

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.11.044

基于传输系数的HFCT电气参数测试方法研究

周 凯¹, 黄永禄¹, 何 珉^{1,2}, 万 航¹, 谢 敏¹, 曾 琴¹, 赵世林¹

(1. 四川大学电气信息学院, 成都 610065; 2. 国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆 401123)

摘要: 目前,局部放电检测技术被认为是电力设备绝缘状态评估有效手段。其中基于电磁耦合法的高频电流传感器(HFCT)广泛应用于电力设备局放检测中。为了评估HFCT的性能,提出了一种基于传输系数的HFCT电气参数测试新方法。首先对HFCT进行电路等效和分析,并提出HFCT电气参数的测试方法和测试原理,同时利用网络分析仪和固定的测试夹具搭建测试系统;然后对测试系统进行电路等效和分析,得到网络分析仪测量的传输系数与HFCT的传递函数、传输阻抗之间的关系,并根据传输系数得到HFCT的带宽、上下限频率和传输阻抗;最后对多个HFCT进行实际测试,并统计各HFCT的带宽、上下限频率和灵敏度。测试结果表明,该测试方法能够快速、稳定地获取HFCT的电气参数,为HFCT性能评估提供数据支撑。

关键词: 高频电流传感器; 网络分析仪; 传输系数; 传输阻抗; 测试夹具; 传递函数

Test Method for Electrical Parameters of HFCT Based on Transmission Coefficient

ZHOU Kai¹, HUANG Yonglu¹, HE Min^{1,2}, WAN Hang¹, XIE Min¹, ZENG Qin¹, ZHAO Shilin¹

(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Electric Power Research Institute of State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 401123, China)

Abstract: High frequency current transducer (HFCT) based on electromagnetic coupling method has been widely used in partial discharge detection of power equipment. In order to evaluate the performance of HFCT, a new method for testing the electrical parameters of HFCT based on the transmission coefficient was presented. Firstly, the test methods and test principle for the electrical parameters of HFCT were put forward based on equivalent circuit and analysis of HFCT, and the test system was built by using the network analyzer and the test fixture. Then, through the equivalent circuit and analysis of the test system, the relationship between the HFCT transmission coefficient measured by the network analyzer, the transfer function and transmission impedance were obtained, and the bandwidth, upper and lower frequencies, and transmission impedance of HFCT were obtained according to the transmission coefficient. Finally, actual test was conducted on a number of HFCTs to obtain the bandwidth, upper and lower frequencies, and sensitivity of the HFCTs. Test results show that this test method can acquire electrical parameters of HFCT rapidly and stably, and provide data support for evaluating the performance of HFCT.

Key words: HFCT; network analyzer; transmission coefficient; transmission impedance; test fixture; transfer function

0 引言

随着局部放电检测技术的不断发展,目前已成功应用于高压交流设备的绝缘状况评估^[1]。局部放电检测由于其检测原理的不同,可以分为两类^[2]:一类

是基于电流的电磁感应原理,包括电磁耦合法^[3]、方向耦合法^[4]、超高频电感耦合法^[5];另一类则是基于电压的电容耦合原理,包括电容耦合法^[6]、差分法^[7]、暂态对地电压法^[8]等等。其中,电磁耦合法主要使用高频电流传感器(high frequency current transformer,

HFCT)在地线上耦合高频电流脉冲^[3],实现对设备局部放电信号的检测。由于HFCT具有易安装,较高灵敏度,宽频带等特点,被应用于电力设备出厂试验及在线监测中。特别地,为适用于现场测试环境下局放测试,HFCT应具备特定带宽及足够高的灵敏度。而目前各厂家生产的HFCT性能参数各异,测试方法和测试系统也不尽相同,作为用户或第三方检测机构,为摸清HFCT性能参数,需建立一个统一的测试手段以进一步量化HFCT的性能参数。

目前,国内外测试HFCT的性能参数主要有两种方式:一种是用信号源产生各种频率的正弦波,通过两个相同的高频电容进行分压,再用一个相同的高频电容穿过传感器几何中心,且与分压电容中的其中一个并联,采用示波器测量HFCT输出端口信号,最终得到HFCT的幅频特性曲线^[9-11];另一种是用信号源产生各种频率的正弦波,外接一无感电阻并穿过HFCT,测量无感电阻两端和HFCT输出端的信号,根据频率特性的公式作出HFCT的幅频特性曲线^[12-13]或传输阻抗^[14-15]。上述两种方式在低频时的测试效果较好,但对于较高的频率时,各种连接线在高频下的感抗以及每次测试时测试线穿过HFCT的位置不同都会对测量结果造成误差。因此需要一种新的测试方法,能够减小测试方法及测试设备自身所带来的误差影响。

基于上述测试方法的不足,文中提出了一种新的测试方法,该方法主要是利用测试夹具和网络分析仪对HFCT的传输系数进行测试,利用网络分析仪的自校准功能减小误差。首先对HFCT进行电路分析,提出测试方法,并搭建测试平台;然后对测试电路进行理论分析,得出传输系数与HFCT的传递函数和传输阻抗的公式,从而获得HFCT的电气参数;最后对多种型号HFCT的性能参数进行实际测试。

1 HFCT原理

HFCT传感器实际上是将线圈绕在一环形磁性骨架上制作而成。其基本原理是:当穿过传感器中心的线路中流过电流时,就会在其四周产生环形的磁场,次级绕组将感应出电流信号,通过积分电阻检测该电流信号。其结构原理见图1,等效电路见图2。

图1、2中: $i_i(t)$ 为被测电流; $u_o(t)$ 为输出电压; $i_o(t)$ 为感应电流; R_c 为积分电阻; $u_o(t)$ 为积分电阻两端电压; N 为线圈的匝数; L_s 为线圈的自感; M 为互感; R_s 为线圈绕线的电阻; C_s 为线圈绕线与线圈外壳间产生的分布电容,通常 C_s 很小,在pF量级。

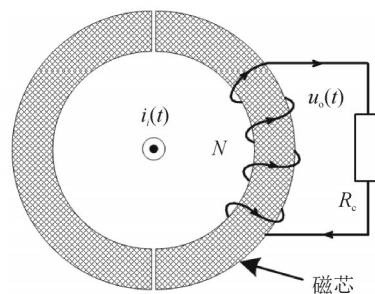


图1 HFCT结构原理图

Fig. 1 Structure diagram of the HFCT

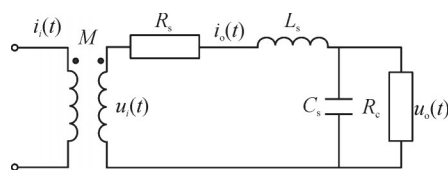


图2 HFCT等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit of the HFCT

根据基尔霍夫电压和电流定律,可列出图2等效电路的方程见式(1)

$$\begin{cases} u_i(t) = M \frac{di_i(t)}{dt} \\ u_o(t) = L_s \frac{di_o(t)}{dt} + R_s i_o(t) + u_o(t) \\ i_o(t) = C_s \frac{du_o(t)}{dt} + \frac{u_o(t)}{R_c} \end{cases} \quad (1)$$

将式(1)变换到频域,可得到HFCT传递函数的幅频特性^[16]为

$$|H(j\omega)| = \frac{MR_c}{L_s + R_c R_s C_s} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega L_s R_c C_s}{L_s + R_s R_c C_s} - \frac{R_c + R_s}{\omega \cdot (L_s + R_s R_c C_s)} \right)^2}} \quad (2)$$

利用式(2)中传递函数的幅频特性表达式可以得到HFCT的各种电气参数,如带宽、上下限频率、灵敏度。因此只需测得HFCT的传递函数,便可对HFCT的性能进行评估。

2 HFCT的测试原理及方法

根据HFCT的基本原理,提出了一种测试HFCT电气参数的新方法,并分析了测试原理。为了保证测试结果的稳定性和可靠性,制作了一个固定测试夹具,材料为铝金属。用于测试时固定HFCT与固定测试夹具之间的相对位置,避免固定测试夹具中部的金属导线穿过HFCT孔的位置不同所带来的误差,同时方便后续对测试系统进行自校准。测试夹具的几何结构见图3,几何尺寸见表1。

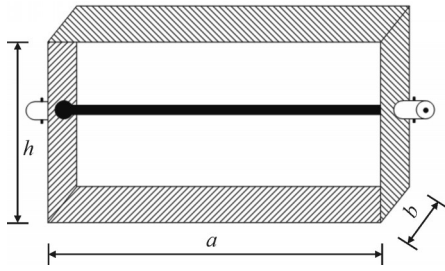


图3 测试夹具的几何结构

Fig. 3 Geometric structure of test fixture

表1 测试夹具的几何尺寸

Table 1 Geometry size of test fixture

参数	长(a)	宽(b)	高(h)
数值/mm	319	220	166

利用固定的测试夹具和网络分析仪搭建了HFCT性能参数的测试系统,其系统原理图见图4。

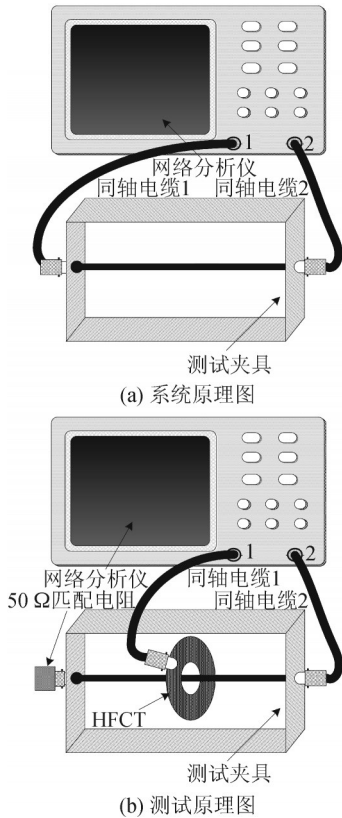


图4 HFCT的参数测试电路原理图

Fig. 4 The principle diagram of the test circuit

for HFCT of parameters

利用如图4的测试系统对HFCT的性能参数进行测试,具体的步骤分3步:第1步,按照如图4(a)所示的电路原理图,将网络分析仪(型号:E5061B)和测试夹具用测试线连接,对测试系统自身的传输系数 S'_{12} 进行测试,并进行自校准;第2步,按照如图4(b)所示的测试系统原理图进行连接,测量得到HFCT的传输系数 S_{12} ;第3步,利用HFCT的传输系数 S_{12} 得到

HFCT的带宽、上下限频率和传输阻抗等参数。将图4的测试电路原理图可以等效为如图5所示的测试电路图。

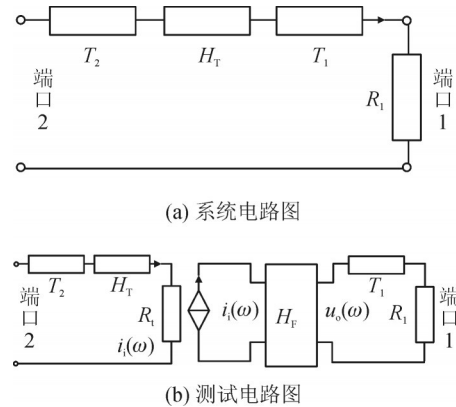


图5 HFCT的参数测试电路图

Fig. 5 Equivalent circuit diagram for testing the parameters of HFCT

图5中,端口2为网络分析仪的信号输出端;端口1为网络分析仪的信号输入端; T_1 、 T_2 分别表示特征阻抗为 50Ω 同轴电缆1、2的传递函数; H_T 表示固定测试夹具的传递函数; H_F 表示HFCT的传递函数; R_1 表示输入端口1的输入阻抗,输入阻抗为 50Ω ; R_i 表示特征阻抗为 50Ω 的匹配电阻。由于网络分析仪的测试结果为传输系数,单位为dB,从图5的电路图中可以得到式(3)、(4)。

$$S'_{12} = 20 \lg(T_2 \cdot H_T \cdot T_1) \quad (3)$$

$$S_{12} = 20 \lg\left(\frac{T_2 \cdot H_T}{R_i} \cdot H_F \cdot T_1\right) - S'_{12} \quad (4)$$

式(4)中, $H_F = u_1(\omega)/i_1(\omega)$ 。

结合图2、5、式(3)、(4),得到如图6所示的HFCT传输阻抗测试的等效电路图,如式(5)所示的HFCT幅频特性与传输系数 S_{12} 之间的关系。

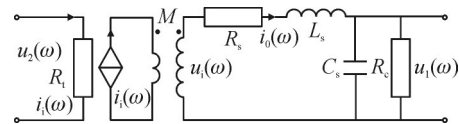


图6 传输阻抗测试的等效电路图

Fig. 6 Equivalent circuit diagram for testing transfer impedance

$$|H_F(\omega)| = S_{12} + 20 \cdot \lg 50 \quad (5)$$

从图6的等效电路图可以看出,网络分析仪测得的传输系数 S_{12} ,与端口1的输入信号 $u_1(\omega)$ 和端口2的输出信号 $u_2(\omega)$ 满足如式(6)所示的数学关系

$$S_{12} = 20 \cdot \lg \frac{u_1(\omega)}{u_2(\omega)} \quad (6)$$

借鉴GB/T 7354—2003^[17]和IEC 60270—2015^[18]对传输阻抗的定义,得到HFCT的传输阻抗为

$$Z(f) = \frac{u_1(\omega)}{i_1(\omega)} \quad (7)$$

其中输入端口2处的电压、电流信号满足式(8)

$$i_1(\omega) = \frac{u_2(\omega)}{R_1} \quad (8)$$

所以,通过式(6)-(8)可以得到HFCT的传输阻抗为

$$Z(f) = 50 \times 10^{S_{12}/20} \quad (9)$$

借鉴 GB/T 7354—2003^[17] 和 IEC 60270—2015^[18] 定义的传感器-6 dB 带宽,以及对应的上、下限频率。从式(5)可以得到, HFCT 的传输系数 S_{12} 与幅频特性所得到的-6 dB 带宽,以及上、下限频率的结果是相同的。所以,可以通过传输系数 S_{12} 得到 HFCT 的-6 dB 带宽和上、下限频率。

3 HFCT 测试结果

利用文中提出的 HFCT 电气参数的测试方法,对多个 HFCT 进行了传输系数 S_{12} 的测试,从而获得了 HFCT 的带宽、上下限频率。文中对测试的 A、B 两个厂家的 HFCT 进行了标记,包括:A 厂家同一型号的 2 支传感器,标记为 A_1 和 A_2 ;B 厂家同一型号的 5 支传感器,标记为 B_1 — B_5 。

各 HFCT 的传输系数 S_{12} 的测试结果见图 7,利用式(9)对传输阻抗进行计算,得到各 HFCT 的传输阻抗特性曲线见图 8。

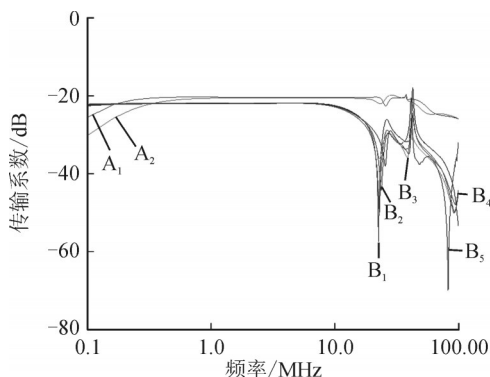


图7 HFCT 传输系数的测试结果

Fig. 7 The test results for transmission coefficient of HFCT

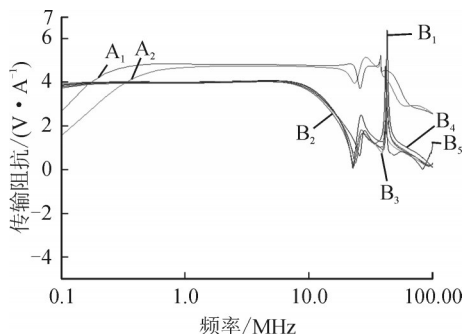


图8 HFCT 传输阻抗的计算结果

Fig. 8 Calculation results for transfer impedance of HFCT

从图 7、8 中可以看出,整个频率测试范围为 100 kHz~100 MHz,且传输系数和传输阻抗在中间部位较为平滑,频率越高或频率越低,传输系数和传输阻抗下降越快,符合滤波器的带通特性。

灵敏度是评价传感器的一个重要参数,为了能得到这一参数,对传感器的灵敏度和传输阻抗定义进行分析。首先罗科夫斯基线圈传感器的灵敏度定义是:输出电压和输入电流的比值,单位是伏/安(V/A)^[19];其次 GB/T 7354—2003^[17] 和 IEC 60270—2015^[18] 对传输阻抗的定义为:输出电压与一恒定输入正弦电流的比值,为频率的函数。从两者的定义可以看出,灵敏度与传输阻抗是相同的,其中最大灵敏度为灵敏度的最大值。

因此,从图 7、8 的结果中可以得到各 HFCT 的上下限频率、带宽和最大灵敏度,各参数的统计结果见表 2。

表2 HFCT 的电气参数

Table 2 The electrical parameters of HFCT

型号	下限频率/MHz	上限频率/MHz	带宽/MHz	最大灵敏度/(V·A ⁻¹)	标称值/(V·A ⁻¹)
A ₁	0.1	100.00	99.90	4.85	5.0
A ₂	0.1	100.00	99.90	4.75	5.0
B ₁	0.1	18.53	18.43	4.09	3.9
B ₂	0.1	17.78	17.68	4.04	3.9
B ₃	0.1	18.59	18.49	4.08	4.0
B ₄	0.1	18.66	18.56	4.07	3.9
B ₅	0.1	19.22	19.12	4.04	4.0

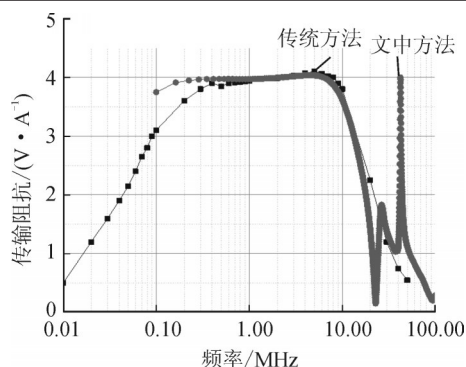
从表 2 中 A、B 两种类型 HFCT 的测试结果可以看出,每种类型的多个 HFCT 的电气参数基本保持一致,具有较好的可重复性。对比测得的最大灵敏度与各 HFCT 传感器的传输阻抗标称值,误差在 5% 以内,说明该方法相较传统测试方法具有可比性。由于网络分析仪(型号:E5061B)的可测试频率范围为 100 kHz~3 GHz,所以测试的传感器的下限频率只能到达 100 kHz。

为进一步验证文中方法的准确性,选取 B₂ 号传感器,采用传统方法测取传感器带宽及传输阻抗曲线,并与文中方法进行对比。B₂ 传感器的两种测试结果对比见表 3, B₂ 传感器传输阻抗的计算结果见图 9。

表3 B₂ 传感器的两种测试方法结果对比

Table 3 Comparison of two test methods for B₂ sensors

方法	下限频率/MHz	上限频率/MHz	带宽/MHz	最大灵敏度/(V·A ⁻¹)
传统方法	0.075	20.00	19.925	4.07(4.0 MHz)
文中方法	0.100	17.78	17.680	4.04(4.5 MHz)

图9 B₂传感器传输阻抗的计算结果Fig. 9 Calculation results for transfer impedance of B₂ sensor

由表3、图9可知,文中方法与传统方法测试结果近似一致。但在高频段,文中方法存在谐振点,考虑是受到改变接线后空间杂散电容改变的影响,但谐振点在传感器带宽范围之外,可忽略其对HFCT参数测试结果的影响。相比于传统HFCT性能参数测试方法,文中所用方法具有以下3点优势:

1)测试速度较快。传统测试方法通常采用任意波形发生器作为信号源,单次测试单个正弦波的频率点,通过测试多个频率点数据,并进行数据手动换算或录入计算机统一换算。可见测量HFCT的带宽及灵敏度所需要的时间和工作量较大。而文中方法中,利用网络分析仪的自动扫频功能,设置起始频率与终止频率,迅速对HFCT进行多个频率点测试,整个扫频测试时间不到1 s,大大提高测试效率。

2)测试精度较高。两种测试方法精度均主要依赖于所选频率点数的多少,点数越多,精度越高。传统测试方法是人为选取尽可能多的频率点数来测量,而使用网络分析仪可通过设置扫频区间获得该频率区间内频率点的传输特性,相对而言,文中所提方法精度相对较高。另外,文中方法利用网络分析仪自校准功能,消除测试线路及测试系统对测量结果的影响,从而减小测量系统的测试误差。

3)测试稳定性较好。由于穿过HFCT的导线位置的差异,对HFCT的测量结果存在影响。传统测试方法所用的测量导线是悬空的,很难保证每次都能位于HFCT中心孔的中间位置,所以对同一HFCT多次测量结果,以及多种传感器的测量结果,很难进行一个比较好的对比。而文中针对HFCT采用的固定测试夹具可以较好固定穿过HFCT的测量导线与HFCT的相对空间位置,从而保证同一传感器的多次测量结果数据稳定性。

4 结论

文中提出了一种测试HFCT性能参数的新方

法,通过理论分析和数学推导,得到了传输系数与传递函数、传输阻抗的关系,从而得到HFCT的-6 dB带宽、上下限频率和灵敏度,并对多种HFCT的传输系数进行了实测,获取各传感器的电气参数。得到以下结论:

1)提出了一套测试HFCT传输系数的测试方法和测试系统,且该测试方法较传统方法更为快捷、准确、稳定。

2)推导出传输系数与传递函数、传输阻抗的换算公式,从而通过传输系数得到HFCT的带宽和上、下限频率,通过传输阻抗得到HFCT的灵敏度,为HFCT的性能评估提供依据。

参考文献:

- [1] 芦竹茂,刘庆,王天正,等. 多种带电检测方法在GIS局部放电诊断中的综合应用与研究[J]. 高压电器, 2017, 53(10): 222-226.
- [2] LU Zhumao, LIU Qing, WANG Tianzheng, et al. Comprehensive application and research of multi live detection methods in partial discharge diagnosis for GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(10): 222-226.
- [3] 魏钢. 高压交联聚乙烯电力电缆接头绝缘缺陷检测及识别研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013: 7-9.
- [4] WEI Gang. Study of detecting and recognition of insulating defect in high-voltage XLPE power cable joint[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013: 7-9.
- [5] ZHANG Z S, XIAO D M, LI Y. Rogowski air coil sensor technique for on-line partial discharge measurement of power cables[J]. IET Science Measurement & Technology, 2009, 3(3): 187-196.
- [6] POMMERENKE D, STREHL T, HEINRICH R, et al. Discrimination between internal PD and other pulses using directional coupling sensors on HV cable systems[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, 6(6): 814-824.
- [7] 唐炬,李伟,杨浩,等. 高压电缆附件局部放电超高频检测与分析[J]. 高电压技术, 2009, 35(7): 1571-1577.
- [8] TANG Ju, LI Wei, YANG Hao, et al. Ultra-high frequency detection and analysis for partial discharge in high-voltage cable accessories[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(7): 1571-1577.
- [9] 姜芸,闵虹,夏荣,等. 高压交联电缆接头局部放电的电容耦合法检测及分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(8): 2005-2011.
- [10] JIANG Yun, MIN Hong, XIA Rong, et al. Capacitive coupling detection and characteristic analysis of partial discharge in high-voltage XLPE power cable joints[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(8): 2005-2011.

- [7] KATSUTA G, TOYA A, MURAOKA K, et al. Development of a method of partial discharge detection in extra-high voltage cross-linked polyethylene insulated cable lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(3): 1068-1079.
- [8] 李旭涛, 周凯, 万利, 等. 基于TEV法的电缆终端局部放电状态监测装置的研制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(12): 98-103.
LI Xutao, ZHOU Kai, WAN Li, et al. Development of cable termination PD condition monitoring device based on TEV method[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(12): 98-103.
- [9] 谈雪晶, 宫黛, 孙静, 等. 电力电缆局放电磁耦合高频传感器的研制[J]. 电线电缆, 2014(3): 14-18.
TAN Xuejing, GONG Dai, SUN Jing, et al. Design of electromagnetic coupling high frequency sensor used in cable partial discharge[J]. Electric Wire & Cable, 2014(3): 14-18.
- [10] 孙静. 高压电力电缆局部放电检测技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012: 39-41.
SUN Jing. Study on partial discharge of high voltage power cable[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012: 39-41.
- [11] 戴旭益, 杨珀, 沈剑荣, 等. 局部放电高性能电流传感器的设计[J]. 上海电力学院学报, 2014, 30(6): 559-562.
DAI Xuyi, YANG Po, SHEN Jianrong, et al. Design of high quality current sensor for partial discharge[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2014, 30(6): 559-562.
- [12] 赵学风, 孙振权, 姚秀, 等. 冲击电压下局部放电测量用高频电流传感器[J]. 高电压技术, 2009, 35(11): 2704-2708.
ZHAO Xuefeng, SUN Zhenquan, YAO Xiu, et al. High-frequency current transducer for measurement of PD under impulse voltage[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(11): 2704-2708.
- [13] 赵学风, 孙振权, 姚秀, 等. 振荡冲击电压下局部放电检测系统研究[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(1): 188-193.
ZHAO Xuefeng, SUN Zhenquan, YAO Xiu, et al. Study on partial discharge detection system under oscillatory impulse voltage[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(1): 188-193.
- [14] 李婷, 叶会生, 李欣, 等. 高频局部放电传感器传输特性测试方法及试验研究[J]. 湖南电力, 2016, 36(2): 39-42.
LI Ting, YE Huisheng, LI Xin, et al. Test method and experiment research of transmission performance test for high-frequency partial discharge sensors[J]. Hunan Electric Power, 2016, 36(2): 39-42.
- [15] 电力设备带电检测仪器技术规范-第5部分: 高频法局部放电带电检测仪: Q/GDW 11304.5—2015[S]. 2015.
Technical specification for energized test device of electrical equipment-part5: Technical specification for high-frequency partial discharge detector: Q/GDW 11304.5—2015[S]. 2015.
- [16] 张磊. 基于XLPE电缆局部放电检测的传感器研究[D]. 天津: 天津大学, 2009: 13-14.
ZHANG Lei. Study on sensor for PD detection in XLPE cable[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009: 13-14.
- [17] 局部放电测量: GB/T 7354—2003[S]. 2003.
Partial discharge measurement: GB/T 7354—2003[S]. 2003.
- [18] High-voltage test techniques: Partial discharge measurements: IEC 60270—2015[S]. 2015.
- [19] 刘晓鸥. 用于局部放电在线监测的高频电流传感器研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007: 16.
LIU Xiao'ou. Study of high frequency current transformer for online monitoring of partial discharge[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007: 16.

周凯(1975—), 男, 博士, 教授, 主要从事高电压与绝缘技术方向研究。

黄永禄(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事电力设备局部放电研究。

(上接第300页)

proximation using incremental constructive feedforward networks with random hidden nodes[J]. IEEE Transactions on Neural Networks/a Publication of the IEEE Neural Networks Council, 2006, 17(4): 879-892.

何金(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事高电压与绝缘技术研究。