

高导热环氧复合材料干式电抗器热点温升的仿真研究

曲展玉¹, 钟昱尧¹, 宋岩泽^{1,2}, 谢子豪¹, 孟雨琦¹, 谢庆^{1,2}

(1. 华北电力大学 电力工程系, 河北 保定 071003;

2. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

摘要:干式电抗器的稳定运行影响新型电力系统的输电可靠性。干式空心电抗器封装材料整体由浸有环氧树脂的玻璃纤维丝经高温固化而成。本文采用多物理场耦合有限元方法,考虑干式空心电抗器的封装材料热导率对其热点温升的影响,建立了环氧复合材料的COMSOL微观仿真模型和外电路约束下的干式空心电抗器电-磁-流-热耦合计算模型。将电磁场下的损耗作为热源计算温度场与流场分布,研究在25℃环境温度下常规/高导热环氧复合材料对干式空心电抗器热点温升的影响规律。结果表明:高导热环氧树脂对复合材料热导率的提升效果显著;封装材料本体及周围空气温度场区域中热点温升最大值为103.75℃,出现在内部第4层封装材料的上端处;不同热导率的复合材料对降低干式电抗器的热点温升有明显差异,其中干式电抗器在高导热环氧树脂复合材料下的热点温度降低了7.55℃。

关键词:干式空心电抗器;热导率;热点温升;多物理场耦合

中图分类号:TM215;TM472 DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2024.04.015

Simulation study on hot spot temperature rise of dry reactor with high thermal conductive epoxy composite as encapsulating material

QU Zhanyu¹, ZHONG Yuyao¹, SONG Yanze^{1,2}, XIE Zihao¹, MENG Yuqi¹, XIE Qing^{1,2}

(1. Department of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The stable operation of dry-type reactors affects the transmission reliability of new power system. The encapsulating material of dry-type reactor is made of glass fiber filament impregnated epoxy resin cured at high temperature. In this paper, a multiphysics coupled finite element method was used to consider the influence of thermal conductivity of the encapsulating material for dry-type reactor on its hot spot temperature rise, and a COMSOL microscopic simulation model of epoxy composites and an electro-magnetic and flow-thermal coupling calculation model of dry-type reactor under the constraints of external circuits were established. The temperature field and flow field distribution were calculated by using the loss under electromagnetic field as the heat source, and the influence of conventional/high thermal conductive epoxy composites on the hot spot temperature rise of the dry-type reactor at 25℃ of ambient temperature was studied. The results show that the high thermal conductive epoxy resin has a significant improving effect on the thermal conductivity of composites. The maximum hot spot temperature rise in the temperature field area of the encapsulating material body and the surrounding air is 103.75℃, which appears at the upper end of the fourth layer of encapsulating material. The epoxy resin composite with different thermal conductivity has obvious difference on decreasing the hot spot temperature of dry-type reactor, and the hot spot temperature of the dry-type reactor with high thermal conductive epoxy resin composite is reduced by 7.55℃.

Key words: dry hollow reactor; thermal conductivity; hot spot temperature rise; multiphysical field coupling

0 引言

干式电抗器凭借线性度好、饱和性高、损耗小、运行维护方便等优点已成为在“双碳”战略下构建新型电力系统的重要发展方向^[1]。然而由于其

外长时间运行,电抗器封装材料会随着运行年限增加逐渐老化,导致电抗器的热点温升与耐热等级不匹配,致使绝缘击穿事故频发,成为电网持续可靠运行的安全隐患。

目前,国内外对干式电抗器温度的相关研究较多。工程上已有对电抗器绕组热点温升和平均温升的研究报道^[2],如采用基于曲线拟合及热平衡原

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52277147);北京市自然科学基金资助项目(3222057)。

理的平均温升计算公式,便于研究电抗器在工程应用中的热性能^[3]。相关学者采用有限元数值计算方法,开展了干式电抗器多物理场耦合研究^[4-7]。李春^[8]研制了一种以COMSOL热点温升仿真计算为理论依据的干式电抗器温度在线监测系统。张宇娇等^[9]对通风结构进行优化设计,解决了干式电抗器局部温升偏高的问题。FENG C等^[10]基于温度对导体区域导电性的影响,利用双向耦合分析法研究导电性与温升的相互作用关系。WU S Y等^[11]基于有限元算法对干式电抗器热点温度分布规律进行研究。针对干式电抗器包封材料的热应力效应,李小萍等^[12]对比分析了不同固化促进剂对树脂凝胶时间及黏度的影响规律,提升了包封材料树脂固化物的力学性能。余传柏等^[13]采用新型聚醚多元醇增韧环氧树脂,提升了环氧固化物的综合性能。赵春明等^[14]研究了不同温度和通流环境条件对包封材料热膨胀系数的影响。

干式电抗器包封层数多,绝缘材料消耗大,目前考虑玻璃纤维-环氧复合材料导热性能对干式电抗器温度场影响的研究较匮乏,因此本文以干式电抗器包封材料为研究对象,建立复合材料热导率仿真计算模型,对常规和高导热环氧材料所构成的复合材料热导率进行计算。在此基础上,通过磁-电与流-热多物理场耦合仿真模型研究热导率对包封材料热点温度的影响,希望能为干式电抗器的绝缘优化设计、缩短研发周期提供参考。

1 仿真模型

1.1 几何结构

在COMSOL多物理场仿真软件中构建干式电抗器的二维轴对称模型以及复合材料热导率仿真计算模型。

1.1.1 干式电抗器几何结构

以一台RKGKL-10kV-600A-20mH型的干式电抗器作为研究对象,其包封材料高度为2.715 m,最大厚度为15.89 mm。该干式电抗器具有轴对称性,将模型简化为图1所示的二维轴对称模型,其主要电气参数如表1所示。

1.1.2 环氧树脂材料几何结构

干式电抗器包封材料由浸有环氧树脂的玻璃纤维丝高温固化而成^[15-16],玻璃纤维体积分数为65%,环氧树脂体积分数为35%。复合材料三维模型如图2所示。

1.2 数学模型

1.2.1 环氧树脂材料热导率计算模型

材料的热导系数是指在稳定传热条件下,对于

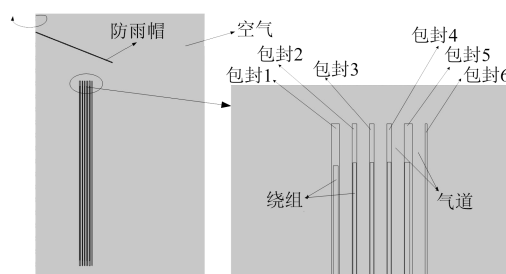


图1 干式空心电抗器系统仿真模型

Fig. 1 System simulation model of dry hollow reactor

表1 干式空心电抗器的主要电气参数

Tab.1 Main electrical parameters of dry hollow reactor

参数	数值	参数	数值
系统电压/kV	10	包封材料高度/mm	2 715.00
额定电流/A	600	内径/mm	1 300.00
频率/Hz	50	外径/mm	1 675.65
绝缘等级	F	直流电流/A	280
电感/mH	20	基波电流/A	530

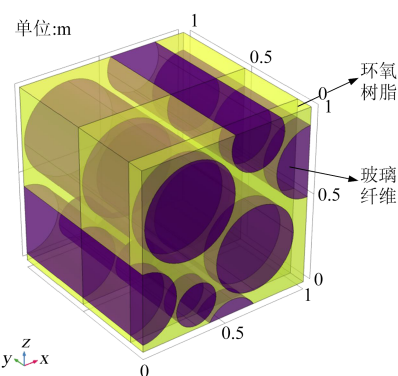


图2 复合材料热导率仿真计算模型

Fig.2 Simulation calculation model for thermal conductivity of composite material

厚度为1 m、两侧表面积为1 m²且温差为1 °C的材料,在1 s内通过1 m²面积传递的热量,单位为W/(m·K)^[17]。其傅里叶方程式如式(1)所示。

$$\frac{dQ}{dt} = -\lambda A \frac{dT}{dl} \quad (1)$$

式(1)中: Q 为热量,W; λ 为热导率,W/(m·K); A 为材料截面接触面积,m²; l 为热量传递距离,m; T 为温度,K; t 为时间,s。

1.2.2 磁场-电路耦合

干式电抗器在结构上由多层绕组并联而成,在电路上等效为电压源与多层绕组并联的结构,各条支路等效为一个电阻 R_i 和电感 L_i (绕组编号 $i=1, 2, \dots, n$)的串联,各支路电感之间通过互感耦合。

采用有限元法分析干式电抗器的磁场-电路耦合问题,电压源等效为集中参数,并联线圈部分按照网格剖析进行离散化求解,分别得到耦合线圈的

磁路部分和外部电压源的电路部分。磁场-电路耦合原理如图3所示。

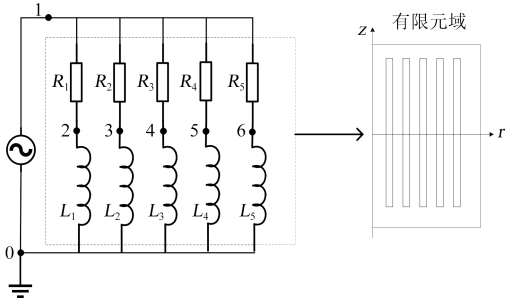


图3 磁场-电路耦合原理示意图
Fig.3 Schematic diagram of magnetic field-circuit coupling principle

基于麦克斯韦方程组,线圈电磁场以磁矢势 A 和电流 I_{cir} 为自由度,干式电抗器的其他部分以磁矢势 A 为自由度,满足磁场频域研究方程,如式(2)~(5)所示。

$$\nabla H = J \quad (2)$$

$$B = \nabla A \quad (3)$$

$$J = \sigma E + j\omega D + J_c \quad (4)$$

$$E = -j\omega A \quad (5)$$

式(2)~(5)中: H 为磁场强度, A/m ; B 为磁感应强度, T ; A 为磁矢势, Wb/m ; J 为总电流密度, A/m^2 ; E 为电场强度, V/m ; D 为电通密度, C/m^2 ; J_c 为线圈中的电流密度, A/m^2 ; ω 为角频率, rad/s ; σ 为电导率, V/m ; j 为虚数单位。

电抗器的外部电路方程为式(6)。

$$u = R_i - \sigma \int_V \nabla \varphi \cdot \frac{\partial A}{\partial t} dV \quad (6)$$

式(6)中: φ 为电势, V ; V 为磁域体积, m^3 。

利用磁场计算得到的损耗作为热源,计算封装材料为常规环氧树脂复合材料的干式电抗器热点温升和温度场分布特点,进一步分析封装材料为高导热环氧树脂材料干式电抗器的热点温升。

1.2.3 流-热耦合

电抗器通过自然对流、热辐射和热传导3种形式与外界空气进行热交换,电抗器内部能量以热能的形式传播,其内部固体和流体瞬态传热方程如式(7)所示。

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u_{trans} \cdot \nabla T + \nabla q = Q + Q_{ted} \quad (7)$$

式(7)中: ρ 为密度, kg/m^3 ; C_p 为恒定应力下的比热容, $J/(kg \cdot K)$; T 为绝对温度, K ; u_{trans} 为平移运动的速度矢量, m/s ; q 为热通量矢量, W/m^2 ; Q 为额外的热源, W/m^3 ; Q_{ted} 为固体中的热弹性阻尼, W/m^3 。

2 仿真结果

2.1 常规/高导热环氧树脂材料导热性能仿真研究

在环氧树脂材料三维仿真模型中,设置不同导热率的环氧树脂材料,常规/高导热环氧树脂材料各组分热导率如表2所示,提取通过复合材料 $1 m^2$ 截面的稳态热通量,得到复合材料热导率与环氧树脂热导率的关系如图4所示。

表2 各组分热导率参数

材料类型	导热系数/($W/(m \cdot K)$)
常规环氧	0.200
	0.600
高导热环氧	0.900
	1.200
玻璃纤维	0.034

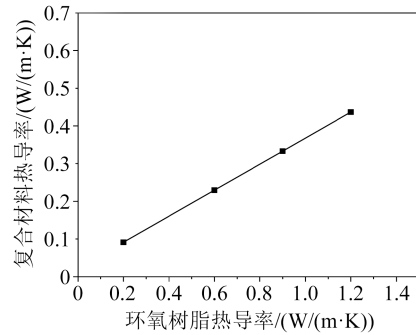


图4 封装复合材料热导率与环氧树脂热导率的关系
Fig. 4 Relationship between thermal conductivity of encapsulating composite materials and epoxy resin

由图4可知,随着环氧树脂热导率的提升,复合材料的热导率呈线性增加,当环氧树脂热导率为 $1.2 W/(m \cdot K)$ 时,复合材料的热导率为 $0.44 W/(m \cdot K)$ 。

2.2 场路耦合结果

根据1.2.2中的磁场频域方程,仿真得到干式电抗器的磁通密度与磁矢势等值线分布如图5所示,轴向和径向磁通密度模值分别如图6、图7所示。

利用COMSOL的后处理功能,提取出干式电抗器在稳态和基频工况下各绕组的电流有效值和损耗值,此时第1~5层封装材料中的绕组体积依次为 0.105 、 0.075 、 0.084 、 0.091 、 $0.128 m^3$,仿真计算出各层电流有效值及体积热源密度,结果如表3所示。

由图6~7可知,径向方向上最内层封装材料的磁感应强度最大,轴向方向上高度中心位置处磁感应强度最大,因此磁通密度在最内层封装材料中心位置处取得最大值。由表3可知,第5绕组体积热源密度最大,这是由于最外层流过最大电流,因而产生最大的损耗。第1绕组流过的电流大小与第4

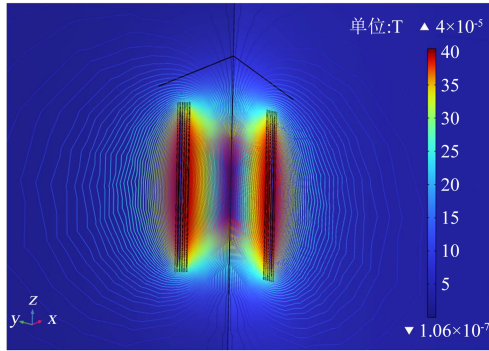


图5 正常情况下干式电抗器的磁场分布示意图

Fig.5 Distribution diagram of dry-type reactor magnetic field under normal conditions

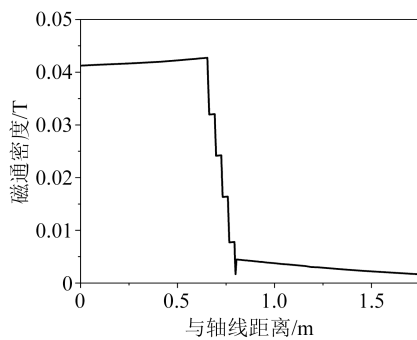


图6 径向磁通密度模值

Fig. 6 Radial flux density modulus

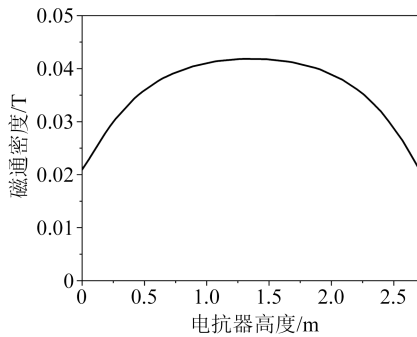


图7 轴向磁通密度模值

Fig.7 Axial flux density modulus

表3 磁场-电路耦合模型计算出的线圈电阻损耗

Tab.3 Coil resistance loss calculated by magnetic field-circuit coupling model

绕组编号	直流电流有效值/A	基波电流有效值/A	总有效值电流/A	直阻损耗/W	体积热源密度/(W/m ³)
1	56.833	106.04	120.30	6 598.91	62 813.76
2	43.682	85.73	96.23	5 503.73	73 114.68
3	50.314	90.54	103.58	5 526.22	66 001.49
4	54.625	103.14	116.71	6 479.87	71 105.56
5	74.213	147.68	165.28	9 530.88	74 415.74

绕组接近,但由于第1绕组体积较大,因而体积热源密度较小。

2.3 常规环氧树脂材料的干式电抗器温度场仿真研究

在COMSOL建立的二维轴对称模型中,将体积热源密度作为温度场模型的热源初始值,通过物理场剖分网格,设置合理的边界条件,按照表4设置材料各部分物性参数,计算模拟6 h时的温度场分布云图。

表4 材料物性参数

Tab.4 Physical property parameters of materials

材料	导热系数/(W/m·K)	恒压热容/(J/kg·K)	密度/(kg/m ³)	运动黏性系数/(Pa·s)
环氧树脂材料	0.091	871	2 719	—
铝	238	900	2 700	—
空气	0.0242	1 006.43	随温度变化	1.808×10 ⁻⁵

图8为干式电抗器求解域内的温度场分布。从图8可以看出,随着高度增加,干式电抗器温度整体呈现上升趋势。图9为干式电抗器的温度分布图。从图9可以看出,在25℃环境温度下,干式电抗器的最高热点温度为103.75℃,位于第4层封装材料整体高度的约95.5%处,其温升为78.75℃。此外,第2~4层封装材料上端区域为热点集中区域。

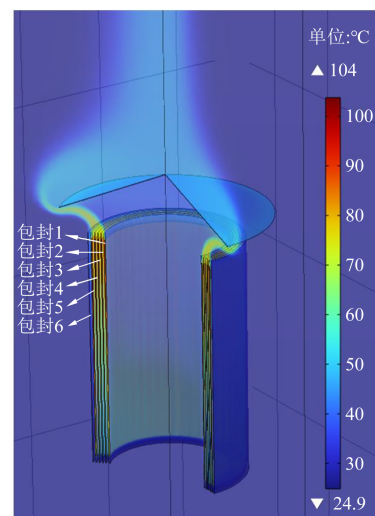
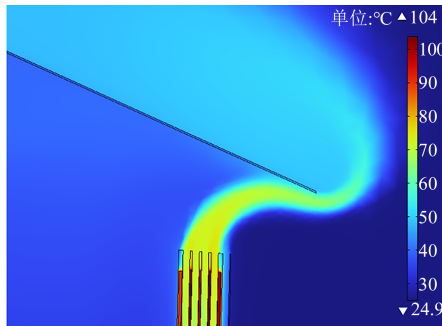


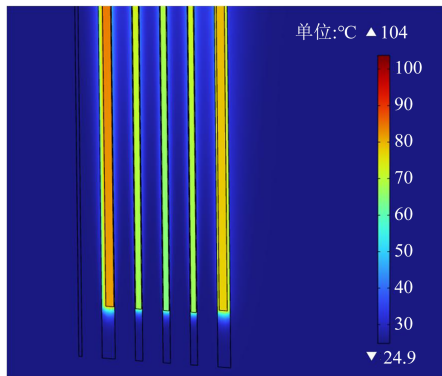
图8 干式电抗器求解域内温度场分布

Fig.8 The temperature field distribution in the solution domain of dry-type reactor

图10为干式电抗器周围空气流场的流速分布。从图10可以看出,求解域内空气的流速最大为1.95 m/s,位于防雨帽的上端檐。空气由下向上吸收封装材料的底部热量后,在自然对流作用下,空气的密度减小,进而加速流动上升,在进入风道时速度会较快。但由于空气在狭窄风道中对流效果变差,流



(a) 上端温度



(b) 下端温度

图9 干式电抗器的温度分布

Fig.9 Temperature distribution of dry-type reactor

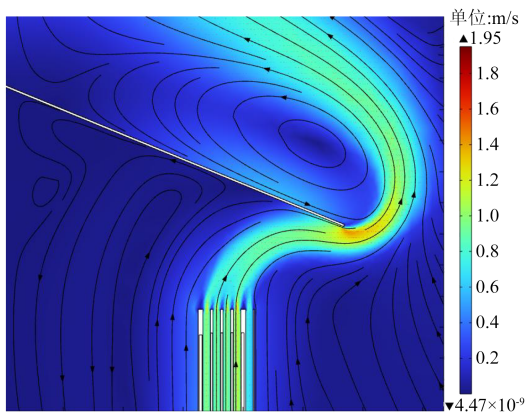


图10 干式电抗器周围空气流场分布

Fig.10 The distribution of air flow field around the dry-type reactor

速提升有限,因此在加速一定时间后空气流速保持稳定。当热空气进入上风道口后,已离开热源,速度开始减弱,一部分热空气沿着防雨帽边缘继续向上流动。

3 结果与讨论

3.1 包封材料的温度分布分析

为便于直观分析各包封材料的轴向温度变化情况,分别对6层包封材料取绕组中心截线,分析其温度变化情况,结果如图11所示。从图11可以看出,第1~5层包封材料的轴向温度分布趋势基本一

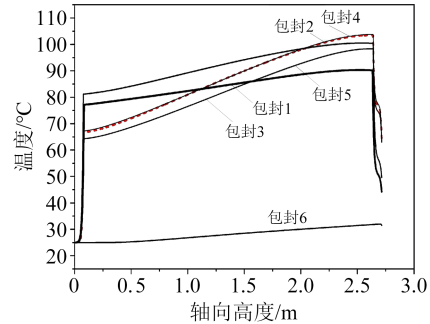


图11 干式电抗器的轴向温度分布规律

Fig.11 Axial temperature distribution of dry-type reactor

致。在底部0~0.074 m范围内,由于底部入口处气流通较好,包封材料吸收大量热量,温度变化梯度最大。在0.074~2.641 m高度范围内,包封材料内部热效应主要为热传导和热对流,空气对流效果稳定,此时电抗器温升变化不大。在轴向2.641~2.715 m高度范围内,风道与外界空气对流换热效果增强,温度明显下降。

对于干式电抗器95.5%高度的径向截线数据集进行分析,温度变化曲线如图12所示,曲线中波峰代表包封材料的温度,波谷代表气道口温度。

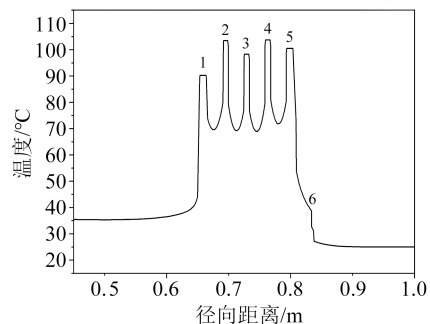


图12 95.5%高度位置处的径向温度分布规律

Fig.12 Radial temperature distribution pattern at 95.5% of height locations

由图12可以看出,波峰与波谷之间的坡度较大,在电抗器各包封材料的同一高度上,位于第4层的温度最高,第2层的温度次之,第1层的温度最低。结合表3中第2层包封材料虽然流过的电流最小,但其绕组体积最小,所以其体积热源密度较大,仅次于第5层包封材料,第4层包封材料的体积热源密度稍小于第2层包封材料。但由于第4层包封材料位于电抗器中部,散热条件较差,而第2层靠近内侧通风区,所以第4层包封材料的热点温升最高。由于第6层包封材料在最外侧阻挡了部分散热,因此第5层的热点温升也较高。最内层包封材料由于散热效果较好,温升较低。第6层包封材料位于最外层,并且没有绕组产热,散热效果好,因此温度

最低。

3.2 环氧复合材料热导率对干式电抗器热点温升的影响规律

由干式电抗器在正常状态下的稳态热点温升可知,其热点温升值为 103.75°C ,此时包封材料为常规环氧复合材料,其热导率为 $0.091\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。通过仿真计算常规/高导热环氧复合材料下干式电抗器的热点温升,结果如图13所示。结合图4和图13可以看出,环氧材料热导率为 $1.2\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 时,复合材料的热导率为 $0.44\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,高导热复合材料使电抗器从最高温 103.75°C 降到 96.2°C ,热点温升降低了 7.55°C ,降温效果显著。

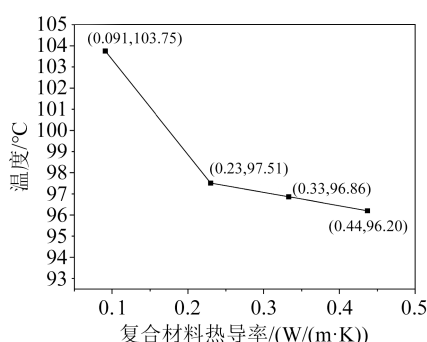


图13 不同环氧复合材料热导率对干式电抗器热点温升的影响

Fig.13 Influence of thermal conductivity of different epoxy composite materials on the hot spot temperature rise of dry-type reactor

4 结论

(1)利用COMSOL有限元仿真模型计算了不同复合材料的热导率,分析得到高导热环氧树脂对复合材料热导率的提升效果显著。

(2)包封材料本体及周围空气温度场区域中热点温升最大值为 103.75°C ,出现在内部第4层包封材料的上端处;电抗器顶部和底部对流换热要优于中部,电抗器顶部温度变化能够表征整体温度状况。

(3)将仿真得到的常规和高导热环氧树脂材料的热导率,作为材料特性输入热-流场仿真模型计算,发现高导热复合材料对降低干式电抗器热点温升的效果显著,使用热导率为 $1.2\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 的环氧树脂,可以使干式电抗器热点温升降低 7.55°C ,证明了包封材料物性参数对干式电抗器温度场影响的重要性。

参考文献:

- [1] KURITA N, ONDA K, NAKANOUE K, et al. Loss estimation method for three-phase ac reactors of two types of structures using amorphous wound cores in 400kVA UPS[J]. IEEE Transaction on Power Electronics,2014,29(7):3657-3668.
- [2] 叶占刚.干式空心电抗器的温升试验与绕组温升的计算[J].变压器,1999(9):6-12.
- [3] 赵海翔.干式空心电抗器平均温升的拟合算法[J].变压器,1999(12):7-9.
- [4] ZHANG Y J, QIN W N, WU G L, et al. Analysis of temperature rise in reactors using coupled multi-physics simulations[C]//2013 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices. Beijing: IEEE,2013.
- [5] 李金忠,张丹丹,徐征宇,等.有限元法分析隔声装置对特高压并联电抗器散热性能的影响[J].高电压技术,2017,43(3):822-827.
- [6] 虞振洋,王世山.基于有限元模型重构的多物理场耦合空心电抗器优化设计[J].电工技术学报,2015,30(20):71-78.
- [7] 姜志鹏,文习山,王羽,等.特高压干式空心平波电抗器温度场耦合计算与试验[J].中国电机工程学报,2015,35(20):5344-5350.
- [8] 李春.干式空心电抗器温度场仿真与温度在线监测系统研究[D].重庆:重庆大学,2018.
- [9] 张宇娇,秦威南,刘文俊.基于耦合场数值计算的电抗器通风结构改进[J].高压电器,2014,50(8):62-67.
- [10] FENG C, ZHAO Y Z, MA X K, et al. An efficient calculation for the temperature of dry air-core reactor based on coupled multi-physics model[C]//Sixth International Conference on Electromagnetic Field Problems & Applications. Dalian, China: IEEE,2012:1-4
- [11] WU S Y, MA H J, JIANG N, et al. Simulation and analysis of temperature field of high voltage reactor based on multi physical field coupling[J]. Power System Protection and Control,2019,47(4):17-24.
- [12] 李小萍,饶保林,田华杰,等.改善大型空心电抗器线圈固化流胶的研究[J].绝缘材料,2010,43(6):12-15.
- [13] 余传柏,饶保林.新型聚酯多元醇增韧干式电抗器浸渍树脂的应用研究[J].绝缘材料,2011,44(3):18-21.
- [14] 赵春明,冷俊,杨晶莹,等.干式空心电抗器应变检测方法及低温条件下应变特性[J].绝缘材料,2023,56(1):82-89.
- [15] 史超帆,陈叔平,王洋,等.纤维方向对环氧树脂/玻纤复合材料导热性能影响[J].工程塑料应用,2022,50(11):108-116.
- [16] 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.
- [17] 杨世铭,陶文铨.传热学[M].第4版.北京:高等教育出版社,2006.

收稿日期:2023-04-15;修回日期:2023-07-07。

作者简介:曲展玉(1998-),女(汉族),山东烟台人,硕士生,主要从事高电压与绝缘技术的研究;通信作者:谢庆(1979-),男(汉族),四川广安人,教授,主要从事高电压与绝缘技术的研究。