

基于振动特征估计的GIS设备故障检测与分析

赵洪山, 高玉峰

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 针对气体绝缘金属全封闭开关设备(gas insulated switchgear, GIS)故障频发问题,提出一种基于振动特征估计的GIS设备故障检测与分析方法;首先,提取GIS设备金属外壳振动信号特征并基于通用自回归模型建立系统的状态空间模型;然后,采用粒子滤波算法对GIS设备振动特征进行估计。同时,将特征估计值与实际测量值之间残差的绝对值作为设备故障检测指标,结合自适应阈值方法来检测故障;最后,依据振动特征残差的变化趋势实现机械故障与放电故障的隔离。对多组变电站现场GIS设备不同故障前、后实测振动数据的仿真分析发现,通过振动特征估计不仅可以准确检测设备故障,而且可以有效隔离设备机械故障与放电故障。

关键词: GIS设备; 振动特征; 粒子滤波; 自回归模型; 自适应阈值; 故障检测与分析

Fault Detection and Analysis of GIS Based on Vibration Characteristic Estimation

ZHAO Hongshan, GAO Yufeng

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Hebei Baoding 071003, China)

Abstract: Aiming at the frequent occurrence of GIS faults, a fault detection and analysis method based on vibration characteristic estimation is proposed. Firstly, the vibration signal characteristic of the metal enclosures of GIS is extracted and the state-space model of the system is established based on the general auto-regressive model. Then, the particle filter algorithm is hired to estimate the vibration characteristic of GIS. At the same time, the absolute value of the residual between the characteristic estimate and the actual measurement is selected as the fault detection indicator combined with the adaptive threshold to detect the fault. Finally, the mechanical fault and the discharge fault are isolated according to the trend of the vibration characteristic residual. The simulation analysis of the measured vibration data before and after different faults of multiple sets of substation GIS equipment found that the vibration characteristics estimation can not only accurately detect equipment faults, but also effectively isolate equipment mechanical faults and discharge faults.

Key words: GIS equipment; vibration characteristics; particle filter; auto-regressive model; adaptive threshold; fault detection and analysis

0 引言

气体绝缘金属全封闭开关设备因其体积小、维护便捷、可靠性高、检修周期长及适应能力强等优点,得到电力行业一致认可,已成为电网重要设备之一^[1]。但受运行环境及制造等因素的影响,GIS设备不可避免的会出现各种故障现象。由于GIS设备的

密封性,当设备内部发生异常时,很难通过人的感官准确发现异常部位;同时,GIS设备出现故障后,设备维修困难、停电检修时间长、维修费用高,会耗费较多的人力、物力。准确监测GIS设备的运行状态、提早发现故障,对提高电力系统运行安全性及经济性具有重要意义。

目前,针对GIS设备的故障检测方法主要包括

超声波法、化学分析法、脉冲电流法、超高频法、振动分析法5种。其中前4种方法已广泛应用于GIS设备绝缘放电故障的检测中^[2-6]。实际上,除放电性故障外,机械故障也是造成设备无法安全稳定运行的重要原因。振动是电力GIS设备的固有属性,能直接反应设备的运行状态。此外,振动信号的采集回路与设备的电气部分无直接联系,不会影响设备的正常运行,在其它设备的故障检测领域已得到广泛应用^[7]。

文[8]研究了正常运行状态下GIS设备金属外壳的振动机理,通过模态分析法分析了设备的固有频率。文[9-11]通过对金属外壳上振动信号研究发现,利用振动信号可以实现GIS设备触头接触不良故障的检测。文[12]利用EMD-HHT算法对GIS设备金属外壳振动信号进行处理,实现了设备不同部位故障的检测,验证了利用外壳振动信号实现GIS设备故障检测的可行性。但是,上述研究方法只能在设备故障发生后进行检测,无法在产生早期、故障特征较弱时发现故障,同时无法根据故障特征来实现故障的隔离。

在故障发生早期实现故障的检测需要对时序非线性振动特征进行估计。不同于只适用于线性离散系统的卡尔曼滤波及将非线性系统线性化的无迹卡尔曼滤波,粒子滤波(particle filter, PF)是一种利用蒙特卡洛模拟方法来实现贝叶斯滤波的算法,可以结合历史信息直接实现非线性系统的特征估计。近年来,已被广泛应用于故障检测领域^[13]。

鉴于上述分析,为了实现基于非线性振动特征的GIS设备故障检测,文中提出一种利用粒子滤波算法估计设备振动特征的故障检测与分析方法。首先,提取金属外壳振动特征并利用通用自回归模型建立GIS设备的状态空间模型。然后,采用粒子滤波算法实现GIS设备振动特征的估计,并将特征估计值与实际测量值比较产生残差,结合自适应阈值方法实现GIS设备故障的检测。最后,根据振动特征残差的变化趋势来实现机械故障与放电故障的隔离。算例对实测GIS设备不同故障的振动数据进行仿真分析,验证了该方法的有效性。

1 GIS金属外壳振动及特征的选取

正常运行时,GIS开关设备振动主要由电磁力与磁致伸缩引起,金属外壳上会产生基频为100 Hz的稳定振动,且当设备内部发生异常时,GIS金属外壳振动信号会产生明显的变化^[14]。由于运输不当、现场运行环境恶劣、运行时间过长等因素,GIS设备

会出现不同类型的故障,。不同故障条件下GIS设备外壳上会出现不同频率的振动^[15],见图1。放电故障与机械故障是GIS设备最主要的故障类型。机械故障包括紧固螺栓松动、机械卡涩、触头接触不良等,会引起低频振动;绝缘故障主要为局部放电,它会引起频率为2 kHz以上的高频振动。

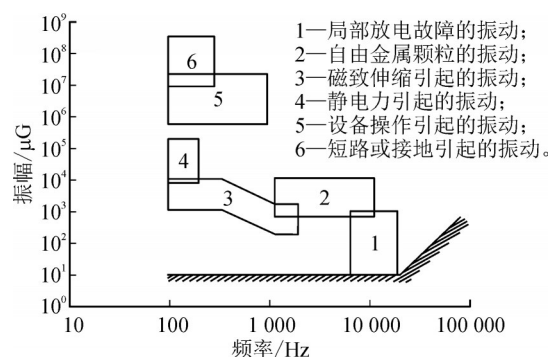


图1 不同故障引起的GIS设备金属外壳振动

Fig. 1 Corresponding vibrations of different faults in metal enclosures of GIS

由于故障信息不易直接从振动信号中获取,且机械故障与放电故障引起的振动频段存在差异^[16],故根据不同故障在功率谱上能量分布不同的特点,选取频段能量比作为振动特征来实现GIS机械故障与放电故障的检测与隔离。将低于2 kHz的频段定义为“低频段”,高于2 kHz的频段定义为“高频段”。为了更好的检测和分离故障,将频段能量的比值进行取对数操作放大能量比的变化

$$x^1 = \lg \frac{E_H}{E_L} \quad (1)$$

式(1)中: E_H 表示振动信号高频段能量; E_L 表示振动信号低频段能量,相应计算公式为:

$$E_L = \sum_{f=1}^{2000} A^2(f) \quad (2)$$

$$E_H = \sum_{f=2000}^{f_{\max}} A^2(f) \quad (3)$$

式(2)、(3)中: A 为振动信号频率点对应的幅值; $f_{\max}$ 由采样频率确定。

2 GIS设备的振动特征估计

2.1 粒子滤波算法

粒子滤波算法利用服从某个分布的粒子及其权重近似系统状态后验概率密度函数^[17]。实现过程分为状态预测、状态更新、重采样3个阶段。

2.1.1 状态预测

假设 $k-1$ 时刻状态概率密度函数 $p(x_{k-1}|y_{k-1})$ 已知,从上述概率分布中采样取值为 $x_{k-1}^{(i)}$ 、权重为 $w_{k-1}^{(i)}$ 的粒子,结合状态转移方程产生新粒子 $x_{kk-1}^{(i)}$,计算

公式为

$$x_{k|k-1}^{(i)} = f\left(x_{k-1}^{(i)}, w_{k-1}^{(i)}\right) \quad (4)$$

式(4)中, $f(\cdot)$ 为系统的状态转移方程。

2.1.2 状态更新

得到最新观测值 y_k 后, 结合系统观测方程确定新粒子 $x_{k|k-1}^{(i)}$ 的权重 $w_k^{(i)}$ 。粒子权重为

$$w_k^{(i)} = \frac{p(y_k | x_{k|k-1}^{(i)})}{\sum_{j=1}^N p(y_k | x_{k|k-1}^{(j)})} \quad (5)$$

式(5)中, $p(y_k | x_{k|k-1})$ 为似然函数, 由观测方程求得。

此时, 状态的后验概率密度可表示为

$$p(x_k | y_k) = \sum_{i=1}^N w_k^{(i)} \delta(x_k - x_k^{(i)}) \quad (6)$$

式(6)中, $\delta(\cdot)$ 表示狄拉克函数。

2.1.3 重采样

为了降低粒子退化问题的影响, 根据粒子权重的大小对粒子进行重新采样, 保留权重大、删除权重小的粒子^[18]。每一时刻逐步执行预测、更新、重采样过程, 即可实现振动特征的估计。

通过粒子滤波算法的运算过程不难看出, 系统状态空间模型是一切运算的基础。因此, 为了实现GIS设备振动特征的估计, 必须建立其状态空间模型。

2.2 GIS设备状态空间模型的建立

通用自回归模型基于系统输出数据进行建模, 用前面时刻的特征值表征当前时刻的特征值, 能高精度的反应数据系统的固有特性^[19]。模型表达式为

$$x_t = \sum_{i_1=1}^{n_1} w_{i_1} x_{t-i_1} + \sum_{i_1=1}^{n_2} \sum_{i_2=1}^{n_2} w_{i_1, i_2} x_{t-i_1} x_{t-i_2} + \dots + \sum_{i_1=1}^{n_p} \dots \sum_{i_p=1}^{n_p} w_{i_1, \dots, i_p} \prod_{\tau=1}^p x_{t-i_\tau} + a_t \quad (7)$$

式(7)中: $n_j (j=1, 2, \dots, p)$ 为各子项的记忆步长; p 为多项式展开的阶数; $w_{i_1}, \dots, w_{i_1, \dots, i_p}$ 为子项的模型参数; x_t 表示 t 时刻系统特征量的取值; a_t 为模型误差, 且满足 $a_t \sim N(\mu, \sigma^2)$ 。上述模型可简记为GNAR($p; n_1, \dots, n_p$)。

GNAR模型的参数估计可以利用最小二乘法实现。假设:

$$G_t = [x_{t-1}, \dots, x_{t-n_1}, x_{t-1}^2, \dots, x_{t-1} x_{t-2}, \dots, x_{t-2} x_{t-1}, \dots, x_{t-n_p} x_{t-n_p+1}, \dots, x_{t-n_p}^p]^\top \quad (8)$$

$$W = [w_1, \dots, w_{n_1}, w_{1,1}, \dots, w_{n_2, n_2}, \dots, w_{n_p, \dots, n_p}]^\top \quad (9)$$

式(7)可表示为

$$x_t = G_t^\top W + a_t \quad (10)$$

式(10)中, G_t 为非线性模型中各子项特征变量组成的矩阵。参数的最小二乘估计为

$$\hat{W} = (G^\top G)^{-1} G^\top R \quad (11)$$

式(11)中: $G = [G_1, \dots, G_{t+k}]^\top$; $\hat{W}$ 为非线性模型中的各子项系数组成的矩阵; $R = [x_1, \dots, x_{t+k}]$ 表示 $t \sim t+k$ 时刻特征变量的集合。

在实际应用中, 对一个缺乏足够先验知识的新系统来说, 实验是一种有效的建模手段。GNAR模型的建立可以采用理论与实验相结合的方法, 且工程中一般最多采用三阶GNAR模型^[20]。

结合GIS设备的非线性振动特征, 定义 t 时刻新的特征变量为 $X_{t+1} = [x_t, \dots, x_{t-p}]^\top$, 上一时刻的特征变量可表示为 $X_t = [x_{t-1}, \dots, x_{t-p-1}]^\top$, 观测变量为 Y_{t+1} 。模型表达式(10)中 $G_t^\top W$ 可写成由 X_t 及各子项参数运算的形式

$$G_t^\top W = E_1 X_t + \text{tr}[(X_t X_t^\top)(B \circ X)] + \text{tr}(DX_t X_t^\top) \quad (12)$$

式(12)中: tr 表示矩阵的求迹运算; “ $\circ$ ” 表示两个维度相同的矩阵对应项相乘运算; B 、 D 及 $E_1 = [w_1, \dots, w_p]$ 为模型参数组成的矩阵。由 X_t 表示GIS设备不同时刻的振动特征, 可得到 $p+1$ 个方程

$$\begin{cases} x_t = E_1 X_t + \text{tr}[(X_t X_t^\top)(B \circ X)] + \text{tr}(DX_t X_t^\top) \\ x_{t-1} = [1, 0, \dots, 0, 0] X_t \\ \vdots \\ x_{t-p} = [0, \dots, 0, 1, 0] X_t \end{cases} \quad (13)$$

将上述方程写成矩阵的形式, 等号左侧变量为 X_{t+1} , 等号右侧写成3项 X_t 、 $\text{tr}[(X_t X_t^\top)(B \circ X)]$ 、 $\text{tr}(DX_t X_t^\top)$ 及对应系数矩阵相乘相加的形式。考虑模型误差 a_t , 则可得GIS系统的状态转移方程, 具体表达式如下

$$X_{t+1} = EX_t + A \left\{ \text{tr}[(X_t X_t^\top)(B \circ X)] \right\} + C \left[\text{tr}(DX_t X_t^\top) \right] + Fa_t \quad (14)$$

式(14)中, $A=C=F=[1, 0, \dots, 0]^\top$ 为 $p \times 1$ 维向量; X 表示 $p \times p$ 维子项都为 X_t 的分块矩阵; B 为 $p \times p$ 维分块参数矩阵, 各子项 $B_{ij} = [w_{ij,1}, \dots, w_{ij,p}]$, 且GNAR模型中3次项的参数符合如下约束

$$w_{ij,k} = \begin{cases} 0 & k < j \\ w_{ij,k} & k \geq j \end{cases}$$

参数矩阵 D 、 E 为

$$D = \begin{bmatrix} w_{1,1} & \dots & w_{1,p} & 0 \\ 0 & \ddots & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & w_{p,p} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$E = \begin{bmatrix} w_1 & w_2 & \dots & w_p \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

系统观测方程为

$$Y_{t+1} = HX_t + v_t \quad (15)$$

式(15)中: Y_{t+1} 表示 $t+1$ 时刻的观测量; $H = [1, 0, \dots,$

$0]^T$ 为 $p \times 1$ 维参数向量; v_t 为系统观测误差。

将建立的GNAR模型应用于粒子滤波算法中即可构成GIS设备的GNAR-PF振动特征估计器,原理见图2。

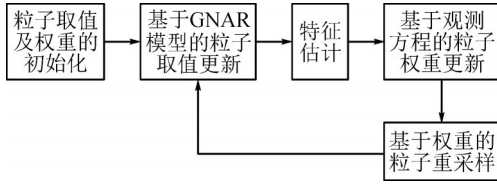


图2 GNAR-PF 振动特征估计器原理图

Fig. 2 Schematic diagram of vibration characteristic estimator based on GNAR-PF

3 GIS故障检测指标与自适应阈值

定义GIS设备振动特征估计值与实测值之间的差值为振动特征残差。残差 e_t 的计算公式为

$$e_t = y_t - \hat{x}_t \quad (16)$$

式(16)中, $\hat{x}_t$ 及 y_t 分别表示 t 时刻振动特征的估计值与实测值。

为了便于计算,选择将振动特征残差的绝对值 $|e_t|$ 作为设备故障检测指标。由于负载、环境因素的影响,设备振动特征存在一定的波动性,采用恒定阈值可能会出现误报警现象,文中引入自适应阈值方法来实现GIS设备故障的检测。根据随机过程理论,特征残差的期望和方差分别为:

$$\mu(e_j, t_k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i(t_k) \Big|_{e_j} \quad (17)$$

$$\sigma^2(e_j, t_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (r_i(t_k) - \mu(e_j, t_k))^2 \Big|_{e_j} \quad (18)$$

式(17)、(18)中, $\mu(e_j, t_k)$ 、 $\sigma^2(e_j, t_k)$ 分别代表 e_j 为输入 t_k 时刻残差的均值与方差; n 为重复获取残差的次数。

置信度与置信水平相关系数之间满足

$$p\{\bar{\mu} - z\alpha < \mu < \bar{\mu} + z\alpha\} = 1 - \alpha \quad (19)$$

式(19)中: α 为置信水平; $1-\alpha$ 为置信度; z 表示与置信水平相关的系数。

当置信水平为 α ,相关系数为 z 时残差的自适应阈值可表示为

$$B_{th}(t_k) = \mu(e_j, t_k) \pm z\sigma^2(e_j, t_k) \quad (20)$$

当残差小于或等于阈值 $B_{th}(t_k)$ 时,认为GIS设备运行正常,未检测到故障;当残差大于 $B_{th}(t_k)$ 时,认为检测到GIS设备的故障,给出报警信号。

4 基于振动特征估计的GIS设备故障检测与分析方法

为了在早期发现GIS设备故障、合理安排检修,

提出一种基于振动特征估计的GIS故障检测与分析算法,原理见图3。

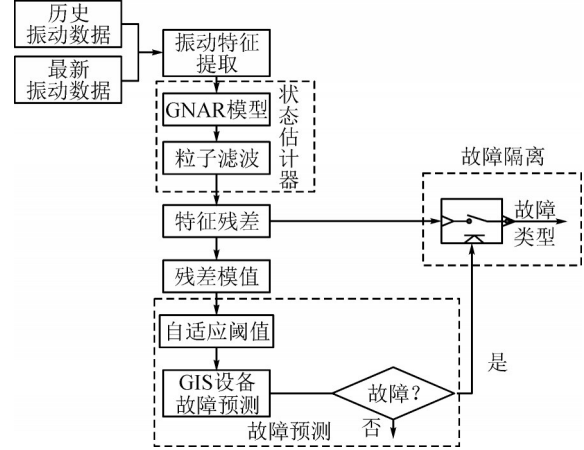


图3 GIS故障检测算法流程图

Fig. 3 GIS faults prediction algorithm flow chart

算法具体实现步骤如下:

- 1)提取采集振动信号的特征量,基于通用自回归建模方法建立GNAR模型;
- 2)将GNAR模型作为系统状态转移方程应用于粒子滤波算法中,构建系统的特征估计器;
- 3)计算振动特征实际测量值与GNAR-PF估计值之间的残差;
- 4)选择振动特征残差的绝对值作为故障检测指标结合自适应阈值方法检测GIS设备故障,一旦检测到故障将给出报警信号;
- 5)故障预警后,根据振动特征残差的变化趋势实现机械故障与放电故障的隔离。

5 算例分析

为了验证提出方法的有效性,选择在变电站现场实测的同型号GIS设备正常、机械故障、放电故障状态下金属外壳振动信号进行分析。某特高压变电站内GIS设备额定电压为1 000 kV,额定电流(有效值)为6 300 A,额定频率为50 Hz,发生故障时GIS设备存在较大的异响,通过检修确认设备故障类型,现场测试图见图4。粒子滤波算法粒子数选为1 000,粒子初始分布为均匀分布。置信水平选为 $\alpha=0.03$,置信度为97%,相关系数 $z=2.17$ 。

5.1 GIS设备状态空间模型的建立

基于历史振动特征时间序列,按照上文提到的建模步骤建立的通用自回归模型为GNAR(2:6,5)。利用最小二乘法估计GNAR模型参数,结果见表1。

由于GNAR模型中不含三次项,即分块矩阵 $B=0$,状态转移方程中各参数向量 $C=[1,0,0,0,0,0]^T$, $F=[1,0,0,0,0,0]^T$,参数矩阵 D 、 E 为



图4 变电站现场数据采集图

Fig. 4 Image of data acquisition at actual substation site

表1 模型参数估计结果

Table 1 Model parameter estimation results

参数	估计值	参数	估计值	参数	估计值
w_1	-2.82	$w_{1,2}$	2.61	$w_{2,5}$	3.17
w_2	-4.24	$w_{1,3}$	3.54	$w_{3,3}$	6.65
w_3	-4.17	$w_{1,4}$	2.85	$w_{3,4}$	11.6
w_4	-2.66	$w_{1,5}$	0.94	$w_{3,5}$	4.66
w_5	-0.94	$w_{2,2}$	3.50	$w_{4,4}$	5.08
w_6	-0.12	$w_{2,3}$	9.63	$w_{4,5}$	4.27
$w_{1,1}$	0.52	$w_{2,4}$	8.27	$w_{5,5}$	0.89

$$D = \begin{bmatrix} 0.52 & 2.61 & 3.54 & 2.85 & 0.94 & 0 \\ 0 & 3.50 & 9.63 & 8.27 & 3.17 & 0 \\ 0 & 0 & 6.65 & 11.6 & 4.66 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5.08 & 4.27 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.89 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$E = - \begin{bmatrix} 2.82 & 4.24 & 4.17 & 2.66 & 0.94 & 0.12 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

观测方程中参数向量 $H=[1,0,0,0,0,0]^T$ 。

5.2 GIS设备故障检测仿真分析

利用GNAR-PF状态估计器处理GIS设备正常状态测量数据,同时结合式(20)确定正常状态下自适应阈值,残差绝对值及自适应阈值变化趋势见图5。观察图5可得,正常状态特征残差绝对值及自适应阈值波动幅度较小。GIS设备振动特征残差绝对值在自适应阈值以下范围内变化,而在某些时刻会超出恒定阈值(3σ 准则阈值),即采用恒定阈值方法会出现故障误报警现象。通过对正常振动信号分析表明利用文中提出的GIS设备检测算法未检测到故障的存在,认为此时设备处于正常运行状态。

利用实测GIS设备机械故障及放电故障发生前后金属外壳振动信号来验证算法对故障检测的有效性。发生机械故障及放电故障时GIS设备振动特征残差绝对值与自适应阈值的变化趋势分别见

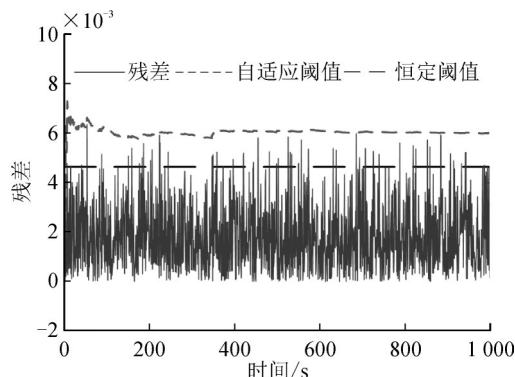


图5 正常状态残差绝对值及自适应阈值

Fig. 5 Absolute value of residual error and adaptive threshold in normal state

图6、7。从图6、7中不难看出,故障发生之前设备状态特征残差绝对值较小且都在自适应阈值以下范围内变化,一旦设备出现故障其会迅速越过阈值。在图6、7中,特征残差绝对值分别在 t_1 、 t_2 时刻开始越过阈值,且一直保持在自适应阈值之上,认为检测到设备会发生故障,给出预警信号。

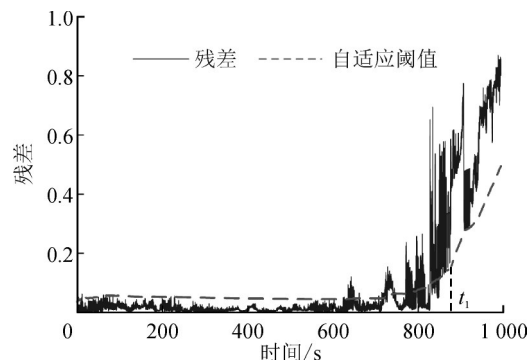


图6 机械故障残差绝对值及自适应阈值

Fig. 6 Absolute value of residual error and adaptive threshold of mechanical failure

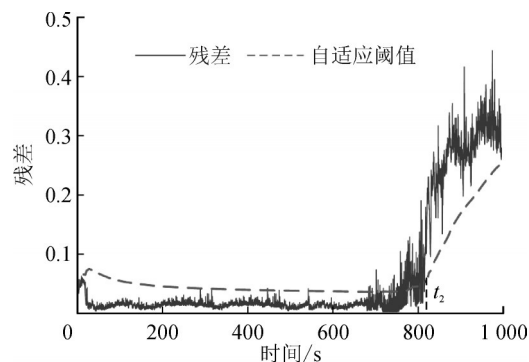


图7 放电故障残差绝对值及自适应阈值

Fig. 7 Absolute value of residual error and adaptive threshold of discharge failure

对比图5-7可以得到,基于振动特征估计的GIS设备故障检测方法能有效的检测设备故障,给出报警信号。

5.3 GIS设备故障隔离仿真分析

通过利用文中提出的故障检测方法处理不同

故障条件下的振动数据,得到相应故障的振动特征残差分布。正常状态、机械故障、放电故障状态下的残差分布见图8。观察图8可以发现,当设备出现放电故障后,残差为正且逐渐向正方向增大,当出现机械故障后,残差为负且逐渐向负方向增大,即可以通过振动特征残差的变化趋势准确实现放电故障与机械故障的分离。

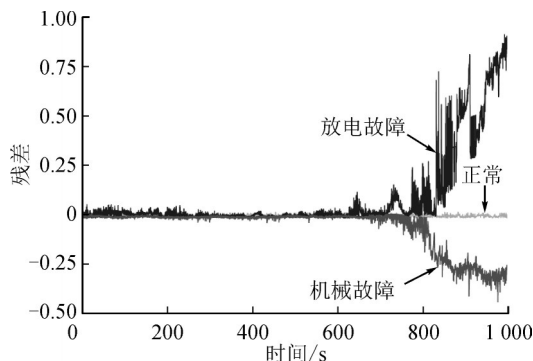


图8 不同状态下振动特征的残差分布
Fig. 8 Residual distribution of vibration characteristic under different states

6 结论

提出一种基于振动特征估计的GIS设备故障检测与分析算法。算法通过构建GNAR-PF设备振动特征估计器,计算特征估计值与实际测量值间的残差,并选择振动特征残差绝对值作为故障检测指标,结合自适应阈值实现GIS设备故障的预测分析,最后根据振动特征残差变化趋势实现了机械故障与放电故障的隔离。基于变电站GIS设备实测数据仿真分析得出以下结论:

- 1)利用GIS设备金属外壳振动信号可以有效检测设备内部机械故障及放电故障;
- 2)通用自回归模型能有效的对GIS设备金属外壳振动特征进行表征;
- 3)采用自适应阈值可以有效降低故障误报警现象,提高了GIS设备故障检测的准确性;
- 4)基于振动特征估计的故障检测与分析方法,能有效实现GIS设备机械故障与放电故障的检测与隔离。该方法将粒子滤波算法引入GIS设备故障检测领域,为现场工作人员提早发现故障、合理安排检修提供了理论依据。

志谢

文中中实验方案的制定和实验数据的测量记录工作是在保定特高压变电站工作人员的大力支持下完成的,在此向他们表示衷心的感谢。

参考文献:

- [1] BOLIN P, KOCH H. Introduction and applications of gas insulated substation GIS[C]//Transmission & Distribution Conference & Exposition. CA, USA: IEEE, 2005:920-926.
- [2] 刘云鹏,李岩松,黄世龙,等. 基于光纤传输的气体绝缘开关设备局部放电超声波检测系统[J]. 高电压技术, 2016, 42(1): 186-191.
LIU Yunpeng, LI Yansong, HUANG Shilong, et al. Ultra-sonic detection system for gas insulated switchgear partial discharge based on optical fiber transmission[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(1): 186-191.
- [3] 颜湘莲,宋 杲,王承玉,等. 基于SF₆气体分解产物检测的气体绝缘开关设备状态监测[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(6): 83-88.
YAN Xianglian, SONG Gao, WANG Chengyu, et al. Gas-insulated switchgear state monitoring based on SF₆ decomposition products detection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(6): 83-88.
- [4] 弓艳朋. 基于脉冲电流法所测GIS局部放电信号的故障识别技术研究[D]. 北京:中国电力科学研究院, 2009.
GONG Yanpeng. The failure recognition research of GIS partial discharge signal measured by the pulse current method[D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2009.
- [5] GAO Wensheng, DING Dengwei, LIU Weidong. Research on the typical partial discharge using the UHF detection method for GIS[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(4): 2621-2629.
- [6] 唐志国,刘江明,酆于杰,等. GIS局放状态检测策略研究[J]. 高压电器, 2018, 54(11): 41-47.
TANG Zhiguo, LIU Jiangming, LI Yujie, et al. State detection strategy of partial discharge in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(11): 41-47.
- [7] 赵洪山,李 浪. 基于MCKD-EMD的风电机组轴承早期故障诊断方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(2): 29-36.
ZHAO Hongshan, LI Lang. Incipient bearing fault diagnosis based on MCKD-EMD for wind turbine[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2): 29-36.
- [8] 李 凯,许洪华,陈冰冰,等. GIS振动机理及固有频率研究[J]. 电测与仪表, 2017, 54(3): 14-18.
LI Kai, XU Honghua, CHEN Bingbing, et al. Research on vibration mechanism and natural frequency in GIS[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(3): 14-18.
- [9] 李秀广,吴旭涛,朱洪波,等. 基于振动信号的GIS触头接触异常研究分析[J]. 高压电器, 2016, 52(10): 165-169.
LI Xiuguang, WU Xutao, ZHU Hongbo, et al. Research on contacting fault of GIS contact based on vibration signal[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(10): 165-169.

- [10] OHSHITA Y, HASHIMOTO A, KUROSAWA Y. A diagnostic technique to detect abnormal conditions of contacts measuring vibrations in metal enclosures of gas insulated switchgear[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(4):2090-2094.
- [11] 杨景刚, 刘媛, 宋思齐, 等. GIS设备机械缺陷的振动检测技术研究[J]. 高压电器, 2018, 54(11): 86-90.
YANG Jinggang, LIU Yuan, SONG Siqi, et al. Research on vibration detection technology of GIS mechanical defects [J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(11): 86-90.
- [12] 徐天乐, 马宏忠, 陈楷, 等. 基于振动信号HHT方法的GIS设备故障诊断[J]. 中国电力, 2013, 46(3): 39-42.
XU Tianle, MA Hongzhong, CHEN Kai, et al. Diagnosis of GIS failure based on HHT method for vibration signals[J]. Electric Power, 2013, 46(3): 39-42.
- [13] CATTERSON V M, MELONE J, GARCIA M S. Prognostics of transformer paper insulation using statistical particle filtering of online data[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2015, 32(1): 28-33.
- [14] YAMAGIWA T, YAMADA H, ENDO F, et al. Development of preventive maintenance system for highly reliable gas insulated switchgear[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991, 6(2): 840-848.
- [15] OKUTSU N, TAKAHASHI Y, MATSUDA S, et al. Pattern recognition of vibrations in metal enclosures of gas insulated equipment and its application[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 1981, PAS-100(6): 2733-2739.
- [16] 郭碧红, 张汉华. 利用GIS外壳典型振动的频率特性检测内部潜伏性故障[J]. 电网技术, 1989, 12(2): 44-50.
- GUO Bihong, ZHANG Hanhua. Detecting internal latent faults by using the frequency characteristics of typical vibration of GIS metal enclosures[J]. Power System Technology, 1989, 12(2): 44-50.
- [17] 胡士强, 敬忠良. 粒子滤波算法综述[J]. 控制与决策, 2005, 20(4): 361-365.
HU Shiqiang, JING Zhongliang. Overview of particle filter algorithm[J]. Control and Decision, 2005, 20(4): 361-365.
- [18] DOUCET A, GODSILL S, ANDRIEU C. On sequential monte carlo sampling methods for bayesian filtering[J]. Statistics & Computing, 2000, 10(3): 197-208.
- [19] 陈茹雯, 黄仁, 史金飞, 等. 线性/非线性时间序列模型一般表达式及其工程应用[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2008, 38(6): 1077-1080.
CHEN Ruwen, HUANG Ren, SHI Jinfei, et al. General expression for linear and nonlinear time series model and its engineering application[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2008, 38(6): 1077-1080.
- [20] 陈茹雯. 非线性自回归时序模型分析及工程应用[M]. 南京: 东南大学出版社, 2011.
CHEN Ruwen. The general expression for nonlinear autoregressive time series model and its engineering application [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2011.
- 赵洪山(1965—), 男, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统分析与控制、电力设备故障预测与优化维修。
- 高玉峰(1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电气设备的状态评估与故障诊断(通信作者)。