

## 基于相位差变化的干式空心电抗器匝间短路故障 监测研究

王智弘<sup>1,2</sup>, 李威<sup>1,2</sup>, 尹旭<sup>1,2</sup>, 吴世宝<sup>1,2</sup>, 朱家运<sup>3</sup>, 潘志敏<sup>1,2</sup>, 廖婧<sup>1,2</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. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

**摘要:** 干式空心电抗器是电力系统的重要设备之一,其失效破坏形式主要表现为匝间短路,在电抗器匝间短路故障早期,发出有效预警具有重要意义。干式空心电抗器在健康运行时,电压电流相位差为固定值,匝间短路后相位差随之变化,基于此提出一种相位差变化特性的匝间短路在线监测方法。建立匝间短路场-路耦合模型,根据仿真结果整定匝间短路的相位差变化阈值;采用 SOGI-PLL 结合 apFFT 算法实时监测相位差的变化特性;搭建匝间短路在线监测系统,并对其性能进行了测试。结果表明:在线监测系统既能灵敏地发现匝间短路,又能精确地测量相位差,满足了灵敏性和可靠性的要求。研究工作验证了基于电压电流相位差变化的匝间短路监测方法的可行性,并为其实现方法提供了参考。

**关键词:** 干式空心电抗器; 匝间短路; 相位差; 在线监测; SOGI-PLL 结合 apFFT 算法

### Study on Inter-turn Short Circuit Fault Monitoring of Dry-type Air-core Reactor Based on Phase Difference Change

WANG Zhihong<sup>1,2</sup>, LI Wei<sup>1,2</sup>, YIN Xu<sup>1,2</sup>, WU Shibao<sup>1,2</sup>, ZHU Jiayun<sup>3</sup>,  
PAN Zhimin<sup>1,2</sup>, LIAO Jing<sup>1,2</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. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100192, China)

**Abstract:** Dry-type air-core reactor is one of the important equipment in power system, and its failure mode is mainly inter-turn short circuit. It is therefore of great significance to issue effective warning in the early stage of inter-turn short circuit fault. In case of healthy operation of the dry-type air core reactor, the phase difference of voltage and current is a fixed value, and the phase difference changes after inter-turn short circuit. Based on this, a kind of online monitoring method for inter-turn short circuit with phase difference change characteristics is proposed. The field-circuit coupling model of inter-turn short circuit is set up, and the change threshold of phase difference of inter-turn short circuit is set in accordance with the simulation results; SOGI-PLL combined with apFFT algorithm is used to monitor the change characteristics of phase difference in real time. Then, the on-line monitoring system for inter-turn short circuit is set up and its performance is tested. The result shows that the on-line monitoring system can not only find out inter-turn short circuit sensitively, but also measure the phase difference accurately, which meets the requirements of both sensitivity and reliability. The feasibility of inter-turn short circuit monitoring method based on the phase difference change of voltage and current is verified by the research work and a reference for its implementation method is provided.

**Keywords:** dry-type air-core reactor; inter-turn short circuit fault; phase difference; online monitoring; SOGI-PLL combined with apFFT algorithm

收稿日期:2023-02-13

基金项目:国网湖南省电力有限公司科技项目(5216A321N00D)。

0 引言

电抗器在提高电力系统稳定性、增强电网运行安全性以及改善电网调度经济性等方面发挥着重要作用。干式空心电抗器具有电感线性度好、结构简单、噪声低、重量轻以及运维便捷等优点,在电力系统中得到广泛的应用<sup>[1-4]</sup>。干式空心电抗器的线圈由聚酯薄膜绝缘介质包裹,在实际运行中长期耐受电、热、机械等应力的影响,也可能受到操作过电压、高频振荡过电压等的侵袭。所以,匝间短路是干式空心电抗器的主要故障类型,占事故总数的50%以上。运行经验表明:干式空心电抗器匝间短路区域急剧发热使周围绝缘迅速老化,导致匝间短路不断恶化,发展为多匝短路,产生高温引发电抗器冒烟起火,且轴向散热气道又提供了通畅的氧气流通过路,使火势持续蔓延,如果电抗器未能被及时切除,就会对变电站的安全运行造成威胁<sup>[5-8]</sup>。所以,在干式空心电抗器匝间短路故障早期,能够灵敏且准确地发出预警具有重要意义。

为了在干式空心电抗器匝间短路初期提出主动预警,目前国内外采用的在线监测方法主要有探测线圈法<sup>[9-11]</sup>、温度监测法<sup>[12-13]</sup>以及高频脉冲振荡法<sup>[14-15]</sup>等。探测线圈法通过差分探测线圈电压信号的变化来反映电抗器匝间短路时电抗器的磁场变化,进而判断匝间短路故障,需要在电抗器外包封表面安装探测线圈,在现场实施时难度大。温度监测法包括红外测温法和光纤测温法<sup>[16-18]</sup>。红外测温法只能反映电抗器外包封的温度变化,且温度变化滞后于匝间短路,反应不灵敏;光纤测温法需将光纤传感器填进各层包封<sup>[19-23]</sup>,一定程度上破坏了电抗器的本体结构,影响电抗器包封间气道的散热,且增加了制造成本及对制造工艺的要求,对于已出厂运行的电抗器无法另行加装。高频脉冲振荡法基于匝间短路后电抗器电感的变化特性,通过比较电抗器在较低和较高幅值高频振荡电压下,两次电压波形的振荡周期来反映匝间短路,高频脉冲振荡法准确性较高,检测过程不能在线实施,且具有一定的破坏性。

干式空心电抗器在安全运行时,电压电流相位差为固定值,发生匝间短路后,相位差随之变化<sup>[24-25]</sup>,因此可以依据相位差的变化特性进行匝间短路故障的监测与判别。本文以一台BKGKL-200000-35型干式空心电抗器为分析对象。首先,建立电抗器匝间短路的场-路耦合计算模型,对电抗器不同位置匝间短路时的相位差变化进行仿真,确定匝间短

路故障的判别阈值。然后,提出采用二阶广义积分器锁相环(SOGI-PLL)结合全相位FFT(apFFT)算法的相位差在线监测方案,使在线监测系统既能灵敏地发现匝间短路,又能精确地测量相位差。最后,设计并实现了干式空心电抗器匝间短路的在线监测系统,验证所提方法的有效性及其可行性。

1 电抗器匝间短路场-路耦合模型及仿真结果分析

1.1 场-路耦合模型

本文采用35 kV电力系统中最常见的BKGKL-200000-35型干式空心电抗器作为研究对象。电抗器共13包封,其中第1包封与第13包封由4层线圈绕制而成,其余包封均为3层。电抗器内径1 943.0 mm,外径2 902.4 mm,线圈高度2.605 m。其额定电气参数见表1。

| 表1 干式空心电抗器额定电气参数<br>Table 1 Rated electric parameters of dry-type air-core reactor |          |
|------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| 参数                                                                                 | 数值       |
| 额定容量/kvar                                                                          | 20 000   |
| 额定电压/V                                                                             | 20 207.3 |
| 额定电流/A                                                                             | 989.7    |
| 额定电感/mH                                                                            | 65       |
| 额定频率/Hz                                                                            | 50       |

根据电抗器的结构参数,在有限元仿真软件中建立场-路耦合模型。电抗器磁场呈轴对称分布,因此可在圆柱坐标系中建立轴对称几何模型,每层线圈用矩形框来表示。干式空心电抗器发生匝间短路时有短路环产生,在几何模型中仍然用矩形框代替短路环,通过改变短路环矩形框的高度实现不同匝数的短路, $k$ 匝线圈短路对应的短路环矩形框高度为 $kH_m/N_m$ , $H_m$ 、 $N_m$ 分别为第 $m$ 短路层线圈的高度和匝数。干式空心电抗器匝间短路时的几何模型见图1。

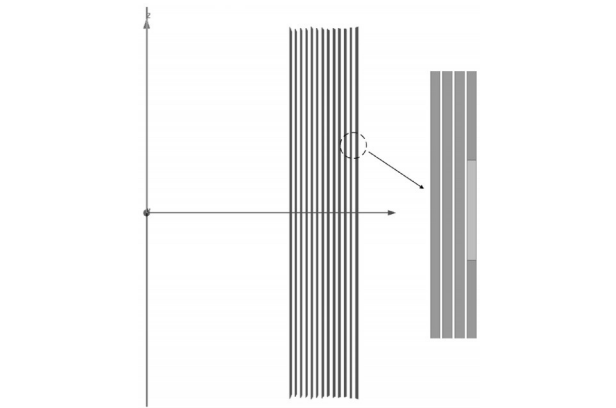


图1 电抗器匝间短路几何模型  
Fig. 1 Geometric model of inter-turn short circuit of reactor

电路模型根据干式空心电抗器的等效电路搭建。假设干式空心电抗器  $n$  层并联线圈中的第  $m$  层发生匝间短路,若第  $m$  层中相邻短路匝之间粘连形成短路环且尚未融化开断,此时的匝间短路等效电路见图 2。匝间短路时出现了由  $R_{n+1}$ 、 $L_{m+1}$  构成的短路环,导致短路层(第  $m$  层)匝数减少并被分成串联的两部分,并且短路环与其他层线圈电感均存在互感  $M_{n+1,j}$ 。

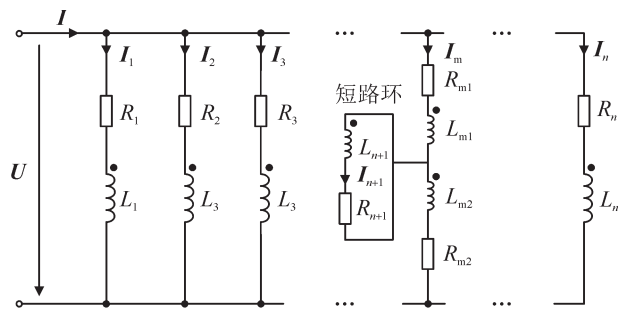


图2 电抗器匝间短路等值电路

Fig. 2 Inter-turn short circuit equivalent circuit of reactor

场路耦合模型将电抗器的电磁场方程与反映匝间短路时线圈连接的等值电路方程联立,其中场和路的计算相互独立,交互迭代。首先对各层线圈的电气参数进行计算,如阻抗、互感等,再求解等效电路中的各支路电流,最后迭代回有限元模型计算空间磁场分布<sup>[26-29]</sup>。

## 1.2 仿真试验结果

为研究干式空心电抗器匝间短路前后,电压电流相位差  $\theta$  的变化特性,通过场路-耦合模型,对不同位置发生匝间短路的情况进行仿真,设定短路匝数为 2,得到相位差变化的仿真结果见图 3-4。

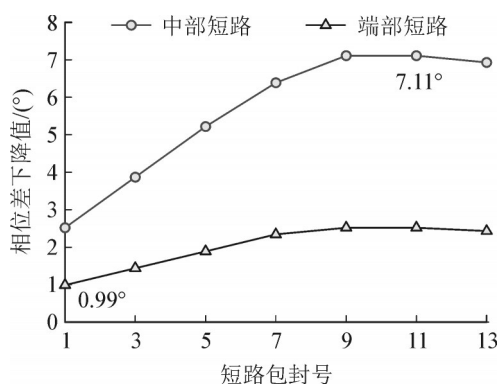


图3 奇数号包封最外层中部和端部不同位置短路的相位差下降值

Fig. 3 Phase difference drop value of short circuit at different positions in the middle and end of the outermost envelope with odd number

可以看出:电抗器在发生匝间短路后,相位差有明显的下降,下降值在  $0.90^\circ \sim 7.11^\circ$  之间。相位差下降的幅度与短路环的位置有关,一般来说,沿电抗器径向短路环距离中心轴线越远,相位差下降值越

大。沿电抗器轴向上下对称的短路环对应的相位差下降值相等,距离电抗器上下中心对称线越近,相位差下降值越大。在第 1 包封最内层线圈端部短路时下降值最小,为  $0.90^\circ$ 。在第 9、11 包封最外层线圈中部短路时下降值最大,为  $7.11^\circ$ 。所以对于 BKGKL-200000-35 型干式空心电抗器,可将  $0.90^\circ$  整定为发生匝间短路的判别阈值,若监测到相位差下降值超过  $0.90^\circ$ ,则可发出匝间短路故障预警。

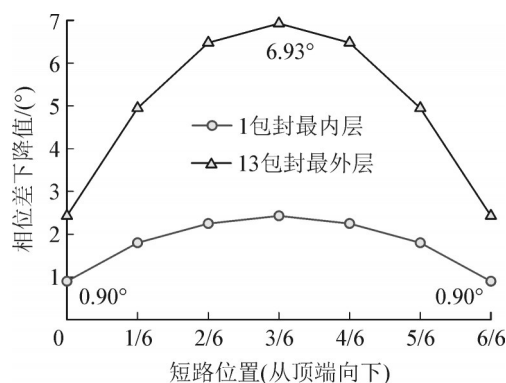


图4 第1、13包封从上到下不同位置短路的相位差下降值  
Fig. 4 The phase difference drop value of the 1st and 13th envelope with short circuits at different positions from top to bottom

## 2 电抗器相位差变化在线监测原理

目前相位差的获取方法主要有过零检测算法<sup>[30-31]</sup>、锁相环(PLL)算法<sup>[32-33]</sup>以及快速傅立叶变换(FFT)算法<sup>[34]</sup>等。过零检测算法通过提取周期性的零点来获取两信号之间的时间差,进而计算相位差;锁相环(PLL)算法构建闭环控制系统,通过内部压控振荡器(VCO)产生参考信号去跟踪输入测量信号的相位;快速傅立叶变换(FFT)算法将输入时域信号转换到频域,幅值谱峰值所在频率位置对应的相位谱值,即为被测量信号的相位。

过零检测算法具有无收敛过程、运算量小和响应速度快的优点,但是在零点的求解过程中极易受到噪声的干扰。而 PLL 算法和 FFT 算法能够克服波形变换算法和过零点检测算法相位差计算结果受过零振荡影响,以及更新速度受工频周期限制的缺陷。

### 2.1 基于 apFFT 算法的相位差获取

FFT 算法不可避免地会产生频谱泄露现象,对原信号加窗截断虽然在一定程度上能改善泄露现象,但作用总归是有限的。而全相位 FFT(apFFT)能有效地缓解频谱泄露,且具有相位不变性,测相结果不受输入信号频率偏移的影响<sup>[35-36]</sup>。apFFT 需要截取输入信号  $x(n)$  的长度为  $2N-1$ ,  $n \in [-N+1, N-1]$ ,对  $x(n)$  加长度为  $2N-1$  的卷积窗  $w_c$ ,再经移位相加得到数据预处理序列  $y(n)$ ,  $n \in [0, N-1]$ ,之后再对  $y(n)$  进行  $N$  阶 FFT 变换。 $N$  阶 apFFT 的基本框图见图 5。

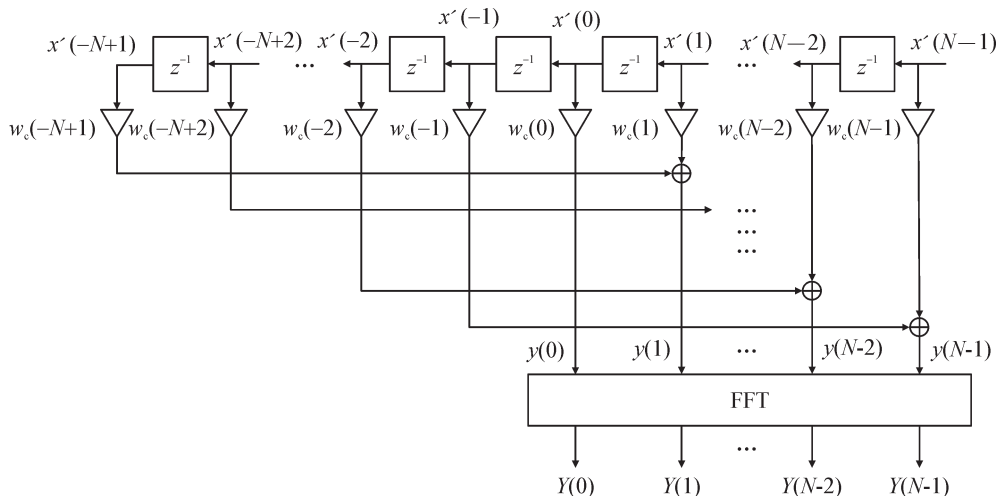


图5  $N$ 阶apFFT的基本框图  
Fig. 5 Basic block diagram of  $N$ -order apFFT

$2N-1$  点的单频复指数信号  $x'(n) = e^{j2\pi k_0 n/N + \varphi_0}$  ( $-N+1 \leq n \leq N-1$ ), 经过前窗  $a$  和后窗  $b$  均为  $N$  点单位矩形窗的截断后, apFFT 的频谱函数可表示为

$$X_{ap}(k) = \frac{e^{j\varphi_0}}{N^2} \times \frac{\sin^2[\pi(k_0 - k)]}{\sin^2[\pi(k_0 - k)/N]} \quad (1)$$

式中:  $k=0, 1, \dots, N-1$ 。从式即可提取出  $x'(n)$  的初相角  $\varphi_0$ 。分别将电抗器端电压和总电流的采样值  $u(n)$ 、 $i(n)$  输入 apFFT 算法, 可得到电压电流的初相角  $\varphi_u$ 、 $\varphi_i$ , 则电压电流相位差可表示为  $\Delta\varphi = \varphi_u - \varphi_i$ 。

## 2.2 基于SOGI-FFT算法的相位差获取

PLL 算法通过闭环相位负反馈将输入、输出信

号间的相位差控制到最小, 一般由鉴相器(PD)、环路滤波器(LF)和压控振荡器(VCO)构成。为了将鉴相器 PD 的输出线性化, 可以选择正交信号发生器(QSG)生成一对正交信号, 然后进行 Park 变换, 见图 6。输入信号的正交量能通过多种方法获取, 如时间延迟和希尔伯特变换等, 但这些方法都有着对频率变化响应速度慢、系统非线性以及对输入电压的滤波性能不佳等缺点, 而基于二阶广义积分器(SOGI)原理实现的 QSG 能够更加快速、准确地进行锁相<sup>[37]</sup>。

SOGI 的两个闭环传递函数  $G_d(s)$  和  $G_q(s)$  分别如式(2)、(3)所示, 波特图见图 7。

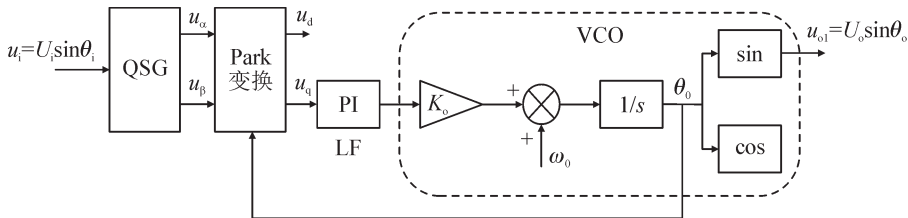


图6 QSG-PLL的结构图  
Fig. 6 Structural diagram of QSG-PLL

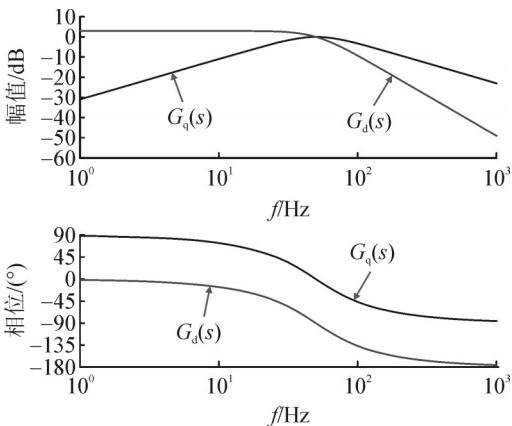


图7 SOGI 闭环传递函数波特图  
Fig. 7 Bode diagram of SOGI closed loop transfer function

$$G_d(s) = \frac{v'}{v}(s) = \frac{k\omega_n s}{s^2 + k\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2)$$

$$G_q(s) = \frac{qv'}{v}(s) = \frac{k\omega_n^2}{s^2 + k\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3)$$

式中:  $q$  为滞后  $90^\circ$  相位偏移系数;  $q = e^{-j\frac{\pi}{2}}$ ;  $\omega_n$  为 SOGI 的谐振频率。

## 2.3 SOGI-PLL 结合 apFFT 算法的相位差在线监测方案

PLL 算法动态响应快, 但测相结果容易掺杂噪声。FFT 算法测相精度高, 但测相结果更新慢。为

了既能及时发现匝间短路初期相位差的下降,并反映短路发展过程中相位差的变化细节,又能对短路前后的稳态相位差实现高精度测量,本文提出 SOGI-PLL 结合 apFFT 算法的相位差在线监测方案。使用灵敏性较强的 SOGI-PLL 监测匝间短路时的相位差突降, SOGI-PLL 监测到相位差突降后,系统切换为可靠性较强的 apFFT 算法实现高精度相位差测量,对 SOGI-PLL 监测相位差突降的正确性进行验证。将 SOGI-PLL 和 apFFT 算法有效地结合起来,实现二者的优势互补。考虑到变电站实际环境中,获取到电抗器二次电压电流的相位值可能会受到互感器角差的影响,需结合现场互感器的类型及准确级,查找互感器“负荷-误差”表,得到当前互感器的角差  $D_{q1}$ 、 $D_{q2}$ ,对相位差结果进行适当的补偿。该匝间短路故障判别流程见图 8。

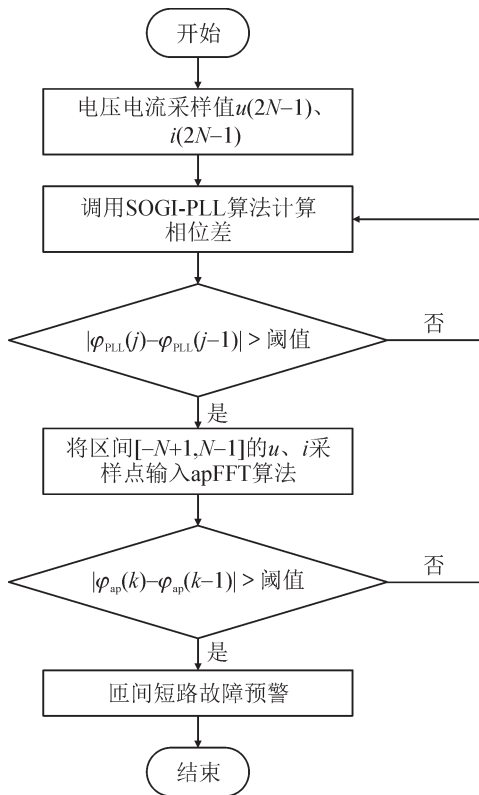


图 8 匝间短路故障判别流程  
Fig. 8 Judgement process of inter-turn short circuit fault

### 3 试验验证与分析

#### 3.1 监测装置设计

本文设计的干式空心电抗器匝间短路在线监测系统的硬件部分以 TMS320F28335 型数字信号处理器(DSP)作为主控和算法处理核心,拓展 AD7606 外部 ADC 作为数据采集核心,拓展 256 K×16 位的 RAM 增大存储空间。该系统具有三相电压电流采

集、相位差实时计算以及与上位机串口通信等功能,可安装于变电站保护室中的电抗器保护屏柜,直接对电抗器二次电压电流采样并实时计算相位差,来完成电抗器匝间短路的在线监测,设置采样率  $f_s$  为 25 kHz,在较高的采样率下对相位差的变化趋势做出灵敏反应,侧重趋势变化判断能在一定程度上削弱变电站互感器角差的不确定性对匝间短路相位差判别阈值整定带来的影响。其总体硬件框图见图 9。

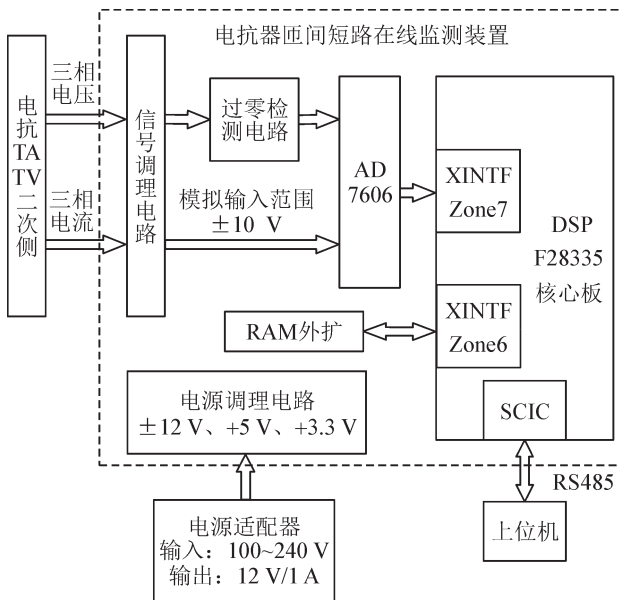


图 9 在线监测系统的总体硬件框图  
Fig. 9 Overall hardware block diagram of online monitoring system

#### 3.2 相位差变化法试验验证

通过仿真对 SOGI-PLL 结合 apFFT 算法的相位突变跟踪性能进行验证,构造幅值 0.8 V 的工频测试原信号,由 SOGI-PLL 结合 apFFT 算法产生的单位工频参考信号进行跟踪,设置在 0.1 s 时原信号发生 0.9°的相位突降,算法的跟踪效果见图 10,可以看出在仿真环境下, SOGI-PLL 结合 apFFT 算法能准确计算出 0.9°的相位突降,并经过 0.03 s 左右的过渡过程完成跟踪,对相位突降的反应灵敏度和跟踪精度较好。

为在最苛刻的情况下测试相位差在线监测系统的性能,将匝间短路判别阈值(0.90°)设定为相位差突变测试值,用信号发生器来产生测试所需的模拟信号。由于信号发生器中信号相位只能精确到  $10^{-1}^{\circ}$ ,所以设置两路  $f=50$  Hz、 $V_m=2$  V 的输入正弦信号,相位差由 89.3°在某时刻突降至 88.4°。在 CCS 中观察 SOGI-PLL 结合 apFFT 算法的相位差突变在线监测效果,见图 11。

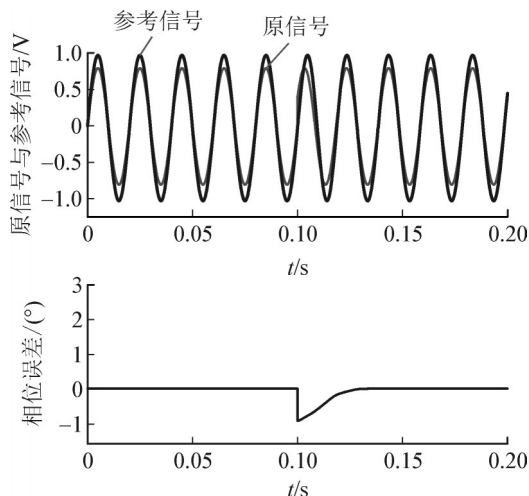


图10 相位突变的算法跟踪仿真结果  
Fig. 10 The tracking results of algorithm of phase mutation

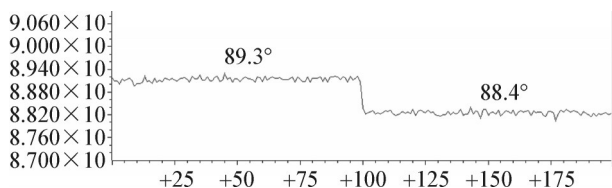


图11 相位差突变监测结果  
Fig. 11 The monitoring results of phase difference mutation

由于将 SOGI-PLL 的采样率  $f_s$  设定为 25 kHz, 即每隔 1/25 ms 就会更新一次相位差计算结果, 所以很快就能获得 200 次相位差结果, 在线监测的灵敏性较高。而  $f_s=1\,024\text{ Hz}$ ,  $N=1\,024$  的 apFFT, 每隔 2 s 才会更新一次相位差计算结果, 在线监测的灵敏性不如 SOGI-PLL。但是, apFFT 的相位差计算结果较 SOGI-PLL 要精确的多, 在线监测的可靠性较高。所以, SOGI-PLL 结合 apFFT 算法的方案能使系统相位差在线监测实现较优的效果。

#### 4 结语

本文提出了一种基于电压电流相位差变化的干式空心电抗器匝间短路在线监测方法, 该方法采用 SOGI-PLL 结合 apFFT 算法实时监测电抗器的相位差变化, 在监测到电抗器运行相位差低于设定阈值时, 发出匝间短路预警。研究过程中, 通过有限元仿真验证了相位差变化监测方法的可行性, 并整定了 BKGKL-200000-35 型电抗器匝间短路的判别阈值, 最后设计并实现了在线监测装置进行试验。试验结果表明, SOGI-PLL 结合 apFFT 算法的相位差在线监测方案, 使在线监测系统既能灵敏地发现匝间短路, 又能精确地测量相位差, 满足了灵

敏性和可靠性的要求。

#### 参考文献

- [1] 王南, 李东, 周志强, 等. 一起 500 kV 高压电抗器内部过热故障案例分析[J]. 变压器, 2022, 59(2): 72-80.  
WANG Nan, LI Dong, ZHOU Zhiqiang, et al. Case analysis of a 500 kV HV reactor internal overheating fault[J]. Transformer, 2022, 59(2): 72-80.
- [2] 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.
- [3] 毛艳, 丁玉剑, 郭贤珊, 等.  $\pm 1\,100\text{ kV}$  PLC 电抗器均压屏蔽装置的结构优化[J]. 高电压技术, 2021, 47(4): 1436-1442.  
MAO Yan, DING Yujian, GUO Xianshan, et al. Structure optimization of grading and shielding devices for  $\pm 1\,100\text{ kV}$  PLC reactor[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(4): 1436-1442.
- [4] 莫文雄, 伍开建, 袁召, 等. 500 kV 高耦合分裂电抗器内部过电压计算与分析[J]. 高电压技术, 2021, 47(2): 495-503.  
MO Wenxiong, WU Kaijian, YUAN Zhao, et al. Calculation and analysis of internal overvoltage of 500 kV high coupled split reactor[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(2): 495-503.
- [5] 李光茂, 李晓, 杜钢, 等. 湿热老化对电抗器匝间过电压耐受特性的影响[J]. 高压电器, 2022, 58(6): 98-103.  
LI Guangmao, LI Xiao, DU Gang, et al. Influence of damp heat aging on withstand characteristics of inter-turn overvoltage of reactor[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(6): 98-103.
- [6] 雷潇, 廖文龙, 白欢, 等. 一起换流站直流滤波器干式电抗器过电压损坏分析[J]. 电瓷避雷器, 2022(4): 140-145.  
LEI Xiao, LIAO Wenlong, BAI Huan, et al. Fault analysis of dry-type air-core reactor of DC filter in hvdc substation caused by overvoltage[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(4): 140-145.
- [7] 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.
- [8] 姜雄伟. 热作用下双层聚酯薄膜空间电荷演变规律及其对击穿特性的影响[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- [9] ZHAO YZ, MA XK, YANG JC. 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.
- [10]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.
- [11]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.
- LING Yun, ZHAO Yanzhen, XIAO Lilong, et al. Online monitoring method for inter-turn short circuit fault of dry-type air-core reactor with high voltage and large capacity [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(5): 1600-1607.
- [12]吴冬文. 35 kV 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.
- WU Dongwen. Temperature field distribution and infrared temperature measurement method research of 35 kV dry-type reactor[J]. Transformer, 2013, 50(9): 62-65.
- [13]周延辉,赵振刚,李英娜,等. 埋入 35 kV 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.
- ZHOU Yanhui, ZHAO Zhengang, LI Yingna, et al. The study on the temperature measurement for the 35 kV dry-type air-core reactor with the embedded optical fiber bragg grating[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(5): 142-146.
- [14]王瑞科,郭香福. 干式空心电抗器匝间绝缘故障对总体特性的影响及检测方法[J]. 变压器,2000,37(9):32-35.
- WANG Ruike, GUO Xiangfu. Influence of turn to turn insulation fault of dry-type air-core reactor on overall characteristics and detection method[J]. Transformer, 2000, 37(9): 32-35.
- [15]曲文韬,赵航,刘洪顺,等. 换流变压器局部放电高频在线监测抗干扰技术研究[J]. 变压器,2022,59(7): 43-50.
- QU Wentao, ZHAO Hang, LIU Hongshun, et al. Anti-interference technology research on high frequency on-line monitoring partial discharge of converter transformer[J]. Transformer, 2022, 59(7): 43-50.
- [16]吕安强,魏伦. 基于光纤传感技术的风机叶片故障检测技术研究进展[J]. 高压电器,2022,58(7):83-92.
- LYU Anqiang, WEI Lun. Research progress on fault detection technology of wind turbine blade based on fiber optic sensor[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(7): 83-92.
- [17]王赞,郑理威,陈忠贤,等. 基于光纤 EFPI 传感器的 GIS 局部放电研究[J]. 电网与清洁能源,2022,38(2):67-75.
- WANG Zan, ZHENG Liwei, CHEN Zhongxian, et al. Research on partial discharge of GIS based on optical fiber EFPI sensor[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(2): 67-75.
- [18]毛颖科,张天枫,朱正一,等.  $\pm 500$  kV 直流换流阀用饱和电抗器温度场与电场仿真研究[J]. 高压电器,2023,60(1):128-135.
- MAO Yingke, ZHANG Tianfeng, ZHU Zhengyi, et al. Simulation study on thermal and electric field of saturable reactor for  $\pm 500$  kV converter valve[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 60(1): 128-135.
- [19]周文文. 外覆绝缘材料的高压开关柜接头温度监测技术[J]. 电器与能效管理技术,2021(4):46-51.
- ZHOU Wenwen. Joint temperature monitoring technology of high voltage switchgear covered with insulation materials[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2021(4): 46-51.
- [20]董青迅,胡祥胜,蒋闵威,等. 基于一阶响应函数的变压器绕组温度测量方法[J]. 变压器,2023,60(1):54-58.
- DONG Qingxun, HU Xiangsheng, JIANG Minwei, et al. Measurement method of transformer winding temperature based on first-order response function[J]. Transformer, 2023, 60(1): 54-58.
- [21]周海滨,张正祥,李文涛,等. 干式变压器不同负载下绕组热点温度的计算与分析[J]. 变压器,2022,59(1):1-5.
- ZHOU Haibin, ZHANG Zhengxiang, LI Wentao, et al. Calculation and analysis of winding hot-point temperature in different loads of dry-type transformer[J]. Transformer, 2022, 59(1): 1-5.
- [22]朱婧,冯国胜,李宏博,等. 基于 Kalman 滤波的充电桩变压器温度预测[J]. 变压器,2022,59(7): 34-37.
- ZHU Jing, FENG Guosheng, LI Hongbo, et al. Temperature prediction of charging pile transformer based on kalman filter[J]. Transformer, 2022, 59(7): 34-37.
- [23]冯保才,张相飞,刘国静,等. 配电变压器电缆接头温升无线无源监测系统[J]. 变压器,2022,59(7): 38-42.
- FENG Baocai, ZHANG Xiangfei, LIU Guojing, et al. Wireless and passive temperature rise monitoring system for distribution transformer cable joint[J]. Transformer, 2022, 59(7): 38-42.
- [24]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 for inter-turn short circuit fault of dry aircore reactor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(2): 150-155.
- [25]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.
- [26]梁振光,唐任远. 采用场路耦合的三维有限元法分析变压器突发短路过程[J]. 中国电机工程学报,2003,23(3):

- 137-140.
- LIANG Zhengguang, TANG Renyuan. Fault simulation of power transformers using 3D finite element model coupled to electric circuit equations[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 137-140.
- [27] 孙宇光, 王祥珩, 桂林, 等. 场路耦合法计算同步发电机定子绕组内部故障的暂态过程[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 136-141.
- SUN Yuguang, WANG Xianghang, GUI Lin, et al. Transient calculation of stator's internal faults in synchronous generator using FEM coupled with multi-loop method[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 136-141.
- [28] 徐干. 基于缩比简化的干式空心电抗器空间磁场分析与预测[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- [29] 刘宏, 梁基重, 牛曙, 等. 匝间短路故障下干式空心电抗器振动特性研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(6): 69-75.
- LIU Hong, LIANG Jichong, NIU Shu, et al. Study on vibration characteristics of dry-type air-core reactor under inter-turn short circuit fault[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(6): 69-75.
- [30] 刘静章, 王进旗, 王凤波. 过零检测技术在相位测量中应用[J]. 电子测量技术, 2004(5): 67-68.
- LIU Jingzhang, WANG Jinqi, WANG Fengbo. Application of past zero detection technology in phase measurement[J]. Electronic Measurement Technology, 2004(5): 67-68.
- [31] 侯其立. 批料流/气液两相流下科氏质量流量计信号处理和数字驱动方法研究与实现[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.
- [32] TEODORESCU R, LISERRE M, RODRIGUEZ P. Grid converters for photovoltaic and wind power systems[M]. John Wiley & Sons, 2011.
- [33] KARIMI-GHARTEMA M. Enhanced phase-locked loop structures for power and energy applications[M]. John Wiley & Sons, 2014.
- [34] PROAKIS J G. Digital signal processing: principles algorithms and applications[M]. Pearson Education India, 2001.
- [35] 王兆华, 黄翔东. 基于全相位谱分析的相位测量原理及其应用[J]. 数据采集与处理, 2009, 24(6): 777-782.
- WANG Zhaohua, HUANG Xiangdong. Principle of phase measurement and its application based on all-phase spectral analysis[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2009, 24(6): 777-782.
- [36] 黄翔东, 王兆华. 全相位FFT相位测量法的抗噪性能[J]. 数据采集与处理, 2011, 26(3): 286-291.
- HUANG Xiangdong, WANG Zhaohua. Anti-noise performance of all-phase FFT phase measuring method[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2011, 26(3): 286-291.
- [37] RODRIGUEZ P, POU J, BERGAS J, et al. Double synchronous reference frame PLL for power converters control[C]// 2005 IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference. [S. l.]: IEEE, 2005: 1415-1421.
- 作者简介:**
- 王智弘(1985—), 男, 高级工程师, 研究方向为特高压设备运维、检修与检测技术。
- 李威(1992—), 男, 工程师, 研究方向为超、特高压设备电气试验与诊断。
- 尹旭(1974—), 男, 高级工程师, 研究方向为特高压设备运维、检修与检测技术。
- 吴世宝(1987—), 男, 高级工程师, 研究方向为特高压设备运维、检修与检测技术。
- 朱家运(1996—), 男, 助理工程师, 通信作者, 研究方向为电力设备状态评价。
- 潘志敏(1973—), 男, 高级工程师, 研究方向为特高压设备运维、检修与检测技术。
- 廖婧(1997—), 女, 助理工程师, 研究方向为超、特高压设备电气试验与诊断。