

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.07.032

基于余弦方波的配电电缆绝缘多功能测试装置的研制

郭建钊

(国网福建省电力有限公司泉州供电公司, 福建 泉州 362000)

摘要:文中研制了一种兼具产生超低频余弦方波和振荡波的多功能高压发生装置,利用该装置既可以开展电缆绝缘的耐受电压能力测试,也可以开展局部放电检测。装置主要由快速充电单元、放电单元、高压电抗器以及局放检测单元组成。放电单元作为装置的核心单元,其实现采用了基于串联IGBT为核心的高压半导体开关,以满足系统最高30 kV峰值电压输出的需求。整套装置可以在余弦方波和直流振荡波两种模式下独立工作,在实验室中搭建系统平台,对中间接头处有缺陷电缆进行了局部放电检测。实验结果验证了多功能高压发生装置用于电缆绝缘测试的有效性。

关键词:电缆绝缘;超低频余弦方波;直流振荡波;局部放电

Development of Multi-functional Insulation Testing Equipment for Distribution Power Cables Based on Cosine Rectangular Wave

GUO Jianzhao

(State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Quanzhou Power Supply Company, Fujian Quanzhou 362000, China)

Abstract: This paper presents the development of a novel multi-functional high voltage testing equipment with the capability of generating both very low frequency (VLF) cosine rectangular wave (CRV) and oscillatory wave. The equipment consists of a fast charging unit, a discharging unit, high voltage reactor and partial discharge detection unit. As the core unit of the equipment, the discharging unit based on insulated gate bipolar transistor (IGBT) series-connected is developed that could meet the demand for 30 kV peak testing voltage. The whole device can work independently in cosine rectangular wave and DC oscillation wave. An experiment platform is built in the laboratory, and a PD test is performed on a section of cable with artificial defect. The results validate the effectiveness of the equipment for testing cable insulation.

Key words: cable insulation; VLF cosine rectangular wave; DC oscillation wave; partial discharge

0 引言

随着国民经济对电力需求的不断提升,城市配电网电缆的使用量逐年增长,对电力电缆的安全运行提出很高要求^[1-3]。交联聚乙烯电缆因其优异的制作工艺、良好的机械性能和耐热性,安装敷设和运行维护简单,成为城市配电网建设所需电缆的首选对象^[4-6]。在电缆制作和安装过程中造成的电缆本体损伤或缺陷,会对电网运行形成一定的安全隐

患。根据激励源的不同,常用的电缆绝缘测试方法包括工频测试法、直流测试法、振荡波测试法以及超低频法等^[7-13]。由于实际运行的电缆长度往往很长,其等效电容值很大,若采取传统的工频交流法,对设备容量要求较高,体积庞大,不便于现场试验;而利用直流耐压法检测XLPE电缆绝缘状态时,残余的空间电荷会在电缆绝缘层形成附加电场,加速绝缘老化。目前常采用超低频法和阻尼振荡波法对电缆进行绝缘诊断^[13-18],0.1 Hz超低频法可以直接测量电缆的 $\tan\delta$ 值,且由于电压频率较低,测量

收稿日期:2020-01-17; 修回日期:2020-03-10

基金项目:国网福建省电力有限公司科技项目(51233016000X)。

Project Supported by Fujian Power Grid Corporation Technology Project Under Grand(51233016000X).

灵敏度较高,可以有效反映电缆整体受潮、老化等状态;阻尼振荡波法与工频等效性较高,可以有效检测电缆的局部放电,继而判断出电缆绝缘品质的好坏。

多年来,超低频余弦方波(very low frequency cosine rectangular voltage)一直是电力行业研究发展的重点,其方波部分可以对电缆进行耐压测试,通过测量电缆的泄漏电流或绝缘电阻,反映电缆整体绝缘状态,而其上升沿和下降沿可以模拟交流对电缆进行局部放电检测^[19-21]。文中提出的 30 kV 配电电缆高压发生装置,不仅可以产生 0.1 Hz 超低频余弦方波,而且同时具有直流振荡波的功能,是一种多功能、综合性的电缆绝缘检测装置,通过在实验室中搭建系统平台,并在实际电缆中进行检测,实验结果表明该系统在电缆绝缘状态检测领域具有良好的发展前景。

1 发生装置工作原理

多功能发生装置分为两种模式,其基本原理是系统通过高压直流源将试品电缆充电至预设电压后,电缆经由电抗器放电,根据控制模式的不同,可以分别产生超低频余弦方波和直流振荡波。

系统电路拓扑结构见图 1。主要由正负向充电单元、放电单元、检测单元等组成。为了将试品电缆迅速充电至预设电压,充电单元采用了基于全桥逆变电路为核心的快速充电系统,主要由整流稳压电路、全桥逆变电路、高频变压器、输出整流电路、控制保护电路组成,具有充电快速、输出电流恒定、可控性强等特点。放电单元采用正向高压半导体开关和反向高压半导体开关相串联的拓扑结构,这种结构的核心是利用半导体开关自身的反并联二极管进行电压换向过程。相较于并联结构,串联拓扑结构避免了高压硅堆的引入,有效地节约了空间和成本。

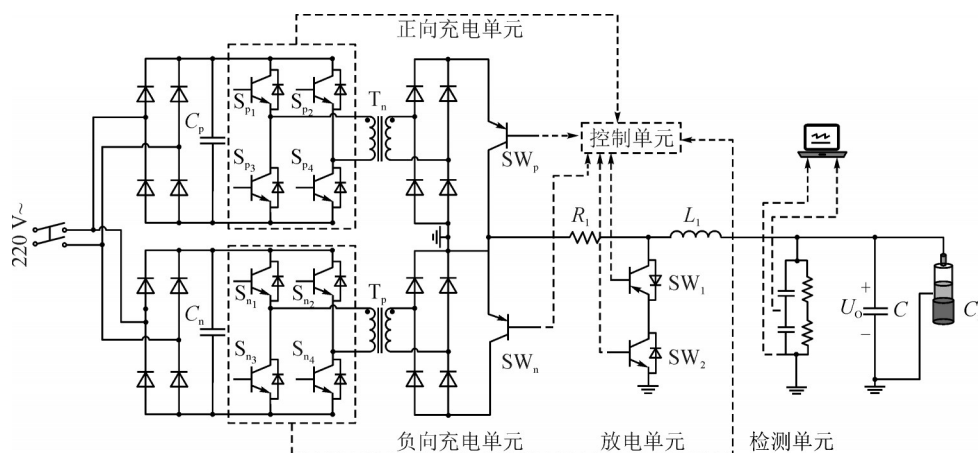


图1 多功能 30 kV 高压发生器拓扑结构图

Fig. 1 Topology of a 30 kV multi-functional high voltage generator

1.1 超低频余弦方波模式

超低频余弦方波的典型波形见图 2。其下降沿和上升沿呈余弦形式,超低频余弦方波发生装置通过充电单元对试品进行充电,形成方波部分,继而通过放电单元实现电压极性的反转,而为了补充在放电过程中损耗的能量,需要正负极性两个充电单元配合充电。

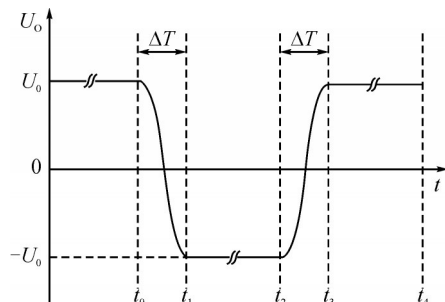


图2 0.1 Hz 超低频余弦方波典型波形

Fig. 2 Typical waveform of 0.1 Hz VLF-CRV

根据图 2 超低频余弦方波波形所示,利用图 1 拓扑结构产生超低频余弦方波分为 4 个阶段:

1) t_0-t_1 阶段: t_0 时刻,开关 SW_p 和 SW_n 关断,充电单元停止对试品电容充电, SW_1 处于关断状态, SW_2 开通,试品电容经由电抗器 L_1 形成 $L-C$ 串联谐振回路,试品两端电压 U 呈余弦形式下降,电压极性发生反转,其数学表达式为

$$U = \frac{U_o}{A} e^{-\delta(t-t_0)} \cos[\omega(t-t_0) + \beta] \quad (1)$$

式(1)中:

$$A = \sqrt{1 - \frac{R_1^2(C_x + C)}{4L_1}} \quad (2)$$

$$\delta = \frac{R_1}{2L_1} \quad (3)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{L_1(C_x + C)} - \left(\frac{R_1}{2L_1}\right)^2} \quad (4)$$

$$\beta = \arccos(A) \quad (5)$$

式(2)-(5)中: C_x 为试品电缆的等效电容; C 为辅助电容, 以避免 C_x 值过小; R_1 为电抗器的等效内阻。换向时间 ΔT 与电抗器和负载电容大小有关, 表达式为

$$\Delta T = \frac{\pi}{\omega} = \frac{\pi}{\sqrt{\frac{1}{L_1(C_x + C)} - \left(\frac{R_1}{2L_1}\right)^2}} \quad (6)$$

一般情况下, 电抗器等效内阻较小, 可忽略不计, 上述表达式可简化为

$$\Delta T \approx \frac{\pi}{\sqrt{\frac{1}{L_1(C_x + C)}}} = \pi \sqrt{L_1(C_x + C)} \quad (7)$$

2) t_1-t_2 阶段: 由于电抗器本身内阻的存在, 超低频余弦方波换向过程会有能量损耗。 t_1 时刻, SW_p 、 SW_1 仍处于关断状态, SW_2 关断, SW_n 导通, 负向充电单元经由电抗器 L_1 对试品电缆进行充电, 补充换向过程损耗的能量。

3) t_2-t_3 阶段: 类似于下降沿, t_2 时刻, 开关 SW_p 和 SW_n 关断, 负极性充电单元停止对试品电容充电, SW_2 处于关断状态, SW_1 开通, 试品电容经由电抗器 L_1 形成 $L-C$ 串联谐振回路, 试品两端电压 U 呈余弦形式上升, 电压极性发生反转, 其数学表达式为

$$U = -\frac{U_o}{A} e^{-\delta(t-t_2)} \cos[\omega(t-t_2) + \beta] \quad (8)$$

4) t_3-t_4 阶段: 类似于 t_1-t_2 阶段, 为了补充换向过程中的能量损耗, t_3 时刻, SW_n 、 SW_2 仍处于关断状态, SW_1 关断, SW_p 导通, 正向充电单元经由电抗器 L_1 对试品电缆进行充电。

1.2 直流振荡波模式

由于电路中存在正负极性两种直流源, 系统可以分别从正负极性电位产生振荡波。根据图1电路拓扑结构, 系统处于直流振荡波模式时, 其工作过程可分为两个阶段:

1) 开关 SW_p 导通, SW_n 、 SW_1 和 SW_2 关断, 正极性直流源工作, 将电缆充电至预设电压。

2) t_0 时刻, 开关 SW_p 、 SW_n 关断, 充电单元停止对试品充电, 放电开关 SW_1 和 SW_2 同时导通, 试品经由电抗器进行放电, 在试品两端产生欠阻尼振荡波, 见图3。

由于电抗器自身内阻较小, 振荡波频率主要由电抗器和负载电容决定, 振荡波频率推导公式为

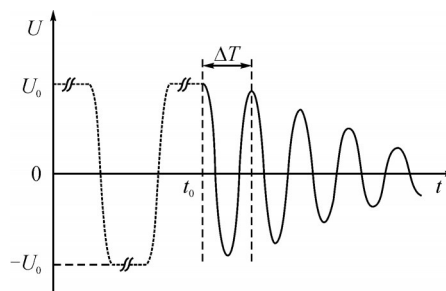


图3 直流振荡波典型波形

Fig. 3 Typical waveform of DC-DAC

$$f \approx \frac{1}{2\pi \sqrt{L(C + C_x)}} \quad (9)$$

2 系统结构设计

高压半导体开关是多功能发生装置的核心部分, 每个单元中都需要高压电力电子开关的配合, 由于系统的严格要求, 高压半导体开关不仅要能够承受 30 kV 以上的电压, 而且开断速度要快, 体积小, 重量轻。比较传统的电力电开关, 综合考虑开关性能和成本, 研制了以多路 IGBT 串联为基础的高压半导体开关, 并满足耐压高、通断速度小于 400 ns、光电隔离等要求, 见表1。实物图见图4。采用圆形电路板设计, 易于拓展, 满足 30 kV 耐压需求, 每个开关板由 5 个 IGBT 串联组成, 每个 IGBT 单元由相关的驱动电路、供电电路和均压保护电路组成。

表1 电力电子开关特性比较

Table 1 Comparison of characteristics among power electronic switch

特性	IGBT	MOSFET	BJT
驱动方式	电压型	电压型	电流型
开断速度	中(ns)	快(ns)	慢(μs)
驱动功率	低	低	高
饱和压降	低	高	低

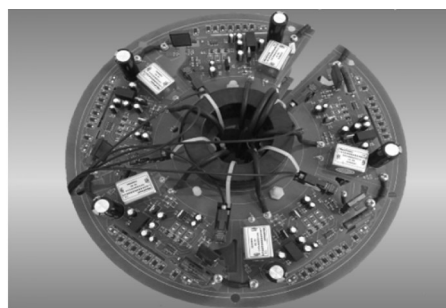


图4 高压半导体开关实物图

Fig. 4 Entity of high-voltage semiconductor switch

开关动作时由于流经感性负载的电流不能突变, 会在开关板两端产生瞬时过冲电压, 为了保证 IGBT 能够正常工作, 每个 IGBT 均并联瞬态电压抑

制二极管(transient voltage suppressors, TVS), TVS 管响应时间小于 1 ps, 当两端经受高能量的冲击时, 阻抗骤然降低, 将两端电压钳位在安全电压内, 保证 IGBT 正常工作。

利用多功能发生装置实现超低频余弦方波和直流振荡波功能, 需要实时地对不同部分的高压开关进行通断控制, 为了提高系统的安全性和稳定性, 笔者所设计的高压半导体开关的控制信号是通过光纤进行传输的, 实现系统光电隔离。由图 1 的电路拓扑结构可知, 系统需要 6 路控制信号, 分别用于控制正负向充电单元、 SW_p 、 SW_n 、 SW_1 、 SW_2 的工作状态。

检测单元由电阻分压器、耦合单元以及高速数据采集卡组成, 用来检测和采集负载端电压和局部放电信号, 耦合单元带宽为 700 kHz~25 MHz, 可以有效检测到局部脉冲信号, 数据采集卡最大模拟带宽 100 MHz, 最高采样速率为 5 GS/s。

3 应用与实验结果

为了验证多功能发生装置在电缆局部放电检测方面的有效性, 在实验室中对 200 m XLPE 单芯电缆进行电缆局部放电检测及定位试验, 系统发生装置采用 1.8 H 空心电抗器。被测电缆为两卷 100 m 电缆经过冷缩中间接头连接, 通过在中间接头处插入钢针, 形成电缆针尖缺陷, 钢针插入深度为 3 mm, 自身直径 0.8 mm, 见图 5。

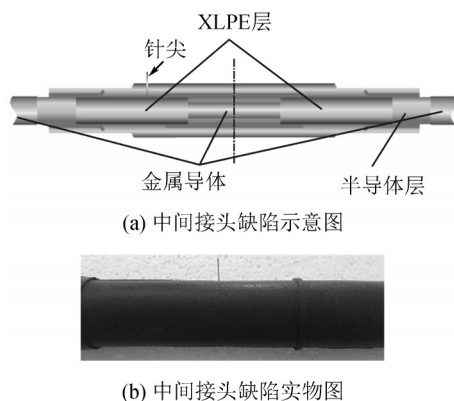


图5 XLPE 电缆中间接头处针尖缺陷

Fig. 5 Needle defect of XLPE cable in the middle joint

3.1 超低频余弦方波试验

在超低频余弦方波下对电缆进行局部放电检测, 见图 6。图 6(a) 是系统高压输出波形, 利用其上升沿和下降沿部分检测电缆局部放电; 由图 6(b) 中可以看出, 在波形上升沿部位准确检测到电缆局部放电信号, 测试结果显示当电缆端电压升至 7 kV 时, 检测单元检测到局部放电信号。

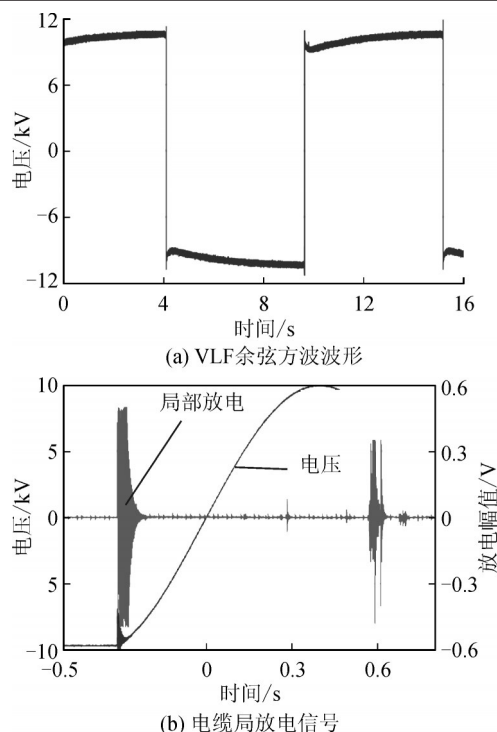


图6 VLF余弦方波下电缆局部放电检测

Fig. 6 PD detection of cable under VLF-CRV

为了进一步验证该多功能发生装置在电缆局部放电定位方面的有效性, 在多个电压等级下向试品电缆施加 VLF 余弦方波, 并根据采集到的局部放电信号对其进行 TDR(time domain reflectometry) 分析, 得到局部放电源的定位图, 见图 7。从图 7 中可以看出在电缆 100 m 处局部放电剧烈, 说明此处存在绝缘缺陷, 定位结果与实际电缆缺陷位置吻合。

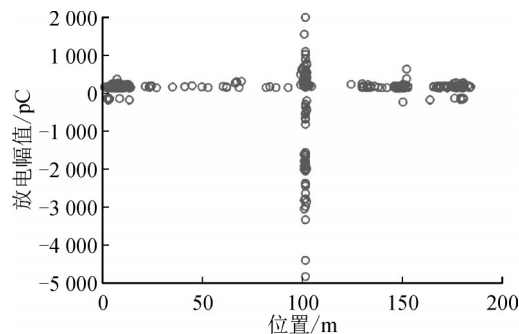


图7 VLF余弦方波下电缆局部放电定位

Fig. 7 PD location of cable under VLF-CRV

3.2 直流振荡波试验

改变系统控制模式, 向同一电缆试品施加直流振荡波, 发生装置采用的空心电抗器电感值为 1.8 H, 振荡波频率为 625 Hz 左右。当电缆端电压升至 7.1 kV 时, 通过检测单元采集得到局部放电信号, 高压输出波形和局部放电信号波形见图 8。利用 TDR 分析技术对电缆局部放电进行分析定位, 得到的结果见图 9, 定位结果与实际缺陷位置相符。

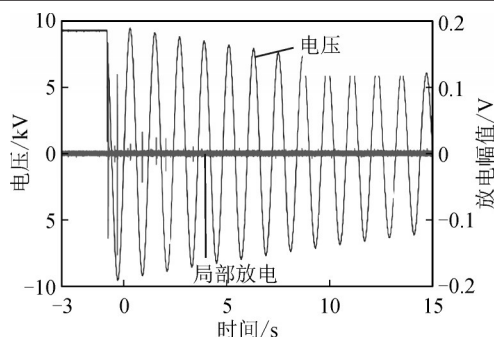


图8 直流振荡波下电缆局部放电检测

Fig. 8 PD detection of cable under DC-DAC

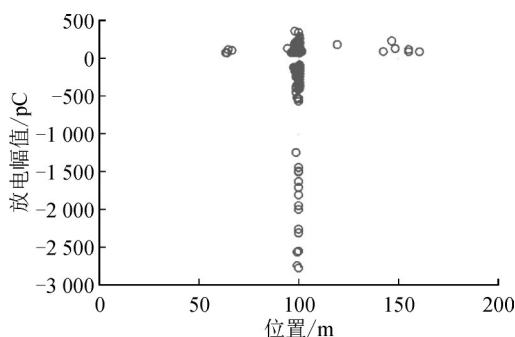


图9 直流振荡波下电缆局部放电定位

Fig. 9 PD location of cable under DC-DAC

4 结语

文中介绍了兼具超低频余弦方波和直流振荡波功能的配电电缆绝缘检测装置,并通过实验验证了多功能发生装置在电缆绝缘耐压以及局部放电检测两个方面的有效性。相对于传统电缆绝缘检测装置,本系统对电源容量要求低,便携性高,是一种综合经济有效的电缆绝缘测试装置。

参考文献:

- [1] 黄超,姚森敬,张伟,等. 配网10 kV电缆脉冲电流法局放测试及定位技术的探讨[J]. 华东电力, 2014, 42(9):1961-1965.
HUANG Chao, YAO Senjing, ZHANG Wei, et al. PD testing and location technology for distribution network 10 kV cable based on pulse current method[J]. East China Electric Power, 2014, 42(9):1961-1965.
- [2] 段乃欣,赵中原,邱毓昌,等. XLPE电缆中局部放电脉冲传播特性的实验研究[J]. 高压电器, 2002, 38(14):16-18.
DUAN Naixin, ZHAO Zhongyuan, QIU Yuchang, et al. Experimental study on the propagation characteristics of the PD pulse in XLPE power cable[J]. High Voltage Apparatus, 2002, 38(14):16-18.
- [3] 陆志雄,沈凉平. XLPE电力电缆局部放电检测技术综述[J]. 湖北电力, 2004(4):26-28.
LU Zhixiong, SHEN Liangping. Overview of partial discharge detecting technology for XLPE cable[J]. Hubei Electric Power, 2004(4):26-28.
- [4] 朱俊栋,杨连殿,贾江波,等. XLPE电缆局放脉冲频谱分析及传感器选频[J]. 高电压技术, 2006, 32(7):36-38.
ZHU Jundong, YANG Liandian, JIA Jiangbo, et al. Spectrum analysis of the partial discharge pulses in XLPE cable and frequency band selection of sensors[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(7):36-38.
- [5] 杨孝华. 交联聚乙烯电力电缆局部放电模式识别的研究[D]. 重庆:重庆大学, 2002.
YANG Xiaohua. Research about operator on PRPD mode of XLPE power cable[D]. Chongqing: Chongqing University, 2002.
- [6] 孙志明. 10 kV电缆振荡波局部放电检测技术研究及应用[D]. 北京:华北电力大学, 2012.
SUN Zhiming. Study and application about 10 kV cable PD owtis[D]. Beijing:North China Electric Power University, 2012.
- [7] 薛荣,张龙,黄志伟,等. 阻尼振荡波电压和工频电压下XLPE电缆局部放电特性的对比研究[J]. 绝缘材料, 2015, 48(1):43-48.
XUE Rong, ZHANG Long, HUANG Zhiwei, et al. Comparative study on partial discharge characteristics of XLPE cable under damped oscillating wave voltage and AC voltage[J]. Insulation Materials, 2015, 48(1):43-48.
- [8] 唐世虎. 0.1 Hz超低频余弦方波耐压试验系统研究与设计[D]. 成都:西南交通大学, 2014.
TANG Shihu. Research and design on 0.1 Hz VLF cosine square wave system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [9] 张青波. 交联聚乙烯绝缘电力电缆交流耐压试验研究[J]. 通讯世界, 2013(23):90-92.
ZHANG Qingbo. Study on AC withstanding voltage test of crosslinked polyethylene insulated power cable[J]. Communication World, 2013(23):90-92.
- [10] 彭发东,刘斌,庞小峰,等. 阻尼振荡波下检测XLPE电缆局部放电和耐压与工频的等效性综述[J]. 高压电器, 2013, 49(7):116-121.
PENG Fadong, LIU Bin, PANG Xiaofeng, et al. Review of the equivalence between oscillating wave voltage and AC methods for XLPE cables withstand and partial discharge measurement[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(7):116-121.
- [11] 夏荣,赵健康,欧阳本红,等. 阻尼振荡波电压下110 kV交联电缆绝缘性能检测[J]. 高电压技术, 2010, 36(7):1753-1760.
XIA Rong, ZHAO Jiankang, OUYANG Benhong, et al. Dielectric property detection of 110 kV XLPE power cables using damped AC voltages[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(7):1753-1760.
- [12] KANDO M. A high voltage damped oscillating wave gen-

- erator[C]//2004 IEEE Region 10 Conference. [S.l.]: IEEE, 2004:124-127.
- [13] WANG Y, WANG Y, WANG C, et al. The partial discharge characteristic of typical XLPE cable insulation defects under damped oscillating voltage[C]//Electrical Insulation Conference. [S.l.]: IEEE, 2014:290-293.
- [14] 陈 硕, 侯 喆, 曾肖明, 等. 电缆状态检测用超低频指数波发生器的研制[J]. 电气技术, 2017(6):37-40.
CHEN Shuo, HOU Zhe, ZENG Xiaoming, et al. Very low frequency(VLF) exponential wave generator for status detection of power cables[J]. Electrical Technology, 2017(6):37-40.
- [15] 张家安, 汪祥兵, 张 辉. 0.1 Hz 超低频耐压试验方法的探讨和研究[J]. 湖北电力, 2007(6):14-15.
ZHANG Jia'an, WANG Xiangbing, ZHANG Hui. The discussion and study of 0.1 Hz ultra-low frequency voltage withstand testing method[J]. Hubei Electric Power, 2007(6):14-15.
- [16] 何丽娟, 李子帑, 罗双超, 等. 0.1 Hz 超低频耐压试验装置的设计及实现[J]. 电测与仪表, 1999, 36(8):22-24.
HE Lijuan, LI Zizhi, LUO Shuangchao, et al. Design and implementation of 0.1 Hz ultra-low frequency withstand voltage test device[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 1999, 36(8):22-24.
- [17] 张 鹏. XLPE 电力电缆耐压试验的探讨[J]. 电气开关, 2007(4):25-26.
ZHANG Peng. Discussion on withstand voltage test of XLPE power cable[J]. Electrical Switch, 2007(4):25-26.
- [18] OYEGOKE B, HYVONEN P, ARO M, et al. Selectivity of damped ac(DAC) and VLF voltages in after-laying tests of extruded MV cable systems[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10(10):874-882.
- [19] 张 梁, 吴仁宜. 苏州供电公司 0.1 Hz VLF(超低频)余弦方波电缆耐压试验技术应用[J]. 现代制造, 2009(36):96-97.
ZHANG Liang, WU Renyi. Withstand testing method of 0.1 Hz VLF cosine rectangular in Suzhou[J]. Maschinen Market, 2009(36):96-97.
- [20] 尹燕民, 杜永刚, 王德胜. 电缆超低频(VLF)正弦波耐压试验的应用[J]. 设备管理与维修, 2014(s1):103-104.
YIN Yanmin, DU Yonggang, WANG Desheng. Application of very low frequency(VLF) sinusoidal voltage test for cable[J]. Equipment Management and Maintenance, 2014(s1):103-104.
- [21] 彭 潜, 陈俊武, 吴云飞. 用 0.1 Hz 超低频方法进行 XLPE/PE 电缆耐压试验[J]. 电工技术, 2004(12):58-60.
PENG Qian, CHEN Junwu, WU Yunfei. XLPE/PE cable withstand voltage test with 0.1 Hz ultra-low frequency method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004(12):58-60.
- 郭建钊(1964—), 男, 本科, 高级工程师, 长期从事生产管理及输变电、信息通信及科技管理工作。