

基于谐振原理由电容器组供电的电缆局部放电振荡波检测与定位技术

赵学风¹, 蒲路¹, 段玮¹, 琚泽立¹, 李洪杰²

(1. 国网陕西省电力公司电力科学研究院, 陕西 西安 710100; 2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 局部放电作为反映交联聚乙烯电缆绝缘状态的重要参数, 其检测能够发现电缆绝缘的早期缺陷, 具有十分重要的意义。提出一种通过传统调频式串联谐振原理上添加两个双向电力电子开关的拓扑, 能够产生振荡波电压测量电缆局部放电。为减小系统在工作时从电网吸收峰值较高的瞬时电流, 利用电容器组对基于调频式串联谐振的振荡波检测技术供电。通过参数评估与Simulink仿真设计了基于提出技术的测试系统, 并在实验室无局部放电电容和含有人造缺陷的电缆上进行试验, 试验结果验证了所提技术的有效性。

关键词: 电力电缆; 串联谐振; 振荡波; 电容器组; 局部放电

Damped AC technique based on resonant principle and supplied by capacitor banks for partial discharge detection and location in power cables

ZHAO Xuefeng¹, PU Lu¹, DUAN Wei¹, JU Zeli¹, LI Hongjie²

(1. Research Institute of State Grid Shanxi Electric Power Company, Xi'an 710100, China;

2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: It is essential to detect partial discharge to ensure the integrity of the cable insulation. A technique to generate damped AC voltage using traditional frequency-tuned resonant system and additional bi-directional solid-state switches is proposed. To reduce the transient high current absorb from the networks, capacitor banks are adopted to supply the system. Parameter estimation and simulation by Simulink are conducted to evaluate the manufacturing process of the system. Laboratory tests show the validity and effectiveness of the proposed technique.

Key words: power cable; series resonant technique; damped AC voltage; capacitor banks; partial discharge

0 引言

交联聚乙烯 (Cross-Linked Polyethylene, XLPE) 电缆由于在电气、机械和热特性方面的优异表现, 成为了输配电网中的绝对主力^[1-2]。然而, 由于制造、安装过程中的工艺问题和敷设环境的复杂性, 电缆往往在运行过程中会产生绝缘

劣化, 严重时可能会造成绝缘击穿, 影响电力系统的安全^[3]。局部放电 (Partial Discharge, PD) 作为绝缘劣化的早期表征, 其检测与分析能够尽早地发现电缆绝缘中的微小缺陷, 对于保障电缆的安全可靠运行具有十分重要的意义^[4-5]。

经过多年的发展, 电缆局部放电现场测试技术主要分为串联谐振技术、超低频检测技术以及

陕西省2018年重点研发计划 (2018GY-001)

振荡波检测技术。串联谐振检测技术根据其调谐方式的不同可以分为调频式串联谐振技术和调感式串联谐振技术^[6]。调感式串联谐振技术通过工频电源以及可调电抗器使得测试回路在50 Hz频率下发生谐振，电缆上产生工频正弦高压进行测试。然而其谐振回路品质因数较低，装置体积较大，重量较重，因此在现场测试中较少使用。而调频式串联谐振技术通过调频电源和固定铁心的电抗器使得测试回路在30~300 Hz之间发生谐振。研究人员通过试验验证了30~300 Hz之间的正弦电压与50 Hz的正弦电压具有较高的等效性^[7]。调频式串联谐振系统具有较高的现场测试便携性，但往往也只用于电缆耐压试验，其原因主要是因为调频电源中的电力电子器件引入了较多的开关噪声，干扰了局部放电的测量^[8]。近年来，超低频试验在业内得到了较为广泛的关注，然而超低频电压与工频电压的等效性较差，通过超低频技术评估电缆绝缘的有效性一直是相关研究人员所担心的问题^[9]。文献[10-11]提出了振荡波检测技术，可以较为便捷地实现现场测试，而且经过试验验证其工频等效性较高。然而，由于振荡波系统中的高压电力电子开关的昂贵价格，在一定程度上阻碍了其发展。

总体而言，除了检测技术本身以外，电源功率也是长久以来现场测试过程中所面临的问题。相较于工频的测试方法，串联谐振系统、超低频检测系统和振荡波系统所需要的电源功率都要小很多。然而，此处所指的功率为单位时间内消耗的能量，并没有考虑电源在短时间内需要给测试系统提供的能量，即系统电源需要提供的瞬时电流值。较大的瞬时电流会对电源甚至电力系统造成较大的冲击。因此，在考虑所采用技术的有效性同时，还需要对该技术所需要吸收的瞬时电流进行相应的评估。

本文基于电缆局部放电现场检测技术所面临的问题，提出一种通过电容器组供电，基于调频式串联谐振原理的电缆振荡波局部放电检测与定位技术。通过传统的调频式串联谐振原理对电缆进行升压，然后由双向固态开关动作在电缆上

产生振荡波电压测量局部放电，在该过程中停止调频电源，不会产生开关噪声影响局部放电的测量。系统谐振和形成振荡波过程由电容器组供电，与电网电源隔离，不会对电网造成大电流冲击。

1 技术背景与原理

1.1 调频式串联谐振技术

传统的调频式串联谐振系统原理如图1所示，通过市电供电，经调频电源和升压变压器 T_r 后连接至由电抗器 L_t 和电缆 C_x 组成的谐振回路，在30~300 Hz之间逐步改变调频电源的输出电压频率，当输出频率与谐振回路的自然频率相等时，电缆上产生该频率下的正弦高压，谐振频率表达式如下

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_t C_x}} \quad (1)$$

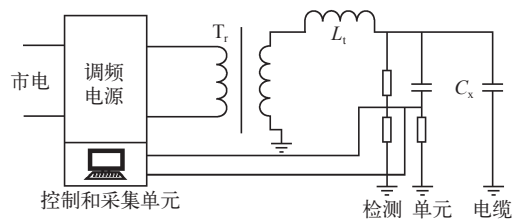


图1 调频式串联谐振系统原理图

Fig.1 Principle of FM series resonance system

由于在谐振过程中回路只消耗有功功率，因此相较于工频试验对源端的需求较小，设备体积较小，重量较轻。然而在调频电源逆变电路器件开通过程中，需要从源端吸收较大的瞬时电流，对电网电源造成不小的冲击。

1.2 基于调频式串联谐振原理的振荡波检测技术

本文提出的电缆现场检测技术基于传统的调频式串联谐振原理，在升压变压器低压绕组侧添加两个双向高速固态开关 K_1 和 K_2 。通过两个开关的动作使得在电缆上的电压由谐振电压转换为振荡波电压。而为了不对电网造成一定的冲击，本文提出的基于调频式串联谐振原理的振荡波检测技术通过容值较大的电容器组进行供电，如图2所示。

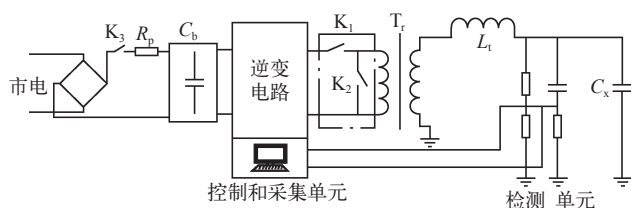


图2 基于调频式串联谐振的振荡波技术原理图

Fig.2 Principle of oscillating wave technology based on FM series resonance

基于调频式串联谐振原理的电缆局部放电振荡的检测步骤如下:

1) 启动系统前, 先将开关 K_3 闭合, 由市电经过整流电路和限流电阻 R_p 给电容器组 C_b 充电, 充至额定目标后断开开关 K_3 。

2) 闭合开关 K_1 , 断开开关 K_2 , 启动系统逆变电路, 此时电路与传统的调频式串联谐振系统相似, 从30 Hz逐步提升逆变电路输出电压频率, 找到回路谐振频率 f_r 。

3) 在该频率下逐步提高逆变电路的输出电压, 当电缆上的谐振电压达到测试值后, 在电压峰值处断开 K_1 , 闭合 K_2 , 并关闭逆变电路, 此时电缆上存储的电荷通过电抗器 L_t 和变压器 T_r 二次侧释放, 由于电抗器和变压器绕组的电阻损耗, 电缆上呈现阻尼的振荡波电压, 在振荡波电压下测量电缆中的局部放电信号。

4) 闭合开关 K_3 给电容器组充电, 进行下一次振荡波测试。

值得说明的是, 与传统串联谐振耐压测试不同, 振荡波局部放电测试表现为非连续性, 即每两次振荡波测试之间都具有一定的时间间隔, 时间间隔长度由回路放电速度、数据传输速度以及操作人员主观决定。因此, 在此时间间隔中对电容器组进行电荷补充, 不会对测试总时间造成较大影响。

与传统的串联谐振系统相比, 由于在局部放电测试时断开了开关 K_1 并关闭了逆变电源, 因此局部放电测试过程不会受到开关噪声的干扰。而传统的通过直流高压充电方式的振荡波系统相比, 本文提出的技术中没有使用高电压等级的电力电子开关, 故具有经济性方面的优势。通过电

容器组供电的形式, 使得需要吸收瞬时大电流的回路与电网隔离, 保障电网安全稳定地运行。

2 系统结构设计参数评估与仿真

2.1 谐振回路参数评估

以常见的8.7/10 kV配电电缆作为测试对象, 根据GB/T 1576规定, 对于新投运的XLPE电缆测试电压 U_c 的最大值为 $2U_0$, 即最大峰值电压为24.6 kV, 电缆长度按照2 km计算, 平均每公里电容值按照 $0.5 \mu\text{F}$ 计算, 而谐振回路的电感值采用传统振荡波系统中的空心电抗器, 电感值约为1 H, 则此时测试回路的谐振频率约为159.2 Hz, 谐振回路的电流峰值为

$$I_r = \omega C_x U_c = 24.6 \text{ A} \quad (2)$$

空心电抗器的直流电阻按照 $R_L = 30 \Omega$ 计算, 此时的谐振回路品质因数为

$$Q = \sqrt{\frac{L_t}{C_x}} \frac{1}{R_L} \approx 33.3 \quad (3)$$

则需要变压器二次侧输出最高电压至少要到 $24.6 \text{ kV} / 33.3 = 0.74 \text{ kV}$, 为了降低逆变电路的输出电流, 需要减小变压器电压比, 在考虑一定损耗后留有裕度, 采用1: 4.5的电压比。

同样由于每两次振荡波测试存在一定时间间隔, 变压器的额定功率无须像耐压试验设备一样考虑较大的热容量。若按照持续性工作的热容量计算, 变压器的功率至少为 $10 \text{ kV} \cdot \text{A}$, 而假设每次振荡波测试时间相同, 测试间隔时间相同, 且测试间隔时间为测试时间的两倍, 则可按照4~5 kV·A的容量设计。

2.2 逆变与充电电路

本文设计的逆变电路采用全桥逆变, 根据归算到变压器一次侧的电压电流参数选型, 逆变桥中采用额定电压为600 V、额定电流为100 A的IGBT, 而逆变电路的控制本文采用单极倍频调制, 使得输出频率为开关频率的两倍, 高次谐波含量减少, 同时有效减小了输出波形的畸变率, 输出脉冲个数相同时, 开关损耗减半。本文采用的调制方式示意图如图3所示。通过采用一对相反

的调制波 U_r 和 $-U_r$ 与三角波载波 U_c 进行比较, 得到四路 IGBT 的控制信号 $S_{i1} \sim S_{i4}$, 同一桥臂的一对控制信号互补导通, 不同桥臂的对应控制信号相隔为调制波周期的一半, 此时逆变桥输出 SPWM 波形 V_i 同样见图 3, 该波形经过滤波后输出即为频率与调制波频率相等的正弦波。

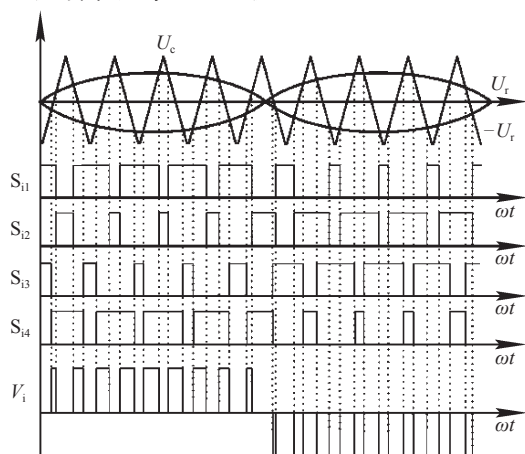


图3 单极倍频调制示意图

Fig.3 Schematic diagram of unipolar frequency doubling modulation

本文逆变采用的开关频率为 10 kHz, 而滤波器的截止频率工程上可以采用开关频率的 1/10, 因此, 最终根据参数搭配设计 LC 滤波器的参数为: $L_f \approx 1.7 \text{ mH}$; $C_f \approx 15 \mu\text{F}$ 。

而为了保证在一次振荡波测试期间逆变电路的母线电压可以近似稳定, 需要电容值较大的电容并联组成电容器组, 本文采用容值为 4 700 μF 、额定电压为 450 V 的电解电容作为电容器组的基本单元。

2.3 Simulink 仿真分析

根据以上评估的系统参数, 在 Simulink 平台中搭建相关模型进行仿真。在最大负载的情况下, 首先不考虑振荡波转换开关 K_1 和 K_2 动作, 以研究电容器组在一次充满电 (按照 220 V 市电经过整流后, 电容器组电压为 311 V 计算) 后能够升至最高的谐振电压。以 25 个电容组成的电容器组电压、电流以及测试电缆上的电压波形分别如图 4a、图 4b 所示。

由图 4 可知, 电容器组电压由 311 V 逐渐降低, 在 1 s 时降至 50 V 左右, 而电缆上试验电压开始时

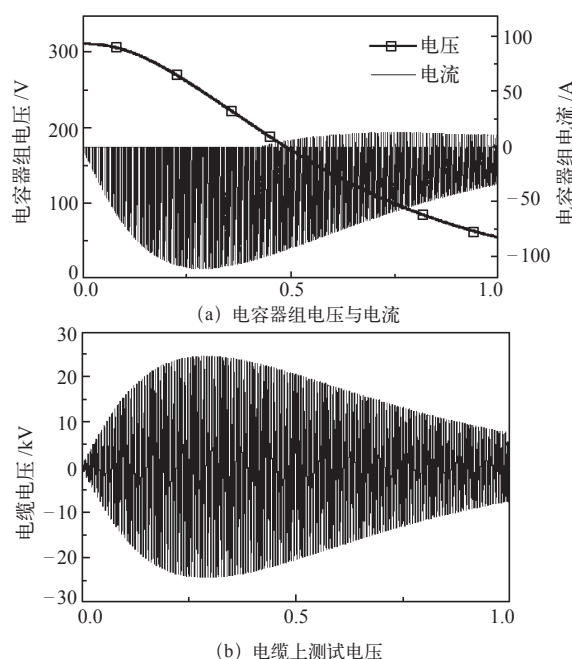


图4 无振荡波切换状态下仿真结果

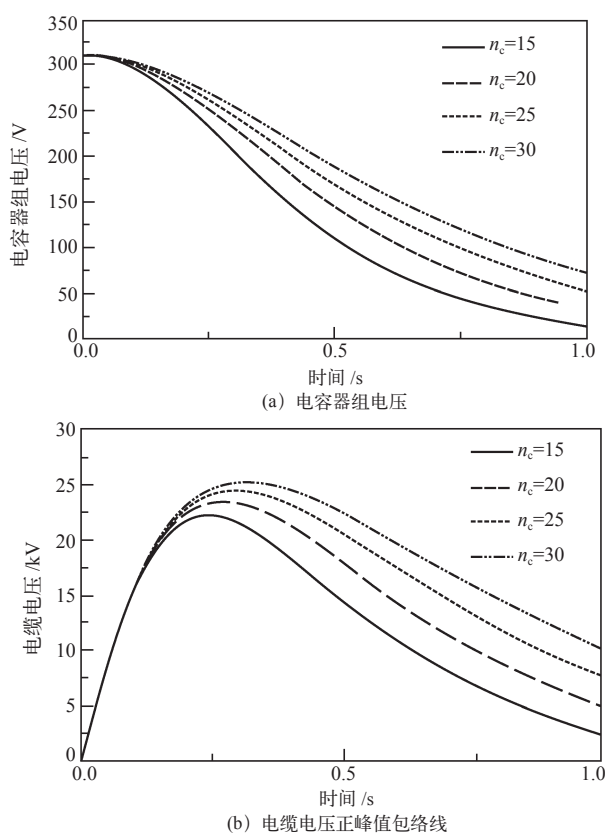
Fig.4 Simulation results of switching without oscillation wave

逐渐升高, 在到达最大值后又逐渐降低, 其主要原因: 逆变电路调制输出逐渐增大, 但电容电压逐渐降低, 因此电缆上的谐振电压势必存在一个极大值的情况, 在 25 个 4 700 μF 组成的电容器组供电的情况下, 能升至的最高电压仿真结果为 24.9 kV。为了评估合理的电容基本单元数量 n_c , 进行仿真分析得到的结果如图 5 所示。

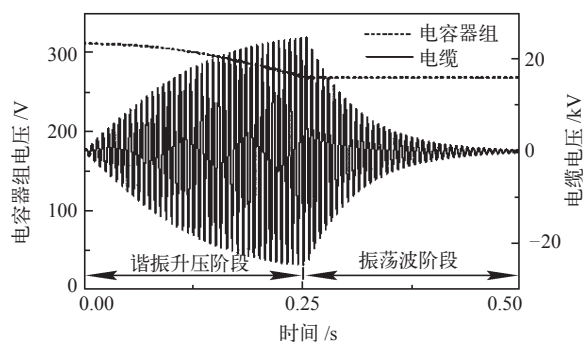
根据图 5 可知, 电容器单元数量较少时, 其电压下降越快, 而电缆上能升至的最高电压也越小。电容单元数量在 20 个以下时, 电缆上的最高电压不满足振荡波现场测试条件, 而在单元数量 $n_c = 25$ 时, 已经能够满足最大负载下 $2U_0$ 的测试条件, 而为了留有裕量, 本文采用 28 个 4 700 μF 的基本电容单元。

在 28 个电容单元组成的电容器组供电的条件下, 在 $2U_0$ 处通过振荡波转换开关动作得到振荡波电压, 如图 6 所示。

根据仿真结果, 电缆电压在达到 $2U_0$ 后产生振荡波电压, 随后, 电容器组上的电压不再发生变化, 最大负载情况下通过单次振荡波测试, 电容器组电压从 311 V 降低至 269 V, 而在测试间隔内, 只需要将电容器组从 269 V 开始充电, 因而可以为

图5 电容单元数量 n_c 不同情况下仿真结果Fig.5 Simulation results of capacitor unit number n_c under different conditions

限流电阻 R_p 的取值提供依据, 根据一般现场可能出现的测试间隔时间, 限流电阻可以选取 $1 \sim 3 \Omega$, 本文以 1Ω 为例进行分析。

图6 $2U_0$ 振荡波仿真结果Fig.6 Simulation results of $2U_0$ oscillation wave

在选取的限流电阻参数情况下, 对比分析同参数的振荡波系统在市电供电和通过本文提出的电容器组供电需要的电源瞬时电流。通过市电供电的系统, 电容采用商用串联谐振系统中常用的 $4\ 700\ \mu\text{F}$, 而除了软启动阶段有限流电阻外, 系

统工作阶段市电直接与整流电路相连接。最终, 两者的对比结果如图7所示。

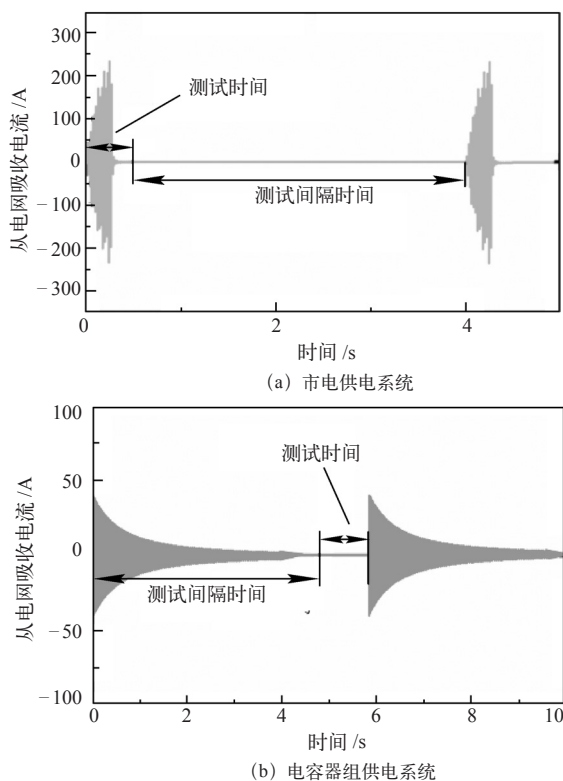


图7 不同供电方式从电网吸收电流波形

Fig.7 Absorbing current waveform from power grid by different power supply ways

由仿真结果可知, 若采用传统的市电供电方法, 虽然系统总体需求的功率不大, 但是瞬时电流最大值接近 200 A , 对电网的运行产生了不稳定因素。而通过在测试间隔之内给电容器组充电的方式, 能够大大降低瞬时电流的峰值, 如图7b中所示限流电阻为 $1\ \Omega$ 的情况, 从电网吸收的瞬时电流峰值不足 50 A 。在实际操作过程中, 测试时间间隔往往比仿真值要长, 因此可以选用更大的限流电阻, 使得瞬时电流峰值更小。

3 系统测试试验

3.1 系统波形测试

根据上述的设计参数, 研制了以电容器组供电并基于调频式串联谐振原理的电缆振荡波检测系统, 电容器组与系统主体部分如图8所示。

对研制的系统进行基本的波形测试, 试验负

载选择无局部放电的 $0.8\ \mu\text{F}$ 的高压陶瓷电容, 实验室测试场景如图8所示。在升压至 $2U_0$ 的情况下, 电容器组的电压与电流波形如图9所示。



图8 实验室测试场景图

Fig.8 Lab test scenario map

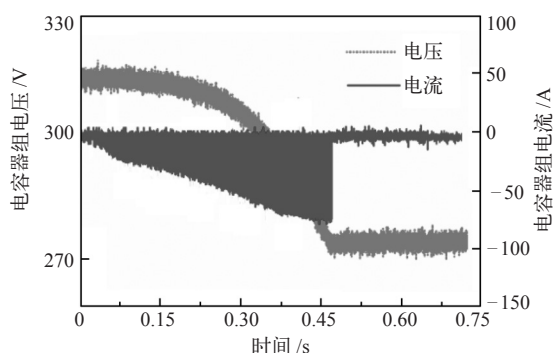


图9 电容器组电压与电流波形

Fig.9 Voltage and current waveform of capacitor bank

由图9可知, 电容器组电压在负载电容电压升至测试电压过程中, 从311 V左右降至大约270 V, 而电容器组给负载电容提供的电流随着负载电容电压上升而增加, 最大电流约为75 A。

在该电压等级下, 测试得到负载电容 (即电缆) 上的高压波形与局部放电检测通道检测到的波形如图10所示。

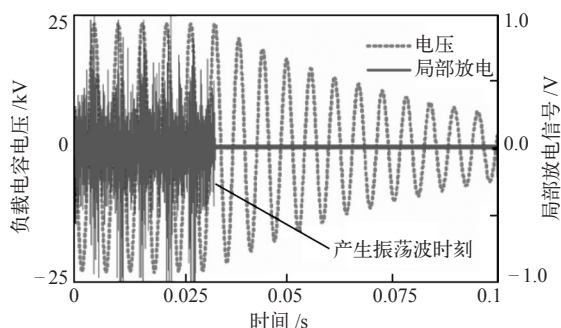


图10 负载电容上高压与局部放电检测信号

Fig.10 High voltage and partial discharge detection signal on load capacitor

由图10可以观察到, 当负载电容处于谐振电压作用下时, 在局部放电检测通道能够检测到幅值较大的开关噪声, 影响局部放电测量, 而当电压转换到振荡波电压后, 开关 K_1 断开, 并且关闭逆变电路, 因此在振荡波电压作用阶段, 局部放电检测不会受到开关噪声的干扰, 只存在背景噪声, 可以测量局部放电信号。而单纯考虑振荡波电压波形, 由于开关 K_2 闭合, 减小变压器铁心损耗, 电压衰减至峰值一半的时间不低于8个周期, 满足国家标准GB/T 1576的要求。

3.2 实验室电缆测试

为了验证通过电容器组供电的基于调频式串联谐振原理的振荡波系统能够有效地对电缆中局部放电进行检测和定位, 在实验室的400 m单芯电缆上进行测试, 在100 m处人为设置一个中间接头的放电缺陷。电缆等效电容约为256 nF, 谐振频率约为314.6 Hz, 在 $1.1U_0$ 电压下, 电缆上电压和测试的局部放电信号如图11所示。由此可以发现: 在振荡波电压作用阶段, 能够测量到局部放电信号; 而在谐振电压阶段, 放电信号湮没在噪声之中。

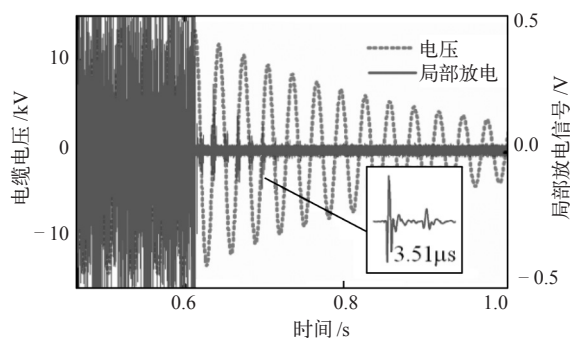


图11 $1.1U_0$ 电压下电缆上电压和局部放电信号

Fig.11 Cable voltage and partial discharge signals at $1.1U_0$ voltage

根据时域反射理论算法可以得到局部放电定位谱图如图12所示。由图12可知, 定位结果集中在98.4 m左右, 与实际情况基本吻合, 验证了本文提出的技术具有可行性和有效性。

4 结束语

本文提出一种基于串联谐振原理的振荡波电

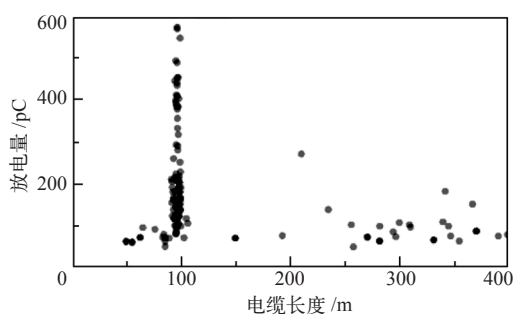


图12 局部放电定位谱图

Fig.12 Partial discharge location spectrum

缆局部放电检测与定位技术, 并且其供电方式采用电容器组供电。相关研究结论如下:

1) 根据传统的调频式串联谐振拓扑, 在变压器一次侧加入两个双向高速电力电子开关, 在谐振电压峰值处依次动作, 可以在电缆上形成阻尼振荡波。

2) 与传统的调频式串联谐振技术相比, 在振荡波阶段隔离并关闭了调频电源, 局部放电测量不会受到开关噪声的干扰; 另一方面, 与传统的振荡波技术相比, 未使用高压电源和高压电力电子开关, 具有较高的经济性。

3) 由电容器组对研制的系统进行供电, 能够抑制试验时系统从电网吸收的瞬时电流峰值, 减小对电网的冲击。在振荡波测试间隔时间内对电容器组充电, 振荡波测试时间内通过电容器组供电, 这种方式也不会对测试时间造成影响。

4) 在实验室通过对无局部放电电容和含有人造缺陷的电缆进行试验, 试验结果验证了本文提出的技术具有可行性和有效性。

参考文献

- [1] 杜伯学, 马宗乐, 霍振星, 等. 电力电缆技术的发展与研究动向[J]. 高压电器, 2010, 46(7): 100-104.
- DU Boxue, MA Zongle, HUO Zhenxing, et al. Development and research trend of power cable technology[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(7): 100-104.
- [2] 杨宇琦, 李园萌, 李洪杰. 基于矢量拟合下的电缆半导体层测量及其建模方法的研究[J]. 电气应

用, 2018, 37(8): 88-93.

YANG Yuqi, LI Yuanmeng, LI Hongjie. Research on measurement and modeling of semiconductive layer of cable based on vector fitting[J]. Electrotechnical Application, 2018, 37(8): 88-93.

- [3] 罗凤魁, 赵丹丹, 黄付环. 减少10 kV交联电缆生产过程中的绝缘缺陷[J]. 电线电缆, 2017 (1): 42-43, 46.

LUO Fengkui, ZHAO Dandan, HUANG Fuhuan. Reducing insulation defects in the production of 10 kV XLPE cables[J]. Wire and Cable, 2017 (1): 42-43, 46.

- [4] 廖瑞金, 周天春, 刘玲, 等. 交联聚乙烯电力电缆的电树枝化试验及其局部放电特征[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(28): 136-143.

LIAO Ruijin, ZHOU Tianchun, LIU Ling, et al. Electric treeing test and partial discharge characteristics of XLPE power cable[J]. Journal of Electrical Engineering of China, 2011, 31(28): 136-143.

- [5] 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.

- [6] Kubler B, Hauschild W. What to do after the warning of an on-line insulation diagnostic system? Off-line PD monitoring with HVAC testing[C]. IEEE Power Systems Conference and Exposition, NY, USA, 2004, 2: 822-828.

- [7] Gockenbach E, Hauschild W. The selection of the frequency range for high-voltage on-site testing of extruded insulation cable systems[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2000, 16 (6): 11-16.

- [8] 陈忠. 串联谐振耐压试验的现场问题及解决方法[J]. 电网技术, 2006, (增刊1): 205-207.
- CHEN Zhong. Field problems and solutions of series resonance voltage withstand test[J]. Power Grid Technology, 2006, (S1): 205-207.

- [9] Dao T, Phung B T, Blackburn T, et al. A comparative

study of partial discharges under power and very low frequency voltage excitation[C]. IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Des Moines, USA, 2014: 164-167.

- [10] Wester F J, Guilski E, Smit J J. Detection of partial discharges at different AC voltage stresses in power cables[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2007, 23 (4): 28-43.

- [11] 王有元, 王亚军, 熊俊, 等. 振荡波电压下10 kV交联聚乙烯电缆中间接头的局部放电特性[J]. 高电压技术, 2015, 41(4): 1068-1074.

WANG Youyuan, WANG Yajun, XIONG Jun, et al. Partial discharge characteristics of intermediate

joints of 10 kV XLPE cables under oscillating wave voltage[J]. High Voltage Technology, 2015, 41(4): 1068-1074.

作者简介



赵学风

赵学风(1983-),女,博士,高级工程师,长期从事电力电缆运维与检测技术。

(收稿日期:2018-11-08)EA

广告 | AD

全新改版

色彩丰富 凸显主题

2019《电气应用》以鲜明色彩和新颖版式呈现精彩内容,力求赏心悦目。

栏目设置 独具风格

坚持继承与开拓并举,以丰富内涵充实经典栏目,持续深化专家访谈、EA经理人等栏目,密切关注电气技术的发展和运用。

专家点评 精辟深刻

每期都将围绕一个热点话题,隆重推出一场专题讨论的盛宴,共邀知名专家、产品用户和生产厂家汇聚一堂,针对焦点问题作出评析。

行业案例 生动丰富

关注电力、建筑、石化和冶金等电气行业应用,以典型深刻的案例分析、方案设计构建技术互动的空间,促进应用经验交流。

国内邮发代号: 82-341 国外发行代号: M1409

每期定价: 25.00元 全年定价: 300.00元



· 电气应用 盛情呈现 ·

2019