

# 基于磁阻效应的干式空心电抗器匝间短路磁场检测研究

李威<sup>1,2</sup>, 潘志敏<sup>1,2</sup>, 戴昀翔<sup>3</sup>, 翟雨佳<sup>3,4</sup>, 邓维<sup>1,2</sup>, 毛学锋<sup>1,2</sup>, 岳宇宾<sup>5</sup>

(1. 国网湖南省超高压变电公司, 长沙 410009; 2. 变电智能运检国网湖南省电力有限公司实验室, 长沙 410009;  
3. 湖南大学电气与信息工程学院, 长沙 410082; 4. 中国科学院电工研究所, 北京 100190;  
5. 北京原力辰超导技术有限公司, 北京 100085)

**摘要:** 针对干式空心电抗器匝间短路故障所产生的磁场变化, 本文通过理论研究、建模仿真与样机试验相结合的方式, 研究基于磁阻效应的干式空心电抗器匝间短路磁场检测方案。仿真过程中建立了电抗器匝间短路的有限元模型, 完成了不同位置处以及不同故障程度的磁场变化量的计算。基于仿真结果, 确定了磁场的测量位置, 并应用磁阻效应传感器开展了电抗器匝间短路磁场测量试验。试验结果表明: 由于测量过程中不与电抗器接触, 磁阻效应传感器应用时并不影响电抗器的正常运行; 其次, 磁阻效应传感器能够有效反映出电抗器故障时磁场的变化情况, 验证了磁阻效应传感器测量干式空心电抗器匝间短路磁场的可行性。

**关键词:** 干式空心电抗器; 匝间短路; 磁阻效应; 磁场

## Research on Magnetic Field Detection of Inter-turn Short Circuit of Dry-type Air-core Reactor Based on Reluctance Effect

LI Wei<sup>1,2</sup>, PAN Zhimin<sup>1,2</sup>, DAI Yunxiang<sup>3</sup>, ZHAI Yujia<sup>3,4</sup>, DENG Wei<sup>1,2</sup>,  
MAO Xuefeng<sup>1,2</sup>, YUE Yubin<sup>5</sup>

(1. State Grid Hunan Extra High Voltage Substation Company, Changsha 410009, China; 2. Substation intelligent Operation and Inspection Laboratory of State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410009, China; 3. School of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 4. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 5. Beijing East Force Superconducting Technology Co., Ltd., Beijing 100085, China)

**Abstract:** Aiming at the magnetic field change due to the inter-turn short-circuit of dry-type air core reactor, the inter-turn short circuit magnetic field detection scheme of dry-type air core reactor based on reluctance effect is analyzed through the combination of theoretical research, modeling and simulation as well as prototype test. In the simulation process, the finite element model of inter-turn short circuit of reactor is set up, and the calculation of magnetic field change at different positions and different fault degrees is completed. Based on the simulation results, the measurement position of the magnetic field is determined, and the magnetic field measurement test of the inter-turn short circuit of the reactor is performed by using the reluctance effect sensor. The test results show that the reluctance effect sensor in application does not affect the normal operation of reactor because it is not in contact with reactor in the measurement process; Secondly, the reluctance effect sensor can effectively reflect the magnetic field change in case of fault of the reactor, and the feasibility of the reluctance effect sensor to measure the inter-turn short circuit magnetic field of dry-type air core reactor is verified.

**Keywords:** dry-type air-core reactor; inter-turn short circuit; reluctance effect; magnetic field

收稿日期: 2023-07-14

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目(52177019); 国网湖南省电力有限公司科技项目(5216A321N00D); 中国科学技术协会青年人才托举计划(2021QNRC001); 湖南省自然科学基金优秀青年项目(2021JJ20013); 湖南省创新平台与人才计划-湖湘青年英才(2021RC3058); 国家自然科学基金青年项目(51907060)。

## 0 引言

近年来,随着我国电力系统规模的逐渐扩大,电压等级、电网容量和输送距离的不断提高,输电线路所产生的功率损失以及容升效应也随之增大,因此在大规模的电力系统中需要布置大量电抗器进行限流与无功补偿<sup>[1-3]</sup>。干式空心电抗器具有线性度好、抗饱和能力强、抗大电流冲击能力强等优点,因而受到广泛的应用<sup>[4-5]</sup>。但是由于干式空心电抗器通常布置在户外,运行环境较为恶劣,在运行过程中发生故障的概率也随之增加<sup>[6-7]</sup>。据研究表明,匝间短路是导致干式空心电抗器故障的主要原因之一,在故障形成过程中,电抗器匝与匝之间的金属导线会相互接触形成短路环,短路环中所流通的巨大电流会对电抗器造成巨大的损坏<sup>[8-9]</sup>。为了保障干式空心电抗器的稳定运行,需要对干式空心电抗器的运行状态进行监测,以便在匝间短路的故障形成时及时发现故障并做出响应,降低事故所带来的损失。

在干式空心电抗器匝间短路故障监测方面,国内外学者已经做了大量研究。文献[10-11]提出了一种基于功率因数变化量的测量方法,通过监测电流与电压之间的相位变化实现对匝间短路故障的检测。文献[12-13]提出了一种阻抗检测方法,通过监测匝间短路故障前后等值电阻与电抗的变化量确定干式空心电抗器的运行状态。上述两种检测方法均是以电气量的变化来判断故障,但是由于电抗器的自感特性,故障前后电流、电压等电气参数的改变可能并不明显。文献[14-15]提出了一种温度检测方法,通过监测匝间短路时故障处因电流的突变而伴随的局部升温,进而反映干式空心电抗器的运行状态,但对于包封较多的大容量电抗器,会出现温度测量不灵敏的情况。在磁场信号检测方面,文献[16-17]提出了一种探测线圈法,在干式空心电抗器上下对称的位置布置感应线圈,当匝间短路故障发生时,上下感应线圈的所流过磁通将不再相等,从而会感应出不同的电压,通过采集上下线圈的差分电压信号完成对匝间短路故障的检测,这种方法的缺点在于存在一定的监测盲区,无法准确反映横轴附近出现的故障。文献[18-20]研究了干式空心电抗器匝间故障前后的磁场沿轴向中心轴和径向中心轴方向的空间磁场分布,但文献中所研究的空间磁场数据为标量,并未考虑磁场的方向,且所提取的磁场数据位置处在电抗器内部的中心处,不宜实现磁场数据的实际测量。

以上所述的检测方法均存在着一定的局限性,

而当电抗器发生匝间短路故障时,其磁场势必会发生变化,因此本文拟从磁场信号的角度出发,研究基于磁阻效应的干式空心电抗器匝间短路故障磁场检测方案。运用 ANSYS Maxwell 建立有限元仿真模型进行模拟分析,并开展电抗器样机的磁场检测试验,验证磁阻效应传感器应用于干式空心电抗器匝间短路磁场测量的可行性。

## 1 磁场信号检测的基本原理

磁场是电力设备运作的一个基本特征,当电力设备工作运行时,设备内部所流通的电流将会产生磁场,而磁场会伴随着电流的改变而发生变化,因此磁场在一定程度上可用于判断电力设备的运行状态。干式空心电抗器通常应用于工频条件下,等值电路可视作为多层线圈组成的并联电路,其中等值电容因影响较小可在电路中将其忽略,所以电抗器的每层线圈可等效为一个电感与直流电阻串联的支路<sup>[21-22]</sup>,电抗器正常运行时的等效电路见图1。根据干式空心电抗器的等效电路,可以由此列出电路方程组。

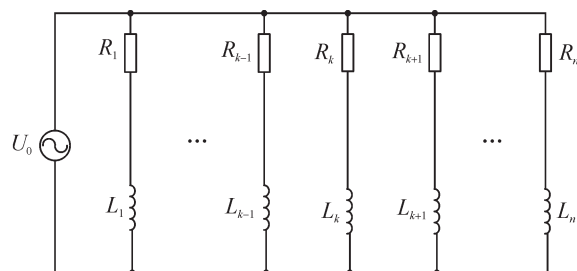


图1 电抗器正常运行等效电路  
Fig. 1 Equivalent circuit at normal operation of reactor

$$\begin{bmatrix} R_1 + j\omega L_1 & \cdots & j\omega M_{1,j} & \cdots & j\omega M_{1,n} \\ j\omega M_{2,1} & \cdots & j\omega M_{2,j} & \cdots & j\omega M_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ j\omega M_{i,1} & \cdots & j\omega M_{i,j} & \cdots & j\omega M_{i,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ j\omega M_{n-1,1} & \cdots & j\omega M_{n-1,j} & \cdots & j\omega M_{n-1,n} \\ j\omega M_{n,1} & \cdots & j\omega M_{n,j} & \cdots & R_{n+1} + j\omega L_{n+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_i \\ \vdots \\ I_{n-1} \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_i \\ \vdots \\ U_{n-1} \\ U_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $R_i$  表示电抗器各层线圈的等效直流电阻;  $L_i$  表示各层线圈的自感;  $M_{ij}$  表示各层线圈之间的互感;  $I_i$ 、 $U_i$  分别表示每层线圈所流通的电流与电抗器的端电压。当电抗器发生匝间短路故障时,匝与匝之间的绕组会相互接触形成短路环,等值电路可等效成在故障位置处并联的一个线圈回路,其等值电感与直流电阻分别为  $L_{n+1}$ 、 $R_{n+1}$ ,电抗器匝间短路故障的等效电路图见图2。

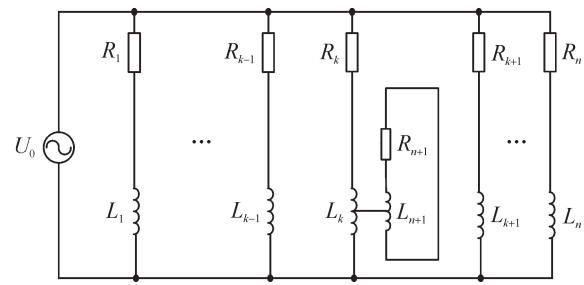


图2 电抗器匝间短路等效电路  
Fig.2 Equivalent circuit of inter-turn short circuit of reactor

从等效电路分析可知,匝间短路故障的形成会

$$\begin{bmatrix} R_1 + j\omega L_1 & j\omega M_{1,2} & \cdots & j\omega M_{1,j} & \cdots & j\omega M_{1,n} & j\omega M_{1,n+1} \\ j\omega M_{2,1} & R_2 + j\omega L_2 & \cdots & j\omega M_{2,j} & \cdots & j\omega M_{2,n} & j\omega M_{2,n+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ j\omega M_{i,1} & j\omega M_{i,2} & \cdots & j\omega M_{i,j} & \cdots & j\omega M_{i,n} & j\omega M_{i,n+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ j\omega M_{n,1} & j\omega M_{n,2} & \cdots & j\omega M_{n,j} & \cdots & R_n + j\omega L_n & j\omega M_{n,n+1} \\ j\omega M_{n+1,1} & j\omega M_{n+1,2} & \cdots & j\omega M_{n+1,j} & \cdots & j\omega M_{n+1,n} & R_{n+1} + j\omega L_{n+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_i \\ \vdots \\ I_n \\ I_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_i \\ \vdots \\ U_n \\ 0 \end{bmatrix}$$

(2)

2 磁阻效应传感器工作原理

传统的磁传感器通常为半导体霍尔器件,但其存在灵敏度较低,容易受应力和温度的影响等缺点,为了灵敏且准确地检测出磁场的改变,本文拟采用基于磁阻效应的线性磁场传感器对电抗器的磁场分布进检测。磁阻效应是指磁阻效应材料在外磁场的作用下其电阻率会发生显著的变化现象<sup>[24-25]</sup>,磁阻效应芯片具有轴性,能够感应磁场敏感轴方向上的磁场变化。为了抑制共模偏置与温度和噪声等干扰,芯片通常被配置成电桥结构,在芯片正负电源端施加电压后,芯片输出端输出差分信号。

干式空心电抗器为多层线圈并绕的对称结构,根据安培定则可知,电抗器内部的磁场方向垂直且聚合,而外表面的磁场较为发散,因此结合电抗器的结构及磁场分布特点,在电抗器的底部布置监测点可达到监测磁场变化情况的目的,并且干式空心电抗器在实际运用过程中需使用绝缘子进行支撑,这样同时也为传感器的布置提供便利。本文选用的磁阻效应线性磁场传感器采用隧穿磁阻效应磁性材料,其灵敏度可达 0.65 Gs。该传感器无需与电抗器线圈绕组进行接触,所以并不会对电抗器的绝缘造成影响。通过在干式空心电抗器底部布置磁阻效应线性磁场传感器测量电抗器的磁场数值变化,并经过信号处理模块将芯片所输出的模拟信号转化为数字信号后,运

使得干式空心电抗器的电路结构发生变化,在短路环所形成的闭合回路中,交变电流的电磁感应会使得短路环内形成一个方向相反且幅值很大的短路电流,进而会对电抗器内的电流分布产生一定影响。匝间短路故障时,电抗器端电压保持不变,各层线圈支路电压相等,故障线圈电压为 0,具体电流电压方程见式(2)。根据毕奥-萨伐尔定律<sup>[23]</sup>,电抗器的磁场大小将会随着电流的改变而发生变化,因而可以通过检测磁场的变化判断电抗器的实际运行状态。

用 PC 上位机编程显示、保存,其中测量示意图见图 3。

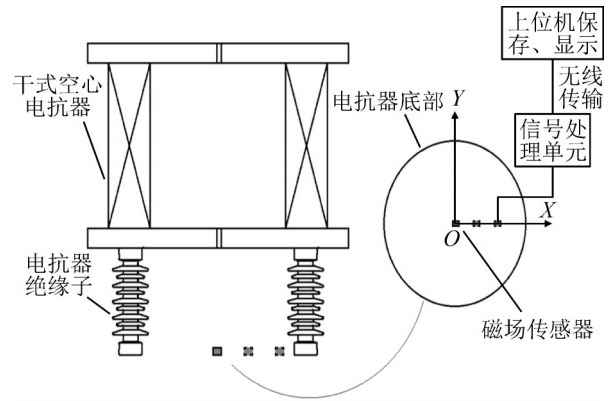


图3 磁场测量示意图  
Fig.3 Schematic diagram of magnetic field measurement

3 有限元模型建立与仿真分析

本文采用有限元分析软件 ANSYS Maxwell 对试验电抗器样机进行模型建立与仿真分析<sup>[26]</sup>。试验电抗器样机内径为 554 mm,外径 751.2 mm,包封数为 4,其中最内侧包封与最外侧包封含有 4 层线圈,其余包封层含有 3 层线圈,线圈为铝制,具体电气设计参数见表 1-2。

表1 电抗器样机额定参数  
Table 1 Rated parameters of reactor prototype

| 电压/V   | 电流/A | 电感/mH | 频率/Hz |
|--------|------|-------|-------|
| 10 000 | 189  | 5.349 | 50    |

| 表2 干式空心电抗器各包封参数<br>Table 2 Each envelope parameters of dry-type air core reactor |    |        |        |       |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|--------|--------|-------|
| 包封序号                                                                             | 层号 | 线圈匝数   | 额定电流/A | 线径/mm |
| 1                                                                                | 1  | 157.75 | 35.83  | 2.75  |
|                                                                                  | 2  | 153.50 |        |       |
|                                                                                  | 3  | 150.25 |        |       |
|                                                                                  | 4  | 147.25 |        |       |
| 2                                                                                | 5  | 136.50 | 29.14  | 3.30  |
|                                                                                  | 6  | 134.00 |        |       |
|                                                                                  | 7  | 132.00 |        |       |
| 3                                                                                | 8  | 124.75 | 34.00  | 3.65  |
|                                                                                  | 9  | 123.25 |        |       |
|                                                                                  | 10 | 122.25 |        |       |
| 4                                                                                | 11 | 119.00 | 58.51  | 3.80  |
|                                                                                  | 12 | 118.50 |        |       |
|                                                                                  | 13 | 118.50 |        |       |
|                                                                                  | 14 | 119.25 |        |       |

3.1 二维有限元模型建立

在对电抗器进行磁场计算时,由于电抗器结构关于中心对称,其磁场也关于中心对称分布,所以可将其模型等效为二维轴对称模型。依据于电抗器额定结构参数,运用 ANSYS Maxwell 2D 模块建立试验电抗器的二维结构模型,由于电抗器匝与匝之间呈紧密分布,因此可对电抗器的线圈进行简化处理。每层线圈的横截面可由相应矩形表示,其中矩形的高为线圈高度,宽为线圈的线径。当电抗器发生匝间短路故障时,可将线圈层分为上层线圈、短路环、下层线圈 3 部分,故障模型见图 4。

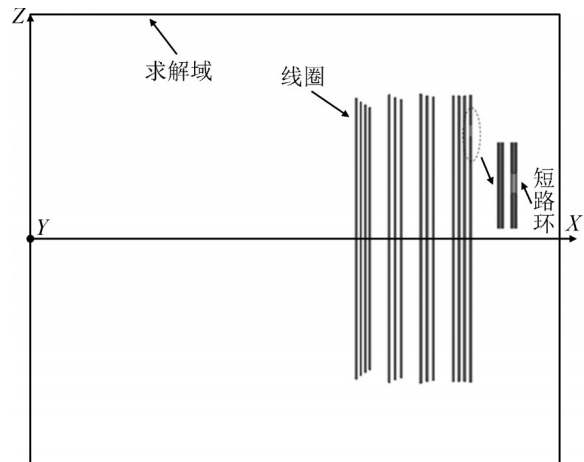


图4 电抗器有限元求解模型  
Fig. 4 Finite element solution model of reactor

其中将干式空心电抗器按照其自身总高度均分为 3 部分,依据短路故障线圈的中心所在位置,

自上而下分别定义为上部故障、中部故障、下部故障。故障程度  $s$  定义为短路线圈匝数与总线圈匝数的比值,计算公式为

$$s = \frac{n_s}{n} \times 100\% \tag{4}$$

式中:  $n_s$  为短路线圈的匝数;  $n$  为该层线圈的总匝数。一般情况下故障程度  $s$  的区间范围取 0~35%, 本文将故障程度  $s$  在 0~5% 区间范围内定义为轻度故障, 5%~20% 区间范围内为中度故障, 20%~35% 为重度故障<sup>[18]</sup>。

3.2 边界条件与激励设定

干式空心电抗器仿真的求解域是一个无界域, 其边界的设置可通施加气球边界 (Balloon) 来完成。电抗器的激励采用导入外部电路的方式进行添加, 外部电路模型通过软件内置的电路编辑器进行搭建, 依据其电抗器的电路结构, 每层线圈等效为直流电阻与电感的串联支路, 外电路见图 5。

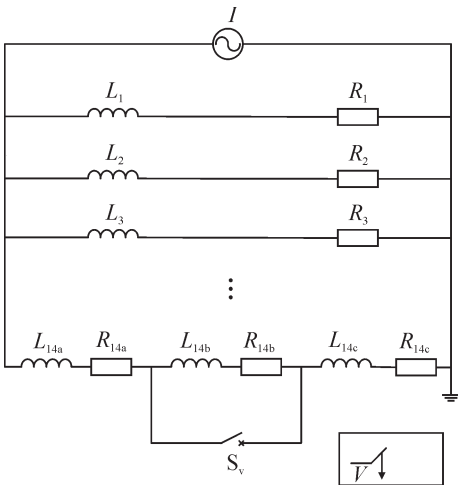


图5 电抗器匝间短路故障电路模型  
Fig. 5 Model of inter-turn short circuit fault circuit of reactor

图中:  $I$  为对电抗器所施加的电流激励源;  $L_1 - L_{14}$  为电抗器每层线圈的电感;  $R_1 - R_{14}$  为电抗器每层线圈的直流电阻。在最外层的线圈处设置匝间短路故障, 由此可将该层线圈进行分段处理, 线圈被分为上部线圈、下部线圈、短路环 3 个部分。其中  $L_{14a}$ 、 $R_{14a}$  表示上部线圈的电感与电阻,  $L_{14b}$ 、 $R_{14b}$  表示短路环的电感与电阻,  $L_{14c}$ 、 $R_{14c}$  表示下部线圈的电感与电阻。线圈的短接由压控开关来控制, 开关闭合时最外层线圈发生短路故障。

3.3 仿真结果与分析

在电抗器的最外层线圈的上部, 中部, 下部位置处, 分别设置轻、中、重 3 种故障程度的匝间短路

故障,以电流激励 100 A 为例,压控开关  $S_V$  闭合时,最外层线圈发生匝间短路故障。由于在实际试验过程当中会受经济、安全等条件因素的制约,传感器的布置位置与安装数量均会受到一定程度上的限制,从而只能选取部分位点用于磁场数值的测量,因此在仿真过程中选取部分位点进行仿真分析。在实际运行过程中,电抗器需用绝缘子进行支撑,这会使得电抗器与地面存在一定的竖直距离。所以在距电抗器底部竖直距离 25 cm 处以圆心位置为起点,沿水平方向每隔 100 mm 提取一次匝间短路故障前后的磁场竖直分量的数值,仿真所得出的匝间短路瞬间测量位点处的磁场变化数据见表 3,磁场变化结果见图 6。

表 3 匝间短路故障前后磁场变化仿真结果  
Table 3 Simulation results of magnetic field change before and after inter-turn short circuit fault

| 距离/mm | 短路位置 | 磁场变化/mT |       |       |
|-------|------|---------|-------|-------|
|       |      | 轻       | 中     | 重     |
| 0     | 上部   | 0.233   | 0.317 | 0.369 |
|       | 中部   | 0.381   | 0.524 | 0.618 |
|       | 下部   | 0.425   | 0.579 | 0.674 |
| 100   | 上部   | 0.229   | 0.312 | 0.364 |
|       | 中部   | 0.378   | 0.519 | 0.613 |
|       | 下部   | 0.425   | 0.579 | 0.674 |
| 200   | 上部   | 0.219   | 0.299 | 0.348 |
|       | 中部   | 0.366   | 0.503 | 0.593 |
|       | 下部   | 0.423   | 0.577 | 0.672 |
| 300   | 上部   | 0.202   | 0.275 | 0.320 |
|       | 中部   | 0.343   | 0.471 | 0.556 |
|       | 下部   | 0.418   | 0.57  | 0.664 |
| 400   | 上部   | 0.173   | 0.236 | 0.275 |
|       | 中部   | 0.303   | 0.416 | 0.491 |
|       | 下部   | 0.401   | 0.546 | 0.638 |
| 500   | 上部   | 0.134   | 0.183 | 0.213 |
|       | 中部   | 0.243   | 0.333 | 0.394 |
|       | 下部   | 0.361   | 0.493 | 0.577 |
| 600   | 上部   | 0.091   | 0.124 | 0.145 |
|       | 中部   | 0.17    | 0.233 | 0.275 |
|       | 下部   | 0.286   | 0.391 | 0.459 |
| 700   | 上部   | 0.056   | 0.076 | 0.09  |
|       | 中部   | 0.101   | 0.14  | 0.165 |
|       | 下部   | 0.172   | 0.236 | 0.278 |

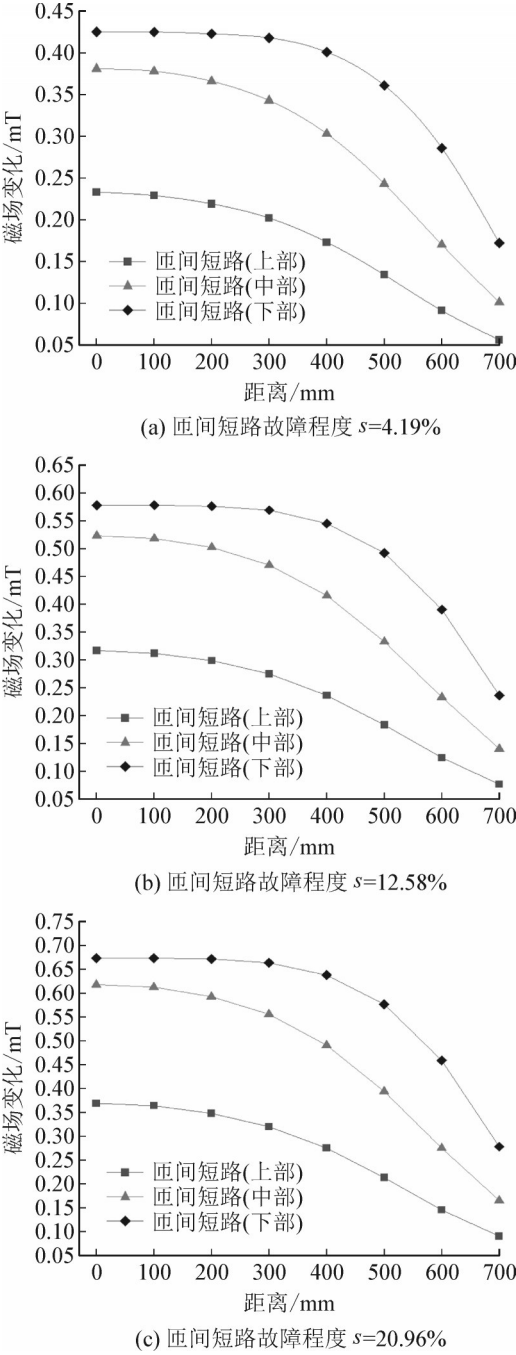


图 6 匝间短路故障前后的磁场变化  
Fig. 6 Magnetic field change before and after inter-turn short circuit fault

由仿真所得到的计算结果可知,电抗器线圈发生匝间短路故障时,会对电抗器的空间磁场分布产生的影响,电抗器底部的磁感应强度在一定程度上被削弱。随着测量位点距离圆心点处水平距离的增大,其磁场的变化量也同时有着减小的趋势,并且故障位置越靠近于底部,磁场变化的数值受水平距离因素的影响也相对越小。故障程度一致的情况下,对比于上、中、下不同的故障位置,匝间短路故障越靠近与电抗器底部,底部磁场变化数值与之变大;在相同故障位置处,对比于不同的故障程度,

其磁场的变化趋势基本一致,并且随着故障程度的增大,匝间短路故障对电抗器底部磁场的削弱情况也愈发明显。

4 试验验证与结果分析

4.1 试验平台搭建

为模拟干式空心电抗器的匝间短路故障状态,可通过在试验电抗器的最外层线圈处并接短路线圈的方式设置短路环。短路线圈的开断由断路器进行控制,开关合闸即可将线圈导通,实现在第14层线圈处匝间短路故障的模拟。磁阻效应线性磁场传感器布置在干式空心电抗器底部的测量位点处,监测底部磁场的变化情况,其中试验电路见图7,试验平台见图8。

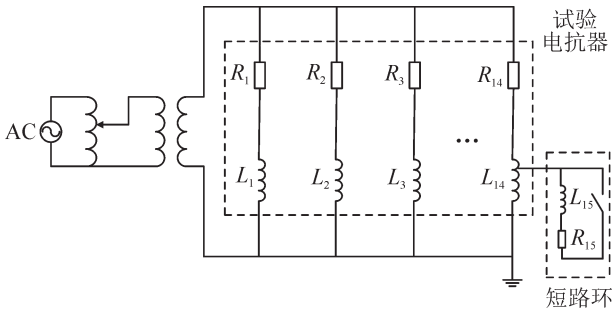


图7 干式空心电抗器匝间短路试验电路  
Fig. 7 Inter-turn short circuit test circuit of dry air core reactor

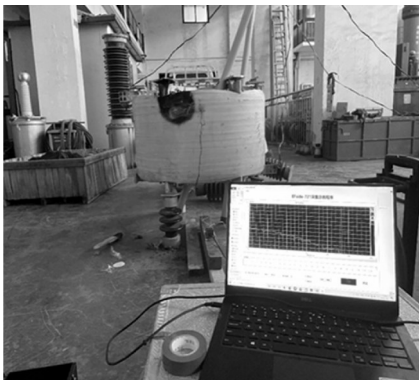


图8 匝间短路试验平台  
Fig. 8 Inter-turn short circuit test platform

4.2 试验结果与分析

断路器合闸,匝间短路故障触发,以底部竖直方向磁场的变化大小作为统计量,分别采集上部、中部、下部的轻度短路故障所带来的磁场变化,并同时测量不同故障程度的上部短路所引起的磁场改变。不同测量位置处故障时刻前后的磁场变化数据见表3-4,磁场变化结果见图9。从表3-4中的数据可以看出,当最外层线圈发生匝间短路故障时,不同的测量位置处的磁场数值均有所减小,这是

由于在匝间短路故障发生的过程当中,匝与匝之间的金属导线相互接触所形成的短路环上会感应出一个与正常电流方向相反的短路电流,从而产生反方向的磁通,进而削弱电抗器底部的磁场强度。在同一故障程度的条件下,随着故障位置的下移,匝间短路对底部磁场的影响也逐渐增大,及在一定程度上,轴向距离上越靠近于短路故障的位置处的磁场变化也就越大。除此之外,在相同故障位置处,随着故障程度的由轻至重,对底部磁场的削弱也逐渐加剧,及说明磁场的变化量与故障程度呈正相关关系。对比仿真所得到的数据可知,试验所呈现的磁场变化现象与仿真计算得到的结果近乎一致。

表4 匝间短路故障前后磁场变化试验结果  
Table 4 Test results of magnetic field change before and after inter turn short circuit fault

| 距离/mm | 短路位置 | 磁场强度/mT | 磁场变化/mT |
|-------|------|---------|---------|
| 0     | 无    | 2.386   | —       |
|       | 上部   | 2.166   | 0.22    |
|       | 中部   | 2.021   | 0.365   |
|       | 下部   | 1.973   | 0.413   |
| 100   | 无    | 2.359   | —       |
|       | 上部   | 2.151   | 0.208   |
|       | 中部   | 2.008   | 0.351   |
|       | 下部   | 1.952   | 0.407   |
| 200   | 无    | 2.315   | —       |
|       | 上部   | 2.118   | 0.197   |
|       | 中部   | 1.976   | 0.339   |
|       | 下部   | 1.911   | 0.404   |
| 300   | 无    | 2.216   | —       |
|       | 上部   | 2.041   | 0.175   |
|       | 中部   | 1.899   | 0.317   |
|       | 下部   | 1.823   | 0.393   |
| 400   | 无    | 2.009   | —       |
|       | 上部   | 1.862   | 0.147   |
|       | 中部   | 1.743   | 0.266   |
|       | 下部   | 1.641   | 0.368   |

表5 不同故障程度上部短路前后磁场变化试验结果  
Table 5 Test results of magnetic field change before and after short circuit faults with different fault degrees

| 距离/mm | 磁场强度/mT | 磁场变化/mT |       |       |
|-------|---------|---------|-------|-------|
|       |         | 轻       | 中     | 重     |
| 0     | 2.386   | 0.233   | 0.317 | 0.369 |
| 100   | 2.359   | 0.229   | 0.312 | 0.364 |
| 200   | 2.315   | 0.219   | 0.299 | 0.348 |
| 300   | 2.216   | 0.202   | 0.275 | 0.320 |
| 400   | 2.009   | 0.056   | 0.076 | 0.090 |

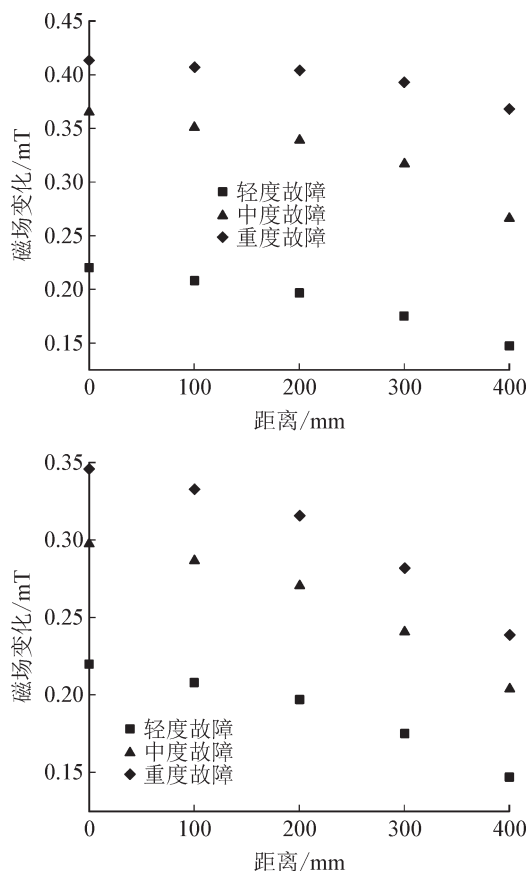


图9 磁场变化试验结果  
Fig. 9 Test result of magnetic field variation

## 5 结语

本文结合仿真与试验,从磁场的角度出发,通过直接检测空间磁场的变化来判断电抗器的运行状态。运用有限元分析软件 ANSYS Maxwell 对干式空心电抗器在上部、中部、下部匝间短路故障前后的磁场分布进行了仿真分析,并使用磁阻效应传感器检测电抗器样机故障前后的磁场变化。从软件仿真与样机试验验证结果可以看出,匝间短路故障发生时,电抗器底部磁场会出现明显的削弱情况,并且磁场的变化情况同时会受到短路故障位置,故障程度等因素的影响。当干式空心电抗器匝间短路故障程度一致时,轴向故障位置由上部向下部改变,底部磁场的变化更加明显;当故障位置相同时,故障程度的由轻度向重度改变,底部磁场的变化也随之增大,磁场变化量与故障程度呈正相关。由于两者的数据结果呈现出的变化趋势大致相同,这也使得磁阻效应传感器应用于干式空心电抗器匝间短路故障检测的可行性得到合理验证。

## 参考文献

[1] 孙健,周启文,杨帆,等. 分级式可控高压并联电抗器控制部分短路判别新原理[J]. 电力系统自动化, 2015, 39

(4): 97-102.

SUN Jian, ZHOU Qiwen, YANG Fan, et al. A new distinguishing principle for short-circuit fault in controllable part of step controlled high-voltage shunt reactor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(4): 97-102.

[2] 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, 2023, 60(1): 136-143.

JIA Genmao, ZHAO Qicheng, LUO Fuquan, et al. Monitoring and protection on inter-turn short circuit fault for reactor of high pass 3rd-order AC filter in DC convert station[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 60(1): 136-143.

[3] 孟文杰,张荣秋,蔡婧,等. 浅谈一起 750 kV 单相并联电抗器局放超标分析[J]. 变压器, 2022, 59(1): 73-75.

MENG Wenjie, ZHANG Rongqiu, CAI Jing, et al. Analysis of a partial discharge exceeding standard of a 750 kV single-phase shunt reactor[J]. Transformer, 2022, 59(1): 73-75.

[4] 邢军强,张耘硕,钟俊涛,等. 基于对偶性的多柱式磁控并联电抗器建模新方法[J]. 变压器, 2022, 59(8): 15-22.

XING Junqiang, ZHANG Yunshuo, ZHONG Juntao, et al. New method for modeling multi-limb magnetically controlled shunt reactor based on duality[J]. Transformer, 2022, 59(8): 15-22.

[5] 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.

[6] 朱恩泽,陈习文,王相锋,等. 一起 35 kV 干式空心并联电抗器绝缘击穿事故原因分析及解决方案[J]. 变压器, 2023, 60(8): 59-64.

ZHU Enze, CHEN Xiwen, WANG Xiangfeng, et al. Analysis and solution of a insulation breakdown of 35 kV dry-type air-core shunt reactor[J]. Transformer, 2023, 60(8): 59-64.

[7] 辛妍丽,周文婷,余泽远,等. 40.5 kV 真空断路器分闸并联电抗器重燃过电压及抑制方法[J]. 电力工程技术, 2023, 42(4): 231-240.

XIN Yanli, ZHOU Wenting, YU Zeyuan, et al. Reignition overvoltages caused by 40.5 kV vacuum circuit breaker switching-off shunt reactors and suppression methods[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(4): 231-240.

[8] 李童,吴标,储后广,等. 高压电抗器短路故障防爆性能仿真分析[J]. 变压器, 2023, 60(8): 25-29.

LI Tong, WU Biao, CHU Houguang, et al. Simulation analysis on explosion-proof performance of high voltage reactor under short circuit fault[J]. Transformer, 2023, 60(8): 25-29.

[9] 李传明,孙业荣,魏彩霞,等. 低频干式变压器漏磁场分

- 析及杂散损耗计算[J]. 变压器, 2023, 60(1): 1-7.
- LI Chuanming, SUN Yerong, WEI Caixia, et al. Leakage magnetic field analysis and stray loss calculation of low frequency dry-type transformer[J]. Transformer, 2023, 60(1): 1-7.
- [10] 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.
- 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.
- [11] 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.
- [12] 庄羽. 66 kV 级干式空心并联电抗器匝间短路在线监测系统研制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2016.
- [12] 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.
- 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.
- [13] 陆潭. 干式电抗器温感监测方法研究[J]. 科技与企业, 2012(19): 276.
- LU Tan. Study on temperature sensing monitoring method of dry-type reactor[J]. Science-technology Enterprise, 2012(19): 276.
- [14] 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.
- [15] 盛裕杰, 应柏青, 赵彦珍, 等. 空心电抗器匝间短路在线检测的改进技术探究[J]. 实验科学与技术, 2018, 16(6): 41-45.
- SHENG Yujie, YING Baiqing, ZHAO Yanzhen, et al. Research on improvement of online detection of inter-turn short circuit in air-core reactor[J]. Experiment Science and Technology, 2018, 16(6): 41-45.
- [16] 赵彦珍, 马西奎, 梁正波, 等. 一种干式空心电抗器匝间短路故障在线实时检测方法: CN101881802A [P]. 2012-07-04
- [17] 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(z1): 105-117.
- 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(z1): 105-117.
- [18] 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.
- 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.
- [19] 翟瑞劫. 单相空心电抗器的匝间短路磁场检测方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
- [20] 咸日常, 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.
- [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): 150-155.
- 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.
- [22] 李海, 张玉颖. 圆形线电流的磁感应强度[J]. 大学物理, 1999, 18(6): 20-22.
- LI Hai, ZHANG Yuying. Magnetic induction of a circular current[J]. College Physics, 1999, 18(6): 20-22.
- [23] 高航. 巨磁效应高精度宽频电流传感技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- [24] 张海峰, 刘晓为, 王喜莲, 等. 磁电阻效应的原理及其应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(3): 362-366.
- ZHANG Haifeng, LIU Xiaowei, WANG Xilian, et al. Principles and applications of magneto-resistance effect[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(3): 362-366.
- [25] 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.
- 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.

作者简介:

李威(1992—),男,工程师,主要研究方向为超、特高压设备电气试验与诊断。

潘志敏(1973—),男,正高级工程师,主要研究方向为超、特高压设备运维、检修与检测技术。

戴昀翔(1999—),男,硕士研究生,主要研究方向为高压

设备故障检测。E-mail:837680761@qq.com。

翟雨佳(1990—),女,副教授,主要研究方向为高温超导磁体及超导无线电能传输技术。

邓维(1973—),男,工程师,主要研究方向为超、特高压设备电气试验与诊断。

毛学锋(1970—),男,工程师,主要研究方向为超、特高压设备电气试验与诊断。

岳宇宾(1986—),男,工程师,主要研究方向为智能化与数字化控制。

(上接第27页)

杨朋威(1989—),男,工程师,主要从事电力系统运行与控制技术研究工作。

陈肖璐(1991—),女,工程师,主要从事电力系统仿真分

析研究工作。

罗振鹏(1976—),男,副教授,研究方向为新能源发电、电力系统传输与控制技术。