

# 一种改进的多电平逆变器SVPWM调制方法研究

王梦谦,李华,毕京斌,曹虎,李政达,汪志

(中车青岛四方车辆研究所有限公司,山东 青岛 266000)

**摘要:**随着现代轨道交通行业的不断发展,多电平逆变技术已经成为大功率牵引变流器的研究热点之一。以有源中点钳位型五电平(ANPC-5L)逆变器为基础,结合虚坐标变换法,实现了逆变器直流侧中点电位及各相悬浮电容电压的稳定控制。根据参考电压矢量坐标与开关状态确定初始电压作用矢量以及三个基本电压矢量的作用顺序。结合参考电压所在三角形区域信息(正三角形或倒三角形)为三个基本电压矢量分配作用时间。搭建系统模型进行仿真实验,仿真结果验证了算法的可行性以及拓扑结构的优越性。最终,设计ANPC-5L牵引逆变器,通过效率测试验证系统的高效性。

**关键词:**有源中点钳位五电平;虚坐标变换;电位控制;电压作用顺序;时间分配

**中图分类号:**TM464 **文献标识码:**B **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed22076

## Research on an Improved SVPWM Modulation Method of Multilevel Inverter

WANG Mengqian, LI Hua, BI Jingbin, CAO Hu, LI Zhengda, WANG Zhi

(CRRC Qingdao Sifang Rolling Stock Research Institute Co., Ltd., Qingdao 266000, Shandong, China)

**Abstract:** With the continuous development of modern rail transit industry, multilevel inverter technology has become one of the research focuses of high-power traction converter. Based on the active neutral point clamped five level(ANPC-5L) inverter, and combined with virtual coordinate transformation method, the stable control of DC side neutral point potential and suspension capacitor voltage of each phase was realized. According to the reference voltage vector coordinates and the switching state, the initial voltage action vector and the action sequence of the three basic voltage vectors were determined. The action time was assigned to the three basic voltage vectors by combining the triangle region information of reference voltage (normal triangle or inverted triangle). The system model was built and simulated. The simulation results verified the feasibility of the algorithm and the superiority of ANPC-5L topology. Finally, the ANPC-5L traction inverter was designed, the efficiency of the system was verified through the efficiency test.

**Key words:** active neutral point clamped five level(ANPC-5L); virtual coordinate transformation; potential control; voltage action sequence; time distribution

相较于传统两电平逆变器,多电平逆变器具有谐波含量低、逆变效率高、能够有效降低系统电磁干扰等优势<sup>[1]</sup>。上世纪80年代,日本学者最早提出了采用二极管钳位式的多电平逆变拓扑结构,随着研究的不断深入,飞跨电容式多电平逆变器、级联型多电平逆变器及各种新式拓扑陆续涌现出来。相比二极管钳位式多电平逆变器,飞跨电容式逆变器能够运用灵活多变的开关组合实现电容电压的平衡控制,但所需钳位电容数量较多,容易造成系统体积庞大。级联H桥型多

电平逆变器采用模块化电路设计,可扩展性强,不存在支撑电容分压不均问题,但该电路采用多路独立直流电源供电方式,系统成本明显增加<sup>[2]</sup>。有源中点钳位型逆变电路通过中点电位控制策略能够妥善解决支撑电容分压不均问题,在工业领域得到越来越广泛的应用。

## 1 五电平逆变器电路拓扑

图1所示为五电平有源中点钳位型逆变电路单相拓扑。

作者简介:王梦谦(1993—),男,硕士,工程师,Email:wangmq182@163.com

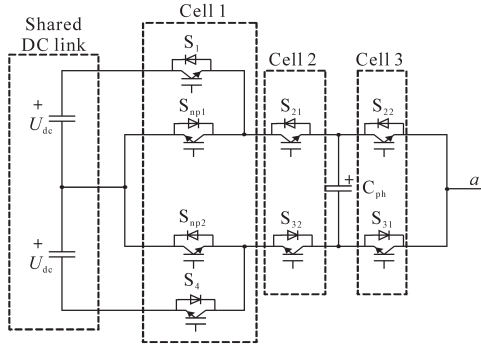


图1 ANPC-5L单相电路拓扑

Fig.1 ANPC-5L single phase circuit topology

ANPC-5L逆变器每相桥臂可以输出五种电平状态,输出电压由低到高依次表示为0~4,参见表1。

表1 开关状态及输出电压列表

Tab.1 Switch status and output voltage table

开关管状态								电压	电压 矢量
S <sub>4</sub>	S <sub>np2</sub>	S <sub>np1</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>32</sub>	S <sub>21</sub>	S <sub>31</sub>	S <sub>22</sub>		
1	0	1	0	1	0	1	0	0	U <sub>0</sub>
1	0	1	0	1	0	0	1	1	U <sub>1</sub>
1	0	1	0	0	1	1	0	1	U <sub>2</sub>
1	0	1	0	0	1	0	1	2	U <sub>3</sub>
0	1	0	1	1	0	1	0	2	U <sub>4</sub>
0	1	0	1	1	0	0	1	3	U <sub>5</sub>
0	1	0	1	0	1	1	0	3	U <sub>6</sub>
0	1	0	1	0	1	0	1	4	U <sub>7</sub>

图2所示为五电平逆变器输出空间矢量图。每相桥臂能够输出5种电平状态,三相逆变器共有125种电压矢量组合方式,例如矢量序列321即代表逆变器a,b,c三相桥臂输出电压等级分别为3,2,1。

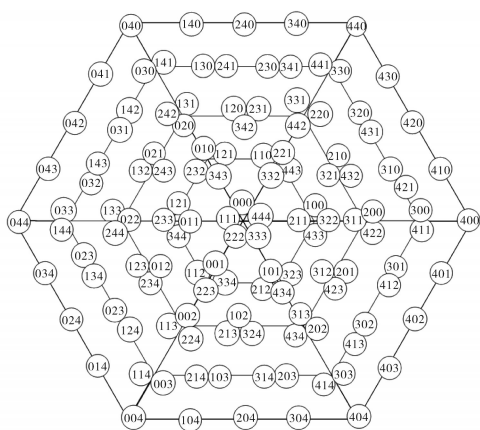


图2 五电平空间电压矢量图

Fig.2 Five level space voltage vector diagram

## 2 五电平逆变器SVPWM算法研究

### 2.1 虚坐标变换

如图3所示,ja-jb-jc为虚坐标系,由a-b-c坐标系逆时针方向旋转90°得到<sup>[3]</sup>。ja-jb-jc坐标系的ja轴与α-β坐标系的β轴重合。

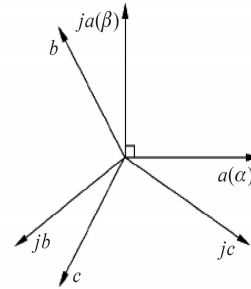


图3 三个坐标系转换图

Fig.3 Transformation of three coordinate systems

(U<sub>ja</sub>, U<sub>jb</sub>, U<sub>jc</sub>)和(U<sub>a</sub>, U<sub>b</sub>, U<sub>c</sub>)分别代表电压矢量在ja-jb-jc和a-b-c坐标系下坐标值,满足:

$$\begin{bmatrix} U_{ja} \\ U_{jb} \\ U_{jc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

### 2.2 非零序分量控制

在ja-jb-jc坐标系下重新定义参考电压矢量U<sub>ref</sub>坐标值,并确定3个基本电压矢量,计算单个开关周期内各基本电压矢量作用时间。

如图4所示,距离参考电压矢量终点最近的位置点分别为P<sub>A</sub>,P<sub>B</sub>,P<sub>C</sub>。以P<sub>A</sub>,P<sub>B</sub>,P<sub>C</sub>为终点的3个电压矢量U<sub>A</sub>,U<sub>B</sub>,U<sub>C</sub>即为基本电压矢量,根据伏秒平衡原理,求解单个开关周期内3个基本电压矢量的作用时间。

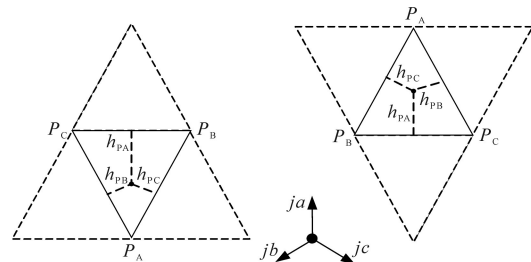


图4 参考矢量对应的两类小三角形

Fig.4 Two kinds of small triangles corresponding to reference vectors

定义三个基本电压矢量的作用时间占空比为d<sub>PA</sub>,d<sub>PB</sub>,d<sub>PC</sub>,参考电压U<sub>ref</sub>终点到周围三条边的距离分别为h<sub>PA</sub>,h<sub>PB</sub>,h<sub>PC</sub>,根据三角形几何关系得出:h<sub>PA</sub>+h<sub>PB</sub>+h<sub>PC</sub>=1。

对参考电压矢量坐标(U<sub>vja</sub>, U<sub>vjb</sub>, U<sub>vjc</sub>)向下取整,得到(ū<sub>vja</sub>, ū<sub>vjb</sub>, ū<sub>vjc</sub>)。当ū<sub>vja</sub>+ū<sub>vjb</sub>+ū<sub>vjc</sub>=-1时,P<sub>A</sub>,P<sub>B</sub>,P<sub>C</sub>三个点连接生成的小三角形区域为

正三角形,计算 $h_{PA}, h_{PB}, h_{PC}$ :

$$\begin{cases} h_{PA} = U_{jia} - \bar{U}_{jia} \\ h_{PB} = U_{jib} - \bar{U}_{jib} \\ h_{PC} = U_{jic} - \bar{U}_{jic} \end{cases} \quad (2)$$

当 $\bar{U}_{jia} + \bar{U}_{jib} + \bar{U}_{jic} = -2$ 时, $P_A, P_B, P_C$  3个点连接生成的小三角形区域为倒三角形,计算 $h_{PA}, h_{PB}, h_{PC}$ :

$$\begin{cases} h_{PA} = 1 - U_{jia} + \bar{U}_{jia} \\ h_{PB} = 1 - U_{jib} + \bar{U}_{jib} \\ h_{PC} = 1 - U_{jic} + \bar{U}_{jic} \end{cases} \quad (3)$$

本文以正三角形为例进行分析:参考电压矢量 $U_{ref}$  ( $U_{jia}, U_{jib}, U_{jic}$ )由三个基本电压矢量合成,分别为 $U_A$  ( $U_{Aja}, U_{Ajb}, U_{Ajc}$ ),  $U_B$  ( $U_{Bja}, U_{Bjb}, U_{Bjc}$ )及 $U_C$  ( $U_{Cja}, U_{Cjb}, U_{Cjc}$ )。

3个基本电压矢量坐标值满足:

$$\begin{cases} U_{Aja} = U_{jia} - h_{PA} + 1 \\ U_{Ajb} = U_{jib} - h_{PB} \\ U_{Ajc} = U_{jic} - h_{PC} \\ U_{Bja} = U_{jia} - h_{PA} \\ U_{Bjb} = U_{jib} - h_{PB} + 1 \\ U_{Bjc} = U_{jic} - h_{PC} \\ U_{Cja} = U_{jia} - h_{PA} \\ U_{Cjb} = U_{jib} - h_{PB} \\ U_{Cjc} = U_{jic} - h_{PC} + 1 \end{cases}$$

参考电压矢量 $U_{ref}$ 与基本电压矢量 $U_A, U_B, U_C$ 满足 $U_{ref} = d_{PA} \times U_A + d_{PB} \times U_B + d_{PC} \times U_C$ ,即

$$\begin{cases} U_{jia} = U_{Aja} \cdot d_{PA} + U_{Bja} \cdot d_{PB} + U_{Cja} \cdot d_{PC} \\ U_{jib} = U_{Ajb} \cdot d_{PA} + U_{Bjb} \cdot d_{PB} + U_{Cjb} \cdot d_{PC} \\ U_{jic} = U_{Ajc} \cdot d_{PA} + U_{Bjc} \cdot d_{PB} + U_{Cjc} \cdot d_{PC} \end{cases} \quad (4)$$

将基本电压矢量坐标值代入式(4)得出:

$$\begin{cases} U_{jia} = (U_{jia} - h_{PA} + 1)d_{PA} + (U_{jia} - h_{PA})d_{PB} + (U_{jia} - h_{PA})d_{PC} \\ U_{jib} = (U_{jib} - h_{PB})d_{PA} + (U_{jib} - h_{PB} + 1)d_{PB} + (U_{jib} - h_{PB})d_{PC} \\ U_{jic} = (U_{jic} - h_{PC})d_{PA} + (U_{jic} - h_{PC})d_{PB} + (U_{jic} - h_{PC} + 1)d_{PC} \end{cases}$$

简化后得到:

$$\begin{cases} U_{jia} = (d_{PA} + d_{PB} + d_{PC}) \cdot (U_{jia} - h_{PA}) + d_{PA} \\ U_{jib} = (d_{PA} + d_{PB} + d_{PC}) \cdot (U_{jib} - h_{PB}) + d_{PB} \\ U_{jic} = (d_{PA} + d_{PB} + d_{PC}) \cdot (U_{jic} - h_{PC}) + d_{PC} \end{cases}$$

得出: $d_{PA} + d_{PB} + d_{PC} = 1$ ,并满足 $d_{PA} = h_{PA}, d_{PB} = h_{PB}, d_{PC} = h_{PC}$ 。倒三角形区域同样满足上述关系。

### 2.3 零序分量控制

零序分量控制通常作为一种多目标控制策略出现在系统控制当中。本文通过系统的零序分量控制策略实现直流侧中点电位及各相悬浮电容电压的稳定控制<sup>[4]</sup>。

### 2.3.1 直流侧中点电位平衡控制

基本电压矢量 $U_s$ 坐标值( $U_{sja}, U_{sjb}, U_{sjc}$ )与逆变器开关状态( $V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}$ )满足:

$$\begin{cases} V_{sa} = V_{sa} \\ V_{sb} = V_{sa} - U_{sjc} \\ V_{sc} = V_{sa} + U_{sjb} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中 $V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}$ 为整数,满足 $0 \leq V_{sa} \leq 4, 0 \leq V_{sb} \leq 4, 0 \leq V_{sc} \leq 4$ ,图5所示为随机选取的参考电压终点所在的小三角区域及逆变器对应开关状态。

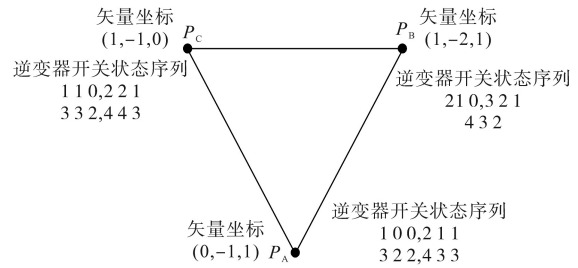


图5 小三角形域及对应开关状态

Fig.5 Small triangle field and corresponding switch states

定义参数 $L$ 为开关序列编号。根据式(5)计算出三个基本矢量分别对应的多个开关状态序列,并将各开关状态序列按照下式进行运算,转换为多个百位数字。

$$num = V_{sa} \times 100 + V_{sb} \times 10 + V_{sc} \quad (6)$$

将数字按照从小到大的顺序进行排列,每种开关序列由相邻的4个开关状态组合而成,最终得到表2。

表2 开关状态列表  
Tab.2 Switch status table

开关序列编号 $L$	开关状态切换
1	100-110-210-211
2	110-210-211-221
3	210-211-221-321
4	211-221-321-322
5	221-321-322-332
6	321-322-332-432
7	322-332-432-433
8	332-432-433-443

对逆变器输出电压进行研究,归纳出不同开关状态对直流侧中点电位的影响,如图6所示。当逆变器开关状态为100时, $a$ 相电流会从支撑电容中点流出,导致中点电位降低;当逆变器开关状态为322时, $b, c$ 相电流会流向支撑电容中点,导致中点电位升高。

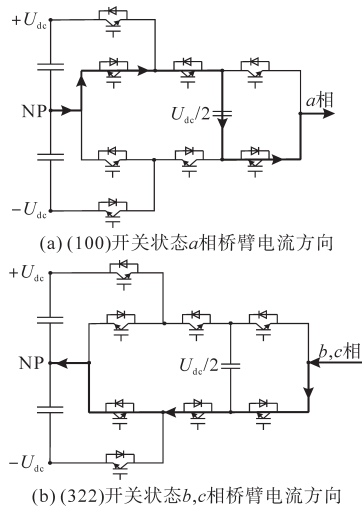


图6 不同开关状态下逆变器中点电位影响  
Fig. 6 Effect of neutral point potential of inverter under different switch states

分析总结得出,当开关序列编码 $L$ 值较小时,普遍具有降低直流侧中点电位作用,随着 $L$ 值的增加,逆变器直流侧中点电流方向会从流出转变为流入,提升直流侧中点电位。因此,根据逆变器状态适当选取 $L$ 的值,能够实现逆变器直流侧中点电位的稳定控制<sup>[5]</sup>。

### 2.3.2 悬浮电容电压控制

定义电流从逆变器流出为正,流入为负。检测逆变器输出三相电流方向,结合悬浮电容电压值选取电压作用矢量。

定义系统状态参数 $x$ ,其表达式为

$$x = (U_{ph} - U_{dc}/2) \times I \quad (7)$$

式中: $U_{ph}$ 为该相悬浮电容电压值; $I$ 为该相电流。

根据输出电压及状态参数 $x$ 确定电压矢量,参见表3。

表3 系统状态与电压矢量表

输出电压	状态参数	选择的电压矢量(表1)
$U_{dc}/2$	$x > 0$	$U_5$
	$x < 0$	$U_6$
$-U_{dc}/2$	$x > 0$	$U_1$
	$x < 0$	$U_2$

### 2.4 矢量作用顺序及作用时间分配

系统采用七段式PWM控制方式,每个周期包含四种开关状态,第一种和最后一种开关状态对应同一电压矢量,称为复用电压<sup>[6-7]</sup>。

根据逆变器当前状态及控制策略选取开关序列编码 $L$ 确定初始开关状态对应 $num$ 值,按照

下式求解出该 $num$ 值对应逆变器开关状态:

$$\begin{cases} V_{sa} = \text{floor}(num/100) \\ V_{sb} = \text{floor}(\text{mod}(num,100)/10) \\ V_{sc} = \text{mod}(num,10) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\text{floor}$ 为向下取整函数; $\text{mod}$ 为取余函数。

逆变器初始开关状态确定后,根据式(5)所示的逆变器开关状态( $V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}$ )与基本电压矢量 $U_s$ 坐标值( $U_{sja}, U_{sjb}, U_{sjc}$ )对应关系即可确定初始基本电压矢量<sup>[8]</sup>。

按照上述方法可以计算单个开关周期内第二、第三基本电压矢量坐标值,进而确定 $U_A, U_B, U_C$ 三个电压矢量作用顺序。

逆变器开关周期时间为 $T_s$ ,则 $U_A, U_B, U_C$ 三个基本电压矢量作用时间分别为

$$\begin{cases} t_{PA} = T_s \times \left( \frac{d_{PA}}{d_{PA} + d_{PB} + d_{PC}} \right) \\ t_{PB} = T_s \times \left( \frac{d_{PB}}{d_{PA} + d_{PB} + d_{PC}} \right) \\ t_{PC} = T_s \times \left( \frac{d_{PC}}{d_{PA} + d_{PB} + d_{PC}} \right) \end{cases} \quad (9)$$

$t_{PA}, t_{PB}, t_{PC}$ 确定后,根据 $U_A, U_B, U_C$ 电压矢量作用顺序与第一、第二、第三基本电压矢量作用时间 $t_{j1}, t_{j2}, t_{j3}$ 进行匹配。

本文基于上述时间分配方案进行研究和改进,通过初始电压矢量及参考电压所在小三角形区域的位置信息(正三角形或倒三角形)即可完成 $t_{PA}, t_{PB}, t_{PC}$ 到 $t_{j1}, t_{j2}, t_{j3}$ 的时间分配。实现了五电平逆变器SVPWM调制算法的简化和优化。

通过逆变器空间电压矢量图可以总结得出:当参考电压 $U_{ref}$ 所在区域为正三角形时,三个基本电压矢量作用顺序为 $U_A-U_B-U_C-U_B-U_A, U_B-U_C-U_A-U_C-U_B$ 或 $U_C-U_A-U_B-U_A-U_C$ ;当参考电压 $U_{ref}$ 所在区域为倒三角形时,三个基本电压矢量作用顺序为 $U_A-U_C-U_B-U_C-U_A, U_B-U_A-U_C-U_A-U_B$ 或 $U_C-U_B-U_A-U_B-U_C$ 。

定义参数 $ini$ 为初始电压作用矢量系数,初始电压是 $U_A$ 时, $ini=1$ ;初始电压是 $U_B$ 时, $ini=2$ ;初始电压是 $U_C$ 时, $ini=3$ 。参数 $tri$ 为参考矢量所在区域系数,当该区域为正三角形时 $tri=1$ ;当该区域为倒三角形时 $tri=2$ 。

根据参数 $ini, tri$ 即可完成 $t_{PA}, t_{PB}, t_{PC}$ 到第一、第二、第三电压矢量作用时间 $t_{j1}, t_{j2}, t_{j3}$ 的对应,具体对应方案如表4所示。

表4 第一、第二、第三电压作用时间分配表

Tab.4 Action time distribution of the first, second and third voltage

初始电压矢量		三角形区域	时间分配方案
系数 $ini$	系数 $tri$		
1	1		$t_{j1}=t_{PA}, t_{j2}=t_{PB}, t_{j3}=t_{PC}$
	2		$t_{j1}=t_{PA}, t_{j2}=t_{PC}, t_{j3}=t_{PB}$
2	1		$t_{j1}=t_{PB}, t_{j2}=t_{PC}, t_{j3}=t_{PA}$
	2		$t_{j1}=t_{PB}, t_{j2}=t_{PA}, t_{j3}=t_{PC}$
3	1		$t_{j1}=t_{PC}, t_{j2}=t_{PA}, t_{j3}=t_{PB}$
	2		$t_{j1}=t_{PC}, t_{j2}=t_{PB}, t_{j3}=t_{PA}$

### 3 ANPC-5L 仿真分析及试验

#### 3.1 系统总体仿真分析

应用 Simulink 软件搭建有源中点钳位五电平逆变器 SVPWM 控制模型。负载采用星形连接方式,  $R=1\ \Omega, L_m=0.01\ H$ 。设置逆变器直流侧电压 600 V, 开关频率为 5 kHz。图 7 所示为五电平逆变器的输出电压波形。

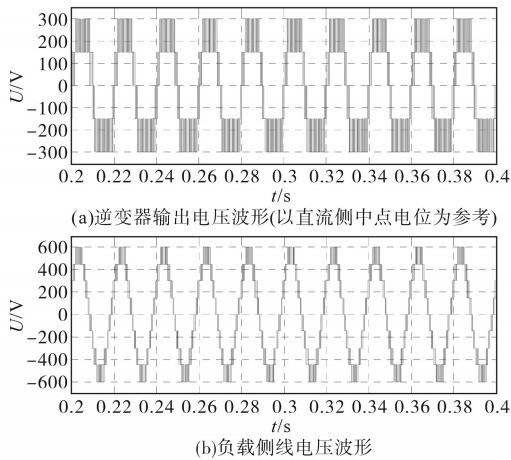


图7 逆变器输出电压波形图

Fig.7 Voltage waveforms of inverter output

图 8、图 9 所示分别为传统两电平逆变器与 ANPC-5L 逆变器输出电压波形谐波分析。

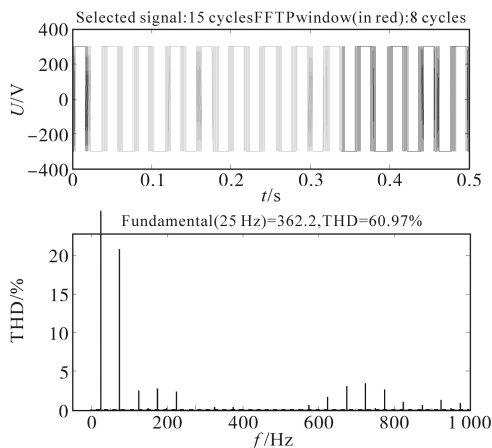


图8 两电平逆变器输出电压谐波分析

Fig.8 Output voltage harmonic analysis of two-level inverter

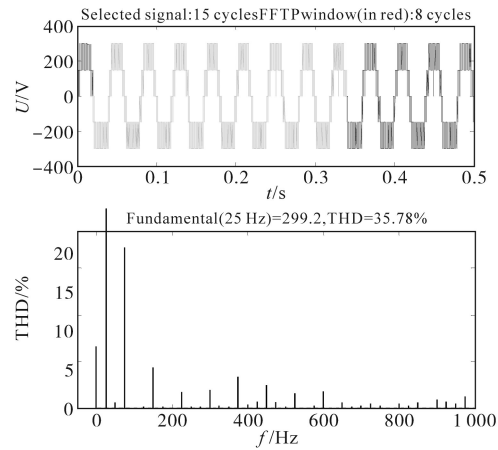


图9 五电平逆变器输出电压谐波分析

Fig.9 Output voltage harmonic analysis of five level inverter

同样设定逆变器开关频率为 5 kHz, 可以看到传统两电平逆变器输出电压谐波畸变率 THD 高达 60.97%, ANPC-5L 五电平逆变器的输出电压谐波畸变率 THD 降低为 35.78%。

另外, 本文在一定范围内随机调节负载参数,  $R=1\sim 5\ \Omega, L_m=0.01\sim 0.05\ H$ , 通过仿真试验验证了系统的负载适应性良好。

#### 3.2 中点电位及悬浮电容电压控制仿真

通过 2.3 节得出: 根据逆变器状态适当选取开关序列编码  $L$  及冗余电压矢量, 能够实现逆变器直流侧中点电位以及各相悬浮电容电压的稳定控制。

如图 10 所示, 系统施加零序分量控制策略后逆变器直流侧中点电位可稳定在 300 V 左右, 误差范围小于 1 V。

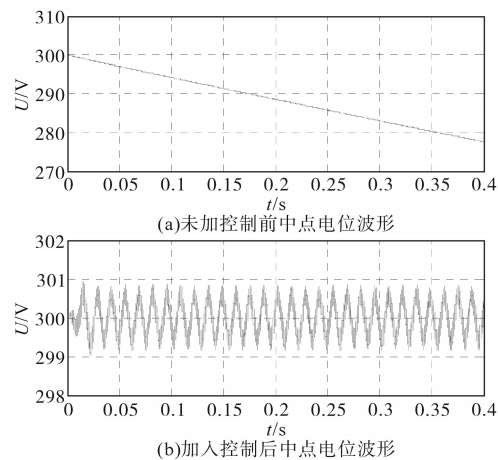


图10 支撑电容中点电位波形图

Fig.10 Waveforms of neutral point potential of DC side capacitor

如图 11 所示, 系统施加零序分量控制策略后逆变器悬浮电容电压波动范围大大降低, 误差范围小于 2 V。

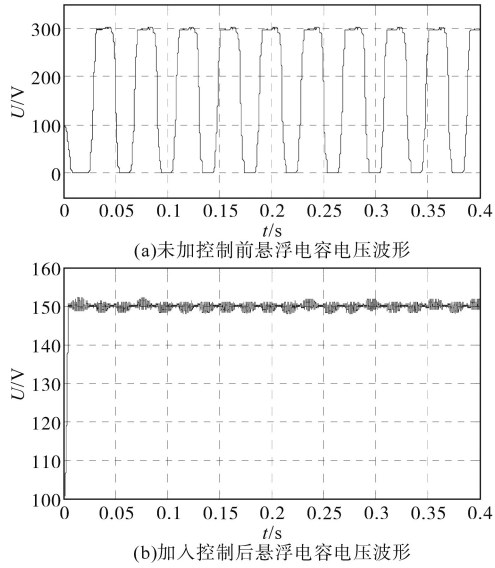


图11 控制前后悬浮电容电压波形图

Fig.11 Voltage waveforms of suspension capacitor before and after control

3.3 试验分析

基于 ARM+DSP+FPGA 硬件架构设计牵引控制器,并开发出 ANPC-5L 牵引逆变器模块。

逆变器直流侧采用 DC 1 500 V 电压供电,负载侧为三相异步电机,电机额定功率 160 kW。

分别应用传统两电平逆变器与 ANPC-5L 逆变器进行负载试验并对试验数据进行谐波对比分析。设置两电平逆变器开关频率为 4.2 kHz,采集逆变器在 20 Hz, 50 Hz, 100 Hz 运行状态下输出电流波形并进行谐波分析;设置 ANPC-5L 逆变器开关频率为 2 kHz,在相同工况下运行并对输出相电流进行谐波分析,试验及分析数据参见表 5。

通过表 5 得出:ANPC-5L 逆变器能够有效改善牵引系统输出电流谐波含量并降低功率器件

开关频率。

表5 逆变器输出电流谐波分析表

Tab.5 Inverter output current harmonic analysis table

输出频率/Hz	谐波含量THD/%	
	传统逆变器(两电平) 开关频率 4.2 kHz	ANPC-5L 开关频率 2 kHz
20	13.35	9.52
50	13.67	10.46
100	14.88	10.97

图 12 所示为 ANPC-5L 逆变器负载试验波形。通道 1 为逆变器输出相电压波形(以直流侧中点电位为参考),可以看到逆变器实现了 ±750 V、±375 V、0 V 五种电平状态电压输出;通道 2 为直流侧中点电压,可以稳定控制在 750 V 左右;通道 3 为逆变器输出相电流波形,波形具有良好的正弦度。

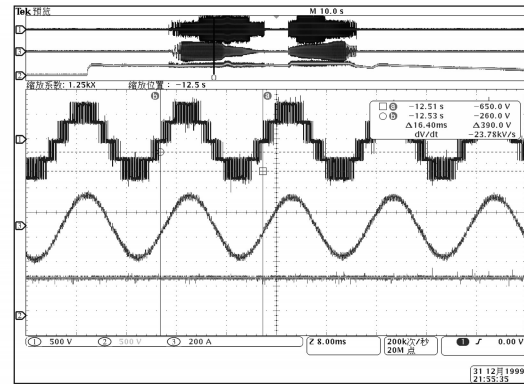


图12 ANPC-5L牵引逆变器运行状态波形

Fig.12 ANPC-5L traction inverter operation state waveforms

分别应用传统两电平逆变器与 ANPC-5L 逆变器进行负载对拖试验,试验电机在额定功率点附近运行。采用 WT1800 功率分析仪测试两种逆变器在额定工况下运行效率,测试结果参见表 6。

表6 两种逆变器工作效率数据表

Tab.6 Working efficiency data of two inverters

电机速度 (r·min <sup>-1</sup> )	逆变器输入功率/kW		逆变器输出功率/kW		逆变器工作效率/%	
	传统逆变器 (两电平)	ANPC-5L	传统逆变器 (两电平)	ANPC-5L	传统逆变器 (4.2 kHz)	ANPC-5L (2 kHz)
1 800	148.34	147.72	143.22	145.40	96.55	98.43
1 900	152.46	152.23	147.00	150.13	96.42	98.62
2 000	155.64	154.92	149.63	152.39	96.14	98.37
2 100	159.76	159.03	153.88	157.07	96.32	98.77
2 200	164.88	164.12	159.34	161.41	96.64	98.35
逆变器额定功率点附近平均工作效率					96.414	98.508

通过表 6 可以得出:牵引系统在额定工况运行条件下,ANPC-5L 逆变器与传统两电平逆变器相比,运行效率从原来的 96.414 % 提升到 98.508 %,充分体现出了 ANPC-5L 逆变系统的高效性。

4 结论

本文采用有源中点钳位拓扑结构设计五电平逆变器,结合虚坐标变换法实现了逆变器的  
(下转第46页)

2010, 34(4):158-162.

[17] 彭春华,孙惠娟.基于非劣排序微分进化的多目标优化发电调度[J].中国电机工程学报,2009,29(34):71-76.  
Peng Chunhua, Sun Huijuan. Multi-objective optimization power dispatch based on non-dominated sorting differential evolution[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(34):71-76.

[18] 赵霞,张荣荣,赵瑞锋,等. CPS标准下 AGC 机组动态优化调度的改进模型[J]. 电工技术学报,2016,31(5):99-106.  
Zhao Xia, Zhang Rongrong, Zhao Ruifeng, et al. An extended dynamic optimization model for AGC generators dispatch under CPS[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(5):99-106.

[19] 路小俊,伊建伟,李炎.基于多目标网格自适应搜索算法的储能系统参与 AGC 优化控制策略[J]. 电网技术,2019,43(6):2116-2124.

Lu Xiaojun, Yin Jianwei, Li Yan. Energy storage system participation AGC optimization control strategy based on multi-objective grid adaptive search algorithm[J]. Power System Technology, 2019, 43(6):2116-2124.

[20] 刘光远,贺一,温万惠.禁忌搜索算法及应用[M].北京:科学出版社,2014.  
Liu Guangyuan, He Yi, Wen Wanhui. Taboo search algorithm and application[M]. Beijing: Science Press, 2014.

[21] 姚静,方彦军,陈广.遗传和禁忌搜索混合算法在机组负荷分配中的应用[J].中国电机工程学报,2010,30(26):95-100.  
Yao Jing, Fang Yanjun, Chen Guang. Genetic-tabu search hybrid algorithm for unit economic load dispatch[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(26):95-100.

收稿日期:2020-05-30

修改稿日期:2020-10-13

(上接第33页)

SVPWM 控制,改进基本电压矢量作用顺序及各矢量作用时间分配方案,根据基本电压矢量坐标与逆变器开关状态的对应关系确定初始电压作用矢量,结合参考电压所在区域信息(正三角形或倒三角形)为三个基本电压矢量分配作用时间,实现了五电平逆变器 SVPWM 调制算法的简化和优化。另外,对 ANPC-5L 逆变器中点电位及三相悬浮电容电压波动问题进行了分析,并提出了相应的解决策略。通过仿真及试验分析验证了算法的可行性以及拓扑结构的优越性,通过效率测试验证了 ANPC-5L 逆变系统的高效性。

参 考 文 献

[1] Zhu Junjie, Sun Xingfa, Nie Ziling, et al. Synchronous control strategy of dual five-level converters based on the improved SVPWM[J]. IET Power Electronics, 2018, 11(14):2311-2318.

[2] 戴鹏,周凯,高爱杰,等. NPC/H 桥五电平逆变器直流侧电容电压平衡控制[J]. 电机与控制学报,2019,23(3):42-50.  
Dai Peng, Zhou Kai, Gao Aijie, et al. DC-link capacitor voltage balance of NPC/H bridge five-level inverter[J]. Electric Machines and Control, 2019, 23(3):42-50.

[3] 高跃,李永东.二极管钳位型五电平逆变器电容电压平衡域研究[J]. 电工技术学报,2008,23(1):77-83.  
Gao Yue, Li Yongdong. Voltage balance boundary of five-level diode clamped inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(1):77-83.

[4] Tan Guojun, Deng Qingwei, Liu Zhan. An optimized SVP-

WM strategy for five-level active NPC (5L-ANPC) converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(1):386-395.

[5] 陈亚爱,石永帅,周京华,等.电力电子牵引变压器拓扑结构综述[J]. 电气传动,2018,48(10):89-96.  
Chen Yaai, Shi Yongshuai, Zhou Jinghua, et al. Overview of topological structure for power electronic traction transformer [J]. Electric Drive, 2018, 48(10):89-96.

[6] 李永东,肖曦,高跃.大容量多电平变换器[M].北京:科学出版社,2005.  
Li Yongdong, Xiao Xi, Gao Yue. Large capacity multilevel converter [M]. Beijing: Science Press, 2005.

[7] 宋亮,熊博.60°坐标系下新型模块化多电平变流器空间矢量脉宽调制的简化通用算法[J]. 武汉大学学报(工学版),2017,50(4):566-570,596.  
Song Liang, Xiong Bo. A simple generalized algorithm of space-vector PWM for a new type of modular multilevel converter based on 60° coordinate system [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2017, 50(4):566-570,596.

[8] Rodriguez J, Bernet S, Steimer P K, et al. A survey on neutral-point-clamped inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 57(7):2219-2230.

[9] 王琛琛,司夏河,杨超.五电平有源中点钳位型变换器电容电压平衡控制策略[J].北京交通大学学报,2016,40(3):25-31.  
Wang Chenchen, Si Xiahe, Yang Chao. Capacitor voltage balancing control strategy of a five-level ANPC converter[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2016, 40(3):25-31.

收稿日期:2020-06-22

修改稿日期:2020-10-13