

500 kV 变电站并联电容器补偿装置用大容量 干式空心串联电抗器研制

刘莉莉, 刘水平, 刘涛, 邵志强, 张文军, 张显明

(西安西电电力电容器有限责任公司, 西安 710082)

摘要: 干式空心串联电抗器是高压并联电容器补偿装置中的重要设备, 用来抑制开关操作涌流, 降低谐波对并联电容器组的危害。使用工况要求电抗器长期稳定、安全可靠运行, 但高温会加速电抗器本体及外部防护的绝缘系统老化, 导致运行可靠性降低, 因此要采取合理的设计控制温升。本文主要介绍了所研制的产品结构, 特别是降低线圈和汇流排的损耗设计研究, 同时利用磁场、温度场的仿真手段对如何规避该类电抗器在以往设计及生产过程中遇到的问题采取了有效措施, 并进行试验验证, 为大容量干式空心串联电抗器设计与制造提供参考。

关键词: 空心串联电抗器; 大容量; 并联电容器; 仿真; 温升

Development of High-power Dry-type Air-core Series Reactor for Shunt Capacitor Compensation Device of 500 kV Substation

LIU Lili, LIU Shuiping, LIU Tao, SHAO Zhiqiang, ZHANG Wenjun, ZHANG Xianming
(Xi'an XD Power Capacitor Co., Ltd., Xi'an 710082, China)

Abstract: Dry-type air-core series reactor is an important equipment of compensation device of high voltage shunt capacitor, and is used to suppress switching operation inrush current and reduce the harm of harmonics to shunt capacitor banks. The operating conditions require the reactor to operate stably, safely and reliably for a long time. However, high temperature will accelerate the insulation aging of the reactor proper and external protection, leading to the decrease in operation reliability, therefore, reasonable design shall be adopted to control the temperature rise. In this paper the structure of the product is mainly introduced, with the design and research on reducing the loss of the coil and busbar in particular. At the same time, the simulation means of the magnetic field and temperature field are used to take effective measures to avoid the problems encountered by the type of reactor in the previous design and production. Moreover, the test verification is performed so to provide reference for the design and manufacture of large-capacity dry-type air core series reactor.

Keywords: air-core series reactor; high power; shunt capacitor; simulation; temperature rise

0 引言

高压并联电容器补偿装置, 广泛应用于电网系统和工矿企业等。干式空心串联电抗器作为高压并联电容器补偿装置的关键设备, 与并联电容器组串联, 是高压并联电容器补偿装置的重要组成部分^[1-3]。

干式空心串联电抗器是以空气为磁路的空心

电感绕组, 其电感值恒定, 具有无油、机械强度高、重量轻、易维护等特点。近年来, 电网对大容量干式空心串联电抗器需求增大, 因此有必要对其设计和制造过程进行研究, 提高产品的可靠性, 保证电网的安全稳定运行, 并减少后期的运维成本。本文对目前广泛应用电磁绝缘圆铝线为主要导体的干式空心串联电抗器, 涉及的相关设计及制造过程中的重点问题进行分析研究^[1-3]。

1 干式空心串联电抗器基本参数和主要性能指标

1.1 基本参数

电抗器为 500 kV 变电站用,基本参数为

型号:CKGKL-2400/66-12;

系统电压: 66 kV;

额定频率: $f=50$ Hz;

配套电容器组的三相额定容量 $S_N=60\ 000$ kvar;

配套电容器组的额定相电压 $U_{CN}=23\times 2$ kV;

单相额定容量 $S_N=2\ 400$ kvar;

额定电抗率 $K=12\%$;

额定电流 $I_N=434.8$ A;

额定电抗 $X_N=12.7\ \Omega$;

海拔不超过 2 000 m;

安装方式:三相水平安装。

该电抗器主材为电磁圆铝线、铝合金汇流排、匝间绝缘采用聚酰亚胺薄膜、浸渍过环氧树脂的玻璃纤维丝包绕结构。

1.2 电抗器的等效电路

电抗器的等效电路见图 1,计算见公式(1)~(4)。电抗器由 8 个包封并联构成,每一个包封等效成一个绕组, L_i 为第 i 层自感, M_{ij} 为第 i 层与第 j 层的互感, R_i 为第 i 层电阻, I_i 为第 i 层的交流电流, U 为电抗器的额定电压向量, I_N 为额定电流向量。包封间采用 25 mm 宽的环氧玻璃丝通风条隔成散热气道,各包封含有不同个数的并联支路^[4]。等效为 20 层同轴螺线管并联而成,每层线圈均可等效为一条支路,由单根或多根聚酰亚胺膜包圆铝线平行绕制,分布均匀。支路中包含该层线圈的自感 L_i 与线圈直流电阻 R_i ,每两个支路间存在互感^[5]。

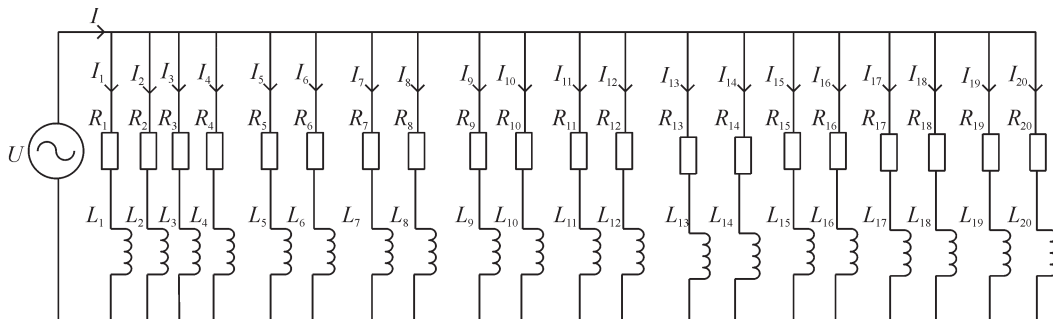


图1 电抗器的等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of reactor

$$j\omega L_1 I_1 + j\omega M_{12} I_2 + j\omega M_{13} I_3 + \dots + j\omega M_{120} I_{20} + R_1 I_1 = U \quad (1)$$

$$j\omega L_2 I_2 + j\omega M_{21} I_1 + j\omega M_{23} I_3 + \dots + j\omega M_{220} I_{20} + R_2 I_2 = U \quad (2)$$

$$j\omega L_{201} I_1 + j\omega M_{202} I_2 + j\omega M_{203} I_3 + \dots + j\omega M_{2020} I_{20} + R_{20} I_{20} = U \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^{20} I_i = I_N \quad (4)$$

2 电抗器研制的考虑因素

2.1 设计总体思路

因该电抗器容量大,电压等级高,绝缘强度要求高,重量及体积大,因此在设计中确保产品的可靠性尤为关键。设计时首先考虑产品的绝缘,即主绝缘和纵绝缘,主绝缘主要是电抗器本体、支柱瓷绝缘子的对地绝缘;纵绝缘主要是电磁线匝间、层间绝缘;其次,线圈设计考虑温升、损耗等关键技术指标;最后,汇流排设计中考虑环流问题、载流量、机械强度、出线端子板允许荷载等。

2.2 产品整体结构

因电站使用场地受限,电抗器外形见图 2。外径 D 为 $\Phi 1\ 750$ mm,考虑产品整体散热效果,将电

抗器直径 D 与高度 H 比控制在 2 以下为宜,线圈高度 H 为 1 951 mm(含上、下端绝缘各 30 mm),系数为 0.897^[4]。线圈层间采用全并联结构。汇流排为等电位设计且上、下结构对称,线圈使上、下汇流排

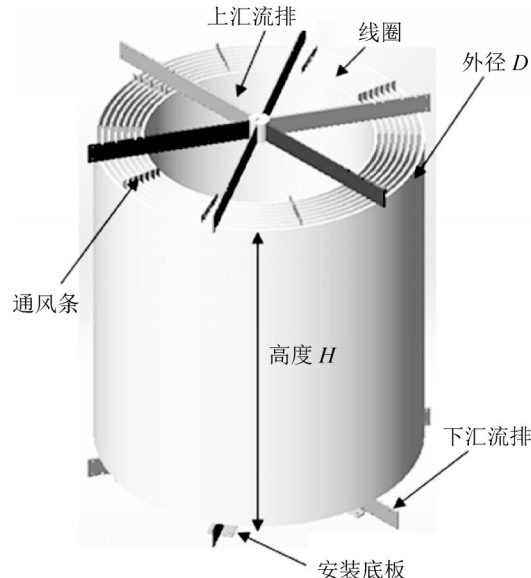


图2 电抗器的三维模型

Fig. 2 Three-dimensional model of reactor

形成电位差,线圈与汇流排通过环氧玻璃纤维丝绑扎拉紧。为改善线圈的耐候性,在线圈表面加一个“假”包封的补偿方式,其与线圈间设有气道,该包封无电磁线,只是一个绝缘筒,承担绝大部分的大气考核。考虑长期有效电流大、海拔高,选取工频耐受电压高、爬电距离大、防污等级高的 ZSW-126/8-4 瓷绝缘子。为减少发热,接线端子处选用非导磁不锈钢螺栓。

2.3 线圈设计

1) 匝绝缘的初步选取,本次电磁线选用绝缘性能优良的聚酰亚胺薄膜 3 层膜包圆铝线,对线匝间和绕组层间涂刷环氧树脂胶,以增强匝间绝缘性能,保证绕组的纵向绝缘和主绝缘;采用“等温升法”设计,即线圈各包封层的端电压和温升设计相同。

2) 导线规格的选取,在电流放大倍数为 1.35 的前提下,考虑电流密度与损耗、温升的技术指标的要求,进行导线规格和并绕根数的调整。

3) 根据国家电网公司的“10 kV~66 kV 干式空心电抗器管理规范”要求,海拔超出 1 000 m 部分以每 500 m 为一级,温升按 2.5% 减少,将各包封的平均温升控制在 63.86 K。干式空心串联电抗器总损耗(P)由线圈电阻引起的基本损耗(P_x)、线圈导线的涡流损耗(P_{w1})、多根并联导线环流产生的损耗(P_h)及金属结构件中产生的损耗(P_{w2})组成,除基本损耗外,其余统称附加损耗^[7-8]。根据实际设计应用,通过计算机设计软件采用等温升法设计,该方法适用性高。

基于热平衡原理(发热量等于散热量进行求解),稳态温升计算采用经验公式(5)~(11)。

$$\Delta T = \frac{P}{Ah} \quad (5)$$

$$P = P_x + P_{w1} + P_h + P_{w2} \quad (6)$$

$$P_x = \sum_{i=1}^N I_i^2 R_i = 18.803 \text{ kW} \quad (7)$$

$$(8)$$

$$P_h = \sum_{i=1}^n \left[I_i^2 R_i - \left(\frac{I_N}{n} \right)^2 R_i \right] \quad (9)$$

$$A = N\pi D_{\text{平均}} H_{\text{绕组}} \quad (10)$$

$$h = 0.56 \times \sqrt[4]{\frac{W_{\text{气道}}^{1.6}}{H_{\text{绕组}}}} \quad (11)$$

式中: P 为电抗器总损耗,W; P_x 为由线圈电阻引起的基本损耗,W; P_{w1} 为线圈导线的涡流损耗,W; P_h 为多根并联导线环流产生的损耗,W; P_{w2} 为金属结构件中产生的损耗,W; N 为电抗器绕线层数; I_i 为第 i 层电流,A; R_i 为第 i 层电阻, Ω ; I_N 为额定电

流,A; A 为电抗器的有效散热面积, m^2 ; $D_{\text{平均}}$ 为绕组平均直径,m; $H_{\text{绕组}}$ 为绕组高度,m; $W_{\text{气道}}$ 为气道宽度,m; h 为综合散热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。

4) 适当搭配各包封层数,利用最内、最外包封的散热优势,使中间包封的辐向并绕层数尽可能少,设为 2,以提高中间包封的温升裕度。各包封轴向并绕根数设计为 2。均衡每个包封的电流密度,将其设计为 $1.1 \text{ A}/\text{mm}^2$ 左右,一般电流密度为 $0.8 \sim 1.8 \text{ A}/\text{mm}^2$ ^[4]。

5) 考虑大容量电抗器因包封数多发热量大,同时为减小涡流损耗,采用 $\Phi 2.73 \sim \Phi 4.0$ 范围内粗细不同圆铝线进行损耗均衡^[3-6]。

2.4 汇流排设计

汇流排设计为 6 星臂,各星臂间夹角为 60° ,铝槽心轴外径为 $\Phi 76 \text{ mm}$,示意图见图 3。考虑容量大和电压等级高,为减少涡流损耗,本次对铝槽心轴进行开口设计,各出线臂和铝槽心轴通过氩弧焊焊接成汇流排。汇流排损耗为包封损耗的 3.7%^[7]。为减少发热,该电抗器选取规格为 $120 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的铝合金汇流排,充分保证了载流面积,同时考虑线圈的金属设计重量较大,约为 1 162 kg,因此该规格汇流排充分保证承重及端子板允许荷载(水平纵向、横向,垂直)。

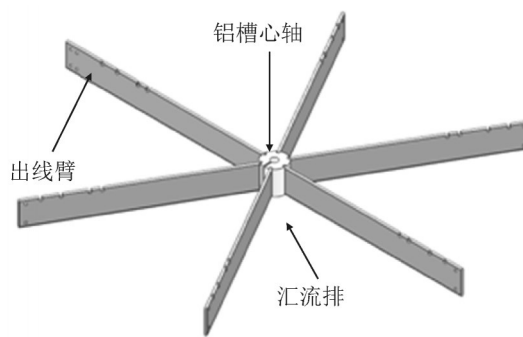


图3 汇流排示意图
Fig. 3 Schematic diagram of busbar

3 难点、关键问题及解决过程

3.1 局部放电问题

户外干式空心串联电抗器的局部放电,是衡量电抗器结构合理性及其制造工艺水平的重要指标。因电抗器的绕包绝缘以环氧树脂为基材,在固化过程中很少放出气体^[7]。本文,采取真空浸胶工艺,通过抽真空加温浸胶,使玻璃纤维丝充分浸渍排气且带胶量大;同时在线圈绕制过程采用专门的保温保空放纱装置,以避免浸渍后的环氧玻璃纱带人空气受潮,同时应对季节温度变化影响环氧胶的

流动性;另一方面采用热聚合工艺,考虑 8 个包封较多,对电抗器采用两步真空固化,第 1 步,待 1-4 包封绕制完成后,进行真空固化;第 2 步,待 5-8 包封完成后,再对产品整体固化,使电抗器绕包绝缘充分脱气、除水、除湿。通过上述工艺改进减少气泡的产生,防止绝缘鼓包。提高电抗器的局部放电起始电压,保证电抗器长期运行的可靠性。

3.2 电抗器的损耗控制

电抗器设计计算结果见表 1,电抗器损耗主要是电阻引起的基本损耗 P_x 占总损耗的 96%,线圈导线的涡流损耗 P_{wi} 占比为 3.95%,由文献[7]知星形支架产生的损耗占包封损耗的 3.7%。在设计中合理选取圆铝线规格及辐、轴向并绕数是降低 P_x 的关键,各包封间电流越小, P_x 越小;同一包封,铝线选的越粗, P_x 越小,温升越低;各包封的辐向并绕层数越多,总损耗越小,温升越低^[9]。

表 1 电抗器设计计算结果
Table 1 Design and calculation results of reactor

包封	线规/mm	电流/A	电阻/ Ω	涡流损耗/W	总损耗/W
1	2.73	59.92	0.869 2	249.652	3 370.303
2	3.00	34.07	1.358 9	110.44	1 688.221
3	3.22	38.34	1.144 3	100.937	1 783.221
4	3.50	42.95	0.961 6	88.71	1 862.902
5	3.75	47.17	0.839 9	74.763	1 943.845
6	3.80	49.6	0.811 3	59.883	2 055.995
7	4.00	52.65	0.753 6	41.783	2 130.93
8	4.00	110.08	0.387 5	46.961	4 743.098
合计	—	—	—	—	19 578

总损耗设计值 19.57 kW,产品实测值为 19.9 kW,小于标准规定限值 28.8 kW,且满足标准对串联电抗器损耗偏差不超过 15% 的要求。

3.3 电抗器引出线的可靠性问题

电抗器引出线,指将线圈各层导线的始端与末端分别引出对应焊接在上、下星形支架臂上。实际工程中,易出现引出线断裂、松动,产生环流等导致接触电阻增大以及导体的绝缘膜脱落等,引起电抗器发热^[10]。针对此现象我们从工装和工艺方面进行改善。该电抗器引出线采用专门的焊接翻转架;先选用耐高温的玻璃纤维粘带对各包封引出线包扎,依次从最外包封至最内包整配成多分支的整股“一”状;再采用引出线折弯工装使折弯处边角为 R10 并进行 90° 折弯;并由铝排的中心处向圆心方向成“一”排列;将多个焊接头适当分离穿入相应规格的电工铝管,用 16 T 液压钳与电工铝管直径相应的专用工装夹接成六边形;调整焊接电流为 300~350 A,钨极直径 Φ 3.0 mm,焊缝长度 25~35 mm,实

现可靠焊接。

3.4 电抗器温度场的仿真

建立干式空心串联电抗器的温度场三维仿真模型,绕组结构为 8 个包封,绕线层数 20 层。汇流排为 6 臂,其进、出线夹角为 180°。安装底板数 6,模型见图 2。

三维建模时,各包封用相应尺寸的圆筒代替,其中圆筒含有电磁线层、绝缘层、包封间间隔采用相应尺寸的空气层填充,对其绕组内部结构简化,忽略星形支架、通风条、焊点、焊缝对电抗器温升影响较小的零件,只考虑线圈本体。进行热仿真分析时,需考虑材料属性。该电抗器各组成部分的材料属性^[11-13]见表 2。

表 2 电抗器各组成部分的材料属性
Table 2 Material properties of each components of reactor

材料	热导率/[W/(m·K)]	密度/(g/cm ³)
电磁圆铝线	204.000	2.70
环氧复合材料	0.200	1.10
空气	0.023	2.54

边界条件的确定,电抗器各组成部分的自然对流换热分为两种:第 1 种电抗器各包封内部层间,包封间、线圈、星形支架等均为固体相互接触,换热方式主要为热传导方式;第 2 种是从电抗器到空气,由于热动力使空气具有流动的特性,因此存在对流传热。电抗器各层绕组的电磁热为热源会产生热辐射^[11-17]。

热荷载:设定对流系数,电抗器的温升主要来源于线圈直流电阻的基本损耗、线圈处在交变磁场中产生的涡流损耗^[8-10,16,18]。干式空心串联电抗器的热源为各层绕组的电磁热^[19]。线圈的电阻损耗合计 18.8 kW,涡流损耗合计 0.773 kW,总损耗 19.57 kW,计算见文中 2.3 节。8 个包封,各包封分别进行电阻损耗计算,计算公式 $P_{xi}=I_i^2R_i$, I_i 、 R_i 由设计可知,各线包总损耗为 $P_i=P_{xi}+P_{wi}$,标准要求的损耗限值为 28.8 kW。热流量为各包封的发热量与包封有效散热面积的比值,即 $Q=P_i/S_i$,假设每个包的发热为均匀分布。

初始条件:环境温度设定为 28℃,假设包封 1(最内包封)的内表面、上端面、下端面,包封 8(最外包封)的内表面、上端面、下端面无热交换,将其选定温度设为环境温度,进行仿真计算,得到结果见图 4。从仿真结果图 4 可以看出,线圈绕组的温度为 92.8℃,温升为 64.8 K,与设计温升 63.86 K 基本接近。

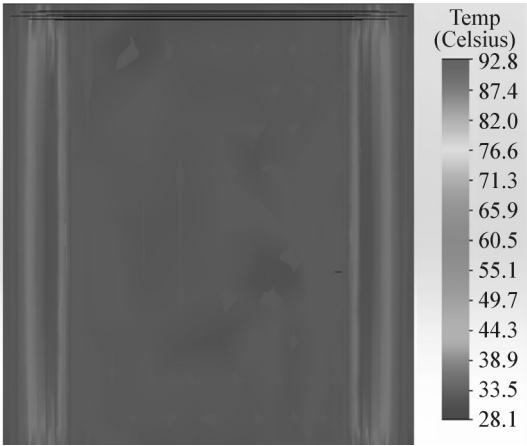


图4 仿真结果
Fig. 4 Simulation results

3.5 电抗器的温升试验验证

电抗器的热稳定校核是验证设计的重要手段^[19],对单相采用直接加压法,依据 GB 1094.2 施加工频 1.35I_N,共 8 h,试验后期保证温升变化值每小时不

大于 2 K,检验热性能,测量绕组热点温升、根据 GB/T 1094.2 计算电抗器平均温升,见图 5^[20-29]。用温控仪采集数据,各包封内表面距底 1/3 高度、线圈表面距底 2/3 高度均有热电偶,试验结果见表 3,试验温升为 55.75 K,满足标准对 F 级绝缘要求的温升限值 90 K。热稳定试验前环温 28℃,直阻仪测量冷态电阻 R₀₁,试品的电抗和损耗值: X_L = 12.96 Ω, P = 19.9 kW。热稳定试验结束时,环温为 31℃,利用电阻法得切断电源瞬间的热态电阻值 R₀,待产品自然冷却后,在额定电流下测量电抗、损耗,得 X_L = 12.94 Ω、P = 19.85 kW。热稳定性试验后比试验前的变化量: ΔX_L = -0.02 Ω, ΔP = -0.05 kW,通过对电抗值和损耗进行试验前后比,发现变化微小。符合标准规定的额定电流下的电抗值的允许偏差不超过 0~+5%;符合标准规定的损耗偏差不大于 15%。产品现场运行照片见图 6。

表3 电抗器热稳定性试验温度测试数据
Table 3 Temperature test data of thermal stability test of reactor

测温部位	A-X		环境温度/℃		电阻测量/mΩ	
	各绕组内、外表面	绕组热点温度/℃	冷电阻	热电阻	冷电阻	热电阻
累计时间/h	6	90.75	28	31	82.93	102.19
	7	91.96				
	8	92.89				
最后 3 h 温升变化量/K	< 2					
热点温升设计值/K			64.89			
绕组试验温升/K			55.75			
平均温升设计值/K			63.86			



图5 热稳定性试验中的电抗器
Fig. 5 Reator in thermal stability test



图6 产品现场运行照片
Fig. 6 Photo of the product in operation at site

4 结语

本文通过研制,考虑高电压、大容量、大电流电抗器匝间绝缘选取了性能优良的聚酰亚胺薄膜结合环氧树脂胶,有效增强了匝间绝缘的可靠性及产品使用寿命;在1.35倍的电流放大倍数下,通过对线圈和汇流排的计算,选取合适的汇流排及导线规格、调整导线的轴向并绕根数、线圈的辐向并绕层数控制电流密度,以便有效提高温升、损耗等技术指标;通过采用“两步法”热聚合生产工艺,提高了局部放电起始电压,保证电抗器长期运行的可靠性;通过三维建模,利用磁场、热场仿真并结合温升试验进行验证,提高产品的可靠性。以上研究可为同类产品提供设计依据,进一步提高大容量干式空心串联电抗器的技术水平。

参考文献

- [1] 顺特电气有限公司. 树脂浇注干式变压器和电抗器[M]. 北京:中国电力出版社,2005.
- [2] 刘水平. 互感器 电力电容器[M]. 北京:中国电力出版社,2020.
- [3] 国家电网公司. 10 kV~66 kV 干式电抗器管理规范[M]. 北京:中国电力出版社,2006.
- [4] 路宝民,朱东柏. 户外干式空心电抗器设计的若干问题[J]. 变压器,1997(12):1-5.
LU Baomin, ZHU Dongbai. Problems in outdoor dry type air core reactor design[J]. Transformer, 1997(12): 1-5.
- [5] 刘宏,梁基重,牛署,等. 匝间短路故障下干式空心电抗器电动力仿真研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2021,42(6): 61-68.
LIU Hong, LIANG Jizhong, NIU Shu, et al. Study on simulation of electro dynamic force in dry-type air-core reactor under inter turn short circuit fault[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(6): 61-68.
- [6] 高压并联电容器用串联电抗器:JB/T 5346—2014[S].2014. Series reactors for high voltage shunt capacitors: JB/T 5346—2014[S]. 2014.
- [7] 路宝民,郑殿春. 户外干式空心电抗器设计的若干问题[J]. 哈尔滨电工学院学报,1994, 17(3):252-258.
- [8] 姜志鹏,周辉,宋俊燕,等. 干式空心电抗器温度场计算与试验分析[J]. 电工技术学报,2017, 32(3):218-224.
JIANG Zhipeng, ZHOU Hui, SONG Junyan, et al. Temperature field calculation and experimental analysis of dry-type air-core reactor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(3): 218-224.
- [9] 李岩,张振海,朱立勋,等. 干式空心电抗器的计算与设计[J]. 变压器,2013, 50(10):1-6.
LI Yan, ZHANG Zhenhai, ZHU Lixun, et al. Calculation and design of dry-type air-core reactor[J]. Transformer, 2013, 50(10): 1-6.
- [10] 朱东柏,马春秋. 等电阻电压法在空心干式电抗器设计中的应用[J]. 变压器,1994, 31(7):21-23.
ZHU Dongbai, MA Chunqiu. Application of equal resistance voltage method in design of dry-type air-core reactor[J]. Transformer, 1994, 31(7): 21-23.
- [11] 曲展玉,钟昱尧,宋岩泽,等. 高导热环氧复合材料干式电抗器热点温升的仿真研究[J]. 绝缘材料,2024, 57(4):109-114.
QU Zhanyu, ZHONG Yuyao, SONG Yanze, et al. Simulation study on hot spot temperature rise of dry reactor with high thermal conductive epoxy composite as encapsulating material[J]. Insulating Materials, 2024, 57(4): 109-114.
- [12] 梁柯. 干式空心电抗器包封材料的传热特性研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2021.
- [13] 刘志刚,王建华,耿英三,等. 基于耦合方法的干式空心阻尼电抗器温度场计算[J]. 西安交通大学学报,2003, 37(6):622-625.
LIU Zhigang, WANG Jianhua, GENG Yingsan, et al. Calculation of temperature field of dry-type air-core damping reactor based on coupled method[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37(6): 622-625.
- [14] 刘成柱,张猛,奚晶亮,等. 基于流体—热力学耦合的大容量干式电抗器温度场研究[J]. 高压电器,2021, 57(4):84-89.
LIU Chengzhu, ZHANG Meng, XI Jingliang, et al. Study on temperature field of high capacity dry-type reactor based on fluid-thermodynamic coupling[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(4): 84-89.
- [15] 有晓宇,穆海宝,董勤晓,等. 基于Fluent的35 kV干式空心电抗器温度场仿真分析[J]. 高压电器,2017, 53(8): 147-152.
YOU Xiaoyu, MU Haibao, DONG Qinxiao, et al. Simulation analysis on temperature field of 35 kV dry-type air-core reactor based on Fluent[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(8): 147-152.
- [16] 沈需宸,赵彦珍,朱世力,等. 基于多物理场耦合的大容量干式空心并联电抗器温度场仿真研究[J]. 高压电器,2024, 60(8):120-128.
SHEN Peichen, ZHAO Yanzhen, ZHU Shili, et al. Study on simulation of temperature field of large-capacity dry-type air-core shunt reactor based on multi-physical field coupling[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(8): 120-128.
- [17] 杨建立,徐政勋,聂京凯,等. 干式空心电抗器温升仿真技术研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2019, 40(6):68-72.
YANG Jianli, XU Zhengxun, NIE Jingkai, et al. Study on temperature rise simulation technology of dry-type air core reactor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(6): 68-72.

- tion, 2019, 40(6): 68-72.
- [18] 夏天伟, 曹云东, 金巍, 等. 干式空心电抗器温度场分析[J]. 高电压技术, 1999, 25(4): 86-88.
- XIA Tianwei, CAO Yundong, JIN Wei, et al. The analysis of temperature field in dry air core reactor[J]. High Voltage Engineering, 1999, 25(4): 86-88.
- [19] 王珊. 叠装式干式空心电抗器温度场仿真与实验分析[J]. 电测与仪表, 2018, 55(18): 9-13.
- WANG Shan. Temperature field simulation and analysis in field test of laminate dry-type air-core reactor[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(18): 9-13.
- [20] 李维鹏, 武士龙, 褚微, 等. 干式空心电抗器汇流排的设计研究[J]. 变压器, 2023, 61(6): 16-21.
- LI Weipeng, WU Shilong, CHU Wei, et al. Design and research of dry-type air-core reactor busbar[J]. Transformer, 2024, 61(6): 16-21.
- [21] 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.
- [22] 电力变压器第2部分: 液浸式变压器的温升: GB/T 1094.2—2013[S]. 2013.
- Power transformers part 2: Temperature rise of liquid-immersed transformers: GB/T 1094.2—2013[S]. 2013.
- [23] 李飞, 江航龙. 矿用隔爆型干式变压器温升的计算流体动力学仿真分析[J]. 变压器, 2024, 61(6): 12-15.
- LI Fei, JIANG Hanglong. Computational fluid dynamics simulation analysis of temperature rise of mine explosion-proof dry type transformer[J]. Transformer, 2024, 61(6): 12-15.
- [24] 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 HP3 order AC filter in DC convert station[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(1): 136-143.
- [25] 沈霏宸, 赵彦珍, 朱世力, 等. 基于多物理场耦合的大容量干式空心并联电抗器温度场仿真研究[J]. 高压电器, 2024, 60(8): 120-128.
- SHEN Peichen, ZHAO Yanzhen, ZHU Shili, et al. Study on simulation of temperature field of large-capacity dry-type air-core shunt reactor based on multi-physical field coupling[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(8): 120-128.
- [26] 邢超, 奚鑫泽, 何鑫, 等. 多端直流输电系统中限流电抗器配置研究[J]. 电测与仪表, 2023, 60(5): 72-78.
- XING Chao, XI Xinze, HE Xin, et al. Research on configuration of current limiting reactor in multi-terminal HVDC system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(5): 72-78.
- [27] 范乃心, 李岩, 曲德浩. 某500 kV变电站66 kV干式电抗器故障分析[J]. 东北电力技术, 2024, 45(11): 50-57.
- FAN Naixin, LI Yan, QU Dehao. Analysis of 66 kV dry-type reactor fault in 500 kV substation[J]. Northeast Electric Power Technology, 2024, 45(11): 50-57.
- [28] 赵启承, 马文皓, 韩国文, 等. 考虑谐波电压的干式空心电抗器匝间短路早期故障诊断方法[J]. 浙江电力, 2024, 43(8): 104-112.
- ZHAO Qicheng, MA Wenhao, HAN Guowen, et al. An early fault diagnosis method for inter-turn short circuits in dry-type air-core reactors considering harmonic voltages[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(8): 104-112.
- [29] 杨国华, 王文豪, 陈蕾, 等. 平波电抗器绝缘校核仿真的高效降阶算法研究[J]. 高压电器, 2023, 59(5): 68-74.
- YANG Guohua, WANG Wenhao, CHEN Lei, et al. Efficient algorithm study of reduced order modeling for smoothing reactor insulation verification[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(5): 68-74.

作者简介:

刘莉莉(1983—), 女, 工程师, 主要从事电力电抗器、电力电容器产品研究和设计工作。

刘水平(1965—), 男, 正高级工程师, 主要从事电力电容器、互感器、电力电抗器设计工作。

刘涛(1987—), 男, 工程师, 主要从事电力电容器产品研究和设计工作。

邵志强(1985—), 男, 工程师, 主要从事电力电容器产品研究和设计工作。

张文军(1983—), 男, 工程师, 主要从事电力电容器产品研究和设计工作。

张显明(1983—), 男, 工程师, 主要从事电力电容器产品研究和设计工作。