

# 基于行波反射的干式空心电抗器匝间短路故障诊断方法研究

温 刚<sup>1</sup>, 李 楚<sup>1</sup>, 程 林<sup>1,2</sup>, 寻传宝<sup>1</sup>, 王同云<sup>1</sup>, 张国治<sup>3,4</sup>, 鄂宜阳<sup>3,4</sup>

(1. 国网新疆电力有限公司超高压分公司, 新疆 乌鲁木齐 830002; 2. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 湖北 武汉 430074; 3. 湖北工业大学 新能源及电网装备安全监测湖北省工程研究中心, 湖北 武汉 430068; 4. 襄阳湖北工业大学 产业研究院, 湖北 襄阳 441100)

**摘 要:**匝间短路是干式空心电抗器的主要故障类型,目前缺乏有效的离线检测手段以在投运前及时发现潜在的故障。本文基于多导体传输线理论搭建干式空心电抗器绕组的分布参数模型,模拟脉冲信号注入后的折反射过程,研究匝间短路对绕组首、末端响应信号的影响规律。在此基础上提出以响应信号绝对值的积分值构建特征波形,并从中提取特征值对绕组的匝间绝缘状态进行诊断。结果表明:本文基于波过程及多导体传输线理论提出的4组特征值法试验结果与仿真计算结果一致,通过对不同结构电抗器模型进行仿真计算,发现不同结构电抗器发生匝间短路故障时的特征值变化趋势也一致,因此上述方法可应用于不同结构电抗器匝间短路故障的诊断。研究成果可为干式空心电抗器匝间短路故障严重程度和区域定位的诊断提供指导。

**关键词:**干式空心电抗器;匝间短路故障;行波反射法;故障诊断;多导体传输线理论

**中图分类号:**TM855 **DOI:**10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2023.04.013

## Fault diagnosis method of inter-turn short circuit for dry-type air-core reactor based on traveling wave reflection

WEN Gang<sup>1</sup>, LI Chu<sup>1</sup>, CHENG Lin<sup>1,2</sup>, XUN Chuanbao<sup>1</sup>,  
WANG Tongyun<sup>1</sup>, ZHANG Guozhi<sup>3,4</sup>, E Yiyang<sup>3,4</sup>

(1. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., UHV Branch Company, Urumqi 830002, China;  
2. Wuhan NARI Limited Liability Company of State Grid Electric Power Research Institute,  
Wuhan 430074, China; 3. Engineering Research Center for Safety Monitoring of New Energy and Power Grid  
Equipment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China; 4. Xiangyang Industrial Institute of  
Hubei University of Technology, Xiangyang 441100, China)

**Abstract:** Inter-turn short circuit is the main fault type of dry-type air-core reactors. At present, there is a lack of effective offline detection method to discover potential faults in time before dry-type reactors put into operation. Based on the theory of multiconductor transmission line, a distributed parameter model of dry-type air-core reactor winding was built to simulate the refraction and reflection processes after pulse signal injection, and the influence law of inter-turn short circuit on the response signal at the head and end of winding was discussed. On this basis, a characteristic waveform was constructed by the integral value of response signal absolute value, and a characteristic value was extracted to diagnose the inter-turn insulation state of winding. The results show that the test results of four-eigenvalue method proposed in this paper based on the wave process and multiconductor transmission line theory are consistent with the simulation results. Through the simulation calculation of different structural reactor models, it is found that the eigenvalue change trend of different structural reactor is also consistent when the inter-turn short circuit fault occurs. Therefore, the above method can be applied to diagnose the inter-turn short circuit fault of reactors with different structures. The research results can provide guidance for the diagnosis of the severity and regional localization of inter-turn short circuit in dry-type air-core reactor.

**Key words:** dry-type air-core reactor; inter-turn short circuit fault; traveling wave reflection method; fault diagnosis; multiconductor transmission line theory

好、质量轻、成本低等一系列优势,广泛应用于6~1 000 kV不同电压等级,是换流站和变电站的重要设备<sup>[1-2]</sup>。据电力部门不完全统计,在干式空心电抗器的各类故障中,由于匝间短路而造成的故障占比高达70%以上<sup>[3]</sup>。在干式空心电抗器工作时,匝间短路形成的巨大环流会使局部温度急剧上升<sup>[4]</sup>,一方面加速绝缘失效,使短路故障范围持续扩大,形成恶性循环;另一方面也会诱发电抗器起火,给周围设备带来安全隐患<sup>[5]</sup>。因此及时发现绕组匝间短路故障,对干式空心电抗器的检修和维护具有十分重要的现实意义。

目前对于干式空心电抗器匝间短路故障的检测,国内外学者从电、磁、温度等方面入手提出了不同的在线检测方法,如阻抗检测法<sup>[6]</sup>、探测线圈法<sup>[7-8]</sup>、红外检测法<sup>[9-10]</sup>等。在线检测方法可以及时发现设备在运行过程中形成的匝间短路缺陷,一定程度上提升了干式空心电抗器运行的安全性。但是上述方法的准确性还有待提升,如阻抗检测法在短路匝数较少的情况下检测灵敏度不高;探测线圈法、红外检测法存在检测盲区,且需要对每组电抗器装设额外传感器,间接提高了电抗器的检测成本。

离线检测是目前干式空心电抗器常用的现场检测手段,在投运前对匝间短路等缺陷进行预防性检测,可以有效避免挂网后故障引起的各种问题,这方面国内外已有相关标准可以参考<sup>[11-13]</sup>。但是现有标准推荐的方法主要是传统的耐压试验以及直流电阻、线圈电感等电气参数的测量,适用于比较严重的缺陷类型,对于短路匝数较少的情况检测准确性有待提升。

当导体绝缘出现缺陷或故障时,由于分布参数的均匀性发生变化,行波信号沿导体的传播及折反射过程会随之变化,行波反射法就是利用行波信号在绕组中的折反射过程对缺陷状态以及缺陷位置进行判断。目前该方法在电缆故障定位等领域已有一定的应用<sup>[14-15]</sup>。近年来也有学者将行波反射法等新型检测技术应用于变压器匝间短路缺陷的诊断,取得了一定的效果<sup>[16]</sup>。电抗器与变压器同为线圈类设备,理论上行波反射技术同样适用于干式空心电抗器。该方法相比于传统方法,能够更早发现潜在的缺陷,但是对于电抗器中缺陷状态、缺陷位置及其与检测信号的对应关系,还有待进一步研究。

本文针对行波反射技术在电抗器匝间短路诊断方面的应用进行研究,从理论角度分析行波在电

抗器绕组中的传播过程,结合多导体传输线理论搭建干式空心电抗器行波传递的分布参数电路模型,分析脉冲信号注入时,匝间短路对电抗器两端响应信号的影响。在此基础上提出以响应信号积分构建特征曲线并提取特征值,并分析匝间短路的匝数、位置等因素对特征值的影响规律,以期为干式空心电抗器的安全运行提供理论和技术支撑。

## 1 干式空心电抗器绕组波过程的数学模型

### 1.1 行波反射法的基本原理

反射和折射是行波沿导体在不同介质中传播的基本特征。当行波沿传输线传播时,遇到线路参数发生突变,即行波阻抗发生突变,会在其节点上发生折射和反射<sup>[17]</sup>。

图1为行波的折射与反射原理图。由图1可知,入射波 $U_i$ 到达节点N时,由于节点N两侧存在不连续波阻抗 $Z_1$ 和 $Z_2$ ,从而得到折射波 $U_q$ 和反射波 $U_r$ ,表达式分别如式(1)、(2)所示。

$$U_q = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} U_i \quad (1)$$

$$U_r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} U_i \quad (2)$$

借助对折反射信号的检测即可对导体是否存在故障进行判断,并可结合信号到达的时间对故障进行定位。

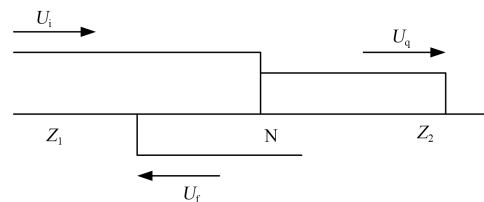


图1 行波的折射与反射

Fig.1 Refraction and reflection of traveling wave

### 1.2 干式空心电抗器绕组的MTL模型

与单导体不同,线圈绕组中的波过程不仅与导体自感、自电容有关,还受到匝间电容、匝间互感等因素影响,过程更加复杂<sup>[18]</sup>。

考虑到干式空心电抗器绕组均匀,线圈的平均直径远大于绕组的径向宽度,因而可以忽略线匝弯曲的影响;线圈的平均线匝尺寸大于线圈的截面尺寸,因此可忽略电压波沿轴向、径向的延时,将电磁波的传播过程近似为TEM波(transverse electromagnetic wave);线匝长度近似相等,且每一根传输线是均匀的。通过上述分析,可以借助多导体传输线理论(multi-conductor transmission line, MTL)对电抗器绕组中的波过程进行分析。

图2为干式空心电抗器分布参数等值电路模型的示意图。图2中,  $R_k$ 、 $L_k$ 、 $C_k$ 分别为第 $k$ 匝导线单位长度的等效电阻、自感以及对地电容;  $M_{k,k+1}$ 为第 $k$ 匝导线与第 $k+1$ 匝导线间的互感;  $C_{k,k+1}$ 为第 $k$ 匝导线与第 $k+1$ 匝导线间的匝间电容。

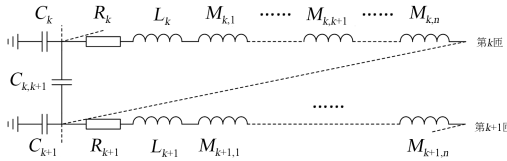


图2 干式空心电抗器绕组分布参数等值电路模型

Fig.2 The equivalent circuit model of dry-type air-core reactor windings distribution parameters

根据MTL理论<sup>[19]</sup>,忽略绝缘中的电导,将多导体系统的单位长度电阻合并至矩阵 $[R]$ ,单位长度自感和互感合并至矩阵 $[L]$ ,单位长度对地电容和匝间电容合并至电位系数矩阵 $[K]$ ,则干式空心电抗器绕组中电压波传播的MTL模型可以写成电报方程的形式,如式(3)所示。

$$\begin{cases} \frac{\partial [u(x,t)]}{\partial x} = -[R][i(x,t)] - [L] \frac{\partial [i(x,t)]}{\partial t} \\ \frac{\partial [i(x,t)]}{\partial x} = -[K] \frac{\partial [u(x,t)]}{\partial t} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中,电位系数矩阵 $[K]$ 中的元素与各分布电容的关系如式(4)~(5)所示。

$$K_{i,i} = \sum_{j=1}^n C_{i,j} \quad (4)$$

$$K_{i,j} = -C_{i,j} \quad (i \neq j) \quad (5)$$

## 2 分布参数计算及MTL模型构建

### 2.1 绕组分布参数计算

分布参数的计算是MTL模型构建的基础,绕组MTL模型所需的参数包括:每匝线圈的分布电阻、自感、匝间互感、对地电容、匝间电容等<sup>[20]</sup>。虽可采用解析法或者经验公式对上述参数进行计算,但上述方法是基于一系列的等效简化得到的,在计算电抗器的分布参数矩阵时可能会出现较大误差。为保证参数计算的准确性,本文采用有限元分析法对MTL模型所需的参数矩阵进行计算。

考虑到电抗器结构的对称性,可将其等效为二维轴对称模型。参考CKGKL-16.7/10-1W户外干式空心电抗器的结构尺寸,建立仿真模型如图3所示。

模型中,线圈内半径和外半径分别为343.0 mm和345.5 mm,线圈高度为410 mm,单匝线圈导体截面积为4.9 mm<sup>2</sup>。为便于分析,将线圈匝数设置为40匝。模型的材料参数设置如表1所示。

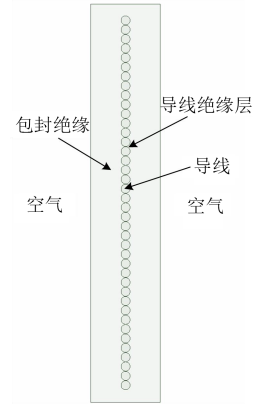


图3 干式空心电抗器单封装有限元仿真模型

Fig.3 Finite element simulation model for single encapsulation of dry-type air-core reactor

表1 主要材料参数

Tab.1 Main material parameters

材料	电导率/(S/m)	相对介电常数	相对磁导率
铝导线	$3.8 \times 10^7$	1.0	1
封装绝缘	0	4.0	1
空气	0	1.0	1
导线绝缘层	0	3.2	1

考虑到电容受频率影响较小,在静电场下采用能量法求取各导体对地电容、匝间电容矩阵,并将其转换为单位长度的电位系数矩阵<sup>[21]</sup>。对于电感及电阻矩阵,需要考虑高频下趋肤效应的影响。根据相关研究,在频率较高的情况下,频率的增加对电感的影响不再明显,因此选取频率为100 MHz进行计算,采用伏安法提取电感及电阻参数<sup>[22-23]</sup>。表2~3中给出了部分导体的电感及电容矩阵。

表2 部分导体电感系数矩阵

Tab.2 Partial conductor inductance coefficient matrix

序号	1	2	3	4	5	6	7
1	1.90	1.69	1.55	1.47	1.42	1.37	1.32
2	1.69	1.89	1.69	1.55	1.46	1.41	1.36
3	1.55	1.69	1.88	1.68	1.54	1.46	1.41
4	1.47	1.55	1.68	1.88	1.68	1.54	1.45
5	1.42	1.46	1.54	1.68	1.87	1.67	1.53
6	1.37	1.41	1.46	1.54	1.67	1.87	1.67
7	1.32	1.36	1.41	1.45	1.53	1.67	1.87

根据仿真结果,上述矩阵均为对角阵。另外,由于导体对电场的屏蔽作用<sup>[24]</sup>,电容值随着线圈间的间隔数增加而急剧减小,在电容矩阵中仅自电容值以及相邻匝间的互电容值较大,其他互电容值较小,可以忽略其影响。为了降低仿真计算时间,在MTL模型中电容矩阵仅考虑自电容以及相邻匝间

表3 部分导体电容系数矩阵  
Tab.3 Partial conductor capacitance coefficient matrix  
pF/m

序号	1	2	3	4	5	6	7
1	0.326	-0.298	-0.009	-0.005	-0.003	-0.002	-0.001
2	-0.298	0.604	-0.291	-0.006	-0.003	-0.001	-0.001
3	-0.009	-0.291	0.605	-0.291	-0.006	-0.002	-0.001
4	-0.005	-0.006	-0.291	0.605	-0.291	-0.006	-0.002
5	-0.003	-0.003	-0.006	-0.291	0.605	-0.291	-0.006
6	-0.002	-0.001	-0.002	-0.006	-0.291	0.605	-0.291
7	-0.001	-0.001	-0.001	-0.002	-0.006	-0.291	0.605

互电容,其余互电容设置为0。

### 2.2 基于MTL的匝间短路仿真模型

采用上述分布参数,在 Matlab/Simulink 软件中利用 distributed parameter line 模块搭建干式空心电抗器绕组的 MTL 模型<sup>[25]</sup>,如图4所示。通过信号发生模块可在绕组模型首端注入如图5所示的脉冲电压信号,并通过检测模块同时测量绕组模型首端和末端的电压波形。

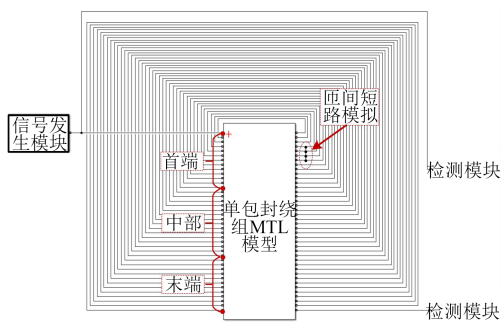


图4 干式空心电抗器绕组匝间短路故障仿真电路

Fig.4 Simulation circuit of dry-type air-core reactor winding when inter-turn short-circuit happens

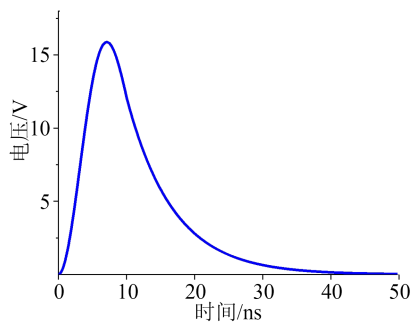


图5 首端注入的脉冲电压信号

Fig.5 Pulse voltage signal injected into head of winding

对于匝间短路,通过不同匝数对应的端子短路来模拟。对于短路位置,可以将绕组进行三等分划分,如对于本文的40匝绕组,发生在1~13匝位置的短路,称为首端短路;发生在14~27匝位置的短路,称为中部短路;发生在28~40匝位置的短路,称

为末端短路。

## 3 仿真实验及结果分析

### 3.1 特征波形的构建

采用建立的仿真模型,分别对正常情况以及绕组首端发生1匝短路时的情况进行仿真。由于行波在线圈中的传递同时涉及沿线传递和匝间传递两种方式,时间尺度拉长以后容易出现匝间传递的回波和沿线传递的回波杂乱叠加的现象,经过多次仿真后对回波波形进行对比分析,选取回波波形规律较为明显的前4 μs进行结果分析。两种情况下在首端检测得到的电压波形如图6所示,在末端检测得到的电压波形如图7所示。从图6~7可以看出,两种匝间绝缘状态下的电压波形变化趋势基本一致,当仅有1匝短路时,响应信号的主要峰值略小于正常情况,且首端信号差异更明显。

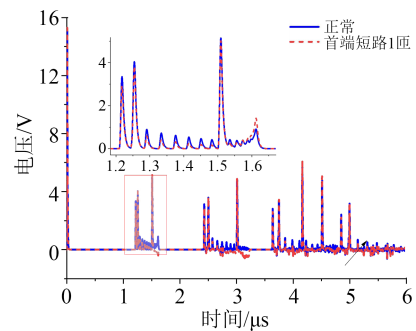


图6 不同状态下电压波形对比(首端信号)

Fig.6 Waveform comparison under different states (head signal)

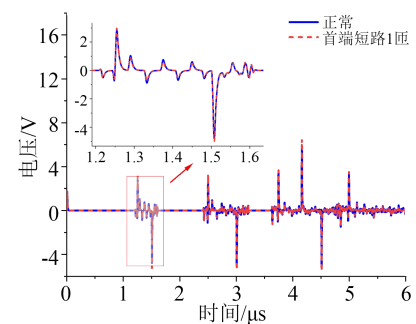


图7 不同状态下电压波形对比(末端信号)

Fig.7 Waveform comparison under different states (end signal)

考虑到短路匝数较少时,波峰之间的微小差别在实际检测中也可能因现场干扰造成误判,借助对波形的绝对值进行积分构建特征波形来突出不同绝缘状态下检测结果的差异。首、末端信号绝对值积分后的特征波形分别如图8和图9所示。

图6和图7在首端和末端获取的回波信号都呈

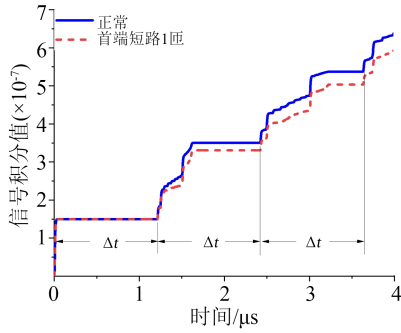


图8 在首端采集到的信号特征波形  
Fig.8 The signal characteristic waveform collected at the head

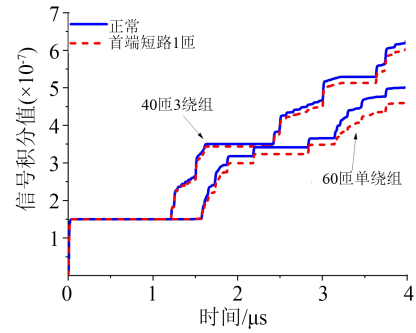


图10 不同结构下绕组首端特征波形  
Fig.10 Characteristic waveform at the head of winding with different structures

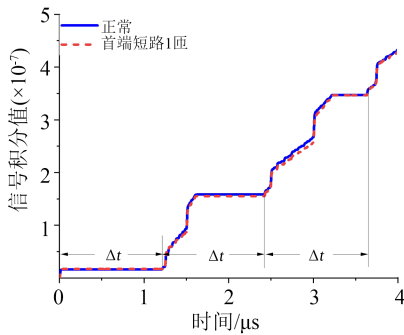


图9 在末端采集到的信号特征波形  
Fig.9 The signal characteristic waveform collected at the end

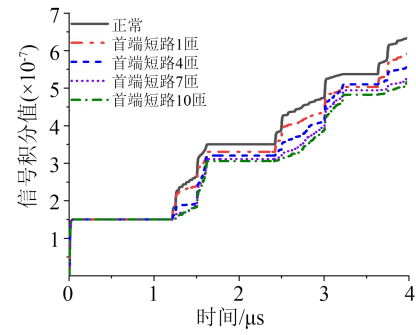


图11 40匝绕组首端的特征波形  
Fig.11 Characteristic waveform at the head of 40-turn winding

现一定的间隔性,对应在图8和图9中即为积分平稳区间,特征波形总体呈现阶梯上升的趋势,且每1级台阶的积分上升区间和平稳区间对应的总间隔时间相同。匝间短路与正常状态下,第1级阶梯信号幅值基本一致,从第2级阶梯开始差异逐渐明显。相比于原始信号,特征波形下匝间短路与正常情况的差异更加明显。

为考察线圈结构的影响,分别计算了3组线圈并联时仅其中1个线圈出现匝间短路的特征波形,以及线圈匝数为60匝单绕组时的特征波形,这两种情况下绕组首端的特征波形如图10所示。从图10可以看出,不同结构下特征波形的变化规律与40匝单绕组时类似,因此后文重点针对40匝单绕组的情况分析匝间短路对特征波形的影响。

### 3.2 故障程度对特性波形的影响

在40匝单绕组的仿真模型绕组首端依次设置1、4、7和10匝短路,绕组首端的特征波形如图11所示。从图11可以看出,随着短路匝数的增加,首端特征波形的幅值呈现下降趋势。

考虑到实际检测时注入的脉冲信号幅值有所差异,如果直接以特征波形幅值的变化来判断匝间是否短路可能会导致误判。而第1级阶梯是由注入的脉冲信号决定,正常情况和匝间短路时的特征波

形在第1级阶梯处基本一致,为避免脉冲信号幅值的影响,以此为基准定义波形的两个特征值,如式(6)~(7)所示。

$$P_1 = A_2/A_1 \tag{6}$$

$$P_2 = A_3/A_1 \tag{7}$$

式(6)~(7)中, $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 分别为特征波形在第1、2、3级阶梯处的稳定值。

图12为绕组首端、中部、末端发生不同匝数匝间短路时绕组首端特征值 $P_{1-s}$ 、 $P_{2-s}$ 以及绕组末端特征值 $P_{1-e}$ 、 $P_{2-e}$ 的变化情况。从图12可以看出:①绕组首端特征值 $P_{1-s}$ 随首端匝间短路匝数的增加逐渐减小,而中部及末端匝间短路匝数对其影响很小;②绕组首端特征值 $P_{2-s}$ 随末端及中部匝间短路匝数的增加而逐渐增大,首端匝间短路匝数对其影响规律不明显;③绕组末端特征值 $P_{1-e}$ 随首端及末端匝间短路匝数的增加逐渐减小,且末端匝间短路时的变化程度更高,中部匝间短路匝数对其影响很小;④绕组末端特征值 $P_{2-e}$ 随首端及末端匝间短路匝数的增加而逐渐减小,随中部匝间短路匝数的增加而增大。

上述4组参数随匝间短路位置以及严重程度的变化规律不同,具体规律如表4所示。从表4可以

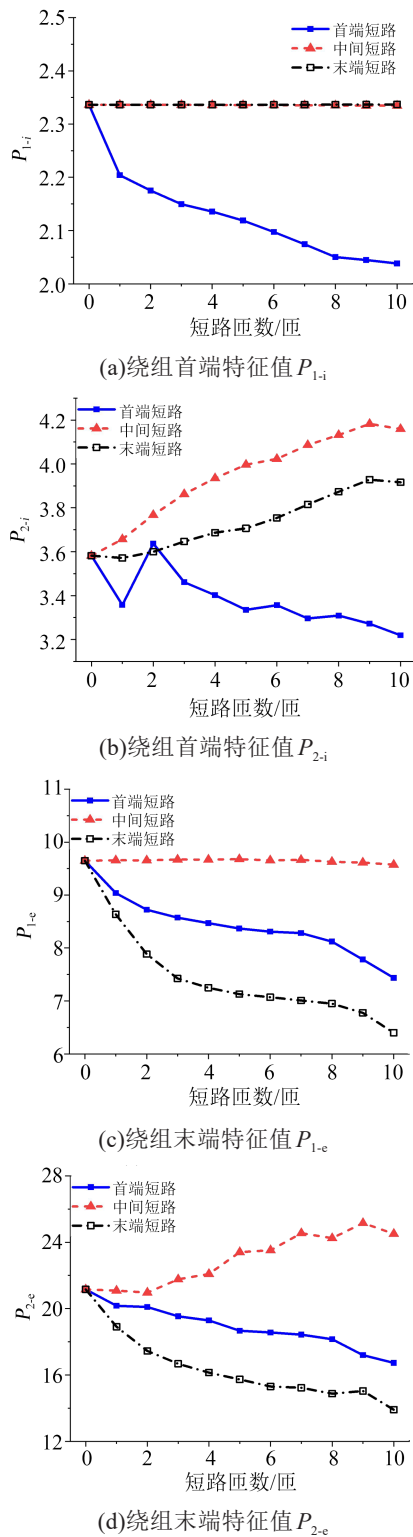


图 12 波形特征值随短路位置及严重程度的变化情况  
Fig.12 Variation of waveform eigenvalues with different short-circuit position and severity

看出,当电抗器在不同部位发生匝间短路故障时,随着故障严重程度的上升,4组参数具有规律性增大或减小的特性,因此可以借助上述4组特征参数的变化规律对不同部位的匝间短路进行综合诊断。

表 4 不同匝间绝缘状态对应的特征值变化

Tab.4 Characteristic value changes of insulation state corresponding to different turns

特征值	首端匝间短路	中部匝间短路	末端匝间短路
$P_{1-i}$	减小	—	—
$P_{2-i}$	—	增大	增大
$P_{1-e}$	减小	—	减小
$P_{2-e}$	减小	增大	减小

采用同样的方法对 60 匝单绕组以及 40 匝 3 绕组的结构在不同绕组绝缘状态下的波形特征值进行了计算,部分计算结果如图 13 所示。从图 13 可以看出,上述情况下首、末端 4 组特征值的变化规律与 40 匝单绕组的变压规律一致,也进一步说明可以利用提出的特征值变化趋势对不同结构的电抗器进行匝间短路诊断。

为了验证本文提出的诊断方法的正确性,参考 CKGKL-16.7/10-1W 户外干式空心电抗器的结构尺寸绕制了 100 匝绕组。分别设置了首端短路 3 匝、中部短路 3 匝和末端短路 3 匝的缺陷,从首端注入脉冲,在首端和末端采集回波信号并绘制特征曲线,结果如图 14 所示。从图 14 可以看出,特征曲线的变化趋势和仿真计算结果一致,呈现阶梯状上升的趋势。

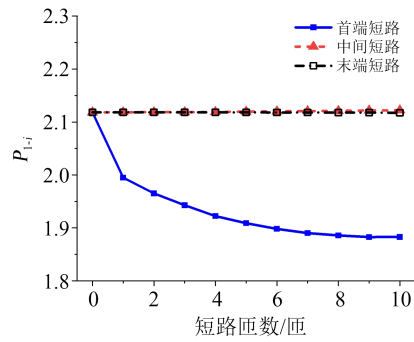
由于在实际测量中每次注入的脉冲会有细微的差别,导致  $A_1$  在幅值上会有细微的差别;同时在实际测量中不可避免的会有外界干扰,导致积分平稳区间的特征波波形也会出现小幅度的上升,故特征值求解所需的  $A_2$ 、 $A_3$  取平稳区上升幅值的中值,求解结果以及变化趋势如表 5 所示。由表 5 可以看出,实验所得特征值的变化趋势与仿真结果一致,可初步验证文中所提方法的可行性与正确性。

### 4 结论

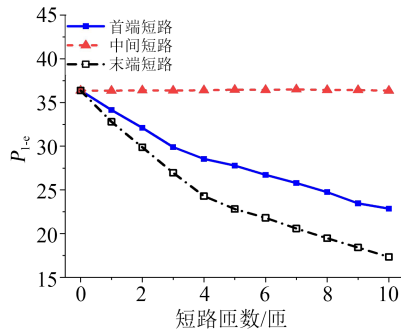
(1)结合波过程理论和多导体传输线理论探讨了行波法应用于电抗器绕组匝间短路检测的可行性,提出可利用匝间短路故障发生前后绕组首、末端响应信号的差异对干式空心电抗器绕组匝间短路故障进行检测。

(2)通过仿真获取了不同绕组绝缘状态下脉冲信号注入后在绕组首、末端产生的响应信号,并提出以信号绝对值的积分值构建特征波形,从而提高匝间短路的可识别性。

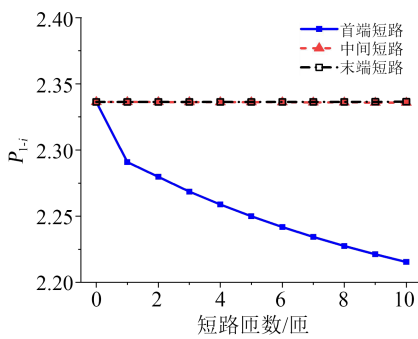
(3)结合特征波形的特点,借助 4 组特征值来避免注入脉冲的影响,客观反映其变化情况。分析了短路部位以及严重程度对特征值的影响规律,提出



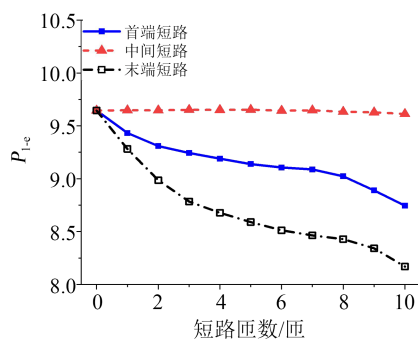
(a) 绕组首端特征值  $P_{1-i}$  (60匝单绕组)



(b) 绕组末端特征值  $P_{1-e}$  (60匝单绕组)



(c) 绕组首端特征值  $P_{1-i}$  (40匝3绕组)

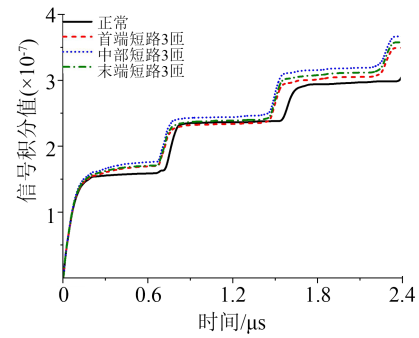


(d) 绕组末端特征值  $P_{1-e}$  (40匝3绕组)

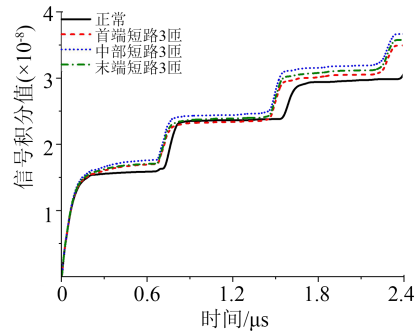
图13 不同绕组结构下特征值的变化情况

Fig.13 Variation of characteristic values under different winding structures

以4组特征值的变化趋势对匝间短路的严重程度和区域定位进行综合诊断。对比仿真计算与实验结果表明,上述方法可适用于不同绕组结构的匝间短路诊断。



(a) 绕组首端特征波形



(b) 绕组末端特征波形

图14 100匝绕组不同位置短路的特征波形

Fig.14 Characteristic waveform of short circuit at different positions of 100-turn winding

表5 100匝绕组不同位置短路特征值

Tab.5 Eigenvalues of short-circuit at different positions of 100-turn winding

特征值	正常	首端3匝短路	中部3匝短路	末端3匝短路
$P_{1-i}$	1.50	1.42 ↓	—	—
$P_{2-i}$	1.88	—	1.98 ↑	1.93 ↑
$P_{1-e}$	2.71	2.20 ↓	—	2.38 ↓
$P_{2-e}$	3.94	3.14 ↓	4.17 ↑	3.39 ↓

参考文献:

- [1] SILVA DE ALMEIDA M L, PERES L M, DOS SANTOS G G. Air-core dry-type shunt reactor protection based on an alternative current alpha plane[J]. IET Generation, Transmission & Distribution,2020,15(1):34-44.
- [2] ENOHYAKET M, EKMAN J. Analysis of air-core reactors from DC to very high frequencies using PEEC models[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2009,24(2):719-729.
- [3] 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.
- [4] 董哲,刘孔瑞,彭辉. 基于二元非线性 Wiener 过程的干式空心电抗器封装材料失效预测[J]. 绝缘材料,2020,53(5):101-106.
- [5] 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.
- [6] 毕大强,王祥珩,王维俭. 基于测量阻抗变化的并联电抗器小匝间短路保护[J]. 电力系统自动化,2005,29(3):57-60.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 周延辉,赵振刚,李英娜,等. 埋入 35kV 干式空心电抗器的光纤布拉格光栅测温研究[J]. 电工技术学报,2015,30(5):142-146.
- [10] 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.
- [11] 全国电力设备状态维修与在线监测标准化技术委员会. 电力设备预防性试验规程:DL/T 596—2021[S]. 北京:国家能源局,2021.
- [12] 全国电力设备状态维修与在线监测标准化技术委员会. 输变电设备状态检修试验规程:DL/T 393—2010[S]. 北京:国家能源局,2010.
- [13] IEEE Power and Energy Society. IEEE standard requirements, terminology, and test code for shunt reactors rated over 500 kVA: IEEE C57.21-2021[S]. New York, US:IEEE,2021.
- [14] 余修勇,肖立业. 基于新型方向判据的多端 MMC-HVDC 故障快速检测方案[J]. 中国电机工程学报,2021,41(24):8437-8446.
- [15] 徐艳春,王泉,吕密,等. 电力设备局部放电定位技术评述[J]. 绝缘材料,2017,50(5):6-11.
- [16] 刘豪,甘昭辉,蒋朝阳,等. 基于 MATLAB 的变压器隐患放电波过程仿真研究[J]. 电工技术,2021,5(43):113-119.
- [17] PEYMAN J, MAJIDS P. A traveling-wave-based protection technique using wavelet/PCA analysis[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*,2010,25(2):588-599.
- [18] 梁贵书,朱晓燕,董华英. 高频下变压器绕组的仿真建模[J]. 高电压技术,2009,35(2):393-398.
- [19] 朱生鸿,秦睿,杨萍,等. 扫频阻抗法检测变压器绕组匝间短路故障[J]. 绝缘材料,2014,47(4):93-96.
- [20] 杨钰,王赞基. 用于特快速暂态仿真的大型电力变压器线圈频域分段建模[J]. 中国电机工程学报,2010,30(10):66-71.
- [21] 许伟,赵争鸣,姜齐荣. 高频变压器分布电容计算方法[J]. 清华大学学报(自然科学版),2021,61(10):1088-1096.
- [22] 阮羚,赵淳,阮江军,等. 基于多导体传输线模型的变压器绕组分布参数计算[J]. 高压电器,2009,45(4):41-46.
- [23] 张跃,刘枰,刘学忠,等. 温度对高压电机用防晕材料非线性电阻特性的影响[J]. 绝缘材料,2021,54(9):86-91.
- [24] POPOV M, VAN S L, PAAP G C, et al. Computation of very fast transient overvoltage in transformer windings[J]. *IEEE Transaction on Power Delivery*,2003,18(4):1268-1274.
- [25] 刘达,彭敏放,万勋,等. 基于行波分析的变压器组匝间短路故障定位[J]. 仪器仪表学报,2015,36(9):2091-2096.

收稿日期:2022-04-01 修回日期:2022-05-25

作者简介:温刚(1971-),男(汉族),四川内江人,高级工程师,主要从事电力系统电网规划,超特高压电网安全风险,电气设备检测、检修,新型电力系统建设,智能电网与新能源的研究,企业战略与管理等工作;通信作者:鄂宜阳(1997-),男(汉族),湖北当阳人,硕士生,主要从事绝缘监测与诊断的研究。