

引用格式:张立志,曹成军,张伟,等.基于场路耦合法的10 kV干式空心串联电抗器匝间绝缘故障电气特征量研究[J].电力科学与技术学报,2025,40(2):265-275.
Citation: ZHANG Lizhi, CAO Chengjun, ZHANG Wei, et al. Study on electrical features of inter-turn insulation fault of 10 kV dry-type air-core series reactor by field-circuit coupling method[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(2): 265-275.

基于场路耦合法的10 kV干式空心串联电抗器匝间绝缘故障电气特征量研究

张立志¹, 曹成军², 张伟¹, 陈开达¹, 雷诗婕¹

(1. 国网湖南超高压变电公司, 湖南长沙 410004; 2. 国网湖南郴州供电公司, 湖南, 郴州 423000)

摘要: 并联电容器成套装置中干式空心串联电抗器匝间短路故障频发, 严重威胁电力系统安全稳定运行, 研究干式空心串联电抗器匝间短路前后的特征量变化具有重要意义。先采用 ANSYS Maxwell 数值软件, 建立场路耦合模型, 并将解析法计算值与厂家试验值进行对比, 验证该模型准确性; 再在此基础上构建匝间短路模型, 对不同位置、不同阶段(匝间绝缘老化阶段、匝间短路阶段)的匝间绝缘故障电气量进行研究。研究表明, 在匝间绝缘老化阶段及匝间短路阶段, 各电气特征量的绝对值均随故障位置由端部向中部变化不断增大。其中, 损耗因数和功率因数的变化率最大, 故这两者可作为匝间短路故障在线监测的电气参量。

关键词: 干式空心串联电抗器; 场路耦合; 损耗因数; 匝间故障

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2025.02.028 中图分类号: TM47 文章编号: 1673-9140(2025)02-0265-11

Study on electrical features of inter-turn insulation fault of 10 kV dry-type air-core series reactor by field-circuit coupling method

ZHANG Lizhi¹, CAO Chengjun², ZHANG Wei¹, CHEN Kaida¹, LEI Shijie¹

(1. Hunan Extra High Voltage Substation Company, State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410004, China;

2. Chenzhou Power Supply Company, State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Chenzhou 423000, China)

Abstract: The frequent occurrence of inter-turn short circuit faults of dry-type air-core series reactors in shunt capacitor sets gravely imperils the secure and steady operation of the power system. It is extremely crucial to research the variations of characteristic quantities prior to and subsequent to inter-turn short circuits in dry-type air-core series reactors. In this paper, Maxwell is used to establish the field-circuit coupling model, and the model accuracy is verified by comparing the calculated value of the analytical method with the test value of the manufacturer. On this basis, the inter-turn short-circuit model is constructed, and the electrical quantities when inter-turn insulation faults occur at different locations in different phases (inter-turn insulation aging phase and inter-turn short-circuit phase) are investigated. The results show that the absolute value of each electrical characteristic quantity increases with the change of fault location from the end to the middle in the inter-turn insulation aging phase and the inter-turn short-circuit phase. In particular, the loss factor and power factor have the largest rates of change, which can be used as electrical parameters for on-line monitoring of inter-turn short-circuit faults.

Key words: dry-type air-core series reactor; field-circuit coupling; loss factor; inter-turn faults

收稿日期: 2023-11-22; 修回日期: 2024-05-10

基金项目: 国网湖南超高压变电公司科技项目(5216A321N018)

通信作者: 曹成军(1997—), 男, 硕士, 主要从事电力系统保护与控制等方面的研究; E-mail: 1150404179@qq.com

随着电力系统的发展,输电距离、电压等级、输电容量不断提升,电力系统对无功功率的需求越来越大。并联电容器组是中国目前应用的数量最多、最经济的无功补偿成套装置^[1]。但该装置在投入时会产生较大的合闸涌流,故往往会在装置中接入干式空心串联电抗器^[2-6]。随着电抗器广泛投入使用,其故障发生率逐步上升。大量数据显示,在干式空心串联电抗器所出现的各类故障里,匝间短路故障占据主导地位^[7-11]。电抗器发生匝间短路故障后,若不能及时检测出故障并采取措,极易导致电抗器烧毁,引发更严重的接地短路故障^[12-14]。因此,研究匝间短路故障前后的特征量变化,对及时检测电抗器匝间短路故障具有重要意义。

研究电抗器的匝间短路故障特征量,需要建立干式空心电抗器的计算模型。目前,这类计算模型主要可分为解析法和有限元法2类。解析法主要是基于纽曼公式和毕奥—萨伐尔定律计算电阻、电感矩阵,进而求得电流大小及磁场分布。文献[15]采用解析法计算了电抗器的自感、互感等参数,其算法精度较高,但该文献未讨论匝间短路情况下电阻电感矩阵的计算方法。文献[16-17]采用磁矢位法,得到了匝间短路情况下的电感计算解析表达式,但该方法计算量较大,且只考虑了单个短路线圈的情况。目前,解析法虽然可较精确地计算电抗器参数,但其计算较为烦琐且无法获得电抗器匝间短路电感矩阵^[18]。文献[19-20]建立了干式空心电抗器的有限元模型,分析了正常情况下电抗器磁场、电动力与电场的特点。文献[21]考虑串、并联电抗器接入电网方式不同,采用有限元法,得到了匝间短路情况下回路电流、电抗器电压与功率因数的变化规律。文献[22-23]基于Comsol建立了干式空心串联电抗器的场路耦合模型,并分析了短路电流与磁感应强度的特点。这些研究均表明,有限元法计算结果较精确,且能模拟各种情况下的匝间短路故障情况。基于此,本文利用有限元法,针对干式空心电抗器匝间短路故障的特征参量展开全面、深入的研究。

本文选取户外干式空心串联电抗器(型号:CKGKL-10-31.5 A-38.5 mH)作为仿真研究对象,先采用ANSYS Maxwell数值软件,构建场路耦合仿真模型,并将得到的仿真结果与解析法计算值进行对比,验证该模型的准确性;再在场路耦合模型中设置了单匝匝间短路故障早期、单匝匝间短路故障中期、单匝完全短路以及两匝完全短路、五匝完

全短路、十匝完全短路等多种故障,详细分析不同故障程度及故障位置下短路环电流、功率因数、等效电阻、等效电感、等效阻抗、损耗因数等多种特征量的变化规律。

1 解析法计算原理

干式空心串联电抗器一般由多个相互并联的同轴包封组合构建而成。在每个包封中内部,设有多层彼此并联的同轴线圈,这些同轴线圈通过单股或多股导线绕制而成,其匝间绝缘为聚酯薄膜和环氧树脂组成的复合绝缘体。干式空心电抗器结构如图1所示^[24-25]。

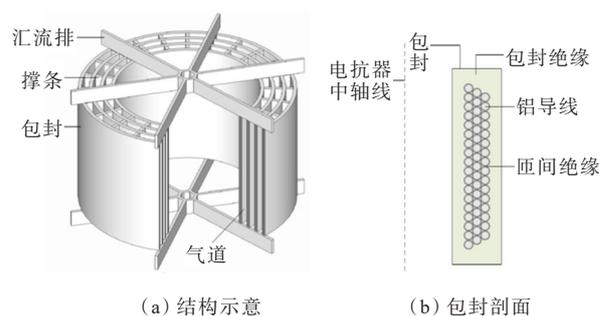


图1 干式空心电抗器结构

Figure 1 Structure of dry-type air-core reactor

1.1 等值电路分析

在正常工频工况下,可忽略层间分布电容与寄生电容参数,故可建立电感-电阻串联等效网络模型来表征该电抗器特性,其拓扑结构如图2所示。

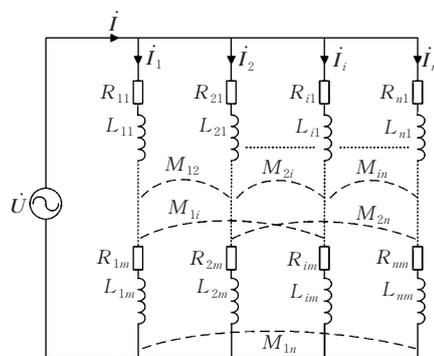


图2 正常情况等效电路模型

Figure 2 Equivalent circuit model for normal conditions

在图2中,施加在电抗器两端的电压为 \dot{U} ,流过电抗器的电流为 \dot{I} ,流过电抗器第 i 层线圈的电流为 \dot{I}_i , R_{nm} 、 L_{nm} 分别为第 n 层线圈的第 m 匝导线的电阻与自感, M_{in} 为第 n 层线圈与第 i 层线圈之间的互感。根据基尔霍夫定律,电抗器在正常情况下等效电路模型的电压电流矩阵方程为

$$\begin{bmatrix} R_1 + j\omega L_1 & j\omega M_{12} & \cdots & j\omega M_{1i} & \cdots & j\omega M_{1n} \\ j\omega M_{21} & R_2 + j\omega L_2 & \cdots & j\omega M_{2i} & \cdots & j\omega M_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ j\omega M_{i1} & j\omega M_{i2} & \cdots & R_i + j\omega L_i & \cdots & j\omega M_{in} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ j\omega M_{n1} & j\omega M_{n2} & \cdots & j\omega M_{ni} & \cdots & R_n + j\omega L_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \vdots \\ \dot{I}_i \\ \vdots \\ \dot{I}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U} \\ \dot{U} \\ \vdots \\ \dot{U} \\ \vdots \\ \dot{U} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, R_i 为第 i 层线圈的总电阻; L_i 第 i 层线圈的总自感, $i=1, 2, \dots, n$; ω 为角频率。

当电抗器包封内的线圈绝缘被破坏时, 就会发生匝间短路故障。匝间短路故障时电抗器内部的等效电路模型如图 3 所示。在图 3 中, 将故障发生时产生的“短路环”标记为“D”, 其两端电压均为 0 V,

R_D 为该短路环的等效电阻, L_D 为该短路环的等效电感, 而 M_{iD} 为是该短路环与第 i 层线圈之间的互感。由于磁链交互, 该短路环会与其他正常线圈发生互感, 不会耦合产生感应电流^[26-27]。

根据图 3, 可得到电抗器在匝间短路情况时的电压电流矩阵方程, 即

$$\begin{bmatrix} R'_1 + j\omega L'_1 & j\omega M'_{12} & \cdots & j\omega M'_{1i} & \cdots & j\omega M'_{1n} & j\omega M_{1D} \\ j\omega M'_{21} & R'_2 + j\omega L'_2 & \cdots & j\omega M'_{2i} & \cdots & j\omega M'_{2n} & j\omega M_{2D} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ j\omega M'_{i1} & j\omega M'_{i2} & \cdots & R'_i + j\omega L'_i & \cdots & j\omega M'_{in} & j\omega M_{iD} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ j\omega M'_{n1} & j\omega M'_{n2} & \cdots & j\omega M'_{ni} & \cdots & R'_n + j\omega L'_n & j\omega M_{nD} \\ j\omega M_{D1} & j\omega M_{D2} & \cdots & j\omega M_{Di} & \cdots & j\omega M_{Dn} & R_D + j\omega L_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \vdots \\ \dot{I}_i \\ \vdots \\ \dot{I}_n \\ \dot{I}_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U} \\ \dot{U} \\ \vdots \\ \dot{U} \\ \vdots \\ \dot{U} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, 由于发生匝间故障后, 各层线圈的总电阻和总电感会发生变化, R'_i 为故障后第 i 层线圈的总电阻; L'_i 为故障后第 i 层线圈的总自感; M'_{in} 为第 n 层线圈与第 i 层线圈之间变化后的互感, $i=1, 2, \dots, n$ 。

相较于电抗器的正常运行状态, 当电抗器发生匝间短路时, 式(2)中新增了关于短路环的电压-电流关系的方程。所有与发生匝间短路故障这一线圈相关的互感均会发生变化; 同时, 故障线圈本身的自感也将与原来的不同。

$2, \dots, n$ 。各层线圈之间的互感均由电抗器的自身结构决定。根据电抗器的结构特点, 可将电抗器任意两层线圈间的互感计算等效为同轴无限薄的有限长的紧密绕制的螺线管间的互感计算。其计算模型如图 4^[28-29] 所示。

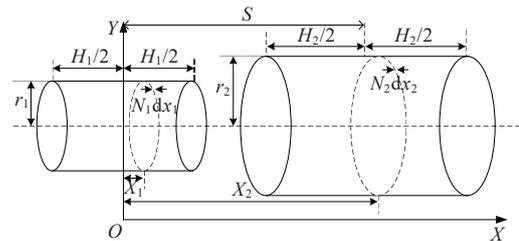


图 4 同轴螺线管及其坐标模型

Figure 4 Coaxial solenoid and its coordinate modeling

在图 4 中, N_1, N_2 为两螺线管单位高度的匝数, H_1, H_2 分别为小、大螺线管的高度, r_1, r_2 分别为小、大螺线管的半径, S 为两螺线管的中心距, X_1 和 X_2 分别为小、大螺线管至 Y 轴的水平距离, dx_1 和 dx_2 分别为位于小、大螺线管的单匝圆环。两层同轴螺线管之间的互感 M 的计算公式为

$$M = \int_{-S+\frac{H_2}{2}}^{S+\frac{H_2}{2}} \int_{-\frac{H_1}{2}}^{\frac{H_1}{2}} \int_0^\pi \frac{\mu_0 N_1 N_2 r_1 r_2 d\theta dx_1 dx_2}{\sqrt{r_1^2 + r_2^2 + (x_1 - x_2)^2 - 2r_1 r_2 \cos \theta}} \quad (3)$$

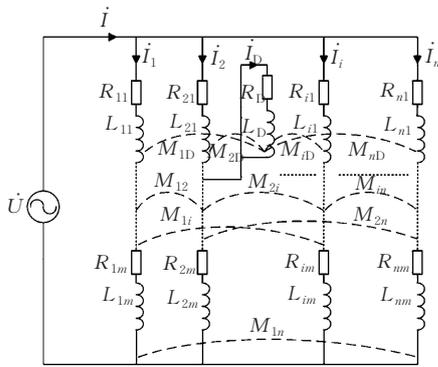


图 3 匝间短路情况等效电路模型

Figure 3 Equivalent circuit model for inter-turn short circuits

1.2 电阻、电感计算分析

电抗器各层线圈的总电阻 R_i 、总自感 $L_i, i=1,$

式中, μ_0 为真空磁导率; θ 是水平转角。

其自感计算亦可视为 2 个高度一致、半径一致、匝数相同的同轴无限薄螺线管之间的互感计算, 即 $H_1=H_2, r_1=r_2, N_1=N_2, S=0$, 其计算式亦与式 (3) 相同。

电抗器第 i 层线圈的直流电阻 R_i 应考虑温度的影响, 其计算式为^[30]

$$R_i = \frac{4\rho_0 N_i L_i}{d_i^2} (1 + \alpha T), i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

式中, ρ_0 为零摄氏度时线圈导线的电阻率; N_i, L_i 分别为第 i 层线圈的匝数和平均直径; d_i 为绕制第 i 层线圈的导线直径; α 为线圈导线材料的温度系数; T 为线圈实时温度。

计算出各层线圈等效电阻、等效自感及互感后, 根据式 (1) 可计算出电抗器正常运行情况下, 各层线圈流过的电流, 进而计算出总电流, 再根据欧姆定律可计算出电抗器总等效阻抗。

假设总电流为 \dot{I}_L , 电抗器的等效电阻为 R_L , 等效电抗为 X_L , 等效阻抗为 Z_L , 功率因数为 $\cos \varphi$, 损耗因数为 $\tan \delta$, 则总电流可表示为

$$\dot{I}_L = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dots + \dot{I}_n \quad (5)$$

等效阻抗 Z_L 为

$$Z_L = \frac{\dot{U}}{\dot{I}_L} = R_L + X_L \quad (6)$$

功率因数为

$$\cos \varphi = \cos \left(\frac{\dot{U}}{\dot{I}_L} \right) = \frac{R_L}{\sqrt{R_L^2 + X_L^2}} \quad (7)$$

损耗因数为

$$\tan \delta = \frac{R_L}{X_L} \quad (8)$$

然而, 在匝间短路情况下, 解析法需要预设各种条件, 且其计算量大, 难以计算出电感矩阵, 无法求得匝间短路情况下各故障特征量。因此, 建立了干式空心串联电抗器场路耦合模型, 利用解析法验证该模型准确性, 通过场路耦合法研究电抗器匝间短路故障特征量。

2 场路耦合模型建立

2.1 基本参数

该电抗器的设计示意如图 5 所示。其型号为 CKGKL-10-31.5 A-38.5 mH, 额定电压为 10 kV, 额定电流为 31.5 A, 设计电感值为 38.5 mH, 其具有 3 个包封, 包封内径为 750 mm, 外径为 900 mm。其

中, 第 1、2、3 包封各有 2 层线圈, 每层线圈均为单股绕制。各包封详细参数分别见表 1。

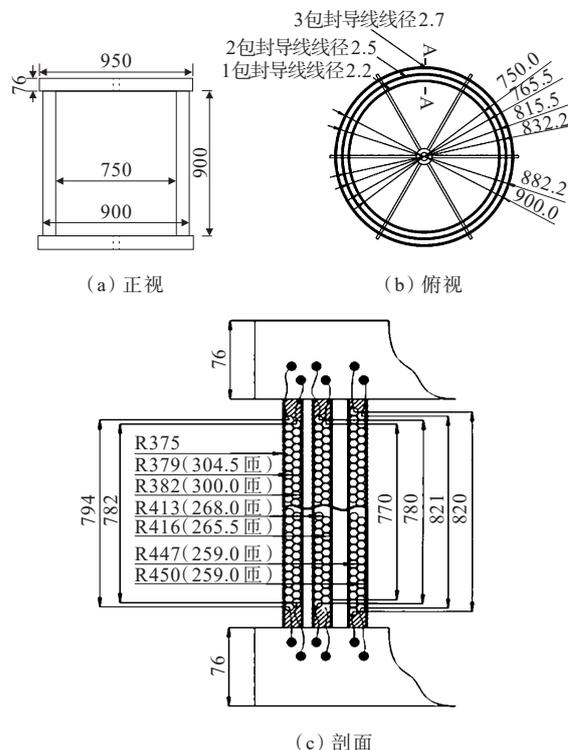


图 5 电抗器设计示意(单位:mm)

Figure 5 Schematic diagram of reactor design (unit:mm)

表 1 各包封详细参数

Table 1 Detailed parameters of each package seal					
包封	序号	半径/mm	高度/mm	匝数	裸线直径/mm
1	1	377.90	796.20	304.5	2.2
	2	380.90	784.20	300.0	2.2
2	3	411.75	782.50	268.0	2.5
	4	414.75	772.50	265.5	2.5
3	5	445.65	822.70	259.0	2.7
	6	448.65	823.70	259.0	2.7

2.2 模型建立

本文借助 ANSYS Maxwell 数值软件, 建立涵盖有限元模型与电路模型 2 个部分场路耦合模型。鉴于干式空心电抗器在几何形态上呈现出轴对称的结构特征, 故而依据电抗器的实际参数构建二维有限元模型。为提升模型精度, 该模型考虑了空气介质以及包封绝缘的因素, 并且将各层线圈的导线截面设置为圆形。为加快计算速度, 忽略其星形架和撑条部分。

该有限元模型如图 6 所示。该计算场类型设置为涡流磁场, 求解区域设置为气球边界 (Balloon), 通过 Assign /Coil、Add Winding 以及 Add Coil 选项

完成线圈端口、匝数等设定。

在 ANSYS Maxwell Circuit Editor 环境中,构建该电路模型,将各层线圈设置为并联连接状态,并为其接入独立电压源,具体电路模型如图 7 所示。在图 7 中,该电抗器包封从内往外分别对应第 1、2、3 包封。其中,第 1、2 层线圈属于电抗器第 1 包封,第 3、4 层线圈属于电抗器第 2 包封,第 5、6 层线圈属于电抗器第 3 包封。LWinding1~LWinding6 分别对应电抗器第 1~6 层线圈。

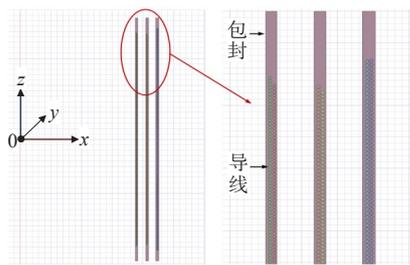


图 6 有限元模型

Figure 6 Finite element model

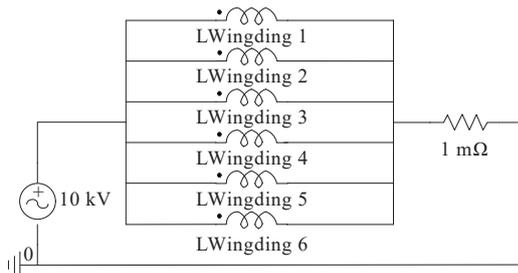


图 7 电路模型

Figure 7 Circuit model

3 模型准确性校验

3.1 电感、电阻计算值的对比验证

运用有限元法与解析法,分别对电抗器各层线圈的自感和电阻展开计算,随后将所得结果与厂家的实测数值进行对比分析,具体比较结果分别如图 8、9 所示。

从图 8、9 中可以看出,有限元法与解析法计算值相对误差较低,其相对误差在 2% 以内,可满足工程需求。这说明该场路耦合模型准确度较高。

本文所采用的户外干式空心串联电抗器,厂家实测阻抗为 12.1 Ω,总电感为 38.5 mH。而该场路耦合模型得到在正常时的阻抗值为 12.3 Ω,总电感为 39.1 mH,阻抗与总电感的相对误差分别为 1.65%、1.56%,这进一步证实了该模型的正确性与有效性。

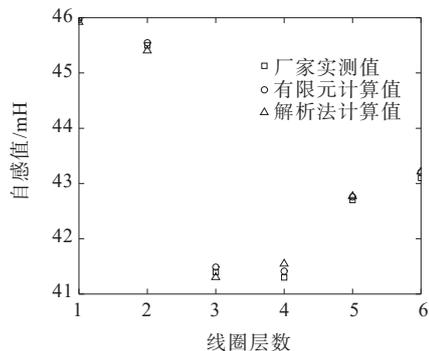


图 8 各层线圈电感值对比

Figure 8 Comparison of coil inductance values for each layer

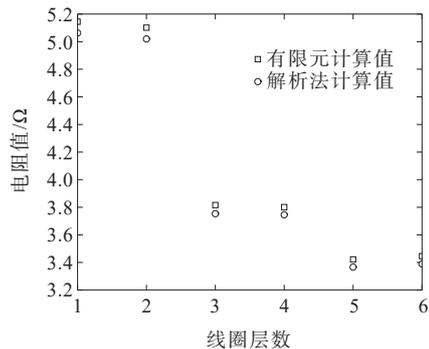


图 9 各层线圈电阻值对比

Figure 9 Comparison of coil resistance values for each layer

3.2 层电流计算值的对比验证

根据前文提及的解析法,可以计算出电抗器正常运行情况下的电阻电感矩阵,在电压 \dot{U} 给定的情况下,可计算出层电流值。通过场路耦合模型仿真得到各层线圈的层电流,将其与解析法计算所得各层线圈的层电流进行对比。其计算结果见表 2,将正常时的层电流进行对比,其结果如图 10 所示。

表 2 正常情况层电流对比

Table 2 Comparison of layer currents under normal conditions

层号	有限元法/A	解析法/A
1	3.909	3.907
2	3.932	3.932
3	5.207	5.207
4	5.230	5.231
5	5.980	5.981
6	5.949	5.949

由图 10 及表 2 可知,有限元法及解析法计算所得各线圈层电流之间非常接近。这进一步验证了该模型的准确性。

解析法只能计算出干式空心电抗器正常运行时的电感参数,难以计算出匝间短路情况下电抗器

的电感参数。因此,本文基于建立的场路耦合模型模拟电抗器的匝间短路故障,准确模拟短路环并计算电抗器的电感参数,分析匝间短路故障前后各特征量的变化特点。

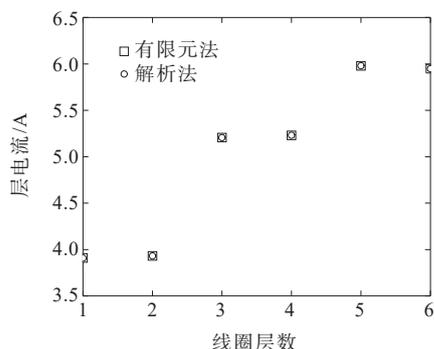


图 10 正常时层电流对比

Figure 10 Comparison of layer currents at normal time

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

66 kV 及以下并联电容器组成套装置通常采用星型中性点不接地方式。因此,本文基于并联电容器组实际运行工况与主接线,在已建立的场路耦合模型的基础上作进一步改进。

图 11 为改进后的场路耦合模型。在图 11 中,A 相为拟设置故障相,B、C 相为正常相。正常相中干式空心串联电抗器的电阻、电感参数设置为正常运行情况的等值电阻与等值电感,均已通过前文计算得到。其电容值为 $9.268 \mu\text{F}$,母线电压为 10 kV。

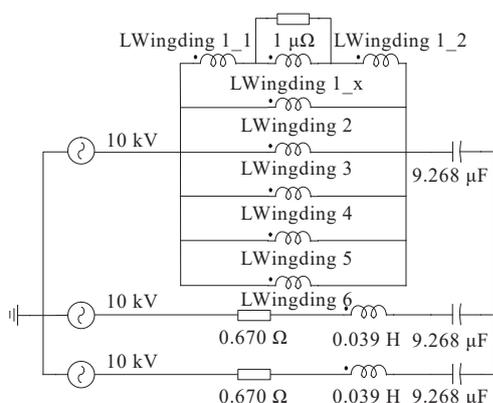


图 11 改进后的场路耦合模型

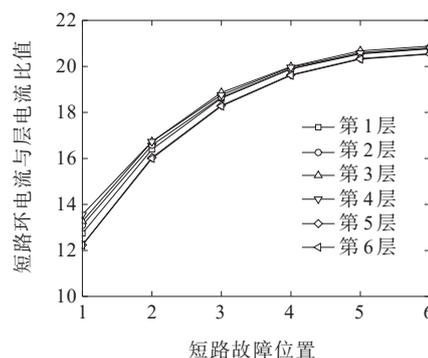
Figure 11 Improved field-circuit coupling model

把电抗器的各层线圈依照从下往上的次序,将其总高度均分为 10 等份,鉴于电抗器的有限元模型在结构方面的对称性,设电抗器线圈的高度为 H 。分别在电抗器的端部、 $H/10$ 、 $2H/10$ 、 $3H/10$ 、 $4H/10$ 、 $5H/10$ 这 6 个位置设定匝间短路故障点,并按顺序

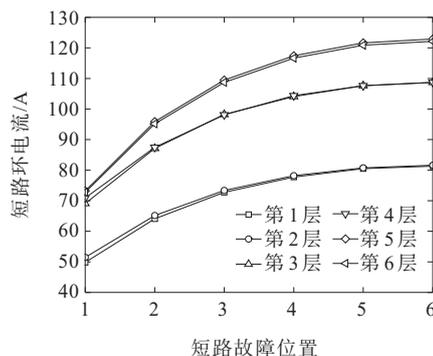
将这些故障点依次标记为 1、2、3、4、5、6。同时,为研究电抗器在匝间短路故障过程中各电气特征量的变化规律,将电抗器的匝间短路故障发展过程划分为 2 个阶段:第 1 个阶段是匝间绝缘老化阶段,以不同过渡电阻表征单匝匝间短路故障早期(过渡电阻为 $100 \text{ m}\Omega$)与单匝匝间短路故障中期(过渡电阻为 $10 \text{ m}\Omega$)的故障场景;第 2 个阶段是匝间短路阶段,以单匝完全短路与两匝、五匝、十匝完全短路等多匝完全短路情形表征故障场景,并通过场路耦合模型来模拟。

4.2 短路环电流仿真分析

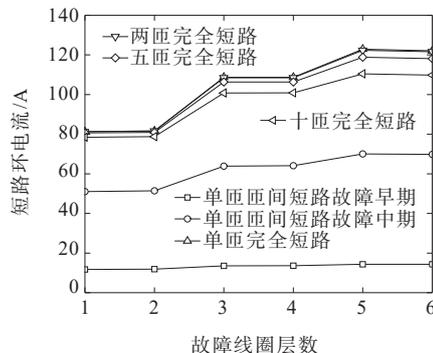
为研究短路环电流的变化规律,设置不同的匝间短路故障点进行仿真,结果如图 12 所示。



(a) 单匝完全短路时短路环电流与层电流对比



(b) 单匝完全短路时各层线圈短路环电流对比



(c) 线圈中部不同程度故障时短路环电流对比

图 12 短路环电流对比

Figure 12 Comparison of short-circuit loop currents

从图 12(a)、12(b)中可以看出,在轴向方向上,对同一层线圈所出现的故障而言,若故障位置越是靠近电抗器端部,则短路环电流越小;反之,若故障位置越是靠近电抗器的中部位置,则短路环电流越大。在径向方向上,若短路位置越靠近内层包封,则短路环电流就越小;反之,所短路位置越靠近外层包封,则短路环电流越大。对同一层包封中相邻的线圈来说,短路环电流的变化趋势大体一致。出现该现象的原因在于,电抗器每一层线圈的匝数由内到外在逐渐减少。线圈匝数越少,平均分布在每一匝导线上的电压越大。且互感的存在使得线圈中部的互感电压高于端部的互感电压,从而使得当最外层包封中部发生匝间短路故障时,短路环电流达到最大,该电流值为层电流值的 20.55 倍。这将使得周围导线绝缘老化加剧,故障迅速发展为更严重的多匝匝间短路故障。

从图 12(c)中可以看出,在匝间绝缘老化阶段,随着绝缘老化加剧,短路环电流不断增大。以第 1 层线圈为例,单匝匝间短路故障早期时的短路环电流仅为 11.73 A;发生单匝完全短路故障时,短路环电流迅速增大至 81.32 A;在匝间短路阶段,随着短路匝数的增多,短路环电流不再增大,呈略微下降的趋势。当第 1 层线圈中部发生十匝完全短路时,短路环电流值为 78.43 A,其与单匝完全短路电流值仅相差 2.89 A。

这是因为在匝间绝缘老化阶段,短路匝数不变,施加在短路环两端的电压受互感影响较小,随着绝缘老化加剧,过渡电阻不断降低,短路环电流急剧增大;而在匝间短路阶段,过渡电阻不变,短路匝数增多,短路环电压、短路环的等效阻抗也同步增加,故短路环电流变化很小。

4.3 故障位置对特征量的影响分析

以电抗器各电气特征量的正常运行值作为参照,计算当电抗器在不同位置发生单匝完全短路时的各电气特征量变化率。其中,并联电容器组故障相电流、电抗器等效阻抗、功率因数等电气量的变化情况如图 13 所示。从图 13 中可以看出,当电抗器在不同位置出现匝间短路的情况时,不同电气量变化率差异较大。

在轴向上,故障位置由端部向中部变化时,故障相电流、等效阻抗、等效电感呈现出逐渐减少的趋势,且故障位置越接近电抗器端部,这些特征量的降幅越小;反之,故障位置越接近电抗器中部,这些特征量的降幅越大。等效电阻、功率因数、损耗因数随故障位置由端部向中部变化时,呈现出增大的趋势,且故障位置越接近电抗器端部,其增幅越小;故障位置越接近电抗器中部,其增幅越大。在故障位置由端部向中部移动过程中,这些特征量变化率的绝对值均不断增大。

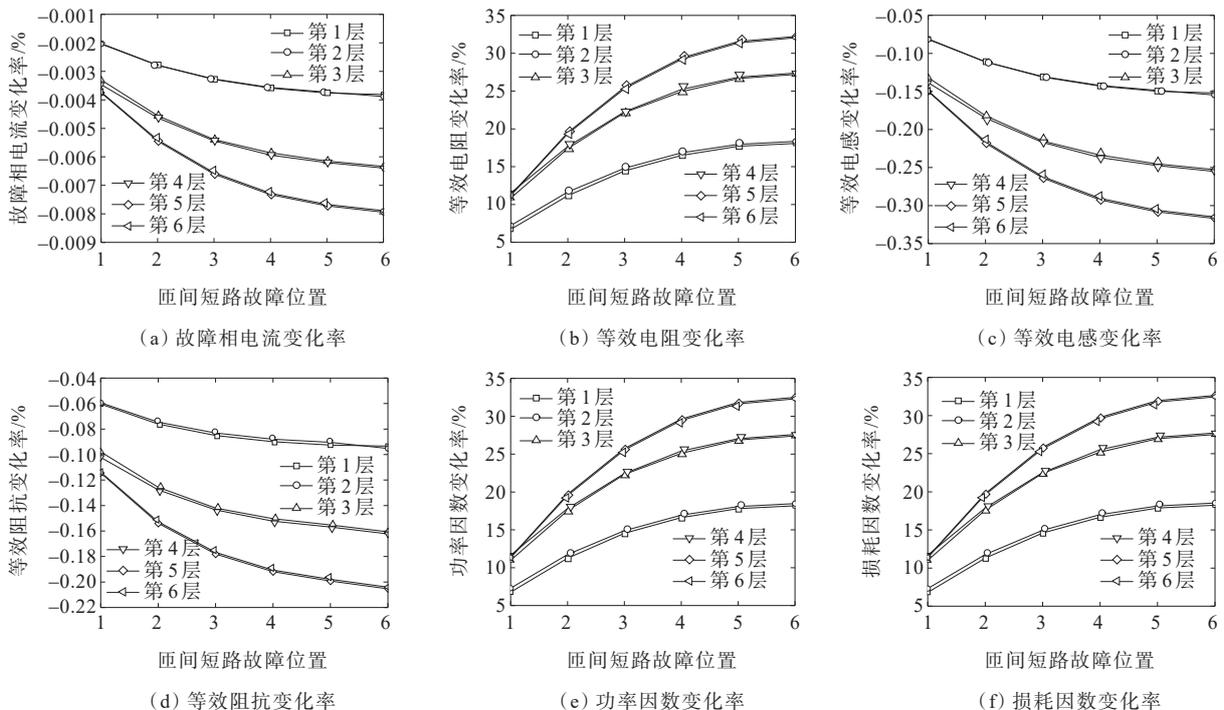


图 13 不同故障位置各特征量变化率

Figure 13 Rate of change of each characteristic quantity at different fault locations

在径向上,故障位置越靠近电抗器内层包封,故障相电流、等效阻抗、等效电感降幅越小;故障位置越靠近电抗器外层包封,故障相电流、等效阻抗、等效电感降幅越大。而等效电阻、功率因数、损耗因数的变化规律则刚好相反:故障位置越靠近电抗器内层包封,其增幅越小;故障位置越靠近外层包封,其增幅越大。在故障位置由内层包封向外层包封移动的过程中,这些特征量变化率的绝对值均在不断增大。

当发生单匝完全短路时,故障相电流变化率的范围为 $[-0.002\%, -0.008\%]$,等效阻抗变化率范围为 $[-0.059\%, -0.205\%]$,等效电感变化率范围为 $[-0.081\%, -0.307\%]$ 。等效电阻的变化率最低为 6.707% ,最高可达 32.224% 。功率因数变化率最低为 6.772% ,最高可达 32.496% 。损耗因数变化率最低为 6.794% ,最高可达 32.644% 。这些变化的原因,主要有以下4个方面:

1) 当电抗器发生匝间短路时,短路环的去磁效应使得电抗器等效电感降低;短路位置由端部向中部、由内层线圈向外层线圈移动的过程中,短路环电流不断增大,去磁效应逐步增强,电抗器电感整体呈不断降低的趋势。

2) 短路环会产生层电流数倍乃至几十倍的短

路电流,大量消耗有功功率。短路环电流越大,消耗有功功率越大。根据 $P=UI\cos\varphi$,在电抗器产生匝间短路故障的情况下,施加至电抗器两端的电压连同流经电抗器的电流,它们所发生的变化均极为微小。因此,功率因数变化趋势与短路环电流变化趋势基本一致。

3) 由于有功功率 $P=I^2R$,电抗器匝间短路故障发生后,有功功率增大,而故障相电流变化几乎可以忽略不计,故等效电阻增大,其变化趋势与有功功率变化趋势基本一致,也与短路电流变化趋势基本一致。

4) 损耗因数可写为 $\tan\delta=R/\omega L$ 。随着等效电阻增大,等效电感降低,故损耗因数也增大。

4.4 故障程度对特征量的影响分析

综上所述,当各层线圈发生匝间短路故障时,各特征量具有相似的变化规律。本文以第1层线圈(最内层包封的最内层线圈)发生匝间短路故障为例,进行模拟仿真,仿真得到不同故障程度的各特征量变化率情况如图14所示。

从图14中可以看出,电抗器的匝间绝缘老化阶段与匝间短路阶段具有相似的变化趋势:

1) 在匝间绝缘老化阶段与匝间短路阶段,故障相电流、等效电感、等效阻抗呈现出减少的趋势,等

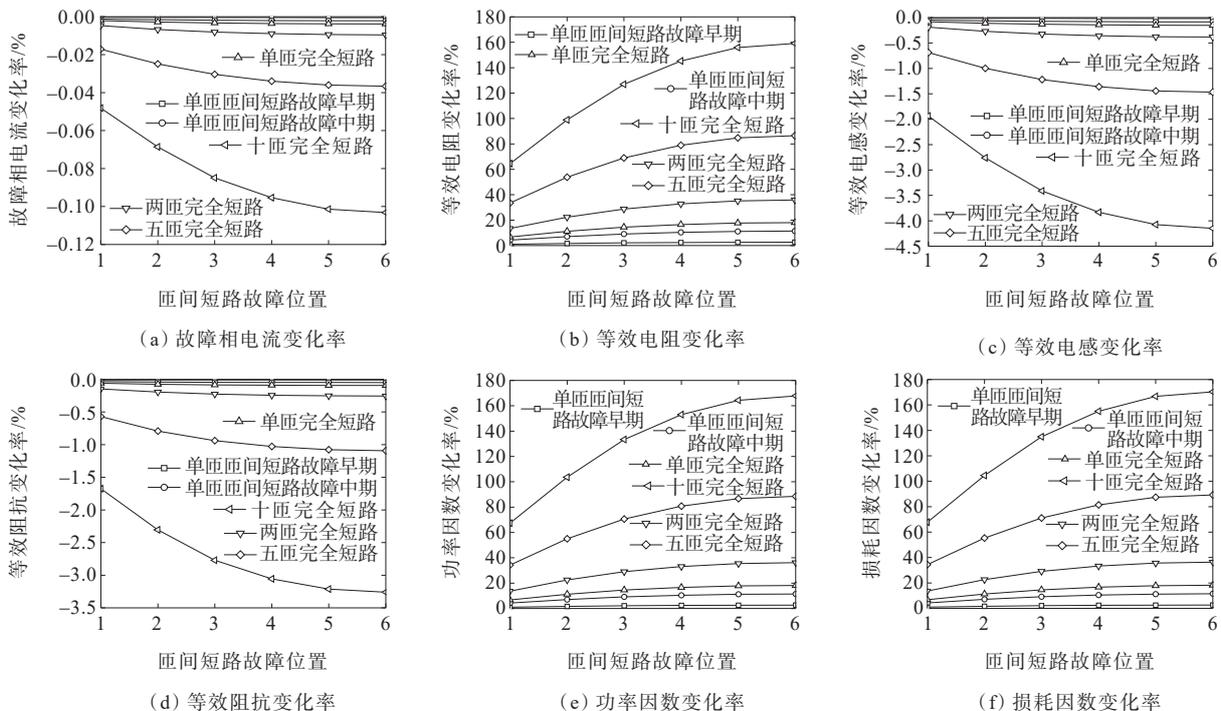


图14 不同故障程度的各特征量变化率

Figure 14 Rate of change of each characteristic quantity at different fault levels

效电阻、功率因数、损耗因数呈现出增加的趋势。短路位置由端部向中部变化的过程中,故障相电流、等效电感、等效阻抗3种特征量降幅不断增加,等效电阻、功率因数、损耗因数3种特征量增幅不断上升,且故障位置越靠近电抗器中部,变化速度越平缓;故障越靠近电抗器端部,其变化速度越快。

2) 在匝间绝缘老化阶段,随着绝缘老化加剧,即过渡电阻不断降低,故障相电流、等效电感、等效阻抗3种特征量降幅增加,等效电阻、功率因数、损耗因数3种特征量增幅上升;在匝间短路阶段,随着短路匝数的增加,故障相电流、等效电感、等效阻抗3种特征量不断减少,等效电阻、功率因数、损耗因数3种特征量不断增大。

随着故障程度的加剧,这些特征量变化率的绝对值均表现出不断增大的趋势。在匝间绝缘老化阶段,故障相电流的变化率范围为 $[-0.001\%, -0.002\%]$,等效阻抗的变化率范围为 $[-0.010\%, -0.076\%]$,等效电感的变化率范围为 $[-0.018\%, -0.081\%]$ 。匝间绝缘不断老化至单匝完全短路,故障相电流、等效电感、等效阻抗变化率不足0.100%。功率因数变化率范围为 $[2.632\%, 6.772\%]$,损耗因数变化率范围为 $[2.640\%, 6.794\%]$,等效电阻的变化率范围为 $[2.621\%, 6.707\%]$ 。究其原因,主要有以下2方面:一是在匝间绝缘老化阶段,短路匝数不变,过渡电阻随绝缘老化加剧而不断降低,短路环电流不断增大,去磁效应增强,故在绝缘老化过程中,电抗器整体呈现出电感降低的趋势。电抗器等效电阻变化与短路环电流变化趋势一致,故等效电阻增大,功率因数、损耗因数增大;二是在匝间短路阶段,短路环电流呈现略微减少的趋势,但短路匝数的增加使得短路环去磁效应增强,导致电抗器的等效电感降低。被短路线圈的匝数增加,短路回路的总电阻增大,使得有功消耗增加,故电抗器等效电阻增大,功率因数、损耗因数也呈现出增大的趋势。

5 结语

本文基于实际电抗器参数构建了干式空心串联电抗器匝间短路的场路耦合模型,并针对匝间短路故障期间电气参数的变化情况开展研究,得出以下结论:

1) 短路位置会产生非常大的短路电流,该电流大小随故障位置由端部向中部、由内层向外层包封

变化时不断增大。

2) 故障相电流、等效电感、等效阻抗减少,功率因数、损耗因数、等效电阻增大。

3) 当故障位置由端部向中部、由内层向外层包封变化时或故障程度增加时,功率因数、损耗因数、等效电阻、故障相电流、等效电感、等效阻抗变化率的绝对值均在增加。

4) 在不同故障位置及不同故障程度下,损耗因数和功率因数的变化率较大,其次是等效电阻,可作为电抗器匝间短路故障检测的参考特征量。

参考文献:

- [1] 刘斌,岳永刚,张庆如,等.基于串联非线性电阻组合开关的补偿电容器组投切重燃过电压研究[J].高压电器,2024,60(8):183-192.
LIU Bin, YUE Yonggang, ZHANG Qingru, et al. Research on switching reignition over-voltage of compensation capacitor bank based on series nonlinear resistor combination switch[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(8):183-192.
- [2] 刘贺千,张健,张海月,等.基于高频阻抗谱的干式空心电抗器匝间短路故障诊断方法[J].中国电力,2024,57(10):218-224.
LIU Heqian, ZHANG Jian, ZHANG Haiyue, et al. A fault diagnosis method for interturn short circuit of dry-type air-core reactor based on high frequency impedance spectrum[J]. Electric Power, 2024, 57(10):218-224.
- [3] 王梓,刘溟,邹建明,等.基于TVOC检测的干式空心电抗器过热故障诊断方法[J].高电压技术,2017,43(11):3756-3762.
WANG Zi, LIU Ming, ZOU Jianming, et al. Diagnostic method of dry-type air-core reactors overheating fault based on monitoring TVOC[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(11):3756-3762.
- [4] 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.
- [5] 周力行,李毅,龚杰,等.基于PD信号提取的干式空心电抗器早期故障研究[J].电力科学与技术学报,2008,23(2):41-45+50.
ZHOU Lixing, LI Yi, GONG Jie, et al. Research on forepart faults of dry-type air-core reactors based on the extraction of PD signals[J]. Journal of Electric Power

- Science and Technology,2008,23(2):41-45+50.
- [6] 聂洪岩,徐万里,徐雅清,等.干式空心电抗器匝间绝缘试验电压的产生方法研究[J].电力科学与技术学报,2016,31(2):45-50.
NIE Hongyan, XU Wanli, XU Yaqing, et al. Turn-to-turn over-voltage generation method for dry-type air-core reactors[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2016,31(2):45-50.
- [7] 郭绍伟,牛铮,李昊扬,等.干式空心电抗器匝间过电压的诊断判据[J].高电压技术,2018,44(3):804-811.
GUO Shaowei, NIU Zheng, LI Haoyang, et al. Diagnostic criterion of turn-to-turn overvoltage test in dry-type air-core reactor[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(3): 804-811.
- [8] 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):150-155+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):150-155+181.
- [9] 郭哲,郭志广,贾跟卯,等.空心并联电抗器匝间故障三阶段特性分析及综合保护方法[J].电力系统自动化,2020,44(8):149-156.
GUO Zhe, GUO Zhiguang, JIA Genmao, et al. Three-stage characteristic analysis on inter-turn fault and comprehensive protection method for air-core shunt reactor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(8):149-156.
- [10] 陈炜,吴晓文,袁发庭,等.基于电磁-热-力多物理场仿真的铁心电抗器结构参数分层优化方法研究[J].智慧电力,2024,52(4):116-124.
CHEN Wei, WU Xiaowen, YUAN Fating, et al. Structural parameters hierarchical optimization of iron core reactors based on electromagnetic-thermal-force multi-physics simulation[J]. Smart Power,2024,52(4):116-124.
- [11] 祝令瑜,杜一鸣,高璐,等.不同频率激励下干式空心电抗器匝间绝缘缺陷振动分布特性[J].高电压技术,2022,48(8):3201-3209.
ZHU Lingyu, DU Yiming, GAO Lu, et al. Vibration distribution characteristics of dry-type air-core reactor with turn-to-turn insulation defects excited by different frequencies[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3201-3209.
- [12] 游帅,陈仁刚,王潇洋.35 kV干式空心电抗器烧毁故障原因分析及保护配置探讨[J].山东电力技术,2022,49(9):55-60.
YOU Shuai, CHEN Rengang, WANG Xiaoyang. Burnout fault analysis and discussion on protection configuration for a 35 kV dry-type reactor[J]. Shandong Electric Power, 2022,49(9):55-60.
- [13] 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 field distribution and switching impulse discharge characteristics of ± 1100 kV dry-type smoothing reactor[J]. Power System Technology,2017,41(11):3414-3419.
- [14] 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.
- [15] 张良县.特高压干式平波电抗器谐波损耗机理的研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2010.
ZHANG Liangxian. Research on mechanism of ultrahigh voltage dry-type smoothing reactor under harmonic magnetic fields[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology,2010.
- [16] 陈炯,付唐强,魏泽民,等.匝间短路状态下干式空心电抗器电感量的分析[J].高压电器,2019,55(2):195-200+207.
CHEN Jiong, FU Tangqiang, WEI Zemin, et al. Analysis on inductance of dry-type air-core reactor under inter-turn short circuit[J]. High Voltage Apparatus,2019,55(2):195-200+207.
- [17] 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+162.
JIA Genmao, ZHAO Qicheng, LUO Fuquan, et al. Monitoring and protection on inter-turn short circuit fault for reactor of high Pass3rd-order AC filter in DC convert station[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(1): 136-143+162.
- [18] 吴书煜,马宏忠,魏旭,等.高压电抗器匝间短路三维模型计算与分析[J].电力自动化设备,2019,39(4):148-154.
WU Shuyu, MA Hongzhong, WEI Xu, et al. Calculation and analysis of three-dimensional model for turn-to-turn short circuit of high voltage reactor[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(4):148-154.
- [19] 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.
- [20] 周秀,白金,李宁,等.高次谐波下干式空心平滑电抗器绕组的电位分布规律研究[J].电力科学与技术学报,2024,39(6):269-276.
ZHOU Xiu,BAI Jin,LI Ning,et al.Potential distribution law of dry-type air-core smoothing reactor winding under high-order harmonics[J].Journal of Electric Power Science and Technology,2024,39(6):269-276.
- [21] 朱保军,刘兴华,谢同平,等.串联电抗器绕组匝间短路故障的电气特征研究[J].变压器,2021,58(8):30-32.
ZHU Baojun,LIU Xinghua,XIE Tongping,et al.Analysis of electrical characteristics of series reactor winding inter-turn short-circuit fault[J].Transformer,2021,58(8):30-32.
- [22] 鲁尧,戚日常,王立权,等.干式空心串联电抗器绕组匝间短路电磁特性研究[J].高压电器,2021,57(11):116-123.
LU Yao,XIAN Richang,WANG Liquan,et al.Study on electromagnetic characteristics of winding inter-turn short circuit of dry-type air-core series reactor[J].High Voltage Apparatus,2021,57(11):116-123.
- [23] 霍竞冲,孟润泉,李胜文,等.低压直流配电系统极间短路故障分析与保护[J].电网与清洁能源,2023,39(5):1-10+19.
HUO Jingchong,MENG Runquan,LI Shengwen,et al.Analysis and protection for pole-to-pole short-circuit faults of the LVDC distribution system[J].Power System and Clean Energy,2023,39(5):1-10+19.
- [24] 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.
- [25] 汪先进,周凯,赵世林,等.不同材料对变电站内三相空心电抗器磁场干扰的屏蔽效果研究[J].电力科学与技术学报,2021,36(4):150-156.
WANG Xianjin,ZHOU Kai,ZHAO Shilin,et al.Research for magnetic shielding effect of 3-phase air core reactor in substation by using different materials[J].Journal of Electric Power Science and Technology,2021,36(4):150-156.
- [26] 戚日常,鲁尧,陈蕾,等.干式空心串联电抗器匝间短路故障特征研究[J].电力系统保护与控制,2021,49(18):10-16.
XIAN Richang,LU Yao,CHEN Lei,et al.Fault characteristics of an inter-turn short circuit of a dry-type air core series reactor[J].Power System Protection and Control,2021,49(18):10-16.
- [27] 李浩,解超,周伟绩,等.采用分相重合方式的风电送出线路自适应重合闸策略[J].电力建设,2023,44(5):94-107.
LI Hao,XIE Chao,ZHOU Weiji,et al.Adaptive reclosing scheme for wind power outgoing line using partial-phase reclosing[J].Electric Power Construction,2023,44(5):94-107.
- [28] 杨国华,王文豪,陈蕾,等.平滑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+83.
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+83.
- [29] 苟炬齐,刘轩东,杨昊,等.匝间绝缘故障对干式空心电抗器电感参数影响的仿真研究[J].高压电器,2015,51(10):117-121+127.
GOU Xuanqi,LIU Xuandong,YANG Hao,et al.Simulation study of the influence of turn-to-turn insulation fault on inductance of dry-type air-core reactors[J].High Voltage Apparatus,2015,51(10):117-121+127.
- [30] 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.