

基于 DSP 和在线 FCE 高压容性设备绝缘性能在线监测装置 *

刘志坚,赵浩益,梁 宁,何 蔚

(昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650504)

摘要: 目前变电站高压容性设备的绝缘检测大多采用定期、离线的实验检测方法, 针对该方法存在的时效性差、精度不高的问题, 提出一种基于 DSP 的高压容性设备绝缘在线监测装置, 同时结合模糊评价算法实现对数据的实时分析和在线评估。首先针对绝缘性能监测原理和方法, 讨论了快速傅里叶变换 FFT 在谐波分析法中的应用, 通过增加汉宁窗的方法改进传统 FFT 变换存在的局限性; 然后建立基于层次分析法的绝缘性能多参数模糊评价模型; 接着对装置软硬件部分实现作了设计, 包括信号 ADC 采样、FFT 处理、SCI 通信和 HMI 对话等单元; 最后在高压实验室对装置进行测试。结果表明, 装置在实时获取设备运行参数同时实现数据在线分析, 给出设备的绝缘情况, 具有一定的实际应用价值。

关键词: 容性设备; 绝缘监测; 数字信号处理器; 快速傅里叶变换; 模糊分析

中图分类号: TM933 文献标识码: A DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.191046

中文引用格式: 刘志坚,赵浩益,梁宁,等. 基于 DSP 和在线 FCE 高压容性设备绝缘性能在线监测装置[J]. 电子技术应用, 2020, 46(7): 88-93, 98.

英文引用格式: Liu Zhijian, Zhao Haoyi, Liang Ning, et al. On-line monitoring device for insulation performance of high-voltage capacitive equipment based on DSP and on-line FCE[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(7): 88-93, 98.

On-line monitoring device for insulation performance of high-voltage capacitive equipment based on DSP and on-line FCE

Liu Zhijian, Zhao Haoyi, Liang Ning, He Wei

(Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650504, China)

Abstract: At present, the insulation testing of high-voltage capacitive equipment in substation mostly adopts regular and off-line experimental testing methods. And this method has some problems such as poor timeliness and low precision. This paper presents an on-line monitoring device for insulation of high-voltage capacitive equipment based on DSP. Firstly, the application of Fast Fourier Transform(FFT) in harmonic analysis is discussed according to the principle and method of insulation performance monitoring, and the limitation of traditional FFT transform is improved by adding Hanning Window. Then the multi-parameter fuzzy evaluation model of insulation performance based on analytic hierarchy process is established. Then the hardware and software part of the device is designed, including signal ADC sampling, FFT processing, SCI communication and HMI dialogue and other units. Finally, the device is tested in the high-voltage laboratory, and the results show that the device can obtain the running parameters of the equipment in real time and analyze the data online at the same time.

Key words: capacitive device; insulation monitoring; DSP; FFT; FCE

0 引言

变电站设备总量的 40%~50% 属于容性设备, 这些设备的绝缘缺陷和不正常运行都会引发电力系统绝缘事故, 因此在高压容性设备运行过程中实时、准确地监测其绝缘性能是十分重要和必要的。然而根据《电气设备预防性试验规程》定期进行预防性试验仍是目前变电站监测设备的主要方法^[1]。这种定期的、离线的实验检测, 根据试验结果来判断设备工作状况的方法存在时效

性差、预测不高的问题。由单一实验参数判断设备绝缘性能也具有不确定性, 很难获得设备的真实绝缘信息。随着嵌入式技术的发展, 实现设备绝缘监测从传统的定期离线检测向实时在线监测的转变成为电力系统安全运行一个重要方向, 绝缘在线监测技术综合了传感器技术、信号处理技术、数据通信技术等^[2], 具有在线监测、精度高、实时性好的特性, 是目前重要的设备绝缘监测方法。

文献[3]从理论方面提出表征容性设备绝缘性能特征参数之一介质损耗; 文献[4]提出监测介质损耗是反

* 基金项目: 云南省人培基金(KKS201904013)

测控技术与仪器仪表

Measurement Control Technology and Instruments

映高压容性设备绝缘性能的有效手段;文献[5]提出一种测量介质损耗因数的加窗免插值DFT算法;文献[6]提出基于STM32单片机的CVT绝缘性能带电测试分析装置;文献[7]提出一种基于定点型DSP处理器TMS320-F2812的在线监测装置,从软硬件方面介绍其实现方法;文献[8]采用分层监测方案并基于DSPTMS320F2806监测光伏电站的综合直流漏电情况;文献[9]基于GPS授时技术设计了网络同步采集器来测量高压交流输电线路电晕信号;文献[10]基于DHT11等传感器设计了环境参数监测系统。目前大多文献提出的绝缘在线监测装置侧重设备绝缘参数的获取,忽略了参数分析过程的硬件化。在设备绝缘评估方面,文献[11]采用模糊层次分析法作为评价方法框架,解决了评价指标权重的设置和隶属度的确定问题,建立了GIS设备绝缘状态的多类信息融合评价模型;文献[12]和[13]提出基于模糊理论和证据理论的变压器状态评估方法;文献[14]提出一种基于半梯形模型和模糊理论相结合的油浸式电力变压器运行状态的评估策略;文献[15]提出了一种基于模糊层次分析法的变压器状态评估方法。

实现硬件推理是智能设备和智能电网建设发展的基础之一,文献[16]提出将传统的软件模糊推理过程实现硬件模块化,得出了推理速度高于传统软件推理的结论;文献[17]在DSP上实现和优化模糊推理系统,实验证明在硬件上推理结果和软件推理一致。作为在线监测系统的基本部件之一^[18-19],本文在总结以往经验基础上,基于DSP完成高压容性设备绝缘性能在线监测装置设计,同时实现数据实时分析和硬件推理,基于层次分析法的多参数模糊综合评价算法现场评估设备绝缘情况。

1 绝缘性能在线监测装置的原理与方法

1.1 容性设备绝缘性能特征参数

高压容性设备在母线电压 U 的作用下会产生一个全电流 I ,也称泄露电流。该电流可分解为阻性电流 I_R 和容性电流 I_C ,其中 I_C 与 I 之间的夹角 δ 即为设备的介质损耗角(简称介损角),介损角的正切值 $\tan\delta$ 称为介质损耗因数(简称介损值)^[20],如图1所示。

$$\tan\delta=\tan\left|\frac{I_R}{I_C}\right|=\frac{P}{U^2\omega C}=\frac{1}{2\pi f\epsilon\rho} \quad (1)$$

式中, P 为介质损耗功率, C 为电容, ω 为电源角频率, f 为电源频率, ϵ 为介电常数, ρ 为绝缘电阻率。

从式(1)可知,对于确定材料的设备,其 ϵ 值一定,此

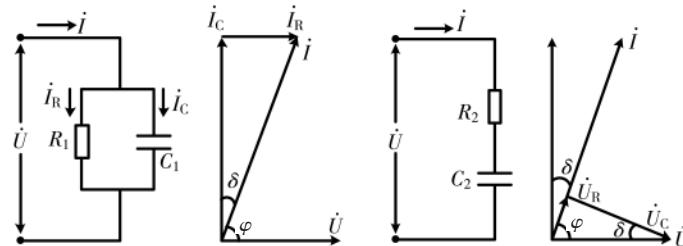


图1 绝缘性能等值电路及其向量图

时如果认为频率 f 基本不变,则介损值 $\tan\delta$ 只与绝缘体的电阻率 ρ 有关,而与绝缘体的形状和尺寸无关,因此在交变电压作用下设备的绝缘性能可以用介损值 $\tan\delta$ 表征^[21]。由图1可知,设备的介损角 δ 与相位角差 φ 互余,所以测量介损值的一般方法是先测量母线电压、泄露电流相位角 φ_u 、 φ_i ,求出相角差 φ ,进而求介质损耗角 δ 和介质损耗值 $\tan\delta$ 。

$$\tan\delta=\tan\left(\frac{\pi}{2}-\varphi\right)=\tan\left[\frac{\pi}{2}-(\varphi_u-\varphi_i)\right] \quad (2)$$

1.2 容性设备绝缘性能监测方法

目前测量高压容性设备 $\tan\delta$ 的方法主要有两种:硬件测量法和软件测量法。本文采用基于谐波分析的软件测量法^[22],克服了硬件测量存在的实现困难、精度不高问题。谐波分析法是一种将三角周期电信号 $U_{(t)}$ 和 $I_{(t)}$ 分解使之成为具有直流分量、基波分量和一系列谐波分量的信号分解方法。如下式:

$$U_t=U_0+\sum_{k=0}^{\infty}U_{km}\sin(k\omega t+\varphi_{ku}) \quad (3)$$

$$I_t=I_0+\sum_{k=0}^{\infty}I_{km}\sin(k\omega t+\varphi_{ki}) \quad (4)$$

式中, U_0 、 I_0 为信号直流分量; U_{km} 、 I_{km} 为信号 k 次谐波幅值; φ_{ku} 、 φ_{ki} 为 k 次谐波初相角; $k=1$ 时即为原始信号的基波分量信息^[23]。 $\tan\delta$ 计算过程如下:

$$U_{1(t)}=U_{1m}\sin(\omega t+\varphi_{lu}) \quad (5)$$

$$I_{1(t)}=I_{1m}\sin(\omega t+\varphi_{li}) \quad (6)$$

$$\delta=\frac{\pi}{2}-(\varphi_{lu}-\varphi_{li}) \quad (7)$$

$$\tan\delta=\tan\left[\frac{\pi}{2}-(\varphi_{lu}-\varphi_{li})\right] \quad (8)$$

1.3 快速傅里叶变换的应用及改进

快速傅里叶变换(FFT)是目前分析平稳随机信号谐波信息的理想方法,利用FFT可以快速实现信号的离散傅里叶变换(DFT)^[24],建立信号的时频关系。在数字信号处理中,利用ADC采样单元将时域信号 $x(t)$ 离散为数字信号 $x(n)$,经过FFT变换得到的频域离散信号 $X(K)$ 为含有各次谐波信息的复序量,进而计算得到原始信号的谐波信息^[25]。

$$X(K)=\sum_{n=0}^N x(n) W_N^{nk}=X_{Rn}(K)+jX_{In}(K) \quad (9)$$

$$|X(K)|=\sqrt{X_{Rn}(K)^2+X_{In}(K)^2} \quad (10)$$

$$\varphi_K=\arctan \frac{X_{Rn}(K)}{X_{In}(K)} \quad (11)$$

$$K_1=\frac{f_n \times N}{f_s} \quad (12)$$

式中, K_1 为基波位置, f_s 为采样频率, f_n 为基波频率(50 Hz), N 为信号长度。

由于实际工频电压频率存在波动,采样单元可能存在非整周期采样,传统FFT对信号抽样和截断分析会造

成“频谱泄露”，使计算存在误差^[26]。为此可对原始信号的 FFT 变换作加窗截短处理，选择合适的窗函数在时域与信号作点乘运算，表现在频域即为卷积，从而实现信号的平滑。本文选择汉宁窗作为加窗函数，其窗函数为式(13)，加窗方式为式(14)，相比其他窗，汉宁窗主瓣加宽并降低，旁瓣减小，使频谱泄漏和波动均减小。利用 MATLAB 进行仿真，结果如图 2 所示。结果表明，信号加汉宁窗截短后作时频变换，频谱信号更加光滑，泄露明显减少。

$$\omega(n) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) \quad (13)$$

$$X_\omega(K) = \text{FFT}[x(n)\omega(n)] \quad (14)$$

2 容性设备绝缘性能的在线模糊评价模型

模糊综合评价方法(FCE)是以划分指标对被评目标的隶属程度为依据的一种综合性评价方法，基于层次分析(AHP)的高压容性设备绝缘性能模糊评价模型建立基本过程如下。

2.1 建立设备绝缘性能影响因素集 U 和评价集 V

为使绝缘评价结果更加真实，建立两级指标的绝缘性能评价指标体系，如图 3 所示。绝缘评价集合 V 包含好、较好、一般、差 4 个等级。

$$V_{\text{绝缘性能}} = \{\text{好} \quad \text{较好} \quad \text{一般} \quad \text{差}\} \quad (15)$$

2.2 一级指标的模糊评估

(1) 构建运行状态、运行条件权重向量 A_1, A_2

根据泄露电流、阻性电流、介质损耗在运行状态中

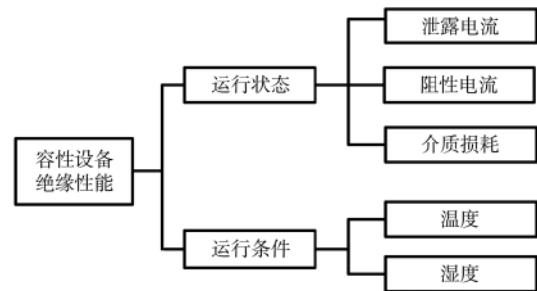
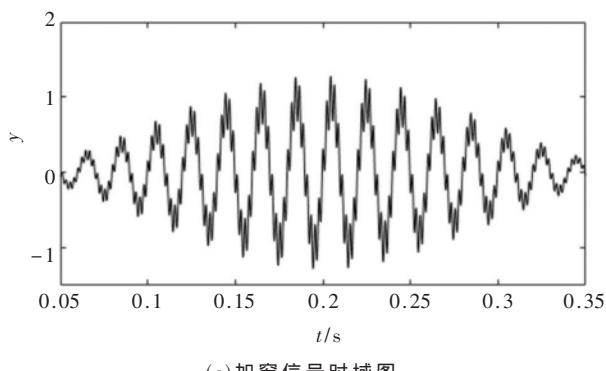
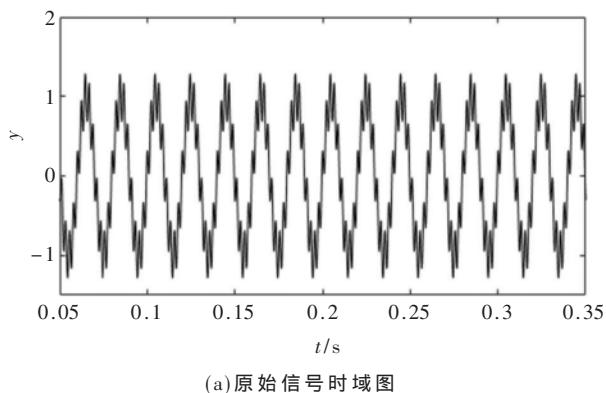


图 3 容性设备绝缘性能评价指标体系

表现绝缘程度的不同，利用 AHP 模型构建影响运行状态的判断矩阵 P_1 ；同样，根据温度、湿度在运行条件中对绝缘影响程度影响不同，利用 AHP 模型构建影响运行条件的判断矩阵 P_2 。 P_1, P_2 矩阵按式(16)作一致性检验，保证较为合理的判断安排。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{RI(n-1)} \quad (16)$$

式中， CI 为判断偏离度； RI 为随机一致性指标； λ_{\max} 为 P 矩阵最大特征值； n 为指标数，即 P 矩阵阶数。

当 $CI < 0.1$ 时，说明判断矩阵设置合理，此时由 P_1, P_2 矩阵按 AHP 算法可求得二级参数在一级指标中的影响权重向量 A_1, A_2 。

$$A_1 = [a_{11} \quad a_{12} \quad a_{13}] \quad (17)$$

$$A_2 = [a_{21} \quad a_{22}] \quad (18)$$

(2) 构建运行状态、运行条件模糊矩阵 R_1, R_2

根据梯形型模糊分布含义，结合《电气设备预防性

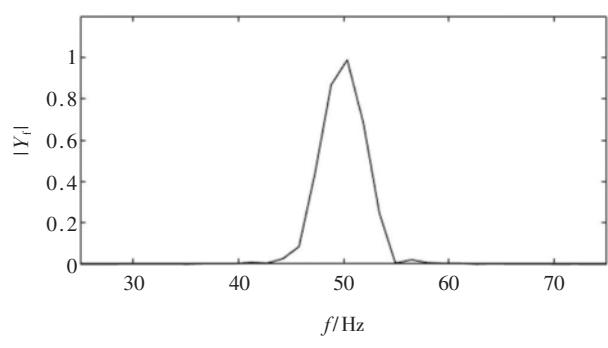
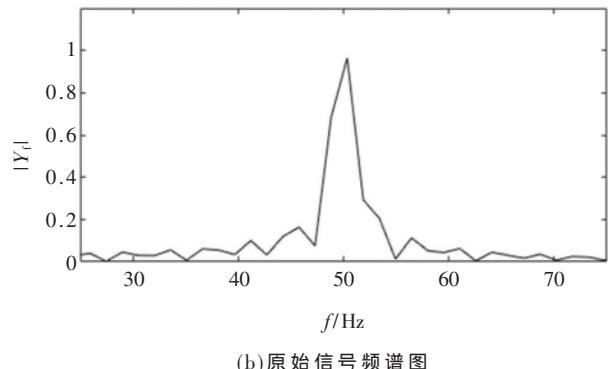


图 2 FFT 加窗的 MATLAB 仿真图

测控技术与仪器仪表

Measurement Control Technology and Instruments

试验规程》，利用统计学中的梯形型模糊分布建立出运行状态、运行条件的相对隶属函数，如式(19)~式(21)所示。通过实际参数求解隶属函数得到模糊矩阵 R_1 、 R_2 。

偏大型(好型)：

$$\mu_A = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ 1 & x > b \end{cases} \quad (19)$$

中间型(较好型)：

$$\mu_B = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a} & a \leq x < b \\ 1 & b \leq x < c \\ \frac{d-x}{d-c} & c \leq x \leq d \\ 0 & x < a, x > d \end{cases} \quad (20)$$

偏小型(差型)：

$$\mu_C = \begin{cases} 1 & x < a \\ \frac{b-x}{b-a} & a \leq x \leq b \\ 0 & x > b \end{cases} \quad (21)$$

其中， μ 为模糊分布函数， x 为指标体系各因素实测函数变量值。

$$R_1 = \begin{bmatrix} r_{111} & r_{112} & r_{113} & r_{114} \\ r_{121} & r_{122} & r_{123} & r_{124} \\ r_{131} & r_{132} & r_{133} & r_{134} \end{bmatrix} \quad 0 \leq r_{ij} \leq 1 \quad (22)$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} r_{211} & r_{212} & r_{213} & r_{214} \\ r_{221} & r_{222} & r_{223} & r_{224} \end{bmatrix} \quad 0 \leq r_{2j} \leq 1 \quad (23)$$

式中， r_{ij} 为影响集合体系中单指标对于评价集合中 V_j 等级的隶属程度值，由实际参数和隶属函数求得。

(3)计算运行状态、运行条件评估矩阵 B_1 、 B_2

评估矩阵由权重向量和模糊矩阵经过模糊运算求得，用 \odot 表示。本文采用基于加权平均的界限和模糊运算 $M(\cdot, \oplus)$ ，该算法综合各因素的权数大小，既考虑了主要因素的影响，又考虑了次要因素的影响，适用于多级指标评价体系。计算如下：

$$B = A \odot R = [b_1 \ b_2 \ b_3 \ \cdots \ b_m] \quad (24)$$

$$b_j = \sum_{i=1}^n a_i \times r_{ij} \quad j = 1, 2, 3, \dots, m \quad (25)$$

式中， m 为评价集合的等级数，本文 $m=4$ ； b_j 值刻画了对应指标对于评价等级的程度。所以有：

$$B_1 = A_1 \odot R_1 = [a_{11} \ a_{12} \ a_{13}] \odot \begin{bmatrix} r_{111} & r_{112} & r_{113} & r_{114} \\ r_{121} & r_{122} & r_{123} & r_{124} \\ r_{131} & r_{132} & r_{133} & r_{134} \end{bmatrix} \\ = [b_{11} \ b_{12} \ b_{13} \ b_{14}] \quad (26)$$

$$B_2 = A_2 \odot R_2 = [a_{21} \ a_{22}] \odot \begin{bmatrix} r_{211} & r_{212} & r_{213} & r_{214} \\ r_{221} & r_{222} & r_{223} & r_{224} \end{bmatrix} \\ = [b_{21} \ b_{22} \ b_{23} \ b_{24}] \quad (27)$$

2.3 设备绝缘性能综合评价

(1)构建设备绝缘性能的综合权重向量 A

根据运行状态、运行条件体现高压容性设备绝缘状态程度不同，由 AHP 模型和一致性检验得到运行状态、运行条件在绝缘评价中的影响权重阵 A 。

$$A = [a_1 \ a_2] \quad (28)$$

(2)构建设备绝缘性能的综合模糊关系向量 R

$$R = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} \end{bmatrix} \quad (29)$$

(3)得到设备绝缘性能的综合模糊评估矩阵 B

$$B = A \odot R = [b_1 \ b_2 \ b_3 \ b_4] \quad (30)$$

式中， B 矩阵元素值对应集合 V 中评价等级程度。

3 绝缘性能在线监测装置设计

在线监测装置是一套集信号获取、信号调理、信号采样、信号处理与分析、信号通信与对话的容性设备绝缘状态监测装置，总体设计如图 4 所示。

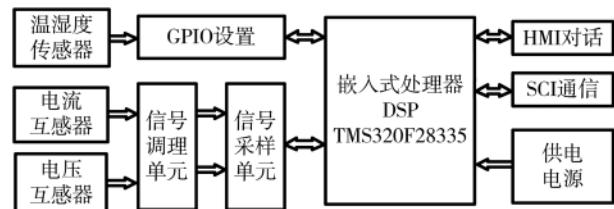


图 4 绝缘性能在线监测装置总体设计图

3.1 信号获取与调理单元

互感器技术实现对母线电压和设备漏电流信号的获取，采用高精度、低失真的加补偿环节的零磁通电流互感器技术，并采用开合的一次穿芯式结构实现不改变设备原有接线状态。

信号调理单元包括偏置电路、滤波电路、比例放大电路、跟随电路等部分，实现对信号的偏置、滤波、放大等预处理。采用直流电源偏置法，同时增加可控的 Buck DC-DC 斩波电路实现对直流电源的输出控制，满足 ADC 采样对正信号的要求；滤波电路则基于 LM324N 芯片设计了压控压源的二阶有源低通滤波器，提高抗高频干扰能力；基于 AD620 微伏电压放大器实现对漏电流的前级放大，该放大器增益范围为 1~1 000，具有高精度、低失调、线性度好的特性；同时设计电压跟随电路，防止过压信号反向侵入主芯片，起到隔离、保护的作用。

3.2 信号采样与处理单元

本文采用 TMS320F28335 型 DSP 芯片，其片内集成了一个 12 位高精度模数转换器，具有两个采样保持器 S/H，实现电压、电流信号的同步采样；具有 PWM 触发、软件触发、中断触发等多种触发方式，ADC 采样对象为 0~3 V 输入范围的电压正信号，所以需在采样前端作模拟信号的调理。

信号处理单元由 TMS320F28335 的 CPU 内核担任，主要实现对信号的 FFT 变换和 FCE 运算。STM320F28335

测控技术与仪器仪表

Measurement Control Technology and Instruments

是 32 位浮点型 DSP, 集成了 ADC、SCI、PWM、中断等功能模块^[27], 相比同系列的 F2812 计算能力更强, 性能更好。ADC 的采样频率 f_s 决定了周期信号序列的长度 N , 是 FFT 处理有限长度离散信号的重要参数, 对于 ADC 这种重要但又不希望 CPU 实时执行的功能程序, 可采用中断的工作机制。设置 PWM 波作为 ADC 采样函数的触发中断源实现对采样频率 f_s 的控制, 假如一次 FFT 可处理 $N=512$ 长度的信号, 则 ADC 采样率最大应为:

$$f_s = N \times f_0 = 512 \times 50 = 25.6 \text{ kHz} \quad (31)$$

即 ADC 触发源 PWM 波频率应配置为 25.6 kHz。

3.3 数据通信与对话单元

现场人机对话单元采用 HMI(Human Machine Interface, 人机接口或人机界面)技术, 它是一种专用于下位机和用户之间进行信息交互的媒介。HMI 串口屏是一种封装好的具有 HMI 底层功能的人机对话界面设备, 可根据需求自主进行界面和功能设计, 如图 5 所示。相比传统 LCD, HMI 屏具有多通道波形显示、多状态信息输出等对话功能, 实现参量的现场输出, 在出现与上位机信息传输不稳定甚至传输错误的情况下不影响对测量结果的获取。与上位机的数据传输采用 RS485 通信, 它是一种半双工 SCI 异步通信, 与 RS232 相比, RS485 通信具有抗干扰能力强、传输距离远、传输稳定等优点。

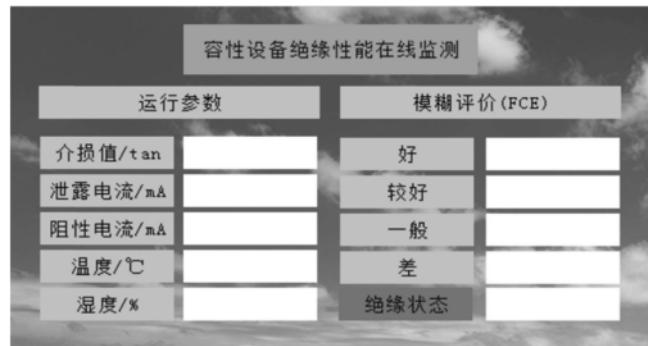


图 5 设备状态 HMI 界面设计图

3.4 绝缘性能在线监测装置软件设计

本文基于 CCS7.3.0 开发环境完成在线监测装置各部分的软件设计, 总体设计流程如图 6 所示, 包括系统初始化、电压电流 ADC 采样、数据处理、人机对话、模糊评价等过程。

经过调理后的信号由中断控制进行 AD 采样获得信号数字量, FFT 正交变换一次分解 512 长度的信号, 得到设备介损角、介损值、泄露电流和阻性电流; 同时基于 DH11 温湿度传感器获得设备运行的环境参数; 最后进入模糊评价算法实现设备绝缘性能的在线评估, 评价的流程为定义好所有权重向量阵 A , 由运行参量和隶属函数计算得到模糊关系向量 R , 最后根据模糊计算方法得到综合评估矩阵 B , 获得评价等级结果、设备运行参量和评价结果, 同时实现 HMI 交互显示和 SCI 通信。

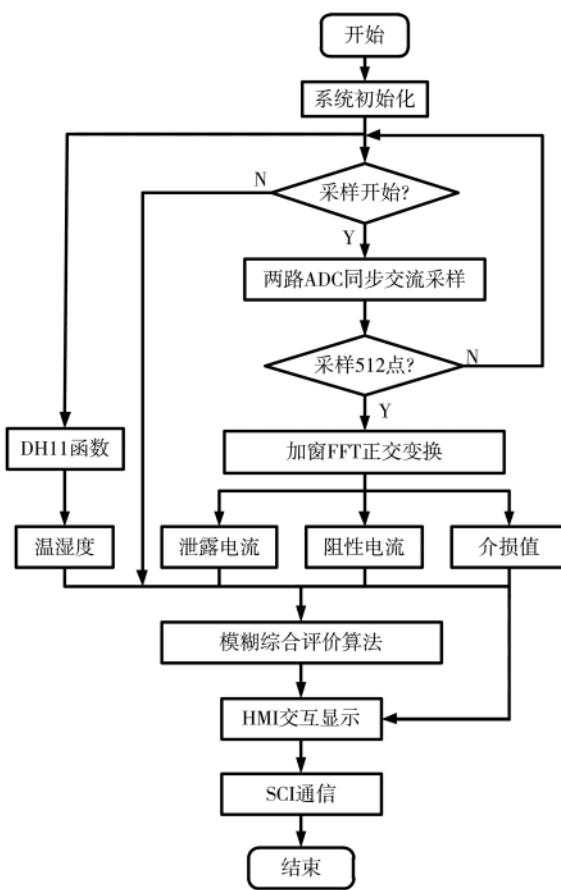


图 6 在线监测装置软件设计流程图

4 绝缘性能在线监测装置的测试与结果分析

基于高电压实验室对在线监测装置进行测试, 实验接线原理如图 7 所示, 在不同电压水平下对试品的绝缘性能进行测试。与文献[28]类似, 本次实验试品采用氧化锌避雷器(MOA), 避雷器的介损值一般在 1% 以下, 并且绝缘性能良好的避雷器其介损值一般不会随电压等级的改变而改变, 而具有绝缘缺陷的设备其介损值则会随着电压的升高而变大, 此时还需考虑温度、湿度等因素综合判断设备绝缘。

实验高压通过可调电源箱和变压器产生, 产生的高

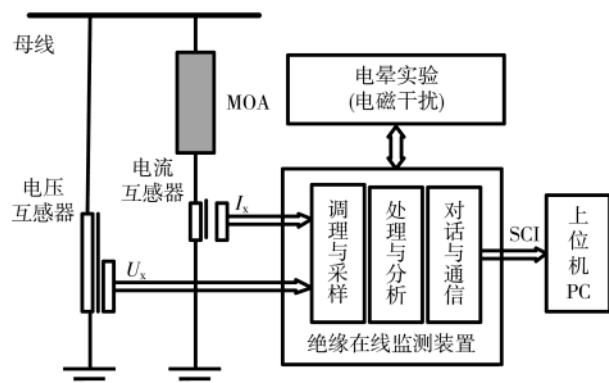


图 7 在线监测装置实验测试接线原理图

电压加在实验避雷器一端,另一端通过地线连接到大地形成回路,由互感器获取电信号接入在线监测装置,并在试品旁增加电晕实验产生电磁干扰模拟更加真实的变电站情况,每隔10 s记录一次设备介损值,测量结果见表1。由表1可知,试品介损值约为0.39%,实验测试数据稳定,数据间误差小且真实;当增大电压时其介损值基本不变,两次模糊评价结果均为绝缘性能较好,表明在线监测装置性能稳定,精度较高,实时性好,模糊评估结果符合实际情况,能够满足绝缘在线监测系统的要求。

5 结论

本文提出的高压容性设备绝缘性能在线监测装置基于高性能的嵌入式DSP芯片设计,将设备电流、电压信号处理后通过HMI屏实现现场多参量显示,通过SCI实现数据与后台管理的通信,同时实现了模糊评估的在线化和硬件化。监测装置不论是对集中式还是对分布式绝缘性能在线监测系统的设计,都有很好的扩展性和移植性,是无人值守变电站必不可少的设备绝缘信息监测系统的基本组件之一。实验结果表明,本文提出的绝缘在线监测装置性能稳定,测量精度较高,抗干扰能力较强,可以较为准确地现场评估出设备的绝缘状态,能够满足变电站容性设备绝缘监测要求,对容性设备安全运行状态监测和状态维修具有一定的理论依据和指导意义。

参考文献

- [1] 郭世波.内蒙古包头东河110 kV变电站状态检修改造方案[D].天津:天津大学,2016.
- [2] 梁永亮.变压器状态评估方法与在线监测优化研究[D].济南:山东大学,2015.
- [3] 沈其工,方瑜,周泽存,等.高电压技术[M].北京:中国电力出版社,2012.
- [4] 王玉巧,李文方.容性电气设备在线监测关键技术研究[J].电子测试,2013(8):97-98.
- [5] 张鸿博,蔡晓峰,黄伟.测量介质损耗因数的加窗免插值DFT算法[J].仪表技术与传感器,2012(9):105-107.
- [6] 唐琪.基于嵌入式设计的CVT绝缘性能带电测试装置[J].电子设计工程,2019,27(5):165-168.
- [7] 左丽霞.基于DSP的高压电气设备绝缘在线监测系统设计[J].电力自动化设备,2011,31(10):144-147.
- [8] 谢志远,陈楠,张冬祺,等.基于电力线通信的光伏电站漏电监测系统设计[J].电子技术应用,2018,44(3):40-42,46.
- [9] 吴健,樊创,冯国亮,等.基于网络同步技术的在线电晕损耗监测系统设计[J].电子技术应用,2017,43(2):51-53,57.
- [10] 徐军,杨帆,朴金宁,等.室内环境参数远程监测系统设计[J].电子技术应用,2018,44(2):48-51.
- [11] TANG B,SUN Y,WU S,et al.Comprehensive evaluation and application of GIS insulation condition part2:construction and application of comprehensive evaluation model considering universality and economic value[J].IEEE Access,2019,7:129127-129135.
- [12] 张博,吴杰康,罗伟明.基于模糊理论和证据理论的变压器绝缘老化状态评估[J].广东电力,2019,32(8):109-118.
- [13] YANG Y,LI W,QI B,et al.Condition assessment method of power transformer based on the classification of component and performance[C].2017 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomenon(CEIDP),Fort Worth,TX,2017.
- [14] 王福忠,邵淑敏.基于模糊综合评价法的变压器运行状态评估[J].计算机仿真,2015,32(6):141-145.
- [15] 张晶晶,许修乐,丁明,等.基于模糊层次分析法的变压器状态评估[J].电力系统保护与控制,2017,45(3):75-81.
- [16] 孙来军,杨国辉.故障诊断专家系统高速模糊推理的CPLD实现[J].电力自动化设备,2008,28(7):107-110.
- [17] 武星星,朱喜林,李晓梅.模糊推理系统在DSP上的实现和优化[J].微计算机信息,2007,23(8):177-179.
- [18] 胡文杰.电容型设备绝缘在线监测系统设计研究[J].能源与环保,2018,40(7):15-19,23.
- [19] 倪文帅.新都500千伏变电站绝缘在线监测系统的设计与实现[D].西安:西安电子科技大学,2017.
- [20] 苟晓侃.基于虚拟仪器的电气设备绝缘综合检测装置研究[D].保定:华北电力大学(保定),2007.
- [21] 段志国.电容型设备带电测试技术分析[D].保定:华北电力大学(保定),2012.
- [22] SUN Y,LI Y,LIU Z,et al.Research on diagnosis technology of insulation performance of high voltage electrical equipment[C].2017 Chinese Automation Congress(CAC),Jinan,2017:5398-5403.
- [23] 黄建国,陈亮,董莉娜,等.变电站用10kV避雷器运行状态在线监测装置的研制[J].电瓷避雷器,2012(4):85-90.
- [24] 王艳芬,王刚.数字信号处理原理及实现[M].北京:清华大学出版社,2017.
- [25] 阳东云.高压变电站容性设备绝缘在线监测系统研制[D].长沙:湖南大学,2013.

表1 不同电压等级下对试品的测试(特征参数: $\tan\delta/\%$) 温度:23 °C 湿度:40%RH

电压	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	模糊评价
10 kV	0.394	0.390	0.393	0.392	0.390	0.394	0.394	0.391	0.394	0.390	较好
35 kV	0.390	0.394	0.394	0.392	0.394	0.397	0.395	0.396	0.395	0.395	较好

(下转第98页)

5 结论

本文针对无线传感器网络中的多目标覆盖优化问题,设计了相应的数学模型,提出了一种改进的混沌免疫混合蛙跳算法。在感知半径不同的情况下,通过和遗传算法、粒子群算法进行仿真对比,所提算法优化效果更好,避免了陷入局部最优,有效提高了成功监测到的目标数量。

参考文献

- [1] 郭志鹏,李娟,赵友刚,等.物联网中的无线传感器网络技术综述[J].计算机与应用化学,2019,36(1):72-83.
- [2] ELHABYAN R,SHI W,ST-HILAIRE M.Coverage protocols for wireless sensor networks: review and future directions[J].Journal of Communications and Networks,2019,21(1):45-60.
- [3] KIM J M,MOON S J,HWANG D Y.A study on greenhouse smart farm system based on wireless sensor[J].Advanced Science Letters,2018,24(3):2041-2045.
- [4] PRABHU B,BALAKUMAR N,ANTONY A J.Evolving constraints in military applications using wireless sensor networks[J].International Journal of Innovative Research in Computer Science & Technology,2017,5(1):184-187.
- [5] REZAEI A A,PASANDIDEH F.A fuzzy congestion control protocol based on active queue management in wireless sensor networks with medical applications[J].Wireless Personal Communications,2018,98(1):815-842.
- [6] BANG J H,CHO Y J,KANG K.Anomaly detection of network-initiated LTE signaling traffic in wireless sensor and actuator networks based on a hidden semi-Markov model[J].Computers & Security,2017,65:108-120.
- [7] DONG Z,MEYLAND S,KARAOMEROGLU M.FEW:a case study of an autonomous wireless sensor network system for environmental data collection[J].Environmental Progress & Sustainable Energy,2017,37(1):180-188.
- [8] 蒋维成,李兰英,刘华春,等.传感网中区域覆盖的目标跟踪方法[J].计算机工程与设计,2019,40(7):1840-1845.
- [9] NGUYEN L,NGUYEN H T.Mobility based network lifetime in wireless sensor networks : a review[J].arXiv:1906.07063 [CS.NI],2019.
- [10] 刘伟,胡安林.无线传感器网络覆盖率与节能性研究[J].电子技术应用,2016,42(6):98-100,104.
- [11] GAO C,ZI L I,SUN Z,et al.Multi-target K-Coverage preservation algorithm in wireless sensor network[J].Computer Engineering,2016,42:59-64.
- [12] LI C X,ZHANG Q,ZHANG L Y.Research on wireless sensor network coverage based on improved particle swarm optimization algorithm[C].2017 International Conference on Computer Network, Electronic and Automation(ICCNEA).IEEE Computer Society,2017.
- [13] LEE J W,CHOI B S,LEE J J.Energy-efficient coverage of wireless sensor networks using ant colony optimization with three types of pheromones[J].IEEE Transactions on Industrial Informatics,2011,7(3):419-427.
- [14] BINH H T T,HANH N T,QUAN L V,et al.Improved cuckoo search and chaotic flower pollination optimization algorithm for maximizing area coverage in wireless sensor networks[J].Neural Computing & Applications,2018,30(7):2305-2317.
- [15] DAMODAR R E,AMRUTA L,RAMALINGASWAMY C,et al.An efficient load balancing of gateways using improved shuffled frog leaping algorithm and novel fitness function for WSNs[J].IEEE Sensors Journal,2017,17(20): 6724-6733.
- [16] WANG Z,ZHANG D H,WANG B,et al.Research on improved strategy of shuffled frog leaping algorithm[C].2019 34rd Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation(YAC).IEEE ,Jinzhou ,China ,2019.

(收稿日期:2020-01-12)

作者简介:

徐梦颖(1996-),女,硕士研究生,主要研究方向:物联网与人工智能。

卢毅(1981-),男,博士研究生,主要研究方向:物联网与人工智能。

周杰(1982-),通信作者,男,博士,副教授,主要研究方向:物联网与人工智能,E-mail:jiezhou@shzu.edu.cn。

(上接第 93 页)

- [26] 游胜强.电容型设备介质损耗因数的监测技术研究[D].福州:福州大学,2015.
- [27] 符晓,朱洪顺.TMS320F28335 原理开发及应用[M].北京:清华大学出版社,2017.
- [28] Xu Guangke,Li Ming,Zhang Weiwei,et al.Research of metal oxide arrester on-line monitoring system[C].2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy

System Integration(EI2),Beijing,2018:1-5.

(收稿日期:2019-10-08)

作者简介:

刘志坚(1975-),男,博士,教授,研究生导师,主要研究方向:电力系统运行与控制。

赵浩益(1995-),男,硕士研究生,主要研究方向:电力系统运行与控制。

梁宁(1985-),通信作者,男,博士,主要研究方向:电力系统优化与运行,E-mail:ningkmust@163.com。

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所