

基于桥式不控整流隔离型三相交流过电压故障检测电路研究

诸葛阳¹, 方 宇², 张 爽¹, 张继勇¹, 夏晓南², 夏梅珍², 曹松银²

¹扬州大学电气与能源动力工程学院, 江苏 扬州

²扬州大学信息工程学院(人工智能学院), 江苏 扬州

收稿日期: 2022年10月11日; 录用日期: 2022年11月11日; 发布日期: 2022年11月21日

摘 要

本文提出了一种基于桥式不控整流隔离型三相交流过电压故障检测电路。在分析了该电路原理后, 建立分压整流电路的戴维南等效电路模型, 根据等效电路模型推导出三相交流电压分压后的数学模型, 建立一阶时域模型, 设计电路的相关参数。最后在PSIM软件中搭建了仿真模型, 并进行了仿真实验。仿真结果表明, 非正常工作电压下电路能向DSP传输保护信号; 正常工作电压下不会向DSP传输故障信号。

关键词

过电压故障检测, 分压整流, PSIM

Research on Isolated Three-Phase AC Overvoltage Fault Detection Circuit Based on Bridge Uncontrolled Rectification

Geyang Zhu¹, Yu Fang², Shuang Zhang¹, Jiyong Zhang¹, Xiaonan Xia², Meizhen Xia², Songyin Cao²

¹College of Electrical, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu

²College of Information Engineering, Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu

Received: Oct. 11th, 2022; accepted: Nov. 11th, 2022; published: Nov. 21st, 2022

Abstract

This paper presents an isolated three-phase AC overvoltage fault detection circuit based on bridge

文章引用: 诸葛阳, 方宇, 张爽, 张继勇, 夏晓南, 夏梅珍, 曹松银. 基于桥式不控整流隔离型三相交流过电压故障检测电路研究[J]. 电路与系统, 2022, 11(4): 29-38. DOI: 10.12677/ojcs.2022.114004

uncontrolled rectification. After analyzing the principle of the circuit, the Thevenin equivalent circuit model of the voltage divider rectifier circuit is established. According to the equivalent circuit model, the mathematical model of the three-phase AC voltage divider is derived, the first-order time-domain model is established, and the relevant parameters of the circuit are designed. Finally, a simulation model is built in PSIM and verified by simulation. The simulation results show that the circuit can transmit protection signals to DSP under abnormal operating voltage; no fault signal will be transmitted to DSP under normal operating voltage.

Keywords

Overvoltage Fault Detection, Voltage Division Rectification, PSIM

Copyright © 2022 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/>



Open Access

1. 引言

三相交流过电压保护是电路中很重要的保护装置，在电路中安装过电压保护装置，就能够使电路中的电压大小维持在用电设备额定电压的波动范围之内。而过电压保护设备能够将电路中的电压控制在一定的范围之内，使得电路中的电压值保持在设备电压绝缘临界值之下，对电路起到一定的保护作用[1]。过电压保护能够对电压进行及时的控制，维系着电路安全，而且能够对整个电路进行全方位的监测和保护。传统过电压保护设备例如过压断路器、过电压保护继电器和过电压保护稳压器这些保护设备成本较高，结构复杂，体积较大；而本论文将介绍一种全新的三相交流过电压故障检测电路可以与 DSP (Digital Signal Processing) 配合使用，很好地实现过电压保护功能[2] [3] [4]。该电路比起传统设备的电气隔离结构较为简单[5] [6]。

现代电力电子的发展方向是结构轻量化，控制智能化，电力电子技术的发展方向是集成化控制芯片大量投入应用。基于不空整流电路的原理模型，本文提出了一种基于桥式不控整流隔离型三相交流过电压故障检测电路，以及利用戴维南定理分析建模的设计方法[7] [8] [9]。

2. 拓扑结构及工作原理分析

2.1. 拓扑结构

图 1 为基于桥式不控整流隔离型三相交流过电压故障检测电路拓扑结构。其中 u_A 、 u_B 和 u_C 为三相交流电压； $VD_1 \sim VD_6$ 为六个二极管，工作在交替导通状态； R_1 、 R_2 和 R_3 为分压电阻；工作在低频状态； C_1 为桥臂电容； R_4 为泄放电阻； R_5 为限流电阻；OPT1 为光耦； Z_1 为齐纳二极管； R_6 为上拉电阻； U_1 为 5 V 直流电压源； C_2 为滤波电容。

2.2. 电路原理分析

如图 1 所示，左半部分电路包括分压电路和桥式整流电路，右半部分电路是电压检测电路并连接 DSP 的 IO 口；接入电路的三相交流电源的电压，经分压电路中的电阻通过桥式整流电路后，在其直流侧电容 C_1 上形成的整流电压；然后由检测电路来检测这个电压的大小是否处于正常范围内。

电路可分为两种工作模式，如图 2 常压工作状态所示。

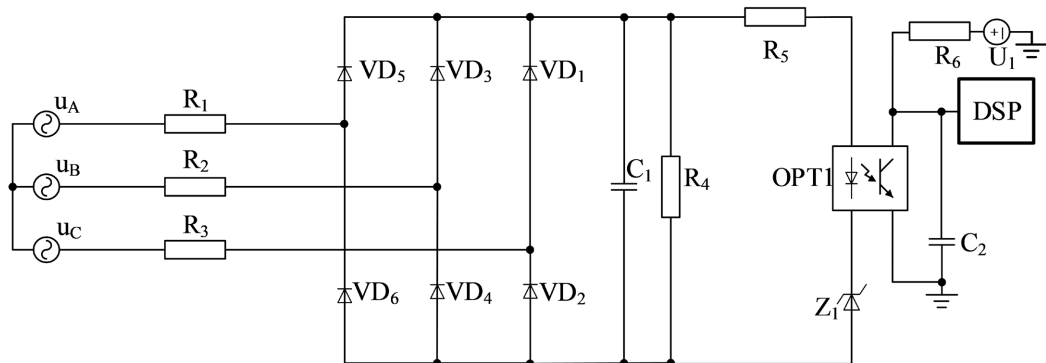


Figure 1. Topology of isolated three-phase AC overvoltage fault detection circuit based on bridge uncontrolled rectification

图 1. 桥式不控整流隔离型三相交流过电压故障检测电路拓扑结构

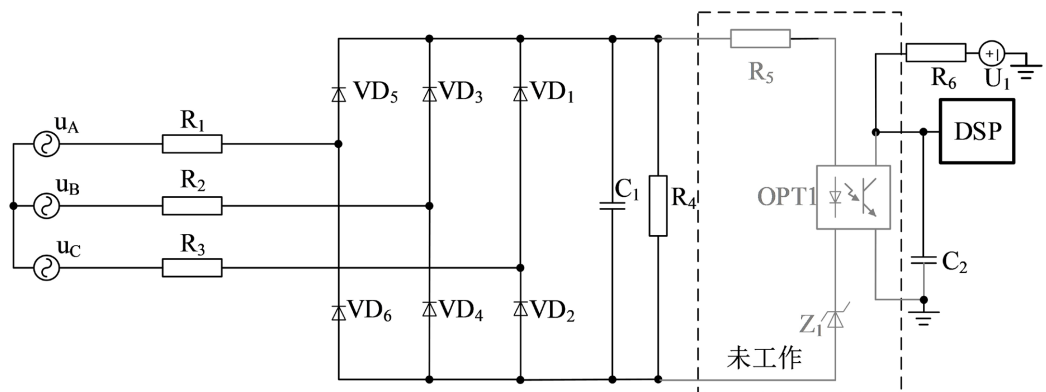


Figure 2. Normal pressure working state

图 2. 常压工作状态

常压工作状态所示常压工作状态下，接入电路的三相交流电源的电压在正常工作范围内，设置第二端口电路中的齐纳二极管 Z_1 不被击穿，此时光耦的原边侧二极管截止，光耦副边侧三极管也相应截止，因此 D 点电压 U_d 呈现高电平，而送出高电平信号到 DSP 的 IO 口，由 DSP 程序判断为常压工作状态，不会动作相应保护。

如图 3 过压工作状态所示。

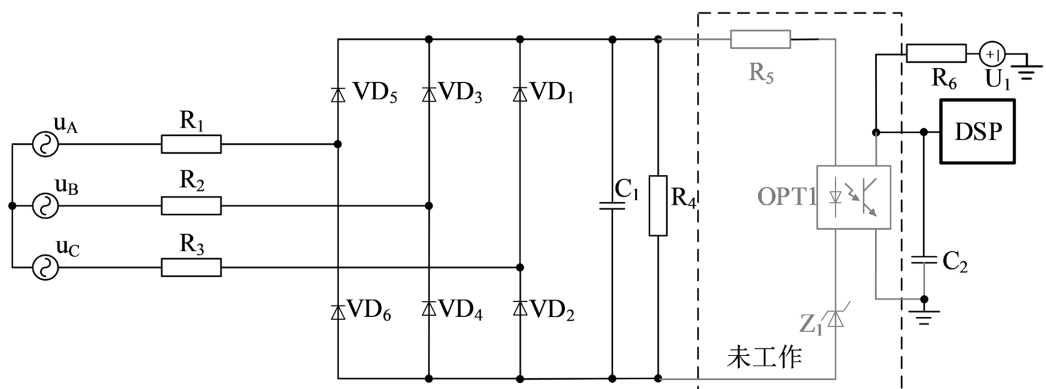


Figure 3. Overvoltage working state

图 3. 过压工作状态

过压工作状态下,接入电路的三相交流电源的电压超出正常工作范围,同时电容 C1 两侧电压超过设置的齐纳二极管击穿电压,使得光耦的原边侧二极管导通,从而使得光耦副边侧三极管饱和导通并接地,因而送出低电平故障信号到 DSP 的 IO 口,由 DSP 接收到这个三相交流电压源的过压故障信号并且动作相应保护。

3. 分压桥式不控整流电路建模

3.1. 戴维南等效

图 1 中分压整流电路中当 A 相电压大于 B 相和 C 相电压时,可以作出其等效原理图,同理当 B 相电压大于 A 相和 C 相电压、C 相电压大于 B 相和 A 相电压时也可以作出其等效原理图。

三种状态的等效原理图如图 4~6 所示。

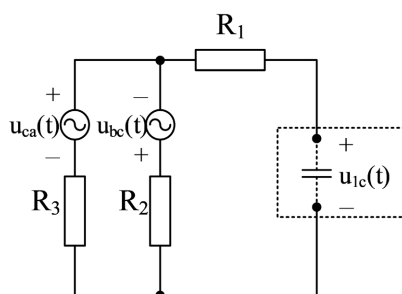


Figure 4. Phase A voltage is greater than phase B and phase C voltage

图 4. A 相电压大于 B 相和 C 相电压

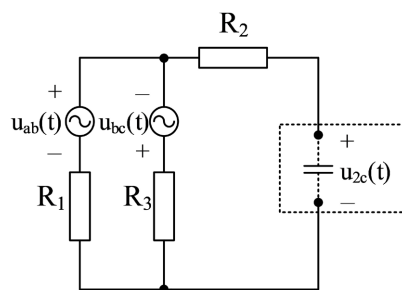


Figure 5. Phase B voltage is greater than phase A and phase C voltage

图 5. B 相电压大于 A 相和 C 相电压

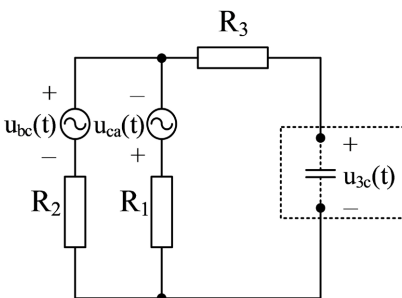


Figure 6. Phase C voltage is greater than phase B and phase A voltage

图 6. C 相电压大于 B 相和 A 相电压

$$\begin{cases} u_{1c}(t) = |0.5(u_{ca}(t) - u_{ab}(t))| \\ u_{2c}(t) = |0.5(u_{ab}(t) - u_{bc}(t))| \\ u_{3c}(t) = |0.5(u_{bc}(t) - u_{ca}(t))| \end{cases} \quad (1)$$

其中 $u_{ab}(t)$ 、 $u_{bc}(t)$ 、 $u_{ca}(t)$ 为三相交流电的线电压， $u_{1c}(t)$ 、 $u_{2c}(t)$ 、 $u_{3c}(t)$ 分别三种状态下的开路电压。

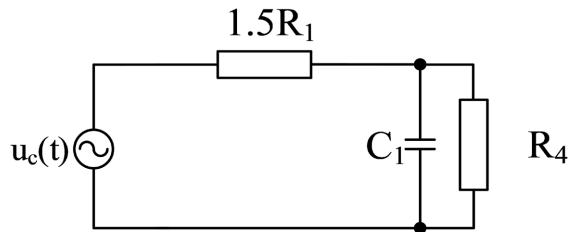


Figure 7. Principle diagram of Thevenin's equivalent circuit of voltage dividing circuit and bridge rectifier circuit
图 7. 分压电路和桥式整流电路戴维南等效电路原理图

如图 7 所示，经分压的电压模型为

$$\begin{cases} u_{dp1}(t) = \frac{R_4}{1.5R_1 + R_4} u_{1c}(t) \\ u_{dp2}(t) = \frac{R_4}{1.5R_1 + R_4} u_{2c}(t) \\ u_{dp3}(t) = \frac{R_4}{1.5R_1 + R_4} u_{3c}(t) \end{cases} \quad (2)$$

其中 $u_{dp1}(t)$ 、 $u_{dp2}(t)$ 、 $u_{dp3}(t)$ 为经过分压后的三种状态下的开路电压。在过压状态下设计，所以输入相电压幅值为 260 V，电阻 $R_1 \sim R_3$ 的电阻值均为 200 k Ω ，电阻 R_4 的电阻值为 10 k Ω ，经过分压后的电压幅值 $V_m = 17.792$ V。(图 8、图 9)

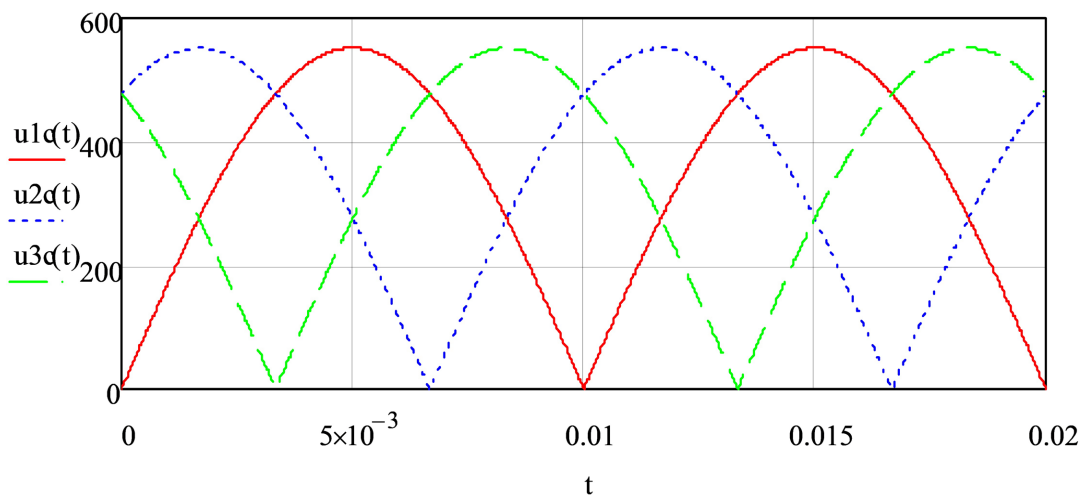


Figure 8. Open circuit voltage in three states before voltage division
图 8. 分压前的三种状态下的开路电压

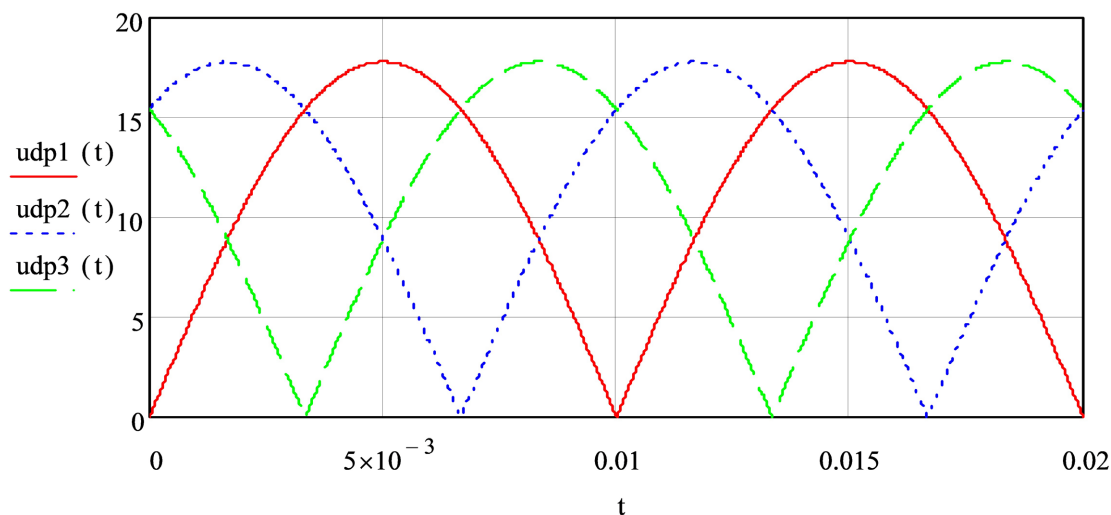


Figure 9. Open circuit voltage in three states after voltage division

图 9. 分压后的三种状态下的开路电压

3.2. 时域分析

因为等效电路是 RC 电路，所以选择一阶电路的时域分析方法来分析该电路的数学模型，通过充放电方程可以根据设计的齐纳二极管保护电压设定值 V_z ，设计桥臂电容 C_1 的值和桥臂电容 C_1 的峰值电压 V_{z2} 。

不妨设定桥臂电容实际充放电峰值电压为

$$V_{z2} = V_z + 0.5 \quad (3)$$

因为二极管压降为 0.5 V，根据 V_{z2} 和图 10 就可以计算出充电时间 t_c 、放电时间 t_d 。

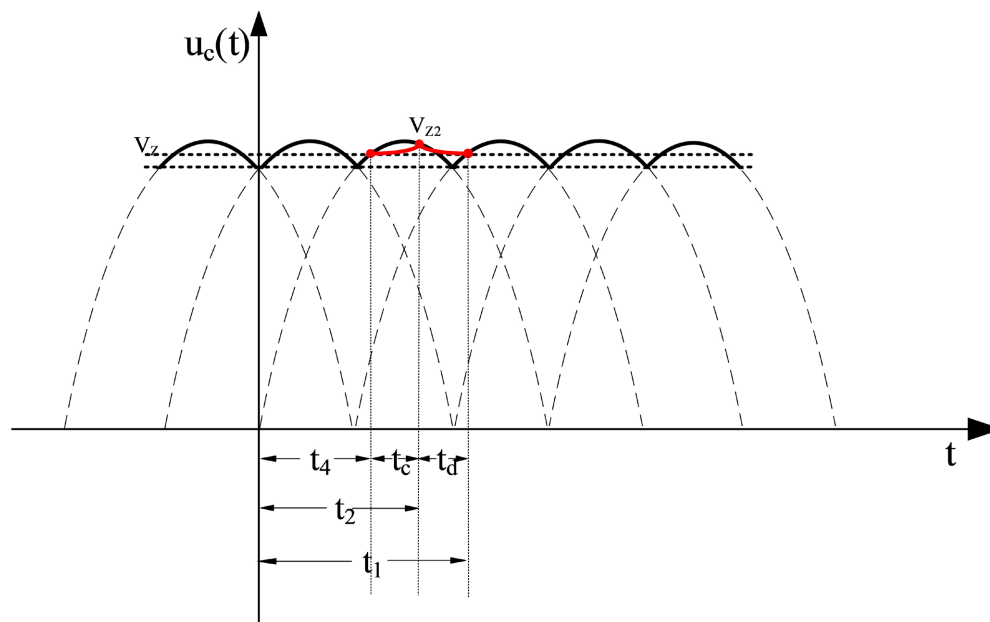


Figure 10. Waveform diagram of charging voltage of bridge arm capacitor and actual voltage of bridge arm capacitor

图 10. 桥臂电容充电电压和桥臂电容实际电压波形图

$$t_c = \left(0.01 - \frac{a \sin\left(\frac{V_{z2}}{V_m}\right)}{2\pi f} \right) - \frac{a \sin\left(\frac{V_z}{V_m}\right)}{2\pi f} \quad (4)$$

上式中, f 为工频 50 Hz。

$$t_d = \frac{a \sin\left(\frac{V_z}{V_m}\right)}{2\pi f} + \frac{0.01}{3} - \left(0.01 - \frac{a \sin\left(\frac{V_{z2}}{V_m}\right)}{2\pi f} \right) \quad (5)$$

如图 10 所示为桥臂电容 C_1 充电电压和桥臂电容 C_1 实际电压波形图; 根据计算出来的两段充放电时间结合图 10 和图 7, 可以知电容充电过程是全响应, 放电过程是零输入响应所以可以列写状态方程来表示桥臂电容 C_1 的充放电过程。

$$\begin{cases} V_{z2} = V_m \left(1 - e^{-\frac{t_c}{\tau_1}} \right) + V_z e^{-\frac{t_c}{\tau_1}} \\ V_z = V_{z2} e^{-\frac{t_d}{\tau_2}} \\ \tau_1 = \frac{1.5R_1 R_4}{1.5R_1 + R_4} C_1 \\ \tau_2 = R_2 C_1 \end{cases} \quad (6)$$

上式中, V_m 为等效电压源的峰值, τ_1 、 τ_2 分别是充电和放电的时间常数, 根据这个式子就可以根据设计的齐纳二极管保护电压设定值 V_z , 设计桥臂电容 C_1 的值和桥臂电容 C_1 的峰值电压 V_{z2} 。

4. 参数整定设计

因为开关管 VD1~VD6 导通压降为 0.5 V, 根据 V_m 值为 17.792 V, 齐纳二极管 Z_1 保护电压设定值 V_z 为 16 V, 电容实际充放电峰值电压 V_{z2} 为 16.5 V。

只需要根据放电式子

$$V_z = 16.5 e^{-\frac{t_d}{\tau_2}} \quad (7)$$

就可以求出电容 C_1 为 2.184 μF 。代入下式中

$$V_z = 16.5 e^{-\frac{t_d}{\tau_2}} \quad (8)$$

求出 V_{z2} 的值为 16.21 V, 适当减小电容值取为 1 μF 。求出 V_{z2} 的值为 16.49 V, 符合预期设计。

5. 仿真验证

主要参数指标如表 1 所示。

基于以上的理论分析及参数设计, 在 PSIM 软件中搭建了仿真模型进行验证, 仿真原理图如图 11 所示。

在正常工作电压 220 V 下进行功能测试, 主要实测了齐纳二极管两端电压 V_{zener} 、桥臂电容电压 V_{bus} 和故障检测信号电压 V_{error_detect} 如图 12。

Table 1. Performance index of fault detection circuit
表 1. 故障检测电路的性能指标

名称	参数
R_5	500 Ω
C_2	100 nF
Z_1	16 V
C_1	1 μ F
R_6	5.1 k Ω

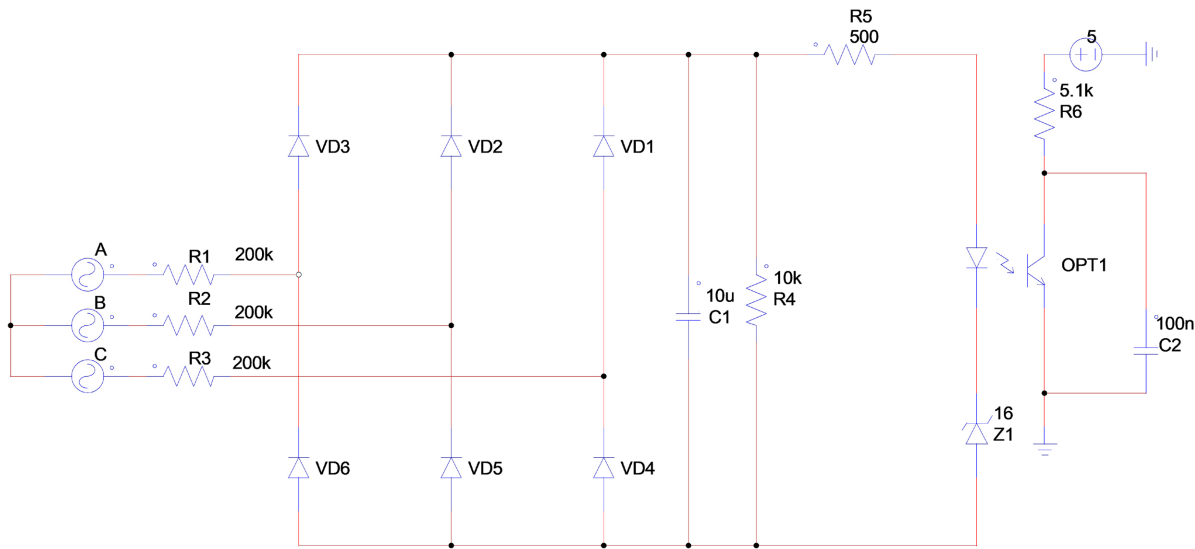


Figure 11. Simulation schematic
图 11. 仿真原理图

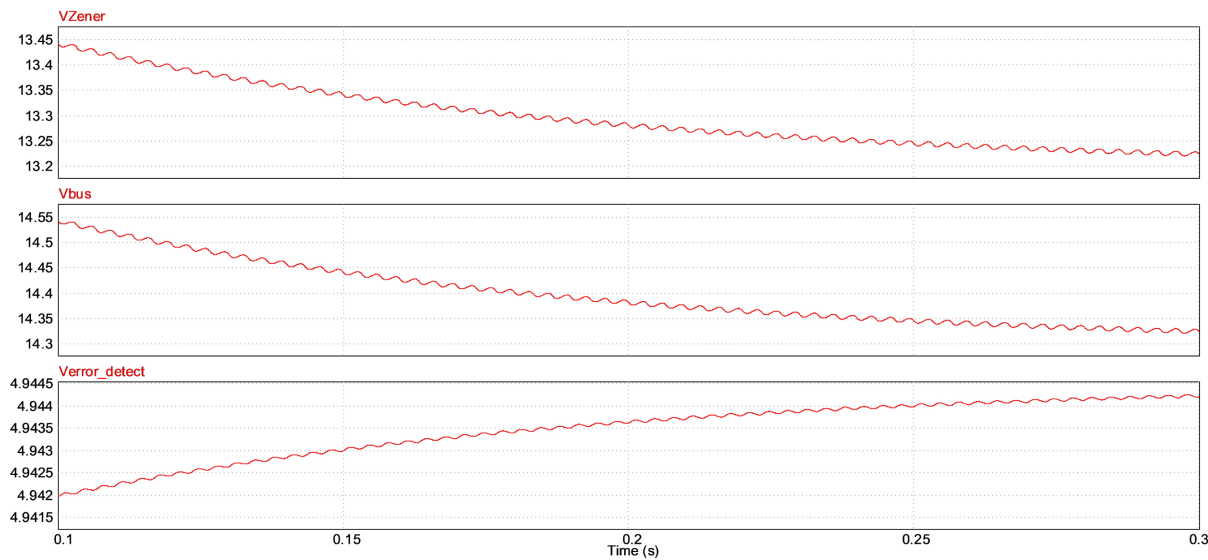


Figure 12. Simulation schematic
图 12. 仿真原理图

可见正常状态下故障检测信号电压 $V_{\text{error_detect}}$ 始终维持在高电平，DSP 检测到三相交流电源的电压正常信号。

在非正常工作电压 265 V 下进行功能测试，主要实测了齐纳二极管 Z_1 两端电压 V_{zener} 、桥臂电容电压 V_{bus} 和故障检测信号电压 $V_{\text{error_detect}}$ 如图 13。

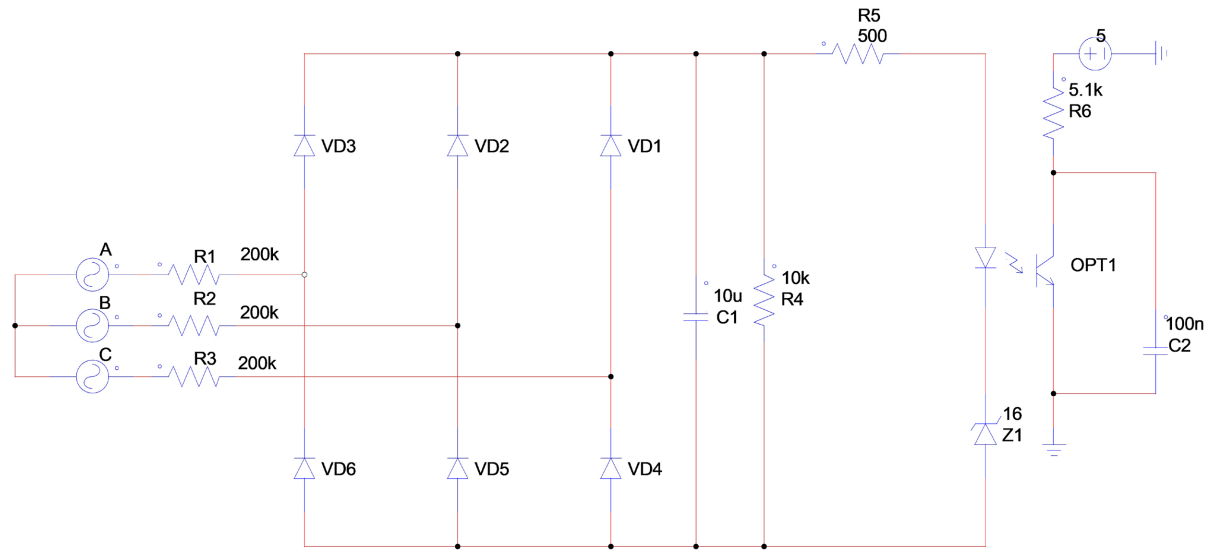


Figure 13. Simulation waveform under abnormal operating voltage

图 13. 非正常工作电压下仿真波形

可见非正常状态下齐纳二极管两端电压稳定在 16 V 左右，故障检测信号电压 $V_{\text{error_detect}}$ 有低电平，因而送出低电平故障信号到 DSP 的 IO 口。经过仿真实验验证如表 2 所示，保护区间在 255 V 以下，一旦超过会送出低电平信号，送到 DSP 芯片。

Table 2. 220 V to 265 V simulation results

表 2. 220 V 至 300 V 仿真结果

电压	低电平信号
220 V	无
240 V	无
250 V	无
255 V	无
260 V	有
265 V	有

6. 结论

本文提出了基于桥式不控整流隔离型三相交流过电压故障检测电路，搭建了分压桥式整流电路和故障检测电路，建立了该电路的简化模型，提出了相关参数的设计方法。仿真结果验证了本文的理论分析和参数计算方法的正确性，该桥式不控整流隔离型三相交流过电压故障检测电路能检测到三相过电压并且向 DSP 传输故障信息，并且该电路无需加任何控制，结构简单，实用性很强，本过压保护电路拓扑简

单、成本低，具有高性价比。后续将该故障检测电路应用到三相储能逆变器中，实现高性价比的储能装备。

致 谢

感谢江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX21_1575)；国家自然科学基金(61873346)和镇江市科技计划项目 - 产业前瞻与共性关键技术(GY2021017)项目的资助。

基金项目

江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX21_1575)；国家自然科学基金(61873346)；镇江市科技计划项目——产业前瞻与共性关键技术(GY2021017)。

参考文献

- [1] Zhang, X., Wang, T.S. and Bao, B.C. (2021) A Detection Circuit for Improving the Unloading Transient Performance of the COT Controller. *Electronics*, **10**, Article No. 2333. <https://doi.org/10.3390/electronics10192333>
- [2] 黄小凡, 刘欣睿. 电压型不控整流电路[J]. 电焊机, 2017, 47(1): 56-62.
- [3] 邓钧韬, 谭健, 吴特, 李权, 荣军. 电容滤波的三相不可控整流电路的仿真研究[J]. 船电技术, 2017, 37(12): 73-75+80.
- [4] 沈瑶, 张舒媛, 冯媛媛, 邹建龙. 一阶 RC 电路实验教学改革与问题分析[J]. 实验室研究与探索, 2021, 40(12): 158-162.
- [5] Lu, S.Z., Deng, X.T. and Li, S.Q. (2020) A Simplified Zero-Voltage Switching Detection Circuit and Switching Loss Dynamic Optimisation Method for Synchronous Buck Converter. *Electronics Letters*, **57**, 71-73. <https://doi.org/10.1049/ell2.12065>
- [6] Jalilian, A., Muttaqi, K.M. and Sutanto, D. (2021) A Novel Voltage Clamping-Based Overvoltage Protection Strategy to Avoid Spurious Trip of Inverter-Based Resources and Eliminate the Risk of Wildfire Following the REFCL Operation in Compensated Networks. *IEEE Transactions on Industry Applications*, **57**, 4558-4568. <https://doi.org/10.1109/TIA.2021.3089116>
- [7] Areerak, K., Sopapirm, T., Bozhko, S., Hill, C.I., Suyapan, A. and Areerak, K. (2018) Adaptive Stabilization of Uncontrolled Rectifier Based AC-DC Power Systems Feeding Constant Power Loads. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **33**, 8927-8935. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2779541>
- [8] Meng, F.G., Xu, X.N., Gao, L., Man, Z.C. and Cai, X.N. (2019) Dual Passive Harmonic Reduction at DC Link of the Double-Star Uncontrolled Rectifier. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **66**, 3303-3309. <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2844840>
- [9] Gable, R. (2021) An Overvoltage Protection Circuit. *QST*, **105**, 36-37.