

# 局部放电检测法在高压变频机组绝缘检测中的应用

唐玉龙<sup>1</sup>, 孙丽华<sup>2</sup>

(1. 国家管网集团西气东输公司郑州输气分公司, 河南 郑州 450000;

2. 柳州电力勘察设计有限公司, 广西 柳州 545000)

**摘要:**通过对直流叠加法、温度测量法、接地线电流法、局部放电检测法等几种常见的电气绝缘在线检测方法和原理, 阐述了各种检测方法的原理、检测方式、适用范围、优缺点。重点对局部放电检测法在高压变频机组的应用进行了实验分析。局部放电检测技术具有与检测装置无电气连接、检测灵敏度高、安装简便的优越性, 可实现便携式检测, 是高压变频机组绝缘检测的最佳方案。

**关键词:** 高压变频机组; 局部放电检测技术; 超高频法; 高频脉冲电流法

**中图分类号:** TM921 **文献标识码:** B **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed23138

## Partial Discharge Detection Method Application in Insulation Detection of High Voltage Inverter Motor Unit

TANG Yulong<sup>1</sup>, SUN Lihua<sup>2</sup>

(1. Zhengzhou Gas Transmission Branch of West-East Gas Transmission Company of State Pipeline Network,

Zhengzhou 450000, Henan, China; 2. Liuzhou Electric Power Survey and

Design Co., Ltd., Liuzhou 545000, Guangxi, China)

**Abstract:** Several on-line detection methods of electrical insulation, such as DC superposition method, distributed optical fiber temperature measurement method, grounding current method and partial discharge detection method, were studied and analyzed. The principle, detection mode, application range, advantages and disadvantages of various detection methods were introduced. The emphasis was put on the experimental analysis of the partial discharge detection method application for high voltage inverter motor unit. The partial discharge detection technology has the advantages of no electrical connection with the detection device, high detection sensitivity, simple installation and portable detection, it is the best scheme for insulation detection of high voltage inverter motor unit.

**Key words:** high voltage inverter motor unit; partial discharge measurements; ultra-high frequency method; high frequency pulse current method

随着科技的不断发展, 越来越多的大容量变频机组应用在铁路、管道、钢铁、石油石化等行业, 这些行业生产运行对供电连续性要求高, 一旦停电停产, 将会造成重大的经济损失或安全事故。作为重要用电设备的变频电动机组的连续稳定运转是安全生产的核心要素, 因此变频电动机组绝缘的状态是影响装置安全运行的重要因素。高压变频机组的绝缘在线检测是当前电气领域重要的课题之一, 能防患于未然, 消除安全隐患。目前, 国内在高压变频装置绝缘在线检测领域仍旧使用传统的工频接地电流检测技术, 该

技术可靠性较差并且无法检测出绝缘的初期故障。适用于高压变频机组的局部放电检测技术目前还是一个空白领域。本文采用检测高频电磁波的局部放电检测技术, 实现高压变频电动机组的绝缘在线检测。

## 1 电气设备绝缘在线检测方法分析

由于现代检测技术的更新换代, 人工智能算法的日渐普及, 通过对电气设备局部放电所产生的电磁波、声波、光波、温度等物理量的检测, 并对这些检测信息进行处理和综合分析, 同时根据

作者简介: 唐玉龙(1984—), 男, 硕士, 工程师, Email: tangyl@pipechina.com.cn

通讯作者: 孙丽华(1971—), 女, 本科, 高级工程师, Email: xyfzly@126.com

其数值的大小和变化趋势,可计算出绝缘劣化发展趋势,并对绝缘的可靠性在线做出判断,便于发现早期的绝缘故障。设备在运行状态下进行连续的检测与分析是电气设备绝缘在线检测的特点<sup>[1]</sup>。

### 1.1 直流叠加法

直流叠加法是在交流系统中在线加入直流电压,通过检测直流电流的大小来判断运行电气设备的绝缘老化程度的方法。以电缆为例,通过检测电缆接地线中的直流分量,可实现对电缆主绝缘状态的在线检测。目前有企业将叠加直流电压增加至1.5~2.5 kV,测量直流泄漏电流,计算对地绝缘电阻,直流叠加法接线如图1所示。此方法在实践应用中存在弊端,不仅需要改变电力系统的一次接线方式,且电压互感器中性点的隔离直电容在系统运行中易产生谐振。直流叠加检测方法适用于与电力系统无电力连接的独立供电网络<sup>[1]</sup>。

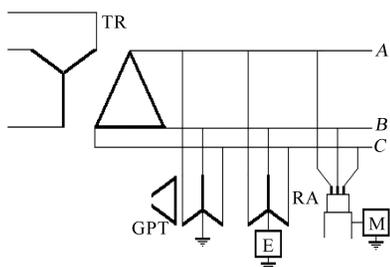


图1 直流叠加法原理图

Fig.1 Principle diagram of DC superposition method

### 1.2 温度测量法

电气设备绝缘事故的发生也会伴随有局部温度的变化。对设备进行实时温度检测可以帮助判断设备的绝缘是否正常。以电缆为例,通过在电缆生产过程中将光纤嵌入电缆或者紧贴电缆表面铺设光纤,将光纤作为温度采集和数据传输的通道。当激光脉冲通过光纤时,会产生散射,包括瑞利散射和拉曼散射,后者与光纤温度相关,可通过测量和分析瑞利散射的背向散射或者返回光纤入射端的散射光去确定拉曼散射点的温度。通过测量入射的激光脉冲被散射并返回到入射端的时间来确定散射点的位置。温度测量法在现场中已大量应用,不论是电力电缆还是电气设备,通过温度的检测可以反映出绝缘状态,但此种方法无法反映出绝缘劣化的初期发展趋势及劣化过程。该方法更多地是反映电气设备老化的结果,无法对设备的老化过程进行有效

检测<sup>[2]</sup>。

### 1.3 接地线电流法

接地线电流法是通过在电气装置接地线端进行电流测量的方法。因为电气装置绝缘不断劣化过程中,伴随着接地电流也不断增大。接地电流的大小与电压等级、接地方式、线路长度都有关系,有时达到数十A。通过长期检测接地电流可以分析出接地电流的发展趋势。如果接地电流突然增大,若无其他故障,可认为这是电气设备绝缘的劣化所致。该方法比较适合对单点接地的电气设备进行绝缘在线检测,此技术可靠性较差并且无法检测出绝缘的初期故障。

### 1.4 局部放电检测法

局部放电是指在电场作用下,绝缘系统中只有局部区域发生放电,在导体之间并没有形成贯穿电压,绝缘性能仍然较好,整个绝缘没有被击穿,简称局放。局部放电分为表面局部放电和内部局部放电。目前国内外对局部放电检测技术进行了深入的研究,出版发布了多种等级技术规范,如:GB/T 7354—2018《局部放电测量》、GB/T 3048.12《电线电缆电性能试验方法局部放电试验》、IEC 60270《高电压试验技术——局部放电测量》、DL/T417—2019《电力设备局部放电测量现场导则》等。局部放电测量是定量分析绝缘劣化状态的最有效方法,在绝缘劣化引发初期,其局部放电量约0.1 pC。当发展到介质击穿临界状态时,其局部放电量可达到1 000 pC以上。在线检测电气设备局部放电是预测设备运行寿命、及时发现故障隐患、保障电力安全的重要依据。局部放电的识别和定位则是研究的目的,也是对设备进行故障诊断和维修的重要依据。现代计算机技术、传感器技术、电子技术、信号处理技术和现代数学计算分析方法的广泛应用,为局部放电在线检测技术的推广起到了有效的支撑作用<sup>[3]</sup>。

在现场实际应用中主要采用电量测量法对电气设备局部放电进行测量。本文仅对高频脉冲电流法(high frequency current transformer, HFCT)、超高频法(ultra-high frequency, UHF)这2种电量检测方式进行探讨。

#### 1.4.1 高频脉冲电流法(HFCT)

高频脉冲电流法是目前使用最广泛的局部放电检测方法,通过检测局部放电的高频电流脉冲反映电气设备的局部放电特性。HFCT绝缘检测传感器由磁芯、罗高夫斯基线圈、滤波和取样

单元以及电磁屏蔽盒组成。线圈绕在高频下具有较高导磁率的磁芯上;滤波及取样单元的设计兼顾测量灵敏度和信号响应频带的要求。该方法的检测频率范围为1~30 MHz,测量方法简单,灵敏度高,易于局部放电定量分析。本项目采用美国德克萨斯州大学 Karen L. Butler-Purry Professor 的理论,解决了局放脉冲电流法在检测重复接地电力系统中存在的分流和环流问题以及局部放电检测的历史趋势预测的技术难题。

#### 1.4.2 超高频法(UHF)

超高频法通过在电气设备旁边安装 UHF 传感器接收局部放电辐射的超高频电磁波,实现局部放电的检测。超高频法检测的频谱在 300 MHz~1.5 GHz,当电气设备产生局部放电时,超高频信号会以电磁波的方式向空间传输,不再依附于电气导体传输,这就为空间检测提供了条件,同时超高频检测法更利于屏蔽噪声,检测准确度更高<sup>[3]</sup>。

#### 1.5 常见绝缘检测方法特点分析

不同检测原理具有各自的技术优缺点,适用于不同的场所。局部放电检测法安全、灵敏度高,适用于重要设备的绝缘检测;直流叠加法需要改变电网结构,并且需要将直流信号注入电网;温度测量法灵敏度较低,电缆在制作时将感温光纤埋入电缆,适用于海底电缆;接地电流法适用于传统小电流接地选线装置。表1为不同绝缘检测技术对比。

表1 绝缘检测技术对比

对比内容	局放检测法	直流叠加法	温度测量法	接地电流法
电力系统结构改变	不改变	改变	不改变	不改变
与检测设备连接方式	无电气连接	有电气连接	无电气连接	无电气连接
被检测设备接地状态	单点、多点及交叉互联接地	只能检测单点接地	可适用多种接地方式	只能检测单点接地
检测设备电压等级	各种电压等级电气设备	检测高、中压电气设备	各种电压等级电气设备	根据接地方式确定
绝缘缺陷检测灵敏度	灵敏度高	灵敏度低	灵敏度低	灵敏度低
检测信号	电磁波/超声波	直流电流	温度	工频电流
适用场景	发电机组及变频电动机	不重要的独立电源系统	海底电缆	已形成单点接地的故障

通过表1对比可知,局放检测法是高压变频机组绝缘检测的最佳解决方案,目前无其他检测手段能够实现变频机组的绝缘在线检测功能。

## 2 局部放电检测技术在高压变频机组中的应用

### 2.1 高压变频机组绝缘在线检测技术方案

高压变频机组由隔离变压器、高压变频器、线路电动机组构成。高压变频器的工作原理及性能特点使高压变频电动机运行时产生大量的谐波,这些谐波以行波方式在线路中传输,在遇到隔离变压器和电动机类高感抗电气设备时会产生行波反弹,反弹行波的电压是正常电压的2倍。机组连续运行时,过电压会对高压变频机组电气设备绝缘造成危害。高压变频电动机在实际工程运行中,出现了众多此类绝缘故障的案例。

采用局部放电检测技术是解决此类故障的最优方案,其他原理检测技术不适用于变频电动机这种复杂电磁环境。在高压变频设备运行时,如果电力电子器件及设备本体绝缘下降,装置会发生局部放电现象,产生局部放电的部位会发射出超高频电磁波(300 MHz~1.5 GHz)和高频脉冲电流(1~30 MHz),通过检测这两种电磁波信号即可实现局部放电的检测,可以预判出机组绝缘劣化的发展趋势,从而可以实现变频机组的绝缘在线检测。变频设备工作频率一般运行在1~100 kHz 范围内,反应电力电子元件绝缘状态的局放信号在1~30 MHz 和 300 MHz~1.5 GHz 两个频率段内,这两个频率段都远离电力电子设备工作频率,通过精确的检测设备可以在线检测出变频电动机组的绝缘状态<sup>[4]</sup>。

### 2.2 超高频法(UHF)图谱分析

在实验室进行电缆接头的局部放电实验,通过超高频检测法对电缆接头局部放电进行在线检测,捕获了局放信号中超高频图谱,如图2~图4所示。通过对图2~图4图谱的分析,可以准确反映电缆绝缘的劣化状态。超高频放电均值为-20 dBm,放电脉冲数为128次/s。

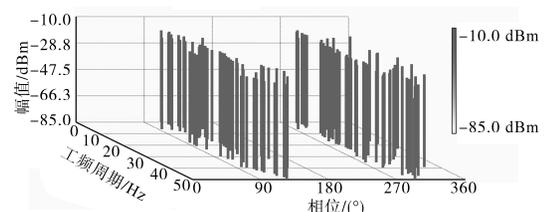


图2 UHF PRPS图

Fig.2 UHF PRPS chart

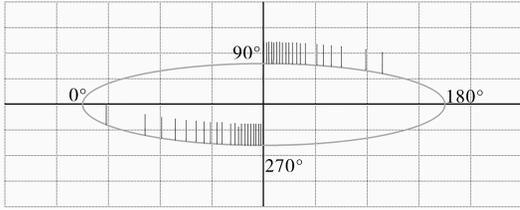


图3 UHF椭圆图  
Fig.3 UHF elliptic chart

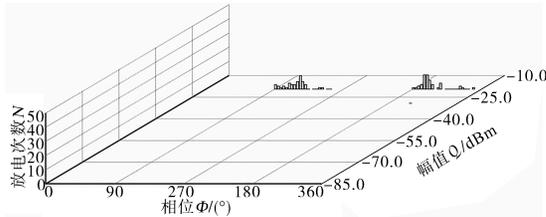


图4 UHF Q-Phi-N图  
Fig.4 UHF Q-Phi-N chart

通过上面三个局部放电图谱分析可知:放电均值大于-35 dBm,放电相位差为180°,反映出电缆接头发生单相局部放电现象,通过此项实验可以验证超高频检测法对于电气设备局放检测的灵敏性和准确性。

### 2.3 高频脉冲电流法(HFCT)图谱分析实例

采用高频脉冲电流检测法对某企业现场运行的11 MW高压变频电动机组进行在线检测,采集到机组局放强烈信号,发现了电机绝缘隐患。

检测设备信息为:功率11 MW,电压6 kV。检测数据如下:放电峰值1 266 mV,放电均值742.26 mV,放电脉冲数396个/s。对HFCT PRPS等三个图谱进行分析,结果如图5~图7所示。

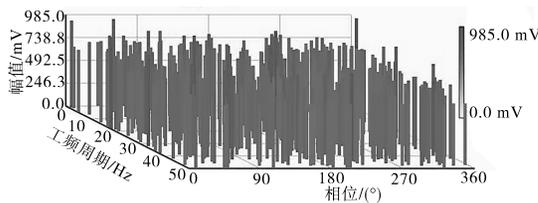


图5 HFCT PRPS图  
Fig.5 HFCT PRPS chart

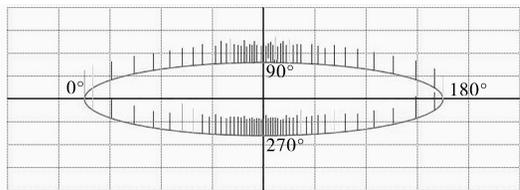


图6 HFCT椭圆图  
Fig.6 HFCT elliptic chart

通过图谱和检测数据分析,高频脉冲放电量已超过1 000 pC,电机本体已产生明显的局部放电现象,通过现场开盖检查,11 MW高压变频电

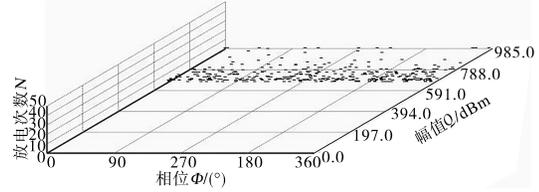


图7 HFCT Q-Phi-N图  
Fig.7 HFCT Q-Phi-N chart

动机定子上发现了放电痕迹,如图8所示。通过现场设备试验可以验证高频脉冲电流检测法检测的准确性。高频脉冲电流检测法适用于变频电动机组及防爆电动机组的绝缘在线检测。

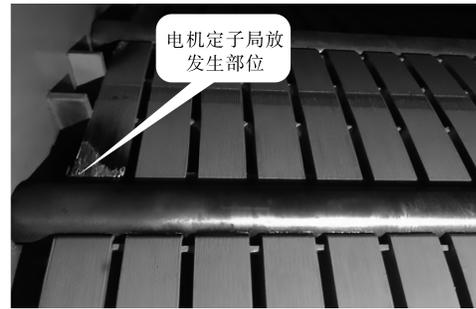


图8 11 MW高压变频电动机定子放电痕迹  
Fig.8 Stator discharge trace of 11 MW high voltage variable frequency motor

### 3 结论

局部放电检测技术中超高频法和高频电流脉冲法具有不改变电力一次系统结构、与被检测设备无电气连接、检测精度高、抗干扰能力强等优点,这些是局部放电检测在高压变频设备领域应用的技术优势。随着现代通讯技术的发展,5G技术的普及势在必行,物联网将全面推广,局部放电检测技术伴随5G技术将向小型化、智能化、离散化发展,为在高压变频设备绝缘检测的技术推广铺平了道路。

#### 参考文献

- [1] 成永红. 电力设备绝缘检测与诊断[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [2] 李华春, 周作春, 徐阳, 等. 交联电缆绝缘在线检测方法综述[J]. 绝缘材料, 2008, 41(6): 59-62.
- [3] 刘思佳. 基于在线电流数据驱动方法的地下电缆故障预诊断的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- [4] 孙丽华, 唐玉龙. 一种电力电子设备绝缘在线检测系统: 中国, ZL202023216639.3[P]. 2021-1-29.

收稿日期: 2021-03-02  
修改稿日期: 2021-04-30