

基于K-S检验法和SVM的高压断路器分合闸线圈回路故障诊断

分合闸线圈回路作为高压断路器分合动作的主控制回路，其正常工作对于高压断路器的可靠性及电力系统的稳定性具有重要的意义。但是在断路器长期的在线运行过程中，分合闸线圈回路往往会出现不同类别的电气故障，影响断路器的正常工作。分合闸线圈回路的状态可以很好地反映在其分合闸线圈电流信号中，通过对断路器分合动作线圈电流信号的采集、处理和分析，可以有效地对分合闸回路进行状态检测。通过对分合闸线圈回路常见的电气故障进行现场试验，获取分合闸线圈电流并提取有效的电流、时间特征参量及其组成的复合特征参量，针对特定的故障类型采用K-S检验法筛选影响因子较高的特征参量作为特征向量，然后通过支持向量机对特征向量进行计算并对分合闸线圈回路进行故障识别。

李恒真¹ 谢志杨¹ 王继锋² 易 林² 刘益军¹ / 1. 广东电网有限责任公司佛山供电局 2. 广州华工科技开发有限公司

0 引言

高压断路器在电力系统中承担着控制和保护两大重要任务，其可靠动作对于电网安全运行及其稳定性具有重要的意义^[1]。作为高压断路器动作的第一级控制元件，分合闸线圈回路的正常工作是断路器整体正常运行的关键保证^[2]。然而，分合闸线圈回路在断路器长期的在线运行过程中会出现不同类型的电气故障，典型的分合闸线圈回路故障包括电磁铁卡滞、分合闸电源电压偏离正常值以及分合闸线圈电阻增大等。其对断路器动作的影响分别为：电磁铁卡滞会增加控制回路的反应时间，使断路器动作滞后，卡滞严重甚至导致断路器动作失

败；分合闸线圈电阻偏大，则分合闸电磁铁起动延迟，影响断路器的速动性；分合闸电源电压偏大可能会烧毁分合闸线圈，偏小则会导致分合闸电磁铁的起动延迟^[3-6]。

分合闸线圈回路出现异常，会在分合闸线圈电流信号中很好地反映出来，因此可以通过采集每次断路器动作时的分合闸线圈电流信号，获取电流信号中的时间、电流等特征参量及其组成的复合特征参量，并用支持向量机对分合闸线圈回路可能产生的电气故障进行识别分类。然而，针对不同的分合闸线圈回路故障，有些特征参量的变化幅度可能较大，有些则不明显，如果盲目地将所有特征参量全部用于对支持向量机的训练，则可能会影响分类的准确性。采用K-S检验法，先对不同分合闸线圈回路故障下的特征参量进行筛选，选取影响因子较高的特征参量，然后通过支持向量机进行故障识别。

1 分合闸线圈回路工作原理

分合闸线圈回路主要由直流电源 U 、定值电阻 R 和电磁继电器组成。其工作等效电路如图1所示，电流 i 满足如下微分方程

$$U = Ri + \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

式中， Φ 为通电线圈产生的磁通，为了简化分析过程，假设铁心在整个过程中不会饱和，则 $\Phi = Li$ ，线圈电感 L 为铁心位移 x 的函数。则式(1)可转化为



李恒真/工程师

关键词/Keywords

分合闸线圈 ·
高压断路器 ·
电气故障 ·
状态监测 ·
支持向量机 ·

广东省电网公司科技项目(K-GD2014-030)。

$$U = Ri + L(x) \frac{di}{dt} + i \frac{dL(x)}{dt} \quad (2)$$

进一步转化

$$U = Ri + L(x) \frac{di}{dt} + i \frac{dL(x)}{dx} v \quad (3)$$

式中, v 为铁心运动速度。

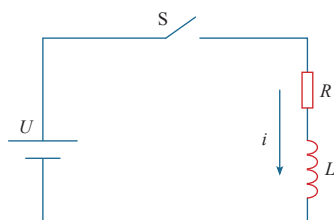


图1 分合闸回路等效电路

典型的分合闸线圈电流曲线如图2所示。在 $t=0$ 时刻, 分合闸回路收到上级控制单元发出的分合闸指令, 经过时延 t_0 , 开关 S 接通分合闸线圈回路, 由于存在线圈电感, 电流由0逐渐增大, 在电流值达到 I_1 之前, 通电线圈产生的电磁力不足以拉动铁心, 铁心位移为0, 该段时间内电流 i 满足式(4) 呈现指数上升, 即

$$i = \frac{U}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L(x)}(t-t_0)}) \quad (4)$$

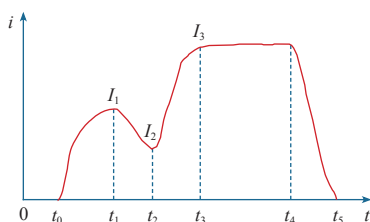


图2 典型的分合闸线圈电流曲线

在 $t=t_1$ 时刻, 分合闸线圈电流值达到 I_1 , 通电线圈产生足够电磁力驱动铁心开始运动, 并短时间内使铁心获得较大速度。由于铁心的运动, 感应出一个瞬间增大的强电动势, 方向与电源电压方向相反, 导致分合闸线圈电流下降。直到 $t=t_2$ 时刻, 铁心推动撞杆撞击分合闸操纵机构的锁扣并停止运动, 电流降至最低值 I_2 。铁心静止以后, 分合闸线圈电流重新上升, 电流变化满足如下表达式

$$i = I_2 e^{-\frac{R}{L(x)}(t-t_2)} + \frac{U}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L(x)}(t-t_2)}) \quad (5)$$

在 $t=t_3$ 时刻电流达到最大电流值 I_3 , 同时锁扣释放储存在分合闸弹簧内的能量, 为断路器分合动作提供动力。在 $t=t_4$ 时刻, 辅助开关切断分合闸线圈回路, 电流急剧下降并在 t_5 时刻降至0, 分合闸线圈回路工作周期结束。

2 分合闸线圈电流信号的采集及预处理

2.1 分合闸线圈电流信号采集

试验对象为额定电压40.5 kV的高压交流瓷柱式SF₆断路器, 主要用于输变电线路的控制和保护, 也可做联络型断路器使用。分合闸线圈电流的采集使用CSM010G型号霍尔电流传感器, 其工作参数为: 量程 ± 20 A, 线性度 $< 0.1\%$, 温度范围 $-25\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。该类型断路器的控制箱内部结构如图3所示, 两个传感器分别环套在分合闸电磁铁一侧的进线上(见图3中红色和绿色圆圈所标记位置), 传感器通过4芯RVVP电缆连接至控制箱附近的户外箱内, 由置于户外箱内的数据采集装置对信号进行采集, 最终以网线传至主控室内的上位机。

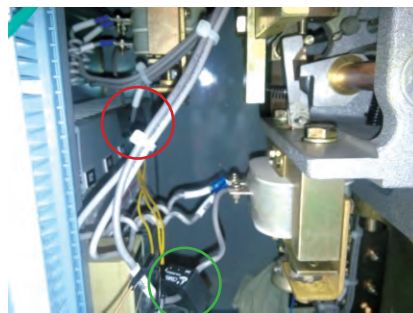


图3 35 kV电容器断路器控制箱机构及分闸电磁铁

由于从传感器向户外箱的走线经过了断路器控制箱机构金属外壳和接线端子排, 并与其他电缆捆绑在一起, 所采集到的电流信号难免会受到一定程度的干扰, 加之现场其他电气设备工作时产生的电磁扰波, 因此, 在对采集信号进行分析之前, 需要对其进行相应的预处理, 并对信号进行放大、降噪等。由于数据采集装置已经进行了采样频率设置及相应的信号放大处理, 故传到上位机的信号只需要进行有效的降噪即可。

2.2 信号降噪处理

选取的降噪方法为小波降噪。小波变换可以在不同尺度下将信号划分到任意细致的频带内,而且各个频带内的重构信号互不重叠。小波变换的视频窗口是可变、可平移的,可以方便地观察频率特征,且能够得到该频率成分发生的时间。相对于其他降噪方法,小波变换在分解重构的过程中更好地保留了其时域、频域的有用信息。

设函数 $\Psi(t)$ 的傅里叶变换 $\Psi(\omega)$ 满足

$$C_{\Psi} = \int_R \frac{|\Psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (6)$$

$\Psi(t)$ 为一个基本小波或者小波母函数,称式(6)为小波函数的容许条件。将 $\Psi(t)$ 进行伸缩和平移,可得到的函数为

$$\Psi_{a,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) \quad (7)$$

当 $a, \tau \in R, a > 0$ 时,称 $\Psi_{a,\tau}(t)$ 为依赖于参数 a 和 τ 的小波基函数;若尺度因子 a 和评议因子 τ 是连续变化的,则称 $\Psi_{a,\tau}(t)$ 为连续小波基函数。将任意函数 $f(t)$ 在连续小波基函数下展开,称为函数 $f(t)$ 的连续小波变换,表达式为

$$WT_f(a, \tau) = \left\langle f(t), \Psi_{a,\tau}(t) \right\rangle = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_R f(t) \bar{\Psi}\left(\frac{t-\tau}{a}\right) dt \quad (8)$$

由上述定义可知,小波变换和傅里叶变换都是一种积分变换, $WT(a, \tau)$ 是小波变换系数。

在实际应用中,为了方便计算机的分析和处理,信号 $f(t)$ 需要进行离散化, a 和 τ 也需要离散化,这就是离散小波变换。为减少小波变换系数的冗余度,将小波基函数 $\Psi_{a,\tau}(t)$ 的 a 和 τ 限定在一些离散点上取值。

常用的离散化方法是将尺度按幂级数进行离散化,即取 $a = a_0^m (a_0 > 1, m \in Z)$,一般 $a_0 = 2$ 。对 τ 进行均匀离散取值以覆盖整个时间轴,即 $\tau = na_0^n \tau_0 (n \in Z)$ 。因此,小波基函数变为

$$\Psi_{m,n}(t) = a_0^{-m/2} \Psi(a_0^{-m} t - n\tau_0) \quad (9)$$

相应的离散小波变换为

$$WT_f(a_0^m, na_0^n \tau_0) = \left\langle f(t), \Psi_{m,n}(t) \right\rangle = \int f(t) \bar{\Psi}_{m,n}(t) dt \quad (10)$$

分合闸线圈电流正常信号与加载噪声时的信号如图4a、b所示,采用db10小波对其进行4层分

解,对高频分解参数进行硬阈值处理,重构信号如图4c所示,消噪前后的曲线对比如图4d。

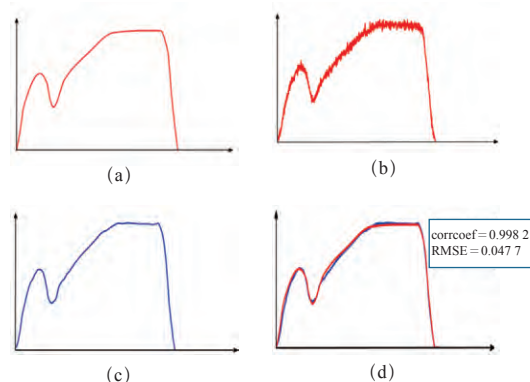


图4 分合闸线圈电流小波降噪

3 分合闸线圈回路电气故障模拟及电流信号特征参量提取

3.1 电气故障模拟

典型的分合闸线圈回路电气故障有电磁铁卡滞、分合闸电源电压偏离正常值以及分合闸线圈电阻增大。针对不同故障的试验模拟方法如下。

1) 电磁铁卡滞:用变电站现场过往检修出现铁心卡滞问题的电磁继电器代替正常的电磁继电器。

2) 分合闸电源电压偏离:将断路器内部原有的AC/DC供电装置从分合闸线圈回路中去除,代之以外部可编程电源供电。

3) 分合闸线圈电阻:解开分合闸线圈回路并串入可调电阻。

通过分合闸线圈电流可以分别检测分合闸线圈两个回路的状态,以分闸回路为例介绍了状态检测的实现方法,其同样适用于合闸线圈回路。分闸线圈回路在几种工作状况下采集并消噪后的线圈电流曲线如图5所示。

3.2 特征参量提取

结合典型分合闸线圈电流曲线及线圈回路的工作原理,提取的特征参量包括5个时间参数 $\{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5\}$ 和3个电流参数 $\{I_1, I_2, I_3\}$ 。对于 t_3 、 t_4 的提取,分别取线圈电流上升及下降至最大电流值 I_3 的90%时刻,其余参数通过曲线离散数据可方便地

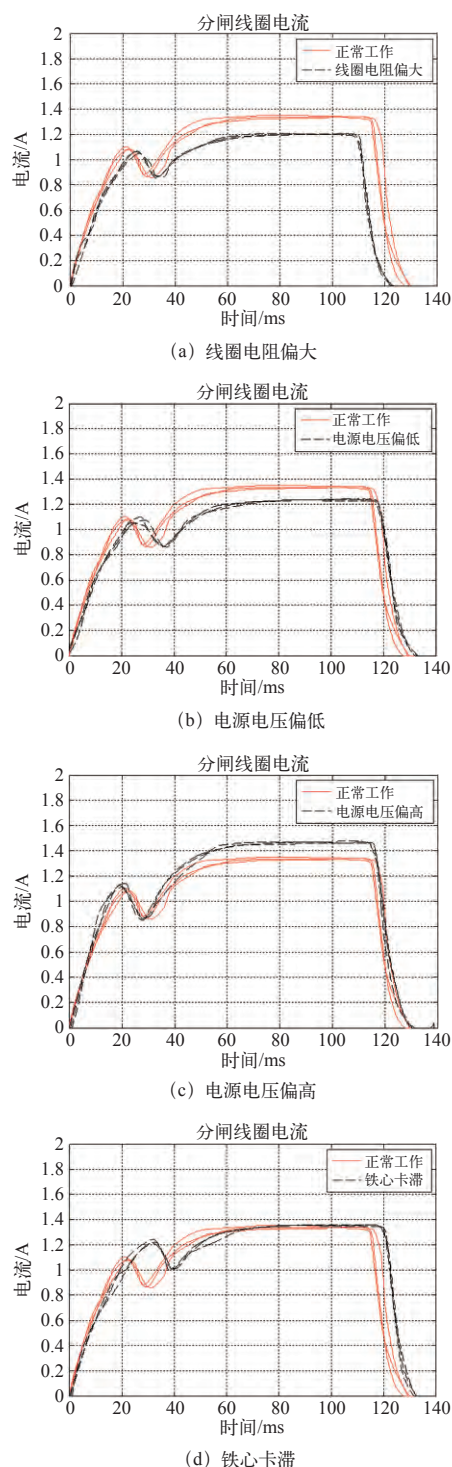


图5 不同电气故障时分闸线圈电流曲线与正常情况电流曲线对比图(各三组)

提取。

复合参数 Δt_{12} 、 S 的定义及计算方式如下:

Δt_{12} 为分合闸电磁铁铁心运动的相对时间跨度, $\Delta t_{12} = |t_1 - t_2|/t_1$; S 为分合闸电磁铁铁心的启动

功, $S = \int_0^{t_1} i dt$ 。

4 分合闸线圈回路电气故障识别

4.1 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 检验法

K-S检验法, 亦称拟合优度检验法, 可以用来检验给定的一组数据是否来自已知分布或检验两组不同数据的分布一致性。作为一种非参数方法, 具有稳健性高、不依赖均值、对尺度化不敏感和适用范围广(不像 t 检验仅仅局限于正态分布)等优点。

根据需要, 两组数据分布一致性检验法的基本思路为: 假定 $X_1, \dots, X_m$ 和 $Y_1, \dots, Y_n$ 为来自两个独立总体的样本, 样本容量分别为 m 和 n 。用 $F_1(x)$ 和 $F_2(x)$ 分别表示两个样本的累积经验分布函数。记 $D(x) = F_1(x) - F_2(x)$, 则两组样本的最大分布差异可表示为

$$Z = \max |D(x)| \sqrt{\frac{mn}{m+n}} \quad -\infty < x < \infty \quad (11)$$

以时间特征向量 t_5 在正常状态和线圈电阻偏大两种情况下的20组数据为例进行K-S检验, 得到的累积分布函数如图6所示, 求得 Z 值为2.69。以此类推, 分别求得10个特征向量的 Z 值, 然后选取 Z 值较大的4个特征向量作为线圈电阻偏大状态下的最终向量。其他故障类型下的特征向量选取类似。

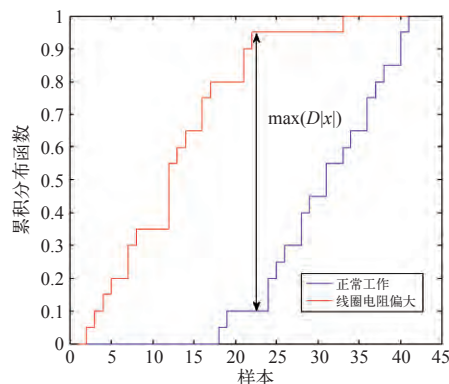


图6 正常工作和线圈电阻偏大两种状态下特征参数 t_5 的累积分布函数

4.2 支持向量机

支持向量机作为一种先进的分类器, 具有鲁

棒性好、理论完善和计算简单等优点,其核心内容为选取合适的核函数,将输入向量映射到线性可分的高维空间中,通过寻找最优的惩罚参数 c 和核参数 g ,达到求解最优分类超平面的目的。

选取的支持向量机模型为C-SVC模型,以径向基函数(RBF)作为分类器核函数,其目标函数及限制条件如下

$$\begin{aligned} \min_{w,b,\xi} \quad & \frac{1}{2} w^T w + c \sum_{i=1}^l \xi_i \\ \text{subject to} \quad & y_i (w^T \phi(x_i) + b) \geq 1 - \xi_i \\ & \xi_i \geq 0 \quad i=1,2,\dots,l \end{aligned} \quad (12)$$

式中, w 为权值向量; y_i 为分类标记; x_i 为训练集; $\phi(x_i)$ 将训练集映射到高维空间; c 为惩罚因子; ξ_i 为松弛变量。

核函数 $k(x_i, x_j) = \phi(x_i)^T \phi(x_j)$,其表达式为

$$k(x_i, x_j) = \exp(-g \|x_i - x_j\|^2) \quad g > 0 \quad (13)$$

式中, g 为相应的核参数。

4.3 采用支持向量机识别分合闸线圈回路故障

以选取的支持向量机对分合闸线圈电流的所有特征参量进行处理:

1) 通过大量试验并采集足够多的分合闸线圈电流数据,提取相应的10个特征参量作为10维特征向量。表1给出了一组正常工作状态下分闸线圈电流的特征值。

表1 正常工作状态下分闸线圈电流特征值

组别 特征参量	1	2	3	4
t_1/ms	21.500	22.400	21.600	21.900
t_2/ms	31.000	29.900	29.300	28.500
t_3/ms	51.600	49.700	52.000	50.800
t_4/ms	115.800	117.200	115.200	116.200
t_5/ms	126.700	128.900	129.300	127.500
I_1/A	1.075 5	1.084 8	1.104 3	1.107 9
I_2/A	0.857 6	0.880 8	0.864 0	0.867 15
I_3/A	1.339 7	1.353 6	1.335 3	1.349 0
Δt_{12}	0.442	0.335	0.356	0.301
S	71.391	72.692	73.344	73.643

2) 对每一条电流曲线对应的特征向量赋予故障标签。故障类型的对应标签为:正常工作,0;电阻偏大,1;电压偏低,2;电压偏大,3;铁

心卡滞,4。将带有相同标签的特征向量划分为两组,分别作为训练集和测试集。

3) 对所有的特征向量进行归一化处理,以便后续数据处理及提高程序收敛速度。将训练集和测试集的特征向量统一进行列归一化。

4) 以训练集的特征向量及对应故障标签对SVM进行训练并求得最优参数 c 、 g ,进而得到最优分类模型。采用遗传算法(GA)得到的最优参数: $c=9.896\ 9$, $g=1.165\ 2$ 。

5) 采用得到的 c 、 g 参数建立分类模型,并对测试集进行预测(50组)。分类结果如图7所示,分类模型正确识别了45组分闸线圈回路的状态,准确率为90%。其中1组分合闸线圈偏大的故障误分为正常状态下,1组电源电压偏低的故障误分为分合闸线圈电阻偏大,2组电源电压偏高的故障误分为电源电压偏低,1组铁心卡滞误分为电源电压偏高。

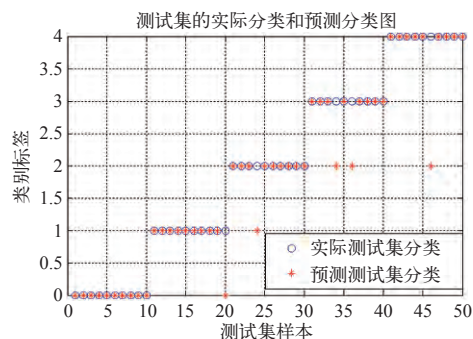


图7 最优分类模型对测试集进行预测结果1

4.4 采用K-S检验法和支持向量机识别分合闸线圈回路故障

因为在不同故障发生时,不同特征参量的变化幅度不一致,在获取所有特征参量后,需要对特征参量的变化幅度进行评估,以选择改变较为显著的特征参量作为支持向量机的特征向量。

将不同故障类型的特征参量分别和正常状态下的特征参量进行K-S检验,得到的最大Z值如表2所示。针对分合闸线圈电阻偏大的故障,通过Z值大小排序可以看出变化较大的前5个特征参量分别为 t_1 、 t_2 、 t_3 、 Δt_{12} 、 I_3 ,因此选取这些特征参量作为训练支持向量机的特征向量,并对该类型故障

进行分类测试。同理可得到其他故障类型变化较大的5个特征参量。

表2 不同故障类型下各特征参量的Z值

故障 Z值	分合闸线圈 电阻偏大	电源电压 偏低	电源电压 偏高	铁心卡滞
Z_{I_1}	3.06	2.98	3.16	3.12
Z_{I_2}	2.96	2.28	3.05	3.05
Z_{I_3}	3.16	3.12	3.12	2.35
Z_{I_4}	2.53	2.24	1.74	2.85
Z_{I_5}	2.69	2.87	1.74	3.00
Z_{I_6}	0.47	0.63	0.79	0.66
Z_{I_7}	0.67	1.26	0.63	3.16
Z_{I_8}	3.12	3.05	3.16	1.74
$Z_{M_{12}}$	3.14	3.11	3.09	1.33
Z_S	2.11	0.88	0.98	3.15

根据不同故障类型所选择的特征向量，重复前文的步骤2)～步骤5)，得到的最优参数为： $c=12.193$ ， $g=1.392\ 4$ 。分类结果如图8所示，准确识别了49组分合闸线圈回路状态，准确率高达98%，只有1组电源电压偏高的故障误分为电源电压偏低。与采用所有特征参量训练支持向量机并进行故障识别的方法相比，该方法先是利用K-S检验法筛选出了相关性较强的几个特征向量，然后用这些特征向量训练支持向量机并进行故障识别，分类准确率有了显著的提升。

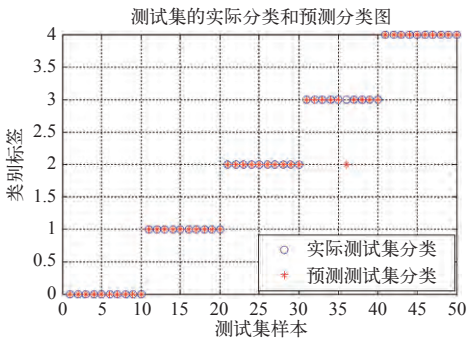


图8 最优分类模型对测试集进行预测结果2

5 结束语

传统的基于分合闸线圈电流信号的故障诊断方法，一种是根据经验选取少数几个特征参量来对分合闸回路状态进行识别，无法判断这些特征参量是否随故障类型而发生显著变化，具有明显

的局限性；一种是通过算法将所有的特征参量不加区别地与故障类型建立映射关系，具有较大误差和不稳定性。

通过研究分合闸线圈回路的工作原理，确定线圈电流信号中重要的特征参量，对采集到的线圈电流信号进行小波降噪并提取相应的基本特征参量和复合特征参量，选取了两种方法对这些参量进行处理：①用所有特征参量训练支持向量机并进行故障识别测试；②采用K-S检验法为支持向量机选择合适的特征向量，然后进行训练及故障识别。

方法一确定的分类模型正确识别了45组分合闸线圈回路的状态，准确率为90%；方法二根据分合闸线圈回路不同的故障类型，分别采用K-S检验法从8种基本特征参量和2种复合特征参量中确定了与各个故障相关程度较高的5个特征参量，并用作支持向量机故障识别的特征向量，准确识别了49组分合闸线圈回路状态，准确率高达98%，足以对断路器分合闸线圈回路状态进行准确的识别。类似地，本文所提出特征提取和故障识别方法也可推广至断路器其他机构的故障诊断的研究中，具有较高的实用价值。

参考文献

[1] 张超. 高压断路器在线监测系统开发及故障诊断分析 [D]. 北京: 华北电力大学, 2004.

[2] 徐国政, 张节容, 钱家骊, 等. 高压断路器原理和应 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.

[3] 袁金丽, 李奎, 郭志涛, 等. 基于SVM与分合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.

[4] 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.

[5] 吴忠良. 高压断路器在线监测技术进展 [J]. 电气开关, 2011 (1): 1-3.

[6] 杨赛男. 高压开关柜智能在线监测与诊断系统关键技术的研究 [D]. 南京: 东南大学, 2013.

(收稿日期: 2015-07-14) EA