

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.01.035

基于三相幅值相位关系分析的交叉互联电缆局部放电宽频检测和分析

刘孟佳¹, 余岩竹², 于义亮¹, 谭敏戈¹, 李建红¹, 邢北平¹, 秦 博¹

(1. 国网陕西省电力公司检修公司, 西安 710075; 2. 西北电力设计院, 西安 710075)

摘要: 电力电缆是电力系统中重要的输电设备之一。为减小屏蔽层损耗和降低电缆末端的电压升高,长距离三相输电电缆通常采用交叉互联接地方式。所以,现场检测交叉互联电缆的局部放电时,即会受到外界电磁干扰信号的影响,又会受到三相电缆之间的串扰信号的影响,导致检测结果难以分析判断。为提高现场交叉电缆系统局部放电的有效检测和准确分析,文中采用宽频带检测传感器现场检测了交叉互联电缆局部放电信号,基于放电脉冲波形图、放电PRPD谱图和3PARD谱图,通过分离分类的方法对现场检测结果进行了识别分析。研究表明,利用宽频带传感器可获得更多的局部放电信息,有效抑制外界干扰信号;三相幅值相位分析法可有效区分不同相的局部放电信号,排除三相放电信号串扰的影响,从而实现对放电源的识别。

关键词: 电力电缆; 交叉互联; 宽频检测; 三相幅值相位关系分析; 局部放电

Broadband Detection and Analysis of Partial Discharge in Cross-connected Cables Based on Three-phase Amplitude-phase Relation Analysis

LIU Mengjia¹, YU Yanzhu², YU Yiliang¹, TAN Mingge¹, LI Jianhong¹, XING Beiping¹, QIN Bo¹

(1. State Grid Shaanxi Maintenance Company, Xi'an 710075, China;

2. Northwest Electric Power Design Institute, Xi'an 710075, China)

Abstract: The power cable is one of the most important transmission equipments. The long cable common use the cross bonded grounding method to reduce the loss of shielding layer and decrease the voltage rise at the end of cable. Therefore, it is difficult to diagnosis the PD detection results of cross bonded cable in field because the PD signals will be influence both the environment electromagnet interference and the interference among different phases. The broadband sensor is used to detect the PD of cross bonded cable in field in this paper. The waveforms of the PD pulse, PRPD and 3PARD diagrams are analyzed to diagnose the results. The results have shown that the broadband sensor can anti the environment electromagnet interference because it can obtain more information of PD signal. The 3PARD diagrams can division the interference among different phases.

Key words: power cable; cross-bonded; broadband detection; 3PARD; partial discharge

0 引言

近年来,随着电力系统的发展,XLPE电缆广泛应用于输电线路和城市配电网。当电缆线路较长(大于1 km)时,三相输电电缆会采用交叉互联接地

方式^[1-3]。该方法是将电缆线路分成若干大段,每大段分成长度相等的3小段,每小段之间装设绝缘接头,每套绝缘接头的绝缘隔板两侧将不同相的金属护套用同轴交叉互联线采用交叉跨越法进行换位连接即交叉互联,见图1。

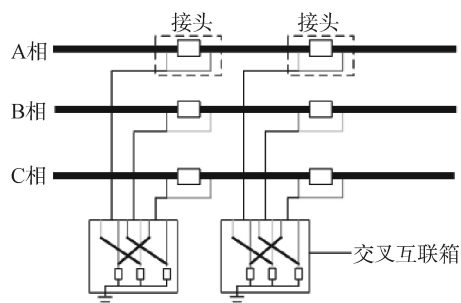


图1 交叉互联接地方式示意图

Fig. 1 The diagram of cross-bondedgrounded

高压XLPE电缆在制造和运行过程中不可避免地出现一些绝缘缺陷,由于缺陷处的电场集中,导致局部放电的发生。长期的放电过程会导致电缆的劣化和老化,最终导致电缆绝缘失效,引起停电事故^[4-8]。通过对电缆局部放电信号的检测,可以有效预防绝缘故障的发生。

当交叉互联电缆系统中某一相电缆的主绝缘中发生局部放电时,局部放电信号会通过该相电缆的导体层传播至下一层并继续传播,三相之间放电信号相互干扰。所以,现场检测交叉互联电缆局部放电时,一方面会受到外界电磁信号的干扰,另一方面三相信号之间相互干扰,这就增加了对检测结果的判断和分析的难度。

目前,国内外学者通过实验室试验以及仿真研究,对交叉互联电缆中局部放电信号的传播规律研究较多^[9-12]。现场主要利用电流线圈检测电缆的局部放电信号,但是,传统的测量范围主要集中在1 MHz以下,检测频带较窄,获得放电信息较小,易于受到外界信号的干扰。通过多通道联合检测可以实现多放电源脉冲分离^[13-15],三相幅值相位关联谱图(3PARD)目前已经广泛应用于变压器中。

针对现场交叉互联电缆局部放电信号检测的难点,文中通过宽频传感器在现场对交叉互联电缆的局部放电进行了测量,并通过对放电脉冲波形图、放电PRPD谱图和3PARD谱图对检测结果进行了识别分析。文中的研究结果有利于现场交叉互联电缆局部放电信号的检测。

1 三相幅值相位关系分析法

如图1所示,当交叉互联电缆系统中某相出现局部放电脉冲信号时,将会在三相中同时检测到局部放电信号,见图2。为确保三相局部放电信号的关联性,通常认为在1~2 μs时间范围内采集到的信号为同时段局部放电信号。确定了三相对应的局部放电信号后,再将测量的3个脉冲幅值映射成3个

模值为原幅值、相位分别为0°、120°、240°的脉冲向量,见式(1)~(3):

$$q_A = |q_A| \angle 0^\circ \quad (1)$$

$$q_B = |q_B| \angle 120^\circ \quad (2)$$

$$q_C = |q_C| \angle 240^\circ \quad (3)$$

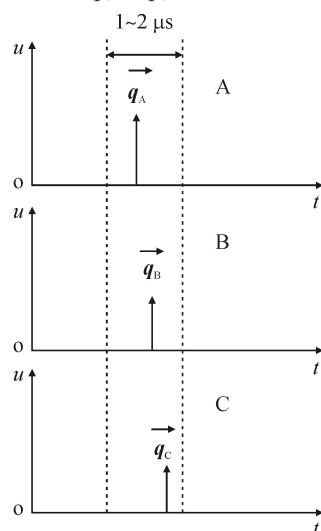


图2 三相同时段放电脉冲信号

Fig. 2 The discharge pulse of three phases

最后,将3个向量矢量相加可得到一个局部放电脉冲向量,见式(4),即3PARD图中的一个局部放电点,计算过程见图3。

$$q = q_A + q_B + q_C \quad (4)$$

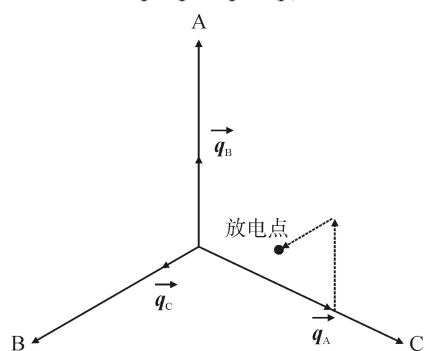


图3 3PARD构成原理图

Fig. 3 The composing principle of 3PARD

利用3PARD技术可以很好地区分出局部放电信号与干扰信号。当A相发生局部放电时,其上检测到的局部放电幅值必然最大,与另外两相局部放电信号矢量叠加后,局部放电点会落在A相坐标轴上。即若A相与另外两相幅值差别较大,且叠加后的矢量离坐标原点较远时,则表明实际发生的局部放电位置为A相,其他两相检测到的信号为A相局部放电的串扰结果。当三相脉冲幅值相同,并且经矢量叠加后的局部放电点位于坐标原点时,则表明此时检测到的局部放电信号实际为外界干扰信号。在实际利用3PARD技术操作时,矢量叠加后的

脉冲点并非严格位于坐标轴与坐标原点上。这是因为实际局部放电信号受传播路径的衰减和干扰的叠加影响,从而导致其发生畸变。这就会使矢量叠加后的局部放电信号为一脉冲簇,其中真实局部放电信号的脉冲簇在某相坐标轴周围,而干扰信号的脉冲簇则位于坐标原点附近。

2 现场交叉互联电缆局部放电检测

2.1 现场检测试验接线

利用高频电流线圈对某 110 kV 交叉互联电缆局部放电信号进行检测,接线示意图见图 4。

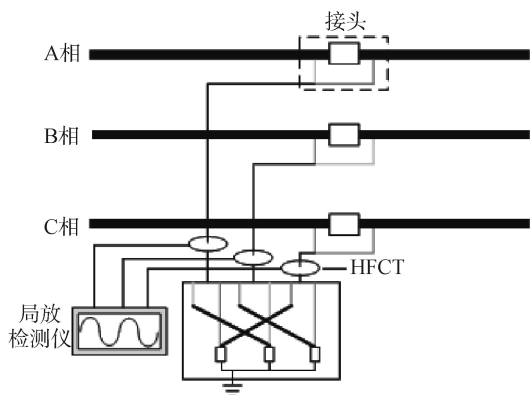


图4 交叉互联电缆局部放电测量示意图

Fig. 4 The detection diagram of cross-bonded cable

通过 3 个完全相同的高频电流线圈(HFCT)分别从三相交叉互联接地线上测量局部放电信号, HFCT 可测量 100 kHz~20 MHz 的电流信号,检测灵敏度为 2.5 V/A。为抑制局放检测通道中的工频位移电流信号的干扰,现场检测时,采用了截止频率为 50 kHz 的高通滤波器。同时,利用低频线圈在接地线上获取电压信号,从而获得相位信息。现场接线见图 5。

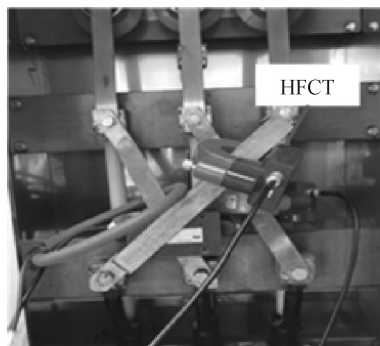


图5 现场检测接线图

Fig. 5 The picture of filed detection

检测系统采用了宽频检测传感器,相较于传统的传感器,现场检测时可以获得更宽频率分布的信号。通过检测信号的频率特性可以将信号进行分

离,该检测系统可检测 2、6、10、12 MHz 等不同最高频率的放电信号。

2.2 低频检测结果

现场检测得到的 2 MHz 放电谱图见图 6,从图 6 可以看出,背景干扰信号大,大于 10 pC,检测得到的信号被淹没,难以获取放电谱图的特性。

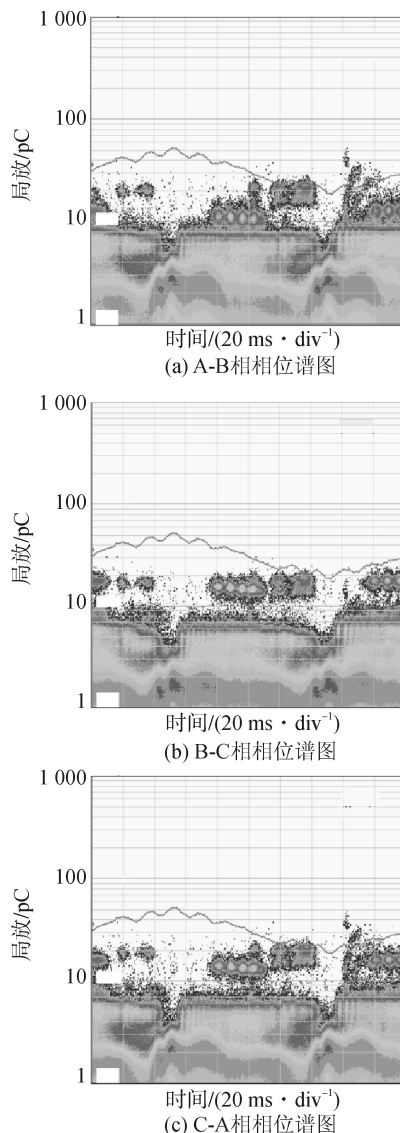


图6 2 MHz 相位谱图

Fig. 6 The PRPD pattern of 2 MHz

从图 6 可以看出,在 A、B、C 三相中均检测到异常信号,但由于外界信号的干扰以及交叉互联导致的串扰,难以确定放电信号的特性以及放电源所处的电压相。

在 2 MHz 检测频率范围下,测量得到的 3PAR 谱图见图 7。从图 7 中可以看出,3PAR 谱图中存在 3 簇信号,其中信号 2 和信号 3 距离原点较近,说明该信号下 A、B、C 三相信号幅值相差不大,所以该信号应为外部干扰信号。而信号 1 靠近 A、C 相,所以,这簇信号可能是来源于 A、C 相的放电信号,信

号具有悬浮缺陷的特征。

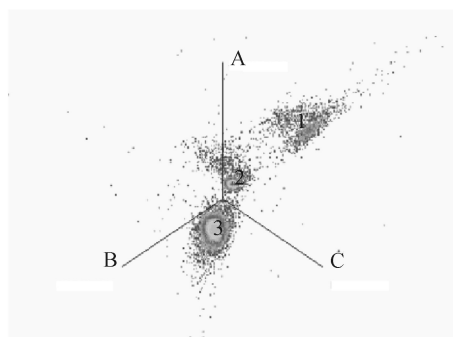


图7 2 MHz下的3PARD谱图

Fig. 7 The 3PARD pattern of 2 MHz

2.3 高频3PARD检测结果

当在6 MHz的频带范围内对信号进行检测时,得到的3PARD谱图见图8。从图8中可以看出,此时只存在两簇信号,其中一簇信号在坐标原点处,同时该信号有所减小,所以,该信号应为干扰信号;另一簇信号位于A、C相之间,距离A相较近,该信号为局部放电信号。

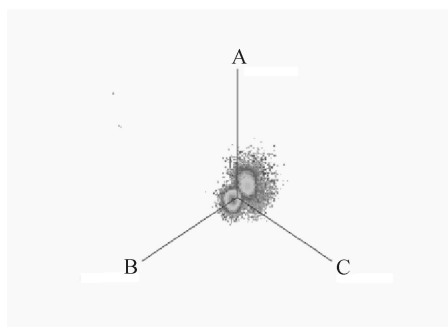


图8 6 MHz下的3PARD谱图

Fig. 8 The 3PARD pattern of 6 MHz

在更高的放电频带对局部放电信号进行检测,10 MHz时检测得到的3PARD谱图见图9。从图9中可以看出,此时只存在一簇信号,该信号距离A相较近,所以,该信号为位于A相的异常放电信号。

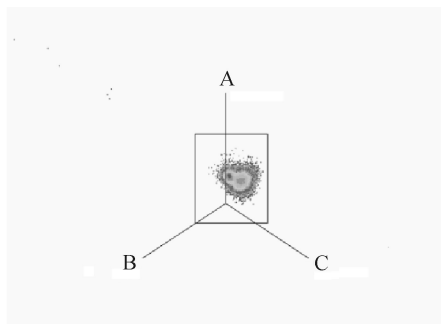


图9 10 MHz下的3PARD谱图

Fig. 9 The 3PARD pattern of 10 MHz

当在更高频带下进行检测时,干扰信号更小。12 MHz下的3PARD谱图见图10,从图10中可以看

出,此时的信号仅有一簇,放电信号明显来源于A相,对应的PRPD谱图见图11。

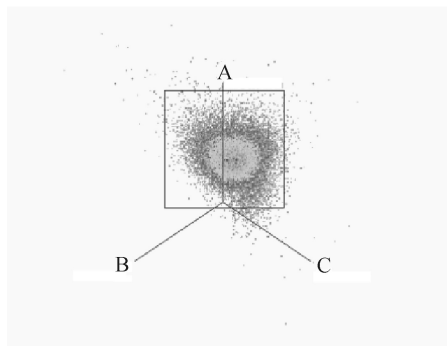
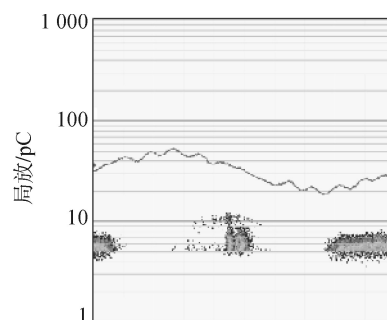


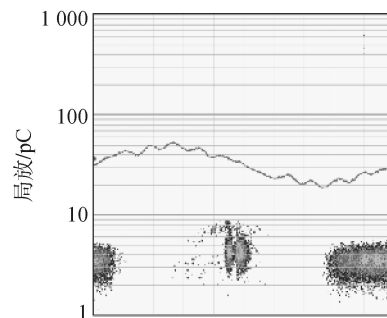
图10 12 MHz下的3PARD谱图

Fig. 10 The 3PARD pattern of 12 MHz



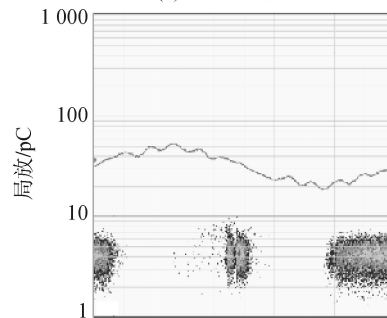
时间/(20 ms · div⁻¹)

(a) A-B相相位谱图



时间/(20 ms · div⁻¹)

(b) B-C相相位谱图



时间/(20 ms · div⁻¹)

(c) C-A相相位谱图

图11 12 MHz相位谱图

Fig. 11 The PRPD pattern of 12 MHz

从图11可以看出,由于高频下干扰信号减小,此时检测得到的信号以放电信号为主,从谱图可以看出,放电缺陷应为悬浮缺陷。

2.4 放电信号时域波形

利用高频线圈检测得到的A相和B相时域波形见图12。从图12中可以看出,在A相和B相检测得到的波形相似,但是A相的放电波形的幅值明显大于B相,说明此时B相检测得到的放电信号是从A相传播过来的信号。

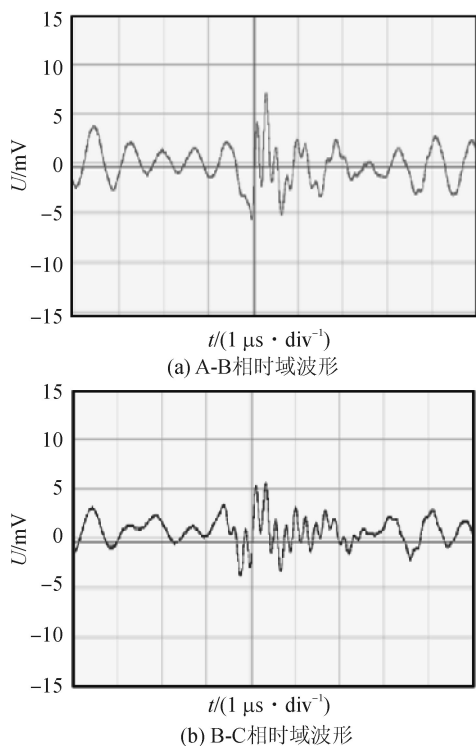


图12 放电脉冲时域波形

Fig. 12 The discharge waveforms in time domain

综上,可以判断,检测得到的放电信号来源于A相,B、C相检测得到的放电信号为A相的串扰信号,放电可能为悬浮缺陷。

3 结论

采用宽频电流线圈对交叉互联电缆系统中的局部放电信号进行了测量,并根据PRPD谱图以及3PARD谱图对检测结果进行了分析判断,主要得到以下结论:

1)采用宽频带的电流线圈可以获得更详细的放电信息,利于去除外部电磁干扰信号对检测结果的影响;

2)3PARD谱图可有效地将放电信号分离,从而排除三相信号之间的串扰影响,利于现场判断放电电源的位置。

采用宽频传感器测量交叉互联电缆中的局部放电信号,并通过3PARD谱图进行分析,可有效去除外部电磁干扰和三相串扰信号的影响。但是现

场环境复杂,检测时还应测量放电脉冲的时域波形,通过比较不同相放电脉冲的波形和幅值来对结果进行判断。综合以上手段可实现现场交叉互联电缆局部放电的准确测量和分析。

参考文献:

- [1] ORTON H. 电力电缆技术综述[J]. 高电压技术, 2015, 41(4):1057-1067.
ORTON H. Power cable technology review[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(4):1057-1067.
- [2] 郭灿新,张丽,钱勇,等. XLPE电力电缆中局部放电检测及定位技术的研究现状[J]. 高压电器, 2009, 45(3): 56-60.
GUO Canxin, ZHANG Li, QIAN Yong, et al. Current status of partial discharge detection and location techniques in XLPE power cable[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(3):56-60.
- [3] 罗俊华,杨黎明,姜芸,等. 电力电缆运行、故障及试验综述[J]. 电力设备, 2004, 5(8):4-8.
LUO Junhua, YANG Liming, JIANG Yun, et al. Outline of operation and fault and testing for power cable[J]. Electrical Equipment, 2004, 5(8):4-8.
- [4] 廖雁群,崔江静,孙廷玺,等. XLPE电力电缆接头局部放电现场检测技术研究[C]//2010年:苏州电力电缆状态检修技术交流会议论文集. 苏州:[s.n.], 2010:48-53.
LIAO Yanqun, CUI Jiangjing, SUN Tingxi, et al. Study on on-site partial discharge detection for XLPE power cable joints[C]//2010 Power Cable Partial Discharge Detection Conference. Suzhou: [s.n.], 2010:48-53.
- [5] 朱晓辉,杜伯学,周凤争,等. 高压交联聚乙烯电缆在线监测及检测技术的研究现状[J]. 绝缘材料, 2009, 42(5): 58-63.
ZHU Xiaohui, DU Boxue, ZHOU Fengzheng, et al. Progress of on-line monitoring and detecting technique for high voltage XLPE cable[J]. Insulating Materials, 2009, 42(5) 58-63.
- [6] 姜芸,周韞捷. 分布式局部放电在线监测技术在上海500 kV交联聚乙烯电力电缆线路中的应用[J]. 高电压技术, 2015, 41(4):1249-1256.
JIANG Yun, ZHOU Yunjie. Application of distributed partial discharge on-line monitoring technology in Shanghai 500 kV XLPE power cable line[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(4):1249-1256.
- [7] PETZOLD F, SCHLAPP H, GULSKI E, et al. Advanced solution for on-site diagnosis of distribution power cables[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(6):1584-1589.
- [8] HE Weisheng, WANG Qinghua, HUANG Chenxi, et al. A novel noise elimination method for PD measurement of on-

(下转第236页)

- High Voltage Engineering, 2007, 33(4): 34-38.
- [12] 丁 辉, 韩民晓, 肖湘宁, 等. VSC-HVDC与平行架设交流线路基频电磁感应边界条件[J]. 电工技术学报, 2010, 25(5): 183-189.
- DING Hui, HAN Minxiao, XIAO Xiangning, et al. Fundamental frequency electromagnetic induction boundary condition analysis of VSC-HVDC system with paralleled AC transmission lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(5): 183-189.
- [13] 周远翔, 刘 睿, 张云霄, 等. 高压/超高压电力电缆关键技术分析及展望[J]. 电工文摘, 2014, 40(6): 1-14.
- ZHOU Yuanxiang, LIU Rui, ZHANG Yunxiao, et al. Key technical analysis and prospect of high voltage and extra-high voltage power cable[J]. Electrician Abstracts, 2014, 40(6): 1-14.
- [14] MARUYAMA S, ISHII N, SHIMADA M, et al. Development of a 500 kV DC XLPE cable system[J]. Furukawa Review, 2003(25): 47-52.
- [15] 刘渝根, 尚龙龙, 田金虎, 等. 220 kV四回高压电缆同相2根并联敷设方式优化研究[J]. 高压电器, 2015, 51(12): 25-32.
- LIU Yugen, SHANG Longlong, TIAN Jinhu, et al. Optimal layout of the 220 kV quadri-circuit cables with double-split conductors in each phase[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(12): 25-32.
- [16] TOMITA M, AKASAKA T, FUKUMOTO Y, et al. Laying method for superconducting feeder cable along railway line[J]. Cryogenics, 2018(89): 125-130.
- [17] WU Chuan, GUO Jun, WU Xiaoming. Calculation method of the pull-back force for cable laying of the trench less completed power pipe-line[J]. Journal of Coastal Research, 2015, 41(4): 681-686.
- [18] 郑雁翎. 电缆线路的电缆群载流量优化数值计算模型研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(11): 3760-3765.
- ZHENG Yanling. Research on numerical calculation model of cable group carrying capacity optimization for cable line[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(11): 3760-3765.
- [19] CHOI Y. ROV-based automated cable-laying system: Application to DONET2 installation[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2018, 43(3): 665-676.
- [20] 曹晓斌, 易志兴, 陈 奎, 等. 高速铁路单芯馈线电缆的敷设方式和敷设间距[J]. 中国铁道科学, 2015, 36(6): 85-90.
- CAO Xiaobin, YI Zhixing, CHEN Kui, et al. Laying mode and laying spacing for single-core feeder cable of high speed railway[J]. China Railway Science, 2015, 36(6): 85-90.

何光华(1978—), 女, 本科, 技师, 长期从事电力电缆施工及检修工作。

(上接第230页)

- site MV cable using frequency-tuned resonant system[C]//2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD). Xi'an, China: [s.n.], 2016: 904-907.
- [9] 王 伟, 王永亮, 刘 冲, 等. 110 kV三相交叉互联电缆的频变模型及局放仿真分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(1): 117-122.
- WANG Wei, WANG Yongliang, LIU Chong, et al. Partial discharge simulation analysis and frequency-dependent model for 110 kV three-phase cross-bonded cable[J]. Proceedings of CSEE, 2011, 31(1): 117-122.
- [10] 姚 翔, 李海生, 付尚莹. XLPE电缆交叉互联系统中的局放脉冲传播特性[J]. 高电压技术, 2008, 34(2): 416-418.
- YAO Xiang, LI Haisheng, FU Shangying. The propagation characteristics of partial discharge in cross-bonded XLPE cable[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(2): 416-418.
- [11] 张磊祺, 盛博杰, 姜 伟, 等. 交叉互联高压电缆系统的局部放电在线监测和定位[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2706-2715.
- ZHANG Lei, SHENG Bojie, JIANG Wei, et al. On-line partial discharge localization in cross-bonded HV cable systems[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2706-2715.
- [12] 章鹿华, 王 伟, 李华春. 交叉互联接地电缆系统局放检测的仿真研究[J]. 电测与仪表, 2010, 47(1): 38-42.
- ZHANG Luhua, WANG Wei, LI Huachun. The emulation research of partial discharge detection for the cross bonding cable system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2010, 47(1): 38-42.
- [13] 郑文栋, 杨 宁, 钱 勇, 等. 多传感器联合检测技术在XLPE电缆附件局部放电定位中的试验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(20): 84-88.
- ZHENG Wendong, YANG Ning, QIAN Yong, et al. Experimental research on partial discharge localization in XLPE cable accessories using multi sensor joint detection technology[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(20): 84-88.
- [14] KOLTUNOWICZ W, PLATH R. Synchronous multi-channel PD measurements[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(6): 1715-1723.
- [15] KRAETGE A, HOEK S, HUMMEL R, et al. De-noising approaches for partial discharge measurements-A comparison of methods and their practical application[C]//International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. [S.l.]: IEEE, 2013: 538-541.
- 刘孟佳(1991—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事高电压与绝缘方面的研究。