

doi: 10.7690/bgzd.2014.06.016

反时限过流保护算法在固态功率控制器中的运用

张雄林¹, 张黎², 王亨勇²

(中国兵器工业第五八研究所特种电子技术部, 四川 绵阳 621000)

摘要: 随着自动化配电技术的发展, 我国在航空、航天以及民用大量采用固态功率器件对系统进行智能化配电, 其中, 在对配电系统负载过流保护上采用了当前先进的反时限过流保护算法, 实现理论转化为实际, 对反时限过流保护算法的理论基础进行分析和研究, 并详细阐述了反时限过流保护算法在固态功率控制器中的运用。

关键词: 固态功率控制器; 反时限; 自动配电技术; 过流保护算法

中图分类号: TP301.6 **文献标志码:** A

Application of Inverse Time Over Current Protection Algorithm in Solid-State Power Controller

Zhang Xionglin¹, Zhang Li², Wang Hengyong²

(Department of Special Electronics Technology, No. 58 Research Institute of China Ordnance Industries, Mianyang 621000, China)

Abstract: With the development of power distribution automation technology, solid state power devices are widely used in China's aviation, aerospace and civil industries for intelligent power distribution system. In the current protection of the power distribution system load, use the current advanced inverse time over current protection algorithm, change theory into practice. The article analyze and research inverse time over current protection algorithm, and elaborate inverse time over current protection algorithm application in the solid-state power control devices.

Keywords: solid-state power control; inverse time; power distribution automation technology; over current protection algorithm

0 引言

反时限过流保护已广泛地运用于发电机、电压器、电动机、配电网等保护之中, 在我国配电系统中, 许多动力负荷也逐步开始要求保护装置具有与其热融限特性相似的反时限过流保护功能, 该技术也必将会成为我国自动配电网保护中的主流技术; 因此, 笔者对其进行研究。

1 反时限过流保护算法数学模型

1.1 反延时保护曲线公式^[1-2]

$$t = \frac{K}{(i^C - I_R^C) / I_F^C} \quad (1)$$

其中: t 为反延时动作时间; I_F 为额定电流值; I_R 为反延时保护开始累加阈值, 这里取 $1.2 \times I_F$; i 为当前负载电流值; C 为反时限特性常数, 当 $C=0.02$ 为一般反时限, $C=1$ 为非常反时限, $C=2$ 为极度反时限。

K 为跳闸常量, 取值如下: K 值决定保护曲线, 故按照 140% 临界, 150% 10 s 左右保护, 可以将 K 值定为 0.999 97, 故此等式:

$$\text{此时刻热量} = \text{上一时刻热量} \times 0.999\ 97 + I^2 \times R \times \Delta t$$

注: K 值可以根据实际需求来选择, 如图 1 所示。

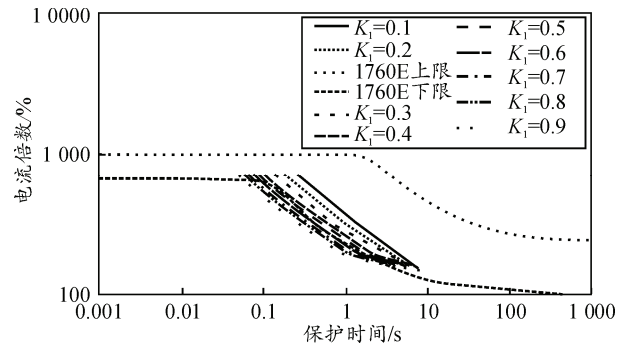


图 1 K 值选取的保护特性曲线图形

其中 $K = \exp(-k_1 \Delta t)$, K_1 越小, K 值越大, 曲线越是偏上, 可以理解为:

此时刻热量 = 上一时刻热量 + ($I^2 \times R \times \Delta t - 0.000\ 03 \times$ 上一时刻热量), 若是这一时刻地热量累计 > 上一时刻耗散地热量, 则热量增加, 在“这一时刻地热量累计”与“上一时刻耗散地热量”达到平衡时, 假设 140% 若 Δt 为 300 μ s 则可以得出, 热量上限可以设置 max 为 19.6。由于 K 值决定了曲线的走向, 保护点决定了保护点的起始, 曲线基本已经定, 可以进

收稿日期: 2014-01-25; 修回日期: 2014-02-27

作者简介: 张雄林(1984—), 男, 四川人, 学士, 工程师, 从事嵌入式系统研究。

行验算稍微调节。

1.2 软件设计用公式就是将上述公式进行离散化

在电力系统中，过流的特性并不是固定的值，考虑到不同时刻实际的电流大小可能不同，在微机保护装置中对式 (1) 进行积分处理后得到下式：

$$k = \int_0^t [(i(t)^C - i_R^C) I_F^C] dt \quad (2)$$

由于在微机中只能处理离散值，所以将上式进行离散化后得到

$$\sum_{n=0}^{M-1} [(i(n)^C - i_R^C) I_F^C] = \frac{k}{\Delta T} \quad (3)$$

其中： ΔT 为两次反延时求和的时间间隔，一般取计算的间隔时间，由于 ΔT 很小，假设在此时间内故障电流基本不发生变化； M 为保护动作时的求和次数。

在反时限过流保护中，当选定某一条反时限曲线后， K 、 C 及 ΔT 为常数。

当 $i > I_R$ 时，启动反延时保护，并对式 (3) 左端逐次累加求和。当累加值达到临界值 G ($G = k/\Delta T$) 时，反延时保护电路工作，保护动作时间为 $t = M\Delta T$ 。 I^2t 保护特性曲线如图 2。

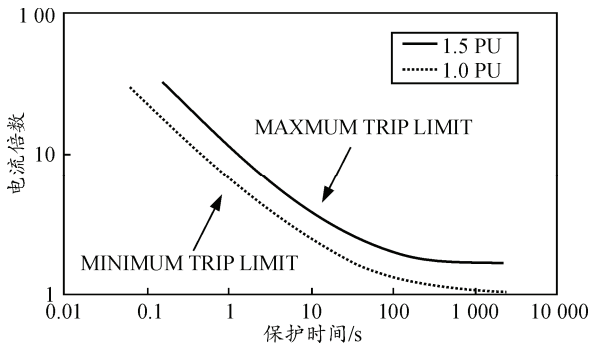


图 2 I^2t 保护特性曲线图形

2 固态功率控制器的组成原理

固态功率控制器由电源模块、控制电路、保护电路、电流、电压取样电路、RS-422A 电路组成。如图 3 所示。

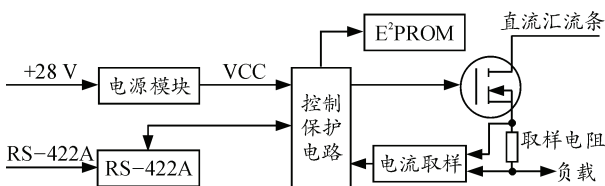


图 3 固态控制器控制电路原理

控制保护电路模块主要完成 MOSFET 通断、电

流取样、过流维持一跳闸保护曲线的实现，短路快速保护、负载状态检测，并将工作参数记录在 E^2PROM 中^[3]。

电流电压取样电路完成电流、电压的取样及 A/D 转换，负载短路检测等功能。取样电阻将流过负载的电流信号转化为电压信号，经过电流放大器放大后送 A/D 转换电路采样，并将转换后的数字信号送控制、保护电路处理。电源模块为控制保护电路提供供电电源，为提高可靠性，采用隔离型 DC-DC，输入电压范围 9~36 V。

2.1 缓冲保护电路

固态功率控制器要求能适用于电网中各种类型的负载，采用硬开通、关断的驱动电路，在容性负载开通时，会产生较大的瞬时浪涌电流，在感性负载关断时，会在功率管两端产生很高的电压尖峰，为了避免上述情况损坏器件，在 MOSFET 的 DS 端加入缓冲保护电路，如图 4 所示。

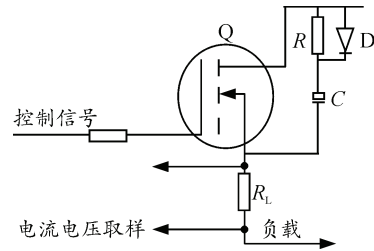


图 4 缓冲保护电路原理

缓冲保护电路的主要作用是抑制 MOSFET 过电压、过电流，减小器件的开关损耗。当 MOSFET 关断时，负载电流通过吸收二极管 D 向电容 C 分流，从而抑制了电压尖峰。MOSFET 开通时，缓冲电容通过 R 向 MOSFET 放电将储存在电容内的电荷放掉，从而减小了瞬时浪涌电流。

2.2 电流取样电路

其原理框图如图 5。

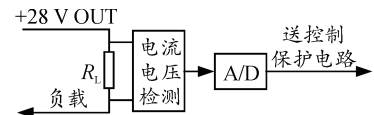


图 5 电流、电压取样电路原理框图

电流取样采用 TI 公司的专用电流检测芯片，该芯片具有宽的共模电压输入： $-16 \sim +80$ V，3 种可编程放大倍数：20、50、100。

A/D 转换器选用 AD 公司的 12 位 A/D 芯片 ADS7808，这是一款单通道串行 A/D 芯片，采样速率 100 kHz，内含基准及时钟，具有抗干扰能力强，

采样误差小等优点。

2.3 控制保护电路

控制保护电路框图如图 6。

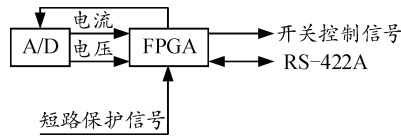


图 6 控制保护电路原理框图

FPGA 选择 ALTERA 公司的 CYCLONE 芯片 EP1C3T100I7，其具有以下优点：

- 1) 有丰富的 I/O 端口；
- 2) 具有较为强大的乘法功能，具实时性好；
- 3) 抗干扰能力强。

FPGA 作为主要逻辑处理器件，实现的功能有：产生模数转器的控制逻辑，反时限保护算法的实现，控制开关执行器件动作，快速短路保护，电流定额可编程等功能。

2.4 短路保护

在对地短路或严重过载时，电路中流过几十甚至几百安的电流，造成 MOSFET 功率器件温度极剧上升，极易损坏，短路保护是当电路中的电流即将到达功率器件的允许的极限值时，为保护器件而采取的一种保护方式，实现原理见图 7。

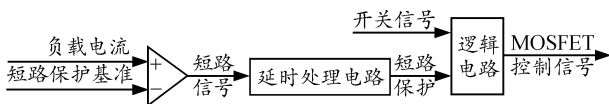


图 7 短路保护原理框图

通过负载电流与短路保护基准比较，判断负载是否短路，短路信号送入延时处理电路，判断短路信号脉冲宽度是否大于 600 μs，只有持续时间大于 600 μs 时，才会输出短路保护信号。短路保护信号和开关信号经逻辑处理电路处理，产生状态锁存的 MOSFET 控制信号，该信号只有复位后才能重新受控。

3 软件设计

3.1 反时限保护功能实现

根据 I^2T 过流维持—跳闸曲线方程生成电流 (%)—时间表，当工作电流 I 大于反时限启动电流 I_0 时，即 $I/I_0 > 1$ 时，将每个采样周期的电流值累加，采取周期 $\Delta t = 1 \text{ ms}$ ，当累加值大于等于电流 (%)—时间表中 $(I/I_0 - 1) \times 100$ 位置对应的延时时间 $t_0 \times I$ 的值时，保护跳闸，电流保护逻辑如图 8^[4-8]所示。

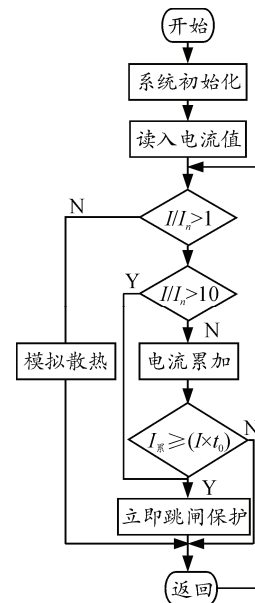


图 8 反时限保护功能流程

对反时限保护曲线进行离散化后根据微机的时钟计算出跳闸时间，即时间对照表，根据处理器的不同，其对应的计算方式也不同，微处理器进行计算处理后量化的对照时间表：

```
float code ProtectData[]=
{301.130 768, 263.377 075, 215.842 392,
176.827 087, 147.023 727, 124.324 265, 106.767 647,
92.926 773 1, 81.812 179 6, 72.737 556 5, 65.219 451 9,
58.910 614
...
0.162 044 764, 0.161 789 387, 0.161 534 682,
0.161 280 677
0.1610 273 57, 0.1607 747 08, 0.160 522 744,
0.160 271 466
0.160 020 858, 0.159 770 906, 0.159 521 639,
0.159 273 028, 0.159 025 088};
```

当电流在额定范围内，固态功率控制器正常工作；当电流大于额定值，小于额定电流的 1 000% 时，固态功率控制器进行反时限保护；当电流大于额定电流的 1 000% 时，固态功率控制器立刻跳闸。

3.2 “软接通”功能的实现

容性负载、电机负载、灯负载接通时，会产生极大的瞬时大电流，如果瞬时大电流的持续时间超过 600 μs，将产生短路保护，该路负载将无法正常工作，为解决该问题，采用“软接通”方式开关该类负载，其他类型的负载不受影响。

“软接通”实现方法见图 9 所示。

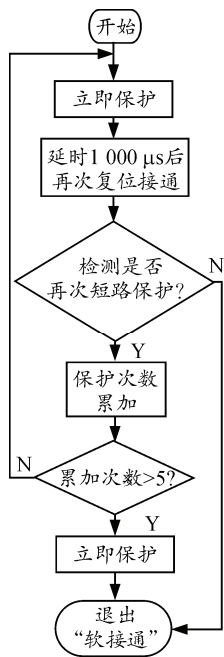


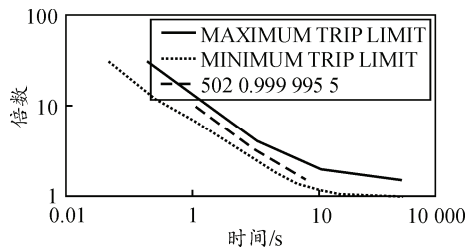
图 9 “软接通”流程

4 实验数据及分析

对实验数据进行分析后进行了曲线拟合见图 10。

输入符号 (mV) 幅度	电流/A	额定倍数	动作时间 (3 500×126)
0	0	0	
35	105.33	1.40	81.6
40	120.38	1.61	45.2
50	150.47	2.01	22.2
70	210.66	2.81	9.20
90	270.85	3.61	5.28
110	331.04	4.41	3.40
130	391.22	5.22	2.36
150	451.41	6.02	1.74
170	511.60	6.82	1.35
190	571.79	7.62	1.06
210	631.98	8.43	0.86
230	692.17	9.23	0.716
245	737.31	9.83	0.62

(a) 实验数据



(b) 曲线拟合

图 10 实验数据及曲线拟合

5 结论

笔者通过对反时限过流保护算法数学模型进行了分析，查阅了大量国内外在配电保护装置中采取的有效措施，了解了航空航天及家用电子产品的智能化控制保护，在此基础上通过实际可操作的方案实现了阻性负载、感性负载、容性负载、电机负载、灯负载等各类直流负载的供电/断电控制，功率控制器采用“软接通”工作方式；并实现了负载过流事 I^2t 反时限过流保护及告警，从而对负载进行健康监控及警告，为智能化配电和保护奠定了基础。

参考文献：

- [1] IEEE Standard Inverse-Time Characteristic Equations For Over-current Relays[S]. IEEE Standard C37. 112-1996: 1-13.
- [2] 刘建政, 黄益庄. 微机多功能反时限保护[J]. 清华大学学报, 1994, 34(1): 24-29.
- [3] 寇戈, 蒋立平. 模拟电路与数字电路[M]. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2008: 10-30.
- [4] 谭浩强. C 程序设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 1991: 15-60.
- [5] 夏宇闻, Verilog 数字系统设计教程[M]. 2 版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008: 70-100.
- [6] 程佩青. 数字信号处理教程[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2001: 9-100.
- [7] 徐厚东, 黄益庄, 付铭. 微机反时限过流保护算法[J]. 清华大学学报, 2006, 46(1): 1-4.
- [8] 刘延飞, 郭锁利, 李琪. 基于 Altera FGA/CPLD 电子系统设计与工程实践[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2009: 25-60.