

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241028

## 基于圆坐标表征法的换流变压器励磁涌流辨识研究

龙启<sup>1</sup>, 杨旭<sup>1</sup>, 薛淑鹏<sup>1</sup>, 黎卫国<sup>1</sup>, 彭翔<sup>1</sup>, 杨光辉<sup>2</sup>, 段雄鹰<sup>2</sup>, 廖敏夫<sup>2</sup>

(1. 中国南方电网超高压输电公司电力科研院, 广东 广州 510663;

2. 大连理工大学电气工程学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 针对特高压直流系统换流变产生的励磁涌流导致的差动保护误动作问题, 现阶段仍未能完全解决。详细分析了换流变励磁涌流工况下传统差动保护的适应性问题, 并提出了一种基于圆坐标表征图像对故障电流和励磁涌流进行判别的方法。首先, 在 Simulink 仿真平台上建立变压器内部故障与励磁涌流系统仿真模型, 从而获得大量的三相差流仿真数据。其次, 引入了圆坐标表征变换, 将原始及平移后的三相差流作为动点的二维坐标, 发现在不同工况下双差动电流形成的动点轨迹图像有显著差异, 进而将仿真数据变换为轨迹图像样本集。最后, 通过比较 6 种常见的机器学习算法对轨迹图像样本集的分类性能, 采用具有最佳综合性能的 VGG16 网络模型, 对仿真、实验及现场录波等数据得到的电流轨迹图像进行识别分类, 实现故障和涌流辨识。结果表明, 所提方法的辨识准确率高, 避免了传统差动保护误动作的问题; 且在不同工况下均有良好的适应性, 降低了保护方案的复杂程度。

**关键词:** 换流变差动保护; 二次谐波制动; 保护闭锁; 励磁涌流; 圆坐标表征法; VGG16

### Research on identification of converter transformer inrush current based on circular coordinate representation method

LONG Qi<sup>1</sup>, YANG Xu<sup>1</sup>, XUE Shupeng<sup>1</sup>, LI Weiguo<sup>1</sup>, PENG Xiang<sup>1</sup>, YANG Guanghui<sup>2</sup>, DUAN Xiongying<sup>2</sup>, LIAO Minfu<sup>2</sup>

(1. Electric Power Research Institute of EHV Power Transmission Company, China Southern Power Grid, Guangzhou 510663, China;

2. School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** The problem of differential protection mis-operation caused by magnetizing inrush current of converter transformers in UHVDC systems has yet to be fully resolved. This paper presents a detailed analysis of the adaptability of traditional differential protection under transformer inrush current conditions and proposes a novel method for discriminating the fault current and magnetizing inrush current based on the circular coordinate representation images. First, a simulation model for transformer internal fault and magnetizing inrush system is built in Simulink, generating a large dataset of three-phase differential current simulations. Then, the circular coordinate transformation is introduced, in which both the original and translated three-phase differential currents are treated as 2D coordinates of dynamic points. Significant trajectory differences between the two differential current under various conditions are observed, and the simulation data are further transformed into the trajectory image sample set. Finally, the classification performances of six common machine learning algorithms on the trajectory image dataset are compared. The VGG16 model, selected for its superior overall performance, is used to identify and classify the current trajectory images derived from simulations, experiments, and field recording, effectively distinguishing between faults and inrush currents. The results show that the proposed method has high prediction accuracy and avoids mis-operation in traditional differential protection. Additionally, it demonstrates good adaptability under various operating conditions and reduces the complexity of protection schemes.

This work is supported by the Science and Technology Project of China Southern Power Grid (No. CGYKJXM20220346).

**Key words:** converter transformer differential protection; second harmonic braking; protection blocking; magnetizing inrush current; circular coordinate representation method; VGG16

基金项目: 南方电网公司科技项目资助 (CGYKJXM20220346); 国家自然科学基金项目资助 (52177131)

## 0 引言

高压直流输电 (high voltage direct current transmission, HVDC) 是一种远距离、大容量输送电及连接非同步运行电网的有效方法。与传统的交流输电相比, 它具有输送功率大、损耗低、控制灵活性强、异步互联等明显优势, 已成为大容量输电的重要形式, 其系统的可靠性和安全性对整个电力系统的运行有着重要的影响<sup>[1-4]</sup>。换流变压器作为 HVDC 系统中的核心设备, 将交流系统与直流输电线路隔离开来, 并为换流阀提供所需要的电压, 因此它的安全运行对高压直流输电系统的安全稳定起着及其重要的作用。差动保护因其操作简单、灵敏度高、稳定性好而被作为换流变主要的保护手段<sup>[5]</sup>。然而, 差动保护的一个重大挑战是能否可靠区分变压器励磁涌流和内部故障。历年变压器现场数据统计表明, 励磁涌流是导致变压器保护动作正确率长年偏低的主要原因之一。

为了避免励磁涌流造成差动保护的误动作, 影响变压器的可靠运行, 许多改进方法被提出。第一类是仅基于电流量的判别方法, 其中基于二次谐波制动原理识别励磁涌流并使差动保护闭锁的方法应用最为广泛<sup>[6-8]</sup>。此外, 还有基于间断角原理<sup>[9-10]</sup>、波形相关性原理<sup>[11-12]</sup>和波形对称原理<sup>[13-14]</sup>等的判别方法。然而, 现代变压器铁芯往往采用冷轧硅钢片等材料, 导致在某些工况下换流变励磁涌流中的二次谐波含量较低, 低于设定的保护阈值, 从而造成基于二次谐波判据的差动保护误动作。其余方法的使用率较低, 间断角原理对硬件要求较高, 且面临着 CT 传变引起的间断角变形问题; 另外两种方法由于励磁涌流的波形受多种因素影响, 不确定性较高, 判定方法存在一定困难, 且在故障刚发生时, 电流波形不是标准的正弦波, 在实际系统中一定要考虑状况的多样性和波形的复杂性。第二类是在第一类方法的基础上, 结合电压量的励磁涌流辨别方法, 包括差有功原理<sup>[15-16]</sup>和阻抗原理<sup>[17-18]</sup>等。这类方法使用率也比较低, 由于对比第一类方法多出了电压量的部分, 判断手段更加综合, 保护的可靠性得到了一定提升, 但是采集电压量需要引入电压互感器 (potential transformer, PT), 这样不仅会增加投资成本, 同时 PT 发生故障的情况也会增加保护出错的风险。综上, 现阶段实际应用的保护算法仍然是基于电流量的励磁涌流辨别方法, 以二次谐波制动判据应用最为广泛。因此, 亟需提出励磁涌流工况下的差动保护优化方案, 在二次谐波判据下的差动保护发生误动作时系统仍能够准确地识别涌流与

故障电流, 从而避免换流变励磁涌流二次谐波含量较低造成闭锁信号失效引起保护误动作的问题。

本文提出了一种基于圆坐标表征法识别电流轨迹图像的新型时域保护方案, 在理论上分析了不同工况下电流轨迹图的特性, 对保护方案进行了合理设计。仿真及实验表明, 本文所提方案的预测准确率高, 避免了传统差动保护误动作的问题; 且在不同工况下均有良好的适应性, 降低了保护方案的复杂程度。

## 1 HVDC 系统差动保护动作行为分析

### 1.1 保护原理分析

换流变是特高压直流输电系统中的核心组成部分, 所以其保护的可靠性、速动性等方面都有较高的要求。目前, 比率式差动保护作为换流变的传统保护手段, 可以对故障进行精确快速地切除, 一般还会配置二次谐波判据与纵联差动保护一同判断, 其中, 比率式差动保护的制动电流  $I_{re}$ 、动作电流  $I_d$  如式(1)所示。

$$\begin{cases} I_d = |I_A - I_C - NI_a| \\ I_{re} = 0.5 |I_A - I_C + NI_a| \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $I_A$  与  $I_C$  分别为一次侧 A、C 相的电流相量;  $I_a$  为二次侧的 A 相电流相量;  $N$  为换流变变比。动作判据为

$$\begin{cases} I_d > I_{ds} & I_{re} \leq I_{re,0} \\ I_d > k(I_{re} - I_{re,0}) + I_{ds} & I_{re} > I_{re,0} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $I_{ds}$  是动作阈值, 一般取  $(0.2 \sim 0.5)I_c$ ,  $I_c$  是二次侧的额定值;  $I_{re,0}$  是制动拐点值;  $k$  一般取  $0.5 \sim 1$ 。

当变压器产生励磁涌流时,  $I_d$  可能会超过差动保护的触发阈值, 从而导致保护误动作<sup>[19]</sup>。在励磁涌流工况下,  $I_d$  中含有较高的二次谐波分量, 故利用式(3)构成基于二次谐波保护的判断条件, 当满足该判断条件时, 保护就会闭锁。

$$\frac{I_2}{I_1} > k_2 \quad (3)$$

式中:  $I_2/I_1$  是  $I_d$  中二次谐波幅值占基波幅值的百分比;  $k_2$  通常取 15%。

### 1.2 传统差动保护适应性分析

现代变压器铁芯往往采用冷轧硅钢片等材料, 导致换流变励磁涌流中的二次谐波含量较低<sup>[20]</sup>。在一些工况下, 其含量可能会低于设定值, 造成基于二次谐波判据的比率式差动保护的误动作。

图 1 是某特高压换流站的励磁涌流录波, 由上到下分别是: 高压 1 侧 A 相电流、高压 1 侧 B 相电流、高压 1 侧 C 相电流。

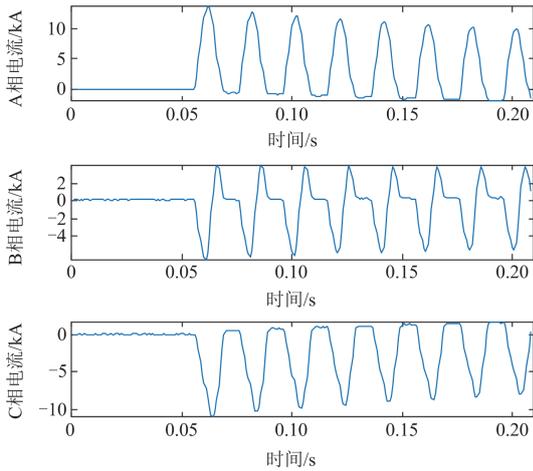


图1 换流变压器高压1侧三相电流

Fig. 1 Three-phase current on HV1 side of converter transformer

图2是励磁涌流工况下传统差动保护的动作情况，由上到下分别是：A相差流  $I_d$ 、纵差A相二次谐波含量  $h_2$ 、比率制动信号RB、二次谐波闭锁信号BRK及跳闸信号TRIP。从图2中可知，制动信号在变压器产生励磁涌流的5ms后动作。对  $I_d$  的二次谐波含量进行分析，可以发现出现励磁涌流18ms后，其二次谐波含量降低到14.4%，低于制动值15%，从而使比率制动信号失效，传统差动保护在18ms后误动作。

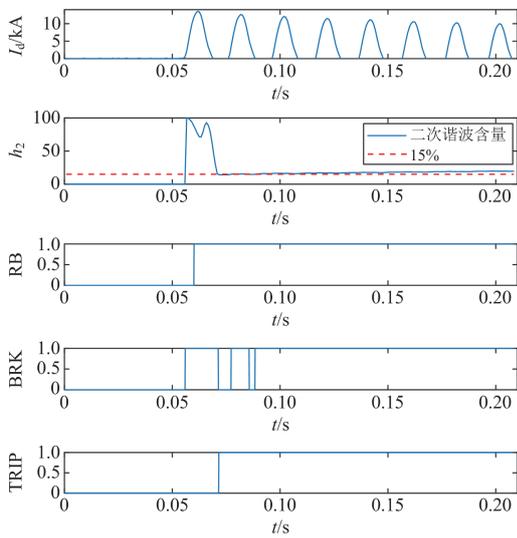


图2 保护动作信号

Fig. 2 Protection action signals

## 2 基于圆坐标表征法的换流变压器励磁涌流辨识方案

### 2.1 圆坐标表征法

圆坐标表征法是利用圆上点的坐标来表征交

流系统中的电流，从而将电流表达式转化为电流轨迹图像。在交流系统中，电流的表达式为： $i(t) = A \cos(\omega t + \alpha)$ ，对该电流进行1/4个周期的平移，得到新的电流表达式： $i_1(t) = A \sin(\omega t + \alpha)$ 。其中， $\omega$ 为电源角频率； $\alpha$ 为初始相角。根据表达式(4)，将原始及平移后的电流作为动点的二维坐标，动点轨迹可以构成一个半径为  $A$  的圆。

$$i^2(t) + i_1^2(t) = A^2 \quad (4)$$

式中： $i(t)$ 为当前时刻的电流； $i_1(t)$ 为平移变换后的电流； $A$ 为待定参数。

当变压器处于内部故障、励磁涌流等工况时，差动电流将在短时间内发生显著的改变。因此，变压器的运行状态可以通过差动电流的特征变化得到清晰的反映。

所以，利用圆坐标表征法的思想对差动电流进行处理，分别以原始的差动电流数据为横轴，以对应平移后三相电流数据为纵轴，构造出电流轨迹图像，进而分析不同工况下电流轨迹图像的异同。

### 2.2 不同工况下的差动电流轨迹图像

#### 2.2.1 内部故障工况

变压器内部故障可导致差动电流瞬间变化。具体来说，内部故障工况下的差动电流通过一个暂态过程从一个振幅较小的正弦波转变为另一个振幅较大的正弦波，此时的差动电流主要由高幅值基波分量和衰减直流分量组成，数学模型如式(5)所示<sup>[21]</sup>。

$$i_s = A_s \cos(2\pi f_1 t + \alpha) + D_s \exp(-t/T_s) \quad (5)$$

式中： $A_s$ 为基波分量幅值； $D_s$ 为直流分量幅值； $f_1 = 50 \text{ Hz}$ ； $T_s$ 为衰减时间常数，与故障电阻成反比。

直流分量的衰减与故障电阻大小有关。衰减时间常数随着故障电阻的增大而减小，差动电流中所含的直流分量也随之减小。该工况可大致分为故障电阻值大、小两类，当故障电阻越大时，差动电流中所含的衰减直流分量越小，直至故障电阻值增大到时间常数可以忽略，则直流分量可以忽略不计，其数学表达式可近似为式(5)中的第一项，与非故障情况下的余弦交流信号相同。利用圆坐标变换法将余弦函数平移1/4周期后得到同相位的正弦函数，余弦与正弦信号分别映射到横轴和纵轴，则动点轨迹可以构成一个半径为  $A_s$  的圆，如图3(a)所示；反之，故障电阻越小，衰减时间常数越大，差动电流中所含的直流分量衰减越慢，不可忽略。取一组故障电阻值小的故障差动电流信号，同样地，利用圆坐标变换法绘出该信号的动点轨迹图，如图3(b)所示。可以发现，直流分量的加入使差动电流构造的动点轨迹图像不再为圆，轨迹中心发生偏移，轨迹图像出现缺口。随着直流分量的衰减，故障电流信

号逐渐转变回余弦交流信号, 动点轨迹图像缺口逐渐减小并变回圆, 轨迹中心逐渐接近圆心。

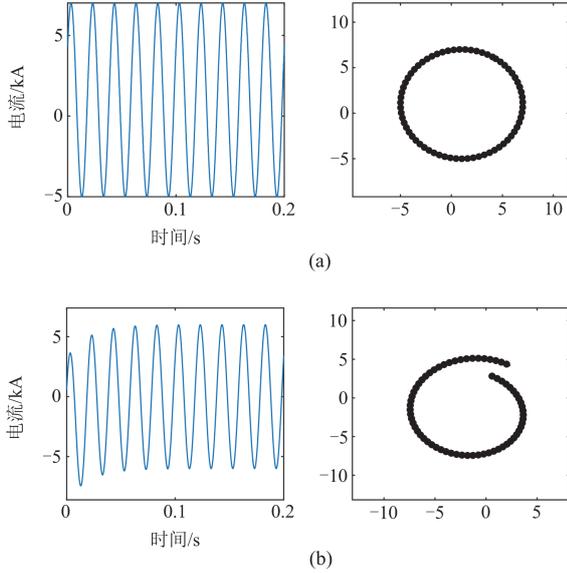


图 3 内部故障工况下的电流波形及动点轨迹图

Fig. 3 Current waveforms and moving point trajectories under internal fault conditions

### 2.2.2 励磁涌流工况

当变压器空载合闸时, 差动电流转变为励磁涌流。以单相变压器为例<sup>[22]</sup>, 假设励磁涌流在短时间不衰减, 则其数学模型如式(6)所示。

$$\begin{cases} i(t) = 0 \times \varepsilon(-t + t_0) + i_s \varepsilon(t - t_0) \\ i_s \approx \begin{cases} \frac{U_m}{\omega L} \left[ \cos \alpha - \cos(\omega t) + \frac{\psi_r - \psi_s}{\psi_m} \right] & t_1 < t < t_2 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \\ \psi_m = \frac{LU_m}{\sqrt{r^2 + (\omega L)^2}} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\varepsilon$  为阶跃函数;  $t_0$  为通电时间;  $U_m$  为电压幅值;  $\psi_r$  为剩磁;  $\psi_s$  为饱和磁通;  $\psi_m$  为磁通幅值;  $r$  和  $L$  分别为等效电阻和等效电感; 铁芯在  $t_1 \sim t_2$  时段处于饱和状态, 产生励磁涌流。

如果铁芯磁饱和程度不同, 则对应的励磁涌流的波形特征也不同, 该工况可大致分为饱和程度高、低两类。当铁芯磁饱和程度越高时, 变压器产生的励磁涌流波形对于时间轴一侧的偏向性越高, 直至波形完全处于时间轴一侧。对高磁饱和铁芯产生的励磁涌流进行圆坐标变换, 利用双差动电流形成动点轨迹图, 如图 4(a)所示; 反之, 当铁芯磁饱和程度越低时, 变压器产生的励磁涌流波形对于时间轴一侧的偏向性越弱, 直至铁芯不饱和, 转变为正常工况下的余弦电流波形, 关于时间轴对称分布。取

一组磁饱和程度低的励磁电流, 对该励磁涌流信号进行圆坐标变换, 利用双差动电流形成动点轨迹图, 如图 4(b)所示。

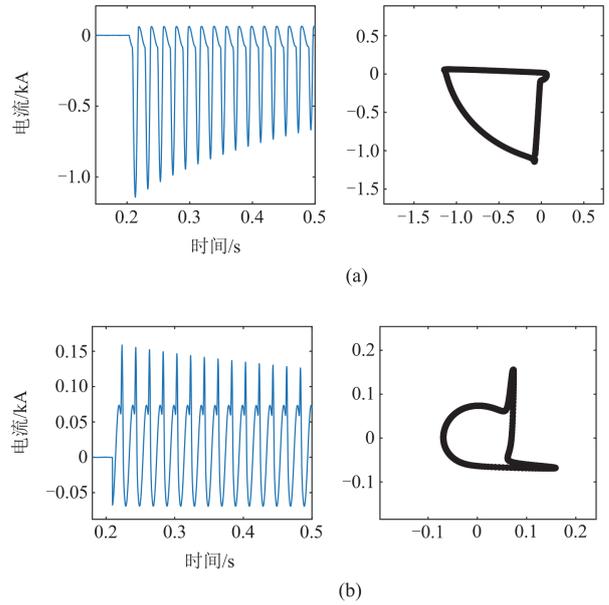


图 4 励磁涌流工况下的电流波形及动点轨迹图

Fig. 4 Current waveforms and moving point trajectories under excitation inrush conditions

根据上述分析, 在内部故障和励磁涌流两种工况下, 差动电流所构造的动点轨迹图像存在显著差异, 且图像简洁直观。因此, 利用机器学习算法对不同工况下的轨迹图像进行识别分类, 完成对变压器内部故障和励磁涌流的判别是可行的。坐标变换方法将二次谐波判据方法中需要量化的谐波含量信息转变为简洁直观的图像信息, 通过图像识别来分辨内部故障与励磁涌流两种工况, 直接绕过关于二次谐波含量的讨论, 从而避免了基于二次谐波判据的差动保护误动作问题。另外, 在发生扰动后, 也可实现对内外故障的区分。

### 2.3 整体方案

基于圆坐标表征法的换流变压器励磁涌流辨识的整体方案流程如图 5 所示。图中:  $CT_{pn}$  和  $CT_{sn}$  分别为一、二次侧的电流互感器, 其中  $n$  的取值为“1”、“2”和“3”, 分别代表 A 相、B 相和 C 相;  $N_1:N_2$  为变压器匝数比。

根据图 5, 本文提出的涌流辨识方法的具体步骤如下所述。

1) 利用 Matlab/Simulink 中的电力系统模块搭建系统仿真模型, 采集励磁涌流和内部工况下的一、

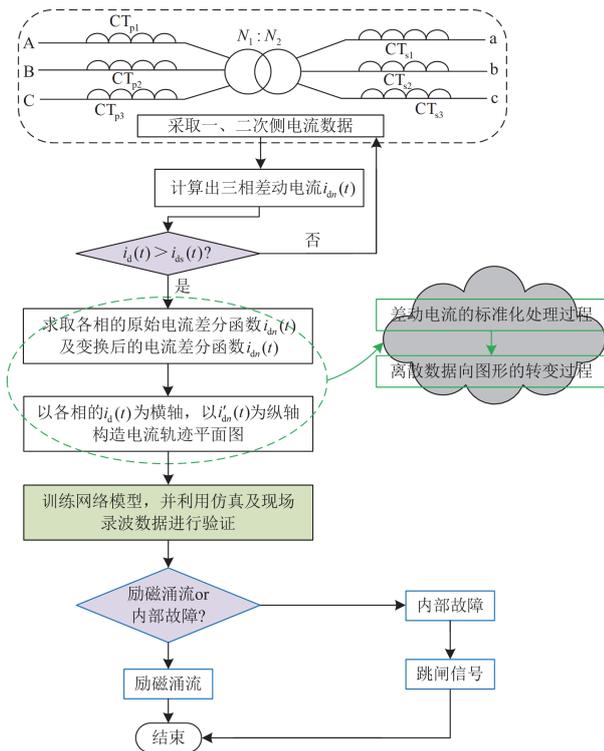


图 5 换流变压器励磁涌流辨识方案逻辑框图

Fig. 5 Logic block diagram of magnetizing inrush current identification scheme for converter transformer

二次侧电流数据, 计算得到三相差动电流  $i_{dn}(t)$ 。

2) 对原始差动电流  $i_{dn}(t)$  进行 1/4 个周期的平移

变换得到  $i'_{dn}(t) = i_{dn}(t - T_s / 4)$ 。

3) 分别以各相  $i_{dn}(t)$  为横轴, 以同相的  $i'_{dn}(t)$  为纵轴构造电流轨迹平面图像。

4) 收集不同工况下的图像, 生成图像识别模型的样本集, 按照 7:3 的比例将样本集数据划分为训练和测试集数据。利用前者对网络模型进行训练, 后者检验模型的训练效果。

5) 利用现场故障录波器记录的励磁涌流与变压器内部故障数据, 测试该模型的有效性。

### 3 电流轨迹图像识别模型的选取

#### 3.1 仿真模型的建立及样本集的获取

在 Simulink 仿真平台上建立变压器内部故障与励磁涌流系统仿真模型, 生成图像识别模型的样本集数据, 具体模型如图 6 所示。该模型取电压源大小为 500 kV、变压器额定电压分别为一次侧 525 kV 和二次侧 170 kV、频率均为 50 Hz, 其中变压器为 3 台单相 3 绕组变压器, 将其高压绕组作为变压器原边, 中压绕组与低压绕组级联作为变压器副边, 所构成的等效双绕组变压器的参数如下: 容量额定值为 750 MVA; 电阻、漏电抗和励磁电阻分别为 0.002 p.u.、0.009 p.u. 和 5000 p.u.; 饱和特性曲线取默认参数; 绕组取星-星型连接; 使用 ode23tb 算法, 每次的运行时间取 0.6 s。

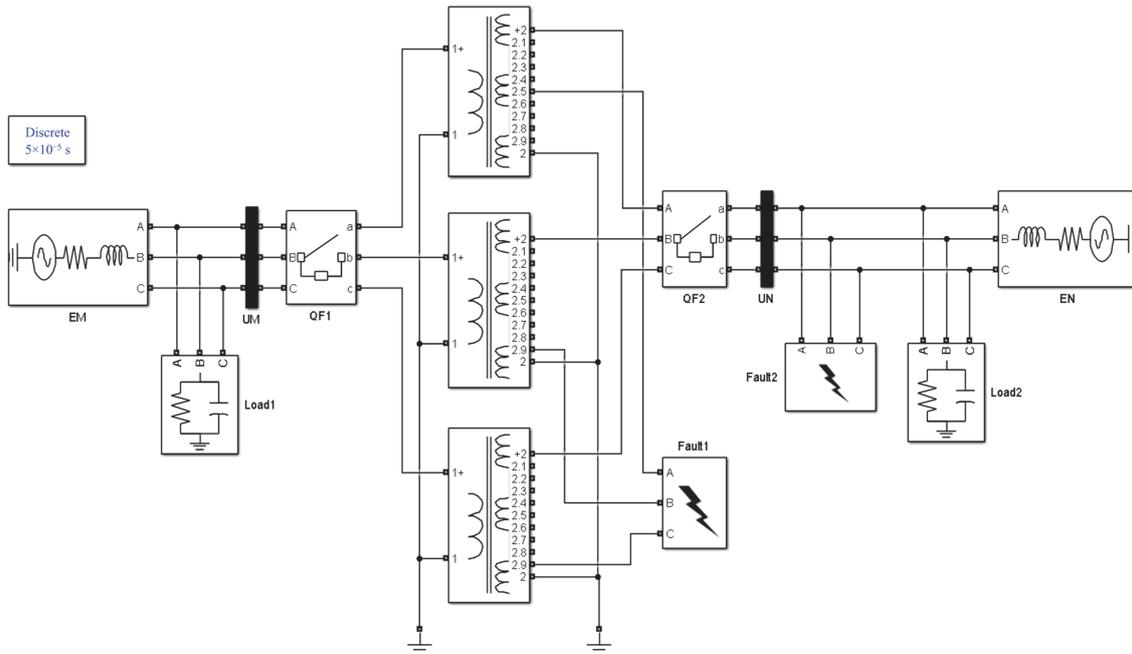


图 6 变压器内部故障与励磁涌流系统仿真模型

Fig. 6 Simulation modeling of transformer internal faults and magnetizing inrush current systems

### 3.2 模型参数的选择

如 3.1 节所述, 本文建立了基于 Simulink 的变压器内部故障与励磁涌流系统仿真模型。对于励磁涌流的工况下, 配置 3 种类型的仿真参数, 即不同的合闸角度、剩磁和过励磁倍数。在内部故障的工况下, 配置了 4 种类型的故障参数, 即不同的合闸角度、匝间短路百分比、故障绕组的位置和故障电阻, 不同工况类型下的变量范围如表 1 所示。

表 1 工况类型及变量范围

工况类型	变量范围
励磁涌流	合闸角度 $\beta$ : $0^\circ, 30^\circ, \dots, 330^\circ$
	剩磁 $\psi_r$ : $0, 10\%, \dots, 70\%$
	过励磁倍数 $m$ : $1.0, 1.1, 1.2, 1.3$
内部故障	合闸角度 $\beta$ : $0^\circ, 30^\circ, \dots, 330^\circ$
	匝间短路百分比: $1\%, 2\%, 3\%, 4\%$
	故障绕组位置: $20\%, 30\%, \dots, 90\%$
	故障电阻: $5 \Omega, 100 \Omega$

将仿真模型进行遍历运行, 采样频率为 1 kHz, 共生成 1552 个样本, 由于在某些角度合闸时, 并不产生励磁涌流, 故剔除一些不合格数据, 剩下的 1475 个样本作为网络模型的样本集数据。

为了提高网络的适应性, 将第 2.2 节中提到的 4 种主要类型按 7:3 的比例随机划分, 如图 7 所示。最终的训练集包含 1033 个样本, 用于进行模型训练, 测试集包含 442 个样本, 用于验证模型有效性。

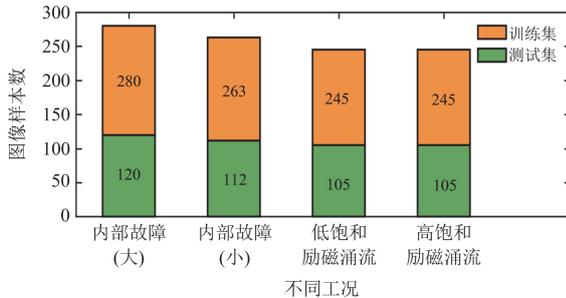


图 7 不同工况下的图像样本数

Fig. 7 Number of image samples under different working conditions

### 3.3 不同网络模型的性能分析

将 6 种常见的机器学习算法对轨迹图像样本集的分类性能进行比较, 其中包括支持向量机(support vector machine, SVM)、朴素贝叶斯算法(naive Bayes, NB)、视觉几何群网络(visual geometry group, VGG) 16 模型、卷积神经网络(convolutional neural networks, CNN)、K 近邻算法(K-nearest neighbor, KNN)和决策树(decision tree, DT), 除了 VGG16 与 CNN 属于端

到端的神经网络分类算法, 其余 4 种方法属于传统的分类算法。为了更全面地比较各种分类算法的性能, 使用接受者操作特性曲线(receiver operating characteristic curve, ROC)来衡量分类效果。ROC 曲线上的每个点都反映着对同一信号刺激的感受性, 是最能反映分类问题中算法整体性能的综合指标<sup>[23-24]</sup>。ROC 曲线的横轴为负正类率(false positive rate, FPR), 纵轴为真正类率(true positive rate, TPR)。FPR 与 TPR 的计算表达式分别为

$$R_{\text{FPR}} = \frac{\sum_{i=1}^k R_{\text{FP}_i}}{\sum_{i=1}^k (R_{\text{FP}_i} + R_{\text{TN}_i})} \quad (7)$$

$$R_{\text{TPR}} = \frac{\sum_{i=1}^k R_{\text{TP}_i}}{\sum_{i=1}^k (R_{\text{TP}_i} + R_{\text{FN}_i})} \quad (8)$$

式中:  $k$  表示工况类型的数量; T/F 表示真或假; P/N 表示正或负; FP 为假正类(false positive, FP), 表示预测为正类, 但是预测错误; TP 为真正类(true positive, TP), 表示预测为正类, 且预测正确;  $R_{\text{FP}_i}/R_{\text{TP}_i}$  表示第  $i$  类的 FP/TP; FN 为假负类(false negative, FN), 表示预测为负类, 但是预测错误; TN 为真负类(true negative, TN), 表示预测为负类, 且预测正确;  $R_{\text{FN}_i}/R_{\text{TN}_i}$  表示第  $i$  类的 FN/TN。

所以, FPR 表示正预测样本中真实负类样本与所有负类样本的比例, TPR 表示正预测样本中真实正类样本与所有正类样本的比例。通过对 softmax 输出设置不同的阈值, 可以得到不同的 FPR 和 TPR 点, 进而由这些点构成 ROC 曲线。ROC 曲线的一大优点是, 当正、负样本的分布发生变化时, 曲线的形状基本保持不变。因此, 该评价指标不仅可以减少不同测试集带来的干扰, 而且可以更客观地衡量分类算法的性能, 并可以进一步通过计算曲线下的面积(area under the curve, AUC)来量化分类性能。不同分类算法的 ROC 曲线如图 8 所示。

根据 TPR 和 FPR 的定义, 理想目标应为 TPR 为 1, FPR 为 0, 即理想目标的 AUC 为 1.0。也就是说, ROC 曲线下的面积越接近于 1, 或者说曲线越靠近点(0,1), 该算法的分类性能越好。由图 8 可知, 6 种机器学习模型 SVM、NB、CNN、KNN、DT 和 VGG16 的 AUC 分别为: 0.7797、0.9611、0.9893、0.9975、0.9977 和 1。故 SVM 表现出的分类性能最差, 而 VGG16 的 ROC 曲线下的面积为 1, 最接近理想分类目标(AUC 为 1.0), 表现出的分类性能最佳。

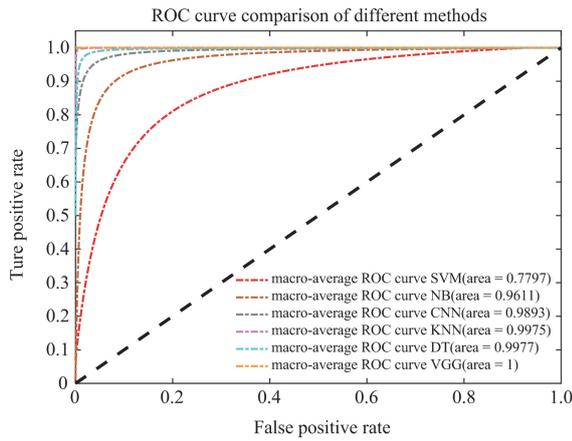


图 8 不同算法的 ROC 曲线

Fig. 8 ROC curves for different algorithms

此外, 选取 4 种性能指标进行对比分析, 准确率(Accuracy)、精确率(Precision)、灵敏度(Sensitivity)和特异度(Specificity)分别如式(9)一式(12)所示。

$$M_{Accuracy} = \frac{R_{TP} + R_{TN}}{R_{TP} + R_{TN} + R_{FP} + R_{FN}} \quad (9)$$

$$M_{Precision} = \frac{R_{TP}}{R_{TP} + R_{FP}} \quad (10)$$

$$M_{Sensitivity} = \frac{R_{TP}}{R_{TP} + R_{FN}} \quad (11)$$

$$M_{Specificity} = \frac{R_{TN}}{R_{FP} + R_{TN}} \quad (12)$$

各个算法准确率的计算结果如图 9 所示。

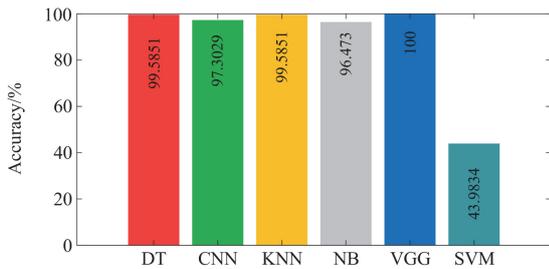


图 9 不同算法的准确率对比

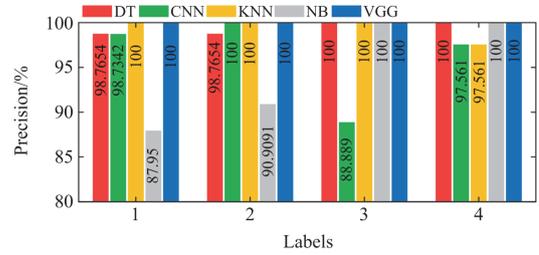
Fig. 9 Comparison of the accuracy of different algorithms

由图 9 可见, DT、CNN、KNN、NB、VGG 的准确率均高于 90%, 而 SVM 的准确率低于 50%, 说明 SVM 的计算结果没有参考意义, 因此后续不再讨论 SVM 算法各指标的计算结果。

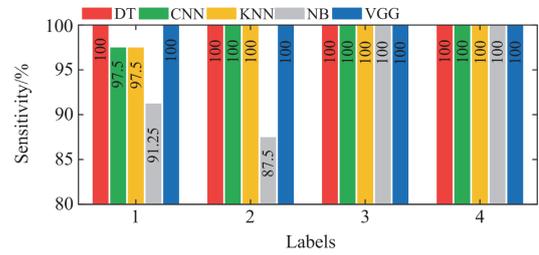
其余 5 种算法的精确率、灵敏度和特异度计算结果, 如图 10 所示。

由图 10(a)可见, 不同算法在不同类别下的精确率计算结果不同, 可明显看出, NB 综合计算结果

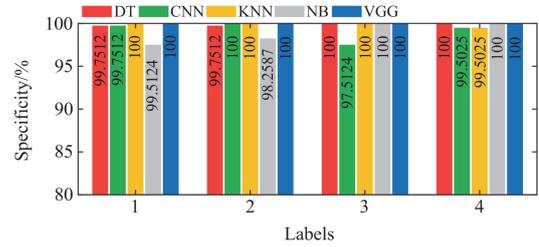
最低, VGG16 的综合计算结果最高, 为 100%; 同样, 不同算法的灵敏度与特异度计算结果也不同, 如图 10(b)、图 10(c)所示, NB 综合计算结果仍为最低, VGG16 具有最高的灵敏度与特异度, 为 100%, 高于其他模型。



(a) 精确率



(b) 灵敏度



(c) 特异度

图 10 不同算法精确率、灵敏度和特异度计算结果对比

Fig. 10 Calculation results comparison of the accuracy, sensitivity and specificity of different algorithms

总体而言, 通过对比 3 种指标的计算结果, 各个算法模型对电流轨迹样本集的特异度结果最高, 均超过 95%; VGG16 模型无论在精确率、灵敏度还是特异度的计算结果方面都有很好的性能。

结果表明, 在样本集的不同类别下, VGG16 比 DT、CNN、KNN 和 NB 具有更强的泛化能力和显著的综合性能。故在后续工作中采用 VGG16 网络模型对仿真、实验及现场录波等数据得到的电流轨迹图像进行识别分类, 实现故障和涌流辨识。

## 4 数据验证

### 4.1 实验数据的获取

以实验室现有设备搭建励磁涌流实验回路, 如

图 11 所示。该实验回路主要由电源系统、机构驱动回路、调压器、相位控制器、真空断路器、单相双绕组变压器以及电流钳等测量设备构成。

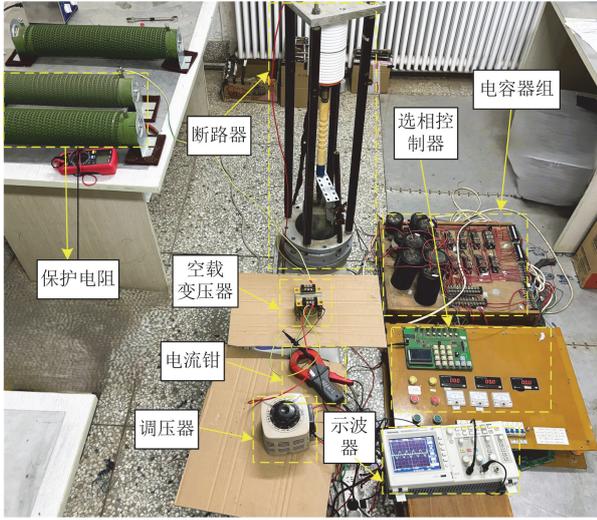


图 11 励磁涌流实验回路

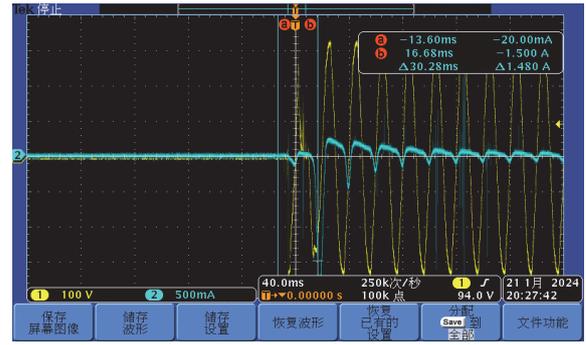
Fig. 11 Experimental circuit for excitation inrush current

相位控制器利用晶闸管传输触发信号完成对电容器组的充放电，从而驱动带永磁机构的真空断路器动作，以实现断路器在特定相位分合闸的目的。将单相双绕组变压器作为实验对象，在示波器中观察由电流钳采集的励磁涌流信号波形，部分实验数据波形如图 12 所示，其中黄色曲线为电压波形，蓝色曲线为励磁涌流波形。

利用相位控制器得到不同合闸角度下的励磁涌流数据，将这些数据进行圆坐标变换生成测试样本，输入到 VGG16 网络中进行判别。实验共得到励磁涌流波形数据 36 组，以图 12 中的两组实验数据为例，励磁涌流波形及其电流轨迹如图 13 所示。

#### 4.2 dSPACE 半实物仿真系统数据的获取

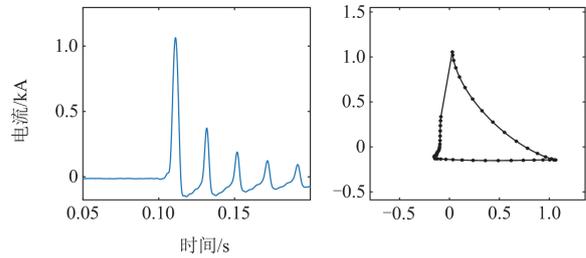
基于 dSPACE 半实物仿真系统完成对变压器故障电流数据的采集，该实验系统如图 14 所示。ControlDesk 是 dSPACE 的上位机软件，能够根据模



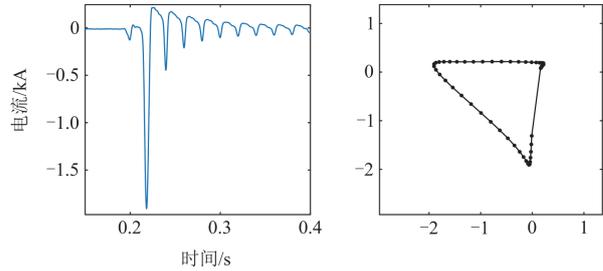
(b) 合闸角度为 120°, 剩磁为 0.3 p.u.

图 12 部分实验数据波形图

Fig. 12 Waveforms of some experimental data



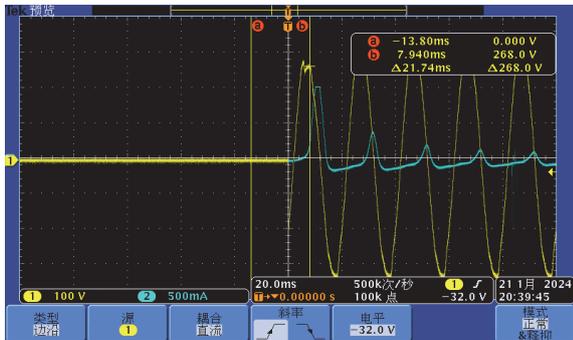
(a) 合闸角度为 30°, 剩磁为 0.1 p.u.



(b) 合闸角度为 120°, 剩磁为 0.3 p.u.

图 13 不同合闸角度下励磁涌流波形及其电流轨迹图

Fig. 13 Excitation inrush waveforms and their current trajectories at different closing angles



(a) 合闸角度为 30°, 剩磁为 0.1 p.u.

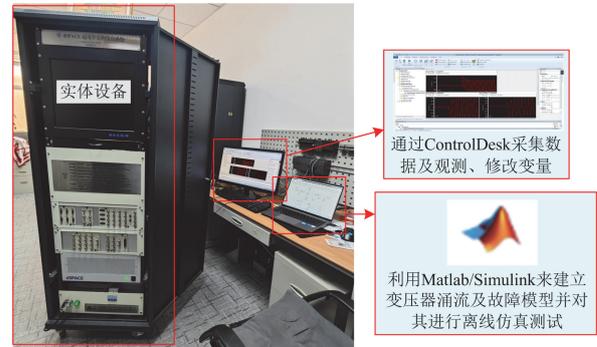


图 14 基于 dSPACE 的实验系统

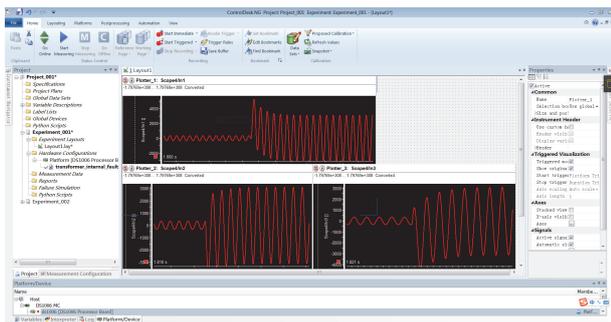
Fig. 14 dSPACE-based experimental system

型需求设计模块化的用户界面，以控制模型的仿真过程，并且可以实时显示出仿真过程中各个量的状态变化。

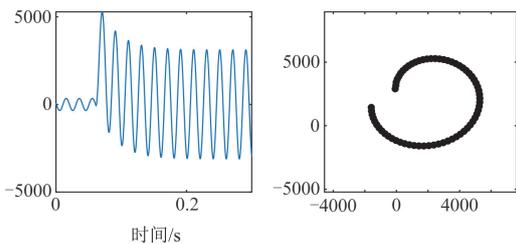
在 Matlab/Simulink 仿真平台上搭建好变压器内部故障系统仿真模型，可以通过此软件进行控制，从而完成在 dSPACE 平台的仿真实验测试。通过改变故障类型、故障位置、故障电阻和匝间短路比，进行了变压器内部故障下的运行测试，共得到 32 组故障电流录波数据，将这些数据进行圆坐标变换生成测试样本，输入到 VGG16 网络中进行判别。以三相接地短路故障为例，Controldesk 界面中的故障录波及其电流轨迹如图 15 所示。

### 4.3 现场录波数据验证

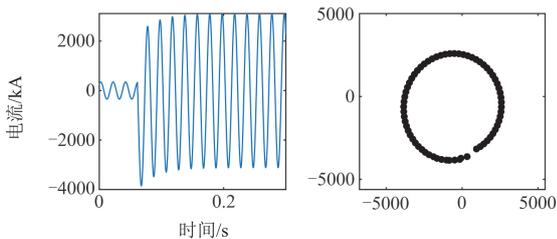
为进一步测试本文提出方法的有效性，对南方电网部分换流站现场故障录波器记录的励磁涌流与变压器内部故障数据进行处理，生成测试样本，输入到 VGG16 网络中进行判别。共有现场励磁涌流波形数据 40 组、变压器内部故障数据 37 组，部分录波数据波形如图 16 所示。



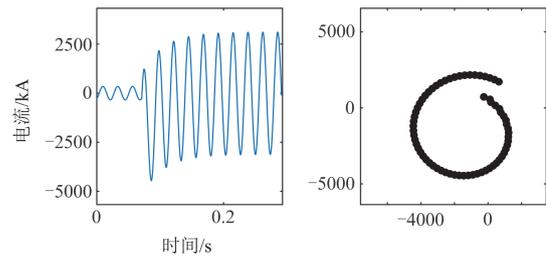
(a) Controldesk 界面中的故障录波图



(b) A相电流波形及其电流轨迹图



(c) B相电流波形及其电流轨迹图



(d) C相电流波形及其电流轨迹图

图 15 部分故障录波数据波形及其电流轨迹图

Fig. 15 Waveforms of some fault recording data and their current trajectories

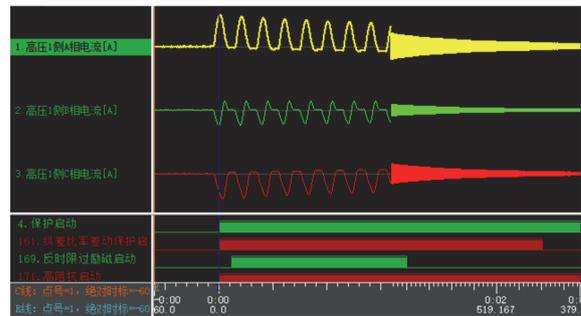
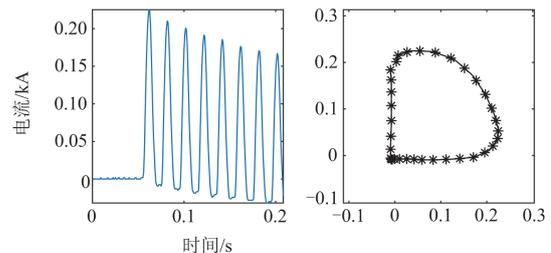


图 16 部分现场录波数据波形图

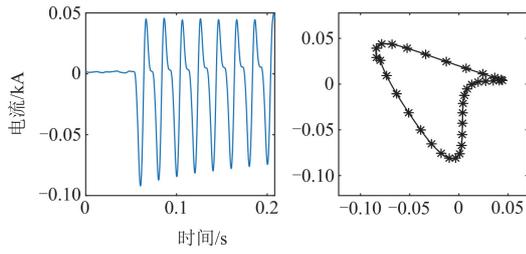
Fig. 16 Waveforms of some field recording data

选取现场事故分析中传统差动保护发生误动作的严重情况，例如某 500 kV CX#1 站用变充电时，变压器空载合闸产生励磁涌流，纵差 A 相二次谐波含量较低，导致现场基于二次谐波判据的差动保护误动作，A、B 相波形及其电流轨迹分别如图 17(a)和图 17(b)所示；500 kV KB 2 号站用变投运时，换流变空载合闸充电，产生励磁涌流的 A 相波形及其电流轨迹如图 17(c)所示。J 站换相失败的故障录波及其电流轨迹分别如图 18(a)和图 18(b)所示；K 站换相失败的故障录波及其电流轨迹如图 18(c)所示。

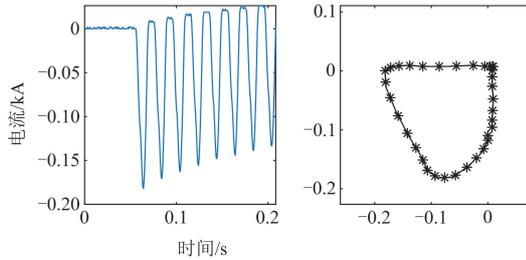
由 36 组实验数据、32 组 dSPACE 系统数据以及 77 组现场录波数据得到 145 张电流轨迹图像，将其放入原有的测试集样本中进行验证，其测试结果如表 2 所示。可以看到现有数据全部识别正确，进一步验证了本文提出方法的有效性。



(a) CX 500 kV #1 站用变空载合闸 A 相波形



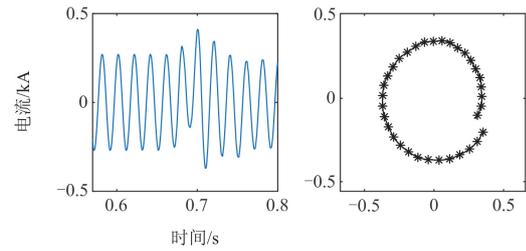
(b) CX 500 kV #1站用变空载合闸B相波形



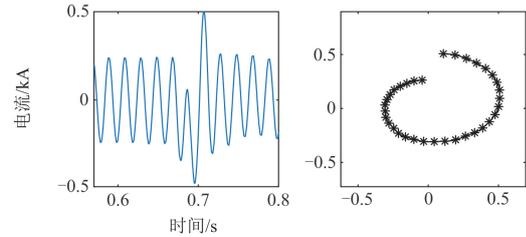
(c) KB 500 kV #2站用变空载合闸A相波形

图 17 现场励磁涌流波形及其电流轨迹图

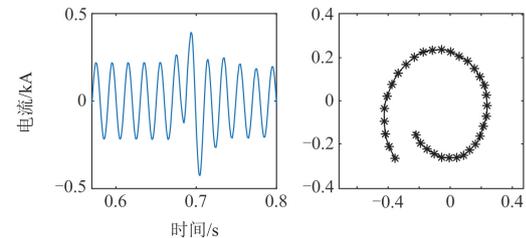
Fig. 17 Field magnetizing inrush current waveforms and their current trajectory diagrams



(a) J站换相失败故障B相录波



(b) J站换相失败故障C相录波



(c) K站换相失败故障A相录波

图 18 故障录波器波形及其电流轨迹图

Fig. 18 Fault recorder waveforms and their current trajectory diagrams

表 2 测试结果汇总表

Table 2 Summary of test results

工况类型	样本类型	样本数量	正确率/%
励磁涌流	仿真测试数据	210	100
	现场测试数据	40	100
	实验测试数据	36	100
内部故障	仿真测试数据	232	100
	现场测试数据	37	100
	dSPACE 系统数据	32	100

## 5 结论

1) 针对特高压系统换流变励磁涌流工况下基于二次谐波判据的传统差动保护误动作问题, 提出了一种基于圆坐标表征图像对故障电流和励磁涌流进行判别和保护优化方案。

2) 对比分析 6 种常见机器学习算法对电流轨迹图像样本集的 ROC 曲线图及各性能指标, 发现 VGG16 网络模型不仅具有较高的分类准确率和精确率, 而且具有显著的综合性能。故采用 VGG16 网络模型对仿真、实验及现场录波等数据得到的电流轨迹图像进行识别分类, 实现故障及涌流辨识。

3) 辨识准确率高, 无需人工设置阈值判据, 通过故障录波与仿真数据训练的模型即可完成励磁涌流与故障电流的辨别, 绕过了关于二次谐波含量的讨论, 从而避免了基于二次谐波判据的差动保护误动作问题。经过仿真测试集样本验证可以看出, 本文方法对两种工况均能准确判断; 现场录波器记录的励磁涌流与变压器内部故障数据进一步表明, 在某站换流变励磁涌流工况下的传统差动保护发生误动作时, 所提方法依然对两种工况全部辨别正确, 进而验证了该方法的有效性。

4) 在不同工况下均有良好的适应性, 降低了保护方案的复杂性。分析了不同工况条件下电流轨迹图像的差异, 包括内部故障(故障电阻大)、内部故障(故障电阻小)、励磁涌流(磁饱和程度高)和励磁涌流(磁饱和程度低), 标签分别为“1”、“2”、“3”、“4”, 均可正确识别。

## 参考文献

[1] 李宽, 黄强, 吕学宾, 等. 抑制高压直流系统后续换相失败的定关断角控制改进方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(6): 109-119.  
 LI Kuan, HUANG Qiang, LÜ Xuebin, et al. Enhanced extinction angle control for subsequent commutation failure mitigation in HVDC systems[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(6): 109-119.  
 [2] TAHERZADEH E, RADMANESH H, JAVADI S, et al.

Circuit breakers in HVDC systems: state-of-the-art review and future trends[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(3): 1-16.

[3] 王顺亮, 刘海军, 谢洋, 等. 基于模块化思想的 LCC-HVDC 改进小信号建模及交互稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(10): 84-94.  
WANG Shunliang, LIU Haijun, XIE Yang, et al. Improved small signal modeling and interaction stability analysis of LCC-HVDC based on modularization[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(10): 84-94.

[4] SHU Hongchun, JIANG Xiaohan, BO Zhiqian. Identifying inrush current for large-scale wind parks transformers based on difference function of differential current[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 38(3): 1768-1779.

[5] 杜丁香, 杨国生, 曹虹, 等. 基于相序差动电流特征差异的换流变压器匝间保护优化研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(17): 6576-6589.  
DU Dingxiang, YANG Guosheng, CAO Hong, et al. Research on the optimization of inter-turn protection of converter transformers based on the difference of phase sequence differential current characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(17): 6576-6589.

[6] 宋九渊, 符玲, 熊思宇, 等. 基于二阶泰勒系数的励磁涌流识别方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(3): 1020-1030.  
SONG Jiuyuan, FU Ling, XIONG Siyu, et al. Magnetizing inrush current identification method based on second-order Taylor derivative[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(3): 1020-1030.

[7] 陈争光, 刘一民, 王兴国, 等. 直流偏磁对二次谐波制动判据的影响及对策[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(5): 91-99.  
CHEN Zhengguang, LIU Yimin, WANG Xingguo, et al. Influences of DC bias on the criterion for second-order harmonic braking and the corresponding countermeasures[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(5): 91-99.

[8] 袁宇波, 陆于平, 李澄, 等. 三相涌流波形特征分析及差动保护中采用二次谐波相位制动的原理[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(19): 23-28.  
YUAN Yubo, LU Yuping, LI Cheng, et al. The characteristic analysis of three phase transformer inrush and the discussion of second harmonic restrained method using phase angle and amplitude[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(19): 23-28.

[9] 卢雪峰, 王增平, 徐岩, 等. 基于波形间断角原理识别变压器励磁涌流的新方法[J]. 继电器, 2007, 35(增刊 1): 1-4.  
LU Xuefeng, WANG Zengping, XU Yan, et al. A new method to identify inrush current based on the principle of dead angle[J]. Relay, 2007, 35(S1): 1-4.

[10] 刘鹏辉, 焦兵豪, 郭向伟. 考虑 CT 饱和干扰的电力变压器励磁涌流识别方法[J]. 电网技术, 2022, 46(9): 3633-3641.  
LIU Penghui, JIAO Binghao, GUO Xiangwei. Magnetizing inrush identification method of power transformer considering CT saturation interference[J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3633-3641.

[11] 陈勇, 张员宁, 黄景光, 等. 基于正弦同源-概率空间协同互补的涌流闭锁方案[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(1): 196-202.  
CHEN Yong, ZHANG Yuanning, HUANG Jingguang, et al. Inrush current locking scheme based on sine homologous-probability space collaborative complementation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(1): 196-202.

[12] 李振兴, 胡聪, 朱益, 等. 基于采样序列整形的配电网线路保护防励磁涌流误动策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(21): 136-145.  
LI Zhenxing, HU Cong, ZHU Yi, et al. An anti-excitation inrush current maloperation strategy of line protection for a distribution network based on sampling sequence shaping[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(21): 136-145.

[13] 李岩军, 李晓梅, 赵寒. 直阻试验后变压器差动保护误动分析[J]. 中国电力, 2013, 46(2): 55-59.  
LI Yanjun, LI Xiaomei, ZHAO Han. Analysis of a mal-operation of differential protection after the DC resistance testing[J]. Electric Power, 2013, 46(2): 55-59.

[14] 李斌, 彭伍龙, 姚斌, 等. 基于复合环流与零序电流特征的换流变压器励磁涌流波形相关性识别方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(24): 8027-8038, 8239.  
LI Bin, PENG Wulong, YAO Bin, et al. An algorithm of identifying inrush current of converter transformer based on waveform cross-correlation of composite circulation and zero sequence current characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(24): 8027-8038, 8239.

[15] 马静, 王增平, 吴劼. 基于广义瞬时功率的新型变压器保护原理[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(13): 78-83.  
MA Jing, WANG Zengping, WU Jie. A novel principle of transformer protection based on generalized instantaneous power[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(13): 78-83.

[16] 张运驰, 高厚磊, 杜士昌. 基于综合形态算法的变压器励磁涌流识别方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(24): 165-173.  
ZHANG Yunchi, GAO Houlei, DU Shichang. Identification

- method of transformer magnetizing inrush current based on comprehensive morphological algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(24): 165-173.
- [17] 翁汉琨, 陈皓, 万毅, 等. 基于巴氏系数的变压器励磁涌流和故障差流识别新判据[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 113-122.
- WENG Hanli, CHEN Hao, WAN Yi, et al. A novel criterion to distinguish inrush current from fault current based on the Bhattacharyya coefficient[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 113-122.
- [18] 索南加乐, 焦在滨, 宋国兵, 等. 基于故障分量综合阻抗的变压器保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2008, 34(34): 94-100.
- SUONAN Jiale, JIAO Zaibin, SONG Guobing, et al. A fault component comprehensive impedance based transformer protection principle[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(34): 94-100.
- [19] 栗磊, 梁亚波, 赫嘉楠, 等. 基于差动电流相位差的和应涌流识别及其与内部故障的区分方法[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(8): 64-72.
- LI Lei, LIANG Yabo, HE Jianan, et al. A method of identifying sympathetic inrush current based on phase difference of differential current and distinguishing it from internal faults[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(8): 64-72.
- [20] 沈春城, 严柏平, 黄大卓, 等. 基于波形复杂特性的励磁涌流快速识别算法研究[J]. 电气工程学报, 2024, 19(1): 243-253.
- SHEN Chuncheng, YAN Baiping, HUANG Dazhuo, et al. Research on fast identification algorithm of inrush current based on complex characteristics of waveform[J]. Journal of Electrical Engineering, 2024, 19(1): 243-253.
- [21] LIN Zexuan, YANG Songhao, ZHANG Yubo, et al. A data-aided power transformer differential protection without inrush blocking module[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 20223, 8(3): 2000-2010.
- [22] LI Zongbo, JIAO Zaibin, HE Anyang. Dynamic differential current-based transformer protection using convolutional neural network[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2022: 1-15.
- [23] TONG Houjie, QIU R C, ZHANG Dongxia, et al. Detection and classification of transmission line transient faults based on graph convolutional neural network[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2021, 7(3): 456-471.
- [24] SONEGO P, KOCSOR A, PONGOR S. ROC analysis: applications to the classification of biological sequences and 3D structures[J]. Briefings in Bioinformatics, 2008, 9(3).

收稿日期: 2024-03-31; 修回日期: 2024-08-25

作者简介:

龙 启(1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为高电压技术及其应用; E-mail: longqi@im.ehv.csg

廖敏夫(1975—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为智能电器、电力设备在线检测、绝缘诊断与限流器。E-mail: LMF@dlut.edu.cn

(编辑 石晋美)