

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2017.08.008

D-dot 场式电压传感器试验系统

张宇^{1,2},汪金刚²,王永华^{1,2},林森¹

(1.重庆市电力公司江北供电局客户服务中心计量部,重庆 401147;

2.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)

摘要:传统电压互感器通过铁芯传递能量进行测量,由于铁芯的磁化饱和作用,导致响应频带窄,易产生铁磁谐振过电压。提出一种应用于电压测量的 D-dot 传感器,介绍其工作原理,并设计出新型电压传感器试验系统。D-dot 传感器是一种非接触式测量的电场耦合传感器,其输出信号经过信号处理后,结合 WiFi 无线网络,与地面采集端组成试验系统。采集端采用 LabVIEW 技术实现信号的接收、数据处理与分析等功能。最后搭建了试验平台,测试了线电压为 10 kV 电压等级下电压传感器的整个试验系统的性能,试验结果表明:该电压传感器实时性好,精度高,响应速度快,试验系统稳定可靠。

关键词:D-dot 传感器;非接触测量;试验系统;LabVIEW

中图分类号:TM 451

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2017)08-063-07

Simulation system of field voltage sensor based on the D-dot sensor

ZHANG Yu^{1,2}, WANG Jingang², WANG Yonghua^{1,2}, LIN Sen¹

(1. Chongqing Jiangbei Power Supply Company Customer Service Center Measurement Unit, Chongqing 401147, P.R.China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P.R.China)

Abstract: The conventional voltage sensor measures voltage through the energy transfer by the core. While, due to the saturation magnetization of the core, the band response of measurement becomes narrow, and ferromagnetic resonance over-voltage appears. We presented a D-dot sensor for voltage measurement, introduced its working principle and designed a new type of voltage sensor test system to test its precision and accuracy. The D-dot sensor is connected with the collection terminal on the ground through the wireless network of hardware system, composing of ground simulation test system. The capture terminal can receive, process and analysis signals with LabVIEW technology. A test platform was built to simulate the voltage transformers in wire line of 10 kV voltage. The results show that the D-dot sensor has high precision and fast response, and the simulation system is stable and reliable.

Keywords: D-dot sensor; non-contact measurement; simulation test system; LabVIEW

收稿日期:2017-03-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51677009)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(51677009).

作者简介:张宇(1983-),男,高级工程师,主要从事电能计量技术研究,(E-mail)645103006@qq.com。

汪金刚(联系人),博士,副研究员,从事高压设备放电检测技术的研究,(E-mail)jingang_023@163.com。

电压测量在电力系统中有着十分重要的地位,其准确性、实时性、响应速度对电力系统故障诊断和分析有着非常重要的作用。随着电力系统的发展,智能电网对电力系统中电压传感器的精度、准确性和实时性的要求越来越高。目前在电力系统中投入使用的电压互感器主要有光学电压、电容式和电磁式电压互感器,但它们均存在一些固有缺陷^[1]。电磁式电压互感器存在铁芯饱和、体积大、暂态性能差、易发生铁磁谐振的问题。高压侧需要具有非常高的绝缘强度以及复杂绝缘结构才能够耐受高电压。随着电压等级的提高,绝缘结构的复杂化必然会使得互感器的体积增大、重量增大,继而导致绝缘结构的设计和制造成本将随之增大。传统的光学电压传感器过于敏感,受环境和机械因素影响过大,安装和运维成本过高,不适于工程运行中安装和使用。智能电网高电压测量需要一种非接触、小型化和智能化的电压互感器^[2-3]。通过电场耦合原理对导体电位进行非接触测量是解决这一问题的新思路。

文献[4]提出了一种非接触式电场耦合的 D-dot 电压传感器模型,该传感器通过测量输电线周围空间电场的变化实现电位测量,是一种新型电子式传感器。

采用差动输入电路结构和多重电极并联结构,具有较大的测量带宽和动态范围、能够抑制非线性负载的感应电压过冲^[5-8]。由检测电路和以 LabVIEW 为核心的终端处理软件组成了 D-dot 电压传感器,将 D-dot 传感器实现电压测量,成为能用于工程测量的电压传感器。设计了一套基于 D-dot 传感器的单相模拟试验系统^[9],该电压传感器体积小、重量轻、实时性绝缘性能好,动态范围宽、响应速度快,模拟试验系统稳定、可靠、测量精度高符合未来智能电网的发展需求。

1 D-dot 传感器原理

1.1 D-dot 传感器测量原理

传统的电压测量是通过电磁式电压互感器的铁芯传递能量的方式来实现的,由于铁芯磁化曲线的非线性,使得电压测量受到原边与副边电流的影响^[10-11]。而 D-dot 传感器只是通过测量导体周围的电场强度对导体电位进行间接测量^[12-14],这个过程中并无直接的能量传递。

D-dot 传感器在被测导体附近的电极会通过电场耦合感应电荷,当变化的感应电荷流过与电极相连接的测量电阻会产生压降,该电阻压降与传感器所处测量点的电场变化率成正比^[16-19]。

对于导线,单一电极输出与被测电压关系可表示为

$$V_0 = \frac{\epsilon_0 A_{eq} R_m r_0}{R_0^2} \frac{d}{dt} \varphi(t), \quad (1)$$

式中: A_{eq} 为传感器等效面积,该参数的值与电场强度及高斯面法相分量的夹角、传感器形状有关; R_m 为测量电阻; R_0 为被测点距离导线距离; $\varphi(t)$ 为被测电位; $E(t)$ 为被测点电场强度; r_0 为导线半径。

1.2 传感器结构分析

为了达到更高的测量精度和减少相位误差,在试验中,D-dot 传感器采用多重环状并联的电极结构,并将其加工成印刷电路板 PCB(printed circuit board, PCB),同时使每块 PCB 参数标准化。传感器是由若干 PCB 叠加组成,理论上,PCB 板越多,传感器测量精度越高^[4],并增加了绝缘强度。

1.3 D-dot 传感器试验系统

该系统是由 D-dot 传感器、后续的检测电路和 PC 端 3 部分构成,其能对单相的电压进行有效的实时监测。将 D-dot 传感器用于对三相导线测量时,其结构图如图 1 所示。

在对三相线路进行监测中,测量点存在邻相电场干扰的问题。因此,本设计使导线穿过传感器,距离导线 r 处, r 远小于相间距离,使邻相电场干扰分量很小,可以暂时忽略相间电场影响。在此只对单相 D-dot 传感器锥形结构进行了研究探讨。

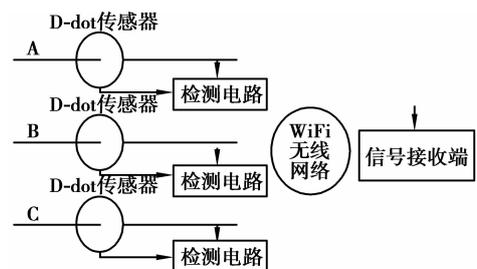


图 1 D-dot 传感器三相结构

Fig.1 Three-phase structure of D-dot transformer

2 系统硬件结构设计

2.1 系统设计

基于电场耦合原理的电压传感器,设计了与传感器相对应的电压检测电路^[18],测量系统结构如图 2 所示。

在检测电路中,差分放大电路的输入信号为传感器输出信号,该信号为电压信号。经过模拟信号处理后,进入单片机进行模数转换。D-dot 传感器与硬件检测电路图如图 3 所示。

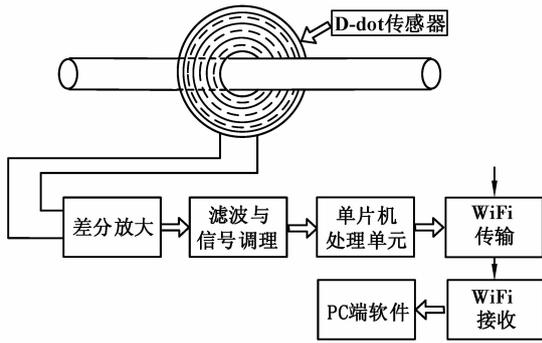


图 2 测量电路结构

Fig.2 The structure of measuring circuit

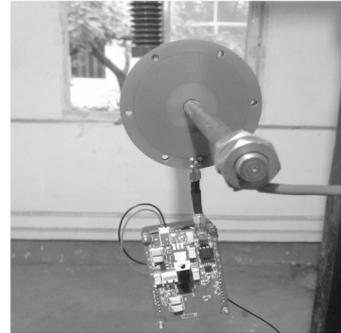


图 3 D-dot 传感器实物图

Fig.3 The physical map of D-dot transformer

信号离散处理后,离散数据打包为 UDP 传输协议格式的数据包,通过 WiFi 模块发送至 PC 端程序对应的接收端口。

2.2 硬件电路设计

1) 差分放大电路。

实际测量中干扰信号为传感器极板间的共模干扰。因此,采用差动放大电路对 D-dot 传感器输出信号进行采集并放大,并抑制环境中共模干扰信号,差分放大电路如图 4 所示。

INA111 的输入级具有高阻抗的特点,使传感器在极低的频率也能工作在自积分模式^[4,17],增大 R_m 还能有效地改善传感器的幅频、相频特性。

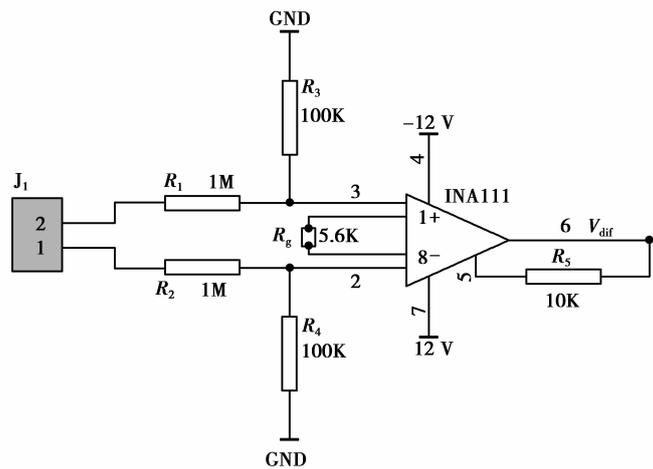


图 4 差分放大电路

Fig.4 A differential amplifier circuit

如图 4 所示,由于传感器输出电压比较大, R_1 与 R_3 、 R_2 与 R_4 构成分压电路,缩小进入差分放大器 INA111 输入值,同时又能有效地抑制共模信号的干扰。保证有效的测量带宽前提下,提高放大倍数。传感器及测量系统没有与地线有直接的电气连接,因此,即使传感器被击穿也不会对二次侧造成损坏,不会对电力系统造成影响。

2) 数据处理与控制。

数据处理主要功能为模数转换,将信号波形离散化,将离散数据按串口(UART)协议格式发送至 WiFi

模块单元。

整个系统的核心处理器是单片机 C8051F410。通过单片机内部的定时器中断达到来控制 AD 转换的周期和采样频率,并且定时器的中断服务程序具有最高优先级,其溢出时间即为采样周期。

3) WiFi 通信模块。

在安全距离的前提下,为了实现对被测导线电压的测量与监控,文中采用无线数据传输模块(WiFi)达到传感器与 PC 端通讯的目的。通过无线网络与标准协议,可以构建多目标的监控。设计中 UART 与 WiFi 的传输波特率保持一致,均为 115 200 bps。由 WiFi 模块构建无线网络,PC 端通过 UDP 协议与之通讯。

3 LabVIEW 实验系统

LabVIEW 软件拥有良好的人机交互界面,可塑性强^[21]。利用 LabVIEW 软件编写 UDP 数据接收模块接收 WiFi 发送至 PC 端口的数据,再将数据进一步处理。经过计算分析后,还原采集数据的波形,与相应分析的数据结果一起显示在可视化的界面上。

1) 人机界面模块。人机界面主要功能为实现初始化参数设定,时域波形及其有效值、基波频率的显示和谐波失真度记录等。

2) 数据通信模块。UDP 协议具有处理速度快、资源消耗小的优点。通过 LabVIEW 中 UDP 协议,PC 端程序与硬件电路在 WiFi 模块建立的无线网络中实现相互通讯。软件程序中提前设定需要监听的本地端口地址,这样 PC 端可以接收无线模块发送的数据。

3) 数据分析模块。软件程序通过 UDP 协议进行数据处理以数组为基础,而发送至 PC 端口的数据类型为字符串型,因此,必须将字符串数据转换为字节数组。在获得相应电压离散值数组后,通过捆绑控件将得到电压离散值波形点与采样间隔进行捆绑,这样即可实现用于显示波形数据的重构。同时为了便于分析和显示,PC 端程序将接收到的数据还原为十进制。

4) 波形分析模块。重构的波形在界面显示,其波形数据也被传送至波形分析模块中,以便计算并显示当前时刻电压的基波频率、有效值、谐波失真度及频谱信号等波形信息。波形分析模块程序框图如图 5 所示。

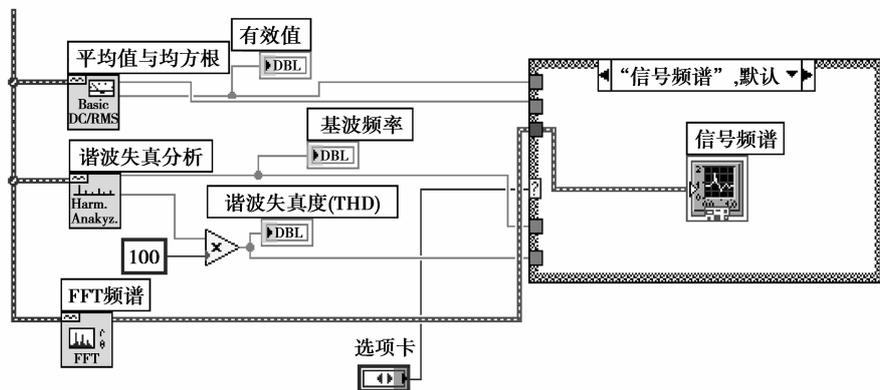


图 5 波形分析程序图

Fig.5 The LabVIEW diagram of data analysis module

4 试验结果及分析

搭建相应的实验平台,建立 LabVIEW 模拟实验系统,测试 D-dot 电压传感器性能。调压器与升压变压器用以产生幅值可控的工频电压,升压变压器的输出端接至高压母线,由测量电路将采集到的电压数据经无

线模块发送至 PC 端,经 LabVIEW 软件处理后,实时地显示出波形及其相关参数。D-dot 电压传感器实验系统如图 6 所示。

在 Labview 程序对结果进行比例系数校正,传感器输出电压信号的波形、有效值、频率等关键参数在 PC 端 LabVIEW 的显示控件中显示出来。如图 7 所示,给出了被测电压为 10kV 时 LabVIEW 的显示界面。

由图 7 可以看出,波形失真度小,与文献[6]相对比,试验系统保持了 D-dot传感器的原始输出信号;双边 FFT 分析中,可以看出频率为准确的 50 Hz,这里的 1 950 Hz 实际上是一 50 Hz。谐波失真度为 2.06%,谐波失真(THD)指原有频率的各种倍频的有害干扰。理论上此数值越小,失真度越低,该谐波失真度满足 GB/T14549—1993 规定。

按照 IEC60044-7 标准,通过标准高压探头和传感器进行对比试验,其测量值比差和相差计算结果如下表所示。其中 U_H 为高压探头测量电压数值,

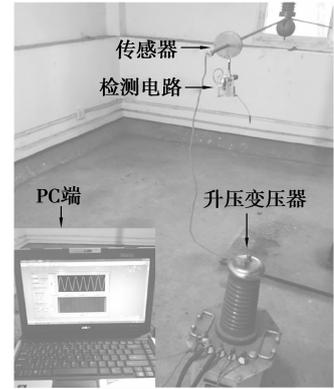


图 6 传感器实验平台

Fig.6 Test platform of transformer

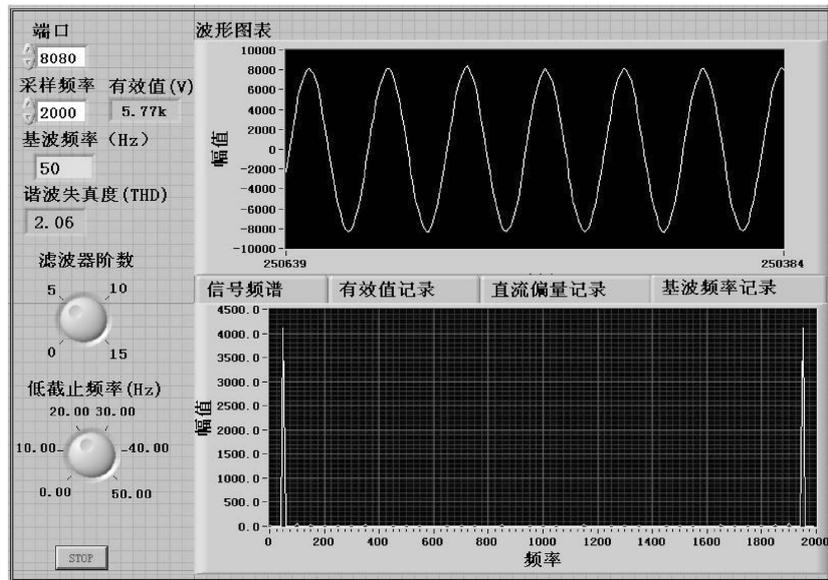


图 7 PC 端监测系统操作界面

Fig.7 The interface of monitoring system on PC

$U_{D\text{-dot}}$ 为新型传感器测量数据。比差定义为

$$\epsilon \% = \frac{K_n U_s - U_p}{U_p}, \tag{3}$$

式中: K_n 为传感器额定电压下的变比; U_p 为一次侧折算电压有效值; U_s 为电压传感器输出有效值。

表 1 D-dot 互感器准确度测试结果

Table.1 Accuracy testing of D-dot voltage transformer

测量点	U_H/kV	$U_{D\text{-dot}}/kV$	比差/%
$10\%U_n$	1.01	0.99	0.21
$20\%U_n$	2.01	2.03	0.19
$40\%U_n$	3.94	3.87	0.15
$60\%U_n$	6.12	6.08	0.17
$80\%U_n$	8.01	8.11	0.25
$100\%U_n$	10.15	10.08	0.11
$120\%U_n$	12.13	12.11	0.16

根据实验结果,在标准 IEC60044-7 规定的 80%~120% 额定电压范围内,D-dot 电压传感器有较高的准确度,假如选用具有较高的准确度,根据对比试验测得数据做出传感器与高压探头输出电压校正曲线以及比差曲线如图 8 所示。

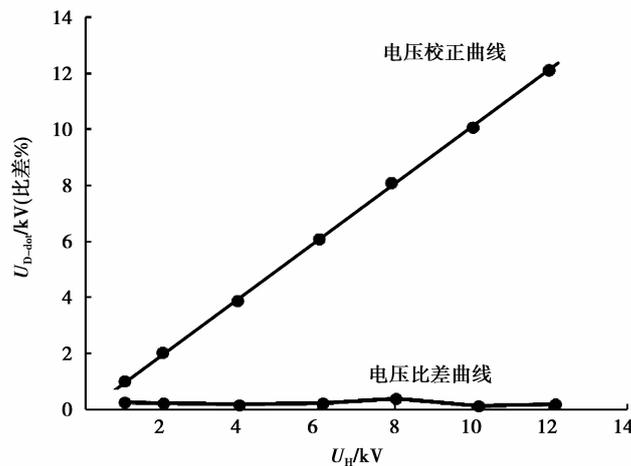


图 8 D-dot 电压传感器与高压探头输出电压校正曲线以及比差曲线
Fig.8 Calibration curve and ratio curve of D-dot voltage sensor versus the HV-probe at different voltage level

通过对表 1 测量数据进行一次拟合,经计算得拟合平方误差为 0.0144,表明 D-dot 传感器具有良好的动态范围。而且,在标准规定的 2%~120% 额定电压范围内,设计的传感器电压比值误差 $\epsilon\%$ 小于 0.5%,表明 D-dot 电压传感器具有较高的稳态精度。

5 结 语

为满足智能电网对电力系统安全、高效、稳定运行的要求,设计了一种基于 D-dot 传感器的电压传感器模拟试验系统,给出了其信号处理、通信系统,并进行相关试验,结果表明该系统不仅实时性好、失真度小及具有较宽的带宽测量范围,而且系统结构设计时传感器成本大大降低,较传统的电压测量设备具有更好的实用性。信号处理电路对 D-dot 传感器影响小,保持了其优良特性,能对 D-dot 传感器输出信号无失真的放大采集。该模拟实验系统论证了 D-dot 传感器作为一种新型电压传感器的可行性,并为智能电网电压传感器设计提供了参考,为智能电网的数字化发展提供新的思路。

参考文献:

- [1] 卢盛和,冉龙明.配电网电压互感器中性点接地方式研究[J].重庆大学学报,1998,21(3):94-100.
LU Shenghe, RAN Longming. A study of distribution network voltage-transformer neutrium grounding method[J]. Journal of chongqing university,1998,21(3):94-100.(in Chinese)
- [2] 方春恩,李伟,王佳颖,等.基于电阻分压的 10 kV 电子式电压互感器[J].电工技术学报,2007,22(5):58-63.
FANG Chunen, LI Wei, WANG Jiaying, et al. 10kV electronic voltage transformer based on resistor divider [J]. Transactions of China Electro Technical Society,2007,22(5):58-63.(in Chinese)
- [3] 刘翔,郭克勤,叶国雄,等.电磁式电压互感器冲击电压响应特性试验研究[J].高电压技术,2011,37(10):2385-2390.
LIU Xiang, GUO Keqin, YE Guoxiong, et al. Experimental study on the impulse-voltage transmission characteristics of inductive voltage transformers[J]. High Voltage Engineering,2011,37(10):2385-2390.(in Chinese)
- [4] 林莉,王军兵,唐凤英,等.10 kV 电压互感器损坏的仿真计算研究[J].电力系统保护与控制,2012,40(17):51-55.
LIN Li, WANG Junbing, TANG Fengying, et al. Simulation and computational analysis on potential transformer damage in 10kV system[J]. Power System Protection and Control,2012,40(17):51-55.(in Chinese)
- [5] 施婕,艾芊.智能电网实现的若干关键技术问题研究[J].电力系统保护与控制,2009,37(19):1-4.
SHI Jie, AI Qian. Research on several key technical problems in realization of smart grid[J]. Power System Protection and

- Control,2009,37(19):1-4.(in Chinese)
- [6] Farhangi H.The path of the smart grid[J].IEEE Power and Energy Magazine, 2010,8(1):18-28.
- [7] 何为,罗睿希,汪金刚,等.自积分式D-dot电压互感器原理及试验研究[J].中国电机工程学报,2014,34(15):2445-2451.
HE Wei, LUO Ruixi, WANG Jingang, et al. Principles and experiments of voltage transformer based on self-integrating D-dot probe[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(15):2445-2451.(in Chinese)
- [8] Metwally I A. Coaxial D-dot probe: design and testing[C]// Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, October 22-25,1995, Virginia Beach, VA, USA. IEEE,1995,298-301.
- [9] Struve K W,Horry M L,Spielman R B. Design,calibration,and performance of water diagnostics on the PBFA Z[C]// 1997 11th IEEE International Pulsed Power Conference, June 29-July 2, Baltimore, MA, USA. IEEE,1997.
- [10] Wagoner T C, Stygar W A, Ives H C, et al. Differential-output B-dot and D-dot monitors for current and voltage measurements on a 20-MA, 3-MV pulsed-power accelerator[J]. Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams, 2008,11(10):232.
- [11] Yarovoy A, De Jongh R, Ligthart L. Ultra-wideband sensor for electromagnetic field measurements in time domain[J]. Electronics Letters, 2000,36(20):1679-1680.
- [12] 张自驰,张国钢,耿英三,等.磁传感器阵列测量大电流实验系统[J].电力系统自动化,2007,31(18):77-81.
ZHANG Zichi,ZHANG Guogang,GENG Yingsan,et al. A high current measurement experimental system using magnetic sensor arrays[J].Automation of Electric Power Systems,2007,31(18):77-81.(in Chinese)
- [13] 孙亚辉,陈志强,蔡衍.电压互感器二次回路反充电的原因分析及防范措施[J].电力系统保护与控制,2010,38(9):126-129.
SUN Yahui,CHEN Zhiqiang,CAI Yan. Cause analysis and preventions of voltage transformer secondary circuit anti-inverse charge[J].2010, 38(9):126-129.(in Chinese)
- [14] 董海波,史丽萍.董海波,史丽萍.电磁式电压互感器和变压器励磁特性曲线转换方法的分析与应用[J].电气应用,1999(2):36-38.
DONG Haibo,SHI Liping. Analysis and application of the conversion method of the excitation character curve of the electric-magnetic type TV and the transformer[J]. Electrotechnical Journal,1999(2):36-38.(in Chinese)
- [15] Gao C,Wang J G. Design and experimental test for non-contact voltage sensor of high-voltage transmission line based on inverse problem of electric field[J].Journal of Applied Sciences,2013,14(10):1030-1036.
- [16] Baum C, Breen E, Giles J, et al. Sensors for electromagnetic pulse measurements both inside and away from nuclear source regions[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,1978,20(1):22-35.
- [17] Metwally I A. D-dot probe for fast-front high-voltage measurement[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,2010,59(8):2211-2219.
- [18] Browning C A, Vinci S J, Zhu J, et al. An evaluation of electric-field sensors for projectile detection[C/OL]// Sensors,2013 IEEE. IEEE,2013[2015-11-10].DOI:10.1109/ICSENS.2013.6688441.
- [19] 余梦婷,汪金刚,温生东,等.基于电场逆问题的非接触电荷感应式电压互感器研究[J].电测与仪表,2012,49(10):82-85.
YU Mengting,WANG Jingang,WEN Shengdong,et al. Research on the non-contact charge induction potential transformer based on inverse problem of electric field[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2012, 49(10): 82-85. (in Chinese)
- [20] Javedani J B,Houck T L,Lahowe D A,et al. Insulator surface flashover due to UV illumination[C]// 2009 PPC'09 IEEE Pulsed Power Conference.IEEE,2009:832-837.
- [21] 孙跃,陈国东,戴欣,等.非接触电能传输系统恒流控制策略[J].重庆大学学报(自然科学版),2008,31(7):766-769.