

基于脉冲频率响应法的变压器绕组变形带电检测仪

李成祥¹, 夏 麒^{1,2}, 朱天宇¹, 赵仲勇¹, 姚陈果¹, 米 彦¹

(1. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044;

2. 四川电力设计咨询有限责任公司, 四川 成都 610041)

摘要: 针对目前变压器绕组变形检测设备只能在变压器离线状态下对绕组运行状态进行检测的不足, 研制基于脉冲频率响应法的变压器绕组变形便携式带电检测仪。该检测仪以固态 Marx 电路作为脉冲发生电路, 以现场可编程门阵列(FPGA)为控制核心, 以 AD 采集电路为信号采集电路, 集高压脉冲信号的产生、脉冲信号及响应信号的采集于一体, 并可进一步对频率响应曲线进行快速分析, 以期达到现场快速检测的目的。离线试验、电容耦合试验和带电试验结果均表明, 所研制的检测仪频率响应曲线谐振点位置与现有离线检测设备频率响应曲线谐振点位置基本一致, 可真实、准确地反映绕组状态, 且可用于变压器绕组运行状态的带电检测。所研制的检测仪为基于脉冲频率响应法的变压器绕组变形带电检测技术的有效性和可靠性的进一步验证及在电力系统中的推广应用奠定了基础。

关键词: 变压器; 绕组变形; 带电检测; 固态 Marx 电路; AD 采集电路; FPGA; 状态评估

中图分类号: TM 41

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2018.01.016

0 引言

电力变压器承载着电力变换的重要功能, 是电厂/变电站内的核心设备, 其安全可靠的运行是电力系统能够持续、稳定供电的前提。事实上, 变压器在实际运行中不可避免地出现各种故障, 而在这些可能出现的故障中, 绕组变形尤为常见。变压器在运输、运行、地震中都有可能发生绕组轻微变形, 且变形存在一定的累积效应。随着绕组变形程度的不断加剧, 极有可能造成变压器的损毁和电网停电, 进而带来不可估量的直接和间接损失^[1-3]。因此, 对变压器绕组运行状态进行及时有效的检测, 并对可能发生的故障进行及时的预警是保证变压器安全运行的有效措施。

为此, 国内外学者和技术人员对变压器绕组变形的检测方法不断地进行探索并积极推广。目前可用于检测的各种方法中, 频率响应法因具有快速、有效、无损的优点而得到了广泛的应用。频率响应法按注入信号类型的不同可分为正弦频率响应 SFRA (Sweep Frequency Response Analysis)法和脉冲频率响应 IFRA (Impulse Frequency Response Analysis)法 2 种^[4]。其中, SFRA 法相对应用较多, 已形成了中国电力行业标准和 IEC 标准, 且已拥有成熟的商用设备^[5-6]。SFRA 法的原理是在频域下直接测量激励和响应信号, 并据此绘制相应的频率响应曲线继而评估绕组运行状态。该方法可有效避免外界干扰和系统

稳定性的影响, 然而目前仍多应用于离线检测, 难以满足新近所提出的变压器绕组带电检测和状态评估的要求。

IFRA 法实际上是在 SFRA 法的基础上发展而来, 现已被尝试用于带电检测。与 SFRA 法相比, IFRA 法所施加的激励信号有所不同, 该方法多利用电力系统中所产生的过电压信号或者外部注入脉冲信号替代 SFRA 法所采用的正弦信号; 与 SFRA 法相同的是, IFRA 法同样需要测量激励信号及响应信号, 并绘制频率响应曲线, 进而对变压器绕组运行状态进行评估。文献[7]利用系统中存在的过电压信号, 文献[8]则通过套管末屏抽头向变压器绕组中注入外加脉冲信号, 然而这 2 种信号注入均存在激励不可控、需改变系统原始接线的缺点。为此, 姚陈果和张重远等人利用电容性耦合传感器 CCS (Capacitive Couple Sensor) 向变压器注入脉冲信号实现了 IFRA 法的带电应用^[9-10], 该方法确保了注入信号的可控, 同时也避免改变系统的原始接线, 已展现出较为广阔的应用前景。然而, 欲将该方法成功推广至现场应用, 亟需研制出一套可稳定输出不同幅值、不同脉宽、不同重复频率的脉冲信号发生器, 以及能够完整采集激励信号和响应信号的一体化设备^[11-12]。

为此, 本文基于 IFRA 法研制一套可用于变压器绕组运行状态带电检测的便携式检测仪(下文简称便携式检测仪), 为实现 IFRA 法的推广应用奠定物质基础。

1 IFRA 法

如前文所述, IFRA 法与 SFRA 法原理一致, 仅是

收稿日期: 2016-09-05; 修回日期: 2017-09-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51377175)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51377175)

改变了激励信号的形式,即将注入的激励信号从电压幅值相对较低的正弦信号替换为幅值相对较高的脉冲信号。在该方法中,变压器绕组在高频条件下可看作由电感、电容、电阻组成的一个二端口网络^[13-16]。对于一个确定的变压器,其内部的元件参数将决定传递函数的极点、零点分布。当变压器绕组发生机械变形后,变压器内部电容、电感参数的变化将造成传递函数改变,进而导致绘制出的频率响应曲线发生变化。

IFRA 法对带电变压器首端施加脉冲激励信号,在末端测量经过变压器绕组传播后的响应信号,通过式(1)—(3)进行快速傅里叶变换,构建变压器绕组的频率响应曲线。通过对比被测绕组频率响应曲线与参考频率响应曲线,可对绕组运行状态进行评估。

$$U_i(k) = \sum_{n=0}^{N-1} U_i(n) e^{-j2\pi kn/N} \quad (1)$$

$$U_o(k) = \sum_{n=0}^{N-1} U_o(n) e^{-j2\pi kn/N} \quad (2)$$

$$H(f) = 20 \lg [U_o(f)/U_i(f)] \quad (3)$$

其中, n 取 $0, 1, \dots, N-1, 0 \leq k \leq N-1, N$ 为信号的采样点数; $U_i(n)$ 为时域激励信号; $U_i(k)$ 为 $U_i(n)$ 的快速傅里叶变换; $U_o(n)$ 为时域响应信号; $U_o(k)$ 为 $U_o(n)$ 的快速傅里叶变换; $H(f)$ 为计算出的变压器绕组频率响应曲线。

基于 CCS 的 IFRA 法的接线方式如图 1 所示。用于检测的设备包括了 CCS、信号注入保护电路、电容分压器、信号检测终端。进行检测时,需在信号检测终端连接脉冲信号发生器和数字信号示波器,实现脉冲信号注入以及脉冲信号和响应信号的采集。

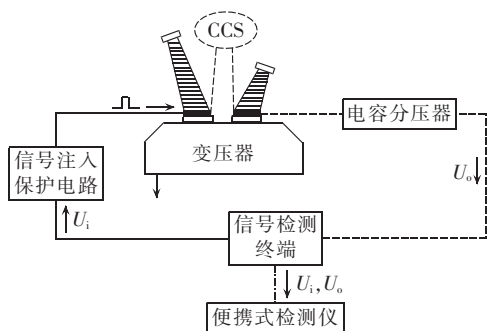


图 1 IFRA 法接线图

Fig.1 Wiring diagram of impulse frequency response method

2 硬件设计

根据 IFRA 法检测变压器绕组变形的原理及设备要求,本文设计的便携式检测仪结构框图如图 2 所示,其主要包括硬件和软件 2 个部分:硬件部分主要包括全固态 Marx 纳秒脉冲发生器(下文简称全固

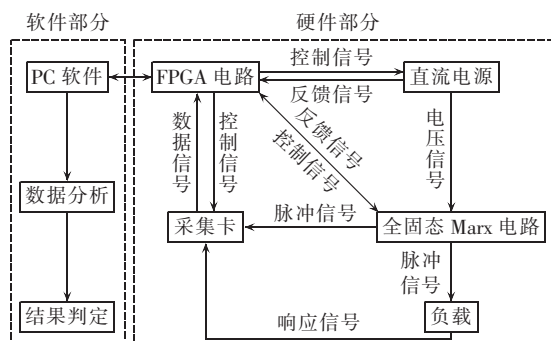


图 2 研制的检测仪结构框图

Fig.2 Structure diagram of developed detecting instrument

态 Marx 发生器)模块、数据采集模块和现场可编程门阵列(FPGA)控制模块;软件部分包括指令控制模块和数据处理模块。

2.1 全固态 Marx 发生器模块设计

本文的 Marx 发生器采用全固态形式^[17-19]。图 3 为二级全固态 Marx 发生器原理图。全固态 Marx 发生器主要包括 MOSFET (V_{T1} 、 V_{T2})、二极管 (V_{D1} — V_{D4})、储能电容 (C_1 、 C_2)、电阻 (R_C 、 R_L) 等,其工作原理是对电容进行并联充电、串联放电,即在充电过程中关断 MOSFET,放电过程中开通 MOSFET,从而在负载上得到幅值高于充电电压的高压脉冲信号,进而通过改变 MOSFET 的开断参数在负载上获得脉宽可调、重复频率可控的高压纳秒脉冲信号。

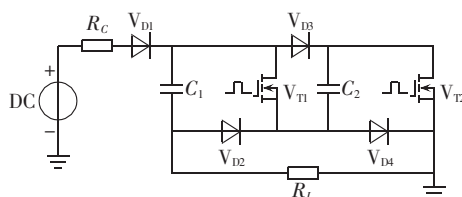


图 3 全固态 Marx 发生器原理

Fig.3 Principle of all solid-state Marx generator

2.1.1 主电路参数要求

综合考虑 GTO、IGBT、MOSFET 这几种常用的固态开关,本文选择 MOSFET 作为装置的固态开关。MOSFET 的参数和特性对产生的脉冲信号幅值、上升时间和下降时间等技术参数都会产生决定性影响。全固态 Marx 发生器中储能电容的选取应主要考虑耐压值和电容量这 2 个参数;耐压值应大于每级 MOSFET 选取的工作电压;电容量的选取应主要由放电时间常数决定^[20]。快恢复二极管的选取考虑反向击穿电压和正向导通电流为主要决定参数;最大反向击穿电压应大于储能电容器存储电压最大值;最大正向导通电流应大于最大充电电流。本文研制的便携式检测仪的所有硬件均为电脑程序控制,因此选取的高压直流电源应该可以通过单片机控制其输出电压值以及电流值,且应具有短路、过载自动保护功能。

2.1.2 驱动电路设计

FPGA 控制模块产生的 2 路同步触发信号需经过驱动电路后才能控制 MOSFET 的通断。本文研制的便携式检测仪选择专用驱动芯片设计驱动电路,其具有宽电压输出、低输出阻抗和支持 TTL/CMOS 电平输入等优点。

通过电平转换电路将 FPGA 控制模块产生的电压幅值为 3.3 V 的触发脉冲信号转成幅值为 5 V 的触发脉冲信号。然后通过光纤驱动器和光纤发射器将各路控制信号转换为光信号,并通过光纤传输到各级驱动电路板上的光纤接收器,将光信号转换成电信号,从而控制 MOSFET 的通断。控制流程图如图 4 所示。

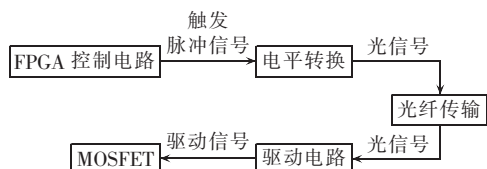


图 4 控制信号流程图

Fig.4 Flowchart of control signal

采用光信号传输控制信号,可实现高低压电路间的隔离,增强了信号抗干扰能力。选择的光纤发射器和光纤接收器应具有足够的带宽,保证触发脉冲信号不失真。另外,为减少外部供电电源对驱动信号的干扰,驱动芯片和光纤接收器均采用 DC-DC 模块隔离后供电。

2.2 数据采集与 FPGA 控制模块设计

所设计的 AD 采集电路需同时采集全固态 Marx 电路产生的高压脉冲信号及经过绕组传播后的低压响应信号;另外,还需要选用合适的逻辑硬件产生不同模块所需的命令信号。因此,本文选择 FPGA 作为逻辑硬件核心,实现便携式检测仪硬件的智能控制。

2.2.1 数据采集模块设计

模拟信号调理电路是被采样信号的输入通道,在保证被测信号不失真的前提下,对信号进行放大、衰减、滤波和电气隔离等处理。AD 数据采集芯片决定数据采集系统的精度和分辨率,所以相关器件选取尤为重要。为尽可能减小 AD 转换误差,本文选取 12 位数据采集芯片。考虑到信号最大分析频段范围为 10 MHz,且 AD 数据采集芯片为双通道同时采集,按 4 倍于信号采样频率选取采样芯片,因此选用的 AD 数据采集芯片的采样率为 80 MS/s。此外,AD 数据采集芯片的输入与输出信号应均为差分信号,这样能够较好地抑制共模噪声和外部电磁干扰,提高采样准确性。

2.2.2 FPGA 控制模块设计

本文采用 FPGA 为逻辑硬件核心,并通过良好的

人机交互界面来实现整个便携式检测仪的智能调控。便携式检测仪通过硬件语言(HDL)对 FPGA 的工作方式进行编写^[21-24]。FPGA 控制模块包括了同步脉冲触发电路、高压直流电源控制电路、AD 同步采集控制电路和 FPGA 控制保护电路。FPGA 的使用提高了整个便携式检测仪的可靠性并极大地简化了硬件电路,有效减小了装置体积。

3 软件设计

本文设计了相应的人机交互界面实现对便携式检测仪硬件的智能控制。本文选择 Visual C++ 作为编程语言^[25],软件设计采取模块化设计,按功能需求分为控制采集模块、信号分析模块和结果判定模块 3 个模块,各模块间相互独立,功能互不影响。软件操作流程如图 5 所示。

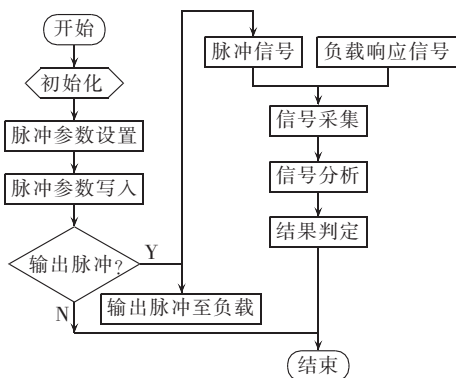


图 5 软件操作流程

Fig.5 Figure of software operation

4 便携式检测仪性能测试

为验证便携式检测仪的性能,对一台 10 kV/380 V 三相变压器进行离线试验、电容耦合试验和带电试验,并分别获取相应的频响曲线。为测试便携式检测仪的采集性能,在使用便携式检测仪采集激励信号和响应信号的同时,使用示波器同步采集激励信号和响应信号。示波器型号为 Tektronix 公司的 MDO3024,带宽为 200 MHz,采样率为 2.5 GS/s。高压探头型号为 Tektronix 公司的 P5100,带宽为 250 MHz,衰减 100 倍。

4.1 离线试验

为便于与目前广泛使用的变压器绕组变形分析仪进行对比,本文首先利用带电检测仪开展变压器的离线试验,接线方式参照标准 DL/T 911—2004。离线试验对象为被试三相试验变压器的低压相健康绕组。离线试验设备接线方式如图 6 所示。通过便携式检测仪和数字示波器采集输出的脉冲电压信号及响应电流信号,并绘制相应的频率响应曲线。同时,在离线状态下使用了型号为 TDT-6U 的变压器绕组

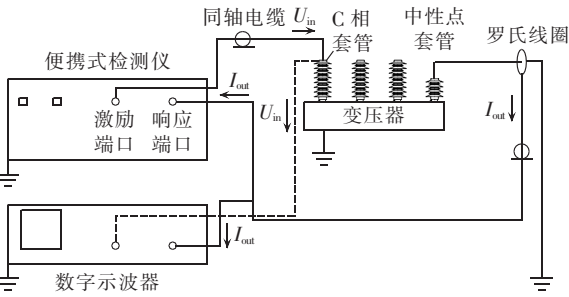


图 6 离线试验接线图
Fig.6 Wiring diagram of off-line test

扫频测试仪(下文简称扫频仪)对相同状态的变压器进行试验。

离线试验中,笔者向变压器中注入幅值为 60 V、脉宽为 400 ns 的脉冲信号,向扫频仪注入峰峰值为 10 V 的正弦信号。图 7 为离线试验结果,表 1 为频率响应曲线谐振点频率及增益大小。

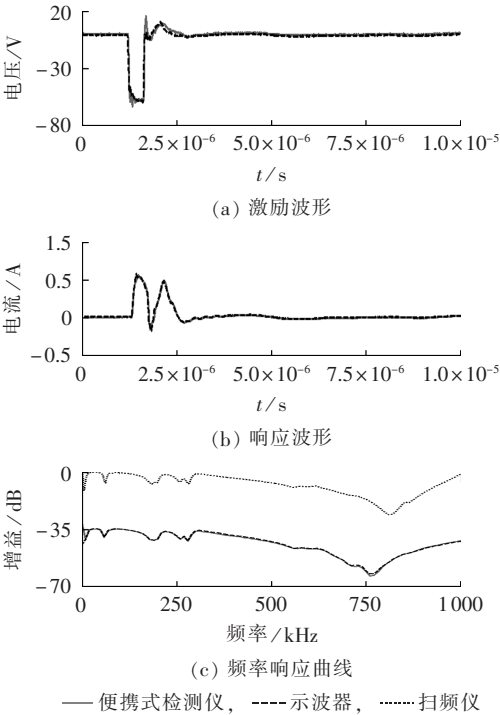


图 7 离线试验结果

Fig.7 Results of off-line test

表 1 频率响应曲线谐振点频率和增益差异的对比
Table 1 Comparison of frequency and gain at resonance point of frequency response curve

谐振点频率/kHz			Δf / kHz	增益/dB			ΔG /dB
示波器	便携式 检测仪	扫频仪		示波器	便携式 检测仪	扫频仪	
10	10	7	3	-41.18	-40.83	-11.5	29.33
60	60	63	3	-39.77	-39.55	6.9	33.55
190	190	187	3	-41.50	-41.77	-7.4	34.37
260	260	258	2	-40.94	-41.07	-6.2	35.07
280	280	280	0	-42.10	-42.20	-7.2	35.00
760	760	812	52	-62.00	-63.35	-26.2	37.15

注: Δf 和 ΔG 分别为扫频仪和便携式检测仪对应的频率响应曲线谐振点频率和增益的差异。

由图 7 的离线试验结果可看出:便携式检测仪采集到的时域信号与示波器采集到的时域信号吻合度较高,说明其采集性能较好,可用于检测时的数据采集;然而,从频率响应曲线中可发现,扫频仪的频率响应结果与便携式检测仪、示波器的频率响应结果存在一个稳定的增益差距,而便携式检测仪与示波器的频率响应结果吻合度较高,基本重合。造成此种结果的原因是,扫频仪检测时采集的频率响应信号是 50 Ω 采样电阻上的电压信号,而检测仪和示波器采集的频率响应信号为电流信号,根据式(3)可知,由于频率响应信号采集对象不同造成的增益采集差距应为 33.9794 dB^[5]。根据文献[26]所述,应用频率响应法检测变压器绕组运行状态时,引线的接线方式及引线长度将对频率响应曲线的高频段造成影响。而本文的离线试验中,扫频仪与便携式检测仪的接线方式和引线长度有所差别。因此,表 1 及图 7 中存在的频率响应曲线谐振点位置、增益改变、曲线平移处于合理范围之内。此外,因为便携式检测仪和示波器的试验电路几乎完全一致,两者获得的结果差距应较小,而表 1 中的数据则说明了这一点,这说明便携式检测仪的性能达到了离线试验的要求。

4.2 电容耦合试验

实际上,如前文所述,IFRA 法是通过电容耦合原理将高压脉冲电压信号经过 CCS 耦合至套管导杆,实现脉冲信号的注入。为模拟实际应用中的 CCS 耦合注入,本文设计了电容耦合试验,利用外置电容替代 CCS,模拟 IFRA 法信号耦合过程,验证便携式检测仪的性能。电容耦合试验对象仍选用 10 kV/380 V 试验变压器,试验接线图如图 8 所示。进行电容耦合试验时,向变压器低压侧绕组中注入幅值为 200 V、脉宽为 400 ns 的脉冲信号,对比了便携式检测仪和示波器采集的频率响应曲线差异,结果见图 9。

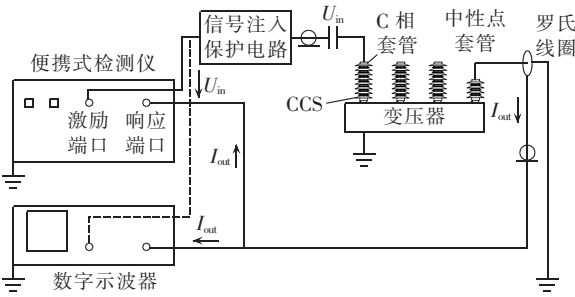
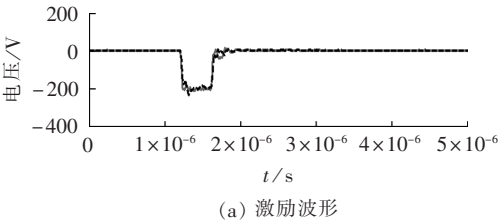
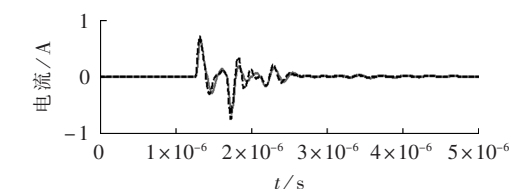


图 8 电容耦合试验接线图

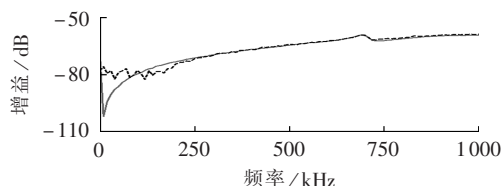
Fig.8 Wiring diagram of capacitance coupling test



(a) 激励波形



(b) 响应波形



(c) 频率响应曲线

— 便携式检测仪, ---- 示波器

图 9 电容耦合试验结果

Fig.9 Results of capacitance coupling test

分析图 9(a)、(b)可知,便携式检测仪与示波器的采集数据基本一致,这说明便携式检测仪的采集性能达到了采集要求。由图 9(c)可见,便携式检测仪和示波器的频率响应曲线在中高频段(200~1000 kHz)的吻合度较好,谐振点位置、增益一致,而在低频段(10~200 kHz)的差异很大。这是因为在低频段,较小的频率响应信号被试验环境中存在的干扰信号及测量设备本身的干扰信号淹没,因此低频段频率响应曲线无法有效反映变压器绕组特性。

进一步分析低频段频率响应数据所存在的干扰是否会对 IFRA 法的现场应用带来影响。根据文献[27],在线 IFRA 法得到的频率响应曲线中,低频段曲线仅反映高压套管的容性特性,而对于变压器绕组中存在的故障多是通过频率响应曲线中高频段谐振点位置的变化体现。因此,尽管低频段的频率响应曲线一定程度上受噪声的影响,但只要保证中高频段频率响应曲线的可靠性和准确性,测量结果依然可以用于变压器绕组变形评估。

4.3 带电试验

离线试验和电容耦合试验的结果初步验证了带电检测仪的工作性能,而该便携式检测仪最终是应用于变压器的带电情况下,为此,本文开展了带电试验,试验接线图与实际应用完全一致,如图 10 所示。

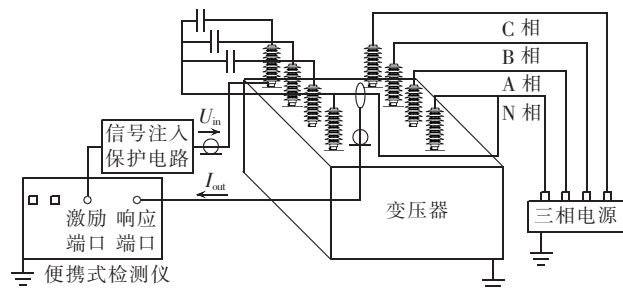


图 10 带电试验接线图

Fig.10 Wiring diagram of live test

带电试验利用 CCS 将高压脉冲信号耦合进套管导杆,低压侧套管接 750 μF 的电容模拟负载,试验过程中变压器接入线电压为 380 V 的三相电压。

向变压器低压侧套管注入幅值为 800 V、脉宽为 400 ns 的脉冲信号,并通过便携式检测仪采集了激励信号及响应信号,得到的频率响应曲线见图 11。

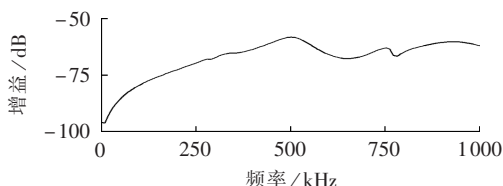


图 11 带电试验结果

Fig.11 Results of live test

对变压器绕组运行状态进行分析,需要分析对比不同时间下的频率响应曲线,为此需对在运变压器进行长期的数据采集,在此基础上进行判定。试验所用变压器为健康变压器,且为首次进行带电试验操作,数据较少,暂无法对试验结果进行进一步分析。但本文的带电试验接线方式与现场应用时完全一致,试验中便携式检测仪能够得到相应的频率响应曲线,这说明便携式检测仪可以用于变压器绕组变形的带电检测。

5 结论与展望

本文基于 IFRA 法设计了一套可用于变压器绕组运行状态带电检测的便携式检测仪。通过离线试验、电容耦合试验和带电试验,证明该便携式检测仪功能模块运行稳定,能够输出预期的高压脉冲信号,并较为精确地采集高压脉冲及响应信号;此外,3 项试验的结果均说明该便携式检测仪的工作性能达到了预期要求,可用于变压器绕组变形的带电检测。

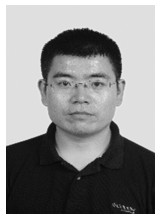
下一步的研究工作是在变压器带电运行条件下,长时间地监测变压器绕组运行状态,采集运行数据,分析其频率响应曲线的发展趋势,对变压器运行状态进行判定。

参考文献:

- [1] LUDWIK OWSKI K,SIODLA K,ZIOMEK W. Investigation of transformer model winding deformation using sweep frequency response analysis[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(6): 1957-1961.
- [2] 李朋,张保会,郝治国,等. 基于电气量特征的变压器绕组变形监测技术现状与展望[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(2): 28-33.
LI Peng,ZHANG Baohui,HAO Zhiguo,et al. Actuality and prospect of transformer winding deformation monitoring based on electric characteristic[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(2): 28-33.
- [3] BAGHERI M,NADERI M S,BLACKBURN T,et al. Advanced transformer winding deformation diagnosis:moving from off-line

- to on-line[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(6): 1860-1870.
- [4] GOMEZ-LUNA E, MAYOR G A, GONZALEZ-GARCIA C, et al. Current status and future trends in frequency-response analysis with a transformer in service[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(2): 1024-1031.
- [5] 国家发展和改革委员会. 电力变压器绕组变形的频率响应分析法: DL/T 911—2005[S]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [6] IEC. Measurement of frequency response: IEC60076-18[S]. Geneva, Switzerland: IEC, 2012.
- [7] WANG M. Winding movement and condition monitoring of power transformers in service[D]. Vancouver, Canada: The University of British Columbia, 2003.
- [8] RYBEL T D, SINGH A, VANDERMAAR J A, et al. Apparatus for online power transformer winding monitoring using bushing tap injection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(3): 996-1003.
- [9] YAO Chenguo, ZHAO Zhongyong, CHEN Yu, et al. Transformer winding deformation diagnostic system using online high frequency signal injection by capacitive coupling[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(4): 1486-1492.
- [10] 张重远, 王彦波, 张林康, 等. 基于 NICS 脉冲信号注入法的变压器绕组变形在线监测装置研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(7): 2259-2267.
- ZHANG Chongyuan, WANG Yanbo, ZHANG Linkang, et al. Research on an online monitoring device for transformer winding deformation using NICS pulse injection method[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(7): 2259-2267.
- [11] 黄震, 江泰廷, 张维锡, 等. 具有自适应电流速断保护功能的配电线路保护监控装置研制[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(5): 109-114.
- HUANG Zhen, JIANG Taiting, ZHANG Weixi, et al. Distribution line protection and supervisory control device with adaptive instantaneous current protection function[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(5): 109-114.
- [12] 周静, 何为, 龙兴明. 蓄电池储能的独立光伏系统充电控制器研制[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(11): 13-17.
- ZHOU Jing, HE Wei, LONG Xingming. Intelligent charging controller of battery-buffered stand-alone photovoltaic system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(11): 13-17.
- [13] BAGHERI M, NADERI M S, BLACKBURN T, et al. Frequency response analysis and short-circuit impedance measurement in detection of winding deformation within power transformers[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2013, 29(3): 33-40.
- [14] 朱明林, 金之俭, 朱子述. 变压器绕组变形诊断中的等效模型参数辨识[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(8): 38-41.
- ZHU Minglin, JIN Zhijian, ZHU Zishu. Parameter identification of transformer equivalent modeling the diagnosis of winding deformation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(8): 38-41.
- [15] GONZÁLEZ C, PLEITE J. Transformer modeling approaches for frequency response analysis[C]//2010 XIX International Conference on Electrical Machines (ICEM). Rome, Italy: IEEE, 2010: 1-6.
- [16] WANG M, VANDERMAAR A J, SRIVASTAVA K D. Improved detection of power transformer winding movement by extending the FRA high frequency range[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(3): 1930-1938.
- [17] KIM J H, RYU M H, MIN B D, et al. High voltage pulse power supply using Marx generator & solid-state switches[C]//31st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Raleigh, USA: IEEE, 2005: 1244-1247.
- [18] HOLT T A, LARA M B, NUNALLY C, et al. Compact Marx generators modified for fast rise time[C]//17th IEEE International Pulsed Power Conference. Washington DC, USA: IEEE, 2009: 1197-1200.
- [19] BAEK J W, YOO D W, RIM G H, et al. Solid state Marx generator using series-connected IGBTs[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2005, 33(4): 1198-1204.
- [20] KIM J H, MIN B D, SHENDERREY S, et al. High voltage Marx generator implementation using IGBT stacks[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(4): 931-936.
- [21] 李晓辉, 周荫清, 王祖林. 基于 FPGA 的机载数据采集系统设计[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(6): 2378-2380.
- LI Xiaohui, ZHOU Yinqing, WANG Zulin. Design of an airborne data acquisition system based on FPGA[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(6): 2378-2380.
- [22] 康华光, 邹寿彬. 电子技术基础——数字部分[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 323-324.
- [23] 褚振勇, 齐亮, 田红心, 等. FPGA 设计及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2006: 92-132, 400, 437.
- [24] Uwe Meyer Baese. 数字信号处理的 FPGA 实现[M]. 刘凌, 译. 北京: 清华大学出版社, 2006: 327-340.
- [25] 刘永平, 龚俊, 辛舟, 等. 往复式摩擦磨损试验机及其计算机控制系统设计[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(8): 1750-1755.
- LIU Yongping, GONG Jun, XIN Zhou, et al. Design of reciprocating friction and wear testing machine and its computer control system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(8): 1750-1755.
- [26] WANG M, VANDERMAAR A J, SRIVASTAVA K D. Transformer winding movement monitoring in service-key factors affecting FRA measurement[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 5(20): 5-12.
- [27] ZHAO Zhongyong, YAO Chenguo, ZHAO Xiaozhen, et al. Impact of capacitive coupling circuit on online impulse frequency response of a power transformer[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(3): 1285-1293.

作者简介:



李成祥

李成祥(1979—),男,山东泰安人,副教授,博士,主要研究方向为在线检测高压设备绝缘状态及脉冲功率技术在生物医疗的应用(E-mail: lichengxiang@cqu.edu.cn);

夏麒(1992—),男,四川遂宁人,硕士研究生,主要研究方向为在线检测高压设备绝缘状态(E-mail: 441941443@qq.com);

朱天宇(1991—),男,山东东营人,硕士研究生,主要研究方向为在线检测仪高压设备绝缘状态(E-mail: 896889101@qq.com)。

(下转第 120 页 continued on page 120)

- YU Zhanqing, ZENG Rong, WANG Shaoan. Simulation calculation and analysis of lightning induced overvoltage on power distribution lines[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(2): 415-422.
- [9] 张琦兵, 邹能灵, 袁成, 等. 同塔四回输电线的相模变换[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(34): 57-62.
- ZHANG Qibing, TAI Nengling, YUAN Cheng, et al. Phase-mode transformation of four-parallel lines on the same tower[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(34): 57-62.
- [10] 刘玲, 范春菊. 基于六序分量法的跨电压等级的同塔四回线的故障计算[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(9): 6-11.
- LIU Ling, FAN Chunju. Fault calculation for joint four transmission lines of different voltage grades on the same tower based on six-sequence-component method[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(9): 6-11.
- [11] 李斌, 戴冬康, 廖惠琴. 局部同塔输电线路的零序电流保护的影响因素及对策[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(8): 82-89.

LI Bin, DAI Dongkang, LIAO Huiqin. Influencing factors of zero sequence current protection and countermeasures for power transmission lines partially on same tower[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(8): 82-89.

作者简介:



刘 欣

刘 欣(1987—), 女, 湖北襄阳人, 博士, 主要研究方向为电力系统保护和变电站设计(E-mail: xinl_0626@126.com);

黄少锋(1958—), 男, 福建福州人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 主要研究方向为电力系统保护与控制;

张 鹏(1987—), 男, 湖北荆门人, 工程师, 硕士, 主要研究方向为变电站设计建造。

Overvoltage calculation of low-voltage system for mixed-voltage on same tower transmission lines under unearthed cross-voltage fault

LIU Xin^{1,2}, HUANG Shaofeng², ZHANG Peng³, ZHENG Tao²

(1. Electric Power Planning & Engineering Institute, Beijing 100120, China;

2. State Key Laboratory of Alternate Electric Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric

Power University, Beijing 102206, China; 3. State Grid DC Power Construction Branch Company, Beijing 100052, China)

Abstract: A method of calculating the short circuit current under non-grounded cross-voltage fault in mixed-voltage transmission lines is proposed for strong magnetic and weak electricity system. On this basis, the voltage at fault point is calculated. Meanwhile, the relationship between this voltage and the electromotive force phase angle difference of the two systems is analyzed, likewise the relationship between this voltage and the impedance ratio. Consequently, the maximum voltages at fault point in different impedance ratios can be obtained, which enables the overvoltage evaluation in low-voltage system compared to the voltages in normal operation. Simulative results on PSCAD verify the accuracy of the proposed method for the short circuit current and over voltage calculation.

Key words: mixed-voltage on same tower; cross-voltage fault; composite sequence-network; overvoltage; impedance ratio

(上接第 115 页 continued from page 115)

Live transformer winding deformation detector based on impulse frequency response method

LI Chengxiang¹, XIA Qi^{1,2}, ZHU Tianyu¹, ZHAO Zhongyong¹, YAO Chenguo¹, MI Yan¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing

University, Chongqing 400044, China; 2. Sichuan Electric Power Design & Consulting Company, Chengdu 610041, China)

Abstract: Aiming at the deficiency that the existing transformer winding deformation detector can only detect the operating state of transformer winding off line, a portable and live transformer winding deformation detector based on the impulse frequency response method is developed. It adopts the solid-state Marx circuit as the impulse generating circuit, the FPGA(Field-Programmable Gate Array) as the control core and the AD sampling circuit as the signal acquisition circuit. Also it combines the high voltage impulse signal generation with the acquisition of impulse and response signals, and can further analyze the frequency response curve quickly to achieve the purpose of on-site rapid detection. Results of offline test, capacitance coupling test and live test results show that resonance point locations in the frequency response curve of the developed detector basically coincide with those of the existing offline detector, the developed detector can truly and accurately reflect the winding's operating state of the detector and can be used in live detection of transformer winding's operating state. The developed detector lays a foundation for further verification of effectiveness and reliability of the live transformer winding deformation detection technique based on the pulse frequency response method and its popularization and application in electric power system.

Key words: power transformers; winding deformation; live detection; solid-state Marx circuit; AD acquisition circuit; FPGA; state assessment