

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.06.033

基于线圈电流特征量优化的断路器状态评估

荣 强¹, 赵莉华¹, 朱林林², 姜海洋², 张 浩¹

(1. 四川大学电气信息学院, 成都 610065; 2. 国网黑龙江电力有限公司检修公司, 哈尔滨 150090)

摘要: 针对高压断路器操作机构状态评估过程中线圈电流特征量维数过高的问题,提出了一种基于皮尔森相关系数的特征量优化方法。利用提取的线圈电流特征量构造皮尔森相关系数矩阵,通过分析线圈电流 8 个特征量间的相关性,并进行特征量优化,得到具有较高分类能力的 3 个特征量。将优化后的特征量输入神经网络进行高压断路器操作机构的状态评估。实例分析表明特征量优化方法有效降低了特征量的维数,简化了分类器结构,以较少特征量达到了较理想的高压断路器操作机构状态评估效果。

关键词: 高压断路器; 线圈电流; 特征量优化; 状态评估

Status Assessment of Circuit Breakers Based on Coil Current Characteristic Quantity Optimization

RONG Qiang¹, ZHAO Lihua¹, ZHU Linlin², JIANG Haiyang², ZHANG Hao¹

(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. State Grid Heilongjiang Power Company Limited Maintenance Company, Harbin 150090, China)

Abstract: Based on the Pearson correlation coefficients, a new method for optimizing characteristic quantity is proposed to reduce the characteristic dimension of coil current in status assessment process of high voltage circuit breaker operating mechanism. To obtain three characteristic quantities with higher classification capability, the extracted coil current characteristic quantity is made use of to construct the Pearson correlation coefficient matrix, and the correlations of eight coil current characteristic quantities are analyzed and optimized. Then, the optimized characteristic quantities are input to neural network to assess the status of high voltage circuit breaker operating mechanism. Experimental results show that the proposed method reduces the dimension of characteristic quantities, simplifies the structure of classifier, and achieves satisfactory status assessment of high voltage circuit breaker operating mechanism with fewer characteristic quantities.

Key words: high voltage circuit breaker; coil current; characteristic quantity optimization; status assessment

0 引言

高压断路器是电力系统中重要的保护和控制设备,其运行可靠性对电力系统正常运行发挥着至关重要的作用。据权威机构调查结果表明,各种高压断路器故障中机构故障所占比例甚至高达 40%左右,所以操作机构的可靠性是影响高压断路器可靠性的关键因素之一^[1-2]。高压断路器操作机构的状态监测是提高高压断路器操作机构可靠运行的有效方法,

操作机构分/合闸线圈电流波形能够部分反映高压断路器操作机构的运行状态,因此提取线圈电流波形的特征量对高压断路器操作机构状态评估具有重要的意义。国内外专家学者在这方面已经做了大量的研究,如通过小波变换检测信号突变点^[4]、结合商空间的属性法和投影法^[2]、利用电流曲线轮廓法^[3]等方法提取线圈电流波形的特征量。但这些方法缺乏对特征量间的关系和重要程度分析,提取的特征量也未经优化,使得状态评估过程复杂。

文中首先对采集的线圈电流信号去噪,然后提

收稿日期:2016-01-21; 修回日期:2016-03-13

取线圈电流的特征量,对提取的特征量进行降维优化处理,剔除具有较强相关性的特征量,从而简化状态评估过程。实际算例分析表明文中采取的方法能够根据线圈电流波形准确评估操作机构的状态,且评估过程简单,容易实现。

1 分/合闸线圈电流典型波形分析

高压断路器操作机构线圈电流波形可以反映分合闸电磁铁本身及所控制的锁闭或阀门以及与之相连的开关操动机构、辅助触点在操作过程中的工作情况。操作机构分合闸过程的工作原理相同,其线圈电流波形也类似,文中重点讨论合闸线圈电流波形。

操作机构合闸线圈电流典型波形见图1,根据合闸线圈电流波形可将电磁铁动铁心的运动过程分为5个阶段^[4-8]。

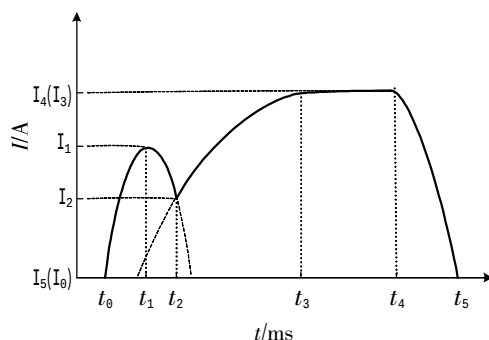


图1 操作机构合闸线圈电流典型波形

Fig. 1 Typical waveform of operating mechanism closing coil current

$t_0 \sim t_1$ 阶段: t_0 时刻,合闸线圈通电,线圈中有电流通过,此时电流较小,所产生的磁通也较小,动铁心受到的电磁力不足以使动铁心运动,动铁心位置保持不变。此时磁路气隙最大,气隙磁阻最大,电感最小。这个阶段中,线圈电压、控制回路电阻及空行程都将影响电流上升速度、电流峰值及持续时间。线圈电压越高,电流上升斜率越陡,达到电流峰值的时间越短,电流的峰值也越大;控制回路电阻增大,时间常数减小,电流上升斜率变小,达到电流峰值的时间延长,峰值电流减小;空行程越大,电感越小,时间常数减小,电流上升速度加快,电流峰值增大。

$t_1 \sim t_2$ 阶段: t_1 时刻,动铁心开始运动。随着铁心的运动,磁路气隙减小,气隙磁阻减小,线圈电感增大,线圈电流逐渐下降。 t_2 时刻,铁心运动速度达到最大值,铁心运动到位,撞杆撞击合闸触发器,铁心停止运动。如果动铁心存在卡涩,将延长 $t_0 \sim t_1$ 的持续时间;电磁铁的动静铁心吸合不好(结合面不干净或结合面不平)将会延长 $t_1 \sim t_2$ 的持续时间。根据此阶段持续时间及电流波形变化情况可以分析判断动

铁心的运动部件是否存在卡涩、脱扣或释能机械负载变化等故障。

$t_2 \sim t_3$ 阶段: t_2 时刻,动铁心运动到位,撞杆撞击合闸触发器停止运动,储能机构释放储能,动触头开始运动。此阶段动铁心不动,磁路气隙不变,磁阻不变,电感为常数。线圈电流按指数规律上升,经过电流上升的暂态过程后,电流不再增加,进入稳流阶段。

$t_3 \sim t_4$ 阶段: t_3 时刻,动触头开始动作,线圈电流近似稳态。 t_4 时刻断路器辅助开关触点断开线圈电源。该阶段线圈电流 I_3 的大小可反映线圈电压及控制回路电阻的大小。

$t_4 \sim t_5$ 阶段: t_4 时刻,断路器辅助触头切断线圈回路直流电源,在辅助触头之间产生电弧并被迅速拉长,电弧电压升高,使电流减小,直到电弧熄灭,线圈电流减小为零。如果辅助开关触点无法正常转换,则不能切断线圈电源,使线圈一直通电,将烧坏线圈。

由合闸线圈电流典型波形分析表明,线圈电流能部分反映断路器操作机构运行情况,通过对操作机构分/合闸线圈电流波形的监测及分析,能够评估操作机构与电磁系统相关部件的运行状态。

2 分/合闸线圈电流波形特征量提取

采集的线圈电流信号中含有噪声等干扰信号,文中对采集的信号进行小波去噪处理,消除其中干扰信号。小波去噪包括小波分解、对小波分解得到的高频系数阈值量化处理和小波重构3个部分^[9-10]。

由分析可知,合闸线圈电流波形含有8个特征量,包括3个电流量 I_1 、 I_2 、 I_3 和5个时间量 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 、 t_5 。这8个特征量包含了线圈电流波形的所有关键信息,只需对这8个特征量进行分析处理,便可完成对机构的状态评估。文中采用小波变换的方法检测信号突变点^[1],从而提取线圈电流的8个特征量。

3 基于皮尔森相关系数的特征量降维优化

通过小波变换得到了线圈电流的8个特征量,维数较高,使得状态评估过程相对复杂^[11-12]。而这些特征量之间可能具有一定的相关性,可以对其进行降维优化处理。

3.1 皮尔森相关系数计算方法

皮尔森相关系数是用来反映两个变量线性相关程度的统计量。利用皮尔森相关系数,可以发现一系列变量中彼此相关的变量,剔除相关性较高的变量,达到降维优化的目的。

构造特征量矩阵 M 为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{m1} & X_{m2} & \cdots & X_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)中: x_{ij} 为特征量, $i=1, \dots, m; j=1, \dots, n; m$ 为样本数; n 为特征量数。

特征量间的皮尔森相关系数^[13-15]计算方法为

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m (M_{ki} - \bar{M}_i)(M_{kj} - \bar{M}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^m (M_{ki} - \bar{M}_i)^2} \sqrt{\sum_{k=1}^m (M_{kj} - \bar{M}_j)^2}} \quad (2)$$

式(2)中: $\bar{M}_i = \frac{1}{m} (\sum_k M_{ki})$; $\bar{M}_j = \frac{1}{m} (\sum_k M_{kj})$ 分别表示两特征变量的均值; $r_{ij} \in [-1, 1], i, j=1, \dots, n; (M_{ki}, M_{kj})$ 分别为两特征变量大小; r_{ij} 描述的是两个特征变量间线性相关强弱的程度, r_{ij} 的绝对值越大表明相关性越强, 当 $r_{ij}=0$ 时, 表明两特征变量不相关。

由式(2)计算特征量矩阵 $\mathbf{M}$ 中每一列间的皮尔森相关系数, 得到矩阵 $\mathbf{M}$ 的皮尔森相关系数矩阵 $\mathbf{P}$ 为

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

矩阵 $\mathbf{P}$ 中, $r_{ij}=r_{ji}$, 因此皮尔森相关系数矩阵 $\mathbf{P}$ 为对称方阵, 而且两个相同向量间的相关性为 1, 从而对角线元素全部为 1, 其中 n 为提取出的特征量个数。由于皮尔森相关系数矩阵具有对称性, 分析特征量间的相关性只需要分析 $\mathbf{P}$ 的上三角矩阵即可。

3.2 线圈电流特征量的降维优化

提取小波去噪后的线圈电流特征量作为操作机构状态评估的特征量。共提取 35 组样本数据, 可表征的高压断路器操作机构状态有 6 种状态^[16-18], 包括机构正常(A)5 组、操作电源过低(B)6 组、合闸铁心开始阶段有卡涩(C)6 组、操作机构有卡涩(D)6 组、铁心空行程过大(E)6 组、辅助开关动作接触不良(F)6 组。利用皮尔森相关系数矩阵分析方法对上述 8 个特征量进行相关性分析, 计算特征量间的皮尔森相关系数结果见表 1。

表 1 合闸线圈电流特征量的皮尔森相关系数

Table 1 Pearson correlation coefficient of the closing coil current characteristic quantities

参数	I_1	I_2	I_3	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5
I_1	1.000 0	0.924 7	0.962 3	0.243 5	0.368 6	0.358 5	0.441 4	0.378 5
I_2	0.924 7	1.000 0	0.944 2	0.204 6	0.262 4	0.296 0	0.407 0	0.303 6
I_3	0.962 3	0.944 2	1.000 0	0.363 6	0.452 9	0.463 6	0.506 8	0.433 2
t_1	0.243 5	0.204 6	0.363 6	1.000 0	0.905 0	0.980 0	0.749 6	0.750 2
t_2	0.368 6	0.262 4	0.452 9	0.905 0	1.000 0	0.925 6	0.608 4	0.617 9
t_3	0.358 5	0.296 0	0.463 6	0.980 0	0.925 6	1.000 0	0.788 4	0.795 1
t_4	0.441 4	0.407 0	0.506 8	0.749 6	0.608 4	0.788 4	1.000 0	0.974 6
t_5	0.378 5	0.303 6	0.433 2	0.750 2	0.617 9	0.795 1	0.974 6	1.000 0

通常认为皮尔森相关系数值大于 0.5 为显著相关, 小于 0.5 为低度相关^[14], 从表 1 中合闸线圈电流特征量的皮尔森相关系数可以得出, $\{I_1, I_2, I_3\}$ 、 $\{t_1, t_2, t_3\}$ 及 $\{t_4, t_5\}$ 3 个集合分别具有很高的相关性。因此, 只需要选择 $\{I_1, t_1, t_5\}$ 3 个特征量就能最大程度代表线圈电流特征。

4 算例分析

在某高压断路器操作机构生产厂家进行高压断路器故障模拟实验, 以型号为 LW34-40.5 的弹簧操作机构为研究对象。提取小波去噪后的线圈电流特征量作为操作机构状态评估的特征量。提取的合闸线圈电流测试样本特征量及所对应的高压断路器操作机构状态类型见表 2。

在 MATLAB 环境中构造神经网络^[19], 其中, 输

入节点层数为 3, 隐含层节点数为 2, 输出层节点数为 6。通过选取 35 组样本数据中的 I_1, t_1 和 t_5 作为训练集。表 2 中 12 组数据中的 I_1, t_1 和 t_5 作为测试集。

由于线圈电流提取的特征量具有不同的量纲, 避免因为不同量纲参数间的数值变动中心不同, 使得输入数据的大小参差不齐。因此需要对样本进行归一化处理, 处理公式为

$$\bar{x}_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (4)$$

式(4)中: $\bar{x}_i$ 为归一化后的数据, 其值为 0 到 1; x_i 为输入数据; $x_{\max}$ 和 $x_{\min}$ 分别为 x_i 中的最大值和最小值, 流程图见图 2。

使用训练好的神经网络对测试集样本进行分类测试, 测试集共 12 组数据, 其中正常状态 2 组、每种故障状态两组数据, 与训练集数据不重叠, 实际分

表2 合闸线圈电流测试样本特征量及所对应的高压断路器操作机构状态类型

Table 2 Samples' characteristics of closing coil current test and the corresponding status-types of high voltage circuit breaker operating mechanism

序号	I_1/A	t_1/ms	t_2/ms	状态标签
1	1.62	24.57	50.02	A
2	1.61	24.51	50.30	A
3	1.61	29.99	56.08	B
4	1.60	30.10	56.00	B
5	1.60	24.28	54.39	C
6	1.59	24.25	54.29	C
7	1.23	23.93	50.01	D
8	1.29	23.76	49.98	D
9	1.60	24.12	49.77	E
10	1.60	24.05	49.69	E
11	1.61	23.88	52.20	F
12	1.63	23.91	52.11	F

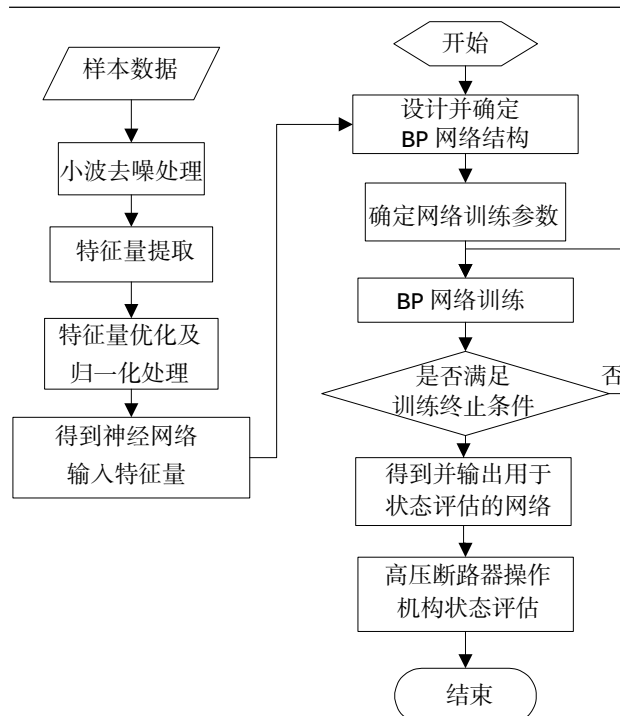


图2 高压断路器操作机构状态评估的流程图

Fig. 2 The flow chart of high voltage circuit breaker operating mechanism state assessment

类与预测分类对比测试结果见图3。

从图3可以看出,测试集中12组预测操作机构状态的结果与实际操作机构状态的结果一致。表明经皮尔森相关系数降维优化后的线圈电流特征量能实现对高压断路器操作机构状态正确评估。

5 结语

文中提取高压断路器操作机构合闸线圈电流信号中的8个特征量作为原始特征数据。通过皮尔森

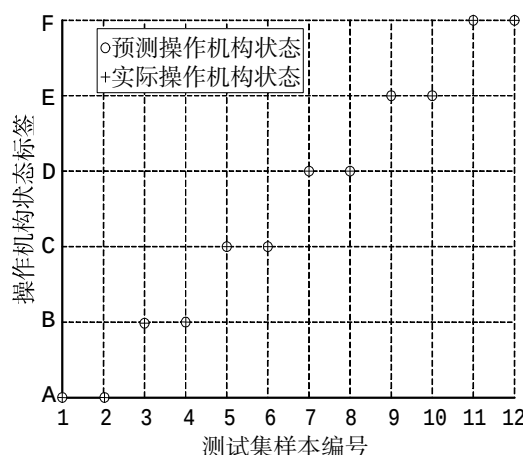


图3 实际分类与预测分类对比

Fig. 3 Comparison of the actual classification and predictive classification

相关系数得到能表征高压断路器操作机构部分状态的3个主要特征量,去除了原始特征参量中的冗余信息,明确了对状态分类有较重要意义的特征参量。并建立神经网络,经实例分析证明此方法可以评估高压断路器操作机构的部分运行状态。方法具有一定的实用性,可应用到具体的工程实践当中。

参考文献:

- [1] 张永奎,赵智忠,冯旭,等.基于分合闸线圈电流信号的高压断路器机械故障诊断[J]. 高压电器,2013,49(2): 37-41.
ZHANG Yongkui, ZHAO Zhizhong, FENG Xu, et al. Based on closing coil current signal of high voltage circuit breaker mechanical fault diagnosis[J]. High Voltage Electrical, 2013, 49(2): 37-41.
- [2] 谢文靖.高压断路器智能故障诊断方法研究[D]. 昆明:云南大学,2013.
XIE Wenjing. Research on intelligent fault diagnosis of high voltage circuit breakers[D]. Kunming: Yunnan University, 2013.
- [3] 李斌.永磁机构真空断路器运动特性状态评估方法研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2013.
LI Bin. Evaluation method permanent magnetic actuator vacuum circuit breaker kinematics state[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2013.
- [4] RAZI-KAZEMI A A, VAKILIAN M, NIAYESH K A. Circuit-breaker automated failure tracking based on coil current signature[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(1): 283-290.
- [5] ANDRUȘCĂ M, ADAM M, PANTELIMON R, et al. About diagnosis of circuit breakers[C]//The 8th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering. Bucharest, Romania: IEEE, 2013: 1-4.
- [6] 胡晓光,孙来军,纪延超.基于线圈电流和触点状态的断

- 路器故障分析[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(8): 5-7.
- HU Xiaoguang, SUN Laijun, JI Yanchao. Circuit breaker fault analysis based on coil currents and contact states[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(8): 5-7.
- [7] 黄建, 胡晓光, 巩玉楠, 等. 高压断路器机构故障诊断专家系统设计[J]. 电机与控制学报, 2011, 15(10): 43-48.
- HUANG Jian, HU Xiaoguang, GONG Yunan, et al. High voltage circuit breaker mechanism fault diagnosis expert system design[J]. Machines and Control, 2011, 15(10): 43-48.
- [8] 王小华, 荣命哲, 吴翊, 等. 高压断路器故障诊断专家系统中快速诊断及新知识获取方法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(3): 95-99.
- WANG Xiaohua, RONG Mingzhe, WU Yi, et al. Method of quick fault diagnosis and new knowledge obtainment for high voltage circuit breaker expert system[J]. Proceedings of CSEE, 2007, 27(3): 95-99.
- [9] 何正友. 小波分析在电力系统暂态信号处理中的应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- HE Zhengyou. Wavelet analysis in power system transient signal processing[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2011.
- [10] 刘明才. 小波分析及其运用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- LIU Mingcai. Wavelet analysis and its application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.
- [11] 任江涛, 黄焕宇, 孙婧昊, 等. 基于相关性分析及遗传算法的高维数据特征选择[J]. 计算机应用, 2006, 26(6): 1403-1405.
- REN Jiangtao, HUANG Huanyu, SUN Jinghao, et al. High-dimensional data feature selection based on relevance analysis and GA[J]. Computer Applications, 2006, 26(6): 1403-1405.
- [12] YU L, LIU H. Efficient feature selection via analysis of relevance and redundancy[J]. Journal of Machine Learning Research, 2004: 1205-1224.
- [13] 苑津莎, 尚海昆, 王瑜, 等. 基于相关系数矩阵和概率神经网络的局部放电模式识别[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 110-115.
- YUAN Jinsha, SHANG Haikun, WANG Yu, et al. Pattern recognition for partial discharge based on correlation coefficient matrix and probabilistic neural networks[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 110-115.
- [14] 尚海昆, 苑津莎, 王瑜, 等. 基于交叉小波变化和相关系数矩阵的局部放电特征提取[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 274-281.
- SHANG Haikun, YUAN Jinsha, WANG Yu, et al. Feature extraction for partial discharge based on cross-wavelet transform and correlation coefficient matrix[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 274-281.
- [15] RAZI-KAZEMI A A, VAKILIAN M, NIAYESH K A. Data mining of online diagnosed waveforms for probabilistic condition assessment of SF₆ circuit breakers[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2015, 30(3): 1354-1362.
- [16] 袁金丽, 李奎, 郭志涛, 等. 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 Jinli, LI Kui, GUO Zhitao, et al. Mechanical failure diagnosis of high voltage circuit breaker based on SVM and opening/closing coil current parameters[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(3): 26-30.
- [17] 卞皓玮. 高压断路器在线监测与故障诊断系统研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2012.
- BIAN Haowei. Study on on-line monitoring and fault diagnosis system for high voltage circuit breaker[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2012.
- [18] 吕锦柏, 王毅, 谢将剑, 等. 基于线圈电流的永磁真空断路器控制方法[J]. 高电压技术, 2013, 39(4): 860-868.
- LYU Jinbai, WANG Yi, XIE Jiangjian, et al. Control method for permanent magnetic vacuum circuit breaker based on coil current[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(4): 860-868.
- [19] 李杰. 基于神经网络的高压断路器故障检测[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- LI Jie. High voltage circuit breaker failure detection based on neural network[D]. Changsha: Hunan University, 2013.
- 荣强(1989—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高压开关设备状态监测。
- 赵莉华(1968—), 女, 副教授, 研究方向为高压开关设备状态监测、电能质量。