

一种新的分相控制式三相电流型五电平逆变器

熊宇¹, 王培容², 鲍建宇¹, 张仲超¹

(1. 浙江大学电气学院, 浙江省 杭州市 310027)

2. 重庆工学院, 重庆市 九龙坡区, 400050)

A NEW SPLIT-CONTROL THREE-PHASE 5-LEVEL CURRENT-SOURCE INVERTER

XIONG Yu, WANG Pei-rong, BAO Jian-yu, ZHANG Zhong-chao

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China;

2. Chongqing Institute of Technology, Jiulongpuo District, Chongqing 400050, China)

ABSTRACT: For a three-phase direct-type multilevel current-source inverter (CSI), it is very difficult to use PWM technique to reduce harmonic contents of the output currents. A new type of split-control three-phase 5-level CSI is proposed in this paper. The inverter is decoupled by the neutral line of the loads. Each phase of the inverter operates separately so that multilevel PWM technique can be applied to reduce output current harmonics. The digital current source multicarrier phase opposition disposition (POD) PWM signal generating technique is developed. The operation principle of the three-phase 5-level CSI using the new topology is introduced by analyzing one phase cell. An experimental prototype of a three-phase 5-level CSI has been built to practise the proposition in the paper. With the development and application of superconducting magnetic energy storage (SMES) technology, the application of multilevel CSI will be more and more popular.

KEY WORDS: Power electronics; Multilevel; Current-source inverter; PWM

摘要: 在一个三相直接式多电平电流型逆变器(CSI)中利用PWM技术来消除输出电流谐波是非常困难的。文中提出了一类新的三相分相控制式电流型5电平逆变器拓扑。这类拓扑通过三相星形负载的中性线进行解耦,逆变器的每相都可以独立控制,因此可以将多电平PWM技术应用到该类逆变器以减小输出电流谐波。文中给出了一种多载波PWM技术的数字化实现方案。文中以单相逆变器单元为例介绍了三相5电平逆变器的工作原理。最后建立了一个三相分相式5电平CSI的实验系统,验证了文中的结论。随着超导储能系

统技术的发展及其应用,电流型多电平变流器将具有广泛的应用前景。

关键词: 电力电子; 多电平; 电流源逆变器; 脉宽调制

1 引言

在大功率应用场合里,电压源多电平逆变器(Voltage Source Inverter, VSI)^[1-3],比电流源多电平逆变器(Current Source Inverter, CSI)^[4-5]更受到人们的关注,这是因为目前大功率变流器的应用是以电压源逆变器(VSI)为主,通常的电力能源例如发电机,电网,电池等均属电压源,而且VSI中的储能元件电容器与CSI中的储能元件电感器相比,储能效率和储能器件的体积、价格都具有明显的优势。

但随着超导技术的发展和应用^[6-7],尤其是高温超导技术突破性的发展并进入实用化,超导技术将解决电流型变流器中的电感储能效率问题,同时电力超导储能系统(SMES)中储能线圈具有电流源特性,以SMES线圈为储能元件的CSI在电力系统中的应用更具优越性,它能根据电力系统的需要发生快速响应以产生或吸收相应的有功功率、无功功率。因此,多电平CSI将具有广泛的应用前景。

目前人们对多电平电流型逆变器的研究工作还较少,传统的大功率电流型逆变器往往采用多重化技术^[8-9],通过将电流型逆变器单元的并联连接以获取多电平的电流输出,这不仅需要体积庞大的变压器,且不利于运用PWM技术来改善输出电流波形。

对于多电平逆变器而言,PWM技术无疑是一

基金项目: 国家自然科学基金项目(50477033)。

Project supported by National Natural Science Foundation of China (50477033).

种获取理想输出的方案。但对于通常的三相多电平 CSI 而言（五电平以上），由于要维持直流侧电流的持续导通以及三相电流的相互耦合，很难采用多电平 PWM 技术。本文在文献[5]的基础上提出一种适用于带中性线的星型负载的三相电流型五电平拓扑，对该拓扑可以采用多载波 PWM 技术来消除输出电流谐波，实验结果验证了该文的有关结论。

2 三相分相控制式多电平 CSI 的原理

图 1 所示为三相分相控制式五电平 CSI。该拓扑由 3 个单相五电平 CSI 单元组成，三相逆变器的每一相对应一个单相 CSI 单元，3 个 CSI 单元之间通过星型负载的中性线进行解耦，即每个逆变器单元之间的控制是相对独立的，3 个单相 CSI 单元之间的控制信号依次相差 $2\pi/3$ 。图 1 中，每个开关管由 MOS 管和一个快恢复二极管串联而成。 L_a, L_b, L_c 与 C_a, C_b, C_c 组成低通滤波器以滤出输出电流谐波。 Z_A, Z_B, Z_C 表示三相交流负载。 I_A, I_B, I_C 表示 3 个独立电流源。

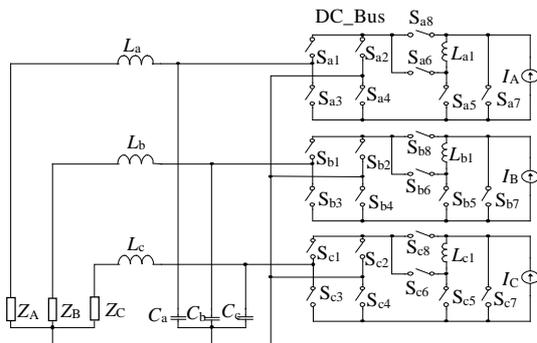


图 1 新型三相五电平 CSI 拓扑

Fig. 1 A new three-phase 5-level CSI

每个单相五电平 CSI 单元的工作原理参见文献 [5]，现将其重画如图 2 所示。图中电感 L_1 （起均流、分流作用）和开关 $S_5 \sim S_8$ 组成直流母线电流分配电路，开关 $S_1 \sim S_4$ 以及负载组成逆变电路。其对应的闭合开关状态和输出电流的对应关系见表 1，其中 S_n, S_{n+1} 为互补开关对， $n=1, 3, 5, 7$ 。

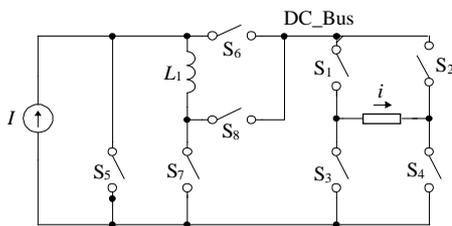


图 2 单相五电平 CSI

Fig. 2 Single-phase 5-level CSI

图 1 所示的三相拓扑可以扩展到更高电平的拓扑如三相 7 电平（9 电平、11 电平等等）CSI，只要把每个单相 CSI 单元扩展到 7 电平（9 电平、11 电平）结构即可。图 3 为另一种三相分相控制式 5 电平 CSI，它的每相为单相全桥逆变单元的并联连接。

表 1 单相五电平 CSI 的工作原理

Tab. 1 Operation principle of single-phase 5-level CSI

序号	开关组合	直流母线电流	输出电流
1	$S_1S_4S_5S_8$	$+I/2$	$+I/2$
	$S_1S_4S_6S_7$		
2	$S_2S_3S_5S_8$	$+I/2$	$-I/2$
	$S_2S_3S_6S_7$		
3	$S_1S_4S_6S_8$	I	I
4	$S_2S_3S_6S_8$	I	$-I$
5	$S_1S_4S_5S_7$	0	0
	$S_2S_3S_5S_7$		

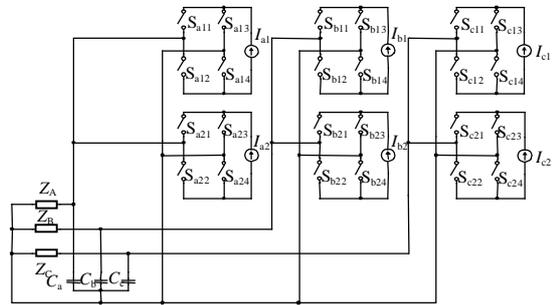


图 3 另一种新型三相五电平 CSI 拓扑

Fig. 3 Another new three-phase 5-level CSI

3 多载波 POD PWM 技术

目前适用于多电平逆变器的调制方法主要有两类，一是空间矢量调制（SVM）技术^[10]，一是多载波 PWM 技术。对于五电平以上的多电平逆变器，空间矢量的计算非常复杂，因而一般采用多载波 PWM 技术^[11-15]。针对本文提出的三相分相控制式多电平逆变器，这里采用一种载波位置相反分布(Phase Opposition Disposition, POD)的 PWM 方法。图 4 为 POD PWM 技术的示意图。

图 4 中，POD 调制里含有 4 个三角调制波 (W_{C1}, W_{C2}, W_{C3} 和 W_{C4}) 和一个正弦调制波 (W_m)，零参考线位于载波系列的中间，所有在零参考线上的载波都同相，而在零参考线下的载波都与零参考线上的载波反相。在每一瞬时，每个载波都与相应的调制波进行比较，针对每一次比较，根据每个单相 CSI 的工作原理，都给出一个导通开关的开关组合。表 2 为针对每个单相 CSI 单元采用 POD PWM 技术的工作原理。

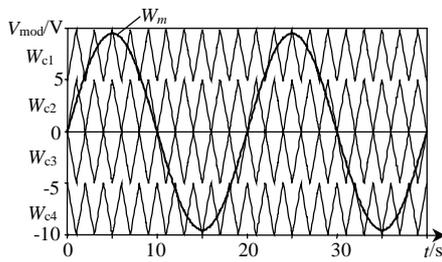


图 4 POD PWM 技术
Fig. 4 POD PWM technique

表 2 POD PWM 的工作原理 (针对每相 CSI 单元)
Tab. 2 Operation principle of POD PWM technique
(for one csi cell)

调制信号	比较表达式	开关组合	直流母线电流	输出电流
$W_m > 0$	$W_m < W_{C2}$	$S_1S_4S_5S_7$	0	0
	$W_{C2} < W_m < W_{C1}$	$S_1S_4S_5S_8$	+I/2	+I/2
	$W_m > W_{C1}$	$S_1S_4S_6S_8$	+I	+I
$W_m < 0$	$ W_m < W_{C3} $	$S_2S_3S_5S_7$	0	0
	$ W_{C3} < W_m < W_{C4} $	$S_2S_3S_6S_7$	+I/2	-I/2
	$ W_m > W_{C4} $	$S_2S_3S_6S_8$	+I	-I

对于三相分相控制式多电平 CSI 而言, 3 个载波系列和 3 个调制波依次相差 $2\pi/3$ 。每个正弦调制波有相同的频率 ω_m 和幅值 A_m 。每个载波系列均有相同的频率 ω_c 和相同的峰峰值 A_c 。设 m 是多电平 CSI 的电平数, 则幅值调制比 m_a 和频率调制比 m_f 分别定义如下: $m_a = A_m / (m - 1) \cdot A_c$, $m_f = \omega_c / \omega_m$ 。

4 实验结果

在前面分析讨论的基础上, 本节对文中提出的三相分相控制式五电平 CSI 新拓扑进行了实验验证。实验的主电路如图 1 所示, 实验的系统参数 (3 个单相 CSI 单元的对应参数均一样) 如下: 每个电流源由一个 35V 的电压源 (通过对应相电源整流获得) 串联 120mH 的电感来模拟, 电路中的开关器件由 MOS 管 (IRFP450) 串联快恢复二极管 (HFA25TB060) 组成。每个均流电感为 100mH, 由于实验用电感存在 0.85Ω 内阻, 故在相关支路中分别串有 0.85Ω 的电阻 R_{e1} 、 R_{e2} 来平衡, 输出电流的频率为 50Hz, 负载电阻为 6Ω, m_a 为 0.95, m_f 为 32 或 16。

图 5 为实验中采用的实现 POD PWM 技术的数字化方案。所有的比较器单元 (决定着开关逻辑) 接收相同的正弦波调制信号 (三相正弦调制波依次相差 $2\pi/3$), 三角载波是由三角载波模块产生, 每个三角载波模块对应着一片 EPROM 和一片 D/A 转

换器。对于同一个 CSI 单元, 所有的 EPROM 均由相同的计数器来寻址, 且通过锁相环与对应相的电源同步。幅值控制信号为 V_{mod} , 它与包含着正弦调制信号的 EPROM 的输出经过 D/A 转换后相乘, 然后作为每个比较模块单元的调制信号。基于 POD PWM 控制的门极逻辑控制规则参见表 2。

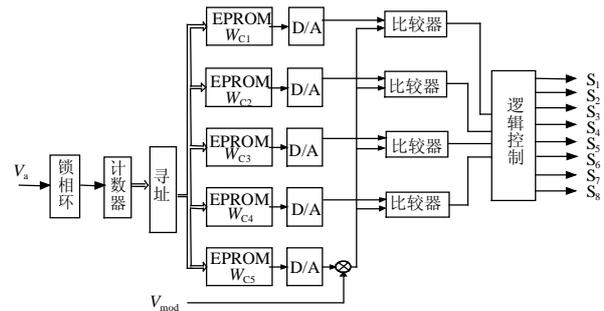


图 5 实现 POD PWM 技术的方法
Fig. 5 Method of implementing POD PWM technique

图 6 为对应的实验波形。图 6(a)所示为 A 相 CSI 单元中的电流源电流和均流电感电流, 从图中可以看出均流电感电流的平均值略为电流源电流的一半; 图 6(b)为载波比为 32 时逆变器输出的 5 电平 PWM 电流波形, 图 6(c)为滤波后的负载电流波形, 图中看出该波形近似为正弦波; 图 6(d)为滤波后负载电流的频谱, 从图中可以看出 THD 已经非常小。

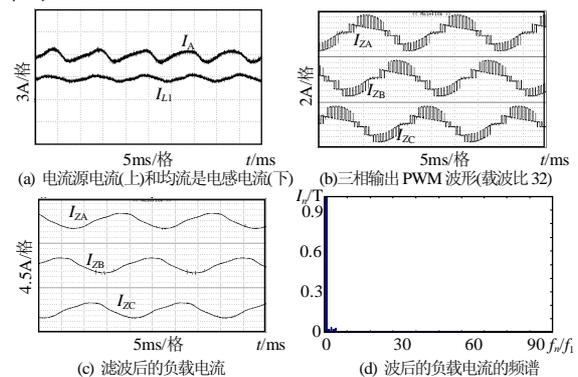


图 6 实验结果

Fig. 6 Experimental results

5 结论

三相分相式多电平 CSI 是一种比较有特色的拓扑, 它适用于带中性线的星型负载。这类逆变器的特点是每相负载的电流都可以独立控制, 因而可以将适用于多电平 VSI 的许多 PWM 方法应用到这类拓扑。

本文首先介绍了三相分相式五电平 CSI 的工作

原理,接着引入了一种多载波 POD PWM 方法并给出了相应的数字化实现方案,最后通过实验验证了文中的有关结论。

尽管现在关于多电平 CSI 的研究还不是热点,但随着高温超导技术突破性发展并进入实用化,超导技术将解决电流型变流器中的储能电感储能效率问题,因此电流型变流器将具有广泛的应用前景,对三相多电平 CSI 的研究将具有重要的意义。

参考文献

- [1] Jih-Sheng Lai, Fang Zheng Peng, Multilevel converter-a new breed of power converters. IEEE Trans. on Industrial Applications [J]. 1996, 32(3): 509-517.
- [2] Leon M. Tolbert, Fang Z. Multilevel converters for large electric drives[C]. IEEE Proceedings of IEEE APEC2000, New Orleans, LA, USA, 2000. 530-536.
- [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.
Chen Alian, Deng Yan, He Xiangning. A multilevel converter topology with redundancy ability[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(9): 34-38.
- [4] 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.
Xiong Yu, Hu Chang Sheng, Chen Dan Jiang *et al.* Research on a new three-phase direct type multilevel current source inverter topology[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 163-167.
- [5] Xiong Yu, Chen Danjiang, Deng Songquan *et al.* A new single-phase multilevel current-source inverter[C]. Proceedings of IEEE APEC Anaheim, California, USA, 2004. 1682-1685.
- [6] Karasik V, Dixon K. SMES for power utility applications: a review of technical and cost considerations[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 1999, 9(2): 541-546.
- [7] Mohan V. Aware, Danny Sutanto. Improved controller for power conditioner using high-temperature superconducting magnetic energy storage (HTS-SMES)[J]. IEEE Trans. Applied Superconductivity, 2003, 13(1): 38-47.
- [8] Hombu M, Ueda S. A multiple current source GTO inverter with sinusoidal output voltage and current[C]. Proceedings of IEEE-IAS, Atlanta, USA, 1987. 600-606.
- [9] Biswas S K, Baskas B. A new 3-phase current source inverter with flexible PWM capability[C]. Proceedings of IEEE-IAS Toronto, Canada, 1985. 1069-1073.
- [10] Sanmin Wei, Bin Wu, Fahai Li *et al.* A general space vector PWM control algorithm for multilevel inverters[C]. Proceedings of IEEE APEC, Florida, USA, 2003, (1): 562-568.
- [11] 吴洪洋, 何湘宁. 级联型多电平变换器 PWM 控制技术的仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8): 42-46.
Wu Hong Yang, He Xiang Ning. Research on PWM control of a cascade multilevel converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(8): 42-46.
- [12] 费万民, 吕征宇, 姚文熙. 三电平逆变器特定谐波消除脉宽调制方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(9): 11-15.
Fei Wanmin, Lv Zhengyu, Yao Wenxi. Research on selected harmonic elimination PWM technique applicable to three-level voltage inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(9): 11-15.
- [13] 王鸿雁, 陈阿莲, 邓焰, 等. 基于控制自由度组合的多电平逆变器载波 PWM 控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 131-135.
Wang Hong Yan, Chen A Lian, Deng Yan *et al.* Multilevel inverter carrier-based PWM method based on control degrees of freedom combination[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 131-135.
- [14] Agelidis V G, Calais M. Application specific harmonic performance evaluation of multicarrier PWM techniques[C]. Proceedings of IEEE PESC, Fukuoka, Japan, 1998. 172-178.
- [15] McGrath B P, Holmes D G. Multicarrier PWM strategies for multilevel inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002, 49(4): 858-867.

收稿日期: 2005-02-25。

作者简介:

熊宇(1972-), 男, 博士研究生, 研究方向为大功率变流器拓扑及其控制技术、功率因数校正技术、开关电源等;

王培容(1973-), 女, 讲师, 硕士, 研究方向为信息与控制技术;

鲍建宇(1976-), 博士研究生, 研究方向为大功率变流器拓扑及其控制技术, 感应加热电源、电机调速控制等;

张仲超(1942-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为中高频感应加热电源、大功率变流器、相移 SPWM 技术以及电力电子技术的应用。