

干式空心电抗器匝间绝缘故障分析及治理措施

任宝林, 贺俊杰, 张建兴, 魏晓伟, 张潇

(国网冀北超高压公司, 北京 102400)

摘要:本文介绍了一起超高压变电站内 35 kV 并联干式电抗器运行过程中跳闸起火的故障情况,通过干式电抗器的工作原理及结构、同批次产品试验数据和设备解体排查情况,结合故障录波数据对故障原因进行了分析并基本确认了故障部位。判断本次故障是由于时间积累下电抗器包封开裂、聚酯薄膜进水腐蚀导致匝间绝缘劣化所造成,绝缘劣化后导致单一匝间短路,而后运行工况下单一匝间短路快速演变为多匝间短路电故障,最终电抗器在持续升温下起火燃烧。根据长期投运状态下干式空心电抗器匝间短路的故障发生机理对设备生产工艺以及检修策略提出了改进建议。

关键词:干式空心电抗器; 匝间绝缘短路; 包封开裂; 工艺改进; 检修措施

Analysis and Mitigation Measures for Inter-turn Insulation Faults in Dry-type Air-core Reactors

REN Baolin, HE Junjie, ZHANG Jianxing, WEI Xiaowei, ZHANG Xiao
(Jibei Ultra-high Voltage Substation Company of SGCC, Beijing 102400, China)

Abstract: In this paper a fault case involving trip and fire incident of a 35 kV dry-type reactor during operation in an UHV substation is introduced. The cause of the fault is analyzed through the working principle and structure of the dry-type reactor, test data of the same batch of products, disassembly and inspection of the equipment as well as combination with the fault recording data, and the fault location is basically confirmed. The fault is determined to be caused by the cracking of the reactor's encapsulation and the moisture ingress and corrosion of the polyester film, which leads to the deterioration of the inter-turn insulation over time. Following the insulation degradation, a single inter-turn short-turn short circuit occurs. Under operating condition, this single inter-turn short circuit is rapidly evolved into a multi-turn short circuit fault. Eventually, the reactor ignites and burns at the continuous temperature rise. Based on the fault occurrence mechanism of inter-turn short circuit of dry-type air-core reactors under long-term operation, certain improvement suggestions for the equipment production process and maintenance strategy of the equipment are made.

Keywords: dry-type air-core reactor; inter-turn insulation short circuit; encapsulation crack; process improvement; maintenance measures

0 引言

目前,超、特高压变电站主变压器无功补偿侧广泛采用重量轻、可靠性高、维护量小的干式空心电抗器^[1],通过串、并联以达到限制过电压、限制电容器组送电冲击电流,改善电网无功功率的目的。但随着设备投运规模的逐年扩大,干式空心电抗器故障跳闸甚至起火事件时有发生^[2]。

90% 的干式空心电抗器跳闸起火原因是由电

抗器的匝间短路引起^[2-6]。而导致电抗器匝间短路的原因包括:1)绝缘材料耐热性差^[7-10]。在较早的文献中常见此类缺陷,但随着设备厂家的制造工艺改进和产品绝缘材质升级换代,目前生产的电抗器基本满足耐热性要求,因此这类故障较为鲜见。2)调匝环起火^[7,11-14]。调匝环部位是匝间绝缘相对薄弱处,若设备制造过程中存在手工绕制质量差、调匝环设计缺陷、焊接毛刺、与本体包封连接不良等诸多问题,投运后某一部分线匝会过流发热甚至损坏绝缘导

致匝间短路、局部过热等故障。从多起案例分析来看,此类故障先单点匝间绝缘失衡然后故障突然扩大发展,且有明显的时间节点属性,一般在投运 5 年左右会出现故障起火,最长者不超过 10 年^[7,13]。目前多个规程^[15-16]要求单丝线电抗器不宜采用调匝环结构,因此越来越多的设备厂家逐渐不再使用调匝环工艺。3)其他原因导致。诸如接线板发热^[17]、风道异物^[18]等因素,但从干式电抗器起火统计情况看^[1,12],并非主流因素。4)材料老化导致匝间绝缘耐受性降低^[19-26]。目前的研究文献显示,电抗器在投运前 5 年故障起火的概率较高,因此大多数的故障分析和探索性绝缘实验的时间节点均选取在投运第 5 年左右或直接采用适合仿真试验的全新设备^[27-32],并未对干式空心电抗器长期投运(15 年及以上运行时间)工况下绝缘变化情况做出深入研究。

本文以某超高压变电站安全运行 15 年的 35 kV 并联干式空心电抗器跳闸起火事故为例,分析起火电抗器故障录波数据及同间隔、同批次、同型号在运电抗器对照试验和解体排查情况,最终找到了电抗器故障的原因和部位,分析了长期运行工况下干式空心电抗器绝缘损坏过程机理,并提出针对性的电抗器生产工艺改进方案与检修措施。

1 故障简介

1.1 设备情况

某超高压 500 kV 变电站 35 kV 干式空心电抗器故障相型号为 BKK-20000/35,出厂编号 219407,2007 年 3 月出厂,2008 年 4 月投运,具体参数见表 1。

表 1 干式电抗器设备参数表
Table 1 Parameters of dry-type reactor

参数	数值
型号	BKK-20000/35
额定电压/kV	34.5/ $\sqrt{3}$
额定电流/A	1 004
额定电抗/ Ω	19.8
外径/mm	2 880
内径/mm	1 680
线圈本体高度/mm	2 336
包封层数	16 真层+1 内假层
绕组小层数	45
螺旋数	2
出厂日期	2007.3

电抗器共计 17 个包封层,最内圈为假包封无线圈缠绕,设备从内向外有效包封为 16 层,每层包封由多股铝线并联组成,包封层间以环氧树脂支撑条起散热、支撑作用。绕组中的导线外部由环氧树脂浸渍的玻璃纤维包封,多层并联筒式绕组结构,

包封内壁无 RTV 喷涂。电抗器上下汇流排采用铝合金星形架布置结构,采用计算机优化计算绕组布局,因此无需调匝环。具体结构如图 1 所示。

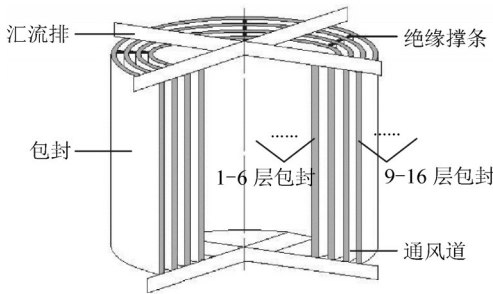
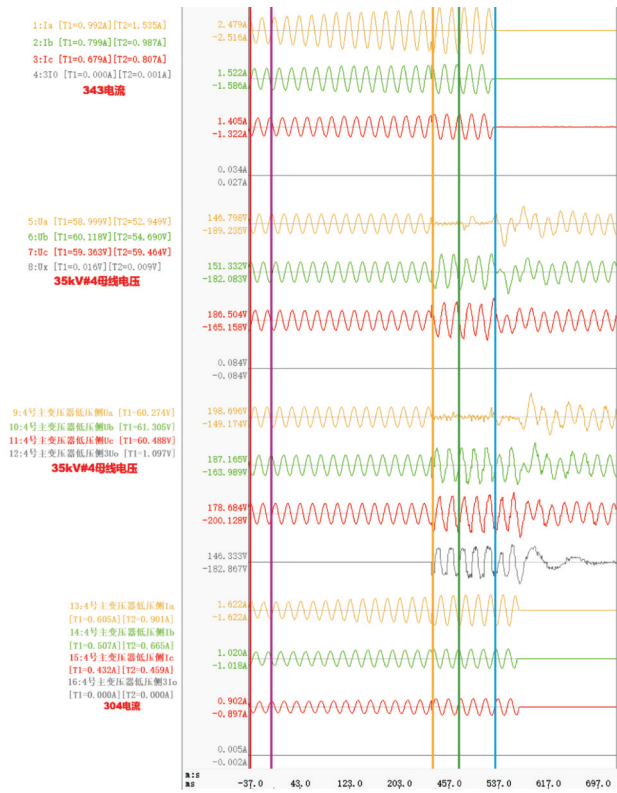


图 1 干式空心电抗器结构示意图
Fig. 1 Structural schematic diagram of dry-type air-core reactor

1.2 故障情况

2024 年 5 月 23 日 17 时 08 分,某 500 kV 变电站 35 kV 1 号电抗器保护过流 II 段动作,343 开关跳闸,运维人员现场检查发现干式空心电抗器 A 相冒烟起火。

结合 35 kV 1 号电抗器保护装置动作信息及 4 号主变故障录波器波形数据,保护动作情况如图 2 所示。



器 A 相电流幅值达到 0.992 A(一次值 1.587 kA),超过电抗器过流保护Ⅱ段电流定值(0.94 A,0.5 s),保护启动。

17 时 08 分 27 秒 253 毫秒(T_1 时刻 0.5 s 后,图 2, T_3 时刻),35 kV 1 号电抗器过流Ⅱ段保护动作,出口跳开 343 开关。

故障期间,电抗器 A 相(故障相)电流呈极短时间内迅速增大趋势,表征阻抗变小,符合匝间短路由少匝短路快速发展成多匝短路的故障特征。

17 时 08 分 27 秒 059 毫秒(图 2, T_2 时刻),35 kV 4 号母线 A 相电压二次值跌落至 0.6 V(一次值 0.2 kV),B、C 相电压二次值升高接近至 100 V(一次值 35 kV),符合不接地系统的接地短路故障特征^[10],接地一直持续至 343 开关跳闸。

通过调阅监控视频,17 时 08 分 27 秒,电抗器 A 相有爆燃过程,爆燃与故障时刻一致。燃烧物掉落时,支撑绝缘子爬电距离不足,造成对地放电,形成单相接地短路。

上述证据表明,本事故中电抗器爆燃起火的根本原因是匝间短路导致,而且匝间短路恶化迅速,从单一匝间短路过渡到多匝间短路起火时间极短。可推断,长时间运行的干式电抗器匝间短路起火的发展规律大致为前期正常运行、多次例行试验无问题,随着匝间损伤到达临界匝间短路出现,或外界环境(如大量降雨、温度炎热等特定情景)催化匝间损伤到达临界后,事故将迅速发展直到起火或放电跳闸为止。

2 对比试验诊断

由于故障相(编号:219407)损毁严重无法试验,因此开展试验诊断工作时选用同厂家、同批次、相同运行工况的 343 间隔干式空心电抗器 B 相(编号:219408)作为试验目标,通过类比 A 相故障跳闸前的设备状态,分析长期运行工况下干式电抗器故障前的绝缘情况和电气量状态。

2.1 常规试验

对 343 间隔干式空心电抗器 B 相进行直流电阻、工频损耗和电抗值测试,试验数据合格,未超标准偏差 $\pm 2\%$ 的规程要求,如表 2 所示。

表 2 干式电抗器常规试验结果
Table 2 Routine test result of dry-type reactor

项目	产品 序号	直流电阻 (75℃)/Ω	工频损耗 (75℃)/kW	电抗/Ω
出厂值	219408	0.051 06	59.151	20.195 3
复测值	219408	0.050 90	60.220	20.160 1

2.2 支路导线直流电阻与绝缘电阻测量试验

首先将电抗器所有下汇流排的出线接头剥开,并做好标记,上汇流排出线头不剥开,测量每根导线的直流电阻。通过测量单支路导线直流电阻值,发现数据无异常,各支路完好,如图 3 所示。



图 3 剥开后的电抗器出线接头
Fig. 3 The exposed reactor outlet terminal after being stripped

之后,将电抗器上、下汇流排所有的出线头剥开,用 500 V 兆欧表测量各绕包层股、层间的绝缘电阻值。试验结果显示各绕包层的股间绝缘和层间绝缘均为“ ∞ ”,股间绝缘和层间绝缘性能良好。

2.3 耐压试验

为验证本组电抗器高电压下绝缘耐受情况,首先对该电抗器进行 128 kV、1 min 匝间耐压试验(标准值的 80%),试验通过后,继续对该电抗器进行 160 kV、1 min(标准值)匝间耐压试验,试验通过。试验耐压波形见图 4。

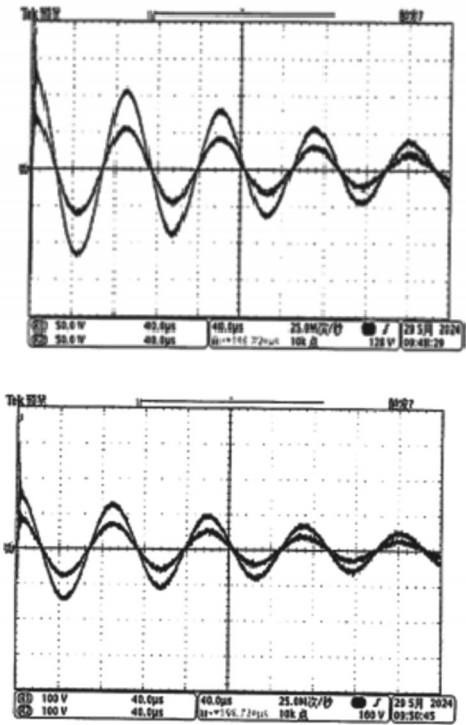


图 4 2 次匝间耐压试验波形情况
Fig. 4 Waveform conditions of the 2nd inter-turn withstand voltage test

根据运行经验,343 间隔电抗器组的另外两相随时可能爆燃起火。但从试验结果看,不仅低电压试验(如直流电阻、匝间绝缘等)对匝间绝缘故障前特征电气量的捕捉效果甚微^[33],高电压试验(128 kV、1 min;160 kV、1 min 匝间耐压试验)同样无法有效反映故障前绝缘状态,可见例行试验对长期工况下干式电抗器匝间绝缘老化程度的判断助益较少。

3 解体检查分析

3.1 故障相解体

故障相电抗器从外至内进行逐层切割解体,第16 包封层至第7 包封层进行切口解体,由于第6 包封层以内烧毁严重无硬化部分且导线分层错乱,无法找到解体切口,故第1 至第6 包封层无法进行解体观察,如图5 所示。



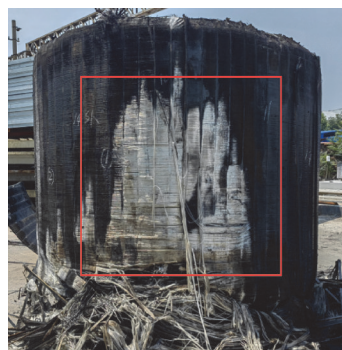
图5 第1至第6包封层烧损情况
Fig. 5 Burn-off condition of the 1st to the 6th encapsulation layers

故障电抗器从第16 层包封向内过火损伤情况逐步扩大,至第7 包封层处电抗器上端已形成塌陷区域,至第6 层向内已完全塌陷。根据第16 至第1 包封层解体情况,故障电抗器是由里层向外层损毁,从区域发展严重程度来看,故障原发点应在6 层以内包封层。

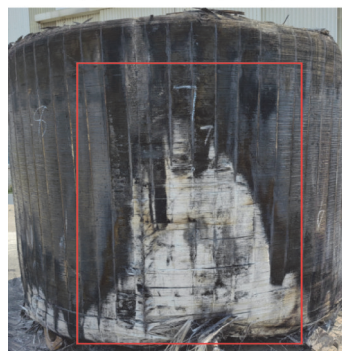
纵向来看,可解体各层的汇流排第11 至第1 臂、第7 臂附近,距下端 400 mm 范围受损较为严重,且第1 臂比第7 臂损伤更严重,如图6 所示。

对于该两处区域,在第14 层、13 层、9 层范围有明显导线断裂破损,如图7 所示。

从图7 可看出,第9 层导线破损情况明显比第14 层、13 层严重,同样印证故障是由内向外发展。结合上述解体检查情况,可以推测出故障烧毁的干式空心电抗器的原发点应在第6 包封层以内的1 号汇流排距下端 400 mm 范围附近。



(a) 第11臂至第1臂



(b) 第7臂

图6 第11至第1臂、第7臂损伤情况
Fig. 6 Damage condition of the 11th to the 1st arm and the 7th arm



(a) 第14臂



(b) 第13臂



(c) 第9臂

图7 故障相第14、13、9层断线情况
Fig. 7 Wire breakage condition the 14th, 13th and 9th layer of the faulty phase

3.2 非故障相解体

343 间隔电抗器 B 相(编号:219408)为非故障相,解体后发现电抗器包封层下端面及内外表面存在轻微积灰,部分外绝缘存在微小开裂损伤,如图 8 所示。



图 8 非故障相电抗器积灰情况
Fig. 8 Dust accumulation on the non-faulty phase reactor

电抗器 B 相逐层解体共发现 8 处包封开裂情况见图 9。包封剥开后发现内部线圈间绝缘介质同样开裂,剥离缺陷处的表面包封,观察导线和导线绝缘膜并无明显损伤,但以目前的技术手段难以判断聚酯薄膜损坏程度。如图 10 所示。



图 9 非故障相电抗器外包封裂口
Fig. 9 Cracks in the outer encapsulation of the non-faulty phase reactor

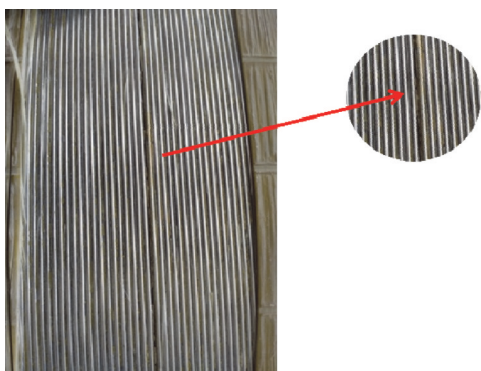


图 10 非故障相电抗器线圈裂口
Fig. 10 Cracks in the coil of the non-faulty phase reactor

3.3 扩大检查

为进一步分析本次电抗器故障原因,立即安排对此前故障跳闸的同厂家、同型号电抗器进行返厂解体,解体后发现该批次电抗器包封通风道内部存在同类包封开裂情况。同时,针对老旧电抗器包封开裂隐患,结合停电对在运的所有干式电抗器开展专项排查,通过内窥镜检查电抗器通风道,发现多组电抗器包封纵向开裂和线圈开裂情况,且下端比上端积污情况严重。

干式电抗器因长时间的机械应力或电热老化、频繁投切过电压等因素造成电抗器包封内、线圈间绝缘实质破坏,破坏后遇空气潮湿、散热不良,加剧绝缘腐蚀损坏,最终导致匝间短路的出现。当匝间绝缘故障从无到有出现之后,单点匝间短路迅速发展为多点匝间短路后起火爆燃。

3.4 故障分析

电抗器长期(15 年以上)在户外经受各种复杂环境条件影响,如 AVC 频繁投切,温度急剧变化等,包封材料长期处于热胀冷缩状态下可能发生形变,多种原因造成该电抗器包封出现狭长裂缝。水汽通过裂缝进入包封内部,导线绝缘所采用的聚酯薄膜虽具有耐高温、电气强度高的特点,但在水汽和高温作用下发生缓慢水解后脆化,开裂处受潮,导致绕组导线绝缘层加速老化,绝缘能力下降^[34]。

在持续交流电场作用下,绝缘薄弱点(裂缝或缺陷)发生局部击穿或树枝状放电,使绝缘层发生不可逆的破坏,导线绝缘老化后击穿引起匝间绝缘短路,时间效应累计下本就脆弱的绝缘层开始快速破坏,形成恶性循环,最终导致短路电流持续增大,故障迅速发展。故障同时造成电抗器内部发热,温度迅速上升,高温导致电抗器环氧树脂材料和铝导线熔化冒烟,形成树脂-铝混合熔液沿支柱绝缘子流淌,对地距离不足必然形成接地电流,故障电流进一步增大后达到保护整定值后开关跳闸。

推测故障相发展过程可能为:并联电抗器通风道长,由外向内包封散热性逐渐变差,持续的热上升气流将空气中的湿气、灰尘、污秽物等带入通风道内,吸附在产品包封层表面,且呈现出下端厚,上端薄的特点。处于包封层裂缝损伤处的污秽物逐步积累,与水汽混合后腐蚀薄膜造成导线内绝缘逐步受损。在特定情况下发展为单一匝间短路,进而快速演变为多匝间短路故障。可见单纯的微小积污威胁有限,但若大量积污且伴有电抗器包封开裂,应引起重视。

4 结语

通过相关证据分析和解体检查,可以确定 343 间隔并联干式空心电抗器跳闸起火部位是电抗器内层包封(1-5 层)下部易积污处。长期室外运行经受各类电、热、机械老化影响导致产品包封开裂,在污秽和潮湿空气作用下引发匝间短路故障,导致铝线圈温度升高,引燃环氧树脂绝缘包封,最终导致电抗器烧损。

本次干式空心电抗器跳闸起火事故,故障相及解体相运行时间均超 15 年,对长期运行的干式电抗器有以下建议:

1)同类型产品包封体系中应增加绝缘增韧剂或包封内部增加玻纤带,提高包封整体性能,降低外绝缘老化、开裂、损伤。

2)将导线由单丝结构升级为全绝缘扁形换位结构,采用全绝缘扁形换位导线,产品匝间绝缘更均匀,避免单丝结构导线层间绝缘问题,换位导线结构产品支路数降低 70% 以上,施工分散性得到有效控制,进一步提升设备性能。

3)结合例行停电对电抗器开展内窥镜检查,若发现包封开裂,立即进行运行可靠性评估。对较严重者建议更换;较轻微或无开裂者建议风道清扫和风道内增喷、补喷 RTV 措施。

4)当然为彻底消除设备故障风险,建议逐步更换运行时间超过 15 年的干式电抗器,保障无功设备安全稳定运行。

参考文献

- [1] 杨宇斌. 广东地区 10 kV 干式空心串联电抗器烧毁故障原因分析及解决方案[D]. 广州:华南理工大学,2018.
- [2] 郭绍伟,彭珑,牛铮,等. 特高压变电站 110 kV 干式空心电抗器匝间过电压试验技术研究与现场应用[J]. 华北电力技术,2016(10):31-35.
GUO Shaowei, PENG Long, NIU Zheng, et al. Research and application of turn-to-turn overvoltage test technique for 110 kV dry-type air-core reactors in ultra-high voltage substation[J]. North China Electric Power, 2016(10):31-35.
- [3] 张晗,蔡延雷. 一起 500 kV 变电站干式空心电抗器故障原因分析[J]. 电力电容器与无功补偿,2016,37(1):47-50.
ZHANG Han, CAI Yanlei. Fault analysis on dry-type air-core reactor in 500 kV substation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2016, 37(1):47-50.
- [4] 廖敏夫,程显,翟云飞. 干式空心电抗器脉冲振荡匝间绝缘检测系统的仿真与试验[J]. 高电压技术,2011,37(6):1343-1348.
LIAO Minfu, CHENG Xian, ZHAI Yunfei. Simulation and

experiment on impulse oscillating turn-to-turn insulation test system of dry-type air core reactor[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(6):1343-1348.

- [5] 张良,吕家圣,王永红,等. 35 kV 干式空心电抗器匝间绝缘现场试验[J]. 电机与控制学报,2014,18(6):66-71.
ZHANG Liang, LYU Jiasheng, WANG Yonghong, et al. Field test on the turn-to-turn insulation for 35 kV dry-type air-core reactors[J]. Electric Machines and Control, 2014, 18(6):66-71.
- [6] 徐林峰. 一起干式空心串联电抗器的故障分析[J]. 电力电容器与无功补偿,2008,29(2):50-54.
XU Linfeng. Fault analysis of dry-type air-core series reactor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2008, 29(2):50-54.
- [7] 荀华,韩建春,郑璐,等. 多维度分析 500 kV 变电站干式电抗器起火原因[J]. 江西电力,2023,47(2):56-59.
XUN Hua, HAN Jianchun, ZHENG Lu, et al. Multi-dimensional analysis of the causes of fire in dry-type reactors in 500 kV substations[J]. Jiangxi Electric Power, 2023, 47(2):56-59.
- [8] 郭婧. 干式空心电抗器的故障分析及运维措施[J]. 湖北电力,2013,37(7):26-27.
GUO Jing. Fault analysis and maintenance measures of dry hollow reactor[J]. Hubei Electric Power, 2013, 37(7):26-27.
- [9] 王华玺,葛少杰,董万光,等. 一起 35 kV 干式空心电抗器故障分析[J]. 电力电容器与无功补偿,2014,35(5):92-95.
WANG Huaxi, GE Shaojie, DONG Wanguang, et al. Fault analysis of 35 kV dry-type air-core reactor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2014, 35(5):92-95.
- [10] 夏长根. 一起 35 kV 干式并联空心电抗器故障分析[J]. 电力电容器与无功补偿,2009,30(5):43-45.
XIA Changgen. Analysis of fault of a 35 kV dry-type air-core shunt reactor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2009, 30(5):43-45.
- [11] 苗俊杰,姜庆礼. 500 kV 变电站 35 kV 干式电抗器故障分析[J]. 电力电容器与无功补偿,2012,33(2):65-69.
MIAO Junjie, JIANG Qingli. Fault analysis of a 35 kV dry-type reactor in 500 kV substation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2012, 33(2):65-69.
- [12] 汪建敏,刘凯,周道城,等. 江西 500 kV 变电站 35 kV 干式电抗器故障统计与分析[J]. 电工技术,2018(16):89-90.
WANG Jianmin, LIU Kai, ZHOU Daocheng, et al. Fault statistics and analysis of 35 kV dry-reactor in Jiangxi 500 kV substation[J]. Electric Engineering, 2018(16):89-90.
- [13] 张兴飞,齐猛,董鑫. 两起 500 kV 变电站 35 kV 干式并联电抗器着火故障分析[J]. 电子测试,2019(9):104-105.

- ZHANG Xingfei, QI Meng, DONG Xin. Fired fault analysis of two 35 kV dry-type shunt reactor in 500 kV substation[J]. Electronic Test, 2019(9): 104-105.
- [14]何丽. 某500 kV变电站35 kV干式电抗器故障分析与处理[J]. 广东科技, 2014, 23(2): 62-66.
- HE Li. Fault analysis and handling of 35 kV dry-type reactor in a 500 kV substation[J]. Guangdong Science & Technology, 2014, 23(2): 62-66.
- [15]王斌. 某风电场35 kV干式空心电抗器起火事件分析及处理[J]. 风能, 2023(1): 94-95.
- WANG Bin. Analysis and handling of a fire incident involving a 35 kV dry-type air-core reactor in a wind farm[J]. Wind Energy, 2023(1): 94-95.
- [16]刘玉海, 苗长青, 丁振华, 等. 一起35 kV电容器串联电抗器着火原因分析及预防措施[J]. 机电信息, 2020(2): 49-51.
- LIU Yuhai, MIAO Changqing, DING Zhenhua, et al. Analysis of the cause of a fire involving a 35 kV capacitor series reactor and preventive measures[J]. Mechanical and Electrical Information, 2020(2): 49-51.
- [17]廖斌, 冯春林, 陈松, 等. 一起35 kV干式空心串联电抗器故障原因分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(4): 63-70.
- LIAO Bin, FENG Chunlin, CHEN Song, et al. Fault analysis of a 35 kV dry type air-core series reactor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(4): 63-70.
- [18]王华玺, 葛少杰, 董万光, 等. 一起35 kV干式空心电抗器故障分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2014, 35(5): 92-95.
- WANG Huaxi, GE Shaojie, DONG Wanguang, et al. Fault analysis of 35 kV dry-type air-core reactor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2014, 35(5): 92-95.
- [19]赵汉武, 钱国超, 胡锦, 等. 一起500 kV高压并联电抗器异常振动的原因分析及处理[J]. 变压器, 2023, 60(10): 68-71.
- ZHAO Hanwu, QIAN Guochao, HU Jin, et al. Analysis and treatment of abnormal vibration of 500 kV high-voltage shunt reactor[J]. Transformer, 2023, 60(10): 68-71.
- [20]朱恩泽, 陈习文, 王相锋, 等. 1 000 kV特高压并联电抗器色谱异常原因分析与处理[J]. 变压器, 2023, 60(1): 59-63.
- ZHU Enze, CHEN Xiwen, WANG Xiangfeng, et al. Analysis and treatment of oil chromatography abnormal in 1 000 kV UHV shunt reactor[J]. Transformer, 2023, 60(1): 59-63.
- [21]李童, 吴标, 储后广, 等. 高压电抗器短路故障防爆性能仿真分析[J]. 变压器, 2023, 60(8): 25-29.
- LI Tong, WU Biao, CHU Houguang, et al. Simulation analysis on explosion-proof performance of high voltage reactor under short circuit fault[J]. Transformer, 2023, 60(8): 25-29.
- [22]顾哲屹, 刘博通. 干式空心电抗器匝间绝缘模型电老化特性实验研究[J]. 电工技术, 2018(19): 31-34.
- GU Zheyi, LIU Botong. Experimental study on electrical aging characteristics of the turn-to-turn insulation model of dry-type air-cored reactor[J]. Electric Engineering, 2018(19): 31-34.
- [23]聂洪岩. 过电压下干式空心电抗器匝间绝缘失效机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [24]马华辉, 刘永, 韩凯, 等. 一台中性点电抗器因套管末屏原因导致绕组对地电容量超差的分析[J]. 变压器, 2024, 61(1): 74-76.
- MA Huahui, LIU Yong, HAN Kai, et al. Analysis of winding capacitance to ground of neutral reactor due to bushing end plate[J]. Transformer, 2024, 61(1): 74-76.
- [25]冉启鹏, 李洪江, 钱富君, 等. 500 kV抽能并联电抗器抽能绕组改造方案研究[J]. 变压器, 2023, 60(11): 19-22.
- RAN Qipeng, LI Hongjiang, QIAN Fujun, et al. Study on transformation scheme of energy extraction winding of 500 kV energy extraction shunt reactor[J]. Transformer, 2023, 60(11): 19-22.
- [26]刘华臣, 常东旭, 单涛, 等. 特高压换流站电抗器等主设备常见发热问题分析及优化措施研究[J]. 变压器, 2023, 60(12): 40-44.
- LIU Huachen, CHANG Dongxu, SHAN Tao, et al. Analysis on common heating problems of reactor and other main equipment in uhv converter station and study on optimization measures[J]. Transformer, 2023, 60(12): 40-44.
- [27]邓志斌, 曾磊磊, 万华, 等. 一起干式空心电抗器匝间短路故障仿真分析[J]. 江西电力, 2024, 48(6): 21-24.
- DENG Zhibin, ZENG Leilei, WAN Hua, et al. Simulation analysis of an inter-turn short-circuit fault in a dry-type air-core reactor[J]. Jiangxi Electric Power, 2024, 48(6): 21-24.
- [28]陈东明, 王建伟, 商力新, 等. 35 kV并联干式电抗器故障缺陷分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(4): 79-85.
- CHEN Dongming, WANG Jianwei, SHANG Lixin, et al. Fault analysis of 35 kV shunt dry-type reactor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(4): 79-85.
- [29]范利东, 张亚杰. 一种辐向分裂变压器的结构分析[J]. 变压器, 2024, 61(1): 1-4.
- FAN Lidong, ZHANG Yajie. Structure analysis of a radial split transformer[J]. Transformer, 2024, 61(1): 1-4.
- [30]王然丰, 马碧磊, 石宇. 中性点接地电抗器抗震试验分析[J]. 变压器, 2024, 61(9): 40-44.
- WANG Ranfeng, MA Bilei, SHI Yu. Seismic test analysis of neutral grounding reactor[J]. Transformer, 2024, 61(9): 40-44.
- [31]牛清林, 曹志刚, 王忠杰, 等. 干式平波电抗器电容参数

(下转第56页)

电能质量技术学会2015学术交流会2015.

作者简介:

雷晓燕(1985—),女,高级工程师,主要研究方向为电力电容器相关检测及科研。E-mail:leixiaoyan0415@163.com。

曹刚(1996—),男,工程师,主要研究方向为电力电容器相关检测及科研。

肖梁乐(1990—),女,高工,主要研究方向为电力电容器相关检测及科研。

陈淑娇(1998—),女,助工,主要研究方向为高压试验检测及科研。

鲁洪吉(1993—),男,大专,主要研究方向为电力电容器试验检测。

(上接第41页)

计算[J]. 变压器, 2023, 60(4): 11-13.

NIU Qinglin, CAO Zhigang, WANG Zhongjie, et al. Calculation method of capacitance for dry-type smoothing reactor[J]. Transformer, 2023, 60(4): 11-13.

[32] 顾哲屹. 干式空心电抗器匝间绝缘材料老化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2017.

[33] 毛颖科, 张天枫, 朱正一, 等. ± 500 kV 直流换流阀用饱和电抗器温度场与电场仿真研究[J]. 高压电器, 2024, 60(1): 128-135.

MAO Yingke, ZHANG Tianfeng, ZHU Zhengyi, et al. Simulation study on thermal and electric field of saturable reactor for ± 500 kV converter valve[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(1): 128-135.

[34] 贾跟卯, 赵启承, 骆福权, 等. 直流换流站高通 HP3 型交流滤波器电抗器匝间故障监测及保护[J]. 高压电器, 2024, 60(1): 136-143.

JIA Genmao, ZHAO Qicheng, LUO Fuquan, et al. Monitoring and protection on inter-turn short circuit fault for reactor of high pass 3rd-order AC filter in DC convert station[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(1): 136-143.

作者简介:

任宝林(1994—),男,工程师,通信作者,主要从事超/特高压变电一次设备检修、故障分析诊断工作。

贺俊杰(1969—),男,高级工程师,主要从事超/特高压变电一次设备检修、故障分析诊断工作。

张建兴(1977—),男,高级工程师,主要从事超/特高压变电一次设备检修、故障分析诊断工作。

魏晓伟(1983—),男,高级工程师,主要从事超/特高压变电一次设备检修、故障分析诊断工作。

张潇(1993年—),男,工程师,主要从事超/特高压变电一次设备检修、故障分析诊断工作。E-mail: 15533266288@163.com。