

# 基于分合闸线圈电流信号的高压断路器机械故障诊断

张永奎, 赵智忠, 冯旭, 郭雪

(河北工业大学电磁场与电器可靠性省部共建重点实验室, 天津 300130)

**摘要:** 高压断路器作为常用的电气设备,其中分合闸线圈是其操动机构的关键部件。文中阐述了根据监测断路器分合闸线圈电流信号来判断其故障的一种新方法,首先介绍了磁通随电磁铁的气隙变化而变化的监测原理,然后进行了以DSP为核心的硬件电路的设计,最后利用小波分析法和动态时间规整法相结合的方法对信号作了具体的分析,从而能够准确的得出断路器的状态信息。根据状态信息可以及时发现断路器运行过程中存在的隐患,然后进行必要的检修。

**关键词:** 断路器; 小波变换; 故障诊断; 动态时间规整

中图分类号: TM561

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2013)02-0037-06

## Mechanical Fault Diagnosis of High Voltage Circuit Breakers Based on Opening/Closing Coil Current Parameters

ZHANG Yong-kui, ZHAO Zhi-zhong, FENG Xu, GUO Xue

(Province-Ministry Joint Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability  
Hebei University of Technology, Tianjin 300310, China)

**Abstract:** High voltage circuit breaker as the commonly used electrical equipment, and the opening/closing coil is the key component of its operating device. This paper described a new method to judge the circuit breaker fault based on monitoring its opening/closing coil current. First, the monitoring principles of magnetic flux changes as the electromagnet's air gap changes was presented, then the hardware circuit was designed based on DSP, finally a detailed analysis of the signal was made by using the combination of the two algorithms of wavelet analysis and then the circuit breaker status information was obtained accurately. According to the status information, timely find the hidden danger in circuit breaker operation process.

**Key words:** circuit breaker; wavelet transform; fault diagnosis; dynamic time warping

### 0 引言

断路器是电力系统中的重要设备。断路器性能的可靠性直接关系到电力系统的可靠运行,而断路器的可靠性在很大程度上取决于其机械操动系统的可靠性<sup>[1]</sup>。因此对断路器的机械故障进行诊断是非常重要的,也是保证电力系统安全运行的重要措施<sup>[2-5]</sup>。断路器的机械故障诊断可以通过监测断路器的多种机械参数来完成,其中分合闸线圈的电流信号是重要监测参数之一<sup>[6-9]</sup>。以前的关于断路器分合

闸线圈的研究主要是根据检测的波形与样本的波形进行对比来判断断路器是否出现故障,没有对波形进行分析处理,这样就使检测的结果不够准确。笔者主要是在前人研究的基础之上引进了一种新的方法,使得通过分析分合闸线圈的电流信号来判断断路器的机械故障更加准确。

### 1 监测原理分析

电磁铁是高压断路器操动机构的重要原件之一<sup>[10]</sup>。当线圈中通过电流时,在电磁铁内产生磁通,铁心受到电磁力作用吸合,使断路器分闸或合闸。不管什么操动机构的断路器,都会有相应的分合闸

收稿日期:2012-06-21; 修回日期:2012-07-16

基金项目:河北省自然科学基金项目(E2011202053)。

Project Supported by Natural Science Foundation of Hebei Province(E2011202053).

线圈电流波形,它包含很多信息,反映了电磁铁本身以及所控制的锁闭或阀门以及连锁触头在操作过程中的工作情况<sup>[1]</sup>。分、合闸回路的电磁铁电路等值电路图见图1。

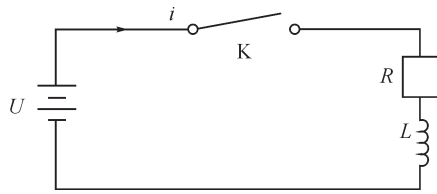


图1 分合闸线圈回路等值电路图

Fig. 1 Opening/closing coil equivalent circuit diagram

其微分方程可表示为

$$U = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (1)$$

式(1)中,  $\psi$  为磁链。为简化分析,假设电磁铁不饱和,则有  $\psi = Li$ , 电感  $L$  不随  $i$  变化,但随电磁铁的气隙  $\delta$  变化而变化,即

$$U = Ri + \frac{d(Li)}{dt} = Ri + L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dt} = Ri + L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{d\delta} \cdot \frac{d\delta}{dt} = Ri + L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{d\delta} \cdot v \quad (2)$$

当电磁线圈刚接通电源时,由于线圈有一定电感,电流不能马上达到稳定电流,而是逐步由0逐渐增大。与此同时,铁心的吸引力也逐渐增大。在电磁铁的吸引力不足以使铁心动作时,  $\delta = \delta_{\max}$  为常数,即铁心的运动速度为  $v = 0$ 。式(2)变为

$$U = Ri + L_1 \frac{di}{dt} \quad (3)$$

式(3)中,  $L_1$  为  $\delta = \delta_{\max}$  时,电磁铁线圈的电感,微分方程的通解是

$$i = Ce^{-\frac{R}{L_1}t} + \frac{U}{R} \quad (4)$$

式(4)中,  $C$  为通解常数。由  $t = 0, i = 0$  的初始条件得微分方程的一个特解

$$i = \frac{U}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L_1}t}) \quad (5)$$

因此,在铁心运动之前,线圈电流  $i$  呈指数上升。在时间  $t_1$  电流增大到动作电流  $I_d$ , 电磁铁的吸力超过反作用力(如铁心重力,加在铁心上的弹簧力等),铁心开始运动,  $v > 0$ 。等值回路中增加一随时间增大的反电动势  $i \frac{dL}{d\delta} \cdot v$ , 一般情况下,线圈电流  $i$  比铁心刚开始运动时的电流  $I_d$  的数值要小,因此,电流  $i$  偏离指数上升曲线,不断下降。这一过程直到铁心吸合,铁心停止运动,  $v = 0$ 。由式(2),电流的微分方程变为

$$U = Ri + L_2 \frac{di}{dt} \quad (6)$$

式(6)中,  $L_2$  为  $\delta = \delta_{\min}$  时,电磁铁线圈的电感。故电流以铁心停止  $t = t_2$  时的电流  $I_2$  为初值,按指数规律上升,最后达到稳定值  $I = \frac{U}{R}$ 。

上述变化过程可用图2中的典型分合闸线圈电流特性波形说明,这一波形根据铁心的运动可以分为5个阶段:

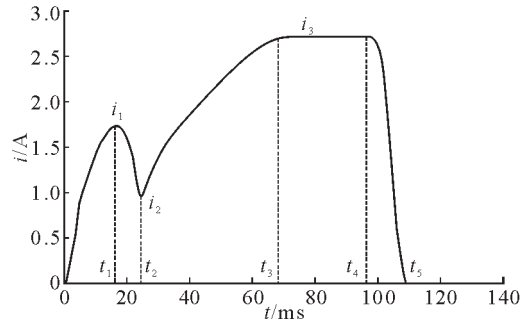


图2 分合闸线圈电流特性波形图

Fig. 2 Current chart of opening/closing coil

1)阶段  $t = t_0 - t_1$ 。线圈在  $t_0$  时刻通电到  $t_1$  时刻铁心开始运动;

2)阶段  $t = t_1 - t_2$ 。铁心运动,电流下降。 $t_2$  为控制电流的谷点,代表铁心已经触动操作机械的负载因而显著减速或停止运动;

3)阶段  $t = t_2 - t_3$ 。铁心停止运动,电流又呈指数上升;

4)阶段  $t = t_3 - t_4$ 。这一阶段是阶段3的延续,电流达到近似的稳态;

5)阶段  $t = t_4 - t_5$ , 电流开断阶段。辅助开关  $K$  分断在辅助开关触头间产生电弧并被拉长,电弧电压快速升高迫使电流迅速减小直到熄灭。

其中,  $t_0 - t_1$  与控制电源及线圈电阻有关;  $t_1 - t_2$  的变化表征电磁铁铁心运行机构有无卡涩、脱扣及机械负载变动情况;  $t_2 - t_3$  可以反映操作传动系统运动的情况。通过以上几个不同特征时间的分析即可诊断断路器部分机械故障趋势,包括拒分、拒合等故障<sup>[12-13]</sup>。

## 2 硬件电路设计

针对弹簧操动机构高压断路器及检测信号的瞬时性,装置选用了对信号反应非常迅速的磁补偿式霍尔电流传感器,可以测量任意波形的电流,输出端能真实地反映输入端电流的波形参数。将高压断路器分、合闸线圈引线穿过霍尔电流传感器测量孔径,可以很方便地取得电流信号,既克服了电磁

式互感器的非理想性缺点,又解决了直流电参量测量时的隔离问题。

笔者选择补偿式霍尔传感器 DT5-P,输入/输出电流比例为 500:1,响应时间小于 1 μs,测量孔径为 φ10,频率响应范围宽,见图 3。高压断路器分、合闸线圈的直流模拟信号为  $I_1$ (约为 0~3 A),经霍尔传感器变换后,变成 0~6 mA 的电流信号  $I_2$ , $I_2$  经过匹配电阻  $R$ (为 500 Ω)转换成 DSP 能够接受的电压信号  $U_0$ (0~3 V)。

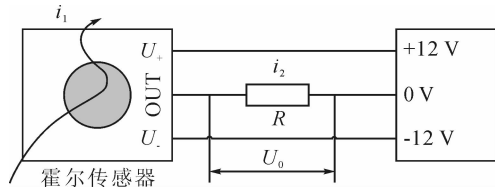


图 3 霍尔电流传感器接线图

Fig. 3 Connecting diagram of Hall current sensor

$U_0$  经过调理电路后传给 DSP 模拟输入通道,由 DSP 内部 A/D 转换器进行模数转换,最后进行数据处理。其调理电路图见图 4,图 4 中  $R_1$  和  $D_1$  一起构成限压保护环节,防止输入范围过大而烧坏 DSP 系统;其中  $R_1$  是限流电阻,防止传感器输出端的电流过大而毁坏电源单元。 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  和单电源 CMOS 低功耗运算放大器 LM324N 一起构成二阶有源低通滤波电路。 $R_2=4.7\text{ k}\Omega$ , $R_3=5.1\text{ k}\Omega$ , $C_1=22\text{ nF}$ , $C_2=47\text{ nF}$ ,滤波电路的截止频率  $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_2 R_3 C_1 C_2}} = 1\ 010\text{ Hz}$ 。

笔者采用的是 NI 公司生产的运算放大器 LM324N,它是一款单电源常用四运放,采用先进的 CMOS 技术,具有偏置电流低、运行速度快、开环增益高以及满幅输出等特点,内部集成 4 个独立的运算放大器,不仅可以节省很多电路板的设计空间,还可以降低成本,提高系统工作可靠性。

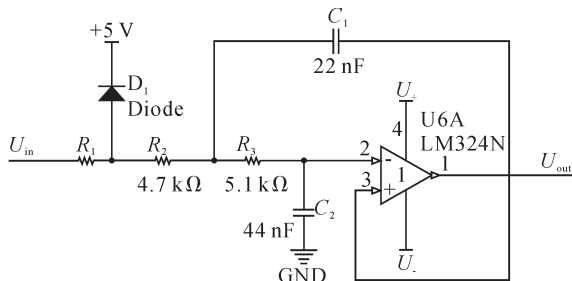


图 4 电流信号调理电路图

Fig. 4 Current signal conditioning circuit diagram

该装置对分、合闸线圈带电瞬间时的线圈电流进行高速数据采集,经过 DSP 与上位机之间的串行数据通讯,由上位机描绘出分、合闸线圈电流曲线。

### 3 故障诊断分析

以往利用断路器分合闸线圈电流波形进行故障诊断的方法主要是通过使用历次检测到的电流波形与正常情况下的电流波形相比较来反映断路器的某些机械故障。笔者使用的是一种新的方法,首先利用小波函数分析其分合闸线圈电流,得到各临界点时刻,从而得到各时间过程的时间,然后再利用动态时间规整法(DTW)计算出检测状态与基准状态之间信号的动态时间距离,通过与其对应的时间短时谱相比较,对断路器的工作状态进行判断<sup>[14-17]</sup>。结合文<sup>[14-17]</sup>中两种方法,实现真空断路器故障诊断。

#### 3.1 小波分析理论

##### 3.1.1 小波分析理论基础

小波函数的定义为:设  $\varphi(t) \in L^2(R)$ ,若其 Fourier 变换  $\varphi(\omega)$  满足

$$C_\varphi = \int_R \frac{|\varphi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (7)$$

则称  $\varphi(t)$  为一个基本小波或小波母函数,并称式(7)为小波变换的可容许条件<sup>[18]</sup>。

小波变换的定义如下:设  $x(t)$  为平方可积函数(记作  $x(t) \in L^2(R)$ ), $\varphi(t)$  为基本小波函数,则

$$WT_\varphi = \frac{1}{\sqrt{a}} \int x(t)\varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \leq x(t) \quad (8)$$

为  $x(t)$  的小波变换。其中  $\varphi_{a,b}(t) = \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) > 0$ ,  $b$  为小波位移,  $a$  为小波尺度伸缩。

实际上,小波变换就是将信号分解成尺度不同的一系列小波的组合,在高频区,采用小尺度的小波,以很好地表征高频的细节信号;在低频区,采用大尺度的小波,再现信号的整体概貌。另外,小波分析还有去除噪声的功能,小波分析能够很好地把具有噪声的高频部分和干净信号区别开来。虽然分、合闸线圈电流信号会有一定的分散性,但是经过小波变换处理后,可以很容易的将正常信号的分散性和故障信号区别开来<sup>[19-20]</sup>。

##### 3.1.2 小波变换检测信号突变点原理

奇异性的定义:①设  $n$  为一正整数且  $n \leq \alpha \leq n+1$ ,一个函数  $f(x)$  在点  $x_0$  称为 Lipschitz  $\alpha$ ,当且仅当存在两个常数  $A$  与  $h_0 > 0$ ,以及一个  $n$  阶多项式  $P_n(h)$ ,使得对  $h < h_0$  满足  $|f(x_0+h) - P_n(h)| \leq Ah^\alpha$ ;②函数  $f(x)$  在区间  $[a, b]$  上一致 Lipschitz  $\alpha$ ,当且仅当存在一个常数  $A$ ,且对任意  $x_0 \in [a, b]$ ,存在一个  $n$  阶多项式  $P_n(h)$ ,如果  $x_0+h \in [a, b]$ ,上式是满足的;③满足  $f(x)$  在  $x_0$  点

是 Lipschitz  $\alpha$  的所有  $\alpha$  的上界,称为  $f(x)$  在  $x_0$  的正规定度;④说一个函数在  $x_0$  点是奇异的,如果它在  $x_0$  点不是 Lipschitz 1。

信号的突变有两方面含义:一是幅值的急剧变化;二是频率的急剧变化。分析信号的突变也要分析两方面:一是突变的时刻;二是判断不同的突变类型。通过对信号进行小波时频局部化分解,可以发现信号突变的时刻和空间分布情况。由上述定义可以看出,函数  $f(x)$  在某点的 Lipschitz  $\alpha$  越大则函数越光滑。函数在某处间断或某阶导数不连续,则函数在该点必奇异。依据以上定义刻画奇异性指数是非常困难的,通常用模极大值法求取奇异性指数。对于二进制的离散小波变换,可以根据小波变化各尺度上模极大值的传递性来计算奇异点对应时刻和奇异性指数。

### 3.2 动态时间规整(DTW)法

动态时间规整是一种柔性模式匹配算法,能够对存在全局或局部扩展、压缩或变形的模式进行匹配,解决动态模式的相似度量和分类问题。DTW 最早用于语言信号识别领域,现在已经在工业过程的故障诊断、手写体识别、签名验证和心电图信号分类等领域得到了广泛的应用<sup>[21]</sup>。

在正常情况下,对信号进行 DTW 的结果近似为一条  $45^\circ$  的直线,断路器出现故障时其规整结果将出现明显的偏移。这种方法对事件出现时间上的变化有较高的灵敏度,能反映触头运动过程的信息,并能对机构零部件工作状态的一些小的变化在检测结果中得到明显的反映<sup>[22]</sup>。

### 3.3 实例分析

线圈电流波形对应的特征参数有:时间量(以  $t_0$  为时间零点)  $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5$  和电流量  $I_1, I_2, I_3$ 。由前述波形分析可知,波形中的时间参数对应着铁心的运动事件。

下面是几种典型的线圈电流波形,见图 5。某状态完好的断路器合闸线圈电流波形见图 5(a),以线圈开始通电为时间原点,该断路器在其他情况下的合闸线圈的电流波形,见图 5(b)、(c)、(d)。

首先利用二次 B 样条小波函数尺度变换对各波形进行变换,然后从分析结果中很容易找到波形的畸变点,而且从 4 幅图中可以看到畸变点位置的一致性,从而得到断路器分合闸线圈各事件变化的准确时刻。对图 5(a)进行二次 B 样条小波函数尺度变换的结果见图 6,其他变换结果用表格表示出来了。

从图 6 中可以清楚的分析出线圈电流波形时间参数的计算结果,见表 1,其他电流波形分析结果见表 2-4。

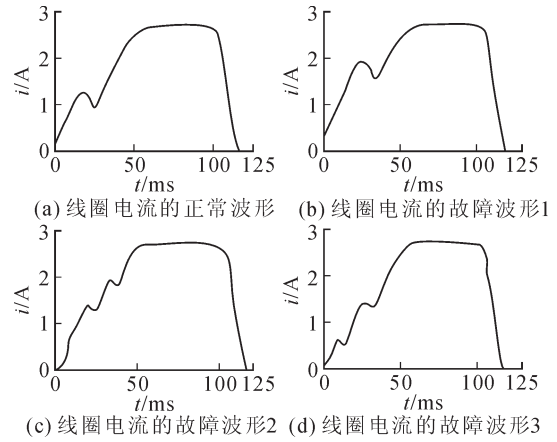


图 5 几种典型的线圈电流波形图

Fig. 5 Coil current diagrams

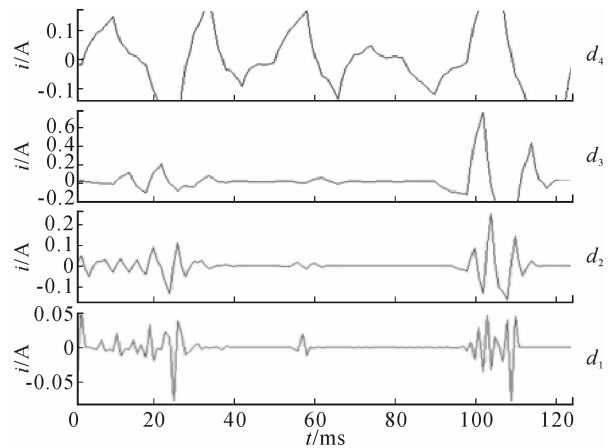


图 6 小波尺度分解图

Fig. 6 Wavelet scale decomposition

表 1 图 5(a)线圈电流波形时间参数

Tab. 1 Time parameters of coil current in Fig.5(a)

参数名	$t_0$	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$
参数值/ms	0	17.8	23.6	59.8	95.5	108.5

表 2 图 5(b)线圈电流波形时间参数

Tab. 2 Time parameters of coil current in Fig.5(b)

参数名	$t_0$	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$
参数值/ms	0	22.6	32.8	61.5	96.6	110.9

表 3 图 5(c)线圈电流波形时间参数

Tab. 3 Time parameters of coil current in Fig.5(c)

参数名	$t_0$	$t_1$	$t_2$	$t_{21}$	$t_{22}$	$t_3$	$t_4$	$t_5$
参数值/ms	0	17.6	20.2	31.5	33.9	50.5	95.8	111.3

表 4 图 5(d)线圈电流波形时间参数

Tab. 4 Time parameters of coil current in Fig.5(d)

参数名	$t_0$	$t_1$	$t_2$	$t_{21}$	$t_{22}$	$t_3$	$t_4$	$t_5$
参数值/ms	0	10.6	12.8	26.4	31.5	56.3	96.5	111.6

为清楚表达其间的相对关系,根据动态时间规整法(DTW)理论用图 7 所示的  $t-t$  图表示。当断路器状态完好时,  $t-t$  图应近似为  $45^\circ$  的直线。当断路器

状态异常时,  $t-t$  图会出现明显的偏移。

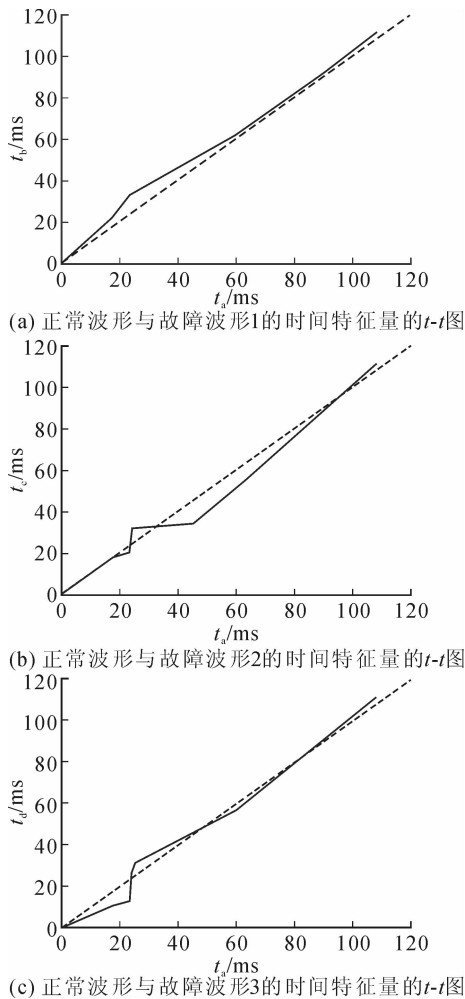


图7 线圈电流时间特征量的  $t-t$  图

Fig. 7  $t-t$  diagrams of coil current time characteristics

从图7中可以看出,虚线以上部分表示时间有滞后量,以下部分表示时间有超前量。当出现与横轴垂直的部分时,则表示出现多余的电流折点。因此,可以得出以下判断:断路器(b)在铁心运动时滞后,断路器(c)、(d)在铁心运动过程中有卡滞。

#### 4 结语

通过分析高压断路器分合闸线圈电流波形的特点,设计了采集此电流信号的硬件电路。再利用文中提出的小波变换和动态时间规整法(DTW)相结合的新方法对采集的电流信号进行分析处理,经过仿真研究,此方法可以准确的判断高压断路器是否存在机械故障以及发生故障的原因。因此该方法具有一定的实用性,可以应用到具体的工程实践当中。

#### 参考文献:

[1] 宋建新,刘凤丽. 真空断路器机械特性参数测量及验

证[J]. 沈阳农业大学学报,2002,33(5):380-382.

SONG Jian-xin, LIU Feng-li. Measurement and verification of the mechanical parameters of the vacuum circuit breaker[J]. Academic Reports of Shenyang Agricultural University, 2002, 33(5):380-382.

[2] LEE D S S, LITHGOW B J, MORRISON E. New fault diagnosis of circuit breakers[J]. IEEE Trans.on Power Delivery, 2003, 18(2):454-459.

[3] 黄凌洁. 高压断路器状态监测与故障诊断方法的研究[D]. 北京:北京交通大学,2009.

HUANG Ling-jie. The research on condition monitoring and faults diagnosis of high voltage SF<sub>6</sub> circuit breaker[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009.

[4] 郎福成. 真空断路器机械特性在线监测[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2005.

LANG Fu-cheng. Online monitoring of the mechanical characteristics of vacuum circuit breakers[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2005.

[5] 潘惠敏. 基于DSP的真空断路器机械参数测试装置的研制[D]. 成都:西华大学,2009.

PAN Hui-min. Development of the test device based on DSP vacuum circuit breaker mechanical parameters [D]. Chengdu: West China University, 2009.

[6] 林燕侠. 高压真空断路器机械特性故障诊断研究[D]. 江苏:江苏科技大学,2009.

LIN Yan-xia. Fault diagnosis of mechanical properties of the high-voltage vacuum circuit breaker[D]. Jiangsu: Jiangsu University of Science and Technology, 2009.

[7] 钟家喜,李保全,李亚红. 高压断路器机械状态诊断与监测技术的探索与实践[J]. 高压电器,2011,47(2):53-60.

ZHONG Jia-xi, LI Bao-quan, LI Ya-hong. Exploration and practices of mechanical state diagnosis and monitoring techniques for high voltage circuit-breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(2):53-60.

[8] 于莉莉. 高压断路器的在线监测与诊断系统[D]. 山东:山东大学,2005.

YU Li-li. Online monitoring and diagnosis system of high voltage circuit breaker[D]. Shandong: Shandong University, 2005.

[9] 王芳,毛晓桦. 基于小波奇异性和神经网络的高压断路器机械故障诊断[J]. 南京工程学院学报:自然科学版,2005,3(1):23-27.

WANG Fang, MAO Xiao-hua. Mechanical fault diagnosis of high voltage breakers based on the wavelet singularity and neural Network[J]. Journal of Nanjing Institute of Technology: Natural Science Edition, 2005, 3(1):23-27.

[10] 赵洋,刘汉宇,曾庆军. 高压真空断路器机械特性在线监测系统研制[J]. 高压电器,2009,45(6):91-95.

ZHAO Yang, LIU Han-yu, ZENG Qing-jun. Study on on-line monitoring for mechanical characteristics of high

voltage vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2009,45(6):91-95.

[11] 许丽娜. 真空断路器状态监测与知识管理系统设计[D]. 辽宁:大连理工大学,2007.  
XU Li-na. The design of condition-based monitoring and knowledge management system on vacuum circuit breaker [D]. Liaoning:Dalian University of Technology,2007.

[12] 袁金丽,李奎. 基于SVM与合分闸线圈电流参数的高压断路器机械故障诊断[J]. 高压电器,2011,47(3):26-30.  
YUAN Jin-li,LI Kui. High voltage circuit breaker machinery fault diagnosis based on the parameters of SVM and together sub-gate coil current[J]. High Voltage Apparatus, 2011,47(3):26-30.

[13] 许沛丰,高军委,张予洛,等. 对断路器电容器电容及介损测量预试方法的探讨[J]. 电力电容器,2007,28(4):53-56.  
XUE Pei-feng,GAO Jun-wei,ZHANG Yu-luo, et al. Discussion about the way to measure capacitance and dielectric loss of circuit breaker[J]. Power Capacitor,2007, 28(4):53-56.

[14] DONG Y,XIAO D M. Combination of wavelet packet band energy analysis and AR model bi-spectrum in application on circuit breaker condition detection [C]//2008 International Conference on High Voltage Engineering and Application.China:IEEE,2008:657-660.

[15] 吴振磊,陈钟荣. 基于小波变换的信号突变检测[J]. 微计算机信息,2006,22(12):92-94.  
WU Zhen-lei,CHEN Zhong-rong. Mutation detection based on wavelet transform of signal[J]. Microcomputer Information, 2006,22(12):92-94.

[16] HU Xiao-guang,WANG Jian-ze,JI Yan-chao, et al. The application of the wavelet analysis of analytic signals in mechanical fault diagnosis of circuit breakers [C]//2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting.Canada: IEEE/PES,2003:2235-2240.

[17] 白志强,唐永哲. 基于动态时间规整的飞控系统故障诊断[J]. 计算机仿真,2007,24(1):39-41.  
BAI Zhi-qiang,TANG Yong-zhe. Flight control system fault diagnosis based on dynamic time warping[J]. Computer Simulation,2007,24(1):39-41.

[18] 杨国安,许飞云,吴贞焕,等. 基于小波包和解调分析的多类故障综合诊断方法研究[J]. 东南大学学报,2004,34(1):42-45.  
YANG Guo-an,XU Fei-yun,WU Zhen-huan,et al. Fault diagnosis based on wavelet packet and demodulation [J]. Journal of Southeast University,2004,34(1):42-45.

[19] 孙鹏,郑志成,高翔. 基于小波分析的故障电弧检测方法[J]. 高压电器,2012,48(1):25-29.  
SUN Peng,ZHENG Zhi-cheng,GAO Xiang. Arc fault detection based on wavelet analysis[J]. High Voltage Apparatus,2012,48(1):25-29.

[20] 赵海龙,王芳,胡晓光. 小波包-能量谱在高压断路器机械故障诊断中的应用[J]. 电网技术,2004,28(6):47-48.  
ZHAO Hai-long,WANG Fang,HU Xiao-guang. Wavelet packet - the energy spectrum of applications in mechanical fault diagnosis of high voltage circuit breaker[J]. Power System Technology,2004,28(6):47-48.

[21] 王振浩,杜凌艳,李国庆. 动态时间规整算法诊断高压断路器故障[J]. 高电压技术,2006,32(10):36-38.  
WANG Zhen-hao,DU Ling-yan,LI Guo-qing. Dynamic time warping algorithm diagnostic high voltage circuit breaker failure[J]. High Voltage Engineering,2006,32(10): 36-38.

[22] 李志兵,许沛丰,刘华伟,等. 断路器电容器介损随电压变化关系研究[J]. 电力电容器,2007,28(6):26-30.  
LI Zhi-bing,XU Pei-feng,LIU Hua-wei,et al. Research on dielectric loss variation of circuit-breaker capacitors with voltage[J]. Power Capacitor,2007,28(6):26-30.

张永奎(1985—),男,硕士研究生,研究方向为真空开关状态参数检测。

赵智忠(1965—),男,教授,硕士生导师,研究方向为真空开关状态参数检测、智能电器(通讯作者,Zhaozhizhong@hebut.edu.cn)。

冯旭(1987—),男,硕士研究生,研究方向为真空开关状态参数检测。

郭雪(1987—),女,硕士研究生,研究方向为真空开关状态参数检测。

简讯

ABB小型太阳能 1 000 V 直流专用隔离开关全新上市

ABB 低压于 2012 年 12 月推出全新小型太阳能 1 000 V 直流专用隔离开关 OTDC,适合小型(包括家用)太阳能系统的汇流箱,逆变器直流侧,能覆盖 15 kW 以下功率的逆变器系统要求,也可以用于通讯等行业的直流配电系统中。

该产品在额定直流电压条件下可达 DC21B 的应用类别不降容,完全满足 IEC 60947-3 和 GB 14048.3 的要求,并可配合 ABB 其他直流产品提供全套太阳能解决方案。