

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200246

一起 500 kV 油浸式电抗器故障调查及防范措施分析

胡晓静¹, 徐鹏², 王海亮³, 初阳¹, 陈昊²

(1. 许昌开普电气研究院有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 国网江苏省电力有限公司检修分公司, 江苏 南京 210012; 3. 许继集团有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 作为电力系统重要的无功补偿设备, 高压并联电抗器能够补偿输电线路的电容效应, 具有调节无功和电压的作用。运行中电抗器故障将对输电网络的安全稳定构成严重威胁, 因此分析其故障成因对维护电网安全具有重要意义。针对一起 500 kV 油浸式高压并联电抗器故障, 基于油色谱中特征气体成分分析、气体含量比值计算、特征气体增长趋势分析及返厂前设备特征气体计算等方法对其故障成因进行剖析。然后通过直流电阻、绝缘及介损、振动、噪声和温升试验等诊断试验进一步排查, 综合运用绕组检查、铁心检查、连接部位检查、样品检测分析等研判出本次事故原因为电抗器铁心硅钢片间绝缘不良。最后提出了相应的防范措施, 为同类型高压并联电抗器的制造工艺管控、故障诊断和运行维护提供参考。

关键词: 高压并联电抗器; 油色谱诊断试验; 片间绝缘不良; 故障诊断

Fault analysis and preventive measures for a 500 kV oil-immersed reactor

HU Xiaojing¹, XU Peng², WANG Hailiang³, CHU Yang¹, CHEN Hao²

(1. Xuchang Ketop Electrical Research Institute Co., Ltd., Xuchang 461000, China; 2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Maintenance Branch Company, Nanjing 210012, China; 3. XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China)

Abstract: As an important reactive power compensation device in a power system, the high voltage shunt reactor has the function of compensating for the capacitance effect of a transmission line, regulating reactive power and voltage. A reactor fault in operation will pose a serious threat to the safety and stability of the power grid, and so it is of great significance to analyze the cause of a fault for the maintenance of power grid security. A fault on a 500 kV oil-immersed high voltage shunt reactor is analyzed based on the component analysis of characteristic gas in the oil chromatogram, the calculation of gas content ratio, the trend analysis of characteristic gas and the characteristic gas calculation of the device before return to the factory. Diagnostic tests of DC resistance, insulation and dielectric loss, vibration, noise and temperature rise etc. are carried out for further investigation, and it is concluded that the cause of the accident is poor insulation between silicon steel sheets of reactor core, this being achieved by employing winding inspection, core inspection, connection part inspection, sample detection and analysis. Finally, corresponding preventive measures are presented, providing reference for process control, fault diagnosis and maintenance of the same type of high voltage shunt reactor.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51807028).

Key words: high voltage shunt reactor; diagnostic test of oil chromatogram; poor insulation between sheets; fault diagnosis

0 引言

变电站高压电气设备是 500 kV 电网的重要组成部分^[1-4]。高压并联电抗器(简称高抗), 作为电网重要的无功补偿设备, 在输电线路的电容效应补偿、

电网无功分布改善、运行电压调节等方面发挥着积极作用, 对 500 kV 电网的安全稳定运行有着重要意义。高抗性能和状态是变电运检工作关注的重点, 对高抗当前状态的精准评估以及故障的正确诊断是变电运检工作的一项重点工作。

按照绝缘介质的不同可以将电抗器分为油浸式和干式两大类^[5-6]。近年来, 油浸式高压电抗器在

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51807028)

运行过程中故障率相对较高^[7-8], 2017年至2019年间, 仅江苏北部地区电网就有6项油浸式故障高抗维修更换项目, 相伴随的设备停运与电网运行方式变更, 给相关地区电网的安全稳定运行带来了压力^[9-12], 在全社会用电量长期保持在高水平的大背景下, 高抗故障成因分析具有格外重要的意义^[13-15]。

高抗故障诊断的方法主要有基于电气试验的经典诊断方法和近年来提出的特殊诊断方法。文献[16]基于油浸式并联铁心电抗器过热、噪音问题的分析, 消除了故障缺陷; 文献[17]对油浸式高压并联电抗器匝间绝缘局部放电特性及其产气规律进行研究, 为高压并联电抗器运维提供了有力的参考依据; 文献[18]研究了铁心电抗器漏磁分布及绕组涡流损耗计算方法, 对电抗器的设计优化及故障诊断具有重要指导意义。文献[19]介绍了关于油浸式电抗器的状态评估分析法, 为有效诊断高抗的运行状况提供了参考。变电站现场工作中高抗故障具有多样性和复杂性, 单一方法有时难以解决问题, 多种方法的综合运用, 是提升诊断效率的主要途径。本文针对一起500 kV油浸式铁心电抗器运行中油色谱异常事故, 基于多种方法的综合运用, 研判了故障原因, 并提出了相应的技术防范措施, 有望提升油浸式高抗设备的专业管理水平, 同时为同类型高抗设备的生产工艺管控及故障诊断提供了参考。

1 现场诊断

某500 kV高抗B相自投运以来, 总烃增长速度较快, 气体以甲烷和乙烷为主。2010年11月, 总烃含量达到147.8 μL/L, 接近注意值150 μL/L。

绝缘油是由许多不同分子量的碳氢化合物分子组成的混合物。由于电或热故障的结果可以使某些C-H键和C-C键断裂, 伴随生成少量活泼的氢原子和不稳定的碳氢化合物的自由基, 这些氢原子或自由基通过复杂的化学反应迅速重新化合, 形成氢气和低分子烃类气体, 如甲烷、乙烷、乙烯、乙炔等。

总烃指烃类气体含量的总和, 即甲烷、乙烷、乙烯和乙炔含量的总和。变压器油中分解出的气体形成气泡在油里经对流、扩散, 不断地溶解在油中。这些故障气体的组成和含量与故障的类型及其严重程度有密切关系。注意值是指状态量达到该数值时, 设备可能存在或可能发展为缺陷。运行中设备内部油中气体含量超过注意值时, 应提高警惕, 追踪分析, 查明原因。

上述500 kV高抗为2007年产品, 2010年总烃含量接近注意值。该高抗型号为BKD-50 Mvar/500 kV, 额定电压为 $525/\sqrt{3}$ kV, 容量为50 Mvar,

冷却方式为油浸自冷(Oil Natural Air Natural, ONAN)。高抗绝缘油采用瑞典尼纳斯油, 牌号为10GBN。

1.1 特征气体分析

2011年2月采集的油色谱数据如表1所示。

表1 油色谱分析结果

Table 1 Result of oil chromatogram analysis

							μL/L	
H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	ΣC	CO	CO ₂	
85	83.8	105.5	10.2	0	199.6	455	1353	

表1中总烃含量ΣC为199.6 μL/L, 超过注意值150 μL/L。其中主要成分为CH₄、C₂H₆, 次要气体成分为C₂H₄。由特征气体法来分析, 烃类气体组分中CH₄、C₂H₆含量较多, C₂H₄含量较少, 对应中低温油过热特征^[20]。另, CO₂与CO比值小于3, 基本可以排除固体绝缘问题。

1.2 气体含量比值计算

利用“三比值法”对表1中的数据进一步分析验证, 结果见表2。

表2 三比值结果

Table 2 Result of three-ratio method

C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆
0	0.986≈1	<0.1

表2中三比值编码结果在“000”和“020”之间, 符合低温过热编码特征。

1.3 特征气体增长趋势

该高抗自投运以来不同时期的气体含量变化如图1、图2所示。

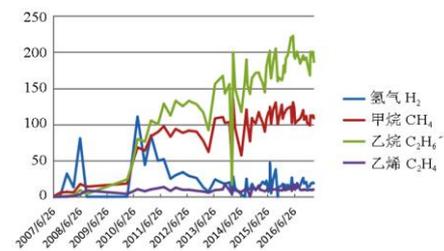


图1 气体含量变化(H₂、CH₄、C₂H₆、C₂H₄)

Fig. 1 Gas content trend(H₂、CH₄、C₂H₆、C₂H₄)

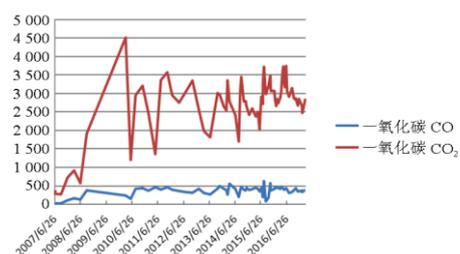


图2 气体含量变化(CO、CO₂)

Fig. 2 Gas content trend (CO and CO₂)

由图 1 和图 2 可见, 随着运行年限增加, 特征气体 CH_4 、 C_2H_6 和 CO_2 呈增长趋势, 不排除存在低温过热引起固体绝缘非正常老化的可能。

1.4 返厂前色谱分析

该高抗返厂前的油色谱数据见表 3。

表 3 返厂前色谱数据

Table 3 Chromatogram data before returning to factory

	μL/L				
日期	2017.1.26	2017.2.28	2017.3.2	2017.3.10	2017.3.23
H_2	15.101	18.267	17.695	19.659	17.39
CH_4	98.727	109.824	112.711	112.711	107.14
C_2H_6	167.841	193.794	200.632	200.655	185.42
C_2H_4	10.025	9.398	9.591	9.594	11.38
C_2H_2	0	0	0	0	0
ΣC	276.593	313.016	322.934	322.96	303.94
CO	326.518	371.877	373.205	378.236	381.21
CO_2	2 462.004	2 656.924	2 728.36	2 848.36	2 745.9

设备返厂前特征气体含量总体仍然呈增长趋势, 其中 2017 年 3 月 23 日的色谱结果有所下降。考虑到检测结果的随机性和离散性, 对烃类气体占比及标准差进行计算。

该电抗器绝缘油中甲烷、乙烷和乙烯占总烃的比例较为稳定。具体有:

$$34.9\% \leq \text{CH}_4 / \Sigma\text{C}(\text{CH}_4\%) \leq 35.69\% \quad (1)$$

$$60.68\% \leq \text{C}_2\text{H}_6 / \Sigma\text{C}(\text{C}_2\text{H}_6\%) \leq 62.13\% \quad (2)$$

$$2.97\% \leq \text{C}_2\text{H}_4 / \Sigma\text{C}(\text{C}_2\text{H}_4\%) \leq 3.74\% \quad (3)$$

进一步计算甲烷、乙烷和乙烯含量的标准差, 如式(4)一式(6)所示。

$$\sigma_{\text{CH}_4\%} = \sqrt{\frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N (\text{CH}_4\% - \overline{\text{CH}_4\%})^2 \right)} = 0.002943 \quad (4)$$

$$\sigma_{\text{C}_2\text{H}_6\%} = \sqrt{\frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N (\text{C}_2\text{H}_6\% - \overline{\text{C}_2\text{H}_6\%})^2 \right)} = 0.006082 \quad (5)$$

$$\sigma_{\text{C}_2\text{H}_4\%} = \sqrt{\frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N (\text{C}_2\text{H}_4\% - \overline{\text{C}_2\text{H}_4\%})^2 \right)} = 0.003468 \quad (6)$$

据式(4)一式(6)计算结果可知烃类气体的占比维持稳定, 热源性质未发生显著变化。

从油中溶解气体组分及比例来看, 高抗内部热源性质稳定, 表现为低温局部过热^[20]。一氧化碳和二氧化碳增长速率均相对稳定, 未见异常变化, 推测过热位置目前暂未影响到设备内部固体绝缘。

2 返厂诊断

为进一步查找高抗总烃超过注意值的原因, 对其开展示范性解体检查。

高抗由高压套管、中性点套管、油箱、油枕和散热片等主要部件构成, 典型高抗的结构如图 3 所示。高抗内部结构与变压器相似, 由绕组、铁心等部件组成, 其铁心由上下铁轭、左右旁轭和主铁心组成。饼状铁心和气隙交替排布, 构成主铁心结构。

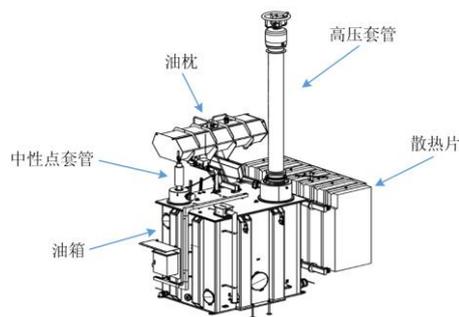


图 3 高抗示意图

Fig. 3 Schematic of high voltage reactor

该高抗返厂后, 开展了一系列诊断性试验, 试验项目包括: 直流电阻、绝缘及介损、振动、噪声和温升试验等, 结果均未见明显异常。使用万用表测试铁心硅钢片之间导通情况: 在上铁轭拆除前, 铁心片间大面积导通; 拆除上铁轭后, 检查发现旁轭手工插片呈倒伏状, 再次用万用表进行测试, 此时仅有少部分硅钢片导通。

2.1 绕组检查

检查绕组外观未见异常, 将绕组导线绝缘纸剥除, 发现绕组导线明显变色。其中, 第一饼绕组最为严重, 绕组中间部分(14~30 匝)较靠近油箱与铁心, 变色严重。继续拆解绕组, 发现第 20 饼绕组导线依然有变色痕迹。

2.2 铁心检查

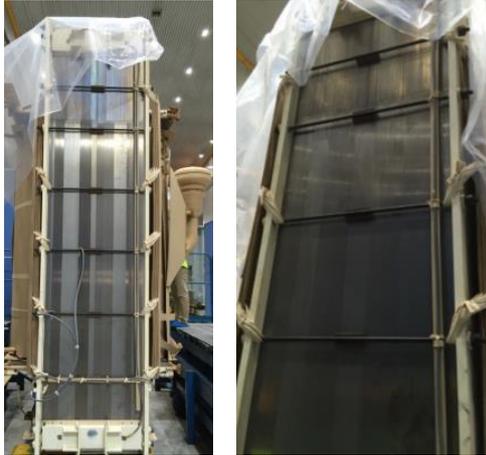
对铁心进行检查, 远离散热器侧的旁轭其上部分大面积泛蓝, 靠近散热器侧未见明显泛蓝, 如图 4 所示; 两个旁轭靠近绕组侧上部分也存在局部小面积泛蓝区域, 且远离散热器侧的旁轭情况相对严重。在远离散热器侧旁轭泛蓝区域, 用白纸擦拭, 存在少量黑色粉屑。

检查旁轭泛蓝区域硅钢片正反面, 未见异常。检查上铁轭, 发现局部带状变色痕迹。检查上部、下部集磁板, 发现上部集磁板变色严重; 下部集磁板也存在局部变色, 变色区域为垫块两侧, 由靠近心柱位置向外侧逐渐变浅, 如图 5 所示。绝缘纸板未见异常。

2.3 连接部位检查

检查连接部位, 夹件上部连接线裸露部分严重变色, 护套内部未见明显变色; 夹件等电位线上部

严重变色；旁轭接地屏引线上部严重变色，变色呈斜条纹状，与绝缘纸包绕结构呈相关性。检查上部集磁板下部垫块，发现部分垫块存在斜条状黑色痕迹，与硅钢片的布置方向一致，如图 6 所示。



(a) 靠近散热器侧 (b) 远离散热器侧

图 4 铁心表面检查情况

Fig. 4 Inspection of iron core surface



图 5 集磁板检查情况

Fig. 5 Inspection of magnetic plate



图 6 集磁板垫块检查情况

Fig. 6 Inspection of magnetic plate cushion block

2.4 样品检测分析

对返厂设备进行样品检测分析。其中：旁轭硅钢片截面粉屑、上下夹件等电位连接线表面成分、导线包绕绝缘纸样品中均未检测到硫元素；导线表面成份、上部集磁板、接地围屏连接线、上部集磁板内部铝片与垫块接触侧表面均检测到不同程度的硫元素。从绕组导线、接地围屏连接线表面检测结

果来看：导线、连接线已遭受硫腐蚀；遭受腐蚀的严重程度与高抗内部温度分布、油流情况存在一定的关系。

设备返厂解体检查结果表现为：绕组导线明显变色，硅钢片局部泛蓝，集磁板变色，夹件上部连接线、夹件等电位线、旁轭接地屏引线变色，垫块存在斜条状黑色痕迹等现象。另，导线表面、上集磁板、接地围屏连接线等部位存在硫元素。通过上述检查结果初步推测本次高抗总烃异常原因或与铁心硅钢片间短路以及样品中检测到的硫元素有关。

3 原因分析及防范措施

3.1 原因分析

对该高抗进行解体检查，发现硅钢片局部泛蓝、绕组导线、等电位线变色、绝缘垫块表面存在黑色痕迹等现象。该高抗自投运以来，总烃上升速度较快，一氧化碳和二氧化碳上升速率未见异常，且经过厂内诊断试验及拆解检查未发现放电痕迹，说明目前固体绝缘状态尚可。使用万用表测试铁心硅钢片之间导通情况，在上铁轭拆除前，铁心片片间大面积导通；拆除上铁轭后，仅有少数部分硅钢片导通，表明铁心硅钢片间存在绝缘不良的情况。硅钢片片间绝缘不良导致涡流损耗增加，进一步引起硅钢片发热异常。

导致硅钢片片间绝缘不良的因素可能有：一是绝缘油中存在腐蚀性硫化物，长期运行过程中，腐蚀性硫化物与硅钢片断面处产生化学反应，破坏其表面绝缘；二是硅钢片裁剪工艺不规范。高抗上部集磁板垫表面出现了斜条状黑色痕迹，且与硅钢片的布置方向一致，说明硅钢片裁剪后存在毛刺，造成上部集磁板片间短路。上述两种原因都将导致硅钢片片间短路。

3.2 技术防范措施

绝缘油中的硫化物会与高抗内部绕组发生化学反应，衍生物会吸附在绝缘纸板表面，降低其绝缘性能；同时硫化物在设备温度和油流的影响下会腐蚀内部导线、连接线等。在设备长期运行、负荷特性多变^[21-23]条件下，可能加速设备绝缘老化，最终发展为绝缘击穿^[24-25]。因此新设备出厂验收时，其绝缘油必须通过腐蚀性硫检测，确保未检测出腐蚀性硫后方可注入设备；同时加强运行中设备腐蚀性硫的变化状况监测，以提升设备运行可靠性。

硅钢片片间绝缘异常将会增加铁心损耗，导致局部异常发热，影响设备运行状态。因此需要加强制造厂内工艺管控，严格控制铁心硅钢片的裁剪

和叠装质量。检查硅钢片裁剪边缘的毛刺、铁心硅钢片之间导通情况等;优化硅钢片裁剪工艺以及夹紧结构,使夹紧结构受力均匀,硅钢片边缘无翘曲现象,接缝处严密;同时提高与硅钢片相接触的垫块材料的耐热度和机械强度。

加强运行高抗油中溶解气体变化分析,当乙烯产生速率加快或产生乙炔时,应合理制定停电计划,安排检修;同时关注一氧化碳和二氧化碳含量变化,当这两种气体增长速率发生突变时,应结合具体数据进行综合分析。高抗内部的固体绝缘状态是不可逆的,一旦发生损伤,会随着运行时间加速老化,表3所给出的高抗色谱中,一氧化碳和二氧化碳虽未见持续增长,但由于其铁心硅钢片已发生片间短路,引起导线局部过热,应加强一氧化碳和二氧化碳含量监测,避免过热危及固体绝缘。

铁心硅钢片间短路将引起内部涡流损耗增加,进一步导致铁心局部过热,对设备的安全运行构成潜在威胁。造成硅钢片间短路的原因有多种,文中所涉及高抗硅钢片间短路是由工艺不良及腐蚀性硫的影响所致,除了严格控制厂内工艺、提高绝缘油验收质量之外,还需要密切关注油中气体检测结果,以尽早发现可能存在的缺陷,避免事故扩大。

4 结论

本文研究了一起 500 kV 油浸式高压并联电抗器故障,通过多种技术的综合运用,分析得出高抗总烃增长速度异常的原因为铁心硅钢片间绝缘不良。为了从源头上控制隐性缺陷,从提升设备运行可靠性的角度,提出如下防范措施:

1) 加强设备生产制造环节管控,严格控制铁芯剪切和叠片、线圈绕制和总装等重要工艺环节标准,提高验收质量。

2) 新油验收必须通过腐蚀性硫检测,经检测无腐蚀性硫的绝缘油才可以注入设备;同时定期对运行中高抗绝缘油进行检测,根据检测结果合理评估其运行状况。

3) 一氧化碳和二氧化碳是判断设备固体绝缘是否存在问题的重要依据,目前在线油色谱的测试误差较大,离线油色谱检测结果也存在波动性较大的问题,需要进一步展开研究。

参考文献

[1] 甘源,白锐,张琪.基于场-路耦合的干式空心电抗器稳态电磁场及电动力分析[J].电力系统保护与控制,2019,47(21):144-149.
GAN Yuan, BAI Rui, ZHANG Qi. Steady-state

electromagnetic field and electrodynamic analysis of dry-type air-core reactor based on field-circuit coupling[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(21): 144-149.

[2] ZIVANOVIC R. Analysis of recorded transients on 765 kV lines with shunt reactors[C] // 2005 IEEE Russia Power Tech, June 27-30, 2005, St. Petersburg, Russia: 1-4.

[3] 戴锋,孙勇军,田涛,等.基于NESSUS的SF6断路器拐臂可靠性分析[J].机械制造与自动化,2017,46(1):215-219.
DAI Feng, SUN Yongjun, TIAN Tao, et al. Reliability analysis of SF6 circuit breaker crank arm based on NESSUS[J]. Machine Building & Automation, 2017, 46(1): 215-219.

[4] 徐鹏,甘强,邵新苍,等.一起500 kV SF₆气体绝缘电流互感器故障分析[J].变压器,2018,55(6):70-73.
XU Peng, GAN Qiang, SHAO Xincang, et al. Fault analysis of 500 kV SF₆ gas insulated current transformer[J]. Transformer, 2018, 55(6): 70-73.

[5] MOHAMMAD A I, MORT T, JETER J, et al. Turn-to-turn fault protection for dry-type shunt reactors[C] // 2018 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), April 16-19, 2018, Denver, CO, USA: 1-5.

[6] ZHENG Tao, ZHAO Yanjie, JIN Ying, et al. Design and analysis on the turn-to-turn fault protection scheme for the control winding of a magnetically controlled shunt reactor[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(2): 967-975.

[7] 陈昊,邓广静,王玉荣,等.电抗器间隔断路器后置式接线所引起二次问题研究[J].电力系统保护与控制,2014,42(18):122-126.
CHEN Hao, DENG Guangjing, WANG Yurong, et al. Research on the secondary side problem caused by breaker rear-wiring pattern in reactor interval[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(18): 122-126.

[8] DAS S, SIDHU T S, ZADEH M R D, et al. A novel hybrid differential algorithm for turn to turn fault detection in shunt reactors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(6): 2537-2545.

[9] MA Zhaoxin, CHEN Hao, CHAI Yanli, et al. Analysis of voltage stability uncertainty using stochastic response surface method related to wind farm correlation[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(3): 211-219. DOI: 10.1186/s41601-017-0051-3.

[10] DING T, LI C, CHEN C, et al. Risk assessment based long-term transmission system hardening under prior probabilistic information[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13 (1): 108-115.

- [11] WANG Yurong, WAN Qiulan, LI Fangxing, et al. Reactive power planning based on fuzzy clustering, gray code, and simulated annealing[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(4): 2246-2255.
- [12] 周明, 曹伟, 陈文涛, 等. 串联电抗器对电力系统短路电流特性影响的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 147-153.
ZHOU Ming, CAO Wei, CHEN Wentao, et al. Study on the influence of series reactor on short circuit current characteristics of power system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 147-153.
- [13] CAO J, DAVIDSON C, MOULSON S. Dynamic modelling of saturable reactor for HVDC applications[J]. IET Science Measurement & Technology, 2007, 1(3): 138-144.
- [14] 陈昊, 朱超, 李义峰, 等. 输电线路工频电场的计算与测量研究[J]. 电气工程学报, 2016, 11(5): 40-45.
CHEN Hao, ZHU Chao, LI Yifeng, et al. Research on calculation and measurement of power frequency electric field for transmission line[J]. Journal of Electrical Engineering, 2016, 11(5): 40-45.
- [15] 滕予非, 冯世林, 张真源, 等. 基于数据驱动的 500 kV 高压并联电抗器过流误报警在线判别方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(3): 146-153.
TENG Yufei, FENG Shilin, ZHANG Zhenyuan, et al. Online identification of error overcurrent alerts of 500 kV high voltage shunt reactor based on data-driven[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(3): 146-153.
- [16] 田肖飞, 孙文星, 杨贤, 等. 油浸式并联铁心电抗器缺陷分析及整改措施[J]. 广东电力, 2019, 32(2): 144-151.
TIAN Xiaofei, SUN Wenxing, YANG Xian, et al. Defect analysis and rectification measures of oil immersed shunt core reactor[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(2): 144-151.
- [17] 颜冰, 钱国超, 王科, 等. 油浸式高压并联电抗器匝间绝缘局部放电特性与产气规律研究[J]. 高压电器, 2018, 54(6): 106-112.
YAN Bing, QIAN Guochao, WANG Ke, et al. Study on the partial discharge characteristics and gas production law of turn to turn insulation of oil immersed high voltage shunt reactor[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(6): 106-112.
- [18] 张宗有, 何晓峰, 赵永霞. 铁心电抗器绕组涡流损耗的计算[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 36(6): 73-77.
ZHANG Zongyou, HE Xiaofeng, ZHAO Yongxia. Calculation of eddy current loss of core reactor winding[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(6): 73-77.
- [19] 张弄韬, 颜冰, 彭庆军, 等. 500 kV 油浸式高压并联电抗器全寿命周期管理方法[J]. 云南电力技术, 2018, 46(5): 59-63.
ZHANG Nongtao, YAN Bing, PENG Qingjun, et al. Life cycle management of 500 kV oil immersed high voltage shunt reactor[J]. Yunnan Electric Power, 2018, 46(5): 59-63.
- [20] 变压器油中溶解气体分析和判断导则: DL/T722—2014[S].
Guide to the analysis and the diagnosis of gases dissolved in transformer oil: DL/T722—2014[S].
- [21] 陈昊. 基于广义自回归条件异方差模型的负荷预测新方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(15): 51-54.
CHEN Hao. A new load forecasting method based on autoregressive conditional heteroscedasticity model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(15): 51-54.
- [22] CHEN Hao, ZHANG Jianzhong, TAO Yubo, et al. Asymmetric GARCH type models for asymmetric volatility characteristics analysis and wind power forecasting[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(4): 356-366. DOI: 10.1186/s41601-019-0146-0.
- [23] 陈昊, 张建忠, 许超, 等. 基于多重离群点平滑转换自回归模型的短期风电功率预测[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 73-79.
CHEN Hao, ZHANG Jianzhong, XU Chao, et al. Short-term wind power forecast based on MOSTAR model[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 73-79.
- [24] HE J, GORUR R S. Flashover of insulators in a wet environment[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(2): 1038-1044.
- [25] DING T, LI C, YAN C, et al. A bilevel optimization model for risk assessment and contingency ranking in transmission system reliability evaluation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 3803-3813.

收稿日期: 2020-03-11; 修回日期: 2020-05-18

作者简介:

胡晓静(1980—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统控制保护设备及技术标准研究工作; E-mail: xiaojingh@dlwg.net

徐鹏(1990—), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 从事高电压绝缘、电气试验与检修工作; E-mail: xupeng1990_ncepu@163.com

王海亮(1978—), 男, 硕士, 工程师, 从事电力市场营销工作。

(编辑 葛艳娜)