



基于磁场检测的干式空心电抗器匝间短路故障诊断方法

李 威^{1,2}, 王智弘^{1,2}, 廖子涵^{1,2}, 刘卫东^{1,2}, 符劲松^{1,2}, 张 进^{1,2}, 赵彦珍^{3*}

(1. 国网湖南超高压变电公司, 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. 西安交通大学 电气工程学院, 西安 710049)

摘要: 匝间短路故障是干式空心电抗器最常见的故障, 严重时会引起电抗器绝缘损坏、起火, 甚至烧毁。及早诊断电抗器匝间短路故障, 发出有效预警对电力系统安全运行具有重要意义。该文提出一种基于磁场检测的干式空心电抗器匝间短路故障诊断方法: 独立于电抗器本体, 上下安装与电抗器绕组同轴的检测线圈, 通过检测线圈感应电压的变化, 采用基于数理统计的准确识别匝间短路过程的 3σ 判据模型和算法, 判断电抗器匝间短路故障并进行预警和报警。基于有限元数值计算软件, 以一台型号为 BKGKL-20000-35 干式空心电抗器为研究对象, 仿真分析了电抗器在不同位置发生匝间短路故障时检测线圈的感应电压变化规律, 验证所提出方法的有效性。最后通过对试制样机的现场试验, 验证了该方法实用可靠, 可推广应用于实际电力系统中。

关键词: 干式空心电抗器; 匝间短路; 磁场检测法; 故障诊断

中图分类号: TM47

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20230362

Fault Diagnosis Method of Inter-turn Short Circuit of Dry-type Air-core Reactor Based on the Magnetic Field Detection

LI Wei^{1,2}, WANG Zhihong^{1,2}, LIAO Zihan^{1,2}, LIU Weidong^{1,2},
FU Jinsong^{1,2}, ZHANG Jin^{1,2}, ZHAO Yanzhen^{3*}

(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 Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Inter-turn short circuit fault is the most common fault of dry-type air-core reactor, which may cause insulation damage, fire or even burn out of the reactor in serious cases. It is of great significance for the safe operation of the power system to diagnose the inter-turn short circuit fault as early as possible and give effective early warning. A new method is presented for diagnosis of inter-turn short circuit of dry-type air-core reactor based on magnetic field detection: detection coils that are independent of the reactor body and coaxial with the reactor winding are installed up and down. By adopting the mathematical statistics 3σ Criterion model and algorithm to detect the changes of the induced voltage of the detection coils, the inter turn short circuit fault of the reactor is determined and early warning and alarm are given. In order to verify the effectiveness of the proposed method, the induced voltage changes of the detection coils are simulated and analyzed when inter turn short circuit faults occur at different positions of a BKGKL-20000-35 dry type air-core reactor based on the finite element numerical calculation software. The proposed method has also been validated through on-site prototype testing. It is reliable and effective, and can be widely applied in practical power systems.

Key words: dry-type air-core reactor; inter-turn short circuit fault; magnetic field detection method; fault diagnosis

干式空心电抗器因其电感线性、结构简单、机械强度高以及噪音小等诸多优点广泛应用于电

力系统中。由于干式空心电抗器常常安装于户外, 服役工况恶劣, 因此, 电抗器事故频发。其

收稿日期: 2023-08-13; 修回日期: 2023-11-03

基金项目: 国网湖南电力科技项目(5216A321N00D)。

作者简介: 李威(1992-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事超、特高压变电及直流一次设备运维检修及技术监督等工作。

*通信作者: 赵彦珍(1967-), 女, 博士, 教授, 主要从事电路与电磁场的教学和科研工作。E-mail: zhaoyzh@mail.xjtu.edu.cn

中,匝间短路故障是干式空心电抗器的主要故障类型^[1-5]。匝间短路时,短路环中巨大的短路电流会引起电抗器局部急剧发热,产生高温,导致电抗器绕组绝缘损坏,严重时引发电抗器冒烟、起火乃至烧毁,给电力系统带来危害。及早发现电抗器匝间短路故障并进行预警或报警,对电力系统的安全运行有着十分重要的意义。

磁场检测法是目前用于电抗器匝间短路故障在线监测的一种有效方法。其主要原理是通过检测匝间短路环中的短路电流所引起电抗器的局部磁场变化来判断电抗器匝间短路故障。

磁场检测法的具体实施主要有两种方式。一种是利用高斯计等仪器直接测量电抗器空间磁场变化来判断匝间短路故障,这种方式目前仅处于理论分析和实验室研究阶段,难以用于现场电抗器的在线监测^[6-7]。另一种方式是基于局部磁场变化导致电抗器磁场分布的不对称性,通过在电抗器本体的顶部、底部绕制探测线圈感应电抗器磁场信号,通过预设阈值或统计检验方法判断电抗器运行状态,识别匝间短路故障进行预警和报警。但这种方式需要在电抗器最外包封绕制探测线圈,现场施工难度大,对现役电抗器的技术升级、改造难以实施^[8-13]。此外,由于在电抗器本体增加了附加结构,会不同程度影响到电抗器的电绝缘和工艺可靠性,可能会造成设备的不安全性隐患。

本文提出一种基于磁场检测的干式空心电抗器匝间短路故障在线监测新方法:独立于电抗器本体,上下安装与电抗器绕组同轴的检测线圈,通过检测线圈感应电压的变化,判断电抗器匝间短路故障并进行预警和报警。本文将基于有限元数值计算软件,以一台型号为BKGKL-20000-35的干式空心电抗器为分析对象,仿真研究电抗器在不同位置发生匝间短路故障时检测线圈的感应电压变化规律,验证所提出方法的有效性。同时,还通过对所试制的电抗器样机进行现场试验,进一步验证该方法的实用性。

1 计算原理

BKGKL-20000-35型干式空心电抗器为35 kV电力系统中常见的电抗器。其额定电气参数如表1所示。电抗器内径1990.0 mm,外径2950.0 mm,线圈高度2600.0 mm。

表1 干式空心电抗器额定电气参数

参数	值
额定容量/kvar	20000
额定电压/V	20207.3
额定电流/A	989.7
额定电感/mH	65
额定频率/Hz	50

根据干式空心电抗器结构,在正常运行时其磁场呈轴对称分布,在电抗器任一个子午面 ROZ 上,其磁场以电抗器上下结构对称中心线 OR 对称分布。电抗器正常运行时的磁力线分布仿真图如图1所示。

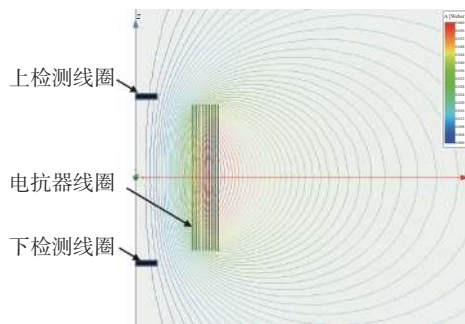


图1 正常运行时干式空心电抗器磁力线分布图

图1中,独立于电抗器本体,若上下对称放置结构尺寸相同的圆环形检测线圈,由于电抗器的结构及磁场分布对称,则上下检测线圈感应电压变化规律也相同。因此,选择在电抗器下方放置检测线圈进行研究,以便于与后续现场试验进行对比。

根据电抗器和检测线圈的结构,基于有限元数值计算软件,建立正常运行和某处匝间短路故障时电抗器及其下方检测线圈的二维轴对称几何模型,如图2(a)和图2(b)所示。

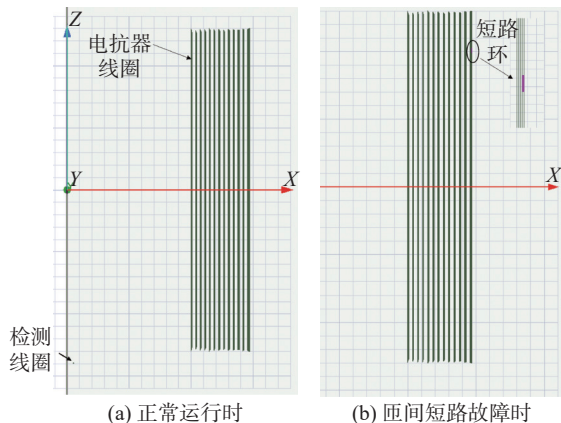


图2 干式空心电抗器及检测线圈的几何模型

电抗器在正常运行及匝间短路故障时，其等效电路如图 3(a)和图 3(b)所示。其中，电抗器层数为 41， R_k 和 L_k 分别表示第 k 层线圈的电阻及自感($k=1, 2, \dots, 41$)， M_{jk} 为第 j 层线圈与第 k 层线圈的互感($j=1, 2, \dots, 41$)， $M_{jk}=M_{kj}$ ； u_s 和 i 分别为电抗器端电压和流过电抗器的总电流， i_k 为流过第 k 层线圈的电流。图 3(b)中，设定电抗器第 41 层线圈发生匝间短路， R_{42} 和 L_{42} 分别表示短路环的电阻及自感， M_{k42} 为第 k 层线圈与短路环的互感。

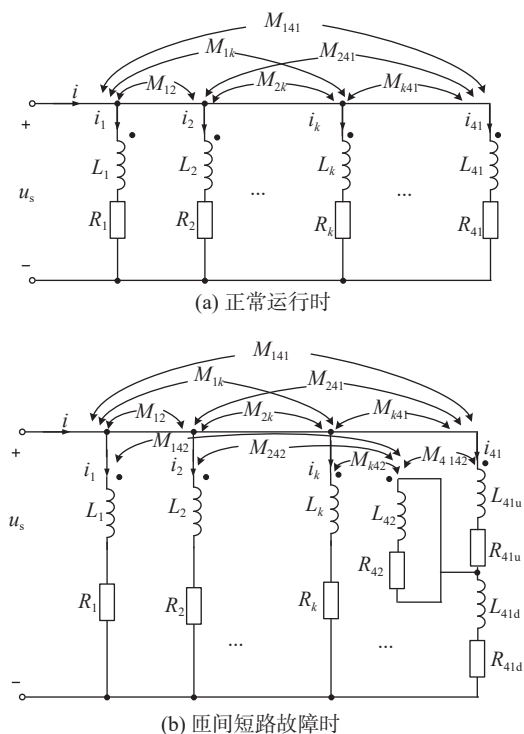


图 3 干式空心电抗器等效电路

根据电抗器等效电路，在仿真软件中建立电抗器的电路仿真模型如图 4 所示。在图 4(a)主电路中， $L_{Windingk}$ 和 R_k 分别为第 k 个线圈电感和电阻模型($k=1, 2, \dots, 41$)， $L_{WindingShortRing}$ 和 $R_{ShortRing}$ 分别为短路环电感和电阻模型，S_523 为电压控制开关，用于模拟匝间短路的动作，ModelV 为 S_523 的开关模型，开关打开表示电抗器处于正常运行状态，开关闭合表示电抗器发生匝间短路故障。图 4(b)中， V_p 为脉冲电压源， R_c 为限流电阻， V_c 为电压表，脉冲电压源的电压脉宽用以模拟线圈匝间短路的瞬间。图 4(c)中， $L_{WindingDetect}$ 为检测线圈电感模型， R_d 为开路电阻，其值可取数量级 $10^9 \Omega$ 及以上。

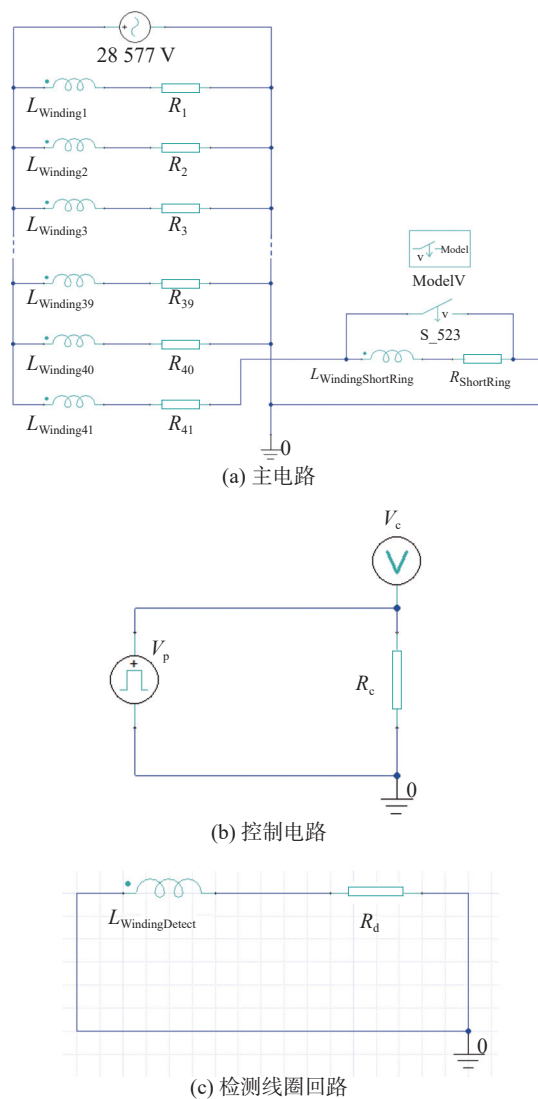


图 4 干式空心电抗器电路仿真模型

2 仿真分析

根据干式空心电抗器的实际结构尺寸，通过仿真得到电抗器匝间短路故障前后检测线圈感应电压的变化。检测线圈直径 100 mm，匝数 105，放置于电抗器正下方，与电抗器线圈同轴，距电抗器下端垂直距离为 300 mm，便于固定至星形架并与星形架等电位。对电抗器正常运行时，对最内包封第 1 层、中间包封第 20 层和最外包封第 41 层的不同位置发生匝间短路故障时的检测线圈电压进行了仿真计算。每层匝间短路位置设置为 3 处：层中部、距层下端 200 mm 处和距层上端 200 mm 处。仿真结果如图 5 所示。

由图 5 的仿真结果看出，电抗器不同包封层数(内侧第一层、中间第 21 层、外侧第 41 层)、不同高度位置(上、中、下)发生匝间短路故障

时, 检测线圈的感应电压均产生显著扰动变化, 这种扰动特征是在感应电压波形中出现局部的尖

锐刺突群, 类似于间歇性的脉冲信号群, 仅仅使波形在局部产生畸变。

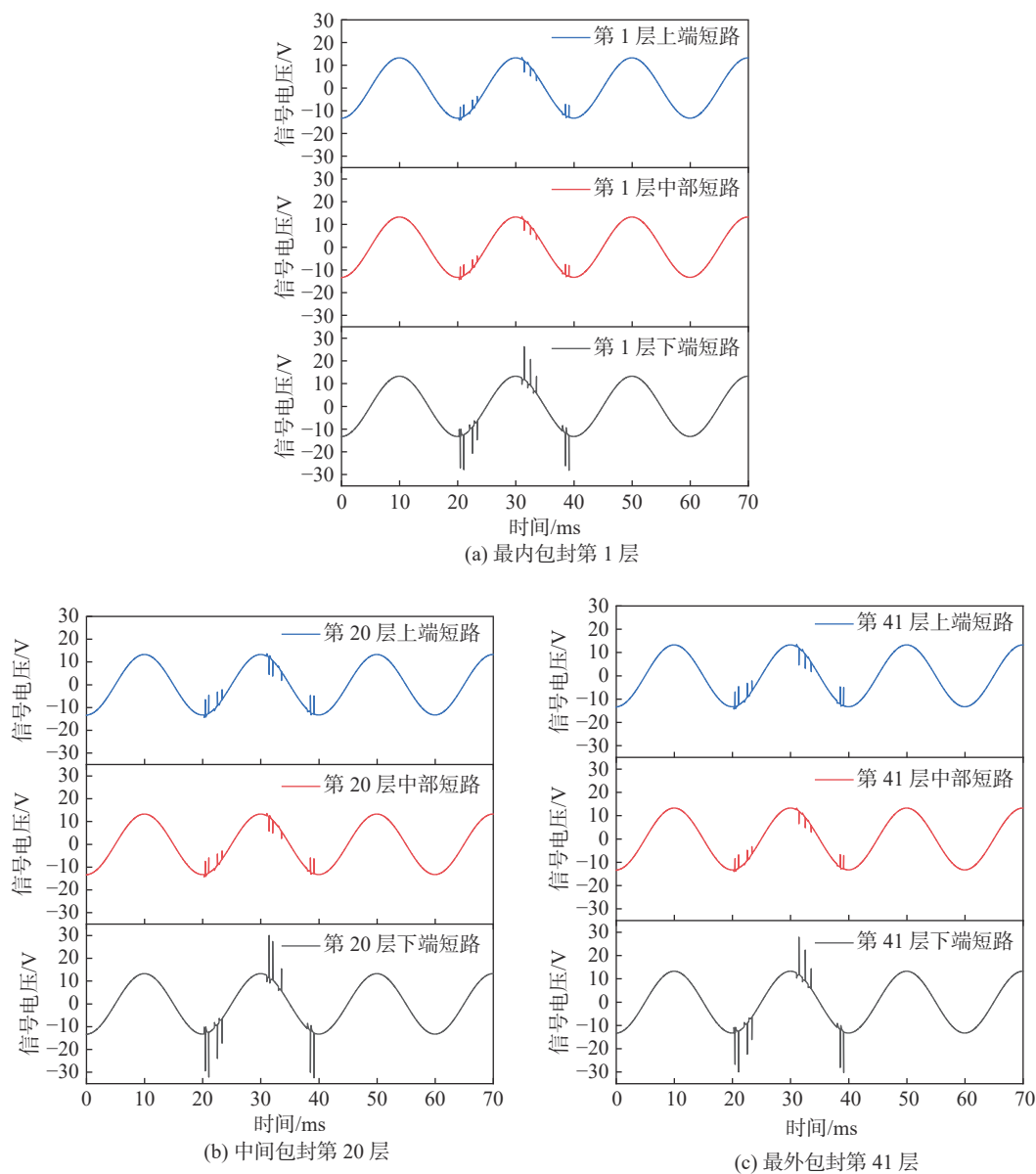


图 5 干式空心电抗器匝间短路故障前后检测线圈感应电压的变化曲线

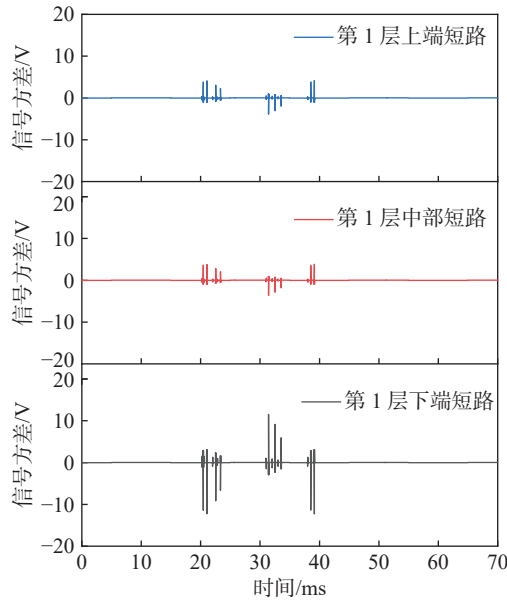
采用波形过滤方法扣除 50 Hz 基波的影响, 得到对应的扰动变化曲线如图 6 所示。检测线圈产生的感应电压变化与电抗器匝间短路的空位位置和方位相关, 不同包封层数在电抗器下端发生匝间短路过程时具有更高的感应电压(约 11.6~15.73 V), 在远端(中部、上端)发生匝间短路过程时具有相对低的感应电压(约为同层数下端短路电压的 1/3 左右), 同时均远远高于未发生匝间短路过程的正常工况的感应电压波动(小于 10 mV)约 10^3 数量级, 具有显著的信号可识别性和抗干扰性。

由此, 将电抗器正常工况下的监测线圈感应

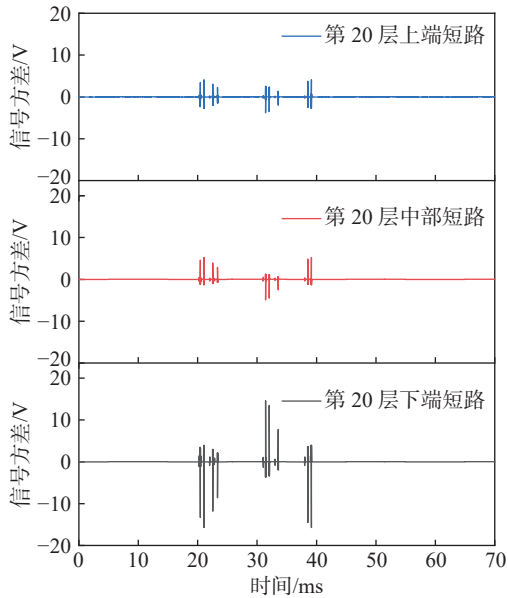
电压的波动作为基准设定匝间短路故障的报警阈值, 实时检测感应电压的波动值, 当其超出报警阈值时即启动报警动作, 可以实现匝间短路故障的识别和早期报警。

3 试验分析

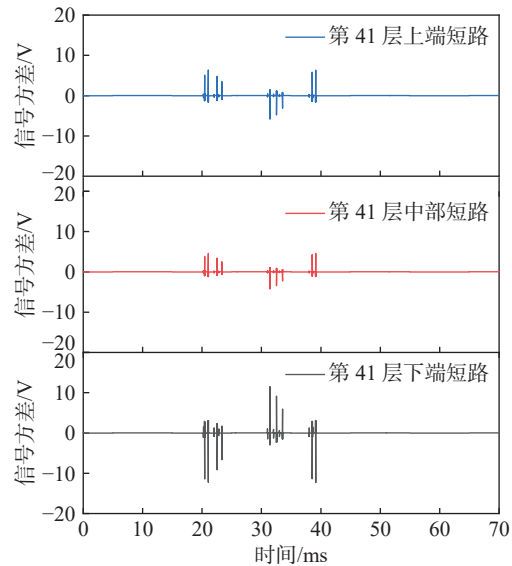
对电抗器试验样机施加电压, 人工设置不同位置发生匝间短路故障, 采用示波器采集观察电抗器正下方检测线圈的感应电压变化规律。考虑到安全因素, 试验电压设定为 2000 V, 匝间短路位置设定在电抗器下端及中部。实验现场照片如图 7 所示。



(a) 最内封装第1层



(b) 中间封装第20层



(c) 最外包装第41层

图 6 检测线圈感应电压扰动变化曲线



(a) 试验电抗器



(b) 检验后台

图 7 干式空心电抗器匝间短路故障前后检测线圈感应电压的变化实测现场

检测线圈设置于电抗器底部靠近星臂中心位置，检测线圈引线到示波器和采样模块，用于记录波形显示和实时感应电压信号采集，采样速率

5000~100000 S/s，采样数据传输到计算机进行波形过滤和信号波动数据的分析处理，其算法流程如图 8 所示。实验中 S_{lim} 取值 20 mV 用于屏蔽数据运算中可能出现的样本方差 $S=0$ 的极端情况，匝间短路故障信号识别判断以采样数据样本的方差 σ 为基准，采用系数 k 调节其敏感度，实验中采用 $k=3$ 为系数。基于随机过程数理统计原理，当 $k=3$ 时，数据波动超出 $\pm 3\sigma$ 区间的几率小于 1%，当数据离差超出此区间，可以判断为出现了匝间短路故障，而连续出现此情况 (n 次) 的概率将会以 $1\%^n$ 的幅度降低，从而可以可靠地识别匝间短路故障的发生过程。

匝间短路故障现场实验检测到的示波器波形及其采样信号处理结果如图 9 所示。从示波器的波形截图中可以明显看到, 这种匝间短路故障发生过程中, 其显著特征是在原有的 50 Hz 波形的局部出现扰动、形成尖锐刺突群, 相当于叠加了间歇性的脉冲信号群, 而总体的波形(频率、幅值、趋势等)没有明显的变化, 和前述的数值仿真结果具有一致性。

同样, 采用波形过滤处理后的数据波动曲线如图 9 所示, 在匝间短路过程中, 数据离差发生显著波动。采用离差阈值 $S_{lim}=15\text{ mV}$, 匝间短路判据系数 $k=3$, 对于识别满足匝间短路判据的数据按 1 s 时间区间进行次数统计, 该次数对应出现了匝间短路过程的频次, 频次越高, 说明匝间短路故障的可信度、可靠性越高, 如次数大于 3 次, 说明匝间短路故障的误判的可能性小于 10^{-9} , 由此实现匝间短路故障的及时预警。

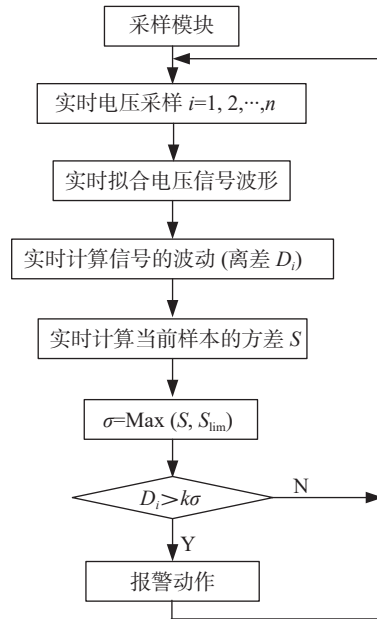
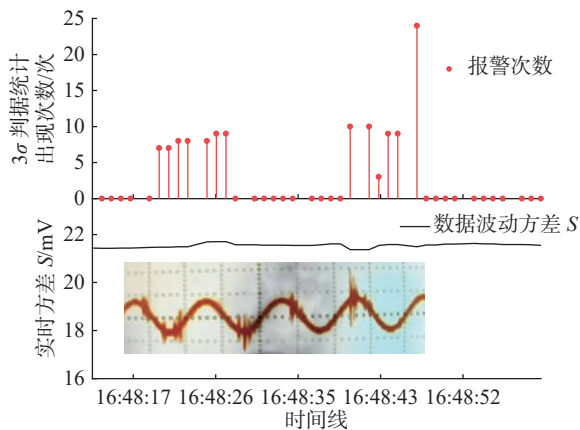
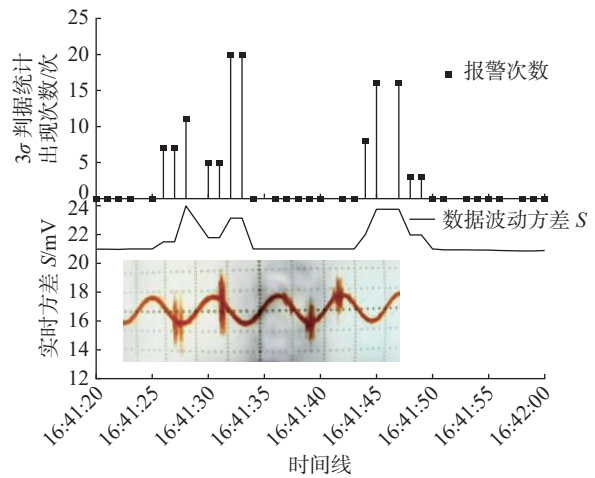


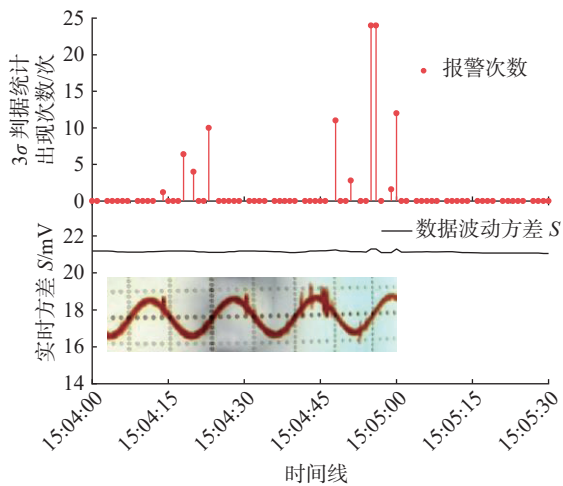
图 8 匝间短路故障诊断算法



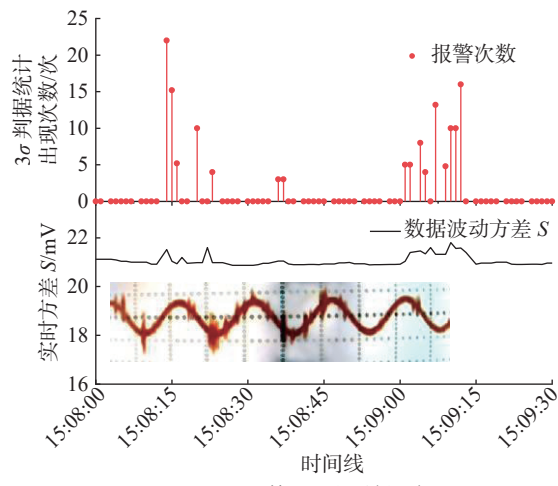
(a) 第 1 层中部短路



(b) 第 1 层下端短路

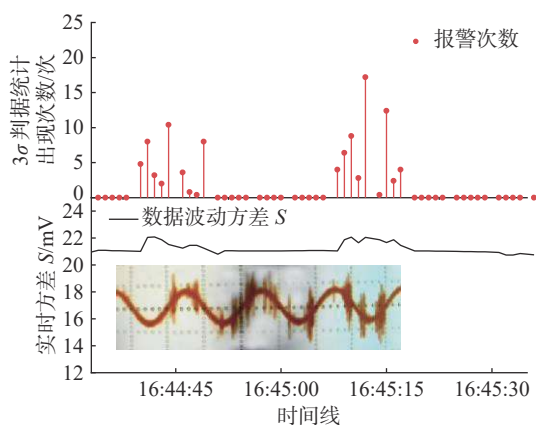


(c) 第 20 层中部短路

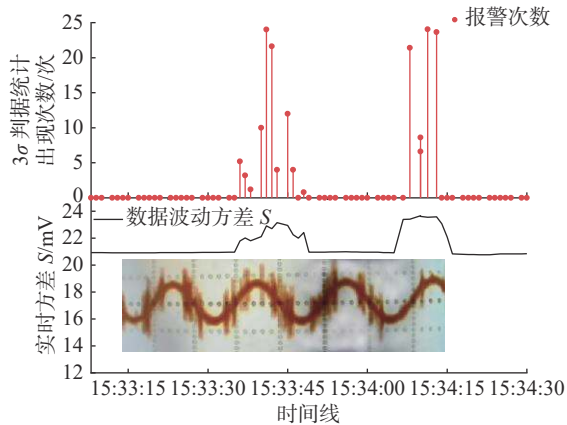


(d) 第 20 层下端短路

图 9 干式空心电抗器匝间短路故障前后检测线圈感应电压的变化实测曲线



(e) 第 41 层中部短路



(f) 第 41 层下端短路

图 9 (续)

4 结束语

本文提出一种基于磁场变化检测的干式空心电抗器匝间短路故障诊断方法，通过在电抗器正下方，独立于电抗器本体、与电抗器线圈同轴方式设置检测线圈，利用检测线圈感应电抗器匝间短路过程中的电压变化。仿真研究和现场试验测试均表明，电抗器发生匝间短路故障时，检测线圈感应电压会发生显著变化，即感应电压波形中出现局部的扰动、尖锐刺突群，类似于间歇性的脉冲信号群，使得波形局部畸变。采用波形过滤的方法获得电压信号的波动信号构成随机样本过程，研究提出了基于数理统计的、准确识别匝间短路过程的 3σ 判据模型和算法。仿真研究和现场试验测试均表明，采用该算法模型能够识别电抗器匝间短路过程，及时判断故障发生和提供早期故障报警。

参考文献

[1] 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.

[2] 蔡林辉. 500 kV变电站35 kV母线并联电抗器烧损原因分析及处理[J]. 电工技术, 2019(5): 66-68.

[3] 布赫, 靳虎, 孟庆天. 35 kV电抗器故障原因分析及处理[J]. 内蒙古电力技术, 2018, 36(6): 59-61.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 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(S1): 105-117.

[8] 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.

[9] 杨振宝, 黄文武, 赵彦珍, 等. 基于ANSYS Maxwell的干式空芯电抗器匝间短路瞬态特性的仿真分析[J]. 实验科学与技术, 2018, 16(6): 50-53.

[10] 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.

[11] 林其友, 刘全峰, 梁艺超, 等. 空心电抗器匝间短路故障监测方法的研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 36(5): 96-100.

[12] ZHAO Y Z, MA X K, YANG J C. Online detection of inter-turn short circuit faults in dry-type air-core reactor[J]. International Journal of Electromagnetics and Mechanics, 2012, 39(1): 443-449.

[13] 杨继超. 干式空心电抗器匝间短路故障在线监测系统的设计[D]. 西安: 西安交通大学, 2012.

编辑 钟晓