

三相T型三电平逆变器的设计与实现

江军楼

华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2024年10月18日; 录用日期: 2024年12月23日; 发布日期: 2024年12月31日

摘要

本文设计的是一个三相T型三电平逆变器, 该三相逆变器采用载波层叠式SPWM调制设计。系统硬件部分包括辅助电源模块, IGBT三相逆变桥模块, 三相逆变驱动模块, 电压检测模块, 过流检测模块, 后级滤波模块。本文采用MATLAB/Simulink对T型三电平逆变电路建立模型, 并进行仿真。仿真结果证实了本文设计的三相T型三电平逆变器及其辅助电路能够稳定输出高质量的三相交流电, 证实了该设计方案的可行性与可靠性。

关键词

三相三电平逆变器, SPWM调制, MATLAB/Simulink仿真

Design and Implementation of a Three-Phase T-Type Three-Level Inverter

Junlou Jiang

School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan Hubei

Received: Oct. 18th, 2024; accepted: Dec. 23rd, 2024; published: Dec. 31st, 2024

Abstract

This paper presents the design of a three-phase T-type three-level inverter, which employs carrier-stacked SPWM (Sine Pulse Width Modulation) modulation. The system hardware comprises an auxiliary power supply module, an IGBT three-phase inverter bridge module, a three-phase inverter drive module, a voltage detection module, an overcurrent detection module, and a post-stage filtering module. In this paper, MATLAB/Simulink is used to model and simulate the T-type three-level inverter circuit. The simulation results confirm that the designed three-phase T-type three-level inverter and its auxiliary circuits can stably output high-quality three-phase AC power, demonstrating the feasibility and reliability of the design scheme.

文章引用: 江军楼. 三相T型三电平逆变器的设计与实现[J]. 电气工程, 2024, 12(4): 63-69.

DOI: 10.12677/jee.2024.124008

Keywords

Three-Phase Three-Level Inverter, SPWM Modulation, MATLAB/Simulink Simulation

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

近年来，风、光等新能源因其低碳环保受到越来越广泛的关注。其中以光伏为代表的新能源并网需要通过逆变器来实现。传统的两电平逆变器输出电压谐波畸变率高，需要更大的滤波器来进行滤波，且开关管的电压应力大。三电平与多电平逆变器通过增加开关管[1]的数量，可以适当解决两电平逆变器的上述问题。常见的三相三电平和多电平逆变器有二极管箝位型三相三电平逆变器、飞跨电容箝位型三相三电平逆变器、具有独立直流电源的级联型三相 N 电平逆变器[2]和 T 型三相三电平逆变器等，本文设计的是 T 型三相三电平逆变器，T 型三相三电平逆变器相比其他三相三电平逆变器具有成本低、体积小、可靠性高等优点。

2. T 型三相三电平逆变器的结构与工作原理

T 型三相三电平逆变器的工作原理是：以 A 相为例，当开关管 S_{a1} 与 S_{a2} 同时导通时，输出端 A 输出相对直流侧中点 O 的电平为 $U_{dc}/2$ ，当开关管 S_{a2} 与 S_{a3} 同时导通时，输出端 A 输出相对直流侧中点 O 的电平为 0，当开关管 S_{a3} 与 S_{a4} 同时导通时，输出端 A 输出相对直流侧中点 O 的电平为 $-U_{dc}/2$ [3] [4]，通过 SPWM 正弦波脉宽调制，可以在 A 相输出的脉冲波形在伏秒意义上等效于连续的正弦波形，再通过输出端的 LC 滤波器对脉冲波形进行平滑处理，滤除高次谐波，使 A 相输出非常接近正弦波的交流电压波形(图 1，表 1)。

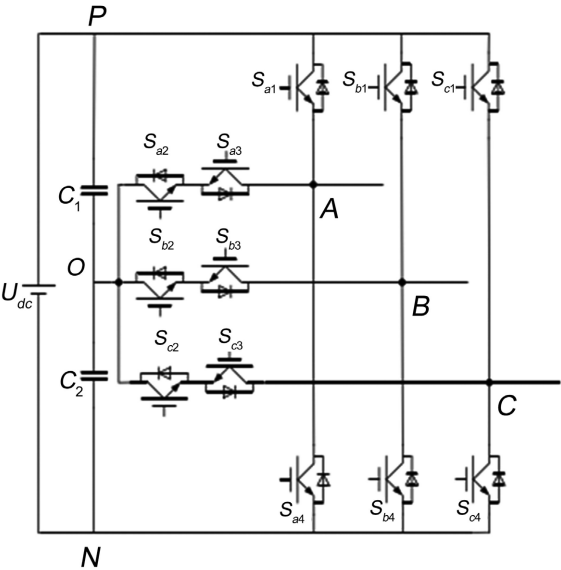


Figure 1. Structure of T-type three-level inverter
图 1. T 型三电平逆变器结构

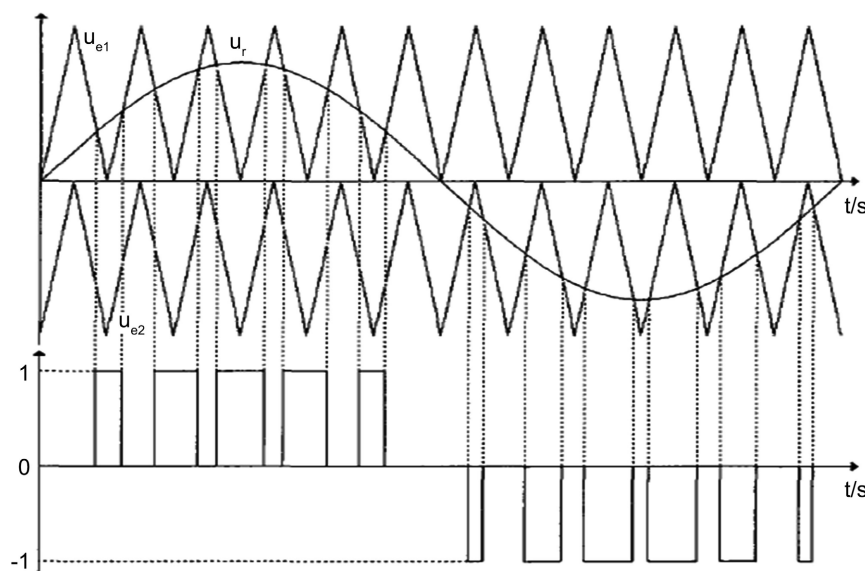
Table 1. Relation between output level and switch state of T-type three-level inverter**表 1.** T 型三电平逆变器输出电平与开关状态关系

S_{a1}	S_{a2}	S_{a3}	S_{a4}	输出电平	开关状态
通	通	断	断	$U_{dc}/2$	1
断	通	通	断	0	0
断	断	通	通	$-U_{dc}/2$	-1

3. 用双层载波层叠实现正弦波脉宽调制(SPWM)

SPWM 正弦波脉宽调制的特点是输出脉冲列是不等宽的, 宽度按正弦规律变化, 故输出电压的波形接近正弦波。SPWM 是采用一个正弦波与三角波相交的方案来确定各段矩形脉冲的宽度。本文设计中每相采用两个幅值相等, 频率相同, 相位亦相同的三角波作为双层载波层叠, 载波的频率远高于调制波的频率。本文设计中每一相的载波层叠相位相同, 每一相的调制波相位互差 120° 角。当每一相调制波 U_r 的值高于上面载波 U_{d1} 的值, 则为“1”的状态, 该相输出电压为 $U_{dc}/2$; 当每一相调制波 U_r 的值低于下面载波 U_{d2} 的值, 则为“-1”状态, 该相输出电压为 $-U_{dc}/2$; 其余则为“0”状态, 该相输出电压为 0。载波层叠比较法生成 PWM [5] 脉冲波后, 将 PWM 脉冲波输入到驱动电路中, 通过驱动电路就能够控制功率开关管的导通与关断。

如图 2 为正弦波与三角波通过比较器产生 PWM 脉冲的示意图, 这种通过正弦波与三角波的比较产生 PWM 脉冲的原理, 利用了正弦波的周期性变化和三角波的固定频率以及线性变化特征, 经过比较器的比较得到一系列宽度不同的脉冲, 从而实现对输出信号的脉宽调制。脉冲信号连接开关管的方式如下: P_1 信号接往 S_1 , P_1 信号反相后接 S_3 (S_1 和 S_3 始终是反相位关系), P_2 信号接往 S_2 , P_2 信号反相后接 S_4 (S_2 和 S_4 始终是反相位关系)。正半周波时, S_4 始终关断, 正半周波输出时, 两个开关管 S_1 和 S_2 均为通态, 两个开关管 S_3 和 S_4 均为断态, 输出电压为 $U_{dc}/2$; 负半周波时, S_1 始终关断, 负半周波输出时, 两个开关管 S_3 和 S_4 均为通态, 两个开关管 S_1 和 S_2 均为断态, 输出电压为 $-U_{dc}/2$; 其余情况下, 两个开关管 S_2 和 S_3 均为通态, 两个开关管 S_1 和 S_4 均为断态, 输出电压为 0。

**Figure 2.** Carrier cascade PWM modulation method**图 2.** 载波层叠式 PWM 调制法

4. 逆变器的基本要求

1) 要求输出电压谐波含量低, 以保证输出电能的质量, 减少对电气设备的损害。这就要求逆变器要有良好的调制方式和滤波方式。2) 要求输出电压的稳定度高, 以保证在不同的负载条件下, 输出的交流电压保持相对稳定。这就要求直流侧要有较大的电容, 能使负载变化时, 输出电压的变化控制在允许的范围内, 以确保连接的负载能够正常工作。3) 要求满足额定功率要求, 以保证在长时间运行过程中保持稳定的功率输出。这就要求逆变器要有高性能的功率开关器件和合适的电感电容元件, 还要有过流保护、过压保护和散热保护等保护电路, 以防止功率输出不稳定或损坏设备。

参数: 直流侧电容 $C = 1500 \mu\text{F}$, 输入电压 800 V 。要求: 输出功率 3.6 kW , 输出三相相电压 220 V , 50 Hz , 带 3.6 kW 阻性负载, 要求输出电压 THD 小于 2% 。

5. 电路设计

T 型三相三电平逆变器的主电路由三相桥臂构成, 每相桥臂由四个开关管构成, 其主要目的是将直流电源转化为三相交流电源输出。控制电路由三相 SPWM 调制电路构成, 其主要目的是输出三相宽度按正弦规律变化的 PWM 电压脉冲。滤波电路由 L-C 滤波器构成, 其主要目的是对交流侧输出的电压脉冲波形进行平滑处理, 滤除高次谐波, 使三相输出非常接近正弦波的交流电压波形[6]。电路主要部分设计如下:

5.1. 电路图(图 3)

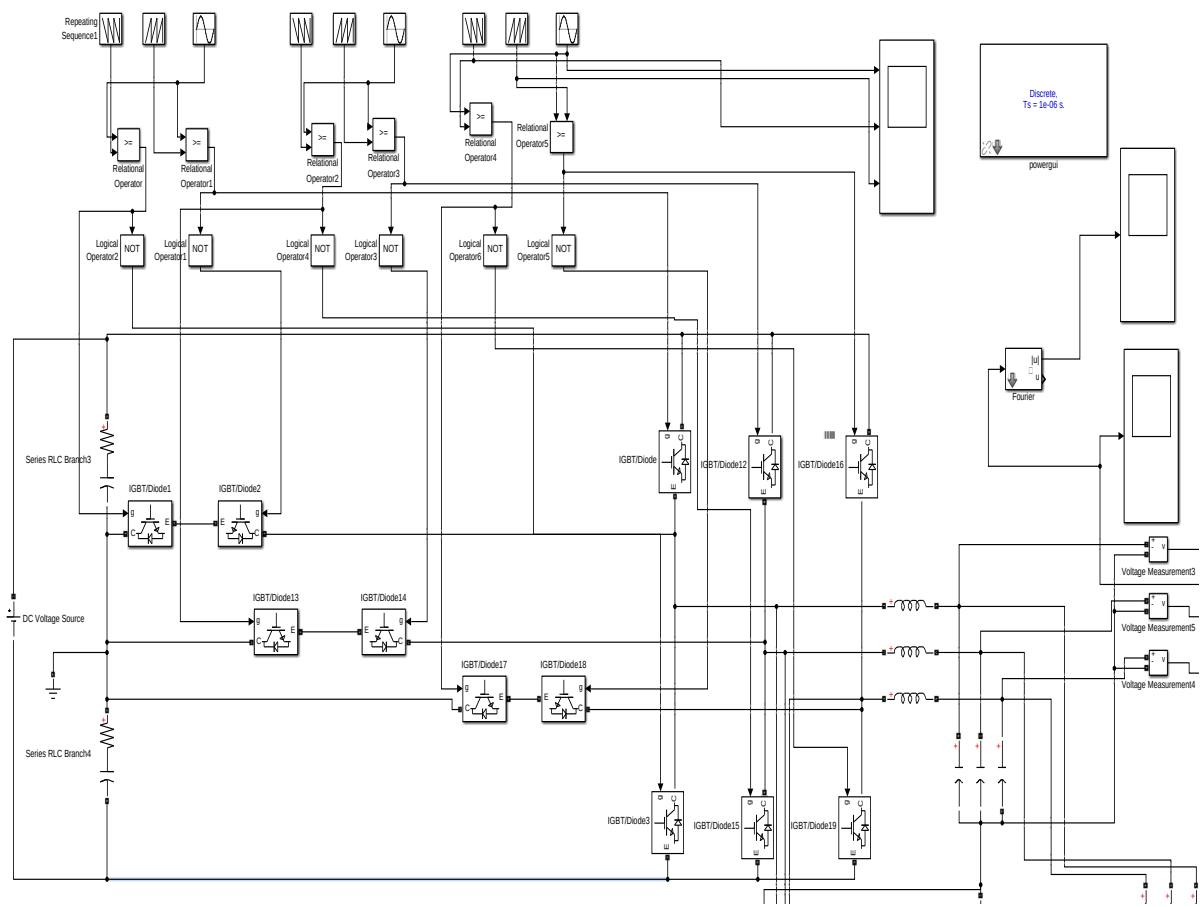


Figure 3. SIMULINK simulation circuit diagram
图 3. SIMULINK 仿真电路图

5.2. 调制电路

连线如图 4，取其中一个信号来观测，可以发现，经过调制出来的波形基本满足 SPWM 调制后的结果。在最后的仿真过程中，锯齿波的周期为 0.00005 s，即频率为 20 kHz。

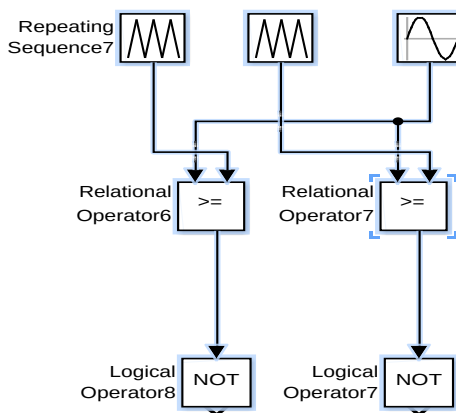


Figure 4. Single-phase SPWM modulation circuit
图 4. 单相 SPWM 调制电路

5.3. L-C 滤波电路

在 SPWM 逆变器中，逆变器的输出 LC 滤波器主要用来滤除开关频率及其邻近频带的谐波。考察一个滤波器性能的优劣首先是看它对谐波的抑制能力，具体可以从 THD 值来体现。另外需要尽量减小滤波器对逆变器附加的电流应力。电流应力增大，除使器件损耗及线路损耗加大外，另一方面也使功率元件的容量增大。THD 值小的要求与滤波器引起的附加电流应力小的要求往往是矛盾的。LC 滤波器的示意图如下图 5 所示。

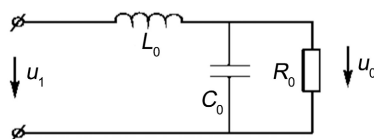


Figure 5. Circuit structure of the filter
图 5. 滤波器的电路结构

$$\text{传递函数: } W(s) = \frac{1}{L_0 C_0 s^2 + \frac{L_0}{R_0} s + 1} = \frac{\omega_0^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q} s + \omega_0^2}$$

$$\text{谐振频率: } f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0}}, \text{ 滤波器特征阻抗: } Z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$$

$$\text{品质因数: } Q = \frac{R_0}{Z_0}$$

逆变器输出基波频率 $f_1 = 50 \text{ Hz}$ ，最低次谐波电压频率 $f_k = 20 \text{ kHz}$ ，要求：

$$f_1 \ll f_0 \leq f_k, \\ Z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} = (0.5 \sim 0.8) R_0$$

最终取： $L_0 = 5 \text{ mH}$ ， $C_0 = 5 \text{ }\mu\text{F}$

5.4. 结果分析

A) 波形分析

滤波前三相电压波形如图 6(a)，滤波后三相电压波形如图 6(b)：

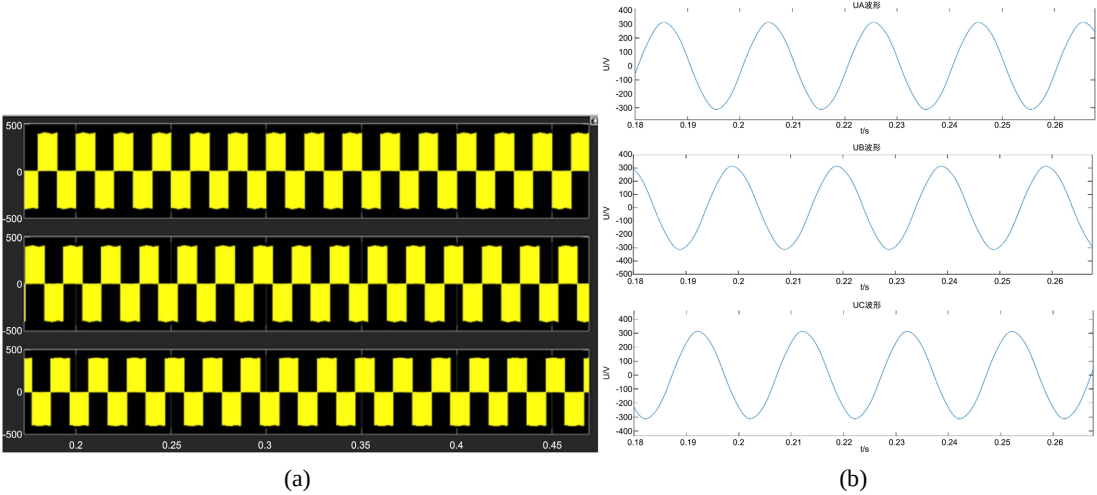


Figure 6. (a) Three-phase AC waveform before filtering; (b) Three-phase AC waveform after filtering
图 6. (a) 滤波前三相电压波形；(b) 滤波后三相电压波形

B) 输出电压畸变率分析(图 7)：

从结果来看，本文设计的 T 型三相电平逆变器能够获得一个非常近似正弦波的波形，其有效值为 220 V，频率为 50 Hz，THD 为 0.96%。

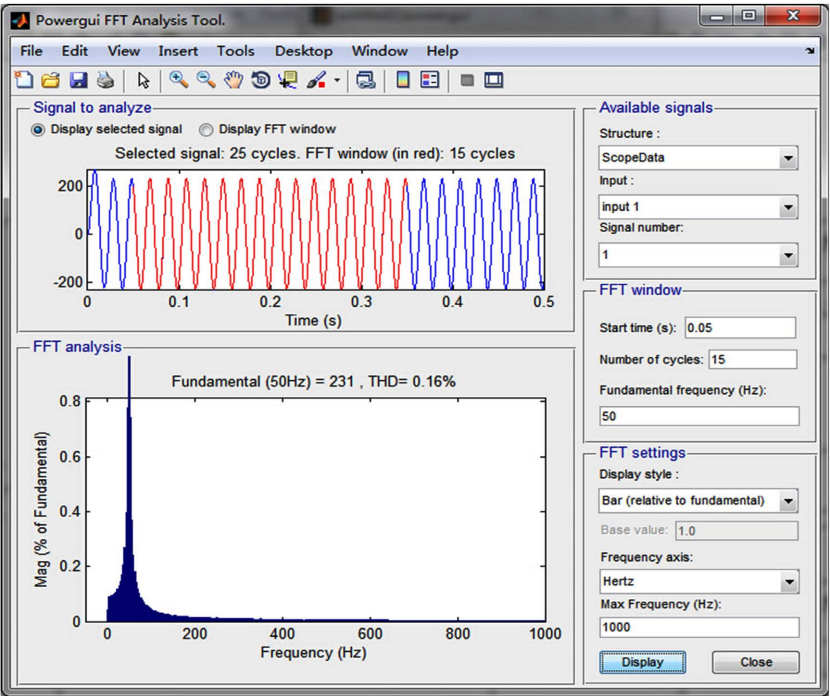


Figure 7. FFT analysis
图 7. FFT 分析

6. 结论

本文介绍了 T 型三相三电平逆变器的设计方案, 并且采用 MATLAB/Simulink 进行仿真实验[7], 实验结果表明, 此 T 型三相三电平逆变器的设计方法简洁实用, 电路结构相对简单, 器件数量相对较少, 易于控制, 输出的三相电压和三相电流波形稳定, 谐波失真度低, 电压稳定性好, 证明了本设计方案的可行性和可靠性。本设计具有如下优势: 1) 开关管承受的电压降低, 相比两电平逆变器每个开关管承受的电压降低, 这使得可以使用耐压等级较低的开关器件, 降低了器件成本, 提高了系统的可靠性; 2) 输出电能的质量提高, 相比两电平逆变器能够输出多电平阶梯电压, 使电压波形更接近正弦波, 交流侧谐波含量更低, 直流电压纹波更小, 可以有效减少对电网的谐波污染; 3) 开关损坏小, 相比两电平逆变器能够使开关动作引起的电压变化率 dv/dt 减少, 使得开关的损耗降低; 4) 具有更好的性能和控制优势, 相比二极管箝位型逆变器和飞跨电容箝位型逆变器减少了器件, 减少了逆变器的体积, 更容易控制。本设计应用前景广阔: 由于 T 型三相三电平逆变器具有良好的性能, 使得其在光伏并网发电、电动汽车充电、不间断电源和电机驱动等领域能得到广泛的应用。随着电力电子技术的不断发展, T 型三相三电平逆变器的技术还将不断改进和完善, 在提高效率、降低成本和增强可靠性方面还将有很大的发展空间。

参考文献

- [1] 陈坚. 电力电子学: 电力电子变换和控制技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 1-20.
- [2] Park, Y., Sul, S.K., Lim, C.H., Kim, W.C. and Lee, S.H. (2011) Asymmetric Control of DC-Link Voltages for Separate MPPTs in Three-Level Inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **28**, 2760-2769.
- [3] 杨荫福. 电力电子装置及系统[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [4] 童鸣庭. 三相 T 型三电平非隔离并网逆变器的研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
- [5] 刘力. PWM 技术在电源中的应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2000.
- [6] 夏玲芳. T 型三电平逆变器技术研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- [7] 徐向民. Altium Designer 快速入门[M]. 第 2 版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011.