基于固态功率控制器的反时限过流保护研究

陈群[1]，周洁敏[1]，洪峰[2]，郑罡[1]，习志扬[2]

（1.南京航空航天大学 民航学院，江苏 南京 211106；
2.南京航空航天大学 电子信息工程学院，江苏 南京 211106）

摘要：集成了断路器、继电器等传统配电器件的功能的固态功率控制器，是全电化航空航天器配电系统的核心器件。其中反时限过流保护技术是固态功率控制器的关键技术之一，对配电系统的性能指标及可靠性非常重要。介绍了一种新型反时限过流保护电路模型，解决反时限保护的实现，并采用Saber仿真获得最佳电路参数，并对反时限过流保护特性进行试验测试，验证了方法的有效性。

关键词：反时限过流保护；固态功率控制器；反时限过流保护曲线

中图分类号：TM56　　**文献标识码：**A　　**DOI：**10.19457/j.1001-2095.dqcd23877

Research on Inverse Time Over-current Protection Based on Solid State Power Controller

CHEN Qun[1]，ZHOU Jiemin[1]，HONG Feng[2]，ZHENG Gang[1]，XI Zhiyang[2]

（1. *Civil Aviation College*，*Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*，*Nanjing* 211106，*Jiangsu*，*China*；2. *Electronic Information Engineering College*，*Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*，*Nanjing* 211106，*Jiangsu*，*China*）

Abstract: The solid-state power controller，which integrates the functions of traditional power distribution devices such as circuit breakers and relays，is the core component of the all-electric aerospace vehicle power distribution system. Among them，the inverse time overcurrent protection technology is one of the key technologies of solid-state power controllers，which is very important for the performance indicators and reliability of the power distribution system. A new type of inverse time overcurrent protection circuit model was introduced，in which the inverse delay protection was realized. Simulation was also made using Saber software to obtain the best circuit parameters. In the end，experimental tests on the inverse time overcurrent protection characteristics was conducted to verify the effectiveness of the method.

Key words: inverse time overcurrent protection；solid state power controller（SSPC）；inverse time overcurrent protection curve

随着航空航天器朝着多电化/全电化方向发展，其中用电设备的数量急剧增加，功率需求越来越大，对配电系统的性能指标及可靠性提出了更高的要求。固态配电技术的核心器件——固态功率控制器（solid state power controller，SSPC），用晶体管电子器件替代机械开关、继电器以及断路器等，使SSPC具有开关速度快、不产生电弧、内部无活动原件、无机械磨损、过载保护精度高、电气隔离以及抗干扰能力强等众多优点。其中反时限过流保护是实现高性能配电及高可靠性的关键技术之一。

SSPC的过流保护特性需要与负载过热特性相匹配，常采用负载的I^2t反时限过流保护曲线模拟出负载的温度变化规律，SSPC就可以在负载过载时及时地从电网上剥离负载，从而起到保护配电系统。

国内外在SSPC上实现反时限过流保护的方法主要有两种，分别是算法研究[1]与硬件电路相结合的方法实现。算法研究通常将“热记忆”与I^2t反时限保护曲线相结合，进行热量累计，并根据保护时间间隔的时长来判断是否需要考虑热量累积所产生的影响，从而更加准确的实现反时限过流保护。有采用复杂可编程逻辑控制器件（complex programmable logic device，CPLD）[2]实现了SSPC的反时限过流保护技术。另外还有文献报道采用基于现场可编程门阵列（field-program-

作者简介：陈群（1996—），男，硕士，Email：CHEN1122@nuaa.edu.cn

mable gate array，FPGA）[3]实现SSPC的反时限过流保护技术，通过热量累积计算，同时进行模拟散热过程，将累积的热量乘以采样次数与热量阈值进行比较，大于热量阈值则迅速进行跳闸保护，小于热量阈值则进入下一个采样周期进行下一轮热量累积计算。还有通过Matlab/Simulink软件完成对反时限过流继电器的仿真建模[4]。在硬件实现方法方面，文献[5]主要介绍了通过反比例反函数拟合法来实现过流保护电路，这种方法的优点在于实现“热记忆保护”比较容易，但实现反时限的关键元件电阻与电容会由于温度特性[6]受限，导致拟合出的I^2t曲线产生偏差，但保护曲线是固定的。如果仅依靠元器件性能提高不仅会导致生产周期变长及成本增加，甚至无法满足设计要求。通过分析导线的热模型[7-9]以及对固态功率控制器的行为建模[10]，用一个RC电路模拟导线发热与散热过程，然后通过对电流的采样以及信号的处理来实现反时限过流保护，但此模型无法实现对动作时间的调整来满足不同情况的需求，在本文中此问题可以得到有效的解决。还有通过对SiC MOSFET源极的电感电流[11]的大小检测以及判断，从而实现对器件的过流保护功能。

本文采用一种新型的反时限电路，实现了SSPC的反时限过流保护，通过调节放大器增益电阻的方法调整动作时间，以满足不同的需求。归纳总结反时限过流保护曲线的类别，根据保护曲线进行SSPC设计方案研究，利用建模和仿真等手段优化设计参数，并研制SSPC试验电路，进一步验证设计方案的有效性。

1 反时限过流保护曲线

反时限过流保护技术是实现SSPC保护负载、实现可靠配电的核心技术。在固态功率控制器应用中，反时限过流保护常用于负载发生故障时，是介于短路保护电流等级之下的保护方式，且随着负载电流的增大，保护时间自动减少，因此将其用于固态功率控制器中可提高可靠性，反时限过流保护通用数学模型为

$$t = \frac{kt_p}{(I/I_p)^r - 1} \tag{1}$$

式中：I为电路输出电流；I_p为保护电流动作值；k为常数，量纲为时间；r为常数；t_p为定义的时间常数。

式（1）表明反时限过流保护时间t随着电路中的输出电流变化。当$I/I_p < 1$时，此时$t < 0$，反时限保护不动作；当$I/I_p = 1$时，此时$t = \infty$，反时限保护不动作；当$I/I_p > 1$时，此时$t > 0$，反时限保护开始工作，随着电路中的电流输入值的增大，保护时间t越小。按照IEC标准，当r与k取不同值，分为三种不同类型的反时限保护，如表1所示。

表1 不同情况下的反时限过流保护曲线的k，r

Tab.1 k, r of inverse time overcurrent protection curve under different conditions

特性曲线	k	r
一般反时限曲线	0.14	0.02
非常反时限曲线	13.50	1.00
超反时限曲线	80.00	2.00

根据SSPC所带负载的不同，选择不同的反时限曲线。一般情况下，选用一般反时限曲线（r = 0.02）；当输入、输出电流变化较大时，选用非常反时限曲线（r = 1.00）；当表示发热与电流的关系，选用极度反时限曲线（r=2.00），常用于反映过热状态的保护。本文取用r=2.00的情况，当kt_p=1时，利用Matlab得到反时限过流保护曲线如图1所示。

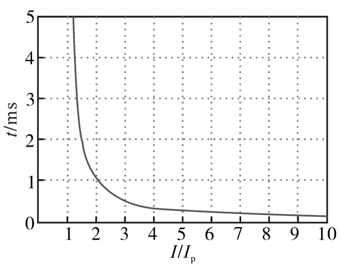


图1 反时限过流保护曲线

Fig.1 Curve of inverse time overcurrent protection

2 固态功率控制器反时限过流保护模型

2.1 固态功率控制器组成原理

固态功率控制器由主功率电路、反激电源电路、保护电路、控制电路以及电流电压采样电路组成，如图2所示。

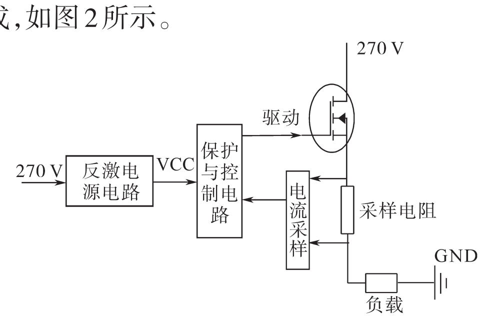


图2 固态功率控制器原理图

Fig.2 Schematic diagram of solid-state power controller

图2中，保护与控制电路要完成的是对主电路的MOSFET的通断、短路保护、负载实时状态的检测以及反时限过流保护的实现。电压、电流采

样电路完成对主电路的电流、电压采样,为后续控制保护电路提供实时的参考信号。辅助电源电路采用的是反激电路,为控制保护电路提供供电电源,输入电压为270 V,输出电压为15 V。

2.2　RC充电模型分析

为了模拟在负载超载的情况下,固态功率控制器应具有反时限过流保护行为,可以用"热力学第一定律"建立导线热模型的微分方程,具体如下:

$$KE_w(t)+\mathrm{d}E_w(t)=R_wI_w^2(t) \tag{2}$$

式中:K为时间常数的导数,与导线的材料、环境温度以及散热情况有关系;E_w为导线中的热量,相当于导线温升,单位W;R_w为导线电阻,单位Ω;I_w为流过导线的电流值,单位A。

将式(2)微分方程求解可得:

$$E_w(t)=\int_0^t R_wI_w^2(\tau)\mathrm{e}^{-K(1-\tau)}\mathrm{d}\tau+E_w(t=0)\mathrm{e}^{-Kt} \tag{3}$$

图3为RC充电电路,由图3可知:

$$I_{eq}(t)=I_1(t)+I_2(t) \tag{4}$$

即

$$I_{eq}(t)=\frac{U_c}{R}+C\frac{\mathrm{d}u_c}{\mathrm{d}t} \tag{5}$$

式中:U_c为电容两端电压;C为电容值;R为电阻值;I_{eq}为流入的电流大小。

解此方程可得:

$$U_c(t)=\frac{1}{C}\int_0^t I_{eq}(\tau)\mathrm{e}^{-\frac{1}{RC}(1-\tau)}\mathrm{d}\tau+U_c(t=0)\mathrm{e}^{-\frac{1}{RC}} \tag{6}$$

比较式(3)和式(6)可知,这两个式子具有相同的结构,所以可以通过用RC放电过程来有效的模拟电路的发散热过程,以此来研究反时限过流保护的工作形式。

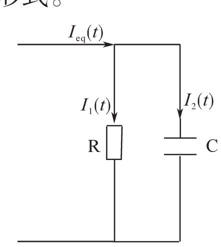


图3　RC充电电路图

Fig.3　Charging circuit diagram of RC

2.3　反时限保护电路分析

反时限保护的意义就是在灵活保护电路的同时又能在保护电路不被烧毁的情况下尽量的延长主电路的工作时间,当电路电流很大的时候,又能加速主电路的关断。图4为反时限保护硬件电路模型图。

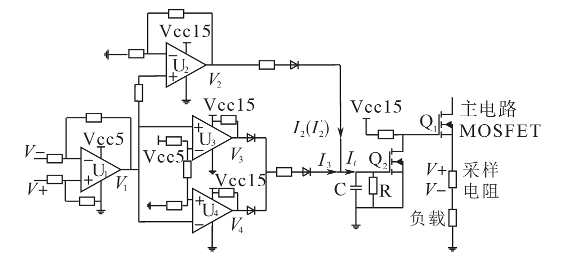


图4　反时限保护硬件电路模型图

Fig.4　Inverse time protection hardware circuit model diagram

图4中,U_1,U_2为运算放大器,型号分别采用的是tlc2201和lm158,输出分别用V_1,V_2表示;U_3,U_4为比较器,型号采用的是lm193,输出分别用V_3,V_4表示。其中运算放大器U_1将采样电阻两端的电压信号放大,输出V_1,并作为运算放大器U_2的正相输入、比较器U_3的正相输入、比较器U_4的反相输入。当SSPC主功率电路在正常状态下工作时,此时,负载电流为正常值,比较器U_3,U_4的逻辑都为低,输出都为低电平,只有运算放大器U_2输出电压V_2,为电容C充电,此时电容C的电压低于MOSFET Q_1的导通电压,Q_1不导通,MOSFET Q_2保持导通状态,SSPC正常工作,此目的是为了使电容C两端保持一个低电压,当SSPC发生故障导致电流过大时,电容C能够迅速充电到Q_1的导通电压,减少充电时间。

当SSPC发生故障,或是在超负载的状态下工作时,此时主功率电路电流上升,运算放大器U_1的输出V_1增大,直到比较器U_3的正相输入大于反相输入,逻辑为高,输出V_3为高电平15 V,此时V_2,V_3共同给电容C充电,当电容C电压达到Q_1的导通电压U_{on},Q_1导通,Q_2栅极电压被拉低成0,Q_2关断,此时主功率电路为断路,SSPC被保护,停止工作。当SSPC发生故障时,负载电流越大,运算放大器U_2的输出V_2也越大,电容C充电到Q_1导通电压的时间也就越短,从而达到反时限过流保护的效果。

SSPC正常工作时,U_2支路电流为I_2,流入并联RC网络的电流I_2,电容C电压为V_2,当处于过流状态时,U_2输出电压增大,支路电流为I_2',U_3输出为V_3,支路电流为I_3,则流入并联RC网络的电流为

$$I_t=I_2'+I_3 \tag{7}$$

根据"三要素"法可计算出图4中电容C的充电电压为

$$U_c(t)=I_tR+(I_2R-I_tR)\mathrm{e}^{-\frac{t}{RC}} \tag{8}$$

解式(8)可得：

$$t = RC\ln\frac{I_2R-(I_2'+I_3)R}{U_c-(I_2'+I_3)R} \tag{9}$$

所以当SSPC过流状态时，电容C充电到Q_1导通电压U_{on}所需时间，即反时限过流保护动作时间为

$$t = RC\ln\frac{I_2R-(I_2'+I_3)R}{U_{on}-(I_2'+I_3)R} \tag{10}$$

图4中的比较器U_4主要起到一个锁存的作用，当SSPC正常工作时以及电流过大，发生反时限过流保护动作之前，其逻辑都为低，输出V_4为低电平，当反时限过流保护动作发生之后，Q_1导通，Q_2关断时，此时比较器U_4的逻辑为高。输出电压V_4为15 V，会一直给电容C充电，保持电容C两端的电压为Q_1导通电压，使Q_1一直保持开通，防止在切断SSPC输入之前，Q_1发生再次开通。

同时此电路模型还有具有反时限保护时间可调功能，当对运算放大器U_2的增益电阻改变时，则在SSPC发生过流状况之前，电容C的电压相较于增益改变之前会有所变化，当发生过流状况后，运算放大器U_2的输出电压较增益改变之前也有变化，所以电容C两端的电压上升到Q_1导通电压所需要的时间就会有变化，因此就可以通过改变运算放大器U_2的增益来改变反时限保护的动作时间。

3 仿真与试验验证

在经过上述理论分析后，利用saber仿真软件对上述硬件电路进行建模仿真，以此来验证反时限保护的有效性。

在saber仿真软件中搭建的电路模型，在仿真过程中，当SSPC正常工作后，延时一段时间后突然改变负载的大小，将负载电阻减小，从而达到瞬时增大电流的效果，以此来模拟SSPC发生过流的状态，而且通过改变不同的负载，可以获得SSPC在不同电流下发生反时限过流保护动作的时间。

3.1 仿真结果分析

在仿真中一共改变了5次负载，即在1.2倍、1.3倍、1.5倍、2倍、2.5倍这5种过流状态下进行反时限保护动作时间仿真，得到仿真结果，图5为不同过流状态保护时间图，具体数值如表2所示。

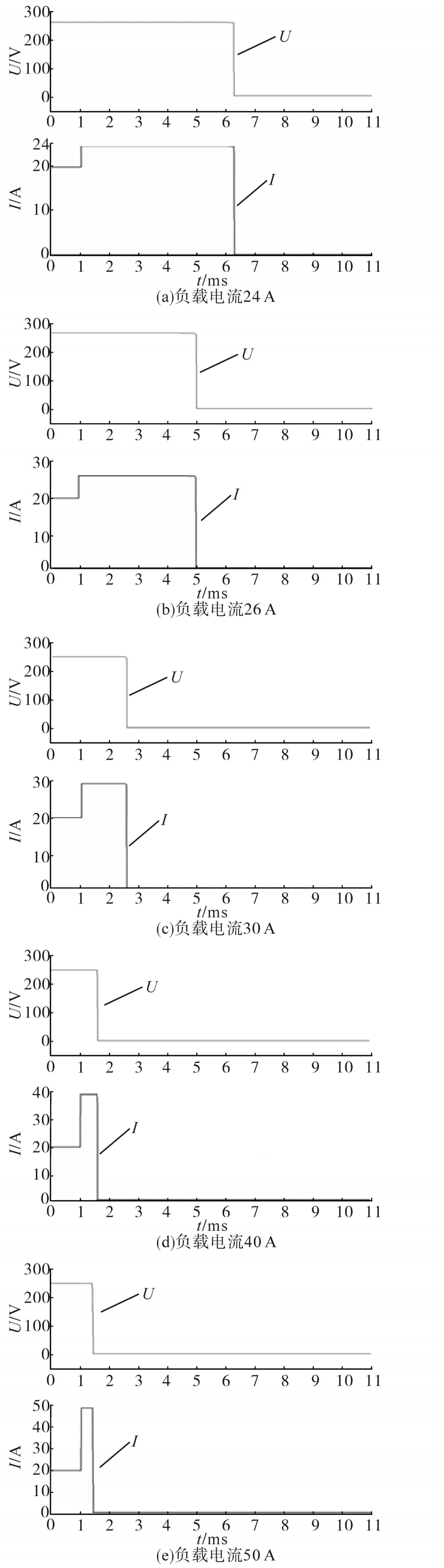


图5 不同过流状态保护时间图

Fig.5 Protection time diagram of different over-current states

表2　不同过流状态保护时间表

Tab.2　Protection time table of different over-current states

过流倍数	电流大小/A	反时限保护时间/ms
1.2	24	5.26
1.3	26	3.96
1.5	30	1.59
2.0	40	0.59
2.5	50	0.40

仿真结果可以清楚地看到,当SSPC的电流增大后延时一段时间SSPC关断,负载两端电压值和SSPC的电流值都变为0。而且随着电流的增大,反时限的保护时间逐渐减小,从5.26 ms减小到0.4 ms,并且起到很好的反时限过流保护效果,由此可以看出此电路模型能够满足上述的理论分析,可以初步认为此电路模型具有一定的有效性,是能够起到反时限过流保护作用。

接下来又对反时限过流保护的保护时间设置进行仿真,减小运算放大器U_2的增益,同样改变5次负载,在1.2倍、1.3倍、1.5倍、2倍、2.5倍这5种过流状态下进行仿真,得出仿真结果如图6,具体数值如表3所示。

表3　减小增益不同过流状态保护时间表

Tab.3　Protection time table of different over-current states with reduced gain

过流倍数	电流大小/A	反时限保护时间/ms
1.2	24	6.94
1.3	26	6.05
1.5	30	3.85
2.0	40	0.88
2.5	50	0.56

在将运算放大器U_2的增益减小以后,电容C两端电压的初始值减小,充电时间增长,由仿真结果可以看出在同样的过流状态下,运算放大器U_2增益减小后,反时限过流保护动作时间有了明显的增长,反时限保护动作时间同样呈随电流增大而减小的趋势,保护时间从6.94 ms减小到0.56 ms,所以在不同的增益下,此电路模型同样满足保护时间设置的要求,验证了保护时间可设置的有效性,同时也进一步验证了电路的可行性。

3.2　试验结果分析

图7为对SSPC反时限过流保护时间测试的实测图,本次实验通过手动切换负载来改变负载的大小,从而使SSPC工作在不同的过流状态,进而测出不同状态下的保护动作时间,得出实验结果。

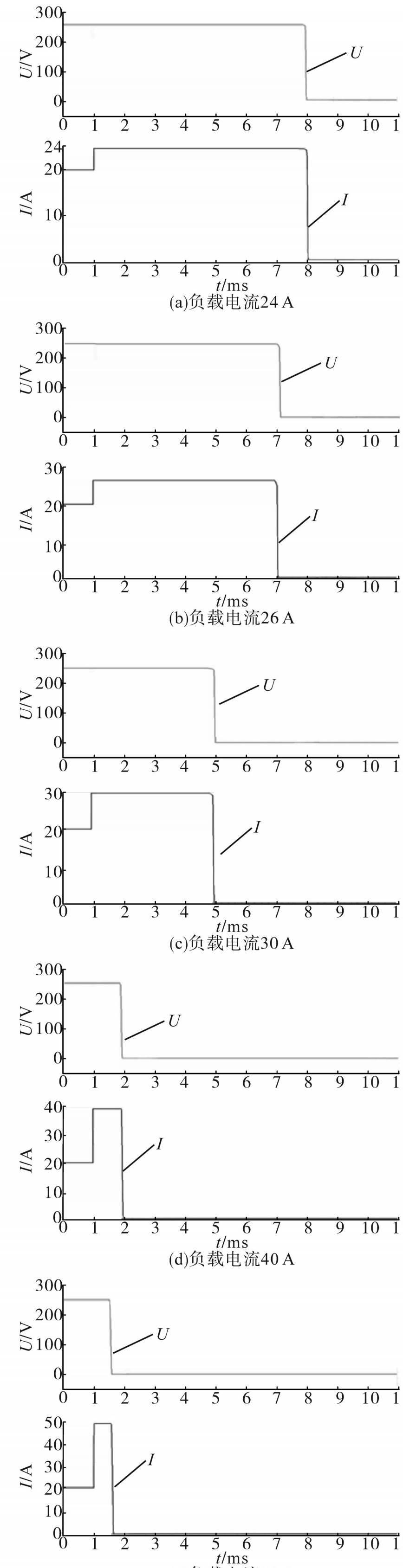


图6　减小增益不同过流状态保护时间图

Fig.6　Protection time diagram of different over-current states with reduced gain

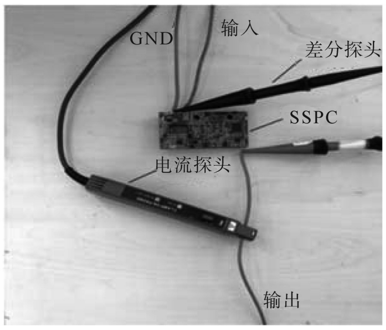
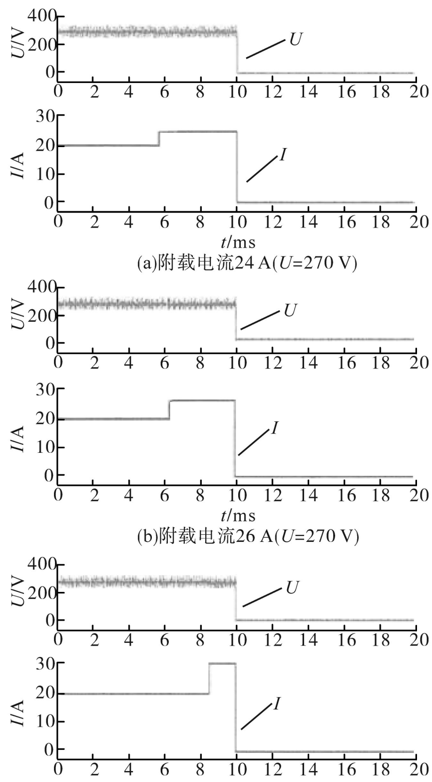


图7　实物测试图

Fig.7　Physical test diagram

由于负载的阻值的限制以及产品设计的要求,此次试验改变了三次负载,即在24 A,26 A,30 A这3种过流状态下进行测试,试验结果如图8所示,具体数值如表4所示。



(a)附载电流24 A(U=270 V)

(b)附载电流26 A(U=270 V)

(c)附载电流30 A(U=270 V)

图8　不同过流状态保护时间图(试验)

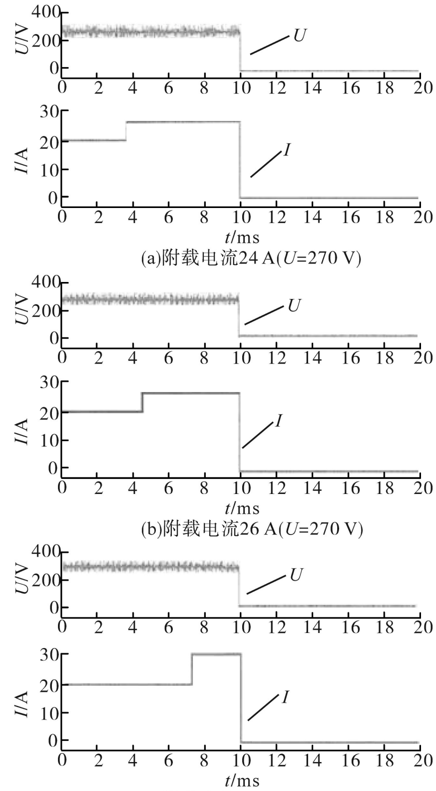
Fig.8　Protection time chart of different over-current states(test)

表4　不同过流状态保护时间表(试验)

Tab.4　Protection time table of different over-current state(test)

过流倍数	电流大小/A	反时限保护时间/ms
1.2	24	4.98
1.3	26	3.60
1.5	30	1.51

同时减小运算放大器U_2的增益,继续在24 A,26 A,30 A这三种过流状态下进行测试,试验结果如图9所示,具体数值如表5所示。



(a)附载电流24 A(U=270 V)

(b)附载电流26 A(U=270 V)

(c)附载电流30 A(U=270 V)

图9　减小增益不同过流状态保护时间图(试验)

Fig.9　Protection time diagram of different over-current states with reduced gain(test)

表5　减小增益不同过流状态保护时间表(试验)

Tab.5　Table of protection time of different over-current states with reduced gain(test)

过流倍数	电流大小/A	反时限保护时间/ms
1.2	24	6.30
1.3	26	5.50
1.5	30	2.78

由试验结果可以看出,电流从24 A增大到30 A,反时限保护时间从4.98 ms减小到1.51 ms,减小运算放大器U_2增益情况下的反时限保护时间从6.30 ms减小到2.78 ms,与仿真结果近似,并且在这三种过流状态下,SSPC都进行了有效的关断,同时也满足反时限过流保护的要求,随着电流的增大,保护时间越来越短,呈非线性减少,符合理论分析结果,充分证明了反时限保护模型的有效性。

4　结论

本文针对固态功率控制器的反时限过流保护问题,对反时限保护曲线、保护电路设计、控制