「断路器」

高压SF_6断路器全弹簧操动机构技术发展

文/平高集团有限公司　刘　宇　宋广民　朱苛娄　宋　超　郭良超

中国电力工业持续高速发展，为高压开关行业带来了极好的发展机遇。随着高压断路器灭弧室所需操作功的降低，高压断路器全弹簧操动机构的应用越来越普及。从国内外典型弹簧机构进行技术研究分析，结合当前灭弧室技术发展情况和电网需求，论述弹簧机构的发展与动向，为国内弹簧机构生产厂家以及用户提供参考。

中国电力工业持续高速发展，为高压开关行业带来了极好的发展机遇。随着高压断路器灭弧室所需操作功的降低，高压断路器全弹簧操动机构（简称“弹簧机构”）的应用越来越普及。目前，国内外弹簧机构的生产厂家越来越多，技术及产品种类也不断涌现，这就需要对各类弹簧机构加以研究分析，理清发展思路，认清发展方向，本文通过对国内外典型弹簧机构进行技术研究分析，结合当前灭弧室技术发展情况和电网需求，论述弹簧机构的发展与动向，为国内弹簧机构生产厂家以及用户提供参考。

典型弹簧机构技术研究分析

高压断路器弹簧操动机构的发展可以追溯到20世纪20年代后期。当今，稳定可靠的弹簧操动机构在额定电压为72.5～550 kV SF_6断路器中得到广泛应用，现代弹簧操动机构的合簧操作功能量（简称“操作功”）可达0.4～13 kJ。

目前国内外高压开关行业中，国外断路器弹簧操动机构技术发展已经日趋成熟，系列化程度较高，最具代表性的公司有ABB、SIEMENS、ALSTOM和三菱等。国内断路器弹簧操动机构在吸取多种国外弹簧机构技术后，发展也非常迅速，多个厂家也已经开始进行自主设计高压断路器配用的全弹簧操动机构，并逐步完善，形成系列化产品，其中最具代表性的厂家有陕西凌宇输变电设备制造有限公司等。

下面对几种典型的弹簧操动机构进行分析。

1. 瑞士ABB公司弹簧机构技术分析

据查，瑞士ABB公司现已推出了BLG型、BLK型、FSA1型和MSD型至少4款弹簧机构。投入中国市场最多的是BLG型和BLK型，FSA1型早就研发成形，但近几年国内市场才开始应用，MSD型为最新研发，国内还未见有产品应用。

（1）BLG型弹簧操动机构技术分析（如图1所示）

图1　BLG型弹簧操动机构原理简化图

BLG型弹簧操动机构技术特点如下。

整机零部件以铸造为主，结构复杂庞大，工作操作功范围为3.7～13.1 kJ，通用性应用能力极强，但是无法配套GIS断路器产品。

BLG型弹簧操动机构的分合闸弹簧系统均采用螺旋压簧，合簧为阵列的组合簧，布置在机心主体内部，分簧为同轴的组合簧，布置在机心主体外部，不利于市场推广；储能系统采用蜗轮－滑轮系的组合设计，由于合簧串入了滑轮系统使机构储能无死点设计，且无机械防过储能设计，并且动滑轮的应用使得操作功不变的情况下，减小了机构系统受力，提高了零部件的可靠性；合闸系统采用凸轮－摆杆原理，由于凸轮轴为储能系统的定滑轮系统，所以合闸时，凸轮轴旋转270°左右才能完成合闸；脱扣系统为等待式三级脱扣，脱扣时间短，整个脱扣系统为模块化设计，便于装配调试，电磁铁为动铁心旋转运动打击式；分闸和合闸缓冲器为单独的缓冲器，具有空程功能，缓冲耗能小；输出为拐臂－拉杆输出，不能旋转输出。

（2）BLK型弹簧操动机构技术分析（如图2所示）

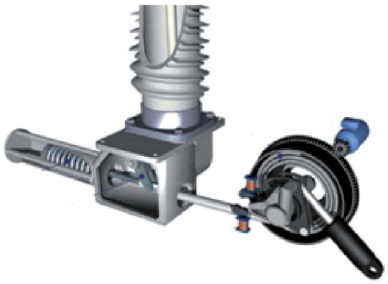

图2　BLK型弹簧操动机构原理简化图

BLK型弹簧操动机构技术特点如下。

整机零部件以铸造为主，结构简单紧凑，工作操作功范围为2.5 kJ左右。

BLK型弹簧操动机构的分闸弹簧采用螺旋压簧，布置在机心主体外部，合闸弹簧采用钟表式卷簧，布置在机心内部，使整机结构简单紧凑；储能系统采用蜗轮－行星齿轮的组合设计，由于合簧串入了行星齿轮系使得无死点设计和机械防过储能设计，简化了储能系统，但合簧储能完全靠行程开关控制，如果电动机制动时间太长，有过储能造成合闸特性超出要求的风险；输出轴和凸轮轴采用偏心轴设计，无合闸凸轮，合闸系统采用偏心轮的原理，无单独的输出轴系，结构简单，凸轮轴旋转90°左右完成合闸；脱扣系统为等待式，三级脱扣，脱扣时间短，且整个脱扣系统为模块化设计，便于装配调试，电磁铁为动铁心旋转运动打击式；无合闸缓冲器，分闸缓冲器具有空程功能，缓冲耗能小；输出为拐臂－拉杆输出，不能旋转输出。

（3）FSA1型弹簧操动机构技术分析（如图3所示）

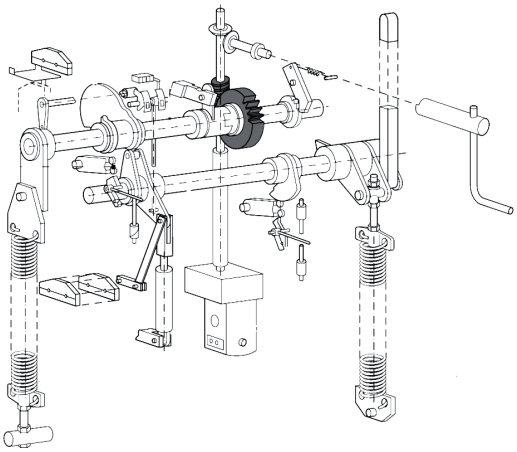

图3　FSA1型弹簧操动机构原理简化图

FSA1型弹簧操动机构技术特点如下。

整机零部件未统一，有钣金、机械加工和铸造三种形式，结构简单，操作功低，可配套72.5～126 kV敞开断路器。

FSA1型弹簧操动机构分合闸弹簧均采用螺旋拉簧，弹簧能量小；储能系统采用蜗轮－蜗杆传动，储能过死点设计，棘轮棘爪式离合器；合闸合闸系统采用凸轮－摆杆原理；分闸脱扣系统为二级复位式，电磁铁为动铁心直线运动撞击式；有明显的分闸缓冲器；输出为拐臂－拉杆输出，不能旋转输出。

（4）MSD型弹簧操动机构技术分析（如图4所示）

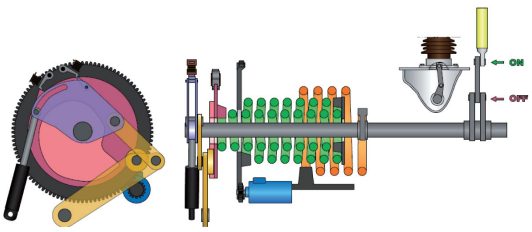

图4　MSD型弹簧操动机构原理简化图

MSD型弹簧操动机构技术特点如下。

整机零部件以铸造件为主，结构简单。

MSD型弹簧操动机构的分合闸弹簧“共轴”式设计，均采用螺旋扭簧；储能系统采用齿轮传动，无明显死点设计；合闸系统采用凸轮－摆杆原理；脱扣系统为等待式，三级脱扣，脱扣时间短，且整个脱扣系统为模块化设计，便于装配调试，电磁铁为动铁心旋转运动打击式；无合闸缓冲器，分闸缓冲器带空行程设计，提高了机构输出效率；输出为轴连旋转输出。

2. 德国西门子公司弹簧操动机构技术分析

据查，德国西门子公司的弹簧操动机构已经形成系列化。通过更改合闸和分闸弹簧的操作功，加上西门子先进的双动自能式灭弧室的断路器操作功大大降低，此系列化的弹簧操动机构可以满足西门子550 kV及以下断路器需要，如图5所示。

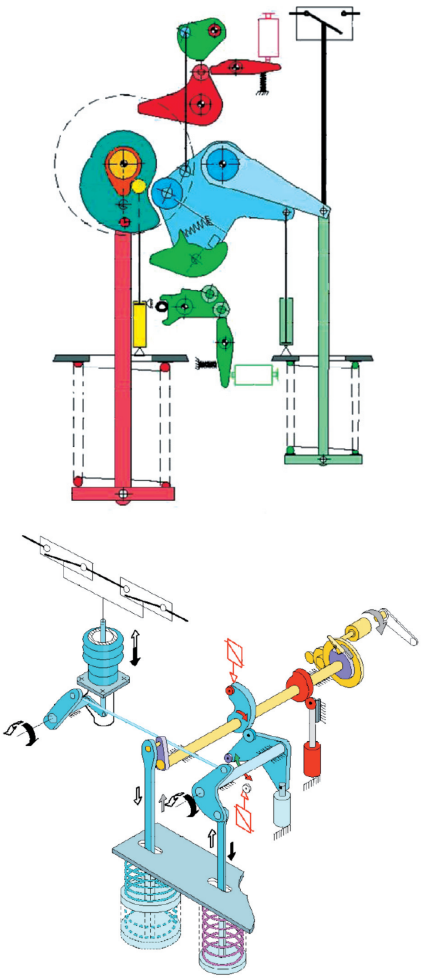

图5　西门子弹簧操动机构原理简化图

西门子弹簧操动机构的技术特点如下。

整机零部件未统一，主要以机械加工和铸造两种形式为主，结构不算简单，操作功范围为2～6 kJ左右，可配套其126～550 kV断路器。

西门子弹簧操动机构的合闸和分闸弹簧采用螺旋压簧，分开布置在机心主体内部，相对占用空间较大；储能系统采用独特的“齿轮系－推杆－凸轮”设计，储能过死点，“推杆－凸轮”储能机构具有离合和机械防过储能的集成功能；合闸系统采用凸轮－摆杆原理，合闸凸轮轴旋转160°左右完成合闸；脱扣系统为等待式，合闸为两级脱扣，分闸为三级脱扣，电磁铁为动铁心直线运动撞击式；具有完全独立的合闸和分闸缓冲器，缓冲器具有空程功能，缓冲耗能小，合闸缓冲器传动采用凸轮－推杆传动；分合闸输出轴旋转46°，输出为拐臂－拉杆输出，不能旋转输出。

3. 法国ALSTOM公司弹簧操动机构技术分析

据查，法国ALSTOM公司已有80多年生产和开发高压断路器用弹簧操动机构的历史和经验。其在1933年推出了第一台断路器全弹簧操动机构，标志着一个与电磁操动机构、气动操动机构和液压操动机构不同的新趋势的形成。目前，ALSTOM已研发出了3代20多种型号的产品，全球有80 000多台的弹簧操动机构正在运行。

（1）FK1和FK2系列弹簧操动机构技术分析（如图6所示）

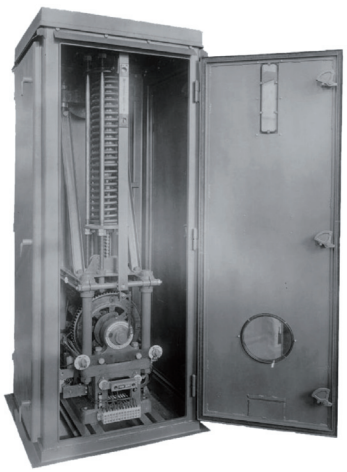

图6　ALSTOM第一代弹簧操动机构

第一代弹簧操动机构为FK1和FK2系列，历时1933年～1936年，配套15～150 kV的罐式多油断路器，此种断路器目前已经被SF_6断路器取代，不再赘述。

（2）FKF1－X和FKF2－X系列弹簧操动机构技术分析（如图7所示）

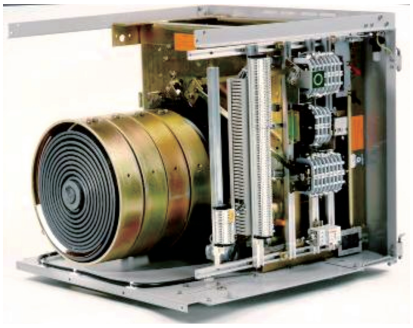

图7　ALSTOM第二代弹簧操动机构

FKF1－X和FKF2－X系列化弹簧操动机构技术特点如下。

第二代弹簧操动机构为FKF1－X和FKF2－X系列，始于1936年，整机零部件统一，以钣金零件为主，结构简单，操作功范围为3.2～12.5 kJ，可配套15～800 kV的少油断路器和72.5～550 kV的SF_6断路器。

FKF1－X和FKF2－X系列化弹簧操动机构的合闸弹簧采用钟表式卷簧，布置于机心内部；分闸弹簧采用螺旋压缩式弹簧，布置于机心外部；合闸系统采用凸轮－摆杆原理，凸轮轴带着凸轮可360°旋转；飞轮带摩擦制动系统，可平衡力矩，并在合闸操作结束时耗散多余的能量；合闸制动器收到阻尼，降低动态符合。

（3）FKF3－X系列弹簧机构技术分析（如图8所示）

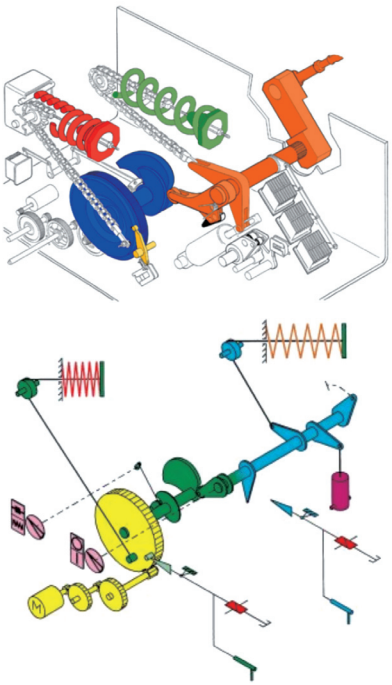

图8　ALSTOM第三代弹簧操动机构原理简化图

第三代弹簧机构为FK3－X系列，1991年研发，历时1994年至今，整机零部件统一，基本全部是钣金结构零件，结构简单紧凑，操作功范围为0.7～12.5 kJ左右，可配套36～550 kV的SF_6断路器。

FK3－X系列化弹簧操动机构的合闸和分闸弹簧采用螺旋压簧，布置在机心主体内部，分闸弹簧也可以根据需要布置在机心外部；储能系统采用齿轮系设计，两套离合器布置在齿轮系中，具有过死点设计，独特“活动齿”机械防过储能结构；齿轮系末级大齿轮作为飞轮，采用链条定滑轮系统，将分合闸弹簧与机心控制系统平行布置；合闸系统采用凸轮－摆杆原理，独特的大轮廓凸轮和60°大角度输出设计，凸轮轴旋转190°左右才能实现合闸锁扣，使得合闸缓冲器得以取消，并且合闸多余能量可以继续储存在合簧中；脱扣系统为等待式，锁扣系统冲击小，减少运动件数量，加之锁闩高副工作面为非转轴圆心的圆弧面，力臂固定，减小零部件加工精度，使锁扣更可靠；合闸二级，分闸三级脱扣，末级锁闩和动铁心集成，减少零部件数量，缩小空间；电磁铁为撬杠式动作，电磁铁力值小，励磁时间短，减少脱扣时间；分闸缓冲器采用活塞侧隙过油缓冲，加之独特的缸体结构，使得缓冲器零部件数量极少，活塞杆上滑动销轴长孔，具有空程功能，缓冲耗能小；输出可轴连旋转输出或者拐臂－拉杆输出，输出轴旋转60°。

4. 日本三菱公司弹簧操动机构技术分析

日本三菱弹簧操动机构20世纪90年代引入我国，是国内高压断路器最早配用的全弹簧操动机构，带来了国内断路器配用弹簧操动机构的第一次革命，由其技术衍生出的多种型号弹簧机构在国内应用极为广泛，但其仅限于1～4 kJ操作功，如图9所示。

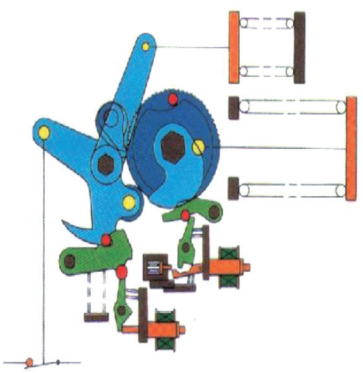

图9　三菱弹簧操动机构原理简化图

三菱弹簧操动机构技术特点如下。

整机零部件未统一，主要以机械加工和铸造两种形式为主，结构不算简单，操作功范围为1～4 kJ左右。

三菱弹簧操动机构的合闸和分闸弹簧采用螺旋压簧，分开布置在机芯主体内部或者外部，相对占用空间较大；储能系统采用独特的“偏心棘爪－不全齿棘轮”设计，储能过死点，由于不完全圆周齿形的棘轮配合死点位置，实现储能过后的机械防过储能功能，采用离合器布置与凸轮轴上；合闸系统采用凸轮－摆杆原理，合闸凸轮轴旋转170°左右完成合闸；分合闸为均为两级脱扣，电磁铁为动铁心直线运动撞击式，脱扣力大，线圈励磁时间较长；分合闸缓冲器集成式设计，无空程功能，分合闸过程中，由缓冲带来的能量损耗较大；输出轴分合闸动作旋转45°，输出为拐臂－拉杆输出，不能旋转输出。

断路器全弹簧操动机构发展方向

通过以上分析和梳理，总结弹簧操动机构的技术方向发展如下。

1. 高可靠性

高压断路器作为电网中的控制和保护关键设备，其地位至为重要，随着电压等级的升高，显得更加重要，在一次国外公司采用FMEA法（德国故障模式效应分析法，用来判断电力工程系统故障效应的一种方法）对取自多个用户11 000台断路器的故障数据研究得出结论：高压功能组的故障率占22%，操动机构占49%，控制和监视功能组占23%，其他占6%，由此可见操动机构故障率占最多。所以弹簧操动机构的技术发展必然以高可靠性为本质。

2. 低成本、中低操作功

高压断路器的造价，大致是灭弧室系统、绝缘系统、操动机构系统各占三分之一，整个断路器的造价，与操动机构所需的操作功有着直接关系。近十年来，随着我国加工技术的提高和高压SF_6断路器生产门槛的降低，国内涌现出了众多断路器及其操动机构生产厂家，加之国外电力巨头的冲击，高压SF_6断路器的整体价格已逐步降低到了很低的水平，因此各大企业为了生存，低成本将是弹簧操动机构技术发展不可避免的研究课题。然而不同操动机构的成本与操作功的关系如图10所示，考虑到第二代自能式双向运动灭弧室技术正在中国大面积实现对断路器的技术升级，所需操动机构的操作功大大减小，呈现出550 kV及以下电压等级断路器采用弹簧操动机构，800 kV及以上电压等级断路器采用液压操动机构的总体趋势，所以弹簧操动机构的操作功发展主要以中低操作功（1～8 kJ）为主。操动机构操作功与制造成本关系如图10所示。

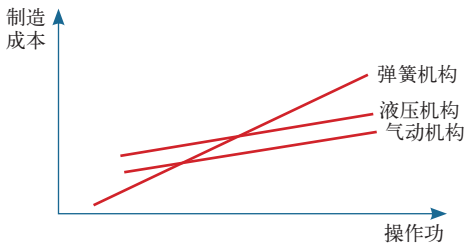

图10　操动机构操作功与制造成本关系图

3. 夹板式结构钣金化

通过上述对国内外典型弹簧操动机构技术研究分析，可将现有弹簧操动机构结构划分为夹板式机架结构和铸造机架式结构2类。零部件的加工方法划分为“铸造＋机加”“型材＋机加”和“板材＋冲压或者＋铆接”（钣金化）3类。众所周知，钣金加工的零部件一致性非常高，这正弥补了操动机构零部件加工差异性导致断路器可靠性降低的缺陷，再者，钣金加工对于大批量零部件来说，加工效率高，加工成本低，这也贴合了弹簧操动机构低成本的市场需求，而且，钣金化的零部件强度也满足中低操作功弹簧操动机构的需求，加之目前中国汽车行业和飞机行业发展突飞猛进，带动了我国冷加工技术的提高，因此，综合分析，弹簧操动机构技术将朝着夹板式结构钣金化方向发展。

结束语

我国电力工业将持续高速发展，特别是在全球能源互联网战略实施以后，高压开关行业将迎来新的发展机遇，并且随着断路器灭弧室所需操作功的降低，高压断路器弹簧操动机构的研究和应用也将迎来新浪潮，弹簧操动机构技术将在低成本中低操作功的需求环境下，以高可靠性为本质，以夹板式结构钣金化为技术路线，最终实现标准、统一和系列的单一弹簧操动机构技术，为中国电力工业添砖加瓦。**EA**

（收稿日期：2017.10.18）

（编辑：刘群垚）