

# 一种多端口直流变换器的系统生成方法—— 采用单极性脉冲电源单元

刘福鑫, 阮洁, 阮新波

(江苏省新能源发电与电能变换重点实验室(南京航空航天大学), 江苏省 南京市 210016)

## A Systematic Approach to Synthesize Multi-port DC/DC Converters—— Adopting Unipolar Pulsating Source Cells

LIU Fuxin, RUAN Jie, RUAN Xinbo

(Jiangsu Key-Laboratory of New Energy Generation and Power Conversion(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics),  
Nanjing 210016, Jiangsu Province, China)

**ABSTRACT:** Multi-port DC/DC converters (MPC) can be combined with multiple uni-directional DC/DC converters and bidirectional DC/DC converters into one configuration, which are of potential interest in applications such as renewable power systems and electric vehicle power systems, featuring simpler structure, lower cost and more flexible control. In this paper, available MPC were classified into different types, and the characteristics of each type were illustrated. The unipolar pulsating source cells (UPSC) were extracted from the conventional bidirectional converters; the approach to construct MPC with UPSC and buffer cells was proposed; and corresponding rules for combination and cascade of PSCs and buffer cells were given. Finally, five synthesizing rules for MPC were generalized and a series of MPC topologies were derived.

**KEY WORDS:** multi-port; unipolar; pulse source cell; buffer cell

**摘要:** 多端口直流变换器(multi-port DC/DC converters, MPC)可应用于新能源供电系统与电动汽车供电系统, 它将系统中原有的多个单向和双向直流变换器在电路结构上实现合并, 具有结构简单、成本低、控制灵活等优点。对现有的 MPC 进行分类, 指出每种类型变换器的特点。从基本的双向直流变换器中提取出双向单极性脉冲电源单元, 提出采用脉冲电源单元和缓冲单元组合的方法构建 MPC, 给出脉冲电源单元组合规则及其与缓冲单元的级联规则, 总结归纳

出 5 种不同类型多端口变换器的生成规则, 进而推导出一系列 MPC 拓扑。

**关键词:** 多端口; 单极性; 脉冲电源单元; 缓冲单元

## 0 引言

近年来,“低碳经济”风潮迅速席卷全球。发展电动汽车,可以大幅减少温室气体排放,降低对进口石油的依赖,是发展低碳经济的重要产业,拥有广阔的市场前景。电动汽车可分为以下 3 类:纯电动汽车(electric vehicle, EV)、混合动力汽车(hybrid electric vehicle, HEV)和燃料电池电动汽车(fuel cell electric vehicle, FCEV)<sup>[1]</sup>。除 EV 以外,常见的电动汽车供电系统是采用发电机(或燃料电池)与动力电池(或超级电容)构成的多电源架构。图 1 给出了 FCEV 的供电系统结构图,如图 1(a)所示,系统中存在高压直流母线,不同类型与不同电压等级的动力源通过各自的功率变换器与高压直流母线相连,本文将不同电压等级或类型的输入或输出定义为一个端口,各个端口之间可通过各自的功率变换器与控制单元实现能量单向或双向传递。

图 1(a)中的供电系统存在以下不足:1)功率变换器数量较多,系统结构复杂;2)系统中每增加一个端口就要相应地增加功率变换器及其控制电路,系统成本较高。为了简化系统结构、降低成本,行之有效的方法就是减少系统中功率变换器的数量。为此,本文采用单个功率变换器取代原有的多个功率变换器,实现功率变换器的拓扑合并和功能合并。合并后的功率变换器参与多个直流母线端口

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(50837003, 50807024); 台达环境与教育基金会《电力电子科教发展计划》。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50837003,50807024); Grants from the Power Electronics Science and Education Development Program of Delta Environmental & Educational Foundation.

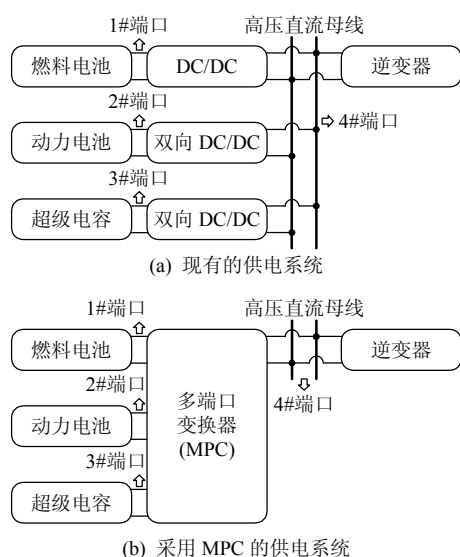


图1 燃料电池电动汽车供电系统结构图

Fig. 1 Power system architectures of FCEV

之间的能量传递,各个端口根据能量传递方向动态的定义为输入或输出,而变换器本身没有固定的输入输出,因而称之为多端口直流变换器(multi-port converter, MPC)。

针对 MPC,近年来国外研究者已提出一些电路结构<sup>[2-14]</sup>,总结而言可分为两类,图2以三端口为例给出两类多端口变换器的电路结构。图2(a)中,1#和2#端口共用直流母线,两个端口共地且与3#端口隔离。其中1#、2#端口与3#端口之间可互相传递能量,而1#和2#端口之间能否直接传递能量要视具体电路而定。该电路变压器结构简单,缺点是部分端口之间可能无法直接传递能量。图2(b)中变换器的3个端口通过一个多绕组的变压器连接在一起,各个端口之间均实现电气隔离,而且各个端口之间均可以互相传递能量,缺点是变压器结构较复杂。文献[15]将上述两类电路结构进行总结,采用直流母线和磁耦合组合的方法,提出了一种 MPC

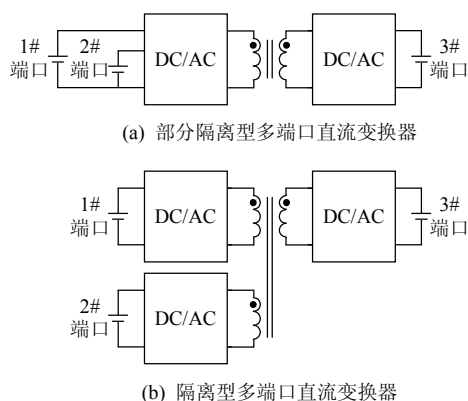


图2 两种典型的多端口直流变换器结构

Fig. 2 Two typical configurations of MPCs

通用拓扑,并推导出一些多端口直流变换器。

本文将总结现有 MPC 电路结构特点,提出采用脉冲电源单元(pulsating source cell, PSC)和缓冲单元(buffer cell, BC)组合的方法构建 MPC,提出 MPC 的基本结构。从基本的双向直流变换器中提取出不同类型的 PSC,给出 PSC 和 BC 的级联规则以及 PSC 的组合规则,根据上述规则总结出 5 种不同类型 MPC 电路的生成规则,进而推导出一系列 MPC 电路拓扑。

## 1 MPC 的分类

根据各个端口之间能量传递方式的不同,可将现有的 MPC 分为 3 种类型,如图 3 所示,本文以三端口为例进行说明。第一类 MPC 结构如图 3(a)所示,其中假设 1#和 2#端口为动力源,3#端口为负载,箭头表示能量传递的方向。该类 MPC 的特点是:某个端口(3#端口)可同时或分时从其它端口单方向的获取能量,而其它端口(1#与 2#端口)之间不能传递能量,该电路拓扑实质为文献[16-18]中的多输入直流变换器。该类变换器仅能实现能量的单向传递,因此不在本文讨论范围之内。第二类 MPC 结构如图 3(b)所示,其特点是:某个端口与其他端口之间可实现单向或双向能量传递,能量传递可以是同时或分时的,而其它端口之间不能相互传递能量。如图 3(b)所示,假设 1#端口为动力源,2#端口为储能装置,它可以是动力电池或超级电容,3#端口为负载,能量可以从动力源和储能装置传递给负载,负载也可向储能装置回馈能量,但是动力源与储能装置之间不能传递能量。第三类 MPC 结构如图 3(c)所示,其特点是:所有端口之间都能进行单向或双向能量传递,各个端口均可作为输入或输出。

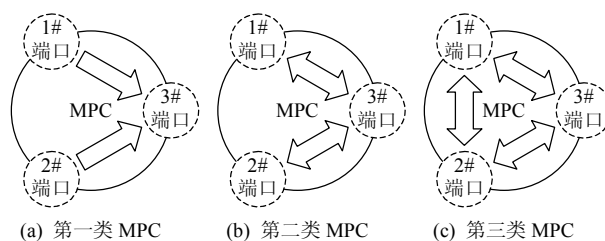


图3 3 种类型的 MPC 结构图

Fig. 3 Three types of MPCs

## 2 MPC 的基本结构

MPC 的特点是各个端口之间可以自由传递能量,且根据系统的能量流实时控制各个端口的电压、电流,进而控制端口的功率。基于该思想,本

文提出 MPC 的基本结构,如图 4 所示,它由多个 PSC 和 BC 组成,每个端口分别连接一个 PSC,多个 PSC 之间通过 BC 实现能量传递。其中 PSC 的作用是提供脉冲电压或电流,进而提供可控的功率。BC 由储能元件构成,其功能是协调各种类型的 PSC,起到中间缓冲作用。



图 4 多端口直流变换器的基本结构

Fig. 4 Basic architecture of MPCs

### 3 脉冲电源单元和缓冲单元

#### 3.1 脉冲电源单元

PSC 由直流源和有源开关网络组成。根据端口能量传递的方向,有单向和双向之分;根据端口输出电压极性或电流方向,又有单极性和双极性之分。鉴于 MPC 的特点,本文拟通过双向单极性 PSC 来构建 MPC。PSC 可从基本的双向变换器中提取,根据端口电气量性质的不同,PSC 可分为脉冲电压源单元(pulsating voltage source cell, PVSC)和脉冲电流源单元(pulsating current source cell, PCSC),下面将分别加以介绍。

##### 1) 脉冲电压源单元。

PVSC 由直流电压源和有源开关网络组成。图 5 给出几种基本的单极性 PVSC(unipolar PVSC,

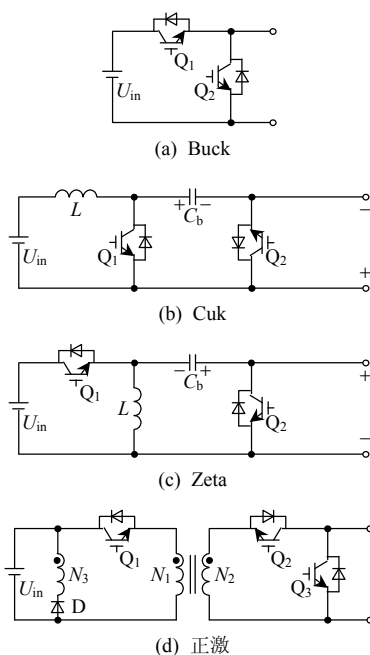


图 5 单极性脉冲电压源单元的电路图

Fig. 5 Circuit configurations of UPVSCs

UPVSC)电路图,分别为 Buck、Cuk、Zeta 和正激型。以图 5(a)中 Buck UPVSC 为例,其中  $Q_1$  和  $Q_2$  为有源开关,两者驱动信号互补。 $Q_1$  开通时, $Q_2$  关断,UPVSC 的输出电压为  $U_{in}$ ;  $Q_1$  关断时, $Q_2$  开通,起续流作用,UPVSC 的输出电压为零。由此可见,在不同的开关时序下,Buck UPVSC 的输出为单极性的脉冲电压信号。同时,当  $Q_1$  开关工作, $Q_2$  保持关断时,能量由电压源向缓冲单元传递,而当  $Q_2$  开关工作, $Q_1$  保持关断时,由后级单元向电压源回馈能量,因此能量可以双向传递。在正激 UPVSC 中,当  $Q_1$  和  $Q_2$  同时开通时,UPVSC 的输出电压为  $kU_{in}$ ,  $k$  为变压器的变比,  $k=N_1/N_2$ ;  $Q_1$  和  $Q_2$  关断后, $Q_3$  和  $D$  导通, $Q_3$  起续流作用, $D$  起磁复位作用,UPVSC 的输出电压为零。

##### 2) 脉冲电流源单元。

脉冲电流源单元由直流电流源和有源开关网络组成,其中直流电流源由直流电压源和一个大电感串联得到。图 6 给出了几种基本的单极性脉冲电流源单元(unipolar PCSC, UPCSC)的电路图,分别为 Boost、Buck-Boost、SEPIC 和反激型。以图 6(a)中 Boost UPCSC 为例,其中  $Q_1$  和  $Q_2$  的驱动信号互补。 $Q_1$  开通时, $Q_2$  关断,电感  $L$  储能,UPCSC 的输出电流为零;  $Q_1$  关断时, $Q_2$  开通,电源和电感同时向后级提供能量,UPCSC 的输出电流为  $I_{in}$ ,  $I_{in}$  为电源输入电流。由此可见,在不同的开关时序下,Boost UPCSC 的输出为单方向的脉冲电流信号。同

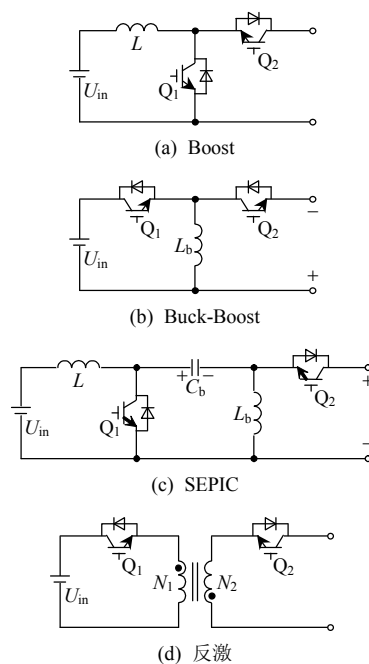


图 6 单极性脉冲电流源单元的电路图

Fig. 6 Circuit configurations of UPCSCs

时,选择合适的控制策略,可以实现能量双向传递。在反激UPCSC中,当 $Q_1$ 开通时,原边电感储能,UPCSC的输出电流为零; $Q_1$ 关断后, $Q_2$ 导通,电感释放能量,UPVSC的输出电流为 $I_m/k$ , $k$ 为变压器的变比, $k=N_1/N_2$ 。

### 3.2 缓冲单元

最简单的缓冲单元是由电感或电容构成的二端口网络,分为电压型和电流型两种。电压型BC用来连接UPCSC,电流型BC用来连接UPVSC,图7(a)、(b)给出了两种缓冲单元的电路图。此外本文还将电感和电容的组合定义为混合型BC,如图7(c)所示。不同的UPSC之间通过电压型BC、电流型BC或混合型BC实现级联。

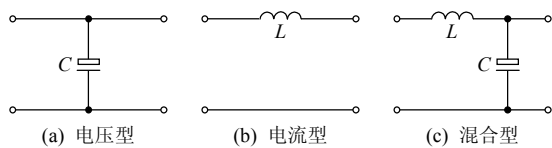


图7 缓冲单元的电路图

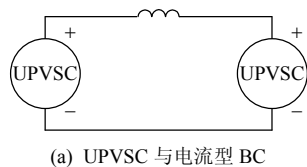
Fig. 7 Circuit configurations of buffer cells

## 4 MPC 电路拓扑的生成规则

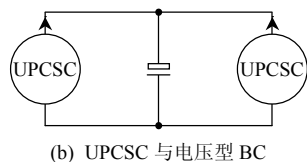
### 4.1 脉冲电源单元与缓冲单元的级联规则

由电路基本理论可知,两个不同类型的UPSC可以直接级联,此外如果将电压源和电容构成的回路短接,或将电流源和电感组成的割集开路,将会出现大的电压或电流尖峰,因此两个相同类型UPSC之间需要级联合适的BC,具体而言,UPVSC之间必须通过电感相连,UPCSC之间必须通过电容相连。结合BC的具体电路形式,有如下结论:

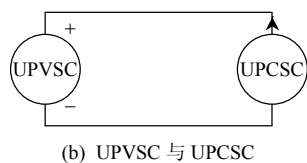
1)UPVSC必须通过电流型BC级联,如图8(a)



(a) UPVSC 与电流型 BC



(b) UPCSC 与电压型 BC



(b) UPVSC 与 UPCSC

图8 两个UPSC的级联形式

Fig. 8 Connection of two UPSCs

所示。

2)UPCSC必须通过电压型BC级联,如图8(b)所示。

3)不同类型的UPSC之间无需缓冲单元,可直接级联,如图8(c)所示。

在构建MPC时,需要将多个UPSC进行级联,其原则是保证当某个UPSC退出工作时,电路仍能正常工作。多个UPSC级联包括3种情况:多个UPVSC级联、多个UPCSC级联以及多个UPVSC和多个UPCSC级联。

1)多个UPVSC级联。

多个UPVSC级联时,由图8(a)可知,每两个UPVSC之间必须通过电流型BC进行级联,从而得到如图9(a)所示的电路结构。但在该电路中,当其中任意一个UPVSC退出工作时,将出现纯电感割集,当电路换路时,电感电流有可能发生突变,因此必须改进。为此可将每个UPVSC支路串接一个电感后再进行级联,此时每个支路可等效为一个电流源,如图9(b)所示,为避免电路中出现纯电感割集,必须在各个支路的联接点处引入电容,该电容作为公共缓冲电容。当任意UPVSC支路退出工作时,其余UPVSC之间仍能正常工作。图9(b)所示电路实质是采用中间直流母线结构,每增加一个端口,电路中只需增加一个电感,电路结构相对简洁。

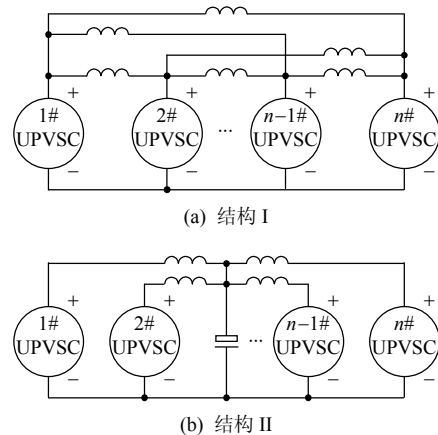


图9 多个UPVSC的级联形式

Fig. 9 Connection of multiple UPVSCs

2)多个UPCSC级联。

由两个UPCSC级联推广至多个UPCSC级联时,有且仅有图10所示一种形式,此时只需将其其他UPCSC直接并联在缓冲电容两端即可,所有的UPCSC共用一个缓冲电容,缓冲电容两端作为公共直流母线,电路结构简洁。由图10可知,当任意UPCSC支路退出工作时,其余UPCSC之间仍能

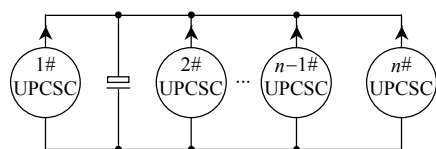


图 10 多个 UPCSC 的级联形式

Fig. 10 Connection of multiple UPCSCs

正常工作。

### 3) 多个 UPVSC 和多个 UPCSC 级联。

当多个 UPVSC 与多个 UPCSC 级联时, 根据图 9(b)和 10 可得如图 11 所示的级联形式。

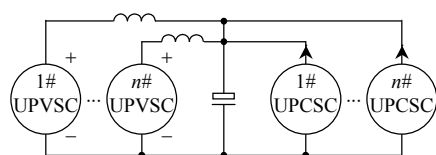


图 11 多个 UPVSC 与多个 UPCSC 的级联形式

Fig. 11 Connection of multiple UPVSCs and UPCSCs

综合上述结论可得, 当两个以上 UPVSC 和 UPCSC 进行级联时, 必须遵循以下级联规则:

级联规则 1: 任意两个 UPVSC 之间须通过两个电流型 BC 与一个电压型 BC 进行级联。

级联规则 2: 任意两个 UPCSC 之间须通过电压型 BC 进行级联。

级联规则 3: 任意两个 UPVSC 与 UPCSC 之间须通过混合型 BC 进行级联。

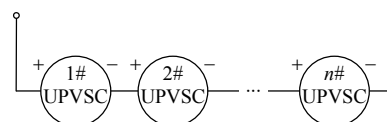
## 4.2 脉冲电源单位的组合规则

上述级联的 UPSC 既可以是基本的 UPSC, 也可以是通过 UPSC 组合而成的等效 UPSC, 因此有必要讨论不同 UPSC 的组合规则。

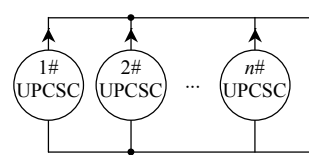
UPSC 的组合形式与直流源类似, 多个 UPVSC 可以直接串联, 多个 UPCSC 可以直接并联, 其组合形式如图 12(a)、(b)所示。由基尔霍夫定律可知, 多个电压幅值不同的恒压源不能直接并联, 多个电流幅值不同的恒流源不能直接串联, 但脉冲电源则不同, 只要采用合理的开关时序, 使多个 UPVSC 或 UPCSC 不同时供电, 从理论上讲, 也可以将多个 UPVSC 并联或多个 UPCSC 串联, 其组合形式如图 12(c)、(d)所示。

在图 12(c)、(d)所示的组合电路中, 为防止直流电压源的直接并联或直流电流源的直接串联, 串联的 UPVSC 或并联的 UPCSC 只能分时工作, 其应用场合受限, 因此本文不讨论这两种组合形式。

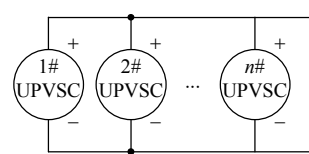
此外, 多个 UPVSC 与多个 UPCSC 也可串并联组合, 但当表征电路特性的脉冲电源发生故障时, 整个组合单元将无法正常工作, 因此这种组合形式



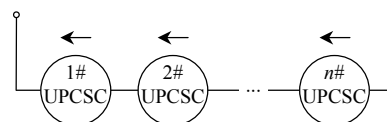
(a) 多个 UPVSC 串联



(b) 多个 UPCSC 并联



(c) 多个 UPVSC 并联



(d) 多个 UPCSC 串联

图 12 脉冲电源单位的组合形式

Fig. 12 Combination of UPSCs

也无实用价值。

综上所述, 脉冲电源单位的组合规则有两种:

组合规则 1: 将多个 UPVSC 直接串联, 组合后的电路等效为单个 UPVSC。

组合规则 2: 将多个 UPCSC 直接并联, 组合后的电路等效为单个 UPCSC。

## 4.3 MPC 电路拓扑的生成规则

由上述两种规则可直接推导出 MPC 电路拓扑的生成规则, 分为 3 类, 具体规则如下:

### 1) 多个脉冲电源单位组合后直接级联。

由图 8(c)和 12(a)可得生成规则 1。

生成规则 1: 多个 UPVSC 串联组合, 等效为单个 UPVSC, 再与单个 UPCSC 直接级联, 进而生成 MPC, 其电路结构如图 13(a)所示。

由生成规则 1 推导的 MPC 电路拓扑中, UPVSC 之间相互串联, 无缓冲单元, 因此无法直接传递能量, 该类 MPC 属于第二类 MPC。

### 2) 多个脉冲电源单位与单个缓冲单元级联。

由图 8(a)和 12(a)可得生成规则 2。

生成规则 2: 两组 UPVSC 通过电流型 BC 进行级联, 每组 UPVSC 由多个 UPVSC 串联等效而成, 进而生成 MPC, 其电路结构如图 13(b)所示。

与生成规则 1 相同, 该类 MPC 也属于第二类 MPC。

由图 10 和 12(b)可得生成规则 3。

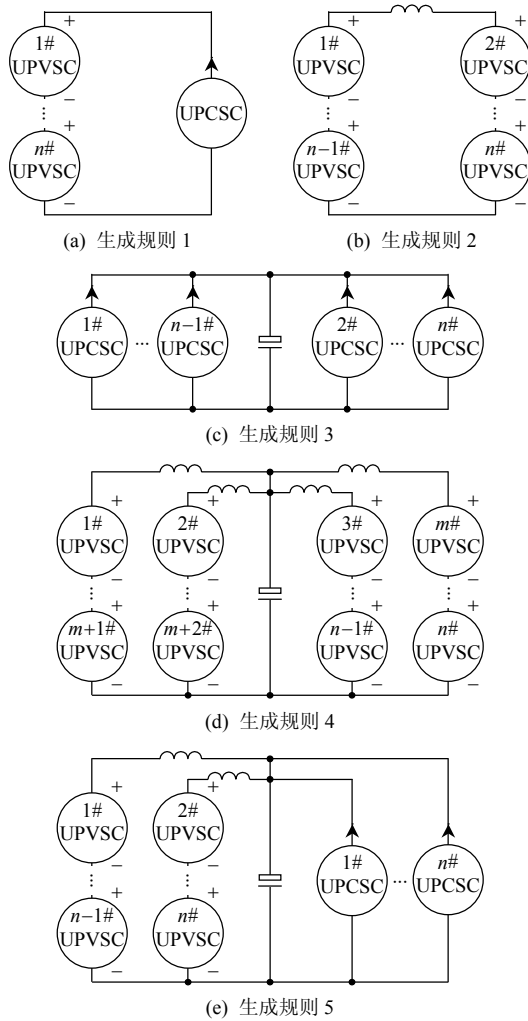


图13 不同生成规则对应的 MPC 电路结构

Fig. 13 MPCs derived from different synthesizing rules

生成规则 3: 多个 UPCSC 通过单个电压型 BC 进行级联, 进而生成 MPC, 其电路结构如图 13(c) 所示, 其中 UPCSC 可以是单个或多个并联的组合, 两种情况等效。

该类 MPC 实质上是多个 UPCSC 共用一个电压型 BC, 电压型 BC 两端作为公共直流母线。该类 MPC 的特点是易于扩展至多端口, 此外在任意时刻, 某个端口可以分时或同时与其他端口互相传递能量, 控制灵活, 属于第三类 MPC。

3) 多个脉冲电源单元与多个缓冲单元级联。

由图 9(b) 和图 12(a) 可得生成规则 4。

生成规则 4: 多组 UPVSC 进行级联, 每组 UPVSC 支路串接一个电流型 BC, 所有支路通过一个公共电压型 BC 级联, 进而生成 MPC, 其电路结构如图 13(d) 所示。

如果每组中的 UPVSC 为单个 UPVSC, 这些 UPVSC 之间可通过 BC 直接互相传递能量, 此时生成的 MPC 属于第三类 MPC; 如果任意一组中的

UPVSC 由多个 UPVSC 串联等效而成, 则属于第二类 MPC。

由图 11 和 12(a)、(b) 可得生成规则 5。

生成规则 5: 多组 UPVSC 和多组 UPCSC 进行级联, 任意 UPVSC 与 UPCSC 之间通过混合型 BC 级联, 进而生成 MPC, 其电路结构如图 13(e) 所示。

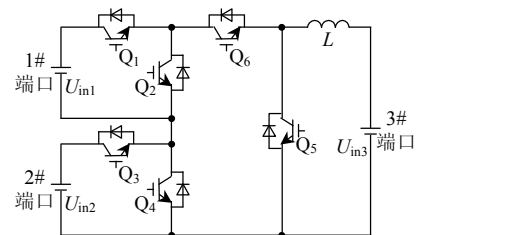
由生成规则 5 推导出的 MPC 分类与生成规则 4 相同。

## 5 MPC 电路拓扑的生成

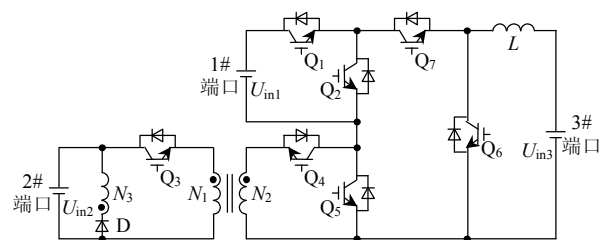
为简单起见, 本文以三端口直流变换器为例, 分别给出由上述生成规则推导出的 MPC 电路拓扑。

1) 由生成规则 1 推导的 MPC。

根据生成规则 1, 先将两个 UPVSC 串联, 再与单个 UPCSC 直接级联, 即可构成三端口直流变换器, 图 14 给出了由该规则生成的 MPC, 图 14(a) 是由两个 Buck 型 UPVSC 串联后与 Boost 型 UPCSC 级联构成的 MPC, 图 14(b) 是将 Buck 型和正激型 UPVSC 串联后再与 Boost 型 UPCSC 级联构成的 MPC。



(a) 两个 Buck 型 UPVSC &amp; Boost 型 UPCSC



(b) Buck 型 &amp; 正激型 UPVSC &amp; Boost 型 UPCSC

图 14 由生成规则 1 推导的 MPC 电路拓扑

Fig. 14 MPC topologies derived from synthesizing rule 1

2) 由生成规则 2 推导的 MPC。

根据生成规则 2, 先将两个 UPVSC 串联, 再与其他 UPVSC 通过电流型 BC 级联, 即可构成三端口变换器, 图 15 为由该规则推导的电路拓扑, 图 15(a) 由 3 个 Buck 型 UPVSC 组成, 图 15(b) 由两个 Buck 型 UPVSC 和正激型 UPVSC 组成。

3) 由生成规则 3 推导的 MPC。

根据生成规则 3, 选择任意 3 种 UPCSC, 将其

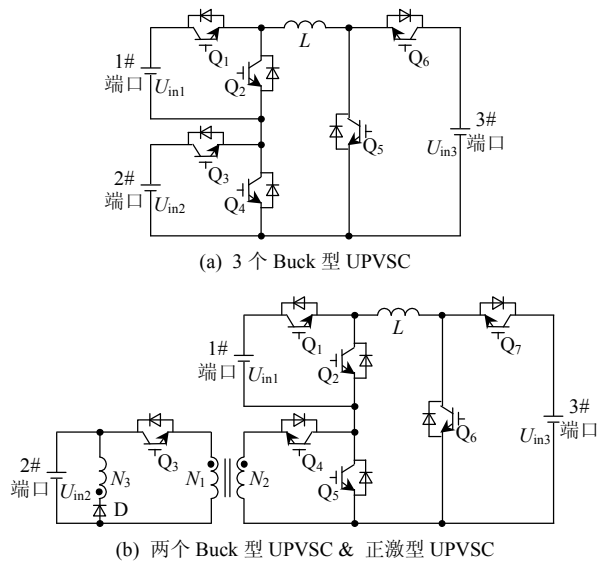


图 15 由生成规则 2 推导的 MPC 电路拓扑

Fig. 15 MPC topologies derived from synthesizing rule 2

直接与电压型 BC 并联, 即可构成三端口直流变换器。图 16 为由该规则生成的 MPC 电路, 图 16(a)是由 3 个 Boost 型 UPCSC 构成的 MPC, 图 16(b)是由 3 个反激型 UPCSC 构成的 MPC。

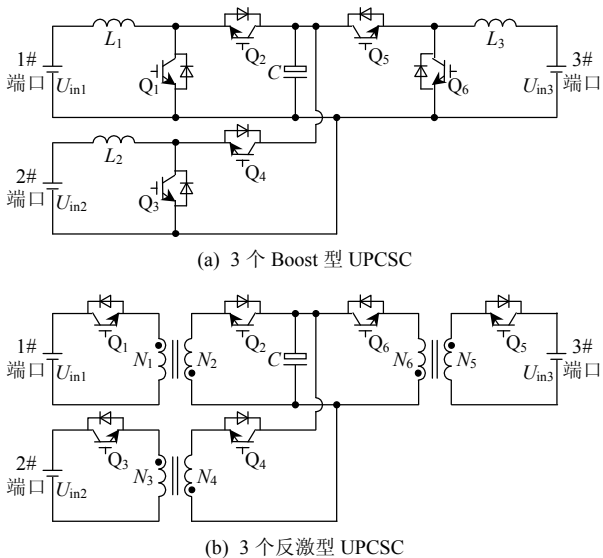


图 16 由生成规则 3 推导的 MPC 电路拓扑

Fig. 16 MPC topologies derived from synthesizing rule 3

#### 4) 由生成规则 4 推导的 MPC。

由生成规则 4 推导的 MPC 分为两种, 图 17 为这两种 MPC 的电路结构图, 其中图 17(a)是将两个 UPVSC 串联后, 再与单个 UPVSC 进行级联, 该电路结构与图 13(b)等效, 图 17(b)是将 3 个 UPVSC 通过 BC 直接进行级联。

图 18 为由图 17(b)推导出的 MPC, 图 18(a)是 3 个 Buck 型 UPVSC 构成的 MPC, 图 18(b)由两个 Buck 型 UPVSC 和正激型 UPVSC 组合而成。

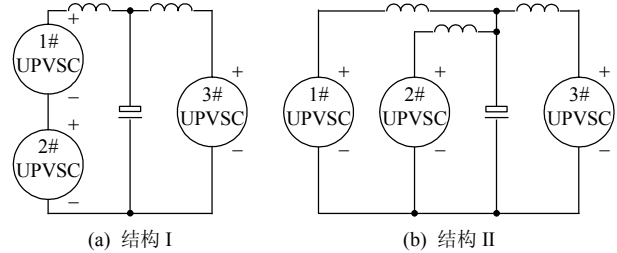
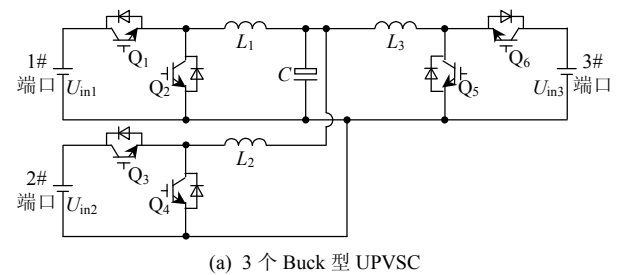
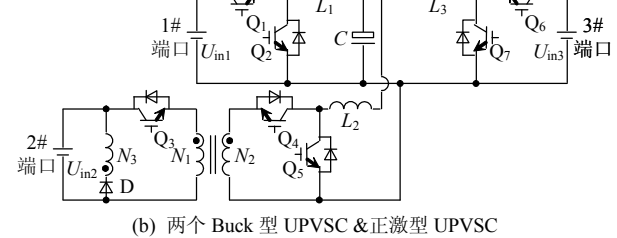


图 17 由生成规则 4 推导的 MPC 电路结构图

Fig. 17 MPC architectures derived from synthesizing rule 4



(a) 3 个 Buck 型 UPVSC



(b) 两个 Buck 型 UPVSC &amp; 正激型 UPVSC

图 18 由生成规则 4 推导的 MPC 电路拓扑

Fig. 18 MPC topologies derived from synthesizing rule 4

#### 5) 由生成规则 5 推导的 MPC。

由生成规则 5 推导的 MPC 分为 3 种, 图 19 为这 3 种 MPC 的电路结构图, 其中图 19(a)是将两个 UPVSC 串联后, 再与单个 UPVSC 进行级联, 图 19(b)、(c)是将 UPVSC 与 UPCSC 直接通过混合型 BC 进行级联。

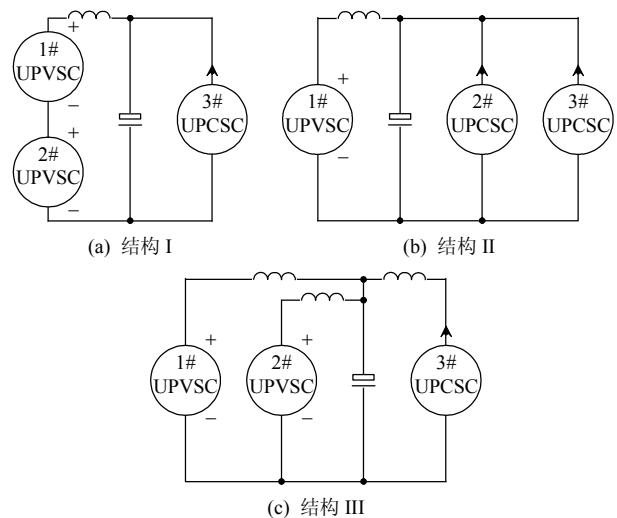


图 19 由生成规则 5 推导的 MPC 电路结构图

Fig. 19 MPC architectures derived from synthesizing rule 5

图 20 为由图 19(a)推导出的 MPC, 图 20(a)是两个 Buck 型 UPVSC 串联后与 Boost 型 UPCSC 构成的 MPC, 图 20(b)是两个 Cuk 型 UPVSC 串联后与 Buck-boost 型 UPCSC 构成的 MPC。

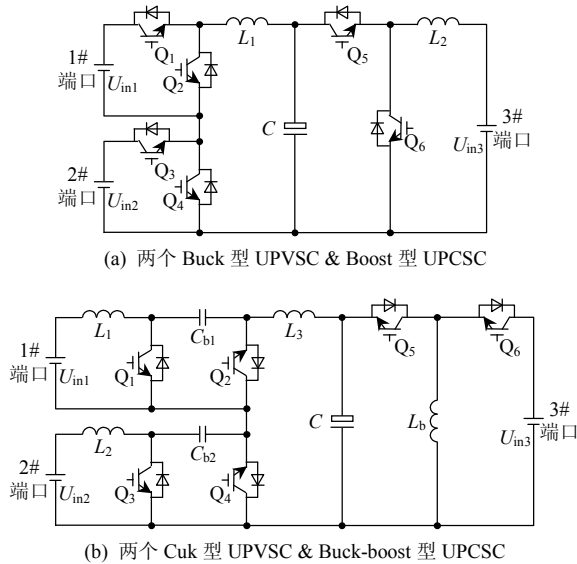


图 20 由生成规则 5 推导的 MPC 电路拓扑(I)

Fig. 20 MPC topologies (I) derived from synthesizing rule 5

图 21 为由图 19(b)推导出的 MPC, 图 21(a)是单个 Buck 型 UPVSC 与两个 Boost 型 UPCSC 通过混合型 BC 级联而成, 图 21(b)则是由单个正激型 UPVSC 与两个 Boost 型 UPCSC 构成。

图 22 为由图 19(c)推导出的 MPC, 图 22(a)是两个 Buck 型 UPVSC 与 Boost 型 UPCSC 构成的 MPC, 图 22(b)是正激型 UPVSC、Zeta 型 UPVSC

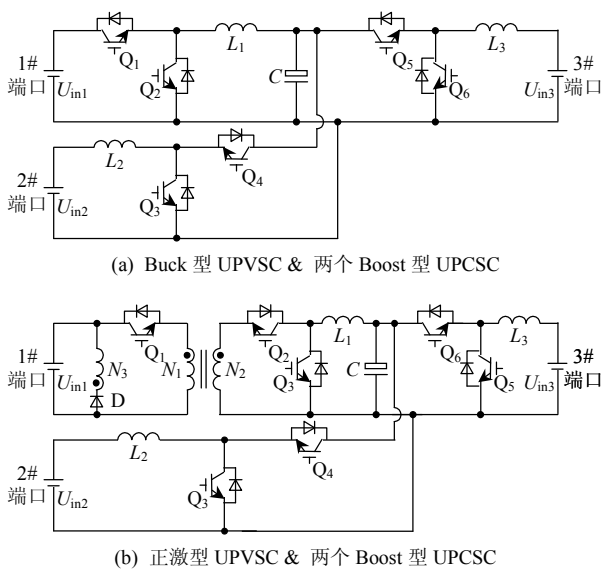


图 21 由生成规则 5 推导的 MPC 电路拓扑(II)

Fig. 21 MPC topologies (II) derived from synthesizing rule 5

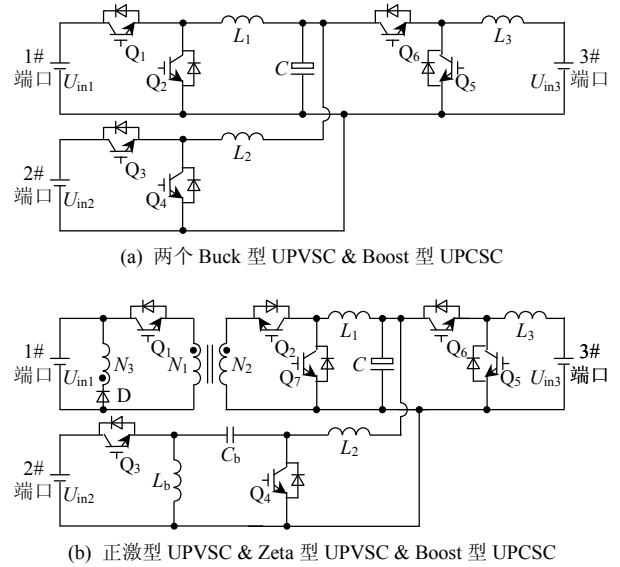


图 22 由生成规则 5 推导的 MPC 电路拓扑(III)

Fig. 22 MPC topologies (III) derived from synthesizing rule 5

与 Boost 型 UPCSC 构成的 MPC。

## 6 结论

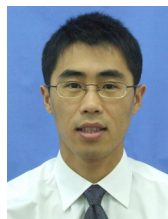
多端口直流变换器可以实现多个电气端口之间的能量传递, 在新能源发电系统和电动汽车供电系统中具有广阔的应用前景。本文首先给出了多端口变换器的概念和分类, 提出多端口变换器的基本结构, 即采用脉冲电源单元和缓冲单元级联的方法构建多端口直流变换器。归纳总结了脉冲电源单元的组合规则及与缓冲单元的级联规则, 在此基础上, 提出了多端口直流变换器的生成规则。由生成规则推导出不同种类和特点的 MPC 电路拓扑, 所推导出的电路拓扑简单实用, 可广泛应用于多端口功率变换系统。

## 参考文献

- [1] Emadi A, Williamson S S, Khaligh A. Power electronics intensive solutions for advanced electric, hybrid electric, and fuel cell vehicular power systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21(3): 567-577.
- [2] Tao H, Kotsopoulos A, Duarte J L, et al. A soft-switched three-port bidirectional converter for fuel cell and supercapacitor applications[C]//IEEE Power Electronics Specialists Conference. Recife: IEEE, 2005: 2487-2493.
- [3] Tao H, Duarte J L, Hendrix M A M. Multiport converters for hybrid power sources[C]//IEEE Power Electronics Specialists Conference. Rhodes: IEEE, 2008: 3412-3418.
- [4] Tao H, Duarte J L, Hendrix M A M. Three-port triple half-bridge bidirectional converter with zero-voltage



- switching[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(2): 782-792.
- [5] Su G, Tang L. A bidirectional, triple-voltage DC-DC converter for hybrid and fuel cell vehicle power systems [C]//IEEE Applied Power Electronics Conference. Anaheim: IEEE, 2007: 1043-1049.
- [6] Su G, Tang L. A multiphase, modular, bidirectional, triple-voltage DC-DC converter for hybrid and fuel cell vehicle power systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(6): 3035-3046.
- [7] Krishnaswami H, Mohan N. A current-fed three-port bi-directional DC-DC converter[C]//IEEE Institute of Electrical & Electronics Engineers. Rome: IEEE, 2007: 523-526.
- [8] Krishnaswami H, Mohan N. Three-port series-resonant DC-DC converter to interface renewable energy sources with bidirectional load and energy storage ports[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(10): 2289-2297.
- [9] Al-Atrash H, Tian F, Batarseh I. Tri-modal half-bridge converter topology for three-port interface[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(1): 341-345.
- [10] Lai J S, Nelson D J. Energy management power converters in hybrid electric and fuel cell vehicles[J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(4): 766-777.
- [11] Zhao C, Round S D, Kolar J W. An isolated three-port bidirectional DC-DC converter with decoupled power flow management[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(5): 2443-2453.
- [12] Li H, Liu D. Power distribution strategy of fuel cell vehicle system with hybrid energy storage elements using triple half bridge (THB) bidirectional DC-DC converter [C]//IEEE Industry Application Society Annual Meeting. New Orleans: IEEE, 2007: 636-642.
- [13] Wang L, Wang Z, Li H. Optimized energy storage system design for a fuel cell vehicle using a novel phase shift and duty cycle control[C]//IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. San Jose: IEEE, 2009: 1432-1438.
- [14] Qian Z, Abdel-Rahman O, Pepper M, et al. Analysis and design for paralleled three-port DC/DC converters with democratic current sharing control[C]//IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. San Jose: IEEE, 2009: 1375-1382.
- [15] Tao H, Duarte J L, Hendrix M A M. Family of multiport bidirectional DC-DC converters[J]. IEEE Proceedings of Electric Power Applications, 2006, 153(3): 451-458.
- [16] Liu Y, Chen Y. A systematic approach to synthesizing multi-input DC/DC converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(1): 116-127.
- [17] Gummi K, Ferdowsi M. Double-input DC-DC power electronic converters for electric drive vehicles—topology exploration and synthesis using a single-pole triple-throw switch[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(2): 617-623.
- [18] Li Y, Ruan X, Yang D, et al. Synthesis of multiple-input DC/DC converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(9): 2372-2385.



刘福鑫

收稿日期: 2011-10-31。

作者简介:

刘福鑫(1979), 男, 博士, 副教授, 研究方向为功率电子变换技术和新能源发电系统, liufuxin@nuaa.edu.cn;

阮洁(1984), 男, 硕士研究生, 研究方向为功率电子变换技术;

阮新波(1970), 男, 博士, 教授、博士生导师, 教育部“长江学者”特聘教授, 研究方向为功率电子变换技术、航空航天电源系统、电力电子系统集成和新能源发电系统。

(责任编辑 吕鲜艳)