

「开关设备」

配电网中压混合直流断路器的研究

文/国网葫芦岛供电公司 高 武

随着VSC以及VSC-HVDC的快速发展，直流断路器作为其关键设备与关键技术，受到了国内外的高度重视。首先介绍了现有的各类直流断路器的工作原理，分析其优缺点，针对现有直流断路器缺点，提出了一种可改善其缺点的断路器，该方案采用IGCT作为固态开关与机械开关并联的混合开关结构，以及增加限流电路，可有效抑制直流短路电流在短路初期的上升率，开断短路电流时间短，具有较好的可控性，开断短路电流时机械开关动静触头产生的电弧小甚至没有电弧产生，正常导通状态损耗小。通过仿真验证了断路器能够快速分断直流故障电流。

随着国家863高技术研究发展计划的展开，在电力传输上具有低损耗、无需同步；光伏发电、风力发电等并网；地区电网互联、地区孤岛供电等方面比传统配电系统具有一定优势的中低压柔性直流输电系统将是配电网主要发展方向。

推进中低压柔性直流输电系统（VSC-HVDC）发展技术难点之一就是具有快速开断能力的直流断路器。现阶段中低压柔性直流输电系统实现电流开断的方法主要有闭锁换流器中的换流阀和在交流侧用交流断路器开断两种。用这两种方法不但会使系统出现停运情况而且也会对并列运行的交流输电系统造成严重冲击，降低了供电可靠性。因此，成功研制中压断路器可以有效推动中低压柔性直流输电系统（VSC-HVDC）的发展。

直流断路器的开断相比于交流断路器的开断来说要困难的多，因为直流电流不同于交流电流存在自然过零点，直流电弧比交流电弧要难于熄灭；而且直流输电系统的线路阻抗与交流输电系统相比，前者远远小于后者，因此直流输电系统一旦发生故障，其故障电流增长速度比交流系统的故障电流要快的多；此外，在开断的过程中，在直流系统电感中存储的能量，需要断路器来吸收。

现阶段研发出的直流断路器主要分为：利用传统机械开关开断的纯机械式直流断路器、利用电力电子器件（SCR、GTO、IGBT等）开断的全固态直流断路器，以及将两者相结合的混合式直流断路器三种。其中混合式直流断路器将纯机械式和纯固态式的优点相结合，具有导通损耗低；开断速度快、特性好的特性，成为了近年来直流断路器领域的主要研究方向。

给出了传统纯机械式直流断路器、使用电力电子开关的全固态直流断路器以及两者结合后衍生的混合式直流断路器的工作原理，给出了其拓扑结构，并分析了各个类型断路器存在的优点以及缺点，通过Matlab/Simulink仿真实验进行了相关的实验验证提出方案的可行性。

三种直流断路器结构

1. 纯机械式直流断路器

因为直流电流不同于交流电流存在自然过零点，直流电弧比交流电弧要难于熄灭。在低压直流系统中开断小电流，通过提高直流电弧的电压、增加限流电阻数量以等方法可以实现直流电弧的强迫熄灭。但在中高压直流系统中，低压直

流系统熄弧方法受到一定的局限性，通过对交流断路器进行改造可以实现中高压直流系统的熄弧，一般的改造方法有叠加LC振荡电路或者能量吸收电路。美国的GE公司的曾提出了一种机械式直流断路器，采用的熄弧方法是增加LC振荡换流电路，图1给出了其拓扑结构。

但是，无论交流断路器的操作机构是液压还是弹簧的，其分闸在时间18~65 ms之间，合闸时间在60~150 ms之间，这对于故障电流增长速度比交流系统要快的多的直流系统来说，开断时间较长，不能快速切断短路电流，隔离故障点，容易扩大事故面积。

2. 全固态直流断路器

因使用半控型或全控型电力电子开关（SCR、

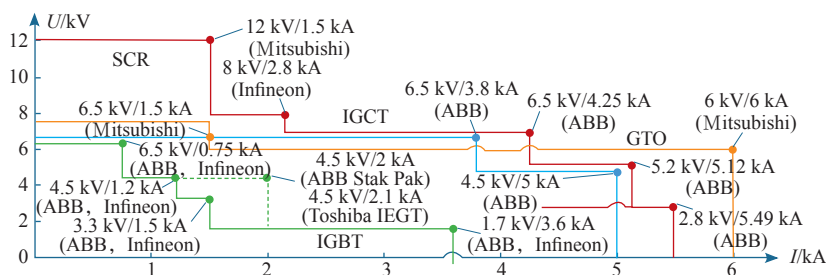


图2 SCR、GTO、IGBT和IGCT参数对比

基于SCR研发的半控型断路器具有常态压降低、开断容量大、控制策略简单、整体价格低以及可靠性较高的优点；但在开断直流电流时需要叠加LC振荡电路作为换流回路，制造出人为过零点，使电路结构更加复杂化，同时增大了断路器的整体体积；SCR较低工作频率使得断路器的开断速度也较低。

基于GTO研发的全控型断路器优点与基于SCR研发的半控型断路器类似，且开断速度比后者要高；但GTO的常态压降要比SCR高，较高的门极驱动功率也需要复杂的驱动电路。

基于IGBT研发的全控型断路器与基于GTO研发的全控型断路器优点基本相同，且其开断速度更快，但IGBT的容量却比GTO小，这就意味着开断同样的电流需要串联的IGBT数量要多于GTO，且IGBT的价格也高于GTO；比IGBT性能更好的IGCT因为成本过高也使全固态型直流断路器的成本过高而不适于推广。

3. 混合式直流断路器

混合型直流断路器采用的关断原理是电流转移法来实现直流系统的开断，综合了传统纯机械式静态特性和全固态式动态特性。根据其不同的

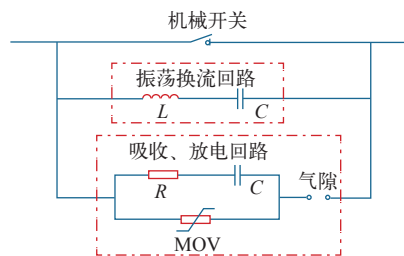


图1 增加LC振荡换流电路断路器拓扑结构

GTO、IGBT和IGCT等）代替传统的机械开关开断电流得名。因此全固态直流断路器又被分为半控型和全控型。半控型电力电子开关以SCR为主。全控型使用的则有GTO、IGBT和IGCT多种电力电子开关，图2给出了SCR、GTO、IGBT和IGCT可关断电流极值和耐压极值的对比。

电流转移方式，可将其分为自然换流型和强制换流型。

自然换流型固态开关的构成多由GTO、IGBT和IGCT等构成，其开断原理为：当机械开关断开时产生的电弧电压大于电力电子开关的导通电压时，电力电子开关被触发导通，当电弧不断被拉大以后，电弧上的压降远远大于电力电子开关器件的通态压降，主电路中的大部分电流都向支路上转移。最终使得主开关在很小的电流下进行分断，因此其开断电流能力取决于固态开关所使用的电力电子器件。图3给出了其拓扑结构。

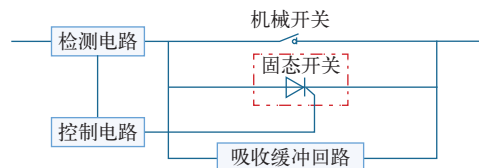


图3 自然换流型混合型断路器

强制换流型开断原理为：断路器开断之前，利用外部充电电源给电容C预先充完电。断路器分断电路时，打开高速机械开关，与此同时，触发固态开关导通。电容C给机械开关反向冲击振荡电流，该电流与机械开关的电弧电流相迭加产生的

振荡电流在电弧拉长的某一时刻时,主电路上迭加的振荡电流产生强迫型过零点,电弧被熄灭。电弧熄灭以后电源不断给电容C充电,当电容C的电压大于氧化物避雷器的阈值电压时,电流全部向避雷器转移。完成直流电路的分断任务。图4给出了其拓扑结构。

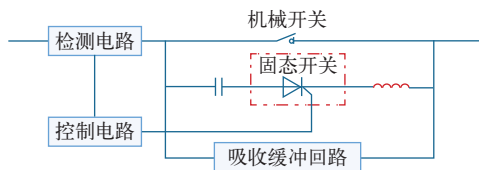


图4 强迫换流型混合式断路器

现阶段的电力电子开关的单管功率不高,多管串、并联的控制电路复杂,存在一定的技术问题,且多管串、并联后的散热也影响断路器的整体功能,综上所述,本文提出一种增加限流电路后使用单管IGCT作为固态开关的中压混合式断路器。

改进后的混合直流断路器

改进后的混合直流断路器其拓扑结构如图5所示。

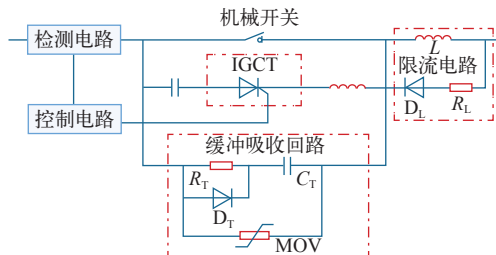


图5 改进后的混合直流断路器

其在分断短路电流的工作原理为:当线路上发生短路故障后,限流电路立即抑制线路中的短路电流上升;当检测电路识别出短路电流超过断路器动作设定值后,即向机械开关断开信号,向IGCT发出导通信号,机械开关动作,动静触头之间产生电弧,当电弧电压达到IGCT的触发电压后,IGCT即导通,此时电弧电压即被控制在IGCT的导通压降,由于此时机械开关动静触头间的电阻大于IGCT的内阻,短路电流将从IGCT中流过。机械开关即在IGCT的导通压降和极小电流下分断。

当机械开关完全分断后即向IGCT出关断信号,IGCT关断后,缓冲吸收回路中的RT、CT即减缓关断电压的上升速度,保证IGCT不被损坏,短路电流被强迫转移至MOV中消耗。分断正常电流与分断短路电流原理相似,这里不做赘述。

仿真及试验验证

根据图4所示的拓扑结构在Matlab/Simlink中建立仿真模型,仿真模型中参数设置如表1所示。

表1 仿真模型中参数设置

参数	数值
直流系统电压 U_s/kV	10
系统线路电阻 R_s/Ω	0.33
负载电阻 Z/Ω	200
系统线路电感 L_s/mH	400
转移电感 $L_t/\mu\text{H}$	50
预充电电容 $C/\mu\text{F}$	500
断路器动作电流 I_0/kA	6
预充电电容电压 U_c/kV	5
避雷器预置电压 U_y/kV	12

仿真结果如图6所示,系统发生短路后,系统电流快速上升并在0.75 ms时到达100 A,此时断路器动作,1.25 ms时IGBT导通,开始换流。由图6可以看出系统电流在3.8 ms时下降到0 A,完成开断故障系统的任务。

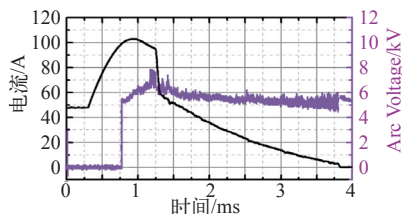


图6 仿真结果

结束语

给出了传统纯机械式直流断路器、使用电力电子开关的全固态直流断路器以及两者结合后衍生的混合式直流断路器的工作原理,给出了其拓扑结构,并分析了各个类型断路器存在的优点以及缺点,得出了混合式直流断路器具有传统纯机械式静态特性和全固态式动态特性性的优点,是现阶段直流断路器的主要研究对象。

在现有的混合式直流断路器研究的基础上进行完善,通过使用新型电力电子开关和增加限流电路的方法提高了断路器的性能,与现有的断路器相比,具有以下优点:开断短路电流时间短,具有较好的可控性,开断短路电流时机械开关动静触头产生的电弧小甚至没有电弧产生,正常导通状态损耗小。通过Matlab/Simulink仿真实验验证了该方案的可行性。EA

(收稿日期:2017.03.25)

(编辑:刘群焱)