

# Research on Three-Level Inverter Based on Space Vector Algorithm

Xiangdong Zhu<sup>1</sup>, Yunong Shen<sup>1</sup>, Ning Liu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Nanjing Normal University, Nanjing Jiangsu

<sup>2</sup>Nanjing Xiniao Electric Equipment Co., Ltd., Nanjing Jiangsu

Email: 495405532@qq.com

Received: Mar. 3<sup>rd</sup>, 2019; accepted: Mar. 18<sup>th</sup>, 2019; published: Mar. 26<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

This paper designs a structure of high power magnetron drive power, inverter module using a three-level inverter as a magnetron anode drive circuit. A mathematical model of the magnetron anode drive circuit was established. After mathematical analysis, the output voltage of the magnetron anode drive circuit under different switching states is derived. A simulation model was established in MATLAB, which uses SPWM and SVPWM to drive the three-level inverter. Through the comparison of simulation data, the superiority of space vector algorithm is verified from three aspects. At the same time, the waveform of the output voltage and current is obtained, which provides a theoretical basis for the subsequent application of this structure to the microwave generating device.

## Keywords

Space Vector Algorithm, Three-Level Inverter, Magnetron

---

# 基于空间矢量算法的三电平逆变器的研究

朱向东<sup>1</sup>, 沈聿农<sup>1</sup>, 刘 宁<sup>2</sup>

<sup>1</sup>南京师范大学, 江苏 南京

<sup>2</sup>南京新澳电气设备有限公司, 江苏 南京

Email: 495405532@qq.com

收稿日期: 2019年3月3日; 录用日期: 2019年3月18日; 发布日期: 2019年3月26日

---

## 摘 要

本文设计了一种大功率磁控管驱动电源的结构, 采用了三电平逆变器作为磁控管阳极驱动电路的逆变模

文章引用: 朱向东, 沈聿农, 刘宁. 基于空间矢量算法的三电平逆变器的研究[J]. 电气工程, 2019, 7(1): 76-84.

DOI: 10.12677/jee.2019.71008

块。建立了磁控管阳极驱动电路的数学模型。经过数学分析，推导出不同开关状态下磁控管阳极驱动电路的输出电压。在MATLAB中建立了仿真模型，分别采用正弦脉宽调制和空间矢量调制来驱动三电平逆变器，通过仿真数据的对比，从三个方面验证了空间矢量算法的优越性。同时得出了输出电压电流的波形，为后续将此结构应用于微波发生装置提供了理论的基础。

## 关键词

空间矢量算法，三电平逆变器，磁控管

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

微波加热的原理是利用磁控管将电能转化为微波能，微波能在不同介质材料中被不同程度的吸收，通过被加热体内部偶极分子高频往复运动，产生内摩擦热而使被加热物料温度升高，从而实现了在介质内部把吸收的微波能转化为热能的过程[1]。微波加热其使用方便、加热快、无污染、对加热材料具有选择性等优点逐渐受到重视[2]。目前工业中急需大功率加热装置用于废旧轮胎裂解、生物质分解、快速干燥杀菌等[3]。如果使用传统的化学或者物理加热方法不仅会浪费大量能源，污染环境，而且所达到的效果也不能满足预期要求。利用磁控管可以产生微波能的特性，设计一种可以驱动大功率磁控管的电源设备具有广阔的应用前景和价值。

## 2. 磁控管驱动电源的拓扑结构

工业生产中需要驱动输出功率 75 kW 以上的磁控管，传统的全桥逆变的结构没有对大功率情况下逆变环节产生谐波进行深入的考虑。在实际测试中，因为谐波的影响，出现了开关管烧毁、设备损坏的情况。为了解决谐波对电路的影响，通过增加逆变器输出电平数，减少逆变环节的谐波，故而采用了三电平逆变器。

综合考虑器件数量与器件损耗的方面的影响，选择采用器件数较少的三相 T 型逆变器替代传统的逆变加谐振环节。三相 T 型逆变电路中，每一相有四个开关管，其中一组开关管反向串联组成双向开关，实现了对主开关管的钳位作用。增加了一个中点零电位，一定程度上可以消除谐波引发的波形畸变。作为双向开关的一组 IGBT 的耐压降低，为 0.5 倍的输入电压。桥臂上的一组 IGBT 耐压为输入电压[4] [5]。由此看来，与传统的桥式逆变环节相比，T 型三电平逆变器的器件所需耐压水平较低，这样可以有更多的选择。使用 T 型三电平逆变器作为磁控管阳极驱动电路的主要环节，其设计流程图如图 1 所示。

在变换环节使用三相交流电作为媒介，在最后整流环节才把其变为直流电是因为三相交流电比起单相交流电它的幅值更大[6]，这进一步契合了我们输出高电压的意图。这样可以进一步减轻后级变压器和倍压整流电路的升压任务。同时后级又使用了三相倍压整流电路，比起二极管硅堆形成的三相不控整流电路，此处可以把变压器的升压任务分摊一部分到整流环节，这么做可以使变压器的绕组匝数可以相对减少。变压器上的电压减少，这样绕组之间的绝缘问题就得到改善。阳极主电路如图 2 所示。

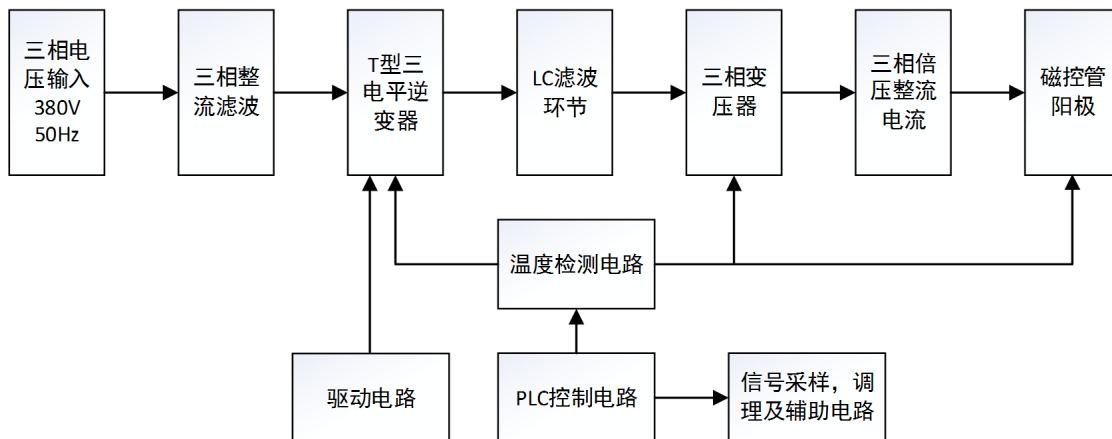


Figure 1. Anode circuit flow chart using a three-level inverter  
图 1. 采用三电平逆变器的阳极电路流程图

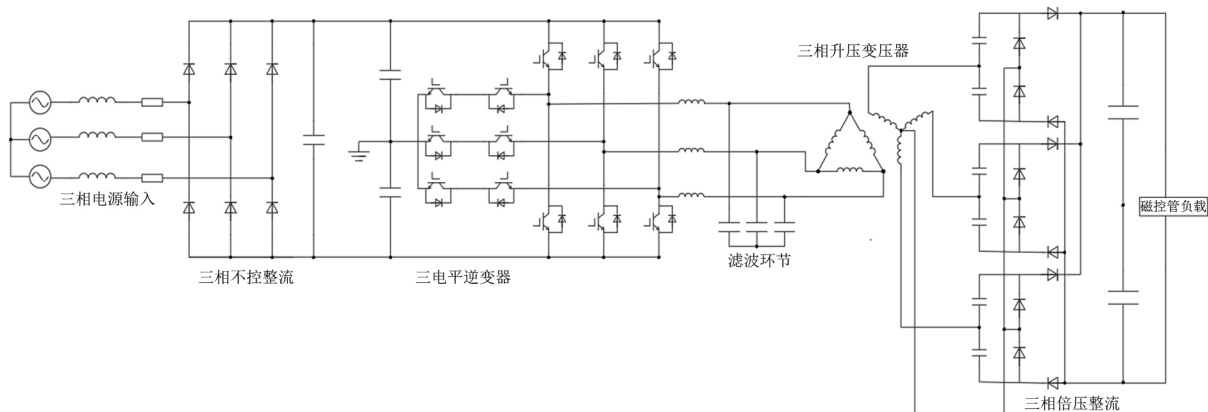


Figure 2. Anode circuit diagram using a three-level inverter  
图 2. 采用三电平逆变器的阳极电路图

### 3. 三电平逆变器的数学模型和矢量控制

#### 3.1. 三电平逆变器的数学模型

为了便于分析,在此定义  $S_a, S_b, S_c$  分别为三电平逆变器 A、B、C 三相的输出状态,  $S_i (i = a, b, c)$  的取值为 -1、0、1, 则三相的输出端相对于中点 O 的电压可用  $U_{dc}$  与  $S_i$  表示:

$$U_{io} = \frac{S_i}{2} U_{dc} \tag{1}$$

理想的三电平逆变器电路开关模型的每相桥臂的电路结构可以看成为一个与直流侧相通的单刀三掷开关[7], 则三电平逆变器主电路可简化成如图 3 所示的结构。

所以逆变器输出线电压可表示为:

$$\begin{bmatrix} U_{AB} \\ U_{BC} \\ U_{CA} \end{bmatrix} = \frac{U_{dc}}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \tag{2}$$

对三相系统有:

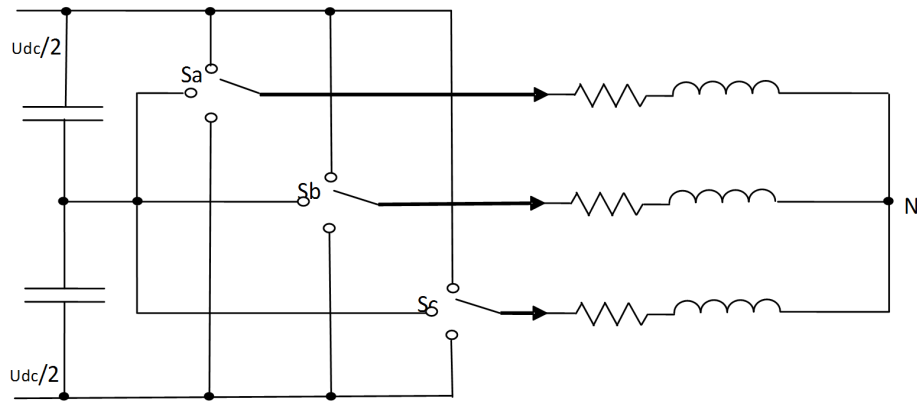


Figure 3. Three-level inverter simplified model  
图 3. 三电平逆变器简化模型

$$U_{AN} + U_{BN} + U_{CN} = 0 \quad (3)$$

所以，负载相电压与逆变器输出线电压关系可整理成为：

$$\begin{bmatrix} U_{AN} \\ U_{BN} \\ U_{CN} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{AB} \\ U_{BC} \\ U_{CA} \end{bmatrix} \quad (4)$$

用  $S_a, S_b, S_c$  表示输出线电压，则(5)式可以表示为：

$$\begin{bmatrix} U_{AN} \\ U_{BN} \\ U_{CN} \end{bmatrix} = \frac{U_{dc}}{6} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (5)$$

因为  $S_a, S_b, S_c$  都各有 3 种开关状态，所以 T 型三电平逆变器共有 27 种输出状态[8]。根据(4)式和(5)式可以求得所有开关组合状态下逆变器输出端线电压和负载侧电压的对应情况。

采用坐标变换的方式可以将数学模型中的三个参数转换为两个参数，这样可以简化计算量，则三相静止坐标系下的变量就可以用矢量的形式表示，如下：

$$\begin{aligned} \vec{U} &= U_\alpha + jU_\beta \\ &= U_A + j \left( \frac{1}{\sqrt{3}}U_B - \frac{1}{\sqrt{3}}U_C \right) \\ &= \left( \frac{2}{3}U_A - \frac{1}{3}U_B - \frac{1}{3}U_C \right) + j \left( \frac{1}{\sqrt{3}}U_B - \frac{1}{\sqrt{3}}U_C \right) \\ &= \frac{2}{3} \left[ U_A + \left( -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) U_B + \left( -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) U_C \right] \\ &= \frac{2}{3} \left( U_A + e^{j\frac{2\pi}{3}} U_B + e^{-j\frac{2\pi}{3}} U_C \right) \end{aligned} \quad (6)$$

将(1)式带入(6)式中，电压空间矢量为：

$$\vec{U} = \frac{U_{dc}}{6} \left[ (2S_a - S_b - S_c) + j\sqrt{3}(S_b - S_c) \right] \quad (7)$$

将  $S_a, S_b, S_c$  的 27 种开关状态带入(7)式中, 在  $\alpha\beta$  坐标系下画出矢量分布, 如图 4 所示。

六个大矢量将图等分为 6 个大扇区, 每个大扇区又被中矢量和小矢量分为 6 个小区域, 图中以大扇区 1 为例, 对大扇区 1 的六个小区域进行了编号。

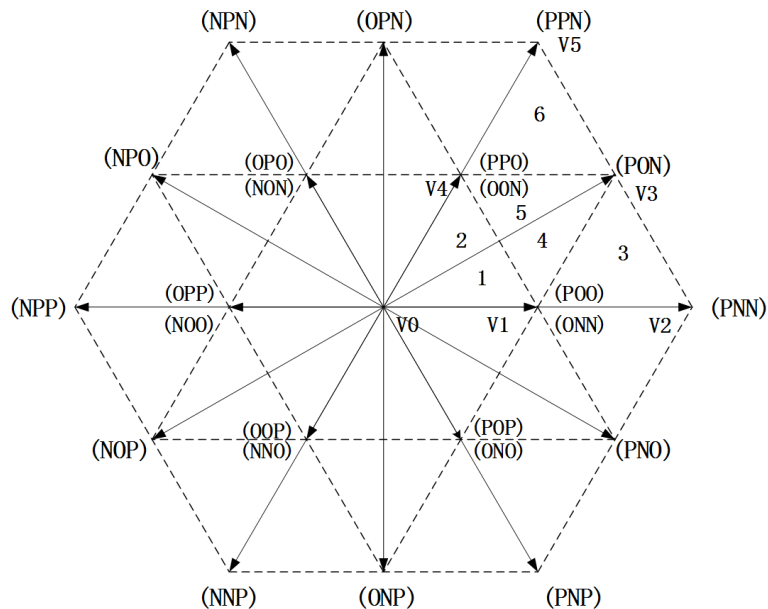


Figure 4. Space vector distribution  
图 4. 空间矢量分布

### 3.2. 空间矢量调制的优势

尽可相较于正弦脉宽调制, 空间矢量调制原理复杂, 不易于硬件电路实现[9] [10]。但是仍然坚持选用空间矢量调制的原因有以下三点:

1) 直流电压利用率高

直流母线电压利用率是指逆变器输出的交流电压基波的幅值与直流侧电源电压之比。在 MATLAB 中搭建了 T 型三电平逆变器的模型, 分别采用空间矢量调制和正弦脉宽调制驱动逆变器的开关器件, 得到滤波后输出线电压  $U_{AB}$  的波形图, 如图 5 所示。

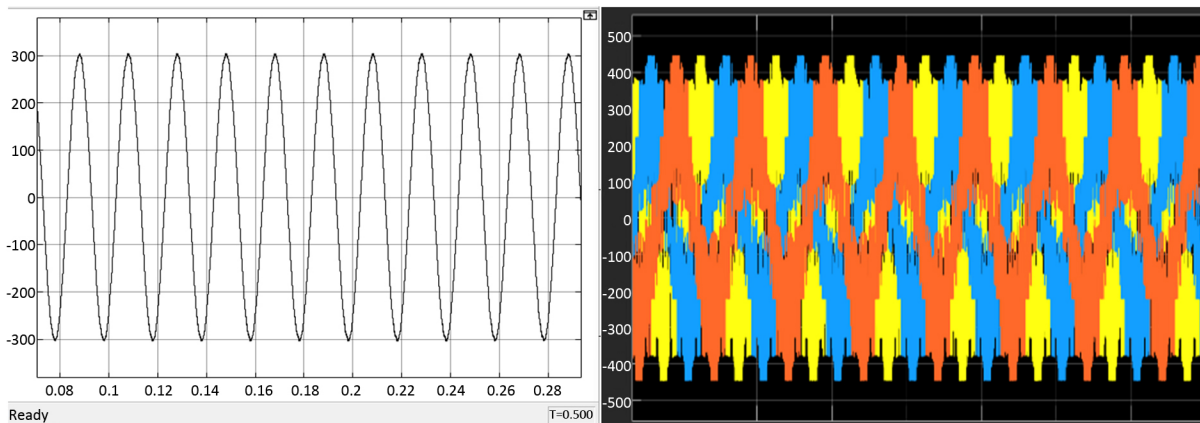


Figure 5. Output line voltage waveform  
图 5. 输出线电压波形图

设定的直流侧母线电压为三相工频交流电经过三相不控整流电路后的值, 约为 540 V。可见采用正弦脉宽调制的逆变器输出线电压幅值为 300 V。而采用空间矢量调制的逆变器输出线电压幅值为 450 V。极大地提高了直流母线电压利用率, 同时逆变环节输出电压幅值越大, 后续升压电路的输入值相应增大。

### 2) 总谐波畸变率小

总谐波畸变率是表征波形相对于正弦波畸变程度的一个性能参数, 其值为全部谐波含量均方根值与基波均方根值之比。对两种调制法做快速傅立叶变换分析, 得到其总谐波畸变率, 如图 6 所示。

采用正弦脉宽调制的总谐波畸变率(THD)为 4.63%, 而采用空间矢量调制的总谐波畸变率(THD)仅为 0.99%。可见空间矢量调制在抑制谐波方面的性能明显优于正弦脉宽调制。

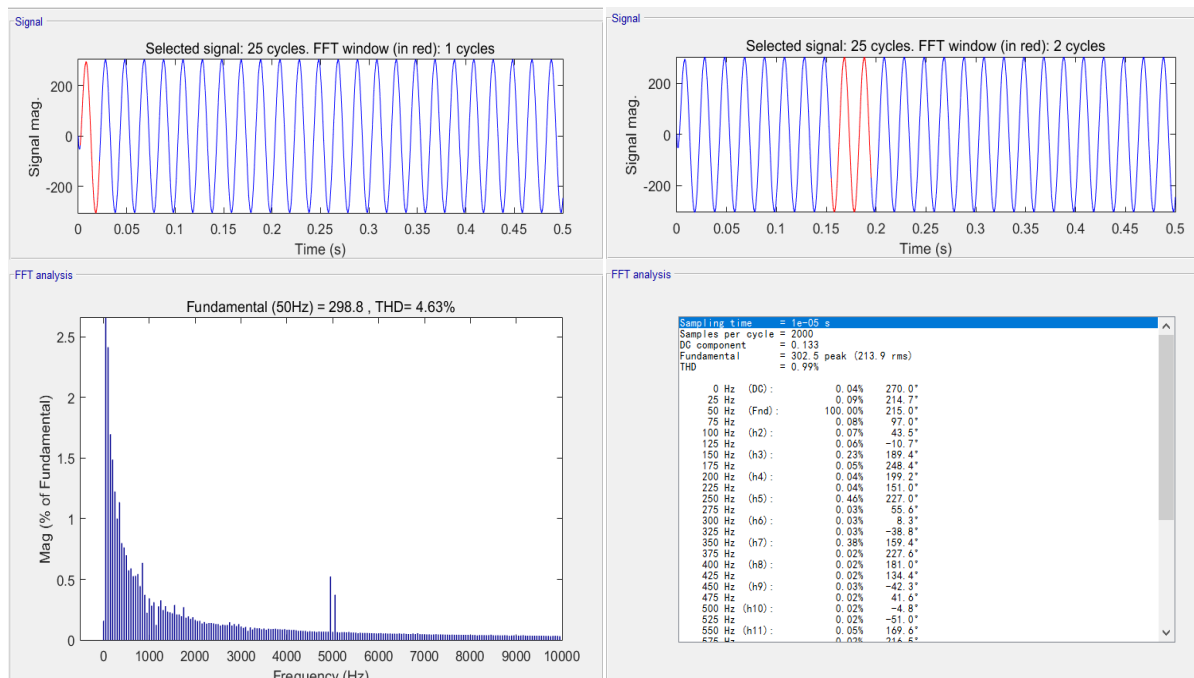


Figure 6. Total Harmonics Distortion  
图 6. 总谐波畸变率

### 3) 可以平衡中点电压

三电平逆变器其结构上存在着分压电容, 会出现中点电位不平衡的问题。采用空间矢量调制可以在矢量作用时间上进行合理分配来平衡中点电压, 而正弦脉宽调制则无法实现这个功能。

小矢量和中矢量对中点电压有影响, 且正小矢量和负小矢量对中点电压的影响相反。因此可以考虑调整正负小矢量的作用时间, 使其对中点电压抬升时间等于降低时间, 达到中点平衡的效果。以图 4 中大区 1, 小区 1 为例。由于矢量作用顺序是对称的, 因此只分析半个周期。其合成矢量中包括负小矢量 ONN, OON 和正小矢量 POO, 作用时间分别为  $T_x/4, T_y/2, T_x/4$ 。负小矢量使中点电压降低, 作用时间是  $T_x/4 + T_y/2$ , 正小矢量使中点电压抬升, 作用时间是  $T_x/4$ 。两者时间不等, 因此会造成中点电压偏移。如果将三个矢量作用时间分别调整为  $(T_x - T_y)/4, T_y/2, (T_x + T_y)/4$ , 这样正负小矢量作用时间均为  $(T_x + T_y)/4$ , 抑制了中点电压不平衡。

### 3.3. 空间矢量算法在三电平逆变器中的实现

根据上文中对空间矢量算法进行数学分析, 在 MATLAB 中编写相应的程序, 用以驱动 T 型三电平

逆变器，观察其输出电压电流的波形，模型如图 7 所示。

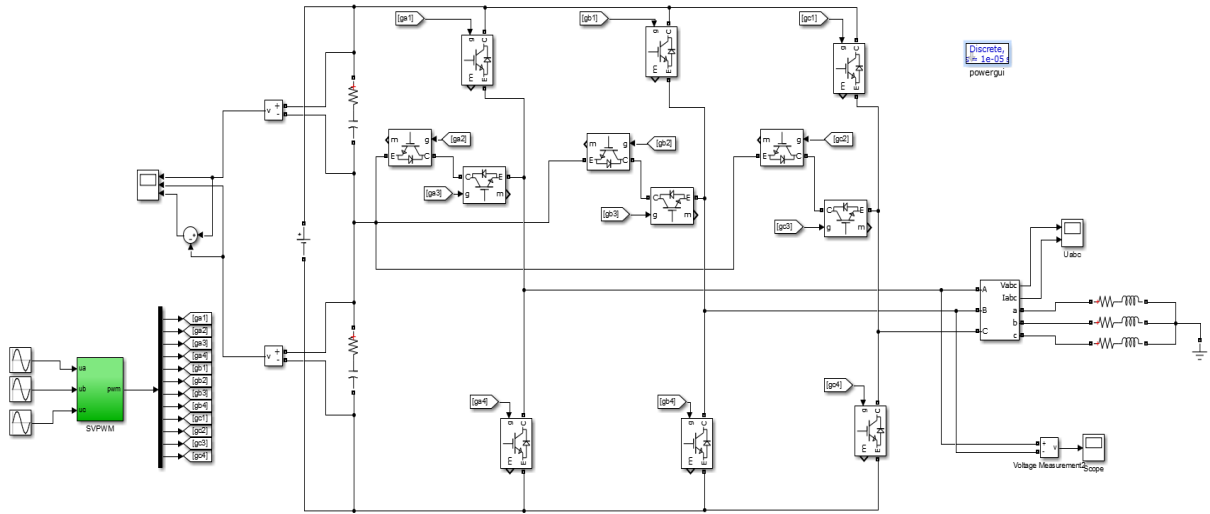


Figure 7. Three-level inverter simulation model  
图 7. 三电平逆变器仿真模型

其中 SVPWM 模块内部划分为坐标变换，大小区选择，矢量作用时间，中点电位平衡等模块，对应的是上节矢量控制的实现中各个部分的数学推导。如图 8 所示。

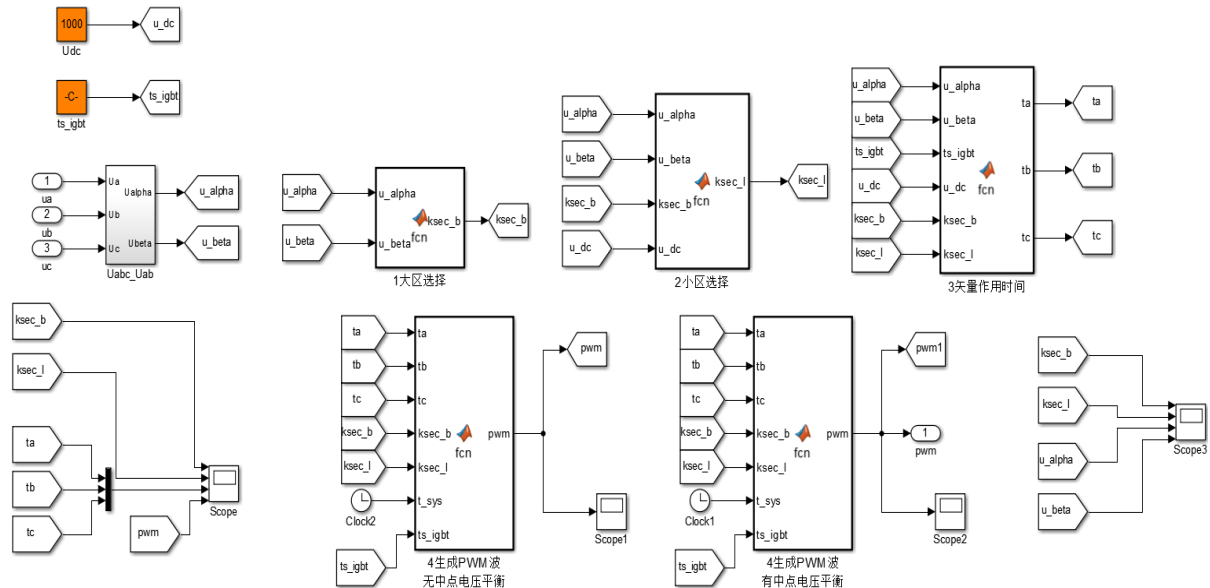


Figure 8. Vector control module  
图 8. 矢量控制模块

模型仿真算法选择固定补偿的离散算法，并在命令行窗口设置两个全局变量  $fs\_igbt$  和  $Ts$  的值为 5000 和  $10^{-5}$ 。空载时三相不可控整流电路输出的电压平均值最大，其最大值为  $\sqrt{6}U_i$ ，随着负载的增加，输出电压的平均值变小，最小值为  $2.34 U_i$ 。因为  $U_i = 220 V$ ，所以输出电压为 515~539 V 之间，因此设置直流母线为 540 V。设置仿真时间为 0.5 秒。运行仿真模型，得到输出三相线电压和线电流的波形，如图 9 所示。

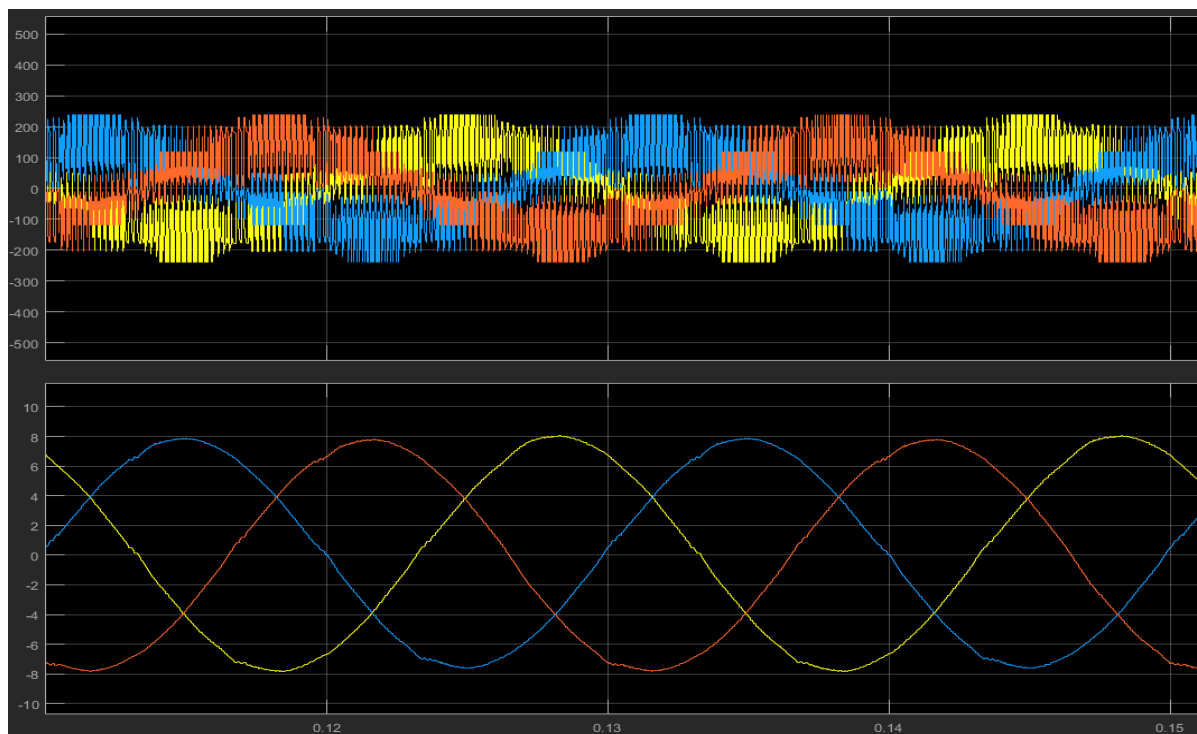


Figure 9. Output voltage and current waveform

图 9. 输出电压电流波形

可以明显的看出输出的线电压波形趋近于正弦波, 说明输出波形中的谐波含量很低, 可以有效地解决目前采用全桥逆变结构时逆变环节谐波含量大的问题。同时采用三相三电平逆变器可以输出三相交流电, 其输出电压幅值更大, 为之后的高频变压器升压环节减轻任务。

#### 4. 结语

针对工业中大功率微波电源存在着输出谐波含量大, 易损坏开关器件的问题, 本文提出了一种新型的微波电源电路拓扑结构, 采用了抑制谐波性能更加优秀的 T 型三电平逆变器。文章不但推导了其数学模型, 而且还建立了仿真模型进行验证。使用了空间矢量算法来调制开关管的导通时序, 其相较于脉宽调制具有无法比拟的优点。同时实验结果也验证了结构的合理性, 为今后制作 75 kW 的磁控管驱动电源打下了理论的基础。

#### 参考文献

- [1] 邓永峰, 印长豹, 刘凯. 微波源用大功率高压直流电源[J]. 真空电子技术, 2016(2): 58-61.
- [2] Schweizer, M. and Kolar, J.W. (2013) Design and Implementation of a Highly Efficient Three-Level T-Type Converter for Low-Voltage Applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **28**, 899-907.  
<https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2203151>
- [3] 才琳, 孙耀杰, 高骞, 等. 磁控管电源系统研究与设计[J]. 电子设计工程, 2011, 19(23): 154-155.
- [4] Pietta, L.P., Treter, M.E., Barin, J.S. and Michels, L. (2015) Modelling and Control of a High-Frequency Magnetron Power Supply for Microwave Heating Applications. 2015 *IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*, Fortaleza, 29 November-2 December 2015, 1-6.  
<https://doi.org/10.1109/COBEP.2015.7420098>
- [5] 陈家新, 汤勇, 沈勇, 等. 微波加热用磁控管电源的设计[J]. 电子设计工程, 2015(24): 80-83.



- 
- [6] 张兆镗. 磁控管与微波加热技术[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2017.
- [7] Heggannavar, M. and Kulkarni, H. (2015) Design of Magnetron Power Source from Three Phase Supply. 2015 *International Conference on Energy Systems and Applications*, Pune, 30 October-1 November 2015, 552-556.  
<https://doi.org/10.1109/ICESA.2015.7503410>
- [8] 袁庆庆, 伍小杰, 吴强. 低开关频率下的不对称空间矢量脉宽调制[J]. 电力电子技术, 2013, 47(5): 4-6.
- [9] 李亚维, 邓建军, 谢敏, 等. 800 kV/100 Hz 高功率微波驱动电源控制系统[J]. 高电压技术, 2009(6): 1426-1429.
- [10] 王强, 刘岩松, 陈祥雪, 等. 具有对称辅助电路的谐振直流环节三电平软开关逆变器[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(27): 4584-4593.

**知网检索的两种方式:**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2333-5394, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [jee@hanspub.org](mailto:jee@hanspub.org)