

文章编号:1674-2974(2016)02-0085-07

新型多输入升压变换器的交错控制研究^{*}

侯世英[†], 陈 复

(重庆大学 电气工程学院, 重庆 400044)

摘 要:在基于开关电容网络的多输入升压变换器中,由于其开关管必须同时导通、同时关断,因此很难实现对各输入源的独立控制.基于此,对开关电容网络的结构进行改变,并采用交错控制策略进行研究.首先对基于交错控制的双输入升压变换器的工作原理及性能进行了分析,然后通过拓扑推演得到了 n 路输入的高升压变换器.最后,进行了仿真和实验研究,实验结果表明:该变换器不仅具有较大的电压增益,而且允许所有开关管不同时导通、不同时关断,并且占空比不完全一致,实现了各输入源的独立控制,在新能源利用方面具有一定的优势.

关键词:新能源;多输入;开关电容网络;高增益;交错控制

中图分类号:TM46

文献标识码:A

Research on the Interleaving Control of A Novel Step-up Multi-input Converter

HOU Shi-ying[†], CHEN Fu

(School of Electrical Engineering, Chongqing Univ, Chongqing 400044, China)

Abstract: As the switches must be turned on and off simultaneously in the proposed multi-input step-up converter based on switched-capacitor network, it is difficult to realize the independent control of each input source. Therefore, some changes were made for the structure of the switched-capacitor network, and research was done with an interleaving control. Firstly, the principle of operation and the performance of the double-input converter based on interleaving control were analyzed. And then the topology of the converter with n -input ports was presented by topology deduction. At last, simulation and experimental research was done. The results have shown that the proposed converter has a high voltage gain and allows all switches not to be turned on and off simultaneously with different duty-cycles, which realizes the independent control of each input source, and has more advantages in the field of new energy.

Key words: new energy sources; multi-input control; switched-capacitor network; high step-up; interleaving control

^{*} 收稿日期:2015-03-02

基金项目:国家“111”计划资助项目(B08036)

作者简介:侯世英(1962-),女,四川南充人,重庆大学教授

[†] 通讯联系人, E-mail: houshiying@cqu.edu.cn

随着传统化石能源的日益枯竭,以及它所造成的环境污染和全球变暖等问题日益严重,新能源的开发和利用越来越受到人们的重视.目前,应用较多的新能源发电方式主要有光伏发电、风力发电、燃料电池发电等,具有资源分布广、开发潜力大、环境影响小、可永续利用的特点.但在传统的新能源联合发电系统中,每一个输入源均需要一个DC/DC变换器与之对应,系统结构复杂,成本较高,且其自身存在随机性、间歇性、地域性、输出非线性等局限性^[1],极大地限制了新能源联合发电技术的发展.基于上述原因,采用一个多输入变换器(Multi-input Converter, MIC)代替多个单输入变换器的思想逐渐形成, MIC不仅可以提高系统的稳定性和灵活性,实现能源的优先利用,降低系统成本,而且允许多种性质、幅值和特征不同的能源输入,因此, MIC的发展受到国内外专家学者的极大关注^[2-4].

近年来,国内外专家学者提出了一些 MIC 拓扑.文献[5-6]所提出的 MIC 结构简单,但在任意时刻只能有一个输入源工作,输入能源利用效率低.文献[7]所提出的 MIC 既能实现多个输入源分时供电,又能实现同时供电,但该变换器实质上是将多个 Boost 单元并联在输出侧,并未减少元件数量.虽然上述两类 MIC 组成结构简单,但电压增益与传统的单输入 Boost 变换器一样,应用场合受到了限制.随着 MIC 研究的深入,同时供电型 MIC 种类增多,相应的控制策略也随之出现,其中交错控制在同时供电型 MIC 中应用广泛^[8-14].

文献[15]结合开关电容网络的优点,得到一种基于开关电容网络的新型单开关升压变换器,并在此基础上衍生出一种新型多输入升压变换器^[16],该变换器开关管和电容的电压应力小,降低了系统成本,电感电流纹波较小且连续,任何输入电源供电时,所有开关电容网络均参与工作,器件利用率及能量输入效率高,所有开关管仅由同一信号驱动,控制简单.但从另一方面而言,所有开关管同时导通、同时关断却带来了一定的局限性,如不同性质、不同幅值、不同特征的新能源同时作为输入源输入时,无法实现各输入源的独立控制.本文针对文献[16]所提多输入升压变换器的不足,对开关电容网络组合方式进行一定的改变,并采用交错控制的方法,使其不仅保留原拓扑高增益、多路输入、开关管和电容的电压应力小、电感电流纹波小等优点,而且允许不同性质、不同幅值、不同特征的新能源同时作为输入源输入,并易于实现各输入源的独立控制.

1 双输入升压变换器

1.1 拓扑变形

开关电容网络的拓扑如图 1 所示,由 1 个开关管 S_1 , 2 个规格参数相同的交叉电容 C_1 和 C_2 , 以及 2 个规格参数也相同的二极管 D_1 和 D_2 构成.当开关管导通时,二极管 D_1 和 D_2 截止,电容 C_1 和 C_2 串联放电;当开关管关断时,二极管 D_1 和 D_2 导通,电容 C_1 和 C_2 交叉并联充电.

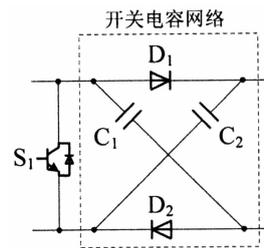


图 1 开关电容网络

Fig. 1 Switched-capacitor network

为了进一步提高开关电容网络的升压能力并允许多个输入源同时工作,文献[15]将两个开关电容网络进行组合,形成了一种具有多输入高增益的升压变换器,如图 2 所示.

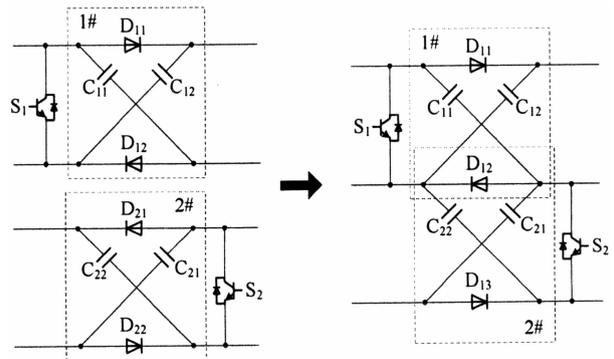


图 2 一种开关电容网络组合方式

Fig. 2 A combination of switched-capacitor network

通过共用网络 1# 中的 D_{12} 与网络 2 中的 D_{21} , 虽然节省了器件,但 D_{12} 和 D_{21} 必须保证同一状态属性,即 D_{12} 和 D_{21} 必须同时导通、同时关断,造成开关管 S_1 和 S_2 也必须同时导通、同时关断,在一定程度上限制了该变换器的应用.本文在上述开关电容网络的基础上,对开关电容网络的组合方式进行调整,如图 3 所示.组合方式调整后的开关电容网络虽然未共用二极管 D_{12} (或 D_{21}),但使得 D_{12} 和 D_{21} 不必保证同一状态属性,因此开关管 S_1 和 S_2 可以不同时导

通、不同时关断,与原拓扑结构相比应用范围更广。

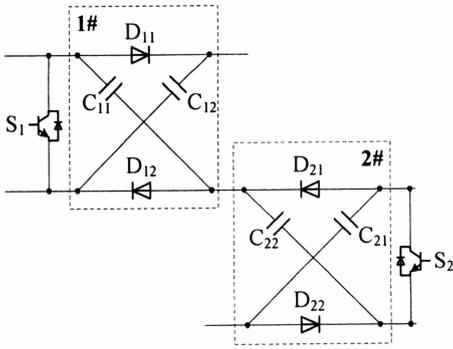


图 3 另一种开关电容网络组合方式
Fig. 3 Another combination of switched-capacitor network

1.2 基于交错控制的变换器工作原理

基于组合方式调整后的开关电容网络,可以得到一种新型的双输入升压变换器,如图 4 所示。所有开关电容网络中电容的规格参数均相等,因此各自网络中的电容电压应有如下关系: $U_{C11} = U_{C12} = U_{C1}$, $U_{C21} = U_{C22} = U_{C2}$ 。

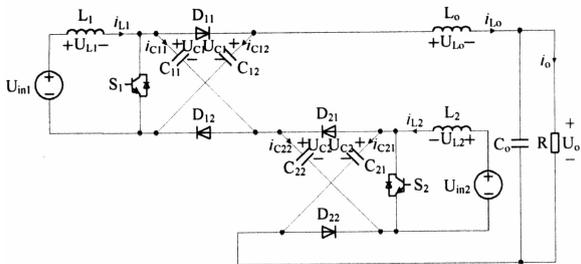


图 4 双输入高升压变换器
Fig. 4 Double-input boost converter

由于开关管 S_1 和 S_2 可以不同时导通与关断,因此本文对如图 4 所示变换器采用交错控制策略,开关管 S_1 和 S_2 的驱动相位依次错开 $360^\circ/2$ 即 180° 。因此,该变换器将会出现至多 4 种工作模式,各模式的开关管及二极管状态见表 1,各模式等效电路如图 5 所示。

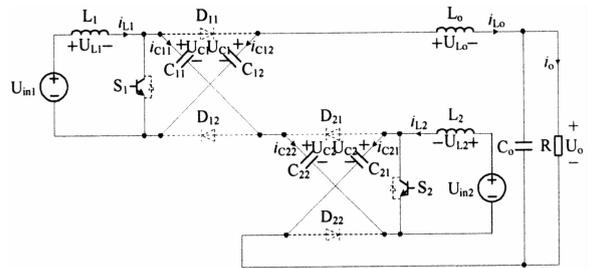
表 1 各模式的开关管及二极管状态

Tab. 1 The state of switch and diode of each model

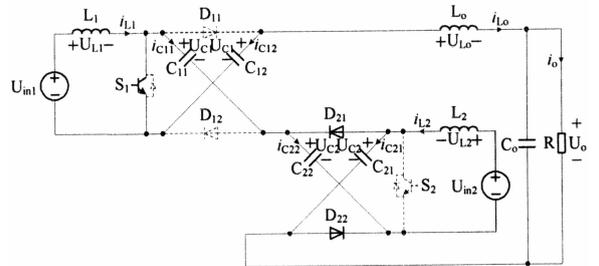
模式	S_1	S_2	D_{11}	D_{12}	D_{21}	D_{22}
1	1	1	0	0	0	0
2	1	0	0	0	1	1
3	0	1	1	1	0	0
4	0	0	1	1	1	1

注:“1”表示导通,“0”表示关断。

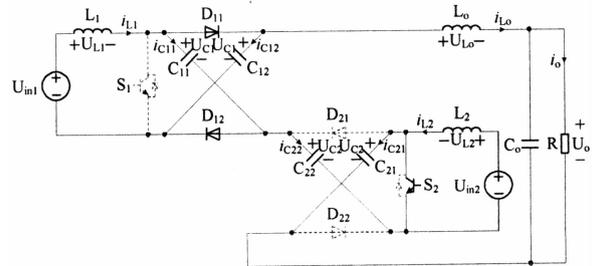
模式 I:等效电路如图 5(a)所示。 S_1 和 S_2 导通, D_{11} , D_{12} , D_{21} 和 D_{22} 关断,此时电感 L_0 , L_1 和 L_2 两端



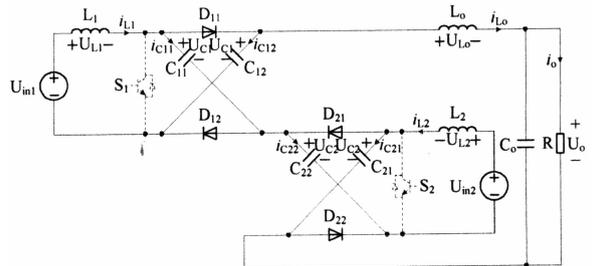
(a) 模式 I 的等效电路



(b) 模式 II 的等效电路



(c) 模式 III 的等效电路



(d) 模式 IV 的等效电路

图 5 各模式的等效电路

Fig. 5 The equivalent circuit of each mode

电压为:

$$\begin{cases} U_{L_0} = 2U_{C1} + 2U_{C2} - U_o, \\ U_{L_1} = U_{in1}, \\ U_{L_2} = U_{in2}. \end{cases} \quad (1)$$

电流 i_{L_0} , i_{L_1} , i_{L_2} 均线性上升,电容 C_{11} , C_{12} , C_{21} 和 C_{22} 均处于串联放电状态,电容电压 U_{C1} 和 U_{C2} 下降。

模式 II:等效电路如图 5(b)所示。 S_1 , D_{21} , D_{22} 导通, S_2 , D_{11} , D_{12} 关断,此时电感 L_0 , L_1 , L_2 两端电压为:

$$\begin{cases} U_{L_0} = 2U_{C1} + U_{C2} - U_o, \\ U_{L_1} = U_{in1}, \\ U_{L_2} = U_{in2} - U_{C2}. \end{cases} \quad (2)$$

电流 i_{L_o} 和 i_{L_2} 线性下降, 电流 i_{L_1} 线性上升, 电容 C_{11} 和 C_{12} 处于串联放电状态, 电容电压 U_{C1} 下降, 电容 C_{21} 和 C_{22} 处于交叉并联充电状态, 电容电压 U_{C2} 上升.

模式 III: 等效电路如图 5(c) 所示. S_2 , D_{11} 和 D_{12} 导通, S_1 , D_{21} 和 D_{22} 关断, 此时电感 L_o , L_1 , L_2 两端电压为:

$$\begin{cases} U_{L_o} = U_{C1} + 2U_{C2} - U_o, \\ U_{L_1} = U_{in1} - U_{C1}, \\ U_{L_2} = U_{in2}. \end{cases} \quad (3)$$

电流 i_{L_o} 和 i_{L_1} 线性下降, 电流 i_{L_2} 线性上升, 电容 C_{11} 和 C_{12} 处于交叉并联充电状态, 电容电压 U_{C1} 上升, 电容 C_{21} 和 C_{22} 处于串联放电状态, 电容电压 U_{C2} 下降.

模式 IV: 等效电路如图 5(d) 所示. S_1 和 S_2 关断, D_{11} , D_{12} , D_{21} 和 D_{22} 导通, 此时电感 L_o , L_1 和 L_2 两端电压为:

$$\begin{cases} U_{L_o} = U_{C1} + U_{C2} - U_o, \\ U_{L_1} = U_{in1} - U_{C1}, \\ U_{L_2} = U_{in2} - U_{C2}. \end{cases} \quad (4)$$

电流 i_{L_o} , i_{L_1} 和 i_{L_2} 均线性下降, 电容 C_{11} , C_{12} , C_{21} 和 C_{22} 均处于交叉并联充电状态, 电容电压 U_{C1} 和 U_{C2} 上升.

1.3 输入\输出电压关系

由于开关管 S_1 和 S_2 的占空比 D_1 和 D_2 的大小不一定相等, 以 0.5 为界将会出现 4 种不同的交错波:

交错波 1: $D_1 < 0.5, D_2 < 0.5$;

交错波 2: $D_1 \geq 0.5, D_2 < 0.5$;

交错波 3: $D_1 < 0.5, D_2 \geq 0.5$;

交错波 4: $D_1 \geq 0.5, D_2 \geq 0.5$.

对交错波 1 进行分析, 稳态工作时的主要波形如图 6 所示, 其中 Q_1 和 Q_2 分别表示开关管 S_1 和 S_2 的驱动波形, 其占空比分别为 D_1 和 D_2 .

由图 6 可知, 当开关管驱动波形为交错波 1 时, 在 1 个开关周期 T , 该变换器仅有 3 个工作模式, 分别为模式 II, 模式 III 及模式 IV.

由式(1)~(4), 再结合电感 L_o , L_1 和 L_2 的伏秒平衡可得:

$$\begin{cases} D_1 U_{in1} + (1 - D_1)(U_{in1} - U_{C1}) = 0, \\ D_2 U_{in2} + (1 - D_2)(U_{in2} - U_{C2}) = 0, \\ D_1(2U_{C1} + U_{C2} - U_o) + D_2(U_{C1} + 2U_{C2} - U_o) \\ + (1 - D_1 - D_2)(U_{C1} + U_{C2} - U_o) = 0. \end{cases} \quad (5)$$

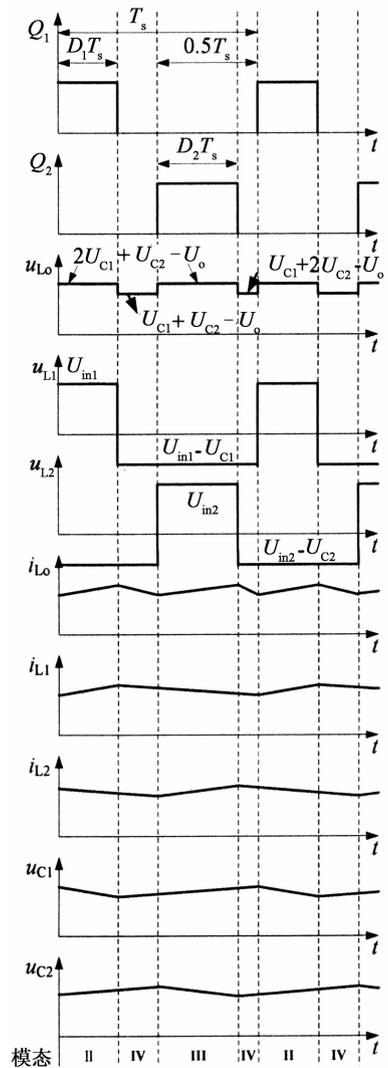


图 6 $D_1 < 0.5, D_2 < 0.5$ 时, 1 个开关周期 T_s 内的主要波形
Fig. 6 Main waveform in one cycle when $D_1 < 0.5$ & $D_2 < 0.5$

化简式(5), 可得:

$$\begin{cases} U_{C1} = \frac{1}{1 - D_1} U_{in1}, \\ U_{C2} = \frac{1}{1 - D_2} U_{in2}, \\ U_o = \frac{1 + D_1}{1 - D_1} U_{in1} + \frac{1 + D_2}{1 - D_2} U_{in2}. \end{cases} \quad (6)$$

由上式可知, 开关网络中的电容电压 U_{C1} 和 U_{C2} 分别等于对应输入电压 U_{in1} 的 $1/(1 - D_1)$ 倍和 U_{in2} 的 $1/(1 - D_2)$ 倍; 输出电压 U_o 与 D_1 , D_2 , U_{in1} 及 U_{in2} 相关, 其中 D_1 和 D_2 可以不同; 同时, 输入电压 U_{in1} 和 U_{in2} 也可不同, 因此可以满足大小、特征、幅值不同的输入源同时输入, 具有良好的性能.

对于另外 3 种情况的交错波, 可以采用相同的方法对其工作原理及输入\输出电压关系进行分析, 得到的结果见表 2.

表 2 另外 3 种交错波时的电路工作原理及输出电压
Tab. 2 Working principle and output voltage when circuit running in other three interleaving waveforms

交错波种类	1 个周期内的工作模式	输出电压 U_o
$2; D_1 \geq 0.5, D_2 < 0.5$	II → I → III → IV	$\frac{1+D_1}{1-D_1}U_{in1} + \frac{1+D_2}{1-D_2}U_{in2}$
$3; D_1 < 0.5, D_2 \geq 0.5$	I → II → IV → III	$\frac{1+D_1}{1-D_1}U_{in1} + \frac{1+D_2}{1-D_2}U_{in2}$
$4; D_1 \geq 0.5, D_2 \geq 0.5$	I → II → I → III	$\frac{1+D_1}{1-D_1}U_{in1} + \frac{1+D_2}{1-D_2}U_{in2}$

2 基于交错控制的 n 输入升压变换器

根据文献[15]可知,开关电容网络可以进行级联组合,因此,将多个开关电容网络按图 3 所示方式进行级联得到一种新型的 n 路输入升压变换器,如图 7 所示。

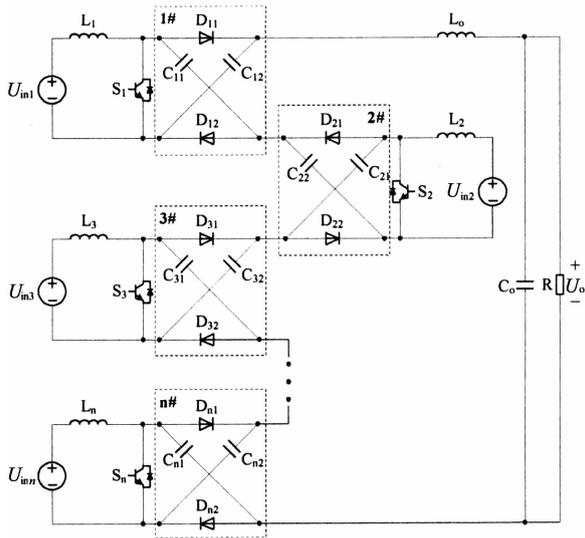


图 7 多路输入高压升压变换器

Fig. 7 High step-up converter with multi-input

针对该多输入变换器,可依然采用交错控制的方式,各开关管的驱动相位依次错开 $360^\circ/n$ 。

根据式(2)可推导出下式:

$$\begin{cases} U_{Cn} = \frac{1}{1-D_n}U_{inn}, n = 1, 2, 3, \dots, n; \\ U_o = \frac{1+D_1}{1-D_1}U_{in1} + \frac{1+D_2}{1-D_2}U_{in2} + \dots + \frac{1+D_n}{1-D_n}U_{inn}. \end{cases} \quad (7)$$

可以看出,在具有 n 个输入源和 n 个开关电容网络的情况下,该拓扑同样可以满足大小、特征、幅值不同的输入源同时输入,且占空比可以不同;若某输入源为光伏输入时,通过调节其输入电流的参考值可以很容易地实现其最大功率输出,即实现

MPPT,提高了能源利用效率,拓展了该拓扑的应用场合,尤其是在新能源联合并网发电系统中的应用。

对两种基于开关电容网络的多输入 DC/DC 变换器的性能特点进行比较,见表 3。

表 3 两种基于开关电容网络的 DC/DC 变换器的性能特点

Tab. 3 The performance of DC/DC converter based on switched capacitor

电路拓扑	文献[16]所提变换器	本文变换器
供电情况	分时供电	同时供电
输出电压 U_o	$\frac{n+D}{1-D}U_{inn}$	$\sum_{n=1}^k \frac{1+D_n}{1-D_n}U_{inn}$
各输入源是否独立可控	否	是
开关电容网络数量	n	n
开关电容网络中电容电压 U_{Cn}	$\frac{1}{1-D}U_{inn}$	$\frac{1}{1-D_n}U_{inn}$

由表 3 可知:

1) 文献[16]所提变换器仅能进行分时供电,而本文中的多输入变换器在同时供电下均能正常工作,充分利用了输入源。

2) 两种多输入变换器输出电压的表达式略有不同,但均能使输出电压获得较高的电压等级,均具备高增益的特点。

3) 文献[16]所提的变换器仅能在开关管同时导通、同时关断的条件下工作,虽然控制简单,但无法实现各输入源的独立可控;而本文中的变换器除了能在开关管同时导通、同时关断的情况下工作,还能工作在开关管交错导通的情况下,能很好地实现对各输入源的独立控制。

3 仿真与实验研究

3.1 仿真研究

为了验证前述理论分析的正确性,本文根据图 4 所示双输入升压变换器,在 Matlab 中搭建了仿真模型,仿真模型参数见表 4。

表 4 仿真模型参数表

Tab. 4 Parameter table of simulation model

参数	数值
输入电压 U_{in1}/V	32
输入电压 U_{in2}/V	24
输入电感 $L_1/\mu H$	700
输入电感 $L_2/\mu H$	700
输出滤波电感 L_o/mH	1.7
开关电容网络中电容 $C/\mu F$	47
输出滤波电容 $C_o/\mu F$	100
占空比 D_1	0.3
占空比 D_2	0.4
开关频率 f_s/kHz	100
负载 R/Ω	100

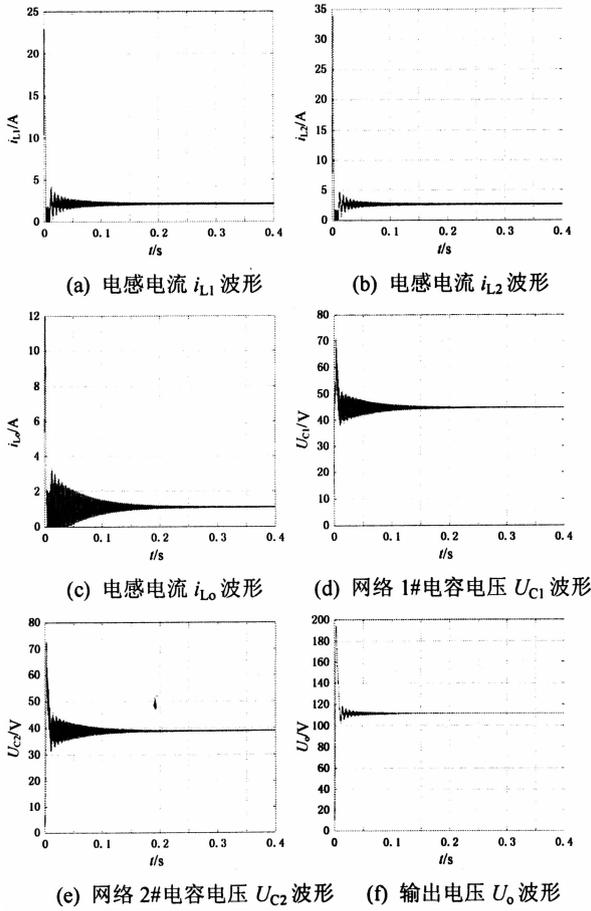


图 8 仿真波形
Fig. 8 Simulation waveforms

由图 8 可以看出：

1) 图 8(a), (b) 和 (c) 所示电感电流存在一定的启动冲击, 这是由 Boost 电路本身的性质决定的, 且在仿真中, 由于电路参数比较理想, 忽略了部分器件自身的阻抗, 因而启动冲击电流较大. 但是实际电路中, 启动冲击电流会比仿真时小一些.

2) 交错波占空比 D_1 和 D_2 分别为 0.3 和 0.4, 此时 U_{C1} 和 U_{C2} 及 U_o 的理论值分别为 45.7 V, 40.0 V 和 115.4 V, 可以发现, 图 8(d), (e) 和 (f) 所示仿真输出电压与理论计算值接近, 说明了前述理论分析的正确性.

3.2 实验研究

为了进一步验证理论分析与仿真结果的正确性, 在实验室搭建双输入升压电路样机, 除开关频率变为 20 kHz 外, 其余电路参数与仿真模型参数基本一致. 两个开关管交错 180° 导通, 得到如图 9 所示的实验波形.

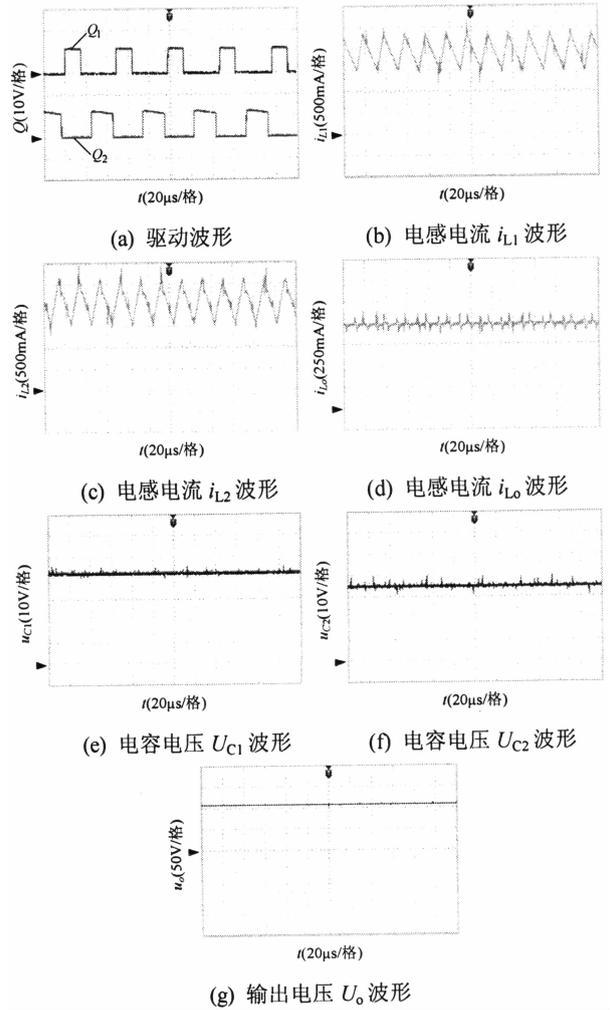


图 9 实验波形
Fig. 9 Experimental waveforms

由图 9 可以看出：

1) 开关管 S_1 和 S_2 的驱动信号相互交错 180° , 而且高电平电压值为 12 V, 达到了 IRF640 的驱动电压.

2) 从电感电流 i_{L1} 和 i_{L2} 的实验波形可以看出, 电感电流 i_{L1} 和 i_{L2} 未出现断续的情况, 说明了多输入变换器工作在 CCM 模式下, 所示实验结果比仿真结果大, 原因是实验样机的开关管工作频率为 20 kHz, 仅为仿真分析时的 1/5. 若提高开关管工作频率, i_{L1} , i_{L2} 及 i_{Lo} 的电流纹波会得到大幅改善.

3) 图 9(e), (f) 和 (g) 所示 U_{C1} , U_{C2} 及 U_o 的实验结果分别为 42 V, 35 V 和 109 V, 与理论值较为接近, 说明了理论分析与仿真结果的正确性.

图 10 为实验样机的实测工作效率, 从图中可以看出, 变换器在不同的负载条件下, 其效率曲线是变化的, 且其最大工作效率大约为 92.7%.

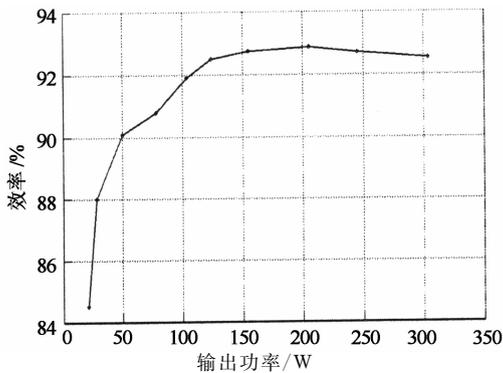


图10 变换器在不同负载条件下的效率曲线

Fig.10 The efficiency of converter with different loads

4 结 语

本文对多个开关电容网络的连接方式进行了重新组合,在交错控制方式下,对其双输入情况下的工作原理、性能特性进行了分析,并在此基础上对基于交错控制的多输入情况进行了推衍,最后进行仿真及样机实验,实验结果表明:

1) 对本文所示的多输入DC/DC变换器采用交错控制是可行的,且所有开关管占空比不完全一致,使各输入源能实现独立控制,拓展了应用场合。

2) 输出电压等于各输入源电压的 $(1+D_n)/(1-D_n)$ 倍之和,同样具备了高增益的性质。

3) 开关电容网络串联的多输入DC/DC在同时供电情况下正常工作,未造成输入源闲置的情况,输入源利用率高,且各输入源之间互不影响,非常适合于新能源联合利用的场合。

参考文献

[1] 刘吉臻. 大规模新能源电力安全高效利用基础问题[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 1-8.
LIU Ji-zhen. Basic issues of utilization of large-scale renewable power with high security and efficiency[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 1-8. (In Chinese)

[2] CHEN Yaow-ming, LIU Yuan-chuan, LIN Sheng-hsien. Double-input PWM DC/DC converter for high/low voltage sources[C]//Proceedings of the 25th International Telecommunications Energy Conference. New York: IEEE, 2003: 27-32.

[3] YALAMANCHILI K P, FERDOWSI M, CORZINE K. New double input DC-DC converter for automotive applications [C]//Proceedings of IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. New York: IEEE, 2006: 1-6.

[4] GAVRIS M, CORNEA O, MUNTEAN N. Multiple input DC-DC topologies in renewable energy systems—a general review[C]//Proceedings of 2011 IEEE 3rd International Symposium on Exploitation of Renewable Energy Sources. New York: IEEE, 2011: 123-128.

[5] NOROOZIN R, ABEDI M, GHAREHPETIAN G B, *et al.* On-grid and off-grid operation of multi-input single-output DC/DC converter based fuel cell generation system[C]//Proceedings of 2010 18th Iranian Conference on Iranian Conference on Electrical Engineering. New York: IEEE, 2010: 753-758.

[6] MATSUO H, SHIGEMIZU T, KUROKAWA F, *et al.* Characteristics of the multi-input DC-DC converter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004, 51(3): 625-631.

[7] KWASINSKI A, KREIN P T. Multiple-input DC-DC converters to enhance local availability in grids using distributed generation resources[C]//Proceedings of IEEE Applied Power Electronics Conference. New York: IEEE, 2007: 1657-1663.

[8] 陆治国, 刘捷丰, 郑路遥, 等. 新型双输入 Boost 变换器[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(9): 42-45.
LU Zhi-guo, LIU Jie-feng, ZHENG Lu-yao, *et al.* Double-input boost converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(9): 42-45. (In Chinese)

[9] 罗全明, 朱玢鑫, 周维维, 等. 一种多路输入高升压 Boost 变换器[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(3): 9-14.
LUO Quan-ming, ZHU Bin-xin, ZHOU Luo-wei, *et al.* High step-up boost converter with multiple-input[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(3): 9-14. (In Chinese)

[10] LU Wei, WU Xin-ke, LU Zheng-yu, *et al.* Wide input voltage isolated DC-DC converter with interleaving control[C]//Proceedings of 12th International Power Electronics and Motion Control Conference. New York: IEEE, 2006: 94-99.

[11] SHEN C L, TSAI C T, WU Y E, *et al.* A modified-forward multi-input power converter for solar energy and wind power generation[C]//Proceedings of International Conference on Power Electronics and Drive Systems. New York: IEEE, 2009: 631-636.

[12] SUN Xiao-feng, PEI Guang-ming, YAO Shuai, *et al.* A novel multi-port DC/DC converter with bi-directional storage unit [C]//Proceedings of 2012 7th International Power Electronics and Motion Control Conference. New York: IEEE, 2012: 1771-1775.

[13] JIANG Y C, QAHOUQ J A A, ORABI M, *et al.* PV solar system with mutiple input power converter operating in discontinuous conduction mode and MPPT Control[C]//Proceedings of Telecommunications Energy Conferences "Smart Power and Efficiency". New York: IEEE, 2013: 1-5.

[14] 李艳, 阮新波, 杨东升. 一种新的双输入直流变换器[J]. 电工技术学报, 2008, 23(6): 77-82.
LI Yan, RUAN Xin-bo, YANG Dong-sheng. A new double-input DC-DC converter[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2008, 23(6): 77-82. (In Chinese)

[15] 侯世英, 陈剑飞, 孙韬, 等. 基于 Switch-Capacitor 网络的单开关升压变换器[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 206-216.
HOU Shi-ying, CHEN Jian-fei, SUN Tao, *et al.* A single-switch step-up converter based on switch-capacitor network [J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 206-216. (In Chinese)

[16] 唐荣波, 侯世英, 陈剑飞. 基于开关电容网络的双输入升压变换器[J]. 电网技术, 2014, 38(1): 146-153.
TANG Rong-bo, HOU Shi-ying, CHEN Jian-fei. A double-input boost converter based on switch-capacitor network[J]. Power System Technology, 2014, 38(1): 146-153. (In Chinese)