

# 基于电压比较器的固态功率控制器驱动保护电路研究

刘红奎

(中国西南电子技术研究所, 四川 成都 610036)

**摘要:** 研究了基于电压比较器的固态功率控制器驱动保护技术原理, 设计了降栅压保护电路。通过设置降栅压保护电路的输出电压值和电压上升/下降的速度, 实现了对 MOSFET 栅极电压的控制和对负载在过流或短路时的及时保护功能。解决了现有技术中使用稳压二极管判断过流门限电压, 导致对 MOSFET 栅极电压的控制精度不高和受保护 MOSFET 在一个时延内反复开通/关断的问题。经过电路分析和仿真实验, 结果表明降栅压保护电路可以在  $45\ \mu\text{s}$  内对短路负载进行关断保护。

**关键词:** 固态功率控制器; 降栅压; 电压比较器; 短路保护

中图分类号: TN386; TM133

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.212421

中文引用格式: 刘红奎. 基于电压比较器的固态功率控制器驱动保护电路研究[J]. 电子技术应用, 2022, 48(8): 127-130.

英文引用格式: Liu Hongkui. Research on driver protection circuit of solid state power controller based on voltage comparator[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(8): 127-130.

## Research on driver protection circuit of solid state power controller based on voltage comparator

Liu Hongkui

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

**Abstract:** This paper analyzed the principle of driver protection technology of solid state power controller based on voltage comparator, and the protection circuit of decreasing gate-voltage was designed. The protection circuit of decreasing gate-voltage by setting output voltage value and voltage rise/fall speed, realized the MOSFET gate voltage control, and the load in over-current or short-circuit protection function. The proposed method solved the existing problem using voltage regulator diode to judge the over-current threshold voltage, which lead to the control precision of MOSFET gate voltage is not high and protected MOSFET repeatedly open/close within a time delay. The analysis and simulation on the circuit has been made, and the results show that the protection circuit of decreasing gate-voltage can protect short-circuit load within  $45\ \mu\text{s}$ .

**Key words:** SSPC; decreasing gate-voltage; voltage comparator; short-circuit protection

### 0 引言

传统的机电式配电系统在智能化、可靠性等方面已不能满足大规模分布式配电系统<sup>[1]</sup>的需要, 采用模块化固态配电技术是当前机载、舰载、星载配电系统的发展趋势<sup>[2-4]</sup>。固态功率控制器(Solid State Power Controller, SSPC)是兼具继电器的转换功能和断路器的电路保护功能于一体的固态功率开关, 所以 SSPC 在负载过流或短路时的及时保护功能就显的十分重要<sup>[5-7]</sup>。

在电力电子技术领域中, 常用的 MOSFET 功率管过流或短路时的保护措施有两种<sup>[8-9]</sup>: 一种是软关断, 另一种是降栅压。软关断是指在检测到器件过流或短路信号时就迅速撤除受保护功率管的栅极信号, 使 MOSFET 功率管关断, 软关断抗干扰的效果差, 只要检测到故障就关断器件, 这样很容易引起错误的动作。降栅压是指在

检测到器件过流或短路信号时立即将 MOSFET 功率管的栅极电压降到某一电平, 但器件仍维持导通, 若故障信号消失了, 驱动电路就能恢复正常的工作状态, 因而大大增强了电路的抗干扰能力。

目前, 降栅压电路是利用过流信号击穿稳压二极管产生过流或短路的保护信号<sup>[10-12]</sup>, 保护电路只做到了两级降栅压, 若这个特定的电平设置得过高则受保护功率管对过流现象抑制不明显, 若这个特定的电平设置得过低则受保护功率管在一个时延内会存在反复开通、关断的问题; 降栅压电路使用稳压二极管作为过流信号的判断器件, 温度对稳压二极管的工作有一定的影响, 温度过高时, 稳压二极管的实际击穿电压和其标称击穿电压会有一定的差别, 在极端情况下还会出现负载过流而降栅压保护电路不保护的情况。

由于现有降栅压电路存在的一些不足,本文对基于电压比较器的 SSPC 驱动保护电路作了进一步的研究,取得了一定的成果,并在该成果的基础上设计了可用于 SSPC 驱动保护电路,经过实验仿真验证,基于电压比较器的保护电路克服了现有技术中使用稳压二极管判断过流门限电压导致精度不高的问题,实现了对过流门限电压的精准判断和迅速响应,只要设定不同的门限电压就可以对相应的过流级别进行响应,使得电路应用更加灵活,调试更加容易。

## 1 设计思想及技术原理

### 1.1 设计思想

本文对现有降栅压电路存在的一些不足,采用三级降栅压电路对受保护功率管进行保护,克服了现有技术中降栅压仅采用两级保护存在的受保护功率管对过流现象抑制不明显和受保护功率管在一个时延内反复开通、关断的问题。MOSFET 功率管发生故障时,降栅压保护电路启动第一级降栅压单元对受保护功率管进行预保护,然后再根据故障的状态进行相应的保护处理,可以有效地防止误动作发生,相邻两级降栅压单元启动时间可根据实际需要任意调节,还可根据需要增加降栅压单元,实现更多级的降栅压。

增加了降栅压速度调节电路,克服了现有技术中降栅压电路没有缓开通和缓关断的问题,实现了对降栅压速度的调节,可根据需要灵活地设定栅极电压下降或上升的速度,降低了受保护功率管在关断时产生的感应电压,从而延长了受保护功率管的使用寿命。

### 1.2 技术原理

SSPC 是由半导体器件构成的开关装置,为负载提供开关控制和馈电保护,根据 SSPC 的电路结构以及降栅压保护电路的功能要求,降栅压保护电路即需要在正常情况下为负载提供开启和关断的功能,又需要在过流或短路的情况下按照设计要求为负载提供及时关断保护功能。降栅压保护电路在 SSPC 系统中的位置如图 1 所示。

降栅压保护电路包括第一级降栅压单元、第二级降

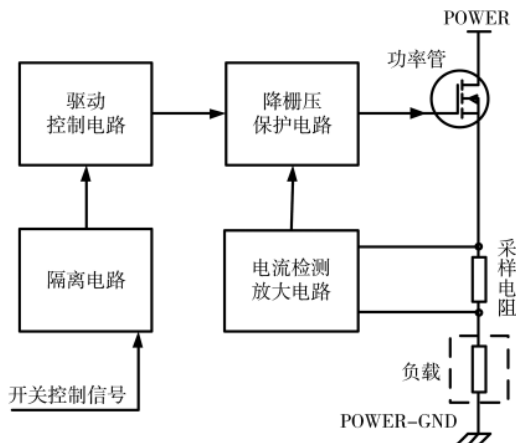


图 1 降栅压保护电路与 SSPC 系统关系框图

栅压单元、第三级降栅压单元、降栅压速度调节电路,降栅压保护电路原理框图如图 2 所示。

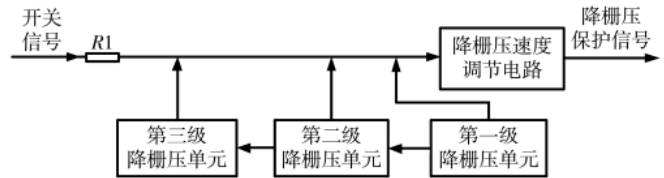


图 2 降栅压保护电路原理框图

## 2 电路设计实现

如前分析,当过流信号出现时,降栅压保护电路中第一级降栅压单元启动,将受保护功率管的栅极电压降到一个设定的值,对受保护功率管进行预保护,此时受保护功率管处于即将完全导通的边缘状态,同时第一级降栅压单元产生第二级降栅压单元所需的延时启动电压,若在一个固定时延内,过流信号消失则受保护功率管恢复完全导通的状态;若在一个固定时延之后过流信号依然存在,则启动第二级降栅压单元,将受保护功率管的栅极电压降到负载额定电流对应的栅极开启电压值,对功率管进行保护。同时第二级降栅压单元产生第三级降栅压单元所需的延时启动电压,若在一个固定时延内,过流信号消失则受保护功率管恢复完全导通的状态;若在一个固定时延之后过流信号依然存在,则启动第三级降栅压单元将受保护功率管的栅极电压缓慢降到 0 V,此时受保护功率管处于关闭的状态。

降栅压速度调节电路由 RC 延时电路组成,其功能是把降栅压单元输出的结果缓慢输出,目的是调节 MOSFET 功率管栅极电压上升或下降的速度。电压上升或下降时间的计算公式为:

$$t = -RC \ln(1 - \frac{U_c}{U}) \quad (1)$$

其中,  $R$  是延时电阻,  $C$  是延时电容,  $U$  是给电容充电的电压,  $U_c$  是电容充电时其两端达到的电压。

根据上述分析设计出的降栅压保护电路原理图如图 3 所示。

SSPC 中采用电源是典型航空直流电源,为负载提供 28 V 的电压和 5 A 的电流, VCC 为 15 V, GND 为模拟地,电压比较器基准电压为 7.5 V,采样电阻的阻值为 10 mΩ。

降栅压保护电路的具体工作流程如下: SSPC 和负载正常工作,电流检测放大电路实时提供过流信号。当过流信号大于电压比较器 U1A 基准电压且一直存在时,电压比较器 U1A 输出高电平,此高电平驱动三极管 Q3,使 Q3 处于开通状态,驱动信号经过 R1 与 R4 后接到地,根据分压原理, R5 的输入电压会降低,降低后的电压值为受保护功率管处于即将完全导通所需的栅源极电压  $V_{GS}$ ;同时电压比较器 U1A 输出高电平通过 R7 与 C2 组

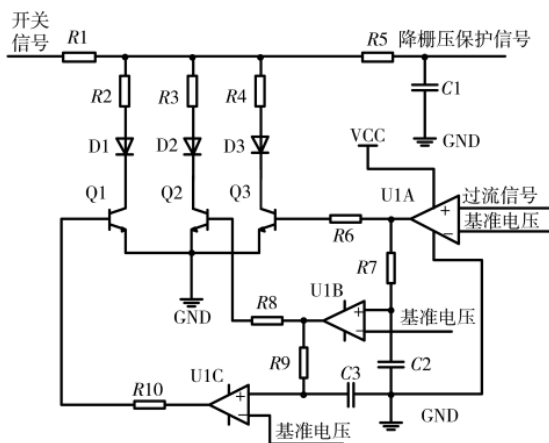


图3 降栅压保护电路原理图

成的RC延时电路,在电压上升固定时间 $t_1$ 后,电容 $C_2$ 两端的电压大于电压比较器U1B基准电压,电压比较器U1B输出高电平,此高电平驱动三极管Q2,使Q2处于开通状态,驱动信号经过 $R_1$ 、 $R_3$ 、 $R_4$ 后接到地,根据分压原理, $R_5$ 的输入电压会再次降低,降低后的电压值为受保护功率管通过负载额定电流所需的栅源极电压 $V_{GS}$ ;同时电压比较器U1B输出高电平通过 $R_9$ 与 $C_3$ 组成的RC延时电路,在电压上升固定时间 $t_2$ 后,电容 $C_3$ 两端的电压大于电压比较器U1C基准电压,电压比较器U1C输出高电平,此高电平驱动三极管Q1,使Q1处于开通状态,驱动信号经过 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$ 后接到地,根据分压原理, $R_5$ 的输入电压为0V。

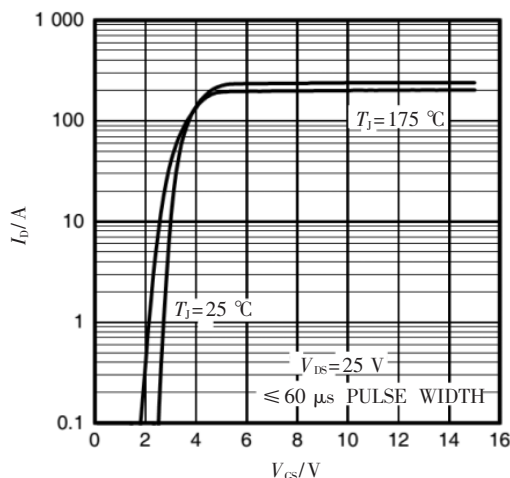
### 3 实验仿真

实验仿真电路中采用电阻 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$ 、 $R_5$ 、 $R_6$ 、 $R_7$ 、 $R_8$ 、 $R_9$ 、 $R_{10}$ 的取值分别为2k $\Omega$ 、0 $\Omega$ 、460 $\Omega$ 、1k $\Omega$ 、2k $\Omega$ 、1k $\Omega$ 、3k $\Omega$ 、1k $\Omega$ 、2.7k $\Omega$ 、1k $\Omega$ ,电容 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 的取值为10nF,电压比较器U1A、U1B、U1C为LM339AD,三极管Q1、Q2、Q3为C9013。

MOSFET功率管选用IR公司的IRLR3110Z产品,IRLR3110Z是N沟道增强型场效应管,能承受的最大漏源极电压为100V,导通阻抗14m $\Omega$ ,允许最大的电流为63A,栅极驱动属于电压型驱动,驱动时电流仅为纳安级,栅源极最大电压为16V,栅源极最大门限开启电压 $V_{GS}$ 为5V,漏源极间的漏电流为20 $\mu$ A~250 $\mu$ A,IRLR3110Z的栅源极典型电压 $V_{GS}$ 关系如图4所示。

降栅压保护电路中第一级降栅压单元预保护电压的范围为 $5\pm 0.1$ V,第二级降栅压单元延时启动电压的范围为7.5V~15V,第二级降栅压单元保护电压的范围为 $2.8\pm 0.1$ V,第三级降栅压单元延时启动电压的范围为7.5V~15V,第三级降栅压单元保护关断电压的范围为0V,降栅压速度调节电路电压上升或下降时时间为60 $\mu$ s。

通过软件仿真的方法对降栅压保护电路进行了验证,降栅压保护电路中的降栅压保护信号仿真如图5、图6所示:通道1为降栅压保护信号,通道2为第一级

图4 IRLR3110Z 栅源极典型电压  $V_{GS}$  关系

降栅压单元输出信号,通道3为第二级降栅压单元输出信号,通道4为第三级降栅压单元输出信号。由图5、图6可以看出降栅压保护电路检测到负载过流信号后先将受保护功率管的栅极电压降到一个设定的电平,对受保护功率管进行预保护,然后再根据故障的状态进行相应的保护处理。

软件仿真了MOSFET功率管开通、关断和负载短路、过流后恢复的状态。MOSFET功率管开通、关断和负载

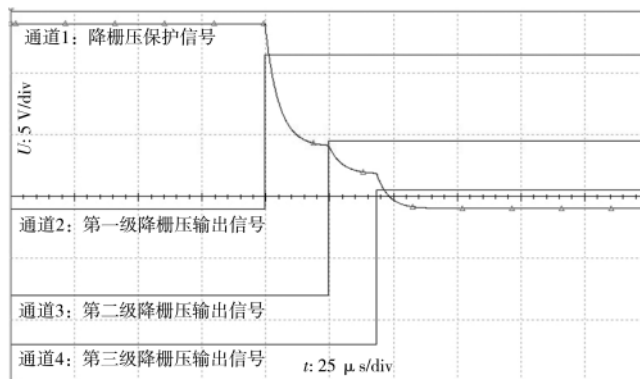


图5 降栅压保护信号仿真图

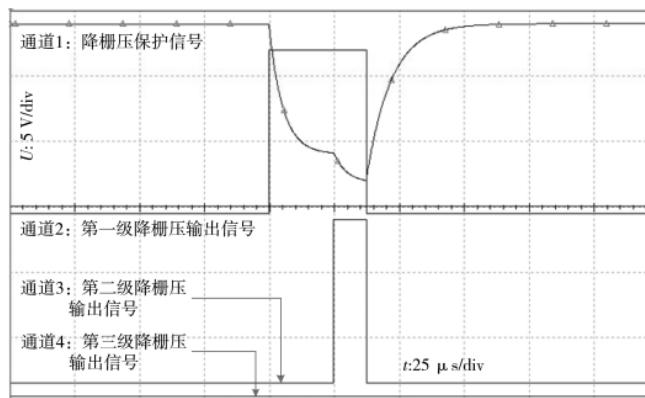


图6 降栅压保护信号恢复仿真图

短路、过流后恢复的状态图如图7~图10所示,其中通道1为MOSFET功率管栅极电压,通道2为负载两端电压。

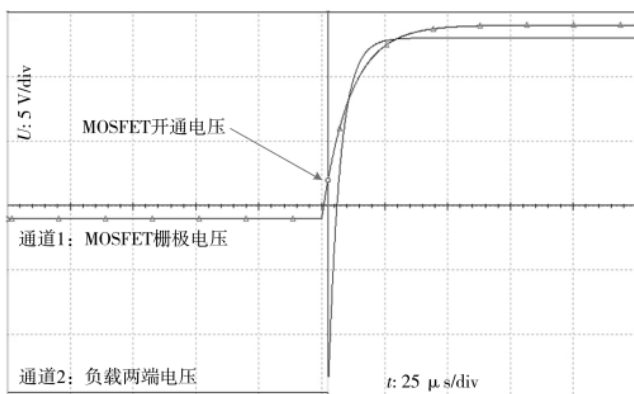


图7 MOSFET功率管开通状态仿真图

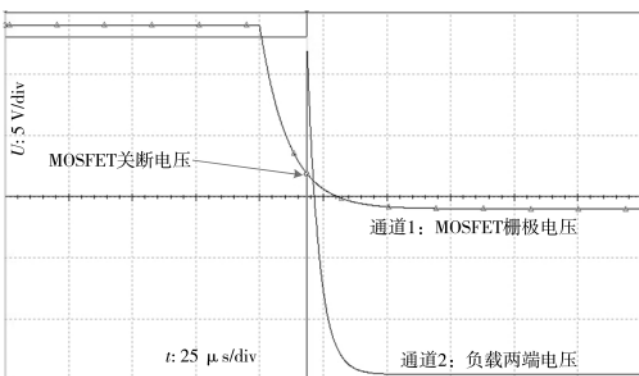


图8 MOSFET功率管关断状态仿真图

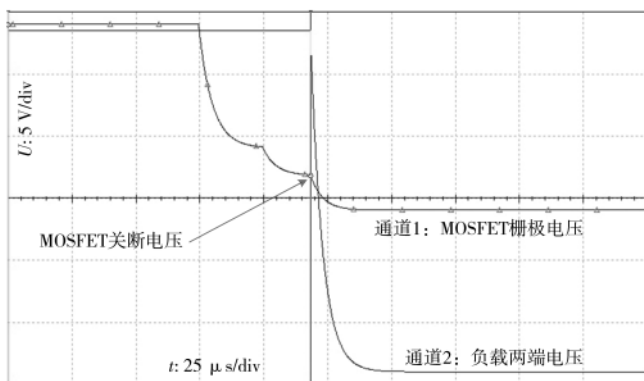


图9 负载短路状态仿真图

通过对SSPC电路的仿真,降栅压保护电路在负载过流或短路时,按照设计实现了对MOSFET功率管栅极电压的控制,有效地防止误动作发生,降低了受保护功率管关断时产生的感应电压,使受保护功率管得到高可靠性的保护。

#### 4 结论

本文阐述了基于电压比较器的SSPC驱动保护电路原理,设计了降栅压保护电路,整个电路结构简单、体积

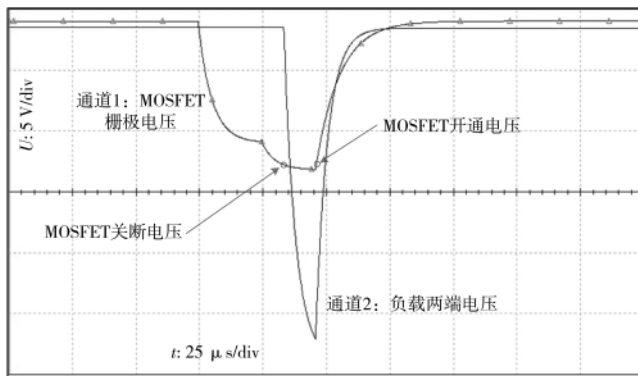


图10 负载过流后恢复正常状态仿真图

小、精度高、抗干扰能力强、栅源极电压 $V_{GS}$ 设置灵活、降栅压速度可调、电路调试简单,实现了对MOSFET栅极电压的控制。经过电路分析和仿真实验,结果表明降栅压保护电路可以在 $45\mu s$ 内对短路负载进行关断保护。降栅压保护电路适合在某些环境恶劣且精度要求高的场合下使用。

#### 参考文献

- [1] 潘江江,李海伟,张翔,等.基于SSPC模块化小型智能配电设计研究[J].电子测量技术,2016,39(10):140-144.
- [2] 郑先成,张晓斌,高朝晖,等.航天器新型固态配电技术研究[J].宇航学报,2008,29(4):1430-1434.
- [3] 张建峰,杨桢,房玲.船舶直流固态功率控制器技术研究[J].现代电子技术,2015,38(13):125-128.
- [4] 徐博宁,白静,张鹏,等.自行火炮系统中固态功率控制器的应用[J].火炮发射与控制学报,2012,2(6):17-20.
- [5] 张兴,赵永瑞,杨熙,等.低压大电流系统短路保护设计[J].电子技术应用,2014,40(2):56-58.
- [6] 吴海富,张建忠,赵进,等.SiC MOSFET短路检测与保护研究综述[J].电工技术学报,2019,34(21):4519-4528.
- [7] 刘红奎,相征,罗辉果.基于动态电位判断的负载状态在线检测技术研究[J].电子测量与仪器学报,2012,26(7):610-615.
- [8] 杨冬平,王莉,江登宇.降栅压技术在MOSFET驱动中的应用[J].电力系统及其自动化学报,2010,19(1):25-28.
- [9] 杜祥,陈权,王群京,等.基于电流反馈的IGBT有源栅极驱动方法研究[J].电子技术应用,2018,44(4):33-36.
- [10] 张海亮,陈国定,夏德印.IGBT过流保护电路设计[J].机电工程,2012,29(8):966-970.
- [11] 文阳,杨媛,高勇.基于2SC0535的大功率IGBT驱动保护电路设计[J].电子技术应用,2014,40(9):34-26,40.
- [12] 刘文静,王民慧.电流检测方法研究[J].传感器世界,2012(9):28-31.

(收稿日期:2021-12-04)

#### 作者简介:

刘红奎(1985-),通信作者,男,硕士,工程师,主要研究方向:综合航空电子信息系统,E-mail:liu020911@qq.com。



扫码下载电子文档



## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所