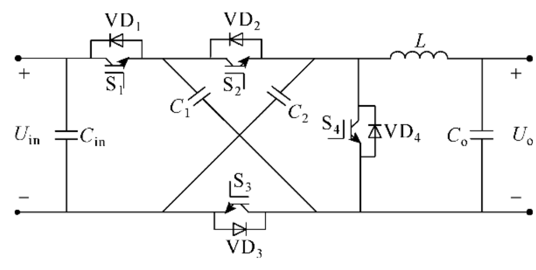


图 8　双向升降压变换器

Fig.8　Bidirectional step-up/step-down converter

当能量从 U_{in} 流向 U_o 时，VD_1、VD_2、VD_3 和 S_4 一直处于关断状态，C_{in}、S_1、S_2、S_3、C_1、C_2、VD_4、L 和 C_o 构成单级降压变换器，实现降压的功能；当能量从 U_o 流向 U_{in} 时，VD_4、S_2、S_3 和 S_1 一直处于关断状态，C_o、L、S_4、VD_2、VD_3、VD_1、C_1、C_2 和 C_{in} 构成单级升压变换器，实现升压的功能。

3.4 多输入升压变换器

根据图 2 所示的两种升压型开关电容网络组，本文提出两种新型多输入升压变换器。为了便于理论分析与实验研究，本文以双输入升压变换器为例。

3.4.1 基于升压型开关电容网络并联的双输入升压变换器

基于升压型开关电容网络并联的双输入升压变换器，如图 9 所示。由文献[14]可知，该变换器只能实现分时供电功能，其输出电压大小为

$$U_{\mathrm{o}}=\frac{3}{1-D}U_{\mathrm{in}} \tag{12}$$

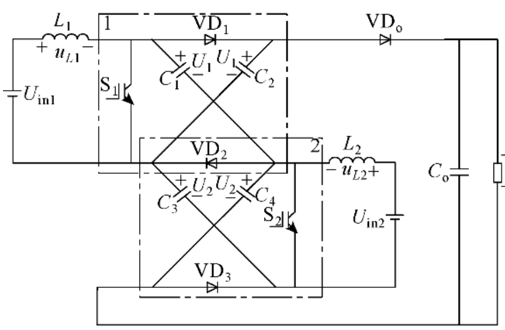


图 9 基于升压型开关电容网络并联的双输入升压变换器

Fig.9 Double-input step-up converter based on the step-up-protype switched-capacitor networks in parallel

3.4.2 基于升压型开关电容网络串联的双输入升压变换器

图 10 给出基于升压型开关电容网络串联的双输入升压变换器电路拓扑，容易得到同时供电模式下该变换器的输出电压大小为

$$U_{\mathrm{o}}=\frac{2}{1-D}(U_{\mathrm{in1}}+U_{\mathrm{in2}}) \tag{13}$$

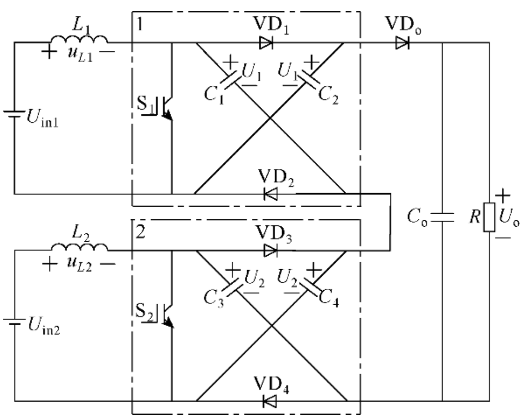


图 10 基于升压型开关电容网络串联的双输入升压变换器

Fig.10 Double-input step-up converter based on the step-up-protype switched-capacitor networks in series

当该变换器处于分时供电模式时，等价于单级升压变换器。

3.5 多级降压变换器

如图 3 所示，若干个降压型开关电容网络并联可构成一个降压型开关电容网络组，基于该网络组可得到一种多级降压变换器。以二级降压变换器为例，其电路拓扑如图 11 所示，等效电路如图 12 所示。

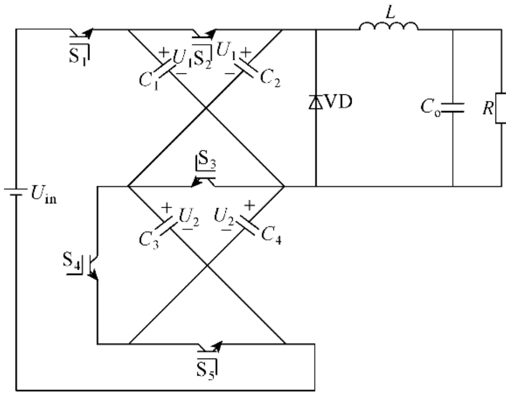
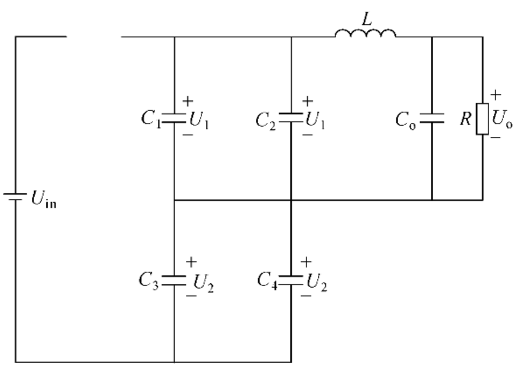
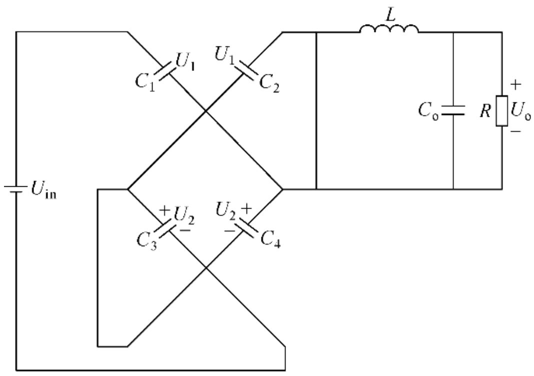


图 11 二级降压变换器

Fig.11 The two-stage step-down converter



（a）S_2、S_3、S_5 同时导通且 S_1、S_4 关断



（b）S_2、S_3、S_5 同时关断且 S_1、S_4 导通

图 12 二级降压变换器的等效电路

Fig.12 Equivalent circuits of the two-stage step-down converter

当 S_2、S_3、S_5 同时导通且 S_1、S_4 关断时，续流

二极管 VD 关断，两个降压型开关电容网络中的两个电容互相并联，使得其每个网络中的电容电压大小相等。此时，电感 L 上的电压大小分别为

$$u_L = U_1 - U_o \tag{14}$$

当 S_2、S_3、S_5 同时关断且 S_1、S_4 导通时，续流二极管 VD 导通，电容 C_2 与 C_4 并联，有

$$U_1 = U_2 \tag{15}$$

另外，降压型开关电容网络组中的三个电容对输入电源串联分压，有

$$U_{in} = 2U_1 + U_2 = U_1 + 2U_2 \tag{16}$$

此时，电感 L 上的电压大小为

$$u_L = -U_o \tag{17}$$

由式（14）～式（17）可得二级降压变换器的输出电压大小为

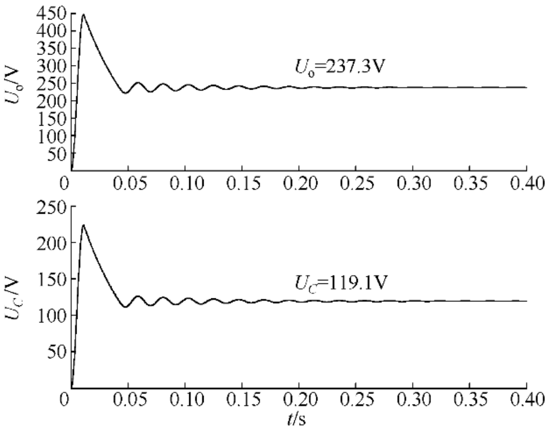
$$U_o = \frac{D}{3} U_{in} \tag{18}$$

4　仿真分析

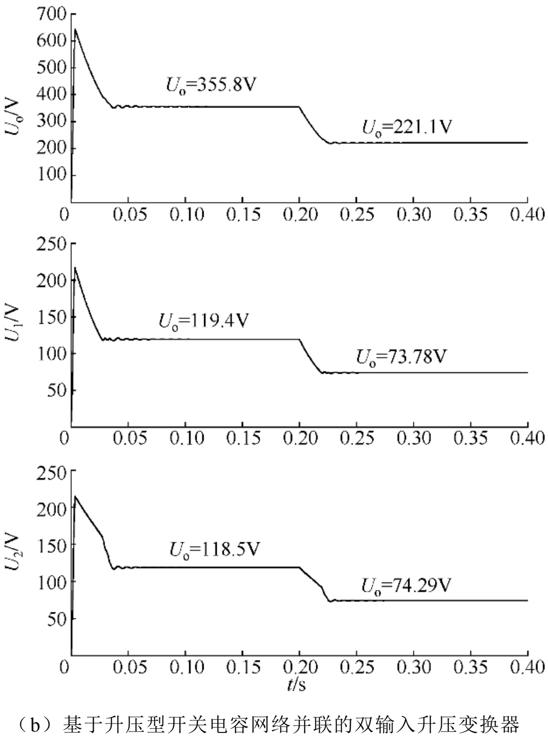
为了验证基于开关电容网络的 DC-DC 变换器的优越性能，分别对本文提出的五种新型 DC-DC 变换器进行仿真实验。仿真实验参数：开关频率 f_s=100kHz，升压型开关电容网络和降压型开关电容网络的电容均取 47μF，输出滤波电容为 100μF。在单级升压变换器中，取输入直流电压 U_{in}=48V，输入电感 L=220μH；在双输入升压变换器中，取输入直流电压 U_{in1}=48V，U_{in2}=30V，输入电感 L_1=L_2=220μH；在单级降压变换器和二级降压变换器中，均取输入直流电压 U_{in}=300V，输出滤波电感均取 400μH。

当占空比 D=0.60 时，三种升压变换器（单级升压变换器、基于升压型开关电容网络并联的双输入升压变换器和基于升压型开关电容网络串联的双输入升压变换器）的输出结果，如图 13 所示。其中，在图 13b 中，0～0.20s 为输入源 U_{in1} 独立工作，0.20s～0.40s 为输入源 U_{in2} 独立工作。

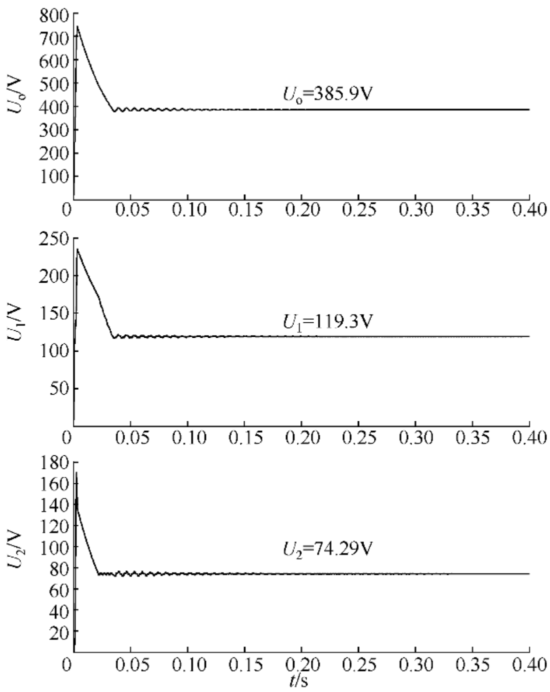
在图 13a 中，输出电压 237.3V 接近理论值 240V，电容电压 119.1V 接近理论值 120V，且输出电压为电容电压的两倍，验证了式（5）、式（6）。在图 13b 中，可知输出电压是电容电压的三倍，满足式（12），同时两个开关电容网络的电容电压相等。在图 13c 中，网络 1 电容电压和网络 2 电容电压分别是输入源 1 电压和输入源 2 电压的 2.5 倍，且输出电压是输入电源 1 电压和输入电源 2 电压大小之和的 5 倍，验证了式（13）。



（a）单级升压变换器



（b）基于升压型开关电容网络并联的双输入升压变换器

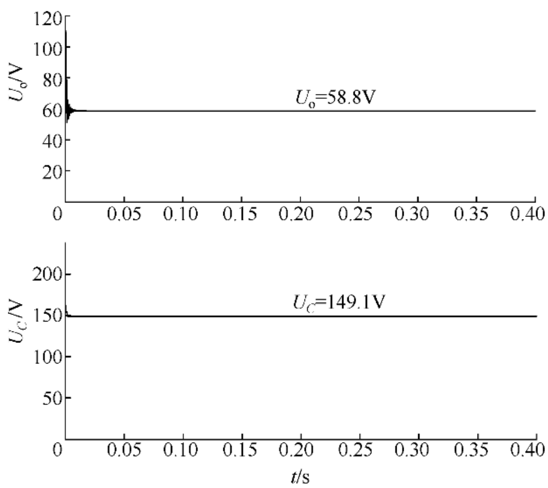


（c）基于升压型开关电容网络串联的双输入升压变换器

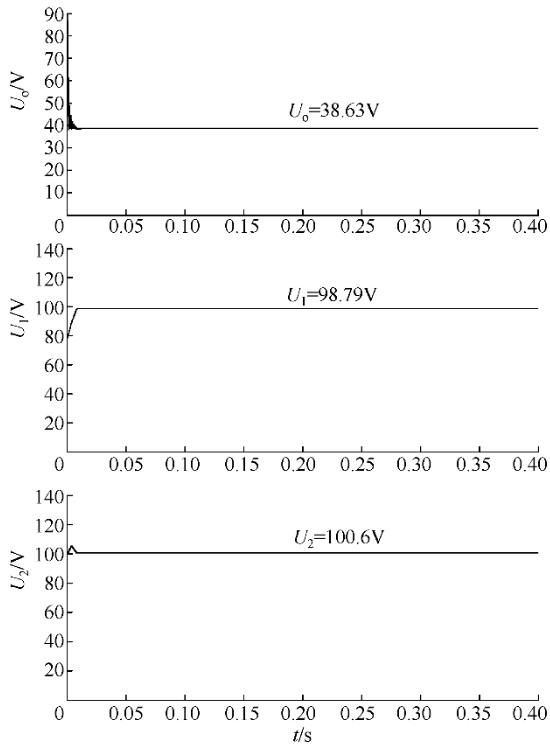
图 13　三种升压变换器的输出结果

Fig.13　Output results of three step-up converters

当占空比 D=0.40 时，两种降压变换器（单级降压变换器和基于降压型开关电容网络并联的二级降压变换器）的输出结果，如图 14 所示。同样地，在图 14 中，单级降压变换器和二级降压变换器的输出结果也与理论分析一致。



（a）单级降压变换器



（b）二级降压变换器

图 14　两种降压变换器的输出结果

Fig.14　Output results of two step-down converters

由图 13 和图 14 的实验结果可知，本文提出的五种 DC-DC 变换器的输出电压稳定，纹波小。除此之外，这五种 DC-DC 变换器具有以下性质：

（1）单级升压变换器是传统 Boost 升压能力的两倍，且通过升压型开关电容网络并联可以得到升压能力更强的多输入变换器，而开关器件和电容电压应力保持不变。

（2）在基于升压型开关电容网络并联的多输入升压变换器和基于升压型开关电容网络串联的多输入升压变换器中，其输出电压都是通过开关电容网络中的电容电压累加实现的。不同的是，前者是部分电容电压累加且所有电容电压相等，而后者是所有电容电压累加且不同网络的电容电压不同。

（3）单级降压变换器的降压能力是传统 Buck 变换器的两倍，且当降压型开关电容网络个数增加一个，其降压能力增加一倍。缺点是开关管数量较多且需要隔离控制，控制电路相对复杂。

（4）将单级升压变换器和单级降压变换器相结合，可得到一种双向升降压变换器，实现能量的双向流动。

5 结论

本文提出开关电容网络，并基于该网络推演出 5 种新型 DC-DC 变换器，与传统 DC-DC 变换器相比，具有较大的优越性。仿真实验验证了这 5 种 DC-DC 变换器理论分析的正确性和可行性。

参考文献

[1] Li Wuhua, He Xiangning. Review of nonisolated high-step-up DC/DC converters in photovoltaic grid-connected applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 58(4): 1239-1250.

[2] Omar Hegazy, Joeri Van Mierlo, Philippe Lataire. Analysis, modeling, and implementation of a multidevice interleaved DC/DC converter for fuel cell hybrid electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(11): 4445-4458.

[3] Pablo F Miaja, Miguel Rodriguez, Alberto Rodriguez, et al. A linear assisted DC/DC converter for envelope tracking and envelope elimination and restoration applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(7): 3302-3309.

[4] Anna Richelli, Simone Comensoli, Zsolt M Ko- vacs-vajna. A DC/DC Boosting technique and power management for ultralow-voltage energy harvesting applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(6): 2701-2708.

[5] Dmitri Vinnikov, Indrek Roasto, Rsyzard Strzelecki, et al. Step-up DC/DC Converter with cascaded quasi-Z-source network[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(10): 3727-3736.

[6] Chien-MingWang, Chang-HuaLin, Hsin-Yi Lin. High-efficiency and low-stress ZVS-PWM bid irectional DC/DC converter for battery charger[C]. IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, Power Electronics, 2011, 6: 1185-1190.

[7] 张国驹，唐西胜，周龙，等. 基于互补 PWM 控制的 Buck/Boost 双向变换器在超级电容器储能中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(6): 15-21.
Zhang Guoju, Tang Xisheng, Zhou Long, et al. Research on complementary PWM controlled Buck/Boost bidirectional converter in supercapacitor energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(6): 15-21.

[8] 皇金锋，董锋斌. 基于 PSIM 的非隔离式 DC/DC 变换器仿真[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(9): 73-76.
Huang Jinfeng, Dong Fengbin. Simulation of non-isolated DC/DC converter based on PSIM[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(9): 73-76.

[9] 吴红飞，陆珏晶，石巍，等. 一族非隔离双向直流变换器[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(9): 65-71.
Wu Hongfei, Lu Yujing, Shi Wei, et al. A family of non-isolated bi-directional DC-DC converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(9): 65-71.

[10] 廖志凌，阮新波. 一种独立光伏发电系统双向变换器的控制策略[J]. 电工技术学报, 2008, 23(1): 97-103.
Liao Zhiling, Ruan Xinbo. Control strategy for bi-directional DC/DC converter of a novel stand-alone photovoltaic power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(1): 97-103.

[11] 刘胜永，唐安琼. 一种新颖的软开关双向 DC/DC 变化器分析与设计[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(3): 28-31.
Liu Shengyong, Tang Anqiong. Analysis and design of soft-switching bidirectional DC-DC converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(3): 28-31.

[12] 陆益民，张波，尹丽云. DC/DC 变换器的切换仿射线性系统模型及控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(15): 16-22.
Lu Yimin, Zhang Bo, Yin Liyun. Switched affine systems modeling and control of DC/DC converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(15): 16-22.

[13] Chia-An Yeh, Yen-Shin Lai. Digital pusle width modulation technique for a synchronous Buck DC/DC converter to reduce switching frequency[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(1): 550-561.

[14] 侯世英，陈剑飞，孙韬，等. 基于 Switch-Capacitor 网络实现分时供电的多输入升压变换器[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 27-37.
Hou Shiying, Chen Jianfei, Sun Tao, et al. A multi-input step-up converter for individual supplying power based on the switch-capacitor network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 27-37.

作者简介 侯世英 女，1962 年生，博士，教授，博士生导师，主要研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用和新能源发电技术。

陈剑飞（通信作者） 男，1987 年生，博士研究生，主要研究方向为功率变换器和新能源发电技术。