

# 复合绝缘子内部缺陷的超声相控阵检测研究

徐天勇<sup>1</sup>, 董晓虎<sup>1</sup>, 李荣超<sup>1</sup>, 刘国强<sup>2</sup>, 夏 慧<sup>2</sup>, 夏正武<sup>2</sup>

(1. 国网湖北省电力有限公司检修公司, 湖北 武汉 430000;

2. 中国科学院电工研究所, 北京 100190)

**摘要:**为消除复合绝缘子内部缺陷对电网运行安全造成的隐患,针对小管径复合绝缘子缺陷检测,提出了一种基于超声相控阵的柔性水囊耦合检测方法。该方法采用硅橡胶薄膜与耦合装置实现了良好超声耦合,分别对平面硅橡胶、复合绝缘子护套与芯棒进行了检测实验。实验结果表明,对平面硅橡胶线性扫描优于扇形扫描,能够检测到0.8 mm的微小缺陷,为复合绝缘子伞群超声缺陷检测提供了新方法。对复合绝缘子护套和芯棒,扇形扫描优于线性扫描,护套最小可检测缺陷尺寸达到0.8 mm,芯棒达到1 mm,为复合绝缘子的在线检测提供了可能。

**关键词:**复合绝缘子;超声波;相控阵;无损检测;内部缺陷

**中图分类号:** TM216

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2018)06-0075-05

## 0 引言

复合绝缘子因其重量轻、强度高、可靠性高、耐污性能优良和运行维护方便等优点在高压输电系统中应用越来越广泛,但长期的运行中,主要存在脆断、酥朽断裂、闪络、伞裙破坏、鸟啄损伤等缺陷,其中,芯棒脆断是目前我国复合绝缘子发生掉串的最主要原因之一。脆断主要受玻璃纤维棒的材料、端部附件的结构、荷载条件、酸对玻璃纤维棒的腐蚀等因素影响。复合绝缘子的伞裙护套材料主要由硅橡胶及其他组分构成,在周围恶劣环境、强电场和各种运行应力的作用下,硅橡胶伞裙护套难以避免会出现伞套变硬、开裂等材老化问题,这些复合绝缘子的缺陷严重影响输电线路的安全运行<sup>[1-5]</sup>。

目前复合绝缘子的超声检测采用离线检测的方法,主要以地面或登塔巡视为主,以及仪器检测。主要方法有直接观测法、红外成像法、紫外成像法、电场分布法、泄漏电流法、憎水性检测法、超声波检测法等<sup>[6-9]</sup>。这些方法对于判断绝缘子缺陷类型和大小效果明显,为进一步了解绝缘子损害特性及缺陷发展机理提供了信息。但对于稳定经济运行的电力系统来说,停电检测会严重影响电网与电力设备的安全运行。如何避免停电检测、利用超声原理实现带电检测绝缘子状况是一个挑战,尤其对绝缘子伞裙护套与芯棒粘接强度的在线无损检测检测

是目前电力用户、科研院所及制造厂家亟待解决的问题<sup>[6-9]</sup>。清华大学高英等将水作为耦合剂用超声脉冲回波法检测硅橡胶内部缺陷,通过对浸泡在水中的绝缘子进行超声检测,测出了伞裙中直径3 mm的人造缺陷<sup>[10]</sup>。华南理工大学谢从珍等验证了用常规的超声波检测法对复合绝缘子内部缺陷检测的可行性,能够检测出直径为0.5 mm的气孔缺陷,利用相控阵超声波检测仪对复合绝缘子进行无损检测,初步验证了超声相控阵检测复合绝缘子的可行性<sup>[11-13]</sup>。

针对上述存在的问题,本文提出一种便于现场检测的超声相控阵检测方法,通过实验结果验证了利用该方法检测复合绝缘子的可行性。

## 1 超声相控阵检测原理

超声相控阵检测是指多个独立的换能器阵元按照一定形状和尺寸排列,构成超声阵列换能器,每个阵元有自己独立的发射和接收电路,通过计算机控制系统按一定的规则和时序激发换能器控制各个换能器的数量和延迟时间来调节控制焦点的位置和聚焦的方向,实现声束的偏转、聚焦,从而完成对工件快速高效的检测<sup>[14-16]</sup>。检测原理是利用复合材料本身或其缺陷的声学性质对超声波传播的影响来检测材料内部和表面的缺陷,如气孔夹杂、橡胶分层、裂纹、脱黏等,对面积型缺陷的检出率较高,被广泛应用于各种金属、非金属及复合材料等材料内部缺陷的无损检测。

在对复合材料检测时,超声检测不仅可以探测材料中的分层、气孔、裂纹和夹杂等缺陷,而且在判别疏松、密度差异、弹性模量、厚度等特性和几何形

收稿日期:2018-06-21;修回日期:2018-08-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61771448);国家自然科学基金资助项目(61271424);中国科学院科研装备研制项目(YZ201507)

状的变化等方面也具有一定的优势。纤维增强复合材料超声检测中的一个主要问题是材料有较大的声衰减。复合材料单位厚度的衰减分贝数与频率的三次方或四次方成正比<sup>[17]</sup>。因此,需要有一定功率输出的发射换能器及较高灵敏度的接收换能器,已保证在足够高的探测频率下进行超声检测。

复合材料的声衰减主要来自树脂基体的粘弹性、材料的不均匀性、以及材料内部气孔和分层等缺陷的散射,影响衰减的主要因素是微气孔率的不同。超声波的衰减是指超声波在传播过程中,波的能量随着传播距离的增大逐渐减小的现象。声波的衰减由是声束扩散、声波散射、介质吸收 3 个原因造成的。

利用超声相控阵扫描在检测复合绝缘子时可解决下列问题:单探头在固定位置检出不同位置和任意方向的裂纹;对复合绝缘子的不规则形状,在尽量小的范围移动探头的情况下对其进行四周检测,防止漏检,减小探头与检测部件的摩擦程度,提高探头使用寿命;复合绝缘子高压端部连接复杂,采用相控阵可实现内部复杂结构波形的传播,完成应力腐蚀小裂纹缺陷检测;缩短在用设备维修时间,提高工作效率对某些临界缺陷提高检测、定位、定量、定向精度<sup>[18-20]</sup>。

线性扫描检测原理与常规单个探头检测类似,不同的是超声相控阵线性扫描是多个阵元组成的探头。线性扫描适合检测平面光滑的部件,在工业中应用广泛,检测效率高,扫描的声场示意图如图 1(a)所示。相控阵聚焦偏转的延迟时间是依次变化的,逐渐增加或者逐渐减少,如图 1(b)所示。从左到右,延迟时间逐渐增加,相当于后面阵元相对于前面阵元延迟发射,通过控制每个阵元的延迟时间就可以实现不同程度、方向的偏转聚焦<sup>[21-23]</sup>。

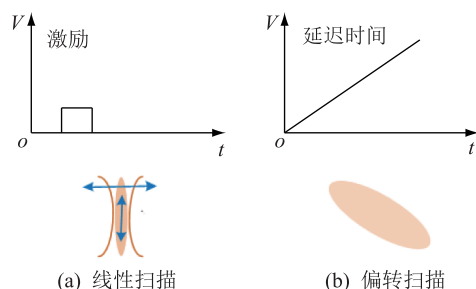


图 1 相控阵扫描方式

Fig.1 Phased array scanning mode

## 2 复合绝缘子超声相控阵检测方法

复合绝缘子主要由芯棒、伞裙护套和金具三部分组成。复合绝缘子高压端部,相对其他部位承受

的机械应力、电场的分布情况要复杂,在高压环境下承受较强的场强,使其容易发生局部放电,引发绝缘子护套电蚀穿孔,水分以及酸性物质通过有损害的护套侵入绝缘子内部芯棒,对其产生腐蚀作用。高压端承受较高的机械负荷,易造成复合绝缘子芯棒脆断或者断裂,导致线路掉线事故。复合绝缘子端部金具与芯棒、护套等材料之间的连接处是出现缺陷最多的部位,该连接处为重点检测区域<sup>[24-26]</sup>。

超声波在空气中衰减很大,在检测试件时,需要在检测部位涂抹适量的耦合剂以减少能量的衰减,传统的超声波水浸法将检测探头与检测试件一同放入水槽中,以水作为耦合剂进行检测,这种方法不适合在现场操作。通过对检测部件绝缘子表面涂抹超声耦合剂进行检测,现场检测存在涂抹方式难以操作、耦合剂均匀度得不到保证、耦合剂容易流失等一系列问题。为了解决超声相控阵探头与复合绝缘子之间的耦合困难问题,设计了一种水囊柔性耦合装置进行耦合检测,如图 2 所示。

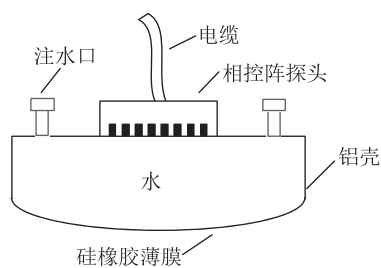


图 2 水囊柔性耦合装置

Fig.2 Water capsule flexible coupling device

通过设计水囊,将水冲入水囊,密封水囊,探头与水囊连为一体。封闭体由铝壳、硅橡胶薄膜组成,其中铝壳上端用来固定超声相控阵探头,铝壳下端由薄膜胶粘而成,薄膜内部充水作为耦合剂,减少超声波衰减。采用硅橡胶薄膜作为水囊柔性耦合材料,材质与绝缘子护套接近,可以有效地减少超声波的反射,硅橡胶膜具有一定的弹性,可以实现水囊中水与绝缘子良好的耦合。

## 3 复合绝缘子超声相控阵检测实验

对平面硅橡胶采用探头直接接触的方法进行单个缺陷的相控阵扫面实验,分别采用扇形扫面(S扫)与线性扫描。对比两种扫描方法,分析不同检测方法的成像效果,对复合绝缘子护套与芯棒进行相控阵扇形扫描。

### 3.1 实验仪器与探头

本实验采用便携式实用型多功能相控阵超声波检测仪,具有体积小、重量轻、16 通道同步发射接

收、集成度高、成像效果好、灵敏度高等优点。探头型号为 AT28439 超声相控阵。

相控阵探头的设计要考虑探头频率、尺寸、阵元数目等参数的选择。硅橡胶复合绝缘子护套材料为高温硫化硅橡胶,超声衰减严重,超声衰减与超声频率、传播距离有关,频率越高,衰减越大,回波接收信号越小。从检测角度,具有高分辨率和较深的检测深度,检测效果更优,选择合适的探头频率,兼顾分辨率和检测深度的要求。探头的阵元数越多,合成波束越理想,但阵元数越多,探头成本更高,发射和接收通道数越多,增加了成本和相控阵控制的复杂度,且探头增大,仪器的体积、功耗相应增大,不利于现场检测应用。

相控阵探头特性如图 3 所示,脉冲回波宽度较大时,对应的频带较小,浅层缺陷检测存在困难,检测时很难却区分缺陷与界面回波。脉冲回波宽度较小时,对应的频带对于较宽,适合距离较近的缺陷检测,检测时,容易判断缺陷的存在,分辨高。

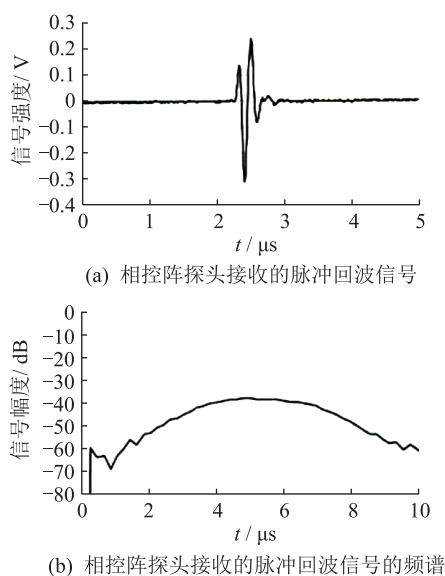


图 3 超声换能器属性

Fig.3 Properties of ultrasonic transducer

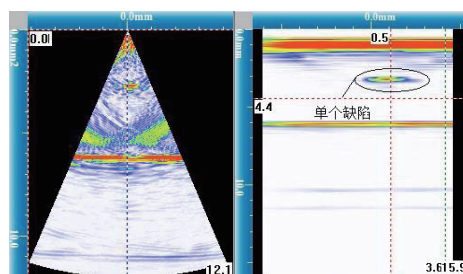
### 3.2 平面硅橡胶单个缺陷检测实验

对厚度为 6 mm 的平面硅橡胶片,利用人工钻孔模拟实际存在的缺陷,孔的直径为 1 mm,距离表面 3 mm 左右。采用 5 MHz 的相控阵探头直接接触的方法对单处缺陷的硅橡胶片进行扇形、线性扫描。相控阵扫描实物图如图 4(a)所示,扇形与线性扫描成像图如图 4(b)、(c)所示。

图 4(b)为相控阵扇形扫描,成像模糊,干扰杂波较多,对缺陷的判别有一定困难,需要与无缺陷图像对比才能发现缺陷护套中检测 0.8 mm 缺陷。图 4(c)为超声相控阵线性扫描图,从扫描图中可直



(a) 相控阵扫描



(b) 相控阵扇形扫描 (c) 超声相控阵线性扫描

图 4 硅橡胶相控阵扫描

Fig.4 Phase array scanning of silicone rubber

观地发现缺陷与底面回波,缺陷成像清晰明显,扫描效果明显优于扇形扫描。在对复合绝缘子伞群超声相控阵检测时,选择线性扫描能够有效地分辨出缺陷的存在。

### 3.3 绝缘子护套两处 0.8 mm 缺陷检测实验

选择直径为 0.8 mm 的微型钻头对复合绝缘子进行钻孔,缺陷数量为 2 个,直径为 0.8 mm,两缺陷间距大致为 1 mm,距离护套上表面为 3 mm 左右。选用频率为 5 MHz 相控阵探头对该处缺陷护套进行相控阵扇形扫描,检测实物图见图 5(a),相控阵扇形扫描成像和 A 扫描曲线图见图 5(b)、(c)。

图 5(b)为超声相控阵扇形扫描,从图中清晰地看到两个分界面,距离探头 17 mm 处的分界面为硅橡胶薄膜与复合绝缘子护套;距离探头 22 mm 左右处为绝缘子护套与芯棒粘接层。在这两界面中间为钻孔缺陷,距离探头 20 mm 左右,两个缺陷成像较为清晰,但缺陷连接处不容易区分,中间有部分连接,相对于 1.0 mm 大缺陷,0.8 mm 缺陷分辨率低。

结合图 5(c) A 扫描曲线中,17 mm,20 mm,22 mm 的三处回波,其中 20 mm 处为绝缘子两处缺陷的左侧缺陷,扇形扫描图中光标定位位置为 A 扫中坐标的位置,两图位置对应,幅值越大对应的缺陷越大。

### 3.4 绝缘子芯棒单个 1 mm 缺陷检测实验

绝缘子芯棒检测,超声波需要穿过护套,透射到芯棒中,为了减小声波衰减,选用频率较低的 2.25 MHz 相控阵探头对直径尺寸为 1 mm 的缺陷进行扇



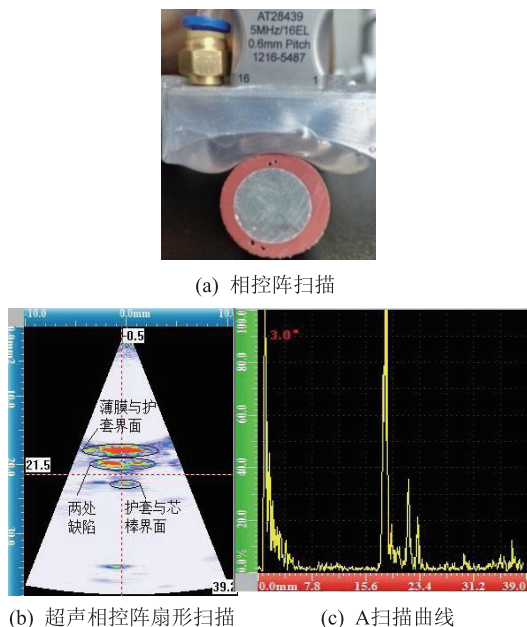


图5 绝缘子护套相控阵扫描

Fig.5 Phase array scanning of insulator sheath

形扫描。耦合方式采用水囊柔性耦合装置进行耦合,检测实物图如图 6(a)所示,超声相控阵扫描图像和 A 扫描曲线图如图 6(b)、6(c)所示。

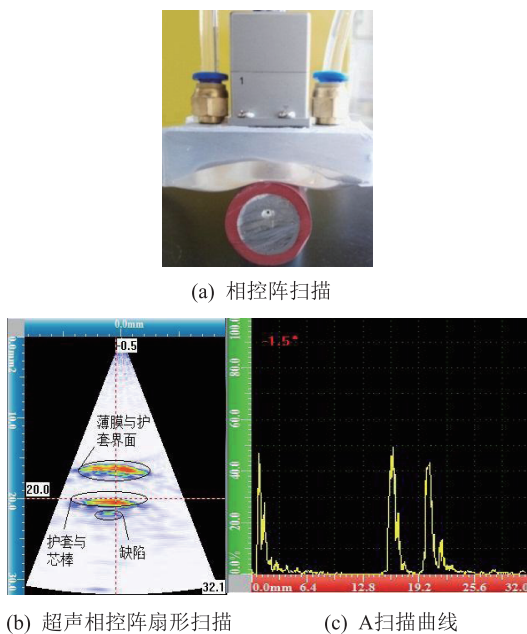


图6 绝缘子芯棒相控阵扫描

Fig.6 Phase array scanning of insulator core

图 6(b)扇形扫描图有 3 个深颜色带,第一条位于距离探头 17 mm 处的色带为薄膜与护套的分界面;第二条位于距离探头 20 mm 处的色带为护套与芯棒的分界面,两界面清晰可见;第三条位于距离探头 23 mm 左右处的色带为缺陷,缺陷图像清晰。

图 6(c)A 扫描曲线图有 3 个回波,第一个波形距离探头 17 mm 对应扇形扫描中的第一条色带为

薄膜与护套的分界面;第二个波形距离探头 23 mm 对应扇形扫描中的第二条色带为护套与芯棒的分界面,两个波形明显,无其他杂波的干扰;第三个波形距离探头 23 mm 左右,对应扇形扫描中的第三条色带 1.0 mm 的缺陷,检测效果明显,波形一一对应。

## 4 结语

(1) 在对小管径复合绝缘子检测方法中,采用水囊耦合法能够实现相控阵探头与绝缘子的良好耦合,克服了水槽检测无法应用于现场检测的弊端,为带电检测提供了可能。

(2) 对平面硅橡胶片内部缺陷进行检测时,相控阵线性扫描效果优于扇形扫描,适合硅橡胶复合绝缘子伞群缺陷检测。

(3) 采用水囊耦合法能够检测复合绝缘子护套内部 0.8 mm 缺陷,两缺陷成像清晰;低频率探头声波衰减减小,适合内部深度较深的芯棒检测。

## 参考文献:

- [1] 关志成,彭功茂,王黎明,等. 复合绝缘子的应用及关键技术研究[J]. 高电压技术,2011,37(3):513-519.  
GUAN Zhicheng, PENG Gongmao, WANG Liming, et al. Application and key technical study of composite insulators[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(3): 513-519.
- [2] 梁曦东,高岩峰,王家福,等. 中国硅橡胶复合绝缘子快速发展历程[J]. 高电压技术,2016, 42(9):2888-2896.  
LIANG Xidong, GAO Yanfeng, WANG Jiafu, et al. Rapid development of silicone rubber composite insulator in China[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(9): 2888-2896.
- [3] 屠幼萍,陈聪慧,佟宇梁,等. 现场运行复合绝缘子伞裙材料的老化判断方法[J]. 高电压技术,2012, 38(10):2522-2527.  
TU Youping, CHEN Conghui, TONG Yuliang, et al. Aging characteristics of shed materials of silicone rubber composite insulators inservice[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(10): 2522-2527.
- [4] 关志成. 绝缘子及输变电外绝缘[M]. 北京:清华大学出版社,2006:61-65.  
GUAN Zhicheng. External insulation of insulators and power transmission and transformation equipment[M]. Beijing: Press of singhua University, 2006: 61-65.
- [5] 谢从珍,刘珊,刘芹,等. 交流 500 kV 复合绝缘子内部缺陷对轴向电场分布的影响[J]. 高电压技术,2012,38(4):922-928.  
XIE Congzhen, LIU Shan, LIU Qin, et al. Internal defects influence of 500 kV AC composite insulator on the electric field distribution along the axis[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(4): 922-928.
- [6] 梁曦东,戴建军,周远翔,等. 超声法检测绝缘子用玻璃钢芯棒脆断裂纹的研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(3):110-114.

- LIANG Xidong, Dai Jianjun, Zhou Yuanxiang, et al. Ultrasonic detection on crack of frp rod in brittle fracture of composite insulator[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 110-114.
- [7] KRAMB V A, OLDING R B, SEBASTIAN J R. Considerations for phased array ultrasonics in a fully futomated inspersion system[J]. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 2004(23): 817-825.
- [8] 谢从珍, 何子兰, 凌永兴, 等. 相控阵超声波检测复合绝缘子内部缺陷[J]. 中国电机工程学报, 2012(S1): 63-68.  
XIE Congzhen, HE Zilan, LING Yongxing, et al. Using ultrasonic phased array to inspect the internal defects of composite insulators[J]. Proceedings of the CSEE, 2012(S1): 63-68.
- [9] 施克仁, 郭寓岷. 相控阵超声成像检测[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.  
SHI Keren, GUO Yumin. Phased array ultrasonic imaging and testing[M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.
- [10] 高英, 梁曦东, 薛家麒, 等. 超声脉冲检测硅橡胶内部缺陷的研究[J]. 高电压技术, 1997, 23(2): 19-21.  
GAO Ying, LIANG Xidong, XUE Jiaqi, et al. Ultrasonic pulse-echo method to detect the faults in silicone rubber[J]. High Voltage Engineering, 1997, 23(2): 19-21.
- [11] 谢从珍, 张尧, 郝艳捧, 等. 应用超声探伤仪检测复合绝缘子的内部缺陷[J]. 高电压技术, 2009, 35(10): 2464-2469.  
XIE Congzhen, ZHANG Yao, HAO Yanpeng, et al. Application of ultrasonic flaw detector to internal defects in composite insulators[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(10): 2464-2469.
- [12] 谢从珍, 袁超, 何子兰, 等. 复合绝缘子典型内部缺陷的相控阵检测[J]. 高电压技术, 2014, 40(3): 837-842.  
XIE Congzhen, Yuan Chao, He Zilan, et al. Phased array detection of typical internal defects of composite insulator[J]. high voltage technology, 2014, 40(3): 837.
- [13] YUANC, XIE C, LI L, et al. Ultrasonic phased array detection of internal defects in composite insulators[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2016, 23(1): 525-531.
- [14] JEROME P, ANDRES G, JESUS V, et al. Phased array technology concepts, probes and applications[C] // 8th European Vongress on NDT. Barcelona, Spain; 2002.
- [15] 刘贵民, 马丽丽. 无损检测技术[M]. 2版. 北京: 国防工业出版社, 2010: 201-256.  
LIU Guimin, MA Lili. Nondestructive inspection[M]. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 201-256.
- [16] 李衍. 相控阵超声检测国际动态[J]. 无损检测, 2009(1): 56-60.  
LI Yan. International dynamic ultrasonic testing of phased array ultrasonic testing[J]. Nondestructive Testing, 2009(1): 56-60.
- [17] 孙芳, 曾周末, 靳世久, 等. 碳纤维复合材料缺陷的小波包分析[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(13): 1-4.  
SUN Fang, ZENG Zhoumo, JIN Shijiu, et al. Analysis of carbon fiber composite defects based on wavelet packet transform[J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(13): 1-4.
- [18] 刘贵民, 马丽丽. 无损检测技术[M]. 2版. 北京: 国防工业出版社, 2010: 201-256.  
LIU Guimin, MA Lili. Nondestructive inspection[M]. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 201-256.
- [19] 孙芳. 超声相控阵技术若干关键问题的研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.  
SUN Fang. Research on several key issues of ultrasonic phased array technology[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [20] 鲍晓宇, 施克仁, 陈以方, 等. 超声相控阵系统中高精度相控发射的实现[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(2): 153-156.  
BAO Xiaoyu, SHI Keren, CHEN Yifang, et al. High-precision phased ultrasonic transmission in phased array ultrasonic systems[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2004, 44(2): 153-156.
- [21] LONGR, RUSSELL J, CAWLEY P. Ultrasonic phased array inspection using full matrix capture[J]. Insight Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2012, 54(7): 380-385.
- [22] YANG S, YOON B, KIM Y. Using phased array ultrasonic technique for the inspection of straddle mount-type low-pressure turbine disc[J]. Ndt & E International, 2009, 42(2): 128-132.
- [23] SHI K, QUE K, GUO D. Flexible ultrasonic phased-array probe[J]. Tsinghua Science and Technology, 2004, 9(5): 574-577.
- [24] 张福增, 宋磊, 李锐海, 等. 复合绝缘子断裂原因分析及缺陷评价方法[J]. 高电压技术, 2012, 38(11): 3093-3100.  
ZHANG Fuzeng, SONG Lei, LI Ruihai, et al. Evaluation method of defect and fracture reason for composite insulator[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(11): 3093-3100.
- [25] 张福林, 张善钢. 复合绝缘子运行过程中芯棒出现脆断原因初析[J]. 电网技术, 2000, 24(1): 30-32.  
ZHANG Fulin, ZHANG Shangang. Preliminary analysis on brittle fracture phenomenon of polymer insulator core rod[J]. Power System Technology, 2000, 24(1): 30-32.
- [26] 高佳程, 曹雁庆, 朱永利, 等. 基于 KERM-VPMD 方法的未知局部放电类型的模式识别[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(5): 141-147.  
GAO Jiacheng, CAO Yanqing, ZHU Yongli, et al. Pattern recognition of unknow PD types based on KERM-VPMD[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5): 141-147.

## 作者简介:



徐天勇

徐天勇(1961—),男,本科,高级工程师,从事高电压与绝缘技术、输电线路覆冰及防护研究工作(E-mail: xuty@hb.sgcc.com.cn);

董晓虎(1980—),男,本科,高级工程师,从事超/特高压输电线路运维检修工作(E-mail: xiaohu\_d@163.com);

李荣超(1966—),男,本科,高级工程师,从事超/特高压输电线路运维检修工作。

(下转第114页)

## The Optimal Allocation Method of Harmonic Measuring Device in Distribution Network

LI Wei<sup>1</sup>, ZHANG Zhihua<sup>2</sup>, SUI Guozheng<sup>3</sup>, SUN Dong<sup>1</sup>, QU Zeqi<sup>2</sup>

(1. Shengli Oilfield Technology Inspection Center, Sinopec, Dongying 257000, China;

2. College of Information and Control Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

3. Hekou Oil Extraction Plant, Shengli Oilfield, Dongying 257200, China)

**Abstract:** In order to satisfy the requirements of energy saving and process adjustment in oil field, the frequency converters and other non-linear power electronic equipments are widely used, and the harmonic pollution of oil field distribution network is raising serious. The harmonic on-line monitoring system lays a foundation for measuring and analyzing the harmonic distribution characteristics of oil field power distribution network. However, due to the economic constraints of application, the installation quantity of harmonic measuring terminal is limited, so it is necessary to optimize its installation position. Considering both the observability and the redundancy of harmonic state estimation, a method for the optimization of measuring terminal addressing is proposed. The observability and redundancy of the system under different harmonic measurement terminal configurations are calculated by using node correlation matrix and observability logic judgment method of harmonic state estimation. On the premise of ensuring the maximum observability of the system, the installation position of the measuring terminal is optimized with the maximum redundancy. In the case of limited number of terminals, the considerable measure and precision of harmonic state estimation of oilfield power distribution network can be improved. Simulation results show that the method is effective.

**Key words:** oil field distribution network; harmonic on-line monitoring system; considerable measure; redundancy

(编辑 方 晶)

(上接第 79 页)

## Ultrasonic Phased Array Detection of Composite Insulator Internal Defects

XU Tianyong<sup>1</sup>, DONG Xiaohu<sup>1</sup>, LI Rongchao<sup>1</sup>, LIU Guoqiang<sup>2</sup>, XIA Hui<sup>2</sup>, XIA Zhengwu<sup>2</sup>

(1. Maintenance Company, State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430000, China;

2. Institute of Electrical Engineering of CAS, Beijing 100190, China)

**Abstract:** In order to eliminate the risk on the safe operation of power grid caused by the internal defects of composite insulators. A water capsule flexible coupling method based on ultrasonic phased array is proposed for small diameter composite insulator. This method uses the silicone rubber film and the coupling device to achieve good ultrasonic coupling. The defects detection experiments of the plane silicone rubber, composite insulator sheath and core were carried out respectively. Experimental results show that the linear scanning imaging is better than the sector scan and defects of the diameter of 0.8 mm can be detected, which provides a new method for the ultrasonic defects detection of composite insulator umbrella group. For the composite insulator sheath and core, the method of water capsule coupling can detect defects with a diameter of 0.8 mm and 1.0 mm through the phased array sector scanning. It provides the possibility for the on-line detection of composite insulator.

**Key words:** composite insulator; ultrasonic wave; phased array; nondestructive testing; internal defect

(编辑 钱 悦)

(上接第 108 页)

## Research and Application of Program Remote Upgrade for Sub-modules in VSC-HVDC Converter

WANG Tao, LI Hanjie, ZHANG Maoqiang, LI Lele, TIAN Jie, FANG Taixun

(NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

**Abstract:** Modular multilevel converter (MMC) has been widely applied in the VSC-HVDC (voltage source converter-high voltage direct current transmission) field. In MMC application, it is very difficult to upgrade the program of the sub-modules of MMC. The structure of VSC-HVDC control system and sub-module of MMC is described, the program function of sub-module controller is analyzed. A method of program remote upgrade for MMC is introduced, the design of main hardware modules and software flowchart of the program upgrading system is presented. Safety and reliability evaluation of program remote upgrade for MMC is also described. This work is applied and verified based on dynamic simulation experiment platform for MMC research.

**Key words:** modular multilevel converter; remote upgrade; sub-module

(编辑 钱 悦)