

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181538

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

甘源¹, 白锐¹, 张琪²

(1. 辽宁工业大学, 辽宁 锦州 121001; 2. 凌海科诚电气股份公司, 辽宁 凌海 121200)

摘要: 干式空心电抗器具有线性度好、维护方便、难燃、无污染等显著优点, 是一种广泛应用于远距离输电线路的无功补偿装置, 它的运行状况直接影响着电网输电质量。以干式空心串联电抗器为研究对象, 利用有限元分析软件建立了场-路耦合分析模型。通过稳态求解对电抗器匝间的磁场、电场以及内部所受电动力的分布进行分析研究, 给出了干式空心电抗器内部磁场、电场以及所受电动力的分布规律。所做工作为电抗器的优化设计以及绝缘材料的合理选择提供了良好的参考依据。

关键词: 干式空心电抗器; 有限元; 场-路耦合; 磁场; 电动力

Steady-state electromagnetic field and electrodynamic analysis of dry-type air-core reactor based on field-circuit coupling

GAN Yuan¹, BAI Rui¹, ZHANG Qi²

(1. Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China; 2. Linghai Kecheng Electric Co., Ltd., Linghai 121200, China)

Abstract: Dry-type air-core reactor has the obvious advantages of good linearity, convenient maintenance, non-flammability and non-pollution. It is a reactive power compensation device widely used in long-distance transmission lines. Its operation directly affects the transmission quality of power grid. In this paper, the field-circuit coupling analysis model of dry-type air-core series reactor is established by using finite element analysis software. The distribution of magnetic field, electric field and internal electrodynamic force between turns of the reactor is analyzed and studied by steady-state solution. The distribution law of internal magnetic field, electric field and internal electrodynamic force of dry-type air-core reactor is given. The work in this paper provides a good reference for the optimal design of reactor and the reasonable selection of insulation materials.

This work is supported by Key Research and Development Guide Program of Liaoning Province in 2018 (No. 2018020082-201).

Key words: dry-type air-core reactor; finite element method; field-circuit coupling; magnetic field; electrodynamic force

0 引言

干式空心电抗器具有起始电压分布均匀、线性度好、损耗小、安装方便、维护简单等优点^[1-2], 在输电系统中主要用于补偿线路的电容性电流以及限制系统电压升高和操作过电压^[3-4]。其中串联电抗器是改善局部短路电流水平的一种有效方法^[5], 在一定程度上促进了电网的发展^[6]。干式空心电抗器虽然有诸多优良的性能, 但是由于长期运行难以避免会出现各种各样的问题, 更严重的可能会导致起火

烧毁, 使电抗器无法正常工作, 对电网的安全性造成极大威胁^[7]。

研究显示, 绝缘开裂是引起干式空心电抗器烧毁的主要原因之一^[8-9], 而电动力又可能是引起绝缘开裂的原因之一, 因此为了减少类似事故的发生, 近年来, 国内外学者对空心电抗器进行了越来越深入的研究。文献[10-11]通过有限元软件对干式空心电抗器建模并对其进行了数值计算, 分析了电场的分布情况, 研究了电场对干式空心电抗器绝缘性的影响。文献[12-15]采用场-路耦合方法, 分析了短路电流对电抗器所受电动力的影响。但上述文献缺少对电抗器电场、磁场和电动力的同时仿真分析, 并且缺少匝间内部的详细分析结果及结论。

基金项目: 辽宁省 2018 年重点研发计划指导项目资助 (2018020082-201)

本文以一台 35 kV、1 200 kvar 的干式空心串联电抗器为研究对象, 利用有限元软件建立了与实际电抗器参数一致的场-路耦合模型^[16], 得到了模型稳态下二维磁场分布; 通过计算电流, 验证了模型的正确性, 同时分析了模型整体与每一层线圈的轴向和幅向的受力情况; 建立了二维电场模型, 对电抗器各个包封在正常工作下其内部绝缘所受的电场强度进行了研究, 分析了各包封匝间场强各不相同的原因并得到结论, 完成了电抗器内匝间内部电场、磁场和电动力的分析。

1 电抗器场路耦合模型的建立

1.1 空心电抗器基本参数

本文以一台额定电压为 35 kV、额定容量为 1 200 kvar 的干式空心串联电抗器为例进行研究。该电抗器的主要参数如表 1 所示, 各包封参数如表 2 所示。

表 1 电抗器主要参数

Table 1 Main parameters of reactor

额定电压/kV	额定容量/kvar	高度/mm	绕线方式	包封数	支路数	电感/mH
35	1 200	1 290	2 匝并绕	3	12	20

表 2 电抗器各包封参数

Table 2 Encapsulation parameters of reactor

包封	线圈层数	并绕数	额定电流/A	匝数	裸导线直径/mm	包绝缘导线直径/mm
1	1	2	21.35	183	3.0	3.3
	2			180		
	3			177		
	4			175		
2	5	2	16.67	160	3.15	3.45
	6			158		
	7			157		
	8			156		
3	9	2	16.12	152	3.5	3.8
	10			151		
	11			150		
	12			150		

1.2 场路耦合模型建立

本文采用的模型为场-路耦合模型, 该模型包括两部分: 有限元模型和电路模型。干式空心电抗器关于中心轴对称, 按照其实际尺寸大小, 建立了包括空气、绝缘介质以及线圈的二维有限元模型^[17]。将各层线圈等效电路相并联, 施加独立电压源, 构

成电路模型, 将线圈的等效电路分别与对应的线圈单元相耦合, 得到场-路耦合模型如图 1 和图 2 所示。

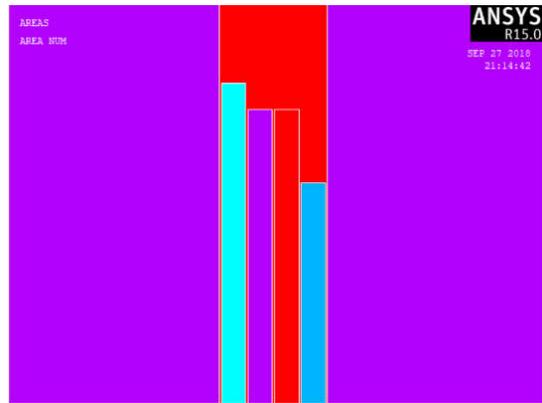


图 1 有限元模型

Fig. 1 Finite element model

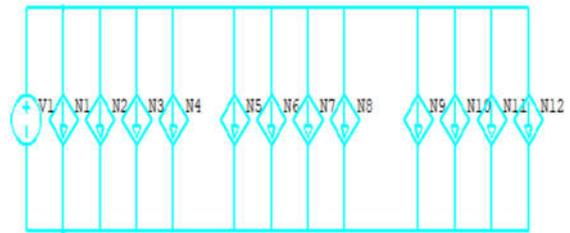


图 2 电路模型

Fig. 2 Circuit model

经过分析调整, 有限元模型的网格采用三角形六级剖分, 既保证了计算精度又尽可能地节省了计算时间^[18], 局部网格划分如图 3 所示。

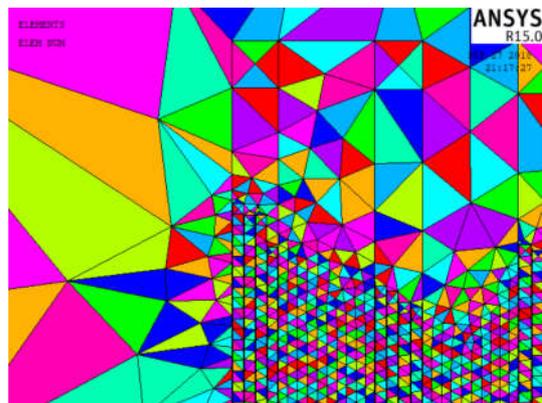


图 3 局部网格划分细图

Fig. 3 Details of local mesh generation

场-路耦合模型的分析先是根据有限元模型的材料属性和实常数设置计算出各线圈的自感、互感和电阻等参数^[19-20], 再由电路模型计算出各线圈的电流并施加到有限元模型对应的线圈上, 计算出磁

场强度和磁感应强度，进一步计算出电抗器的各处受力。

1.3 模型校验

将上述场-路耦合模型中的电压源定义为工频交流电压源，分析类型选择谐波分析，将各层线圈计算得到电流值与额定电流对比，结果如图 4 所示。由图 4 可知，模型具有较高精度。

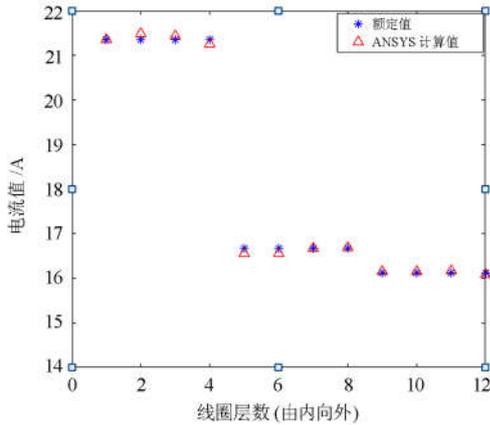


图 4 场-路耦合模型各支路电流校核

Fig. 4 Current checking of branches in field-circuit coupled model

2 稳态电磁场与电动力计算

2.1 稳态磁场分布

利用上述模型对电抗器在稳定运行时的磁场进行计算，可以得到稳态磁通密度分布云图以及磁力线分布图，如图 5 和图 6 所示。

由分布图可以看出，干式空心串联电抗器的端部磁场较为发散，绕组内部磁力线以 8、9 层中部位置为圆心形成闭环曲线，在轴向上沿中心高度对称。在干式空心电抗器内部，磁通密度最大区域出现在最内层中部，最小值出现在 8、9 层之间，磁感应强度最大值为 0.049 903 T。

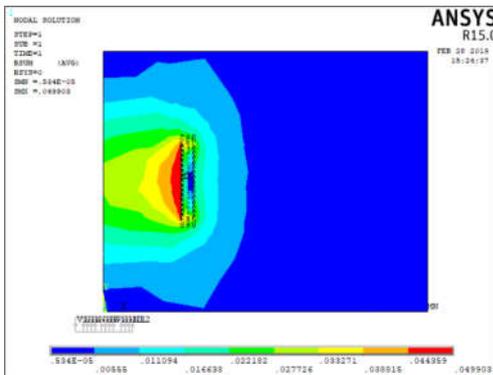


图 5 磁通密度分布云图

Fig. 5 Flux density distribution nephogram

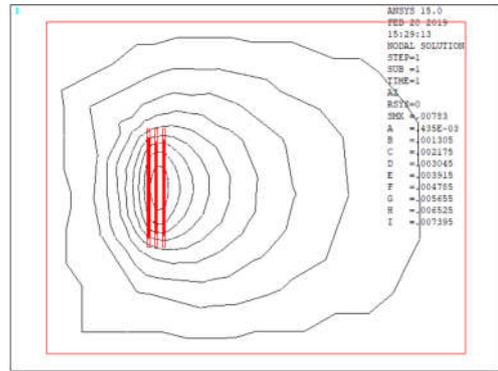


图 6 磁力线分布图

Fig. 6 Magnetic force line distribution map

2.2 稳态电动力分布

电抗器各层线圈所受电动力分布如图 7—图 9 所示。可以看出，从轴向上观察，电抗器的线圈由上下两端向中部挤压，且沿中心高度对称，试图使其变“矮”；从幅向上观察，电抗器的线圈由内外两侧向第 8、9 层挤压，试图使其变“瘦”，并且分布不对称，越靠近中心处，轴向力越小；越靠近第 8、9 层绕组，幅向力越小，第 8 层绕组主要表现为轴向力。

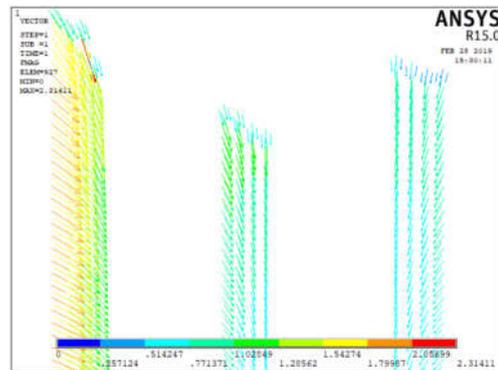


图 7 上部受电动力矢量图

Fig. 7 Upper electrodynamic force vector diagram

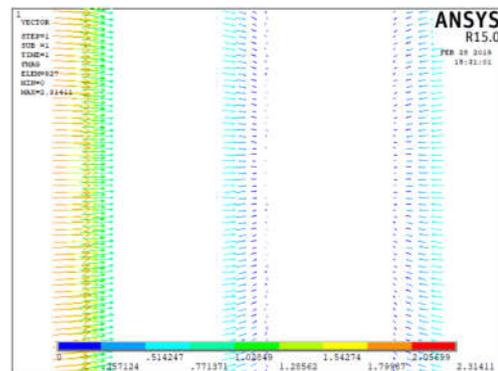


图 8 中部受电动力矢量图

Fig. 8 Central electrodynamic force vector diagram

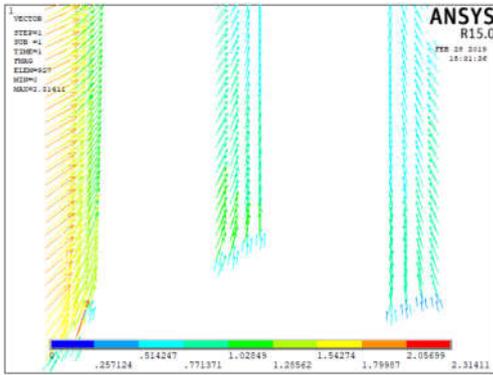


图 9 下部受电动力矢量图

Fig. 9 Lower electromotive force vector diagram

对于各个包封内部, 由于各层线圈轴向电动力关于中心高度对称, 所以合力约为 0, 而幅向电动力合力较大。在此假设指向电抗器外侧方向为正, 各层线圈幅向合力的大小如表 3 所示。由内向外, 前 7 层线圈幅向稳态合力指向电抗器外侧, 而外部的 4 层线圈幅向稳态合力指向电抗器内侧, 且各层绕组的幅向合力分布十分不均匀, 最内层绕组的幅向合力最大, 第 8 层绕组的幅向合力最小, 电抗器整体的幅向合力可达 1 759.29 N。各层绕组幅向合力如表 3 所示。

表 3 各层绕组幅向稳态合力

Table 3 Amplitude-directional steady-state resultant force of each layer winding

线圈层	幅向合力/N	线圈层	幅向合力/N
1	615.651	7	59.743
2	499.956	8	-0.336
3	387.061	9	-17.387
4	280.527	10	-69.634
5	180.410	11	-121.830
6	120.219	12	-175.090

3 静电场分布

针对电抗器电场的分析主要是对其各个包封的内部场强进行计算, 所以需要对整个模型进行剖分建模。为了减小模型的计算求解难度, 本文对电抗器内部进行近似的二维模型搭建, 根据实际尺寸, 建立的包封二维模型如图 10, 对模型的网格划分如图 11 所示。

假设施加在电抗器每一层的电压都是呈线性分布, 即电抗器两端的电压平均加载到该层的每一匝线圈上。例如, 本文所研究的串联电抗器适用于电力系统中 35 kV 的电压等级, 额定电抗率为 12%。根据 JB 5346-1998 的规定, 电抗器的端电压设置为 2 880 V, 包封一的第一层线圈为 183 匝, 双股并绕,

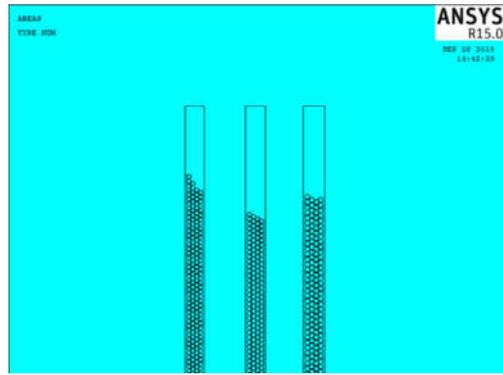


图 10 包封的二维模型

Fig. 10 Two-dimensional model of encapsulation

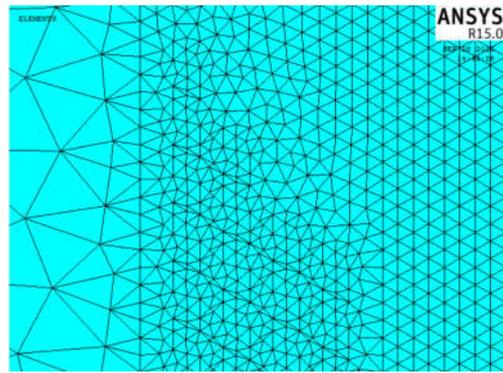


图 11 网格划分

Fig. 11 Mesh generation

因此每两匝的匝间电压约为 31.48 V, 根据此计算方法能够计算出每一层的匝间电压, 再将对应的电压负载施加在每一匝线圈上, 经过求解, 能够得到线圈间场强分布情况。

各包封场强分布如图 12—图 14 所示。

由图 12—图 14 可以观察到, 包封一到包封三匝间的场强在逐渐增大, 原因是电抗器由内到外每一层线圈的匝数在逐渐减小, 所以同一层绕组分配到每一匝线圈上的电压逐渐增大, 导致线圈间的电

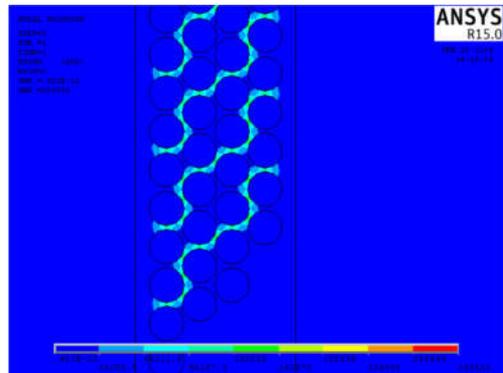


图 12 包封一场强分布云图

Fig. 12 Encapsulating a strongly distributed cloud map

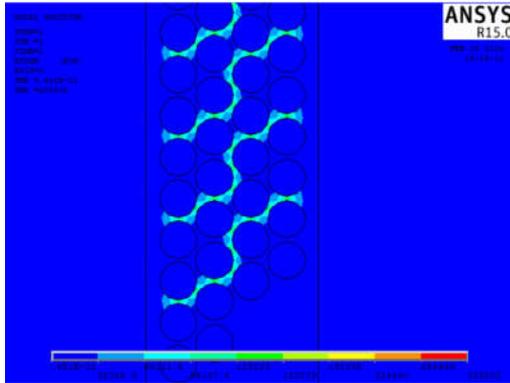


图 13 包封二场强分布云图

Fig. 13 Encapsulated two-field intensity distribution nephogram

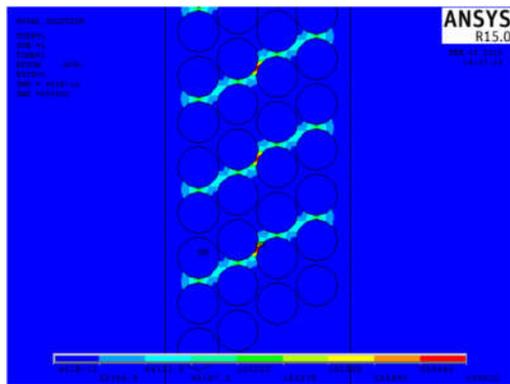


图 14 包封三场强分布云图

Fig. 14 Cloud map of enveloped three field intensity distribution

压差逐渐增大，对应的场强逐渐增强。场强最强处位于包封三，原因是包封三的线圈匝数最少，每一匝线圈上分配的电压最大，对应的局部场强最大。

4 结论

本文首先利用有限元软件建立了干式空心串联电抗器的场-路耦合模型，并进行了磁场、电动力以及电场的分析，根据分析结果，可得如下结论：

1) 稳态运行时，电抗器端部的磁场比较发散，在轴向上沿中心高度对称，磁通密度最大区域出现在最内层中部，最小值出现在第 8、9 层中部。电动力分布特性受电动力的影响，从轴向上观察，上下两端的线圈挤压中间位置的线圈，且上下高度对称；从幅向上观察，内外两侧的线圈向第 8、9 层线圈挤压，试图使其变“瘦”，并且分布不对称，越靠近中心处，轴向力越小；越靠近第 8 层绕组，幅向力越小。

2) 稳态运行时，包封间的电场影响很小，匝间的场强与每一层线圈的匝数有关，匝数越多场强越小，匝数越少场强越大。

3) 在包封内部，幅向电动力合力较大。由内向外，前 7 层线圈幅向瞬态合力指向电抗器外侧，而外部的 4 层绕组幅向瞬态合力指向电抗器内侧，且各层绕组的幅向合力分布十分不均匀，最内层绕组的幅向合力最大，第 8 层绕组的幅向合力最小。

参考文献

[1] 周明, 曹玮, 陈文涛, 等. 串联电抗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 influence of series reactor on power system short-circuit current characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 147-153.

[2] 李丽, 刘嘉文. 35 kV 并联电抗器工频电磁场分布特性研究[J]. 电力科技与环保, 2012, 28(1): 5-6.
LI Li, LIU Jiawen. The research of power frequency electric field intensity of 35 kV shunt reactor[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2012, 28(1): 5-6.

[3] 刘宇博. 干式空心电抗器故障磁场分析及监测方法研究[D]. 沈阳: 沈阳工程学院, 2017.
LIU Yubo. Magnetic field analysis and monitoring method about the failure of dry-type air-core reactor[D]. Shenyang: Shenyang Institute of Engineering, 2017.

[4] 于龙洋, 刘晔, 于施淼, 等. 超特高压油浸式电抗器电磁场仿真分析[J]. 中国电力, 2018, 51(11): 110-116.
YU Longyang, LIU Ye, YU Shimiao, et al. Simulation analysis and research on electromagnetic field of ultra-special high pressure oil-immersed reactor[J]. Electric Power, 2018, 51(11): 110-116.

[5] 李锋, 樊艳芳, 王晓飞, 等. 限流电抗器接入电网对继电保护的影响及整定原则研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 118-123.
LI Feng, FAN Yanfang, WANG Xiaofei, et al. Influence of current limiting series reactor connected to the power grid on relay protection and research on the principle of the corresponding setting[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17): 118-123.

[6] 吴书煜, 马宏忠, 姜宁, 等. 基于多物理场耦合的高压电抗器温度场仿真与分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(4): 17-24.
WU Shuyu, MA Hongzhong, JIANG Ning, 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.

[7] 丁玉剑, 张月华, 周松松, 等. ±1100 kV 干式平波电抗

- 器电场分布和操作冲击放电特性[J]. 电网技术, 2017, 41(11): 3414-3419.
- DING Yujian, ZHANG Yuehua, ZHOU Songsong, et al. Study on electric distribution and switching impulse discharge characteristics of ± 1100 kV dry-type smoothing reactor[J]. Power System Technology, 2017, 41(11): 3414-3419.
- [8] 李爽. 干式空心并联电抗器磁场与电动力研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2015.
- LI Shuang. Calculation of magnetic field and electromagnetic force of the dry-type air-core shunt reactor[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2015.
- [9] 赵延山. 空心电抗器电场及电动力问题分析[D]. 济南: 山东大学, 2012.
- ZHAO Yanshan. Analysis of electric field and electrodynamic force of air-core reactor[D]. Jinan: Shandong University, 2012.
- [10] 王岩, 谭向宇, 陈晶, 等. 电场对干式空心电抗器的绝缘性影响分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 36(6): 78-81, 90.
- WANG Yan, TAN Xiangyu, CHEN Jing, et al. Analysis of the influence of electric field on the insulation of dry-type air-core reactor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(6): 78-81, 90.
- [11] 彭庆军, 姜雄伟, 马仪, 等. 基于有限元方法的 35 kV 干式空心并联电抗器匝间电场分布研究[J]. 高压电器, 2018, 54(2): 147-152.
- PENG Qingjun, JIANG Xiongwei, MA Yi, et al. Analysis of 35 kV dry-type air-core reactors turn-to-turn field distribution based on the finite element method[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(2): 147-152.
- [12] 闫强强, 舒乃秋, 关向雨, 等. 基于电磁-结构场耦合的干式空心电抗器短路电动力计算[J]. 水电能源科学, 2016, 34(2): 186-189.
- YAN Qiangqiang, SHU Naiqiu, GUAN Xiangyu, et al. Calculation of short-circuit electric force of dry-type air core reactor based on electromagnetic-structural coupling method[J]. Water Resources and Power, 2016, 34(2): 186-189.
- [13] 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.
- [14] 李白, 唐力, 厉天威, 等. 基于场-路耦合的干式空心电抗器匝间短路特性研究[J]. 广东电力, 2018, 31(1): 119-126.
- LI Bai, TANG Li, LI Tianwei, et al. Research on characteristic of turn-to-turn short circuit of dry air reactor based on electromagnetic field-circuit coupling method[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(1): 119-126.
- [15] 沈宏伟, 马仪, 崔志刚, 等. 干式空心并联电抗器投入瞬态电动力研究[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2014, 19(6): 93-97.
- SHEN Hongwei, MA Yi, CUI Zhigang, et al. Calculation of inputting transient electromagnetic force of dry-type air-core shunt reactor[J]. Journal of Harbin University of Technology, 2014, 19(6): 93-97.
- [16] 牛艳艳, 刘志刚, 耿英三, 等. 空心电抗器在瞬变中的电动力计算[J]. 电气开关, 2004(5): 20-23.
- NIU Yanyan, LIU Zhigang, GENG Yingsan, et al. The calculation of electromagnetic force in air-core reactor[J]. Electric Switchgear, 2004(5): 20-23.
- [17] 付伟平, 赵京武, 霍春燕. 一起 35 kV 干式电抗器故障原因分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2011, 32(1): 59-62.
- FU Weiping, ZHAO Jingwu, HUO Chunyan. Reason analysis for a 35 kV dry type reactor fault[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2011, 32(1): 59-62.
- [18] 刘志刚, 耿英三, 王建华, 等. 干式空心电抗器的优化设计[J]. 高电压技术, 2003, 29(2): 17-18, 20.
- LIU Zhigang, GENG Yingsan, WANG Jianhua, et al. The optimum design of dry-type air-core reactor[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(2): 17-18, 20.
- [19] 吴红波. 干式串联铁心电抗器设计中应注意的一些问题[J]. 高压电器, 2010, 46(6): 103-105.
- WU Hongbo. Some suggestions to design of dry type series iron-core reactor[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(6): 103-105.
- [20] 付银仓. 关于户外干式空心电抗器的设计[J]. 电力电容器与无功补偿, 2008, 29(6): 15-19, 39.
- FU Yincang. Design of outdoor dry-type air-core reactor[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2008, 29(6): 15-19, 39.

收稿日期: 2018-12-09; 修回日期: 2019-05-16

作者简介:

甘源(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电磁场仿真分析; E-mail: 1135639280@qq.com

白锐(1976—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电磁场仿真分析及智能控制; E-mail: broffice@126.com

张琪(1988—), 男, 学士, 工程师, 研究方向为干式空心电抗器的设计与制造。E-mail: 625999634@qq.com

(编辑 魏小丽)