

# 直流固态继电器与功率控制器的对比研究

阳 辉, 张玉林, 张晋源

重庆城市科技学院电气工程与智能制造学院 重庆

**【摘要】**随着宇航、新能源汽车和军事武器等应用领域的快速发展, 电子设备的数量和复杂性大大增加, 同时为了增大配电系统的负载兼容性和带载能力, 传统的机械式继电器和常规式断路器已经无法满足供电系统的高可靠配电要求。具有继电器通断功能和断路器保护功能的智能固态功率控制器应运而生。本文对比分析了直流固态继电器和固态功率控制器的开关特性和保护特性, 最后通过实验验证直流固态功率控制器的基本功能。

**【关键词】**直流固态功率控制器; 固态继电器; 开关特性; 保护特性

**【基金项目】**蓄冷式冷藏厢结构传热机理及优化设计研究项目 (2022yc-jckx20015); 基于离散型制造系统 MES 系统研究与应用 (KJZD-K202202502)

**【收稿日期】**2024 年 4 月 14 日

**【出刊日期】**2024 年 6 月 23 日

**【DOI】**10.12208/j.jeeaa.20240002

## A comparative study of DC solid-state relays and power controllers

Hui Yang, Yulin Zhang, Jinyuan Zhang

School of Electrical Engineering and Intelligent Manufacturing, Chongqing City University of Science and Technology, Chongqing

**【Abstract】** With the rapid development of aerospace, new energy vehicles, military weapons and other application fields, the number and complexity of electronic equipment has increased greatly. Meanwhile, in order to increase the load compatibility and carrying capacity of distribution system, the traditional mechanical relay and conventional circuit breaker have been unable to meet the high reliable distribution requirements of power supply and distribution system. Intelligent solid-state power controller with relay on/off function and circuit breaker protection function came into being. In this paper, the switching characteristics and protection characteristics of DC solid-state relay and solid-state power controller are compared and analyzed. Finally, the basic functions of DC solid-state power controller are verified through experiments.

**【Keywords】** DC Solid-State Power Controller; Solid State Relay; Switching Characteristics; Protective Properties

### 1 引言

传统的机械式开关采用触点闭合和断开来控制功率的流动, 但是机械触点会在接通和断开的过程中产生电弧使得触点可靠性降低<sup>[1-2]</sup>。具有导通电阻低、无晶体管二次击穿和 IGBT 电流拖尾等优势的功率 MOSFET 通常作为固态功率控制器 (Solid State Power Controller, SSPC) 的核心功率器件。功率 MOSFET 使得 SSPC 成为无机械触点、无电弧、响应速度快、高可靠性和寿命长的固态配电开关<sup>[3]</sup>。

本文分析了当前直流固态继电器 (Solid State

Relays, SSR) 开通容性和感性负载时主功率 MOSFET 承受的电压电流应力大、短路保护致使熔断器熔断不易恢复和电路保护单一等问题, 从而对比分析了 SSPC 的通断和保护功能。通过理论分析和实验对设计的 SSPC 加电断电、异常保护等功能进行了验证与测试。

### 2 直流 SSR 与 SSPC 的功能框图

固态开关作为固态配电技术的主要功率控制器件, 固态配电器中普遍使用的是 SSR 与 SSPC。

#### 2.1 直流 SSR 的系统结构

直流固态继电器是早期固态配电系统中常用的配电开关, 因其结构简单、成本低廉被广泛应用于数控机械和信号灯等设备<sup>[4]</sup>。SSR 功能框图如图 1 所示。

SSR 主要由隔离光电耦合器、驱动放大电路和功率开关管回路三部分组成<sup>[5]</sup>。在 SSR 控制端 A<sub>1</sub> 和 A<sub>2</sub> 之间加入控制信号后经过光耦合器的隔离传输到驱动放大电路, 从而驱动 Q<sub>1</sub> 闭合和断开功率输入到负载的路径, 控制电能的流动。

### 2.2 直流 SSPC 的系统结构

直流 SSPC 由主功率电路、电压电流调理电路、驱动与保护电路、控制电源模块、硬线操控电路和数字 DSP 控制电路等组成, 基本功能框图如图 2 所示。

SSPC 的慢通断实现直流电从端子 VLINE 流过 SSPC, 再从端子 VOUT 流出后供电给负载。负载电压、负载电流、母线电压经过采样后传输到硬件部分实现闭环驱动控制、开环降栅压控制和短路保护等功能, 同时也传输到 DSP 进行监测进而实现 I<sup>2</sup>T 反时限保护、过欠压保护等功能。

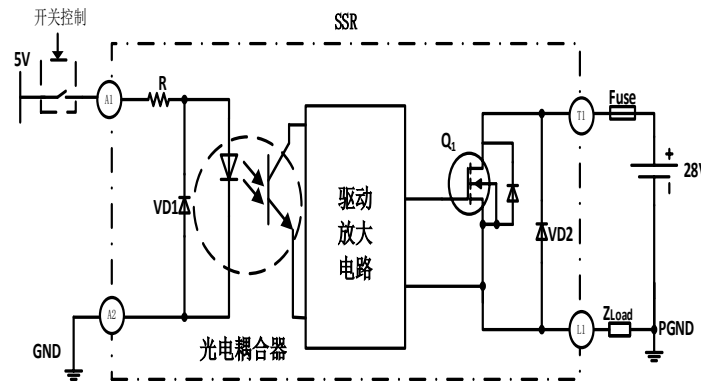


图 1 SSR 应用结构框图

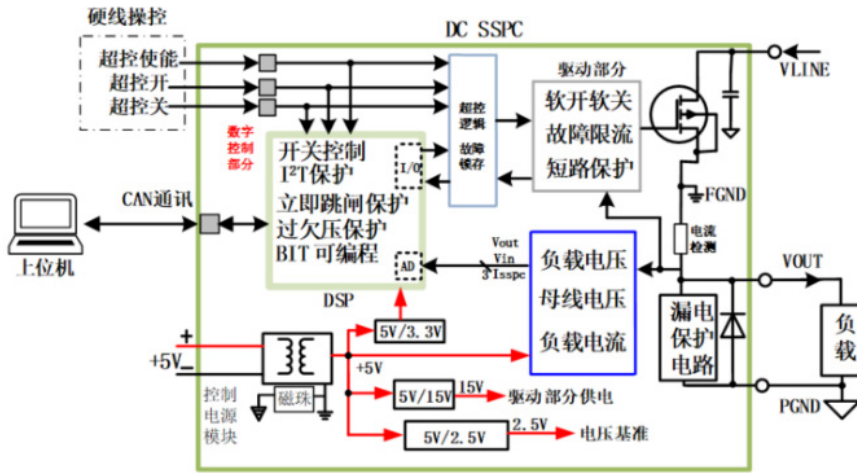


图 2 直流 SSPC 的功能框图

## 3 直流 SSR 与 SSPC 的性能

### 3.1 开关特性

直流 SSR 与 SSPC 均采用 MOSFET 作为主控开关管, 因驱动控制策略的不同导致 SSR 与 SSPC 接通/关断负载时出现开关特性的差异。

#### 3.1.1 SSR 开关特性

直流 SSR 通常采用硬开通和硬关断的方式控制主功率 MOSFET 接通负载。容性负载对 dv/dt 比较敏感, SSR 在较短时间开通容性负载时会在功率回路产生较大的电流冲击。利用仿真软件建立 SSR 的电路模型并开通额定 28V5A 阻容负载(5.6Ω//5μF)的仿真波形如图 3 所示。图 3 显示当 SSR 硬开通容

性负载时, 负载电流冲击到 43.4756A, 电流值远大于 5A 额定负载电流, 易造成主功率管承受较大的电流应力和熔断器误动作。

同理, 在硬关断感性负载时, 电感对 di/dt 比较敏感, 功率连接线的寄生电感将会在快速关断的过程中产生反电势和电源电压同时叠加在功率管两端使得功率管承受较大的电压应力而击穿。关断时功率回路示意图如图 4 所示。

### 3.1.2 SSPC 开关特性

为了解决 SSR 开关应力大的问题, SSPC 采用

闭环斜坡驱动方式。闭环驱动控制框图如图 5 所示。闭环斜坡驱动的控制的方式可以实现功率管的软开通和软关断<sup>[6]</sup>, 通过搭建仿真模型得到开通容性负载(5.6Ω//5uF)和关断阻感负载(5.6Ω串联 1.6mH)的波形如图 6 和图 7 所示。

图 6 显示 SSPC 和 SSR 带相同的容性负载时, 负载电流只有很小的冲击。图 7 显示 SSPC 关断阻感负载时功率管电压呈现斜坡形式上升, 承受较小的电压应力。闭环驱动开关的方式牺牲部分开通和关断时间来提高 SSPC 的开关性能。

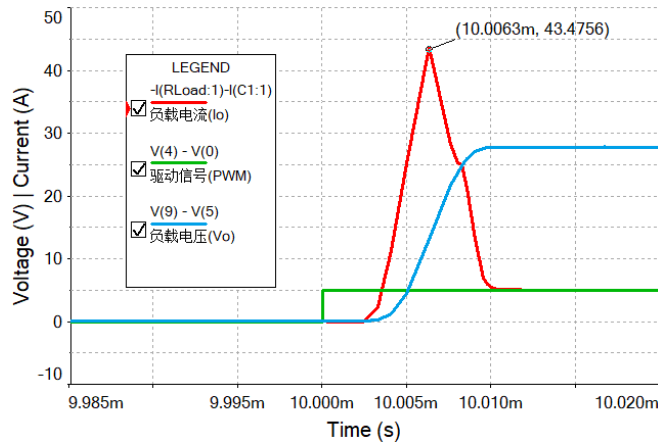


图 3 SSR 开通容性负载波形

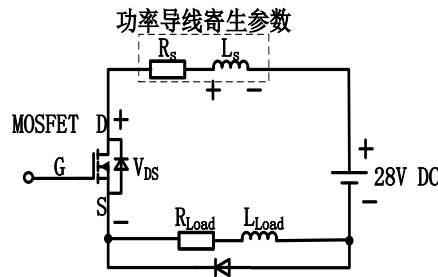


图 4 阻感负载关断回路示意图

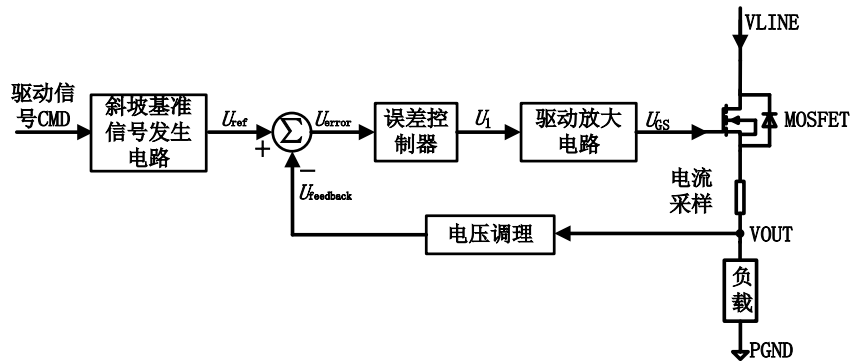


图 5 闭环斜坡驱动控制结构框图

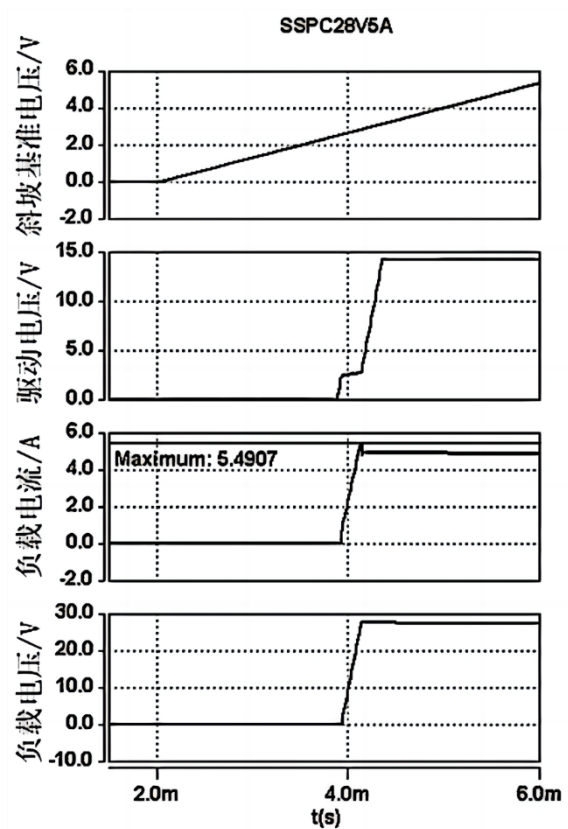


图6 SSPC 开通容性负载波形

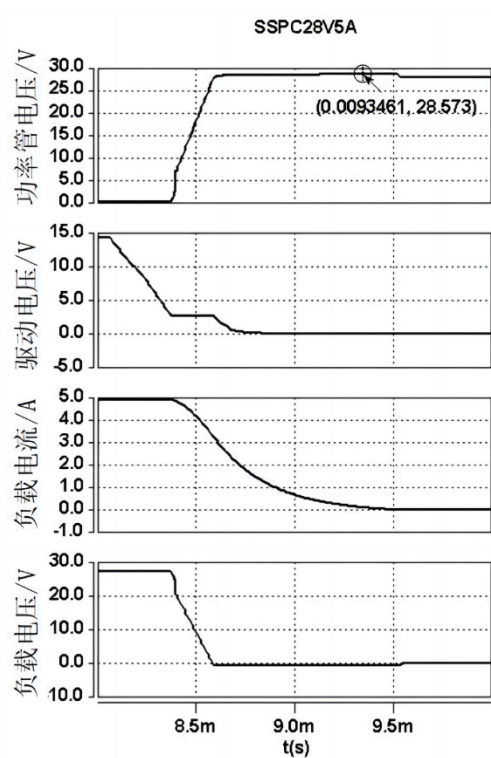


图7 SSPC 关断阻感负载

### 3.2 短路保护特性

SSR 电路结构简单, 它自身不具备短路保护功能。应用 SSR 进行配电时需在功率回路中串接断路器防止短路电流过大造成 SSR 等设备的损坏。

负载出现短路故障时, 负载电流会过载为额定负载电流的数倍, 易造成 SSPC 出现过流热失效<sup>[7]</sup>。功率 MOSFET 在栅源电压的控制下漏源阻抗可以实现从 mΩ 到 MΩ 的变化, SSPC 利用 MOSFET 这一特性实现配电系统发生短路故障时的保护。短路保护的框图如图 8 所示。

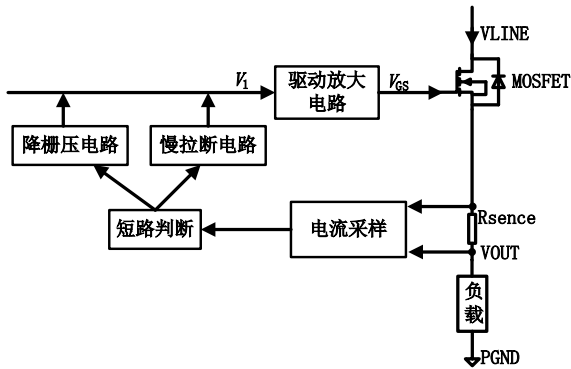


图 8 短路保护控制框图

当负载电流达到额定电流的过载倍数时触发短路信号有效, 将驱动电压降低到一个限定值, 功率管的阻抗增大进而限制负载电流持续增大。为了减少功率导线寄生电感在快速关断短路大电流时产生的电势在功率管两端产生电压冲击, 在电流被限制后通过短路慢拉断电路逐渐减小功率管的驱动电压  $V_{GS}$  使得功率管可靠隔离短路故障。

### 3.3 直流 SSPC 的其它特性

为了满足复杂配电系统的配电要求, SSPC 需要在 SSR 的基础上具有更多可靠的特性。

#### 3.3.1 高可靠漏电钳位保护特性

在配电开关关断纯容性负载时, 负载电容上的电荷无泄放通路, 需要提供额外的泄放通路来对电容上的电荷电流进行释放, 以保证操作人员 and 用电设备的安全。与此同时, 固态开关中采用功率 MOSFET 半导体器件, 与传统的机械断路器不同的是, 在关断情况下存在漏电流, 并且随着母线电压的增大, 漏电流增大。漏电流会逐步在容性负载端积累电荷, 从而带来安全隐患, 因此针对上述问题可在 SSPC 中设计可行的漏电钳位保护电路。

因此提出一种自取电方式, 利用母线电压提供

漏电保护功率管  $M_2$  的驱动电压, 电路如图 9 所示。

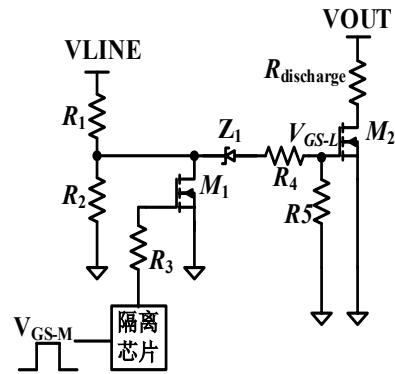


图 9 高可靠漏电钳位保护电路

通过控制  $M_2$  通断控制提供泄放和钳位功能的  $R_{discharge}$  接通、退出功率回路。 $M_2$  功率管驱动电压由功率输入电压  $R_1$  与  $R_2$  的分压提供。分压应满足:

$$V_{GS-Q2-th} < \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times VLINE < V_{GS-Q2-max} \quad (1)$$

实现不加控制电也可通过  $R_{discharge}$  和  $M_2$  提供漏电保护的功能。稳压管  $Z_1$  用于保护  $M_2$  以防止输入电压浪涌击穿功率管  $M_2$ , 失去漏电保护电路的可控能力。当 CMD 给出高电平开通信号时, SSPC 导通, 此时应关闭漏电保护,  $M_1$  导通, 将  $M_2$  栅极电压钳位至 0V, 关闭漏电保护功能。

为了防止母线电压存在时 SSPC 主功率管和漏电保护电路功率管出现直通, 两者的驱动信号需要注入死区时间  $\Delta t_1$  和  $\Delta t_2$ , 驱动信号的控制时序图如图 10 所示。

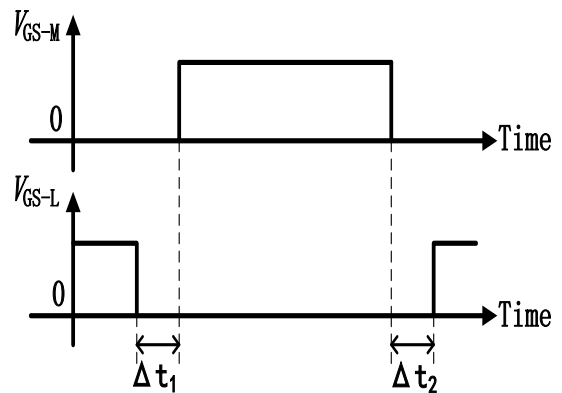


图 10 驱动信号时序控制图

#### 3.3.2 可编程 I<sup>2</sup>T 反时限过流保护特性

功率回路由导线将母线、SSPC 和负载三者连接起来, 导线扮演着重要的作用。当导线中有电流流

过时会产生较大的热量并向周边环境散发。功率导线中流过额定电流  $I_e$  时导线产生的热量和向环境散发的热量达到动态平衡, 导线不会因为热量累积过多而发生安全事故。负载发生部分短路等故障引起负载电流过载, 较大的负载电流在很短时间内使得导线产生很多热量, 导线温度达到极限, 反时限过载保护是 SSPC 解决导线过热的必须保护功能。

反时限  $I^2T$  保护是一种延时跳闸保护<sup>[8]</sup>。负载电流过载情况越严重, 延时跳闸保护的时间越短。SSPC 反时限保护特性的一般数学方程如式 (2) 所示。

$$t = \frac{A}{\left(\frac{I}{I_e}\right)^2 - B^2} \quad (2)$$

式 (2) 中  $I$  为实时负载电流,  $I_e$  为额定电流,  $A$  和  $B$  为可变常数。

反时限保护由数字信号处理器 (Digital Signal Processing, DSP) 发出控制保护信号<sup>[9-10]</sup>。将式 (2) 进行离散化处理 and 等式变换得到如下的等式 (3)。

$$\sum_{n=0}^{M-1} [I_{(n)}^2 - B^2 * I_e^2] = \frac{A}{\Delta T} I_e^2 \quad (3)$$

当式 (3) 中左边的累加值大于右边的阈值时, DSP 发出反时限保护信号关断 SSPC, 过流故障指示信号从 0 变为 1。反时限保护数字保护流程图如图 11 所示。

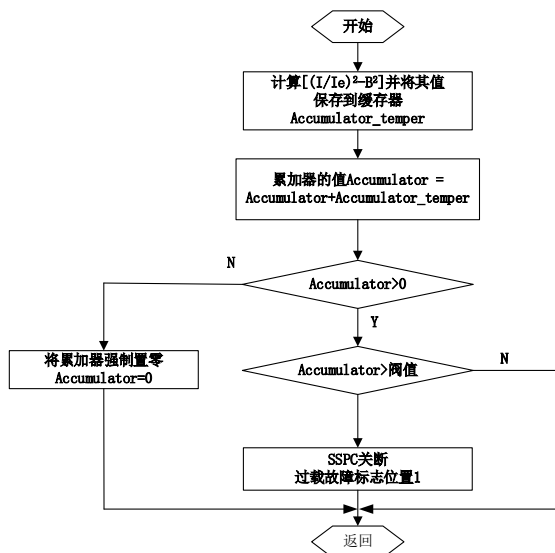


图 11 反时限数字保护流程图

### 3.3.3 母线过欠压保护特性

功率母线通过 SSPC 加在负载两端, 母线电压出现电压过大或过小都会对 SSPC 和负载带来影响。母线过压和欠压都是采用定时限的保护方式。过压保护主要是防止母线电压长时间过大击穿 SSPC 的功率管, 欠压保护用于防止负载长时间工作在欠压状态下引起的故障。

通过高精度母线电压采样电路将母线电压送往 DSP 进行处理, 当母线电压大于上限阈值或小于下限阈值达到设定的时间后, DSP 发出控制信号关断 SSPC。

## 4 直流 SSPC 样机实验验证

### 4.1 SSPC 样机性能指标

SSPC 样机设计的主要性能指标如表 1 所示。

### 4.2 正常开通关断验证

通过实验波形图 12 和图 13 可知, SSPC 能够较线性正常开通容性负载和关断感性负载, 避免了 SSPC 承受较大的开关应力。

### 4.3 短路保护验证

短路故障是系统故障中比较严重的故障, 当故障电流达到 30A(6I<sub>e</sub>)时, 开环降栅压电路工作, SSPC 中功率管的驱动电压 V<sub>GS</sub> 下降, 随后短路慢拉断电路实现驱动电压 V<sub>GS</sub> 的可靠拉低。整个短路保护过程消耗的时间为 60us。

### 4.4 漏电保护验证

开通纯容性负载后, 负载电流恒为 0, 当 SSPC 中功率管驱动信号 V<sub>GS</sub> 下降后电容上的电荷通过漏电保护支路进行泄放, 负载电压呈现指数形式下降, 最终将负载电压控制在人体安全电压以下。

### 4.5 反时限保护验证

在额定电流的基础上, 利用空气开关切换负载到过载状态。通过测试, 将一些定点的跳闸延时时间的实验值列于下表 2 中, 为便于比较, 表 2 中同时给出了这些定点的理论值。

电流过载测试波形如图 16、图 17 和图 18 所示。

从实验波形图 16、图 17 和图 18 可知, SSPC 能够通过 DSP 正确地实现反时限过流保护。

### 4.6 母线过欠压保护验证

当母线输入电压 V<sub>LINE</sub> 的电压值大于过压阈值或小于欠压阈值时, SSPC 做出保护动作, 保证配电系统的安全性。

过压/欠压保护实验波形如图 19 和图 20 所示。  
在 SSPC 稳态开通的情况下, 改变母线输入电压, 使得母线电压耗时 800us 从额定值 28V 陡升为

32V, 然后在 6.4ms 后拉低 SSPC 开关管的驱动信号使得 SSPC 可靠关断实现过压保护。对于母线欠压时, SSPC 同样可以可靠的关断。

表 1 28V5A 直流 SSPC 性能参数指标

参数	表示符号	性能指标
母线电压保护上限/下限	VLINE	31V/25V
额定负载电压	VOUT	28V
额定负载电流	Ie	5A
开通时间	Ton	<1ms
关断时间	Toff	<1ms
短路保护过载倍数/保护时间	Ishort	6 倍/小于 100us
反时限保护过载倍数	Iover	1.5-6 倍

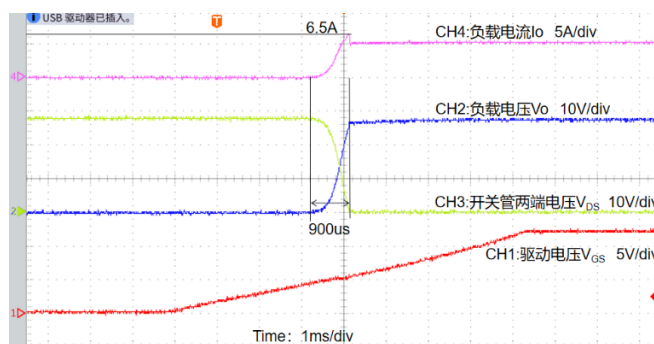


图 12 SSPC 正常开通阻容负载波形

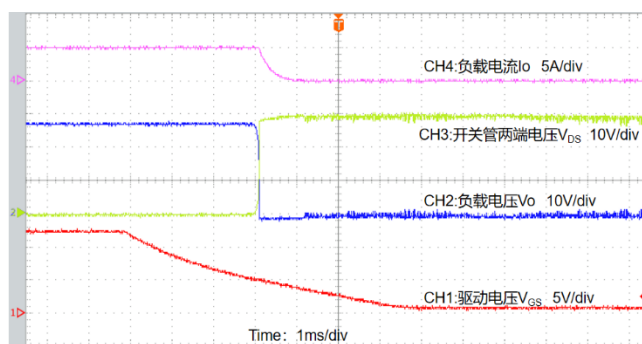


图 13 SSPC 正常关断阻感负载波形

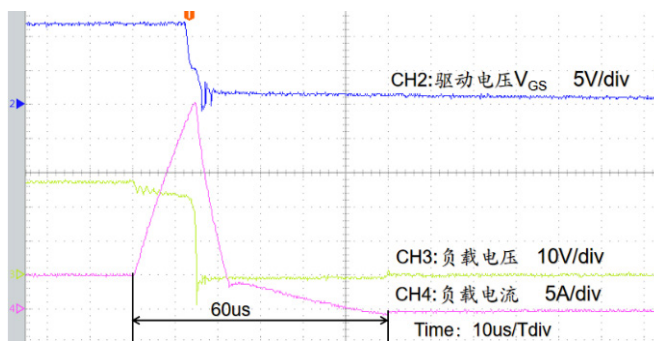


图 14 SSPC 短路保护波形

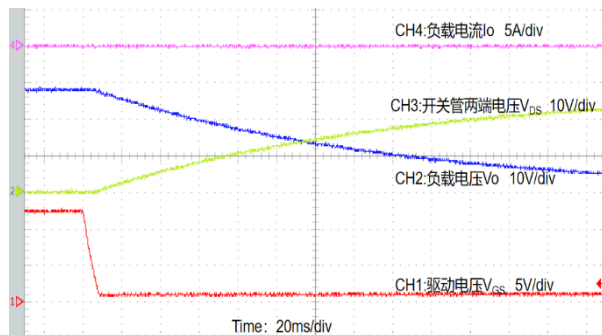


图 15 漏电保护电路工作波形

表 2 反时限保护测试数据

过载电流	过载倍数	理论保护时间	实测保护时间	相对误差
9.32A	1.8 倍	3.14574s	3.10s	1.45%
13.6A	2.7 倍	1.09811s	1.12s	1.99%
16.8A	3.4 倍	0.654977s	0.64s	2.29%

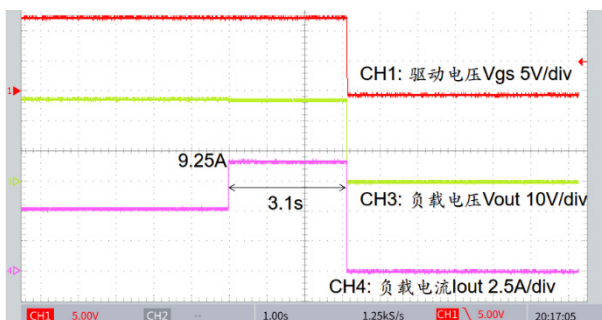


图 16 1.8 倍过载保护实验波形

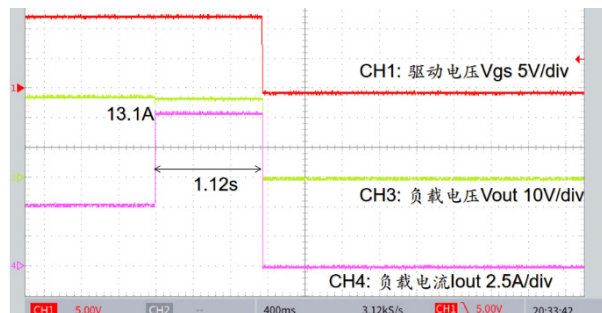


图 17 2.7 倍过载保护实验波形

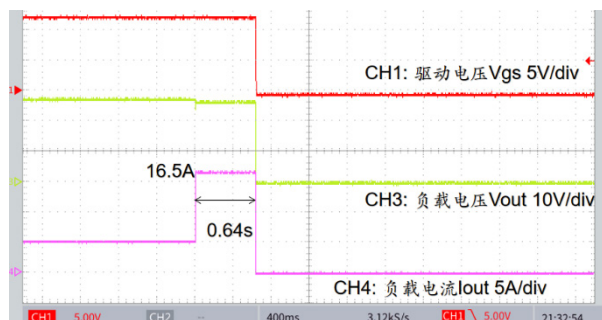


图 18 3.4 倍过载保护实验波形



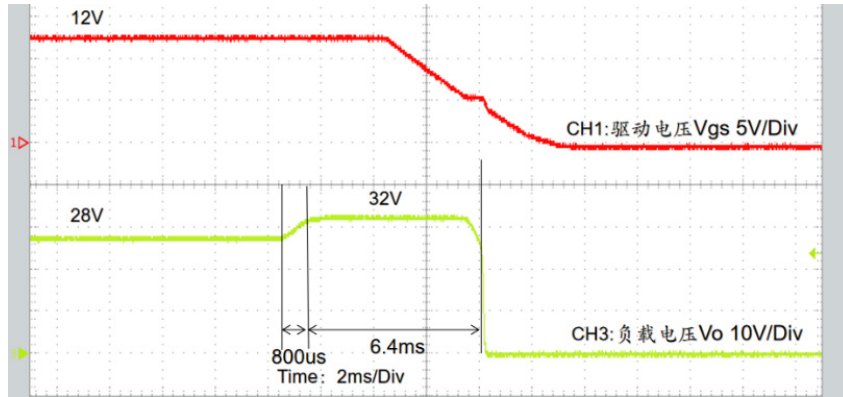


图 19 过压保护测试波形

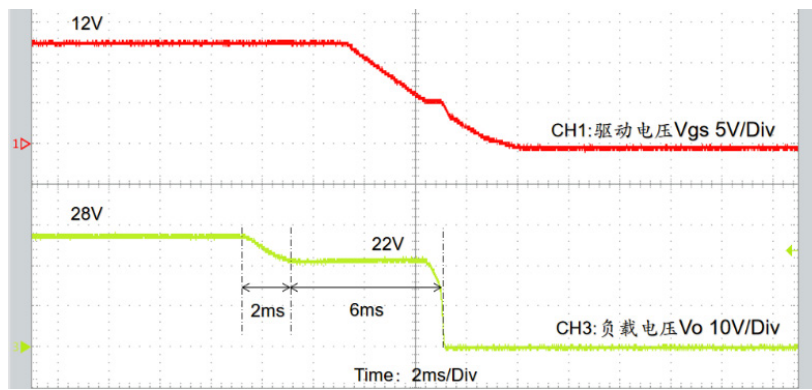


图 20 欠压保护测试波形

表 3 SSR 与 SSPC 性能对比

配电器类型		SSR	SSPC
功能特点			
共同点		功率开关管均用 MOSFET; 无电弧; 无触点; 无噪声	
驱动方式		光耦驱动	图腾柱驱动
驱动隔离方式		光耦隔离	磁耦隔离
开关速度		硬开硬关	高性能慢开通、慢关断
过流保护		需外配熔断器	具有故障限流; 快速短路保护; I <sup>2</sup> T 反时限保护功能
过欠压保护		过压易击穿/欠压无保护	过欠压定时限关断
不同点	集成度	低	高
	成本	低	高
	结构复杂度	简单	复杂
其他功能		-	BIT 自检功能 操控控制功能 漏电钳位保护功能 智能微机控制功能

5 SSR 与 SSPC 对比

SSR 在某些简单配电场合也有应用, 但是随着配电系统的复杂性和更高的配电要求, SSPC 将会逐渐取代 SSR 占据主导地位。

参考文献

[1] Hayes J, George K, Killeen P. Bidirectional, SiC module-based solid-state circuit breakers for 270 Vdc MEA/AEA

- systems[C]. Wide Bandgap Power Devices & Applications, San Diego: IEEE, 2016: 70-77.
- [2] 吴燕茹,张佳宁,张金刚,王晓君,郭照峰.固态配电技术在航天器中的工程应用[J].计算机测量与控制,2018,26(01): 213-215+225.
- [3] 谢拴勤,张永茂,何兵兵,宋岩.航空新型固态配电技术研究[J].计算机测量与控制,2012,20(07):1980-1982+1998.
- [4] 王洪玮,孔祥东,齐乐.飞机固态配电系统现状及发展趋势[J].天津科技,2017,44(12):47-50.
- [5] 甘发润.直流固态继电器原理及应用[J].机电元件,1992(02):47-51.
- [6] 亢洁,李玉婷.一种高压直流固态功率控制器的设计[J].电脑知识与技术,2017,13(24):198-201.
- [7] Gregory I R, Joshua S C, Vietson. Nguyen M. SSPC for soft start of DC link capacitor[P]. U.S.Patent 0286141, 2011-11-24.
- [8] 王大龙,严桂荣,宋小超,马立伟,李朗男,张丞.270 V 高压直流固态功率控制器软启动电路的设计[J].测控技术,2020,39(10):87-92.
- [9] 叶雪荣,张开新,孙祺森,翟国富,丁新.基于 FPGA 的固态功率控制器反时限过流保护技术[J].电器与能效管理技术,2019(01):7-11.
- [10] 张大为,姜静,刘迪.基于 DSP 的固态功率控制器的设计[J].航空计算技术,2012,42(04):117-119+123.
- 版权声明:** ©2024 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



**OPEN ACCESS**