[高压断路器]

高压断路器用欠电压脱扣器研究与设计

文/平高集团有限公司　郭良超　高　翔　李美荣　刘　宇　宋广民　惠勇锋

随着智能电网的推广，对高压断路器安全性与可靠性的要求不断提高。欠电压脱扣器作为低压断路器常用的检测和保护装置，也逐步地应用到高压断路器中。通过对高压断路器欠电压脱扣器结构和原理进行研究分析，采用理论计算、仿真分析和试验修正相结合的方法，总结出一种高压断路器欠电压脱扣器的设计方法并成功应用于高压断路器。

高压断路器作为最重要输变电设备，对电网系统起着保护和控制作用。随着智能电网的推广，对高压断路器安全性与可靠性的要求不断提高。欠电压脱扣器作为低压断路器常用的检测和保护装置，也逐步地应用到高压断路器中。

高压欠电压脱扣器一般集成于断路器分闸脱扣系统，当断路器控制回路电压降到额定控制电压的30%以下时，应动作使开关装置分闸。当欠电压脱扣器端子电压不小于额定控制电压的65%时，开关装置应可以合闸。

高压断路器用欠电压脱扣器结构一般采用电磁铁和复位弹簧相结合的方式，通过不同控制电压下电磁铁力值和复位弹簧力值之间的匹配关系，实现电磁铁的既定动作，满足欠电压脱扣的功能。由于不同电压等级断路器合闸脱扣力、扣接量等参数不同，欠电压脱扣器必须依据断路器分闸脱扣器结构尺寸和力学性能进行定制化设计。

本文以某126 kV高压断路器（配弹簧操动机构）为例，对高压断路器欠电压脱扣器结构和原理进行研究分析，总结出一种高压断路器欠电压脱扣器设计方法，并成功应用于该高压断路器。

欠电压脱扣器结构及动作原理

如图1所示，断路器处于合闸状态，此时分闸弹簧已储能，能量被分闸脱扣器保持，电磁铁两端电压正常，电磁铁产生的电磁力压缩复位弹簧，保持在图示状态。当电磁铁控制电压下降至额定电压的30%以下时，电磁铁产生的电磁力小于复位弹簧力，电磁铁撞杆在复位弹簧的作用下，带动电磁铁撞杆撞击分闸锁闩，分闸脱扣器打开，分闸弹簧如图1示方向运动释放能量，在分闸弹簧力的作用下，弹簧操动机构输出拐臂随之转动，带动断路器进行分闸动作。当控制电压恢复至额定电压65%以上时，电磁铁产生的电磁力增大，压缩复位弹簧至图1示位置。

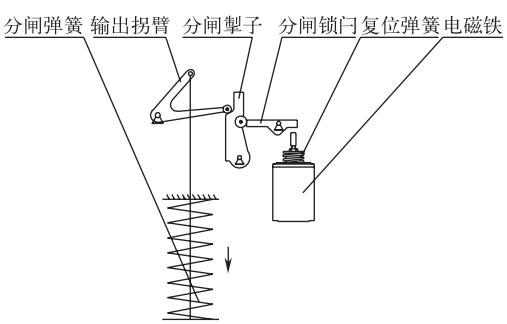

图1　欠电压脱扣动器作原理图

欠电压脱扣器的设计

基于欠电压脱扣器的动作原理，其设计关键为：不同电压下，电磁铁在动作过程中，电磁铁出力、复位弹簧力与断路器分闸脱扣力之间的匹配关系。下面以某126 kV断路器欠电压脱扣器为例，对欠电压脱扣器的设计进行介绍。

1. 断路器分闸脱扣力计算

由欠电压脱扣器的动作原理可知，断路器分闸脱扣力是欠电压脱扣器设计中电磁铁出力和复位弹出力的设计依据。

断路器弹簧操动机构分闸状态锁扣系统力学模型如图2所示。图2中，P_2为分闸弹簧力；L_1为分闸弹簧作用力臂；F_1分闸掣子作用力；L_2为分闸掣子作用力臂；F_2为分闸锁闩作用力；L_3为分闸锁闩作用力臂；f^*为脱扣力；μ为脱扣摩擦系数。

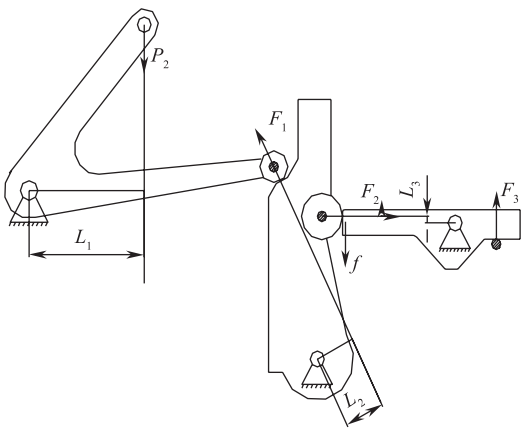

图2　断路器分闸锁扣系统受力简图

由力矩平衡方程可知

$$P_2L_1=F_1L_2=F_2L_3 \quad (1)$$

$$f^*=F_2\mu \quad (2)$$

由式（1）、式（2）得出f^*=230 N。

2. 电磁铁仿真计算

如图3所示，电磁铁主要有动铁心、静铁心、线圈、外壳和撞杆组成。撞杆与动铁心通过螺纹固定连接，当动铁心动作时撞杆随之动作。欠电压脱扣器用电磁铁并联于控制电源两端，处于长通电状态，动静铁心间始终存在吸合力。当电压为额定电压65%以上时，电磁铁吸合力大于复位弹簧力处于图3示状态，当电磁铁电压降至额定电压30%时，随着电磁力的减小，在复位弹簧的作用下带动撞杆运动。当电磁铁电压恢复到额定电压65%时，电磁铁重新吸合恢复到原状态。

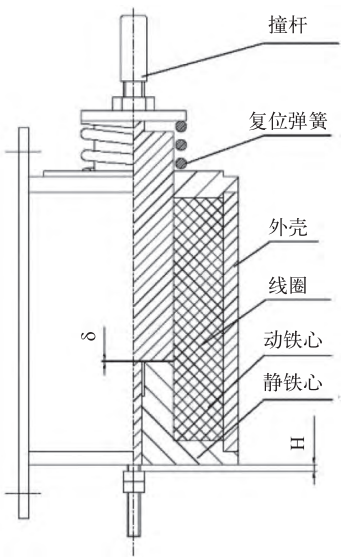

图3　电磁铁结构原理图

电磁铁是欠电压脱扣器的核心部件，影响电磁铁出力特性的主要参数有电压V、动静铁心的气隙δ和安匝数A。其中电压V即断路器的控制电压，一般为直流110 V或220 V。工程设计中考虑到零部件的通用性，不同的欠电压脱扣器一般选用相同规格的电磁铁线圈，通过改变动静铁心间的气隙来实现电磁铁的动作特性。因此电磁铁的设计关键是准确计算出在电磁铁不同控制电压、不同气隙的情况下，电磁铁的出力特性。

有限元法是电磁铁在工程设计中最常用的方法，具有准确、高效及可参数化设计等诸多优点。故采用有限元电磁仿真分析软件进行电磁铁仿真计算。

根据电磁铁内部结构及实际尺寸，在有限元电磁仿真分析软件中建立二维仿真模型如图4所示。

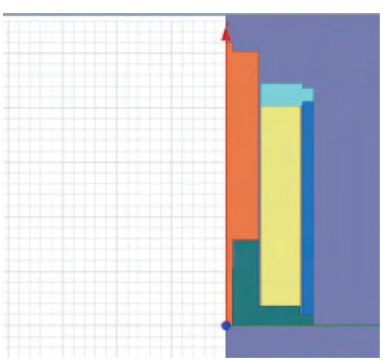

图4　仿真模型

定义仿真模型中各零部件材料属性如下：动静铁心为纯铁DT4；外壳为20钢；线圈为铜。依据电磁铁额定电压DC 110 V；线圈电阻230 Ω；线圈匝数8 000。在电磁铁额定电压30%时，安匝数1 148 A；额定电压65%时，安匝数2 487 A，气隙δ=0～4mm的条件下进行仿真计算，得出电磁铁出力特性如图5所示。

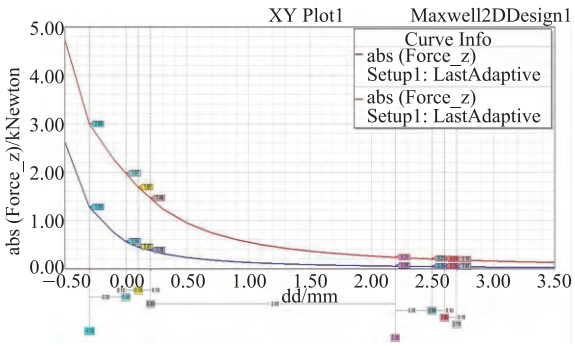

图5　仿真结果

图5中横坐标为电磁铁间隙，纵坐标为电磁铁出力值。上方曲线为电磁铁在65%额定电压、在不同动静铁心间隙下的电磁铁力值曲线；下方为电磁铁在35%额定电压，在不同动静铁心间隙下的电磁铁力值曲线。通过曲线可以得到电磁铁在不同电压下不同空气间隙时电磁铁的力值，为复位弹簧设计提供依据。

3. 复位弹簧的设计

由欠电压脱扣器的结构原理可知，在电磁铁运动过程中，随着动静铁心气隙的变化，复位弹簧压缩量也随之变化，而复位弹簧的压缩量直接决定弹簧的力值。要实现欠电压脱扣的功能，电磁铁动静铁心在不同的气隙下产生的电磁力与复位弹簧的力必须满足关系

$$F_{\delta}>P_{\delta}>f_{\delta} \tag{3}$$

$$F_{\delta+2.5}\geqslant P_{\delta+2.5}>f_{\delta+2.5} \tag{4}$$

$$F_{\delta+0.5}>P_{0.5}>f_{\delta+0.5}+f^{*} \tag{5}$$

式中，F_{δ}、$F_{\delta+0.5}$、$F_{\delta+2.5}$分别为电磁铁在65%电压，初始气隙、电磁铁撞杆与锁栓接触位置及电磁铁走完行程位置时的电磁力；f_{δ}、$f_{\delta+0.5}$、$f_{\delta+2.5}$分别为电磁铁在30%电压，初始气隙、电磁铁撞杆与锁栓接触位置及电磁铁走完行程位置时的电磁力；P_{δ}、$P_{\delta+0.5}$、$P_{\delta+2.5}$分别为复位弹簧在电磁铁初始气隙位置、电磁铁撞杆与锁栓接触位置及电磁铁走完行程位置时的复位力。

复位弹簧力值与弹簧压缩量成近似线性关系，结合上述仿真结果可以绘制出复位弹簧的力值曲线区间，如图6所示。

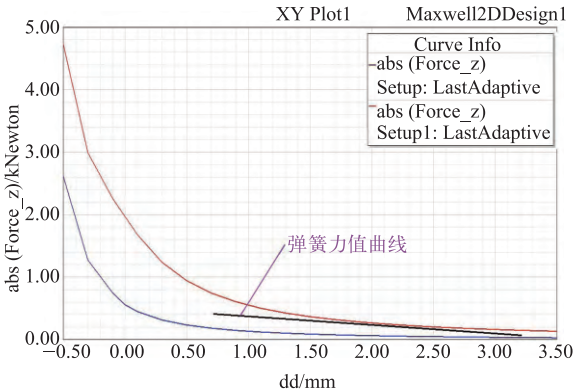

图6　理论电磁铁与复位弹簧力值曲线图

从图6中可以看出，满足使用要求的复位弹簧设计区间很小，在0.7 mm以后，两条电磁铁力值曲线趋于平行，确定初始气隙δ=0.7 mm。复位弹簧力值的取值区间为：1 460 N＞P_{δ}＞390 N；190 N≥$P_{\delta+0.5}$＞50 N；750 N＞$P_{\delta+2.5}$≥420 N；考虑到弹簧的制造性，设计弹簧刚度时应尽量选取较小值，故选取$P_{\delta+0.5}$=190 N；$P_{\delta+2.5}$=42 N0。依据弹簧设计公式最终确定弹簧参数：P1=190 N；P_2=430；k=96 N/mm。

4. 试验修正

依据上述设计参数，制造出欠电压脱扣器并安装到断路器上进行试验验证。采用调压器调节欠电压脱扣器两端电压，在额定电压65%～120%区间内，可靠保持在理论位置。当电压缓慢下降至额定电压30%时，进行了50次操作试验，电磁铁撞杆运动，可以撞击分闸脱扣器，但出现4次分闸脱扣器没有打开的情况。分析其原因，主要由于零部件的制造及仿真计算存在误差，导致电磁铁撞杆撞击力裕度过小造成的。通过增大复位弹簧刚至k=102 N/mm，问题得到了解决，并成功应用于断路器。

结束语

本文通过对高压断路器欠电压脱扣器结构和原理进行研究分析，采用理论计算、仿真分析和试验修正相结合的方法，设计出一种欠电压脱扣器并成功应用于高压断路器，同时也验证了该方法的有效性与可行性，对高压断路器欠电压脱扣器的设计与改进具有指导意义。EA

（收稿日期：2022-05-23）