

[开关设备]

一种限流式固态开关设计

文/山东省建筑设计研究院有限公司 赵培坚
安科瑞电气股份有限公司 高安康 滕翔 王志强

因漏电、短路和过负荷等电气线路问题引发的电气火灾屡屡发生。为了防止因电气线路或用电设备发生短路、过载等造成发生电弧火花引起电气火灾，需要一种新型过载保护和短路装置。在发生短路或过载时快速切断线路电流，保证用电安全。

消防数据显示，我国电气火灾多发造成人员伤亡和财产损失。在这些火灾事故当中，因漏电、短路和过负荷等电气线路问题引发电的气火灾占比60%。在短路发生之后，需要快速准确判断出来，对线路进行限流，防止短路点能量过大产生电弧及飞溅火花造成电气火灾。

传统断路器是电力系统和配电环节的重要电气设备。常见机械断路器，其内部由机械触头接触，具有导流量大，发热量低。由于在发生短路之后机械结构动作时间长，短路点会产生电弧造成火花飞溅。固态断路器（Solid State Circuit Breaker，SSCB）采用电力电子器件作为分断器件，具有无机械触头、无电弧、寿命长和速度快等特点，受到了业内的持续研究关注。一种限流式固态开关设计采用固态开关进行短路限流，限流速度快可减少短路电弧发生，避免火花产生。

结构组成及工作原理

一种限流式固态开关设计如图1所示，电流检测模块用于检测当前实时的电流与控制电路、驱动电路，构成一种限流式固态开关设计。 Q_1 和 Q_2 组成了固态开关的主电路，由于固态开关具有导通双向性，在交流电应用上可以快速切断与闭合。 L_1 和 R_1 为负载和供电线路所构成成分等效电感和等效电阻，整个固态开关串联到供电线路上级与负载之间。

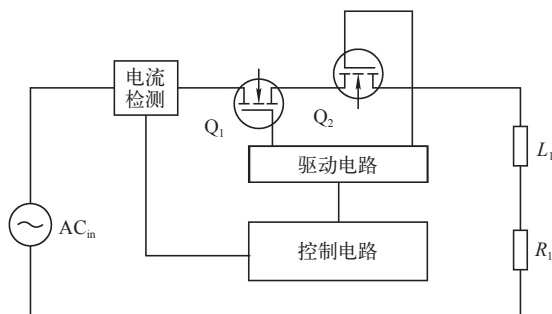


图1 一种限流式固态开关设计

在常见的使用场景当中往往存在感性负载，切断电流时造成电流在短时间内急剧降低。在这个过程中，负载以及供电线路自身所产生的寄生等效电感 L_1 会因为电流的突变产生很高的反激电压，造成超出 Q_1 、 Q_2 本身额定耐压值，引起固态开关击穿损坏。

在无驱动信号给予MOS管驱动电路时，处于驱动电路的断开状态，在装置自身无电的情况下固态开关断开无电流流出。正常工作时， Q_1 和 Q_2 处于导通状态，当控制电路根据后方负载发生短路故障，以及出现短路电流达到限流阈值时，发出信号到驱动电路。驱动电路发出控制信号，使固态开关迅速切断电流，减少短路点电弧出现飞溅式火花，防止点燃短路点易燃易爆物品，引发电气火灾。本装置另有漏电互感器、电压互感器等，根据相关设置的控制策略可以进行漏电、过欠电压和过载等故障的快速限流。

固态开关的选择及开关特性

1. 固态开关的选择

市电220 V发生短路之后,电流会在几十微秒内上升到几百安培,传统晶闸管在响应速度上与驱动小型化上达不到现在要求的小型快速。目前大多数固态断路器分断器件采用半控型器件晶闸管(Silicon Controlled Rectifier, SCR)、GTO/IGBT等电力器件。基于SCR类型的固态继电器由于只能在过零点关断,极大地限制了短路限流能力。故固态开关常选择IGBT与MOSFET。

IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), 是绝缘栅双极型晶体管,由双极型三极管(BJT)和绝缘栅型场效应管(MOS)组成的复合全控型电压驱动式功率半导体器件,兼有MOSFET的高输入阻抗和GTR的低导通压降两方面的优点。IGBT大致分为单管IGBT与复合型IGBT,由于单管IGBT不具有反向二极管不能双向导通。IGBT通常额定电压都在1 000 V以上,常见固态开关的使用220 V电压,具有很好的耐压优势。针对后端带有感性负载线路上在发生短路进行限流保护之后,能更好地保证其自身不被击穿损坏。IGBT的额定工作电流在使用IGBT模块的情况下,很容易达到100 A以上的容量,在额定电流以及额定电压方面有较多优势。

MOSFET金属-氧化物半导体场效应晶体管(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor, MOSFET)。由于MOSFET的自身结构,通常能够做成很大电流,但是一般耐压在1 000 V以下。相对于IGBT硬开关频率, MOSFET的开关频率能达到几兆赫兹,对于短路限流保护有很大优势。

综上所述,根据额定耐压、额定电流、开关速度以及并联器件的均流性,本文综合采用MOSFET作为固态开关的关断器件。

2. 固态开关的开关特性

假定在 $t=t_0$ 时刻发生短路,此时通过断路器的电流 $i_L(t)$

$$i_L(t) = L_{pm} \sin(\omega t + \theta - \varphi_k) + [I_m \sin(\omega t_0 + \theta - \varphi) - I_{pm} \sin(\omega t_0 + \theta - \varphi_k)] e^{\frac{R_s}{L}(t-t_0)} \quad (1)$$

式中, I_{pm} 是电流周期分量峰值; I_m 是短路前电流峰值; φ 、 φ_k 分别是短路前后回路阻抗角; θ 是电压阻抗角; ω 是电压角频率。

由式(1)可知,发生短路后,短路支路电流

在几十微秒内上升到几百安培。传统机械断路器动作时间在100 ms左右,经过100 ms断开后,短路点电流达到所在支路最大电流容量。通常短路点接触不良,造成电弧与飞溅式火花点燃短路点附近易燃物品,形成电气火灾。利用MOSFET固态高开关频率特性可以快速切断线路中的电流,阻止短路电流上升,防止短路点能量过高,产生电弧等。

短路发生后,电流在几十微秒内上升到几百安培,当控制电路发出限流信号后,电流迅速下降。电感与电压的对应关系为

$$u_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (2)$$

电流快速变化,假设输入电压 u_L 在正半周发生短路,当 i_0 上升到 i_L 之后关断固态开关Q,假设此时经过的时间为 t_1 ,所采用的MOSFET关断时间为20 ns,限流值 i_{UL} 为150 A,代入式(2)得, u_L 达到52.5 kV,远远超过正常MOSFET的额定电压造成的过电压击穿。

固态开关的保护

使用MOS管作为固态开关时,由于短路电流很大,MOS管快速关断造成后端电压达到50 kV以上。MOS管在没有保护的情况下造成电压击穿现象,导致MOS管损坏。进行固态开关设计时,为了保证MOS管在短路切断时可以正常稳定工作,通常采用电压抑制电路消除反向电压尖峰,从而保护MOS管内的寄生二极管不被反向导通。

在交流电路中,MOS管的电压抑制电路通常采用RCD缓冲电路对反向电动势进行抑制,消除电压尖峰。

如图2所示,RCD缓冲电路主要由储能电容 C_1 、限流电阻 R_2 、双向触发二极管 Z_1 组成。 Q_3 正常工作时,RCD保护电路处于短路状态。发生短路故障后 Q_3 进行快速关断, u_L 电压急剧升高,由于原本RCD处于短路状态, C_1 与 R_2 两端没有电压

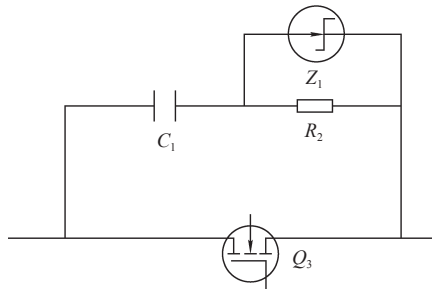


图2 RCD组合电路

(下转第45页)

3. 报警电路模块设计

报警电路是检测继电器辅助触点动作情况的直观结果显示。考虑工程实际应用便捷性，采用二极管与蜂鸣器结合的声光报警形式。测试仪设计6组报警电路，分别对应3组常开触点和3组常闭触点的动作情况检测结果反馈。图6为报警电路设计原理图，将蜂鸣器应用电路与发光二极管应用电路并联接入工作电源两端，当被测继电器辅助触点动作，蜂鸣器发声、二极管发光。

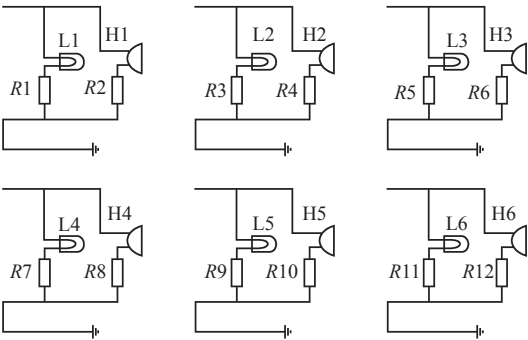


图5 报警电路原理图

试验

1. 仿真

在Proteus平台中搭建本测试仪的仿真模型，完整模拟对3组NC触点与3组NO触点瞬时动作情况的检测。将6组被测继电器辅助触点K接入本测试仪，将SW按钮由复位档设置到启动档位，等待6组被测对象K瞬时接通，记录仿真试验结果。从仿真结果可以看出（见表），本测试仪能正确实现对多组辅助触点瞬时动作情况的同时测量，并能将结果保持输出，直至复归。

2. 试验

利用本测试仪对RELECO C4-A40型号继电器进行测试。选取继电器的3组常开触点接入测试

仪，当继电器动作后，记录测试仪的检测结果。随后选取继电器的3组常闭触点进行测试。通过试验，本测试仪可以实现对继电器辅助触点瞬时动作情况的正确检测，且响应速度快，检测结果可保持，满足测试仪的设计要求。



图6 测试仪界面示意图

表 仿真与试验结果统计表

方式	方案	次数	响应次数	响应时间/ms	响应成功率(%)
仿真	3组NC	5	5	23.9	100
	3组NO	5	5	23.4	100
	6组	5	5	25.7	100
试验	3组NC	10	10	49.8	100
	3组NO	10	10	47.6	100
	6组	10	10	54.3	100

结束语

本文设计的继电器辅助触点动作测试仪，利用微型继电器实现对6组继电器辅助触点动作情况的同时检测，并采用自锁技术实现了对检测结果的信号保持。在实际应用中，不仅可以实现多组触点的同时测量，而且有效避免了二次回路接线复杂，测试重复性强度大，现场测试接线难度大等弊端，且测试仪携带方便，操作简便，有非常大的实际应用意义。EA

（收稿日期：2020.08.19）

（上接第42页）

差，在 u_L 上升到 Z_1 的导通电压后， Z_1 导通， C_1 通过 Z_1 连接到 Q_3 两端，RC缓冲电路抑制反向电动势尖峰，消除过高电压。当反向电动势能量逐步释放且MOS管已经切断，后端电路 u_L 将降低至 Z 关断电压， Z_1 关断后， R_2 与 C_1 连接经短路处泄放 C_1 内的能量。

经过RCD组合电路的综合保护，在发生短路后， Q_3 快速切断，限制后端线路的反向电动势，消除电压尖峰避免，MOS因电压过高击穿。

结束语

文本介绍分析了基于固态开关的短路限流式保护装置，对本装置的原理和短路保护电路组成进行了介绍，分析了固态开关保护电路组成和工作原理。通过对固态开关的分析，验证了固态开关能预防短路电弧产生，减少短路火花引起的电气火灾，拥有短路瞬时限流防越级跳闸功能。EA

（收稿日期：2020.08.19）