**在电机启动器和取暖系统中实现具有机械电子双重优点的继电器**

**意法半导体**

**Benoit RENARD; Laurent GONTHIER**

**前言**

混合式继电器是静态继电器（又称固体继电器、电子继电器或半导体继电器）与机电继电器并联在一起组成的电源开关，兼备机电继电器的低电压降和固体继电器的高可靠性。家电电机启动器或家用电暖气的控制开关是继电器的常用应用领域。鉴于符合RoHS法规可能会降低机电继电器电源开关的可靠性，混合式继电器的市场关注度越来越高。

但是，正确控制混合式继电器远不像乍看起来那么容易，例如，机电继电器和固体继电器之间的切换操作可能产生尖峰电压，辐射电磁噪声。本文提供几个容易实现的降低混合式继电器的尖峰电压的控制电路设计小贴士。

**1．集固体技术和机电技术之大成**

在选择交流开关时，设计人员非常熟知机电开关和固体开关的优点和缺点。半导体开关即固体开关的响应速度快，通电时无电压反弹，断电时无火花，不会辐射电磁干扰（EMI），也不会缩短继电器的产品寿命。机电式开关的主要优点是导通损耗小，能够为2 A RMS以上的应用系统省去一个散热器，驱动线圈与电源接线端子之间的电隔离还节省了驱动可控制硅（SCR）整流管或三端双向晶闸管的光耦合器。

第三个电源开关解决方案是将固体继电器和机电继电器并联，集两种继电器技术之大成，设计一个混合式继电器(HR)。图1所示是电机启动器所使用的混合继电器拓扑。图中的三相电机启动器只使用两个混合式继电器。如果两个继电器都被关断，只要负载没有连接零线，电机就会保持断态。

如果负载连接零线，也可以在L1线上串联一个混合式继电器开关。



图1: 左图)基于混合式继电器的电机启动器； 右图) 继电器/双向晶闸管控制顺序

图1还给出了混合式继电器的控制顺序:

-导通顺序:

* 首先，三端双向晶闸管导通(如果电流更大，应改用两个反极性并联的可控硅整流管)，这准许负载零压导通；
* 然后，继电器在一个或几个交流电周期后导通。继电器的导通电压极低（通常是在1-2V之间，是双向晶闸管的电压降）；
* 最后，应在继电器线圈上电至少1至2个周期后撤消双向晶闸管栅电流，为继电器在双向晶闸管关断前开始运行提供充足的时间。因此，在稳态过程中负载电流只流经机电继电器。

-关断顺序:

* 首先，三端双向晶闸管导通。当继电器处于通态时，负载电流主要是通过机电继电器送到电机。.
* 然后，继电器在几毫秒后关断。继电器的关断电压极低，类似于继电器导通操作。因此，火花期被缩短。
* 最后，应在继电器线圈掉电至少1至2个周期后撤消双向晶闸管栅电流，双向晶闸管关断，混合式继电器在零电流时关断。

在近乎零压时关断机电式继电器的设计方法可将继电器寿命延长10倍，如果开关操作是直流电流或电压，继电器的寿命延长不只是10倍，可能更高。

最重要的是，因为RoHS行业法规(2002/95/EC)将于2016年7月起禁用镉物质，触点防锈和触点焊接工艺使用的银氧化镉可能会被Ag-ZnO或Ag-SnO2替代，在这种情况下，除非使用更大的触点，否则触点寿命将会缩短。

零压导通还准许使用容性负载降低涌流，例如，电子镇流器和内置补偿电容或逆变器的荧光灯管。零压导通还有助于延长电容的生命周期，避免交流电压波动。

此外，固体继电器准许电机实现渐进式软件启动或启停。平顺的加速或减速将会降低机械系统磨损，避免电泵、风机、电动工具、空气压缩机等设备损伤。例如，运输管道中的水锤现象将会消失，货物传送带可避免V型皮带打滑和抖动。

混合式继电器在4-15 kW的电机应用中十分常见，不过也可用于最高250 kW的电机应用系统。

混合式继电器还用于电暖气等取暖产品，加热功率或室温/水温的设定通常由脉冲串控制器来完成。脉冲串或周期跳跃式控制原理的实质是使负载保持N个周期的通态和K个周期的断态，“N/K”比负责定义加热功率，类似于脉冲调制控制技术中的占空比。这里的控制频率小于25-30 Hz，但是，相对于取暖系统的时间常量，这个速度已经够用。

**2． EMI噪声源**

三端双向晶闸管的驱动方法虽然有多种，但是，行业法规要求在取暖应用中必须使用电隔离控制电路。如图1所示，两个双向晶闸管没有共用同一个参考电压，这就是设计师期待使用光耦或脉冲变压器设计控制电路的原因。两个电路的工作方式不同，所产生的电磁干扰噪声也不尽相同。

图2所示是一个光耦双向晶闸管驱动电路。当光耦双向晶闸管激活时（即当微控制器的I/O引脚置高电平时），通过电阻R1施加双向晶闸管栅电流。电阻R2连接在双向晶闸管栅极G和接线端子A1之间，用于阻止每当施加瞬变电压时光耦双向晶闸管电容器产生的电流。每当电流过零时，该控制电路都会产生一个尖峰电压(如图2所示)，即使在光耦双向晶闸管内置电压过零电路，仍就会产生尖峰电压。



图 2:左图) 光耦驱动电路，右图)电流过零尖峰电压

事实上，在一个光耦双向晶闸管驱动电路内，要想施加栅极电流，双向晶闸管A1和接线端子A2之间必须存在电压。双向晶闸管导通压降接近1V或1.5V，然而低于光耦双向晶闸管和G-A1结的电压降之和（两个电路的电压降都高于1V），所以还不足以驱动电流经过栅极。每当负载电流为零时，因为没有电流施加到栅级，所以双向晶闸管关断。

在双向晶闸管关断后，线路电压回加到接线端子上，使电压VTPeak升高，升幅足以使在栅极施加的电流达到双向晶闸管的额定栅极电流IGT。在图2所示的T2550-12G双向晶闸管(25 A，1200 V，50 mA IGT)测试中，该电压的最大值电压为7.5 V (在变成负电压过程中)。假设光耦双向晶闸管和G-A1结的典型电压降分别为1.1 V和0.8 V，电阻R1为200 Ohm，这个电压值将会产生28 mA的栅电流，这正是我们所用样片在第3象限导通所需的IGT 电流（负VT电压和负栅电流）。

如果样片的IGT 值接近最大额定值(50 mA)，VTPeak 电压值可能会更高，因为IGT随着结温降低而升高，所以，如果结温降低，VTPeak 电压值也可能会提高。

因为VTPeak电压的出现频率是线路频率的2倍（如果交流电频率50 Hz，VTPeak电压出现频率是100 Hz），使得继电器的EMI噪声辐射超出EN 55014-1家电和电动工具电磁干扰辐射标准规定的上限。需要说明的是，这一噪声只有当双向晶闸管导通时才会出现。只要继电器将光耦电路旁通，该噪声也就自动消失。这种断续骚扰是否适用EN 55014-1标准规定，取决于断续骚扰的重复率（或喀呖声），即混合式继电器工作频率和骚扰时长。

为避免这些尖峰电压，在脉冲变压器和光耦双向晶闸管中，应优选脉冲变压器。增加一个整流器全桥和一个电容器，以修平变压器二次侧整流电压，这种方法可让直流驱动双向晶闸管栅极。因此，电流每次过零时都不会再有尖峰电压发生。但是，在导通过程中，从机电式继电器切换到双向晶闸管时，仍然有骚扰噪声出现，不过，这种切换好在只发生在在混合继电器关断过程中。图3所示是切换期间发生的尖峰电压。这个尖峰电压恰好发生在双向晶闸管导通时，也就是整个负载电流从继电器突然转移到双向晶闸管期间。

图3.b所示是流经双向晶闸管的电流的放大图。电流上升速率dIT/t接近8 A/µs。如果双向晶闸管被触发但没有导通（整个电流仍然流经机电继电器），当电流开始流动时，硅衬底的电阻率很高，这会产生很高的峰值电压，在使用T2550-12G进行的试验中，这个峰值电压为11.6 V，如图3所示。

在双向晶闸管导通后，晶闸管硅结构的顶部和底部P-N结将向衬底注入少数载流子，在注入过程中，衬底电阻率降低，通态电压降至大约1-1.5 V。

这个现象与PIN二极管上出现峰值电压降和导通时出现高电流上升速率是同一现象，这也是PIN二极管数据手册提供VFP 峰压的原因。该参数大小取决于所施加的电压上升速率dI/dt，如果频率很高，则峰压值将影响应用能效。对于混合式继电器应用，该VFP 电压只在混合继电器关断时才会出现，当评测功率损耗时无需考虑这个参数。

还应指出的是，因为导致VFP现象的原因是注入少数载流子调整衬底电阻率需要时间，所以，与800V的双向晶闸管（例如，T2550-8）相比，1200V双向晶闸管的VFP电压更高，所以必须精心挑选晶闸管对耐受电压的要求，因为电压裕量过大将产生更高的导通峰压。

虽然脉冲电压器峰压测量值高于光耦双向晶闸管驱动电路的峰压测量值，但是EMI电磁干扰降低了，因为峰压现象每周期只出现一次，即混合继电器每关断一次才出现一次，且持续时间仅几微秒，所以，即使尺寸大，钕铁芯昂贵，成本高，脉冲变压器仍然是首选驱动解决方案。



图3: 混合继电器关断(a) – 双向晶闸管导通放大图 (b)

**3． 降低VFP 峰压的小贴士**

在控制电路设计中采纳几个简单的小贴士，有助于降低混合继电器的VFP现象。

最有实效的小贴士是控制继电器在负电流导通时关断。事实上，相对于正电流，负电流时VFP更低。图4所示的VFP电压测试条件与图3.b的VFP电压测试条件相同，只是正电流改为负电流。从图中不难看出，VFP电压降了二分之一，从正电流的11.6V降至负电流的5.5V。负电流VFP电压低的原因是，硅结构在第3象限导通比在第2象限（正A2－A1电压和负栅电流）更容易。



图4: 负关断电流时的VFP

第二个小贴士是提高双向晶闸管的栅极电流。以T2550-12G双向晶闸管为例，特别是对于正关断电流，当施加的栅极电流从额定的IGT 电流 (仅50 mA)提升到100 mA时，VFP 电压可以降低二分之一甚至三分之二。

另一个降低VFP 电压的解决方案是设法在电流过零时关断继电器。事实上，限制关断电流还能限制在双向晶闸管导通时施加的dIT/dt电流上升速率。当然，要想实现这种解决方案，必须选择关断时间小于几毫秒的机电式继电器。

给双向晶闸管串联一个电感也能降低dIT/dt参数，但是这里不建议缩短机电继电器与双向晶闸管之间的PCB迹线。

**结论：**

现在，混合继电器被家电和系统厂商用于延长交流开关的寿命，设计尺寸紧凑的控制开关。

本文分析了尖峰电压产生的原因，并提出了相应的降低电压的解决方案，例如，在负电流导通时关断继电器，在双向晶闸栅极施加直流或更大电流，或者给双向晶闸管串联一个电感。