

# 基于模糊虚拟空间矢量调制的 NPC 三电平 逆变器中点电位平衡的研究

刘永超, 黄 勇, 李 兴, 黄 波

(西华大学电气与电子信息学院, 成都 610039)

**摘要:** 三电平中点钳位型 NPC(neutral-point-clamped)逆变器拓扑结构相比于两电平有能承受高电压、效率高和电磁干扰小等优点,但也存在中点电位不平衡这一固有问题。针对此固有问题,提出了一种新的控制中点电位平衡的方法。该方法是在虚拟空间矢量调制策略的基础上,细分扇区,调整输出电压矢量顺序,增加分配时间的模糊控制因子;冗余小矢量对中点电压的影响可以相互抵消,减少了中矢量的作用时间;通过控制因子合理分配冗余小矢量的作用时间,能有效地控制中点电压偏移。仿真结果验证了该方法的正确性和可行性。

**关键词:** 三电平逆变器;中点电位;模糊控制;虚拟空间矢量

## Research on Neutral-point Potential of Three-level NPC Inverter Based on Fuzzy Virtual Space Vector Modulation

LIU Yongchao, HUANG Yong, LI Xing, HUANG Bo

(School of Electrical Engineering and Electronic Information, Xihua University, Chengdu 610039, China)

**Abstract:** Compared with the topology of a two-level inverter, the topology of a three-level neutral-point-clamped (NPC) inverter has obvious advantages, such as resistance to higher voltage, higher efficiency, and less electromagnetic interference. However, the unbalanced potential at the neutral-point is still an inherent problem. Accordingly, a new method for controlling the neutral-point potential is proposed in this paper. Based on the strategy of virtual space vector modulation, the sector is subdivided, the sequences of output voltage vectors are adjusted, and a fuzzy control factor that allocates time is added; the effect of redundant vector pairs on the neutral-point potential can be offset, which reduces the action time of medium vectors; the control factor properly allocates the action time for redundant vector pairs, thus the shift of neutral-point voltage can be efficiently controlled. Simulation results verify the correctness and validity of the proposed method.

**Keywords:** three-level inverter; neutral-point potential; fuzzy control; virtual space vector

NPC 型三电平拓扑于 1981 年被提出,因其结构自身的优点而被广泛应用于中高压、大功率场合<sup>[1-3]</sup>。而 NPC 型三电平逆变器拓扑自身结构的特点,致使逆变器工作时会出现直流侧上、下分压电容电压不平衡,此情况导致中点电压偏移,给系统带来了如逆变器输出电压畸变、谐波含量大、严重时退化为两电平等。中点电压偏移带来的一系列问题制约了三电平 NPC 型变换器的应用和发展。为此,该课题成了国内外学者研究的热点,并针

对此问题提出了一些控制策略<sup>[4-7]</sup>。

文献[7]提出虚拟空间矢量调制策略,理论上该方法不会对中点电位产生影响,不会造成中点电压偏移,但在实际应用中,由于负载参数不对称、元器件参数不对称、开关延迟等原因会导致中点电压平衡控制效果不理想;同时,该方法没有中点电位平衡策略,当发生偏移时,并不能控制中点电压平衡。文献[8]在传统 SVPWM 调制算法基础上加入模糊控制的中点平衡策略,在一定程度上控制了中点电压平衡,但是当调制度较大时,分配给小矢量的时间小,冗余小矢量的调节能力变小,对中点电压的

控制效果就不理想。文献[9-10]提出了一些混合调制策略,在空间矢量区间范围内,结合传统 SVPWM 算法和虚拟空间矢量法的优势,并添加时间分配因子控制中点电压偏移;相较于传统 SVPWM 算法和虚拟空间矢量算法,混合调制法能够控制中点电压偏移,但缺点是其算法复杂。

本文基于虚拟空间矢量算法不会对中点电位产生影响的优点,用模糊控制器灵活分配冗余小矢量的作用时间来控制中点电压偏移,使其在较小的范围内波动;在传统虚拟空间矢量调制算法基础上增加了分区,使各个区域内主小矢量更加明显。选择直流侧两个分压电容的电压差值和该差值变化率作为模糊控制器输入,根据输入的大小利用模糊控制规则分配各区域内主小矢量的作用时间,减小中点电压的波动。

## 1 NPC 三电平逆变器拓扑结构

NPC 三电平逆变器拓扑结构如图 1 所示,每相桥臂都有 4 个功率开关管,开关管的导通顺序决定了输出相电压的输出电平,如表 1 所示,表中 P、O、N 分别表示输出相电压 3 个电平幅值  $U_{dc}/2$ 、0、 $-U_{dc}/2$ 。

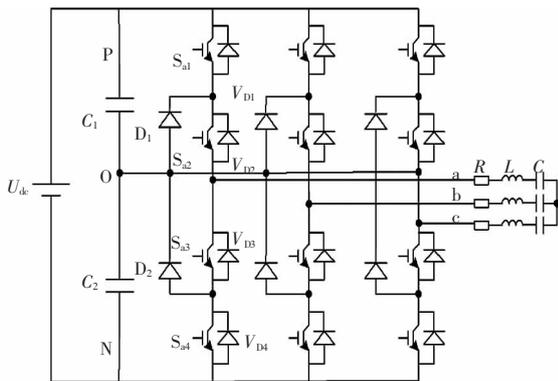


图 1 三电平逆变器拓扑结构

Fig.1 Topology of three-level inverter

表 1 三电平逆变器输出电平与导通器件的关系

Tab.1 Relationship between the output levels of three-level inverter and conducted devices

输出电平	P	O	N
导通器件	$S_1, S_2$	$S_2, S_3$	$S_3, S_4$

## 2 基于虚拟空间矢量的改进调制算法

文献[6-7]分析了造成中点电压偏移的原因,详细介绍了虚拟空间矢量调制策略,其中小矢量和中矢量影响中点电位,小矢量对中点电位的影响可用相应的冗余矢量抵消,中矢量为不可控量。而零矢量大矢量和中矢量对中点电位无影响。虚拟空间矢量法是通过控制一个开关周期内,使流过中点的平均电流为零来实现控制中点电压平衡,但该方法没有中点平衡策略,对中点电位控制效果不理想。

本文利用虚拟空间矢量算法的优点,减少中矢量的作用时间以降低中矢量对中点电位影响,根据中点电压偏差值通过模糊控制控制器产生的平衡因子,利用平衡因子分配冗余小矢量时间来克服中点电压平衡问题。第 1 扇区区域划分如图 2 所示,第 1 扇区分为 8 个小区,在每 1 个小区内根据小矢量靠近小区的距离分为 1 个主小矢量和一个副小矢量。副小矢量的时间平分给冗余正负小矢量,可抵消副小矢量对中点电压产生的影响;主小矢量参与控制中点电压,利用模糊平衡因子  $D$  分配主小矢量的时间控制中点电压平衡。虚拟中矢量  $V^*$  可以分解为

$$V^* = \frac{1}{3} (V_{s1} + V_{s2} + V_M) \quad (1)$$

两边同时乘以虚拟中矢量作用时间  $T^*$  得

$$V^* T^* = \frac{1}{3} (V_{s1} + V_{s2} + V_M) T^* \quad (2)$$

即虚拟中矢量的作用时间可以平分给 2 个小矢量和中矢量。此时一个开关周期内中矢量所分得时间为虚拟中矢量时间  $1/3$ , 相较于传统 SVPWM

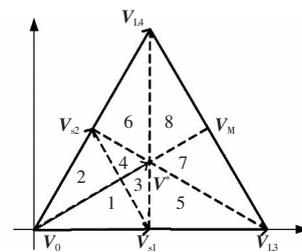


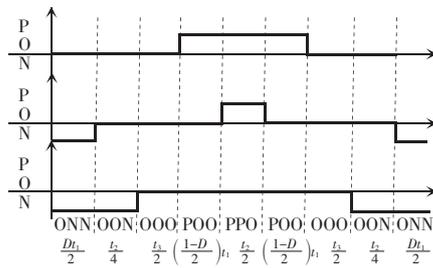
图 2 第 1 扇区区域划分

Fig.2 Region division of Sector 1

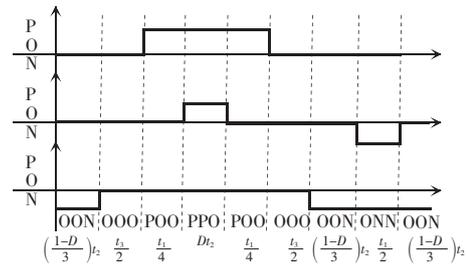
算法,中矢量的作用时间减小了,从而降低了中矢量对中点电压的影响。由于 2 个小矢量时间也分别增加了  $1/3T^*$ ,主小矢量所增加的时间与原有时间均参与中点电位控制,与传统 SVPWM 算法相比,该方法中参与调节的冗余小矢量的时间更大,增强了对中点电位的控制能力,能达到更好的控制效

果。矢量输出顺序根据需要调整,电压矢量的输出顺序和时间分配如图 3 所示。

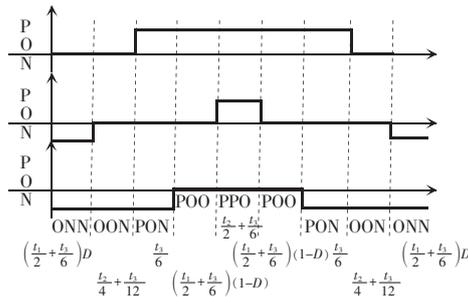
假设空间电压矢量  $U_{ref}$  在第 1 扇区第 5 小区中,根据最近三矢量原则可以得到合成  $U_{ref}$  的 3 个矢量  $V_{s1}$ 、 $V_{s2}$ 、 $V^*$  和三矢量相应的作用时间  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ <sup>[11]</sup>。由于  $V_{s1}$  距离第 5 小区更近,在计算时间时它分到



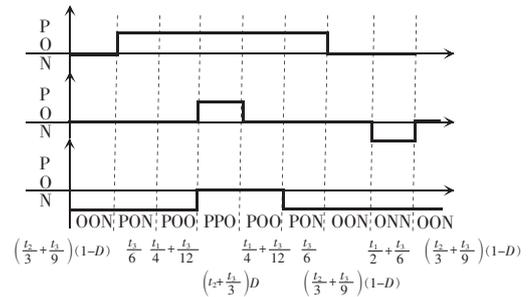
(a)  $U_{ref}$  在第 1 小区



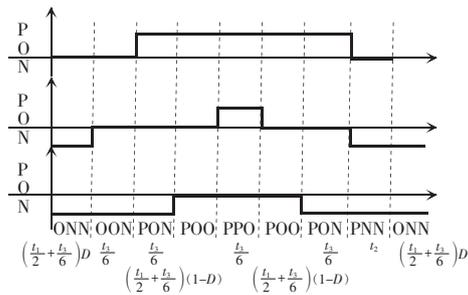
(b)  $U_{ref}$  在第 2 小区



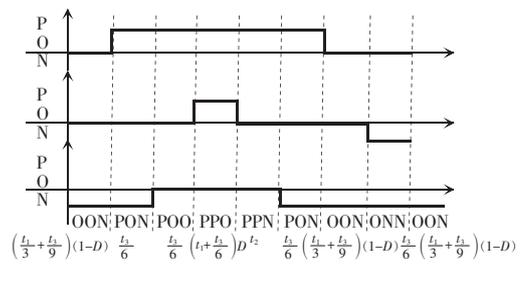
(c)  $U_{ref}$  在第 3 小区



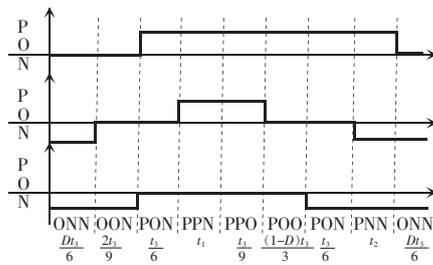
(d)  $U_{ref}$  在第 4 小区



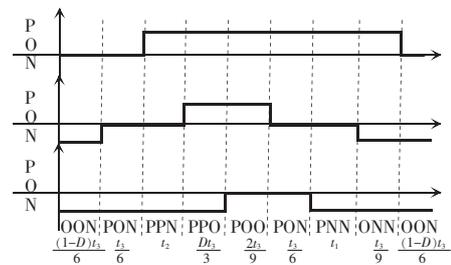
(e)  $U_{ref}$  在第 5 小区



(f)  $U_{ref}$  在第 6 小区



(g)  $U_{ref}$  在第 7 小区



(h)  $U_{ref}$  在第 8 小区

图 3  $U_{ref}$  在第 1 扇区电压矢量时序

Fig.3 Timing diagram of for  $U_{ref}$  voltage vector in Sector 1

间比  $V_{s2}$  大,它的调节控制能力强,因此  $V_{s1}$  是主小矢量,  $V_{s2}$  是副小矢量。在 1 个周期内,输出电压矢量排列顺序和时间分配如图 3(e)所示。

### 3 模糊控制器的设计

以模糊数学为基础,模糊逻辑控制器的设计把专家对特定被控对象或过程的控制策略总结成一系列控制规则,通过这些规则实现对系统的控制。

在此系统中,选择直流侧上、下两电容电压的差值  $e$  和该差值的变化率  $ec$  作为模糊控制器的输入,经过模糊推理得到控制因子  $D(0.25 < D < 0.75)$ 。由于中点电位与基本电压矢量的选取有关,基本电压矢量影响着中点电位。当  $V_{C1} > V_{C2}$  时,中点电流流出,要想保证电压平衡须要加大中点电流的流入,即加大正小矢量作用时间;同理,当  $V_{C1} < V_{C2}$  时,需加大负小矢量作用时间。正、负小矢量的作用时间大小由模糊控制器的输出控制因子  $D$  调节。

图 4 为模糊控制器结构组成。首先,设定变量的论域和模糊取值,分别设输入和输出变量论域为  $\pm 5$  和  $\pm 6$ ,在相应的论域上定义 {NB,NM,NS,Z,PS,PM,PB} 共 7 个模糊子集;其次,选取隶属函数,如图 5 所示,输入、输出变量均选取三角形曲线;最后,根据系统需求确定模糊控制规则,如表 2 所示。



图 4 模糊控制器

Fig.4 Fuzzy controller

表 2 模糊推理规则

Tab.2 Fuzzy inference rule

D	ec						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NB	NM	NM
NM	NB	NB	NM	NM	NM	NB	NB
NS	NB	NB	NM	NS	Z	Z	PB
e	Z	NB	NM	Z	Z	Z	NM
PS	NS	Z	Z	PS	PM	PB	PB
PM	PS	PS	PM	PM	PM	PB	PB
PB	PM	PM	PB	PB	PB	PB	PB

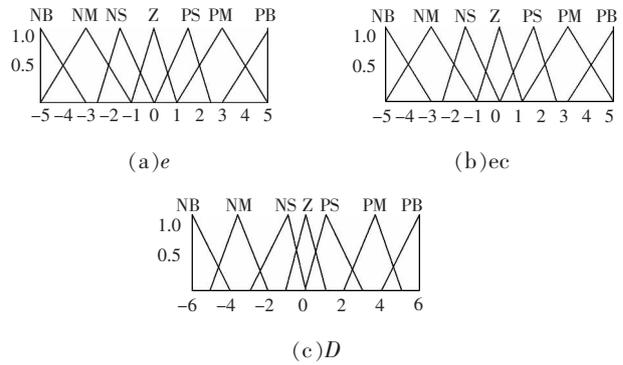


图 5 模糊控制隶属函数曲线

Fig.5 Curves of membership function of fuzzy control

为了使用模糊规则,需要将输入输出值量化至相应论域内,对偏差  $e$  和偏差的变化率  $ec$  分别用量化因子  $k_e$  和  $k_{ec}$  量化,即

$$k_e e(n) \in [-5, 5], \quad k_{ec} ec(n) \in [-5, 5] \quad (3)$$

对应的输出控制因子  $D$  也要用比例因子  $k_u$  量化至论域内,即

$$Fk_u = D(n), F \in [-6, 6] \quad (4)$$

### 4 仿真结果

为了验证该方法对 NPC 三电平逆变器中点电位平衡控制的可行性和有效性,在 Matlab/Simulink 仿真环境下搭建仿真模型。

仿真参数设置如下:直流母线电压 600 V,采样频率 10 kHz,基波频率 50 Hz,调制度 0.9。分以下 3 种情况进行仿真。

三相平衡阻感负载:  $R=12.5 \Omega, L=40 \text{ mH}$ ; 分压电容  $C_1=C_2=2000 \mu\text{F}$ ; 三相不对称阻感负载:  $R_a=6 \Omega, L_a=10 \text{ mH}; R_b=R_c=12.5 \Omega, L_b=L_c=40 \text{ mH}$ ; 分压电容,  $C_1=C_2=2000 \mu\text{F}$ ; 三相平衡阻感负载:  $R=12.5 \Omega, L=40 \text{ mH}$ ; 不对称分压电容:  $C_1=1800 \mu\text{F}, C_2=2000 \mu\text{F}$ 。

图 6 所示为使用同相载波 SPWM 调制策略得到的中点电压偏移的仿真波形。图 7 为虚拟空间矢量调制时中点电压偏移的仿真波形。图 8 为在传统空间矢量法基础上加模糊中点电位平衡控制后中点电压的仿真波形。图 9 为在虚拟空间矢量调制基础上加模糊中点平衡策略后中点电压偏移的仿真波形。由图 6~图 9 可得,在不同情况下,同相载波

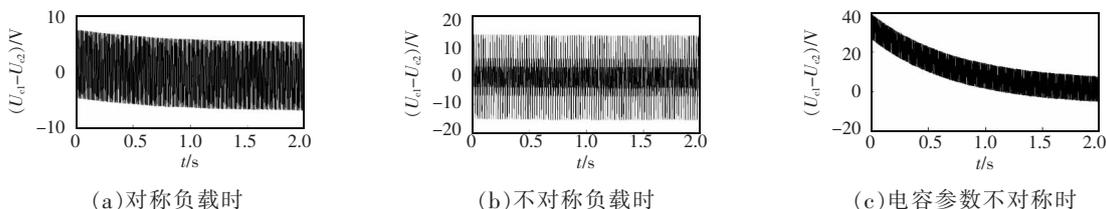


图 6 同相载波 SPWM 控制时的仿真波形

Fig.6 Simulation waveform under phase carrier SPWM control

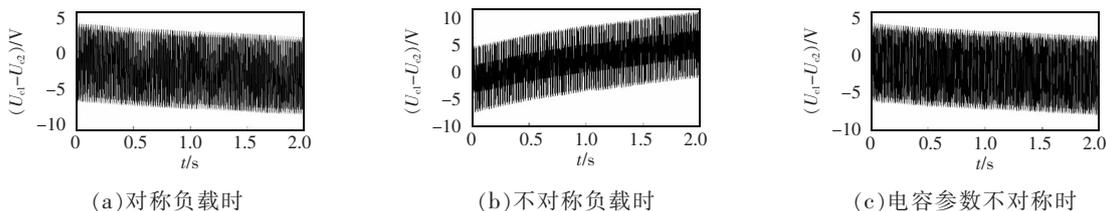


图 7 虚拟空间矢量调制时的仿真波形

Fig.7 Simulation waveform with virtual space vector modulation

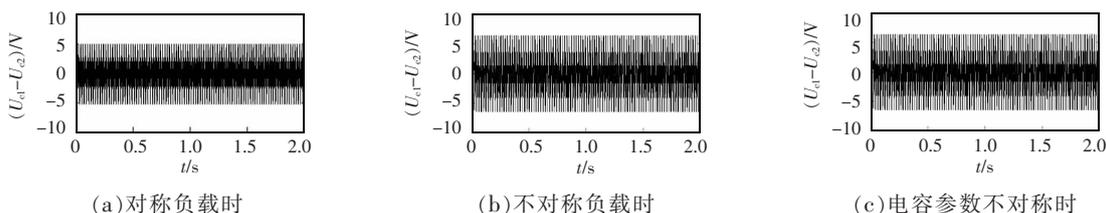


图 8 传统 SVPWM 加模糊控制仿真波形

Fig.8 Simulation waveforms with traditional SVPWM under fuzzy control

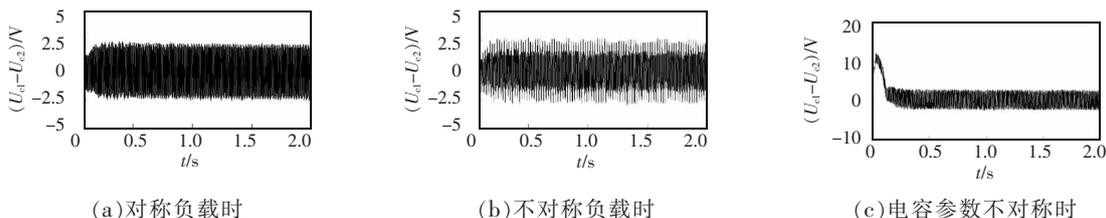


图 9 虚拟空间矢量加模糊控制时的仿真波形

Fig.9 Simulation waveform of virtual space vector under fuzzy control

SPWM 调制时由于没有很好地考虑中点电压平衡问题,中点电压波动较大,发生了中点电压偏移;虚拟空间矢量法控制效果也不理想,也发生中点电压偏移;虽对中点电压无影响,但当负载参数不对称、元器件参数不对称、开关延迟等情况下会造成中点电压累积,同时该法没有中点平衡策略,不能有效主动地去减小电压偏移,偏移量会越来越大;加模糊中点平衡控制的两种方法能主动有效地抑制中点电压偏移,使电压偏移量控制在一定范围内。比较图 8 和图 9,本文提出的基于虚拟空间矢量的模糊中点控制的控制效果明显更好,它能将中点电压偏移量控制在更小的范围内。

### 5 结语

本文针对 NPC 型三电平逆变器中点电位偏移问题,分析验证了传统虚拟空间矢量法在元器件参数不对称、负载参数不对称和开关延迟等影响时,中点电位控制效果不理想的原因。在虚拟空间矢量法基础上加模糊中点平衡控制策略来控制中点电位平衡,结合两者的优势来控制中点电位,相较于传统虚拟空间矢量调制策略,在实际应用中,控制效果得到了很好的改善,不仅能够抑制对中点电压造成的影响,而且使中点电压波动控制在一个更小

的范围内;相较于基于传统 SVPWM 法的模糊控制策略,能减小中点电压的波动范围,在调制度较高时,有较好的控制效果。仿真验证了该方法的正确性和可行性。

#### 参考文献:

- [1] Nabae A, Takahashi I, Akagi H. A new neutral-point-clamped PWM inverter[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1981, IA-17(5): 518-523.
- [2] Rodriguez J, Bernet S, Steimer P K, et al. A survey on neutral-point-clamped inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(7):2219-2230.
- [3] 宋文祥, 陈国呈, 丁肖宇. 基于两类脉宽调制方式本质联系的三电平逆变器中点电压平衡控制的研究[J]. 电工技术学报, 2005, 20(12): 53-58.  
Song Wenxiang, Chen Guocheng, Ding Xiaoyu, et al. Research on neutral-point balancing control for three-level NPC inverter based on correlation between PWM and SVPWM[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(12): 53-58(in Chinese).
- [4] Alonso O, Marroyo L, Sanchis P, et al. Analysis of neutral-point voltage balancing problem in three-level neutral-point-clamped inverters with SVPWM modulation[C]. Industrial Electronics Society, IEEE 2002 28th Annual Conference, 2002, 2: 920-925.
- [5] Pou J, Zaragoza J, Ceballos S, et al. A carrier-based PWM strategy with zero-sequence voltage injection for a three-level neutral-point-clamped converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(2):642-651.
- [6] Busquets-Monge S, Bordonau J, Boroyevich D, et al. The nearest three virtual space vector PWM—A modulation for the comprehensive neutral-point balancing in the three-level NPC inverter[C]. IEEE Power Electronics Letters, 2004, 2(1):11-15.
- [7] 胡存刚, 王群京, 李国丽, 等. 基于虚拟空间矢量的三电平 NPC 逆变器中点电压平衡控制方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(5):100-107.  
Hu Cungang, Wang Qunjing, Li Guoli, et al. A neutral-point potential balancing algorithm for three-level inverter based on the virtual-space-vector[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(5):100-107(in Chinese).
- [8] 陈鑫兵, 何礼高. 基于模糊控制的三电平逆变器中点电位平衡策略[J]. 电工技术学报, 2007, 22(10): 103-108.  
Chen Xinbing, He Ligao. Research on neutral point potential balance of three-level inverter based on fuzzy logic control strategy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(10): 103-108(in Chinese).
- [9] 周京华, 贾斌, 章小卫, 等. 混合式三电平中点电位平衡控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(24):82-89.  
Zhou Jinghua, Jia Bin, Zhang Xiaowei, et al. A hybrid three-level neutral-point balance control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(24): 82-89(in Chinese).
- [10] 范必双, 谭冠政, 樊绍胜, 等. 一种新的基于混合空间矢量调制的三电平逆变器直流侧电容电压平衡研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(27):135-141.  
Fan Bishuang, Tan Guanzheng, Fan Shaosheng, et al. A new DC side capacitance voltages balancing method for three-level inverters based on hybrid space vector modulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(27): 135-141(in Chinese).
- [11] 李成杰, 彭华良, 李梅, 等. 基于坐标变换法的三电平 SVPWM 算法的三个矢量作用时间的计算方法[J]. 电气技术, 2015, 2:60-65.  
Li Chengjie, Peng Hualiang, Li Mei, et al. The calculation method of the three vector action time of three level SVPWM algorithm based on the coordinate transformation method[J]. Electrical Engineering, 2015, 2:60-65(in Chinese).



刘永超

#### 作者简介:

刘永超(1989-),男,通信作者,硕士研究生,研究方向:电力电子与电力传动, E-mail:lyc\_sd@yeah.net。

黄勇(1964-),男,博士后,教授,研究方向:现代信号处理及在通信技术中的应用, E-mail:huangyong@mail.xhu.edu.cn。

李兴(1991-),男,硕士研究生,研究方向:电力电子与电力传动, E-mail:wslsdx@163.com。

黄波(1991-),男,硕士研究生,研究方向:LED 开关电源, E-mail:806287508@qq.com。