

二极管箝位五电平变换器控制方法

余致廷, 曹 达, 彭永进

(湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 传统二极管箝位变换器的电压变化率和共模电压较高, 且波形谐波含量较大, 使得输出滤波器的设计变得复杂。为了克服以上不足, 在分析五电平变换器桥臂拓扑的基础上, 结合 SHEPWM 法和 SFOPWM 法两者的优点, 提出了一种新型 PWM 控制方法。由于直流侧各个电平都得到应用, 基于该新型 PWM 控制技术的二极管箝位型五电平变换器具有了更高的调制比、更少的谐波。仿真及实验结果表明, 在低调制比与高调制比的情况下, 该方法都能很好地实现对二极管箝位五电平变换器的控制, 变换器输出波形正弦度好, 谐波含量低, 因此该二极管箝位五电平变换器控制方法较适合应用于大功率高电压功率变换场合。

关键词: 二极管箝位; 五电平变换器; 脉宽调制; 拓扑

中图分类号: TM 464

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2011)04-0047-03

0 引言

目前, 在高压大功率应用领域多电平功率变换技术是电力电子研究的热点^[1-5]。传统的变换器存在高的电压变化率和共模电压, 且波形谐波含量较大, 使得输出滤波器的设计变得复杂^[6-9]。基于以上原因, 国内外学者先后研究了二极管箝位型、飞跨电容型、级联型的电路拓扑结构^[10-14]。在提高变换器的性能方面采用优化的 PWM 技术, 也是一个很重要的环节。经过多年的发展, 提出了各种多电平变换器 PWM 方法, 主要有三角载波 SPWM 法^[15]和空间电压矢量 SVPWM 法^[16]。三角载波法采用消谐波法(SHEPWM)控制策略, 可使得变换器谐波减少, 但缺点是调制比低, 基波电压幅值小; 而采用开关频率优化法(SFOPWM)控制策略, 在正弦调制波中注入零序分量, 解决了 SHEPWM 法直流电压利用率低的缺点, 使调制度达到了 1.15, 这非常符合人们对高电压调制比的需要。但 SHEPWM 和 SFOPWM 都无法解决二极管箝位型变换器在低调制度下发生电平退化的问题。

本文在此基础上研究了二极管箝位型五电平变换器, 结合 SHEPWM 法和 SFOPWM 法两者的优点, 提出一种新型 PWM 控制方法。由于直流侧各个电平都得到应用, 基于这种新型 PWM 控制技术的二极管箝位型五电平变换器具有更高的调制比、更少的谐波。仿真与实验表明, 这种五电平变换器与传统的多电平变换器相比, 输出波形更趋于正弦, 谐波含量大幅减少, 更适合于大功率电机传动。

1 二极管箝位五电平变换器的桥臂拓扑

图 1 是二极管箝位型五电平变换器的一路桥臂

结构。分压电容 $C_1=C_2=C_3=C_4$, 故 $U_{C1}=U_{C2}=U_{C3}=U_{C4}$; 每个桥臂有 8 个开关器件 $V_{T1}\sim V_{T8}$ 串联, 每 4 个开关器件同处导通或关断状态, 其中 (V_{T1}, V_{T5}) 、 (V_{T2}, V_{T6}) 、 (V_{T3}, V_{T7}) 、 (V_{T4}, V_{T8}) 为互补工作的开关对, 即当其中一个开关导通时, 另一个一定关断; 反之亦然。五电平变换器的输出电压与开关状态之间的关系见表 1。

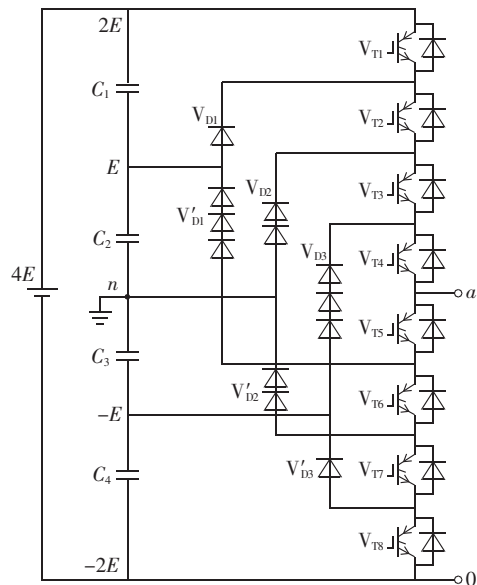


图 1 二极管箝位型五电平变换器的一路桥臂结构

Fig.1 One bridge arm of diode-clamped five-level converter

表 1 输出电压与开关状态之间的关系

Tab.1 Relationship between output voltage and switch state

输出 电压	开关状态							
	V_{T1}	V_{T2}	V_{T3}	V_{T4}	V_{T5}	V_{T6}	V_{T7}	V_{T8}
$2E$	on	on	on	on	off	off	off	off
E	off	on	on	on	on	off	off	off
0	off	off	on	on	on	on	off	off
$-E$	off	off	off	on	on	on	on	off
$-2E$	off	off	off	off	on	on	on	on

注: “on”表示开关器件导通, “off”表示开关器件关断。

2 二极管箝位型五电平变换器控制方法

二极管箝位型五电平变换器的每相采用 4 个具有相同频率 f_c 和相同峰峰值 U_c 的三角载波与一个频率为 f_m 、幅值为 U_m 的正弦波相比较,为了使 4 个三角载波所占的区域是连续的,它们在空间上紧密相连且整个载波集对称分布于零参考的正、负两侧,如图 2 所示。在正弦波与三角波相交的时刻,如果调制波的幅值大于某个三角波的幅值,则开通相应的开关器件;反之,则关断该器件。

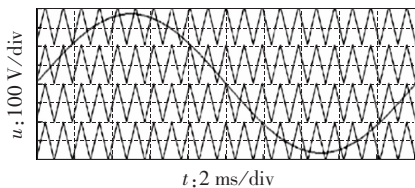


图 2 SHEPWM 法原理示意图
Fig.2 Principle of SHEPWM

传统的 SHEPWM 法尽管具有输出谐波含量低、易于实现等优点,但存在调制度 M_a 低、基波电压幅值小等缺点。本文结合 SHEPWM 法和 SFOPWM 法两者的优点,导出了一种无论是在高调制度还是在低调制度下都有良好性能的新型 PWM 控制方法,其原理如图 3 所示,这种方法是在调制波中注入零序分量,载波采用相互交叠的形式。该方法能够适用于三相系统,与传统的 SHEPWM 法相比,提高了幅度调制比,变换器输出的基波电压幅值得到有效提高。

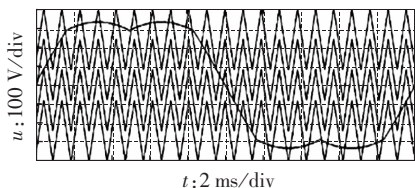
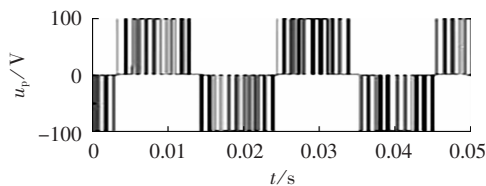


图 3 新型 PWM 控制方法原理图
Fig.3 Principle of proposed PWM

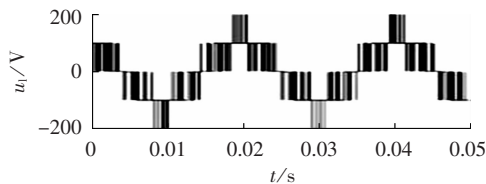
3 仿真及实验结果分析

为了验证这种新型 PWM 控制方法的有效性,本文对二极管箝位型五电平变换器进行了仿真与实验研究。该变换器的母线直流电压采用 400 V,开关频率设定为 1.08 kHz,分别采用 SHEPWM 控制方法和所提出的新型 PWM 方法对低调制度 ($M_a=0.3$) 和高调制度 ($M_a=0.8$) 进行了仿真。

图 4~7 分别是采用 SHEPWM 方法和新型 PWM 控制法在调制度为 0.3 和 0.8 时相电压 u_p 和线电压 u_l 的仿真波形。由仿真结果可知:在低调制度下, SHEPWM 方法会产生电平退化现象,而新型 PWM 方法由于直流侧各个电平都得到应用,不存在电平退化现象,且具有谐波少的优点;在高调制度情况下,新型 PWM 方法与常规 SHEPWM 方法相比,最显著的优点在于其谐波性能好,输出电压的电压调制比高,

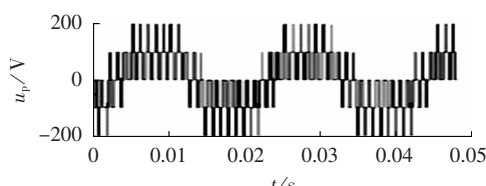


(a) 相电压波形

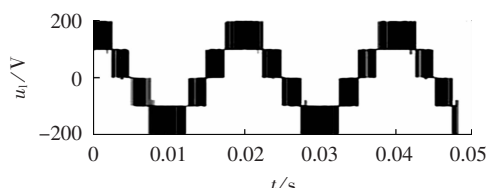


(b) 线电压波形

图 4 SHEPWM 法调制度为 0.3 时的仿真
Fig.4 Simulative results of SHEPWM at $M_a=0.3$

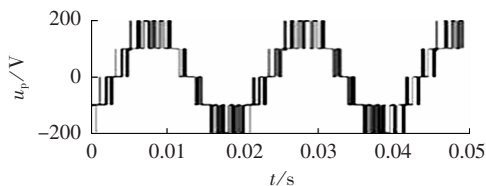


(a) 相电压波形

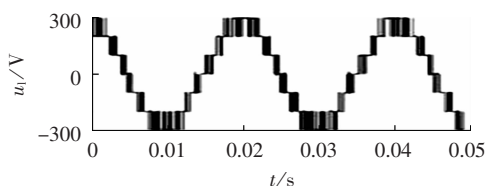


(b) 线电压波形

图 5 新型 PWM 法调制度为 0.3 时的仿真
Fig.5 Simulative results of proposed PWM at $M_a=0.3$



(a) 相电压波形



(b) 线电压波形

图 6 SHEPWM 法调制度为 0.8 时的仿真
Fig.6 Simulative results of SHEPWM at $M_a=0.8$

提高了直流电压的利用率。

采用新型 PWM 控制法对二极管箝位型五电平变换器进行了实验研究,图 8 给出了变换器实验输出电压 u_o 波形。可以看出,所提出的 PWM 方法很好地实现了对三相二极管箝位五电平变换器的控制,变换器输出波形正弦度好,谐波含量低。

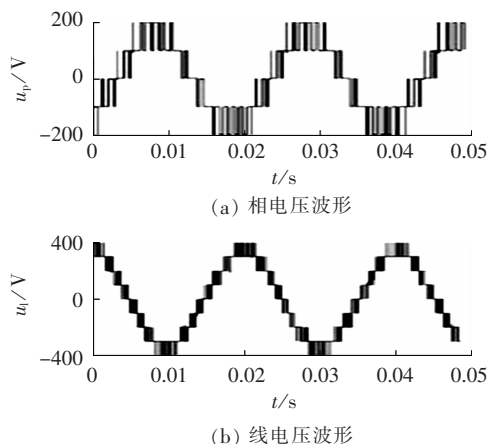


图7 新型PWM法调制度为0.8时的仿真

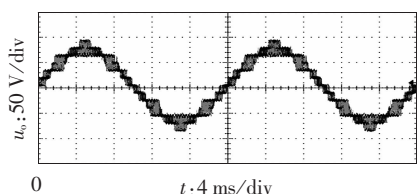
Fig.7 Simulative results of proposed PWM at $M_a=0.8$ 

图8 变换器输出电压波形

Fig.8 Waveform of converter output voltage

4 结论

本文研究了二极管箝位型五电平变换器,结合SHEPWM法和SFOPWM法两者的优点,提出了一种新型二极管箝位五电平变换器PWM控制法。理论分析、仿真与实验结果表明,该方法在高调制度和低调制度下都具有良好的谐波特性,输出波形质量好,因此该方法适合应用于大功率高电压三相功率变换场合。

参考文献:

- [1] 夏加宽,黄剑龙,包岩峰. 电流型多电平变流器拓扑分析[J]. 电力自动化设备,2008,28(8):78-80.
XIA Jiakuan,HUANG Jianlong,BAO Yanfeng. Topological analysis of multilevel current-source inverter[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(8):78-80.
- [2] NAMI A,ZARE F,LEDWICH G,et al. A new configuration for multilevel converters with diode clamped topology[C]//International Power Engineering Conference. Singapore:IEEE,2007:661-665.
- [3] RODRIGUEZ J,LAI J S,PENG F Z. Multilevel inverters:a survey of topologies,controls,and applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2002,49(4):724-738.
- [4] FRANQUELO L G,RODRIGUEZ J,LEON J I,et al. The age of multilevel converters arrives[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine,2008,2(2):28-39.
- [5] 张艳莉,居荣,费万民,等. 混合二极管箝位多电平变换器的拓扑结构研究[J]. 电力自动化设备,2005,25(12):27-30.
ZHANG Yanli,JU Rong,FEI Wanmin,et al. Research on topology of hybrid diode-clamping multilevel voltage inverter[J]. Electric Power Automation Equipment,2005,25(12):27-30.
- [6] LEZANA P,RODRIGUEZ J,OYARZUN D. A cascaded multilevel inverter with regeneration capability and reduced number of switches[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics,2008,55(3):1059-1066.
- [7] CEGLIA G,GUZMAN V,SANCHEZ C,et al. A new simplified multilevel inverter topology for DC-AC conversion[J]. IEEE Trans on Power Electronics,2006,21(5):1311-1319.
- [8] 洪春梅,王广柱. 五电平逆变器直流侧电容电压的平衡与控制[J]. 电机与控制学报,2003,7(3):202-206.
HONG Chunmei,WANG Guangzhu. DC bus voltage balancing and control in five-level inverters[J]. Electric Machines and Control,2003,7(3):202-206.
- [9] RODRIGUEZ J,WU B,BERNET S,et al. Multilevel voltage source converter topologies for industrial medium voltage drives[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics,2007,54(6):2930-2945.
- [10] KHAJEHODDIN S A,BAKSHSHAI A,JAIN P K. A voltage balancing method and its stability boundary for five-level diode-clamped multilevel converters[C]//Power Electronics Specialists Conference. Orlando,FL,USA:IEEE,2007:2204-2208.
- [11] 林磊,邹云屏,钟和清,等. 二极管箝位型三电平逆变器控制系统研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(15):33-39.
LIN Lei,ZOU Yunping,ZHONG Heqing,et al. Study of control system of diode-clamped three-level inverter[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(15):33-39.
- [12] FAZEL S S,BERNET S,KRUG D,et al. Design and comparison of 4 kV neutral point clamped,flying capacitor and series connected H bridge multilevel converters[J]. IEEE Trans on Industry Applications,2007,43(4):1032-1040.
- [13] 江友华,曹以龙,龚幼民. 基于载波相移角度的级联型多电平变频器输出性能的研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(1):76-81.
JIANG Youhua,CAO Yilong,GONG Youmin. Research on the cascade multilevel inverter based on different carrier phase-shifted angle[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(1):76-81.
- [14] NABEA A,TAKAHASHI I,AKAGI H. A new neutral-point-clamped PWM inverter[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,1981,17(5):518-523.
- [15] 单庆晓,李永东,潘孟春. 级联型逆变器的新进展[J]. 电工技术学报,2004,19(2):1-9.
SHAN Qingxiao,LI Yongdong,PAN Mengchun. A review on cascaded inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2004,19(2):1-9.
- [16] 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,LÜ 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.

(实习编辑:李莉)

作者简介:

余致廷(1962-),男,湖南常德人,副教授,博士,主要研究方向为电力电子与电气传动、软开关技术及应用(E-mail: shezhiting@yahoo.com.cn);

曹达(1986-),男,湖南衡阳人,硕士研究生,主要研究方向为电力电子技术、多电平变换器(E-mail: da-nini@163.com);

彭永进(1938-),男,湖南长沙人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力电子技术、控制理论及多电平变换器。

(下转第54页 continued on page 54)

Control of diode-clamped five-level converter

SHE Zhiting, CAO Da, PENG Yongjin

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Traditional diode-clamped converters have high voltage variation rate, common-mode voltage and harmonics, which make the design of its output filter complicated. Based on the analysis of five-level converter, a control method combining SHEPWM and SFOPWM is proposed. As each level of its DC side is applied, the converter has higher modulation ratio and fewer harmonics. Simulative and experimental results show that, the proposed method well controls the diode-clamped five-level converter with high or low modulation ratio and its outputting waveform is perfectly sinusoidal with low harmonic content, suitable for high-power high-voltage applications.

Key words: diode-clamped; five-level converter; PWM; topology