

[短路保护]

一种三相短路保护装置的设计

文/廖汉鑫 高安康 陈子璋 滕翔
安科瑞电气股份有限公司

为解决线路短路出现电弧和火花四溅造成电气火灾的问题，保护人身和财产安全，分析了一种三相短路保护方案的原理，逐步分析了固态开关元件的选取、MOS管的原理、单相短路保护的原理、三相短路保护的方案设计及MOS管的保护方式，通过以上的分析设计出针对三相电路短路的保护方案，避免出现电气火灾。

根据近些年我国的消防数据显示，电气事故是引发火灾的首要原因，且较大火灾有1/3以上是由电气原因引起的，在这些电气火灾中，由于线路短路、过载及漏电等原因引起的火灾占比最大。为了避免由于短路引起的火灾事故，需要有一种能够在线路短路的瞬间，迅速判断出短路故障并将线路及时切断的装置。

针对短路故障，业内常用的方式是采用熔体或断路器等装置。熔体串联在线路中，在出现短路故障后，由于电流突增，根据焦耳定律，熔体会产生大量的热量，导致熔断，从而断开后端线路。其缺点是，每次出现故障时都需要更换新的熔体，更换的过程相对危险。断路器的工作原理是，当出现短路故障时，电流瞬间增大，产生较强磁场克服内部弹簧，脱扣器拉动机械触头断开后端线路。其缺点是断路器内部是机械结构，在发生短路故障后，断开的动作时间较长，不能够及时保护后端负载。

随着半导体技术的迅速发展，出现了采用电力电子器件作为分断开关的新型固态断路器。这类固态断路器由于具有内部没有机械触头、速度快且不会产生电弧等优点，越来越成为未来针对短路保护的发展方向。

固态开关的器件选择

1. 常规半导体器件的比较

闸流晶体管（Thyristor），又称作可控硅元件

（Silicon Controlled Rectifier, SCR），其中双向晶闸管可以导通交流电，但由于晶闸管的关断特性决定了双向晶闸管必须在交流电的过零点处才能断开线路，这就导致了短路故障发生时不能够及时地将线路断开，影响短路保护性能，故不选择晶闸管作为短路保护的开关元件。

绝缘栅双极型晶体管（Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT），是由双极型三极管和绝缘栅型场效应管组成的复合全控型电压驱动式功率半导体器件，兼有金属氧化物半导体场效应晶体管（MOSFET）的高输入阻抗和电力晶体管（GTR）的低导通压降两方面的优点。由于IGBT的结构决定了只有直流电才能通过，在IGBT模块集成反向二极管后才能双向导通。IGBT导通电阻小，耐压高达1 000 V以上，在大功率的场合下表现卓越，工作频率一般在100 kHz以下。

金属-氧化物半导体场效应晶体管（Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor, MOSFET，以下简称MOS管），由于这种场效应管的栅极被绝缘层隔离，所以又叫作绝缘栅场效应管。MOS管的输入阻抗高，开关速度快，硬开关频率可以做到1 MHz以上，缺点是导通电阻较大，功耗相对比较高。

对于IGBT和MOS管，考虑到硬开关频率、额定耐压值、额定电流值以及现有技术的经验，本文

中短路保护设计采用MOS管作为电子开关器件。

2. MOSFET的原理

NMOS管结构如图1所示,当g极和s极之间加上正向电压 U_{gs} ,g极金属将聚集正电荷,排斥P衬底的空穴使靠近 SiO_2 绝缘层一侧形成耗尽层。随着 U_{gs} 逐渐增大,耗尽层将逐渐增宽,当 U_{gs} 大于MOS管的开启电压 $U_{gs(th)}$ 时,P衬底的自由电子被吸引到耗尽层与 SiO_2 绝缘层之间形成反型层作为s极到d极的导电沟道。由于s极、d极是高参杂的N型半导体,其本身的自由电子比较多,然后导电沟道连接s极与d极,所以电流可以在s极与d极之间双向流动。因此,通过控制g极与s极之间的电压可以控制s极到d极的通断。

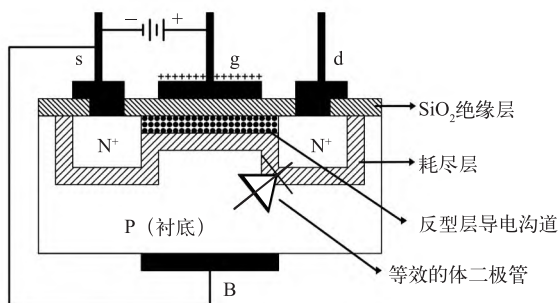


图1 NMOS管结构

NMOS管的P衬底和s极与d极分别组成两个PN结形成体二极管,由于s极与P衬底连接到一起,两者之间的体二极管被短路,P衬底与d极之间的体二极管还存在,当导电沟道断开时,交流电的半波周期可以通过P衬底与d极之间的体二极管导通。

3. MOSFET作为固态开关的方案设计

为解决交流电不能全周期关断的问题,可以设想多种MOS管的组合方案。

1) 将NMOS管的s极与PMOS管的d极接到一起,由于PMOS管的体二极管方向和NMOS管相反,当两个MOS管导电沟道都断开后,交流电流不能通过两个体二极管导通。这种方式理论上是可行的,但是需要两个不同的驱动电路,复杂程度较高,且由于工艺问题,同样成本下NMOS管优于PMOS管,综合以上情况,不考虑此方案。

2) 将两个相同的NMOS管背靠背连接二者的d极,此时二者的体二极管方向相反。当断开导电沟道后,较高的交流电压加在两个NMOS管的s极上,s极连接到驱动电路上,就相当于较高的交流电压加

到驱动电压导致电路损坏,故不考虑此方案。

3) 将两个相同的NMOS管背靠背连接二者的s极,此时二者的体二极管方向相反。这种方案的s极接在一起,可以只用一个驱动电路就能同时驱动两个NMOS管,电路简单可靠,成本较低,两个MOS管的开断一致性较好,本文采取此方案作为短路保护的开关元件。

单相短路保护的原理

1. 单相短路保护装置结构

可以用一组相同的NMOS管背靠背连接二者的s极作为电子开关,对交流电进行开断控制,目前市面上利用这一方案设计的单相短路保护产品屡见不鲜,其原理也比较简单明确,设计方案成熟,其电路如图2所示。图2中的电流检测电路实时检测线路中的电流,及时判断是否有短路故障出现。控制电路用来判断故障以及作出相应的处理。驱动电路用来转换控制电路的信号,驱动MOS的开断。Q1和Q2两个NMOS管背靠背串联在线路中,作为线路的开关。 R 、 L 是线路与负载的等效阻抗和感抗。

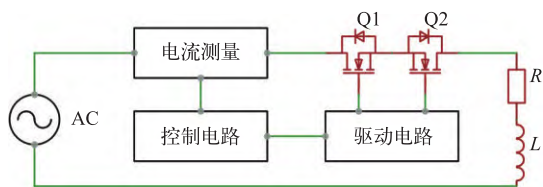


图2 电流示例

2. 单相短路保护装置工作原理

当此装置正常工作时,驱动电路驱动MOS管导通,此时交流电可以正常通过两个MOS管给后端负载上电。当后端负载线路出现短路故障时,根据欧姆定律 $I=U/R$ 可知,阻抗 R 会突然减小到几乎为零,而线路中电流会急剧增大。控制电路根据检测到急剧增大的电流判断出短路故障,然后在极短的时间($150\mu s$)内驱动两个MOS管切断回路电流,从而保护后端线路和负载,防止因短路出现火花四溅点燃可燃物,从而导致火灾等情况的发生。在MOS管切断线路后,线路中的电流会在极短时间内迅速下降,导致电感产生一个反向电动势 $U_L=-L \times di/dt$,其中, di/dt 非常大,所以反向电动势非常大,超过MOS管的耐压范围时将其击穿。

三相短路保护设计

单相短路保护的原理，可以在短路后 $150\ \mu\text{s}$ 内断开线路，抑制过高的短路电流，保护变压器和负载线路的安全。三相电路是单相电路的扩展，线路连接上比单相复杂，其短路状况也更加复杂，一般三相短路分为单相短路、两相短路、三相短路和两相接地短路四种情况。不论哪一种短路，其相位的线电流都会激增，只须检测到线电流的激增，就容易判断出对应相位的短路，然后根据预设的规则断开对应相位或者所有相位线路。

根据单相短路保护的设计原理，设计出三相短路保护方案。三相短路保护装置如图3所示，A、B及C三相都按照单相短路保护方案，各有一个电流测量电路、一组背靠背串联的NMOS和相应的MOS管驱动电路，三个相位共用同一个控制电路。三相变压器的A、B及C相连接装置的 A_{in} 、 B_{in} 及 C_{in} ，变压器的中性点连接 N_{in} ，装置的 A_{out} 、 B_{out} 和 C_{out} 连接三相负载的三个相位， N_{out} 连接负载的中性点，若变压器和负载没有中性点，则装置的 N_{in} 、 N_{out} 不接。

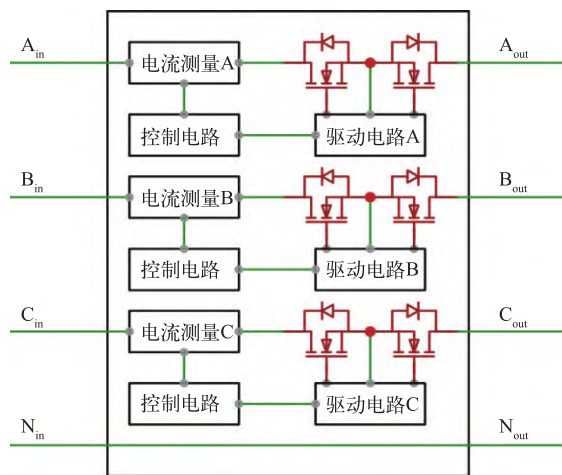


图3 三相短路保护装置

装置正常工作时，三相的驱动电路驱动各自MOS管导通，负载正常工作，此时装置可以通过电流测量电路测量出三个相位的线电流。当出现短路故障时，短路相位的线电流在短时间内激增，相应相位的电流测量电路能测量出短路电流，然后控制电路就能判断出短路故障，通过控制对应相位或者所有相位的MOS管切断故障线路，从而保护后端负载，避免出现短路引起火灾等事故。和单相短路保

护原理一样，在出现短路故障、短路电流非常大时立刻切断线路，后端负载的电感会产生一个非常大的反向电动势，从而击穿MOS管。

MOS管的保护

当出现短路故障时，在短路电流非常大时切断MOS管的导电沟道，后端负载的电感产生一个很大的反向电动势，从而反向击穿MOS管。为了保证短路保护装置在短路后能够正常切断线路且不受损坏，需要在MOS管的d极与s极之间加上过电压保护电路。

在设计过电压保护电路中，比较简单的方式利用瞬变电压抑制二极管（Transient Voltage Suppressors, TVS），TVS管在受到高电压的冲击下，会在极短时间内使内部阻抗降低吸收大电流，同时使自身两端的电压钳位在对应的电压上，从而保护TVS管并联的器件免受瞬时高电压的击穿。将TVS管并联在MOS管s极和d极两端，当切断MOS管电感产生很大的反向电动势时，TVS管的内部阻抗降低，将两端的电压钳到MOS管正常工作的电压以下，起到了保护MOS管的作用。

过电压保护也有其他方式，如采用RC过电压抑制电路，选用合适的电阻、电容串联在一起，然后并联在MOS管s极和d极两端。在MOS管导通时，并联的RC电路短路，在MOS切断电感产生很大的反向电动势时，由于电容两端电压不能突变，可以有效抑制过电压浪涌尖峰。串联电阻的目的是在能量转化过程中消耗一部分能量，并抑制LC回路的振荡。

结束语

通过对各类常用的半导体器件的分析，选取了MOS管作为短路保护设计的电子开关器件，然后通过各类方案比较确定了一组NMOS管背靠背连接s极的组合作为线路中的电子开关。在解析了成熟的单相短路保护原理的基础上，设计了一种三相短路保护的方案，然后分析了保护MOS管的方法。在综合以上的原理后就可以设计出针对三相短路保护的装置，从而减少电气火灾发生的概率。EA

（收稿日期：2023-01-05）