

# 一种基于 MIA 的油浸式变压器放电性故障定位新方法

魏云冰<sup>1,2</sup>, 王东晖<sup>1</sup>, 韩立峰<sup>3</sup>, 张捷<sup>3</sup>

(1. 郑州轻工业学院电气信息工程学院, 河南 郑州 450002; 2. School of Electrical & Electronic Engineering, University of Manchester, Manchester, M13 9PL; 3. 郑州轻工业学院材料与化学工程学院, 河南 郑州 450002)

**摘要:** 为解决油浸式电力变压器中低能放电、高能放电等放电性故障的定位问题, 提出了基于油中金属分析(Metal In-Oil Analysis, MIA)的放电性故障定位方法。通过对变压器内部高故障概率构件进行表面处理, 将潜在的故障信息源预置于构件表面, 并应用示位金属(Metal for Position Indication, MPI)进行发生故障构件的确定。在此基础上, 结合已有的局部放电、油中溶解气体分析等在线监测系统, 可以实现较为完善的变压器放电性故障的诊断与定位。研究表明, 该方法在提高放电性故障定位精度的同时, 还可以降低对原有某种特定故障定位方法在精度方面的要求, 并通过连续监测使运行维护人员对变压器的潜伏性故障信息有更为全面的掌握, 为变压器状态检修的实现提供了新的技术支持。

**关键词:** 油浸式电力变压器; 故障定位; 油中金属分析; 示位金属; 状态检修

## A novel method for discharging fault diagnosis and location of oil-immersed power transformers based on MIA

WEI Yunbing<sup>1,2</sup>, WANG Donghui<sup>1</sup>, HAN Lifeng<sup>3</sup>, ZHANG Jie<sup>3</sup>

(1. School of Electrical & Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China; 2. School of Electrical & Electronic Engineering, University of Manchester, Manchester M13 9PL, UK; 3. School of Material & Chemical Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** To solve the location problems of discharging faults in oil-immersed power transformers, a novel location method based on metal in-oil analysis (MIA) is proposed. By the surface treatment for the internal components of high failure probability in the transformer, the potential failure sources in transformers are preset in the surface of these components and metal for position indication (MPI) is used for fault location. At the same time, through the integration with the existing partial discharge monitoring system and the online dissolved gases monitoring system, a relatively perfect fault diagnosis and location method for discharging faults could be achieved. The results show that the proposed method can increase the accuracy of fault location and lower the requirements in precision of the original certain fault location methods. The operation staff can also master more comprehensive latent fault information and be provided with new technical support for the realization of condition-based maintenance for transformers.

This work is supported by the China Scholarship Council ([2013] No.5045).

**Key words:** oil-immersed power transformer; fault location; MIA; MPI; condition-based maintenance

中图分类号: TM63

文章编号: 1674-3415(2015)21-0041-07

## 0 引言

油浸式电力变压器是电力系统中极为重要的变电设备, 其运行状况的优劣直接关系到电网的安全、可靠运行与否。一旦变压器因故障退出运行, 造成的经济损失难以估量<sup>[1]</sup>。由于油浸式变压器内

部绝缘结构复杂、电磁环境恶劣, 使得放电性故障信号的有效提取受到严重的制约, 加之故障信号的幅值、相位与频率的时变性, 导致有限次数的取样无法反映故障的真实特性<sup>[2-3]</sup>。如何有效地利用放电性故障信息对变压器故障进行诊断与定位一直是高压电气设备绝缘监测领域的难题<sup>[4]</sup>。

近年来很多学者依托人工智能算法, 在油浸式变压器放电性故障定位方面取得了显著成果, 如文

献[5]将遗传算法与特高频检测技术相结合, 实现了对单一局放源的定位。文献[6]将粗糙集理论与支持向量机相结合, 实现了在不完备故障信息条件下对变压器故障的初步定位。但从整体上看, 这些方法均属于应用人工智能算法对放电性故障信号进行处理与挖掘, 因而存在对其他故障信息利用不完全、所需训练样本数量较大以及能检测的放电性故障源数量受限等不足。

本文从油浸式变压器绕组的制造工艺入手, 对变压器绕组进行了创新性的电镀设计, 将潜在的故障信息, 变被动挖掘为主动预置, 在定义“特征物质”、“MIA”及“示位金属”等概念的基础上, 提出了基于 MIA 的油浸式电力变压器故障定位方法, 并同原有的在线故障监测方法进行了整合, 以充分发挥绝缘油“信息载体<sup>[7]</sup>”的作用。通过示例分析, 证明了该方法对放电性故障有较高的诊断、定位精度, 可对发生故障的构件进行确定, 同时还可提高油浸式变压器的维修效率。

## 1 定义引入及油中金属来源分析

### 1.1 特征物质、MIA 定义的引入

若我们不从“利用电磁感应原理实现能量传递”的角度来理解变压器, 而将它看为一座伴随着能量传递过程的“化学反应容器”, 那么, 我们可以将由油浸式变压器内部故障诱发的“化学反应”的生成物定义为“特征物质(Characteristic Materials)”, 即: “对判断充油电气设备内部故障有价值的物质, 如特征气体<sup>[8]</sup>、糠醛、金属微粒/离子、微水等”, 继而由特征物质中的金属微粒/离子来定义“油中金属分析(Metal In-Oil Analysis, MIA)”如下: “通过对绝缘油中悬浮的金属微粒或溶解的金属离子进行分析, 来判断充油电气设备内部潜伏性故障的故障诊断与定位方法”。

### 1.2 特征物质中金属微粒/离子的来源分析

作为传统的监测对象, 对于绝缘油中溶解的特征气体、糠醛、微水的来源已获得详尽的分析<sup>[9-11]</sup>, 对应的监测系统亦日趋成熟(如图1所示的油浸式变压器油中溶解气体在线监测系统, DGA)。在此, 仅对绝缘油中金属微粒/离子的生成机理进行分析。

#### 1.2.1 非放电性故障情况

新的绝缘油酸值很低, 除非受到污染。在绝缘油注入变压器箱体前, 运输过程中混入的金属微粒/离子(多为铜、铁微粒/离子)和变压器箱体内残存的金属微粒就成为了绝缘油最初的污染源。

在变压器运行过程中, 上述的铜、铁微粒/离子与绝缘油发生以下循环过程: 铜、铁微粒/离子催化

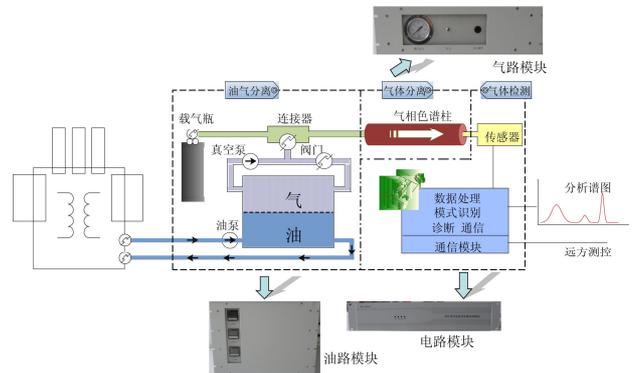


图 1 油中溶解气体在线监测系统  
Fig. 1 Online dissolved gas monitoring system

绝缘油的氧化→产生有机酸→有机酸腐蚀裸露金属→使油中金属离子含量增加。与此同时, 若潜油泵发生故障导致扫膛或磨损, 产生的铜、铁微粒/离子也会加入上述循环过程。

在变压器的维护中, 若使用活性白土对绝缘油进行净化<sup>[12]</sup>, 则难免会有蒙脱石晶层中的少量铝、镁离子溶于绝缘油中。

#### 1.2.2 放电性故障情况

若变压器发生低能放电、高能放电等放电性故障, 放电部位发生的烧熔或腐蚀会导致该部位材质(主要是铜、铁)对应的金属离子、微粒溶解、悬浮于绝缘油中。

此外, 由于变压器内部绕组引线焊接时采用铜基钎料, 参照其化学成分<sup>[13]</sup>, 若放电性故障发生在焊点, 可能会有微量铜、锌、锡、镉离子溶于绝缘油中。

由上述分析可知, 在初次完成绝缘油中金属微粒/离子种类、含量的测定并将其定为基值后, 绝缘油中金属微粒/离子种类、含量的变化与变压器内部故障的类别、严重程度有直接的联系。因此, 对绝缘油中金属微粒/离子的持续监测可为获知变压器内部故障提供一个便捷的渠道。

## 2 基本原理及与已有监测系统的整合

### 2.1 基本原理

参照对国家电网公司 110 kV 及以上等级变压器故障部位的分析<sup>[14]</sup>, 可知变压器绕组、主绝缘及引线是变压器的主要故障部位, 对应损坏台次占到总损坏台次的 81.8%, 且在变压器绕组所采用的部分纸包扁铜线的制作流程中, 亦有镀锡防腐环节。因此, 在本方法中, 结合各种可用于表面处理的金属的熔点、延展性、导电性、耐腐蚀性等特性, 对于不同相别的高、低压绕组, 采用不同的表面处理材质。如表 1 所示。

表 1 构件与表面处理用材料对照表

Table 1 Comparison table of components and surface treatment materials

构件名称	导电回路						引线及其焊点	导磁回路	其他位置
	A 相高压绕组	A 相低压绕组	B 相高压绕组	B 相低压绕组	C 相高压绕组	C 相低压绕组	铁心	铜基钎料焊接处	
镀(涂)层材料	铬	钴	镍	铂	钛(PVD)	银	金(喷涂)	无	无

这样,在保证三相绕组电阻、电抗满足对应标准的前提下,对油浸式变压器导电回路的对应构件进行电镀、喷涂或物理气相沉积(PVD)等相应的表面处理。当上述变压器高故障风险部位发生低能放电、高能放电或热电综合故障时,对应的表面处理材料以金属微粒或离子的形式进入绝缘油中,通过对绝缘油中金属的定性检测,可对该放电性故障所在相别及绕组进行判定;同时,对表面处理用金属及铜、铁的定量检测,对比测得的绝缘油中金属含量的基值及前次进行 MIA 分析所得数值,则可判断该放电性故障的严重程度及发展趋势。

我们将上述为指示放电性故障的部位而特意引入的镀层金属定义为示位金属(Metal for Position Indication, MPI)。由参考文献[15]可知,油浸式变压器在超铭牌额定值负载时,顶层油温限值为 105℃,绕组热点温度和纤维绝缘材料接触的金属温度限值为 120℃。即使在此温度下,上述示位金属镀层亦具有较好的耐腐蚀性,且绕组经表面处理后,亦会包覆绝缘纸,所以在此忽略示位金属同油纸绝缘间的微弱反应。

## 2.2 绝缘油中金属的定量及参考限值

受制于现有的便携式金属检测仪器要求样品溶剂为无机物,现有的应用于环境保护、食品药品安全领域的便携式金属检测仪无法直接应用于绝缘油中金属微粒/离子的定量检测<sup>[16]</sup>。因此,对绝缘油中金属的检测目前需经在线取样后,在实验室中利用电感耦合等离子质谱(ICP-MS)或石墨炉原子分光光度计来定量检测<sup>[17-18]</sup>。将来,基于膜分离技术<sup>[19]</sup>与传感器技术<sup>[20]</sup>的变压器绝缘油中金属在线监测装置进一步成熟后,绝缘油中金属的定量环节亦可在线完成。

目前对绝缘油中金属含量的限定既无国家标准,又无行业或企业标准。在查阅与分析大量文献后,仅可给出部分国产新绝缘油中,金属铜、铁的质量分数约为 20~70 μg/kg,对锡、锌、铝等金属的质量分数暂未给出参考值。

## 2.3 MIA 与已有监测系统的整合

### 2.3.1 硬件整合

目前 MIA 尚无法在线实现,但针对油浸式变压

器油中溶解气体、油中微水、顶层油温等特征量而研发的油浸式变压器在线监测系统已相对成熟,所以,经在线取样、离线分析后所得的 MIA 结果,可通过通信协议传至状态监测站内数据平台,共同参与变压器故障的诊断与定位过程,如图 2 所示。

待在线 MIA 系统成熟并投运后,则可考虑实施其检测周期与在线 DGA 系统的检测周期进行穿插等技术措施,以进一步提高潜伏性故障的发现概率。

### 2.3.2 故障诊断、定位流程的整合

综合考虑已有在线监测设备的成熟度及已有标准<sup>[21]</sup>,可设计出以在线 DGA 系统为先导、以局部放电在线监测系统为辅助、以 MIA 为核心的故障监测与定位系统的诊断流程如图 3 所示。

图 3 中“MIA 检测”环节之前的流程为传统的借助在线 DGA、局部放电系统进行故障诊断的环节。在此环节中,结合工程实际,考虑到 H<sub>2</sub> 难溶于绝缘油且具有较高的扩散率,采用不涉及 H<sub>2</sub> 的 Duval 三角形法<sup>[22]</sup>进行初步的故障诊断。

图 3 中“MIA 检测”环节之后的流程为以 MIA 分析结果为核心的故障诊断流程。在该部分流程中,借助对绝缘油中示位金属及铜、铁含量的分析,可以对发生放电性故障的构件(如铁心、绕组)及故障类型(如环流、沿面放电等)进行清晰的判定。

在上述由 DGA 进行故障定性、MIA 进行故障定位环节完成后,对历次 MIA 所得数据进行进一步挖掘,则可以对故障的严重程度进行判定。如,若某次 MIA 数据显示某种示位金属及铜的含量较基值均有所上升,且后续 MIA 数据显示铜的含量进一步上升,则可以判定此处的放电性故障在持续中且已经触及示位金属所包覆的构件本体,因而需要尽快执行停运、消缺操作。若经 MIA 分析,发现示位金属、铜、铁含量均未上升,但检测到 PD 信号,则依据图 3,可判定出放电性故障发生在木质垫块等非金属材料部位。由图 3 亦可观察出,对局部放电在线监测系统的要求仅为判定出“有无 PD 信号”而不要求故障定位,所以在引入 MIA 后,对局部放电监测系统的检测精度有所放宽,考虑到变电站复杂的电磁环境对局部放电监测系统造成的干扰,这一点具有积极的工程意义。

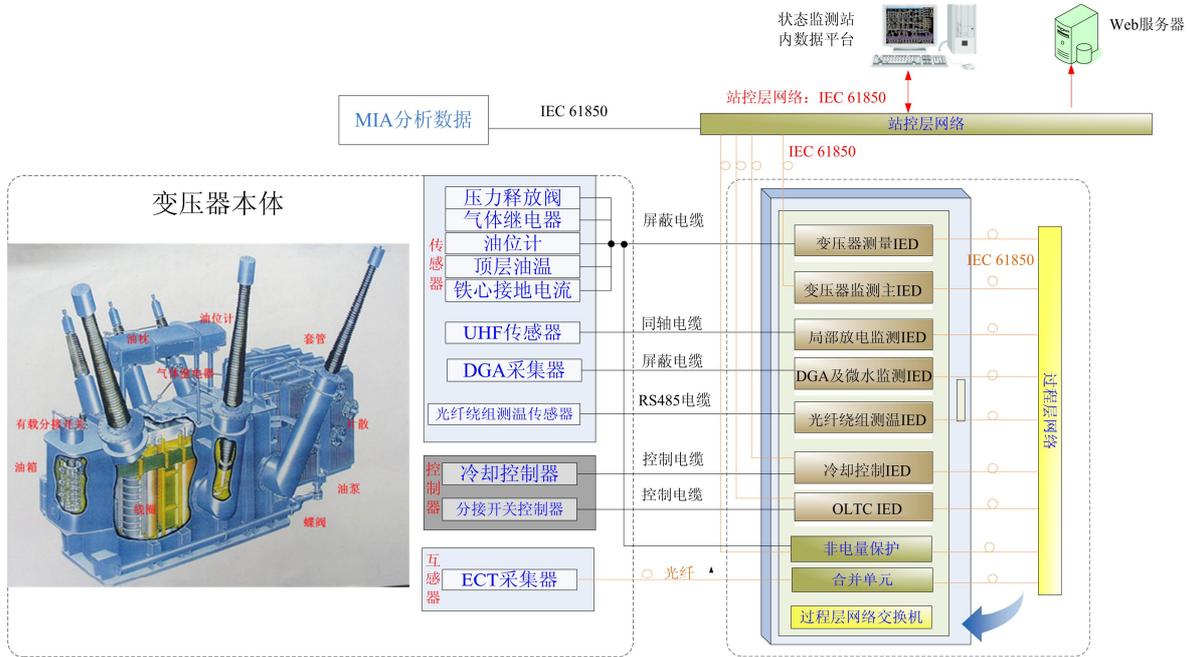


图 2 MIA 与已有监测系统的整合

Fig. 2 Integration of MIA and existing monitoring systems

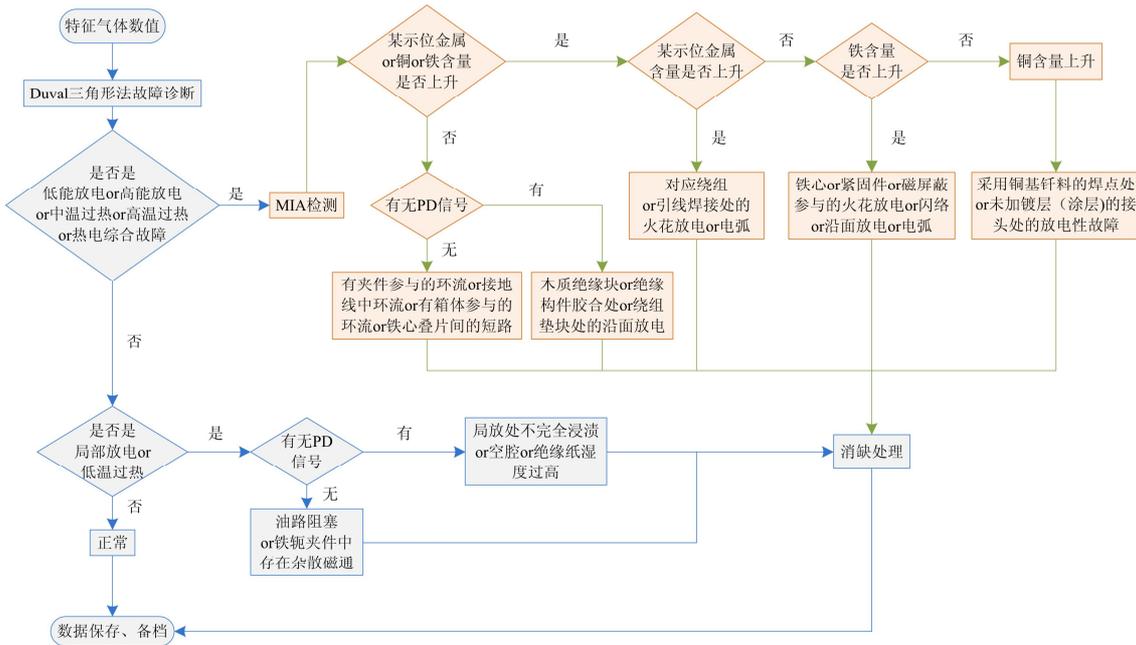


图 3 结合 MIA 数据的故障定位流程

Fig. 3 Fault location flow chart combined with MIA data

### 3 灵敏度分析

我们结合一台 SF9-31500/110 油浸式双绕组变压器的具体参数，对实验室中两种检测设备可以检测出的最小烧蚀区域的半径进行测算。统筹考虑表面处理的工艺难度及原材料成本，将表面处理层的

厚度统一设定为 0.02 mm。

由于在放电过程中，放电电弧产生的高温使放电部位表面处理材质液化熔融，电弧的作用力作用于熔融部位表面使其受到损坏；多次放电后，烧蚀范围扩大，从中心向四周扩散<sup>[23]</sup>，所以，设定放电性故障处烧蚀形成区域为高度为表面处理层厚度的

圆柱, 考虑到镀层密度与变压器净油器对绝缘油中金属含量的影响, 我们将绝缘油中某种离子的浓度设定为  $10 \mu\text{g/L}$ , 结合箱体绝缘油载油量为  $16500 \text{ L}$ , 选用石墨炉原子分光光度计为油中金属的定量检测设备, 以密度最低的钛为例, 计算可检测出的该区域最小烧蚀半径为

$$V = \frac{c \times V}{\rho} = \frac{10 \mu\text{g/L} \times 16500 \text{ L}}{4.506 \text{ g/L}} = 36.6 \text{ mm}^3 \quad (1)$$

$$r = \sqrt{\frac{V}{h \times \pi}} = \sqrt{\frac{36.6 \text{ mm}^3}{0.02 \text{ mm} \times \pi}} = 24.14 \text{ mm} \quad (2)$$

其中:  $\rho$  为表面处理材质密度;  $h$  为表面处理层的厚度。

若选用定量精度高一个数量级的电感耦合等离子质谱(ICP-MS)作为实验室中的检测设备, 则计算出的可检测出的最小烧蚀半径为  $7.63 \text{ mm}$ 。

若放电性故障发生处的绕组采用的镀层材料为密度较大的银, 则在实验室中分别选用石墨炉原子分光光度计、电感耦合等离子质谱(ICP-MS)作为检测设备, 那么可测得的最小烧蚀半径分别为  $15.81 \text{ mm}$ 、 $5.00 \text{ mm}$ , 如表 2 所示。

表 2 最小烧蚀半径对照表

表面处理材质	钛	银
石墨炉原子分光光度计	24.14	15.81
电感耦合等离子质谱 (ICP-MS)	7.63	5.00

因此, 对于上述 6 种用于变压器构件表面处理的金属材料, 若发生放电性故障, 则以石墨炉原子分光光度计为实验室用检测设备, 可检测出的最小烧蚀半径(mm)区间为  $[15.81, 24.14]$ ; 以电感耦合等离子质谱为实验室用检测设备, 最小烧蚀半径(mm)区间为  $[5.00, 7.63]$ 。

## 4 示例分析

某电厂 2 号升压变油色谱数据如表 3 所示, 试对其进行分析。

分析处理流程: 油色谱分析结果为严重过热和火花放电综合性故障, 高压侧直流电阻测试结果, AO、BO、CO 三相基本平衡, 即绕组尚无断线。经吊芯检查, C 相高压线圈上部有较多铜末, 绕组损坏。

以“工作日”为单位, 原处理方式的处理流程如图 4 所示。

表 3 油色谱分析数据

气体成分	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>1</sub> +C <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>
含量/ppm	197	106	20	134	80	340	290	640

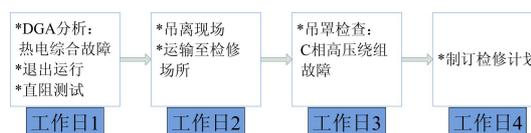


图 4 未进行 MIA 分析时的处理流程

Fig. 4 Diagnosis procedure without MIA

若我们引入 MIA 分析, 依据图 3 中的故障诊断与定位流程, 分析过程如下:

1) DGA 分析使用 Duval 三角法, 如下:

a. 计算 CH<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 总量:

$$106 + 134 + 80 = 320 \text{ ppm}.$$

b. 分别计算三者的含量百分比:

$$\text{CH}_4 \text{ 的含量百分比为 } \frac{106}{320} \times 100\% = 33.1\%;$$

$$\text{C}_2\text{H}_4 \text{ 含量百分比为 } \frac{134}{320} \times 100\% = 41.9\%;$$

$$\text{C}_2\text{H}_2 \text{ 含量百分比为 } \frac{80}{320} \times 100\% = 25.0\%.$$

c. 故障诊断程序分析, 标注结果如图 5 所示。

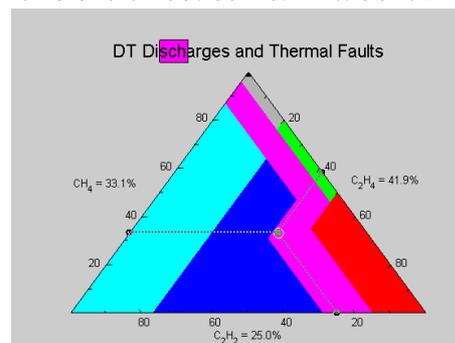


图 5 Duval 三角形法标注结果

Fig. 5 Result of Duval triangle method

由于坐标点落于三角形中“Discharges and Thermal Faults 热电综合故障”区域, 所以可初步判定为热电综合故障。因而进入 MIA 分析环节。

2) MIA 分析

a. 在线采样:

由在线采样系统采集绝缘油  $20 \text{ ml}$ 。

b. 绝缘油样品消解处理:

从预处理后的绝缘油样品中, 准确称量  $0.2 \text{ g}$  于高压密闭消解罐中, 采用  $0.5 \text{ ml}$  二氯甲烷溶剂溶

解分散后，加入 6 ml 浓硝酸-2 ml 过氧化氢消解试剂，在密闭微波消解系统内消解。冷却后，用超纯水定容至 30 g，供 ICP-MS 测定。

c. ICP-MS 按照表 4 进行工作参数设定后进行分析。

由测试结果，发现 C 相高压绕组对应的示位金属含量上升，且绝缘油中铜的含量已经升至 200 ppm 以上，因而可以判断出 C 相高压绕组发生放电性故障。

表 4 ICP-MS 参数设定

Table 4 Parameter settings of ICP-MS

工作参数	设定条件	工作参数	设定条件
射频功率	1 350 W	采样速度	1.0 ml/min
采样深度	6.8 mm	分析模式	全定量
等离子体气体流量	16.0 L/min	数据采集重复次数	3
辅助气体流量	1.00 L/min	驻留时间	30 ms
载气流量	1.12 L/min	单位质量数采集点数	3
采样锥孔径	1.0 mm	积分时间	1 ms
截取锥孔径	0.4 mm		

3) 退出运行，制定检修计划，进行消缺处理  
所以，若我们仍以“工作日”为单位，引入 MIA 分析后的处理流程如图 6 所示。

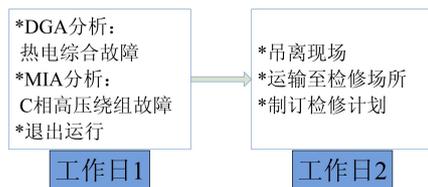


图 6 加入 MIA 分析后的处理流程

Fig. 6 Diagnosis procedure with MIA

综合以上分析可知：

1) 通过 DGA 分析的结果同 MIA 分析的结果进行对比，可以对绝缘油中出现的金属离子/微粒来源于非放电性故障或放电性故障进行判定；

2) 由 MIA 对示位金属的分析，可省去吊芯环节，即可对故障位置进行定位；

3) 由 MIA 分析的结果同基值的对比，可对故障的严重程度及发展趋势进行判断，从而为状态检修的实现提供有力的支撑；

4) 在吊离、运输过程中，通过时间上统筹，可同时制订检修计划，结合检修过程中以相别、构件为单位逐步进行拆解与消缺，所以该方法可提高检修、消缺工作效率。

## 5 结论

1) 本文的方法充分利用变压器中绝缘油除冷

却、绝缘、保护三大功能外的信息载体的功能，即将示位金属作为未激活的故障信息源，经电镀等表面处理工艺置于绕组和绕组引线上，上述部位发生放电性故障或热电综合性故障时，溶解或悬浮于绝缘油中的示位金属的离子或微粒即相当于被激活而释放至绝缘油中的故障信息，经 MIA 分析，被运行人员所获知。

2) 对变压器进行定期的 MIA 分析，使运行维护人员对变压器的运行状况有更为全面的掌握并及时把握潜伏性故障信息，示位金属的引入亦可使工作人员更有针对性地对设备进行维护与保养，为状态检修的实现提供了新的数据支持。

3) 通过基于不同原理的电力变压器监测方法的结合，在降低对某种特定监测方法的依赖程度的同时，不同的方法所获得的数据亦可以相互佐证，进而提高故障诊断的精度，即达到 1+1>2 的效果。

## 参考文献

- [1] 苑津莎, 尚海昆, 王瑜, 等. 基于相关系数矩阵和概率神经网络的局部放电模式识别[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 110-115.  
YUAN Jinsha, SHANG Haikun, WANG Yu, et al. Pattern recognition for partial discharge based on correlation coefficient matrix and probabilistic neural networks[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 110-115.
- [2] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-33.  
YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-33.
- [3] 姚致清, 赵倩, 刘喜梅. 基于准同步原理的逆变器并网技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 123-126.  
YAO Zhiqing, ZHAO Qian, LIU Ximei. Research on grid-connected technology of inverter based on quasi synchronous principle[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 123-126.
- [4] 罗日成, 李卫国, 文习山. 大型变压器局部放电多目标定位实验[J]. 高电压技术, 2007, 33(8): 71-76.  
LUO Richeng, LI Weiguang, WEN Xishan. Experimental study on partial discharges localization within large transformer[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(8): 71-76.
- [5] 唐志国, 李成榕, 黄兴泉, 等. 基于辐射电磁波检测的电力变压器局部放电定位研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(3): 96-101.

- TANG Zhiguo, LI Chengrong, HUANG Xingquan, et al. Study of partial discharge location in power transformer based on the detection of electromagnetic waves[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(3): 96-101.
- [6] 武中利, 杨建, 朱永利, 等. 基于粗糙集理论和支持向量机的变压器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 80-83.  
WU Zhongli, YANG Jian, ZHU Yongli, et al. Power transformer fault diagnosis based on rough set theory and support vector machines[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 80-83.
- [7] DL/T 1094-2008, 电力变压器用绝缘油选用指南[S].  
DL/T 1094-2008, guide to the choice of power transformer oil[S].
- [8] GB/T 7252-2001, 变压器油中溶解气体分析和判断导则[S].  
GB/T 7252-2001, guide to the analysis and the diagnosis of gases dissolved in transformer oil[S].
- [9] 凌愨. 变压器用油的析气性问题[J]. 电力设备, 2005, 6(1): 12-15.  
LING Min. Gassing problem of transformer oil[J]. Electrical Equipment, 2005, 6(1): 12-15.
- [10] CHEIM L, PLATTS D, PREVOST T, et al. Furan analysis for liquid power transformers[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2012, 28(2): 8-21.
- [11] 林燕桢, 蔡金锭. 回复电压极化谱特征量与油纸绝缘变压器微水含量关系分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 148-153.  
LIN Yanzhen, CAI Jinding. Analysis of the relationship between the characteristics of the return voltage polarization spectrum and micro water content of oil-paper insulation transformer[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 148-153.
- [12] 王晋华, 刘翠响. 活性白土净化变压器油机理的探讨[J]. 变压器, 2002, 39(7): 1-2.  
WANG Jinhua, LIU Cuixiang. The investigation about the mechanism of transformer oil purification with activated clay[J]. Transformer, 2002, 39(7): 1-2.
- [13] GB/T 6418-2008, 铜基钎料[S].  
GB/T 6418-2008, copper base brazing filter metal[S].
- [14] 王梦云. 110 kV 及以上变压器事故统计分析[J]. 供用电, 2006, 23(1): 1-4.  
WANG Mengyun. Analysis of the fault statistics of transformers 110 kV and above[J]. Distribution & Utilization, 2006, 23(1): 1-4.
- [15] GB/T 1094.7-2008, 电力变压器 第7部分: 油浸式电力变压器负载导则[S].  
GB/T 1094.7-2008, power transformers-part 7: loading guide for oil-immersed power transformers[S].
- [16] 郑守国, 李淼, 曾新华. 痕量铬检测传感器的设计与实现[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(8): 2299-2302.  
ZHENG Shouguo, LI Miao, ZENG Xinhua. Design and development of trace Cr(VI) sensor[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(8): 2299-2302.
- [17] 严冬, 曾祥程, 宋娟娥, 等. 电感耦合等离子体质谱测定水体中可溶性 65 种元素[J]. 环境化学, 2014, 33(8): 1418-1421.  
YAN Dong, ZENG Xiangcheng, SONG Juane, et al. The measurement about 65 kinds of water-soluble elements with inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. Environmental Chemistry, 2014, 33(8): 1418-1421.
- [18] 李勇. Z-2000 偏振塞曼石墨炉原子吸收分光光度计测定地球化学样品中痕量金[J]. 岩矿测试, 2008, 27(4): 305-309.  
LI Yong. Determination of trace gold in geochemical exploration samples by Z-2000 polarized zeeman graphite furnace atomic absorption spectrophotometry[J]. Rock and Mineral Analysis, 2008, 27(4): 305-309.
- [19] 李爱阳, 蔡玲. 膜分离技术在环保中的应用[J]. 化工技术与开发, 2007, 36(10): 38-40.  
LI Aiyang, CAI Ling. Application of membrane separation technology in environmental protection[J]. Technology & Development of Chemical Industry, 2007, 36(10): 38-40.
- [20] 潘勇, 傅慧娟, 黄慧萍, 等. 传感器技术在金属检测中的新发展[J]. 传感器与微系统, 2006, 25(7): 7-10.  
PAN Yong, FU Huijuan, HUANG Huiping, et al. New development of sensor technique in metal ions detection[J]. Transducer and Microsystem Technology, 2006, 25(7): 7-10.
- [21] IEEE Std C57.104-2008, IEEE guide for the interpretation of gas generated in oil-immersed transformers[S].
- [22] DUVAL M, DUKARM J. Improve the reliability of transformer gas-in-oil diagnosis[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2005, 21(4): 21-2.
- [23] 谢昌明, 谈效华, 杜涛, 等. 气体火花开关电极烧蚀研究[J]. 强激光与离子束, 2014, 26(1): 248-255.  
XIE Changming, TAN Xiaohua, DU Tao, et al. Electrode erosion research of gas spark gap[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(1): 248-255.

收稿日期: 2015-01-22; 修回日期: 2015-04-23

作者简介:

魏云冰(1970-), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电气设备在线监测与故障诊断;

王东晖(1988-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力变压器在线监测与故障诊断; E-mail: eastsunshine87@126.com

韩立峰(1976-), 男, 硕士, 讲师, 研究方向为功能材料。

(编辑 葛艳娜)