

# 开关电源过电流保护电路设计分析

王攀\*

中国船舶重工集团第七〇五研究所, 陕西 710077

**摘要:** 众所周知, 电子装置的运行离不开开关电源的支持, 虽然在长期使用过程中会出现损坏, 但绝大多数情况下与保护电路有关。对此, 笔者阐述了开关电源保护电路的重要性, 分析当下不同过电流保护电路的特点, 并提出一种新型保护电路方式, 希望对提升开关电源过电流保护电路性能有所启示。

**关键词:** 开关电源; 过电流; 保护电路

## 一、前言

对于电子装置而言, 开关电源是关键所在, 既可以为其提供源源不断的能量, 也可在一定程度上减少外界的不良影响, 而这需要保护电路的支持, 其中过电流保护电路尤为重要, 但需要结合开关电源的实际情况选择与之匹配的保护策略, 唯有如此, 开关电源的安全性和可靠性才能得到良好的保障。

## 二、开关电源过电流保护电路的重要性

所谓的开关电源是在现代电子电力技术的基础上, 通过控制开关及其时间比用于保持输出电压稳定, 以此满足不同用户端对电压或电流的实际需求<sup>[1]</sup>。近年来正朝着高效率、小型轻量化的方向发展, 为电子信息产业的快速发展作出了巨大贡献。

但电流的增大往往伴随着热量的增加, 开关电源也是如此, 尽管在正常情况下开关电源损坏的风险相对较小, 但若遇到负载突增、雷雨天气以及环境变化等极端情况时则极易损坏, 这是因为上述问题的出现通常会导致电子设备电流过大, 进而产生大量的热量, 而开关电源作为关键模块也不可避免地会受此影响, 显然不利于开关电源性能的稳定和功能的发挥<sup>[2]</sup>。因此要想处于突发故障或恶劣环境下的开关电源仍然能够安全可靠的运行, 就必须做好过电流保护电路设计, 如此一来, 当电流过大时便可以及时将其变化情况传至芯片的内部控制环路, 通过调整控制电流最大限度的减少对开关电源的影响, 这也是将安全性作为衡量开关电源质量重要指标的原因所在。

## 三、开关电源过电流保护电路的设计策略

### (一) 以继电器和达林顿管为基础

在开关电源过电流保护电路设计中选择以继电器和达林顿管为基础的初衷在于规避2A漏极电流对核心芯片和电子器件的不良影响, 具体需要通过脉宽调制芯片自动停止输出脉宽来实现, 所以选用的是阻值为0.7  $\Omega$ 、精度在1/100以上的电阻 $R_1$ , 这样的话当开关管电流高于2 A时便可以依次导通达林顿管和继电器 (12 V), 促使开关由常闭状态变为开启状态, 最终使得芯片失电停止工作, 发挥保护电路和开关管的效用, 而且在大电流消失后芯片会自动恢复供电, 使得开关电源再次工作<sup>[3]</sup>。虽然经仿真测试发现, 在漏级电流为2.07 A时便可以启动保护, 不仅可靠还稳定, 但文中提及的开断器件—继电器具有电流冲击较大以及开断速度较慢的缺点, 还需研究创新予以完善。

### (二) 以继电器和光电隔离器为基础

该设计策略的目的在于当开关管漏级电流值为2 A时可通过自动停止芯片输出脉宽以保护电路和器件安全, 配以1/100以上精度、阻值为2  $\Omega$  的电阻 ( $R_1$ ) 和幅值3 V、型号1N4372A的稳压二极管, 保证开关管电流载大于2 A的情况下, 光电隔离器发射极和接收端均导通, 进而在 $R_2$  (阻值为100  $\Omega$ ) 形成高电压最终导通继电器 (12 V), 此时开关转为开启状态, 意味着脉宽调制芯片无电源供应而停止运行, 发挥了保护开关管及其相应电路的作用, 后经仿真测试发现, 在漏极电流为2.1 A时继电器便会工作于保护电路不受影响。与基于继电器和光电隔离器的保护电路一样, 虽然稳定可靠, 但难以规避继电器的固有缺陷, 也需借助技术手段进行改进<sup>[4]</sup>。

### (三) 以TL431和光电隔离器为基础

该类过电流保护电路的设计目标是在开关管漏级电流为2 A时自动停止芯片对脉宽的输出, 进而保护核心芯片及器件, 故选用的是阻值为2  $\Omega$  的高精度电阻 $R_1$ , 配以3 V稳压二极管作为D2, 确保开关管电路中存在2 A以上的电流时

\*通讯作者: 王攀, 1985年5月, 男, 汉族, 陕西西安人, 就职于中国船舶重工集团第七〇五研究所, 高级工程师, 本科。研究方向: 电气工程及其自动化。

能够促使型号为TLP521-1的光电隔离器发射极和接收端导通,通过阻值为 $100\ \Omega$ 的电阻 $R_2$ 上高电压的形成导通开断器件TL431,使得芯片失电保护电路<sup>[5]</sup>。重要的是当电路中的大电流消失后可快速实现芯片供电,此时开关电源恢复正常工作,而且仿真测试结果表明,电路中有 $2.06\ \text{A}$ 的漏级电流就可以导通TL431实现电路保护,虽然较之继电器,TL431开断灵敏快速,但存在关断残压的风险,还需在设计电路时将其消除以免埋下安全隐患。

#### (四)以LM393N和光电隔离器为基础

与前文的设计目标一致,但该开关电源过电流保护电路选用的是高精度 $2\ \Omega$ 电阻 $R_1$ 和1N4372A稳压二极管,以此保证在开关管电流大于 $2\ \text{A}$ 时能够导通光电隔离器的发射极和接收端,而LM393这一比较器同向端与反向端电压一高一低,可以通过导通三极管使脉宽调制芯片失电停止工作,最终达到保护开关管和电路的目的<sup>[6]</sup>。同时仿真测试表明,漏级电流只需达到 $2.06\ \text{A}$ ,比较器就会输出高电平导通三极管启动电路保护。本次设计的判决器件LM393N和关断器件三极管,不仅开断灵敏迅速而且不存在物理损耗,但关断残压问题不可避免,需要在设计环节将其消除。

此外,达林顿管和可控硅也可用于过电流保护电路的设计,即选用 $0.7\ \Omega$ 、精度在 $1/100$ 以上的电阻,当开关管电流在 $2\ \text{A}$ 之上时可导通达林顿管和可控硅,导致芯片失去供电而结束工作,待大电流消失后芯片可通过自动恢复供电促使电源重新工作。仿真结果显示, $2.01\ \text{A}$ 的漏级电流就可以导通小功率的可控硅用于保护电路,关键是本次应用的开断器件可控硅功率小、残压低、灵敏性高、开断快速,经此设计的过电流保护电路较为理想<sup>[7]</sup>。

#### 四、开关电源过电流保护电路的优化方法

由上可知,不同的过电流保护电路各有利弊,对开关电源的影响也不尽相同,因此对比分析传统的保护电路作了一定的优化,希望有助于提升开关电源过流保护性能,具体分析如下。

##### (一)传统过电流保护设计的弊端

为更为直观地了解开关电源传统的过电流保护电路的弊端,在此以图1为例加以讲解。已知图中流经采样电阻 $R_S$ 的电流与电感电流 $I_L$ 相等, $M_0$ 、 $M_1$ 均为开关电源的功率管, $M_2$ 表示反馈回路, $C$ 、 $L$ 和 $R_L$ 分别代表输出电容、储能电感和负载电阻。由此可见该保护电路设计只包括采样电阻和MOS管,若负载电流低于额定值,此时 $R_S$ 压降不能导通 $M_2$ 故保护电路处于非工作状态;当发生短路或负载过轻时, $R_S$ 压降则会突增达到 $M_2$ 阈值使其导通,进而拉低 $M_0$ 电压抑制电流的输出,这样的话,即使电流降低不能使 $R_S$ 压降至 $M_2$ 阈值电压,也会保证开关管电压恢复至正常状态;若负载始终处于短路状态或负载过小, $M_2$ 则会在负载过流情况下导通以及在正常情况下关断,进而保证电流恒定<sup>[8]</sup>。

但在实际应用过程中可以发现,输出电流的限制不仅与 $R_S$ 有关,还会受到 $M_2$ 阈值电压的影响,虽然可经调整 $R_S$ 大小以及 $M_2$ 宽长比加以改善,不过因为温度因素和工艺条件有所不同,会导致限制电流因MOS管阈值电压的变化而变化,适用于对过电流要求不同的保护电路,显然应用范围有限,急需改进。

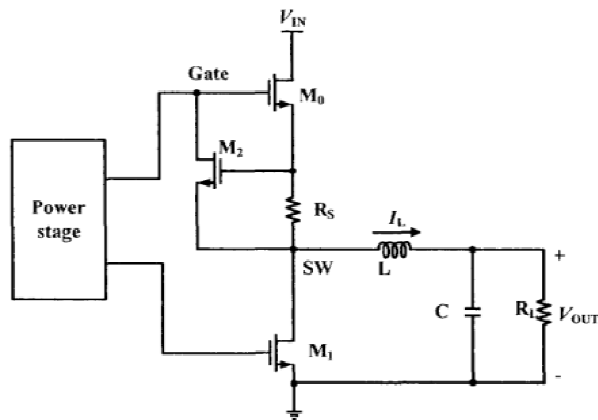


图1 传统过电流保护电路原理图

##### (二)过电流保护电路设计的优化

根据以上分析,本文提出了相应的优化建议,即基于直接电流采样结合应用温度补偿原理大大缩小限流门限,使其在相同的温度影响下变化幅度最小,进而彰显良好的过电流保护电路性能,促进开关电源更广泛应用<sup>[9]</sup>。

1. 该过电流保护电路主要包括PTAT电流产生、限流采样和比较器输出三大部分,即通过采集开关电源SW点的电压完成电流采样,其中限流采样是采集整流管的压降信息,用于是否过流状态的判断,比较器输出则是比较处理信号并对输出信号加以控制。

2. 该保护电路的关键在于过流采样环节，并将该部分提取出来便于分析。根据图2可知，采样部分中的负载比较器采用的是cascode电流源，功率电压为 $V_{p1}$ 电压，通常为0 V，且在负载电流过大的情况下显著降低SW点电压，甚至降低 $M_{13}$ 栅级电压为负值，所以为保证比较器工作正常，只需提供一定的偏置电压即可实现饱和区工作，至于 $M_{12}$ 和 $M_{13}$ 两个差分输入管则要满足相应的条件方可工作在饱和区，即 $R_1$ 阻值不能过大，同时串联于采样支路中的NMOS管 $M_{11}$ 采用的是电压稳定的芯片栅级电压，数值一般为5 V，且SW点电压为源级电压。结合开关电源结构特点得知，当SW点电压最大值与芯片电源电压相同时，该电源电压往往会比内部稳定的电压值（VDD）高，在此情况下 $M_{11}$ 会关断采样支路，从而避免SW点向VDD灌电流而影响内部电压的稳定性。

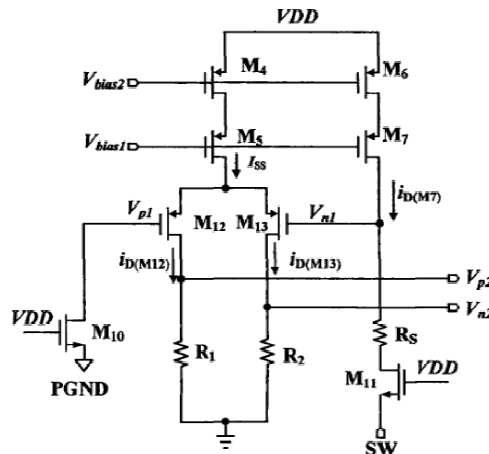


图2 过电流保护中的采样部分

3. 在分析仿真偏置电流的过程中，假设MOS管 $M_2$ 、 $M_4$ 和 $M_1$ 的宽长比（W/L）为1 : 1 : a，那么输出的PTAT电流则可由公式  $I_{PTAT} = \alpha i_{D(M2)} = \alpha \times \frac{k \ln(n)}{qR_1} T = \alpha \ln(n) \times V_T$  表示，且 $k$ 、 $q$ 、 $n$ 均为常数，在理想状况下 $R_1$ 与温度无关，偏置电流具有正温度系数，并经电流镜完成对外输出<sup>[10]</sup>。不过在现实中电阻阻值会随着温度的变化而变化的，只是变化幅度有所差别，因此可以基于合理的温度的变化关系设定电阻值的大小来限制电流的输出。对此，假设VDD为5 V，分别在-40℃、25℃、85℃和125℃的温度下仿真PTAT电路情况，结果发现其电流大小与温度之间具有正比关系，当 $R_s$ 和 $R_1$ 工艺相同时有利于减少电阻随温度变化对过流门限的不良影响。值得一提的是，具体参数必须结合实际情况进行计算和确定，并将电路功耗问题纳入考虑范围，以免因各路电流增加不必要的损耗。

4. 在验证该保护电路的性能时作了仿真（见图3），其中 $M_1$ 为整流管，栅级电压为5 V， $i_0$ 为负载电流，保持其为导通状态时，因整流管存在导通电阻，所以改变负载电流会使得SW点电压随之变化。按照设计要求给定条件，在栅级电压、灌入电流分别为5 V和1 A的条件下，在不同温度下加以仿真。结果发现，当温度为25℃时，整流管具有90 mΩ的导通电阻，达到了设计要求，且其随着温度的升高有所增大，将其温度系数近似为488.4 ppm/℃。同时随着温度的变化，该过电流保护电路的跳变门限最大值与最小值分别为2.14 A和2.06 A，变化幅度和最大漂移分别为0.07 A和3.5%；最大静态功耗仅为32 μW。与传统过电流保护电路相比门限更低更准且功耗更低，具有推广价值。

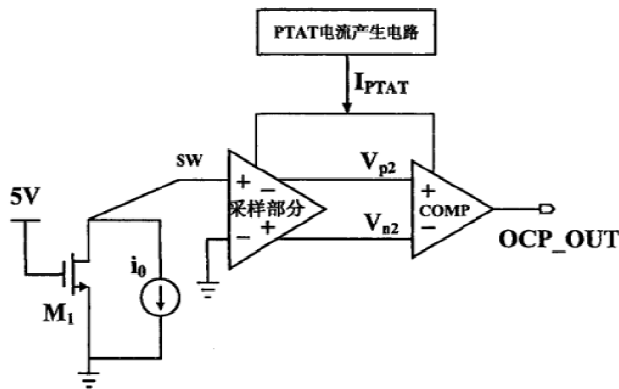


图3 过电流保护电路的仿真原理图

## 五、结束语

总之,安全可靠性是衡量开关电源优劣的重要指标,这使得过电流保护电路设计变得愈加重要,但在实际应用中多种设计策略可供选择且各有利弊,所以我们应该结合实际需求选择最为适合的保护电路,为开关电源的广泛应用奠定坚实的基础。

### 参考文献:

- [1]马健.开关电源过电流保护电路设计研究[J].中国设备工程,2019(15):123-124.
- [2]熊浩.开关电源过流保护电路设计[J].江苏科技信息,2019,36(01):49-51+62.
- [3]甘艳.开关电源的保护电路的设计[J].工业控制计算机,2017,30(03):142+144.
- [4]高佳.适用于LNG船舶的直流开关电源快速截流保护技术[D].山东交通学院,2016.
- [5]李清峰.基于PFC的高频开关电力操作电源的设计与实现[D].大连海事大学,2016.
- [6]何玲,吴恒玉,王志刚.多功能开关电源保护电路的设计与实现[J].电子工业专用设备,2015,44(04):7-13.
- [7]李艳丽.开关电源中保护电路的研究与设计[D].西南交通大学,2015.
- [8]王怡.一种宽范围大电流本安电源的设计[D].郑州大学,2014.
- [9]金乐平,刘晓琳.一种四线制开关电源保护电路的设计[J].微电子学,2013,43(02):233-237+269.
- [10]赵虹.浅谈开关电源的电路保护[J].黑龙江科技信息,2009(30):55.