

基于脉冲源的高频电流传感器传输阻抗测量新方法

陈孝信^{1,2}, 钱勇¹, 许永鹏¹, 舒博¹, 盛戈隼¹, 江秀臣¹

(1. 上海交通大学 电气工程系, 上海 200240; 2. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310014)

摘要: 针对目前点频法在测量局部放电高频电流传感器(HFCT)传输阻抗上的不足, 提出一种基于脉冲源的新方法。该方法使用脉冲作为激励信号注入, 仅需1次测量即可获得检测频段内的传输阻抗曲线, 极大地缩短了测试时间, 提高了测试效率, 具有操作简便、分辨率高等优点。搭建实验平台测量了多种型号 HFCT 的传输阻抗, 分析了脉冲激励对测量结果的影响, 并且将脉冲注入法和点频法进行了对比。实验结果表明: 脉冲注入法宜使用上升时间小于 10 ns 的高斯脉冲作为激励信号, 其测量结果与点频法高度一致, 两者得到的传输阻抗曲线均值差不超过 0.1 V/A, 均方根误差小于 0.25 V/A, 相关系数大于 0.85。

关键词: 局部放电; 高频电流传感器; 传输阻抗; 脉冲; 测量

中图分类号: TM 247

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2019.03.019

0 引言

电力电缆是输电线路的重要组成部分, 其绝缘状态直接关系到电力系统的安全与稳定, 因此有必要对电缆的绝缘状态进行监测与评估。局部放电检测是目前最常见的电缆绝缘状态在线监测与带电检测手段之一, 其能够及时有效地发现电缆绝缘缺陷, 从而避免进一步的电缆故障^[1-3]。常见的电缆局部放电检测技术有高频电流法^[4]、电容耦合法^[5]、轴向磁场耦合法^[6]、方向传感器检测法^[7]、金属模电极法^[8]、特高频法^[9]、超声检测法^[10]等。其中高频电流法的应用最为广泛, 已经被国家电网公司列为高压电缆状态检测的必做项目^[11]。

高频电流法使用高频电流传感器 HFCT (High Frequency Current Transformer) 对流经电缆接地线或交叉互联线上的局部放电电流进行检测^[12-13]。HFCT 属于线圈型电流传感器, 通过与积分电路相连, 能够产生与流过其线圈中心的电流成正比的电压信号。传输阻抗是表征 HFCT 性能的主要参数, 定义为正弦电流作为输入时, 输出电压幅值和输入电流幅值的比。HFCT 传输阻抗的大小是决定高频电流法检测效果的因素之一, 因此对传输阻抗的准确测量具有重要的意义。目前对 HFCT 传输阻抗的测量工作主要依据国家电网标准 Q/GDW 11304.5 中推荐的点频法进行, 使用正弦信号源接入被测电路, 从低到高不断改变信号源频率并进行逐点测量^[14]。点频法原理简单, 对设备要求低, 但由于需要逐点测量, 整体而言效率低下、繁琐费时, 难以对多批量 HFCT 进行快速准确测量。另一方面, 点频

法得到的测量结果中频点间往往过于离散, 导致传输阻抗曲线不够平滑, 且容易遗漏部分突变点。

脉冲测量是一种新兴的时域测量技术。不同于传统的频域测量技术, 该方法使用宽频带的瞬时脉冲信号作为激励信号来获取被测设备的系统响应。随着脉冲信号发生器和数字示波器性能的提高, 脉冲注入法在电磁测量领域得到了发展和应用, 例如特高频传感器校验^[15-16]和材料屏蔽性能测试^[17-18]等。针对现有方法的不足, 本文提出了一种基于脉冲源的 HFCT 传输阻抗测量方法, 该方法仅需进行 1 次测量即可获得检测频段内各频点上的传输阻抗值, 极大地缩短了测试时间。最后搭建了实验平台, 对不同厂商多种型号的 HFCT 进行了传输阻抗的脉冲测量, 研究分析了脉冲波形选择对测量结果的影响, 并与传统点频法的测量结果进行了对比。

1 HFCT 的工作原理与性能要求

为方便安装与维护, HFCT 通常设计为钳形结构, 可以在不影响电缆运行的情况下进行非侵入式的检测^[19]。HFCT 结构和等效电路分别如图 1 和图 2 所示。图中, L_s 为线圈自感; M 为线圈互感; R_s 为线圈等效电阻; C_s 为等效杂散电容; R 为积分电阻; $i_1(t)$ 为流经线圈的输入电流; $i_2(t)$ 为积分电阻上的输出电压; $u_1(t)$ 为线圈感应电压; $u_2(t)$ 为积分电阻上的输出电压。由 HFCT 等效电路可得电路方程:

$$u_1(t) = L_s \frac{di_2(t)}{dt} + R_s i_2(t) + u_2(t) \quad (1)$$

$$i_2(t) = C_s \frac{du_2(t)}{dt} + \frac{u_2(t)}{R} \quad (2)$$

同时, HFCT 还满足式(3)和(4)的自积分条件:

$$L_s \frac{di_2(t)}{dt} \gg (R + R_s) i_2(t) \quad (3)$$

收稿日期: 2018-12-16; 修回日期: 2018-12-17

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2014CB239506)

Project supported by the National Basic Research Program of China(973 Program)(2014CB239506)

$$\frac{u_2(t)}{R} \gg C_s \frac{du_2(t)}{dt} \quad (4)$$

另外有:

$$u_1(t) = M \frac{di_1(t)}{dt} \approx L_s \frac{di_2(t)}{dt} \quad (5)$$

结合式(1)~(5)可得 HFCT 的系统传递函数^[20]如式(6)所示。

$$Z(\omega) = \frac{U_2(\omega)}{I_1(\omega)} = \frac{j\omega MR}{R + R_s - L_s RC_s \omega^2 + j\omega(L_s + RR_s C_s)} \quad (6)$$

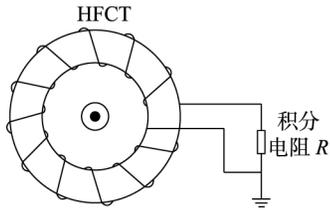


图1 HFCT 结构示意图

Fig.1 Structure of HFCT

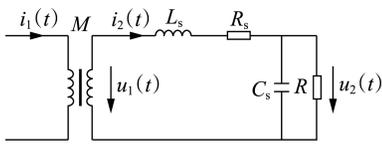


图2 HFCT 等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of HFCT

易知 HFCT 的系统传递函数即为其传输阻抗。利用高频谐振回路理论可以进一步得到 HFCT 的上限频率、下限频率和工作频宽^[21]分别如式(7)、(8)和(9)所示。

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \frac{R + R_s}{L_s + RR_s C_s} \approx \frac{1}{2\pi} \frac{R + R_s}{L_s} \quad (7)$$

$$f_2 = \frac{1}{2\pi} \frac{L_s + RR_s C_s}{L_s RC_s} \approx \frac{1}{2\pi} \frac{1}{RC_s} \quad (8)$$

$$B_w = f_2 - f_1 = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{L_s + RR_s C_s}{L_s RC_s} - \frac{R + R_s}{L_s + RR_s C_s} \right) \quad (9)$$

根据 Q/GDW 11304.5 国家电网标准, HFCT 的主要工作频率应在 3~30 MHz 的范围内, 且在该范围内的传输阻抗不小于 5 V/A。

2 HFCT 传输阻抗测量

2.1 点频法

传统点频法的原理和流程如附录 A 中的图 A1 所示。

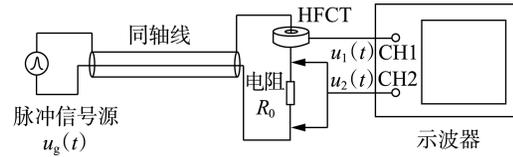
测试时, 正弦信号源 $u_s(t)$ 输出频率可调的正弦电压信号, 并在回路中产生相应频率的正弦电流信号。采用示波器记录频点 f_0 处, HFCT 输出电压整周期波形的峰峰值 U_{pp1} 和电阻 R_0 两端的电压峰峰值 U_{pp2} , 然后按式(10)求得此时的传输阻抗值。

$$Z(f_0) = U_{pp1}(f_0) R_0 / U_{pp2}(f_0) \quad (10)$$

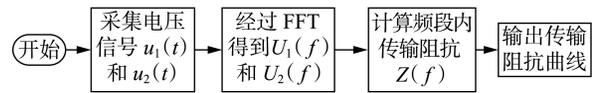
不断改变测试频率 f_0 , 完成 3~30 MHz 范围内各频点传输阻抗的测量。

2.2 脉冲注入法

脉冲注入法使用脉冲信号源 u_g 代替可调正弦信号源, 其测试原理与流程如图 3 所示。



(a) 测试原理



(b) 测试流程

图3 脉冲注入法的测试原理与流程

Fig.3 Test principle and procedure of pulse injection method

为降低由阻抗不匹配引起的脉冲折反射对测试结果的影响, 同时也为减少外界干扰, 采用 50 Ω 同轴线进行脉冲传输, 且设定负载电阻 $R_0 = 50 \Omega$ 。测量时, 在同轴线末端抽头穿过 HFCT 后串接负载电阻 R_0 。在信号源输出脉冲信号的同时, 采集 HFCT 的输出电压信号 $u_1(t)$ 和电阻 R_0 两端的电压信号 $u_2(t)$, 按式(11)求得该 HFCT 的传输阻抗。

$$Z(f) = \frac{F\{u_1(t)\} R_0}{F\{u_2(t)\}} = \frac{U_1(f) R_0}{U_2(f)} \quad (11)$$

其中, F 表示对时域信号的快速傅里叶变换 (FFT); $U_1(f)$ 、 $U_2(f)$ 分别为 $u_1(t)$ 和 $u_2(t)$ 的 FFT 结果。由此可见, 脉冲注入法只需要对电压信号进行 1 次采集, 利用 FFT 即可获得所需频段内各频点的传输阻抗, 直接给出传输阻抗曲线。

示波器本身的系统特性将会影响所测脉冲信号波形。实际上, 示波器的测量结果可以认为是脉冲信号和示波器系统的级连。在进行脉冲测量时, 只有选用的示波器的带宽为被测信号的 3 倍以上, 且其上升时间为被测信号的 1/3 以下时, 才能认为示波器示值表示的是被测信号的实际值。针对 HFCT 传输阻抗的主要测量频段 3~30 MHz, 所选示波器的带宽至少应为 100 MHz^[22]。如果需要测量更高频段的特性, 则示波器带宽需要进一步提高。另一方面, 脉冲信号本身也会对传输阻抗测量结果产生影响, 这将在第 4 节进行讨论。

3 实验设置

为进一步研究 HFCT 传输阻抗脉冲测量方法的有效性和影响因素, 搭建了传输阻抗测量系统。该系统可以选择使用点频法或脉冲源法, 主要由任意函数发生器、同轴传输装置和示波器组成, 各设备

的性能参数如附录 B 中表 B1 所示。其中,示波器型号为 Agilent DSO6104A,其带宽达到 1 GHz,完全满足脉冲测量技术中对采样仪器的带宽要求。

采用点频法进行测量时,1 MHz 以下每 100 kHz 测量 1 个频点,1~50 MHz 之间每 1 MHz 测量 1 个频点。采用脉冲注入法进行测量时,信号采样时间长度为 10 μ s,采样点数为 40 000 点。测试对象为 5 款不同厂家、不同型号的 HFCT,分别标识为型号 A、B、C、D 和 E,如附录 A 中的图 A2 所示。

为研究不同脉冲源波形对所测传输阻抗的影响,设定高斯脉冲和方波脉冲 2 种波形,形成表 1 所示的 5 种信号。脉冲注入法所用脉冲峰值统一为 5 V,点频法所用正弦信号峰峰值保持为 1 V。上述脉冲由表 B1 中的任意函数发生器 Tektronix AFG3101 产生,其幅度的典型精度值为 $\pm(0.5\%V_{set} + 0.5 \text{ mV})$, V_{set} 为设置值。同时采用低衰减的 RG142 同轴传输线,保证脉冲波形的稳定性。

表 1 脉冲波形参数

Table 1 Parameters of pulse waveforms

编号	波形	上升时间/ns	脉冲宽度/ns	脉冲间最小相关系数
1	高斯脉冲	5	—	0.997 6
2	高斯脉冲	10	—	0.998 7
3	高斯脉冲	25	—	0.999 3
4	方波脉冲	5	50	0.999 6
5	方波脉冲	5	100	0.999 7

为明确说明脉冲注入的前后一致性,避免因脉冲源前后波形误差而降低测试结果的可信度,在进行传输阻抗测试前使用该组实验设备采集了表 1 中所列的高斯脉冲波形信号和方波脉冲波形信号各 10 组,计算同类波形间的相关系数,相关系数的最小值如表 1 所示。由表 1 可知,脉冲源产生的脉冲间相关系数几乎为 1,可以认为脉冲源前后生成的波形完全一致。

4 测试结果

4.1 脉冲波形选择

以图 A2 中型号为 A 的 HFCT 为例,比较不同脉冲源下传输阻抗的计算结果。

4.1.1 高斯脉冲与方波脉冲比较

采用表 1 中上升时间均为 5 ns 的 1 号、4 号和 5 号脉冲的测量结果如图 4 所示,图中同时给出了点频法的测量结果。

由图 4 可见,脉冲注入法与点频法的测量结果高度一致,使用 4 号方波脉冲与 5 号方波脉冲得到的传输阻抗曲线与使用 1 号高频脉冲的传输阻抗曲线具有相同的趋势,但是在部分频点上存在着较大差异。造成这种差异的原因在于高斯脉冲与方波脉冲的信号频谱的不同,如图 5 所示。对于方波信号

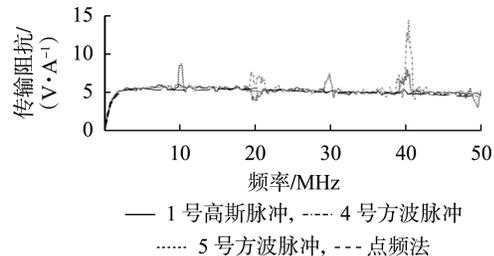


图 4 高斯脉冲和方波脉冲的测量结果

Fig.4 Measurement results of Gaussian pulse and square wave pulses

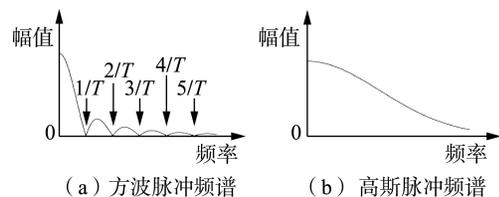


图 5 高斯脉冲和方波脉冲的频谱

Fig.5 Spectra of Gaussian pulse and square wave pulse

而言,其频谱以 $\text{Sa}(2\pi fT)$ 函数的形式分布于频域,其中, T 为方波的脉冲宽度, f 为频率。这就意味着在频率 n/T ($n = 1, 2, \dots$) 处存在零值频谱,结合式 (11) 可知,在零值频谱附近由于分母趋近 0,测量误差将被放大,使得传输阻抗的计算结果极不稳定,从而产生图 4 中 4 号方波脉冲与 5 号方波脉冲的突变点。相对地,高斯脉冲的频谱为高斯函数,理论上在全频率范围内不存在零点,因此更加适用于本文提出的脉冲注入法。

4.1.2 不同上升时间的高斯脉冲比较

采用上升时间分别为 5 ns、10 ns 和 25 ns 的 1、2 和 3 号高斯脉冲的测量结果如图 6 所示。由图可见,1、2 和 3 号高斯脉冲的测量结果在 15 MHz 前与点频法的测量结果具有较高的一致性,3 号脉冲的测量结果在 15 MHz 后的传输阻抗曲线表现出异常的振荡现象,2 号脉冲的测量结果也从 30 MHz 左右开始出现振荡。此类振荡的产生原因与脉冲源上升时间有直接关联。高斯脉冲的频谱幅值随着频率增长而单调递减。对于有限的高斯脉冲,其在高频段的幅值逐渐下降,且在某一频率之后由于频率幅值过小,同样会使得式 (11) 产生病态问题,令计算结果不稳定而引起振荡,降低测量的可靠性^[23]。由高

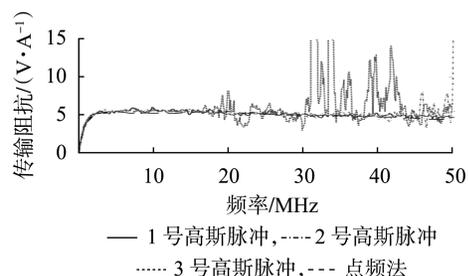


图 6 不同上升时间高斯脉冲的测量结果

Fig.6 Measurement results of Gaussian pulses with different rise times

斯函数的单调递减特性可知,此类问题往往发生在幅值小的高频段,可能导致测试需求无法得到满足。时域脉冲的上升时间越短,其高频段的幅值相对越高,因此通过缩短脉冲的上升时间可以提高传输阻抗测量结果中振荡失真的起始频率。

HFCT 传输阻抗的测量频率 30 MHz 以内,从图 6 中的测试结果可以看出,当高斯脉冲的上升时间大于 10 ns 时,30 MHz 以内的测试结果将会产生振荡。因此在使用脉冲注入法测量 HFCT 传输阻抗特性时,所选用高斯脉冲的上升时间不宜超过 10 ns。

4.2 一致性比较

使用 1 号高斯脉冲作为脉冲源,比较各型号 HFCT 传输阻抗的脉冲测量结果和点频测量结果,传输阻抗曲线如图 7 所示。可以看出 2 种测试方法的结果基本相同,其中脉冲注入法的分辨率更高。

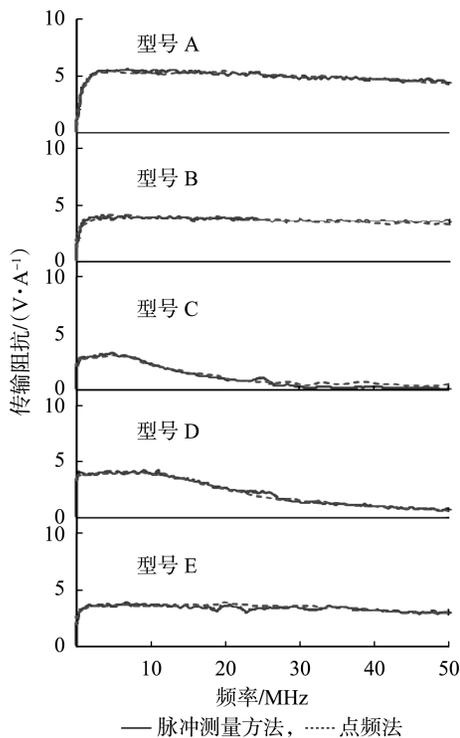


图 7 不同型号 HFCT 的传输阻抗测量结果

Fig.7 Measurement results of transfer impedances of different HFCTs

利用线性插值将点频法的数据点数扩展到与脉冲注入法相同,设此时点频法测量数据为 X_i ,均值为 \bar{X} ;脉冲法测量数据为 Y_i ,均值为 \bar{Y} ;数据点数为 N , $i=1,2,\dots,N$ 。定义如下评价参数。

a. 均值差 Δm 。

$$\Delta m = \left| \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i \right| = |\bar{X} - \bar{Y}| \quad (12)$$

b. 均方根误差 ε 。

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2} \quad (13)$$

c. 相关系数 r 。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (14)$$

各型号 HFCT 测量结果的评价参数如表 2 所示。传输阻抗均值大小是评定 HFCT 检测灵敏度的重要指标,测试结果显示 2 种方法的均值差均不超过 0.1 V/A,与均值本身相比差值非常有限,即 2 种方法的均值基本保持一致。同时均方根误差小于 0.25 V/A,表明 2 种方法间的波动偏差很小。相关系数是反映变量间线性相关关系的统计指标。由于点频法的测试点数有限,无法像脉冲注入法一样快速获取传输阻抗曲线中的细节,特别是微小突变部分,因此两者测试结果的相关系数不完全接近于 1。通常当相关系数绝对值大于 0.8 时,认为数据之间高度相关。而表 2 所示点频法与脉冲注入法测试结果曲线的相关系数均大于 0.85,表明 2 个曲线波形高度相似,具有相同的变化趋势。上述分析结果证明了脉冲注入法与现有的点频法在测量结果上的一致性,表明脉冲注入法可以合理替代点频法进行 HFCT 传输阻抗的测量。

表 2 测量结果评价参数

Table 2 Evaluation parameters of measurement results

型号	$\bar{X}/$ (V·A ⁻¹)	$\bar{Y}/$ (V·A ⁻¹)	$\Delta m/(V·A-1)$	$\varepsilon/(V·A-1)$	r
A	4.98	4.99	0.01	0.147	0.964
B	3.65	3.68	0.03	0.145	0.894
C	1.21	1.11	0.10	0.242	0.988
D	2.22	2.27	0.05	0.193	0.989
E	3.45	3.36	0.09	0.201	0.856

5 结论

本文提出一种基于脉冲源的局部放电 HFCT 传输阻抗测量方法,建立了实验平台,得出以下结论。

a. 为保证传输阻抗脉冲测量方法的准确性,所选信号采集设备带宽应在 100 MHz 以上,同时脉冲信号宜采用上升时间不超过 10 ns 的高斯脉冲。

b. 脉冲注入法与传统点频法的测量结果之间具有较高的一致性。分别使用 2 种方法测量 5 种型号 HFCT 的传输阻抗曲线,不同方法得到的同种型号曲线之间均值差不超过 0.1 V/A,均方根误差小于 0.25 V/A,相关系数大于 0.85。

c. 与现有的点频法相比,脉冲注入法具有操作简便和分辨率高等优点,大幅提高了传输阻抗的测试效率,且能够更好地展现传输阻抗曲线的细节成分。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] EIGNER A, RETHMEIER K. An overview on the current status of partial discharge measurements on AC high voltage cable accessories [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2016, 32(2): 48-55.
- [2] WILD M, TENBOHLEN S, GULSKI E, et al. Basic aspects of partial discharge on-site testing of long length transmission power cables [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(2): 1077-1087.
- [3] 江秀臣, 蔡军, 董小兵, 等. 110 kV 及以上电压等级交联电缆在线监测技术[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(8): 13-17.
JIANG Xiuchen, CAI Jun, DONG Xiaobing, et al. On-line monitoring techniques for 110 kV and above XLPE cable[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(8): 13-17.
- [4] 朱海钢, 冯江, 罗俊华. XLPE 电力电缆局部放电高频检测技术的研究[J]. 高电压技术, 2004, 30(增刊 1): 75-76.
ZHU Haigang, FENG Jiang, LUO Junhua. Study on PD HF detection technology of XLPE power cable[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(S1): 75-76.
- [5] TIAN Y, LEWIN P L, DAVIES A E, et al. Partial discharge detection in cables using VHF capacitive couplers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10(2): 343-353.
- [6] WOUTERS P A A F, VAN DER LAAN P C T, STEENNIS E F. Inductive ultra-wide band detection and location of partial discharges in high-voltage cables [J]. European Transactions on Electrical Power Engineering, 1994, 4(3): 223-229.
- [7] POMMERENKE D, STREHL T, HEINRICH R, et al. Discrimination between internal PD and other pulses using directional coupling sensors an HV cable systems[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, 6(6): 814-824.
- [8] 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.
- [9] 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.
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.
- [10] 郭灿新, 张丽, 钱勇, 等. XLPE 电力电缆中局部放电检测及定位技术的研究现状[J]. 高压电器, 2009, 45(3): 56-60.
GUO Canxin, ZHANG Li, QIAN Yong, et al. Current status of partial discharge detection and location techniques in XLPE power cable [J]. High Voltage Engineering, 2009, 45(3): 56-60.
- [11] 国家电网公司. 电力电缆局部放电带电检测设备技术规范: Q/GDW 11224—2014[S]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [12] XU Y, GU X, LIU B, et al. Special requirements of high frequency current transformers in the on-line detection of partial discharges in power cables [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2016, 32(6): 8-19.
- [13] 陈孝信, 钱勇, 许永鹏, 等. 隧道敷设高压电缆特征导纳模型及局部放电信号幅值分布特性[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(7): 171-177.
CHEN Xiaoxin, QIAN Yong, XU Yongpeng, et al. Characteristic admittance model and PD amplitude distribution of tunnel-installed high-voltage cables [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(7): 171-177.
- [14] 国家电网公司. 电力设备带电检测仪器技术规范第 5 部分: 高频局部放电带电检测仪器技术规范: Q/GDW 11304.5—2015[S]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [15] JUDD M D, FARISH O. A pulsed GTEM system for UHF sensor calibration[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1998, 47(4): 875-880.
- [16] CHEN X, QIAN Y, SHENG G, et al. A time-domain characterization method for UHF partial discharge sensors[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(1): 110-119.
- [17] 陈翔, 陈永光, 魏明, 等. 采用法兰同轴法的材料电磁脉冲屏蔽效能时域测试方法[J]. 高电压技术, 2012, 38(3): 594-600.
CHEN Xiang, CHEN Yongguang, WEI Ming, et al. Time domain testing methods of material's shielding effectiveness of electromagnetic pulse using flange coaxial[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(3): 594-600.
- [18] HERLEMANN H, KOCH M. Measurement of the transient shielding effectiveness of enclosures using UWB pulses inside an open TEM waveguide[J]. Advances in Radio Science, 2007, 5(E.2): 75-79.
- [19] ZHOU Y, QIN Y, CHAPPELL P. Cost-effective on-line partial discharge of measurements for cables [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2006, 22(2): 31-38.
- [20] 赵来军, 何俊佳, 钱冠军, 等. 电力变压器局放宽频带传感器的研究[J]. 高电压技术, 2005, 31(3): 46-47.
ZHAO Laijun, HE Junjia, QIAN Guanjun, et al. Research on wide band sensor for PD on-line monitoring[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(3): 46-47.
- [21] 马翠姣, 黄新红, 邱毓昌, 等. 局部放电检测用宽频带电流传感器的探讨[J]. 高压电器, 2001, 37(1): 24-26.
MA Cuijiao, HUNAG Xinhong, QIU Yuchang, et al. Optimization of the wide frequency bandwidth current transducer for PD detection [J]. High Voltage Apparatus, 2001, 37(1): 24-26.
- [22] 刘明亮, 陆福敏, 朱江森, 等. 现代脉冲计量[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 57-82.
- [23] 陈孝信, 钱勇, 盛戈皞, 等. 基于频域反卷积的局部放电特高频传感器时域参数研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1488-1494.
CHEN Xiaoxin, QIAN Yong, SHENG Gehao, et al. Study of UHF partial discharge sensor time domain parameters based on frequency domain deconvolution[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1488-1494.

作者简介:



陈孝信

陈孝信(1990—),男,浙江苍南人,工程师,博士,研究方向为电力设备状态评价和故障诊断技术(E-mail: shawcine@live.com);

钱勇(1977—),男,湖北武汉人,讲师,博士,通信作者,主要从事输变电设备状态监测与智能化方面的研究工作(E-mail:

qian_yong@sjtu.edu.cn)。

(下转第 131 页 continued on page 131)

的应用[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2591-2603.

LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, ZHONG Qingchang, et al. Virtual synchronous generator and its applications in micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2591-2603.

[14] 胡文强, 吴在军, 孙充勃, 等. 基于VSG的储能系统并网逆变器建模与参数整定方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(8): 13-23.

HU Wenqiang, WU Zaijun, SUN Chongbo, et al. Modeling and parameter setting method for grid-connected inverter of energy storage system based on VSG[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(8): 13-23.

作者简介:



杨 赞

杨 赞(1993—), 男, 江苏盐城人, 硕士研究生, 主要研究方向为虚拟同步发电机及其在微电网中的应用(**E-mail**: seanyang@163.com);

梅 飞(1982—), 男, 安徽定远人, 讲师, 博士, 主要研究方向为新能源发电技术(**E-mail**: meifei@hhu.edu.cn);

张宸宇(1989—), 男, 江苏扬州人, 工程师, 博士, 主要研究方向为新能源及电力电子技术(**E-mail**: yu_z@sina.cn)。

Coordinated adaptive control strategy of rotational inertia and damping coefficient for virtual synchronous generator

YANG Yun¹, MEI Fei², ZHANG Chenyu³, MIAO Huiyu¹, CHEN Hongfei¹, ZHENG Jianyong¹

(1. Electrical Engineering Department, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

3. Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211103, China)

Abstract: The control strategy of VSG (Virtual Synchronous Generator) introduces rotational inertia and damping coefficient that are originally from synchronous generators to the inverter control, which improves the frequency response and enhances the anti-disturbance capability. However, the system dynamic adjustment performance may be negatively impacted. Hence, a coordinated adaptive control strategy of rotational inertia and damping coefficient for VSG is proposed. Firstly, the mathematical model of the VSG is established, and the influence of parameters on the system output characteristics are analyzed. Secondly, the proposed control strategy is applied on the VSG, in which the stability analysis under the change of corresponding parameters is performed. Finally, compared with the traditional VSG control strategy, simulative results on MATLAB/Simulink verify the feasibility and effectiveness of the proposed control strategy.

Key words: virtual synchronous generator; frequency response; rotational inertia; damping coefficient; adaptive control strategy

(上接第124页 continued from page 124)

A novel pulse-source-based method for measuring transfer impedance of high frequency current sensor

CHEN Xiaoxin^{1,2}, QIAN Yong¹, XU Yongpeng¹, SHU Bo¹, SHENG Gehao¹, JIANG Xiuchen¹

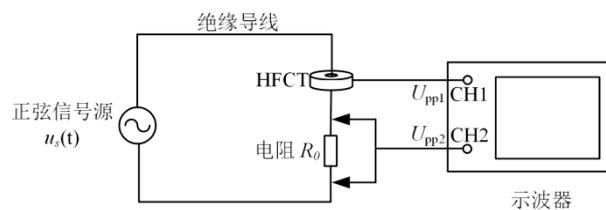
(1. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, China)

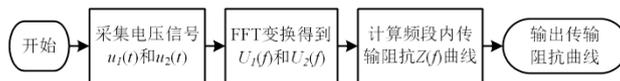
Abstract: Aiming at the shortcomings of the existing single-point frequency method in measuring the transfer impedance of HFCT (High Frequency Current Transformer) with partial discharge, a novel method based on pulse source is proposed. The proposed method adopts a pulse signal as the injecting source and can obtain the transfer impedance curve within the detection band by measuring only once, it greatly reduces the test time, improves the test efficiency, and has the advantages of simple operation and high resolution. An experimental platform is built, and the transfer impedances of various types of HFCTs are measured. Moreover, the influences of pulse signal source on the measurement results are analyzed. Finally, the pulse injection method and the single-point frequency method have been compared. The results show that Gaussian pulse with a rise time shorter than 10 ns should be used as the signal source. The measured transfer impedance curves of the pulse injection method and the single-point frequency method are highly consistent. The mean difference of the transfer impedance curves obtained by the two methods is at most 0.1 V/A, the root mean square error is less than 0.25 V/A, and the correlation coefficient is larger than 0.85.

Key words: partial discharge; High Frequency Current Transformer (HFCT); transfer impedance; pulse; measurement

附录 A



(a) 测试原理



(b) 测试流程

图 A1 点频法的测试原理与流程

Fig.A1 Test principle and procedure of single-point frequency method



图 A2 被测 HFCT

Fig.A2 HFCTs under test

附录 B

表 B1 实验设备参数

Table B1 Parameters of experimental equipments

实验设备	型号	性能参数
任意函数 发生器	Tektronix AFG3101	采样率: 1GSa/s
		最大正弦频率: 100MHz
		最小上升时间: 5ns
		幅度典型精度值: $\pm(\text{设置值的 } 0.5\%+0.5\text{mV})$
示波器	Agilent DSO6104A	采样率: 4GSa/s 带宽: 1GHz
	同轴传输 线	RG142
阻抗: 50 Ω		
衰减: <3.6dB/100m @10MHz		