

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.06.042

## 基于定子电流特征与SVM高压隔离开关机构故障诊断

刘仕兵, 宋陵灿, 郭文璟, 刘 威  
(华东交通大学电气与自动化工程学院, 南昌 330013)

**摘要:** 针对牵引供电系统中高压隔离开关机构故障诊断问题,提出了一种基于定子电流特征与支持向量机(SVM)的故障诊断方法。通过分析转矩波动与定子电流之间的关系,建立了定子电流波动与边频带和基波有效值之间的函数关系,得出定子电流的边频分量和基波有效值可有效地表现出机构故障类型。然后设计了低通 Butterworth 滤波器+数字 FIR 滤波器的采样滤波组合,对采样定子电流数据分析处理得出 45~55 Hz 边频量的幅值—频率特征量和分合闸过程基波有效值—时间特征量,以这两种电流特征量作为 SVM 的输入,构建 SVM 故障诊断模型。最后实验结果表明该模型对高压隔离开关机构故障类别诊断的总体准确度可达到 97.8%。

**关键词:** 高压隔离开关;支持向量机;定子电流;机构故障;边频带;基波有效值

### Fault Diagnosis of High Voltage Disconnector Mechanism Based on Stator Current Characteristics and SVM

LIU Shibing, SONG Lingcan, GUO Wenjing, LIU Wei

(School of Electrical Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of fault detection of high voltage disconnector mechanism in traction power supply system, a fault diagnosis method based on stator current characteristics and SVM is proposed. By analyzing the relationship between the torque fluctuation and the stator current, the functional relationship between the stator current fluctuation and the effective value of the side frequency band and the fundamental wave is established, and it is concluded that the side frequency component and the effective value of the fundamental wave of the stator current can effectively show the type of mechanism fault. Then, the combination of low-pass Butterworth filter and digital FIR filter is designed. The amplitude frequency characteristic value of the 45 ~ 55 Hz side frequency and the fundamental effective value time characteristic value of the opening and closing process are obtained by analyzing and processing the sampled stator current data. These two current characteristics are used as the input of SVM to build the SVM fault diagnosis model. Finally, the experimental results show that the overall accuracy of the model is 97.8%.

**Key words:** high voltage disconnector; SVM; stator current; mechanism fault; sideband; fundamental RMS

## 0 引言

高压隔离开关在牵引供电系统中,应用十分广泛<sup>[1]</sup>。对于户外型的隔离开关,由于其长期受到露天环境和气候条件等因素影响,相比户内型号更容易产生各类的缺陷和故障,常见的故障可归纳为:机构问题、瓷导电接触不良、导电回路松动、开裂等<sup>[2-3]</sup>。

对于一些外绝缘污秽、瓷瓶外表面破裂、触头生锈等表面问题可通过日常巡视排除,例如,针对导电回路发热问题,须对触点温度监测<sup>[4-6]</sup>;针对瓷瓶断裂问题,采用图像识别和超声波探伤等<sup>[7-8]</sup>。但对于一些较为隐蔽的故障类型,例如弹簧失效、机构卡涩等内部机构故障,则要通过特定的监测手段。目前,已有一些针对高压隔离开关机构问题的

收稿日期:2020-02-10; 修回日期:2020-04-17

基金项目:江西省科技厅重点研发计划一般项目(20192BBH80005)。

Project Supported by General Project of Key R & D Program of Science and Technology Department of Jiangxi Province (20192BBH80005).

研究,主要研究点是异步电机转矩和定子电流的特征与机构故障之间的关系<sup>[9-14]</sup>。文[12]提出了主轴转角时间特性与转矩有关,当传动机构出现故障时,其特性曲线会有一些的变化,通过判别曲线可诊断是否出现机构故障;文[13]提出了一种操作力矩和操作杆转角检测的隔离开关故障诊断,通过操作力矩-转角曲线来判断故障类型。但单一的力矩+转角(或时间轴)对故障检测准确性较低;文[14]推导出异步电机定子电流与转矩的函数关系,当机构故障时,电机转矩将增大,同时电机定子电流将随之增大,通过分析电流信号包络线,可对不同机构故障诊断。而在定子电流中50 Hz 基波含量最大,当出现机构故障时,基波成分变化较大<sup>[15]</sup>。但上述文献均未分析故障电流产生机理也未给出预测模型。考虑到在电流信号频谱中,基波附近边频带和电流有效值均会随转矩的变化而变化<sup>[16-17]</sup>。由此,综合定子电流各个特征量构建分析机构故障类型的预测模型是对高压隔离开关机构故障诊断的更佳选择<sup>[18]</sup>。

文中提出了一种基于定子电流特征与SVM的高压隔离开关机构故障诊断新方法。通过低通Butterworth滤波器+数字FIR滤波器的组合采样滤波电路获得定子电流信号数据,再对数据分析处理得出45~55 Hz 边频量的幅值-频率特征量和分合闸过程基波有效值-时间特征量,以这两种特征量作为SVM的输入,构建基于SVM的高压隔离开关机构故障诊断模型。

## 1 电机定子电流特性分析

文中以铁路供电系统中输配电常用GW4型高压隔离开关为例分析,该型号隔离开关采用CX-6电动机构、三相异步电机。高压隔离开关使用到的三相异步电机的工作原理为:当三相正弦电流流过定子绕组时,电机产生一个频率为 $f_p$ 的旋转磁场,同时由该磁场在转子绕组中产生频率为 $s f_p$ 的感应电动势,其中 $s$ 为转差率。

当高压隔离开关分合闸过程中出现卡涩,分合闸不到位等情况,转子的不对称会引起其感应电流出现大小相等、方向相反的两个频率为 $\pm s f_p$ 的旋转磁场,其中 $-s f_p$ 的旋转磁场使定子绕组中形成频率为 $(1-2s)f_p$ 的电流 $I_{2s}$ ,其瞬时值可表示为

$$i_{2s} = I_{2s} \cos[(1-2s)\omega t - \alpha_{2s}] \quad (1)$$

式(1)中: $\alpha_{2s}$ 为定子电流与转子旋转磁场的夹角; $\omega$ 为三相电流频率。该电流与基波磁通工作作用产生波动转矩 $\Delta T(t)$ ,可表示为

$$\Delta T(t) = 3p\phi I_{2s} \sin[2s\omega t - (\alpha_\phi - \alpha_{I_{2s}})] \quad (2)$$

式(2)中: $p$ 为电机极对数; $\alpha_\phi$ 为基波磁通与基波电流夹角,由式(2)可得波动转矩相对值为

$$T' = J \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{\Delta T}{T} \cong \frac{I_{2s}}{I \cos \varphi} \quad (3)$$

式(3)中, $J$ 为转动惯量; $\omega_r$ 为电机稳态均速; $T$ 为稳态转矩; $I$ 为定子电流基波分量; $\cos \varphi$ 为功率因素。

由式(3)可知,当出现机构故障使转矩发生波动时,将引起转速的波动,转速波动可表示为

$$\Delta \omega_r(t) = \frac{1}{J} \int \Delta T(t) dt = -\frac{3p\phi I_{2s}}{2sJ\omega} \cos[2s\omega t - (\alpha_\phi - \alpha_{I_{2s}})] \quad (4)$$

近似等效 $\omega_r \cong \omega/p$ ,结合式(4)可得出转速波动相对值为

$$\omega' = \frac{\Delta \omega_r}{\omega_r} = \frac{pT I_{2s}}{2sJ I \cos \varphi \omega^2} \quad (5)$$

当转子转速波动时,定子绕组电流将随之出现波动,其值等于基波和由于转子速度波动引起的频率为 $(1 \pm 2s)f_p$ 的边频分量的叠加,定子绕组电流波动量可表示为

$$i' = \frac{\phi \omega}{X} \cos(\omega t - \alpha_\phi) - \frac{1}{2X} \Delta \omega_r \phi \left\{ \cos[(1+2s)\omega t - 2\alpha_\phi + \alpha_{I_{2s}}] + \cos[(1-2s)\omega t - \alpha_{I_{2s}}] \right\} \quad (6)$$

式(6)中, $X$ 为定子网孔阻抗。

由此得出了在分合闸过程中出现机构故障引起定子电流波动与基波和频率为 $(1 \pm 2s)f_p$ 的边频分量的函数关系。

考虑到基波与边频分量之间频率相近且存在干扰,需通过频谱分析50 Hz附近(可取45~55 Hz)的频率-幅值特征量才可更加有效的得出其特性。而对于基波波动更多体现在50 Hz频率电流有效值的变化。因此,结合45~55 Hz边频量的幅值-频率特征量和分合闸过程基波有效值-时间特征量可对高压隔离开关是否出现机构故障做出评估。

## 2 电流信号采样滤波设计

在高压隔离开关分合闸过程中,电机定子电流包含大量的谐波分量,且电网波动和卡涩等故障的出现,会给电流采样值带来干扰,因此需对采样滤波处理。

为得到理想的信号,文中对电流信号(连续非周期信号)经模拟低通滤波器滤波后得到的离散非周

期信号, 再对离散信号进行一次数字滤波处理得到离散非周期信号, 对该信号进行后续分析, 采样过程见图 1。

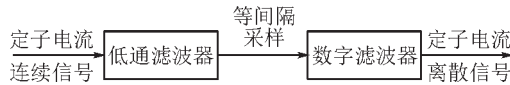


图1 定子电流采样转换过程

Fig. 1 Stator current sampling and conversion process

### 2.1 低通 Butterworth 滤波器的设计

Butterworth 滤波器作为一种广泛使用在电流采样滤波场合的低通滤波器, 其性能优异, 并且因滤波器件的低品质因数, 硬件易于设计<sup>[19]</sup>。Butterworth 滤波器的幅值平方与频率之间的关系可表示为

$$|H(\omega)|^2 = \frac{1}{1 + (\omega/\omega_c)^{2n}} \quad (7)$$

式(7)中,  $\omega_c$  为截止频率(幅值为 -3 dB 对应频率)。滤波器最优阶数  $n$  设计可根据

$$n = \frac{\lg(1/\omega_s^2 - 1)}{2 \lg(\omega_s/\omega_c)} \quad (8)$$

式(8)中,  $\omega_s$  为带阻衰减频率。

为消除电流信号中的频谱混叠现象, 设置截止频率为 100 Hz, 带阻衰减分贝为 -15 dB, 滤波器阶数为 3, 为降低高频信号的干扰, 每个 50 Hz 工频电流信号, 采样 20 个点, 采样频率设置为 1 000 Hz。由此可得其幅频特性曲线, 见图 2。

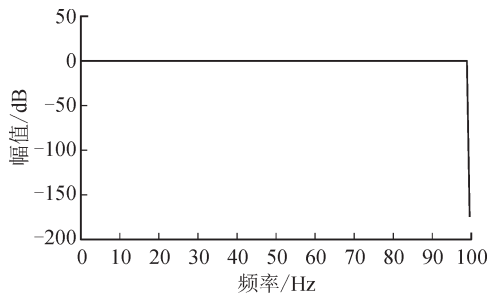


图2 Butterworth 滤波器幅频特性曲线

Fig. 2 Amplitude frequency curve of Butterworth filter

### 2.2 自适应 FIR 数字滤波器的设计

FIR 滤波器, 也称有限冲激响应 FIR 数字滤波器, 其简单的线性相位设计使其成为数字信号处理中使用最多的滤波器<sup>[20]</sup>。但在实际使用中, 存在相位失真和实时性差等缺点, 因此为增加采样系统对数据的鲁棒性, 文中采用了一种自适应形式的 FIR 滤波器。

FIR 的滤波器系统函数可表示为

$$Y(n) = \sum_{k=0}^{M-1} h(k)x(n-k) \quad (9)$$

式(9)中,  $x(n-k)$  为输入信号;  $h(k)$  是一个长度为  $M$  的序列;  $Y(n)$  为经过滤波后的信号。

对于自适应的 FIR 滤波器来说, 对其设计应满足滤波器输出与理想信号之间的误差最小。  $y'(n)$  为  $y(n)$  的估计, 误差可表示为

$$e(n) = y(n) - y'(n) \quad (10)$$

式(10)中的误差  $e(n)$  可通过计算其最小均方值来表示, 即 LMS 算法, 为

$$\xi_M = E \left[ |y(n)|^2 \right] - 2 \operatorname{Re} \left[ \sum_{l=0}^{M-1} h(l) \gamma dx(l) \right] + \sum_{l=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{M-1} W(l)h(k)E[y(n)y(n-l+k)] \quad (11)$$

求解式(11)的最小值, 便可得出自适应算法, 有

$$\begin{cases} Y(n) = \sum_{k=0}^{M-1} h_k y(n-k) \\ e(n) = y(n) - y'(n) \\ h(n+1) = h(n) + 2\mu e(n)x(n) \end{cases} \quad (12)$$

式(11)中的  $\mu$  已有研究<sup>[21]</sup>, 可根据式(13)计算

$$\mu(n) = \beta \left\{ 1 / \left\{ 1 + \exp[-\alpha e(n)] \right\} - 0.5 \right\} \quad (13)$$

式(13)中,  $\alpha, \beta$  为常数。  $\mu$  作为收敛系数, 其值越大, 其收敛速度越快, 其数值随每次数据的更新而更新。

结合 MATLAB 中 fdatool 工具箱的窗函数法, 窗口类型选择 Kaiser, 设计 FIR 数字滤波器, 设计其阶数为 30, 截止频率为 70 Hz。由此可得其幅频特性曲线, 见图 3。

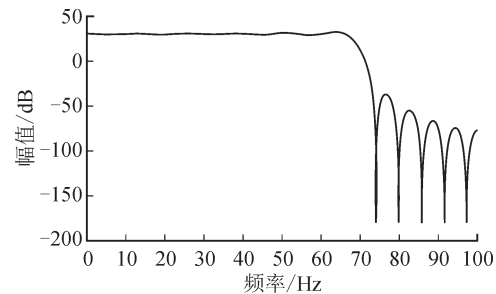


图3 自适应 FIR 数字滤波器幅频特性曲线

Fig. 3 Amplitude frequency curve of adaptive FIR digital filter

## 3 定子电流特征提取

### 3.1 边频分量特征

在隔离开关出现卡涩等情况时, 定子电流所产生的频率为  $(1 \pm 2ks)f_p$  的边频分量, 当  $k=1$  时, 其对应的电动势分量最大, 因此主要对该频率范围内的频谱分析。测得电机转速 1 450 r/min, 因此在电流信号 FFT 分析时, 做出 45~55 Hz 范围内频率—幅值曲线用于分析其边频分量特性。

当出现机构故障时, 表现在电流信号的频谱图

为:基波和边频带幅值的大小宽度会随隔离开关分合闸操作时故障程度变化。

### 3.2 基波有效值

定子电流为交流电流,而交流电流有效值的测量算法有均方根值法、平均值法等,其中均方根值法由于其高精度,使用较多。文中采用均方根值法计算定子电流的有效值,其公式为

$$I = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N i_j^2} \quad (14)$$

式(11)中: $N$ 为工频频率下单周期采样点数,文中 $N=20$ ;  $i_j$ 为在第 $j$ 时刻的电流采样值。

### 3.3 电流信号分析

为得出实验数据,以合闸过程为例,人工的模拟高压隔离开关出现机构卡涩、分合闸不到位、弹簧失效等机构故障,为不同机构故障对应的电流信

号见图4。图4中的(1)为定子电流采样实验波形;(2)为基波电流有效值—时间 $t$ 关系;(3)为45~55 Hz幅频特性曲线。从图4(a)可知,合闸过程时间约3.0 s,电机启动过程时间约为0.2 s。启动时,定子旋转磁场以高速状态切割静止的转子,使得定子电流瞬间可达到4.10 A。合闸过程中,当出现机构卡涩时,见图4(b),力矩增加,电机电流随之上升,表现为电流有效值在稳态工况下出现波峰(比正常工况高0.2 A左右)、边频分量增大;当出现弹簧失效时,弹簧起不到平衡机构的重力矩的作用,此时需增大力矩以完成合闸操作,导致合闸的冲击增大,对应的电流在2.4 s时比正常工况高0.3 A左右,边频分量表现为不对称;当合闸不到位时,体现在合闸过程的第2.4 s,电流有效值明显增益,比正常高0.5 A左右,并且电流有效值波形有明显的畸变,但边频量表现不明显。

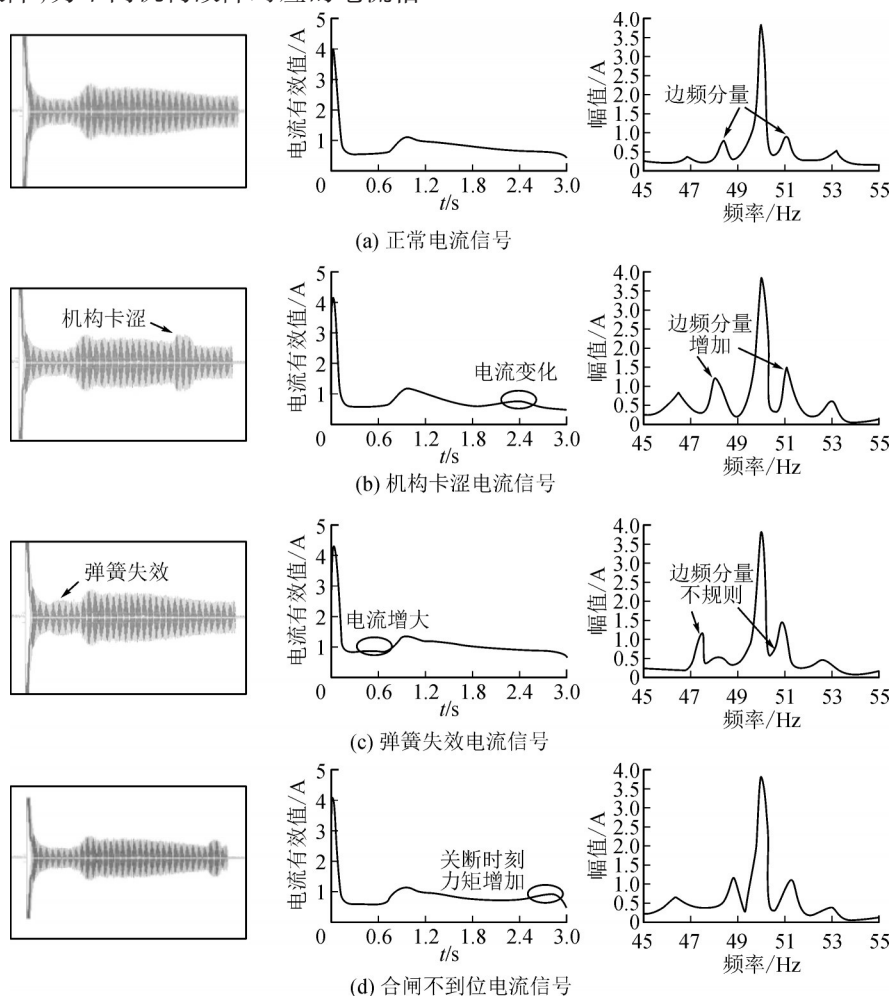


图4 不同机构故障对应电流信号

Fig. 4 Current signals of different mechanism faults

由此可知,当高压隔离开关出现不同机构故障时,其定子电流信号的基波电流有效值—时间 $t$ 关系和45~55 Hz幅频特性曲线均能反应故障类型,通过将两者结合构建高压隔离开关机构故障预测模型是可行的。

## 4 基于SVM的隔离开关机构故障诊断模型

### 4.1 SVM模型

支持向量机SVM(support vector machine)是传统机器学习中常用的一种分类算法。它的目的是寻

找一个能够对样本集进行分割的超平面。对于线性可分的样本集, 由于其线性可分, 可使用一个  $W \cdot X + b = 0$  的超平面对该样本集进行线性划分, 由  $W$  和  $X$  两向量的内积决定该超平面的位置。将该最优划分的问题转化为求取最优超平面, 可通过式(15)进行转化

$$f = \begin{cases} \min \phi(w, \xi) = \frac{1}{2} \|w\|^2 + c \sum_{i=1}^n \xi_i & c \geq 0 \\ \text{s.t. } y_i [(w \cdot x_i) + b] \geq 1 - \xi_i & \xi_i \geq 0 \end{cases} \quad (15)$$

式(15)中:  $b$  是分类超平面的阈值;  $W$  是用于分类整个样本集的特征空间的超平面系数向量;  $f$  表示最优超平面;  $C$  是对于分类样本错误的惩罚因子;  $\xi_i$  为引入的松弛因子。通过式(15)便可以求取到最优超平面

$$f(x) = W \cdot X + b \quad (16)$$

对于线性不可分的样本集, 可通过设置一个能把数据从低纬度转高纬度的核函数, 将低维度难以划分的样本数据投影到高维度进行分类, 并且通过对大量数据处理, 不断地优化核参数, 使分类的精确度提高。这样低维度数据变成高维度数据, 解决了低维数据线性不可分的问题, 其示意图见图5。

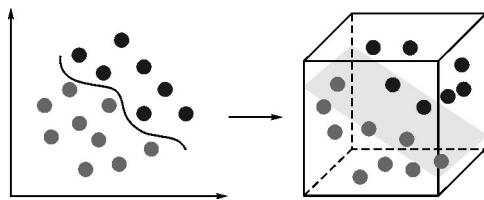


图5 线性不可分样本集分类示意图

Fig. 5 Classification diagram of linear non separable sample set

这样核函数解决线性不可分问题可表示为: 将输入的低维度向量  $Y$  通过映射函数  $R(x)$  投影到高维度空间  $Z$ , 则优化问题就转化为

$$f = \begin{cases} \min \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n y_i y_j a_i a_j K(X_i, X_j) - \sum_{i=1}^n a_i & i = 1, 2, \dots, n \\ \text{s.t. } \sum_{i=1}^n y_i a_i = 0 & 0 \leq a_i \leq C \end{cases} \quad (17)$$

式(17)中, 核函数  $K(X_i, X_j)$  等于  $R(X_i) \cdot R(X_j)$  这两个映射函数的点积, 求解出函数  $f$  的最优函数为

$$f(x) = \text{sign} \left[ \sum_{i=1}^n a_i y_i K(X_i, X_j) + b \right] \quad (18)$$

从式(18)可看出, 只需要选择核函数  $K$  和惩罚因子  $C$ , 在不需要知道映射函数  $R(x)$  和高维度空间  $Z$  的情况下, 仍然可以对样本进行处理。由于定子电流特征量均为线性, 但受多种机构故障影响可区分度不高, 因此文中将选用 RBF 核函数进行后续实验分析。

## 4.2 SVM故障诊断模型构建

文中所测实验数据来自两台 GW4 型高压隔离开关, 考虑到该型号隔离开关均采用相同 CX-6 电动机构、三相异步电机, 其机构故障类型具有普遍性。每台高压隔离开关对应的每种故障各测试 400 组电流数据, 每个故障类型共 800 组数据, 每组数据包含 45~55 Hz 边频量的频率-幅值和基波有效值-时间两种特征量, 其中 600 组数据用于训练模型, 对应每台隔离开关设置每种故障各 100 组实验数据用于检验模型可行性, 其输入见表 1。通过对训练样本交叉验证, 得出惩罚因子  $C=127$ , 核函数方差  $g=0.358$ 。

表 1 SVM故障诊断模型训练样本

Table 1 Training sample of SVM fault diagnosis model

故障类型	特征量	训练样本数
机构卡涩、分闸不到位、合闸不到位、弹簧故障	45~55 Hz 边频量频率-幅值 基波有效值-时间	600

## 4.3 故障分类结果分析

将每台隔离开关设置每种故障各 100 组电流数据, 提取出特征量用于检验样本, 输入到 SVM 故障分类模型, 同时与文[22]所提的方法进行比较, 相应的结果见表 2。

表 2 不同故障诊断方法结果对比

Table 2 Comparison of different fault diagnosis methods

故障类型 及总计	SVM故障分类		K-mens 聚类 分析 <sup>[22]</sup>
	测试样本数/ 台 1 正确率/%	测试样本数/ 台 2 正确率/%	测试样本数/ 正 确率%
机构卡涩	100/97.8	100/98.2	200/94.0
分闸不到位	100/98.3	100/97.7	200/94.0
合闸不到位	100/97.4	100/97.6	200/92.0
弹簧故障	100/98.1	100/97.9	200/90.0
总计	800/97.8		800/92.5

结果表明, 基于定子电流特征与 SVM 分类模型对高压隔离开关机构故障类别分类的总体准确度可达到 97.8%, 高于文[22]所提的方法正确率 92.3%, 且台 1、2 两台不同样机在同一故障的预测结果相近, 由此可证明文中所提方法的有效性。

## 5 结论

文中根据高压隔离开关出现机构故障时定子电流表现的特征量, 建立了基于定子电流特征与 SVM 的高压隔离开关机构故障诊断, 得出以下结论:

1)转矩波动将引起定子电流的45~55 Hz边频量和基波有效值这两个特征量变化,对这两个特征量分析可有效的诊断机构故障;

2)高压隔离开关分合闸过程中,存在大量的干扰会影响电流波形质量,通过低通 Butterworth 滤波器+数字 FIR 滤波器的组合采样滤波电路可有效的滤除干扰信号和高频谐波分量;

3)基于定子电流特征与SVM的高压隔离开关机构故障诊断模型可对机构卡涩、分合闸不到位、弹簧失效等故障做出有效分类判断,鲁棒性较强,总体准确度可达到97.8%。然而,还需进一步研究文中所提方法如何在实际工程应用。

### 参考文献:

- [1] 钱林清,钱 聪. GIS隔离开关动作特性状态监测的应用[J]. 通信电源技术, 2018, 35(12): 123-124.  
QIAN Linqing, QIAN Cong. Application of GIS disconnector operating characteristic condition monitoring[J]. Telecom Power Technologies, 2018, 35(12): 123-124.
- [2] 张学强. 浅谈高压隔离开关常见故障的分析及排除方法[J]. 应用能源技术, 2019(4): 37-39.  
ZHANG Xueqiang. Analysis and troubleshooting of common faults of high voltage disconnector[J]. Applied Energy Technology, 2019(4): 37-39.
- [3] 董洪达,冯世涛,黄 涛,等. 高压隔离开关典型机械故障与检测方法分析[J]. 电工技术, 2018(7): 36-38.  
DONG Hongda, FENG Shitao, HUANG Tao, et al. Analysis of detection methods and typical mechanical faults of high voltage disconnectors[J]. Electric Engineering, 2018 (7): 36-38.
- [4] 李中祥,宋建成. 高压隔离开关触头温度在线监测系统的研制[J]. 高压电器, 2009, 45(2): 11-13.  
LI Zhongxiang, SONG Jiancheng. On - line temperature measurement system for contacts in HV switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(2): 11-13.
- [5] 何 成,李文胜,赵建平,等. 高压隔离开关分合闸过程触指压力检测技术与应用[J]. 高压电器, 2017, 53(11): 229-235.  
HE Cheng, LI Wensheng, ZHAO Jianping, et al. Touch pressure detection technology and application in the process of opening and closing of high-voltage disconnector[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(11): 229-235.
- [6] 肖 荣,徐 澄. 220 kV GW6型隔离开关导电回路过热故障分析及处理[J]. 高压电器, 2013, 49(1): 107-110.  
XIAO Rong, XU Cheng. Analysis and treatment of the overheating fault in 220 kV GW6 - type disconnector conductive loop[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(1): 107-110.
- [7] 王慧燕,诸 静. 基于小波变换的边缘检测及其在绝缘瓷瓶故障诊断中的应用[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(15): 76-79.  
WANG Huiyan, ZHU Jing. Wavelet transform based edge detection and its application in porcelain bottles fault monitoring[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(15): 76-79.
- [8] 牛 博,杨鼎革,于义亮,等. 基于超声波的GIS盆式绝缘子表面污秽检测技术仿真研究[J]. 高压电器, 2018, 54(11): 97-102.  
NIU Bo, YANG Dingge, YU Yiliang, et al. Simulation of surface dirt detection on GIS insulator based on ultrasonic method[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(11): 97-102.
- [9] 马宏忠,方瑞明,黄允凯,等. 大型异步电机转子绕组故障特征量的新研究[J]. 大电机技术, 2004(4): 1-4.  
MA Hongzhong, FANG Ruiming, HUANG Yunkai, et al. Study on fault feature in large asynchronous motor rotor winding[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2004(4): 1-4.
- [10] 马宏忠,李训铭,王刘芳. 高压异步电机转子绕组故障诊断系统的研究[J]. 高电压技术, 2004, 30(4): 31-33.  
MA Hongzhong, LI Xunming, WANG Liufang. Development of the diagnosis system of rotor winding faults in high voltage induction motors[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(4): 31-33.
- [11] 司方坤. 基于小波包分析的感应电机故障诊断技术的研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2011.  
SI Fangkun. Research on fault diagnosis technology of induction motor based on wavelet packet analysis[D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and technology, 2011.
- [12] 杨福彪,阮江军,邱志斌,等. 隔离开关操动机构电机输出轴扭矩和电流关系的研究[J]. 高压电器, 2015, 51(6): 139-144.  
YANG Fubiao, RUAN Jiangjun, QIU Zhibin, et al. Study on the relationship between torque and current of Motor output shaft of disconnector operating mechanism[J]. High Voltage Appliances, 2015, 51(6): 139-144.
- [13] 马宏明,周涛涛,彭诗怡,等. GW4隔离开关机械故障仿真与诊断技术[J]. 电工技术学报, 2019, 34(s2): 501-508.  
MA Hongming, ZHOU Taotao, PENG Shiyi, et al. Research on mechanical fault simulation and diagnosis technology of GW4 disconnector[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(s2): 501-508.
- [14] 邱志斌,阮江军,黄道春,等. 基于电机电流检测的高压隔离开关机械故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(13): 3459-3466.  
QIU Zhibin, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun, et al. Mechanical fault diagnosis of high voltage disconnector based on motor current detection[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(13): 3459-3466.
- [15] 张金龙,郭 兴,漆汉宏,等. 基于小波调制的异步电机变频控制技术[J]. 电力电子技术, 2016, 50(9): 54-57.  
ZHANG Jinlong, GUO Xing, QI Hanhong, et al. Frequency

- control technology of induction motor based on wavelet modulation[J]. Power Electronics, 2016, 50(9): 54-57.
- [16] 唐晓, 庞金虎, 迟诚, 等. 带谐波抑制的新型异步电机无功补偿控制策略[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(10): 29-33.  
TANG Xiao, PANG Jinhu, CHI Cheng, et al. A novel control strategy of reactive power compensation and harmonic suppression for asynchronous motor[J]. Electric Machines & Control Application, 2018, 45(10): 29-33.
- [17] 马宏忠, 方瑞明, 黄允凯, 等. 大型异步电机转子绕组故障特征量的新研究[J]. 大电机技术, 2004(4): 1-4.  
MA Hongzhong, FANG Ruiming, HUANG Yunkai, et al. Study on fault feature in large asynchronous motor rotor winding[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2004(4): 1-4.
- [18] 陈士刚, 关永刚, 张小青, 等. 不完备故障类别下基于Multi-SVDD的高压隔离开关故障诊断方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(11): 2439-2447.  
CHEN Shigang, GUAN Yonggang, ZHANG Xiaoqing, et al. Diagnosis method of high voltage isolating switch fault based on multi-SVDD under incomplete fault type[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(11): 2439-2447.
- [19] 李志坚, 曾大治, 龙腾. 一种基于Butterworth滤波器的DAC幅频特性模型[J]. 电路与系统学报, 2010, 15(4): 101-103.  
LI Zhijian, ZENG Dazhi, LONG Teng. A model of D/A converter amplitude frequency response characteristic based on Butterworth filter[J]. Journal of Circuits and Systems, 2010, 15(4): 101-103.
- [20] 王路, 赖春露. FIR数字滤波器幅频响应约束最大加权相位误差最小化设计[J]. 电子学报, 2018, 46(11): 2781-2786.  
WANG Lu, LAI Chunlou. Design of FIR digital filters by a Magnitude-response constrained minimax weighted phase error method[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(11): 2781-2786.
- [21] 王东文, 孙万亭. 基于自适应FIR滤波算法的永磁同步电机电流控制研究[J]. 电子设计工程, 2017, 25(7): 53-56.  
WANG Dongwen, SUN Wanting. Research on current control of permanent magnet synchronous motor based on adaptive FIR filtering algorithm[J]. Electronic Design Engineering, 2017, 25(7): 53-56.
- [22] 刘仕兵, 葛俊祥. 基于K-means聚类法的牵引供电隔离开关故障状态监测[J]. 华东交通大学学报, 2017, 34(3): 109-117.  
LIU Shibing, GE Junxiang. Fault monitoring of OCS isolation switch based on K-means clustering[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2017, 34(3): 109-117.
- 刘仕兵(1970—), 男, 教授, 硕士, 主要从事电气化轨道交通接触网技术、高速铁路弓网动力学等研究。  
宋陵灿(1995—), 女, 硕士研究生, 主要从事高压隔离开关机械故障检测等方面研究。

(上接第288页)

- switchgear with active wireless sensing[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(22): 82-86.
- [16] HEINEMANN L, GLOCK J, REHERS C, et al. Modular online condition monitoring system for gas insulated switchgear[C]//Transmission & Distribution Conference & Exposition. [S.l.]: IEEE, 2010: 1-6.
- [17] BURUNKAYA M, PARS T.A smart meter design and implementation using ZigBee based wireless sensor network in smart grid[C]//International Conference on Electrical & Electronic Engineering. [S.l.]: IEEE, 2017: 158-162.
- [18] 杨瑞峰, 王雄, 郭晨霞, 等. 基于ZigBee无线传感网络环境监测系统设计与应用[J]. 电子器件, 2017, 40(3): 760-765.  
YANG Ruifeng, WANG Xiong, GUO Chenxia, et al. Design and application of wireless sensor network environmental monitoring system based on ZigBee[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2017, 40(3): 760-765.
- [19] 孙增圻, 徐红兵. 基于T-S模型的模糊神经网络[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1997(3): 76-80.  
SUN Zengqi, XU Hongbing. Fuzzy-neural network based on T-S model[J]. Journal of Tsinghua University(Sci & Tech), 1997(3): 76-80.
- [20] 宋杲, 崔景春, 袁大陆. 2004年高压开关设备运行统计分析[J]. 电力设备, 2006, 7(2): 10-14.  
SONG Gao, CUI Jingchun, YUAN Dalu. Operation statistics and analysis of high voltage switchgear in 2004[J]. Electrical Equipment, 2006, 7(2): 10-14.
- [21] 刘文奇. 均衡函数及其在变权综合中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 1997, 17(4): 59-65.  
LIU Wenqi. Balanced function and its application for variable weight synthesizing[J]. System Engineering Theory and Practice, 1997, 17(4): 59-65.
- 琚泽立(1984—)男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为配电网设备运维检修及状态评价。  
张航伟(1996—), 男, 在读硕士研究生, 研究方向为电力设备状态检测技术。  
黄小羽(1983—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为配网运维检修工作。  
段玮(1989—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事输配电技术研究。  
侯喆(1986—), 男, 博士, 工程师, 研究方向为配网设备绝缘状态检测。  
李洪杰(1966—), 男, 博士, 教授, 从事电力设备状态检测及诊断、电场、热场及耦合场的数值计算等领域的研究。