

## 断路器分闸力值计算与实测

刘雅妮, 朱琦琦, 李 渊, 王 状

(西安西电开关电气有限公司, 西安 710077)

**摘要:** 断路器分闸力值对断路器结构设计、机械寿命估算分析至关重要。文中提出了3种断路器分闸力值计算的方法。第1种方法通过实测断路器传动连杆的应变进而计算获取分闸力值;第2种方法是基于分闸运动特性获取断路器加速度,从而计算出断路器分闸力值;第3种方法则是通过操动机构弹簧力值反推断断路器分闸力值。以某断路器为例,分别采用上述3种方法进行了计算、分析和对比,发现在断路器分闸冲击的工况下,断路器的冲击载荷是持续载荷的2.0~2.2倍,该结论与经典教材上给出的经验公式一致。

**关键词:** 断路器; 分闸; 力值; 计算

## Calculation and Measurement of Circuit Breaker Opening Force

LIU Yani, ZHU Qiqi, LI Yuan, WANG Zhuang

(Xi'an XD Switchgear Electric Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

**Abstract:** Circuit breaker opening force is very important to circuit breaker's structure design and mechanism life analysis. In this paper, three methods for calculating circuit breaker opening force are presented. The first method calculates the opening force on the basis of measured strain of circuit breaker's drive link. The second method calculates the opening force by fitting the opening motion curve to obtain the opening acceleration. And the third method inversely derives the opening force from the spring force of operating mechanism. Taking some circuit breaker for example, the opening forces are calculated with the three methods and compared. The results show that the impact load of the circuit breaker is 2.0~2.2 times of the sustaining load.

**Key words:** circuit breaker; opening; force; calculation

### 0 引言

断路器分闸力值是断路器机械强度设计、结构优化、寿命分析的基础<sup>[1-4]</sup>。当前断路器结构设计时,常用的方法是以操动机构的输出力值即持续载荷作为传动系统受力分析的输入条件,持续载荷是机器在平稳工作条件下作用在零件上的载荷,它没有反映动力机和工作机间的实际载荷随时间作用的不均匀性、载荷在零件上分布的不均匀性以及影响零件受力情况等因素。然而断路器的分合闸是一个瞬态过程,属于重度冲击,要考虑实际冲击载荷随时间作用的不均匀性、载荷在零件上分布的不均匀性以及影响零件受力情况等因素。这些因素的综合影响,常用冲击系数  $K$  来做概略估计,冲击系数  $K$  与持续载荷的乘积称为冲击载荷。根据经

验公式,在重度冲击操作下,冲击载荷为持续载荷的 2~3 倍<sup>[5]</sup>。

为了获取并深入分析断路器分闸力值载荷,笔者采用了 3 种计算方法。第 1 种方法的技术路线是根据实测断路器传动连杆的应变求得分闸力值;第 2 种方法的技术路线是对分闸运动特性进行拟合,然后求二阶导数获取断路器加速度,从而计算出断路器分闸力值;第 3 种方法则是通过操动机构弹簧力值反推断断路器分闸力值。最后以某断路器为例,对上述 3 种方法进行了验证和比较。

### 1 分闸力值计算模型

#### 1.1 基于应变采集的分闸力值计算模型

将应变片粘贴于断路器传动连杆上<sup>[6-7]</sup>,通过应变信号采集系统,实时采集传动连杆的应变  $\varepsilon$ ,获取分闸过程中  $\varepsilon$  与时间  $t$  的关系曲线  $\varepsilon(t)$ ,然后运用式

(1)计算出时间  $t$  和分闸力值  $F$  的关系曲线图  $F(t)$ <sup>[8-9]</sup>。

$$F(t) = \varepsilon(t) \times E \times A。 \quad (1)$$

式(1)中: $F(t)$ 为  $t$  时刻的力值, N;  $\varepsilon(t)$ 为  $t$  时刻的应变值;  $E$  为传动连杆弹性模量, Pa;  $A$  为传动连杆横截面积,  $m^2$ 。

## 1.2 基于运动特性曲线的计算模型

通过机械特性测试仪采集断路器分闸操作过程中时间  $t$  和位移  $S$  的关系曲线图, 并将其拟合成一个连续的函数  $S(t)$ , 对  $S(t)$  求二阶导数获取加速度  $a(t)$ , 进而可求出分闸力值  $F(t)$ , 上述计算过程见式(2)、(3)<sup>[10-13]</sup>。

$$a(t) = S''(t); \quad (2)$$

$$F(t) = m \times a(t)。 \quad (3)$$

式(2)、(3)中: $a(t)$ 为  $t$  时刻加速度,  $m/s^2$ ;  $S''(t)$ 为  $t$  时刻位移, m;  $F(t)$ 为  $t$  时刻的分闸力值, N;  $m$  为断路器内部的运动质量, kg。

## 1.3 基于受力平衡的计算模型

根据能量守恒定律, 断路器操动机构的分闸弹簧释放的能量传递给断路器拉杆并使其带动断路器动侧进行分闸运动。该方法进行计算简便, 并以系数  $K$  考虑弹簧机构分闸操作时, 机构内部的能量损耗<sup>[10-13]</sup>。

$$F(t) = F_T(t) \times \frac{L_T(t)}{L(t)} \times K。 \quad (4)$$

式(4)中: $F(t)$ 为  $t$  时刻的分闸力值, N;  $F_T(t)$ 为  $t$  时刻的分闸弹簧力值, N;  $L_T(t)$ 为  $t$  时刻分闸弹簧力臂长度, m;  $L(t)$ 为  $t$  时刻传动连杆的力臂长度, m;  $K=0.9$  为弹簧机构内部能量损耗系数。

## 2 实例分析

某断路器为三相分箱结构, 每相配置 1 台弹簧操动机构<sup>[14]</sup>, 选择该断路器的某一相作为研究对象, 分别采用上述 3 种方法进行分闸力值的计算分析。

### 2.1 基于应变数据采集系统的计算模型

根据实际布置情况, 将应变片的粘贴位置选在断路器所配机构连杆的双头螺杆平面上, 用粘接剂将应变片粘贴在平面上, 将应变片和振动信号采集设备以及振动信号采集处理和分析程序连接<sup>[15-16]</sup>, 见图 1。机构分闸操作过程中, 应变  $\varepsilon$  与时间  $t$  的关系曲线  $\varepsilon(t)$  见图 2(图 2 中只有中间部分对应分闸过程, 其余为分闸前后的噪声信号)。

根据式(1)计算分闸过程的力值  $F(t)$ , 其中弹性模量  $E=210$  GPa, 得到分闸力值与时间的关系曲线, 见图 3, 其中最大的分闸力值  $F$  为 12 600 N。

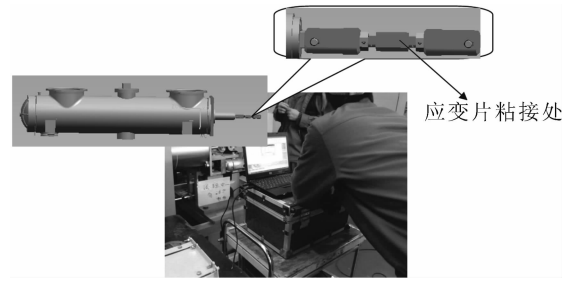


图 1 应变采集方案布置

Fig. 1 Strain acquisition program arranged

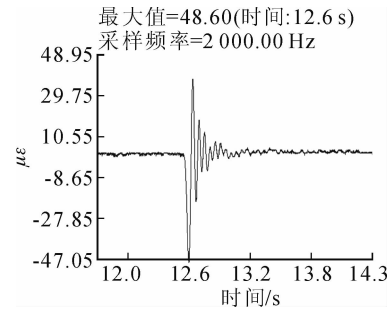


图 2 应变  $\varepsilon$  与时间  $t$  的关系曲线

Fig. 2 Strain the relationship between epsilon and time  $t$  curve

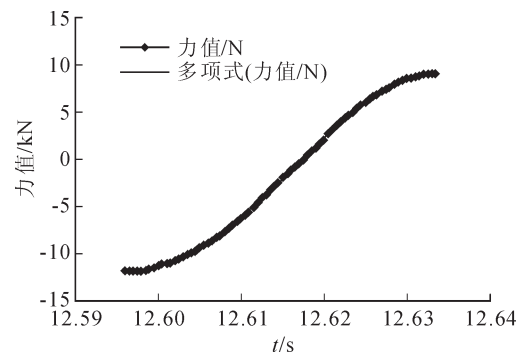


图 3 基于应变采集的分闸力值

Fig. 3 Opening force calculation based on strain

### 2.2 基于特性曲线性能的计算模型

机构进行分闸操作, 机械特性测试仪采集出时间  $t$  和位移  $S$  的运动特性曲线图, 见图 4。截取图 4 中运动特性曲线的有效部分, 并采用最小二乘法进行拟合<sup>[17-18]</sup>, 获得时间  $t$  和位移  $S$  的拟合函数(见图 5)为

$$S = 3\ 865.7t^3 - 745.08t^2 + 39.984t - 0.429\ 8。$$

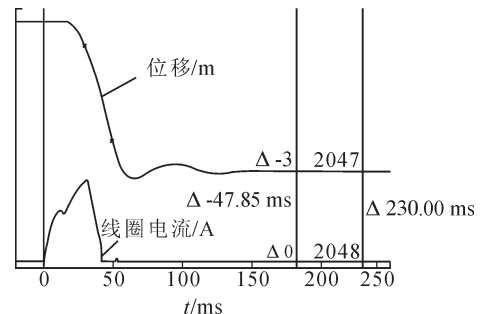


图 4 实测的分闸运动特性

Fig. 4 The measured break-brake movement characteristics

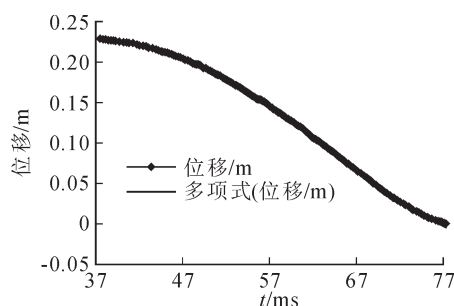


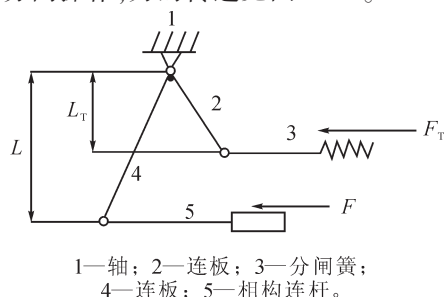
图5 拟合的运动特性

Fig. 5 Fitting movement characteristics

利用式(2)、(3)计算力值  $F(t)$ , 得出最大的分闸力值  $F$  为 12 000 N。

### 2.3 基于受力平衡的计算模型

机构进行分闸操作时, 分闸簧能量释放使灭弧室进行分闸操作, 力的传递见图 6<sup>[19-20]</sup>。



1—轴; 2—连板; 3—分闸簧;  
4—连板; 5—相构连杆。

图6 机械静载力值计算模型

Fig. 6 Model for static force calculation

根据式(4), 得出最大的分闸力值  $F$  为 6 000 N。

### 2.4 3种方法的比较分析

将上述3种方法的计算结果汇总成表1。

表1 3种方法获取的分闸力值

Table 1 Opening force based on presented three methods

| 方法        | 第1种方法:<br>基于应变数<br>据采集 | 第2种方法:<br>基于运<br>动特性曲线 | 第3种方法:<br>基于受<br>力平衡 |
|-----------|------------------------|------------------------|----------------------|
| 最大的分闸力值/N | 12 600                 | 12 000                 | 6 000                |

从表1中可以看出, 第1种方法和第2种方法的计算结果比较接近, 均为第3种计算结果的2.0~2.2倍。其原因是第1种和第2种方法获取的是断路器分闸力值的冲击载荷, 而第3种方法获取的是断路器分闸的持续载荷。根据文[5], 在重度冲击的工况下, 冲击载荷为持续载荷的2~3倍, 显然表1的3种计算结果与文[5]上给出的结论相符。

上述计算结果为断路器设计人员提供了数据支持, 即在断路器设计时, 要考虑断路器重度冲击的影响; 但又不能以冲击载荷作为强度设计的依据, 因为材料没有冲击强度的限值(亦许用值)。因此只能将分闸动力源的最大输出力作为持续力来核

算传动件的强度, 并以材料已知的各种持续力作用时的强度许用值, 如 $[\sigma_b]$ 、 $[\sigma_w]$ 、 $[\sigma_c]$ 来检验各种工作应力设计值的合理性<sup>[10-13]</sup>, 通常要求强度许用值应大于工作应力设计值(取1.5~2倍的安全系数), 以此来考虑冲击载荷的影响。

## 3 结论

1) 断路器分闸力值对断路器机械强度设计计算以及寿命分析至关重要。文中提出了3种方法计算断路器分闸力值并采用一个实例, 对上述3种方法进行了计算演示, 结果表明, 第1种方法和第2种方法的计算结果比较接近, 其计算结果为冲击载荷; 第3种方法的计算结果为持续载荷, 第1种和第2种方法计算的结果为第3种计算结果的2.0~2.2倍, 这与文[5]中给出的结论相符。

2) 只能用持续载荷作为传动强度核算的依据, 并以适当的安全系数来考虑冲击载荷的影响。

## 参考文献:

- [1] 林 萃. 现代高压电气技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [2] 尚振球, 郭文元. 高压电器[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1992.
- [3] 黎 斌. SF<sub>6</sub> 高压电气设计[M]. 第2版. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [4] 罗学琛. SF<sub>6</sub> 气体绝缘全封闭组合电气(GIS)[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [5] 邱宣怀, 郭可谦, 吴宗泽. 机械设计[M]. 第四版. 高等教育出版社, 1996.
- [6] 董 伟. 电阻应变片粘贴技巧[J]. 山西建筑, 2011, 37(28): 46-48.  
DONG Wei. On sticking skills for resistance strain chip[J]. Shanxi Architecture, 2011, 37(28): 46-48.
- [7] 王永红. 电阻应变片粘贴位置对测量结果的影响[J]. 硫磷设计, 1997, 1(1): 31-35.  
WANG Yonghong. Resistance strain gauges attached affect the position of the measurement results[J]. Parathion Design, 1997, 1(1): 31-35.
- [8] 郑 俊, 赵红旺, 朵兴茂. 应力应变测试方法综述[J]. 汽车科技, 2009(1): 5-8.  
ZHENG Jun, ZHAO Hongwang, DUO Xingmao. Summarization of stress and strain test method[J]. Automobile Science & Technology, 2009(1): 5-8.
- [9] 郑秀媛, 谢大吉. 应力应变电测技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.
- [10] 朱照宣. 理论力学-下[M]. 北京: 北京大学出版社, 1982.
- [11] 周衍柏. 理论力学教程[M]. 北京: 人民教育出版社, 1979.
- [12] 刘鸿文, 林建兴, 曹曼玲. 高等材料力学[M]. 北京: 高等

教育出版社, 1985.

- [13] R.M.琼斯. 复合材料力学[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1981.
- [14] 苏菊芳, 张红军, 文亚宁, 等. CT20 弹簧操动机构在 252 kV 高压断路器中的应用[J]. 高压电器, 2011, 47(6): 87-90.  
SU Jufang, ZHANG Hongjun, WEN Yaning, et al. Application of CT20 spring operating mechanism to 252 kV HV circuit-breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(6): 87-90.
- [15] 常晓飞, 符文星, 闫 杰. 便携式应变采集分析系统的设计[J]. 测控技术, 2011, 30(5): 98-100.  
CHANG Xiaofei, FU Wenxing, YAN Jie. Design of portable strain signal acquisition and analysis system[J]. Measurement & Control Technology, 2011, 30(5): 98-100.
- [16] 周兵谊, 王 勇, 曹 亮. 基于静态应变测试系统的应变与位移测试方法研究[J]. 机械与电子, 2005(6): 17-19.  
ZHOU Bingyi, WANG Yong, CAO Liang. Study on stress and displacement measurement based on static strain testing system[J]. Machinery & Electronics, 2005(6): 17-19.
- [17] 曾清红, 卢德唐. 基于移动最小二乘法的曲线曲面拟合[J]. 工程图学学报, 2004, 25(1): 84-89.

ZENG Qinghong, LU Detang. Curve and surface fitting based on moving least-squares methods[J]. Journal of Engineering Graphics, 2004, 25(1): 84-89.

- [18] 陆 健. 最小二乘法及其应用[J]. 中国西部科技, 2007(19): 19-21.  
LU Jian. Least squares method and its application[J]. Science and Technology of West China, 2007(19): 19-21.
- [19] 申永胜. 机械原理教程[M]. 北京:清华大学出版社, 1999.
- [20] 程崇恭. 机械运动简图设计[M]. 北京:机械工业出版社, 1994.

刘雅妮(1982—), 女, 双学士, 主要从事高压开关设备的产品工艺工作。

朱琦琦(1982—), 男, 博士, 主要从事高压开关设备的研发和计算。

李 渊(1985—), 男, 学士, 主要从事高压开关设备的产品工艺工作。

王 状(1985—), 男, 学士, 主要从事高压开关设备的试验与检测工作。

(编辑 吴俊丽)

(上接第 183 页)

the cable head by infrared technique[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(z1): 105-106.

- [18] GB/J 149—1990 电气装置安装工程母线装置施工及验收规范[S]. 1990.
- [19] 黄小卫. GW4 型隔离开关导电部位发热缺陷分析及消除对策[J]. 电气开关, 2013, 51(5): 83-85.  
HUANG Xiaowei. Heat defect analysis and countermeasures for conductive part of GW4 type isolating switch[J]. Electric Switcher, 2013, 51(5): 83-85.
- [20] 石延辉, 谢 超, 张志浩. 电气设备接头发热原因统计分析及预防措施[J]. 南方电网技术, 2013, 7(2): 126-129.  
DAN Yanhui, XIE Chao, ZHANG Zhihao. The statistical analysis on overheat causes of electrical equipment connectors and related preventive measures[J]. Southern Power System Technology, 2013, 7(2): 126-129.
- [21] 任荣勇. 电气设备发热故障的预防和处理[J]. 冶金动力, 2005, 4(4): 7-8.

REN Rongyong. Precaution and treatment of heating failures of electric plant[J]. Metallurgical Power, 2005, 4(4): 7-8.

- [22] 梁方建, 张道乾. GW5-110 型隔离开关触头发热缺陷分析及检修处理[J]. 高压电器, 2008, 44(1): 88-90.  
LIANG Fangjian, ZHANG Daoqian. Reason analysis and maintenance for overheat faults of type GW5 -110 disconnecter contact[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(1): 88-90.

杨晓峰(1983—), 男, 工程师, 主要从事高压试验工作。

张 晗(1987—), 男, 助理工程师, 硕士, 主要从事高压试验工作。

邓 军(1985—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事高压试验工作。

黄和燕(1984—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事高压试验工作。

(编辑 吴俊丽)