

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2025.11.014

朱金炜, 陶加贵, 戴建卓. 基于质量数据分析的配电变压器抗短路特性研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2025, 47(11): 178-190.

基于质量数据分析的配电变压器抗短路特性研究

朱金炜, 陶加贵, 戴建卓

国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 南京 211103

摘要: 开展配电变压器入网检测能对其抗短路特性进行严格把关, 从而保障电力供应的可靠性与安全性。通过对某检测中心 2021—2024 年抽检的油浸式配电变压器的质量数据进行分析, 挖掘变压器短路承受能力试验的合格率与变压器铁心选材及结构、能效等级、声级特性之间的关联特性。通过分析可知, 采用电工钢带铁心材质与立体卷铁心结构、使用一级与二级能效等级的变压器, 以及降低噪声水平等方式均能使合格率得到明显提升, 并显著提高短路承受能力。同时, 提出了一种基于朴素贝叶斯的变压器抗短路性能分类算法, 对变压器的抗短路特性进行了推理与预测, 通过实际检测数据验证了方法的可行性, 并给出了变压器行业在选材和制造工艺上提升变压器抗短路能力的共性措施。

关键词: 配电变压器; 材料结构; 声级特性; 抗短路;

朴素贝叶斯

中图分类号: TM421

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 1673-9868(2025)11-0178-13

Research on Short-Circuit Resistance Characteristics of Distribution Transformer Based on Quality Data Analysis

ZHU Jinwei, TAO Jiagui, DAI Jianzhuo

Electric Power Research Institute of State Grid Jiangsu Electric Power Co. Ltd., Nanjing 211103, China

Abstract: Conducting incoming inspection of distribution transformers can strictly verify the short-circuit resistance characteristics, thereby ensuring the reliability and safety of power supply. By analyzing the short-circuit resistance test results of oil-immersed distribution transformers sampled by a testing center from 2021 to 2024, quality data analysis was performed to explore the correlation between the pass rate of transformer short-circuit resistance tests and factors such as the selection and structure of core material,

收稿日期: 2024-07-16

基金项目: 国网江苏省电力有限公司科技项目(J2022085); 国家自然科学基金面上项目(62473343)。

作者简介: 朱金炜, 硕士, 工程师, 主要从事电气设备状态评价与检测技术、电网物资质量检测与评估技术研究。

energy efficiency grade, and acoustic level characteristics. Statistical data indicated that using electrical steel strip core material and three-dimensional wound core structure, employing transformers with first and second energy efficiency grades, and reducing noise levels can significantly improve the pass rate and significantly enhance the short-circuit resistance capability. Furthermore, a Naive Bayes-based classification algorithm was proposed for evaluating transformer short-circuit resistance performance, which inferred and predicted the short-circuit resistance characteristics. The feasibility of this method was validated through actual test data analysis, revealing common industry practices for improving transformer short-circuit resistance capacity through material selection and manufacturing processes.

Key words: distribution transformers; material structure; acoustic level characteristics; short-circuit resistance; Naive Bayes

电力变压器作为电力系统的重要组成部分之一,其产品质量直接影响电网的安全、稳定运行^[1-6]。其中,35 kV 及以下电压等级的配电变压器作为连续发/输电系统和终端用户之间的纽带,广泛应用于国计民生的各个领域。为了加强对变压器中标供应商的质量管控,促进变压器产品的质量提升,近年来国家电网公司多次组织变压器类产品的抽检工作^[7-9],以监督并提高待入网变压器的产品质量,保障电网的安全、稳定运行。变压器短路承受能力试验作为配电变压器抽检工作的重要试验项目,已成为检验其质量好坏的关键^[10-12]。

变压器短路现象起因于电力系统中电气绝缘的破坏^[11],其诱因多样,包括过压、雷击、绝缘老化、设备维护不当、运行人员误操作,以及鸟害、鼠害、施工机械的直接损害等外部因素。变压器一旦发生短路,电力系统的工作点电压将急剧下降,电流则大幅增加,往往超过变压器额定电流的几倍甚至几十倍。若变压器的抗短路特性不好,便会在这种热效应和动效应的作用下受损。因此,验证变压器在过电流条件下的短路承受能力,关键在于验证绕组在峰值过电流作用后能否保持轴向和径向的动态结构稳定性。变压器短路承受能力试验通过模拟短路故障,检测变压器是否能够承受短路电流的冲击而不受损,以检验其安全运行的可靠性。试验不仅有助于发现变压器内部绕组、绝缘材料或连接件的潜在缺陷,还能验证变压器制造过程中的综合技术能力和工艺水平。然而大量抽检变压器的检验结果表明,变压器短路承受能力试验的合格率远低于其他试验项目^[13-14]。配电变压器的抗短路性能一直是制约行业发展的瓶颈,如何有效提升配电变压器的抗短路性能,已成为影响电网安全、稳定运行的关键课题。

近年来,支持向量机(Support Vector Machine, SVM)、决策树(Decision Tree, DT)、神经网络等人工智能技术^[15-18]迅速发展,为变压器特性分析提供了新的技术手段。这些方法能够在不依赖先验知识的情况下,仅输入原始数据进行模型训练即可完成分类任务。然而,这类方法在实际应用中仍面临诸多挑战:首先,人工智能模型对数据的数量和质量要求较高,数据量不足或数据质量较差均可能导致模型无法有效拟合;其次,这些方法通常以“黑箱”方式运行,可解释性较弱。相比之下,朴素贝叶斯算法将贝叶斯概率、统计学理论与特征条件独立假设相结合,通过对样本数据的严密推理计算,不仅能够有效处理数据分析中的不确定性和不完整性问题,还具备较强的解释性和鲁棒性,为变压器抗短路性能分类提供了一种更为可靠且高效的解决方案。

本文通过收集某检测中心 2021—2024 年抽检的油浸式配电变压器短路承受能力试验结果,开展质量数据分析,挖掘变压器短路承受能力试验合格率与选材及结构、变压器能效等级、声级特性之间的相关性。同时,提出一种基于朴素贝叶斯的变压器抗短路性能分类算法,构建基于检测数据的预测模型,并通过统计数据揭示变压器行业在选材和制造工艺上提升变压器抗短路特性的共性措施,为配电变压器的质量评估和优化设计提供新的思路和方法。

1 配电变压器抗短路特性评估的概率基础

某检测中心于 2021—2024 年对油浸式配电变压器进行抽检, 其中 271 台变压器的短路承受能力试验不合格, 总体合格率为 78.06%。按照不同容量对变压器进行统计, 不同容量的变压器合格率如表 1 所示。从表 1 可以看出, 200 kVA 容量的变压器合格率相对较高(80.43%), 而 400 kVA 容量的变压器合格率相对较低(77.03%)。这一统计结果验证了变压器故障率随容量的变化规律, 即变压器容量越大, 其短路电流也越大, 因此对其抗短路特性的要求也更高。

表 1 不同容量变压器短路承受能力试验合格率统计

容量/kVA	合格/台	不合格/台	总计/台	合格率/%
200	300	73	373	80.43
400	664	198	862	77.03

变压器抗短路特性与各部件的选材以及采取的制造工艺密切相关, 通过分析材料和工艺与合格率之间的相关关系, 能够挖掘提升变压器抗短路能力的相关措施。将配电变压器采用某种材料和工艺设为事件 A_i , 配电变压器短路承受能力试验合格设为事件 B 。由于事件 A_i 和事件 B 符合两点分布规律, 则随机事件 A_i 和 B 的联合概率分布如表 2 所示。

表 2 随机事件 A_i 和 B 的联合概率分布表

A_i	B	
	0	1
0	$P(\overline{A_i}\overline{B})$	$P(\overline{A_i}B)$
1	$P(A_i\overline{B})$	$P(A_iB)$

1.1 材料和工艺的采用率

材料和工艺的采用率 $P(A_i)$ 代表某种材料和工艺在变压器制造中的普及程度, 采用率越高, 说明该材料和工艺越普及。统计某种容量变压器中采用该种材料和工艺的数量占该容量所有变压器数量的比例, 则有:

$$P(A_i) = \frac{n_1}{n} \quad (1)$$

式中: n_1 为某种容量变压器采用该种材料和工艺的数量; n 为某种容量变压器总数。不采用该种材料和工艺的概率定义为 $P(\overline{A_i})$ 。

1.2 短路承受能力试验合格率

短路承受能力试验合格率 $P(B)$ 由抽检工作得到, 统计某种容量变压器中短路承受能力试验合格的变压器数量占该容量所有变压器数量的比例, 则有:

$$P(B) = \frac{n_2}{n} \quad (2)$$

式中: n_2 为某种容量变压器短路试验合格的数量。短路承受能力试验不合格率定义为 $P(\overline{B})$ 。

1.3 采用某种材料和工艺且合格的概率

采用某种材料和工艺且合格的概率 $P(A_iB)$ 代表某种材料和工艺的普及程度对变压器抗短路能力的影响, 数值越高说明该种材料和工艺的普及程度越高且对变压器抗短路能力无太大的不利影响, 但合格率低时则无法判断是该种材料和工艺的普及程度低, 还是该种材料和工艺对变压器抗短路能力有较大的不利影响。统计某种容量变压器中采用该种材料和工艺且合格的数量占该容量所有变压器数量的比例, 则有:

$$P(A_i B) = \frac{n_3}{n} \quad (3)$$

式中： n_3 为某种容量变压器采用该种材料和工艺且合格的数量。

1.4 合格产品中采用某种材料和工艺的概率

合格产品中采用某种材料和工艺的概率 $P(A_i | B)$ 隐含着生产企业针对某种材料和工艺在提高短路合格率上的共识，数值越高说明生产企业可能认为该种材料和工艺对提高短路合格率越有利，因而普遍采用。统计某种容量变压器中采用该种材料和工艺且合格的数量占该容量合格变压器数量的比例，则有：

$$P(A_i | B) = \frac{n_3}{n_4} = \frac{P(A_i B)}{P(B)} \quad (4)$$

式中： n_4 为某种容量变压器合格数量。

1.5 采用某种材料和工艺的配电变压器合格的概率

采用某种材料和工艺的配电变压器合格的概率 $P(B | A_i)$ 代表某种材料和工艺对变压器抗短路能力的影响，数值越高说明该种材料和工艺对变压器抗短路能力不会产生太大的不利影响。统计某种容量变压器中采用该种材料和工艺且合格的数量占采用该材料和工艺的所有变压器数量的比例，则有：

$$P(B | A_i) = \frac{n_3}{n_1} = \frac{P(A_i B)}{P(A_i)} \quad (5)$$

1.6 材料和工艺与合格率之间的相关系数

配电变压器采用的某种材料和工艺与短路承受能力试验合格率的相关关系可以用相关系数 $\rho_{A_i, B}$ 表示，如式(6)所示。 $\rho_{A_i, B}$ 数值为正，表明事件 A_i 和事件 B 呈正相关，则该种材料和工艺能够提升配电变压器的抗短路能力。

$$\rho_{A_i, B} = \frac{P(A_i B) - P(A_i)P(B)}{\sqrt{P(A_i) - [P(A_i)]^2} \sqrt{P(B) - [P(B)]^2}} \quad (6)$$

2 配电变压器抗短路特性分析

2.1 配电变压器抗短路特性与铁心材料和结构的相关性分析

2.1.1 铁心材料抗短路特性对比

非晶合金变压器采用非晶合金作为铁心材料，相比传统的电工钢带铁心变压器，其空载损耗可以降低 70% 以上，空载电流下降约 80%，这使得非晶合金铁心变压器在节能方面更为理想。但是非晶合金铁心材料较薄，加工性较差，材质偏脆，加工难度大。本文详细对比了配电变压器电工钢带铁心和非晶合金铁心在抗短路能力上的差别，分别对抽检的变压器按电工钢带铁心和非晶合金铁心进行统计分析。其中 200 kVA 配电变压器电工钢带铁心的采用率为 65.15%，非晶合金铁心的采用率为 34.85%；400 kVA 配电变压器电工钢带铁心的采用率为 62.76%，非晶合金铁心的采用率为 37.24%，具体数据如表 3 和图 1 所示。

表 3 不同铁心材质的配电变压器短路承受能力试验合格率统计

容量/ kVA	铁心材质	$P(A_i)/$ %	$P(A_i B)/$ %	$P(A_i B)/$ %	$P(B A_i)/$ %	$\rho_{A_i, B}$
200	电工钢带	65.15	53.62	66.67	82.30	0.064 6
	非晶合金	34.85	26.81	33.33	76.92	-0.064 6
400	电工钢带	62.76	50.12	65.06	79.85	0.087 1
	非晶合金	37.24	26.91	34.94	72.27	-0.087 1

通过数据分析可知, 目前无论是 200 kVA 容量还是 400 kVA 容量的配电变压器, 电工钢带铁心的采用率都比非晶合金铁心高。采用非晶合金铁心的 $P(A_i|B)$ 值比电工钢带铁心低, 表明非晶合金铁心自身采用率较低。采用非晶合金铁心的 $P(A_i|B)$ 值比电工钢带铁心低, 表明采用非晶合金铁心合格的数量占所有合格变压器数量的比例低, 隐含着当前生产企业对电工钢带铁心在提高短路合格率上的表现达成共识。采用非晶合金铁心的 $P(B|A_i)$ 值比电工钢带铁心低, 表明非晶合金铁心对变压器抗短路能力可能产生负面影响。从相关系数也可以看出电工钢带铁心与变压器的合格率提升呈正相关。目前, 非晶合金铁心变压器还不够成熟, 抗短路特性仍有较大的提升空间。

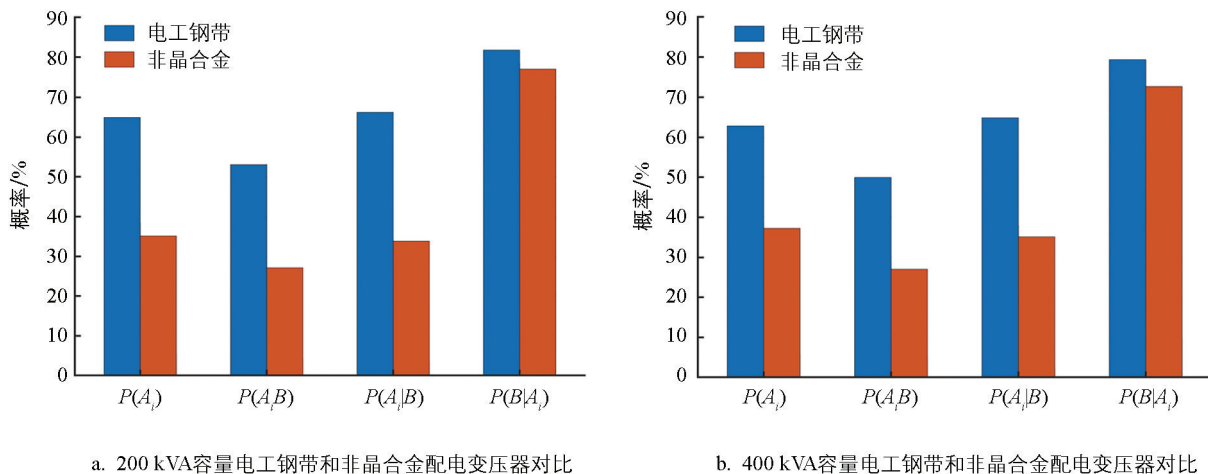


图 1 不同铁心材质的配电变压器短路承受能力试验合格率对比

经统计分析发现, 在配电变压器抗短路特性方面, 电工钢带铁心和非晶合金铁心有着显著的差异。非晶合金铁心变压器虽然在节能方面表现出色, 但在抗短路能力上存在一些不足。由于非晶合金铁心带材非常薄, 且硬度大, 这种参数性质决定了非晶合金铁心材料在受力时非常容易脆裂, 由非晶合金铁心材料组成的变压器铁心强度, 也必然存在差距。相比之下, 电工钢带铁心变压器在抗短路能力上表现更为稳定。电工钢带铁心的物理特性使其在受到短路冲击时能够更好地维持结构完整性, 从而提供更高的可靠性。因此, 在考虑变压器抗短路性能时, 电工钢带铁心变压器通常是更可靠的选择。

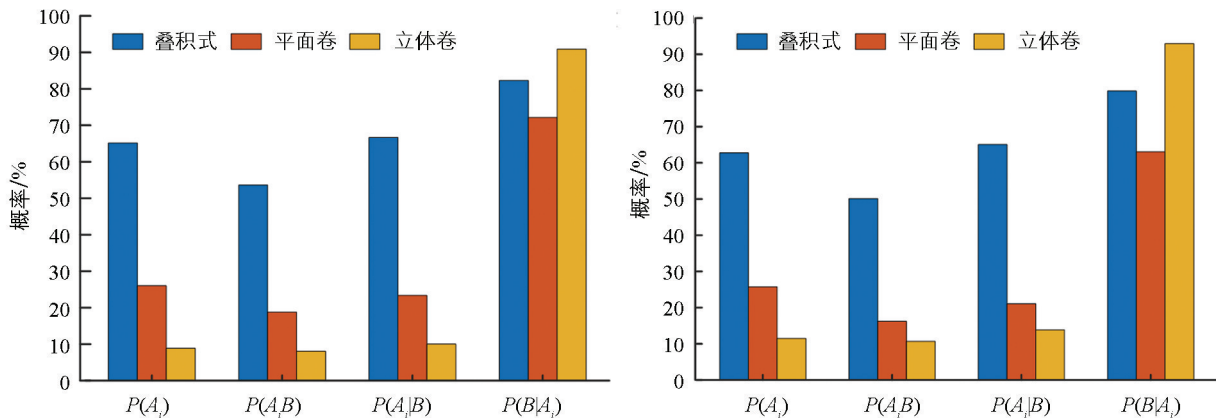
2.1.2 铁心结构抗短路特性对比

叠积式铁心、平面卷铁心和立体卷铁心变压器在结构和性能上有一些区别。叠积式铁心是由片状电工钢带叠积而成的铁心; 平面卷铁心是由电工钢带或者非晶合金平面卷制而成的铁心; 立体卷铁心是由 3 个几何尺寸相同的卷绕式铁心单框拼合成的三角形立体铁心。对抽检的变压器按叠积式铁心、平面卷铁心和立体卷铁心分别进行统计分析, 其中 200 kVA 配电变压器叠积式铁心的采用率为 65.15%, 平面卷铁心的采用率为 26.01%, 立体卷铁心的采用率为 8.84%; 400 kVA 配电变压器叠积式铁心的采用率为 62.76%, 平面卷铁心的采用率为 25.75%, 立体卷铁心的采用率为 11.49%, 具体数据如表 4 和图 2 所示。

表 4 不同铁心结构的配电变压器短路承受能力试验合格率统计

容量/ kVA	铁心结构	$P(A_i)/$ %	$P(A_i B)/$ %	$P(A_i B)/$ %	$P(B A_i)/$ %	$\rho_{A_i,B}$
200	叠积式	65.15	53.62	66.67	82.30	0.064 6
	平面卷	26.01	18.77	23.33	72.16	-0.123 5
	立体卷	8.84	8.04	10.00	90.91	0.082 3
400	叠积式	62.76	50.12	65.06	79.85	0.087 1
	平面卷	25.75	16.24	21.08	63.06	-0.195 6
	立体卷	11.49	10.67	13.86	92.93	0.136 2

通过数据分析可知,无论是 200 kVA 容量还是 400 kVA 容量的配电变压器,叠积式铁心的采用率都比平面卷铁心和立体卷铁心高。采用立体卷铁心的 $P(A_i|B)$ 值比叠积式铁心和平面卷铁心低,表明变压器中采用立体卷铁心的合格数量占所有变压器数量的比例最低。立体卷铁心的 $P(B|A_i)$ 值比叠积式铁心和平面卷铁心高,表明立体卷铁心对变压器抗短路能力会产生正面影响;而平面卷铁心的 $P(B|A_i)$ 值最低,表明平面卷铁心对变压器抗短路能力会产生负面影响。叠积式铁心的 $P(A_i|B)$ 值比平面卷铁心和立体卷铁心高,表明当前生产企业认为叠积式铁心技术相对更成熟。从相关系数也可以看出叠积式铁心和立体卷铁心与变压器的合格率提升呈正相关。由于成本的原因,目前立体卷铁心变压器的采用率较低,但其合格率高于叠积式铁心和平面卷铁心变压器,未来采用立体卷铁心结构有望显著提高变压器短路承受能力试验的合格率。



a. 200 kVA 容量叠积式、平面卷和立体卷铁心配电变压器对比 b. 400 kVA 容量叠积式、平面卷和立体卷铁心配电变压器对比

图 2 不同铁心结构的配电变压器短路承受能力试验合格率对比

经统计分析发现,在配电变压器抗短路特性方面,立体卷铁心结构优于叠积式和平面卷铁心结构。由于其独特的三维立体结构,在抗短路能力方面表现优异,其铁心由 3 个完全相同的单框拼合而成,形成等边三角形立体排列。等边三角形的排列方式使得三相受力均匀,铁心机械强度高,能够有效分散短路时产生的机械应力。立体卷变压器的铁心和绕组结构设计使其在短路条件下能够更好地承受电磁力和机械应力,减少变形和损坏的风险。叠积式铁心变压器通常采用椭圆截面的铁心,其结构和工艺设计使其在抗短路能力上相对较弱,通常通过设计改进,如采用低压箔式绕组、高低压绕组整型固化,以及薄弱处结构加强等方法来提高抗短路能力,其制造工艺成熟,成本较低,因此在许多应用场景中仍然具有竞争力。平面卷铁心变压器在抗短路性能上相对较弱,其铁心采用平面排列方式,这种结构在短路条件下容易受到不均匀的电磁力作用,导致铁心和绕组的变形和损坏。

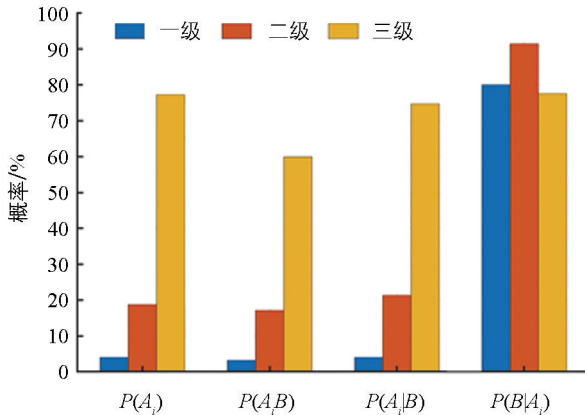
2.2 配电变压器抗短路能力与能效等级的相关性分析

《电力变压器能效限定值及能效等级》(GB 20052—2024)作为目前我国唯一的变压器技术方面的强制性标准,规定了 10 kV、35 kV、66 kV、110 kV、220 kV、330 kV、500 kV 7 个电压等级的电力变压器各个容量的能效限定值和对应的能效等级,涵盖了我国变压器行业 80% 以上的产品。

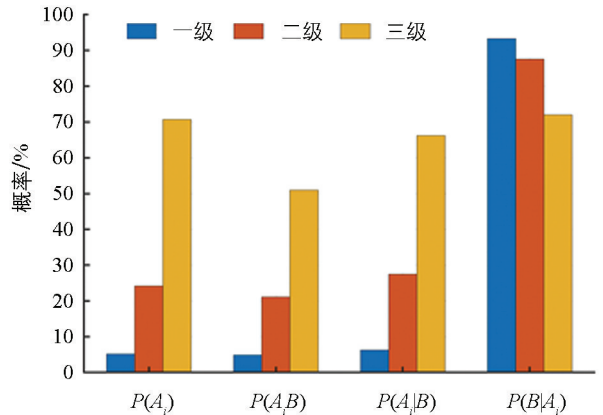
对抽检的变压器按能效等级分别进行统计分析,200 kVA 配电变压器一级能效的采用率为 4.02%,二级能效的采用率为 18.77%,三级能效的采用率为 77.21%;400 kVA 配电变压器一级能效的采用率为 5.10%,二级能效的采用率为 24.25%,三级能效的采用率为 70.65%,具体数据如表 5 和图 3 所示。

表 5 不同能效等级的配电变压器短路承受能力试验合格率统计

容量/ kVA	能效等级	$P(A_i)/$ %	$P(A_iB)/$ %	$P(A_i B)/$ %	$P(B A_i)/$ %	$\rho_{A_i,B}$
200	一级	4.02	3.22	4.00	80.00	-0.002 2
	二级	18.77	17.16	21.33	91.43	0.133 3
	三级	77.21	60.05	74.67	77.78	-0.123 0
400	一级	5.10	4.87	6.33	95.45	0.101 6
	二级	24.25	21.11	27.41	87.08	0.135 2
	三级	70.65	51.04	66.27	72.25	-0.176 3



a. 200 kVA容量不同能效等级配电变压器对比



b. 400 kVA容量不同能效等级配电变压器对比

图 3 不同能效等级的配电变压器短路承受能力试验合格率对比

目前,无论是 200 kVA 容量还是 400 kVA 容量的配电变压器,三级能效的采用率最高,其次是二级能效,一级能效采用率最低。一级能效配电变压器 $P(A_iB)$ 值最低,表明变压器中采用一级能效合格的数量占有所有变压器数量的比例低。200 kVA 配电变压器中二级能效的 $P(B|A_i)$ 值最高,400 kVA 配电变压器中一级能效的 $P(B|A_i)$ 值最高,表明一级能效、二级能效的变压器在设计、制造和材料选择方面更加优越,具有更好的电气性能和结构强度,不仅在能效上表现更好,还在抗短路方面具备更高的可靠性。三级能效配电变压器的 $P(A_i|B)$ 值最高,表明当前生产企业认为三级能效变压器技术相对更成熟,更愿意采用三级能效配电变压器。从相关系数可以看出,无论是 200 kVA 容量还是 400 kVA 容量的配电变压器,二级能效配电变压器与短路合格率提升的相关性最高。目前,二级能效配电变压器的采用率介于一级能效和三级能效变压器之间,相比三级能效变压器合格率更高,相比一级能效变压器产品成熟度更高。随着二级能效和一级能效配电变压器的采购规模加大,将会对变压器短路承受能力试验合格率带来较大提升。

2.3 配电变压器抗短路能力与声级特性的相关性分析

配电变压器的振动和噪声问题日益凸显,其与配电变压器的抗短路能力也存在一定关系。对抽检的变压器声压等级检测数据按短路合格、第 1 次短路承受能力试验不合格、第 2 次短路承受能力试验不合格、第 3 次短路承受能力试验不合格和复测不合格进行对比分析。200 kVA 和 400 kVA 配电变压器声压等级与抗短路特性的关系如图 4 所示,颜色深浅代表该声级变压器的占比。由统计结果可知,无论是 200 kVA 变压器还是 400 kVA 变压器,第 1 次、第 2 次、第 3 次短路承受能力试验不合格的配电变压器相比短路合格的变压器,其声压等级更集中在较高的区域,复测不合格的变压器声压等级则较为分散。通过比较可知,配电变压器的声级特性和抗短路特性之间存在一定的关系,但并不直接影响。变压器的抗短路能力主要与绕

组、绝缘、铁心等有关,而声级特性与变压器的设计、结构、材料等有关。在设计变压器时,需要综合考虑抗短路能力、噪声水平以及其他性能指标。通过合理的设计、材料选择和工艺措施,可以在保证抗短路能力的前提下,尽可能降低噪声水平。变压器抗短路能力和声级特性是需要综合考虑的因素,生产企业在设计和制造过程中应平衡这些因素,以满足电网的要求和用户的需求。

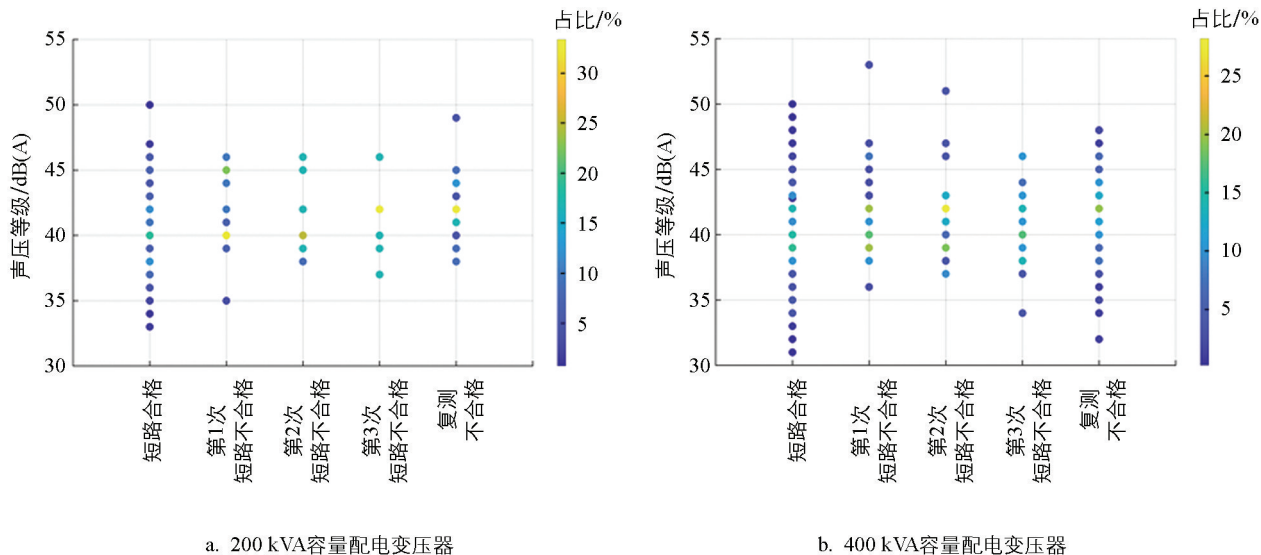


图 4 200 kVA 和 400 kVA 配电变压器声压等级与抗短路特性的关系

3 基于朴素贝叶斯的变压器抗短路性能分类研究

为进一步挖掘变压器各特征量与其抗短路特性的关联关系,基于前文分析的铁心材质、铁心结构、能效等级和声级数据,将朴素贝叶斯算法^[19]应用到变压器的抗短路特性识别中,对变压器的抗短路特性进行推理预测,为变压器采购提供更为有效的决策依据。本文选取的关键特征量如表 6 所示。

表 6 特征量信息

序号	特征量	序号	特征量
1	容量	4	能效等级
2	铁心材质	5	声压等级
3	铁心结构		

3.1 朴素贝叶斯分类算法模型

朴素贝叶斯分类算法以先验概率为基础,基于新检测证据计算后验概率,从而作出判断。基于朴素贝叶斯的变压器抗短路性能分析算法步骤如下:

步骤 1 搜集样本训练集 $D = \{A_1, A_2, A_3, \dots, A_m\}$, 对应样本数据的特征属性集为 $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$, 其中 A 为训练样本集中的实例, m 为训练样本集的个数, n 为特征属性的个数, x_n 为 X 的特征量, 分类集合 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_k\}$ 。

步骤 2 统计得到各类别下各特征量的条件概率估计, 记为 $P(x_j | y_i)$, 其中 y_i 为第 i 种抗短路特性, x_j 为第 j 个特征属性。针对连续特征量, 如声压等级, 设定其服从正态分布, 用概率密度函数表征条件概率, 则其概率密度函数为:

$$P(X = x_j | y_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{y_i}} \exp\left[-\frac{(x - \mu_{y_i})^2}{2\sigma_{y_i}^2}\right] \quad (7)$$

式中: μ_{y_i} 为从样本数据集中统计出在 y_i 分类下特征量的均值; σ_{y_i} 为从样本数据集中统计出在 y_i 分类下特征量的方差。

针对离散特征量, 如容量、铁心材质、铁心结构、能效等级, 对其分类的条件概率通过统计特征量在样本数据集中出现的次数来计算:

$$P(X = x_j | y_i) = \frac{\text{sum}(X = x_j | Y = y_i)}{\text{sum}(Y = y_i)} \tag{8}$$

步骤 3 由于朴素贝叶斯算法原理基于样本属性间相互独立的假设, 则所有条件概率为:

$$P(X | y_i) = \prod_{j=1}^n P(x_j | y_i) \tag{9}$$

且由全概率公式可知:

$$P(X) = \sum_{i=1}^k P(y_i)P(X | y_i) \tag{10}$$

所以类别 y_i 的后验概率为:

$$P(y_i | X) = \frac{P(y_i)P(X | y_i)}{P(X)} = \frac{P(y_i) \prod_{j=1}^n P(x_j | y_i)}{\sum_{i=1}^k P(y_i) \prod_{j=1}^n P(x_j | y_i)} \tag{11}$$

此时只要求出 $P(y_i | X)$ 取最大值时对应的 y_i 即为待验样本所属的类别, 即:

$$P(y_R | X) = \max\{P(y_1 | X), P(y_2 | X), \dots, P(y_k | X)\} \tag{12}$$

基于朴素贝叶斯的变压器抗短路性能分类算法流程如图 5 所示。首先, 收集和整理历史检测数据, 这些数据是模型训练和验证的基础, 需增加对于数据异常值和缺失值的解决方法。对于数据异常情况, 使用箱线图法^[20]识别异常值, 并使用线性插值法对其进行补值; 对于数据缺失情况, 使用多项式插值法^[21]进行补足。接着, 从数据中提取关键特征量, 构建多维数据模型, 用于模型的训练和检验。然后, 基于多维数据模型, 计算各个类别的先验概率, 利用朴素贝叶斯算法构建分类模型, 使用提取的特征量和多维数据模型进行数据的训练和检验, 得到相应的分类结果。最后, 获取新的检测数据, 对新的检测数据进行测试并验证模型的性能。新数据应具有代表性, 以确保模型在实际应用中的有效性, 使用构建好的模型对新的检测数据进行分类判断, 模型根据计算出的后验概率, 将新数据分配到最可能的类别中。根据新的检测数据和分类结果, 更新模型以提高其准确性和鲁棒性。

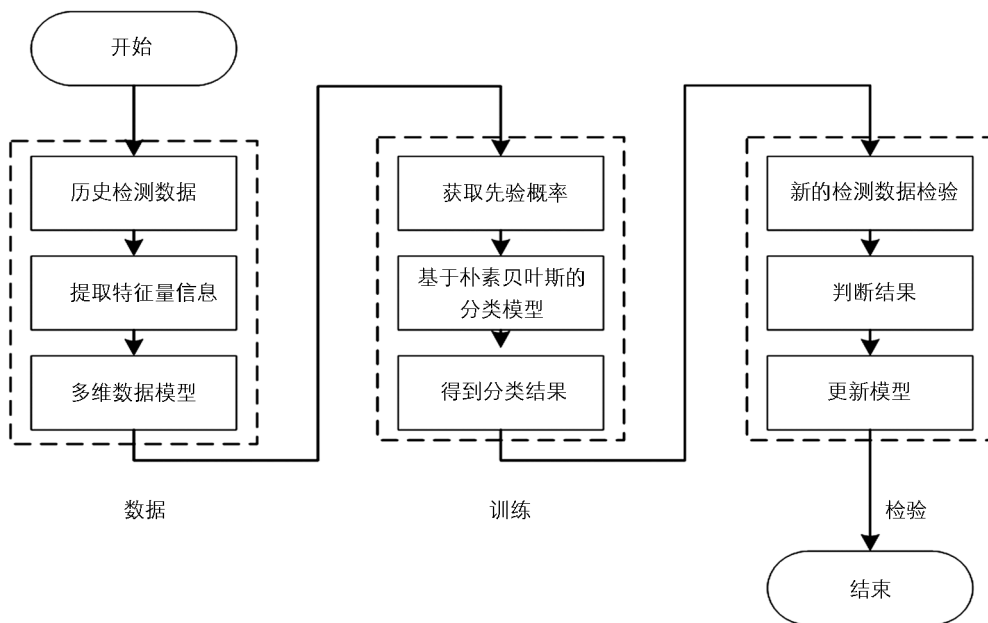


图 5 基于朴素贝叶斯的变压器抗短路性能分类算法流程

3.2 变压器抗短路性能实例验证

基于变压器的抽检质量数据,将前 80%数据作为训练样本集,后 20%数据作为测试样本集,形成样本集 D 。样本中所包含的类别为: $Y = \{\text{合格, 不合格—第 1 次短路不合格, 不合格—第 2 次短路不合格, 不合格—第 3 次短路不合格, 不合格—复测不合格}\}$, 特征变量 $X = \{\text{容量, 铁心材质, 结构, 能效等级, 声压等级}\}$ 。

计算训练样本集中变压器不同抗短路特性出现的先验概率 $P(Y)$, 如表 7 所示。从变压器不同抗短路特性的先验概率可知, 78.5%的变压器短路试验合格, 整体抗短路性能可靠性较高。但多次短路不合格概率随试验次数递减, 且复测不合格概率达到 9.5%, 所有不合格情况累计超 20%, 仍需管控相关性性能风险。

表 7 变压器不同抗短路特性的先验概率

短路试验结果	先验概率/%	短路试验结果	先验概率/%
合格	78.5	第 3 次短路不合格	3.2
第 1 次短路不合格	5.1	复测不合格	9.5
第 2 次短路不合格	3.7		

离散特征量 x_j 的条件概率 $P(x_j | y_i)$ 的计算结果如表 8 所示。不同离散特征量的条件概率显示, 400 kVA 容量、电工钢带铁心材质的变压器抗短路性能及稳定性更优, 立体卷铁心在合格结果上倾向性突出, 而三级能效变压器在不合格结果中的占比更高, 200 kVA、非晶合金铁心材质变压器相对更易出现抗短路性能不达标的情况。

表 8 不同离散特征量的条件概率

特征量	合格/ %	第 1 次短路不合格/ %	第 2 次短路不合格/ %	第 3 次短路不合格/ %	复测不合格/ %
200 kVA	29.2	44.0	32.4	18.8	18.1
400 kVA	70.8	56.0	67.6	81.3	81.9
电工钢带铁心	65.2	66.0	48.6	59.4	48.9
非晶合金铁心	34.8	34.0	51.4	40.6	51.1
叠积式铁心	65.2	66.0	48.6	59.4	48.9
平面卷铁心	19.9	32.0	45.9	37.5	41.5
立体卷铁心	14.9	2.0	5.4	3.1	9.6
一级能效	6.3	2.0	10.8	3.1	3.2
二级能效	30.8	12.0	2.7	12.5	21.3
三级能效	62.9	86.0	86.5	84.4	75.5

声压等级作为连续特征量, 设定服从正态分布, 表示不同特征下的条件概率, 通过训练样本集计算得到连续特征量条件概率分布的样本均值和标准差, 如表 9 所示。合格样本的声压等级均值为最低的 40.12 dB(A), 所有不合格样本均值均高于合格样本, 其中第 1 次、第 2 次短路及复测不合格均值在 41.72~41.95 dB(A) 范围内, 第 3 次短路不合格的均值为 41.03 dB(A), 且各状态下声压等级标准差差异较小。

表 9 连续特征量条件概率分布的样本均值和标准差

样本	声压等级	
	均值/dB(A)	标准差/dB(A)
合格	40.12	3.17
第 1 次短路不合格	41.94	3.27
第 2 次短路不合格	41.95	2.94
第 3 次短路不合格	41.03	2.92
复测不合格	41.72	3.14

经过训练得到朴素贝叶斯分类算法模型, 为验证模型的合理性, 再对后 20% 数据作为测试样本集进行类别预测。利用朴素贝叶斯分类后验概率最大原则进行判别, 基于待验样本的特征属性数据快速预测每台变压器的抗短路特性, 并与真实等级进行类比, 得到待验样本预测类别正确的为 227 组, 错误的为 20 组, 分类总体准确率为 91.90%。具体的朴素贝叶斯分类结果如表 10 和图 6 所示, 其中混淆矩阵表明模型对多数类别标签的预测较为准确, 但仍存在少量类别标签预测错误的情况。

为保证对比试验的可信度, 在完全相同的训练集与测试集下, 采用 SVM、DT 和逻辑回归(Logistic Regression, LR)方法进行对比测试, 测试结果如表 11 所示。

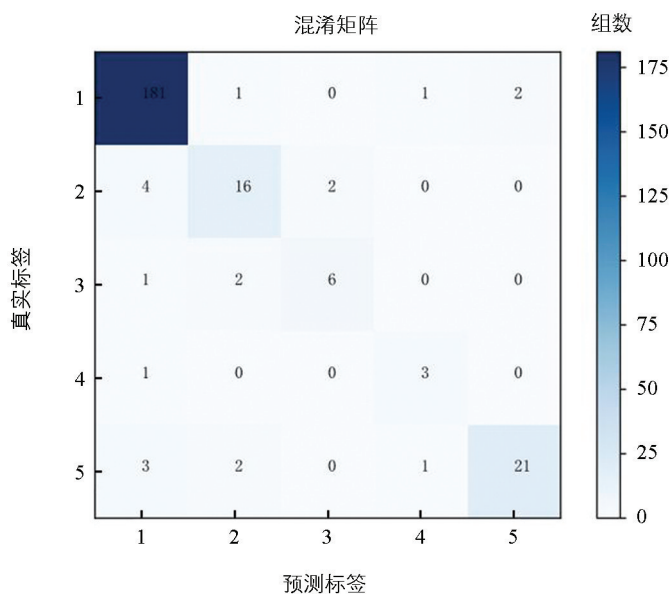


图 6 朴素贝叶斯分类混淆矩阵

表 10 朴素贝叶斯分类结果

组

真实等级	分类预测				
	合格	第 1 次短路不合格	第 2 次短路不合格	第三次短路不合格	复测不合格
合格	181	1	0	1	2
第 1 次短路不合格	4	16	2	0	0
第 2 次短路不合格	1	2	6	0	0
第 3 次短路不合格	1	0	0	3	0
复测不合格	3	2	0	1	21

表 11 不同方法测试结果对比

模型	准确率/%	精确率/%	召回率/%	F1 分数/%
SVM	88.66	66.82	70.21	66.80
DT	87.45	63.89	67.48	62.82
LR	88.26	65.34	68.96	64.82
朴素贝叶斯	91.90	79.55	78.00	78.44

根据测试结果可知,相比 SVM、DT 和 LR,本文构建的基于朴素贝叶斯的变压器抗短路性能分类算法模型总体表现最佳。结合变压器的容量、铁心材质、铁心结构、能效等级、声压等级等信息,利用贝叶斯推理的分类方法,对变压器可能存在的短路缺陷进行推理预测,可为现场提供更为有效的决策依据。应用案例的诊断结果表明,本文所提的变压器抗短路特性的贝叶斯分类算法可在一定程度上推理变压器的抗短路特性,具有一定的工程应用价值。

4 变压器抗短路特性提升策略

提高配电变压器的抗短路特性是确保电力系统稳定运行的关键。根据前文分析结果,从选材、结构、能效等级和声级特性 4 个方面给出提高配电变压器抗短路特性的策略。

1) 电工钢带配电变压器相比非晶合金配电变压器的合格率平均提高了 6.48 个百分点,因此应优先选择高强度和高导电性的材料,如采用高性能的硅钢片,以及采用高导电性的纯铜或铝合金导线,以减少绕组电阻,降低热损失;同时选择具有良好热稳定性的绝缘材料,以承受短路时产生的高温,提高变压器的抗短路能力。

2) 立体卷铁心配电变压器相比平面卷铁心配电变压器的合格率平均提高了 24.31 个百分点,因此优化变压器的结构设计,应优先选用立体卷结构,加强绕组支撑和压紧结构,提高机械强度,防止短路时的变形;设计合理的冷却系统,能够有效散热,从而减轻短路时的热应力。

3) 一级、二级能效配电变压器相比三级能效配电变压器的合格率平均提高了 13.48 个百分点,因此应优先选购高能效变压器,不仅可以通过减少无功损耗和负载损耗,提高整体效率,还可以减少热损失,从而减轻短路时产生的热应力,提高变压器的耐受能力。

4) 选择低噪声变压器,降低变压器运行时的噪声与振动,从而减小结构应力;采用低噪声的冷却系统和减振材料,提高变压器的整体稳定性,也有助于提高变压器的抗短路能力。

综上所述,通过考虑材料选择、结构优化、能效提升和噪声控制等方面,可以有效提高配电变压器的抗短路特性,确保电力系统的可靠性和安全性。

5 结论

本文基于质量数据开展了配电变压器抗短路特性研究,通过分析某检测中心对某电网 2021—2024 年抽检的油浸式配电变压器短路承受能力试验结果,挖掘了变压器短路合格率与铁心材质和结构、变压器能效等级、声级特性之间的密切相关性,给出了变压器行业在选材和工艺方面提升变压器抗短路能力的共性措施。此外,通过引入朴素贝叶斯分类算法,将变压器容量、铁心材质、铁心结构、能效等级和声压等级等特征量作为输入,对变压器的短路性能进行了推理预测。经过实例验证,该算法的分类总体准确率达到 91.90%,表明其具有一定的工程应用价值,并为配电变压器的质量评估和优化提供了新的思路和方法。本文的研究成果对于配电变压器供应商优化变压器设计、采购商评估变压器质量等级均具有重要的指导意义。

参考文献:

- [1] 周勤勇,何泽家. “双碳”目标下新型电力系统技术与实践 [M]. 北京:机械工业出版社,2022.
- [2] 吕青媛,李雅雯. 低碳电网发展现状及展望 [J]. 电气时代,2023(8): 22-25.
- [3] 赵家礼,张庆达. 变压器故障诊断与修理 [M]. 北京:机械工业出版社,1998.
- [4] 陆云才,廖才波,李群,等. 基于声纹特征和集成学习的变压器缺陷诊断方法 [J]. 电力工程技术,2023, 42(5): 46-55.
- [5] 王世阁,钟洪璧. 电力变压器故障分析与技术改进 [M]. 北京:中国电力出版社,2004.

- [6] 廖才波, 杨金鑫, 胡雄, 等. 基于油中溶解气体特征量筛选的变压器故障诊断方法 [J]. 电力工程技术, 2024, 43(1): 192-200.
- [7] 孙洋. 电力系统中高压电气试验的分析 [J]. 中国设备工程, 2022(1): 233-234.
- [8] 李沂新, 贾云飞, 杨欣颐, 等. 基于典型振动规律的干式变压器机械状态诊断 [J]. 电力工程技术, 2023, 42(5): 10-19.
- [9] 胡赵宇, 李喆, 陈海威, 等. 基于声纹压缩和代价敏感的变压器状态检测评估方法 [J]. 电力工程技术, 2024, 43(3): 209-216.
- [10] 王轩, 龙飞, 张江超, 等. 限流装置对变压器抗短路能力提升作用分析 [J]. 设备管理与维修, 2024(3): 17-19.
- [11] 罗竣匀, 刘君, 胡晓, 等. 基于有限元的电力变压器抗短路能力校核方法研究 [J]. 电工电能新技术, 2023, 42(2): 78-87.
- [12] 谢茜, 张宗喜, 丁理杰, 等. 变压器抗短路能力校核不合格原因分析及治理措施研究 [J]. 四川电力技术, 2022, 45(5): 54-57.
- [13] 陈友鹏, 陈璟华, 廖姗姗, 等. 电力变压器抗短路能力提升研究综述 [J]. 电工技术, 2021(11): 75-79.
- [14] 金雷, 罗维, 鲁非, 等. 电力变压器短路风险评估及防治措施 [J]. 变压器, 2020, 57(3): 46-50.
- [15] 田军, 朱占春, 孙建鸿, 等. 基于 BP 神经网络和改良三比值法的变压器故障诊断方法 [J]. 工业控制计算机, 2024, 37(12): 135-136.
- [16] 唐轩, 成俊杰, 吴琳, 等. 基于信号距离度模型和 SVM 的变压器绕组变形诊断方法研究 [J]. 高压电器, 2024, 60(11): 27-36.
- [17] 陈泽华. 基于改进支持向量机的变压器故障诊断模型研究 [D]. 南京: 东南大学, 2023.
- [18] 袁海满, 钱海涛. 基于灰色相关向量机的变压器故障预测 [J]. 电工技术, 2024(21): 147-150.
- [19] 李庆波, 赵宇兰, 张如静. 基于粗糙集约简与概率图的认知诊断模型研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2024, 46(11): 217-226.
- [20] 顾国庆, 李晓辉. 基于箱线图异常检测的指数加权平滑预测模型 [J]. 计算机与现代化, 2021(1): 28-33.
- [21] 周效栋, 张帆, 李晋江, 等. 基于特征增强与多项式插值的目标检测网络 [J/OL]. 计算机辅助设计与图形学学报, (2025-02-07) [2025-05-22]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2925.TP.20250206.1619.027>.

责任编辑 柳剑