

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201295

# 干式空心串联电抗器匝间短路故障特征研究

咸日常<sup>1</sup>, 鲁尧<sup>1</sup>, 陈蕾<sup>1</sup>, 耿凯<sup>2</sup>, 王艳萍<sup>1</sup>, 尹宝林<sup>3</sup>

(1. 山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255000; 2. 山东汇能电气有限公司, 山东 淄博 255089;  
3. 智洋创新科技股份有限公司, 山东 淄博 255086)

**摘要:** 干式空心串联电抗器是电力系统无功补偿回路中的重要电气设备, 其主绝缘通常采用环氧浇注结构, 在实际研究中其匝间绝缘故障设置困难、试验验证成本高。为了监测是否发生匝间短路故障、提高在线监测灵敏度, 借助有限元软件 Comsol 仿真研究了电抗器发生匝间短路时各电气参数的变化情况。首先仿真计算正常状态下电抗器的电感值和电流值, 通过与解析计算结果进行比较, 验证所建模型的正确性。然后在不同位置分别设置匝间短路故障点以得到电抗器各线圈层电流。最后得出其等效电阻、等效电抗、等效阻抗、功率因数、损耗因数等电气参数的变化情况。仿真分析结果表明: 电抗器匝间短路故障点的位置不同, 各电气参数变化率也不同, 其绝对值由端部向中部、由内层向外层呈现增大趋势, 且损耗因数和功率因数变化率较大, 对匝间短路故障反应灵敏, 可用于干式空心串联电抗器匝间短路故障的在线监测与保护。

**关键词:** 干式空心串联电抗器; 有限元; 匝间短路; 损耗因数; 功率因数

## Fault characteristics of an inter-turn short circuit of a dry-type air core series reactor

XIAN Richang<sup>1</sup>, LU Yao<sup>1</sup>, CHEN Lei<sup>1</sup>, GENG Kai<sup>2</sup>, WANG Yanping<sup>1</sup>, YIN Baolin<sup>3</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China;  
2. Shandong Huineng Electric Co., Ltd., Zibo 255089, China; 3. Zhiyang Innovation Technology Co., Ltd., Zibo 255086, China)

**Abstract:** The dry-type air-core series reactor is an important component in the reactive power compensation loop of a power system. Its main insulation usually adopts an epoxy casting structure. It is difficult to set the inter-turn insulation fault and the test verification cost is high. There is a need to monitor whether turn-to-turn short-circuit faults occur and improve online monitoring sensitivity. In this paper, the finite element software Comsol is used to simulate the changes of electrical parameters when inter-turn short circuits occur. First, the inductance and current values of the reactor under normal conditions are simulated and calculated, and the correctness of the model is verified by comparing with the results obtained by analytical calculation methods. Then the inter-turn short-circuit fault points at different positions are set to obtain the current of each coil layer of the reactor. Finally, the change of electrical parameters such as equivalent resistance, reactance, impedance, and power and loss factors of the reactor is calculated. The simulation analysis shows that the different electrical parameters of the reactor have different rates of change because of different short-circuit locations. The absolute values of the reactor have a tendency to increase from the end to the middle and from the inner layer to the outer layer. Among the parameters, the change rate of the loss factor of the reactor and power factor change rate are large, and sensitive to reactor short-circuit faults between turns. The system can be used for on-line monitoring and protection of inter-turn short-circuit faults in dry-type air-core series reactors.

This work is supported by the National “Thirteen-Five Year” Research and Development Program of China (No. 2016YFB0901303).

**Key words:** dry-type air core series reactor; finite element; inter-turn short circuit; loss factor; power factor

## 0 引言

随着电力系统感性负荷的增加, 系统对无功的

需求越来越高, 在我国的无功补偿装置中, 电力电容器成套装置数量最多也最为经济<sup>[1]</sup>。为抑制因投入电力电容器而引起的电网高次谐波放大问题和限制电容器合闸涌流, 电力电容器成套装置中往往接入一定电抗率的串联电抗器<sup>[2-4]</sup>, 其中, 干式空心

基金项目: 国家“十三五”重点研发计划(2016YFB0901303)

串联电抗器(以下简称电抗器)由于具有线性度好、损耗低、机械强度高、无油化、维护方便等优点而得到广泛应用<sup>[5-9]</sup>。然而在实际的运行过程中电抗器往往会发生不同类型的故障, 其中匝间短路故障发生比例最大, 当电抗器发生匝间短路故障而又无法得到有效监测时极易造成电抗器烧毁<sup>[10-14]</sup>, 甚至引发火灾事故危及整个变电站的安全运行。因此, 研究电抗器匝间短路故障时各电气参数的变化情况、提高监测灵敏度有着极其重要的现实意义。

诸多专家学者对此进行了相关研究与探索。文献[15]提出利用无线热点测温的方法来判断电抗器的整体绝缘状态, 该方法虽可反映电抗器的匝间绝缘状态, 但需布置大量传感器。因此更多学者注重于研究可反映电抗器匝间短路本质特征的相关电气量变化情况。文献[16]通过解析计算方法计算了并联电抗器匝间短路电抗和电阻, 得出了电抗器等值电阻变化量最大的结论。该方法满足精度要求但计算量较大。文献[17]采用有限元法分析了电抗器短路状态下的短路电流和电动力。有限元计算方法基于磁场—电路耦合原理能够对电抗器各种运行工况进行模拟, 在提高运算速度与精度的同时也大大节省了计算量, 其强大的后处理功能使得计算结果更为直观。因此本文采用有限元计算方法对电抗器匝间短路故障下电气参数的变化情况展开研究。

本文以一台型号为 CKGKL-50/10-5% 的户外干式空心串联电抗器为仿真研究对象。首先在有限元仿真软件 Comsol 中建立了电抗器匝间绝缘正常情况下的仿真模型, 该模型下计算得到的各层线圈电感值和电流值与解析值吻合度较高, 验证了模型的准确性。然后, 建立电抗器匝间短路仿真模型, 研究了电抗器等效电阻、等效电抗、等效阻抗、功率因数、损耗因数等电气参数的变化情况, 为在线监测电抗器是否发生匝间短路故障提供了数据支持, 有利于实现电抗器的保护。

## 1 有限元计算

在 Comsol 中建立的电抗器仿真模型如图 1 所示。求解区域内控制方程为<sup>[18]</sup>

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_e \\ \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \\ \mathbf{E} = -j\omega \mathbf{A} \\ \mathbf{J}_e = \sigma \mathbf{E} + j\omega \mathbf{D} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{H}$  为磁场强度;  $\mathbf{J}_e$  为电流密度;  $\mathbf{B}$  为磁通密度;  $\mathbf{A}$  为磁矢势;  $\mathbf{E}$  为电场强度;  $\mathbf{D}$  为电位移矢量。

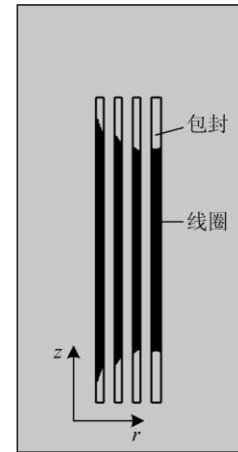


图 1 电抗器仿真模型

Fig. 1 Reactor simulation model

线圈几何分析方程为

$$\mathbf{J}_e = \frac{N(V_{coil} + V_{ind})}{AR_{coil}} \mathbf{e}_{coil} \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{J}_e$  为沿导线方向的电流密度分量;  $N$  为线圈匝数;  $V_{coil}$  为施加的线圈电压;  $V_{ind}$  为沿线圈积分电场计算出的感应电压;  $\mathbf{e}_{coil}$  为线圈的方向矢量;  $A$  为线圈区域的总横截面面积;  $R_{coil}$  为线圈总电阻。

线圈电阻计算公式为

$$R_{coil} = \int_A \frac{NL}{\sigma_{coil} a_{coil} A} \quad (3)$$

式中:  $L$  为线圈长度;  $\sigma_{coil}$  为导线电导率;  $a_{coil}$  为导线横截面面积。

边界条件: 在边界处将磁势的切向分量设置为零, 即满足式(4)。

$$\mathbf{n} \times \mathbf{A} = 0 \quad (4)$$

式中,  $\mathbf{n}$  为法向分量。

## 2 解析计算法

### 2.1 等效电路分析

干式空心串联电抗器本质上是由多个单层线圈并联组成, 假设电抗器共有  $m$  层线圈, 电抗器匝间绝缘正常时, 其等效电路如图 2(a)所示; 若电抗器某层线圈发生匝间短路故障, 假设故障层为第  $t$  层线圈, 则由故障点连接的短路匝将形成一闭合回路(以下称为“短路环”), 将该支路记为第  $m+1$  条支路, 该支路电压虽为 0, 但因电磁感应作用该短路环会与其他正常线圈交链而产生感应电流<sup>[17]</sup>, 匝间短路时的电抗器等效电路如图 2(b)所示<sup>[18-23]</sup>。

匝间绝缘正常时电抗器各层线圈满足的计算方程为<sup>[14]</sup>

$$(R_i + j\omega L_i)I_i + \sum_{l=1, l \neq i}^{m+1} j\omega M_{i,l} I_l = U_i \quad (5)$$

式中:  $i = 1, 2, \dots, m$ ;  $\mathbf{U}_i = \mathbf{U}$ 。

当发生匝间短路故障时电抗器各层线圈的计算方程为

$$\begin{cases} (R'_i + j\omega L'_i)I'_i + \sum_{l=1, l \neq i}^{m+1} j\omega M'_{i,l} I'_l = U_i \\ (R'_{m+1} + j\omega L'_{m+1})I'_{m+1} + \sum_{i=1}^m j\omega M'_{i,m+1} I'_i = 0 \end{cases} \quad (6)$$

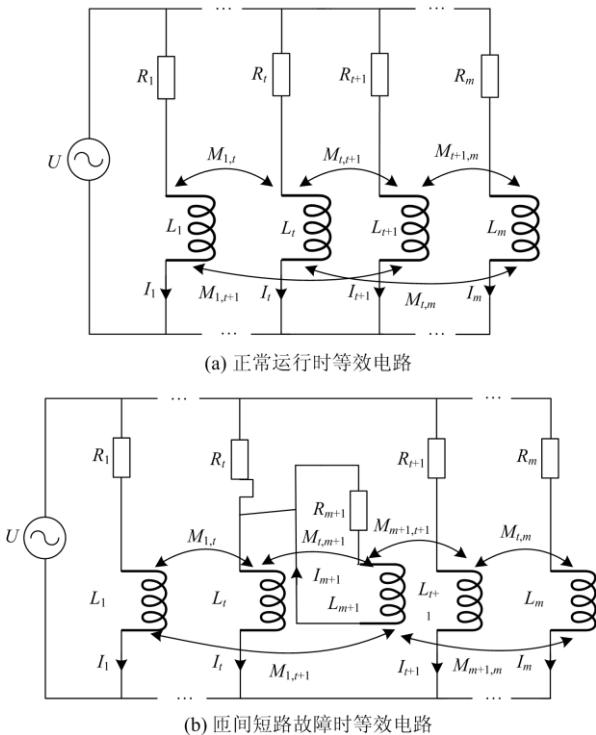


图 2 电抗器等效电路

Fig. 2 Reactor equivalent circuit

## 2.2 电感、电流计算分析

线圈层的电感计算模型<sup>[24]</sup>如图 3 所示。

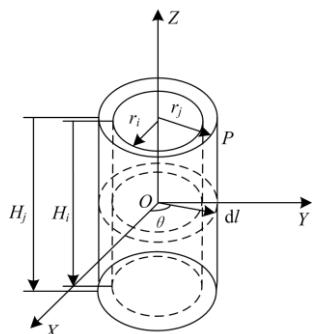


图 3 两层螺线圈电感计算示意图

Fig. 3 Schematic diagram of two-layer solenoid inductance and magnetic field calculation

根据纽曼公式和毕奥—萨伐尔定律, 线圈层  $i$  与线圈层  $j$  之间的互感计算公式为<sup>[25]</sup>

$$\begin{cases} M_{ij} = \int_{S-0.5H_i}^{S+0.5H_i} \int_{-0.5H_j}^{0.5H_j} \int_0^\pi \frac{\mu_0 n_i n_j r_i r_j \cos \theta}{k^{\frac{1}{2}}} d\theta dz_j dz_i \\ k = (z_j - z_i)^2 + r_i^2 + r_j^2 - 2r_i r_j \cos \theta \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $S$  为两线圈的中心距, 在电抗器计算中可设置为 0;  $H_i$ 、 $H_j$  为线圈高度;  $\mu_0$  为真空磁导率;  $n_i$ 、 $n_j$  表示线圈单位高度的匝数;  $r_i$ 、 $r_j$  为线圈半径;  $\theta$  为水平转角。

令上式中  $i = j$ 、 $S = 0$ , 即可求得线圈的自感。将求得的电抗器电感分别代入式(5)、式(6)中, 即可求得每层线圈的电流。

## 3 仿真验证

本文的仿真对象为一台型号为 CKGKL-50/10-5% 的干式空心串联电抗器, 该电抗器的主要技术参数如表 1 所示。

表 1 干式空心串联电抗器主要参数

Table 1 Main parameters of dry-type air-core series reactor

参数	数值	参数	数值
额定电压/kV	10	频率/Hz	50
额定电流/A	157.5	内径/mm	545
额定容量/kvar	50	外径/mm	843.1
相数	1	包封数	4
包封 1 支路数	5	包封 2 支路数	4
包封 3 支路数	4	包封 4 支路数	5

将采用有限元法和解析法两种计算方式得到的电感值和电流值进行比较, 比较结果如图 4、图 5 所示。

由图 4、图 5 可知, 有限元法计算所得结果与解析值数据吻合度较高, 验证了有限元仿真模型的准确性。

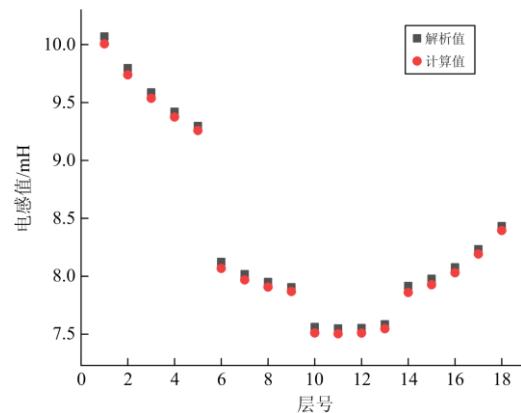


图 4 各层电感参数比较

Fig. 4 Comparison of inductance parameters of each layer

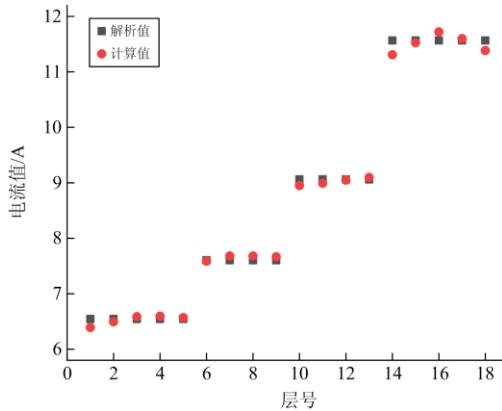


图 5 各层电流比较

Fig. 5 Current comparison of each layer

## 4 匝间短路故障设置与仿真分析

### 4.1 电抗器匝间短路故障设置

考虑到电抗器结构上的对称性, 文中分别在线圈轴向高度的  $H$ (电抗器线圈端部)、 $7H/8$ 、 $3H/4$ 、 $5H/8$ 、 $H/2$  五处位置设置匝间绝缘短路故障点, 从上到下依次记为 1、2、3、4、5。同时文中分别设置第 1、5、9、13、17 层线圈为故障层, 研究不同位置发生匝间短路故障时电抗器等效电气参数的变化情况。仿真时假定电抗器匝间短路前后各线圈层的电压不变, 但故障点处电压为 0, 其中故障位置是以一矩形表示, 该矩形宽度与相应故障层线圈线径相同, 高度为故障匝数与线圈线径的乘积, 本文只对单匝短路的情况加以研究分析。以第 5 层线圈位置 2 故障为例, 故障设置位置如图 6(a)所示, Comsol 仿真云图如图 6(b)所示。

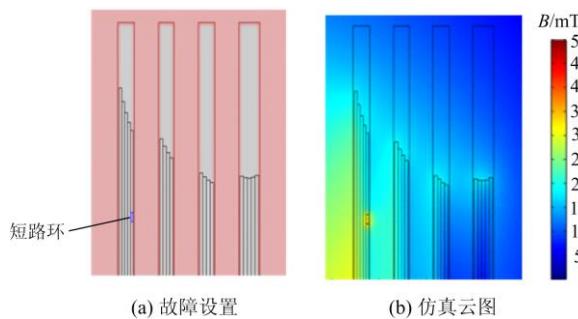


图 6 故障设置与仿真结果

Fig. 6 Fault settings and simulation results

### 4.2 电抗器电气参数计算原理

由于在线监测只能对电抗器的主回路整体参数进行监测, 而不能对每一层或每一匝线圈进行监测, 因此文中致力于探索当电抗器某匝线圈发生故障时, 电抗器主回路电气参数的变化情况。

电抗器主回路总电流计算公式如式(8)所示。

$$\mathbf{I} = \sum_{i=1}^n \mathbf{I}_i \quad (8)$$

式中:  $n$  为电抗器的线圈层数;  $\mathbf{I}_i$  为由仿真计算出的电抗器各层线圈电流。

电抗器的等效阻抗计算公式如式(9)所示。

$$\mathbf{Z} = R + j\omega L = \frac{\mathbf{U}}{\mathbf{I}} \quad (9)$$

式中:  $\mathbf{U}$  为仿真时施加的线圈电压;  $\mathbf{I}$  为电抗器总电流;  $R$  为电抗器的等效电阻;  $\omega L$  为电抗器等效电抗(其中  $\omega$  表示角频率,  $L$  表示电抗器等效电感)。

这里将上式中电抗器等效电阻和等效电抗的比值定义为损耗因数, 其计算公式如式(10)所示。

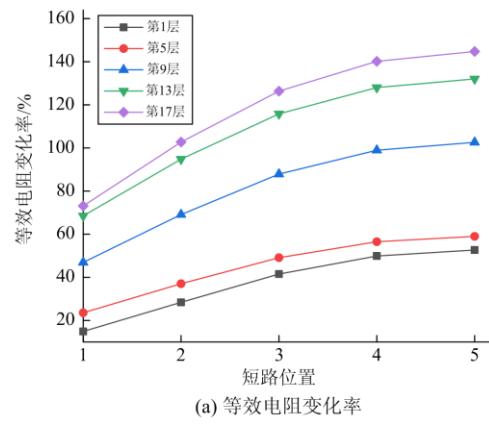
$$\tan \delta = \frac{R}{\omega L} \quad (10)$$

相应地, 根据三角函数关系可知, 电抗器功率因数计算公式如式(11)所示。

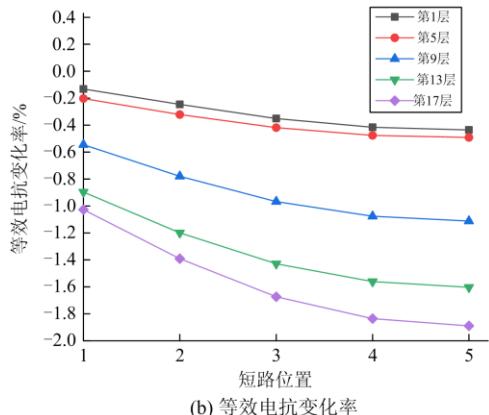
$$\cos \varphi = \cos(\frac{\pi}{2} - \arctan \delta) \quad (11)$$

### 4.3 仿真结果分析

电抗器在其线圈不同位置发生匝间短路时, 其等效电气参数相对于正常状态下的变化情况如图 7(a)—图 7(e)所示。



(a) 等效电阻变化率



(b) 等效电抗变化率

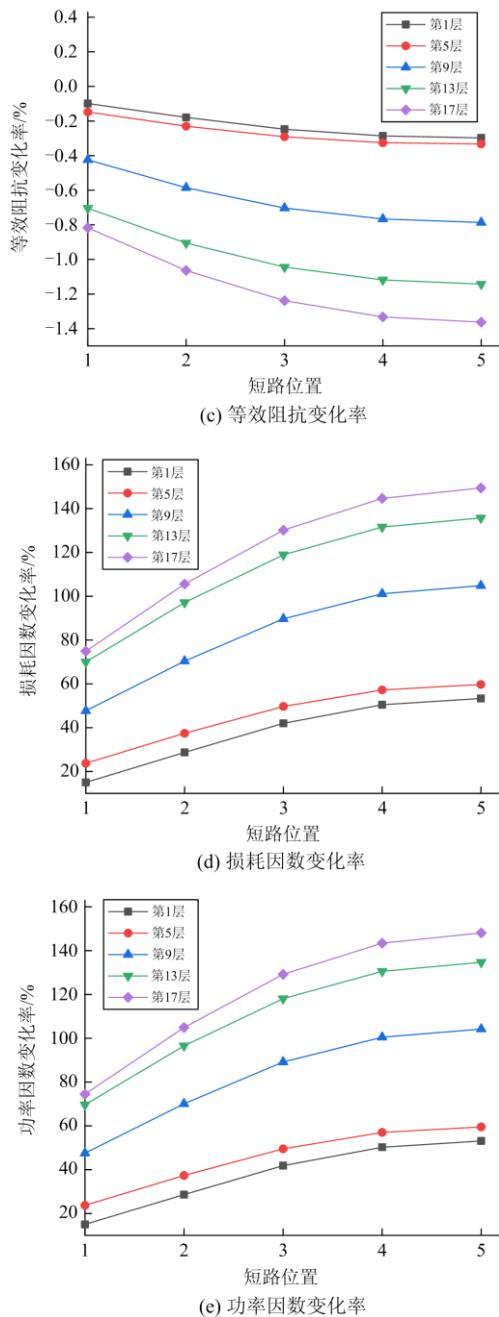


图 7 电抗器匝间短路电气参数变化量

Fig. 7 Electrical parameters of the interturn short circuit of the reactor

由图 7 可知, 当电抗器线圈发生匝间短路故障时, 其等效电阻、等效电抗、等效阻抗、损耗因数、功率因数的变化率差别较大, 具体变化规律如下所述。

1) 在轴向上, 电抗器发生匝间短路故障时, 等效电抗和等效阻抗值的变化率均在减小。同一层线圈中, 端部发生匝间短路故障时其变化率最小, 等效电抗变化率为 $-0.13\% \sim -1.89\%$ , 等效阻抗变化率

为 $-0.10\% \sim -1.36\%$ 。其中, 等效电抗减小是因为短路环电流与实际线圈电流方向相反, 该反向电流对原有磁场产生去磁作用; 等效阻抗减小是因为电抗器匝间短路前后系统电压并未改变, 但短路后回路总电流在增大。

2) 在轴向上, 短路点位置从线圈顶部向中部靠拢的过程中, 等效电阻、功率因数、损耗因数的变化率均在增大, 但三者变化率相差不大。其中, 损耗因数变化率最小为 15.04%, 最大可达 149.45%; 功率因数变化率最小为 15.00%, 最大可达 148.11%; 等效电阻变化率最小为 14.89%, 最大为 144.73%; 分析上述参数变化情况, 主要原因有以下几点:

(1) 电抗器在发生匝间短路后, 短路环中的巨大电流使得电抗器消耗的有功功率大幅增加, 有功功率表达式如式(12)所示。

$$P = UI \cos \varphi \quad (12)$$

由于电压不变, 回路电流增大非常小, 因此电抗器的功率因数将会明显增大。

(2) 同时, 有功功率与回路电流的平方、等效电阻成正比, 即

$$P = I^2 R \quad (13)$$

同理, 电抗器等效电阻会出现明显增大。

(3) 电抗器匝间短路后等效电阻增大, 等效电感减小, 由式(10)可得其损耗因数会增大。

3) 在径向上, 随着短路位置从线圈内层向外层变化, 电抗器等效电阻、等效电抗、等效阻抗、功率因数、损耗因数变化率的绝对值均在增大。因为随着故障位置由内层向外层变化, 短路环电流越来越大, 故障线圈与其他线圈的耦合度越来越高, 因此上述各参数的变化率也越来越大。

## 5 结论

本文基于有限元计算方法, 仿真分析了 10 kV 干式空心串联电抗器匝间短路故障时其电气参数的变化情况, 并得到以下结论:

1) 电抗器发生匝间短路故障时, 等效电阻、功率因数、损耗因数在增大, 其变化率为正; 等效电抗、等效阻抗在减小, 其变化率为负。

2) 随着短路故障点位置的不同, 电抗器各电气参数变化率的绝对值总体呈现出由顶部向中部增大、由内层向外层增大的趋势。

3) 总体而言, 在电抗器以上电气参数中, 损耗因数和功率因数对电抗器线圈发生匝间短路故障的反应灵敏, 因此可通过采集计算的电压、电流信号来计算电抗器的损耗因数或功率因数, 从而实现电抗器的在线监测与保护。

## 参考文献

- [1] 马伟东, 孔圣立, 刘超, 等. 基于联合电压判据的高压并联电容器单相接地故障保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(22): 142-147.  
MA Weidong, KONG Shengli, LIU Chao, et al. Single-phase earth fault protection method based on combined voltage criterion in high voltage shunt capacitor[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(22): 142-147.
- [2] 咸日常, 李其伟, 孙学锋, 等. 基于状态量监测的电力电容器故障诊断技术的研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39(3): 21-25.  
XIAN Richang, LI Qiwei, SUN Xuefeng, et al. Study on fault diagnosis technology of power capacitor based on condition quantity monitoring[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018, 39(3): 21-25.
- [3] 电力行业电力电容器标准化技术委员会. 并联电容器装置技术及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [4] 宋波. 谐波影响下电力电容器的协调无功降损方法[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(11): 7-12.  
SONG Bo. A method of coordinated reactive power loss reduction for power capacitors under the influence of harmonics[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(11): 7-12.
- [5] 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.
- [6] 凌云, 赵彦珍, 肖利龙, 等. 高电压大容量干式空心电抗器匝间短路故障在线监测方法[J]. 高电压技术, 2019, 45(5): 1600-1607.  
LING Yun, ZHAO Yanzhen, XIAO Lilong, et al. Online monitoring method for inter-turn short circuit fault of dry-type air-core reactor with high voltage and large capacity[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(5): 1600-1607.
- [7] 陈争光, 李岩军, 詹荣荣, 等. PT 断线后电抗器匝间保护新判据[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(24): 6398-6404.  
CHEN Zhengguang, LI Yanjun, ZHAN Rongrong, et al. New criterion on shunt reactor inter-turn protection when PT secondary circuit open[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(24): 6398-6404.
- [8] 聂洪岩, 魏新劳, 姚远航, 等. 热老化对干式空心电力电抗器匝间绝缘操作过电压耐受特性的影响[J]. 电工技术学报, 2020, 35(24): 5096-5104.  
NIE Hongyan, WEI Xinlao, YAO Yuanhang, et al. Effect of thermal aging on the characteristic to withstand switching overvoltage of interturn insulation of dry-type air core power reactor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(24): 5096-5104.
- [9] 李浩, 晏年平, 贾志东. 干式空心电抗器包封受潮对绝缘的影响研究[J]. 高压电器, 2020, 56(5): 55-61.  
LI Hao, YAN Nianping, JIA Zhidong. Influence of moisture in dry-type air-core reactor package on its insulation[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(5): 55-61.
- [10] 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.
- [11] 杨建立, 田程涛, 黄小华, 等. 一起干式空心并联电抗器故障原因分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2017, 38(6): 87-90.  
YANG Jianli, TIAN Chengtao, HUANG Xiaohua, et al. Failure analysis on dry-type air-core shunt reactor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(6): 87-90.
- [12] 李国栋, 俞华, 刘宏, 等. 干式空心电抗器匝间绝缘诊断[J]. 变压器, 2019, 56(12): 13-18.  
LI Guodong, YU Hua, LIU Hong, et al. Method for diagnosis of inter-turn insulation of dry-type air-core reactor[J]. Transformer, 2019, 56(12): 13-18.
- [13] 尹睿涵, 丁国成, 杨海涛, 等. 基于功率因数法的干式空心电抗器匝间短路故障检测研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(2): 80-85.  
YIN Ruihan, DING Guocheng, YANG Haitao, et al. Study on inter-turn short circuit fault detection of dry-type air-core reactor based on power factor method[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(2): 80-85.
- [14] 彭庆军, 姜雄伟, 司马文霞, 等. 35 kV 干式空芯并联电抗器匝间绝缘故障综合分析[J]. 高电压技术, 2018, 44(6): 2005-2011.  
PENG Qingjun, QIANG Xiongwei, SIMA Wenxia, et al. Comprehensive analysis of turn-insulating fault of 35 kV dry-type air-core reactors[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(6): 2005-2011.
- [15] 霍峰, 段长君, 周广东, 等. 基于无线热点测温法的干

- 式空心电抗器匝间绝缘状态带电诊断方法应用研究[J]. 高压电器, 2020, 56(2): 215-220.
- HUO Feng, DUAN Changjun, ZHOU Guangdong, et al. Study on the application of on-line diagnosis method for inter-turn insulation of dry-type air-core reactor based on wireless hot spot temperature measurement[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(2): 215-220.
- [16] 王和杰, 徐广鹏, 周徐达, 等. 干式空心并联电抗器匝间短路状态下损耗分析[J]. 电力与能源, 2018, 39(2): 160-161, 169.
- WANG Hejie, XU Guangying, ZHOU Xuda, et al. Loss analysis of dry-type air-core shunt reactor under turn-to-turn short circuit[J]. Power & Energy, 2018, 39(2): 160-161, 169.
- [17] 闫强, 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.
- [18] 周兴梅, 彭庆军, 马仪, 等. 干式空芯电抗器线圈径向厚度对自感几何系数及支路电流分布影响研究[J]. 高压电器, 2020, 56(3): 128-134.
- ZHOU Xingmei, PENG Qingjun, MA Yi, et al. Influence of coil radial thickness of dry-type air-core reactor on self-inductance geometric coefficient and branch current distribution[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(3): 128-134.
- [19] ZHOU Dazhou, XU Mingkai, DU Xiuming, et al. Study for spatial magnetic field distribution of inter-turn short-circuit fault degree in dry air-core reactors[C] // 2018 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), May 31-June 2, 2018, Wuhan, China: 1-10.
- [20] 毕大强, 王祥珩, 王维俭. 基于测量阻抗变化的并联电抗器小匝间短路保护[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(3): 57-60.
- BI Daqiang, WANG Xiangheng, WANG Weijian. Measured impedance based shunt reactor protection against small inter-turn fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(3): 57-60.
- [21] 黄新波, 周岩, 朱永灿, 等. 干式空心电抗器匝间短路故障在线监测技术[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(2): 150-160, 181.
- HUANG Xinbo, ZHOU Yan, ZHU Yongcan, et al. On-line monitoring technology of inter-turn short circuit fault of dry-type air-core reactor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(2): 150-160, 181.
- [22] DAI F, HAO B, MA H, et al. On-line monitoring and analysis of turn-to-turn short circuit fault of reactor[J]. Journal of Physics Conference Series, 2019, 1345(3).
- [23] BEN Tong, YANG Qingxin, YAN Rongge, et al. Research on stress characteristics of shunt reactor considering magnetization and magnetostrictive anisotropy[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54(3).
- [24] 魏新劳, 朱博, 聂洪岩, 等. 干式空心电抗器匝间绝缘故障位置与电气参数之间关系[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(4): 71-79.
- WEI Xinlao, ZHU Bo, NIE Hongyan, et al. Relationship between electrical parameters and turn-to-turn insulation fault position of dry-type air-core reactor[J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(4): 71-79.
- [25] 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.

收稿日期: 2020-10-27; 修回日期: 2020-12-20

作者简介:

咸日常(1965—), 男, 硕士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电气设备状态检测与故障分析; E-mail: xianrc@163.com

鲁尧(1996—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电气设备在线监测与故障诊断技术。E-mail: 493857497@qq.com

(编辑 魏小丽)