

# 一种适用于飞跨电容型多电平逆变器的 新型载波同相层叠 PWM 方法

王 琨, 冯 琳, 李国杰

(电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海交通大学电气工程系, 上海 200240)

**摘要:** 传统载波层叠PWM方法不能平衡飞跨电容电压, 因此不能直接应用于飞跨电容型多电平逆变器。对传统载波同相层叠PWM方法进行改进, 增加了零电平选择环节, 根据设定值, 合理分配零电平向量, 从而在设定周期内, 平衡飞跨电容电压。该方法随着调制度的不同, 载波波形会发生变化, 和传统载波移相PWM方法相比, 线电压谐波性能也得到了很大提高, 尤其是在中等调制度下, 效果显著。采用该方法对飞跨电容型三电平逆变器进行了仿真验证, 结果证明了该方法的正确性与可行性。

**关键词:** 飞跨电容型多电平逆变器; 载波移相PWM; 载波同相层叠PWM; 零电平选择环节; 电压平衡

## A novel carrier-based disposition PWM method with voltage balance for flying capacitor multilevel inverter

WANG Kun, FENG Lin, LI Guo-jie

(Key Laboratory of Control of Power Transmission and Transformation, Ministry of Education (Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University), Shanghai 200240, China)

**Abstract:** The conventional carrier-based cascading PWM method cannot balance the flying capacitor voltage for flying capacitor multilevel inverter (FCMLI). This paper improves the conventional phase disposition PWM method (PDPWM) to achieve the balance of the flying capacitor through adding the link selection of zero level which will be a reasonable allocation of zero level vectors. The carrier waveform will change with different modulations. Its line voltage harmonic performance is greatly improved than that of the conventional phase-shifted carrier PWM method (PSPWM), especially under middle modulation index region. The validity of the novel PWM method is demonstrated by the simulation results.

This work is supported by National Key Technology R & D Program (No. 2013BAA01B04), National Natural Science Foundation of China (No. 51307106) and International S & T Cooperation Program of China (No. 2013DFG71630).

**Key words:** FCMLI; PSPWM; carrier-based phase disposition (PD) PWM; zero level selection; voltage balance

中图分类号: TM76

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)14-0008-06

## 0 引言

近年来, 多电平逆变器在高压大功率领域应用越来越多, 现在应用较为成熟的主要有三种拓扑结构: 二极管钳位型、级联型和飞跨电容型。其中飞跨电容型多电平逆变器拓扑和其他两种相比, 利用电容钳位, 克服了二极管钳位型逆变器的固有缺陷;

利用一个直流电源, 克服了级联型逆变器的多电源缺陷, 并有大量的冗余开关状态, 具有更容易向多电平发展的优良特点<sup>[1-3]</sup>。

多电平载波 PWM 方法是多电平逆变器的重要控制算法。主要的载波方法有载波同相层叠 PWM 方法(PDPWM), 载波反相层叠 PWM 方法(APOD PWM)和载波移相 PWM 方法 (PSPWM)等。其中 PDPWM 方法被广泛认为具有最低的线电压谐波性能<sup>[4-9]</sup>, 并且实现简单, 但是由于飞跨电容型逆变器利用电容钳位, 且必须保证其电压稳定, 只有 PSPWM 适用, 且其谐波性能不如载波层叠算法。

**基金项目:** 国家科技支撑计划(2013BAA01B04); 国家自然科学基金资助项目(51307106); 国家国际科技合作专项(2013DFG71630)



图 4 为传统载波同相层叠 PWM 方法飞跨电容上的电压仿真波形, 仿真电路直流母线电压 400 V, 开关频率 4 kHz, 飞跨电容取值 450  $\mu\text{F}$ , 负载为纯阻性 50 kW, 滤波电感为 1 mH。可以看出飞跨电容电压在 0~400 V 间波动, 无法稳定。

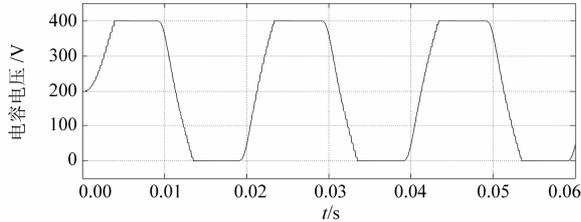


图 4 PDPWM 直接应用于飞跨电容三电平逆变器时飞跨电容电压仿真波形

Fig. 4 Flying capacitor voltage waveform with direct use of PDPWM method

### 3 适合飞跨电容的载波同相层叠 PWM 方法

为了平衡飞跨电容电压, 并且利用载波同相层叠 PWM 方法, 本文对其进行了一定的改进, 基于此方法提出了新的 PWM 方法。新方法充分利用了飞跨电容型多电平逆变器开关状态冗余的特点, 增加零电平选择环节, 灵活控制零电平向量, 具有载波同相层叠方法的各项谐波性能, 算法流程如图 5。

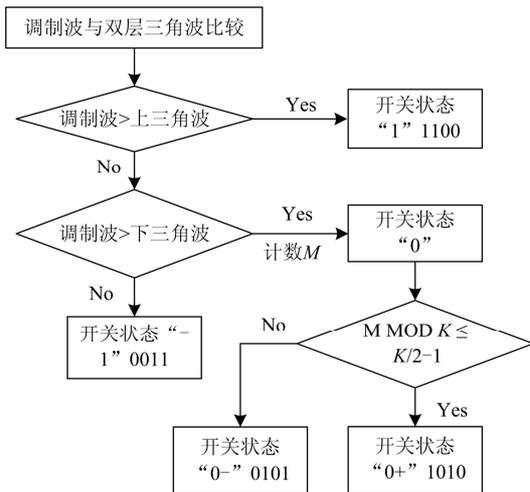


图 5 改进载波同相层叠 PWM 算法流程图

Fig. 5 Flow chart of improved PDPWM method

算法原理为: 当正弦调制波比上层三角载波大时, 逆变器应输出“1”电平状态, 开关状态为 1100; 当正弦调制波比下层三角载波小时, 逆变器输出“-1”状态, 开关状态为 0011; 当正弦调制波介于上下层三角载波之间时, 0 电平计数个数  $M$  与预先设定参数  $K$  相模, 如果小于等于  $K/2-1$  则输出  $0+$  状态, 否则输出  $0-$  状态。

$K$  为依据一个周期中零电平出现的次数而计算出的可以在两个周期内使飞跨电容上的电压自动平衡的预设模值。每个载波频率下  $K$  值惟一。

下面利用载波方法分析调制度为 0.8 时, 新 PWM 方法自动平衡飞跨电容电压原理及  $K$  取值原理, 各开关状态及输出电压状态如图 6、图 7 所示。

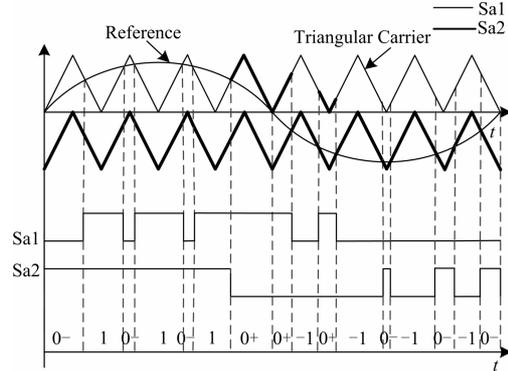


图 6 三电平飞跨电容的改进 PDPWM 方法-周期一

Fig. 6 PDPWM for 3-level FCMLI -cycle 1

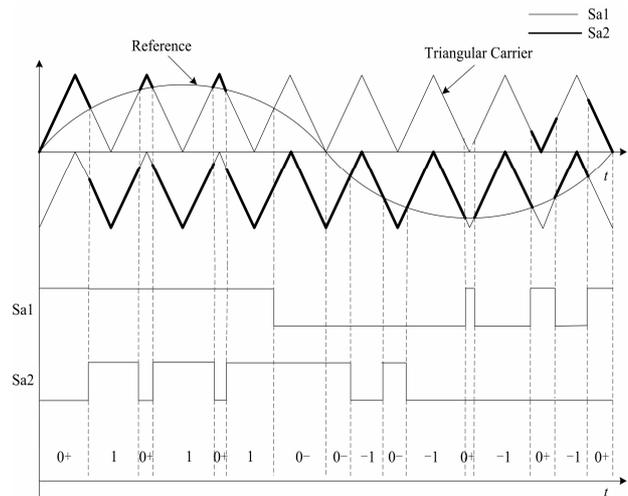


图 7 三电平飞跨电容的改进 PDPWM 方法-周期二

Fig. 7 Novel PDPWM for 3-level FCMLI -cycle 2

可以看出, 在连续两个周期内  $0+$  和  $0-$  的状态成对出现且作用时间相同, 能够自动平衡飞跨电容上的电压。分析图 6 和图 7 可以得出, 一个周期中“0”电平状态共出现 9 次, 可将这 9 个“0”电平分为三组, 每组包含 3 个“0”电平状态, 三组的作用时间分别为  $T_1$ 、 $T_2$  和  $T_3$ 。可以看出, 这种情况单个周期中的“0”电平无法平衡, 必须在连续两个周期内平衡。在连续两个周期中, 每隔一组更换一次  $0+$  和  $0-$  状态, 顺序依次为:  $T_1$  ( $0-$ )、 $T_2$  ( $0+$ )、 $T_3$  ( $0-$ )、 $T_1$  ( $0+$ )、 $T_2$  ( $0-$ )、 $T_3$  ( $0+$ ), 此时  $0+$  和  $0-$

状态的作用时间均为  $T_1+T_2+T_3$ 。当调制度发生变化时, 零电平作用时间随即发生变化, 相当于载波发生变化, 但连续两个周期内  $0+$  和  $0-$  作用时间始终保持相等, 保证了飞跨电容上的电压平衡。因此  $K$  应取值为 6, 即以 3 为周期转换  $0+$  和  $0-$  向量。

综上, 该方法利用载波同相层叠 PWM 方法获得逆变器 1、0、-1 电平的状态转换关系, 在 0 电平状态时根据飞跨电容逆变器自身特点, 基于预设初值  $K$  选用不同的零电平开关组合 ( $0+$  和  $0-$ ) 对飞跨电容分别充电和放电, 在连续两个载波周期内两种开关组合作用时间相等, 对电容充放电情况相同, 故飞跨电容上的电压可以保持平衡。

#### 4 Matlab/Simulink 仿真结果分析与验证

为了证明改进载波同相层叠 PWM 方法的正确性与可行性, 在 Matlab/Simulink 中搭建了飞跨电容三电平逆变器模型。直流母线电压 400 V, 开关频率采用 4 kHz, 飞跨电容取值  $450 \mu\text{F}$ ,  $K$  值取为 6, 负载为纯阻性 50 kW, 滤波电感为 1 mH。图 8 为调制度 0.8 时该方法仿真相电压、线电压波形。

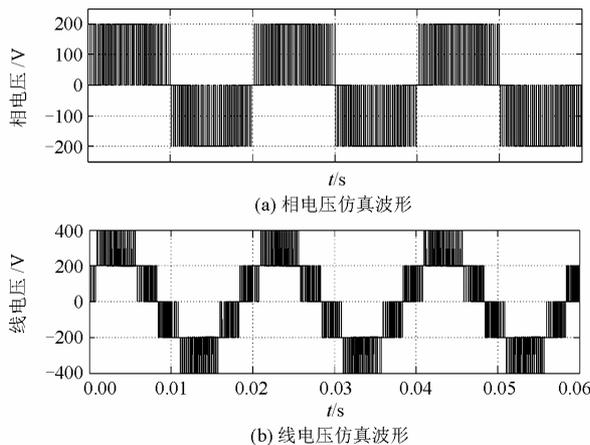


图 8 飞跨电容三电平逆变器新型 PWM 方法仿真波形 (调制度为 0.8)

Fig. 8 Simulation results with novel PWM method in 3-level FCMLI ( $M=0.8$ )

图 9 为此调制度下飞跨电容上电压波形, 可以看出电容电压波动稳定在  $\pm 2 \text{ V}$  以内。传统 PSPWM 飞跨电容电压波形如图 10 所示, 波动电压为  $\pm 10 \text{ V}$ , 可见, 改进载波同相层叠 PWM 方法相较传统 PSPWM 有较大优势。图 11 为调制度为 0.3 时改进 PWM 方法仿真相电压、线电压波形。图 12 为调制度为 0.3 时飞跨电容电压仿真波形。

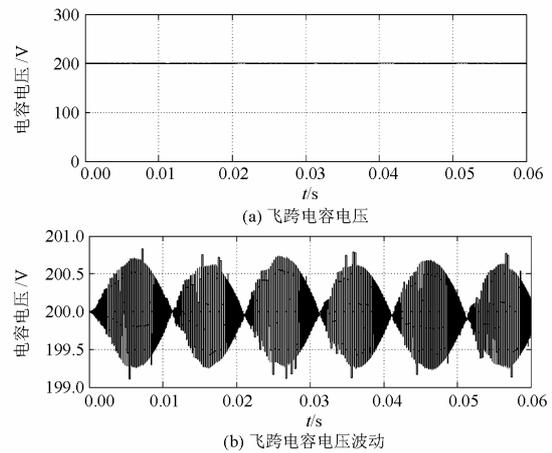


图 9 新 PWM 方法飞跨电容电压波形 (调制度为 0.8)

Fig. 9 Flying capacitor voltage waveform with novel PWM method ( $M=0.8$ )

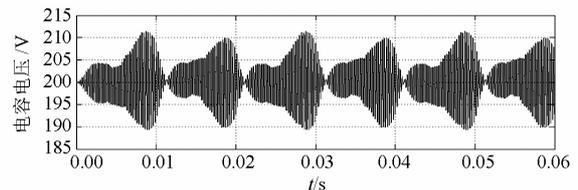


图 10 PSPWM 方法飞跨电容电压波形 (调制度为 0.8)

Fig. 10 Flying capacitor voltage waveform with PSPWM method ( $M=0.8$ )

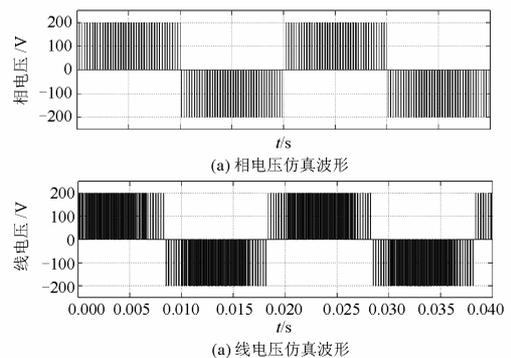


图 11 飞跨电容三电平逆变器新型 PWM 方法仿真波形 (调制度为 0.3)

Fig. 11 Simulation results with novel PWM method in 3-level FCMLI ( $M=0.3$ )

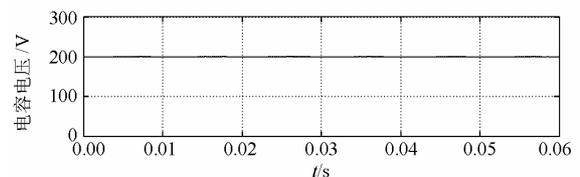


图 12 新 PWM 方法飞跨电容电压波形 (调制度为 0.3)

Fig. 12 Flying capacitor voltage waveform with novel PWM method ( $M=0.3$ )

对本文改进的载波同相层叠 PWM 调制方法和传统的 PSPWM 调制方法, 在调制度从 0.1~1 范围内变化时, 线电压谐波分量总 THD 值 (160th 以内) 随调制度变化曲线如图 13 所示。从此结果可以看出, 新型 PWM 方法比传统载波移相 PWM 方法有更好的线电压谐波性能, 尤其在中等调制度时, 如调制度为 0.6 时谐波分量总 THD 可降低 57%, 具体 THD 比较数值如表 2 所示。

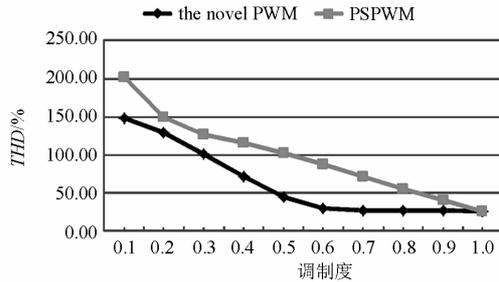


图 13 飞跨电容型三电平逆变器载波 PWM 方法输出线电压 THD 比较

Fig. 13 THD comparison of output line-voltage with carrier PWM method in 3-level FCMLI

表 2 飞跨电容三电平逆变器不同调制方法线电压 THD 比较  
Table 2 THD comparison of line-voltage with different methods for FCMLI

调制度	改进 PWM 方法	载波移相 PWM
1	26.30%	25.86%
0.9	27.10%	40.23%
0.8	27.77%	55.96%
0.7	26.86%	71.80%
0.6	29.79%	87.48%
0.5	45.26%	102.40%
0.4	71.84%	115.94%
0.3	101.64%	126.93%
0.2	129.10%	149.26%
0.1	147.84%	201.66%

## 5 结论

本文将原本不适用于飞跨电容逆变器的载波同相层叠 PWM 方法进行改进, 提出了一种新型 PWM 方法, 利用飞跨电容开关状态冗余特性, 增加零电平向量选择环节, 通过设定初值, 合理分配零电平向量, 平衡了飞跨电容电压。相比传统载波移相 PWM 方法, 算法灵活度大, 实现简单, 利用 Matlab/Simulink 仿真, 验证了算法的正确性。从仿真结果可以看出, 该方法线电压谐波性能有较大提高, 具有一定的应用价值。

## 参考文献

[1] ESCALANTE M F, VANNIER J C, ARZANDE A. Flying capacitor multilevel inverters and DTC motor drive applications[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2002, 49(4): 809-815.

[2] MEYNARD T A, FOCH H, THOMAS P, et al. Multicell converters: basic concepts and industry applications[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2002, 49(5): 955-964.

[3] 刘苗, 洪峰, 王成华. 五电平飞跨电容型双降压逆变器[J]. 电工技术学报, 2011, 26(5): 83-87.  
LIU Miao, HONG Feng, WANG Cheng-hua. A novel flying-capacitor dual buck five-level inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(5): 83-87.

[4] CARRARA G, GARDELLA S, MARCHESONI M, et al. A new multilevel PWM method: a theoretical analysis[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1992, 7(3): 497-505.

[5] 王兆宇, 艾芊. 三电平逆变器空间矢量调制及中点电压控制[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(20): 131-136.  
WANG Zhao-yu, AI Qian. Space vector modulation for three-level inverter and neutral point potential control[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(20): 131-136.

[6] 王立杰, 孙玉坤, 孙运全, 等. 大容量链式 STATCOM 的三角载波移相-开关频率最优 PWM 法控制策略的研究[J]. 继电器, 2007, 35(3): 41-44.  
WANG Li-jie, SUN Yu-kun, SUN Yun-quan, et al. PS-SFO-PWM control for high-power STATCOM employing cascade multilevel inverters[J]. Relay, 2007, 35(3): 41-44.

[7] 王立乔, 姜旭东. 单相多电平逆变器空间矢量调制技术及其应用[J]. 电工技术学报, 2011, 26(4): 114-121.  
WANG Li-qiao, JIANG Xu-dong. A single-phase space vector PWM method for multilevel inverter and its application[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(4): 114-121.

[8] 顾和荣, 王德玉, 沈虹, 等. 三相四桥臂逆变器控制技术[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 41-46.  
GU He-rong, WANG De-yu, SHEN Hong, et al. Research on control scheme of three-phase four-leg inverter[J]. Power System Protection and Control, 2011,

- 39(24): 41-46.
- [9] 余威, 江友华, 张小群, 等. 级联型多电平逆变器的谐波分析及仿真研究[J]. 继电器, 2006, 34(14): 58-61.  
YU Wei, JIANG You-hua, ZHANG Xiao-qun, et al. Harmonics analysis and simulation research of multi-cell-cascade multi-level inverter[J]. Relay, 2006, 34(14): 58-61.
- [10] 王鸿雁, 王小峰, 张超, 等. 飞跨电容多电平逆变器的新型载波 PWM 方法[J]. 电工技术学报, 2006, 21(2): 63-67.  
WANG Hong-yan, WANG Xiao-feng, ZHANG Chao, et al. Carrier-based PWM method with voltage balance for flying capacitor multilevel inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(2): 63-67.
- [11] 王小峰, 何湘宁, 邓焰. 载波交叠特性 PWM 方法在飞跨电容多电平逆变器中的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 98-102.  
WANG Xiao-feng, HE Xiang-ning, DENG Yan. PWM methods with carrier overlapping characteristics in flying capacitor multilevel inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(10): 98-102.
- [12] 王红玲, 张元敏, 方波. 基于 CPWM 控制方式的正弦波逆变器电路设计[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(2): 76-79.  
WANG Hong-ling, ZHANG Yuan-min, FANG Bo. Design of sine-wave inverter based on CPWM control mode[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(2): 76-79.
- [13] MENZIES R W, STEIMER P, STEINKE J K. Five level GTO inverters for large induction motor drives[J]. IEEE Trans on Industrial Applications, 1994, 30(4): 938-944.
- [14] SHUKLA A, GHOSH A, JOSHI A. Hysteresis current control operation of flying capacitor multilevel inverter and its application in shunt compensation of distribution systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2007, 22(1): 396-405.
- [15] MCGRATH B P, HOLMES D G. Multicarrier PWM strategies for multilevel inverters[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2002, 49(4): 858-867.
- [16] 费万民, 张艳丽, 都小利. 五电平逆变器特定谐波消除脉宽调制方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(2): 85-99.  
FEI Wan-min, ZHANG Yan-li, DU Xiao-li. Selective harmonic elimination PWM method for five-level inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(2): 85-99.
- [17] YUAN Xiao-ming, STEMLER H, BARBI I. Self-balancing of the clamping-capacitor-voltages in the multilevel capacitor clamping inverter under sub-harmonic PWM modulation[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2001, 16(2): 256-263.
- [18] LEE S G, KANG D W, HAN L Y, et al. The carrier-based PWM method for voltage balance of flying capacitor multilevel inverter[C] // Power Electronics Specialists Conference, 2001: 126-131.
- [19] 王鸿雁, 邓焰, 赵荣祥, 等. 飞跨电容型多电平逆变器开关损耗最小 PWM 方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 51-55.  
WANG Hong-yan, DENG Yan, ZHANG Rong-xiang, et al. Switching loss minimizing PWM method for flying capacitor multi-level inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(8): 51-55.

收稿日期: 2013-10-08; 修回日期: 2013-11-01

作者简介:

王琨(1988-), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源控制、微网控制; E-mail: wangkunmoon@gmail.com

冯琳(1976-), 女, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为新能源控制、电机设计;

李国杰(1965-), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统分析与控制、新能源及电能质量。