

无缓冲单元的多输入直流变换器电路拓扑

李 艳^{1,2} 阮新波¹ 杨东升¹ 刘福鑫¹

(1. 南京航空航天大学航空电源重点实验室 南京 210016) 2. 燕山大学电气工程学院 秦皇岛 066004)

摘要 在采用两个甚至多个输入源的新能源联合供电系统中, 用单个多输入直流变换器 MIC 代替原有的多个单输入直流变换器, 可以简化电路结构, 降低系统成本。MIC 可分为无缓冲单元和带缓冲单元的两类, 文中讨论了无缓冲单元的 MIC 电路拓扑的生成方法。首先给出构成无缓冲单元的 MIC 电路拓扑的基本单元, 提出生成 MIC 时基本单元之间的组合级联规则, 由此推导出一系列无缓冲单元的 MIC 电路拓扑。

关键词: 多输入 直流变换器 新能源联合供电系统

中图分类号: TM463

Multiple-Input DC/DC Converters Without Buffer Cells

Li Yan^{1,2} Ruan Xinbo¹ Yang Dongsheng¹ Liu Fuxin¹

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics Nanjing 210016 China 2. Yanshan University Qinhuangdao 066004 China)

Abstract In the renewable energy power system with two or more sources, the application of multiple-input converter(MIC) instead of several single-input converters can simplify the circuit and reduce the cost of the power system. MIC can be categorized into two lists, MIC without buffer cells and MIC with buffer cells. In this paper, a new method for synthesizing MICs without buffer cells is proposed. By analyzing the topologies of the single-input DC-DC converters, the basic cells of MIC are proposed. According to the presented synthesizing rules, a series of MICs without buffer cells are generated.

Keywords: Multiple-input, DC/DC converter, renewable hybrid power system

国家自然科学基金青年科学基金 (50807024)、新世纪优秀人才支持计划和江苏省“六大人才高峰”计划 (07-E-022) 资助项目。
收稿日期 2008-08-21 改稿日期 2009-02-21

1 引言

石化能源是不可再生能源, 正日益枯竭, 它所造成的环境污染也日益严重。为了可持续发展, 人们正在寻找新的替代能源。可再生能源具有廉价、可靠、清洁无污染、可永续利用的特点, 因此可再生能源有良好的市场前景。目前, 应用较多的可再生能源发电形式有光伏发电、风力发电、水力发电

和地热发电等, 但均存在电力供应不稳定、不连续和随气候条件变化等缺点, 因此需要采用多种能源联合供电系统^[1]。

在传统的新能源联合供电系统中, 每种能源形式通常需要一个 DC/DC 变换器, 将各种能源变成直流输出, 并联在公共的直流母线上, 结构较复杂, 且成本较高^[2]。为了简化电路结构、降低系统成本, 可以用一个多输入直流变换器 (Multiple-Input Converter, MIC) 代替多个单输入直流变换器。MIC 是将多个输入源和单个负载连接在一起的变换器, 它允许多个输入源向单个负载供电, 输入源的性质、幅值和特性可以相同, 也可以不同, 多输入源可以分别或同时向负载供电。

近年来, 国内外的学者已经提出了一些

MIC 电路拓扑。根据多种输入源连接方式的不同, MIC 可分两类:

(1) 同时供电型: 多种输入源既可以独立向负载供电, 也可以同时向负载供电。此类电路拓扑分为电压型和电流型两类。电压型 MIC 中的多个输入电压源串联起来向负载供电, 当某一路输入电压源不工作时, 则需要一条将其旁路的支路以保证其他输入电压源继续向负载供电^[3]; 电流型 MIC 电路拓扑中的多个输入电流源并联起来向负载供电, 当某一路输入电流源不工作时, 则需要串入一个开关器件使其不再向负载供电^[4-6]。

(2) 分时供电型: 任一时刻均只有一种输入源向负载供电。此类电路拓扑分为电压型和电流型两类。在电压型 MIC 电路拓扑中, 由于各输入电压源的幅值不一定相等, 它们在并联时只能分时工作, 因此每一路都需要串入一个开关器件^[7-8]。类似地, 在电流型 MIC 电路拓扑中, 由于多个输入电流源的电流幅值不一定相等, 它们在串联时只能分时工作, 因此每一路都需要一条将其旁路的支路^[9]。

文献[10]提出了脉冲电压源单元 (Pulsating Voltage Source Cell, PVSC) 和脉冲电流源单元 (Pulsating Current Source Cell, PCSC) 的概念, 并将其应用于六种基本的非隔离型 DC/DC 变换器中, 得到了一些非隔离型 MIC 电路拓扑。

本文提出一种无缓冲单元的 MIC 电路拓扑的生成方法。首先对文献[10]提出的脉冲电源单元进行扩展, 提出新的隔离型脉冲电源单元, 并给出它们的电路结构; 提出 MIC 电路拓扑构成的基本规则; 推导出一系列无缓冲单元 MIC 电路拓扑; 并将结构较复杂的隔离型 MIC 电路拓扑进一步简化, 给出简化原则。

2 MIC 的基本单元

从分析电路拓扑的角度来说, 有些单输入直流变换器可以看成由脉冲电源单元和输出滤波器组成, 如图 1a 所示。而另一些在两者之间增加了缓冲单元, 如图 1b 所示。

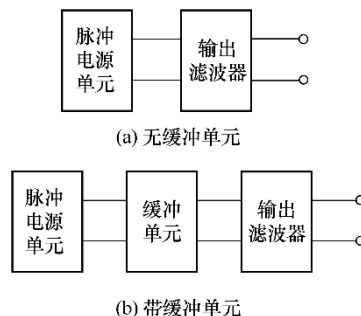


图 1 单输入直流变换器的结构图

Fig.1 Topological structure of single-input DC-DC converter

无缓冲单元的单输入直流变换器可分为 Buck 型和 Boost 型, 因此, 输出电压将高于或低于输入电压; 带缓冲单元的包括 Buck-Boost 型、Cuk 型、Zeta 型以及 Sepic 型, 因此, 输出电压既可高于输入电压也可低于输入电压, 并且输出电压的极性可以与输入电压极性相反。当然, 除了这些非隔离型电路拓扑, 还有隔离型的。

本文只讨论无缓冲单元的 MIC 电路拓扑的生成方法, 因此, 下面将详细介绍脉冲电源单元和输出滤波器的功能及电路结构, 而有关缓冲单元的内容将在带缓冲单元的 MIC 电路拓扑一文中详细介绍。

2.1 脉冲电源单元

脉冲电源单元分为电压源型和电流源型两种, 其输出分别为脉冲的电压和电流, 可以通过调整脉冲的宽度控制向后级输出的功率, 下面将分别加以介绍。

2.1.1 脉冲电压源单元

最简单的 PVSC 包括一个电压源和一个有源开关网络。若为隔离型, 则需增加隔离变压器, 图 2 给出了 Buck、正激、推挽、半桥、全桥 PVSC 的电路结构。当 Buck PVSC 中的开关管 Q_1 开通时, 二极管 VD_1 截止, 电源单元的输出电压为 V_{in} ; 当 Q_1 关断时, 二极管 VD_1 续流导通, 电源单元的输出电压为 0^[10]。当推挽 PVSC 中的 Q_1 开通的同时 Q_2 关断, 二极管 VD_1 导通, 二极管 VD_2 截止, 二极管起整流作用, 电源单元的输出电压为 kV_{in} (k 为变压器电压比); 当 Q_1 关断的同时 Q_2 开通, 二极管 VD_2 导通, 电源单元的输出电压为 kV_{in} ; 当 Q_1 和 Q_2 均

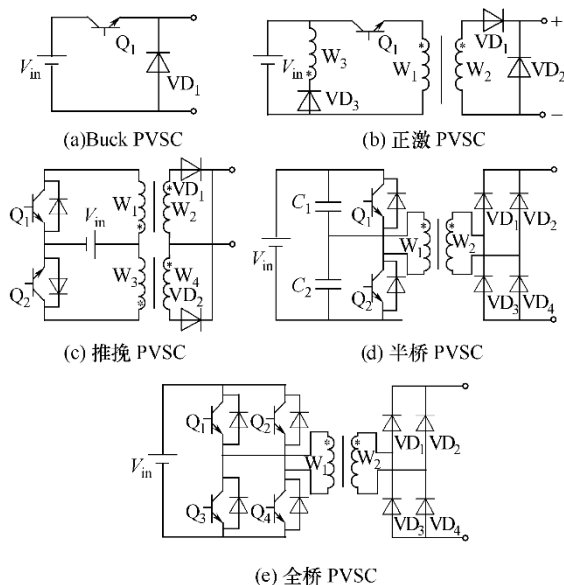


图 2 脉冲电压源单元的电路图

Fig.2 Circuit configuration of PVSC

关断时, 二极管 VD_1 和 VD_2 均导通, 二极管起续流作用, 电源单元的输出电压为 0。

2.1.2 脉冲电流源单元

根据对偶原则, 可以得到 PVSC 相对应的五种 PCSC, 其中与恒定电压源对应的恒定电流源可以由恒定电压源和一个大电感串联得到。图 3 给出了 Boost、正激、推挽、半桥、全桥 PCSC 的电路结构, 其中正激电流源单元的电路结构较复杂, 对控制电路的要求很高, 这里不采用。当 Boost PCSC 中的 Q_1 开通时, 电感 L_1 储能, 二极管 VD_1 截止, 起阻断作用, 电源单元的输出电流为 0; 当 Q_1 关断时, 二极管 VD_1 导通, 电源单元的输出电流为 I_{in} (I_{in} 为电源电流) [10]。在推挽 PCSC 中, 当 Q_1 关断 Q_2 导通时, 二极管 VD_1 导通, 起整流作用, 电源单元的输出为 kI_{in} ; 当 Q_1 导通而 Q_2 关断时, 二极管 VD_2 导通, 起整流作用, 电源单元的输出为 kI_{in} ; Q_1 和 Q_2 同时开通时, 电感 L_1 储能, 二极管 VD_1 和 VD_2 截止, 起阻断作用, 电源单元的输出电流为 0。

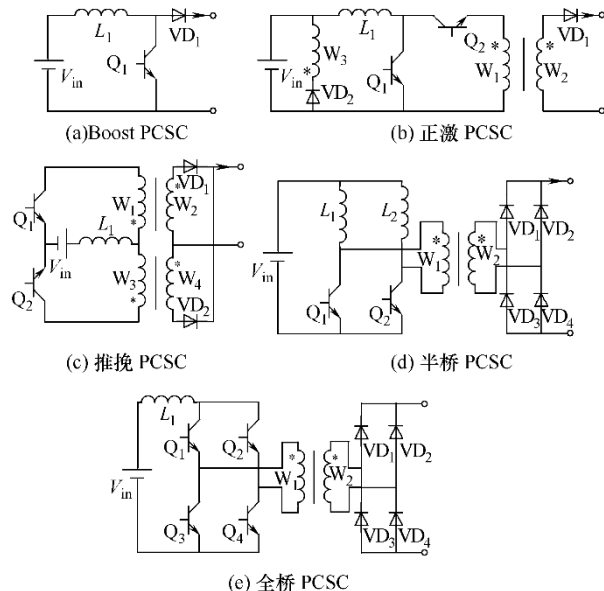


图 3 脉冲电流源单元的电路图

Fig.3 Circuit configuration of PCSC

2.2 输出滤波器

输出滤波器有电压源型和电流源型两种, 电路如图 4 所示, 它们分别由电容和电感与电容构成。

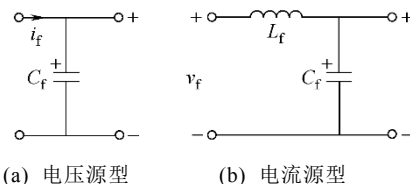


图 4 输出滤波器的电路图

Fig.4 Circuit configuration of output filter

3 生成 MIC 电路拓扑的规则

生成任何一种电路拓扑都要符合拓扑学的基本约束条件 [11]: ①电压不同的电压源不能直接并联; ②电流不同的电流源不能直接串联。

为满足上述约束条件, 在生成 MIC 电路拓扑时, 相同类型的单元组合时必须符合组合规则, 不同类型的单元级联时必须符合级联规则。下面分别加以介绍。

3.1 脉冲电源单元的组合规则

由电路拓扑构成恒定电源的组合规则可知, 多个脉冲电源单元的组合形式有两种 [11]。

(1) 将多个脉冲电压源串联, 等效为单个脉冲电压源, 结构如图 5a 所示。将多个脉冲电流源并联, 等效为单个脉冲电流源, 结构如图 5b 所示。按照此规则生成的电路拓扑有如下特点: 控制上十分灵活, 多个电源可以同时或分时而向负载供电。

(2) 由上述约束条件可知, 多个恒定电压源不能并联, 多个恒定电流源不能串联。因此, 若将多个 PVSC 并联, 或者将多个 PCSC 串联, 它们必须分时工作, 结构如图 5c 和图 5d 所示。按照此规则生成的电路拓扑, 在任一时刻, 多个电源只能单独向负载提供能量, 不能同时工作。

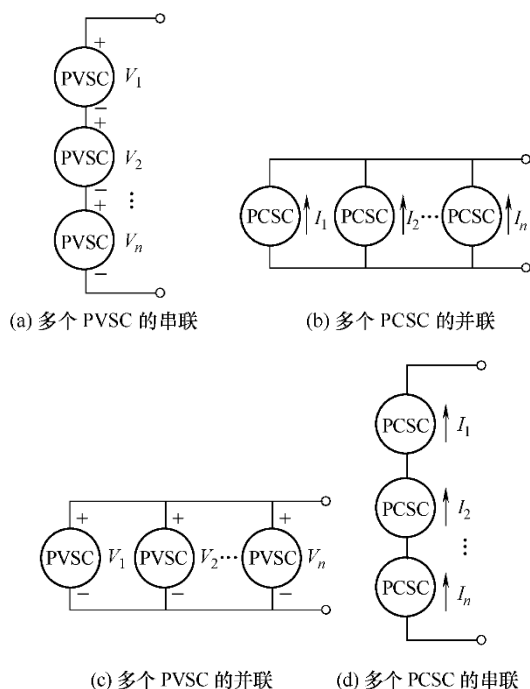


图 5 多个脉冲电源单元组合的结构框图

Fig.5 Combination conceptual diagram of multiple PSCs

因此, 多个脉冲电源单元有效的组合方式共有四种, 按照等效的电源性质不同, 分为电压源型和电流源型两大类。图 5a 和图 5c 可以等效为单个脉冲电压源。图 5b 和图 5d 可以等效为单个脉冲电流源。

3.2 不同单元的级联规则

为满足上述约束条件, 相邻单元的电源性质不能相同, 即脉冲电源单元与输出滤波器的电源性质不能相同^[11]。

由前面的介绍可知, 无缓冲单元的 MIC 电路拓扑由脉冲电源单元和输出滤波器组成, 当两部分级联时, PVSC 必须与电流型的输出滤波器相连; PCSC 必须与电压型的输出滤波器相连。

4 无缓冲单元的 MIC 电路拓扑

对于 MIC 的各路输入源来说, 其功率传递过程与基本的单输入直流变换器有很多相似性, 与其不

同的是, MIC 中存在多路输入源, 各路输入功率必须是可控的, 因此, MIC 中存在多个脉冲电源单元。若将多个脉冲电源单元按照组合规则进行组合, 并且将组合后的电源单元直接和输出滤波器相连, 可生成无缓冲单元的 MIC 电路拓扑, 结构如图 6 所示。

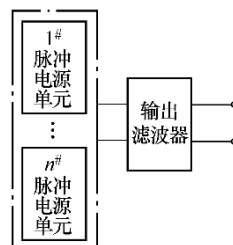


图 6 无缓冲单元的 MIC 电路拓扑的结构框图

Fig.6 Topological structure of a MIC without buffer cells

这里均以双输入为例, 给出典型的双输入直流变换器 (Double-Input Converter, DIC) 的电路图。将其中两个脉冲电源单元扩展至多个, 就可以生成无缓冲单元的 MIC 电路拓扑。

由前面的分析可知, 脉冲电源单元的组合方式有四种, 相应的电路拓扑也有四类, 下面将分别加以介绍。

4.1 第 I 类无缓冲单元的 DIC 电路拓扑

此类电路拓扑是将两个 PVSC 串联组合, 再与电流源型输出滤波器级联生成第 I 类 DIC 电路拓扑。五种 PVSC 串联组合, 生成的电路拓扑共有十五种, 均属于电压型电路拓扑, 图 7 仅给出了其中典型的四种电路拓扑。图 7a 是将两个相同的非隔离型 PVSC 串联组合生成的电路拓扑, 称之为双输入 Buck 变换器^[10]。图 7b 是将两个正激型 PVSC 串联组合生成的电路拓扑, 图 7c 是将非隔离型 PVSC 和隔离型的 PVSC 串联组合生成的电路拓扑。

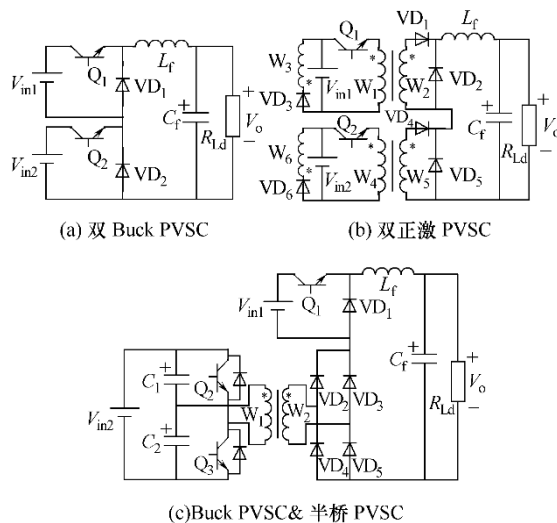


图 7 第 I 类无缓冲单元的典型 DIC 电路拓扑

Fig.7 Typical type I DICs without BCs

此类电路拓扑的特点是任一时刻，两路电压源既可以分别单独向负载供电，也可以串联同时向负载供电，控制上十分灵活。

4.2 第 II 类无缓冲单元的 DIC 电路拓扑

此类电路拓扑是将两个 PCSC 并联组合等效为单个脉冲电流源，与电压型的输出滤波器级联生成第 II 类 DIC 电路拓扑。四种 PCSC 并联组合，生成的电路拓扑共有十种，均属于电流型电路拓扑。图 8 给出了其中三种典型的电路拓扑。图 8a 所示的电路拓扑是将两个相同的非隔离型 PCSC 并联组合生成的电路拓扑^[4]，图 8b 是将两个半桥型 PCSC 并联

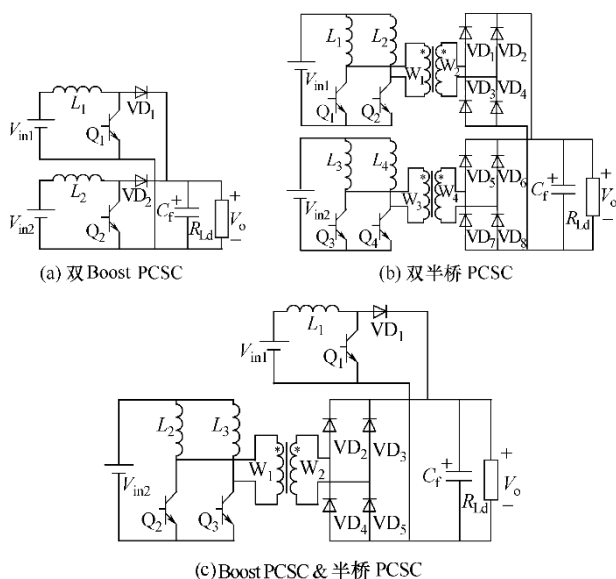


图 8 第 II 类无缓冲单元的典型 DIC 电路拓扑

Fig.8 Typical type II DICs without BCs

组合生成的电路拓扑，图 8c 是将非隔离型 PCSC 和隔离型 PCSC 并联组合生成的电路拓扑。

此类电路拓扑的特点：任一时刻，两个电压源既可以单独向负载供电，也可以串联同时向负载供电，控制十分灵活。

4.3 第 III 类无缓冲单元的 DIC 电路拓扑

此类电路拓扑是将两个 PVSC 并联组合等效为单个脉冲电压源，与电流型的输出滤波器级联生成第 III 类 DIC 电路拓扑。五种 PVSC 并联组合，生成的电路拓扑共有十五种，均属于电压型电路拓扑。图 9 仅给出了三种典型的电路拓扑。图 9a 是将两个相同的非隔离型 PVSC 并联组合生成的电路拓扑，两个脉冲电压源单元的续流二极管是并联连接的，可以共用，简化后的电路拓扑曾在文献 [7]中提到。

图 9b 是将两个正激型 PVSC 并联组合生成的电路拓扑，图 9c 是一个非隔离型 PVSC 和一个隔离型的 PVSC 并联组合生成的电路拓扑。

此类电路拓扑的特点：此电路拓扑中出现了两个电压源直接并联，因此，任一时刻，只能有一个输入源向负载供电。其中，采用 Buck 型的 PVSC 构成电路拓扑时，两个输入源分别通过单向导电的开关管并联在一起，若采用 MOSFET 或 IGBT 作为开关器件，则需要串联二极管 VD_1 。而在其他隔离型的 PVSC 中，此二极管可由整流二极管代替。

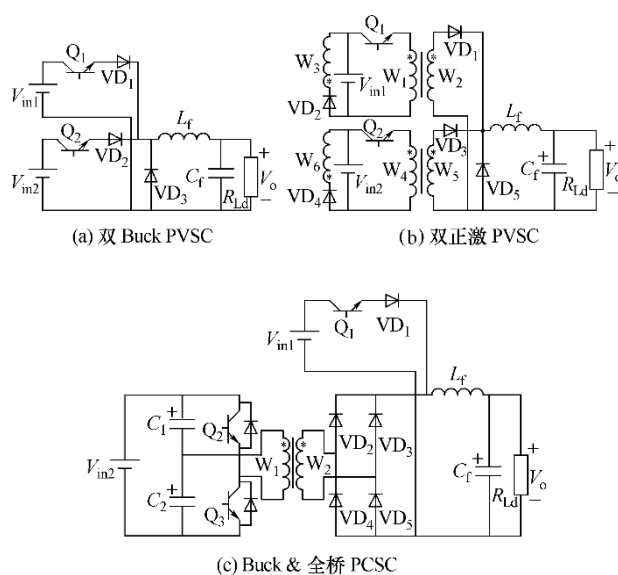


图 9 第 III 类无缓冲单元的典型 DIC 电路拓扑

Fig.9 Typical type III DICs without BCs

4.4 第 IV 类无缓冲单元的 DIC 电路拓扑

此类电路拓扑是将两个 PCSC 串联组合等效为单个脉冲电流源，与电压型输出滤波器级联生成第 IV 类 DIC 电路拓扑。四种 PCSC 并联组合，生成的电路拓扑共有十种，均属于电流型电路拓扑。图 10 给出了其中三种典型的电路拓扑。图 10a 是将两个相同的非隔离型 PCSC 串联组合生成的电路拓扑，两个脉冲电流源单元的二极管是串联的，可以共用，简化后的电路拓扑曾在文献 [9]中提到。图 10b 是将两个相同的隔离型 PCSC 串联组合生成的电路拓扑，图 10c 是将一个非隔离型 PCSC 和一个隔离型的 PCSC 串联组合生成的电路拓扑。

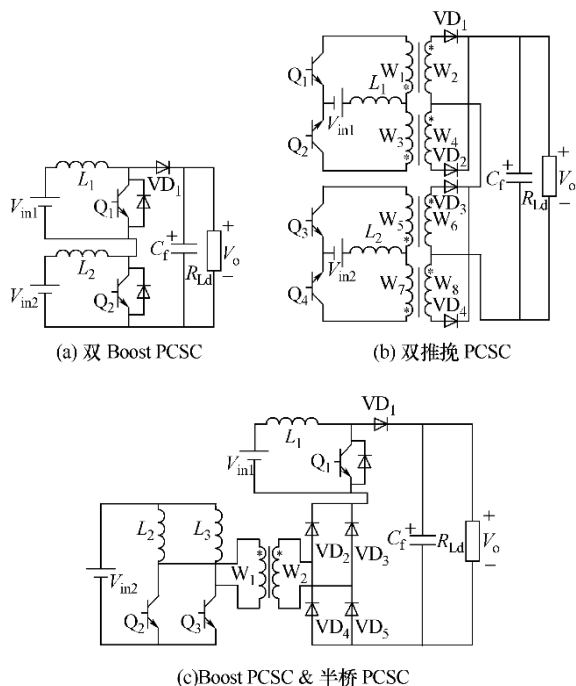


图 10 第IV类无缓冲单元的典型 DIC 电路拓扑

Fig.10 Typical type IV DICs without BCs

此类电路拓扑中出现了两个电流源直接串联, 因此, 任一时刻, 只有一种输入源向负载供电。

5 隔离型 MIC 电路拓扑的简化

由图 7~图 10 可知, 生成的隔离型 MIC 电路拓扑结构复杂, 多个输入源单独工作时没有共用开关管、变压器和整流二极管, 因此有必要进行简化, 以适合工程应用。但是若想共用部分开关管、变压器和二次侧整流二极管是需要满足一定条件的。下面以电压型全桥 DIC 电路拓扑为例, 具体说明简化原则, 如图 11a 所示。

原则 1: 整流二极管的共用。开关频率必须相同, 且 1#变压器二次电压的正半周与 2#的正半周相对应, 即两者只能串联叠加, 这时二次侧整流二极管是可以共用的, 简化后的电路如图 11b 所示。显然, 共用后的整流二极管的电压应力会增加。

原则 2: 变压器的共用。图 11b 中的变压器的二次侧是串联的, 整个变压器相当于串联的, 若两个变压器匝数相同, 可以将变压器共用, 简化后的电路如图 11c 所示。不过, 变压器的共用造成了两路输入源不隔离, 同时, 由于匝比的限制, 造成占空比调节范围增大, 电感电流的纹波随之增大。

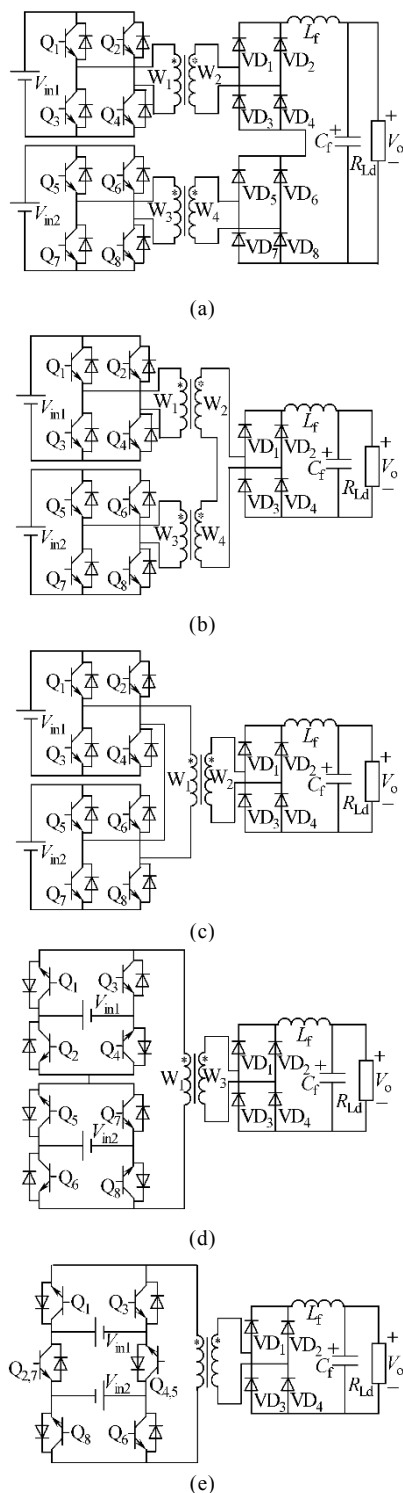


图 11 电压型全桥 DIC 电路拓扑的简化

Fig.11 Simplification of voltage-fed full-bridge DIC

原则 3: 部分开关管的共用。为分析方便, 将图 11c 所示电路重画, 如图 11d 所示。由简化原则 1 可知, 两个全桥单元的开关管的开关频率相同, 其桥臂中点间的电压串联叠加。如果采用移相控制, Q_2 和 Q_7 是同时导通的, Q_2 和 Q_5 互补导通。同理, Q_4 和 Q_5 同时导通, Q_4 和 Q_7 互补导通, 因此可将

Q_2 和 Q_7 共用, Q_4 和 Q_5 共用, 节省了两只开关管。简化后的电路如图 11e 所示。显然, 共用的两只开关管的电压应力会增加。

其他 MIC 电路拓扑同样也可以按照上述简化原则进行简化。

由于图 8b 和图 8c 所示电路拓扑的整流桥和变压器的二次绕组并联连接, 可以共用。简化后的电路拓扑如图 12a 和图 12b 所示, 分别在文献 [5] 和文献 [6] 中提到。

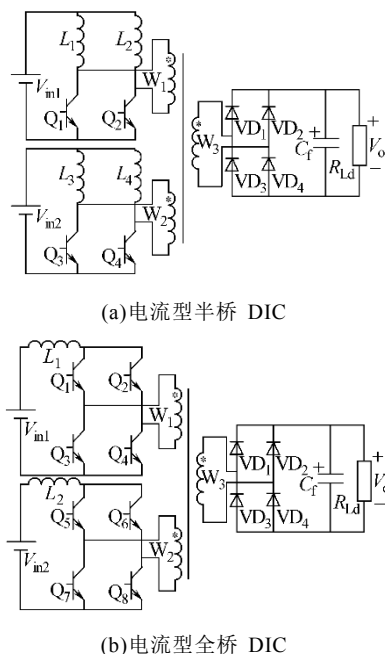


图 12 简化的电流型半桥和全桥 DIC 电路图

Fig.12 Circuit configurations of the simplified current-fed half-bridge and full-bridge DIC

由于图 9b 所示电路拓扑的二极管和变压器的二次绕组并联连接, 可以共用。简化后的电路拓扑如图 13 所示, 曾在文献 [8] 中提到。

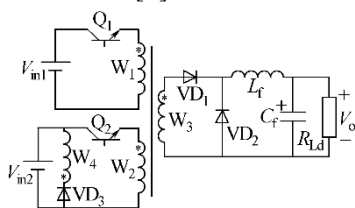


图 13 简化的正激型 DIC 电路图

Fig.13 Circuit configuration of the simplified forward DIC

6 结论

无缓冲单元 MIC 电路拓扑是由脉冲电源单元和输出滤波器构成。本文首先给出了各基本单元的概念和具体电路结构, 在此基础上, 提出了新的组合

级联思想生成无缓冲单元的 MIC 电路拓扑, 即按照组合规则, 将各种脉冲电源单元组合; 按照级联规则, 将组合后的脉冲电源单元与合适的输出滤波器相连, 生成一系列的无缓冲单元的 MIC 电路拓扑。由于生成的隔离型 MIC 电路拓扑结构复杂, 本文进一步给出了简化原则, 对其进行简化。

参考文献

- [1] Iannone F, Leva S, Zaninelli D. Hybrid photovoltaic and hybrid photovoltaic-fuel cell system: Economic and environmental analysis[C]. Proc. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005: 1503-1509.
- [2] Jiang Z H. Power management of hybrid photovoltaic-fuel cell power systems[C]. Proc. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2006: 1-6.
- [3] Chen Y M, Liu Y C, Lin S H. Double-input PWM DC/DC converter for high/low voltage sources[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2006, 3(5): 1538-1544.
- [4] Solero L, Lidozzi A, Pomilio J A. Design of multiple-input DC-DC power converter for hybrid vehicles[C]. In Proc. IEEE APEC, 2004: 1145-1151.
- [5] Chiu H J, Huang H M, Lin L W, et al. A multipleinput DC/DC converter for renewable energy system[C]. In Proc. IEEE ICIT, 2005: 1304-1308.
- [6] Chen Y M, Liu Y C, Wu T F. Multi-input DC/DC converter based on the multiwinding transformer for renewable energy applications[J]. IEEE Trans. on Industrial Applications, 2002, 38(4): 1096-1104.
- [7] Dobbs B G, Chapman P L. A multiple-input DC-DC converter topology[J]. IEEE Power Electronics Letters, 2003, 1(1): 6-9.
- [8] Matsuo H, Lin W Z, Kurokawa F, et al. Characteristics of the multiple-input DC-DC converter[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2004, 51(3): 625-631.
- [9] Marchesoni M, Vacca C. A new DC-DC converter structure for power flow management in fuel-cell electronic vehicles with energy storage systems[C]. Proc. IEEE PESC, 2004: 683-689.
- [10] Liu Y C, Chen Y M. A systematic approach to synthesizing multiple-input DC/DC converter[C].

Proc. IEEE PESC, 2007: 2625-2632.

- [11] Liu K H, Lee F C. Topological constrains on basic PWM converters[C]. Proc. IEEE PESC, 1988: 164-172.

作者简介:李艳 女, 1977 年生, 博士研究生, 研究方向为中小功率高频软开关直-直变换器和新能源供电系统。阮新波 男, 1970 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为功率电子变换技术、航空航天供电系统、新能源供电系统和电力电子系统集成。