

用于电缆局部放电检测的 储能式交流激励型振荡波测试系统

郭小凯¹, 卢雨欣², 孙廷玺¹, 徐小龙², 李军浩², 李洪杰²

(1. 广东电网有限责任公司珠海供电局, 519075, 广东珠海; 2. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对电缆现场局部放电检测试验缺乏低噪声和便携测试系统的问题,提出了一种由电容器组储能供电的交流激励型电缆振荡波测试系统。该系统在传统调频式串联谐振电路的逆变电源输出端添加了两个双向高速固态开关,并使用电容器组为逆变电源供电,能够在被测电缆上产生试验所需的振荡波电压,具有免受开关噪声干扰的突出优点。此外,为避免使用发电机带来的脉冲干扰降低局部放电检测的灵敏度,该系统采用在测试阶段由电容器组对系统供电,在测试间隔期间由电源对电容器组充电的对策解决了系统对发电机的依赖问题。对该系统开展大容量电容测试以及10 kV 配电电缆应用测试,结果表明:该系统在电容器组供电条件下可将等效容值为1 μF 的电缆负载升压至峰值24 kV,且局部放电检测噪声低于10 mV;系统可满足10 kV 电力电缆现场离线局部放电检测试验的需求。

关键词: 振荡波;串联谐振;电容器组;局部放电

中图分类号: TM83 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202010012 **文章编号:** 0253-987X(2020)10-0100-08



OSID 码

A Testing System with Energy Storage and Oscillating Wave for Partial Discharge Detection of Cables

GUO Xiaokai¹, LU Yuxin², SUN Tingxi¹, XU Xiaolong², LI Junhao², LI Hongjie²

(1. Zhuhai Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Corporation, Zhuhai, Guangdong 519075, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A testing system with energy storage and oscillating wave is proposed to provide a lack of low-noise and portable testing system for field partial discharge tests of power cables. The system adds two bi-directional solid-state switches and a capacitor bank, and generates oscillating wave using traditional frequency-tuned resonant technique so that partial discharge signals will not be disturbed any more by switching noise. Moreover, the capacitor bank is used to power the system during the testing and to reduce the electromagnetic interference produced by the power generator. The system's dependence on the generator is solved by charging the capacitor bank by the power supply during each oscillating wave test interval. A laboratory test on a large capacitor and a field test on a 10 kV cable line are carried out for the system. It is verified that the system boosts the cable load with equivalent capacitance of 1 μF to a peak 24 kV and partial discharge detection noise is lower than 10 mV. It is concluded that the system meets the requirements of off-line field partial discharge detection test for 10 kV power cables.

收稿日期: 2020-04-08 作者简介: 郭小凯(1986—),男,硕士,高级工程师;孙廷玺(通信作者),男,硕士,高级工程师。

基金项目: 广东电网有限责任公司科技项目(GDKJXM20185371);国家自然科学基金资助项目(51877169)。

网络出版时间: 2020-06-24

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20200624.0851.004.html>

Keywords: oscillating wave; frequency-tuned resonance; capacitor bank; partial discharge

交联聚乙烯电力电缆在城市输配电网络中都得到了大量使用,其绝缘状态直接关系着电力系统的稳定性和可靠性^[1-5]。然而,受到绝缘制造工艺以及电缆附件现场安装质量等问题的影响,电缆故障时有发生,造成大量经济损失和不良社会影响。

局部放电技术能够检测出电缆绝缘中的微小缺陷,在绝缘劣化初期便提出相应的检修策略,得到了业内广泛的认可。然而,由于电缆呈现容性较大的无功功率需求导致现场较少采用工频电压进行电缆局部放电测试,因此业内研究人员提出了调频式串联谐振(ACRF)、超低频(VLF)和振荡波(DAC)等现场测试技术^[6-11]。随着这些技术在国内外的推广和使用,它们的一些不足之处也逐渐开始显现。

ACRF 技术通常用于电缆耐压试验而较少用于局部放电测试,主要是由于其调频电源会在测试过程中产生数量较多、幅值较大的开关噪声,影响局部放电信号的检测与识别。VLF 技术是目前在国内开展较多的推广应用技术^[12],但该技术在工频等效性方面的讨论从未停止过。Hartshorn 和 Su 认为 VLF 电压对电缆绝缘具有破坏性,在施加 VLF 电压过程中可能在绝缘中诱发新的缺陷^[13-14]。此外,0.1~1 Hz 的 VLF 电压由于电压变化速率较慢,不容易激发绝缘中的缺陷产生局部放电^[15]。较多的现场案例已经表明 DAC 技术在电缆局部放电现场测试领域具有较好的有效性和便捷性^[16-19]。该技术通过高压直流电源对电缆充电,控制高压固态开关的闭合,使得电缆上的电荷经由空心电抗器与固态开关的回路释放,在电缆上形成阻尼振荡波电压激发电缆缺陷产生局部放电。由于单个绝缘栅双极性晶闸管(IGBT)或光控晶闸管(LTT)的额定电压有限^[20-21],振荡波系统中采用的高压固态开关往往由大量的 IGBT 或 LTT 级联而成,因而导致其成本较高^[22]。另一方面,慢速的直流充电阶段引起的空间电荷累积对电缆绝缘的负面影响也同样需要考虑^[23-24]。综上所述,针对目前电缆局部放电现场测试技术仍存在多种缺陷,寻找一种低噪声、经济且无损的电缆局部放电测试技术具有重要意义。

本文提出一种由电容器组储能供电的交流激励型振荡波技术,不仅可以实现经济、便捷、低噪声且高效的电缆局部放电现场测试,还不会对电网造成大电流脉冲冲击。在当前电力电缆运行安全性受到越来越多重视的背景下,本文提出的技术具有较高

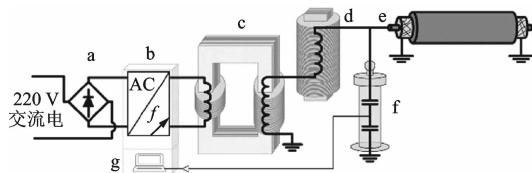
的工程应用价值。

1 储能式交流激励型振荡波技术

本文提出的交流激励型振荡波技术拓扑结构主要包含调频式串联谐振装置、两个高速双向固态开关以及一个电容器组。

1.1 调频式串联谐振技术

调频式串联谐振系统如图 1 所示,通常由整流器、调频电源、励磁变压器、电抗器、被测电缆、分压器以及控制和采集模块组成。



a—整流器;b—调频电源;c—励磁变压器;d—电抗器;
e—被测电缆;f—分压器;g—控制和采集模块。

图 1 调频式串联谐振技术电路示意图

当调频电源输出频率调节至高压回路的自然频率时,高压回路发生谐振,谐振频率可以表示为

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

式中: L 为电抗器电感; C_x 为被测电缆等效电容。

通常情况下,该谐振频率在 20~300 Hz 之间变化。根据谐振回路的品质因数的不同,电缆上产生的谐振电压可以达到数十倍变压器输出电压。

1.2 储能式交流激励型振荡波技术原理

本文提出的电容器组储能供电的交流激励型振荡波系统结构示意图如图 2 所示。在典型的调频式串联谐振系统中引入两个双向高速固态开关 K_1 和 K_2 ,同时,在调频电源前端加入电容器组 C_b 以及限流电阻 R_p 。

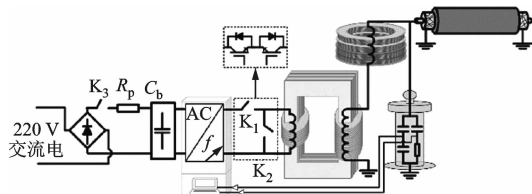


图 2 电容器组储能供电的交流型振荡波系统

与电缆现场耐压试验不同,振荡波测试不需要持续对电缆加压,在每两次振荡波加压过程中都存在时间不等的测试间隔,如图 3 所示。

在测试间隔中,电容器组可以通过电源(市电或

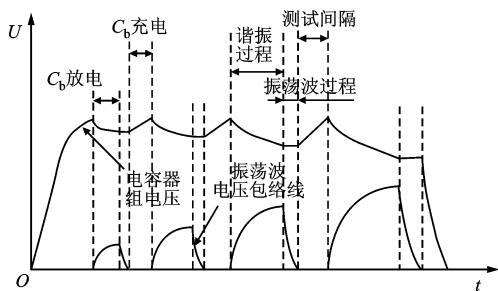


图3 振荡波测试波形示意图

小功率发电机)充电。测试过程描述如下。

1.2.1 充电过程 在电缆从电网中解套的准备过程中便可以闭合开关 K_3 , 通过电源经由整流器、 K_3 以及保护电阻对电容器组进行充电, 当 C_b 电压达到预设值之后便断开 K_3 。

1.2.2 确定谐振频率 K_1 和 K_2 的初始状态分别为闭合和断开, 启动系统后, 调节调频电源的输出频率为 50 Hz、峰值为 30 V, 此时被测电缆、电抗器和变压器所组成的高压电路并没有进入谐振状态, 而处于串联分压状态。持续输出 10 个周期后闭合 K_2 并关断 K_1 和调频电源的输出, 由于电抗器中的电流以及电缆上的电压并不会立即降为零, 此时由被测电缆、电抗器和一次侧短路的变压器所组成的高压电路处于欠阻尼振荡状态, 电缆电压波形示意图如图 4 所示。

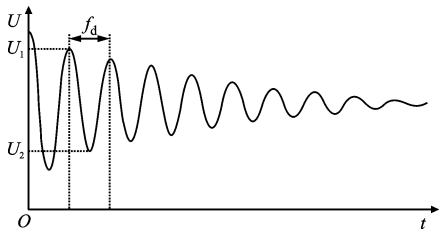


图4 容性负载电压波形示意图

由电缆电压波形可以测量得到谐振电路的阻尼振荡频率 f_d , 以及波峰和波谷的幅值 U_1 、 U_2 , 由此可以计算振荡电路阻尼系数

$$\lambda \approx -2f_d \ln(U_2/U_1) \quad (2)$$

利用阻尼振荡频率 f_d 和阻尼系数 λ 可以计算得到谐振电路的自然振荡频率 f , 计算公式如下

$$f = f_d / \sqrt{1 - \lambda^2} \quad (3)$$

1.2.3 串联谐振过程 K_1 和 K_2 的初始状态分别为闭合和断开, 在此情况下, 图 2 所示的拓扑结构可以视作典型的串联谐振拓扑, 启动系统后, 调节调频电源的输出频率使得其满足式(3), 当高压回路处于谐振状态后, 电缆上便形成了同频率的正弦电压, 逐步提升调频电源输出电压等级。

1.2.4 振荡波过程 当电缆上电压达到预设电压后, 在电缆上正弦电压峰值时刻关断 K_1 并闭合 K_2 , 关停调频电源, 电缆上的电荷便通过谐振电抗器和励磁变压器二次侧的回路释放, 由于电抗器和变压器绕组的电阻损耗, 电缆上的电压便呈现阻尼振荡波的形式。

1.2.5 振荡波测试间隔 每一次振荡波测试结束后, 闭合 K_3 给电容器组充电, 便于其为下一次振荡波测试供电。

在振荡波过程中, 由于调频电源关停且 K_1 断开, 在此过程中的局部放电测量不会受到开关噪声的干扰。此外, K_2 闭合将变压器一次侧短接减小了回路铁芯损耗。

振荡波测试间隔时间主要取决于数据传输的速度以及操作人员的主观选择, 也即是说, 仅需保证电容器组的充电时间不超出一般的测试间隔时间, 便可使得由电容器储能供电的交流激励型振荡波系统总测试时间与市电供电的情况相同。

2 系统参数设计与性能评估

2.1 谐振回路设计

以常用的 10 kV 配电电缆为例, 按照最大测试长度 2 km(等效电容为 $1 \mu\text{F}$) 进行设计。负载与谐振频率的关系可以表示为

$$C_{\max}/C_{\min} = (f_{\max}/f_{\min})^2 \quad (4)$$

因而, 谐振电抗器电感值取决于最大的负载 $C_{\max}$, 而最大电容负载能够决定最小谐振频率, 最小负载取决于标准允许的最大谐振频率。为了现场测试的便捷性, 本文设计采用 1 H 的空心电抗器, 进而可以推算出最低谐振频率 $f_{\min}$ 为 159.2 Hz, 最小负载为 $0.28 \mu\text{F}$ 。现场采用一个 $0.2 \mu\text{F}$ 的补偿电容进行测试, 可以使得最小测试负载电容值为 $0.08 \mu\text{F}$ 。根据 DL/T 1576—2016 规定, 电缆上最大测试电压为 $2U^*$ (U^* 为电缆额定电压), 谐振回路最大电流 I_r 可以通过下式进行计算

$$I_r = 2U^* \sqrt{\frac{C_x}{L}} = 24.6 \text{ A} \quad (5)$$

根据电抗器线圈绕组得到其直流电阻约为 28 Ω , 计算出谐振回路的品质因数 $Q=35.7$ 。为了降低励磁变压器一次绕组的电流, 励磁变压器选取较小的变比, 本文采用 1:5。由于振荡波单次工作时间一般小于 2 s, 远小于两次测试的间隔时间, 因此交流激励型振荡波系统无需按照串联谐振系统一样考虑设备的热容量问题, 本文采用 5 kV · A 的励磁

变压器以及 $3\text{ kV}\cdot\text{A}$ 的谐振电抗器,大大减小了整体系统的体积和质量。

2.2 调频电源设计

调频电源是调频式串联谐振系统的关键组成部分,是实现输出频率可控调节的重要技术,其原理图如图 5 所示。综合考虑开关损耗以及高次谐波含量等因素,本文系统采用 SPWM 单极倍频调制方式,其原理如图 6 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_f 进行波形比较,得到 4 路独立的逆变开关控制信号 $U_{Q_{i1}}\sim U_{Q_{i4}}$,同一桥臂的一对控制信号互补导通,不同桥臂所对应控制信号相隔为调制波周期的一半,经滤波后输出即为频率与调制波频率相等的正弦波。

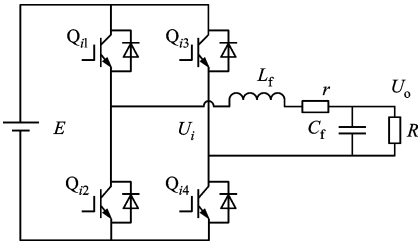


图 5 调频电源示意图

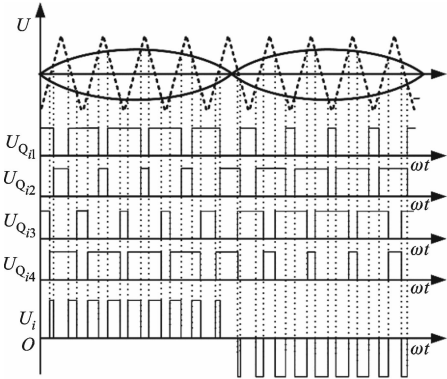


图 6 SPWM 单极倍频调制原理图

滤波器的转折频率在工程上可以取开关频率的 $1/10$,本系统根据传统商用串联谐振系统中常用的开关频率 $f_s=10\text{ kHz}$ 进行设计,因此滤波电路的截止频率可以表示为

$$f_n = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_f C_f}} = 1\text{ kHz} \tag{6}$$

在一个开关周期内,逆变桥输出电压脉冲的总计脉宽时间 W 为

$$W = \frac{U_r}{U_f} T_s \tag{7}$$

式中: T_s 为开关周期时间。

假设滤波器对逆变输出基波无影响,在一个开

关周期内滤波器的电感脉冲电流 ΔI 为

$$\Delta I = \frac{E - U_o}{L_f} W = \frac{E T_s}{L_f} \frac{U_r}{U_f} \left(1 - \frac{U_r}{U_f}\right) \tag{8}$$

计算可以得到输出最大脉冲电流为

$$\Delta I_{\max} = \frac{E T_s}{4 L_f} \tag{9}$$

工程上脉动系数不超过 $15\%^{[25]}$,本系统将电流脉动系数选定为 5% ,而设计的逆变电路前级直流输出为 311 V ,由此可以得到选取的滤波电路电感、电容参数分别为 $L_f=1.7\text{ mH}$, $C_f=15\text{ }\mu\text{F}$ 。

2.3 双向高速固态开关设计

双向高速固态开关是实现串联谐振状态与振荡波状态转换的关键元件,本文系统将两个 IGBT 以共发射极的形式连接实现双向高速开断功能。在考虑杂散电容的情况下,双向高速固态开关的模型如图 7 所示。图中, C_{ce} 、 C_{ge} 和 C_{gc} 分别为集电极-发射极、门极-发射极以及门极-集电极之间的杂散电容,仿真中所用的杂散参数如表 1 所示。

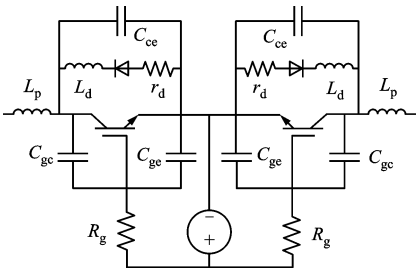


图 7 双向高速固态开关模型

表 1 双向高速固态开关仿真参数

参数	数值
R_g/Ω	10.0
r_d/Ω	0.0
L_p/nH	10.0
L_d/nH	5.0
C_{ge}/nF	5.5
C_{gc}/nF	1.0
C_{ce}/nF	0.8

在 Saber 软件中建立如图 2 所示的模型,其中双向高速开关模型采用图 7 所示的拓扑结构,各 IGBT 的集电极-发射极电压 V_{ce} 、集电极电流 I_c 如图 8 所示,其中 Q_{11} 、 Q_{12} 和 Q_{21} 和 Q_{22} 分别表示开关 K_1 和 K_2 从左至右的 IGBT。

由图 8 所示的仿真结果可见, Q_{11} 和 Q_{12} 上的 V_{ce} 在串联谐振过程中都相对较低,而 Q_{21} 和 Q_{22} 上的 V_{ce} 在串联谐振过程中电压接近电容器组的电压。

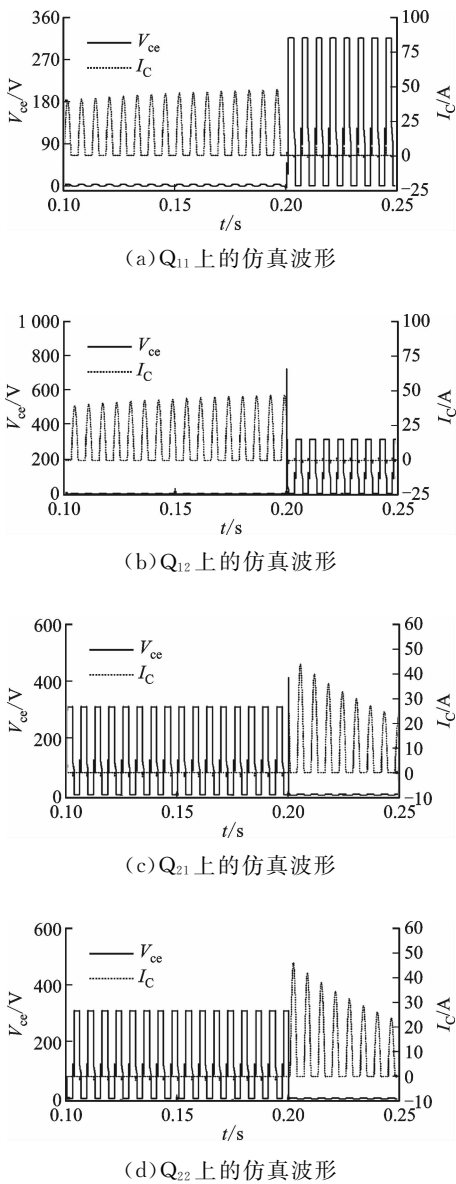


图 8 双向高速固态开关中各 IGBT 上的仿真波形

采用单相全桥整流后,电容器组的电压约为 311 V。在振荡波过程中, Q_{21} 和 Q_{22} 为导通状态,只承受导通压降。然而,在开关状态转换瞬间,各 IGBT 的最大承受电压可达 700 V,最大的瞬态电流接近 123 A。在考虑安全裕量的情况下,可以选择额定电压为 1 kV,额定电流为 150 A 的 IGBT。从 IGBT 的用量和其电压等级来看,本文提出的交流激励型振荡波技术相较于传统的直流充电式振荡波技术,具有极高的经济性优势。

2.4 电容器组设计

电容器组 C_b 的容值与系统的带载能力直接相关,在 $1\ \mu\text{F}$ 负载下针对不同的并联电容个数 n_c 展开仿真计算,调频电源持续以最大占空比状态工作,电容器组 C_b 电压变化如图 9a 所示,不同 C_b 容值下

的谐振电压包络线如图 9b 所示。

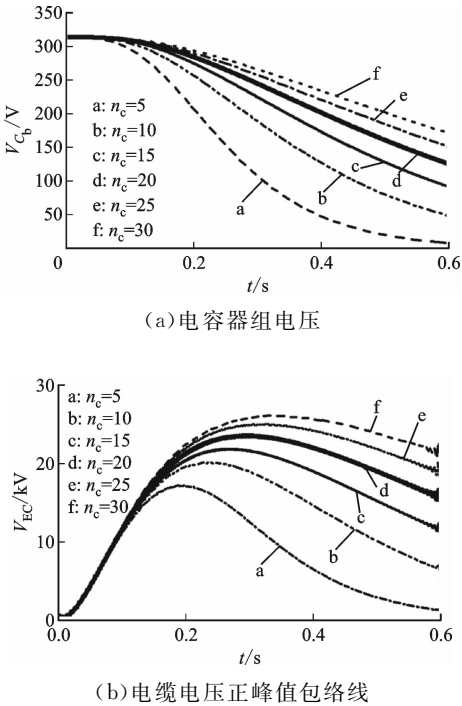


图 9 不同并联电容数 n_c 情况下的仿真结果

由图 9a 可知, C_b 的电压随着 C_b 的容值增加而降低得更加缓慢。根据仿真结果并考虑安全裕度,选用 28 只 $4\ 700\ \mu\text{F}$ 的电容器便可以满足单次振荡波测试要求。通过该参数的电容器组供电,考虑 K_1 和 K_2 的动作产生振荡波电压,得到仿真的振荡波电压如图 10a 所示,相应的电容器组电压和电流如图 10b 所示。

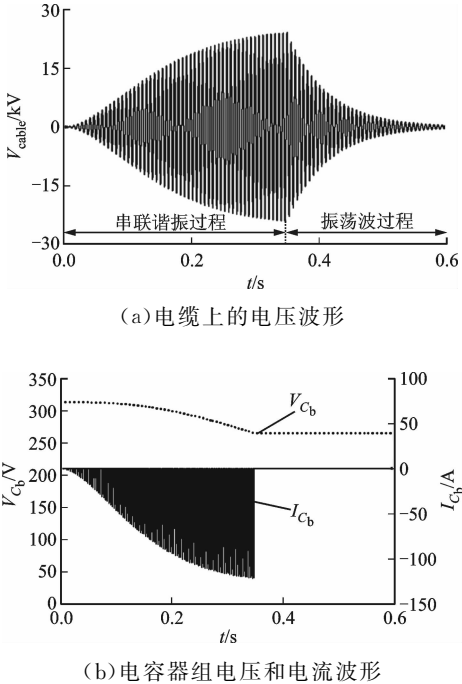


图 10 $2U^*$ 电缆电压、电容器组电压和电流仿真波形

3 系统实现及其验证

3.1 系统实现

电容器组中的电容器基本单元容值需要足够大并且能够承受 120 A 以上的瞬时电流,因而电解电容器是较好的选择,本文选用 28 个额定电压 450 V、额定容值为 4 700 μF 的电解电容器组成电容器组,选用阻值为 10 Ω 限流电阻 R_p 限制电容器组充电电流;调频电源由额定参数为 600 V/150 A 的两个 2MBI150VA-060-50 模块组成; K_1 和 K_2 都由两个额定参数为 1.2 kV/200 A 的 IGBT 单片 IXGK 120N120B3 组成;励磁变压器和无局放空芯电抗器都按照前文所述仿真参数实现。

3.2 实验测试

3.2.1 电容器作为实验负载 首先将系统连接 1 μF 的电容器进行升压测试。当测试电压达到 $2U^*$ 时,电容器组的电压和电流波形如图 11 所示。电容器组的电压从 311 V 降低至 263 V,电容器组的最大电流约为 126 A。电容器组实测输出电流波形存在较多毛刺,这是由于调频电源在工作时会产生大量高幅值脉冲干扰,而用于测量电流的霍尔传感器对脉冲干扰极为敏感,导致实测波形与图 10b 所示的仿真波形存在一定的差异。

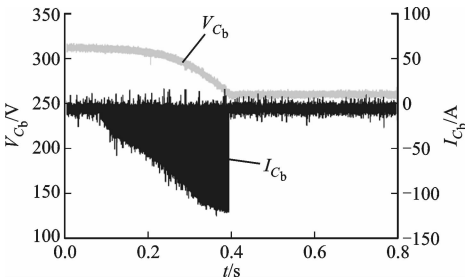


图 11 电容器组电压与电流测试波形

相应的负载电容器上的电压波形如图 12 所示,在振荡波阶段系统局部放电噪声低于 10 mV,验证了本系统的加压有效性。

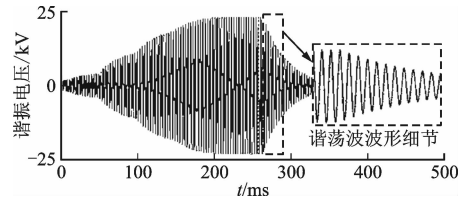


图 12 负载电容器上电压与局部放电通道测量波形

3.2.2 电缆作为实验负载 如图 13 所示,对由 4 段 100 m 长的单芯 XLPE 电缆组成的试品进行实验,在第 2 段电缆与第 3 段电缆连接处人为制造一

个放电缺陷。测量计算可得回路自然振荡频率为 382.6 Hz。当电缆上电压达到 $1.3U^*$ 时,检测到的局部放电信号以及测试波形如图 14 所示,此时的电容器组电压从 311 V 降低至 306 V。



图 13 电缆负载测试实物图

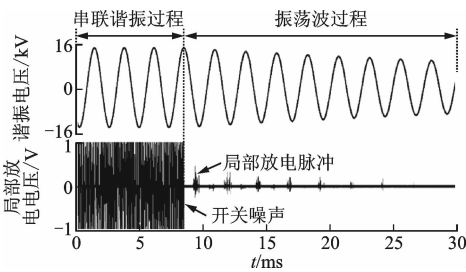


图 14 $1.3U^*$ 电压下测试波形

在振荡波过程下局部放电检测信号并未受到开关噪声的干扰,直接可以提取脉冲并进行时域反射算法分析,定位局部放电信号位置,其结果如图 15 所示,定位结果与电缆缺陷实际设置位置符合。

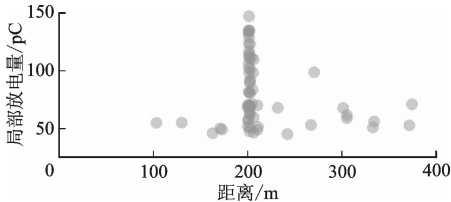


图 15 局部放电定位结果

4 结 论

本文从理论分析和实际测试两方面阐述了基于调频式串联谐振的振荡波测试技术。通过在典型的调频式串联谐振系统中添加两个双向高速固态开关并控制其通断状态,便可以经济、高效地在电缆上产生阻尼振荡波电压。为了减小振荡波测试系统对电源侧造成的瞬时大电流扰动,本文还提出了采用由电解电容器组成的电容器组对交流激励型振荡波系统供电的技术。在开展每次振荡波测试时由电容器组对交流激励型振荡波系统进行供电,而在每次振

荡波测试间隔则由电源侧对电容器组进行充电。

本文以 10 kV 配电电缆系统为例,通过 Saber 软件对设计的电容器组储能供电的交流激励型振荡波系统进行仿真分析,验证设计参数的可行性。分别在负载电容器以及 10 kV 电缆上开展实验,验证了本文设计研发的电容器组供电的交流激励型振荡波系统在电缆局部放电现场测试的有效性。

虽然本文仅针对 10 kV 电缆电容器组供电的交流激励型振荡波系统展开了详细说明,但本文提出的技术适用于各电压等级的电缆,仅需对不同电压等级、不同测试容量进行参数调整即可,均可以实现更为经济、便捷及高效的电缆局部放电现场测试。

参考文献:

- [1] CHEN H C. Fractal features-based pattern recognition of partial discharge in XLPE power cables using extension method [J]. IET Generation Transmission and Distribution, 2012, 6(11): 1096-1103.
- [2] GRANADO J, ÁLVAREZ-ARROYO C, TORRALBA A, et al. Time domain analysis of partial discharges envelope in medium voltage XLPE cables [J]. Electronic Power System Research, 2015, 125: 220-227.
- [3] REGT D J J, HOOGENDORP G, WAGENAARS P P, et al. Cross-bonding cable and box model based on pulse reflection measurement [J]. IET Science Measurement and Technology, 2015, 9(3): 268-275.
- [4] 郭卫, 周松霖, 王立, 等. 电力电缆状态在线监测系统的设计及应用 [J]. 高电压技术, 2019, 45(11): 3459-3466.
GUO Wei, ZHOU Songlin, WANG Li, et al. Design and application of online monitoring system for electrical cable states [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(11): 3459-3466.
- [5] 刘英, 曹晓珑. 直流电压下交联聚乙烯电缆绝缘中电树枝的生长特性研究 [J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(4): 41-46.
LIU Ying, CAO Xiaolong. Growth characteristics of electrical trees in XLPE cable insulation under DC voltage [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(4): 41-46.
- [6] VAHLSTROM W. Strategies for field testing medium voltage cables [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2009, 25(5): 7-17.
- [7] 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.
- [8] HAUSCHILD W. Critical review of voltages applied for quality-acceptance and diagnostic field tests on high-voltage and extra-high-voltage cable systems [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2013, 29(2): 16-25.
- [9] SIIRTO O, VEPSLINEN J, HMLINEN A, et al. Improving reliability by focusing on the quality and condition of medium-voltage cables and cable accessories [C]//24th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution. London, UK: IET, 2017: 229-232.
- [10] XIE Cheng, WANG Yuli, SHAO Xianjun, et al. The application research of very low frequency diagnostic methods in acceptance tests on new cable systems of medium voltage [C]//2018 China International Conference on Electricity Distribution. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, 2018: 47-53.
- [11] GULSKI E, CICHECKI P, WESTER F, et al. On-site testing and PD diagnosis of high voltage power cables [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(6): 1691-1700.
- [12] HOU Zhe, LI Hongjie, CHEN Shuo, et al. Development of a novel 20 kV 0.1 Hz very low frequency cosine-rectangular voltage generator for multi-functional insulation testing of MV power cables [J]. IET Generation Transmission and Distribution, 2018, 12(1): 1-8.
- [13] HARTSHORN G, LANZ B, BROUSSARD B. Medium voltage cable predictive diagnostics technique [C]//2007 IEEE Petroleum and Chemical Industry Technical Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 4365791.
- [14] SU C Q, LI C R. Using very-low-frequency and oscillating-wave tests to improve the reliability of distribution cables [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2013, 29(1): 38-45.
- [15] GULSKI E, HAMERLING B R, WESTER F J, et al. Insulation condition assessment of medium voltage power cables using on-site PD detection and analysis techniques [C]//16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution. London, UK: IET, 2001: 2001436702496.
- [16] JIANG J, MA G M, LUO D P, et al. A 65-kV insulated gate bipolar transistor switch applied in damped AC voltages partial discharge detection system [J]. Review of Scientific Instruments, 2014, 85(2): 024706.
- [17] BACH R, SULK S, WALTER C. Suitable voltage

- levels for on-site tests of MV and HV-cables with damped AC to detect service endangering defects [C] // Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Dielectrics, Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2016: 489-492.
- [18] HE Weisheng, WANG Qinghua, HUANG Chenxi, et al. A cost-effective technique for PD testing of MV cables under combined AC and damped AC voltage [J]. IEEE Transactions on Power Deliver, 2018, 33(4): 2039-2040.
- [19] SCHIKARSKI P, GAMLIN M, RICKMANN J, et al. Two years of experience with a mobile resonant test system for testing of installed medium and high voltage power cables [C] // Proceedings of the 1999 11th International Symposium on High Voltage Engineering. Stevenage, UK: IEE, 1999: 236-239.
- [20] JIANG Jun, LUO Dingping, YU Miao, et al. Optical fiber-triggered solid-state switch applied in power cables damped AC voltages test system [J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2018, 13(4): 580-586.
- [21] WILD M, TENBOHLEN S, GULSKI E, et al. Basic aspects of partial discharge on-site testing of long length transmission power cables [J]. IEEE Transac-
- tions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(2): 1077-1087.
- [22] 辛征, 王秀和, 孙树敏, 等. 一种用于高压电力电子开关的新型多路输出隔离供电系统 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(12): 99-105.
- XIN Zheng, WANG Xiuhe, SUN Shumin, et al. A novel multi-output isolation power supply system for high voltage power electronic switch [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(12): 99-105.
- [23] SCHIERIG S, STEINER T, JOCHIM M. HV AC generation based on resonant circuits with variable frequency for testing of electrical power equipment on site [C] // Proceedings of 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, 2008: 684-691.
- [24] WANG Wei, JIANG Da, DONG Wenyan, et al. The effect of charge rate on space charge accumulation in damped alternating current (DAC) testing for power cable [C] // 2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2018: 8642249.
- [25] 贺彪. 基于 DSP 控制的单相逆变电源的研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2014: 37-39.
- (编辑 刘杨)
-
- (上接第 99 页)
- [11] TAKENO M, CHIBA A, HOSHI N, et al. Test results and torque improvement of the 50-kW switched reluctance motor designed for hybrid electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(4): 1327-1334.
- [12] DESAI P C, KRISHNAMURTHY M, SCHOFIELD N, et al. Novel switched reluctance machine configuration with higher number of rotor poles than stator poles: concept to implementation [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 57(2): 649-659.
- [13] DING Shuye, LIU Haoran, CHU Jilun, et al. Performance analysis of a switched reluctance motor based on the APC control [J]. Electric Machines and Control, 2012 16(2): 39-43.
- [14] LEI Yu, WANG Jun, GOU Bin, et al. An improved method of angle position control for switched reluctance motor [J]. Power Electronics, 2018, 52(2): 21-24.
- [15] 赵天一. 开关磁阻电机转矩脉动抑制与平滑转速范围提升研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019: 11-12.
- [16] 陈灵. 基于开通、关断角度优化的开关磁阻电机控制策略研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2010: 14-15.
- [17] CAI Xiwen, QIU Haobo, GAO Liang, et al. A multi-point sampling method based on kriging for global optimization. [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2017, 56(1): 71-88.
- [18] LI Shuai, WANG Yiping, WANG Tao, et al. Optimization of heat exchangers with dimpled surfaces to improve the performance in thermoelectric generators using a kriging model [J]. Journal of Electronic Materials, 2017, 46(5): 3062-3070.
- [19] 余锐, 周代伟, 竺晓程, 等. 基于自适应 Kriging 代理模型的叶型气动优化设计 [J]. 动力工程学报, 2014, 34(2): 103-107.
- YU Rui, ZHOU Daiwei, ZHU Xiaochen, et al. Aerodynamic optimization design of airfoils based on adaptive kriging surrogate model [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2014, 34(2): 103-107.
- [20] 夏斌. 基于 Kriging 模型的开关磁阻电机优化设计 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2012: 9-13.
- (编辑 刘杨)