

干式电抗器匝间绝缘状态监测技术综述

闻一鸣, 杜怡君, 周 军, 邓 禹

(中国电力科学研究院有限公司 电网环境保护国家重点实验室, 北京 100192)

摘 要:干式电抗器由于其参数稳定、损耗小的优点得到广泛应用。但随着干式电抗器的广泛应用,相关事故也随之频繁出现,其中最为常见的是匝间故障。本文首先简要总结了干式电抗器匝间故障产生的原因和机理,随后从不同的角度综述了近年来国内外干式电抗器匝间绝缘状态监测的研究现状,最后基于研究中存在的不足,对干式电抗器匝间绝缘状态监测技术的发展趋势进行了展望。

关键词:干式电抗器;匝间绝缘;绝缘故障;在线监测技术;离线监测技术

中图分类号:TM47;TM403 **DOI:**10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2024.03.002

Review on detection technology of turn-to-turn insulation condition in dry reactor

WEN Yiming, DU Yijun, ZHOU Jun, DENG Yu

(State Key Laboratory of Power Grid Environmental Protection, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Dry reactors are widely used due to their advantages of stable parameters and small losses. However, with the wide application of dry reactors, related accidents occur frequently, among which the turn-to-turn fault is the most common. In this paper, the causes and mechanisms of turn-to-turn faults of dry reactors were briefly summarized. Then, the research status of turn-to-turn insulation condition monitoring of dry reactors at home and abroad in recent years was reviewed from different perspectives. Finally, based on the deficiencies in the researches, the development trend of turn-to-turn insulation condition monitoring technology for dry reactor was prospected.

Key words: dry reactor; turn-to-turn insulation; insulation fault; online monitoring technology; offline monitoring technology

0 引言

干式电抗器具有损耗小、参数稳定、维护简单等优点,在电力系统中的应用越来越广泛。干式电抗器作为无功补偿设备的组成部分,常工作于室外。对于运行环境复杂的地区,干式电抗器在多应力作用下可能会发生起火、短路等故障^[1]。相关研究表明,干式电抗器的故障中由匝间短路导致的故障大约占70%^[2]。

为了监测匝间故障,研究者们开展了大量研究,S SARKAR等^[3]利用示波器观察电磁绕组的电压波形来实现对发电机转子匝间短路故障的判断。田应富^[4]介绍了干式电抗器故障监测的3种方法,经过分析对比,在电气量监测法、烟感监测法、温感监测法中选择温感监测法作为匝间短路故障的监测方法。薛建之^[5]提出了一种新方法——采用特高频

对干式电抗器匝间的局部放电进行监测。凌云等^[6]在此基础上,提出以磁场变化为监测对象的新方法。该方法采用设置于电抗器端部的等电位自差分结构探测线圈感应电压来反映电抗器的磁场变化,并通过采样数据中心移动均值算法实时拟合电抗器的工作波形,把采样数据和工作波形的离差作为随机过程的监测对象,采用置信区间 t 检验模型实时识别匝间短路故障信号。这些文献对于干式电抗器匝间故障监测技术的进展与不足进行了深入总结分析,清晰地综述了目前的研究方法已经取得的研究成果以及未来的发展方向,但缺少基于不同理论的在线监测研究技术的最新研究进展。

在线监测技术具有实时性好、可靠性高的特点,根据电力系统安全稳定运行的需求,基于不同理论的在线监测技术正在迅速发展。ZHENG L等^[7]提出了一种基于改进卡尔曼滤波器的故障在线监测技术,通过对卡尔曼算法的优化与改进,再对

干式电抗器已有的在线监测方法进行优化改进,极大地减小了误差。ZHU LY等^[8]提出了一种干式空心滤波电抗器匝间短路故障带电监测方法。该方法通过监测电抗器表面振动分布特性的变化来确定和定位匝间短路故障。结果表明该方法能有效定位电抗器匝间短路故障,且短路故障对各频率的振动信号影响明显。

本文简要分析干式电抗器匝间故障的原理,在此基础上主要综述近年来在线监测技术的新发展,并简要介绍相对成熟的离线监测技术的发展状况,最后从目前存在的问题入手讨论干式电抗器匝间短路故障监测技术未来的研究方向。

1 匝间绝缘故障

1.1 干式电抗器匝间绝缘故障原因

干式电抗器匝间短路故障产生的原因可分为以下3类:

(1) 生产制造工艺缺陷

干式电抗器在制造过程中,由于存在缠绕工序,作为导线的铝线表面可能存在毛刺、杂质等污染物,这些微小的污染物可能会导致干式电抗器在运行过程中产生局部放电,进而导致干式电抗器发生匝间短路故障^[9]。

(2) 工作环境条件恶劣

对于长期工作在高温、高湿、高海拔环境下的干式电抗器,由于其绝缘性能劣化的程度与时间成正比,工作时间越长,干式电抗器绝缘性能劣化的程度越大,严重时甚至会导致放电通道形成,最终产生局部放电^[10]。

(3) 在线监测方法不足

在对干式电抗器自身绝缘缺陷以及发生的故障进行监测时,主要的监测方法可分为在线监测、离线监测以及外观监测(直接监测干式电抗器外观变化)等^[11],其中外观监测相对主观并且不能实时反映故障;离线监测虽然可以有效地识别匝间短路故障,但是需要停电操作,过程较为复杂;在线监测具有实时性,但目前在线监测手段较少,导致匝间故障不能及时、快速地被发现,影响干式电抗器的正常运行。

因此,针对干式电抗器匝间短路故障,研究电抗器匝间绝缘状态的监测技术是非常重要的。

1.2 匝间短路故障原理

通过对干式电抗器在实际运行中的故障进行分析,发现产生故障的主要原因是匝间绝缘损坏^[12]。高晓东等^[13]对一起35 kV干式电抗器着火故障进行

分析,通过对故障电抗器外观检查以及返厂解体后测试,最终确定发生故障的原因是导线绝缘损坏导致匝间绝缘失效。张晗等^[14]对南方电网某500 kV变电站内的一起电抗器烧毁故障进行分析,发现引起电抗器故障的直接因素是匝间短路^[15]。

干式电抗器正常运行时,容抗远大于感抗,此时等值电容相当于开路,即干式电抗器线圈可等效于等值电阻与等值电感串联。干式电抗器正常运行的等效电路如图1所示。

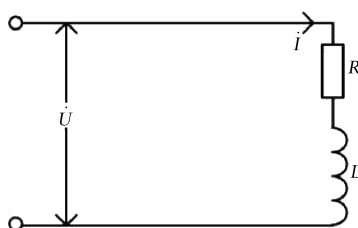


图1 干式电抗器正常运行等效电路
Fig.1 Equivalent circuit of dry reactor during normal operation

干式电抗器发生匝间短路时,绕组线圈中相邻的两匝线圈短接,进而发展成为短路环,如图2所示^[16]。形成短路环后,根据电磁感应原理,短路电流远高于正常运行时的电流,导致故障区域温度异常升高,最终导致起火等故障。

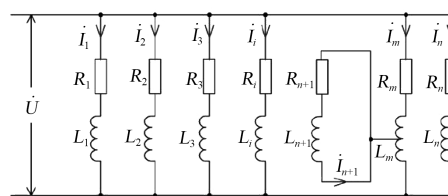


图2 匝间短路故障电路模型
Fig.2 Interturn short circuit fault circuit model

2 匝间绝缘监测技术

2.1 离线监测法

2.1.1 高频脉冲振荡电压法

高频脉冲振荡电压法是通过向电抗器施加特定频率的电压波形,分析流经电抗器的电流来评估电抗器的状态。高频脉冲振荡电压法的原理图如图3所示^[17]。

高频脉冲振荡电压法通过电容C、电抗器的等效电阻R、电抗器的等效电感L三者形成阻尼振荡,通过单向二极管SS、功率二极管MOSFET控制电流单向导通,若电抗器匝间发生短路故障,等效于线圈匝数变少,等效电感减小,则阻尼振荡的频率发生变化。此时,匝间短路所形成的短路环中的短路

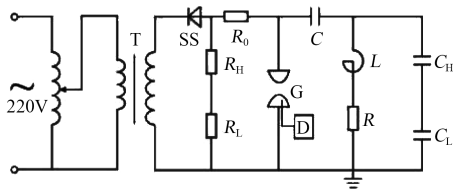


图3 高频脉冲振荡电压法原理图

Fig.3 Schematic diagram of high-frequency pulse oscillation voltage method

电流会导致损耗增加,故谐振电路的电压、电流减小。通过对试验电压下电抗器两端的电压波形与额定电压下的正常波形进行对比,就可以判断电抗器是否存在绝缘缺陷,即可进一步判断是否会发生短路故障^[17]。

F H KIERSTEAD等^[18-19]为了研究电抗器在有并联电阻时的不同电流波形情况,采用高压脉冲发生器对电抗器进行过电压试验。骆晓龙等^[20]通过电路模拟计算,验证了脉冲电压法用于判断电抗器匝间短路故障的有效性。M M A SALAMA^[21]仿真得到计算脉冲电压及稳态电压响应所必要的电路元件的等效表示。结果表明仿真结果与计算所得的脉冲电压分布一致,验证了脉冲电压法的有效性。

宋喜平^[22]在上述高频脉冲振荡电压法的基础上提出了一种脉冲振荡电压发生装置,研究电抗器匝间绝缘缺陷在脉冲振荡电压下的破坏特性。结果表明局部放电导致的匝间绝缘破坏是其击穿电压下降的主要原因。

滕昕颖等^[23]利用脉冲电压法检测干式空心电抗器的匝间绝缘情况,通过计算出干式空心电抗器的电阻、电感参数,建立了试验电路。利用PSpice软件分别仿真了故障点出现在电抗器端部和中部时的情况并搭建了试验电路。结果表明用脉冲电压法并比较电抗器线圈两端的电压或流过线圈的电流波形变化来检查干式空心电抗器的匝间绝缘故障是可行的。

2.1.2 电容电感测量法

电容电感测量法是通过电桥对干式电抗器的直流电阻进行测量,根据Q/GDW 452—2010及Q/GDW 599—2011相关规定^[24-25],当测得干式电抗器的直流电阻相间差值超过2%,或与历年测得的数据误差超过2%;或电抗测量初值差不超过±5%或者相间差超过2%时,通过判断线圈电阻和电感的变化,即可初步对绕组的电气性能进行评估。即三相直流电阻不平衡或者测得的结果与历年测得的数据相差较大时应进行进一步检查。

2.1.3 其他方法

离线监测法还包括瓷瓶探伤法、接地导通测试法、涂料憎水性试验等。瓷瓶探伤法是通过超声波原理监测干式电抗器的绝缘子是否存在绝缘性能的损坏;接地导通测试法即测试干式电抗器的每相支柱绝缘子接地是否符合要求,且下部支撑架或接地线能否形成金属闭合环路;涂料憎水性试验是通过在电抗器表面喷水,直接目测密封表面是否存在浸润现象。上述3种方法相对直观,是针对干式电抗器绝缘子、封装材料而提出的监测方法。

离线监测法可以用于电抗器的预防性试验,也可用于电抗器已损坏时的情形。表1为离线监测法对比分析。从表1可以看出,离线监测法可以直观反映电抗器故障,并可以可靠、有效、准确地监测干式电抗器匝间绝缘的故障情况,但运行成本过高,时效性相对较差。

表1 离线监测技术对比分析

Tab.1 Comparative analysis of offline monitoring technology

方法	优点	缺点
高频脉冲振荡法	监测可靠性高; 实际运用准确有效	运行成本高; 时效性差
电容电感测量法		
瓷瓶探伤法	监测直观性强	缺乏直接性,需通过 现象间接反映
接地导通测试法		
涂料憎水性测试		

2.2 在线监测法

2.2.1 温度监测法

如前文所述,干式电抗器发生匝间短路后,在故障处形成短路环,短路环一旦形成,短路电流会远大于正常运行时的电流,故障处的温度急剧升高。因此,可以通过监测温度变化进行匝间绝缘状态的监测。

为了从温度场出发研究干式电抗器产生匝间故障的原因,于群英等^[26]构建了基于温度场的三维仿真模型,设定模型参数后,经仿真得到干式电抗器的温度场分布特性、运行电压不同时的封装平均温升曲线及最大温升曲线,以及温度场不同时的封装热应力分布特性,为温度监测结果提供了一定的理论分析基础。李心达等^[27]研究了考虑空气流速时的温度场,通过对温度场的分析,得到电抗器的流体场、温度场分布特性。文献[26]与[27]得到的结论一致,可作为温度场仿真分析的理论基础。

(1) 光纤温度监测法

以干式电抗器温度变化为监测对象时,通常是通过各类不同的传感器监测温度的变化。光纤温

度监测法就是通过安装在外部的光纤传感器或埋入式光纤传感器监测由于匝间故障引起的电抗器温度变化。光纤传感器结构如图4所示,光纤传感器采用耐腐蚀抗老化性能好的聚四氟乙烯材料作为封装材料,通过环氧树脂胶固定光纤与封装材料,其中光纤光栅传感器与光纤兼容性良好,可通过光栅等随温度的变化而产生的“波长移位”等现象作为原理,监测干式电抗器的匝间故障。

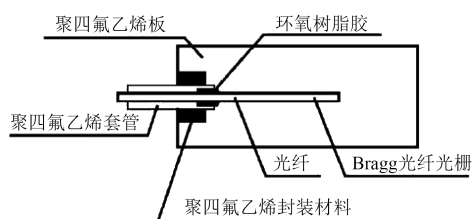


图4 Bragg光纤传感器结构图

Fig.4 The structure diagram of optical Bragg fiber sensor

为了给基于光纤分布式传感的电抗器温度监测提供理论依据,樊明月^[28]通过数值模拟的方法,经过有限元仿真得到电抗器正常及发生匝间短路后的电磁场和温度场的数据。在此基础上,通过对不同的环境温度、气道宽度等建立不同的有限元仿真模型,分析这些因素对电抗器温度变化的影响,得到综合上述因素的温度监测方案,最终基于此方案提出了干式电抗器光纤传感监测法的预警时间和光纤敷设的方法,并运用到实际运行中对电抗器进行检验,验证了此种方法的有效性。

在此基础上,李赢等^[29]通过设计分布式光纤传感器对电抗器的匝间故障进行定位。然后基于传热学和流体力学理论,利用流体-温度场耦合仿真分析电抗器温度场分布,并在此基础上提出一种基于分布式光纤的干式电抗器温升监测方法。同时,提出一种分布式光纤的环状式布局方法,通过此种方法达到故障定位的目的。但是,这种方法测量的是气道的温度,而非绕组的温度,因此结果具有一定的偏差。

与上述分布式光纤不同的是,周延辉等^[30]设计了图5所示埋入式的光纤光栅温度传感器,克服了以往传感器只能贴在电抗器表面的缺点,将此传感器埋入干式电抗器的内部包封表面来测量温度变化,能够较好地实现温度的实时监测。

综上,Bragg光纤光栅被广泛运用于电抗器的温度监测^[31-32]。光纤传感器测温具有不受电磁干扰、耐高温、灵敏度高等优点,但是由于光纤测温的造价高,因此不易运用到实际工程中。

(2) 红外测温法



图5 埋入式光纤传感器安装位置图

Fig.5 The installation location of embedded optical fiber sensor

红外测温技术是通过安装在包封外表面的红外传感器捕捉红外辐射实现对温度变化的监测。姜志鹏等^[33]通过对干式电抗器的温度场进行理论与仿真计算,为红外监测技术提供了理论依据。

覃绍先等^[34]通过设计由红外热像仪、支架、载重云台以及控制单元组成的干式电抗器红外监测装置,进而实现电抗器故障处异常温升的可视化监测,从而实现温度变化的实时监测。但在工程实际应用的过程中,发现存在造价过高的问题,并且投入实际运行后,对故障发生点的温度监测相对来说较难实现。

基于上述温度场理论基础,有晓宇等^[35]利用Fluent仿真计算电抗器正常运行状态的温度场以及故障后的温度场,并分析不同情况下各个包封的不同温度分布,然后通过红外测温技术进行了实际验证。吴冬文^[36]提出了非接触式远红外在线测量并通过红外成像仪测温方法对某35 kV干式电抗器进行温度监测。非接触式远红外在线测量方法通过探头实现温度A/D转化,信号通过无线传输的方式传输至接受单元,进而实现数据的实时监测。

红外测温法具有可靠性高、实用性高以及安装便利等优点,但是由于常用的温度传感器一般安装在包封表面,只能反映局部温升,较难反应整体温升,因此红外测温法的灵敏度不够高,并不能及时地反映故障的发生^[37-38]。

2.2.2 磁场监测法

电抗器发生局部放电时,匝间短路初期为小面积的局部放电,随着故障时间的延长,绝缘层逐渐被破坏,最终形成大面积的局部放电,造成匝间短路故障,这个过程中往往伴随电磁辐射、超声波等现象^[39]。磁场监测法即通过传感器探测匝间短路时故障处周围磁场的变化,从而判断匝间短路故障^[40]。

为了解决以往方法灵敏度不高以及不准确的问题,郑宗安^[41]提出了一种基于磁场探测法的匝间

短路故障监测方法。当存在匝间故障时,首先在电路结构上对电感参数造成影响,进而使得电抗器中的电流及电压参数发生变化,最后表现为故障对空间磁场分布参数的影响。该方法先通过滑动均值平滑采样数据,再根据误差限值控制模型来判断是否发生匝间故障,实现电抗器匝间短路故障在初期和发展期的在线监控和及时准确地故障预警。随后,通过工程实际运用,将所得数据与传统方法所得数据进行对比,验证了该方法的工程实用性。

宋晗等^[42]为了研究匝间轴向、径向的磁场分布规律,设定了“轻、中、重”3种程度的匝间短路故障,以轴向、径向上某点的磁感应强度变化作为因变量,分别与故障程度、故障位置拟合得到监测函数,最终通过故障的算例分析验证了拟合故障监测函数的有效性。经过仿真分析得到控制相对高度一致时某点的故障程度监测函数拟合曲线和控制故障程度一致时的故障相对高度监测函数拟合曲线,分别如图6和图7所示。

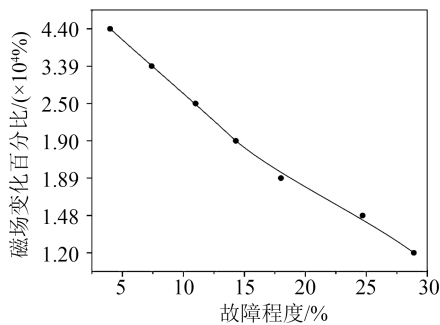


图6 故障程度监测函数拟合曲线

Fig.6 Fault degree monitoring function fitting curve

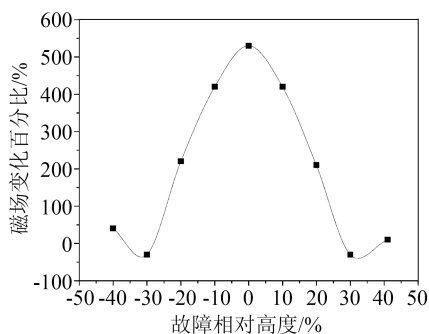


图7 故障相对高度监测函数拟合曲线

Fig.7 Fault relative height monitoring function fitting curve

从图6和图7可以看出,当发生匝间短路的相对高度一致时,磁感应强度的变化量与故障程度成正比。当故障程度一致时,故障发生在中部位置时磁感应强度变化最大,故障发生在上部位置或下部位置时磁感应强度变化相对较小^[42]。所得的结果与通过故障算例验证的结果误差很小,说明所拟合的

故障监测函数是有效的。

计算磁场时,对于线圈间的互感,J T CONWAY等^[43]对于具有平行轴的一般非同轴薄圆形线圈以及椭圆形线圈间的互感,提出了解决方案:薄圆形线圈的解通过椭圆积分表达式的角积分表达。而对于磁场产生的环流,赵海翔^[44]分析了空间闭合环路受电抗器磁场影响所产生的环流,并通过现场试验验证了计算的结果。BAO X H等^[45]分析了磁屏蔽的涡流损耗,并针对多层屏蔽的总涡流损耗采取多种不同组不同层之间组合来计算。

综上所述,通过磁场信号监测电抗器匝间短路故障的原理相对简单,测量平台也较易搭建,但磁场监测法最大的缺点在于很容易受到其他空间磁场信号的干扰,对结果造成很大影响,因此,采用磁场监测法时就需要灵敏度很高的传感系统。

2.2.3 电气参数监测法

电气参数监测法是利用故障前后电抗器自身电气参数如电流、电压、阻抗等变化作为监测对象以判断电抗器匝间是否发生故障^[46-48]。

尹睿涵等^[49]从功率因数的角度考虑问题,通过基本电磁场理论分析了正常工作以及发生匝间短路故障时电抗器功率因数的变化情况。通过 AN-SYS Maxwell建立了有限元模型对所得结论进行仿真验证,验证了通过功率因数法监测匝间短路故障在实际运行中的可行性。

赵春明等^[47]在不同类型和不同位置匝间短路故障下,分析总电流和功率因数的变化量。结果表明由于电抗器内部形成环流,不同故障类型下功率因数的变化量会远大于总电流变化量,因此选择功率因数变化量作为判断对象更容易判别匝间短路故障。不同股匝间短路故障发生在最内层绕组中部时,功率因数变化量最小;相同股匝间短路故障发生在最内层绕组端部时,功率因数变化量最小。总的来说,在判别不同故障时可以计算这两个数值,并以它们为最小变化量作为两种类型匝间短路故障的判据。

2.2.4 频率响应分析法

作为绕组间设备监测的一种常用方法,频率响应分析法由 E P DICK 等^[50]于1978年首次提出。频率响应分析法的主要原理是在电抗器两端施加1个随频率变化的激励信号,相应的会产生1个随激励信号频率变化的响应信号。根据响应信号与激励信号之间的关系绘制可描述绕组状态的频率响应曲线。一般来说,绕组参数改变会影响频率响应曲线的移动轨迹,发生匝间短路故障时会同时改变分

布电容和分布电感^[51]。

频率响应分析法按照激励信号的类型可以分为扫频频率响应法和脉冲频率响应分析法两种。M BAGHERI 等^[52]将扫频信号作为激励信号,制作了绕组短路故障模型并进行不同程度的匝间短路试验,通过改变短路环中电流的大小实现不同匝间短路程度的模拟试验。结果表明随着匝间短路程度不断加深,绕组频率响应曲线会局部向着高频方向移动,主要是因为短路环中存在反向磁场,从而导致等效电感减小。

此外,也有学者将脉冲信号作为激励信号。T D RYBEL 等^[53]为了研究高频信号下的绕组故障情况,从变压器套管末屏注入高频脉冲信号以监测绕组内部的故障情况,随后研制监测装置并开展相应的试验测试。图 8 为套管等效注入图。图 8 中, Z_{grid} 、 I_{grid} 分别为实际电网运行时的高压母线特性阻抗、电流, Z_{tp} 为变压器的特性阻抗,发电机电流 I_{gen} 分流为 I_{inj} 、 I_{shunt} ,套管在实际实施过程中相当于耦合电容,且具有一定的阻抗,此时与试验设备形成阻抗分压,进而可实现将高频脉冲电压信号加载到试验设备中。

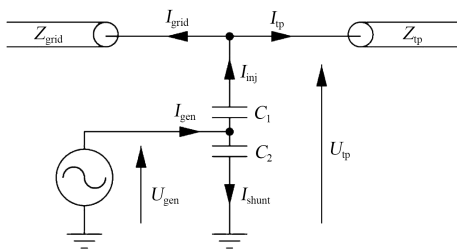


图 8 套管等效注入图

Fig.8 Equivalent injection diagram of the bushing

在对变压器绕组变形故障进行监测时,赵仲勇^[54]针对试验结果认为以脉冲电压作为激励信号的频率响应分析法具有监测时间短、灵敏度高等优点。刘华麟等^[55]同样采用脉冲信号作为激励信号来监测绕组变形,所采用的监测平台频率为 80 MHz,同样得到了很好的分析结果。

综上所述,将扫频信号和脉冲信号作为激励信号均可以很好地监测绕组中出现的故障问题。但将扫频信号作为激励信号的方法成本较高,而将脉冲信号作为激励信号的方法监测时间短、频域范围宽、灵敏度也相对较高。因此,以脉冲信号作为激励信号的方法发展前景更为广阔。

表 2 为在线监测技术 4 种方法的优缺点对比分析。从表 2 可以看出,在线监测技术时效性好,测量可靠性与灵敏性也高,但是部分方法的操作成本相对较高,且借助的工具如传感器等容易受到外界因

素的干扰,时效性和抗干扰性有待提升。

表 2 在线监测技术对比分析

Tab.2 Comparative analysis of online monitoring technology

方法	优点	缺点
温度监测法	响应时间短;可靠性高;测量抗干扰能力强	温度信号易受干扰导致信号变化缓慢;受传感器安装位置影响,实时性差
磁场监测法	灵敏性高;时效性好	磁场干扰严重,导致信号提取难度大
电气参数监测法	操作难度低;监测过程直观、明显	可靠性、实用性差;只有严重故障时才有明显参数变化
频率响应分析法	监测频域范围宽;灵敏度高	监测成本高

3 结束语

干式电抗器作为电力系统一次设备的重要组成部分,其安全稳定运行至关重要。目前关于干式电抗器匝间绝缘故障的研究仍然较少,为了避免电抗器匝间出现绝缘故障的情况,需要开展大量的工作,总体来说可以从以下 5 个方面开展针对性研究:

(1) 离线监测方法可以从优化发现故障时间、增强时效性的角度出发,通过搭建模型实现投运前监测潜在故障,结合脉冲波形等故障前后的变化分析检验匝间绝缘是否发生故障或者发生故障的程度。

(2) 在线监测手段中电气参数监测法更直观,且时效性相对较好,为了改善在线监测技术的时效性,考虑优化电气参数法。经过调研后,电气参数监测法中以介质损耗因数作为特征量时特征量变化量最大,运用于故障检测更加明显。因此,可以从介质损耗因数的角度进行深入研究。

(3) 可以通过在线监测手段与卡尔曼滤波器结合在一起优化现有的在线监测技术。将传统的卡尔曼算法与在线监测技术相融合,形成改进后的算法可以提高故障预测的准确性与时效性。

(4) 在实际运行中,从提高包封绝缘使用寿命、减少成本的角度出发,干式电抗器最内层建议加装包封,同时保证最内层绕组包封有撑条固定。

(5) 设备交接前应进行匝间耐压试验和额定电压下的冲击合闸试验。为了从源头上减小干式电抗器发生匝间绝缘故障的概率,应根据生产厂家提供的合格的温升试验报告,在设备交接投运前开展相关监测试验。

参考文献:

[1] 杨宇斌. 广东地区 10kV 干式空心串联电抗器烧毁故障原因分

- 析及解决方案[D].广州:华南理工大学,2018.
- [2] 张龙.干式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.
- [3] SARKAR S, DAS S, PURKAIT P. Wavelet and SFAM based classification of induction motor stator winding short circuit faults and incipient insulation failures[C]//2013 IEEE 1st International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems. Kolkata, India:IEEE,2013.
- [4] 田应富.变电站干式电抗器故障监测方法研究[J].南方电网技术,2010,4(S1):60-63.
- [5] 薛建之.采用特高频对干式电抗器的局部放电进行监测[J].电世界,2015,56(1):18-19.
- [6] 凌云,赵彦珍,肖利龙,等.高电压大容量干式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.
- [7] ZHENG L, LIU X, KANG Q, et al. Online fault detection of dry reactor based on improved kalman filter[J]. Journal of Sensors, 2022,2022:3947025.
- [8] ZHU L Y, DU Y M, GAO L, et al. Vibration distribution detection method for turn-to-turn short-circuit fault of dry-type air-core filter reactors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2022,37(5):4474-4476.
- [9] 王耀龙.干式空心并联电抗器多起损坏原因分析[J].电气技术,2012(7):55-57.
- [10] 李文杰,许国龙,邵三保,等.高电压大容量干式电抗器匝间短路故障在线监测方法探析[J].电工技术,2020(4):75-76.
- [11] 李达,杨红伟,王庸道,等.高频脉冲振荡法监测干式电抗器匝间绝缘缺陷[J].电力设备管理,2018(10):36-37,41.
- [12] 楚金伟,陈伟民,张良,等.干式电抗器烧损故障分析[J].广东电力,2016,29(7):117-121.
- [13] 高晓东,曲文韬,陈仁刚.35kV干式电抗器故障分析及预防措施[J].电力电容器与无功补偿,2015,36(2):85-88.
- [14] 张晗,蔡延雷.一起500kV变电站干式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.
- [15] 何丽.某500kV变电站35kV干式电抗器故障分析与处理[J].广东科技,2014,23(24):66,62.
- [16] 杨鹏.干式电抗器匝间短路故障监测技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2021.
- [17] 廖敏夫,程显,翟云飞.干式电抗器脉冲振荡匝间绝缘监测系统的仿真与试验[J].高电压技术,2011,37(6):1343-1348.
- [18] KIERSTEAD F H, BEWLEY L V. Shunt resistors for reactors-II [J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers,1934,53(3):411-418.
- [19] KIERSTEAD F H, RORDEN H L, BEWLEY L V. Shunt resistors for reactors[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers,1930,49(3):1161-1177.
- [20] 骆晓龙,张良,王永红,等.干式电抗器匝间绝缘试验方法有效性分析[J].哈尔滨理工大学学报,2014,19(1):74-78.
- [21] SALAMA M M A. A calculation method for voltage distribution in a large AIR core power reactor[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,1981,PAS-100(4):1752-1758.
- [22] 宋喜平.脉冲振荡电压下电抗器匝间绝缘击穿特性[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2016.
- [23] 滕昕颖,王铮,李纯子,等.基于脉冲电压法的干式空心电抗器匝间绝缘试验分析[J].绝缘材料,2010,43(5):67-70.
- [24] 国家电网公司科技部.并联电容器装置(集合式电容器装置)状态评价导则:Q/GDW 452—2010[S].2010.
- [25] 国家电网公司科技部.干式并联电抗器状态评价导则:Q/GDW 599—2011[S].2011.
- [26] 于群英,赵春明,林海丹,等.基于温度场的干式电抗器匝间绝缘破损机理研究[J].高压电器,2022,58(4):94-100.
- [27] 李心达,刘鸣,刘雨桐,等.干式空心滤波电抗器温度场分布研究[J].吉林电力,2021,49(5):26-28.
- [28] 樊明月.干抗温度场有限元仿真及基于光纤传感的测量方法研究[D].北京:华北电力大学,2021.
- [29] 李赢,杨松伟,章建欢,等.基于分布式光纤测温的干式电抗器温升监测方法的研究[J].仪表技术与传感器,2017(2):43-46,50.
- [30] 周延辉,赵振刚,李英娜,等.一种埋入式FBG应变传感器在干式空心电抗器健康监测中的应用[J].光电子·激光,2015,26(3):422-426.
- [31] 刘世钊,张轩,郑欣,等.分布式光纤光栅在电抗器封装层中的应用[J].云南电力技术,2016,44(1):87-89,93.
- [32] 姜志鹏,文习山,王羽,等.特高压干式空心平波电抗器温度场耦合计算与试验[J].中国电机工程学报,2015,35(20):5344-5350.
- [33] 姜志鹏,周辉,宋俊燕,等.干式电抗器温度场计算与试验分析[J].电工技术学报,2017,32(3):218-224.
- [34] 覃绍先,林磊,张兴无,等.干式电抗器在线红外监测装置:CN201420796727.0[P].2015-04-01.
- [35] 有晓宇,穆海宝,董勤晓,等.基于Fluent的35kV干式电抗器温度场仿真分析[J].高压电器,2017,53(8):147-152.
- [36] 吴冬文.35kV干式电抗器温度场分布及红外测温方法研究[J].变压器,2013,50(9):62-65.
- [37] KAKUTA N, NISHIJIMA K, HAN V C, et al. Near-infrared temperature measurement technique for water surrounding an induction-heated small magnetic sphere[J]. Journal of Visualized Experiments,2018,134:e57407.
- [38] 杨青波,魏卓,胡四全,等.红外测温技术在换流阀温度监测中的应用[J].激光与红外,2018,48(1):73-78.
- [39] 王卫东,赵现平,王达达,等.GIS局部放电监测方法的分析研究[J].高压电器,2012,48(8):13-17,23.
- [40] 黄新波.变电设备在线监测与故障诊断[M].北京:中国电力出版社,2010.
- [41] 郑宗安.基于磁场探测法的电抗器匝间短路故障监测法的研究与应用[J].高压电器,2020,56(3):217-223.
- [42] 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监测方法[J].电工技术学报,2019,34(S1):105-117.
- [43] CONWAY J T. Exact solutions for the mutual inductance of circular coils and elliptic coils[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011,48(1):81-94.
- [44] 赵海翔.干式电抗器磁场对空间闭合回路影响的研究[J].电网技术,2000(2):17-19.
- [45] BAO X H, ZHANG C, HU Y P, et al. Combined passive shielding design of magnetic field generated by air-core reactor of power supply of EAST poloidal field[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics,2017,54(3):289-299.
- [46] CHEN J, LI J Y, GE N C. Study on variation law of electrical

- parameters in dry hollow reactor inter-turn short circuit fault[C]//2018 12th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials. Xi'an, China:IEEE,2018.
- [47] 赵春明,王永红,敖明,等.匝间短路干式空心并联电抗器电气参数变化[J].变压器,2019,56(3):31-36.
- [48] LIU H, WANG Y H, GAO Z W, et al. Feasibility analysis of impedance monitoring method for turn-to-turn insulation fault of dry-type air-core reactor[C]//2016 International Conference on Condition Monitorin and Diagnosi. Xi'an, China:IEEE,2016.
- [49] 尹睿涵,丁国成,杨海涛,等.基于功率因数法的干式电抗器匝间短路故障监测研究[J].电力电容器与无功补偿,2020,41(2):80-85.
- [50] DICK E P, ERVEN C C. Transformer diagnostic testing by frequency response analysis[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and systems,1978,PAS-97(6):2144-2153.
- [51] 陈嘉诚.基于IFRA和PSO-SVM的干式电抗器匝间短路故障监测方法研究[D].重庆:重庆大学,2021.
- [52] BAGHERI M, PHUNG B T. Frequency response and vibration analysis in transformer winding turn-to-turn fault recognition [C]//2016 International Conference on Smart Green Thchnology in Electrical and Information System. Denpasar, Indonesia:IEEE, 2016.
- [53] RYBEL T D, SINGH A, VANDERMAAR J A, et al. Apparatus for online power transformer winding monitoring using bushing tap injection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2009,24(3):996-1003.
- [54] 赵仲勇.基于脉冲耦合注入的变压器绕组变形故障监测方法研究[D].重庆:重庆大学,2017.
- [55] 刘华麟,雷潇,王有元,等.变压器绕组微小变形脉冲响应监测系统的设计[J].电测与仪表,2011,48(10):10-13,18.

收稿日期:2023-03-14;修回日期:2023-05-24。

作者简介:闻一鸣(2000-),女(汉族),河南南阳人,硕士生,主要从事高压绝缘材料性能的研究;通信作者:周军(1973-),男(汉族),江苏盐城人,教授级高级工程师,主要从事高电压外绝缘、绝缘子覆冰闪络特性等的研究。