

基于 CatBoost 算法的空载变压器励磁涌流预测

郭文,黄著,周鸣中,王丹翔

(中国长江电力股份有限公司溪洛渡水力发电厂,四川 宜宾 657399)

摘要:空载变压器合闸时产生的励磁涌流可能出现引起设备故障、影响电能质量和导致线路过载等问题,现阶段相控开断是抑制涌流的有效手段,断路器关合特性和剩磁是影响相控精度的主要因素。通过阐述断路器关合特性对励磁涌流的影响,并考虑关合过程中灭弧室内电场变化的不均匀性对关合系数的影响,计算了不同关合系数 k 对应的预击穿时间。分析了剩磁对励磁涌流的影响机理,利用 ATP/EMTP 对不同剩磁情况下的励磁涌流做了统计仿真分析。提出一种利用 Categorical Boosting (CatBoost) 算法预测空载变压器励磁涌流的方法,基于 CatBoost 算法模型探究断路器关合系数 k 、机械分散性 3σ 、剩磁 Φ_r 和励磁涌流之间的映射关系,建立了空载变压器合闸励磁涌流预测模型,此模型可以完成不同相控条件下励磁涌流的预测,同时可以分析不同励磁涌流要求下的断路器性能参数。最后,通过实验验证了 CatBoost 模型的有效性,通过与其他传统算法对比,验证了其预测的准确性。

关键词:相控;励磁涌流;关合特性;剩磁;CatBoost 算法

中图分类号:TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd26229

No-load Transformer Excitation Inrush Current Prediction Based on CatBoost Algorithm

GUO Wen, HUANG Zhu, ZHOU Mingzhong, WANG Danxiang

(China Yangtze Power Co., Ltd. Xiluodu Hydropower Plant, Yibin 657399, Sichuan, China)

Abstract: The excitation inrush generated when the no-load transformer is closed may appear to cause equipment failure, affect the power quality and lead to line overload and other problems, at this stage, phase-controlled opening and closing is an effective means of suppressing the inrush, the circuit breaker closing characteristics and remanent magnetism are the main factors affecting the accuracy of phase control. The influence of switching characteristics of circuit breakers on inrush current was described, and considered the unevenness of the electric field changes in the arc extinguishing chamber during closing, and the pre-breakdown time corresponding to different switching coefficients k was calculated. The influence mechanism of residual flux on inrush current was analyzed. Statistical simulation analysis of inrush current under different residual flux conditions was made by using ATP/EMTP. A method was proposed for predicting excitation inrush current in no-load transformers using Categorical Boosting (CatBoost) algorithm. Based on CatBoost model, the mapping relationship between breaker closing coefficient k , mechanical dispersion 3σ , residual flux Φ_r and inrush current was established. This model can predict the inrush current under different phase control conditions, and analyze the performance parameters of circuit breakers under different inrush current requirements. Finally, the effectiveness of the CatBoost model was verified through experiments, and by comparing it with other traditional algorithms, it was confirmed the accurate of its predictions.

Key words: controlled switching; inrush current; closing characteristics; residual flux; CatBoost algorithm

空载变压器在随机合闸过程中会产生数倍于额定电流的励磁涌流^[1-2],可能引起保护装置误动作,严重时甚至可能烧毁变压器,危害电力系统的安全稳定运行。断路器串联合闸电阻、变压

器低压侧并联电容、改变铁心绕组等传统方法虽然可以在一定程度上抑制励磁涌流^[3-4],但是会伴随一系列其他问题,增大设备的投资。为了从根源上解决励磁涌流的问题,选相投切技术应运而

基金项目:三峡金沙江川云水电开发有限公司永善溪洛渡电厂科研项目(4123020009)

作者简介:郭文(1986—),男,本科,高级工程师,主要研究方向为继电保护运维,Email:guo_wen1@ctg.com.cn

生^[5-6]。空载变压器的选相投切使断路器开断在最佳合闸相位,即在剩磁与预感应磁通相同时,变压器合闸,合闸瞬间系统平稳过渡至稳态过程,可达到削弱甚至消除励磁涌流的效果。

选相投切技术的关键问题是最佳合闸相位的确定^[7],最佳合闸相位受到断路器预击穿现象、断路器机械分散性与变压器铁心剩磁的影响。因此,将选相投切技术应用于空载变压器合闸过程时,需要考虑断路器关合特性(预击穿时间、机械分散性)和变压器铁心剩磁^[8-9]对励磁涌流的影响。

对于关合特性来说,传统的方法是将触头间的场强近似为常量,故其关合特性为一条直线^[10],斜率的绝对值为绝缘下降率,但由于灭弧室内 SF₆ 气体的绝缘特性、电弧与触头间的反应,导致灭弧室击穿电压随开距呈非线性变化,进而使关合特性曲线呈现非线性,最终计算的合闸时刻准确度低。

对于具有选相投切功能的开关制造厂商和用户来说,很有必要在设备制造和使用之前预测涌流控制效果。根据用户对涌流的不同控制要求,制造商需要及时调整相控开关特性参数以提高产品质量,增强产品适应性。同时,用户根据开关的这些特性参数,也可以对断路器的实际选相效果进行预测评估,从而根据对涌流抑制的需求选择合适特性参数的断路器产品。

针对于断路器关合特性、变压器铁心剩磁和励磁涌流之间的关系,传统的数值求解方法准确性差且效率低,很难应用大量的数据获得三者之间的关系,因此,本文将 Categorical Boosting (CatBoost) 算法模型引入到励磁涌流的预测中,探究断路器关合特性参数、变压器铁心剩磁与合闸励磁涌流之间的映射关系,从而建立高效的空载变压器合闸励磁涌流预测模型。CatBoost 算法模型已被广泛应用于电力工业。文献[11]将 CatBoost 算法模型应用于高阻接地故障检测;文献[12]应用 CatBoost 算法模型对光伏组件故障诊断方法进行研究;文献[13]将 CatBoost 算法模型应用于配电网分区拓扑辨识;文献[14-15]应用 CatBoost 算法模型对电池的健康状态(SOH)进行预测评估;文献[16]将其应用于光伏短期发电功率预测模型研究;文献[17-18]将 CatBoost 算法模型应用于电力系统短期负荷预测。

为了更加准确地预测空载变压器的励磁涌

流特征,本文从 SF₆ 气体流注放电理论出发,建立断路器关合过程中击穿电压与开距之间的关系,通过与实验数据^[19]进行对照,设置修正函数,以关合感性负载变压器为目标,通过设置不同的合闸速度,计算预击穿时间,得到关合特性即预击穿时间与机械分散性与断路器动作速度与击穿电场之间的关系。接着利用 CatBoost 算法模型,建立断路器关合特性参数、变压器铁心剩磁与合闸励磁涌流之间的映射关系。建立空载变压器合闸励磁涌流预测模型,并结合网格搜索法得到最优 CatBoost 模型参数组合。利用 Matlab 软件中的 CatBoost 函数建立所需模型,根据仿真来验证 CatBoost 模型的准确度,最后利用该模型对断路器的关合特性进行分析,进行实验验证与算法对比,从而提供给用户及制造断路器的厂家参考。

1 关合特性和剩磁对励磁涌流的影响

三相变压器空载合闸时通常采用的选相合闸策略为延时合闸策略。理想情况下,即不考虑预击穿和机械分散性、剩磁为零的情况下,延时合闸策略为首合相在峰值处合闸,其余两相延迟 2~3 个周期后同时合闸^[19]。本文采用此策略作为相控合闸策略,并基于此合闸策略,利用 CatBoost 模型研究不同预击穿特性、机械分散性和剩磁对励磁涌流的影响。CatBoost 模型的输入数据通常可以通过现场试验或仿真模型获得,本文利用暂态仿真软件 ATP/EMTP 对数据进行采集。

1.1 断路器关合特性

断路器在合闸过程中,触头间的击穿电压会随着触头间距的减小而变化,当 SF₆ 灭弧室的绝缘强度下降后,触头间会发生预击穿现象产生电弧,即电气合闸早于机械合闸。为描述此阶段断路器的合闸特性,击穿电压与时间的导数的斜率绝对值定义为绝缘下降率曲线 k_{RDDs} ^[19],即灭弧室触头间的场强 E 和触头速度 v 的乘积,定义合闸过程中主电路电压变化与灭弧室击穿电压之间的关系为关合系数 k ,其值为绝缘强度下降率和外施电压零点处的导数值,即

$$k = \frac{k_{\text{RDDs}}}{\omega U_m} = \frac{Ev}{\omega U_m} \quad (1)$$

式中: U_m , ω 分别为电源电压峰值及角频率; v 为断路器关合速度; E 为绝缘强度。

由式(1)可知,若 U_m 保持不变, E 和 v 的增大都会引起 k 的提高。目前真空断路器发生预击穿

的程度较低,而在高压超高压领域中, SF_6 断路器发生预击穿产生的影响不容忽视。以典型特高压断路器为例,其气流速度最大值为 7.6 m/s,关合速度为 5.1 m/s,平均最大场强为 26 kV/mm 等, SF_6 气体介质击穿电压可根据流注理论计算获得。通过计算可以得到特高压断路器关合系数 $k=0.353$ 。

$k < 1$ 时,开关的绝缘强度下降率总是小于外施电压的变化率,两者的关系如图 1 所示,可以看到,预击穿特性基本不受外施电压的正值或者负值影响,故能够取其绝对值对预击穿特性进行分析。

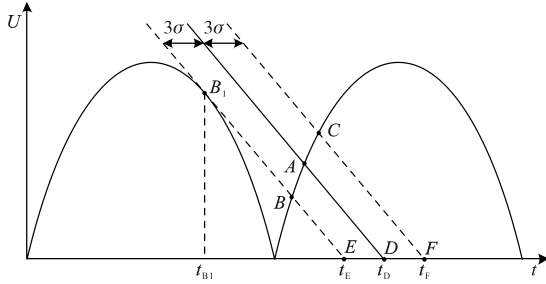


图1 $k < 1$ 时外施电压与预击穿关系

Fig.1 Relationship between pre-penetration characteristics and applied voltage when $k < 1$

如图 1 所示,预击穿发生的位置为点 A、点 B、点 C,即两曲线相交处;触头机械接触的位置为点 D、点 E、点 F,即与时间轴相交点。两条虚线是考虑机械分散性 3σ 的预击穿特性边界线。两曲线相切于 B_1 点, B 点为两曲线的最小相交点,断路器关合特性 $u_{p1}(t)$

$$u_{p1}(t) = U_m [-k\omega(t - 3\sigma) + \sin(\omega t_{B1}) - k\omega t_{B1}] \quad (2)$$

其中

$$t_{B1} = \frac{\arccos(k)}{\omega} \quad (3)$$

t_{B1} 根据外施电压在 B_1 点的切线斜率获得。

由于高压 SF_6 断路器触头间电场不均匀,随着开距的变化会呈现非线性,而真空断路器非线性程度较弱。本文根据流注理论分析灭弧室内介质击穿电压的变化情况^[20]。灭弧室内气体击穿判断方法为电场强度和气体粒子密度的比值是否在一定范围内,超过阈值即发生间隙击穿。其简化的表达式为

$$E/N \geq (E_{\text{crit}}/N)^* \quad (4)$$

式中: E/N 为折合击穿场强; N 为气体粒子数密度; E_{crit} 为气体临界击穿场强,表示在 SF_6 气体中灭弧室间隙能承受的最大的场强; E_{crit}/N 为临界

折合击穿场强。

对于 SF_6 灭弧室来说, $(E_{\text{crit}}/N)^* = 3.65 \times 10^{-15} \text{ V} \cdot \text{cm}^2$,那么击穿电场为

$$E = (E/N)^* \cdot N \quad (5)$$

气体击穿电压为

$$U_b = E \cdot d/f \quad (6)$$

式中: U_b 为气体击穿电压; d 为断路器的开距; f 为电场的不均匀系数,可通过试验获得^[20]。

击穿电压与开距的关系如图 2 所示。则考虑电场的不均匀性后,式(1)变为

$$k = k_{\text{RDDS}}/(\omega U_m) = \frac{du_p}{ds} \cdot \frac{ds}{dt} \cdot \frac{1}{\omega U_m} \quad (7)$$

其中

$$u_p = 35.3s^{0.245} \quad (8)$$

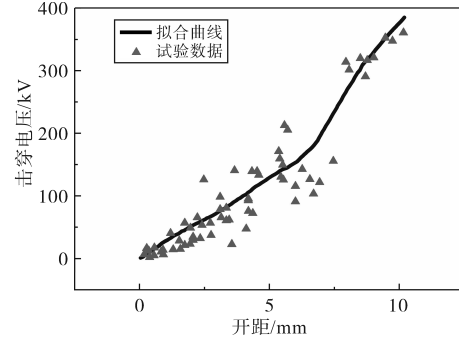


图2 击穿电压与开距的关系

Fig.2 The relationship between voltage and opening distance

根据式(2)可以计算出不同的 k 和 3σ 下的预击穿时间,且运动速度 v 是影响非线性化后 k 变化范围的主要因素。通过仿真得到计算结果,如表 1 所示。

表1 仿真计算结果

Tab.1 Simulation results

$3\sigma/\text{ms}$	$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$					
	6.3	6.4	6.5	6.6	6.7	6.8
T_2	0.011 52	0.113 3	0.010 93	0.010 78	0.010 54	0.010 44
1/2 T_1	0.011 34	0.011 03	0.010 86	0.010 64	0.010 45	0.010 22
T_3	0.011 68	0.011 45	0.011 09	0.010 89	0.010 66	0.010 54
T_2	0.011 62	0.011 48	0.011 01	0.010 88	0.010 63	0.010 59
1.0 T_1	0.011 34	0.011 03	0.010 86	0.010 64	0.010 45	0.010 22
T_3	0.011 93	0.011 52	0.011 49	0.011 21	0.011 19	0.011 18

在表 1 中可以看到,随着断路器触头速度 v 的提升,即关合系数的增大,预击穿时间逐渐减小。由于断路器的预击穿特性和机械分散性,使得实际合闸时刻偏离预设的最佳合闸时刻,导致相控效果不精确,可能会出现较大的励磁涌流。

1.2 变压器铁心剩磁

电力变压器正常工作在磁化曲线的拐点附近,但由于磁滞效应,分闸时铁心中存在剩磁,若剩磁极性与稳态磁通相同,二者叠加会导致铁心迅速进入磁饱和状态,由此会产生较大的励磁涌流^[21],如图3所示。

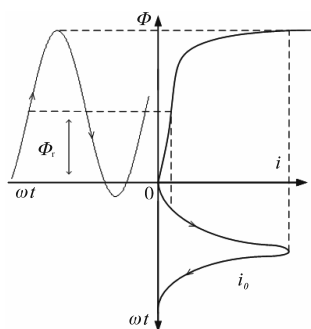


图3 剩磁与励磁涌流

Fig.3 Residual flux and inrush current

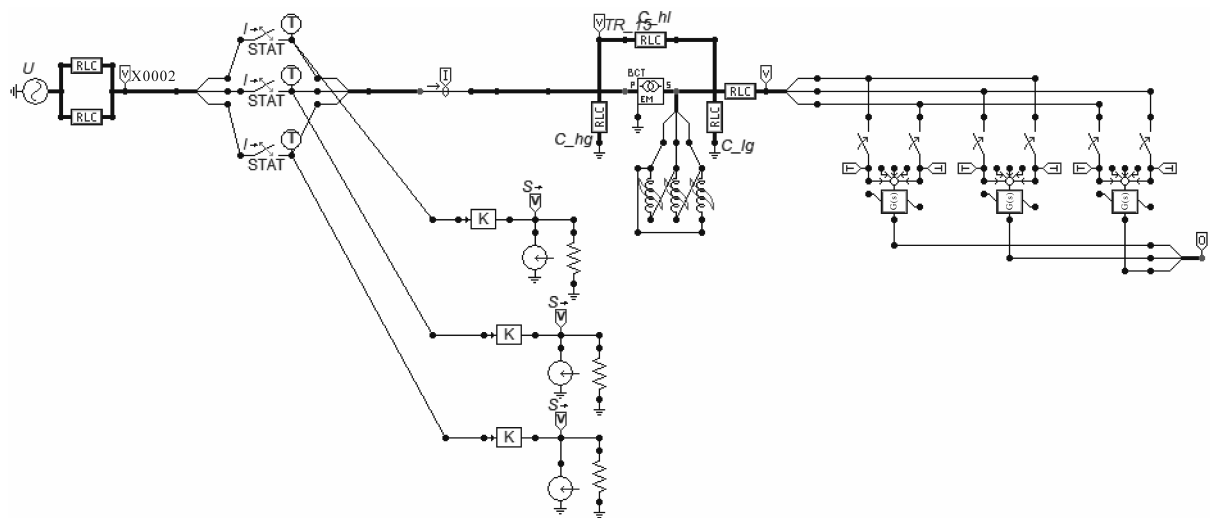


图4 ATP/EMTP仿真模型

Fig.4 ATP/EMTP simulation model

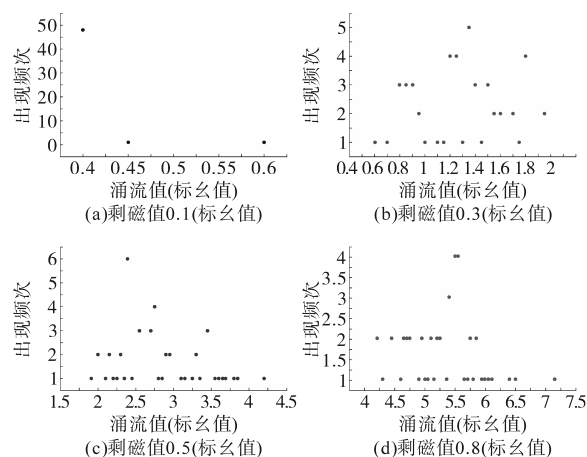


图5 不同剩磁值对应的励磁涌流

Fig.5 Inrush current corresponding to different residual flux values

剩磁是空载变压器选相合闸时必须考虑的因素,在剩磁与预感应磁通相等时投入变压器,可以使磁通平滑地进入稳态过程,磁通不会发生饱和,从而达到抑制励磁涌流的效果。

在ATP/EMTP中建立了空载变压器选相合闸的统计仿真模型,如图4所示。

STAT为统计开关,统计次数设置为50次。采用首合相峰值处合闸的延时合闸策略,开关分散性设置为0.5 ms,通过改变铁心中剩磁值进行仿真,观测不同剩磁值对选相合闸的影响。统计仿真结果如图5所示,图中分别列举了剩磁标么值为0.1,0.3,0.5,0.8四种情况下的统计结果。由图中可看出,励磁涌流中出现最为频繁的值和最大值都会随着变压器剩磁 Φ_r 的增大而提高。因此,空载变压器在选相合闸过程中有必要考虑剩磁的影响。

2 基于CatBoost模型的涌流预测

2.1 CatBoost算法原理及建模步骤

CatBoost是一个基于梯度提升决策树的算法模型,但由于它的平滑性较为缺乏,模型可能会出现过拟合的情况。所以,该算法通过 Ordered Boosting 来降低梯度估计偏差、改善算法的泛化能力及解决过拟合问题^[22-26],从而提高选择相关合闸励磁涌流的预测性能。由于无法直接得到断路器关合系数 k 、机械分散性 3σ 等断路器特性参数及变压器剩磁 Φ_r 与合闸励磁涌流 I 之间的解析表达式,基于CatBoost算法建立一个三输入单

输出的涌流预测模型,预测模型框架如图 6 所示。

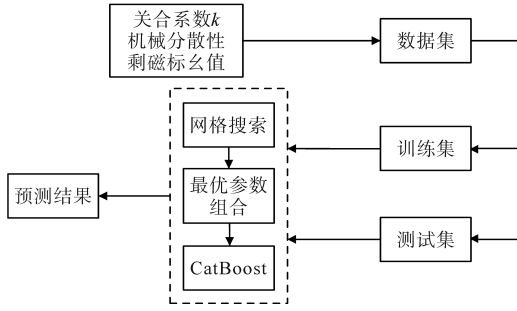


图 6 空载变压器励磁涌流预测模型框架

Fig.6 Modeling framework for predicting excitation inrush currents in no-load transformers

CatBoost 算法建模的具体主要步骤如下:

第 1 步:假设 $F^{n-1}(x)$ 与 $h(x)$ 是上一轮迭代中获得的强、弱学习器, E_1 为期望函数, $L[y, F^{n-1}(x)]$ 是损失函数,则在每一轮迭代中的目标函数 h^n :

$$h^n = \operatorname{argmin}_{h \in H} E_1 L[y, F^{n-1}(x) + h(x)] \quad (9)$$

应用 $L[y, F^{n-1}(x)]$ 的负梯度对每一轮迭代中损失的近似值进行拟合,那么式(9)中 h^n 为

$$h^n = \operatorname{argmin}_{h \in H} E \left\{ -\frac{\partial L[y, F^{n-1}(x)]}{\partial f^{n-1}(x)} - h(x) \right\}^2 \quad (10)$$

综上,得到该轮迭代的强学习器 $F^n(x)$:

$$F^n(x) = F^{n-1}(x) + \alpha h^2 \quad (11)$$

式中: α 为每轮更新的步长。

第 2 步:应用 GTBS 方法处理 GBDT 离散特征问题,节点分裂的准则相应的标签平均值如下式:

$$\hat{x}_k^i = \frac{\sum_{j=1}^n I\{x_j^i = x_k^j\} y_j}{\sum_{j=1}^n I\{x_j^i = x_k^i\} y_j} \quad (12)$$

式中: I 为指示函数。

当满足 $x_j^i = x_k^i$ 时,函数值取 1,反之取 0。特征包含的信息多于标签是传统 GTBS 的一个缺陷,若强以标签平均值表示特征,可能会出现条件偏移的状况。所以, CatBoost 模型额外采用权重系数 β 以及先验分布项 p ,从而降低特殊频率下数据对整体分布的影响,达到改进 GTBS 方法的目的,如下式:

$$\hat{x}_k^i = \frac{\sum_{j=1}^n I\{x_j^i = x_k^j\} y_j + \beta p}{\sum_{j=1}^n I\{x_j^i = x_k^i\} + \beta} \quad (13)$$

第 3 步:该模型的基预测器采用对称树,并将一样的分割准则应用在树上。

首先将信息二值化,从而输出被放入模型中的预测数据,并将其保存在 S 向量中。定义 D 为树的深度,将叶子的节点值储存在形式为 2^D 的向量中。再将编号为 k 的树的叶子节点对应的索引转为二进制向量 S ,如下式所示:

$$S_r = \sum_{d=0}^{D-1} 2^d S[R, f(k, d)] \quad (14)$$

其中,在特定的样本 R 中求得的二进制的特征 f 为 $S[R, f(k, d)]$;第 k 棵树的二进制特征数量为 $f(t, d)$ 。

2.2 最优模型参数组合

各参数值对 CatBoost 算法的预测准确率影响很大,一般各参数的判断为主观试探法,难以提高准确度。故本文采用网格搜索法进行算法优化,其主要思路为穷举各参数的排列组合。首先建立“网格”,交叉验证各个组合结果,优化参数取值;其次,交叉验证评估训练模型的性能;最后,依据设定的评估指标选取最优的参数。

2.3 CatBoost 模型训练

CatBoost 模型设计有三个输入,前两个输入来自断路器预击穿和机械分散性,第三个输入来自剩磁标么值,输出表示不同输入下的励磁涌流标么值。通过 ATP/EMTP 的统计仿真计算,可以得到 CatBoost 的训练数据集,即关合系数 k 、机械分散性 3σ 和剩磁 Φ_r ,关合系数 k 的相对斜率分别取 0.353, 0.496, 0.595, 0.697, 0.795, 0.898, 3σ 分别取 0.50 ms 和 1.00 ms, Φ_r (标么值)分别取 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 时的励磁涌流标么值,共计 96 个样本。其中 $k=0.795$ 时的 16 个样本为测试集样本,其余 80 个作为训练集样本。由于数据众多,因此只列举两组数据,表 2 为 $k=0.496$ 及 $3\sigma=0.5$ ms 时的训练集,表 3 为其中 $k=0.795$ 及 $3\sigma=1$ ms 时的测试集。

表 2 训练集

Tab.2 Training set

输入			输出
关合系数 k	机械分散性 $3\sigma/\text{ms}$	剩磁 (标么值)	励磁涌流 (标么值)
0.496	0.5	0.1	1.70
		0.2	1.85
		0.3	1.90
		0.4	2.25
		0.5	2.65
		0.6	3.55
		0.7	4.40
		0.8	5.00

表3 测试集

Tab.3 Test set

输入			输出
关合系数 k	机械分散性 $3\sigma/\text{ms}$	剩磁(标么值)	励磁涌流 (标么值)
0.795	1	0.1	1.45
		0.2	2.70
		0.3	3.45
		0.4	4.00
		0.5	4.95
		0.6	5.80
		0.7	6.50
		0.8	8.00

3 CatBoost 训练结果与分析

本文采用均方根误差来评估 CatBoost 模型训练结果的准确性。训练数据误差与校验数据误差对比如图 7 所示。

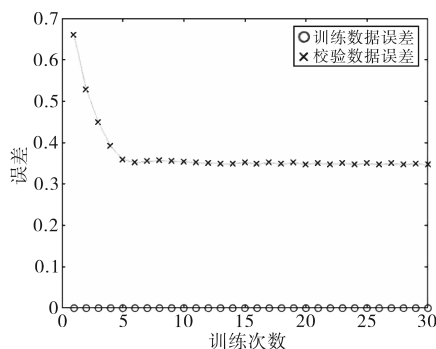
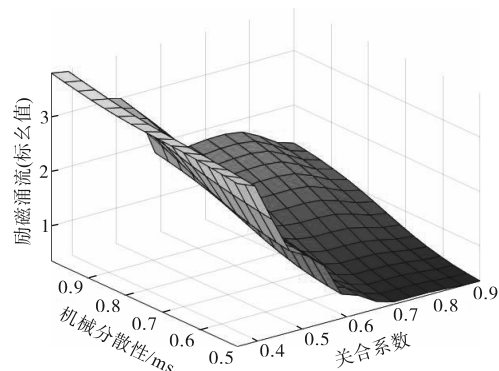


图7 训练集与测试集数据误差

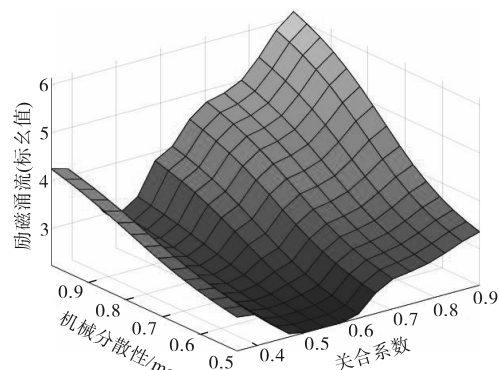
Fig.7 Training set and test set data error

由图 7 可知,经过 CatBoost 模型训练学习后,校验数据的误差同训练数据相比,可以控制在 0.7 以内,经过 30 次训练后,校验数据误差稳定在 0.3~0.4 之间。完成训练 10 次后,校验数据的误差基本上已达到稳定,由此可见,CatBoost 模型具有高效学习的特点。训练结果表明,基于 CatBoost 模型的励磁涌流预测误差较小,可以达到满意结果。

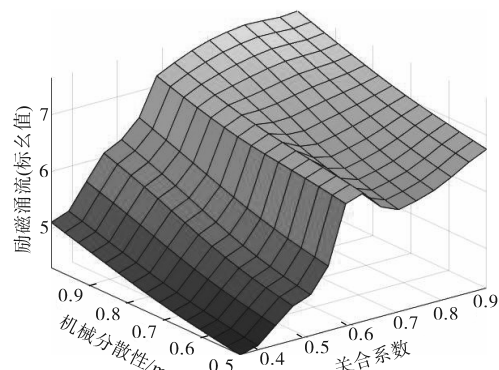
根据所建立的 CatBoost 模型,可以针对不同励磁涌流要求,进行断路器关合性能的评估分析。假设剩磁保持不变,在某一区间内将断路器的关合系数 k 和 3σ 各自等分成 M 和 N 份,可得 $M \times N$ 的矩阵。将该矩阵作为输入,利用 CatBoost 模型得到输出结果,即变压器励磁涌流变化时对应断路器的 k 和 3σ 。 k 和 3σ 与励磁涌流的关系如图 8 所示。



(a)剩磁值为0.1(标么值)



(b)剩磁值为0.4(标么值)



(c)剩磁值为0.8(标么值)

图8 关合系数、机械分散性与励磁涌流的关系

Fig.8 The relation between k , 3σ and inrush current

图 8 仅列举了剩磁为三种情况时的计算结果,由图中可以看出,在剩磁变化时,断路器的 3σ 对励磁涌流的影响趋势一致,断路器的关合系数 k 对励磁涌流的影响趋势有所变化。 k 越大,预击穿时间越短,合闸相位离电压峰值越近。此时的剩磁 Φ_r 越小,得到的最佳合闸相位越靠近电压峰值,因此, k 越大, Φ_r 越小,断路器的相控效果越佳。随着 Φ_r 的进一步增大,得到的最佳合闸相位会远离电压峰值,若仍然在靠近电压峰值处操作合闸,可能会生成幅值很大的涌流。所以,在对断路器进行选相操作时,要同时考虑断路器 k , 3σ 和 Φ_r 的影响,当断路器的 k 和 3σ 确定时,要根据

Φ_r 的不同及时改变合闸方案。

4 实验分析

本文以单相双绕组变压器为实验对象,以带永磁机构的真空断路器为开关模拟空载变压器合闸时的励磁涌流波形,比较实验数据与仿真数据,验证 CatBoost 算法的有效性。励磁涌流实验回路如图9所示,其由市电系统、机构驱动回路、相控装置、调压器、断路器、单相变压器、测量系统等构成。



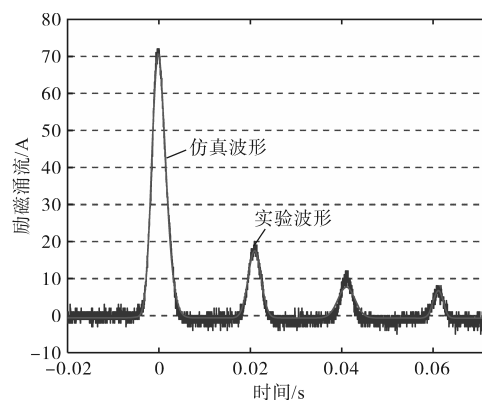
图9 实验回路

Fig.9 Circuit experiment

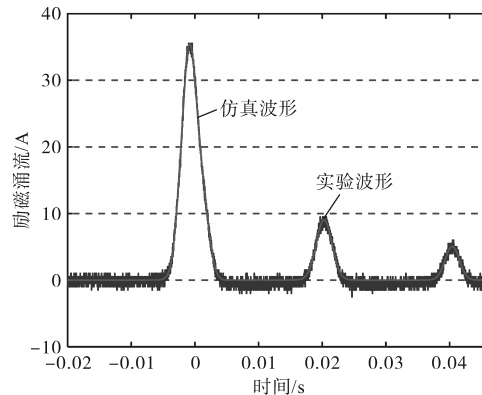
实验平台虽无法达到SF₆断路器运行所需的高压等级。但可以通过测量实验中真空断路器的关合系数、机械分散性和变压器的剩磁,将此三种数据集代入 CatBoost 模型,预测出励磁涌流大小,将算法所得励磁涌流值和实验所得值进行对比分析,验证算法的准确性。具体实验步骤为:先通过动态击穿特性实验,记录真空断路器合闸不同开距下每次击穿过程的电压值,即动态击穿特性曲线,得到击穿场强 E 与距离的关系,同时记录真空断路器位移传感器的数据,求导得到真空断路器速度 v ,计算得到关合系数。通过多次真空断路器的合闸试验得到其机械分散性为 1 ms。在励磁涌流试验回路中,用电压互感器测量变压器分闸后的电压变化,通过电压积分法得到其剩磁大小,将关合系数、机械分散性和得到的剩磁大小数据集代入 CatBoost 算法,得出其励磁涌流的预测值。再将剩磁输入相控装置得到其合闸时刻,通过驱动充放电电容器组使永磁真空断路器关合,测量合闸时空载变压器的励磁涌

流的大小,记录波形与实验数据。通过多次实验得到不同的剩磁及合闸角度,将实验得到的合闸励磁涌流和仿真结果对比,如图10所示。

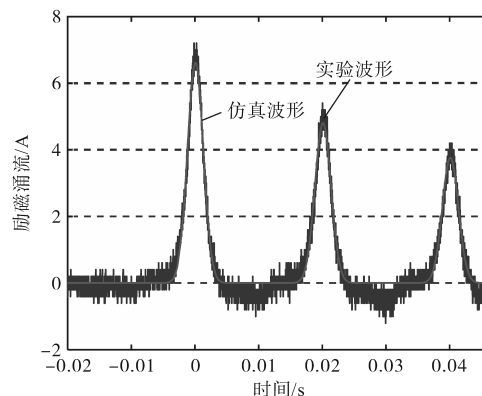
CatBoost 算法三种合闸角度下合闸励磁涌流的相对误差如表4,得到平均相对误差为 2.52%。



(a)合闸角度为30°,剩磁值为0.2(标么值)



(b)合闸角度为45°,剩磁值为0.4(标么值)



(c)合闸角度为60°,剩磁值为0.7(标么值)

图10 实验结果与仿真结果对比

Fig.10 Comparison of experimental and simulation results

表4 采用 CatBoost 算法时,不同合闸角度下的平均相对误差

Tab.4 The average error under different closing angle when CatBoost is accepted

合闸角度	仿真结果/A	实验结果/A	相对误差/%
30°	70.166	72.002	2.55
45°	52.593	54.061	2.72
60°	6.962	7.125	2.29

从以上图表可看到,合闸后励磁涌流峰值的实验值和预测值结果相差很小。由此可验证算法的准确性。为了证明 CatBoost 算法相对于其他算法的优势,将其与卷积神经网络(CNN)、支持向量机(SVM)、随机森林(RF)在同样三种角度下的合闸励磁涌流平均相对误差做对比,结果如表 5 所示。

表 5 采用不同算法时,不同合闸角度下的平均相对误差

Tab.5 The average error under different closing angle when different algorithm is accepted

合闸 角度		CatBoost	CNN	RF	SVM
30°	仿真结果/A	70.166	68.557	76.872	59.422
	实验结果/A	72.002	72.002	72.002	72.002
	平均相对误差/%	2.55	4.78	6.76	17.47
45°	仿真结果/A	52.593	51.202	57.553	48.686
	实验结果/A	54.061	54.061	54.061	54.061
	平均相对误差/%	2.72	5.29	6.46	9.94
60°	仿真结果/A	6.962	6.836	7.563	6.910
	实验结果/A	7.125	7.125	7.125	7.125
	平均相对误差/%	2.29	4.06	6.15	3.02

CatBoost 算法得到平均相对误差为 2.52%;卷积神经网络(CNN)得到平均相对误差为 4.71%;随机森林(RF)得到平均相对误差为 6.46%;支持向量机(SVM)得到平均相对误差为 10.14%。

5 结论

本文基于 CatBoost 算法,结合断路器关合性能和剩磁特性,建立了变压器空载合闸励磁涌流预测模型,分析了两者之间的映射关系,得出了以下结论:

1)模型经过训练学习后,解决了仿真效率低时间冗长的问题,实验结果与仿真吻合较好。

2)基于此 CatBoost 模型,可实现不同关合系数、机械分散性和剩磁情况下的励磁涌流预测。相对于其他常规算法,CatBoost 模型训练学习用时更短,预测结果误差更小。

3)基于本文所提方法,为降低涌流大小,断路器的制造商能够根据客户要求改变断路器的内部结构,提高电网的稳定性。

参考文献

[1] 柴群康,赵义波,申琴,等. 新型大容量变压器无涌流合闸装置[J]. 电气传动,2017,47(11):74-76.
CHAI Qunkang, ZHAO Yibo, SHEN Qin, et al. New type of

large capacity transformer no inrush current switching device [J]. Electric Drive, 2017, 47(11): 74-76.

[2] 李伟,黄金,方春恩,等. 基于相控开关技术的空载变压器励磁涌流抑制研究[J]. 高压电器,2010,46(5):9-13.
LI Wei, HUANG Jin, FANG Chunen, et al. Research on elimination of no-load power transformers inrush currents based on controlled switching[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(5): 9-13.

[3] 李琥,周海洋,施围. 断路器合闸电阻对变压器励磁涌流的影响[J]. 高压电器,2003,39(1):16-18,21.
LI Hu, ZHOU Haiyang, SHI Wei. Effect of closing resistance of circuit breaker on inrush current of transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2003, 39(1): 16-18, 21.

[4] 刘涛,颜廷武,卜新良,等. 基于合闸电阻的变压器励磁涌流相控技术研究[J]. 高压电器,2018,54(3):109-114.
LIU Tao, YAN Tingwu, BU Xinliang, et al. Research on phase-controlled technology of inrush current based on closing resistance[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(3): 109-114.

[5] 翟永昌,高永强,余江. 高压断路器选相合闸方法研究[J]. 广东电力,2020,33(6):107-113.
ZHAI Yongchang, GAO Yongqiang, YU Jiang. Research of method for selecting phase and controlled switching of high-voltage circuit breaker[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(6): 107-113.

[6] 张帆,段雄鹰,吕洋,等. 选相投切特高压线路及其操作冲击绝缘的影响[J]. 电工技术学报,2018,33(5):1151-1157.
ZHANG Fan, DUAN Xiongying, LÜ Yang, et al. Controlled switching UHV line and its effect on line switching impulse insulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(5): 1151-1157.

[7] 李晓华,张冬怡,陈忠,等. 换流变压器第 1 次空载合闸励磁涌流抑制的研究[J]. 广东电力,2019,32(1):13-19.
LI Xiaohua, ZHANG Dongyi, CHEN Zhong, et al. Research on suppression of excitation inrush current of converter transformer caused by first no-load closing[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(1): 13-19.

[8] 韩平平,王焱,陈宇翔,等. 考虑 CVT 输出特性的换流变剩磁测算方法[J]. 电力自动化设备,2024,44(6):90-95,109.
HAN Pingping, WANG Yan, CHEN Yuxiang, et al. Calculation method of converter transformer residual flux considering CVT output characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(6): 90-95, 109.

[9] 叶志军,于旺,郑荣显,等. 变压器空充下的励磁涌流二次谐波特性分析[J]. 电力系统自动化,2020,44(24):145-150.
YE Zhijun, YU Wang, ZHENG Rongxian, et al. Characteristic analysis of second harmonic of magnetizing inrush current with no-load transformer energization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(24): 145-150.

[10] 马飞越,相中华,倪辉,等. 750 kV 滤波器场断路器合闸电阻预投入异常仿真[J]. 高压电器,2023,59(6):65-73,102.
MA Feiyue, XIANG Zhonghua, NI Hui, et al. Simulation of abnormal pre-insertion for the closing resistor in 750 kV AC filter

- circuit breakers[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(6): 65–73, 102.
- [11] 高伟,何文秀,郭谋发,等. 基于实测不平衡小样本的配电网高阻接地故障检测方法[J]. 高电压技术, 2025, 51(3): 1135–1144.
- GAO Wei, HE Wenxiu, GUO Moufa, et al. Detection method of high-impedance fault in distribution network based on uneven small samples from actual measurements[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(3): 1135–1144.
- [12] 王雪琦,曹立霞. 基于PCA-CatBoost算法的光伏组件故障诊断方法[J]. 智能物联技术, 2024, 56(1): 26–31.
- WANG Xueqi, CAO Lixia. Fault diagnosis method of photovoltaic modules based on PCA CatBoost algorithm[J]. Technology of IoT & AI, 2024, 56(1): 26–31.
- [13] 彭寒梅,吴行,胡磊,等. 基于CatBoost算法的配电网分区拓扑辨识[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(5): 95–102.
- PENG Hanmei, WU Xing, HU Lei, et al. Partition topology identification of distribution network based on CatBoost algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(5): 95–102.
- [14] 顾菊平,蒋凌,张新松,等. 基于特征提取的锂离子电池健康状态评估及影响因素分析[J]. 电工技术学报, 2023, 38(19): 5330–5342.
- GU Juping, JIANG Ling, ZHANG Xinsong, et al. Estimation and influencing factor analysis of lithium-ion batteries state of health based on features extraction[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(19): 5330–5342.
- [15] 刘伟霞,田勋,肖家勇,等. 基于混合模型及LSTM的锂电池SOH与剩余寿命预测[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(2): 689–694.
- LIU Weixia, TIAN Xun, XIAO Jiayong, et al. Estimation of SOH and remaining life of lithium batteries based on a combination model and long short-term memory[J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(2): 689–694.
- [16] 徐恒山,莫汝乔,薛飞,等. 基于时间戳特征提取和CatBoost-LSTM模型的光伏短期发电功率预测[J]. 太阳能学报, 2024, 45(5): 565–575.
- XU Hengshan, MO Ruqiao, XUE Fei, et al. Short-term photovoltaic power prediction based on timestamp feature extraction and CatBoost-LSTM model[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2024, 45(5): 565–575.
- [17] 党存禄,杨海兰,武文成. 基于LSTM和CatBoost组合模型的短期负荷预测[J]. 电气工程学报, 2021, 16(3): 62–69.
- DANG Cunlu, YANG Hailan, WU Wencheng. Short-term load forecasting based on LSTM and CatBoost combined model[J]. Journal of Electrical Engineering, 2021, 16(3): 62–69.
- [18] 党存禄,武文成,李超峰,等. 基于CatBoost算法的电力短期负荷预测研究[J]. 电气工程学报, 2020, 15(1): 76–82.
- DANG Cunlu, WU Wencheng, LI Chaofeng, et al. Short-term load forecasting based on CatBoost algorithm[J]. Journal of Electrical Engineering, 2020, 15(1): 76–82.
- [19] 林莘,王飞鸣,刘卫东,等. 高压SF6断路器关合预击穿特性计算与试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(5): 1445–1452.
- LIN Xin, WANG Feiming, LIU Weidong, et al. Research on calculations and experiments of closing pre-strike characteristics in high voltage SF6 circuit breakers[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(5): 1445–1452.
- [20] 魏敏. 252 kV SF₆断路器开断特性数值计算与分析[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2021.
- WEI Min. Numerical Computation and analysis on breaking characteristics of 252 kV SF₆ circuit breaker[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2021.
- [21] 金恩淑,吴宛凝,张弼弘,等. 适用于空载合闸于匝间故障的特高压换流变压器保护新方法[J]. 电测与仪表, 2025, 62(5): 58–67.
- JIN Enshu, WU Wanning, ZHANG Bihong, et al. A new protection method for UHV converter transformers suitable for no-load closing and inter-turn faults[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(5): 58–67.
- [22] PARIKH U, BHALJA BR. Challenges in field implementation of controlled energization for various equipment loads with circuit breakers considering diversified dielectric and mechanical characteristics[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2017, 87: 99–108.
- [23] 戈文祺,汪友华,陈学广,等. 电力变压器铁心剩磁的测量与削弱方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 10–16.
- GE Wenqi, WANG Youhua, CHEN Xueguang, et al. Method to measure and weaken the residual flux of the power transformer core[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 10–16.
- [24] 杜一星,胡志坚,陈纬楠,等. 基于改进CatBoost的电力系统暂态稳定评估方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(12): 115–122.
- DU Yixing, HU Zhijian, CHEN Weinan, et al. Transient stability assessment method of power system based on improved CatBoost[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(12): 115–122.
- [25] 周挺,杨军,詹祥澎,等. 一种数据驱动的暂态电压稳定评估方法及其可解释性研究[J]. 电网技术, 2021, 45(11): 4416–4425.
- ZHOU Ting, YANG Jun, ZHAN Xiangpeng, et al. Data-driven method and interpretability analysis for transient voltage stability assessment[J]. Power System Technology, 2021, 45(11): 4416–4425.
- [26] WANG Jiazhao, XU Jason, WANG Xuejun. Combination of hyperband and Bayesian optimization for hyperparameter optimization in deep learning[J]. Computer Vision and Pattern Recognition, 2018: 1801. 01596.

收稿日期:2024-10-15

修改稿日期:2024-11-07