

DOI:10.15923/j.cnki.cn22-1382/t.2019.1.14

# T型三电平拓扑结构的控制

陈玲, 纪萍\*

(渤海大学文天学院, 安徽 马鞍山 243031)

**摘要:** 基于T型三电平拓扑结构, 分析了系统工作原理, 给出了控制策略, 基于此进行软硬件设计, 完成了实验。

**关键词:** T型拓扑; 三电平; 空间矢量调制

**中图分类号:** TM 46    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1674-1374(2019)01-0077-06

## T-type three-level topology structure control

CHEN Ling, JI Ping\*

(Hehai University Wentian College, Ma'anshan 243031, China)

**Abstract:** For the topology of the T-type three level inverter, we analyze the system principle and give the control strategy. The related hardware and software are designed with experiments.

**Key words:** T-type topology; three-level; space vector modulation.

## 0 引言

随着现代电力电子技术的发展, 双极型复合自关断器件取得迅猛的发展, 促进高压大容量变流器技术的进步, 尤其是多电平拓扑结构的逆变器技术逐渐成为大功率变流器的研究热点<sup>[1-4]</sup>。多电平逆变器优点显著, 如输出电压谐波小、所需器件耐压低和开关损耗低等, 使其在众多中高压大功率场合得到了广泛应用<sup>[5]</sup>。其中, 三电平拓扑结构以结构简单、控制方便等更是得到迅猛发展<sup>[6]</sup>。文中在T型三电平拓扑结构的基础上对T型三电平逆变系统的原理及控制策略进行了分析, 建立了一定的理论依据, 在此基础上设计了硬

件电路, 并对系统进行了软件设计, 完成了实验。通过实验验证了控制方法的有效性。

## 1 T型三电平逆变系统控制原理

T型三电平逆变系统主电路拓扑结构如图1所示。

每相桥臂有4个功率开关器件, 上下桥臂各包含一个功率开关管, 而另两个功率开关管反向串联后与直流侧电容在中点处相连, 其结构形状像字符“T”, 因此, 称这种结构为T型拓扑。当系统输出低电平或者高电平时, 由于电流流经器件个数较少, 导致对应的导通损耗也会下降<sup>[7]</sup>。

收稿日期: 2018-09-22

基金项目: 安徽省高校省级质量工程项目(2016jxtd104); 渤海大学文天学院校级科研项目(WT16011)

作者简介: 陈玲(1982-), 女, 汉族, 安徽安庆人, 渤海大学文天学院讲师, 硕士, 主要从事电力电子功率变换方向研究, E-mail: chenling09044248@163.com. \* 通讯作者: 纪萍(1981-), 女, 汉族, 山东青岛人, 渤海大学文天学院副教授, 硕士, 主要从事数字信号处理方向研究, E-mail: 471374754@qq.com.

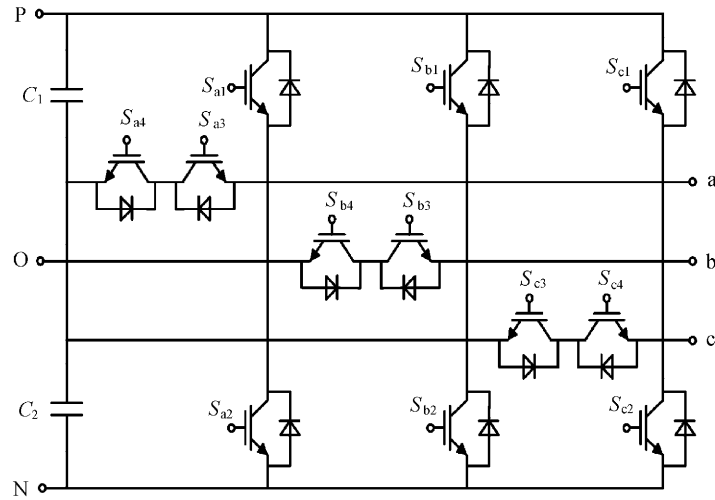


图 1 T型三电平主电路拓扑

图 1 中, 设直流电压为  $U_d$ , 由于直流侧电容  $C_1=C_2$ , 则  $U_{dc1}=U_{dc2}=U_d/2$ 。若以直流侧电容中点  $O$  为参考, 则每相桥臂可输出电平:  $U_d/2$ 、 $0$ 、 $-U_d/2$ 。若这三种电平对应状态 P、O 和 N 三种电平状态。则单相桥臂输出不同电平时对应的开关状态见表 1。

表 1 不同电平对应的单相开关状态

| 电平 | $U_{ao}$ | $S_{a1}$ | $S_{a2}$ | $S_{a3}$ | $S_{a4}$ |
|----|----------|----------|----------|----------|----------|
| P  | $+U_d/2$ | 通        | 断        | 断        | 断        |
| O  | 0        | 断        | 断        | 通        | 通        |
| N  | $-U_d/2$ | 断        | 通        | 断        | 断        |

由此, 三相 T 型三电平逆变器共有 27 个开关状态, 可组成 19 个有效的空间矢量。其中, 零矢量 1 个, 对应了 3 个开关状态; 小矢量 6 个, 对应了 2 个开关状态; 中矢量和 大矢量各 6 个, 分别对应 1 个开关状态。三电平空间矢量图<sup>[8]</sup>如图 2 所示。

将这 27 个开关状态利用三电平空间矢量调制算法 SVPWM 是在逆变系统的一个工作周期中用 6 个大基本矢量将矢量空间分成 6 个区域, 再将期望的旋转参考矢量在  $\alpha-\beta$  坐标系上进行分解, 同时, 利用正六边形空间矢量图来判断参考矢量所在的扇区来完成合成矢量作用时间的计算。根据基本电压矢量的调制方式和作用时间, 可以获得三相桥臂各开关的驱动信号, 从而实现三电平逆变系统的 SVPWM 控制。即各输出电平对应的开关状态, 给予对应的开关管触发脉冲

即可实现逆变系统的 PWM 控制<sup>[9]</sup>。三电平逆变器 PWM 波形示意图如图 3 所示。

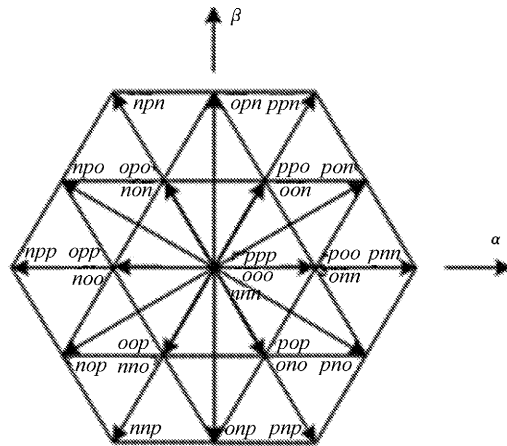


图 2 三电平逆变器基本电压空间矢量图

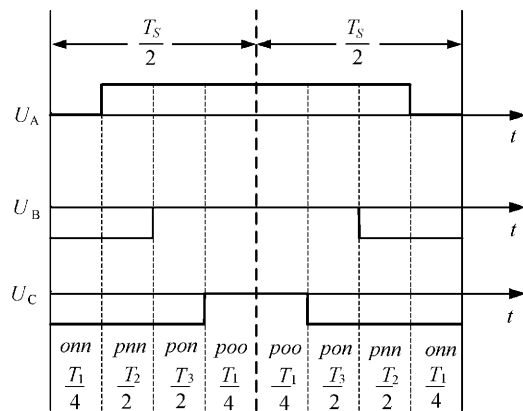


图 3 三电平逆变器 PWM 波形示意图

## 2 系统硬件结构

### 2.1 系统硬件组成

T 型三电平逆变系统的控制主要由 dsPIC 与 FPGA 结合实现, T 型三电平逆变系统结构如图 4 所示。

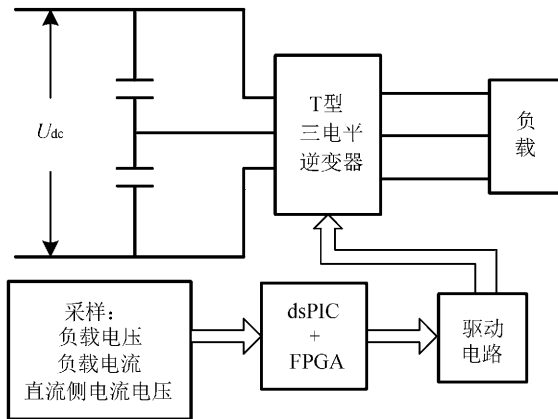


图 4 T 型三电平逆变系统结构

首先采集电路中所需的电压及电流信号, 然

后通过控制算法进行计算, 得到开关管的控制脉冲信号。再将脉冲信号送入驱动电路, 最终利用其实现开关管的通断控制。由此, 系统实现电能直流交流变换。

### 2.2 系统主电路设计

三电平逆变系统主电路采用共集电极式 T 型三电平拓扑结构(见图 1), 左侧接直流电源, 右侧接星型阻感负载。由于文中只是研究了 T 型三电平拓扑的控制策略, 因此实验中的功率较小, 直流侧电压为 30 V。

系统直流侧存在中点电位平衡问题, 故用容值较大的电容来适当抑制中点电位波动, 因此选用 3 300  $\mu$ F/100 V 的电解电容作为直流侧分压电容。逆变桥功率开关管选用 MOSFET。

### 2.3 系统控制电路设计

电压驱动型功率器件选为电力 MOSFET, 其开通电压为 10~15 V, 考虑关断速度, 选择关断电压为 -5~-15 V 的负电压, 因此, 实验选择 TOSHIBA 公司的光耦隔离型驱动芯片 TLP250, 对应驱动电路如图 5 所示<sup>[10]</sup>。

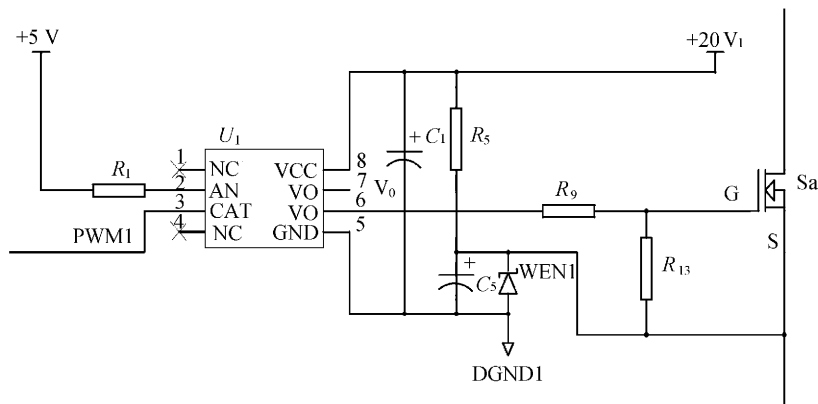


图 5 TLP250 驱动原理图

考虑系统各开关管驱动电路之间易形成干扰, 需对芯片的电源部分进行相应隔离。由于本系统 T 型三电平逆变器采用共集电极接法, 至少需要 5 路独立的驱动电源。因此, 实验中采用 SAPS 公司的 AC/DC 电源模块制作了一个电源板, 实现了由交流 220 V 转换得到的 24 V 直流电源, 然后通过 5 个 MORNSUN 公司的 DC/DC 隔离电源模块获得 5 路相互隔离的直流电源为 TLP250 芯片供电, 在方便供电的同时确保了驱动电路的稳定性。

系统实验中, 还需进行采样电路设计和保护

电路设计。采样信号主要有直流侧电压、电流过零点检测及三相输出电压电流等。

## 3 系统软件部分设计

考虑 T 型三电平逆变系统主电路中含 12 个功率开关, 因此, 正常工作时共需要 12 路 PWM 控制信号。T 型三电平逆变系统采用 FPGA 和 dsPIC 芯片相结合来实现控制。6 路 PWM 逻辑控制信号由 dsPIC 通过控制程序生成, 经 FPGA 译码并进行死区处理, 最终产生 12 路控制信号, 实现逆变桥的控制。

### 3.1 系统控制模块设计

系统控制模块中的 T 型三电平 SVPWM 算法的实现主要由 dsPIC 芯片承担。通过软件设计使 PWM 引脚输出相应的电平状态,以控制 T 型三电平逆变系统每个桥臂。系统控制模块的硬件结构如图 6 所示。

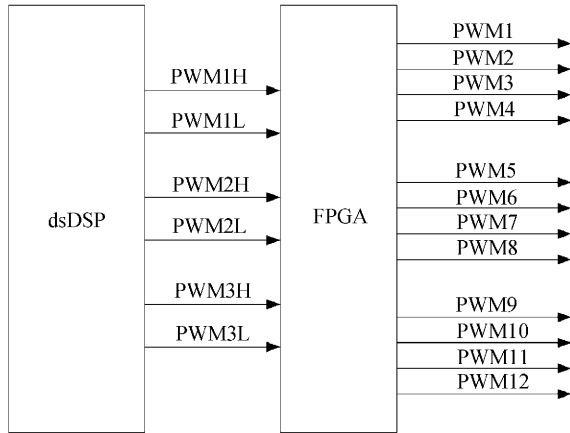


图 6 系统控制模块结构

图中 dsPIC 的 PWM 模块每组两个输出引脚 PWM<sub>x</sub>H 和 PWM<sub>x</sub>L 输出的电平有“00”“01”“10”,分别表示 T 型三电平逆变系统的零电平、低电平和高电平状态,而“11”则不应该出现,以下在软件设计中将加以界定。dsPIC 的 6 组 PWM 模块产生的逻辑信号,经 FPGA 进行译码,得到相应的电平对逆变系统的 6 个开关器件进行控制,在此基础上加上死去时间,最后实现 12 路开关器件的有效控制。

### 3.2 系统 dsPIC 程序设计

系统软件设计包含 dsPIC 和 FPGA 程序设计,其中 dsPIC 程序采用 C 语言进行编程<sup>[11]</sup>,而 FPGA 则采用 VHDL 语言进行编写<sup>[12]</sup>。dsPIC 程序软件主要包括算法主程序及中断服务子程序。

在系统进行时钟源配置、特殊功能配置、所需系统外设、I/O 端口等初始化后,再对系统变量进行定义和赋值,最后执行系统的主程序。具体程序流程图如图 7 所示。

系统根据三电平控制规律判断各自对应扇区信息,从而确定具体作用矢量,在此基础上,计算各矢量对应的开关状态以及时间,这也是主程序的核心,即三电平的算法模块。

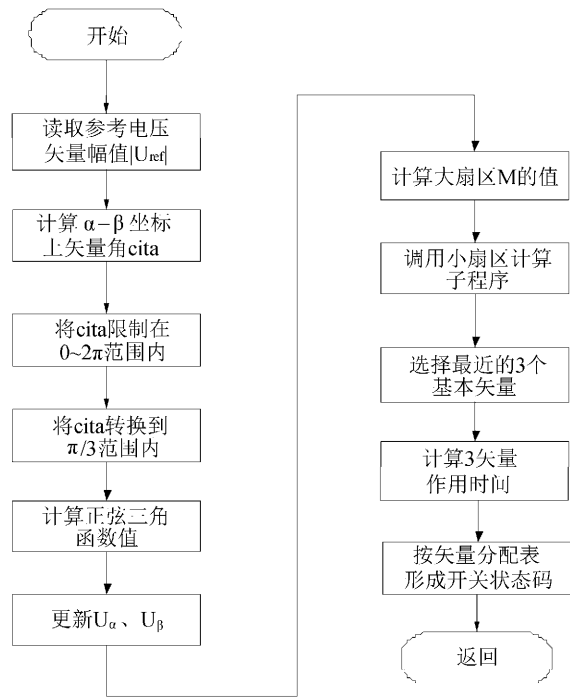


图 7 dsPIC 算法程序流程

### 3.3 系统 FPGA 程序设计

系统 FPGA 程序设计如图 8 所示。

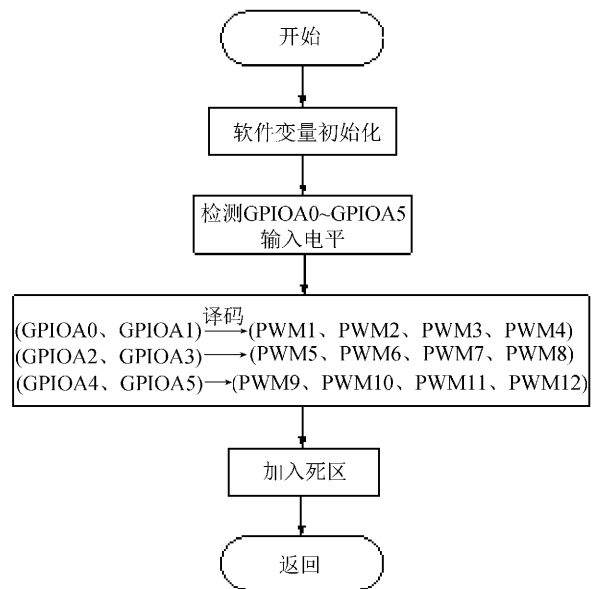


图 8 FPGA 程序流程

系统首先接收 dsPIC 发送相应时间的开关状态信号,通过 FPGA 进行译码,加上死区时间,由 6 路的逻辑信号变成 12 路的开关器件控制信号。

#### 4 实验结果分析

通过 T 型三电平逆变系统原理的分析, 并进行了一定的仿真, 建立了理论依据。在此基础上搭建了 T 型三电平逆变系统的实验装置, 进行了相应的小功率实验。实验中的直流电源采用了直流稳压电源, 以保证系统的稳定与安全。

逆变系统 A 相输出相电压波形如图 9 所示(此时系统为空载)。

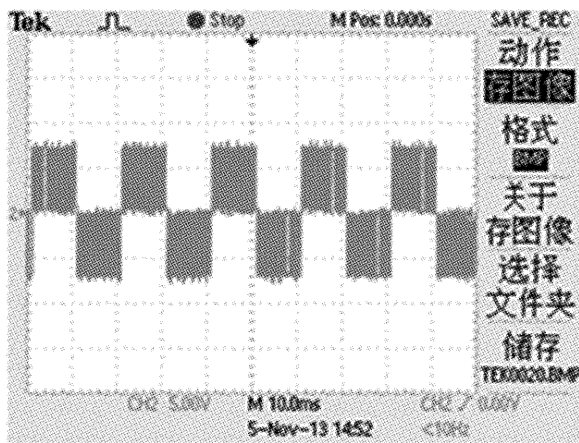
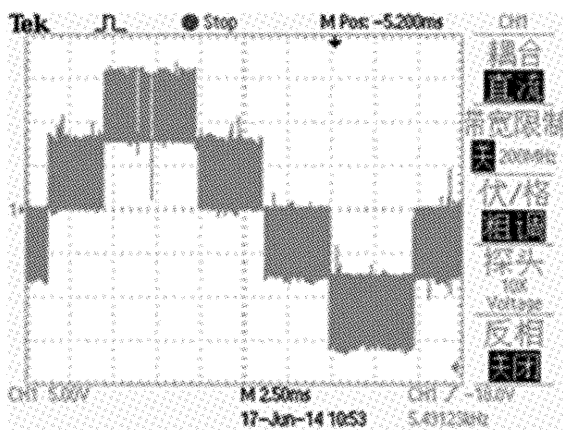


图 9 空载时 A 相相电压输出波形

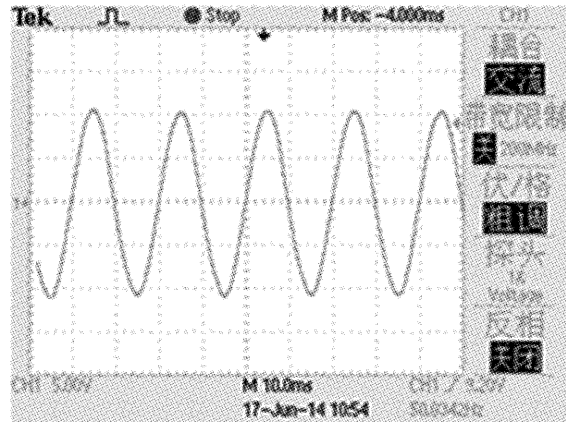
可见, 相电压输出波形有  $+U_{dc}/2$ 、0 和  $-U_{dc}/2$  三个电平值, 呈现了逆变系统的三电平特性。

T 型三电平逆变系统输出的线电压波形如图 10 所示(此时系统仍为空载)。

可见, 系统线电压输出有 5 个电平, 并且将其滤波后, 得到波形为 50 Hz 的正弦波。



(a) 滤波前输出波形



(b) 滤波后输出波形

图 10 空载时线电压波形

#### 5 结 语

在 T 型三电平拓扑结构的基础上对 T 型三电平逆变系统的原理及控制策略进行了分析, 采用空间矢量调制算法, 对开关管的开关状态进行控制, 合理分配 PWM 时序, 有效降低了功率器件开关损耗。在此基础上搭建了 T 型三电平逆变系统实验平台, 对系统进行了软硬件设计, 并对控制方法进行了实验验证。实验结果验证了系统及控制方法的可行性和有效性。

#### 参考文献:

- [1] 林磊, 邹云屏, 钟和清, 等. 二极管箝位型三电平逆变器控制系统研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(15): 33-39.
- [2] 常非, 赵丽平, 冯金博. 五电平交直交变换器在贯通同相供电中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(1): 26-31.
- [3] Schweizer M, Friedli T, Kolar J W. Comparison and implementation of a 3-level NPC voltage link back-to-back converter with SiC and Si diodes[C]// Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. Palm Springs, USA, 2010: 1527-1533.
- [4] 毛承雄, 李时华, 陆继明, 等. 中性点箝位型三电平高压变频器实验分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(2): 78-82.
- [5] Schweizer Mario, Kolar Johann W. Design and implementation of a highly efficient three-level T-type converter for low-voltage applications [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2013, 28(2): 899-907.

- [6] 田凯.一种新型三电平变频器拓扑及其控制策略研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.
- [7] 郑诗程,彭勃,徐礼萍.T型三电平拓扑的 PWM 控制策略[J].电力系统及其自动化学报,2016,28(2):93-97.
- [8] 刘朋朋,王玉华,马辉.基于三电平逆变器的改进的空间矢量 PWM 控制算法[J].长春工业大学学报:自然科学版,2013,34(4):427-431.
- [9] 孙超.三电平 T 型并网逆变器设计[D].杭州:浙江大学电气工程学院,2013.
- [10] Mario Schweizer, Johann W Kolar. Design and implementation of a highly efficient three-level T-type converter for low-voltage applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(2):899-907.
- [11] 谭浩强.C 程序设计[M].2 版.北京:清华大学出版社,1999.
- [12] 周京华.CPLD/FPGA 控制系统设计[M].北京:机械工业出版社,2011.