

单相五电平逆变器的多载波 PWM 方法分析

侯世英¹, 万江², 郑含博²

(1. 重庆大学 高电压与电工新技术教育部重点实验室, 重庆 400044;

2. 重庆新世纪电气有限公司, 重庆 400041)

摘要: 针对单相五电平级联逆变器, 对不同的多载波 PWM 方法进行分析。采用载波移相(PS)PWM 方式时, 其输出波形中含有幅值较大的高次谐波, 而载波垂直分布(CD)PWM 方式不存在这些问题, 但是 CDPWM 调制方式的低次谐波比较大。与 CDPWM 调制方式相比, 采用 PSPWM 调制方式所产生的低次谐波分量非常小。结合 2 种 PWM 调制方式各自的优点, 提出一种混合多载波 PWM 方法。通过对典型的五电平 PWM 单相逆变电路的 Matlab 仿真计算, 证明了混合多载波 PWM 法输出波形中的高次谐波含量小, 低次谐波分量介于 PSPWM 调制方式和 CDPWM 调制方式之间, 总的谐波畸变率最小。因此, 对于单相的五电平逆变器而言, 混合调制方式最优。

关键词: 高压; 单元串联; 逆变器; 谐波; 五电平

中图分类号: TM 464; TN 787^{+.2} **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2007)09-0067-04

通过对常用的载波移相(PS)PWM 法和载波垂直分布(CD)PWM 法进行研究, 提出了一种混合的多载波调制策略^[1]。以单相五电平逆变器为例, 对各种多载波 PWM 调制策略进行仿真研究, 仿真结果表明, 采用混合多载波调制策略的逆变器输出波形更好, 谐波污染更小。

1 多电平逆变器的拓扑结构^[2-3]

这里讨论的五电平逆变器是有独立直流电源的级联型多电平逆变器。其一相电路的拓扑结构见图 1。

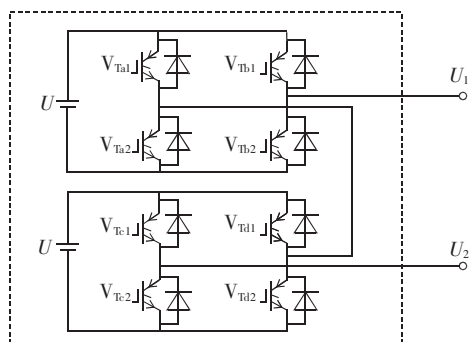


图 1 五电平级联逆变器

Fig.1 Five-level cascaded inverter

2 多载波 PWM 调制策略

逆变器的调制策略对输出电压谐波、开关损耗、电容电压的平衡等方面产生很大的影响。调制策略不一样, 所综合出的波形也不一样, 因此谐波分布特性也有差别。对于多电平逆变器, 基于多载波的 PWM 调制策略是用于多电平拓扑结构最常用的方法。多载波 PWM 策略与两电平 PWM 技术相比, 前者在

开关利用、状态冗余、等效开关频率等方面, 提供了额外的自由度和更多的可能性^[4]。

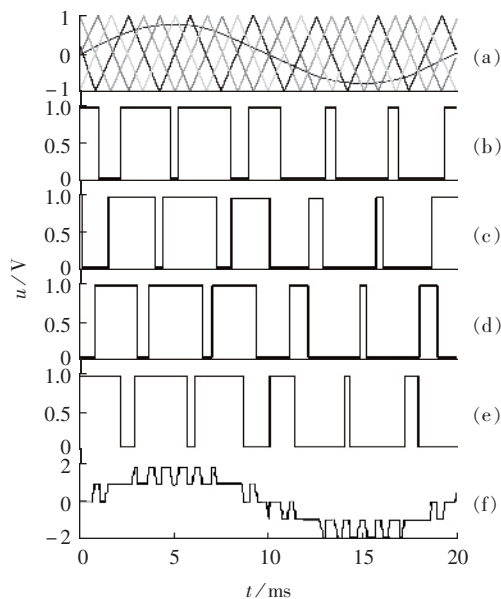
多载波调制技术的原理是利用一个调制信号波(通常为正弦波)与多个载波信号(一般为三角波)相交, 来产生开关器件的驱动波形。多载波 PWM 调制技术可分为 PSPWM 和 CDPWM 2 类^[5-7]。

2.1 PSPWM

PSPWM 方法采用了 4 个幅值和频率都相同的载波信号。将载波信号与参考正弦波信号进行比较, 若参考信号大于三角载波, 则相应于该载波信号的开关器件导通; 反之若参考信号小于三角载波, 则相应于该载波信号的开关器件关断。置于各开关器件的载波信号的初始相位依次移动 90° 。图 2 显示了载波信号与参考信号进行比较所产生的开关器件的门电压信号, 以及逆变器的输出五电平波形^[8-10]。图 3(a)所示为 PS 调制方式下的谐波分析(图中 M_{ag} 为谐波幅值所占基波幅值的百分比, n 为谐波次数; (b)~(d)同)。从图中可以看出, PS 调制方式下, 低次谐波含量比较小, 但是高次谐波总含量较大, 因此谐波畸变率较高, 为 36.33 %。

2.2 CDPWM

当采用载波垂直分布技术时, 对于一个 N 电平的逆变器, 需要 $N-1$ 个载波信号, 且这些载波具有相同的幅值与频率, 按照连续的带宽对这些载波进行排列, 使其完全分布在逆变器的线性调制区。参考正弦波的初始相位为 0, 且以 0 参考轴为中心。即在参考正弦波的正半周, 参考波与 0 参考轴上的所有载波信号进行比较, 当参考波每大于一个载波时, 便输出一个正的电压, 否则输出 0 电平; 在参考波的负半周, 参考波与 0 参考轴以下的所有载波进行比较, 当参考波每小于一个载波时, 便输出一个负的电压, 否则输出 0 电平^[11-12]。



(a) 为载波信号及参考波信号, (b)~(e) 为 V_{Ta1} 、 V_{Tb2} 、 V_{Tc1} 、 V_{Td2} 门控信号, (f) 为逆变器输出波形。

图 2 PSPWM 方式

Fig.2 PSPWM method

CDPWM 可分为 2 种情况。

a. 所有载波相位相同 PD (Phase Disposition)。载波和参考波分布以及逆变器输出波形如图 4 所示。PD 调制方式下的谐波分析如图 3(b) 所示, 从图中可以看出, 相对于 PS 调制方式, PD 调制方式下

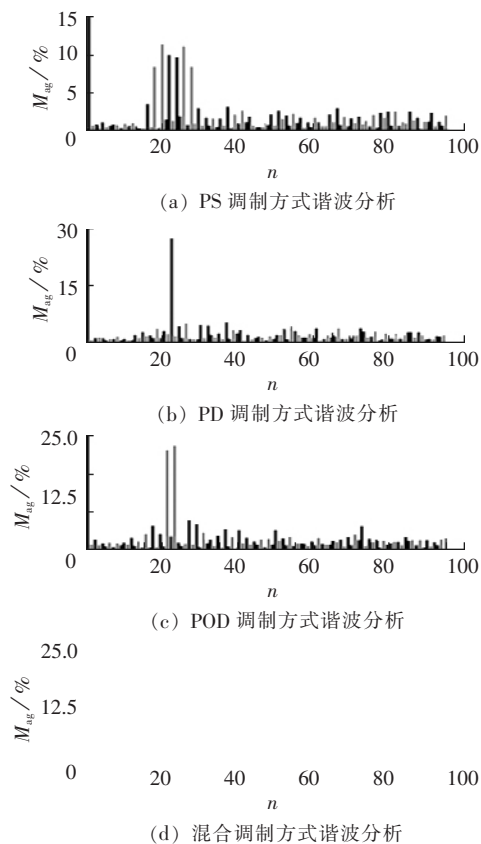


图 3 各调制方法的谐波分析

Fig.3 Harmonic analysis of different PWM methods

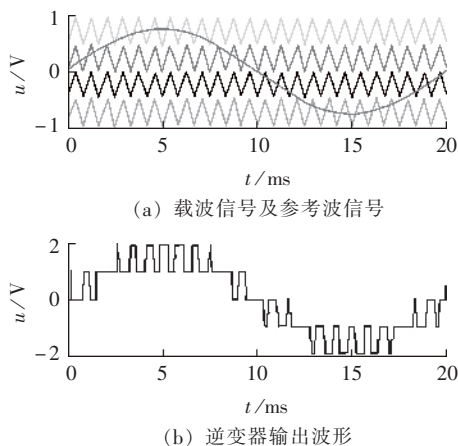


图 4 PDPWM 方式

Fig.4 PDPWM method

的输出波形的高次谐波总含量较小, 但是低次谐波含量较大, 其谐波畸变率为 36.08%。

b. 对称轴上下载波反相 POD (Phase Opposition Disposition)。在 0 参考轴上与 0 参考轴下的载波互差 180° 。载波和参考波分布以及逆变器输出波形如图 5 所示。POD 调制方式下的谐波分析如图 3(c) 所示, 从图中可以看出, 相对于 PD 调制方式, POD 调制方式下的输出波形的低次谐波含量有所减少, 但高次谐波含量又有所增加, 其谐波畸变率为 36.20%。

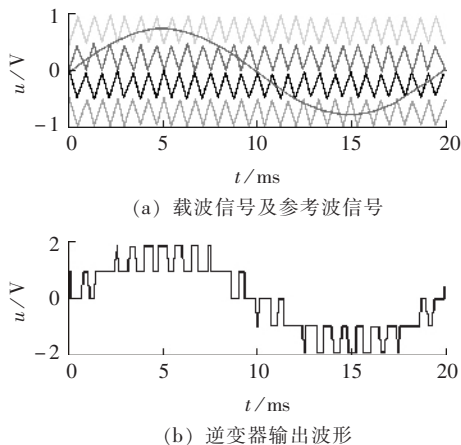


图 5 PODPWM 方式

Fig.5 PODPWM method

对于本节所讨论的每一种调制技术, 都包括 3 个自由度。

a. 调制比 m_a 。各调制技术的 m_a 如表 1 所示, 其中, A_0 为参考信号波的幅值, A_{cpp} 为载波信号的峰-峰值。

b. 载波比 $m_t = f_c / f_0$, 其中 f_c 为载波信号的频率, f_0 为参考信号波的频率。

c. 参考信号波与载波信号之间的相角差 ϕ 。在文中的仿真过程中, $\phi = 0$ 。

表 1 各调制技术中 m_a 的定义

Tab.1 Definitions of m_a for different PWM methods

调制技术	PS	CD	H
m_a	A_0 / A_{cpp}	$A_0 / 4 A_{cpp}$	$A_0 / 4 A_{cpp}$

3 基于 Matlab/Simulink 的混合(H)多载波 PWM 调制技术仿真

由于采用 PSPWM 方法所产生输出波形具有低次谐波含量较低的优点,采用 CDPWM 方法所产生的输出波形具有高次谐波含量较低的优点,因此结合这 2 种方法,提出一种混合(H)PWM 调制方法^[13-14]。各门控信号发生器模型如图 6 所示。脉冲控制模块包括参考正弦波发生电路(sin)和载波三角波发生电路(A、B、C、D),它的主要工作原理是在同步时钟的控制下产生一个正弦波和一个三角波,然后将两者进

行比较从而产生所需的控制脉冲。模型输出 4 路脉冲,根据控制需要,通过 IGBT 的驱动电路,提供控制 IGBT 导通与关断的脉冲信号。

HPWM 调制技术的原理是将一个三角载波信号分成等带宽的 4 个载波信号,然后各载波信号依次移相 90°。将移相后产生的新载波信号叠加后同参考波信号进行比较,产生的脉冲信号依次作为一个开关器件的门控信号。实现此功能的关键在于对载波信号发生器的设计,如图 6 中的 A、B、C、D 4 个经过封装的模块,其内部结构如图 7 所示。各载波的移相通过模块 Look - Up Table 实现,如图 8 所示。混合调制方式下的谐波分析如图 3(d)所示,从图中可以看

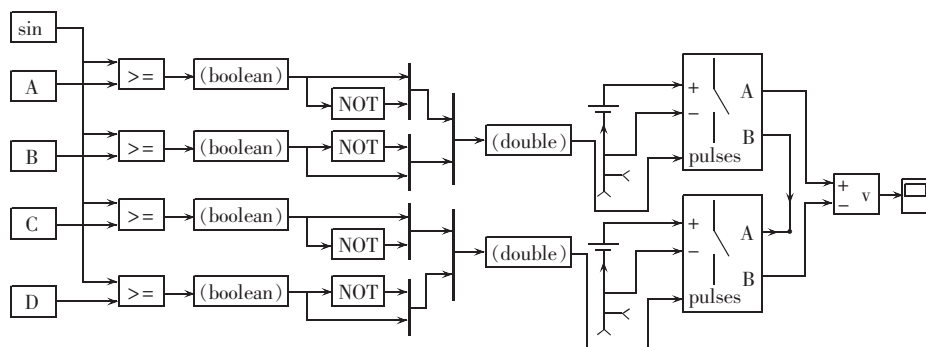


图 6 控制脉冲发生模型

Fig.6 Control pulse generator model

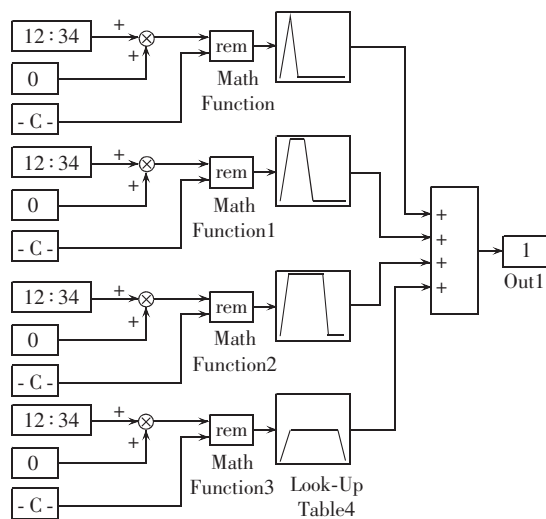


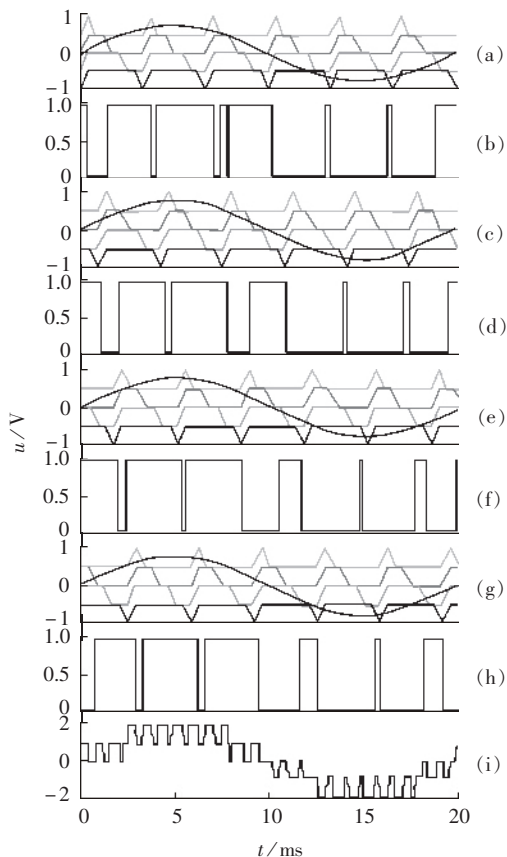
图 7 三角波载波发生电路

Fig.7 Triangular carrier wave generation circuit

出,混合调制方式下输出波形的低次谐波含量相对于 CDPWM 调制方式有所降低,而高次谐波含量相对于 PSPWM 调制方式同样有所降低,总谐波畸变率为 35.55 %。

4 仿真结果谐波分析比较

针对五电平逆变器,基于 3 种多载波的 PWM 调制策略进行了仿真研究,并在此基础上提出了一种新的混合调制策略。采用对滤波前的波形进行分析,摆脱了因滤波器设计不一致而造成的影响,更能够抓住多电平调制方法的本质,直接对多电平调制



(a)(c)(e)(g) 为载波信号及参考波信号, (b)(d)(f)(h) 为 V_{Td1} 、 V_{Td2} 、 V_{Te1} 、 V_{Te2} 门控信号, (i) 为逆变器输出波形。

图 8 混合 PWM 方式

Fig.8 Hybrid PWM method

方法进行比较。对在线性调制区仿真的结果进行谐波分析,如图 3 所示^[15]。

通过观察采用各种调制技术情况下所产生的谐波状况可以知道,采用 PSPWM 调制方式时,其输出波形中含有幅值较大的高次谐波;而采用 CDPWM 调制方式和混合调制方式时则不存在这些问题,但是考察各种方案下低次谐波的分量,发现 CDPWM 调制方式的低次谐波分量最大,PS 调制方式的低次谐波分量最小,混合调制方式的低次谐波分量介于两者之间。各调制方法下的输出波形的总谐波畸变率相差不大,但混合调制方法相对最小。综合考虑上述结论,对于单相的五电平逆变器而言,混合调制方式为最优。

5 结论

研究了用于五电平逆变器的多载波 PWM 调制方式,分析了多载波 PWM 调制方式所产生的谐波的特性,结合 PS 调制方式和 CD 调制方式,提出了一种新的混合多载波调制方式,并获得了较好的输出波形。

通过谐波分析,相比较而言,基于载波垂直分布的调制方式略适用于五电平逆变器,其中又以混合调制方式为最优,在五电平以上的逆变器,应采用基于载波移相的调制方式。

参考文献:

- [1] 张燕宾. SPWM 变频调速应用技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2002.
- [2] 吴洪洋,何湘宁. 级联型多电平变换器 PWM 控制方法的仿真研究[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.
- [3] LEE Dong-ho, LEE F C. New cascade switch multilevel PWM converters[C]// APEC'99. [S.l.]: APEC, 1999: 1109-1113.
- [4] 张皓,续明进. 多电平高压变频中的波形调制方法[J]. 电力电子技术, 2006, 40(1): 12-13, 20.
ZHANG Hao, XU Ming-jin. Approaches of waveform modulation of multi-level high voltage inverters [J]. Power Electronics, 2006, 40(1): 12-13, 20.

- [5] SUB B S, SINHA G, MANJREKAR M D, et al. Multilevel power conversion — an overview of topologies and modulation strategies [C] // Proceedings of the 6th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, OPTIM'98. Brasov, Romania; [s.n.], 1998: 11-24.
- [6] CORZINE K, FAMILIANT Y. A new cascaded multilevel H-bridge drive[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2002, 17(1): 125-131.
- [7] 李世平,李擎,李华德. 一种 SPWM 控制的多电平逆变器电压误差补偿策略[J]. 电力电子技术, 2005, 39(5): 12-14.
LI Shi-ping, LI Qing, LI Hua-de. A voltage-error compensation strategy for multi-level inverter based on SPWM control[J]. Power Electronics, 2005, 39(5): 12-14.
- [8] ZHANG Z C, KUANG J, WANG X, et al. Force commutated HVDC and SVC based on phase-shifted multi-converter modules [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1993, 8(2): 712-718.
- [9] LIANG Yi-qiao. A new type of STATCOM based on cascading voltage source inverters with phase shifted unipolar SPWM[C/CD]. [S.l.]: IAS, 1998.
- [10] MANJREKAR M D, STEIMER P K, LIPO T A. Hybrid multilevel power conversion system: a competitive solution for high power applications[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2000, 36(3): 834-841.
- [11] LAI Ji-sheng, PENG Fang-zheng. Multilevel converter—a new breed of power converters[J]. IEEE Trans on Ind Appl, 1996, 32(3): 509-517.
- [12] CARRARA G, GARDELLA S, MARCHESONI M, et al. A new multilevel PWM method: a theoretical analysis[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1992, 7(3): 497-505.
- [13] BLASKO V. A hybrid PWM strategy combining modified space vector and triangle comparison methods[C]// PESC'96. Italy: [s.n.], 1996: 1872-1878.
- [14] JOOS G, HUANG Xiao-gang, OOI Boon-teck. Direct-coupled multilevel cascaded series var compensators [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1998, 34(5): 786-793.
- [15] 黄忠霖. 控制系统 Matlab 计算及仿真[M]. 北京:国防工业出版社, 2001.

(责任编辑:李玲)

作者简介:

侯世英(1962-),女,重庆人,副教授,从事电力电子技术及电气传动方面的研究工作;

万江(1983-),男,重庆人,硕士研究生,从事电机控制及高压变频技术方面的研究工作(E-mail: wanjiang830501@163.com);

郑含博(1984-),男,河南南阳人,硕士研究生,从事电力电子在电力系统中的应用方面的研究工作。

Analysis of multi-carrier PWM methods for single-phase five-level inverter

HOU Shi-ying¹, WAN Jiang², ZHENG Han-bo²

(1. Key Laboratory of High Voltage Engineering & Electrical New Technology, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Chongqing New Century Electrical Co., Ltd., Chongqing 400041, China)

Abstract: Different multi-carrier PWM methods for single-phase five-level cascaded inverter are analyzed. The high order harmonics have bigger amplitude in its output when PSPWM method is adopted while the low order harmonics have bigger amplitude when CDPWM method is adopted. A hybrid PWM method combining PSPWM and CDPWM is presented. The simulative calculation with Matlab for typical single-phase five-level inverter circuit shows that, the high order harmonics in the output of hybrid PWM method are less and its low order harmonics are between PSPWM and CDPWM, and its total harmonic distortion is the least. For single-phase five-level inverter, the proposed hybrid PWM method is the best.

Key words: high-voltage; cascaded; inverter; harmonic; five-level