

## 光纤位移传感器在断路器在线监测系统中的应用

赵国栋<sup>1</sup>, 耿亚明<sup>2</sup>, 柴宇<sup>2</sup>, 揣振国<sup>2</sup>, 田涛<sup>2</sup>, 张兆君<sup>2</sup>

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096;

2. 国网江苏省电力公司检修分公司, 江苏 南京 211102)

**摘要:**针对以往用于断路器在线监测位移传感器的不足,本文提出了使用光纤位移传感器测量断路器动触头行程,达到精度高、干扰少的目的。提出一种基于希尔伯特-黄变换的断路器刚合点分析方法,利用经验模态分解得到包含速度信号局部特性的本征模态函数分量,根据速度突变点的特征,利用方差贡献率选择本征模态函数分量,经过希尔伯特变换得到瞬时幅值,该曲线的特征点即断路器刚合点。实验证明,该方法能够有效提取断路器的刚合点,耗时少、结果准确,可为断路器故障诊断提供可靠依据。

**关键词:**断路器机械特性;光纤位移传感器;希尔伯特-黄变换;刚合点

中图分类号: TM561

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2017)04-0098-05

### 0 引言

断路器是电力系统中的重要电气设备,其可靠性关系到电网运行的可靠性。根据国家电力监管委员会的长期统计显示<sup>[1,2]</sup>,断路器的机械故障是断路器失效的主要原因。动触头行程信号可以直观反映断路器的机械结构运行状态即机械特性<sup>[3-5]</sup>,是断路器在线监测中不可缺少的部分。断路器动触头与静触头的碰撞点称为刚合点,通过该点可以计算得到断路器的机械参数,机械参数直接反映了断路器是否存在机械故障。为了达到快速准确提取出刚合点的目标,西安交通大学的孟永鹏等人<sup>[6]</sup>采用了角度位移传感器测量断路器动触头的行程曲线,能够通过转轴位移曲线分析得到断路器刚合点,但是仅用一个角度位移传感器不能反映三相位移的同期性;陈建平等人<sup>[7]</sup>利用电阻式直线位移传感器直接测量动触头的行程曲线,虽然采集到真实的绝对行程,但是电阻式直线位移传感器输出信号为模拟信号,抗电磁干扰能力差,测量信号中包含大量毛刺。此外,由于断路器动触头连杆的动作位移具有一定的角度,将导致传感器连杆与保护壳之间的摩擦力增大,长时间测量会缩短传感器的使用寿命。

本文采用非接触式光纤位移传感器<sup>[8]</sup>作为断路器动触头行程的测量工具,精确测量断路器三相动触头的位移,传感器工作模式为非接触式的,不存在摩擦力影响寿命问题,能够保持长期精确测量。针对采集数据提出了一种基于希尔伯特-黄变

换的提取方法<sup>[9]</sup>,能够准确找到断路器的刚合点,进而得到一系列断路器机械特性参数。

### 1 非接触式光纤位移传感器

本文使用的光纤位移传感器利用标尺光栅作为数字编码器<sup>[10,11]</sup>,光线经过反射式数字编码器反射后,通过光纤阵列探头收集携带位置信息的反射光进而得到光信号脉冲,经过光电转换即可得到位置编码信息。反射式数字编码器安装在带拉杆的直线滑轨的表面,如图1所示。并使用Z型连接器将拉杆与断路器动触头绝缘连杆连接,当断路器动触头动作时,通过Z型连接器带动反射式数字编码器运动,光纤阵列探头将接收携带不同位置信息编码的光信号脉冲,转换即可得到断路器动触头的位移信息。

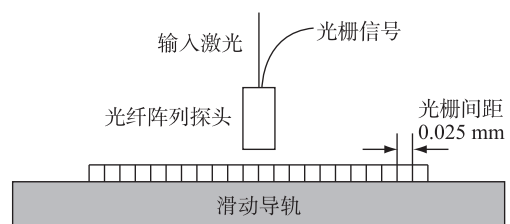


图1 反射式光纤传感器原理

Fig.1 Principle of reflective optical fiber displacement sensor

非接触式光纤位移传感器具有如下优点<sup>[12]</sup>:

- (1) 灵敏度高,响应频带宽,满足测量精度的要求;
- (2) 抗电磁干扰,电绝缘性好,可以用于复杂电磁环境中;
- (3) 体积小,质量轻,方便安装在断路器的狭小空间中。这些优点满足了断路器在线测量的要求,不仅能够精确探测断路器动触头的绝对行程,而且避免了环境的电磁影响,信号不需要经过消噪

收稿日期:2017-02-25;修回日期:2017-03-29

基金项目:国网江苏省电力公司科技项目(5210EC14006Z)

处理就可以进行分析。光纤位移传感器的安装位置如图2所示。

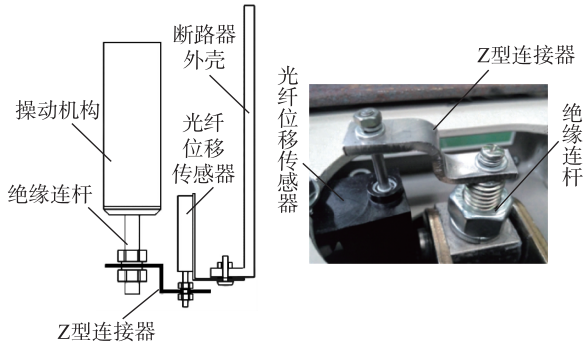


图2 光纤位移传感器安装

Fig.2 Installation drawing of optical fiber displacement sensor

本文使用的非接触式光纤位移传感器,其反射式数字编码器采用了MEMS技术刻蚀光栅<sup>[13,14]</sup>,精度可以达到0.025 mm。在实际采样过程中,绝缘连杆拉动编码器运动,经过某光栅时,光纤阵列探头即得到一个脉冲信号,由信号处理系统记录下时刻,经过下一个光栅时,数字编码器移动0.025 mm,信号处理系统记下经过该光栅的时刻,以此类推,即可得到断路器动触头行程-时间曲线,即位移信号。

## 2 基于希尔伯特-黄变换的刚合点提取

希尔伯特黄变换算法分为两个过程:经验模态分解(EMD)和希尔伯特变换(HT)<sup>[7]</sup>。但是EMD算法在对含突变信号的平稳信号进行分解时会产生模态混叠现象,使得突变点的提取产生困难<sup>[15]</sup>。因此,先对断路器动触头行程信号进行处理,计算经过各个光栅时的速度,将原行程信号变为非平稳的速度信号。在刚合点处,断路器动触头由于碰撞静触头,其速度发生了突变,因此速度信号的突变点即为刚合点。对速度-时间信号进行EMD分解,获得多个频率不同的IMF分量<sup>[16]</sup>,然后对方差贡献率最小的IMF分量进行希尔伯特变换,得到相应的信号包络,检测其特征点,从而获得速度突变点即刚合点。

### 2.1 基于EMD的断路器速度-时间信号分析

利用EMD对信号进行分析要求信号具备两个基本条件<sup>[17]</sup>:

- (1) 在整个信号序列上的极值点个数和过零点的个数相等或相差一个;
- (2) 任何一点由局部极大值和局部极小值点包络的平均值为零。

根据文献[18]的分解步骤,断路器的原始速度-时间信号可以表示为若干个IMF分量及余量之和:

$$v(t) = \sum_{i=1}^n v_i(t) + r_n(t) \quad (1)$$

式中: $v(t)$ 表示原始速度-时间信号; $v_i(t)$  ( $i=1,2,\dots,n$ )代表第*i*个IMF分量; $r_n(t)$ 为余量。

合闸时,断路器动触头接触刚合点的瞬间,受碰撞静触头的反作用力影响,损失大部分速度,因此包含该点信息的IMF分量对原始信号的贡献很小。为此本文采用方差贡献率<sup>[19]</sup>作为选择IMF分量的衡量指标。相应计算公式为:

$$M_i = \frac{D_i}{\sum_{i=1}^n D_i} \quad (2)$$

$$D_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |c_i(k\Delta t)|^2 - \left[ \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N c_i(k\Delta t) \right]^2 \quad (3)$$

式中: $D_i$ 表示第*i*个IMF分量的方差; $\Delta t$ 为信号数据采集时间间隔。

### 2.2 基于希尔伯特变换的速度-时间信号突变点提取

选择方差贡献率最小的IMF分量作希尔伯特变换,一个函数 $f(x)$ 的希尔伯特变换其实就是 $f(x)$ 和 $\frac{1}{\pi x}$ 做卷积,于是:

$$\hat{v}_i(t) = v_i(t) \times \frac{1}{\pi t} = \int_{-\infty}^{+\infty} v_i(t-t') \frac{1}{\pi t'} dt' \quad (4)$$

式中: $\hat{v}_i(t)$ 表示信号进行希尔伯特变换后的结果, $v_i(t)$ 表示某个IMF分量,原信号的解析信号 $V_i(t)$ 可以表示为:

$$V_i(t) = v_i(t) + i\hat{v}_i(t) = a_i(t) e^{j\theta_i(t)} \quad (5)$$

$$A_i(t) = \sqrt{v_i(t)^2 + \hat{v}_i(t)^2} \quad (6)$$

$$\theta_i(t) = \arctan\left(\frac{\hat{v}_i(t)}{v_i(t)}\right) \quad (7)$$

式(6)代表信号的瞬时振幅,式(7)代表信号的瞬时相位,均反映信号的瞬时特征。

$A_i(t)$ 也称作IMF信号的包络,描述了信号的幅值随时间变化规律<sup>[20]</sup>,检测其极值,找到幅值-时间曲线的突变点,以此作为断路器合闸过程中的刚合点,该点也是分闸过程中的刚分点。

## 3 断路器的机械特性

通过安装在断路器动触头上的光纤位移传感器,可以实时得到断路器的行程-时间特性。本文以某公司生产的ZW27-12型户外交流高压真空断

路器作为实验对象,光纤位移传感器有效行程为 20 mm,位移精度为 0.025 mm,采集到的断路器合闸动触头行程信号如图 3 所示。可以发现,经过光纤位移传感器采集到断路器动触头行程信号曲线极少有毛刺。

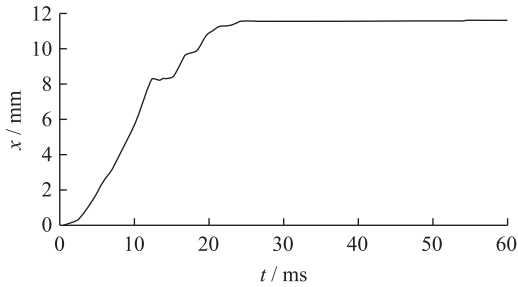


图3 断路器动触头行程曲线

Fig.3 Stroke curve of circuit breaker's moving contact

将断路器合闸动触头行程信号先转变为速度-时间信号,由于反射式数字编码盘的光栅的间隔很短,因此用经过光栅的平均速度作为经过每个光栅的瞬时速度,即可得到速度-时间信号。对速度-时间信号进行 EMD 分解,共得到 6 个 IMF 分量,如图 4 所示。

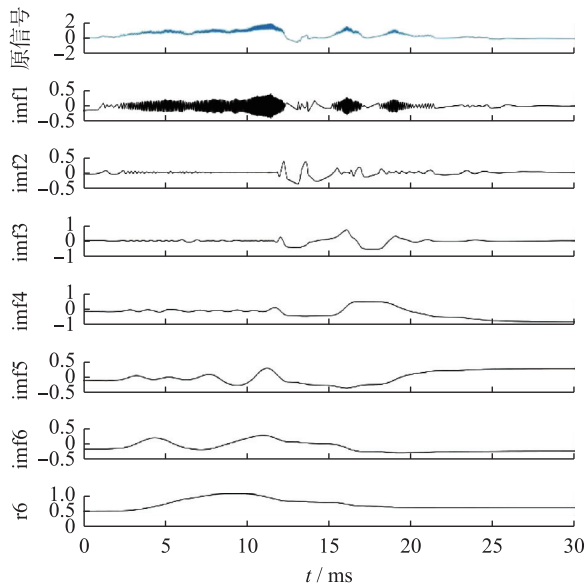


图4 原信号、EMD 分解得到的 IMF 分量及余项

Fig.4 Original signal, IMF components and remainder

由于动触头运动到刚合点时受静触头反作用力影响速度发生衰减,对整个速度信号的贡献率最小,因此包含刚合点信息的 IMF 分量的方差贡献率最小。

根据表 1 计算得到的方差贡献率,选择方差贡献率最小的 imf2 分量用于提取刚合点。对 imf2 进行希尔伯特变换,得到 imf2 分量的瞬时幅值,与断路器合闸动触头行程信号比较。

表 1 各 IMF 分量方差贡献率

Table 1 Variance contribution of each IMF components %

IMF 分量	方差贡献率	IMF 分量	方差贡献率
imf1	20.71	imf4	30.87
imf2	2.02	imf5	15.03
imf3	15.13	imf6	16.24

由图 5 的信号处理波形的分析可以发现,imf2 分量的幅值图中幅值最大的特征点即为断路器刚合点。记录下该点的时刻,即可在断路器动触头行程曲线中找到刚合点的位置信息。

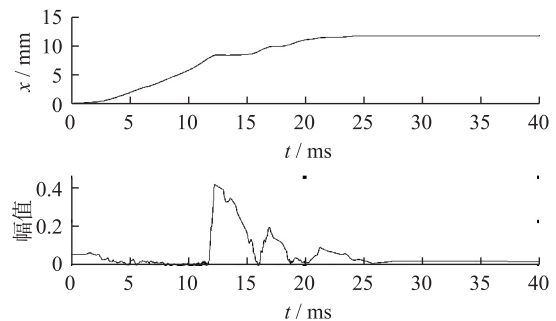


图5 瞬时幅值与原信号比较

Fig.5 Comparison between instantaneous amplitude and original signal

下面以断路器接触行程为例,验证上述方法的精度。接触行程是从刚合点到停止运动时动触头所移动的距离,其精度能够直接反映该算法的准确率和精度。计算公式为:

$$x_j = x - x_g \quad (8)$$

式中: $x_j$  是断路器的接触行程; $x$  是由光纤位移传感器采集到的断路器动触头总行程; $x_g$  为上述算法提取到的刚合点位置。

$$\text{误差: } D = \frac{x_j}{\bar{x}_j} \times 100\% \quad (9)$$

式中: $\bar{x}_j$  是接触行程的真实值。

表 2 为利用本文中提出的算法对采集的 5 组信号进行处理后计算得到的断路器接触行程数据,同时将计算结果与断路器特性测试仪 SA100 测试结果(断路器 ABC 三相的接触行程都调整为 3.5 mm,测试仪精度 $<0.5\%$ )进行比对。结果显示,误差都在 3%以内,表明该算法可以满足在线监测系统的要求。

提取出断路器的刚合点后,根据接触行程、触头开距以及分合闸速度的定义<sup>[21]</sup>,计算反映断路器机械特性的参数,见表 3,为进一步进行故障诊断提供坚实基础。



表2 断路器接触行程实验数据

Table 2 Experimental data of circuit breaker's contacting travel

次数	A相数据 /mm	A相误差 /%	B相数据 /mm	B相误差 /%	C相数据 /mm	C相误差 /%
1	3.525	0.71	3.475	0.71	3.550	1.43
2	3.475	0.71	3.425	2.14	3.575	2.14
3	3.575	2.14	3.425	2.14	3.475	0.71
4	3.550	1.43	3.450	1.43	3.450	1.43
5	3.475	0.71	3.475	0.71	3.550	1.43

表3 断路器机械特性参数

Table 3 Mechanical parameters of circuit breaker

参数类型	A相	B相	C相
接触行程/mm	3.52	3.35	3.52
触头开距/mm	9.48	9.55	9.48
合闸速度/ $m \cdot s^{-1}$	0.665	0.719	0.654
合闸同期性/ms		0.541	
分闸速度/ $m \cdot s^{-1}$	1.12	1.19	1.21
分闸同期性/ms		0.128	

## 4 结语

本文利用非接触式光纤位移传感器测量断路器动触头的行程,具有测量精度高,信号毛刺少的优点。提出了基于希尔伯特-黄变换的断路器刚合点分析方法,并应用于断路器动触头行程曲线。主要研究结果有:(1)根据断路器刚合点的速度特征,利用方差贡献率选择速度-时间信号经过EMD分解后的本征模态函数分量。(2)经过希尔伯特变换得到本征模态函数分量的信号包络,包络特征点即断路器刚合点,该特征提取方法能够准确找到断路器刚合点。得到断路器刚合点后,可以计算得到断路器机械特性的一系列机械参数,为断路器故障诊断提供可靠依据。经实验验证,该方法寻点准确、误差在3%以内,是理想的数据采集和提取办法。

### 参考文献:

- [1] 宋 泉,顾霓鸿. 高压开关设备运行及故障分析[J]. 供用电,2007,24(1):6-9, 19.  
SONG Gao, GU Nihong. Analysis of operation and fault of HV switchgear[J]. Distribution & Utilization, 2007, 24(1): 6-9, 19.
- [2] 杨 堃,李 炜,宋 泉,等. 2013年高压开关设备运行分析[J]. 智能电网,2014,2(6):32-41.  
YANG Kun, LI Wei, SONG Gao, et al. Operation analysis of HV switchgears in 2013[J]. Smart Grid, 2014, 2(6): 32-41.
- [3] 徐建源,张 彬,林 莘,等. 能谱熵向量法及粒子群优化的RBF神经网络在高压断路器机械故障诊断中的应用[J]. 高压技术,2012,8(6):1299-1306.

XU Jianyuan, ZHANG Bin, LIN Xin, et al. Application of energy spectrum entropy vector method and RBF neural networks optimized by the particle swarm in high-voltage circuit breaker mechanical fault diagnosis[J]. High Voltage Engineering, 2012, 8(6): 1299-1306.

- [4] 秦文姬,马丽丽,魏聪明. 高压断路器机械特性在线监测的研究[J]. 电气开关,2012,50(5):51-53,58.  
QIN Wenji, MA Lili, WEI Chengming. Research on the mechanical characteristic on-line monitoring of High Voltage Circuit Breaker[J]. Electric Switchgear, 2012, 50(5): 51-53, 58.
- [5] 黄 建,胡晓光,巩玉楠,等. 高压断路器机械故障诊断专家系统设计[J]. 电机与控制学报,2011,15(10):43-49.  
HUANG Jian, HU Xiaoguang, GONG Yunan, et al. Machinery fault diagnosis expert system for high voltage circuit breaker[J]. Electric Machines and Control, 2011, 15(10): 43-49.
- [6] 孟永鹏,贾申利,荣命哲. 真空断路器机械特性的在线监测方法[J]. 高压电器,2006,42(01):31-34.  
MENG Yongpeng, JIA Shenli, RONG Mingzhe. On-line Monitoring Method for Mechanical Characteristics of Vacuum Circuit Breakers[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(01): 31-34.
- [7] 陈建平,胡占强,苏晓东. 智能化断路器机械特性在线监测关键技术设计[J]. 高压电器,2014(4):108-112,119.  
CHEN Jianping, HU Zhanqiang, SU Xiaodong. Key technology design to on-line monitoring of mechanical characteristics for intelligent vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2014(4): 108-112, 119.
- [8] 韦 宣,乐 静,申阿维,等. 用于微动工作台的光纤位移传感器设计[J]. 传感器与微系统,2013,32(1):115-117.  
WEI Xuan, YUE Jing, SHEN Awei, et al. Design of optical fiber displacement sensor for micromotion worktable[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2013, 32(1): 115-117.
- [9] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[C]//Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. The Royal Society, 1998, 454(1971): 903-995.
- [10] 周顺斌,刘 莹. 光纤位移传感器的研究进展及其应用[J]. 煤矿机械,2008,29(6):10-11.  
ZHOU Shunbin, LIU Ying. Research development and application of fiber-optic displacement sensor[J]. Coal Mine Machinery, 2008, 29(6): 10-11.
- [11] 韦春玲,黄承义,冯 杰. 反射式光纤位移传感器的研究[J]. 国网技术学院学报,2014(2):19-23.  
WEI Chunling, HUANG Chengyi, FENG Jie. Research on reflective fiber-optic displacement sensor[J]. Journal of State Grid Technology College, 2014(2): 19-23.
- [12] 赵 勇,李鹏生,浦昭邦. 光纤位移传感器进展及其应用[J]. 传感器技术,1999,18(2):2.  
ZHAO Yong, LI Pengsheng, PU Zhaobang. Development and application of fiber-optic displacement sensor[J]. Journal of Transducer Technology, 1999, 18(2): 2.
- [13] 张建松,刘建胜,樊惠隆,等. 一种高稳定、高分辨率的光纤

- 位移检测系统[J]. 光学技术, 2006, 32(5): 656-659.
- ZHANG Jiansong, LIU Jiansheng, FAN Huilong, et al. A fiber-optic displacement measuring system with a high stability, high resolution[J]. Optical Technique, 2006, 32(5): 656-659.
- [14] 高天国. 反射式光纤位移传感器[J]. 自动化博览, 2002, 19(1): 29-30.
- GAO Tianguo. The reflexive-type optical fiber displacement sensor[J]. Automation Panorama, 2002, 19(1): 29-30.
- [15] 韩松, 何利铨, 孙斌, 等. 基于希尔伯特-黄变换的电力系统低频振荡的非线性非平稳分析及其应用[J]. 电网技术, 2008, 32(4): 56-60.
- HAN Song, HE Liquan, SUN Bin, et al. Hilbert-Huang transform based nonlinear and non-stationary analysis of power system low frequency oscillation and its application[J]. Power System Technology, 2008, 32(4): 56-60.
- [16] LOONEY D, MANDIC D P. Multiscale image fusion using complex extensions of EMD[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(4): 1626-1630.
- [17] REHMAN N, MANDIC D P. Empirical mode decomposition for trivariate signals[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(3): 1059-1068.
- [18] 黄建, 胡晓光, 巩玉楠. 基于经验模态分解的高压断路器机械故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(12): 108-113.
- HUANG Jian, HU Xiaoguang, GONG Yunan. Machinery fault diagnosis of high voltage circuit breaker based on empirical mode decomposition[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(12): 108-113.
- [19] 缪希仁, 吴晓梅, 石敦义, 等. 采用 HHT 振动分析的低压断路器合闸同期辨识[J]. 电工技术学报, 2014, 29(11): 154-161.
- MIAO Xiren, WU Xiaomei, SHI Dunyi, et al. Switching synchronism identification of low voltage circuit breaker Utilizing HHT Analysis to Vibration Signal[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(11): 154-161.
- [20] 李天云, 赵妍, 季小慧, 等. HHT 方法在电力系统故障信号分析中的应用[J]. 电工技术学报, 2005, 20(6): 87-91.
- LI Tianyun, ZHAO Yan, JI Xiaohui, et al. Application of HHT method for analysis of fault signal in electric power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(6): 87-91.
- [21] 梅飞. 断路器在线监测与故障诊断技术研究及工程实现[D]. 南京: 东南大学, 2014.
- MEI Fei. Research and engineering realization on on-line monitoring and fault diagnosis technology for circuit breaker[D]. Nanjing: Southeast University, 2014.

#### 作者简介:



赵国栋

赵国栋(1991—),男,山东烟台人,硕士研究生,研究方向为断路器在线监测与故障识别研究工作(E-mail: 220142216@seu.edu.cn);

耿亚明(1979—),男,江苏泰州人,工程师,从事继电保护方面的工作;

柴宇(1982—),男,辽宁阜新,工程师,从事变电检修方面的工作;

揣振国(1986—),男,安徽宿州人,工程师,从事变电检修方面的工作;

田涛(1972—),男,江苏南京人,工程师,从事高压电网变电检修方面的工作;

张兆君(1977—),男,江苏金坛人,工程师,从事变电运行工作。

## The Applications of the Optical Fiber Displacement Sensor in On-line Monitoring System of Circuit Breaker

ZHAO Guodong<sup>1</sup>, GENG Yaming<sup>2</sup>, CHAI Yu<sup>2</sup>, CHUAI Zhenguo<sup>2</sup>, TIAN Tao<sup>2</sup>, ZHANG Zhaojun<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Jiangsu Electric Power Maintenance Branch Company, Nanjing 211102, China)

**Abstract:** Fiber optic displacement sensor is introduced to measure the trip of the circuit breaker's moving contact against deficiencies of the displacement sensors used by previous online monitoring system, which leads to high-accuracy and low interference. An analysis method based on Hilbert-Huang Transform to extract moment-close point is put forward. The intrinsic mode function (IMF) component which contains speed signal partial characteristic is extracted by empirical mode decomposition (EMD). The IMF component is selected by the variance contribution rate according to the speed characteristic of the moment-close point. Thus the selected IMF component can be analyzed by instantaneous amplitude after Hilbert transform, whose feature point is the moment-close point of the circuit breaker. The experiment results shows that the analysis method could extract the moment-close point effectively and accurately, providing credible information for the fault diagnosis of circuit breaker.

**Key words:** mechanical characteristic of circuit breaker; fiber optic displacement sensor; Hilbert-Huang transform; moment-close point

(编辑 刘晓燕)