

基于线圈电流的牵引变电站直流断路器 状态监测与诊断研究

肖伟强¹, 肖涛古¹, 王志惠¹, 张目然¹, 夏加富²

(1. 广州地铁集团有限公司, 广州 510000; 2. 武汉船用电力推进装置研究所, 武汉 430064)

摘要: 直流断路器在系统设备入网或者退网时起到开关转换的控制作用, 是电力系统的关键设备之一; 研究牵引变电站直流断路器的分合闸线圈电流与直流断路器状态的联系, 实现对直流断路器的状态诊断; 首先利用霍尔电流传感器采集分合闸线圈电流波形, 然后分析了直流断路器分合闸过程线圈电流的变化机理并确定以电流拐点的时间 (t_1/t_2) 和电流值 (i_1/i_2) 作为诊断的特征值, 接着对采集的电流波形进行 15kHz 低通滤波去噪后采用电流包络法提取分合闸线圈电流信号中特征值, 最后随机划分 80% 样本为训练样本, 20% 为测试样本, 通过 SVM 支持向量机对模拟的 7 种不同状态进行诊断; 诊断结果表明, 通过分析分合闸线圈电流的特征值能够实现牵引变电站直流断路器的状态监测与诊断。

关键词: 牵引变电站; 直流断路器; 线圈电流; 状态监测与诊断

Research on Condition Monitoring and Diagnosis of DC Circuit Breaker Based on Coil Current

Xiao Weiqiang¹, Xiao Taogu¹, Wang Zhihui¹, Zhang Muran¹, Xia Jiafu²

(1. Guangzhou Metro Group Co., Ltd., Guangzhou 510000, China;

2. Wuhan Institute of Marine Electric Propulsion, Wuhan 430064, China)

Abstract: DC circuit breaker is one of the most important switch devices in power system, which plays the role of switching control when the system devices enter or exits the system. The connection between the closing/opening coil current and the state of the DC breaker are studied, to diagnosis the DC breaker status. Firstly, the current waveform of the opening and closing coil is collected by the Hall current sensor. Then, analysis the coil current in the DC circuit breaker opening/closing process is analyzed and the time (t_1/t_2) with current value (i_1/i_2) of the coil current inflection point are determined as the characteristic values of the diagnosis. and then, the collected current waveform is denoised by low-pass filtering with a cutoff frequency of 15 kHz that is extracted by the method of current envelope. Finally, 80% of the samples were randomly divided into training samples and 20% were test samples. Seven different states of the simulation were diagnosed by SVM. The diagnosis results show that the analysis method based on the current of the coil current can realize the condition monitoring and diagnosis of the DC circuit breaker in traction substation.

Keywords: traction substation; DC circuit breaker; coil current; condition monitoring and diagnostic

0 引言

直流电力系统相对于交流系统具有很多优点: 输电容量大、供电可靠性高、电能质量好等。目前诸如直流输电、轨道交通、新能源并网发电都已采用直流电力系统。直流断路器作为直流电力系统中最关键的开关设备, 起着分断闭合系统的控制作用和保证系统安全可靠运行的保护作用, 因此直流断路器的可靠性直接影响直流系统的稳定运行^[1]。

直流断路器的故障有很多类型, 发生故障时或者出现劣化时, 分合闸线圈电流波形特征状态也会发生变化^[2]。

因此研究直流断路器分合闸线圈电流, 寻找直流断路器故障或者劣化时分合闸线圈电流的特征量, 实现对直流断路器的故障诊断。

针对断路器分合闸线圈电流波形并诊断国内外学者进行了大量研究。文献 [3] 针对 GIS 断路器采用固定窗口法提取分合闸线圈电流极值点作为特征量, 并以置信区间诊断故障。文献 [4] 对线圈电流特征提取进行优化, 并归纳了依据线圈电流实现故障诊断的方法。文献 [5] 研究电流极值点提取算法和贝叶斯决策理论诊断故障。文献 [6] 研究小波分析、近似求斜率及求极值点结合, 提取高压断路器线圈电流的特征值点。文献 [7] 研究包络均值法在电流滤波中的作用。文献 [8] 研究了蚁群算法优化的 SVM 诊断故障。总结发现: 应用分合闸线圈电流实现断路器故障诊断是可以实现的, 但是相关研究集中于高压直流断路器分合闸线圈电流特征研究, 对于低压等级直流断路器分合闸线圈电流特性研究很少。

收稿日期: 2019-06-03; 修回日期: 2019-06-22。

基金项目: 国家重点研发计划资助(2017YFB1201200)。

作者简介: 肖伟强(1973-), 男, 广东广州人, 高级工程师, 主要从事城轨交通供电系统检修和管理方向的研究。

通讯作者: 夏加富(1991-), 男, 湖北武汉人, 工程师, 主要从事直流断路器智能化方向的研究。

牵引变电站直流断路器作为低压等级 (1 500 V/750 V) 直流断路器, 工况与高压断路器有很大不同。本文将以牵引变电站直流断路器合分闸线圈电流作为研究对象, 采用滤波预处理, 线圈电流包络极值法提取特征点, SVM 支持向量机诊断等方法, 实现了该直流断路器的状态监测和故障诊断。

1 牵引变电站直流断路器合分闸线圈电流监测与诊断系统

分合闸线圈作为实现直流断路器分合闸控制信号的来源, 线圈电流可直观反映直流断路器的状态。

1.1 分合闸线圈电流监测诊断系统

牵引变电站直流断路器分合闸线圈采用两路分离的方案控制该直流断路器通断, 合闸线圈工作电压 DC220 V, 分闸线圈工作电流 24 V。针对该直流断路器线圈电流监测诊断系统如图 1 所示。

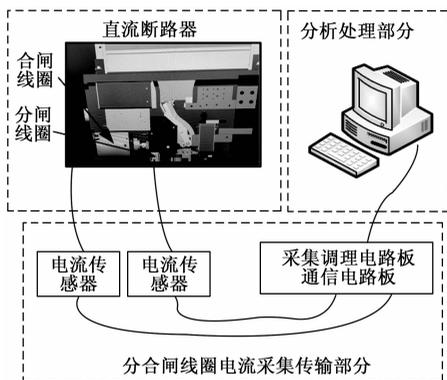


图 1 直流断路器线圈电流监测诊断系统框图

整个系统包括 3 个部分: 直流断路器本体部分、分合闸线圈采集传输部分、分析诊断部分。

1.2 分合闸过程分析

从图 1 的直流断路器来看, 分闸线圈和合闸线圈是独立的两部分, 所以需要分合闸线圈电流采用两路分别控制。图 2 为直流断路器合分闸线圈回路工作示意图。

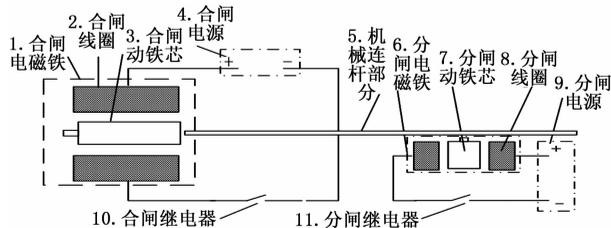


图 2 直流断路器合分闸线圈工作示意图

由图 2 分析合闸过程: 合闸继电器 10 受分合闸控制板信号控制闭合, 合闸回路接通, 合闸线圈 2 产生电磁吸力使得合闸动铁芯 3 向左移动, 拉动连杆 5 等一系列机械部件动作, 直至动静触头闭合, 此时直流断路器机械保持。合闸继电器 10 受控制延时一段时间后分开, 合闸回路断开控制

电, 整个合闸过程结束。

分闸过程: 分闸继电器 11 受控制闭合, 分闸回路接通, 分闸线圈 8 产生电磁吸力, 分闸动铁芯 7 向上运动碰撞连杆机构 5, 破坏机械平衡, 反力弹簧作用, 直流断路器动静触头分开。分闸继电器 11 受控制延时一段时间后分开, 分闸回路断电, 整个分闸过程结束。

合分闸线圈为直动式直流并励电磁系统^[9], 其等效电路如图 3 所示^[10]。

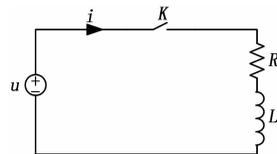


图 3 合分闸线圈回路等效电路

结合 1.2 分合闸过程分析和图 3: 当合分闸线圈回路收到命令, 开关 K 闭合, 由此可得电路方程:

$$u = iR + \frac{d\psi}{dt} \quad (1)$$

式 (1) 中, Ψ 为回路磁通。 $\Psi = Li$ 。由此式 (1) 可以变为:

$$u = iR + L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dt} \quad (2)$$

又 $L = f(\delta)$, 且 L 不随 i 变化^[10], δ 为气隙大小。所以 $dL/dt = (dL/d\delta) * (d\delta/dt) = v (dL/d\delta)$, v 为气隙变化速度即动铁芯的运动速度。即:

$$u = iR + L \frac{di}{dt} + iv \frac{dL}{d\delta} \quad (3)$$

离线状态下测得合分闸线圈电流如图 4、5 所示。

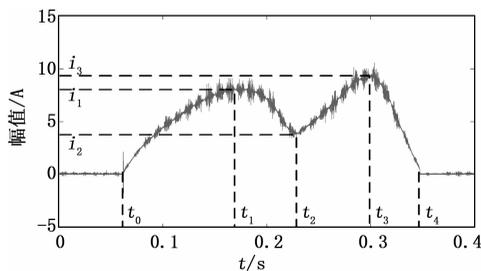


图 4 合闸线圈电流原始波形

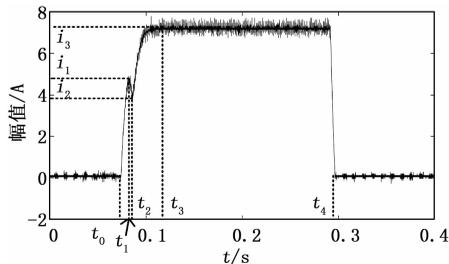


图 5 分闸线圈电流原始波形

2 牵引变电站直流断路器分合闸线圈电流特征量提取

2.1 合分闸线圈电流分析

下面以合闸过程为例，结合图 3、4 分析合闸线圈电流波形变化过程。

在 $t=t_0$ 时，开关 K 闭合，由于电感性电路电流不能突变，线圈电流逐渐上升。

在 $t_0 \sim t_1$ 前段，线圈电流较小，电磁吸力很小，未能克服机械连杆等阻力，动铁芯未动。在此阶段满足式 (4)：

$$u = iR + L \frac{di}{dt} \quad (4)$$

求得式 (4) 的特解为：

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

可见在 $t_0 \sim t_1$ 初始阶段内，线圈电流是指数形式上升。在 $t_0 \sim t_1$ 后阶段，电磁吸力增大，动铁芯运动，产生反电动势 $i v dL/d\delta$ 。之后线圈电流继续增大，由式 (3) 电压 u 不变，则 di/dt 减小，直到 $di/dt=0$ ，线圈电流增加到最大到 i_1 。

在 $t_1 \sim t_2$ 阶段，反电动势继续增大，由式 (3) 的 u 不变可知： $di/dt < 0$ ，线圈电流开始减小。直到铁芯吸合，机械锁扣，进入机械保持状态。

在 $t_2 \sim t_3$ 阶段，动铁芯停止运动， $v=0$ ，反电动势为 0，根据式 (3)，线圈电流以指数增大直到最大值 $i_{\max} = u/R$ 。直到控制继电器收到控制板断开命令，线圈电流开始减小，直至为 0。

在分析过程中，可以看出：对于不同的控制电压 u ，上升所需要的时间 t_1 、稳态值 U/R 、 i_{\max} 等值是不一样的。因此检测线圈电流能够反映出直流断路器的某些故障。

分闸线圈电流分析过程与合闸线圈分析原理和过程相同。此处不再赘述。

2.2 分合闸线圈电流特征量提取

从图 4、5 可以看出，合分闸线圈电流噪声很大。需要通过预处理后，提取电流波形关键点数值作为特征量。

2.2.1 分合闸线圈电流信号预处理

电流波形预处理比较简单，采用低通滤波和平滑处理结合。对电流波形做 FFT 后，选择高斯窗函数设计截止频率为 15 kHz 的低通滤波器滤除杂波。

平滑处理电流波形时，窗宽参数选取对于分闸和合闸有区别。合闸线圈电流特征点间隔较大，可以选取较大窗宽，但是选择太大会导致信号失真。多次试验选择合适的窗宽预处理合闸线圈电流，得到滤波后的合闸线圈电流如图 6 所示。

观察图 5 可以发现分闸线圈电流 $t_1 \sim t_2$ 的时间很短，平滑处理时窗宽太大或太小会导致滤波不完全，影响特征点提取的准确性。多次试验后选取合适参数，得分闸线圈电流滤波后波形如图 7。

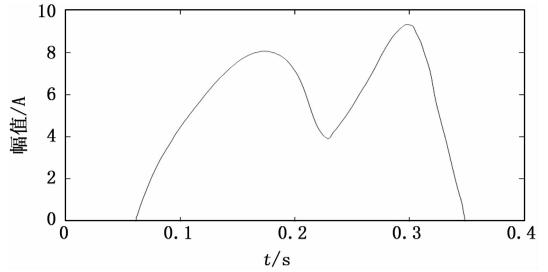


图 6 合闸线圈电流滤波后波形

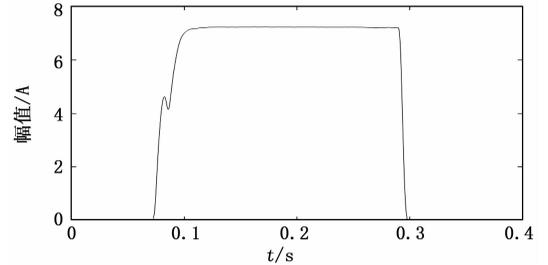


图 7 分闸线圈电流滤波后波形

从图 6/7 看出：低通滤波结合平滑处理的方法，能有效去除合分闸线圈电流中的干扰信号。

2.2.2 分合闸线圈电流特征量提取

由 2.1 的分析和图 4/5：选取合分闸线圈电流极值点作为特征值。本文采用电流包络极值法提取电流波形中的 $(t_1 t_2 i_1 i_2)$ 向量组作为特征向量组。

为了验证本文提取线圈电流方法的有效性，在试验条件下模拟了几种不同情况：正常合闸；断路器实际运行时，控制电压波动是常见故障，要求在工作电压的 65%~110% 能正常工作，故模拟 240 V 过压合闸，200 V 欠压合闸，180 V 欠压合闸，160 V 欠压合闸等情况；正常分闸；拧松断路器内部机械连杆固定螺钉模拟拒分。

针对上述总共 7 种情况，分别进行多次试验，采集电流波形提取特征点。正常合闸线圈电流波形和特征值分别如图 8 和表 1 所示。

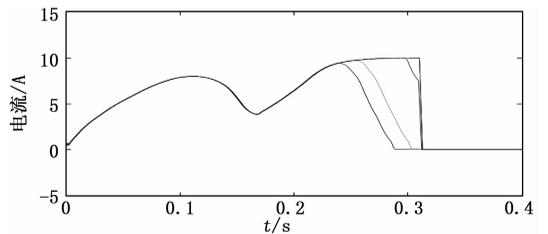


图 8 正常合闸线圈电流波形

表 1 正常合闸线圈电流特征值

状态	t_1/s	t_2/s	i_1/A	i_2/A
正常合闸	0.112 640	0.167 68	8.026 81	3.869 06
正常合闸	0.110 720	0.167 68	8.012 77	3.850 53
正常合闸	0.111 680	0.168 00	7.990 60	3.839 32
正常合闸	0.112 640	0.167 68	7.992 10	3.848 17
正常合闸	0.111 680	0.168 96	7.996 18	3.847 86

240 V 过压合闸线圈电流波形和特征值分别如图 9 和表 2 所示。

200 V 欠压合闸线圈电流波形和特征值分别如图 10 和表 3 所示。

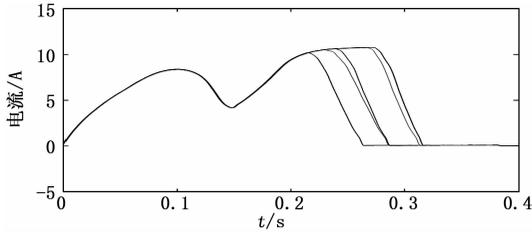


图 9 240 V 过压合闸线圈电流波形

表 2 240 V 过压合闸线圈电流特征值

状态	t_1/s	t_2/s	i_1/A	i_2/A
240V 过压合闸	0.100 80	0.149 12	8.407 25	4.186 82
240V 过压合闸	0.100 48	0.148 16	8.376 60	4.167 82
240V 过压合闸	0.101 12	0.148 80	8.367 42	4.176 51
240V 过压合闸	0.101 76	0.148 48	8.370 40	4.180 30
240V 过压合闸	0.100 48	0.149 12	8.359 78	4.175 05

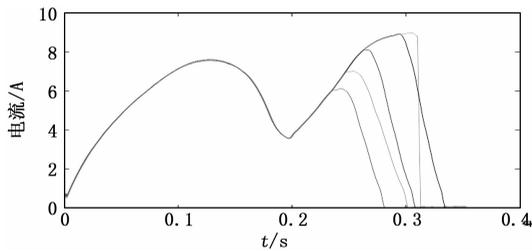


图 10 200 V 欠压合闸线圈电流波形

表 3 200 V 欠压合闸线圈电流特征值

状态	t_1/s	t_2/s	i_1/A	i_2/A
200V 欠压合闸	0.100 80	0.149 12	8.407 25	4.186 82
200V 欠压合闸	0.100 48	0.148 16	8.376 60	4.167 82
200V 欠压合闸	0.101 12	0.148 80	8.367 42	4.176 51
200V 欠压合闸	0.101 76	0.148 48	8.370 40	4.180 30
200V 欠压合闸	0.100 48	0.149 12	8.359 78	4.175 05

180 V 欠压合闸线圈电流波形和特征值分别如图 11 和表 4 所示。

表 4 180 V 欠压合闸线圈电流特征值

状态	t_1/s	t_2/s	i_1/A	i_2/A
180V 欠压合闸	0.150 40	0.245 44	7.161 182	3.311 165
180V 欠压合闸	0.155 52	0.247 36	7.148 26	3.333 73
180V 欠压合闸	0.156 16	0.247 04	7.155 76	3.311 856
180V 欠压合闸	0.157 44	0.246 40	7.162 71	3.308 88
180V 欠压合闸	0.154 24	0.247 36	7.159 98	3.319 80

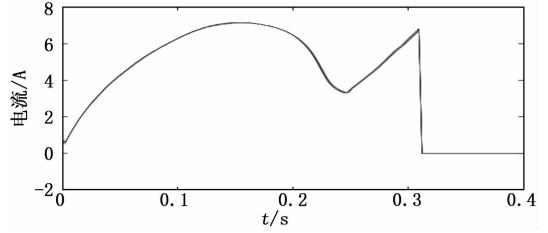


图 11 180 V 欠压合闸线圈电流波形

160 V 欠压合闸线圈电流波形和特征值分别如图 12 和表 5 所示。

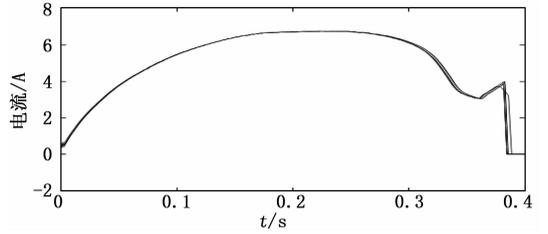


图 12 160 V 欠压合闸线圈电流波形

表 5 160 V 欠压合闸线圈电流特征值

状态	t_1/s	t_2/s	i_1/A	i_2/A
160V 欠压合闸	0.157 76	0.193 28	6.516 85	6.724 51
160V 欠压合闸	0.158 40	0.192 00	6.515 73	6.703 43
160V 欠压合闸	0.196 80	0.212 16	6.733 06	6.744 61
160V 欠压合闸	0.152 00	0.185 92	6.444 44	6.688 37
160V 欠压合闸	0.192 96	0.209 92	6.710 80	6.732 91

正常分闸线圈电流波形和特征值分别如图 13 和表 6 所示。

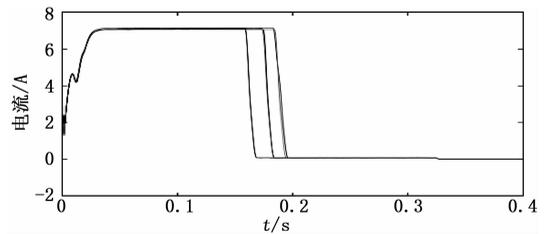


图 13 正常分闸线圈电流波形

表 6 正常分闸线圈电流特征值

状态	t_1/s	t_2/s	i_1/A	i_2/A
正常分闸	0.008 96	0.011 84	4.721 69	4.189 66
正常分闸	0.008 96	0.012 16	4.681 14	4.075 42
正常分闸	0.008 96	0.012 16	4.677 41	4.095 27
正常分闸	0.008 64	0.012 16	4.661 09	4.080 60
正常分闸	0.008 96	0.011 84	4.678 61	4.136 19

模拟拒分条件下分闸线圈电流波形和特征值分别如图 14 和表 7 所示。

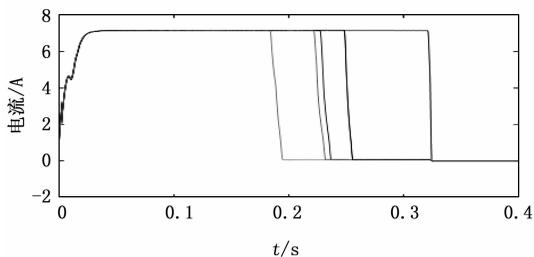


图 14 直流断路器拒分时分闸线圈电流波形

表 7 直流断路器拒分时分闸线圈电流特征值

状态	t_1/s	t_2/s	i_1/A	i_2/A
拒分	0.008 96	0.010 88	4.634 72	4.443 22
拒分	0.008 64	0.010 56	4.675 46	4.470 23
拒分	0.008 64	0.010 88	4.657 82	4.449 78
拒分	0.008 64	0.010 88	4.636 73	4.451 34
拒分	0.008 64	0.010 88	4.653 28	4.467 26

结合图 8~14 和表 1~7 可以看出：1) 每种情况单独试验具有可重复性；2) 由于离线检测手操的原因，导致线圈失电时间不一致，可以在后面实验中改进；3) 对比正常合闸、过压合闸、欠压 200 V 合闸、欠压 180 V 合闸、欠压 160 V 合闸，可以发现合闸线圈电压越低，合闸过程所花的时间越长；4) 拒分和正常分闸相比 i_2 增大。

3 牵引变电站直流断路器状态诊断

通过前文提取线圈电流包络极值的方法得到个各种情况下特征值，并利用该特征值以实现牵引变电站直流断路器的故障诊断。

直流断路器的故障诊断实质是利用特征值在监督学习下实现模式识别的过程。文献 [11] 对比几种主流监督式分类算法（决策树、SVM、贝叶斯、KNN、随机森林、AdaBoost），分别在有噪声和无噪声条件下进行分类测试。测试结果表明 SVM 不管在无噪声还是在噪声条件下分类效果表现最佳，准确率分别为 85.5% 和 85.8%。因此本文选取 SVM 来实现直流断路器状态诊断。

采用 2.2 所述方法，多次重复试验，采集线圈电流波形，提取特征量。随机划分 80% 为训练样本，其余为测试样本以验证训练效果。利用 matlab 的 SVM 工具包进行分类，诊断结果如图 15 所示。

```

optimization finished, #iter = 10
nu = 0.248021
obj = -1.633663, rho = 0.284142
nSV = 8, nBSV = 5
Total nSV = 33
Accuracy = 100% (14/14) (classification)
    
```

图 15 利用 SVM 实现直流断路器状态诊断

从图 15 的诊断结果来看，SVM 模式识别算法对直流断路器模拟的 7 种状态能够实现分类，即能够实现直流断路器故障诊断。

4 结论与展望

本文对牵引变电站直流断路器分合闸线圈展开研究。首先分析了该直流断路器分合闸过程线圈电流，然后在离线条件下测量多种情况下分合闸线圈电流，经过预处理和电流包络极值法提取电流波形中的特征点，最后采用 SVM 实现该直流断路器状态诊断。结果表明：文中提取线圈电流特征值的方法和 SVM 诊断算法，能够较好实现基于线圈电流的牵引变电站直流断路器状态监测和诊断。在后面的处理中，建议首先对该直流断路器模拟故障建立故障数据库，为故障诊断提供更多样本；其次，要从多参量、多传感器融合的角度全面研究特征量的提取算法，最后基于故障数据库，研究该直流断路器劣化趋势。

参考文献：

- [1] Kotra S, Mishra M K. Design and Stability Analysis of DC Microgrid with Hybrid Energy Storage System [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, (99): 1-1.
- [2] 彭在兴, 王 颂, 刘 芹, 等. 高压断路器分合闸线圈电流采集实验平台与故障模拟实验研究 [J]. 高压电器, 2018, 54 (7): 248-253.
- [3] 周凯峰, 李海涛, 薛 峰, 等. GIS 分合闸线圈电流特征分析及故障诊断 [J]. 电气自动化, 2017, 39 (2): 95-97, 102.
- [4] 赵书涛, 朱继鹏, 王 波, 等. 断路器控制线圈电流特征诊断故障的技术分析及展望 [J]. 华北电力大学学报 (自然科学版), 2018, 45 (5): 70-77.
- [5] 杜小康, 陈志英. 高压断路器合(分)闸线圈电流信号特征值提取方法研究 [J]. 电气应用, 2018, 37 (15): 26-30.
- [6] 王 森. 高压断路器故障诊断算法的研究与应用 [D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [7] 陈志英, 周小娜, 卢超龙. 高压断路器合(分)闸线圈电流在线监测系统的研制 [J]. 厦门理工学院学报, 2016, 24 (5): 6-12.
- [8] 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.
- [9] 荣命哲, 贾申利, 王小华. 电器设备状态检测 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [10] 陈 盟. 牵引变电所真空断路器在线监测管理系统的研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- [11] 欧阳强强. 主流监督式机器学习分类算法 [DB/OL]. [2017-05-16]. <https://blog.csdn.net/ouyangqq2017/article/details/72235490>.