

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20240919001

文章编号: 1672-9331(2025)01-0071-11

引用格式: 张立志, 王晓, 龙崦平, 等. 基于功率因数变化的电抗器匝间短路故障检测[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2025, 22(1): 71-81.

Citation: ZHANG Lizhi, WANG Xiao, LONG Yanping, et al. Turn-to-turn short circuit fault detection of reactor based on changes in power factor[J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2025, 22(1): 71-81.

基于功率因数变化的电抗器匝间短路故障检测

张立志¹, 王晓¹, 龙崦平¹, 王寅², 唐维³, 黄晓夏³, 陈卫³, 王媛媛²

(1. 国网湖南省电力有限公司超高压变电公司, 湖南长沙 410004; 2. 长沙理工大学 电气与信息工程学院, 湖南长沙 410114; 3. 国电南瑞南京控制系统有限公司, 江苏南京 211100)

摘要:【目的】为解决户外恶劣多变运行环境下干式空心电抗器匝间短路故障保护问题, 提出了一种基于功率因数变化率的故障检测方法。【方法】首先, 采用 ANSYS Maxwell 建立了干式空心电抗器有限元场路耦合模型, 对电抗器不同圈层不同位置发生匝间短路故障的情况进行仿真, 揭示了功率因数的变化规律; 随后, 采用谐波分析法计算功角, 由多个功率因数变化率的波动情况, 结合电抗器的不同故障类型, 提出了一种基于功率因数变化率的干式空心电抗器匝间短路故障检测方法。【结果】当干式空心电抗器发生匝间短路时, 短路匝数越多, 功率因数变化率越大。当故障匝数相同时, 在轴向上, 故障位置越接近端部功率因数增大的幅度越小; 在径向上, 故障位置越靠近内层包封功率因数增大的幅度越小, 其中最内层线圈端部发生单匝短路故障时的功率因数变化率最小, 数值为 6.718 9%。考虑噪声影响, 仿真发现故障后功率因数变化率超过 6.718 9% 的个数均在 20 个以上, 正常时该数量均不会超过 20, 因此取次数 20 为保护阈值。仿真验证所提出的故障检测方法在电抗器不同位置不同匝数发生匝间短路故障时均能发挥作用, 可极大地提高户外干式空心电抗器的运行安全性。【结论】本文提出的故障检测方法可有效解决长期困扰工业界的电抗器故障特征微弱难以检测的问题, 证明利用多个时刻功率因数变化率组合识别故障是一种更为有效的解决思路, 能够为后续的研究提供参考。

关键词: 干式空心电抗器; 匝间短路故障; 有限元模型; 谐波分析; 功率因数角

中图分类号: TM47

文献标志码: A

Turn-to-turn short circuit fault detection of reactor based on changes in power factor

ZHANG Lizhi¹, WANG Xiao¹, LONG Yanping¹, WANG Yin², TANG Wei³, HUANG Xiaoxia³, CHEN Wei³, WANG Yuanyuan²

(1. Ultra High Voltage Substation Company, State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd. Changsha 410004, China; 2. School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 3. NARI-TECH Nanjing Control Systems Co., Ltd., Nanjing 211100, China)

Abstract: [Purposes] In order to achieve turn-to-turn short circuit fault protection of dry-type hollow reactor under harsh and variable outdoor operating environment, a fault detection method based on the rate of change of power factor was proposed. [Methods] Firstly, ANSYS Maxwell was

收稿日期: 2024-09-19; 修回日期: 2024-10-29; 接受日期: 2024-10-30

基金项目: 国家自然科学基金(52177069); 国网湖南超高压变电公司科技项目(5216A321N018)

通信作者: 张立志(1982—)(ORCID: 0009-0004-7330-0116), 男, 高级工程师, 主要从事继电保护专业的研究。

E-mail: zlzhi126@126.com

投稿网址: <http://csjgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxxbzk/home>

used to establish a finite element field and circuit coupling model of a dry-type hollow reactor and simulate the occurrence of turn-to-turn short circuit faults at different locations in different circles of the reactor, which revealed the change rule of power factor. Then, harmonic analysis was adopted to calculate the power angle. According to the fluctuations in the rate of change of multiple power factors and the different types of faults of the reactor, a turn-to-turn short circuit fault detection method for the dry-type hollow reactor based on the rate of change of power factor was proposed. [Findings] When a dry-type hollow reactor has a turn-to-turn short circuit fault, the rate of change of power factor is large if there are more short-circuited turns. When the number of faulty turns is the same, in the axial direction, as the fault location is closer to the end, the magnitude of power factor increase gets small; in the radial direction, as the fault location is closer to the inner layer of the envelope, the magnitude of power factor increase gets small. In addition, the change in power factor is the most slight when a single-turn short circuit fault occurs in the innermost layer of the coil end, with a value of 6.718 9%. With the effect of noise taken into account, the simulation finds that there are more than 20 locations with a rate of change of power factor exceeding 6.718 9% after fault occurrence, and the number usually does not exceed 20 under normal operating conditions. Therefore, 20 is taken as the protection threshold. Simulation verifies that the proposed fault detection method can correctly identify turn-to-turn short circuit faults at different locations in different circles, greatly improving the operational safety of outdoor dry-type hollow reactors. [Conclusions] The proposed fault detection method in this paper effectively solves the problem that the reactor fault characteristics are weak and difficult to detect in the industry for a long time, and it proves that using the combination of the rate of change of multiple power factors at different time to identify faults is a more effective solution idea, which can provide a reference for the subsequent research.

Key words: dry-type hollow reactor; turn-to-turn short circuit fault; finite element model; harmonic analysis; power factor angle

Foundation items: Project(52177069) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(5216A321N018) supported by State Grid Hunan Ultra High Voltage Transformer Company Science and Technology Project

Corresponding author: ZHANG Lizhi (1982—) (ORCID: 0009-0004-7330-0116), male, senior engineer, research interest: relay protection specialty. E-mail: zlzhi126@126.com

0 引言

在现代电力系统中,干式空心电抗器因其卓越的性能和维护便利性,在低压补偿领域中被广泛应用^[1-3]。然而,长期恶劣工况下的运行环境显著增加了电抗器故障的风险。其中匝间短路故障是最常见的故障类型,约占全部故障的70%^[4],已成为影响系统稳定性和可靠性的主要因素。当电抗器发生匝间短路故障时,其短路环中会产生巨大的短路电流,该短路电流在交变磁场中会导致

电抗器局部过热^[5-6],进而导致电抗器烧毁。因此,深入分析干式空心电抗器的匝间短路故障机理和短路故障特征,研究快速、准确、可靠的匝间短路故障检测方法,对电抗器及变电站其他设备的安全可靠运行具有重要意义。

对于电抗器匝间短路故障的检测,已经有众多专家学者进行了相关研究。目前,电抗器故障检测方法主要有温度检测法、磁感应探测线圈法、局部放电法和基于阻抗变化量的检测方法。其中,文献[7]提出将无线温度传感器模块置于不同包封中,将测试温度通过无线传输方式传至接收

端以实时监测电抗器的绝缘状态。由于电抗器的结构特点,该方法无法准确反映电抗器各处的绝缘状态,且需要布置大量的传感器,在一定程度上增加了电抗器的投运成本。文献[8-11]利用电抗器匝间短路故障前后电抗器周围的磁场变化情况对电抗器的运行状态进行监测,然而磁场测量装置在强干扰磁场的环境下测量精度会受到较大影响。同时,当电抗器在较为恶劣的户外环境运行时,磁场测量装置的可靠性会显著降低,且当电抗器短路匝数较少时,磁通量无明显变化,因此无法识别电抗器早期故障。文献[12]提出的局部放电法虽然可以快速地发现电抗器的早期故障,但电抗器在一个复杂的电磁场环境中工作,电磁干扰十分严重,进而导致局部放电信号的检测较为困难。文献[13-16]提出了基于电气参数的检测方法,直接以电抗器匝间短路故障后电气量变化情况为依据进行故障检测,然而当干式空心电抗器发生少匝匝间短路时,电气量的变化不太明显,且易受噪声干扰,从而影响电气量测量精度。因此,利用单个电气量的值进行检测,保护容易出现误动,可靠性较差。针对现有干式空心电抗器匝间短路故障检测方法存在的缺陷,提高保护的采样容错率和保护动作的可靠性,本文提出了一种基于多时刻功率因数变化率组合判断的干式空心电抗器匝间短路故障检测方法。

本文以一台型号为CKGKL-10-31.5 A-38.5 mH的户外干式空心串联电抗器作为研究对象,从功率因数的角度出发,在理论上分析了干式空心电抗器正常情况及发生匝间短路后功率因数的变化情况,利用ANSYS建立有限元模型验证了理论分析结果,提出了一种基于功率因数变化率的匝间短路故障检测方法,并通过仿真试验验证所提方法的有效性和可行性。

1 电抗器匝间短路故障模型

干式空心电抗器由多层线圈绕组多个同轴包封并联而成,各绕组层承受相同电压,因此可以等效成若干个并联电感支路。假设干式空心电抗器由 n 层线圈并联绕制而成,构成 n 个支路。在工频电压下,电抗器的等值电容可以忽略不计,电抗器

就可简化为由等值电感和等值电阻构成的等值电路模型^[17],如图1所示。图中 I_i 为第 i 层线圈流过的电流, R_i 、 L_i 分别为第 i 层线圈的等效直流电阻和自感, U 为电抗器端电压, $M_{1,i}$ 为第1层线圈和第 i 层线圈之间的互感, j 为复数中的虚部, ω 为角频率。

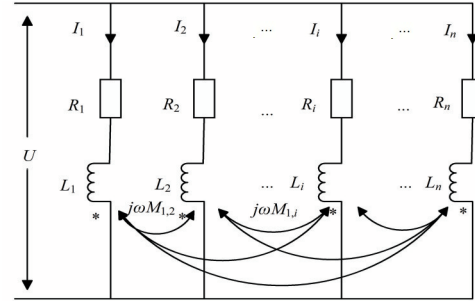


图1 电抗器正常工作情况下的等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of reactor under normal operating conditions

当电抗器发生匝间短路故障时,假设第 i 层绕组的第 k 匝出现匝间短路故障,导致相邻两匝的金属直接相连,从而形成了短路环,使电抗器的等效电路模型发生了变化,如图2所示。

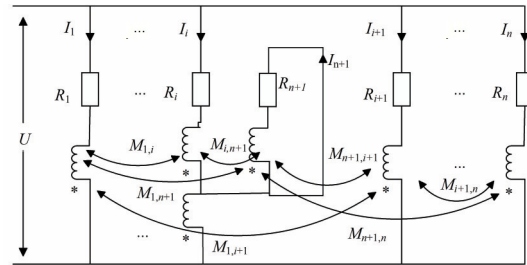


图2 电抗器发生匝间短路故障下的等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of reactor in case of turn-to-turn short circuit fault

闭合回路通过 $M_{i,n+1}$ 与其他支路相互影响,由于短路环的存在,根据电磁感应定律可知,短路环内将产生巨大的反向电流^[18],此时第 i 层线圈的电压平衡方程为

$$(R_i + j\omega L_i)I_i + \sum_{l=i, i \neq 1}^n j M_{i,l} I_l + j\omega M_{i,n+1} I_{n+1} = U \quad (1)$$

短路环的电压平衡方程为

$$(R_{n+1} + j\omega L_{n+1})I_{n+1} + \sum_{i=1}^n j M_{i,n+1} I_i = 0 \quad (2)$$

式(1)~(2)中: $\omega = 2\pi f$, f 为工频功率; n 为电抗器线圈的支路数; R_i 和 L_i ($i = 1, 2, \dots, n$)分别为第 i 层线圈的等效电阻和自感; $M_{i,l}$ ($i, l = 1, 2, \dots, n$)为第 i 层线圈和第 l 层线圈间的互感; I_i 为第 i 层线圈的

线圈支路电流; I_{n+1} 表示短路环中的电流。由式(1)、式(2)可得电抗器各支路电流,从而得到电抗器总电流,通过电抗器端电压和总电流计算得到等值电抗和等值电阻。

2 基于功率因数变化率的故障保护方法

2.1 电抗器匝间短路故障特征量分析

当正常运行时,干式空心电抗器的有功损耗主要有电阻损耗和附加损耗^[19]。在频率一定的情况下,一般认为附加损耗是一个固定值,其数值为不大于0.3倍的电阻损耗,则正常运行时电抗器的有功损耗为

$$P_{\text{loss}} = UI \cos \theta = P_R + P_{\text{附加}} = I^2 R + P_{\text{附加}} \quad (3)$$

式中: P_{loss} 为电抗器的有功损耗; θ 为电抗器的功角; P_R 为电阻损耗; $P_{\text{附加}}$ 为附加损耗。

图3为电抗器发生匝间短路故障时功角变化图。由图3可知,在电抗器故障初期,电抗器的等效电感 X 变化很小,由 X 变化为 X' ,可以忽略不计。而短路环内电流极大,如此大的短路电流在短路环内产生巨大的有功损耗,使得电抗器整体有功损耗 P 急剧增加,而电抗器总电流 I 几乎没有变化,等效电阻 R 增大。此时电抗器的等效电阻变化为 R' ,电抗器的功角为 θ' 。短路环内电流很大,导致电抗器局部温度升高,加剧了短路匝数的扩大。当短路匝数超过五匝时,电抗器等效电感的变化不可忽略,由 X' 变化为 X'' ,此时短路电流更大,等效电阻由 R' 变化为 R'' ,功角由 θ' 变化为 θ'' ,如图3所示。

通过上述原理可知,干式空心串联电抗器正

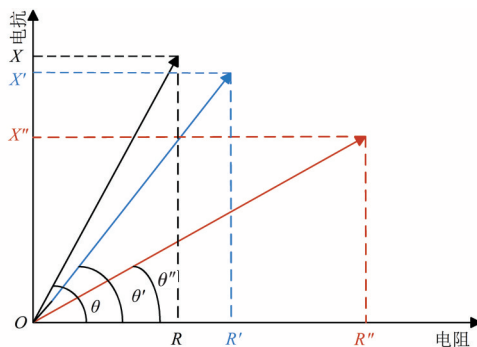


图3 电抗器发生匝间短路故障时功角变化

Fig. 3 Power angle change of reactor in case of turn-to-turn short circuit fault

常运行时的总电压和电流存在稳定的相位关系。当发生匝间短路故障时,短路环内产生巨大的短路环电流,使得电抗器的总电压和电流的相位关系发生变化。因此,可以通过检测功率因数的变化对电抗器是否发生故障进行检测。

2.2 谐波分析法计算功率因数

本文提出的基于功率因数变化率的干式空心电抗器在线检测技术拟通过实时获取电抗器的电压电流信号,采用谐波分析法获取功角,并计算功率因数来实现。设获取的电抗器端电压为 $u(t)$,流经电抗器的电流为 $i(t)$,采用傅里叶级数分解, $u(t)$ 、 $i(t)$ 表达式分别如式(4)、式(5)所示:

$$u(t) = U_0 + \sum_{k=1}^k [U_{k1} \sin(k\omega t) + U_{k2} \cos(k\omega t)] \quad (4)$$

$$i(t) = I_0 + \sum_{k=1}^k [I_{k1} \sin(k\omega t) + I_{k2} \cos(k\omega t)] \quad (5)$$

式中: $\omega = 2\pi f_0$, f_0 为基波频率; U_0 、 I_0 分别为电压电流的直流分量; U_{k1} 、 U_{k2} 分别为电压 k 次谐波的正弦和余弦分量; I_{k1} 、 I_{k2} 分别为电流 k 次谐波的正弦和余弦分量。

采集到的信号经A/D转换后得到电压、电流信号的离散序列,分别用 $x(s)$ 、 $y(s)$ 表示($0 \leq s \leq S-1$, S 为采样点数)。对电压、电流序列进行离散傅里叶变换,可获得电压、电流的正弦、余弦分量,根据正弦、余弦分量可得电压、电流相位,分别如式(6)、式(7)所示:

$$\varphi_{uk} = \arctan \frac{U_{k1}}{U_{k2}} \quad (6)$$

$$\varphi_{ik} = \arctan \frac{I_{k1}}{I_{k2}} \quad (7)$$

$$\theta = \varphi_{uk} - \varphi_{ik} \quad (8)$$

式中: φ_{uk} 为电压信号的相位; φ_{ik} 为电流信号的相位。

$\cos \theta$ 即为电抗器的功率因数。

2.3 故障保护原理

本文拟通过检测功率因数变化量对电抗器进行故障检测,在电抗器正常运行初期采集电压、电流信号,计算正常功率因数基值,如式(9)所示:

$$\cos \theta_{\text{normal}} = \cos(\varphi_{u0} - \varphi_{i0}) \quad (9)$$

式中: $\cos \theta_{\text{normal}}$ 为正常功率因数基值; φ_{u0} 、 φ_{i0} 分别为电抗器运行时电压、电流的初相位。

获取正常功率因数基值,实时采集电抗器的电压、电流信号,计算实时的功率因数值,如式(10)所示:

$$\cos \theta_i = \cos(\varphi_{ui} - \varphi_{ii}) \quad (10)$$

式中: $\cos \theta_i$ 是实时功率因数; φ_{ui} 、 φ_{ii} 分别是电抗器运行时电压、电流的实时相位。

由式(9)、式(10)可得,电抗器的功率因数变化率 $\Delta \cos \theta_i$ 为

$$\Delta \cos \theta_i = \frac{\cos \theta_i - \cos \theta_{\text{normal}}}{\cos \theta_{\text{normal}}} \quad (11)$$

此外,功率因数值会受到噪声干扰和频率波动的影响,以致功率因数变化率计算精度低。因此,本文所提方法每周波采样40次,计算40个功率因数变化率,若有 W 个功率因数变化率的绝对值超过指定范围(W 为触发保护动作所需的最小连续次数),则发生保护动作。该方法具体流程如图4所示。

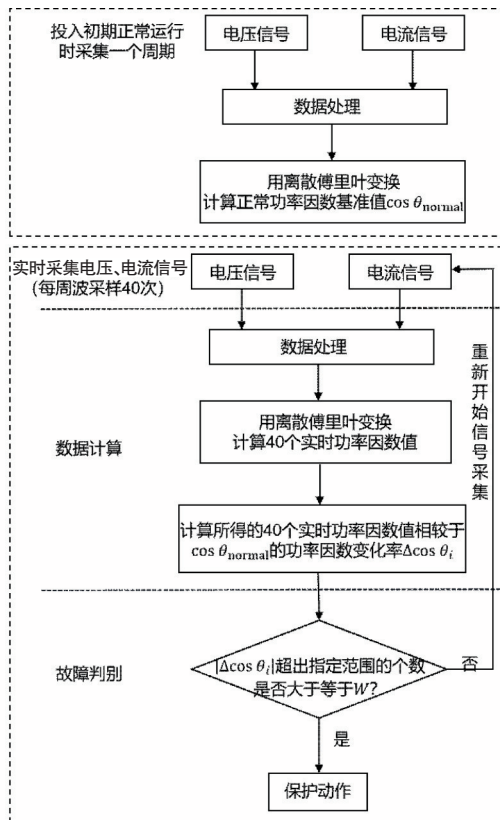


图4 功率因数变化率检测原理流程图

Fig. 4 Detection principle of rate of change of power factor

该保护的動作判据为

$$\text{Protect} = \begin{cases} \text{True, if } \sum_{i=1}^{40} 1 \quad (|\Delta \cos \theta_i| > \Delta \cos \theta_{\text{threshold}}) \geq W \\ \text{False,} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

$$\Delta \cos \theta_{\text{threshold}} = \Delta \cos \theta_{\text{min}} = \gamma \cdot \Delta \cos \theta_{\text{normal}} \quad (13)$$

式中: $\Delta \cos \theta_{\text{threshold}}$ 是设定的阈值; $\Delta \cos \theta_{\text{min}}$ 为电抗

器发生匝间短路时功率因数的最小变化率; γ 是一个大于1的系数; $\Delta \cos \theta_{\text{normal}}$ 是正常运行时的功率因数变化率,理论上为零,但由于测量精度和噪声干扰,所以是一个较小的值; W 是触发保护动作所需的最小连续次数。为避免保护误判,本文对每周波采样40次计算出来的功率因数变化率均进行判别,若在连续的40次判别中有 W 次满足判据,则进行保护动作。

3 建模与仿真分析

本文使用 ANSYS Maxwell 二维电磁进行仿真,并根据一台型号为 CKGKL-10-31.5 A-38.5 mH 的电抗器样机设计参数进行建模仿真。计算电抗器在正常运行时和在不同程度不同位置发生匝间短路故障时的功率因数,并分析其变化情况。电抗器样机共有3个包封,6层线圈,每个包封均由2层线圈绕制而成。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 hollow reactor in series

参数	数值	参数	数值
额定电压/kV	10	频率/Hz	50
额定电流/A	31.5	内径/mm	750
相数	1	外径/mm	900
电感值/mH	38.5	包封数	3

3.1 干式空心电抗器有限元仿真模型搭建

本研究根据表1电抗器参数,在 ANSYS Maxwell 软件建立了干式空心串联电抗器场路耦合模型。为了降低求解的规模,考虑到干式空心电抗器有很好的轴对称性,因此根据这一性质建立了电抗器二维有限元模型^[20]。为提高精度,模型考虑了空气介质、包封绝缘,各层线圈导线截面用圆形表示,每个包封用矩形表示,同时为提高计算速度,忽略了星形汇流排、撑条。电抗器有限元模型如图5所示。

本次仿真设置求解区域为气球边界 (Balloon),在 ANSYS Maxwell Circuit Editor 中建立电路模型,并将各层线圈并联。为了对模型施加激励,引入了一个外部电路,该电路通过仿真软件的外部电路编辑器进行设计。图6为正常运行时

外电路模型。如图6所示,在外部电路中,电感器LWinding1至LWinding6分别代表从电抗器样机内部到外部的6层线圈,每层线圈是由电感和电阻组成的串联回路。给这个外部电路施加额定电压。

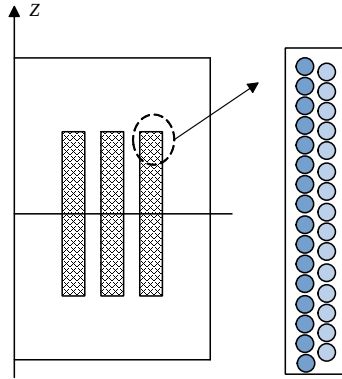


图5 电抗器有限元模型

Fig. 5 Finite element model of reactor

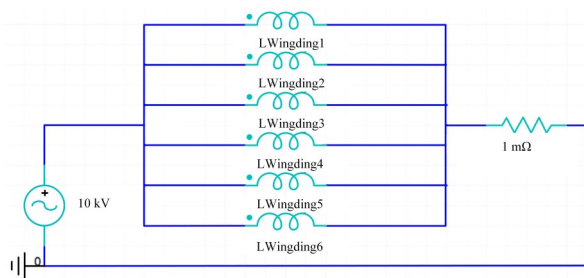


图6 正常运行时外电路模型

Fig. 6 External circuit model under normal operating conditions

本文将A相作为故障相,B、C相为正常相。将几何模型中某层线圈分成上、中、下三部分,上、下两部分为未发生故障的导线,中间部分为发生匝间短路故障的导线。图7为有限元几何模型中线圈匝间短路故障设置示意图。如图7所示,矩形虚线框导线部分为发生匝间故障的导线,上、下导线为正常导线。通过改变有限元几何模型中被短路导线的匝数和位置,可模拟发生不同位置及不同匝数的匝间故障。

当发生匝间短路故障时,外电路模型如图8所示。LWinding1_1表示上方未发生匝间短路故障的导线,LWinding1_2表示下方未发生匝间短路故障的导线,LWinding1_x为短路匝。在LWinding1_x两端并联不同大小的过渡电阻来模拟不同绝缘劣化程度的匝间故障,设置过渡电阻为 $1\ \mu\Omega$ 来模拟直接短路情况。

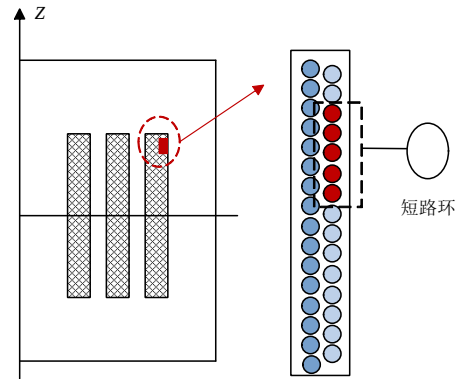


图7 有限元几何模型中线圈匝间短路故障设置示意图

Fig. 7 Turn-to-turn short circuit fault setting in finite element geometric model of coil

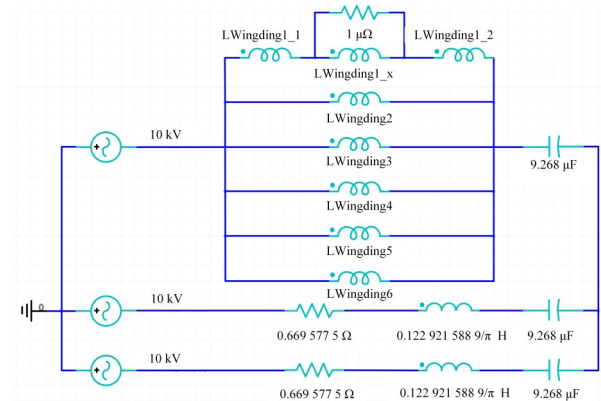


图8 匝间短路故障时外电路模型

Fig. 8 External circuit model in case of turn-to-turn short circuit fault

3.2 匝间短路故障特征量变化规律验证

通过上述模型,本文对正常运行时的电抗器和发生匝间短路故障时的电抗器进行仿真。将电抗器各层线圈按照自下而上的顺序对总高度进行10等分,考虑到电抗器有限元模型在结构上具有对称性,假设电抗器线圈高度为 H ,分别取 H 、 $H/10$ 、 $2H/10$ 、 $3H/10$ 、 $4H/10$ 、 $5H/10$ 六处位置设置匝间短路故障点。本次仿真模拟了单匝完全短路、两匝完全短路、五匝完全短路、十匝完全短路等多种场景。当发生匝间短路故障时,短路环电流及功率因数变化情况如图9~11所示。

由图9可知,对于同一层线圈发生的故障:在轴向上,短路故障位置越靠近端部,短路环电流越小,短路故障位置越靠近中部,短路环电流越大;在径向上,短路故障位置越靠近内层包封,短路环电流越小,短路故障位置越靠近外层包封,短路环

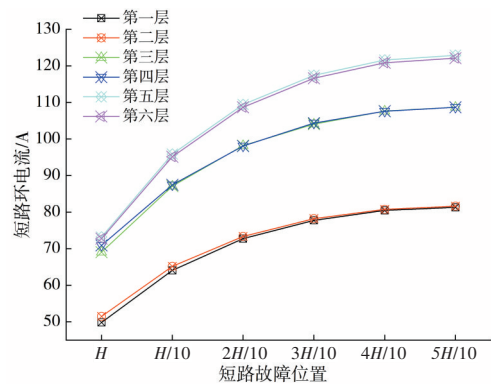


图 9 单匝完全短路时各层线圈短路环电流对比

Fig. 9 Comparison of short circuit ring currents in each layer of coils during a single-turn complete short circuit

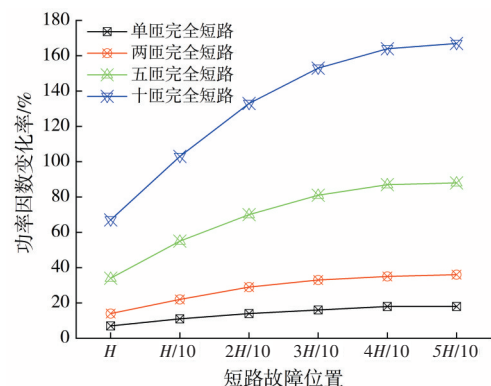


图 10 线圈 1 不同故障时功率因数变化率

Fig. 10 Rate of change of power factor during different faults in coil 1

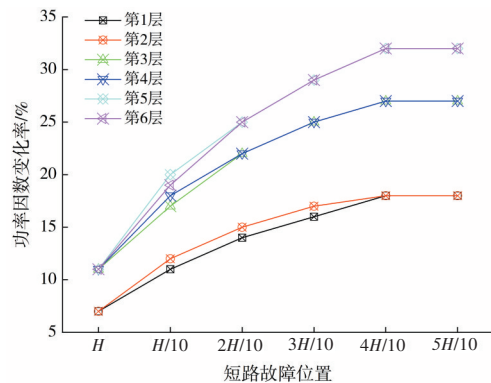


图 11 不同线圈单匝完全短路时功率因数变化率

Fig. 11 Rate of change of power factor during single-turn complete short circuits in different coils

电流越大。本文所采用的电抗器短路环电流最大约为 123 A,如此大的短路电流将使周围绝缘导线老化加剧,同时也使电抗器的有功损耗急剧增加。

由图 10~11 可知:在轴向上,随着短路匝数增

多,功率因数变化率越大,且短路故障位置越接近端部,功率因数变化率增大的幅度越小;在径向上,短路故障位置越靠近内层包封,功率因数变化率增大的幅度越小。表 2 为电抗器不同位置发生单匝短路时的功率因数变化情况。由仿真结果可知,当最内层线圈的端部发生单匝短路故障时,功率因数变化率最小,为 6.718 9%。

表 2 电抗器不同位置发生单匝短路时功率因数变化

Table 2 Change in power factor in case of single-turn short circuit at different locations of reactor

故障线圈位置	短路位置	短路时功率因数	功率因数变化率%
正常	无	0.054 392 032	0
第 1 层线圈	端部	0.058 044 434	6.718 9
	中部	0.064 147 949	17.940 7
第 2 层线圈	端部	0.058 288 574	7.167 8
	中部	0.064 331 055	18.277 4
第 3 层线圈	端部	0.060 241 699	10.758 8
	中部	0.069 213 867	27.254 8
第 4 层线圈	端部	0.060 607 912	11.432 1
	中部	0.069 335 938	27.479 2
第 5 层线圈	端部	0.060 485 843	11.207 6
	中部	0.071 960 449	32.304 6
第 6 层线圈	端部	0.060 485 843	11.207 6
	中部	0.071 899 414	32.192 3

3.3 故障保护结果分析

本研究根据 3.2 节对电抗器不同圈层、不同匝数匝间短路下功率因数变化情况的分析,发现当最内层线圈的最端部位置发生单匝短路故障时,其电抗器功率因数变化率是所有故障情况里最小的。因此,本文用最内层线圈的最端部位置发生单匝短路故障时的变化率 6.718 9% 作为故障判据。在不同噪声情况下,最内层线圈最端部位置发生单匝短路时,功率因数变化率超过 6.718 9% 的个数均在 20 个以上,而正常运行时的功率因数变化率超过 6.718 9% 的个数均在 20 个及以下,故本文选用 $W = 20$ 为超过的次数阈值,并提出了基于功率因数变化率的干式空心串联电抗器的匝间短路故障保护方法。

为了验证本文所提方法的可行性,本研究采用型号为 CKGKL-10-31.5 A-38.5 mH 的电抗器搭

建了simulink 仿真模型,以此验证本文所提方法的可行性。本文拟对电抗器正常运行、线圈1端部单匝完全短路、线圈1端部两匝完全短路、线圈1端部五匝完全短路、线圈1端部十匝完全短路五种情况进行仿真验证。仿真结果如图12~16所示。

由图12~16可见,当电抗器发生匝间短路故障时,功率因数值会发生改变。由图12可知,当电抗器正常运行时功率因数变化率均在 $\pm 6.718\%$ 的范围内,此时不会发生保护动作。由图13可知,当电抗器最内层线圈发生单匝完全短路故障时,20个功率因数变化量的值不在 $\pm 6.718\%$ 的范围内,此时发生保护动作。

由图14~16可知,当电抗器最内层线圈发生两匝、五匝、十匝完全短路故障时,40个功率因数变化量的值均不在 $\pm 6.718\%$ 的范围内,此时发生保护动作。由以上结果可知,该保护方法判断准确。

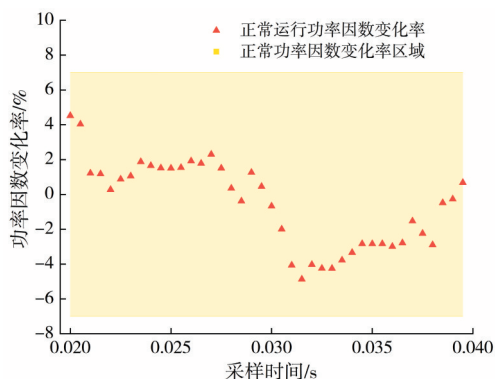


图12 正常情况下功率因数变化率

Fig. 12 Rate of change of power factor under normal operating conditions

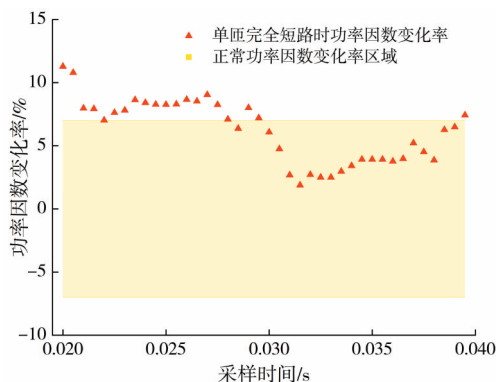


图13 线圈1端部单匝完全短路时功率因数变化率

Fig. 13 Rate of change of power factor in case of single-turn complete short circuit at the end of coil 1

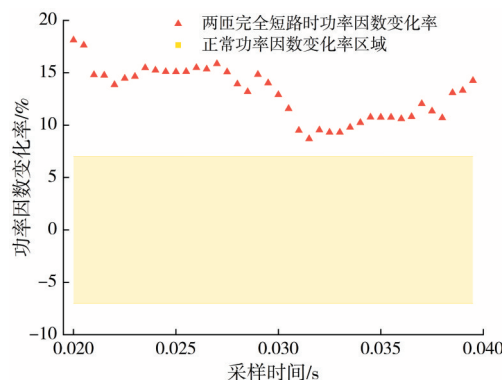


图14 线圈1端部两匝完全短路时功率因数变化率

Fig. 14 Rate of change of power factor in case of complete short circuit of two turns at the end of coil 1

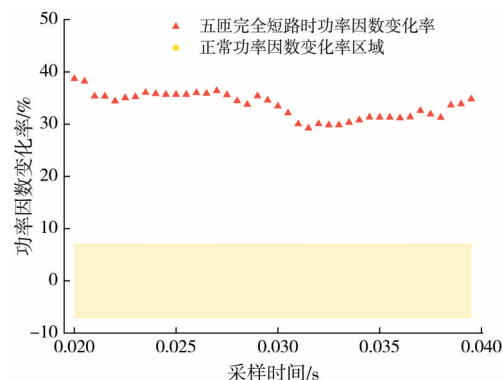


图15 线圈1端部五匝完全短路时功率因数变化率

Fig. 15 Rate of change of power factor in case of complete short circuit of five turns at the end of coil 1

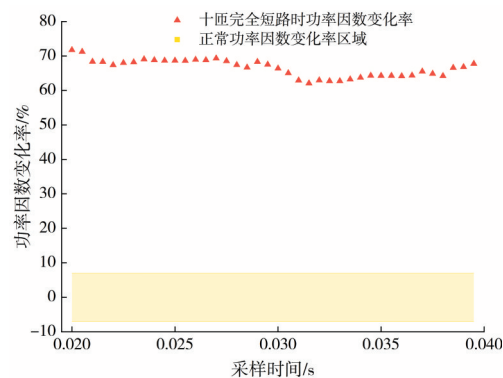


图16 线圈1端部十匝完全短路时功率因数变化率

Fig. 16 Rate of change of power factor in case of complete short circuit of ten turns at the end of coil 1

4 检测装置的设计

基于本文所提保护原理,本文设计了干式空心电抗器在线检测装置,装置采用高性能的硬件平台,内置32位RISC双核CPU,并采用16位高精

度AD采样。该装置集成测控、电度、状态监视等多种功能,以常规电缆连接方式进行采样、开入、开出等回路连接,并具备光缆跳闸功能,可实现GOOSE开入、GOOSE开出。装置的整体硬件结构如图17所示。

该装置采用交流采样方法采集 U_a 、 U_b 、 U_c 、 I_a 、 I_b 、 I_c 等电气量,每周波采样40点,并采用以太网、光纤通信将电抗器运行状态及各电气参数上传至上位机及远程监控系统,进而根据本文所提保护方法对电抗器运行状态进行检测。保护逻辑图如图18所示,图中 U_{ppMin} 为最小峰峰值电压, I_{Min} 为最小值电流, & 为逻辑符号“与”, G1、G2、G3、G4 为4个控制模块。

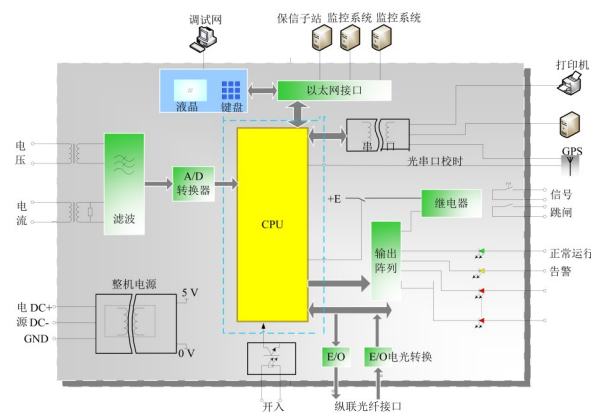


图17 装置整体硬件结构

Fig. 17 Overall hardware structure of device

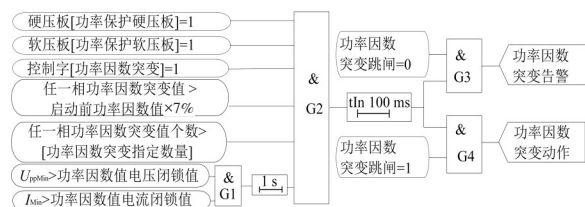


图18 保护逻辑框图

Fig. 18 Protection logic block diagram

5 讨论

通过故障等值电路的理论分析和仿真试验可知,从故障位置和故障程度的角度出发,故障工况主要可分为三种类型:第一种是相同故障线圈、相同故障位置、不同短路匝数的故障工况,此时故障特征表现为随着短路匝数的增加,功率因数的变化幅度递增;第二种是不同故障线圈、相同故障位置、相同短路匝数的故障工况,此时故障线圈越靠

近内层,功率因数的变化幅度越小;最后一种是相同故障线圈、不同故障位置、相同短路匝数的故障工况,此时故障位置越靠近线圈端部,功率因数变化的幅度越小。

结合上述分析,功率因数的变化情况与短路匝数和故障位置有关,且变化规律十分复杂。现有检测方法主要存在两方面问题:其一是在功率因数角的测量过程中,受限于设备运行环境的复杂性和恶劣性,测量精度不可避免地会受到噪声和频率波动的影响,测量精度难以提高^[21];其二是工程上一般仍采用单个功率因数设置保护判据的解决思路,一旦出现测量误差较大的情况,保护误动的问题难以避免^[22]。为此,本文考虑了电抗器在保护过程中不同的影响因素,通过研究发现,利用多故障特征量变化规律的有机组合构造判据的这一思路具有更高的采样数据容错率,能够取得更好的保护效果。该方法的核心原理是利用故障前后的功率因数变化情况对电抗器运行状态进行检测。而针对不同的电抗器型号,线圈层数和线圈匝数会有区别。因此,在利用此方法对其他类型的干式空心电抗器进行检测时,我们应先通过仿真得到最内层线圈的最端部发生单匝短路故障时的最小功率因数变化率,并将此作为保护阈值,之后,即可用此方法进行检测。

6 结论

针对干式空心电抗器匝间短路故障,提出了一种基于功率因数变化率的匝间短路故障保护方法,本文主要结论如下:

1) 在干式空心电抗器发生匝间短路故障后,故障特征的变化规律由故障位置、类型和严重程度共同决定。本文搭建了故障电路模型,推导了故障前后电路物理参数的变化规律,最终得出了故障特征量的特点。其中,功率因数变化率的特点尤其明显,并在不同圈层不同位置的特性各异,具备在不同故障情况下的辨识能力。

2) 本文提出了一种基于功率因数变化率的保护方法,采用谐波分析法计算功角,由多个功率因数变化率的波动情况,结合电抗器的不同故障类型设计保护判据。

3) 所提判据经仿真试验表明,在电抗器不同位置不同匝数发生故障时,判据均能发生可靠动作。这证明利用功率因数变化率这一特征量所构造的判据在保护上具有更高的适应性。

[参考文献]

- [1] 廖斌,冯春林,陈松,等.一起35 kV干式空心串联电抗器故障原因分析[J].电力电容器与无功补偿,2024,45(4):63-70. DOI: 10.14044/j.1674-1757.perpc.2024.04.009.
LIAO Bin, FENG Chunlin, CHEN Song, et al. Fault analysis of a 35 kV dry type air-core series reactor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(4): 63-70. DOI: 10.14044/j.1674-1757.perpc.2024.04.009.
- [2] 张健,刘贺千,朱勇行,等.干式空心电抗器用环氧玻璃纤维复合材料协同增韧改性及性能研究[J].绝缘材料,2024,57(7):43-50. DOI: 10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2024.07.006.
ZHANG Jian, LIU Heqian, ZHU Yongxing, et al. Synergistic toughening modification and performance study of epoxy-glass fiber composites for dry-type hollow reactors[J]. Insulating Materials, 2024, 57(7): 43-50. DOI: 10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2024.07.006.
- [3] 张波,王坚俊,韩文芳,等.干式空心电抗器匝间电弧性短路故障特征提取及诊断方法研究[J].热力发电,2021,50(12):145-152. DOI: 10.19666/j.rld.202108175.
ZHANG Bo, WANG Jianjun, HAN Wenfang, et al. Study on feature extraction and diagnosis method of inter-turn arc short circuit fault in dry-type air core reactor[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(12): 145-152. DOI: 10.19666/j.rld.202108175.
- [4] 黄新波,张龙,朱永灿,等.基于功角特性的干式空心电抗器匝间绝缘在线监测技术[J].电力自动化设备,2019,39(2):143-148. DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2019.02.021.
HUANG Xinbo, ZHANG Long, ZHU Yongcan, et al. Online inter-turn insulation monitoring technology based on power angle characteristics for dry-type air-core reactor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(2): 143-148. DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2019.02.021.
- [5] 郝文光,叶震生,孙国华,等.阻燃干式空心电抗器燃烧过程分析[J].电工电气,2023(12):71-73. DOI: 10.3969/j.issn.1007-3175.2023.12.014.
HAO Wenguang, YE Zhensheng, SUN Guohua, et al. Analysis of combustion process of flame retardant dry-type air-core reactor[J]. Electrotechnics Electric, 2023(12): 71-73. DOI: 10.3969/j.issn.1007-3175.2023.12.014.
- [6] 张晗,蔡延雷.一起500 kV变电站干式空心电抗器故障原因分析[J].电力电容器与无功补偿,2016,37(1):47-50. DOI: 10.14044/j.1674-1757.perpc.2016.01.010.
ZHANG Han, CAI Yanlei. Fault analysis on dry-type air-core reactor in 500 kV substation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2016, 37(1): 47-50. DOI: 10.14044/j.1674-1757.perpc.2016.01.010.
- [7] 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. DOI: 10.13296/j.1001-1609.hva.2020.02.032.
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. DOI: 10.13296/j.1001-1609.hva.2020.02.032.
- [8] 鲁尧,咸日常,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. DOI: 10.13296/j.1001-1609.hva.2021.11.015.
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. DOI: 10.13296/j.1001-1609.hva.2021.11.015.
- [9] 郑宗安.基于磁场探测法的电抗器匝间短路故障检测法的研究与应用[J].高压电器,2020,56(3):217-223. DOI: 10.13296/j.1001-1609.hva.2020.03.032.
ZHENG Zong'an. Research and application of fault detection of reactor turn-to-turn short circuit based on magnetic field detection method[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(3): 217-223. DOI: 10.13296/j.1001-1609.hva.2020.03.032.
- [10] 宋晗,邹亮,张秀群,等.基于空间磁场分布的干式空心电抗器匝间短路检测方法[J].电工技术学报,2019,34(增刊1):105-117. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.L80674.
SONG Han, ZOU Liang, ZHANG Xiuqun, et al. Inter-turn short-circuit detection of dry-type air-core reactor based on spatial magnetic field distribution[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(Sup. 1): 105-117. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.L80674.
- [11] 王晓文,刘宇博.基于探测线圈法的干式并联电抗器故障监测研究[J].沈阳工程学院学报(自然科学版),2016,12(4):336-339. DOI: 10.13888/j.cnki.

- jsie(ns).2016.04.010.
- WANG Xiaowen, LIU Yubo. The study based on detecting coil for dry-type shunt reactors fault detection [J]. Journal of Shenyang Institute of Engineering (Natural Science), 2016, 12 (4): 336-339. DOI: 10.13888/j.cnki.jsie(ns).2016.04.010.
- [12] 王生杰, 吴对平, 李渊, 等. 750 kV 高压并联电抗器局放检测异常分析[J]. 高压电器, 2023, 59(8): 78-83, 90. DOI: 10.13296/j.1001-1609.hva.2023.08.009.
- WANG Shengjie, WU Duiping, LI Yuan, et al. Abnormality analysis of 750 kV high voltage shunt reactor through partial discharge detection [J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59 (8): 78-83, 90. DOI: 10.13296/j.1001-1609.hva.2023.08.009.
- [13] 高自伟, 朱学成, 王永红, 等. 干式空心电抗器匝间短路在线监测系统研制[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2017, 22 (2): 67-71. DOI: 10.15938/j.jhust.2017.02.013.
- GAO Ziwei, ZHU Xuecheng, WANG Yonghong, et al. Study on turn-to-turn short circuit on-line monitoring system for dry-type air-core reactor [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2017, 22(2): 67-71. DOI: 10.15938/j.jhust.2017.02.013.
- [14] 孟子贺. 基于阻抗变化量频率特性的干式空心电抗器故障检测技术[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2020. DOI: 10.27063/d.cnki.ghlgu.2020.000300.
- MENG Zihe. Fault detection technology of the dry-type air-core reactor based on frequency characteristics of impedance variation [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2020. DOI: 10.27063/d.cnki.ghlgu.2020.000300.
- [15] 赵春明, 敖明, 王永红, 等. 基于功率因数变化量的干式空心电抗器匝间短路故障在线监测方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(3): 87-93. DOI: 10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2020.03.015.
- ZHAO Chunming, AO Ming, WANG Yonghong, et al. On-line monitoring method for inter-turn short circuit fault of dry-type air-core reactor based on power factor variation [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41 (3): 87-93. DOI: 10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2020.03.015.
- [16] 谢同平, 于洋, 刘兴华, 等. 基于损耗因数的干式串联电抗器匝间绝缘状态监测技术[J]. 电工电气, 2021 (1): 47-50. DOI: 10.3969/j.issn.1007-3175.2021.01.010.
- XIE Tongping, YU Yang, LIU Xinghua, et al. Inter-turn insulation state monitoring technology of dry-type series reactor based on loss factor [J]. Electrotechnics Electric, 2021 (1): 47-50. DOI: 10.3969/j.issn.1007-3175.2021.01.010.
- [17] 赵春明, 朱大铭, 司昌健, 等. 匝间短路干式空心并联电抗器故障电流分析[J]. 变压器, 2017, 54(9): 34-38. DOI: 10.19487/j.cnki.1001-8425.2017.09.007.
- ZHAO Chunming, ZHU Daming, SI Changjian, et al. Analysis of currents in dry-type air-core shunt reactor with turn-to-turn short-circuit fault [J]. Transformer, 2017, 54 (9): 34-38. DOI: 10.19487/j.cnki.1001-8425.2017.09.007.
- [18] 周岩. 干式空心电抗器在线监测与故障诊断技术研究[D]. 西安: 西安工程大学, 2019. DOI: 10.27390/d.cnki.gxbfc.2019.000223.
- ZHOU Yan. Study on the on-line monitoring and fault diagnosis technology of dry air core reactor [D]. Xi'an: Xi'an Polytechnic University, 2019. DOI: 10.27390/d.cnki.gxbfc.2019.000223.
- [19] 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. DOI: 10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2020.02.015.
- 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. DOI: 10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2020.02.015.
- [20] 杨振宝, 黄文武, 赵彦珍, 等. 基于ANSYS Maxwell的干式空心电抗器匝间短路故障瞬态特性的仿真分析[J]. 实验科学与技术, 2018, 16(6): 50-53. DOI: 10.3969/j.issn.1672-4550.2018.06.012.
- YANG Zhenbao, HUANG Wenwu, ZHAO Yanzhen, et al. Simulation analysis on transient characteristics of inter-turn short circuit fault of dry-type air-core reactor based on ANSYS Maxwell [J]. Experiment Science and Technology, 2018, 16 (6): 50-53. DOI: 10.3969/j.issn.1672-4550.2018.06.012.
- [21] 范兴明, 韩冬阳, 张鑫. 基于小波分析的空心电抗器匝间短路磁场探测方法研究[J]. 电机与控制学报, 2024, 28 (5): 163-172. DOI: 10.15938/j.emc.2024.05.017.
- FAN Xingming, HAN Dongyang, ZHANG Xin. Detection method of inter-turn short-circuit magnetic field of air-core reactor based on wavelet analysis [J]. Electric Machines and Control, 2024, 28 (5): 163-172. DOI: 10.15938/j.emc.2024.05.017.
- [22] 张龙. 干式空心电抗器匝间短路故障监测技术研究[D]. 西安: 西安工程大学, 2018.
- ZHANG Long. Study on interturn short circuit fault online monitoring technology for dry-type air-core reactor [D]. Xi'an: Xi'an Polytechnic University, 2018.

(责任编辑:毛娜;校对:赵冰)