

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.03.002

# 适用于直流断路器的大电流快速开关分闸特性

兰剑, 冯英, 王承玉

(中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

**摘要:**快速开关分闸稳定性是影响直流断路器开断性能的关键要素。文中对大电流快速开关的双弹簧永磁操动和电磁斥力双动机构的分闸过程,用有限元方法进行电磁、热和位移等多物理场耦合计算,分析了永磁操动机构驱动线圈是否有必要投入以及不同驱动线圈电流对双动机构分闸特性的影响。结果表明:在永磁操动机构驱动线圈投入的情况下,可提前将永磁吸力抵消,进而避免电磁斥力因做功时间较短而引起分闸回弹现象;由于分闸初期电磁斥力非常大,永磁操动机构驱动线圈的投入对分闸初期的速度影响较小;在电磁斥力消失后,永磁操动机构驱动线圈电流在一定范围内越大,到达额定开距的速度越大,为避免其造成分闸反弹,应合理选择驱动线圈电流值。将仿真结果与实际样机分闸特性曲线进行对比,二者具有较好的一致性,验证了仿真方法的正确性。

**关键词:**大电流快速开关;直流断路器;永磁操动机构;电磁斥力机构;多场耦合;有限元计算

中图分类号: TM56

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2023)03-0011-08

## 0 引言

基于混合型拓扑方案的直流断路器是目前直流开断技术的重要发展方向<sup>[1-6]</sup>,该类型断路器将机械开关的低通态损耗和电力电子开关的快速关断优点充分结合<sup>[7]</sup>。混合式直流断路器关断时电流变化梯度极大,在线路杂散电感或其他感性器件的影响下,关断瞬间机械开关的触头间隙须承受一定的瞬时过电压,故机械开关分闸速度的快慢以及分闸过程的稳定性是影响混合式直流断路器开断性能的关键要素<sup>[8-9]</sup>。随着中压直流配电系统迈向大容量电力传输时代,混合式直流断路器将承载更大的电流<sup>[10-11]</sup>,电网故障时也将承受更高幅值的瞬态恢复电压。大电流快速开关要求其触头接触电阻非常小,同时须满足短路工况下的动热稳定要求,因此在机械特性上要求合闸时机构对触头的压力非常大,分闸时速度非常快。

为保证大电流快速开关在合闸位置时有足够的接触压力,目前普遍采用永磁操动机构<sup>[12-14]</sup>,保持位置永磁体吸力大且稳定,并且永磁操动机构运动部件简单、分合闸电流小,对操作电源要求较低;同时,为保证分闸速度足够快,电磁斥力机构得以广泛应用<sup>[15-17]</sup>,通过电磁涡流效应,放电线圈与斥力板之间产生快速反向磁场,电磁斥力推动斥力板快速运动,放电线圈电流上升梯度越大,斥力板所受斥力增加越快。因此,基于永磁操动和电磁斥力双动机构设计的快速开关是适用于大容量中压混合式直流断路器的可行方案<sup>[18-23]</sup>。但由于2种

操动机构涉及的元件及参数众多,在配合使用时,受到电磁、热、位移等多物理场相互作用,运动过程复杂,如果设计稍有缺陷,特别是在中压大电流真空开关触头开距小并且运动部件质量大的情况下,易导致分闸过程不稳定,出现触头回弹、反弹等问题。因此,双动机构操作线圈是否同时投入、如何相互配合、线圈电流参数如何设计等成为制约大电流快速开关分闸稳定性的主要难题。

文中利用有限元计算方法,针对基于双弹簧永磁操动和电磁斥力双动机构的快速开关分闸过程进行建模。通过改变2种机构操作线圈配合方式以及操作线圈电流大小,对基于双动机构的快速开关分闸过程进行电磁场、热场及位移场的多物理场耦合仿真计算,分析其对开关分闸过程的影响规律,并进行试验验证,为大电流快速开关的合理设计提供指导依据。

## 1 产品及工作原理

基于双弹簧永磁操动机构和电磁斥力机构的大电流快速开关设计结构如图1所示。其中动触头、连杆、带凸台的运动导杆和斥力盘是机械硬连接,作为一个整体,文中称为主运动部件;分闸弹簧和触头弹簧通过带凸台的运动导杆将力传递到主运动部件上;主运动部件与动铁芯通过触头弹簧进行连接。

永磁操动和电磁斥力机构的控制驱动原理如图2所示,主要包括永磁操动机构的驱动电路和电磁斥力机构的驱动电路。 $D_{11}$ 为控制晶闸管; $D_{12}$ 为续流二极管; $R_0$ 、 $R_1$ 分别为驱动线圈和分闸线圈的

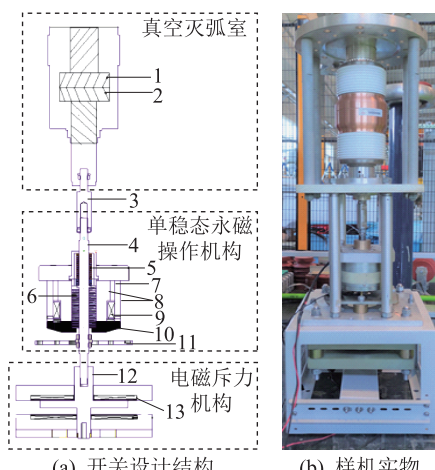


图1 基于双动机构的快速开关结构  
1—静触头；2—动触头；3—连杆；4—带凸台的运动导杆；  
5—分闸弹簧；6—触头弹簧；7—永磁体；8—静铁芯；  
9—永磁机构驱动线圈；10—动铁芯；11—动铁芯分闸限位板；  
12—斥力盘；13—分闸线圈。

图1 基于双动机构的快速开关结构  
Fig.1 Structural of fast mechanical switch based on double-action mechanism

引线电阻。开关在合闸位置时,永磁操动机构动静铁芯吸合,通过带凸台的运动导杆压缩触头弹簧给予触头一定的压力。开关分闸动作时,控制器控制永磁操动机构驱动电路中的绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)导通,使得储能电容  $C_0$  以一定大小的电流对驱动线圈放电,驱动线圈产生与永磁体相反的持续磁场,抵消永磁力。同时,控制器控制晶闸管  $D_{11}$  使储能电容  $C_{11}$  向分闸线圈放电,从而在分闸线圈中产生一个毫秒级的脉冲电流,脉冲电流在线圈周围产生变化的磁场,由于电磁感应现象的存在,在靠近驱动线圈斥力盘的内部感应出一个与线圈电流相反的涡流,从而在斥力盘中产生电磁斥力推动运动部件加速。

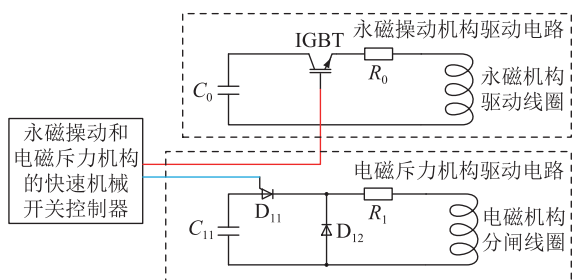


图2 双动机构的控制原理  
Fig.2 Control principle of double-action mechanism

## 2 多物理场耦合建模

### 2.1 几何模型

按照样机机构设计需求,建立近似 1:1 的仿真几何模型进行计算分析。由于实际机构沿轴心对称,故文中采用轴对称模型进行等效计算,仿真几

何模型如图 3 所示。

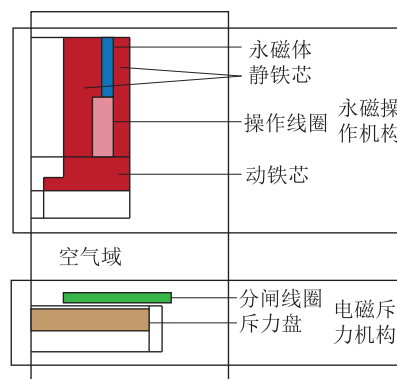


图3 双动机构的仿真几何模型  
Fig.3 Simulation geometric model of double-action mechanism

为最大限度地接近实际结构,几何模型中相关参数的设定与样机结构一致,其核心部件几何尺寸和材料属性设计如下。

(1) 永磁操动机构:永磁体内径 54 mm,外径 63 mm,高度 40 mm,材料为钕铁硼;驱动线圈内径 47 mm,外径 63 mm,高度 40 mm,线径 4 mm<sup>2</sup>,匝数 200,材料为铜;静铁芯内径 25 mm,外径 75 mm,高度 80 mm,材料为软铁;动铁芯内径 25 mm,外径 75 mm,高度 24 mm,材料为软铁。

(2) 电磁斥力机构:分闸线圈内径 25 mm,外径 107 mm,截面积 1 mm×7 mm,匝数 55,材料为铜;斥力盘半径 90 mm,厚度 15 mm,材料为铝。

### 2.2 数学模型

样机分闸过程涉及电磁场、热场和位移场,为完整、准确地模拟分闸过程,须基于这 3 种物理场进行耦合计算。3 种物理场的数学方程如式(1)一式(10)所示。

#### 2.2.1 电磁场方程

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (1)$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (2)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (3)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla A / \partial t \quad (4)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (5)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{H}$  为磁场强度; $\mathbf{J}$  为电流密度; $\mathbf{B}$  为磁通密度; $\mathbf{A}$  为磁矢势; $\mathbf{E}$  为电场强度; $\mathbf{D}$  为电位移; $\sigma$  为电导率; $\mu$  为磁导率; $\varepsilon$  为介电常数。

#### 2.2.2 热场方程

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla k \nabla T = Q \quad (7)$$

$$Q = \frac{1}{2} \sigma |\mathbf{E}|^2 \quad (8)$$

式中: $\rho$ 为密度; $C_p$ 为定压比热; $T$ 为温度; $k$ 为热导率; $Q$ 为感应热源。

### 2.2.3 位移场方程

由于双弹簧永磁操动机构的运动导杆与动铁芯运动过程不同,所以将动触头、连杆、带凸台的运动导杆和斥力盘作为主运动部件进行整体运动分析,而将动铁芯作为另一部分进行运动分析。由于动铁芯相对于主运动部件质量较小,故在计算分析中忽略其本身重力的影响。文中不考虑在运动过程中产生的摩擦力。

$$\begin{cases} \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{F_{em0} + F_g + F_f - F_c - F_z}{m_1} & s = 0 \\ \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{F_{em0} + F_g + F_f - F_{em1} - F_z}{m_1} & s < 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = v \quad (10)$$

式中: $v$ 为斥力盘的速度; $t$ 为时间; $F_{em0}$ 为斥力盘受到的磁场力; $F_g$ 为主运动部件所受重力; $F_f$ 为主运动部件所受分闸弹簧的张力; $F_c$ 为主运动部件所受触头弹簧的张力; $F_z$ 为灭弧室自闭力; $F_{em1}$ 为动铁芯所受磁场合力; $u$ 为主运动部件从零时刻开始的位移量; $s$ 为动铁芯从零时刻开始的位移量; $m_1$ 为主运动部件质量。

## 3 仿真分析

### 3.1 不投入永磁机构驱动线圈对分闸特性的影响分析

为了研究不投入永磁机构驱动线圈对分闸特性的影响,对特定结构及参数的样机进行试验测试及仿真分析。分闸弹簧在合闸位置的预压力为2 000 N,弹性系数为50 N/mm;触头弹簧在合闸位置的预压力为6 000 N,弹性系数为1 000 N/mm,两者均为螺旋弹簧;电磁斥力机构中分闸线圈储能电容为2.5 mF,初始充电电压为1 000 V;斥力盘与分闸线圈之间的初始间隙为4 mm;主运动部件额定最大位移为12 mm,质量为10 kg;环境温度为293.15 K。

为了得到主运动部件分闸位移特性,对样机进行分闸操作试验,如图4所示。可以看出,分闸线圈电流峰值约为2 900 A,持续半个周期(约2.1 ms)。分闸过程中主运动部件未达到额定最大位移,而是在产生分闸线圈4.5 ms后、位移约6 mm的位置发生了回弹。

针对上述分闸过程回弹现象进行仿真分析,仿真设置参数与试验保持一致。为仿真得到永磁体

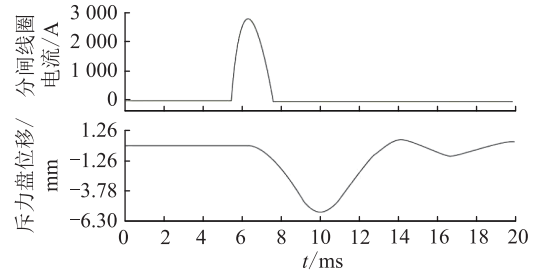


图4 永磁机构驱动线圈不投入情况下的分闸线圈电流和斥力盘位移实测波形

Fig.4 Test waveforms of opening coil current and stroke curve of the repulsion disc without inputting the driving coil of the permanent magnet operating mechanism

磁场稳定状态,在0 s—0.3 s仿真计算永磁机构的磁场分布,待磁场计算至稳态,从 $t=0.3$  s时刻开始仿真计算双动机构的分闸过程。

斥力盘位移、速度和分闸线圈电流仿真曲线如图5所示。

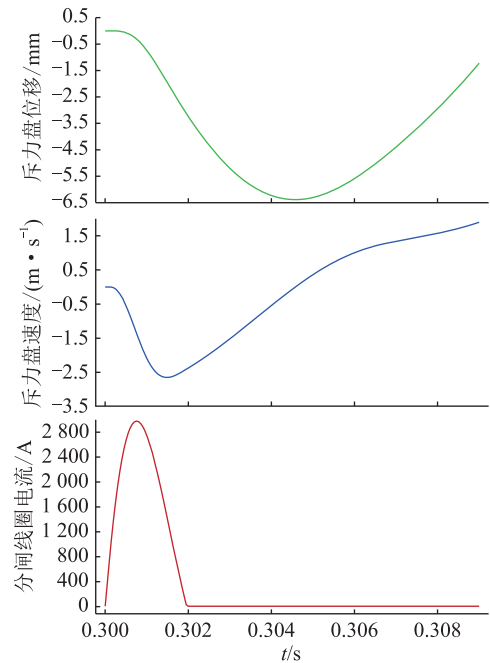


图5 永磁机构驱动线圈不投入情况下的斥力盘位移、速度和分闸线圈电流仿真波形

Fig.5 Simulation waveforms of stroke and speed curve of the repulsion disc and opening coil current without inputting the driving coil of the permanent magnet operating mechanism

可以看出分闸线圈电流峰值约为2 970 A,持续半个周期(约2 ms)。主运动部件在产生分闸线圈4.6 ms后位移至6.5 mm处发生回弹,其运动速度趋势先随着电磁斥力的增大而迅速增大,当电磁斥力减小时,其速度增加变缓;达到最大值以后,随着电磁斥力的消失,速度逐渐减小至0;此后,斥力盘回弹,速度向上增大,直至回弹至合闸初始位置。通

过对比图 4 与图 5,可以看出仿真结果与实测结果具有较好的一致性。

样机分闸过程中的磁通密度分布如图 6 所示。可以看出,分闸过程中永磁机构的磁场分布基本不变,而电磁斥力机构在产生分闸线圈 1 ms 后磁场迅速增大,快速变化的磁场在斥力盘中感应出涡流,使得电磁斥力迅速增大,此时动铁芯位置未发生变化而斥力盘快速向下运动;当电磁斥力机构的磁场消失以后,动铁芯出现向下运动趋势,这说明分闸过程中斥力盘带动动触头先动作而动铁芯后动作。其原因是电磁斥力直接作用于斥力盘,斥力盘直接带动主运动部件快速运动,而主运动部件通过触头弹簧与动铁芯间接连接,动铁芯始终受到永磁吸力的作用,在分闸时,主运动部件通过触头弹簧将向下的张力逐渐传递给动铁芯,由于弹簧压缩形变过程较慢,所以只有当触头弹簧向下的张力大于永磁吸力时,动铁芯才会开始运动。

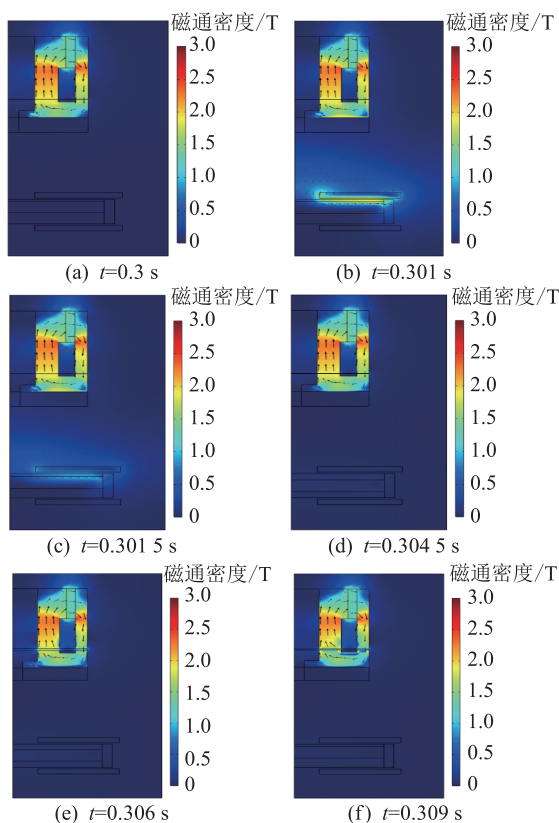


图 6 分闸过程中不同时刻的磁通密度仿真  
Fig.6 Simulation of magnetic flux density at different times during opening

样机分闸过程中的温度场分布如图 7 所示。可以看出,温升主要出现在斥力盘上表面附近,瞬时的温升最大可以达到 3 K。这主要是由感应涡流的集肤效应引起的,即当斥力盘处于快速变化的电磁场中时,斥力盘内部的电流分布不均匀,电流主要

集中在其表面的薄层,越靠近表面,电流密度越大,因此斥力盘上表面的电流密度要远远大于其他位置,所以热量主要产生在斥力盘上表面附近。为了保证计算的准确性,在计算过程中不可忽略温度场的耦合。

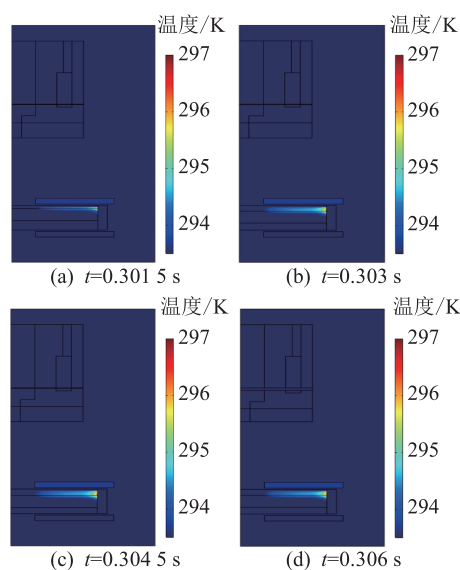


图 7 分闸过程中不同时刻的温度场仿真  
Fig.7 Simulation of temperature at different times during opening

主运动部件受力以及加速度曲线如图 8 所示。

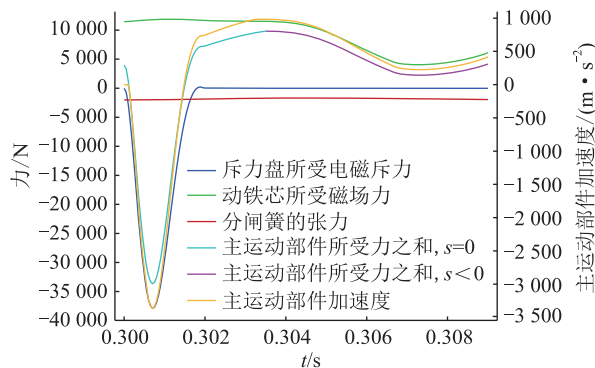


图 8 永磁机构驱动线圈不投入情况下的主运动部件受力及加速度仿真波形

Fig.8 Simulation waveforms of force and acceleration curve of the main moving parts without inputting the driving coil of the permanent magnet operating mechanism

由式(9)分析可知,当动铁芯位移  $s=0$  时,主运动部件主要受到电磁斥力、分闸弹簧张力和触头弹簧张力。电磁斥力虽然远大于触头弹簧张力,但作用时间较短,并且随着主运动部件向下运动,触头弹簧压缩量不断增大,所以当电磁斥力与分闸弹簧张力之和小于触头弹簧张力时(产生分闸线圈 1.5 ms 的时刻),主运动部件受力方向由向下改为向上,加速度方向随着力的方向和大小变化,至此速度由最大值开始减小;当动铁芯位移  $s<0$  时,此时触头弹

簧的张力已经大于永磁吸力,使得动铁芯开始向下运动,所以此时主运动部件主要受到分闸弹簧张力和永磁吸力,加速度方向向上,速度继续减小至 0,随后发生回弹。从以上分析可以得出,在电磁斥力消失(产生分闸线圈 2 ms 的时刻)以后,导致主运动部件回弹现象出现的主要原因是动铁芯所受永磁吸力通过触头弹簧抑制主运动部件向下运动,因此只有在分闸过程中快速抵消动铁芯所受的永磁吸力才能避免分闸回弹现象的发生。

### 3.2 投入永磁机构驱动线圈对分闸特性的影响分析

为了快速抵消永磁吸力,分闸时在永磁机构驱动线圈中通以一定电流,该电流使线圈产生与永磁体极性相反的磁场,以此来削弱铁磁回路的磁场,降低永磁体对动铁芯的剩余磁力<sup>[24-28]</sup>。为此,设定永磁操动机构驱动线圈储能电容为 10 mF,初始充电电压为 360 V。

永磁操动机构驱动线圈与电磁斥力机构分闸线圈同时投入情况下得到的分闸线圈电流、驱动线圈电流、斥力盘位移和速度仿真曲线如图 9 所示。

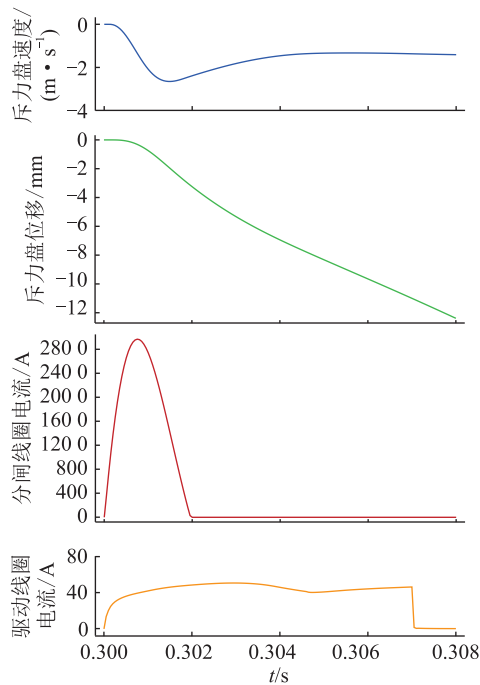


图 9 双动机构操作线圈同时投入情况下的线圈电流和斥力盘位移、速度仿真波形

Fig.9 Simulation waveforms of coil current and stroke, speed curve with inputting the operating coil of the double-action mechanism at the same time

对比图 5 可以看出,在其他条件相同的情况下,投入永磁操动机构驱动线圈时,速度方向始终向下,斥力盘位移曲线未出现回弹现象,可知驱动线圈产生的磁场抵消部分永磁吸力,可以避免该条件

下分闸回弹现象的发生。

永磁操动机构驱动线圈与电磁斥力机构分闸线圈同时投入情况下得到的主运动部件受力以及加速度曲线如图 10 所示。和图 8 对比可以看出,动铁芯动作时间提高了近 1 ms,这是由于永磁操动机构驱动线圈产生的磁场削弱了永磁吸力,降低了永磁吸力对动铁芯的阻力,从而加快了动铁芯动作。当动铁芯向下运动后,由于驱动线圈磁场力持续作用,继续抵消永磁吸力,从而使主运动部件所受的向上阻力迅速减小至 0,避免了分闸回弹现象的发生。

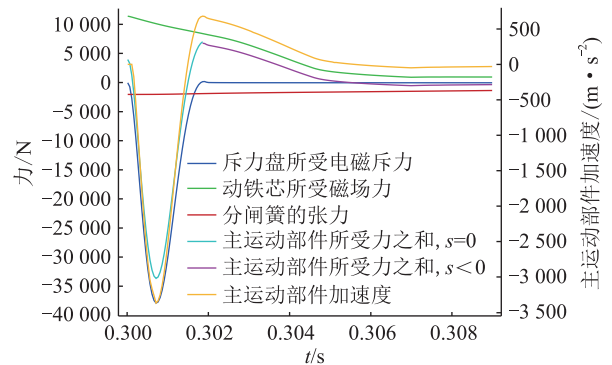


图 10 双动机构操作线圈同时投入情况下的主运动部件受力及加速度仿真波形

Fig.10 Simulation waveforms of force and acceleration curves of main moving parts with inputting the operating coil of the double-action mechanism at the same time

对样机同时投入永磁操动机构驱动线圈与电磁斥力机构分闸线圈,在同等情况下进行试验,得到驱动线圈电流、分闸线圈电流和斥力盘的位移试验波形如图 11 所示。驱动线圈电流波动主要是由 IGBT 频繁通断控制电容对线圈放电产生的。分闸时该电流须稳定在相应的目标值附近,以确保既能克服永磁吸力又不至于产生过大的反向作用力,当电流未达到目标值时,IGBT 导通使电流增大;当电流即将高于目标值时,IGBT 关断使电流下降。通过对比图 11 和图 9,可以看出试验曲线变化趋势与仿真曲线基本一致,从而很好地验证了仿真计算的准确性。

### 3.3 不同永磁机构驱动线圈电流对分闸特性的影响分析

为了选择合适的驱动线圈电流,在其他条件和参数相同的情况下,对永磁操动机构驱动线圈分别通以 20 A、30 A、50 A 和 150 A 的电流进行仿真分析。

不同永磁操动机构驱动线圈电流情况下的动铁芯所受磁场力曲线如图 12 所示。

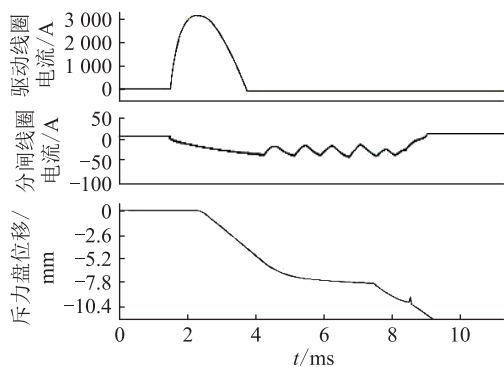


图 11 双动机构操作线圈同时投入情况下的驱动线圈电流、分闸线圈电流和斥力盘位移试验波形

Fig.11 Test waveforms of driving coil current, opening coil current and stroke curve of the repulsion disc with inputting the operating coil of the double-action mechanism at the same time

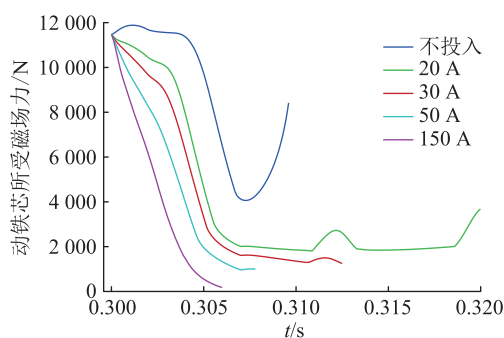


图 12 不同永磁机构驱动线圈电流情况下的动铁芯所受磁场力曲线

Fig.12 Simulation waveforms of magnetic field force curve of moving iron core under different driving coil currents of permanent magnet operating mechanism

可以看出,驱动线圈电流越大,所抵消永磁吸力的作用越明显,动铁芯所受磁场力之和减小越快。

不同永磁操动机构驱动线圈电流情况下的位移曲线和速度曲线如图 13 和图 14 所示。

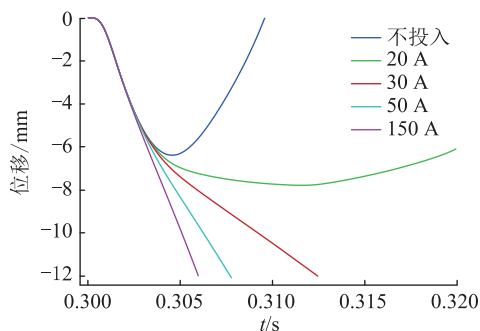


图 13 不同永磁机构驱动线圈电流情况下的位移曲线

Fig.13 Simulation waveforms of stroke curves under different driving coil currents of permanent magnet operating mechanism

可以看出,永磁操动机构的驱动线圈电流对产生分闸线圈电流 2 ms 内之前的位移和速度影响较

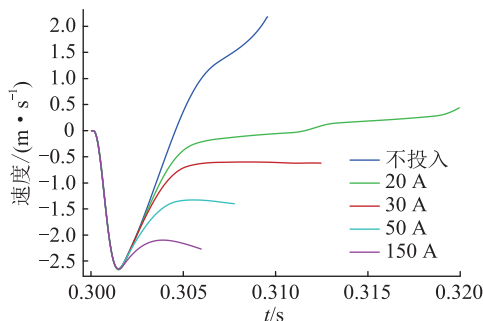


图 14 不同永磁机构驱动线圈电流情况下的速度曲线

Fig.14 Simulation waveforms of speed curves under different driving coil currents of permanent magnet operating mechanism

小。对比图 8 和图 10 可知,这是由于在 2 ms 内的电磁斥力非常大,在该段时间内占据主导作用,所以初始分闸速度的快慢主要取决于电磁斥力机构。随着电磁斥力的消退,动铁芯所受电磁力的影响逐渐增大,永磁机构驱动线圈的电流越大,抵消永磁吸力的效果越明显,所以在产生分闸线圈电流 2 ms 之后,线圈电流越大,越快到达额定开距。同时,速度差异逐渐明显,在电流为 20 A 的情况下,运动部件发生了回弹现象;在电流为 30 A、50 A、150 A 的情况下,到达额定开距下的时间分别为 12.5 ms、7.5 ms、6.0 ms,速度分别为 0.6 m/s、1.4 m/s、2.3 m/s。适用于直流断路器的大电流快速开关其基本特点要求分闸前期速度快,分闸后期运动稳定,尤其达到额定开距位置时其速度应尽量小,避免分闸反弹现象的发生。故通过综合分析,设计时应确保分闸到位时间为 8~13 ms,达到分闸位置的速度应小于 1 m/s,因此文中仿真中驱动线圈电流选择 30 A 为最佳,电流较大不至发生回弹,且到达额定开距时速度小,稳定性好。研究结果适用于额定电压 10 kV、额定电流 2 000 A 以上的直流断路器。

#### 4 结论

利用有限元法对基于双弹簧永磁操动和电磁斥力双动机构的快速开关分闸特性进行电磁场、热场及位移场等多物理场仿真分析,并进行试验验证,得出如下结论:

(1) 在永磁操动机构驱动线圈不投入的情况下,由于电磁斥力做功时间较短,在斥力消失后动铁芯受到的永磁吸力仍然非常大,动铁芯所受永磁吸力通过触头弹簧作用于主运动部件,进而抑制了主运动部件向下运动,导致分闸回弹现象的发生。

(2) 在永磁操动机构驱动线圈与电磁斥力机构分闸线圈同时投入的情况下,驱动线圈产生的磁场

可持续抵消永磁吸力,避免由于电磁斥力做功时间太短导致分闸回弹。

(3) 由于分闸初期电磁斥力非常大,永磁操动机构驱动线圈的投入对分闸初期的速度影响较小。在电磁斥力消失后,永磁操动机构的驱动线圈电流在一定范围内越大,抵消永磁吸力的效果越明显,但到达额定开距的速度也越大,所以为了防止分闸后期速度过快导致的分闸反弹,须合理选择驱动线圈电流。

(4) 通过设置相同条件下的样机试验与模型仿真进行对比,很好地验证了仿真计算的准确性。

(5) 基于双弹簧永磁操动和电磁斥力双动机构的大电流快速开关,通过使用永磁操动机构驱动线圈与电磁斥力机构分闸线圈同时投入的方法,可以克服中压大电流灭弧室开距小且运动部件质量大导致分闸速度慢和回弹的缺点,对于在额定电压 10 kV、额定电流 2 000 A 以上的直流断路器应用中具有一定的优势。

### 致 谢

本文得到中国电力科学研究院学科建设项目“应用于柔性直流配电网的经济型小型化中压直流开关关键技术研究及样机研制”(52420022000Y)资助,谨此致谢!

### 参考文献:

- [1] 王守相,李琦,赵倩宇,等. 计及源荷随机性的交直流配电网电压多目标优化改进粒子群算法[J]. 电力系统及其自动化学报,2021,33(12):10-17.  
WANG Shouxiang, LI Qi, ZHAO Qianyu, et al. Improved particle swarm optimization algorithm for multi-objective voltage optimization of AC/DC distribution network considering the randomness of source and loads [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(12):10-17.
- [2] 袁宇波,丁俊健,陆于平,等. 基于 Internet/Intranet 的电网继电保护及故障信息管理系统[J]. 电力系统自动化,2001,25(17):39-42.  
YUAN Yubo, DING Junjian, LU Yuping, et al. Automatic management information system for protective relaying and fault recorder based on Internet/Intranet [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(17):39-42.
- [3] 余占清,曾嵘,屈鲁,等. 混合式直流断路器的发展现状及展望[J]. 高电压技术,2020,46(8):2617-2626.  
YU Zhanqing, ZENG Rong, QU Lu, et al. Development status and prospect of hybrid DC circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8):2617-2626.
- [4] 吴益飞,胡杨,易强,等. 中压直流开断技术研究综述[J]. 供用电,2018,35(6):12-16,59.  
WU Yifei, HU Yang, YI Qiang, et al. Review on MVDC interruption technologies [J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(6):12-16,59.
- [5] CHEN Z Y, YU Z Q, ZHANG X Y, et al. Analysis and experiments for IGBT, IEGT, and IGCT in hybrid DC circuit breaker [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(4):2883-2892.
- [6] 贺之渊,王威儒,谷怀广,等. 兼备故障限流及开断功能的直流电网集成化关键设备发展现状及展望[J]. 中国电机工程学报,2020,40(11):3402-3418.  
HE Zhiyuan, WANG Weiru, GU Huaiguang, et al. Development status and prospect of integrated key equipment of DC power grid with fault current limiting and breaking functions [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11):3402-3418.
- [7] FENG L, GOU R F, ZHUO F, et al. Development of a 10 kV solid-state DC circuit breaker based on press-pack IGBT for VSC-HVDC system [C]//2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia). Hefei. IEEE, 2016:2371-2377.
- [8] 武瑾,庄劲武,王晨,等. 电磁斥力机构数学模型的简化与求解[J]. 中国电机工程学报,2013,33(24):175-182,25.  
WU Jin, ZHUANG Jinwu, WANG Chen, et al. Simplification and solution of the mathematical model to electromagnetic repulsion mechanism [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(24):175-182,25.
- [9] 黄瑜珑,张祖安,温伟杰,等. 高压直流断路器中电磁斥力快速驱动器研究[J]. 高电压技术,2014,40(10):3171-3178.  
HUANG Yulong, ZHANG Zuan, WEN Weijie, et al. Research on an ultrafast driver for HVDC circuit breaker with electromagnetic repulsion mechanism [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(10):3171-3178.
- [10] 曾南薰,方春恩,李伟,等. 高压直流断路器用快速开关电磁缓冲研究[J]. 高压电器,2020,56(3):9-16.  
ZENG Nanxun, FANG Chun'en, LI Wei, et al. Research on electromagnetic damping for fast mechanical switch of HVDC circuit breaker [J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(3):9-16.
- [11] 李斌,马久欣,温伟杰,等. 适用于中压直流配电网的新型多端口机械式直流断路器[J]. 高电压技术,2019,45(8):2385-2392.  
LI Bin, MA Jiuxin, WEN Weijie, et al. New type of multipoint mechanical DC circuit breaker for medium voltage DC distribution network [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(8):2385-2392.
- [12] 吴勇,房淑华,邹钢,等. 126 kV 高压真空断路器永磁操作机构及其小型化研究[J]. 高压电器,2018,54(3):45-51.  
WU Yong, FANG Shuhua, ZOU Gang, et al. Study on permanent magnetic actuator of 126 kV high voltage vacuum circuit breaker and its miniaturization [J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(3):45-51.
- [13] 孙丽琼,王振兴,何塞楠,等. 126 kV 真空断路器分离磁路式永磁操动机构[J]. 电工技术学报,2015,30(20):49-56.  
SUN Liqiong, WANG Zhenxing, HE Sainan, et al. A permanent magnetic actuator with separated magnetic circuit for 126 kV

- vacuum circuit breakers [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20):49-56.
- [14] 阮绵晖, 陈建福, 陈锐, 等. 10 kV 快速开关斥力机构仿真分析[J]. 高压电器, 2020, 56(10):141-146, 154.  
RUAN Mianhui, CHEN Jianfu, CHEN Rui, et al. Simulation and analysis of repulsion mechanism for 10 kV fast mechanical switch[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(10):141-146, 154.
- [15] JIAN Z X, ZHUANG J W, WANG C, et al. Simulation analysis and design of a high speed mechanical contact base on electromagnetic repulsion mechanism [C]//2011 International Conference on Electrical Machines and Systems. Beijing, China. IEEE, 2011:1-5.
- [16] 田阳, 田宇, 李志兵, 等. 高速机械开关单元多场耦合仿真优化设计[J]. 电网技术, 2018, 42(4):1273-1280.  
TIAN Yang, TIAN Yu, LI Zhibing, et al. Multi-field coupling simulation optimization of high-speed mechanical switch unit [J]. Power System Technology, 2018, 42(4):1273-1280.
- [17] 郭兴宇, 梁德世, 黄智慧, 等. 基于多场耦合的电磁斥力机构运动参数研究[J]. 高电压技术, 2022, 48(2):626-635.  
GUO Xingyu, LIANG Deshi, HUANG Zhihui, et al. Research on motion parameters of electromagnetic repulsion mechanism based on multi-field coupling [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(2):626-635.
- [18] MEYER J M, RUFER A. A DC hybrid circuit breaker with ultra-fast contact opening and integrated gate-commutated thyristors (IGCTs) [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(2):646-651.
- [19] 侯雨杉, 史宗谦, 刘少飞, 等. 快速直流断路器中操动机构的仿真研究[J]. 高压电器, 2020, 56(4):42-47.  
HOU Yushan, SHI Zongqian, LIU Shaofei, et al. Simulation study of operation mechanism in high-speed DC circuit breaker [J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(4):42-47.
- [20] 周宝石, 刘向军. 高压直流继电器双线圈涡流斥力机构仿真优化设计[J]. 电器与能效管理技术, 2020(9):7-12, 67.  
ZHOU Baoshi, LIU Xiangjun. Simulation and optimization design of eddy current repulsion mechanism with double coil for HVDC relay [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2020(9):7-12, 67.
- [21] 张海龙. 永磁操作机构抗振动性能的研究[D]. 南京:东南大学, 2017.  
ZHANG Hailong. Study on anti vibration performance of permanent magnetic actuator [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [22] 孔凡良, 徐凯, 马子文. 中压直流断路器电磁斥力脱扣机构优化设计与试验验证[J]. 电器与能效管理技术, 2021(7):34-39.  
KONG Fanliang, XU Kai, MA Ziwen. Optimization design and experimental verification of electromagnetic repulsion trip mechanism of medium voltage DC circuit breaker [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2021(7):34-39.
- [23] 韩伟, 朱忠建, 衣陈晨, 等. 基于电磁斥力机构的机械快速开关:CN110875162A [P]. 2020-03-10.  
HAN Wei, ZHU Zhongjian, YI Chenchen, et al. Mechanical quick switch based on electromagnetic repulsion mechanism: CN110875162A [P]. 2020-03-10.
- [24] 程显, 袁晓东, 葛国伟, 等. 真空开关高动作稳定性的永磁操动机构控制系统 [J]. 电工技术学报, 2021, 36(21):4617-4626.  
CHENG Xian, YUAN Xiaodong, GE Guowei, et al. Permanent magnet mechanism control system with high operation stability of vacuum switch [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(21):4617-4626.
- [25] 杨曦, 黄彦全, 王斌, 等. 单稳态永磁操动机构驱动线圈等效电感辨识方法研究[J]. 电工技术, 2018(10):117-120.  
YANG Xi, HUANG Yanquan, WANG Bin, et al. Study on equivalent inductance identification methods of driving coil in monostable permanent magnet actuator [J]. Electric Engineering, 2018(10):117-120.
- [26] 洪礼通, 缪希仁. 操动机构研究现状与发展新趋势 [J]. 电器与能效管理技术, 2017(22):1-7.  
HONG Litong, MIAO Xiren. Research situation and new development trend of operating mechanism [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2017(22):1-7.
- [27] 刘晓明, 张煦松, 姜文涛, 等. 基于混沌吸引子的真空断路器永磁斥力机构机械故障识别方法 [J]. 电工技术学报, 2022, 37(20):5334-5346.  
LIU Xiaoming, ZHANG Xusong, JIANG Wentao, et al. Mechanical fault identification method of permanent magnet repulsion mechanism of vacuum circuit breaker based on chaotic attractor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(20):5334-5346.
- [28] 宾丁炜, 黄彦全, 喻泉, 等. 单稳态永磁真空断路器铁芯动态电磁力计算方法研究 [J]. 电工技术, 2020(13):10-13.  
BIN Dingwei, HUANG Yanquan, YU Quan, et al. Study on calculation method of dynamic electromagnetic force of monostable permanent magnet vacuum circuit breaker core [J]. Electric Engineering, 2020(13):10-13.

作者简介:



兰剑

兰剑(1987),男,硕士,高级工程师,从事高压开关设备的试验与运行技术研究工作(E-mail:lanjian@epri.sgcc.com.cn);

冯英(1983),男,博士,高级工程师,从事高压开关设备的试验与运行技术研究工作;

王承玉(1963),男,博士,研究员级高级工程师,从事高压开关的研制开发、运行管理与技术规范等研究工作。

(下转第 35 页)



## Reliability evaluation of islanded DC microgrid considering electric-hydrogen hybrid energy storage

YUE Dawei<sup>1</sup>, ZHAO Wenti<sup>2</sup>, YUAN Hanghang<sup>2</sup>, YANG Mingzhe<sup>1</sup>, JIANG Yi<sup>2</sup>, LI Lianbing<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment (Hebei University of Technology), Tianjin 300130, China; 2. School of Artificial Intelligence, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

**Abstract:** An effective way is provided by the electric-hydrogen hybrid energy storage to improve the reliability of islanded DC microgrids. However, the reliability level of the system will also be affected by different electric-hydrogen hybrid energy storage strategies. According to different operation sequences of electric-hydrogen hybrid energy storage, the impact of three energy storage strategies on the reliability of islanded DC microgrid is compared and analyzed. Firstly, the hydrogen storage model, battery storage model and microgrid reliability evaluation index system are established. Then, considering the fault of system components, based on the sequential Monte Carlo method, a reliability evaluation method of islanded DC microgrid considering electric-hydrogen hybrid energy storage is proposed. Finally, the improved RBTS BUS6 F4 feeder system is applied to evaluate the reliability of the islanded DC microgrid, and the influence of different energy storage strategies and different capacities of electric-hydrogen hybrid energy storage on the system reliability are compared and analyzed. The results show that system reliability can be effectively improved with hydrogen energy storage. Different electric-hydrogen energy storage strategies and capacities have different effects on system reliability.

**Keywords:** islanded DC microgrid; electric-hydrogen hybrid energy storage; reliability evaluation; Monte Carlo method; energy storage strategy; reliability indices

(编辑 方晶)

(上接第 18 页)

## Opening characteristics of high current fast switch for DC circuit breaker

LAN Jian, FENG Ying, WANG Chengyu

(China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

**Abstract:** The stability of opening process of fast mechanical switch is the key factor affecting the breaking performance of DC circuit breaker. Based on the finite element method, the multi-field coupling calculation of electromagnetic, thermal and momentum is carried out for the opening process of high current fast switch with permanent magnet operating mechanism and electromagnetic repulsion mechanism. The influence of the driving coil input for the permanent magnet operating mechanism and different driving coil currents on the opening process of double-action mechanism are analyzed. The calculation results show that the permanent magnet suction force can be cancelled in advance when the driving coil of the permanent magnet operating mechanism is put in, thereby avoiding the opening spring back phenomenon caused by the electromagnetic repulsion force due to the short working time. Because the electromagnetic repulsion force is very large at the initial stage of opening, the driving coil input of the permanent magnet operating mechanism has little influence on the initial speed of opening. After the electromagnetic repulsion disappears, the greater the driving coil current of the permanent magnet operating mechanism is, the greater the speed to reach the rated opening distance after the electromagnetic repulsion force disappearing. In order to avoid opening rebound phenomenon, the current value of the driving coil should be selected reasonably. The comparison between the simulation results and the opening process characteristic curves of the actual prototype shows that two curves are in good agreement, which verifies the correctness of the simulation method.

**Keywords:** high current fast switch; DC circuit breaker; permanent magnet operating mechanism; electromagnetic repulsion mechanism; multi-field coupling; finite element calculation

(编辑 吴昊)