

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.11.027

# 基于改进型Duffing振子模型的变压器局部放电信号检测方法

杨振源<sup>1</sup>, 曾喆昭<sup>2</sup>, 顾黎明<sup>1</sup>, 孙伟军<sup>1</sup>, 朱斌<sup>1</sup>, 柯敏倩<sup>1</sup>,  
项超<sup>1</sup>, 陈仙进<sup>1</sup>

(1. 浙江省电力公司检修分公司, 杭州 310000; 2. 浙长沙理工大学电气与信息工程学院, 长沙 410114)

**摘要:** 针对现有Duffing振子在微弱信号检测方面存在的局限性,提出了一种基于改进型Duffing振子的微弱脉冲信号检测的新方法。考虑到变压器局部放电信号的检测涉及到广谱信号的检测问题,而且改进型Duffing振子的临界混沌幅值不会随振子的激励频率和采样频率的改变而发生明显变化,因而有效避免了现有Duffing振子只能检测低频信号的局限性。仿真结果表明,在强噪声背景下,基于改进型Duffing振子的变压器局部放电微弱脉冲信号的检测方法不仅具有良好的噪声免疫特性,而且具有高精度的检测结果,在变压器局部放电信号检测领域中具有重要的应用价值。

**关键词:** 改进型Duffing振子; 局部放电; 微弱信号检测; 变压器

## Transformer PD Signal Detection Method Based on Improved Duffing Oscillator Model

YANG Zhenyuan<sup>1</sup>, ZENG Zhezha<sup>2</sup>, GU Liming<sup>1</sup>, SUN Weijun<sup>1</sup>, ZHU Bin<sup>1</sup>,  
KE Minqian<sup>1</sup>, XIANG Chao<sup>1</sup>, CHEN Xianjin<sup>1</sup>

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Company Maintenance Branch, Hangzhou 310000, China; 2. College of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** To break out of the limitations of existing Duffing oscillator in weak signal detection, we propose a new method for detecting weak pulse signal based on the improved Duffing oscillator. Because the detection of transformer partial discharge (PD) detection involves the detection of broad spectrum signals, and the improved Duffing oscillator's critical amplitude of chaos does not change with the excitation frequency of oscillator and the sampling frequency, the limitation that the existing Duffing oscillator is only applicable to detection of low-frequency signals is broken. Simulation shows that in strong noise background, the improved Duffing oscillator based weak PD pulse signal detection method for transformer has good noise immunity and high accuracy.

**Key words:** improved Duffing oscillator; partial discharge; weak signal detection; transformer

## 0 引言

由于电力变压器的绝缘缺陷引起的局部放电会导致设备老化和劣化,引起的电力系统事故,造成巨大经济损失<sup>[1-2]</sup>。因此,监测变压器局部放电及时根除变压器故障在电力系统中具有重要的安全意义。由于初期的局部放电信号非常微弱,特别是在强噪声干扰环境下检测微弱的局部放电信号是一个极具挑战性的课题,因此如何有效检测出早

期的局部放电信号对于电力变压器安全稳定运行具有重要的理论和实际意义<sup>[3-12]</sup>。

传统的变压器局部放电微弱信号检测方法主要有小波阈值去噪法、傅里叶频域变换法、数字滤波法等,这些方法都存在检测精度不高,而且最低检测信噪比只有-10 dB<sup>[13-15]</sup>,难以准确检测变压器初期的局部放电微弱信号。

目前,基于Duffing振子的微弱信号检测技术广泛应用于通信、医学、振动测量、电力系统故障诊断等领域<sup>[16-19]</sup>。Duffing振子在局部放电信号检测中有

收稿日期:2017-05-11; 修回日期:2017-07-09

基金项目:长沙理工大学开放基金项目。

Project Supported by the Open Research Fund of Changsha University of Science and Technology.

如下一些成果应用,在文[20]利用 Duffing-Home 混沌振子系统可准确、快速地识别局部放电周期性脉冲干扰信号并予以抑制,而对局部放电脉冲信号无任何影响。在文[21]中利用双耦合 Duffing 振子系统瞬态同步突变的处理方法对交联聚乙烯电缆局部放电脉冲信号进行检测能有效抑制白噪声,检测出幅值十分微弱的局放脉冲,提高了局放脉冲信号的检测灵敏度。在文[6]双向环形藕和 Duffing 振子抗噪性能比较强,检测比较稳定。但是在检测局部放电信号中只有信噪比在-20 dB 以上才具有良好检测效果,然而现场检测中常常出现信噪比更低的局部放电信号,而且现有 Duffing 振子模型只适合于微弱周期或准周期信号的检测,对于一些高频或非周期信号的检测难以实现。由于变压器的局部放电脉冲信号是广谱信号,其频谱是从直流到超高频的连续谱,而且处于复杂的噪声环境中,信噪比很低,现有方法难以检测出放电信号,因此在强噪声背景下对变压器局部微弱放电微弱非周期信号的检测提出了新要求,需要研究新的理论方法。为了有效解决现有的理论方法存在的局限性,文中提出了一种基于改进型 Duffing 振子模型的微弱信号检测方法,该方法将 Holmes 型 Duffing 振子进行广义时间尺度变换,得到了改进型 Duffing 振子检测模型,与传统的模型相比,该模型不仅适用于非周期信号的检测,而且大大扩展了待检测信号的频率范围,为变压器局部放电微弱信号的检测奠定了良好的理论基础。

## 1 改进型 Duffing 振子的微弱信号检测原理

由文[22]可知,传统的 Holmes-Duffing 振子模型为

$$\ddot{x} + k\dot{x} - x + x^3 = A \cos(\omega t). \quad (1)$$

式(1)中: $k$ 为阻尼系数; $-x+x^3$ 为非线性恢复力; $A$ 为系统激励幅值; $\omega$ 为激励频率,其值为 1 rad/s; $t$ 为广义时间变量; $A \cos(\omega t)$ 为系统周期驱动力。传统的 Duffing 振子方程具有丰富的非线性特性,是研究混沌理论常用的模型之一。混沌系统的特性之一是系统对初始状态的敏感性,即系统的初始状态的微小变化将会导致系统由混沌状态向大尺度周期状态转变,这就是传统 Duffing 振子微弱信号检测的重要混沌特性。

### 1.1 传统 Duffing 振子的局限性

传统 Duffing 振子在微弱信号检测中存在如下几方面的局限性:

1)当待测信号的频率  $\omega=1$  rad/s 时,系统具有良好的动态特性和检测效果。然而在实际工程中,电

力变压器局部放电所产生的微弱放电信号的频率一般是未知,因此很难确定系统周期驱动频率,从而无法得到临界幅值;

2)系统在小频率参数条件下能够有效地检测出待测信号,由于传统的 Duffing 振子不适合非周期信号的检测,而局部放电产生的放电信号可能是从直流到超高频的广谱信号(即非周期信号),在宽频带条件下,系统的动态稳定响应很容易受到影响,严重影响检测系统的精确度;

3)在保持其他参数不变的情况下,通过利用四阶 Runge-Kutta 法计算步长(即待测信号采样步长)改变,将会引起临界幅值发生改变,甚至导致噪声免疫特性变差。

基于上述所提出的传统 Duffing 振子的微弱信号检测的局限性,文中经过广义时间尺度变换得到改进型 Duffing 振子模型,有效避免上述所提出的局限性。

### 1.2 改进型 Duffing 振子模型

将传统 Holmes-Duffing 振子模型(1)进行广义时间尺度变换,变换过程如下。

设  $t=\omega\tau$ , 则:  $\dot{x} = \frac{dx}{dt} = \frac{1}{\omega} \frac{dx}{d\tau}$ , 同理可得:  $\ddot{x} = \frac{d^2x}{d\tau^2}$ , 同时将广义的时间变量  $\tau$  换成  $t$ , 由方程(1)整理可得

$$\ddot{x} = \omega^2 \left[ -k \frac{1}{\omega} \dot{x} + x - x^3 + A \cos(\omega t) \right]. \quad (2)$$

为了便于使用四阶 Runge-Kutta 方法进行求解,设  $x_1=x$ ,  $\dot{x}_1=\omega x_2$ , 则方程(2)可改写为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \omega x_2 \\ \dot{x}_2 = \omega [-k x_2 + x_1 - x_1^3 + A \cos(\omega t)] \end{cases}. \quad (3)$$

显然,通过广义时间尺度变换后,Duffing 振子激励角频率由原来 1 rad/s 变换为任意角频率  $\omega$ 。由于原系统经变换后不会改变系统的特性,因此,在所有参数条件以及采样频率都相同的情况下,变换后的激励角频率为  $\omega$  的系统混沌阈值与原系统的激励角频率为 1 rad/s 的混沌阈值相同。

### 1.3 改进型 Duffing 振子特性分析

1)系统驱动力幅值敏感特性。仿真分析中,取采样频率为  $f_s=10^5$  Hz,则计算步长为  $10^{-5}$  s,取阻尼参数  $k=0.5$ ,初始状态为  $x(0)=\dot{x}(0)=0$ ,使用四阶 Runge-Kutta 方法进行求解,计算点数为  $N=100\ 000$ ,并由后 5 000 个点绘出系统的相轨迹。当系统激励角频率为 10 000 rad/s 时,经过仿真计算可确定改进型 Duffing 系统的临界混沌幅值  $A_c=0.825\ 013$ 、临界大

尺度周期状态幅值  $A_p=0.825\ 014$ 。系统临界混沌相轨迹见图 1(a), 临界大尺度周期相轨迹见图 1(b)。由图 1 可知, 驱动幅值发生  $10^{-6}$  的微弱变化就会引起改进型 Duffing 振子状态的显著变化, 而且具有良好的动态响应特性。

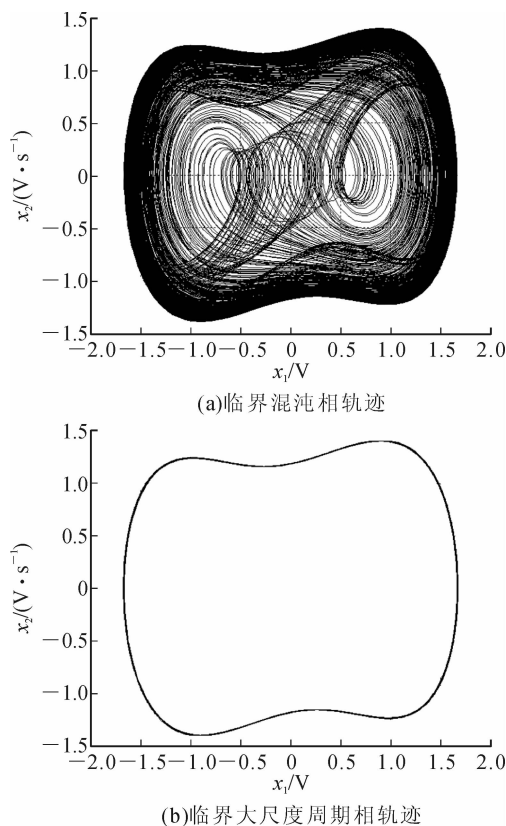


图 1 改进型 Duffing 振子临界相轨迹

Fig. 1 The critical phase tracks of improved Duffing oscillator

2) 系统强噪声免疫特性。方程(3)中, 系统在没有输入局部放电脉冲信号和噪声信号时, 处于混沌状态, 当只输入强度为  $D$  的 Gauss 白噪声信号  $n(t)$ , 且  $s(t)=0$  时, 此时噪声免疫特性测试系统变为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \omega x_2 \\ \dot{x}_2 = \omega [-kx_2 + x_1 - x_1^3 + A \cos(\omega t) + n(t)] \end{cases} \quad (4)$$

在保证其他参数不变的情况下, 令激励角频率  $\omega=10\ 000\ \text{rad/s}$ , 为了防止噪声信号的诱导作用, 即将改进型 Duffing 振子周期驱动信号的幅值  $A$  设置为小于临界幅值  $A_d$ 。如将系统方程(4)的驱动信号幅值由  $A_d=0.825\ 013$  改为  $A_d=0.825\ 001$ , 此时系统的驱动幅值离混沌状态的临界幅值留有一定的裕度。当输入噪声信号为  $D=0.1$  的高强度 Gauss 白噪声时, 改进型 Duffing 振子系统仍然处于在混沌状态, 并且具有良好的动态响应特性, 加入噪声后改进型 Duffing 振子系统状态见图 2。由图 2 可知, 改进型 Duffing 振子检测系统具有很强的噪声免疫特性。

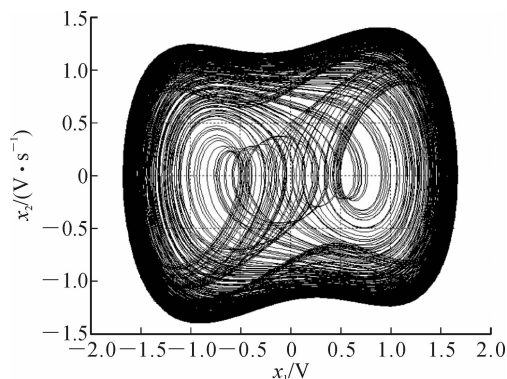


图 2 加入噪声后改进型 Duffing 振子系统状态

Fig. 2 The status of improved Duffing oscillator system after adding noise

3) 临界幅值  $A_d$  不变特性。为了检验在不同激励频率情况下改进型 Duffing 振子混沌临界幅值的不变性, 设采样频率  $f_s=100\ 000\ \text{Hz}$ , 在表 1 所示的激励角频率时, 相应的临界混沌幅值仿真结果见图 1。由表 1 可知, 临界混沌幅值的最小值是  $0.825\ 010\ \text{V}$ , 最大值是  $0.825\ 013\ \text{V}$ 。很显然相差只有  $0.000\ 003\ \text{V}$ , 在  $9\ 900\sim 10\ 100\ \text{rad/s}$  范围内的激励角频率驱动下, 只要将临界混沌幅值设置为  $A_d=0.825\ 010\ \text{V}$  时, 改进型 Duffing 振子都处于临界混沌状态; 当  $A_d > 0.825\ 013\ \text{V}$  时, 则处于大尺度周期运动状态。很显然, 改进型 Duffing 振子的临界混沌幅值不随激励频率变化而变化的显著特性弥补了传统 Duffing 振子的不足。

表 1 在不同激励角频率时的临界混沌幅值

Table 1 The amplitude of chaos at different excitation frequency of critical

| 参数                                      | 数值          |              |               |
|-----------------------------------------|-------------|--------------|---------------|
| $\omega/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$ | 9 900~9 950 | 9 950~10 000 | 10 000~10 100 |
| $A_d/\text{V}$                          | 0.825 801 0 | 0.825 801 2  | 0.825 013 0   |

#### 1.4 基于改进型 Duffing 振子的局部放电脉冲信号检测原理

保持其他参数条件不变, 在系统方程(3)中取周期驱动力临界幅值  $A=A_d$ , 将待测脉冲信号  $s(t)$  与含有噪声强度为  $D$  的 Gauss 白噪声信号  $n(t)$  的合成信号  $s(t)+n(t)$  作为周期驱动力的摄动输入到系统(3)中, 则基于改进型 Duffing 振子的待测微弱脉冲信号检测系统为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \omega x_2 \\ \dot{x}_2 = \omega [-kx_2 + x_1 - x_1^3 + A \cos(\omega t) + s(t) + n(t)] \end{cases} \quad (5)$$

信噪比定义如下:  $\text{SNR}=10\lg\left(\frac{a^2}{4D}\right)$ ,  $a$  为待测脉冲信号的幅值,  $D$  是噪声强度。由傅里叶变换可知, 宽度为  $\tau$ , 幅度为  $a$  的脉冲信号, 其频谱为  $F(j\omega)=$

$a\tau Sa(\omega\tau/2)$ , 其中抽样函数  $Sa(x)=\sin x/x$ , 主瓣带宽度为  $\Delta\omega \approx 2\pi/\tau$ , 且在主瓣范围内相位为“0”。由文[6]可设定变压器局部放电信号的脉宽为  $\tau=280 \mu\text{s}$  的单极性脉冲信号, 并设定  $\omega=10\,000 \text{ rad/s}$ 。因此, 其频谱  $F(\omega) \approx a1.971 \times 10^{-4}$ , 由于驱动幅值发生  $10^{-6}$  的微弱变化就会引起改进型 Duffing 振子状态的显著变化, 所以频谱幅度应该要大于  $10^{-6}$ , 由此可得: 系统能检测到变压器局部放电脉冲信号最小幅值为  $a=10^{-6}/(1.971 \times 10^{-4}) \approx 5 \text{ mV}$ 。其频谱的主瓣带宽度为  $\Delta\omega \approx 20\,900 \text{ rad/s}$ , 由于激励角频率  $\omega=10\,000 \text{ rad/s}$  在系统所设定的主瓣带宽范围内, 因此系统的待测微弱脉冲信号的频率分量与系统周期激励信号同相叠加, 从而引起系统周期驱动力幅值增加, 当且仅当驱动力幅值达到或超过相应频率点的大尺度周期运动状态的临界幅值  $A_p$  时, 系统(5)的临界混沌状态转变为大尺度周期状态, 从检测出待测脉冲微弱信号。

## 2 仿真实验研究

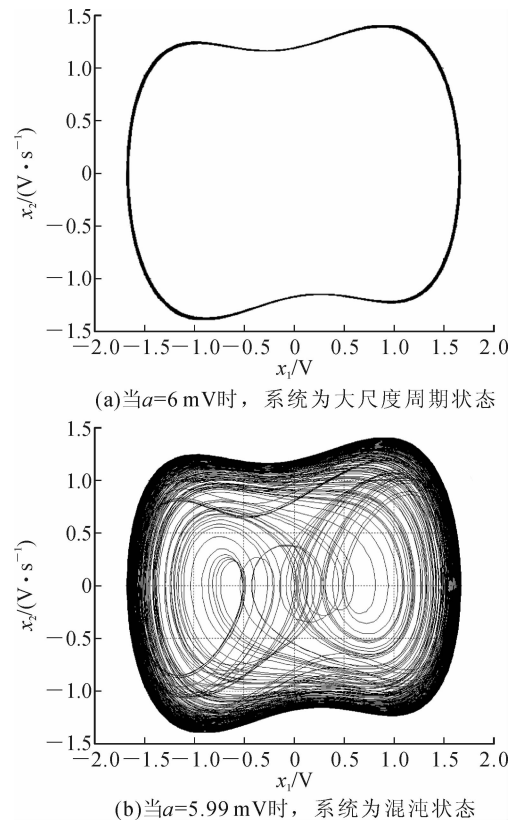
在仿真实验中, 取阻尼参数  $k=0.5$ , 初始状态  $x(0)=\dot{x}(0)=0$ , Gauss 白噪声强度  $D=0.1$ , 根据采样频率  $f_s=10^5 \text{ Hz}$ , 则计算步长  $T_s=1 \times 10^{-5} \text{ s}$ , 取系统的驱动激励角频率为  $\omega=10\,000 \text{ rad/s}$ , 考虑到噪声的诱导作用, 并保证系统对噪声诱导影响具有一定的裕度, 在微弱信号检测系统方程(5)中设置临界混沌幅值  $A_d=0.825\,001$ , 再使用四阶 Runge-Kutta 方法进行求解, 计算结果见表 2。

表 2 局部放电脉冲信号检测结果  
Table 2 The results of partial discharge pulse signal detection

| 放电脉冲信号幅值/mV | 信噪比/dB | 系统状态 |
|-------------|--------|------|
| 60.00       | -20.46 | 周期状态 |
| 50.00       | -22.04 | 周期状态 |
| 30.00       | -26.48 | 周期状态 |
| 15.00       | -32.50 | 周期状态 |
| 6.00        | -40.45 | 周期状态 |
| 5.99        | -40.47 | 混沌状态 |

局部放电脉冲信号的部分检测结果见图 3, 由表 2 和图 3 可知, 信噪比低至 -40.45 dB 时, 改进型 Duffing 振子也能有效检测到微弱的局部放电脉冲信号。

仿真实验结果表明, 改进型 Duffing 振子模型在局部放电脉冲信号(即非周期信号)检测方面, 具有较好的效果。而且显著提高了噪声的免疫性能和微



(a) 当  $a=6 \text{ mV}$  时, 系统为大尺度周期状态

(b) 当  $a=5.99 \text{ mV}$  时, 系统为混沌状态

图 3 检测系统在不同幅值下的状态

Fig. 3 The status of detection system at different amplitudes

弱信号的检测精度, 在信噪比低至 -40.45 dB 时, 仍然具有良好的局部放电微弱脉冲检测效果。

## 3 结语

笔者在 Holmes 型 Duffing 系统基础上, 利用广义时间尺度变换使传统的 Duffing 振子变成改进型 Duffing 振子模型, 通过仿真实验分析了该振子系统在高频激励频率时的混沌特性和免疫特性, 验证了在高频激励频率的周期驱动力下, 该系统不仅具有良好的动态特性, 而且具有很强的噪声免疫性能; 由文[6]可知, 小波阈值去噪法、数字滤波法、傅里叶频域变换法等常用的微弱信号检测方法所能达到的最低检测信噪比为 -10 dB; 尽管双向环形耦合 Duffing 振子噪声免疫性能很好, 具有很好的动态响应特性, 并且在信噪比达到 -20 dB 以上时, 仍然具有较好的检查效果。但是电力变压器初期局部放电信号十分微弱, 现有的检测方法难以检测出该信号。文中提出的检测方法有效解决了该问题, 仿真结果表明, 文中方法在信噪比低至 -40.45 dB 时仍然具有良好的检测结果, 而且可检测出 6 mV 的微弱放电信号, 显然, 文中方法有效提高了电力变压器故障检测精度, 具有较大的应用价值。

## 参考文献:

- [1] STONE DG C. The use of partial discharge measurements to assess the condition of rotating machine insulation[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1996, 12(4): 23-27.
- [2] GULSKI E. Comment and discussion on digital processing of PD pulses[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995, 4(2): 685-699.
- [3] JUDD M D, YANG L, HUNTER L B B. Partial discharge monitoring for power transformer using UHF sensors Part 2: Field experience[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2005, 21(3): 5-13.
- [4] 杜伯学, 魏国忠. 基于小波与分形理论的电力设备局部放电类型识别[J]. 电网技术, 2006, 30(13): 76-80.  
DU Boxue, WEI Guozhong. Partial discharge classification based on wavelet and fractal theory[J]. Power System Technology, 2006, 30(13): 76-80.
- [5] BARTNIKAS R. Partial discharges their mechanism, detection and measurement[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2002, 9(5): 763-808.
- [6] 吴勇峰, 黄绍平, 金国彬. 基于耦合 Duffing 振子的局部放电信号检测方法研究[J]. 物理学报, 2013(13): 132-139.  
WU Yongfeng, HUANG Shaoping, JIN Guobin. Study on partial discharge signal detection by coupled Duffing oscillators[J]. Acta Physica Sinica, 2013(13): 132-139.
- [7] 胡文堂, 高胜友, 余绍峰, 等. 统计参数在变压器局部放电模式识别中的应用[J]. 高电压技术, 2009, 35(2): 277-281.  
HU Wentang, GAO Shengyou, YU Shaofeng, et al. Application of statistic parameters in recognition of partial discharge in transformers[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(2): 277-281.
- [8] 伍志荣, 聂德鑫, 陈江波. 特高压变压器局部放电试验分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(1): 54-61.  
WU Zhirong, NIE Dexin, CHEN Jiangbo. Analysis of partial discharge test of UHV transformer[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(1): 54-61.
- [9] 张晓星, 王震, 唐炬, 等. 气体绝缘变压器局部放电超高频在线监测系统[J]. 高电压技术, 2010, 36(7): 1692-1697.  
ZHANG Xiaoxing, WANG Zhen, TANG Ju, et al. GIT partial discharge UHF on-line monitoring system[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(7): 1692-1697.
- [10] 王国利, 郝艳捧, 李彦明. 电力变压器局部放电检测技术的现状和发展[J]. 电工电能新技术, 2001, 20(2): 52-57.  
WANG Guoli, HAO Yanpeng, LI Yanming. Present and future development of partial discharge detection in power transformers[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2001, 20(2): 52-57.
- [11] 郭俊, 吴广宁, 张血琴, 等. 局部放电检测技术的现状和发展[J]. 电工技术学报, 2005, 20(2): 29-35.  
GUO Jun, WU Guangning, ZHANG Xieqin, et al. The actuality and perspective of partial discharge detection techniques[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(2): 29-35.
- [12] BARRY H W, LINDGREN S. A survey of development s in insulaion monitoring of power transformers[C]//Conf. Record of IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Anaheim, CA, USA: IEEE, 2000: 2822.
- [13] 钱勇, 黄成军, 陈陈, 等. 多小波消噪算法在局部放电检测中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(6): 89-95.  
QIAN Yong, HUANG Chengjun, CHEN Chen, et al. Application of multi-wavelet based on denoising algorithm in partial discharge detection[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(6): 89-95.
- [14] 徐剑, 黄成军. 局部放电窄带干扰抑制中改进快速傅里叶变换频域阈值算法的研究[J]. 电网技术, 2004, 28(13): 80-83.  
XU Jian, HUANG Chengjun. Research on improved fast Fourier transform algorithm applied in suppression of discrete spectral interference in partial discharge signals[J]. Power System Technology, 2004, 28(13): 80-83.
- [15] 刘卫东, 刘尚合, 胡小锋, 等. 小波阈值去噪函数的改进方法分析[J]. 高电压技术, 2007, 33(10): 59-63.  
LIU Weidong, LIU Shanghe, HU Xiaofeng, et al. Analysis of modified methods of wavelet threshold de-noising functions [J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(10): 59-63.
- [16] 李月, 杨宝俊, 石要武. 色噪声背景下微弱正弦信号的混沌检测[J]. 物理学报, 2003, 52(3): 526-530.  
LI Yue, YANG Baojun, SHI Yaowu. Chaos-based weak periodic pulse signal detection approach under colored noise background[J]. Acta Physica Sinica, 2003, 52(3): 526-530.
- [17] XIANG X, SHI B. Weak signal detection based on the information fusion and chaotic oscillator[J]. Chaos, 2010, 20(1): 013104.
- [18] 赖志慧, 冷永刚, 孙建桥, 等. 基于 Duffing 振子的变尺度微弱特征信号检测方法研究[J]. 物理学报, 2012, 61(5): 60-68.  
LAI Zhihui, LENG Yonggang, SUN Jianqiao, et al. Weak characteristic signal detection based on scale transformation of Duffing oscillator[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(5): 60-68.
- [19] 唐志国, 蒋佟佟, 刘昌标, 等. 高频电流法检测电容器局部放电的抗干扰研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2016, 37(5): 67-72.  
TANG Zhiguo, JIANG Tongtong, LIU Changbiao, et al. An-

- ti-interference study of partial discharge of capacitor by high frequency current detection method[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2016, 37(5):67-72.
- [20] 周力行,李卫国,陈允平. 基于混沌控制的局部放电周期性脉冲干扰抑制方法[J]. *电力系统自动化*, 2004, 28(15): 90-94.
- ZHOU Lihang, LI Weiguo, CHEN Yunping. Suppressing the periodic impulse in partial discharge detection based on chaotic control[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2004, 28(15):90-94.
- [21] 周涛,曾祥君. 交联聚乙烯电缆局部放电脉冲高灵敏度检测方法研究[J]. *高压电器*, 2013, 49(5):26-30.
- ZHOU Tao, ZENG Xiangjun. Study on high sensitivity detection of partial discharge pulse in XLPE cable[J]. *High Voltage Apparatus*, 2013, 49(5):26-30.
- [22] HOLMES P. A nonlinear oscillator with a strange attractor[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B Biological Sciences*, 1979(A292):419-448.
- 杨振源(1989—),男,研究生,主要从事电力设备放电信号检测研究工作。
- 曾喆昭(1963—),男,博士,教授,主要从事智能计算与智能控制等研究工作。
- 顾黎明(1967—),男,高级工程师,从事变电运维技术管理工作。
- 孙伟军(1975—),男,工程师,从事变电运维技术管理工作。
- 朱斌(1974—),男,工程师,从事变电运维技术管理工作。
- 
- (上接第 163 页)
- [19] INGEBRIGTSEN S, DAHLUND M, HANSEN W, et al. Solubility of carboxylic acids in paper(Kraft)-oil insulation systems[C]//2004 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. [S.l.]:IEEE, 2004: 253-257.
- [20] ZHOU Yuanxiang, WANG Yunshan, LI Guangfan, et al. Space charge phenomena in oil-paper insulation materials under high voltage direct current[J]. *Journal of Electrostatics*, 2009, 67(2-3):417-421.
- [21] 董伯冬,邓凡良,李良军. 变压器油微水在线监测技术原理及实现[J]. *高压电器*, 2005, 41(1):68-69.
- DONG Baidong, DENG Fanliang, LI Liangjun. Technology and practice of on-line monitoring moisture content in transformer oil[J]. *High Voltage Apparatus*, 2005, 41(1):68-69.
- [22] 王世强,胡海燕,肖睿. 油老化对油纸绝缘时域介电特性影响的实验研究[J]. *高压电器*, 2014, 50(5):110-114.
- WANG Shiqiang, HU Haiyan, XIAO Rui. Experimental study on oil aging Effects on time-domain dielectric characteristics of oil-paper insulation[J]. *High Voltage Apparature*, 2014, 50(5):110-114.
- 赵勇进(1979—),男,工程师,主要从事超、特高压电力变压器设计工作。