

# 支柱式柱上开关用隔离刀闸结构电动力分析

任璐 李守业 岳禹州 丰宇庭 李孟婧  
天津平高智能电气有限公司 天津 300000

**摘要:** 因支柱式柱上开关结构简单、运行可靠等优点,广泛运用于城农网架空线路各节点。由于采用真空灭弧方式,断口开距设计设计较小,为了有效保障线路运行及运维检修安全,用户要求断路器集成连锁隔离开关,用可见断口来保障开断状态,常见的支柱式开关集成隔离有上下隔离(进/出线侧)两种形式。通过对现有隔离开关的计算分析,改进优化开关结构,提高产品性能。

**关键词:** 隔离开关;保护;电动力

## 前言:

柱上隔离开关,又称隔离刀闸,是一种没灭弧装置的控制开关,其主要功能是隔离电源,建立可靠的绝缘间隙,给予工作人员有可视的明显的断开标志,保证检修或试验工作的安全。隔离开关是高压开关当中使用的最多也是最频繁的一个电器装置。柱上隔离开关优点是造价低、简单耐用。

## 一、隔离开关分类及分析

### 1.市场调研

为了更好的认识隔离开关,了解市场形势,我们对市面23家开关厂家进行了调研,了解到现在市面上与支柱式柱上开关配套的隔离开关大致分为两类:上隔离开关(进线侧集成)和下隔离开关(出线侧集成)。

其中,下隔离开关市场占有率较高,样本中有20家开关厂家的支柱式柱上开关采用下隔离开关。其具有以下优点:

(1) 一次化隔离结构设计,传动更为精确,同期性好,框架刚性强度高;

(2) 绝缘支撑和绝缘拉杆分离设计,整体绝缘净距大,断口安全性好。

(3) 合闸通电时,接线端子和隔离刀闸近似平行,不会产生太大的电斥力。

### 缺点:

(1) 结构较为复杂,加工及装配耗时长,人工成本高;

(2) 出线需辅助绝缘支撑,一体化隔离框架等,用料成本略高。

上隔离开关设计初衷主要应用于小型化支柱断路器,方案小众市场占有率较低,调研盘厂仅有3家采用上隔离结构。其具有以下优点:

(1) 一次导电主回路短,整机回路电阻较小;

(2) 驱动结构简单,优化节省出线侧绝缘支撑及隔离架;

(3) 零部件少,装配工序简单。

### 缺点:

(1) 隔离主轴较长,刚度难保证,易变形;

(2) 三相传动不稳定,同期性差;

(3) 隔离刀片和隔离接线端子间电斥力较大,易产生机械冲击、危害电弧、熔焊等危害现象。

### 2.物料分析

为了进一步对上下隔离进行成本分析,分别对其需求的物料明细进行分类汇总、比较,详见表1。

从表中可以看出,上隔离开关物料种类较多,主要集中在隔离刀装配部分;下隔离开关有3个绝缘支柱和隔离架,是属于成本较高的物料。从成本角度考虑,上隔离开关的成本略低。

基于上述调研分析后,我们对上、下隔离开关有了初步了解,其运行的稳定性需要通过进一步的电动力计算得出。

## 二、电动力的计算

在通过较大电流时,接线端子和隔离刀闸之间会产生较大的作用力。对设备施加短时耐受和峰值耐受电流,试验后观察发现隔离刀闸有退刀现象。依据《高压断路器原理与应用》中,两垂直导体间的电动力计算为参考,可对电动力的大小及方向进行计算。因接线端子对隔离刀闸产生的电动力方向为远离接线端子的方向,故下文称这种电动力为电斥力。

### 1.上隔离开关电斥力的计算

在通过大电流时,上隔离开关接线端子与隔离刀间电斥力较大,导致隔离退刀,无法锁紧端子,见图1。为了解决这一问题,需对隔离刀进行动热计算。根据计算结果对端子进行结构优化设计,减小电斥力。

表 1

隔离开关分类	上隔离装配		下隔离装配	
	名称	单台数量	名称	单台数量
隔离刀装配部分	隔离刀片	6	隔离刀片	6
	隔离接线端子	3	左相出线	1
			中出线	1
			右相出线	1
	压簧	6	压簧	3
	压簧座	12	压簧套	6
	铜套	3		
	固定铜套	3		
	夹板	3		
	垫圈	1		
拐臂	3			
磁锁板	6			
接线端子	接线端子	3	接线端子	3
绝缘拉杆部分	拉杆上接头	3	销	6
	绝缘拉杆	3	连接头	3
	拉杆下接头	3	绝缘拉杆	3
主轴传动部分	手柄焊装	1	手柄焊接	1
	合标牌	1	合指示牌	1
	分标牌	1	分指示牌	1
	拉簧	1	触头簧	2
	拉簧套	1	加速簧支座	3
	拉簧块	1	销	2
	支架板铜套	2	铜套	2
主轴焊装	1	隔离主轴	1	
绝缘支撑		0	绝缘支柱	3
隔离架		0	隔离架焊接	1
联锁部分	支架板	1	联锁套焊接	1
	支架板	1	销	1
	轴销	6	联锁拐臂	1
	闭锁杆	1	联锁杆焊接	1
	铜轴套	1	橡胶板	2
	拨板	1	联锁导向套焊接	1
	拐臂焊接	1	轴	1
铜套	1	轴	1	



图 1 电斥力作用下隔离退刀

根据《高压断路器原理与应用》中，两垂直导体间的电动力计算为参考。

两垂直导体间的电动力

在同 一平面内两垂直有限长的载流导体(呈 L 形)如图 2.15 所示,求相互作用的电动力。

图 2.15 中 L 形导体, 竖直导体长度为  $h$ , 水平导体长度为  $a$ , 导体等效半径为  $r$ ,  $\alpha_1 = \frac{\pi}{2}$ , 以  $x, dx$  代替式(2.16)中的  $a_1, dl_1$ 。则

$$C = \int_r^a \frac{\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2}{x} dx = \int_r^a \frac{\cos \alpha_2}{x} dx$$

$$= \int_r^a \frac{h}{x \sqrt{h^2 + x^2}} dx = \left( - \ln \frac{h + \sqrt{h^2 + x^2}}{x} \right)_r^a$$

$$= \ln \frac{(h + \sqrt{h^2 + r^2}) \cdot a}{r(h + \sqrt{h^2 + a^2})} \quad (2.30)$$

若  $r \ll h$ , 则  $\sqrt{h^2 + r^2} \approx h$ 。式(2.30)可简化为

$$C = \ln \frac{2ah}{r(h + \sqrt{h^2 + a^2})} \quad (2.31)$$

水平导体所受电动力为

$$F = 1 \times 10^{-7} I^2 \ln \frac{2ah}{r(h + \sqrt{h^2 + a^2})} \text{ [N]} \quad (2.32)$$

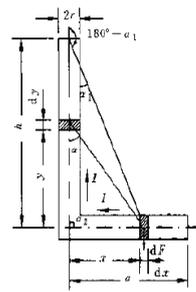


图 2.15 L 形导体电动力计算

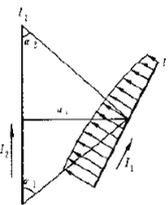


图 2.16 电动力沿导体各点的分布

当隔离接线端子与隔离刀片呈一定角度时, 式中  $\alpha_2$  的值发生了变化, 计算公式变为:

$$C = \int_r^a \frac{\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2}{x} dx$$

$$= \int_r^a \frac{\cos \alpha_1}{x} dx + \int_r^a \frac{\cos \alpha_2}{x} dx$$

$$= \ln \frac{2ah \sin \alpha_2}{r[h \sin \alpha_2 + \sqrt{(h \sin \alpha_2)^2 + a^2}]} + \cos \alpha_2 (\ln a - \ln r)$$

故隔离刀所受电动力

$$F = 1 \times 10^{-7} I^2 \ln \frac{2ah \sin \alpha_2}{r[h \sin \alpha_2 + \sqrt{(h \sin \alpha_2)^2 + a^2}]} + \cos \alpha_2 (\ln a - \ln r)$$

其中,  $I=50000A$ ,  $a$  选取隔离刀片的有效长度, 269mm;  $h$  为隔离接线端子的有效长度, 117mm,  $r$  为隔离接线端子和隔离刀片的接触面半径, 为 6mm。

$$F = 1 \times 10^{-7} \times 50000^2 \ln \frac{2 \times 269 \times 117 \sin \alpha_2}{6 \times [117 \sin \alpha_2 + \sqrt{(117 \sin \alpha_2)^2 + 269^2}]} + \cos \alpha_2 (\ln 269 - \ln 6)$$

$$= 250 \ln \frac{62946 \sin \alpha_2}{6 \times [117 \sin \alpha_2 + \sqrt{(117 \sin \alpha_2)^2 + 269^2}]} + 3.803 \cos \alpha_2$$

当  $\alpha_2 = 10^\circ$  时,  $F=463.093N$

当  $\alpha_2 = 45^\circ$  时,  $F=756.185N$

当  $\alpha=90^\circ$  时,  $F=810.320N$

当  $\alpha=135^\circ$  时,  $F=750.807N$

当  $\alpha=170^\circ$  时,  $F=455.603N$

根据计算结果,可看出当隔离接线端子和隔离刀片呈  $90^\circ$  时,接线端子对隔离刀片的电斥力最大。在接线端子进行结构改进时,可以尽可能的减小或者增大角度,使隔离接线端子和隔离刀闸尽量保持平行。

### 2. 下隔离开关电斥力的计算

由于下隔离开关的隔离刀片、压簧与上隔离开关相同,根据以往计算可得:下隔离开关的隔离刀最小通流面积、接触温升、热稳定电压降、电动稳定性满足载流要求。故此处只进行隔离刀片与接线端子之间的电斥力计算。

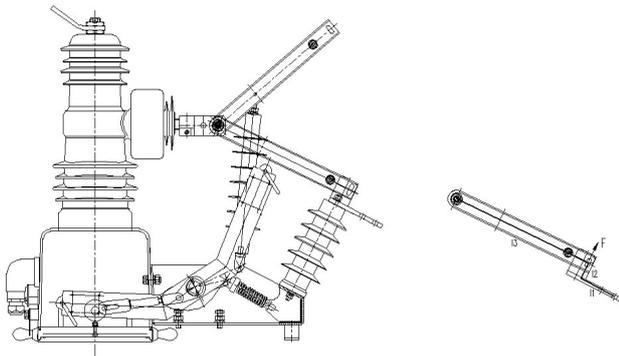


图2 下隔离刀闸受力分析

由下隔离开关图纸(图2)可知,下隔离接线端子和隔离刀闸近似Z型结构,为了算隔离刀闸受力F,根据《高压断路器原理和应用》,取两垂直导体间的电动力计算为参考。

$$F = 1 \times 10^{-7} I^2 \ln \frac{2ah}{r[h + \sqrt{h^2 + a^2}]}$$

将Z字形结构拆分为两个L型导体来计算,取图2中F的方向为正,见图11。

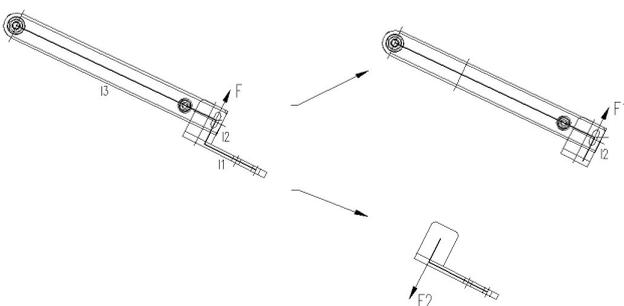


图3 受力拆分

其中,  $I=50000A$ ,  $a_1$ 选取隔离刀片的有效长度,  $269mm$ ;  $h_1$ 为隔离接线端子的有效高度,  $41mm$ ,  $r_1$ 为隔离接线端子和隔离刀片的接触面半径,为  $6mm$ 。

$$F_1 = 1 \times 10^{-7} \times 50000^2 \ln \frac{2 \times 269 \times 41}{6 \times [41 + \sqrt{41^2 + 269^2}]} = 615.782N$$

$I=50000A$ ,  $a_2$ 选取隔离接线端子的有效长度,  $85mm$ ;  $h$ 为隔离接线端子的有效高度,  $41mm$ ,  $r_2$ 为隔离接线端子高度半径,为  $3.5mm$ 。

$$F_2 = 1 \times 10^{-7} \times 50000^2 \ln \frac{2 \times 85 \times 41}{3.5 \times [41 + \sqrt{41^2 + 85^2}]} = 672.146N$$

根据电流方向可知,  $F_1$ 与 $F_2$ 方向相反,  $F_1$ 和 $F$ 同向,故

$$F = F_1 - F_2 = 615.782 - 672.146 = -56.364N$$

根据计算结果可知,  $F$ 的方向与图示方向相反,隔离刀片在大电流通过的时候不会产生弹出的电斥力。故下隔离开关的稳定性更高。

### 三、主轴挠度计算

针对大电流通过时上隔离开关的隔离主轴变形这一问题,需要对隔离主轴所受力进行分析,然后对主轴进行加固。

假设隔离接线端子与隔离刀闸呈  $90^\circ$  角,当峰值耐受电流  $I=50000A$  通过时,电斥力最大,方向与隔离刀闸垂直,如图4所示:

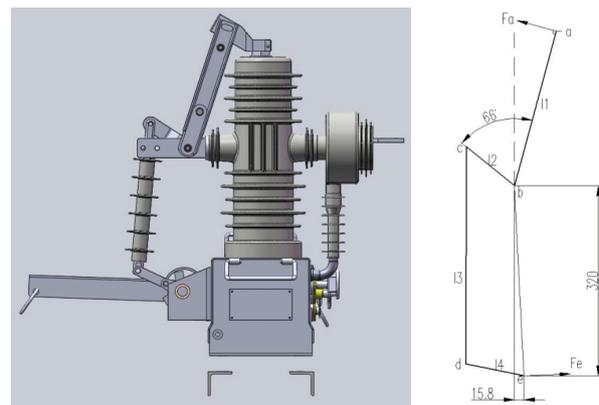


图4 受力分析

由于实物的隔离主轴变形量最大,我们假设当大电流通过时,只有隔离主轴发生形变,则受力模型可以简化为通过力臂  $ab$  所受的力,求力臂  $be$  所受的力。其中,力臂  $ab$  的长度为  $l_1=269mm$ ,  $F_a=810.320N$ ,连接  $b$ 、 $e$  两点,则:

$$F_e = \frac{F_a \times l_1}{\sqrt{320^2 + 15.8^2}} = \frac{810.320 \times 269}{\sqrt{320^2 + 15.8^2}} = 680.346N$$

$F_e$ 的方向垂直于  $be$  连线,如图4所示。 $F_e$ 即为通过大电流时隔离主轴所受的力。

根据挠度的计算公式,两端固定的简支梁,三同时受力时,可以拆分为图5两种情况的叠加:

序次	图类	图 示	项 目	计 算 式
1	荷载		反力	$R_A = R_B = \frac{F}{2}$
	剪力		剪力	$V_A = R_{A1}, V_B = -R_{B1}$
	弯矩		弯矩	$M_{max} = \frac{1}{4} Fl$
	剪力		挠度	$W_{max} = \frac{Fl^3}{48EI}$
3	荷载		反力	$R_A = R_B = F$
	剪力		剪力	$V_A = R_{A1}, V_B = -R_{B1}$
	弯矩		弯矩	$M_{max} = Fa$
	剪力		挠度	$W_{max} = \frac{Fa}{24EI} (3l^2 - 4a^2)$

图5 简支梁挠度计算公式一览表

因为三相所受力的大小相等，所以：

$$W_{max} = W_1 + W_2 = \frac{Fl^3}{48EI} + \frac{Fa}{24EI} (3l^2 - 4a^2)$$

其中，F=Fe=680.346N

l= 主轴长度 0.94m

E = 200GPa = 2 × 10<sup>11</sup> Pa （不锈钢弹性模量）

$$I = \frac{\pi d^4}{64}, \text{ 其中 } d=0.02m$$

a=A相（C相）距支撑板的距离 0.13m

代入，得

$$W_1 = \frac{680.346 \times 0.94^3 \times 64}{48 \times 2 \times 10^{11} \times \pi \times 0.02^4} = 7.494 \times 10^{-3} m = 7.494 mm$$

$$W_2 = \frac{680.346 \times 0.13 \times 64}{24 \times 2 \times 10^{11} \times \pi \times 0.02^4} (3 \times 0.94^2 - 4 \times 0.13^2) = 5.671 \times 10^{-3} m = 5.671 mm$$

$$W_{max} = W_1 + W_2 = 7.494 + 5.671 = 13.165 mm$$

通过计算结果，可知隔离主轴的变形量较大。在隔离主轴的结构改进时，可以尽可能的增大隔离主轴的半径，这样可以减小挠度。

#### 四、改进方案

##### 1. 隔离接线端子改进

为了使隔离接线端子和隔离刀闸尽量保持平行，可选用带弯钩形状的隔离接线端子，或改变隔离接线端子中电流的方向，电力的方向也随之改变。

##### 2. 主轴加固

为了减小变形量，保证大电流通过时结构的刚度。对隔离主轴进行加固：

##### 方案 a：主轴加粗

将主轴直径增加至 30mm，挠度明显减小。

$$W_1 = \frac{680.346 \times 0.94^3 \times 64}{48 \times 2 \times 10^{11} \times \pi \times 0.03^4} = 1.481 \times 10^{-3} m = 1.481 mm$$

$$W_2 = \frac{680.346 \times 0.13 \times 64}{24 \times 2 \times 10^{11} \times \pi \times 0.03^4} (3 \times 0.94^2 - 4 \times 0.13^2) = 1.123 \times 10^{-3} m = 1.123 mm$$

$$W_{max} = W_1 + W_2 = 1.481 + 1.123 = 2.604 mm$$

方案 b：增加主轴支撑：

在隔离主轴和箱体之间增加铜套支撑，如图 6、图 7 所示：

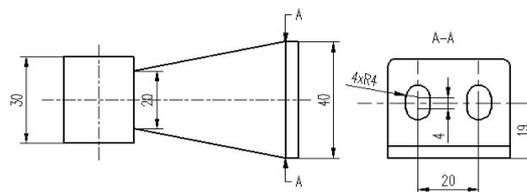
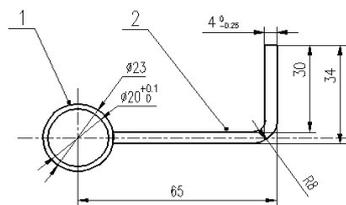


图6 铜套支撑焊接

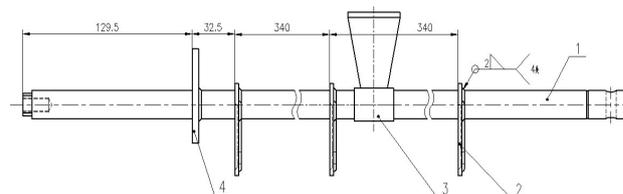


图7 隔离主轴焊接

#### 五、结束语

通过计算分析，对隔离开关的结构及工作原理有了更深一步的认识，也充分认识到两种隔离开关虽各有优点，却难以避免电斥力等诸多问题。2021年3月，国家电网设备发布了〔2021〕151号文件：国家电网有限公司关于印发一二次融合柱上断路器及环网柜（箱）标准化设计方案的通知。通知中明确了支柱式柱上断路器，根据运行情况及技术成熟度，不设置一体化隔离开关。如需，则配置独立隔离开关。通过进一步的标准化，更有利于打造坚强电网！

#### 参考文献：

[1]徐国政.高压断路器原理和应用.电力系统自动化.2000: 13-41.52  
[2]江东杰.基于柱上开关过分相方式的接触网异相短路机理研究[D].大连交通大学, 2018. (05): 87-92  
[3]程凯.10kV柱上开关保护定值整定方法及注意事项探讨[J].通讯世界, 2017 (01): 145-146.  
[4]蒋喜华.10kV配网线路柱上开关定值整定[J].农村电气化, 2014 (08): 21-22.