基于功角特性的干式空心电抗器匝间绝缘在线监测技术

黄新波,张 龙,朱永灿,周 岩,邬红霞
(西安工程大学 电子信息学院,陕西 西安 710048)

摘要:干式空心电抗器在长期运行中由于绝缘老化而故障频发,其中匝间短路故障率最高。建立电抗器匝间短路故障等效电路模型,分析了匝间绝缘短路故障引起的电抗器功角变化特性,基于此提出一种基于功角特性的干式空心电抗器匝间绝缘在线监测技术。采用改进中值滤波算法对原始数据进行去噪处理,通过修正理想采样频率法消除了非整周期采样带来的采样误差,利用谐波分析法获取电抗器的功率因数角。试验结果表明,所提技术可以实现对电抗器的少匝匝间绝缘短路故障的有效监测。

关键词:电抗器;干式空心电抗器;匝间短路故障;功率因数角;谐波分析
中图分类号:TM 472 **文献标识码**:A DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.02.021

0 引言

干式空心电抗器具有线性度好、损耗小、噪音低、结构简单、维护方便等优良特性,在电力系统中被广泛应用[1-3]。随着干式空心电抗器的大量投运及长期运行,其故障率不断升高,其中 70%的故障由匝间短路故障导致。

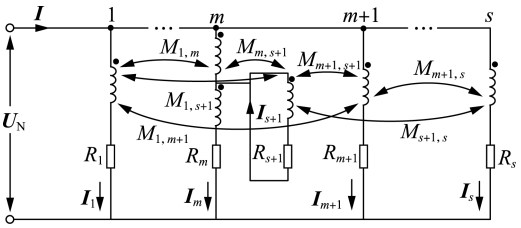
近年来,干式空心电抗器故障频发,严重影响电网的安全、稳定运行,故电抗器在线监测显得尤为重要,目前,电抗器在线监测方法主要有温度监测法、局部放电监测法、磁感应探测线圈法等。其中,温度监测法可以起到故障预警的作用,但灵敏度差,不能快速反映电抗器当前故障信息;局部放电监测法虽然灵敏度高,但受干扰影响,局部放电信号的提取较为困难;磁感应探测线圈法可以快速检测出严重匝间短路故障,但无法实现电抗器不同位置匝间短路故障检测[4-7]。针对现有干式空心电抗器匝间短路故障监测方法存在的缺陷,本文提出一种基于功率因数角(下文简称功角)特性的干式空心电抗器匝间故障在线监测方法,不仅信号易提取,还可以快速检测出电抗器不同位置发生的少匝匝间绝缘故障。

本文以 1 台 CKGL-40/10-6 型串联电抗器作为研究对象,首先建立了电抗器匝间短路故障模型,通过理论分析获得电抗器发生匝间短路故障时功角变小的特性;在此基础上,采用改进中值滤波算法和修正理想采样频率法对数据进行处理,再利用谐波分析法获取电抗器的功角;最后搭建了试验平台,研究电抗器发生不同匝数及不同位置的匝间路故障时功角的变化特性,并验证所提方法的有效性及可行性。

收稿日期:2018-01-19;**修回日期**:2018-11-23
基金项目:陕西省重点科技创新团队计划项目(2014KCT-16);陕西省协同创新计划项目(2014XT-07);陕西省工业科技攻关项目(2016GY-052)
Project supported by the Project of Key Science and Technology Innovation Team of Shaanxi (2014KCT-16), the Collaborative Innovation Project of Shaanxi Province(2014XT-07) and Shaanxi Industrial Science and Technology Tackling Key Problems Fund (2016GY-052)

1 匝间短路故障模型

将干式空心电抗器等效为若干个并联电感支路,假设 s 层并联绕组的第 m 层绕组的第 k 匝发生匝间短路,其等效电路模型如图 1 所示。图中,短路环形成单独的闭合回路,m 层绕组被分为上下串联的 2 段绕组,其等效电阻为 R_{s+1}、自感为 L_{s+1}[7-8]。



R_i— 等效电阻,L_i—自感,$M_{i,j}$— 互感

图 1 干式空心电抗器匝间短路等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of dry-type air-core reactor inter-turn short circuit

闭合回路通过互感 $M_{i,s+1}$ 与其他各并联支路发生联系,2 段串联绕组上的电压为电抗器端电压,短路环上电压为 0。由电磁感应原理可知,虽然短路环两端电压为 0,但短路环内存在感应电流[9-11]。发生短路故障后各支路电压方程如下。

第 i 层线圈的电压平衡方程为:

$$(R_i+\mathrm{j}\omega L_i)\boldsymbol{I}_i+\sum_{l=1,l\neq i}^{s}\mathrm{j}\omega M_{i,l}\boldsymbol{I}_l+\mathrm{j}\omega M_{i,s+1}\boldsymbol{I}_{s+1}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{N}} \quad (1)$$

短路环的电压平衡方程为:

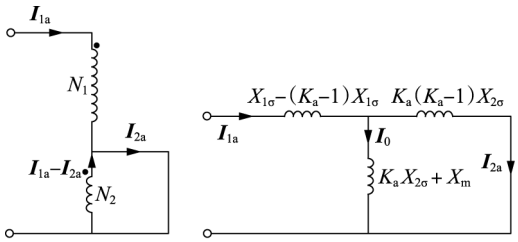
$$(R_{s+1}+\mathrm{j}\omega L_{s+1})\boldsymbol{I}_{s+1}+\sum_{i=1}^{s}\mathrm{j}\omega M_{i,s+1}\boldsymbol{I}_i=0 \quad (2)$$

其中,$\omega=2\pi f$,f 为工频频率。

由式(1)、(2)得电抗器各支路的分布电流 $\boldsymbol{I}_1$、$\boldsymbol{I}_2$、$\boldsymbol{I}_3$、…、$\boldsymbol{I}_s$,对各支路电流进行代数求和,获得流经电抗器的总电流 $\boldsymbol{I}$,根据欧姆定律 $Z=\boldsymbol{U}/\boldsymbol{I}$ 得出等值电阻 R 与等值电抗 X,进而计算出功角 θ。

2 匝间短路监测原理

正常运行时,干式空心电抗器的每相只有单侧绕组,当发生匝间短路故障时,可以将短路部分看作二次侧绕组,相当于1台单相自耦降压变压器副边发生短路故障,如图2(a)所示,其等效电路如图2(b)所示。图中,N_1 为电抗器每相绕组匝数(串联绕组);N_2 为匝间短路匝数(公共绕组);K_a 为变比;$X_{1\sigma}$为串联绕组漏抗;$X_{2\sigma}$为公共绕组漏抗;X_m为励磁电抗;$\boldsymbol{I}_{1a}$ 和 $\boldsymbol{I}_{2a}$ 分别为故障原边和副边电流;$\boldsymbol{I}_0$ 为励磁电流。



(a) 匝间短路故障　　(b) 等效电路

图2 电抗器A相匝间短路故障电路及其等效电路

Fig.2 Circuit of inter-turn fault in phase-A of reactor and its equivalent circuit

正常运行时,电抗器的有功损耗主要有电阻损耗 P_R 和附加损耗 P_{add},频率一定的情况下一般认为附加损耗是某个固定值,其数值不超过30%的电阻损耗,则正常运行时电抗器的有功损耗为:

$$P=UI\cos\theta=P_R+P_{add}=i^2R+P_{add} \tag{3}$$

其中,i 为流过电抗器的总电流。

电抗器故障初期,其等效电抗 X' 变化很小,可以忽略不计,短路环瞬时消耗大量能量,使得电抗器整体有功损耗 P 急剧增加,而电流 i 几乎没有变化,则等效电阻 R 增大,变化为 R',此时电抗器的功角为 θ'。当短路匝数超过5匝时,此时电感变化不可忽略,由图2(b)可知,当发生匝间短路故障时,等效电抗 X 由两部分组成,一部分为公共绕组部分的漏感和励磁电抗的并联,另一部分由串联绕组的漏抗与公共绕组的部分漏抗组成,其中第一部分并联电抗低于电抗器正常运行时的值[12-13],此时等效电抗为 X'',且短路电流更大,等效电阻变为 R'',则功角变化为 θ'',如图3所示。

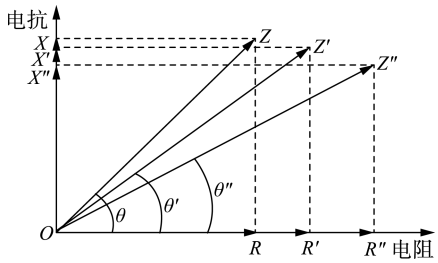


图3 电抗器匝间短路功角变化

Fig.3 Power angle variation of reactor inter-turn short circuit

3 干式空心电抗器监测技术

本文设计的干式空心电抗器匝间短路故障在线监测系统由监测终端和远程监控中心组成,可实时监测并联电抗器和串联电抗器。现以并联电抗器监测为例进行说明,其监测系统见附录中的图A1。

3.1 功角的获取

本文采用谐波分析法获取电抗器的功角,设获取的电抗器的端电压为 $\boldsymbol{U}(t)$,流经电抗器的总电流为 $\boldsymbol{I}(t)$,采用傅里叶级数分解,其表达式为:

$$\boldsymbol{U}(t)=a_{u0}+\sum_{k=1}^{\infty}A_{uk}\sin(2k\pi f_0t+\varphi_{uk}) \tag{4}$$

$$\boldsymbol{I}(t)=a_{i0}+\sum_{k=1}^{\infty}A_{ik}\sin(2k\pi f_0t+\varphi_{ik}) \tag{5}$$

其中,f_0 为基波频率;a_{u0}、a_{i0}分别为电压、电流的直流分量;A_{uk}、A_{ik} 分别为电压、电流的 k 次谐波的幅值;φ_{uk}、φ_{ik}分别为电压、电流的 k 次谐波的初相位。

对采集模拟信号进行A/D转换后得到电压信号和电流信号的离散序列,分别采用 $x(n)$、$y(n)$表示($0\leqslant n\leqslant N-1$,$N$ 为采样点数),对电压序列 $x(n)$ 进行离散傅里叶变换得:

$$X(k)=\sum_{n=0}^{N-1}x(n)\left(\cos\frac{2\pi kn}{N}+\mathrm{j}\sin\frac{-2\pi kn}{N}\right) \tag{6}$$

由式(6)可得电压信号的实部、虚部分别为:

$$X_{Re}(k)=\sum_{n=0}^{N-1}x(n)\cos(2\pi kn/N) \tag{7}$$

$$X_{Im}(k)=\sum_{n=0}^{N-1}x(n)\sin(-2\pi kn/N) \tag{8}$$

通过电压信号的实部、虚部计算出电压信号的相位为:

$$\varphi_{uk}=\arctan(X_{Im}(k)/X_{Re}(k)) \tag{9}$$

同理可以计算出电流信号的相位 φ_{ik},则电抗器的功率因数 $\cos\theta$ 为:

$$\cos\theta=\cos(\varphi_{u0}-\varphi_{i0}) \tag{10}$$

3.2 监测装置的硬件设计

干式空心电抗器在线监测装置采用复杂可编程逻辑器件+数字信号处理器(CPLD+DSP)的结构,如图4所示。其中,CPLD实现高精度的系统频率测量,DSP实现高速数据处理、分析、传输。通过高精

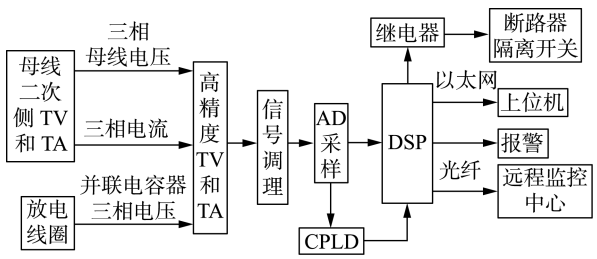


图4 监测终端硬件原理图

Fig.4 Principle diagram of monitoring terminal hardware

度的电压互感器(TV)、电流互感器(TA)对电气量进行采集(并联电抗器模式下主要采集电抗器母线侧三相电压和电流,串联电抗器模式下还需采集并联电容器的三相电压);经信号调理后,采用 AD7656 将模拟信号转化为数字信号输入微控制单元(MCU),实现数据处理及故障逻辑判断,并采用以太网、光纤通信将电抗器运行状态及各电气参数分别上传至上位机及远程监控中心,实现对电抗器运行状态的实时监测。

3.3　系统软件设计

系统启动后,进行系统初始化,判断电抗器是否投运,如果投运则进行系统设置(采样间隔、报警阈值、互感器变比等)与设备管理(设备编号、设备 IP、端号等)。待系统设置和设备管理完成后,上位机向监测终端发送握手命令,握手成功后,监测终端启动监测,并将监测数据实时上传给上位机,上位机接收到前端监测数据后,根据当前运行参数和故障识别算法进行故障判别,若发生故障则发出报警信息,同时绘制当前电抗器运行的各电气参数(电压、电路、有功、无功)及特征参数(功率因数)曲线,并保存数据以便客户进行查询。系统软件设计如图 5 所示。

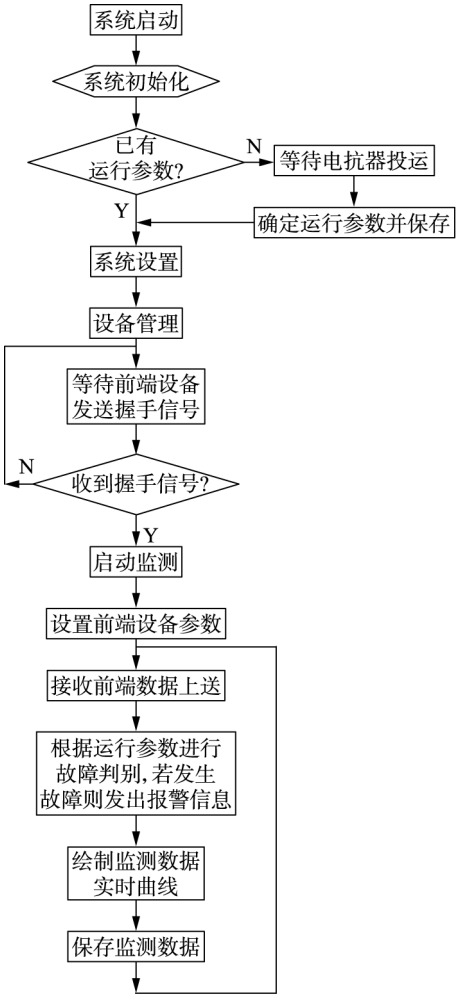


图 5　系统软件框图

Fig.5　Block diagram of system software

4　数字信号处理

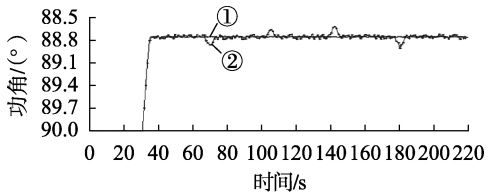
功角测量精度是电抗器匝间短路故障监测的关键,而影响电抗器相角测量精度的主要因素是噪声干扰和电力系统频率波动。因此,本文首先采用中值滤波算法对原始数据进行去噪处理,然后采用修正理想采样频率法对原始采样序列进行改进,以消除电力系统频率波动对功角测量的影响。

4.1　去噪处理

本文采用改进的中值滤波算法对原始数据进行平滑处理。设采样所得电压、电流信号为 $x(n)$,由 $x(n)$ 构造一个新序列 $x_2(n)$。中值滤波算法对原始序列 $x(n)$ 开头和结尾的几个数也进行了滤波,所得序列 $x_2(n)$ 与 $x(n)$ 长度相同,有效地避免了滤波前后数据长度不相等的问题[14-15]。使用中值滤波算法对测量所得的电压和电流信号进行滤波,能够有效滤除信号中的脉冲噪声,减小脉冲噪声对功角测量的影响。改进的中值滤波算法见式(11),滤波前、后的功角测量结果对比如图 6 所示。

$$x_2(m)=\begin{cases}\mathrm{Med}[x(0)\sim x(2m)] & 0\leqslant m\leqslant k-1\\ \mathrm{Med}[x(m-k)\sim x(m+k)] & k\leqslant m\leqslant N-k-1\\ \mathrm{Med}[x(2m-N+1)\sim x(N-1)] & N-k\leqslant m\leqslant N-1\end{cases} \tag{11}$$

其中,Med 为中值滤波。



① —原始曲线，② —滤波后曲线

图 6　滤波前、后功角测量结果的对比

Fig.6　Comparison of measuring result of power factor angle between before and after filtering

4.2　电力系统频率波动影响的消除

监测终端在现场运行时,电网频率是波动的,传统的谐波分析法难以实现整周期采样,会产生频谱泄漏或栅栏效应,导致功角测量存在较大误差。本文采用理想采样频率法[14-16]对中值滤波处理后的采样序列 $x_2(n)$ 进行修正得到新序列 $x(n)$,使 $x(n)$ 近似满足同步采样序列。设:系统的额定周期为 T_0,实际周期为 T,且 1 个周期内采样点数为 N,则修正后采样间隔 $T_S=T/N$,实际的采样间隔 $T_{0S}=T_0/N$,则有 $\Delta T=T_{0S}-T_S$;采样频率序列与理想频率序列在第 1 个采样点处的值相等[16-18]。

$$x(n)=x_a(nT_S)=x_a(nT_{0S}-n\Delta T) \tag{11}$$

利用泰勒公式对式(11)进行线性化可得:

$$x(n)\approx x_a(nT_S)-x_a'(nT_{0S})n\Delta T$$

由于：

$$x_0(n+N)=x_a[(n+N)T_{0S}]=x_a[(n+N)(T_S+\Delta T)]=x_a(nT_{0S}+N\Delta T)$$

可得：

$$x_a'(nT_{0S})\approx\frac{x_a(nT_{0S}+N\Delta T)-x_a(nT_{0S})}{N\Delta T}=\frac{x_a(nT_{0S}+N\Delta T)-x_0(n)}{N\Delta T} \tag{12}$$

将式(12)代入式(11)得到修正公式为：

$$x(n)=x_0+nN^{-1}(x_0(n)-x_0(n+N))$$

本文实验使用的电抗器的真实功角为88.6°，功率因数为2.443%；实验系统电压为220 V，根据西北电力系统实测谐波含量迭加谐波相位参数自拟，主要包含3、5次谐波；在MATLAB环境下进行仿真实验。仿真实验结果发现，当系统频率在±0.2 Hz范围内变化时，非同步采样情况下，与传统谐波分析法相比，采用修正谐波分析法时的测量准确度显著提高，如表1所示。

表1 采用不同算法时的cos δ值的比较

Table 1 Comparison of cos δ between different algorithms

算法	电网频率/Hz	cos δ/%		
		理论计算值	测量值	相对误差
传统谐波分析	50.2	2.443	4.811	96.92
	50.1	2.443	3.790	55.12
	50.0	2.443	2.470	1.10
	49.9	2.443	1.114	54.42
	49.8	2.443	0.077	96.83
修正理想采样+谐波分析	50.2	2.443	2.426	0.69
	50.1	2.443	2.432	0.45
	50.0	2.443	2.449	0.25
	49.9	2.443	2.436	0.29
	49.8	2.443	2.421	0.90

5 试验验证与分析

为了验证本文所提方法的可行性，以并联电抗器在线监测为例，采用3台CKGL-40/10-6型串联电抗器搭建试验平台，进行试验验证、分析。按照附录中的图A1搭建实验平台如附录中的图A2所示。

5.1 并联电抗器故障模拟实验

本文为了模拟电抗器匝间短路故障，在不破坏电抗器原始结构的基础上，将产品包封固化后，在A相电抗器外表面的不同位置加绕几组匝数不同的线圈，每组线圈通过刀闸连接，闭合不同的线圈的刀闸，模拟不同匝数的短路故障，如附录中的图A2所示。电抗器的额定电气参数为：额定容量为40 kvar，额定电压为10 kV，额定电流为88.8 A，额定电抗为5.08 Ω，额定频率为50 Hz。

设备投入运行以后，调节升压器使得母线电压升到0.099 kV，此时流经电抗器的电流为18.8 A，当设备上电运行稳定后，进行手动初始化，获取设备正常运行时的特征值，然后闭合A相电抗中间的1匝线圈闭合以模拟匝间短路故障。此时，电抗器的功率因数变化如图7所示。

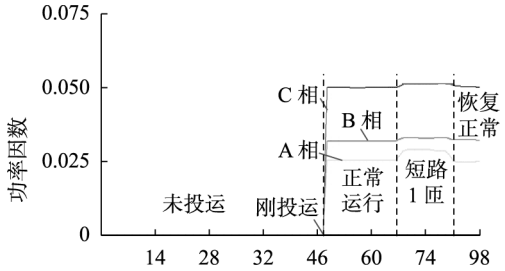


图7 1匝匝间短路功率因数变化

Fig.7 Power factor change of one turn short circuit

由图7可见，正常情况下C相电抗器的功率与A、B相差异较大，这是因为A、B、C三相电抗器不是同一批次的产品，每台电抗器自身的电气参数存在一定的差异，所以对A、B、C三相电抗器施加相同的电压时，每台电抗器的功率和相角存在差异。正常情况下，A、B、C三相电抗器的功率因数如表2所示。

表2 正常状态下的并联电抗器参数

Table 2 Parameters of shunt reactor under normal condition

相别	功角/(°)	有功/kW	无功/kvar	功率因数
A	88.592	0.020	0.814	0.024 57
B	88.154	0.024	0.745	0.032 21
C	87.123	0.039	0.776	0.050 20

当发生匝间短路时，A相电抗器的功率因数突然增大，同时B、C相电抗器的功率因数也有升高但是变化较小，其原因是该实验环境下，A、B、C三相电抗器的连接方式为Y型不接地，所以当A相电抗器发生匝间短路故障时会影响B、C相电抗器。同时A相电抗器的有功功率也显著增加，但是A相电抗器的无功功率没有变化。发生1匝匝间短路故障时并联电抗器的参数如表3所示。从表中可以发现，当电抗器在工频电压下发生少匝匝间短路故障时，电抗器的电感变化非常小，几乎可以忽略不计，但短路环内有功损耗很大，电抗器的等效电阻显著增加，功角减小，功率因数增大。

表3 发生1匝匝间短路故障时的并联电抗器参数

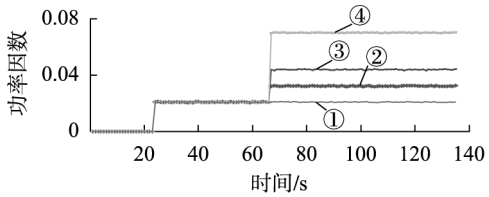
Table 3 Parameters of shunt reactor under one turn short circuit

相别	功角/(°)	有功/kW	无功/kvar	功率因数
A	88.287	0.024	0.811	0.029 89
B	88.033	0.026	0.749	0.034 33
C	87.075	0.040	0.779	0.051 03

5.2 不同匝数短路故障模拟实验

电抗器匝间短路故障是电抗器匝间绝缘性能降低导致的，多匝匝间短路故障是单匝短路故障发展的结果，随着短路匝数的增多，短路环内的短路电流

增大,消耗的有功功率增大,电抗器的等效电阻增大,功角减小,功率因数增大。因此,笔者通过闭合 A 相电抗器上不同匝数的线圈组来模拟电抗器不同程度的匝间短路故障,功率因数变化见图 8。由图 8 可见,正常情况下 A 相电抗器的功率因数约为 0.024,随着短路匝数的增多,电抗器的功率因数不断增大,发生 2 匝匝间短路故障时的功率因数约为 0.043,发生 4 匝匝间短路故障时的功率因数约为 0.07。



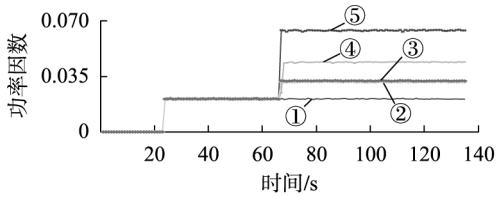
①—正常状态,②—1 匝匝间短路故障
③—2 匝匝间短路故障,④—4 匝匝间短路故障

图 8　不同匝数匝间短路故障情况下的功率因数变化

Fig.8　Change of power factor under short circuit fault with different turns

5.3　不同位置匝间短路故障模拟实验

电抗器功角的变化不仅与短路匝数有关,还与匝间短路故障发生的位置有关,因为电抗器不同位置线圈的磁场强度不同、线圈之间的耦合不同,因此,不同位置的匝间短路故障引起的功角变化不同,笔者通过 A 相电抗器模拟不同位置发生 2 匝匝间短路故障的情况,得到的电抗器功率因数变化规律见图 9。由图 9 可见,当电抗器中部发生匝间短路故障时功率因数变化最大,随着故障位置向电抗器两端移动,电抗器的功率因数逐渐减小,其中在电抗器 2 个端部发生匝间短路故障时功率因数变化最小。



①—正常状态,②—顶端位置故障,③—底端位置故障
④—中上端位置故障,⑤—中间位置故障

图 9　不同位置发生匝间短路故障时功率因数变化

Fig.9　Variation of power factor when inter-turn short circuit occurs in different positions

通过升压将电抗器端电压升至 0.099 kV,流经电抗器的线电流约为 18.8 A,此时模拟电抗器不同位置发生匝间短路故障的情况。结果发现,随着匝间短路故障位置向中间移动,电抗器总电流变化不大,短路环内电流逐渐增大,其中间位置发生匝间短路故障时的短路环电流为电抗器正常运行时电流的 3.8 倍,等值电阻也不断增加,等效电感减小,但变化不大。表 4 中数据是根据第 1 节建立的电抗器故障模型计算的不同位置发生匝间短路故障时,电抗器的总电流、短路环电流、等效电阻和等效电感等详细参数。

表 4　不同位置发生匝间短路故障时的电抗器电气参数

Table 4　Electrical parameters of reactor when inter-turn short circuit occurs in different positions

故障位置	总电流/A	短路环电流/A	等效电阻/Ω	等效电感/mH
顶端	18.910	31.86	0.163 8	16.07
底端	18.897	32.15	0.162 1	16.04
中上端	18.941	40.53	0.224 1	15.96
中间	18.958	71.28	0.325 3	15.87

6　结论

本文设计了干式空心电抗器匝间绝缘在线监测系统,并以并联电抗器监测为例,对其进行了试验验证,获得了干式空心电抗器发生不同匝数及相同匝数、不同位置的匝间短路故障时功率因数变化特性,得出以下结论:

a. 通过对干式空心电抗匝间短路故障进行建模,分析发现电抗器发生匝间短路故障时电抗器的功角减小,功率因数增大;

b. 本文采用理想修正频率采样法,对原始的采样序列进行处理后获得新的修正采样序列,然后再利用谐波分析法,很好地解决了频率波动所引起相角测量的误差的问题,提高了采样精度;

c. 匝数短路故障模拟实验结果表明,该装置能快速检测出电抗器早期少匝匝间短路故障,且电抗器发生匝间短路故障前后功角的变化大小与短路匝数和短路故障位置有关,随着短路匝数的增多或匝间短路故障位置由两端向中间移动,电抗器功角逐渐减小,功率因数不断增大。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

[1] 林其友,刘全峰,梁艺超. 空心电抗器匝间短路故障监测的方法研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2015,36(5):96-100.
LIN Qiyou,LIU Quanfeng,LIANG Yichao. Research of monitoring method for interturn short circuit fault of air-core reactor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2015,36(5):96-100.

[2] 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,2010:32-35.

[3] 黄文武,凌云,吴玉坤,等. 干式空心电抗器匝间短路故障特性的研究[J]. 变压器,2017,54(10):14-18.
HUANG Wenwu,LING Yun,WU Yukun,et al. Research on interturn short circuit fault characteristics of dry-type air-core reactor[J]. Transformer,2017,54(10):14-18.

[4] 王卓,黄新波,邓凸,等. 变压器套管介质损耗在线监测装置[J]. 广东电力,2013,26(4):72-76.
WANG Zhuo,HUANG Xinbo,DENG Tu,et al. On-line monitoring device for dielectric loss of transformer casing[J]. Guangdong Electric Power,2013,26(4):72-76.

[5] 李赢,杨松伟,章建欢,等. 基于分布式光纤测温的干式空心电

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.
LI Ying,YANG Songwei,ZHANG Jianhuan,et al. Study of temperature monitoring method of dry-type air-core reactor based on distributed optical fiber[J]. Instrument Technique and Sensor,2017(2):43-46,50.

[6] 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.
WANG Xiaowen,LIU Yubo. The study based on detecting coil for dry-type shunt reactors fault detection[J]. Shenyang Institute of Engineering(Natural Science),2016,12(4):336-339.

[7] 钱勇,黄成军,江秀臣,等. 基于超高频法的GIS局部放电在线监测研究现状及展望[J]. 电网技术,2005,29(1):40-43,55.
QIAN Yong,HUANG Chengjun,JIANG Xiuchen,et al. Present situation and prospect of ultrahigh frequency method based research of on-line monitoring of partial discharge in gas insulated switchgear[J]. Power System Technology,2005,29(1):40-43,55.

[8] 刘创华,刘梅. 干式空心电抗器匝间绝缘检测技术[J]. 电力系统及其自动化学报,2016,28(增刊):115-118.
LIU Chuanghua,LIU Mei. Detection technology of the interturn insulation of dry-type air-core reactor[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2016,28(Supplement):115-118.

[9] 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.
WANG Zi,LIU Ming,ZOU Jianming,et al. Diagnostic method of dry-type air-core reactorsoverheating fault based on monitoring TVOC[J]. High Voltage Engineering,2017,43(11):3756-3762.

[10] 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.
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.

[11] ZHANG Bin,HUANG Wenwu,LING Yun,et al. Simulation on transient characteristics of inter-turn short circuit fault of dry-type air-core reactor based on ANSYS Maxwell[C]//International Conference on Electrical Engineering and Automation Control(ICEEAC 2017). Nanjing,China:[s.n.],2017:416-422.

[12] 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短路保护[J]. 电力系统自动化,2005,29(3):57-60.
BI Daqiang,WANG Xiangheng,WANG Weijian. Measured impedance based shunt reactor protection against small interturn fault[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(3):57-60.

[13] 张庆莹. 基于阻抗变化量的干式空心电抗器匝间短路监测方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2015.
ZHANG Qingying. Research of dry-type air-core reactor winding short-circuit monitoring method based on impedance variation[D]. Harbin:Harbin University of Science and Technology,2015.

[14] BLASKO V,KAURA V. New mathematical model and control of a three-phase AC-DC voltage source converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2008,12(1):116-121.

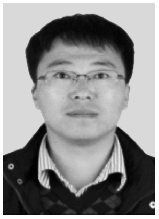
[15] HUANG Xinbo,LI Hongbo,ZHU Yongcan. A short-term ice accretion forecasting model for transmission lines with modified time series analysis by fireworks algorithm[J]. IET Generation,Transmission & Distribution,2018,12(5):1074-1080.

[16] 郭香福,孟波. 空心并联电抗器匝间短路故障电流及其过流保护系统[J]. 变压器,2008,45(11):20-22.
GUO Xiangfu,MENG Bo. Interturn short circuit fault current and overcurrent protective system of shunt reactor with air core[J]. Transformer,2008,45(11):20-22.

[17] 吴彦霖,谭向宇,马仪,等. 电场分布以及匝数偏差暂态电动力对干式空心并联电抗器影响的研究[J]. 高压电器,2016,52(10):99-107.
WU Yanlin,TAN Xiangyu,MA Yi,et al. Study of the influence of electric field distribution and turns deviation transient electrodynamic force on dry-type air-core shunt reactor[J]. High Voltage Apparatus,2016,52(10):99-107.

[18] 冯小华,吴正茂,张承学. 介损在线监测的3种改进谐波分析法的分析[J]. 高压电器,2005,41(1):4-5,9.
FENG Xiaohua,WU Zhengmao,ZHANG Chengxue. Analysis of three modified algorithms for online measurement of tan δ[J]. High Voltage Apparatus,2005,41(1):4-5,9.

作者简介:


黄新波

黄新波(1975—),男,山东海阳人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为智能电网在线监测与故障诊断(**E-mail**:huangxb1975@163.com);

张 龙(1990—),男,陕西神木人,硕士研究生,主要研究方向为智能电网在线监测与故障诊断(**E-mail**:zhanglong_920@163.com);

Online inter-turn insulation monitoring technology based on power angle characteristics for dry-type air-core reactor

HUANG Xinbo,ZHANG Long,ZHU Yongcan,ZHOU Yan,WU Hongxia
(College of Electronics and Information,Xi'an Polytechnic University,Xi'an 710048,China)

Abstract:Dry-type air-core reactors have frequent faults in long-term operation due to insulation aging,among which the inter-turn short circuit fault rate is the highest. The equivalent circuit model of reactor inter-turn short circuit fault is established,and the characteristics of reactor power angle variation caused by inter-turn insulation short circuit fault are analyzed,based on which,an online inter-turn insulation monitoring technology based on power angle characteristics for dry-type air-core reactor is proposed. The improved median filter algorithm is used to denoise the original data,the sampling error caused by non-integer period sampling is eliminated by correcting the ideal sampling frequency method. The power factor angle of reactor is obtained by harmonic analysis. The test results show that the less-coil inter-turn insulation fault of the reactor can be effectively monitored by the proposed technology.

Key words:electric reactors;dry-type air-core reactor;inter-turn short circuit;power factor angle;harmonic analysis

附录

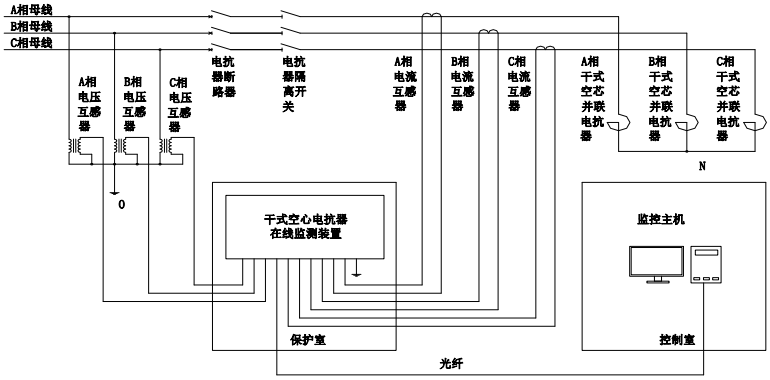


图 A1 并联电抗器在线监测系统

Fig.A1 Online monitoring system of shunt reactor

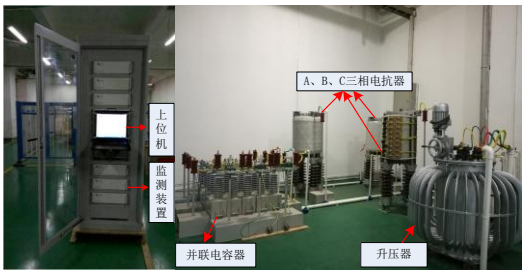


图 A2 干式空心电抗器在线监测试验平台

Fig.A2 Online monitoring test platform for dry-type air-core reactor

图 A3 模拟匝间短路电抗器

Fig.A3 Simulation of inter-turn short circuit reactor