

基于对偶原理构造三相电流型多电平逆变器拓扑

鲍建宇¹ 鲍卫兵² 李玉玲³

¹(浙江大学宁波理工学院 宁波 315100)

²(浙江工业大学之江学院 杭州 310024)

³(浙江大学电气工程学院 杭州 310027)

摘 要 受三相逆变器拓扑图非平面性的制约, 很难直接运用对偶原理实现三相电压型逆变器拓扑与三相电流型逆变器拓扑之间的相互转换。为充分利用三相电压型多电平逆变器的研究成果以便构造三相电流型多电平逆变器拓扑, 文章探讨了针对三相电压型二电平逆变器的两种拓扑图平面化处理办法, 并分析了用于构造三相电流型多电平逆变器拓扑的可行性。在三相飞跨电容箝位电压型多电平逆变器拓扑基础上, 通过增加一个独立电压源获得其平面化的等效电路, 并以此作为原始拓扑利用对偶原理提出了一种新型的三相电流型多电平逆变器拓扑。采用多载波 SPWM 技术对该类逆变器的正确性与合理性进行了仿真验证。

关键词 拓扑图; 平面性; 多电平; 对偶; 电流型逆变器; 多载波

中图分类号 TM 464 **文献标志码** A

Construction of Three-Phase Multi-Level Current-Source Inverter Topologies Based on Dual Principle

BAO Jianyu¹ BAO Weibing² LI Yuling³

¹(Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315100, China)

²(Zhijiang College, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310024, China)

³(Electrical Engineering College of Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract Due to the non-planarity of topological graphs for three-phase inverters, it is hard to construct three-phase current-source inverter (CSI) topologies from three-phase voltage-source inverter (VSI) topologies by using dual transformation. In order to form the multilevel CSI topology by making full use of the research findings of the three-phase multilevel VSI, two planar methods of treating with topological graphs of three-phase two-level voltage-source inverter topologies were discussed, and the feasibilities to construct three-phase multilevel CSI topologies by applying such methods were analyzed. By adding an extra voltage-source to the three-phase flying-capacitor multilevel VSI, an equivalent circuit topology with planarity was obtained, and a new kind of three-phase multilevel CSI topology was proposed through the dual transformation in this paper. Lastly, the multi-carrier sinusoidal pulse width modulation (SPWM) technique was adopted to verify the correctness and rationality of such multilevel CSI topology by simulation.

Keywords topological graph; planarity; multilevel; dual; current-source inverter (CSI); multi-carrier

收稿日期: 2014-07-14

基金项目: 国家自然科学基金(51277164); 浙江省自然科学基金资助项目(Y1111002)

作者简介: 鲍建宇(通讯作者), 硕士生导师, 研究方向为电流型多电平逆变技术、智能 LED 照明控制技术和新能源变换技术, E-mail: jianyu_bao@126.com; 鲍卫兵, 副教授, 研究方向为工业自动化技术; 李玉玲, 副教授, 研究方向为电力电子系统及控制、可再生能源的并网发电技术。

1 引言

多电平逆变器具有输出功率大、器件开关频率低、等效开关频率高、输出谐波小、动态响应快、传输频带宽、电磁兼容性好等特点。按照直流侧供电电源方式不同, 多电平逆变器可分为电压型和电流型两种基本拓扑。目前, 多电平电压型逆变器(Voltage-Source Inverter, VSI)^[1-3]经过多年的研究和发展, 在拓扑结构、调制方式、谐波特性、控制性能和直流电压平衡等方面都已取得了丰硕的研究成果, 并继续成为研究的热点。相对于多电平 VSI, 多电平电流型逆变器(Current-Source Inverter, CSI)也具有自身的特点。例如, CSI 用于电机驱动具有动态响应快、回馈制动方便等特点, CSI 用来作为感应加热电源时工作更稳定、应用更加普遍等。但是, 回顾近几年有关多电平 CSI^[4-6]的研究工作, 与多电平 VSI 的研究成果相比, 两者还存在不少差距, 尤其是在三相电路拓扑构造和 PWM 调制策略的灵活运用等方面。

构造结构合理的多电平 CSI 拓扑, 特别是三相拓扑, 是多电平 CSI 研究工作的前提与基础。对于三相多电平 CSI 拓扑, 由于三相电流之间存在相互耦合, 因此不能在单相多电平 CSI 拓扑基础上直接通过桥臂扩展的方法进行构造。另外, 由于三相逆变器对应的拓扑图是非平面的, 根据图论的观点, 也不能在三相多电平 VSI 拓扑基础上直接运用对偶变换来构造三相多电平 CSI 拓扑。因此, 目前的研究成果基本还局限于利用多个逆变器单元的组合来构造三相多电平拓扑。Xiong 等^[7]提出了一种三相分相式 5 电平 CSI 拓扑, 但其需要引入中性线并且中性线上要流过负载电流, 故其实用性受到限制。鲍建宇等^[8]和熊宇等^[9]所提出的三相直接式多电平 CSI 拓扑, 实质上还是两组逆变单元的并联结构, 采用的是特定开关组合方式下的阶梯波调制方法, 虽然控制

比较简单, 但并没有真正实现 PWM 调制。Bai 等^[10]提出了一类通用型三相多电平 CSI 拓扑, 将多组逆变单元通过分流电感进行并联连接, 调制策略基本局限于载波相移 SPWM 技术, 随着组合单元数的增加均流控制也将变得越复杂。综上所述, 探索与构造一种三相多电平 CSI 拓扑, 使其既无需中性线就可直接带三相负载, 又能灵活采用各种 PWM 调制策略, 是本文研究工作的重点与难点。

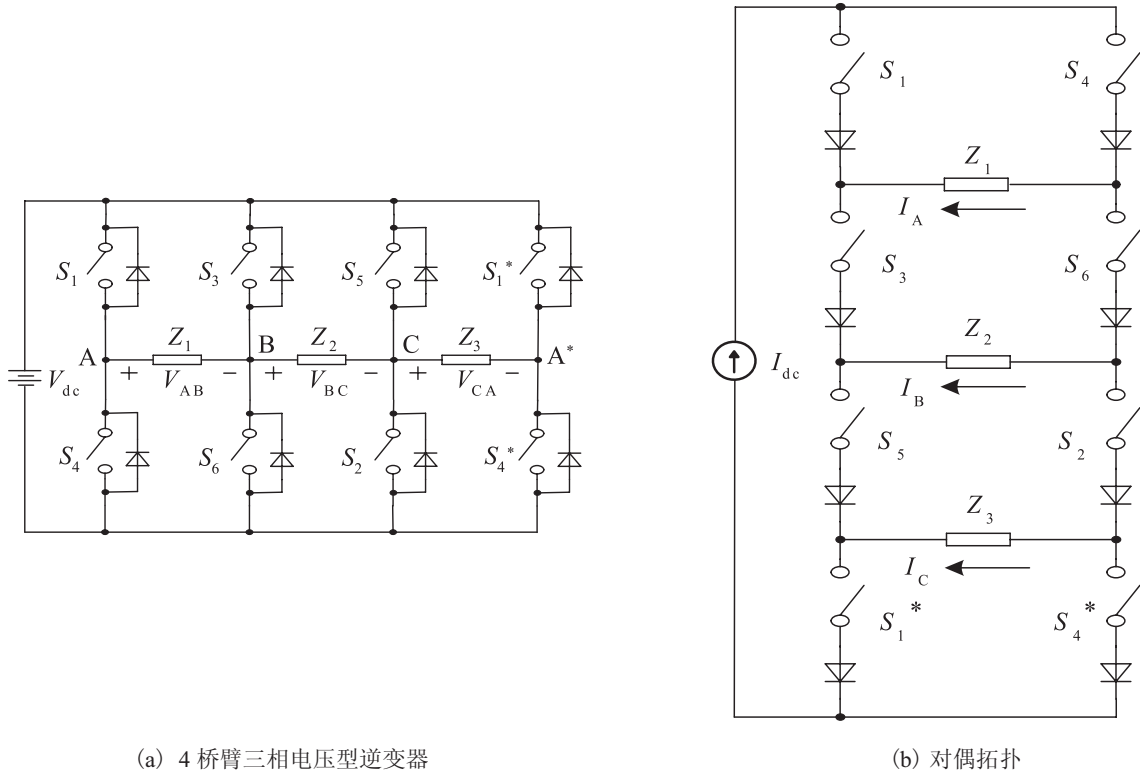
本文试图通过剖析三相二电平 VSI 的电路特点, 利用电路等效思想, 系统地归纳与总结了三相二电平 VSI 拓扑图的平面化处理办法。在此基础上, 将三相逆变器拓扑图的平面化处理办法扩展应用于三相多电平 VSI 拓扑。选择三相飞跨电容箝位多电平 VSI 作为原始拓扑, 采用打点法进行对偶变换, 构造了一种不需中性线的三相直接式 5 电平 CSI 拓扑, 在该拓扑基础上可以方便地扩展出 7 电平、9 电平甚至更高电平数的逆变器。最后, 在 SIMULINK 仿真环境下, 采用多载波 SPWM^[11]调制技术, 对该类多电平 CSI 拓扑的可行性与合理性进行了仿真实验验证。

2 二电平 VSI 拓扑图的平面化方法

2.1 增加一个辅助桥臂的方法

图 1(a)所示为增加一个辅助桥臂(S_1^* 、 S_4^*)后的一种三相电压型逆变器。只要开关 S_1^* 、 S_4^* 分别与开关 S_1 、 S_4 采用相同的控制信号, 就可以保证 A 与 A* 的电位始终相同, 因此增加一个辅助桥臂后的 4 桥臂三相电压型逆变器与原电路在电气关系上是完全等效的。

不难看出, 4 桥臂三相电压型逆变器所对应的拓扑图是平面的, 因此可以直接运用打点法^[13]来进行电路的对偶变换。对偶变换后的三相电流型逆变器拓扑如图 1(b)所示。为了直观地分析两种逆变器之间的对偶关系, 表 1 分别列出了 8 种



(a) 4 桥臂三相电压型逆变器

(b) 对偶拓扑

图 1 增加辅助桥臂的平面化方法

Fig. 1. Planarity by adding an extra bridge leg

表 1 开关状态间的对偶关系

Table 1. Dual relationship of switching states

开关编号	逆变器类型							
	VSI				CSI			
	State	V_{AB}	V_{BC}	V_{CA}	State	I_A	I_B	I_C
1	$S_1S_2S_6S_1^*$	1	0	-1	$S_3S_4S_5S_4^*$	1	0	-1
2	$S_1S_2S_3S_1^*$	0	1	-1	$S_4S_5S_6S_4^*$	0	1	-1
3	$S_2S_3S_4S_4^*$	-1	1	0	$S_1S_5S_6S_1^*$	-1	1	0
4	$S_3S_4S_5S_4^*$	-1	0	1	$S_1S_2S_6S_1^*$	-1	0	1
5	$S_4S_5S_6S_4^*$	0	-1	1	$S_1S_2S_3S_1^*$	0	-1	1
6	$S_1S_5S_6S_1^*$	1	-1	0	$S_2S_3S_4S_4^*$	1	-1	0
7	$S_1S_3S_5S_1^*$	0	0	0	$S_2S_4S_6S_4^*$	0	0	0
8	$S_2S_4S_6S_4^*$	0	0	0	$S_1S_3S_5S_1^*$	0	0	0

开关状态所对应的电压矢量和电流矢量。可以看出, 当输出相同的电压矢量和电流矢量时, 两者所对应的开关状态正好是互补的, 这说明两种逆变器在电气关系上也是完全对偶的。

2.2 增加一个等值独立电压源的方法

在三相 6 开关电压型逆变器中, 再增加一个等值独立电压源 V_{dc2} , 将第三个桥臂移出并通过

S_5 连接到该等值独立电压源上, 三相负载按三角形方式连接, 适当整理后得到了另一种等效电路, 如图 2(a) 所示。很明显该拓扑所对应的图也是平面的, 因此也可以直接运用打点法来进行对偶变换, 变换后所得到的对偶拓扑如图 2(b) 所示。

表 2 分别列出了 8 种开关状态所对应的输出电压矢量和输出电流矢量。当输出相同的电压矢

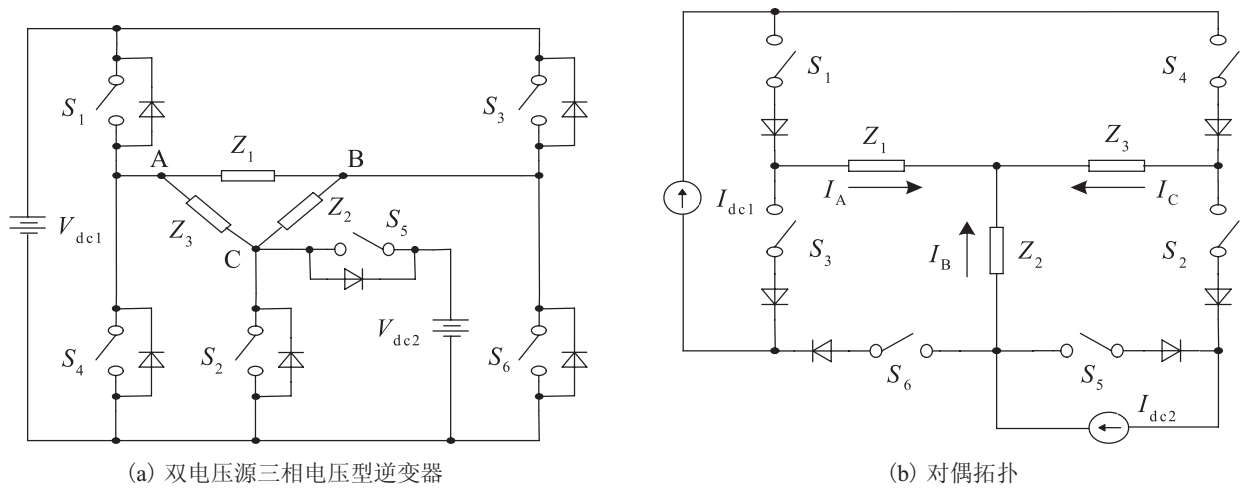


图 2 增加独立电压源的平面化方法

Fig. 2. Planarity by adding an independent voltage source

表 2 开关状态间的对偶关系

Table 2. Dual relationship of switching states

开关编号	逆变器类型							
	VSI				CSI			
	State	V_{AB}	V_{BC}	V_{CA}	State	I_A	I_B	I_C
1	$S_1S_2S_6$	1	0	-1	$S_3S_4S_5$	-1	0	1
2	$S_1S_2S_3$	0	1	-1	$S_4S_5S_6$	0	-1	1
3	$S_2S_3S_4$	-1	1	0	$S_1S_5S_6$	1	-1	0
4	$S_3S_4S_5$	-1	0	1	$S_1S_2S_6$	1	0	-1
5	$S_4S_5S_6$	0	-1	1	$S_1S_2S_3$	0	1	-1
6	$S_1S_5S_6$	1	-1	0	$S_2S_3S_4$	-1	1	0
7	$S_1S_3S_5$	0	0	0	$S_2S_4S_6$	0	0	0
8	$S_2S_4S_6$	0	0	0	$S_1S_3S_5$	0	0	0

量和电流矢量时,两种逆变器所对应的开关导通状态正好互补,说明两种逆变器之间也存在着完全的对偶关系。

3 多电平 VSI 拓扑图的平面化方法

如要运用对偶变换,则需对三相多电平 VSI 的拓扑图进行平面化处理。用于三相二电平 VSI 拓扑图的平面化方法同样适用于三相多电平 VSI 拓扑。

在三相多电平 VSI 拓扑中,假如采用增加一个辅助桥臂的方法,由于箝位电容或箝位二极管与三相负载的引出连接线之间仍旧存在相互交叉,无法实现原拓扑图的平面化,因此该方法不适用于三相多电平 VSI。

对于第 2 种方法,即增加一个等值独立电压

源的方法,在二极管箝位多电平 VSI 中,由于箝位二极管与分压电容之间存在相互交叉,即使增加一个等值独立电压源还是无法实现平面化。只有在三相飞跨电容箝位型多电平 VSI 中,通过增加一个独立电压源所得到的等效电路的拓扑图是平面的,因此可以将三相飞跨电容箝位多电平 VSI 作为原始拓扑,通过对偶变换来推导三相多电平 CSI 拓扑。

以三相飞跨电容箝位电压型 5 电平逆变器为例,将逆变器的第三个桥臂独立出来,并连接到新增加的一个等值独立电压源上,适当调整桥臂的位置,并将三相负载连接成三角形方式,整理后就得到了如图 3 所示的一种带双电压源的三相飞跨电容箝位电压型 5 电平逆变器拓扑。显然,该拓扑所对应的图是平面的,因此可以直接运用打点法来推导其对偶拓扑。

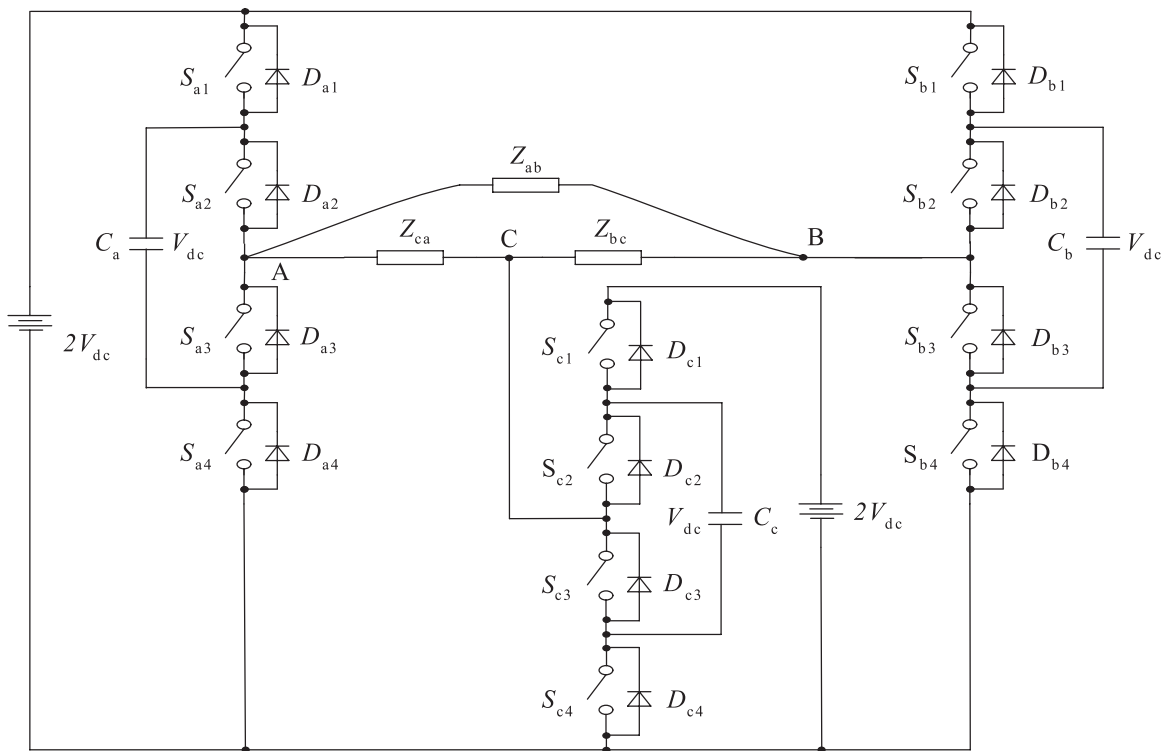


图 3 双电压源的三相 5 电平 VSI 拓扑

Fig. 3. The three-phase 5-level VSI with two voltage sources

4 构造三相多电平 CSI 拓扑

这样, 只要画出图 3 所示 5 电平逆变器所对应的拓扑图, 直接采用打点法, 就可进行电路的对偶变换。此处省略电路对偶变换的推导过程, 经过适当整理得到了如图 4 所示的一种三相电流型 5 电平逆变器拓扑。该类三相电流型 5 电平逆变器拓扑主要由 2 个独立电流源、3 个分流电感以及 12 个开关器件和 12 个快恢复二极管组成; 三相负载呈星型连接方式而无需中性线。

对该三相 5 电平 CSI 拓扑每一相桥臂的电路结构进行分析, 不难发现分流电感与开关器件的连接方式以及分流原理都与单相 8 开关电流型 5 电平逆变器^[4]相类似。因此, 如要获得更高电平数的三相逆变器拓扑, 只要按照单相电流型多电平逆变器的拓扑扩展方法, 对每相桥臂上的基本分流单元分别进行扩展即可。扩展后的三相电流型 7 电平逆变器拓扑如图 5 所示, 该三

相逆变器拓扑主要由 2 个独立电流源、6 个分流电感、以及 18 个开关器件和 18 个快恢复二极管组成。

5 工作原理分析

5.1 5 电平电流产生机理

以图 4 所示的三相 5 电平 CSI 拓扑为例, 假设分流电感 L_a 上流过的电流为 I_{dc} , 由于与分流电感连接在同一端点的两个开关分别工作在互补状态, 可以得到 i_{a1} 输出 3 电平电流的工作方式:

- (1) S_{a1} 、 S_{a2} 导通, $i_{a1} = +2I_{dc}$;
- (2) S_{a1} 、 S_{a3} 或 S_{a2} 、 S_{a4} 导通, $i_{a1} = +I_{dc}$;
- (3) S_{a3} 、 S_{a4} 导通, $i_{a1} = 0$;

同理, 可以得到 i_{b1} 的 3 电平电流产生方式:

- (1) S_{b1} 、 S_{b2} 导通, $i_{b1} = +2I_{dc}$;
- (2) S_{b1} 、 S_{b3} 或 S_{b2} 、 S_{b4} 导通, $i_{b1} = +I_{dc}$;
- (3) S_{b3} 、 S_{b4} 导通, $i_{b1} = 0$;

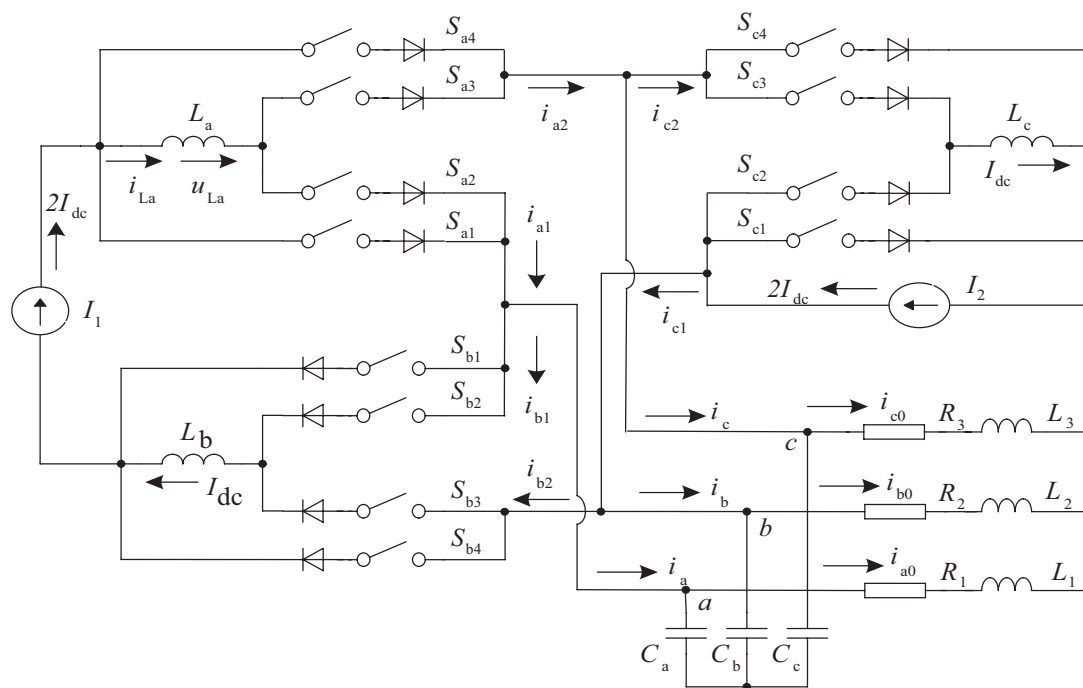


图 4 双电流源的三相 5 电平 CSI 拓扑

Fig. 4. The three-phase 5-level CSI with two current sources

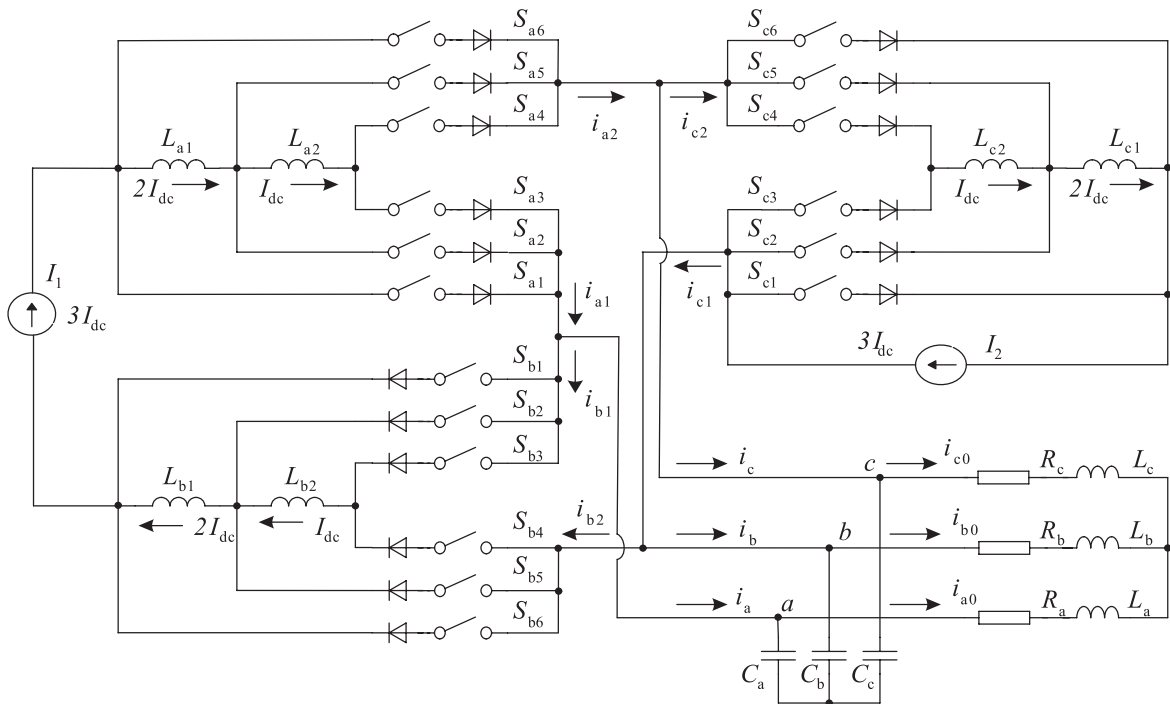


图5 双电流源的三相7电平CSI拓扑

Fig. 5. The three-phase 7-level CSI with two current sources

由图4可知, a相的输出总电流 $i_a = i_{a1} - i_{b1}$, 由于 i_{a1} 和 i_{b1} 都为3电平电流, 两者相减后就可获得5电平的输出电流, 即a相输出总电流 i_a 为5电平电流。同理, 可以推导出b、c两相输出电流 i_b 、 i_c 的5电平产生方式。其实, 5电平电流的产生机理与三相电压型多电平逆变器中5电平电压的产生方式完全一致, 即输出的相电压为3电平, 而相电压之差就产生了5电平的线电压。

5.2 PWM调制策略的应用

由于该类三相电流型多电平拓扑是从三相电压型多电平逆变器通过对偶变换而得到, 因此所有适用于三相电压型多电平逆变器的PWM调制策略都可以在该类拓扑中应用。

以采用最常用的多载波SPWM技术为例, 由于只需控制3电平电流的产生方式, 则一共需要两组三角载波。此时APOD-PWM和POD-

PWM的载波排列方式完全相同, 因此只需研究PD-PWM和POD-PWM这两种调制方案即可。为节省篇幅, 本文仅以PD-PWM为例进行分析, 其原理示意图如图6所示。图中, W_a 、 W_b 和 W_c 为三相调制波, W_{c1} 和 W_{c2} 为三角载波。根据5电平电流产生机理, 表3列出了当 i_{a1} 输出3电平电流时, PD-PWM技术所对应的开关状态译码关系。同理, 可以列出其他两相的开关状态译码关系。

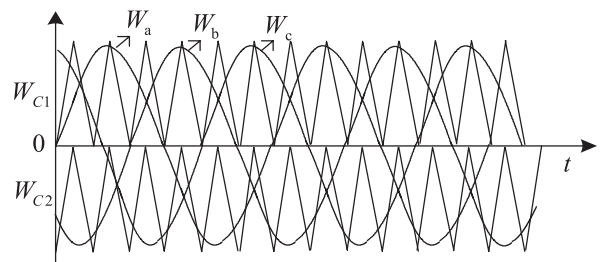


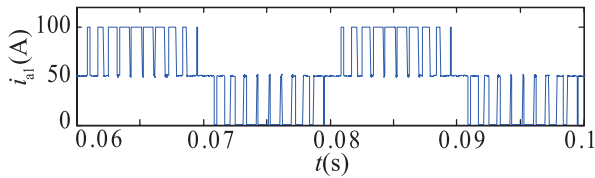
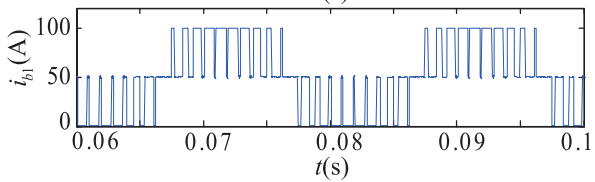
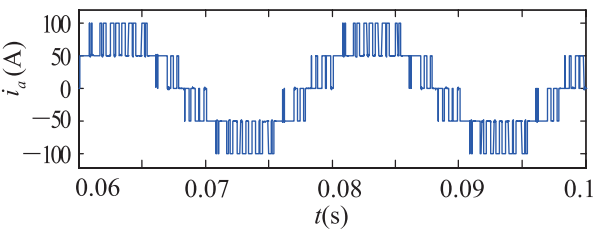
图6 三电平PD-PWM原理示意图

Fig. 6. The schematic diagram for 3-level PD-PWM

表 3 PD-PWM 技术的开关状态译码表

Table 3. Switching-states decoding for PD-PWM

W_a	载波与调制波比较	导通开关组合	输出电流 i_{a1}
$W_a > 0$	$W_a > W_{C1}$	S_{a1}, S_{a2}	$+2I_{dc}$
	$W_a < W_{C1}$	S_{a1}, S_{a3} S_{a2}, S_{a4}	$+ I_{dc}$
$W_a < 0$	$ W_a < W_{C2} $	S_{a1}, S_{a3} S_{a2}, S_{a4}	$+ I_{dc}$
	$ W_a > W_{C2} $	S_{a3}, S_{a4}	0

(a) 电流 i_{a1} 、 i_{b1} 波形(b) a 相总输出电流 i_a 

(c) 滤波前后的电流波形比较

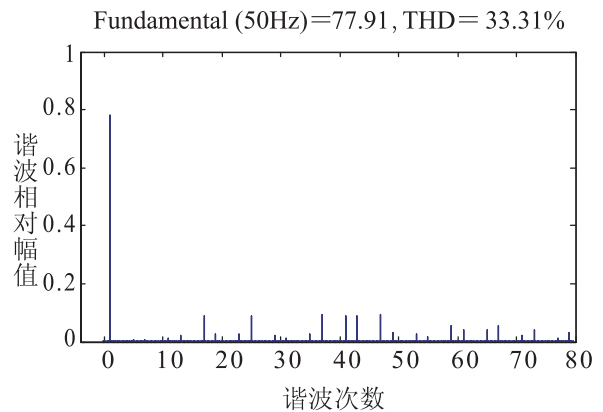
图 7 三相 5 电平 CSI 仿真分析

Fig. 7. Simulation results of the three-phase 5-level CSI

6 仿真实验验证

为验证该类多电平 CSI 拓扑结构的合理性以及 PWM 调制策略的可行性, 本文采用 MATLAB/SIMULINK 软件对图 4 所示的三相 5 电平 CSI 系统进行了仿真研究。调制方法采用 PD-PWM, 取电流源 $2I_{dc}=100$ A, 调制比 $m_a=0.9$, 三角载波频率 $f_c=1050$ Hz, 负载由一个 4Ω 电阻和一个 5 mH 的电感串联而成, 滤波电容为 $50 \mu\text{F}$ 。仿真试验结果如图 7 所示。

在图 7(a) 中, 电流 i_{a1} 、 i_{b1} 分别为用于合成 a 相输出总电流的支路电流, 且都为 3 电平波形。电流 i_{a1} 与 i_{b1} 之差正好是总输出电流 i_a , 其为 5

图 8 电流 i_a 谐波频谱图Fig. 8. Harmonic spectrum of i_a

电平波形,如图 7(b)所示,仿真结果正好验证了 5.1 节所描述的 5 电平电流产生机理。图 7(c)分别示出了滤波前后的 a 相电流波形,其中 i_{a0} 为滤波后的波形,已基本接近于正弦。

图 8 给出了 a 相 5 电平输出电流波形的谐波频谱,不含载波谐波分量,谐波主要以边带谐波为主,与理论分析结果^[11]基本吻合。

7 结 论

目前,构建三相电流型多电平逆变器拓扑的主要方法还是通过组合或拼凑多个电流型逆变器单元,方法缺少规律性;逆变器的调制策略也基本局限于载波相移 SPWM 技术。本文通过灵活运用电路对偶变换方法,提出了一种新型直接式三相电流型多电平逆变器拓扑。所采用的对偶变换方法,可以延伸用于构造其他三相逆变器拓扑,解决了三相逆变器拓扑构造难的问题。提出的三相电流型多电平拓扑在电气关系上与三相电压型飞跨电容箝位多电平拓扑完全对偶,所有适用于三相电压型多电平拓扑的 PWM 调制策略都可以在该类拓扑中应用,实现了真正意义上的电流型多电平技术。

参 考 文 献

- [1] 李永东,肖曦,高跃. 大容量多电平变换器 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [2] Rodriguez J, Lai JS, Peng FZ. Multilevel inverters: a survey of topologies, controls and applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002, 49(4): 724-738.
- [3] 陈阿莲, 邓焰, 何湘宁. 一种具有冗余功能的多电平变换器拓扑 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(9): 34-38.
- [4] Antunes FLM, Braga HAC, Barbi I. Application of a generalized current multilevel cell to current-source inverters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1999, 46(1): 31-38.
- [5] Kwak S, Toliyat HA. Multilevel converter topology using two types of current-source inverters [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2006, 42(6): 1558-1564.
- [6] 白志红, 张仲超. 单相电流型多电平逆变器组合拓扑及其 SPWM 调制策略研究 [J]. 电工技术学报, 2007, 22(11): 80-84.
- [7] Xiong Y, Li YL, Yang X, et al. A new three-phase five-level current-source inverter [C] // IEEE Conference on Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2005: 424-427.
- [8] 鲍建宇, 李玉玲, 白志红, 等. 一种三相五电平电流型逆变器拓扑及其 PWM 控制方法的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(9): 71-75.
- [9] 熊宇, 胡长生, 陈丹江, 等. 一类新型三相直接式电流型多电平逆变器拓扑的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 163-167.
- [10] Bai ZH, Zhang ZC, Yao Z. A generalized three-phase multilevel current source inverter with carrier phase-shifted SPWM [C] // IEEE Conference on Power Electronics Specialists, 2007: 2055-2060.
- [11] McGrath BP, Holmes DG. Multicarrier PWM strategies for multilevel inverters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002, 49(4): 858-867.
- [12] Bao JY, Bai ZH, Wang QS, et al. A new three-phase 5-level current-source inverter [J]. Journal of Zhejiang University SCIENCE A, 2006, 7(12): 1973-1978.
- [13] Freeland SD. Techniques for the practical application of duality to power circuits [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1992, 7(2): 374-384.