

油浸式真空有载分接开关油中溶解气体分析方法研究

荀 华¹, 韩建春¹, 韩荀杰²

(1. 内蒙古电力科学研究院, 内蒙古 呼和浩特 010020; 2. 内蒙古工业大学 能源与动力工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘 要:文中针对油浸式真空有载分接开关在运行中因转换触头烧损,导致绝缘油中乙炔和氢气含量异常的问题,系统分析了其结构特点、产气机理及油中溶解气体分析方法的适用性与局限性。研究表明,由于该类开关绝缘油量少、气体浓度低,传统色谱分析方法存在误判风险。通过对比国内外标准,提出采用绝对气体浓度与产气速率作为主要诊断依据,并推荐使用高精度GC-MS技术,以提升微量气体检测能力;进一步提出以氢气与总溶解加热气体的比值作为故障警示值,并基于实际故障数据,推导出不同型号开关的差异化预警阈值。该研究结果为提升真空有载分接开关状态监测的准确性与可靠性提供了理论支持和方法指导。

关键词:真空有载分接开关;油中溶解气体分析;产气机理;故障诊断;H₂/TDHG 比值

中图分类号:TM 441 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-348X(2025)06-0024-05

0 引言

有载分接开关是电力变压器的核心可动组件,其运行状态直接影响电网的稳定性和可靠性。它的主要作用是通过实时精准的调压响应,抑制电压波动、优化负荷潮流分布,并充分挖掘设备的有功、无功输出能力,从而提升电力系统的运行效率和调度灵活性。近年来,国内电网在运变压器频繁发生真空有载分接开关故障,尤其是转换开关触头烧灼问题,导致绝缘油中乙炔(C₂H₂)和氢气(H₂)含量严重超标,给设备安全和电网稳定带来重大隐患。虽然,油色谱分析依旧是监测有载分接开关状态的主要手段,但实际应用中存在诸多局限性。首先,由于开关内部绝缘油量少,频繁取样检测难以实现,通常依赖制造商规定的检修周期和色谱限值进行判断;其次,变压器运行负荷波动、环境温度变化等因素可能干扰油色谱数据,导致误判。运行经验表明,部分分接开关油色谱指标未超过厂家注意值,但吊检时仍发现潜在缺陷;反之,也存在油色谱超标但吊检无异常的情况。这表明仅依靠油色谱分析难以全面、准确地评估开关的健康状态。因此,

为提高真空有载分接开关的状态监测精度,降低误判风险,需要开展色谱关键状态量的深度数据分析方法研究。

1 油浸式真空有载分接开关结构

油浸式真空有载分接开关主要是在分接开关回路上加装真空灭弧管,作为电流切换单元,将电弧开断过程密封在真空环境中,在快速恢复断口介质强度的同时,实现可靠灭弧,避免绝缘油碳化;选择开关或转换开关浸润在绝缘油中,利用绝缘油进行散热和绝缘,如图1所示。在实际运行中,分接开关在切换分接头时需通过电阻过渡来限制环流,因此,其结构通常由切换开关、分接选择器和操作机构三部分组成。切换开关进行负载电流的切换,其动作由快速机构按预设动作流程进行;分接选择器则按照分接顺序预先接通相邻分接头,并承担连续负载;这两部分共同构成开关本体,通常安装在分接开关油箱内部。这种结构设计既保留了真空灭弧的技术优势,又兼顾了实际运行中电阻过渡需求,体现了现代电力设备安全性与可靠性的平衡。

收稿日期:2025-08-20

作者简介:荀华(1976),女,硕士,教授级高级工程师,长期从事变电一次设备状态评价、状态检修、数据分析等工作。

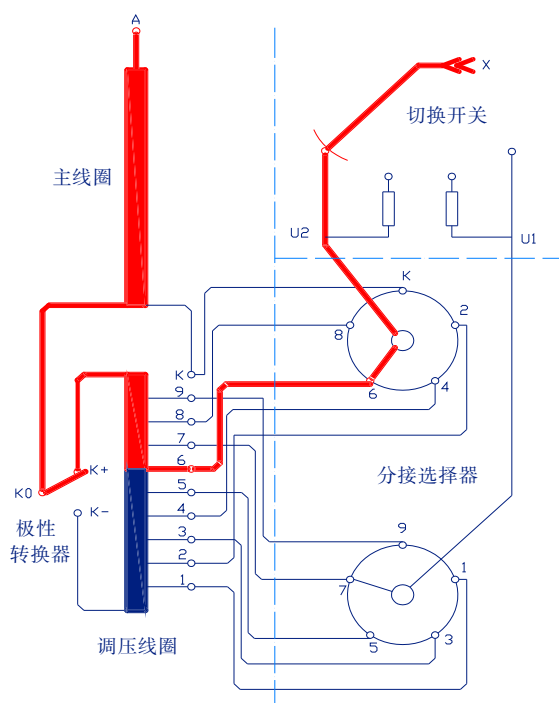


图1 油浸式真空有载分接开关结构图

2 理论基础

2.1 绝缘油产气理论

真空有载分接开关电流切换单元密封于真空灭弧室,开关选择器或者转换开关浸润在绝缘油中。理论上,设备采用真空泡灭弧,避免了弧触头在绝缘油中的切换,而绝缘油与电弧隔绝,则不会造成绝缘油的分解,也就避免了绝缘油的碳化;但在实际工作过程中,由于制造工艺的差异,导致零件装配和零部件加工过程中存在公差积累等原因^[1],当各触头间的配合时间存在误差时,会出现正常运行工况下,不作为灭弧功能使用的转换触头切断循环电流的情况,产生放电而导致转换触头烧损。正常运行工况下,分接开关抽头变换(即移动或固定盘路触点)打开或关闭旁路电路时可能产生轻微电弧,而其余情况下,也仅仅只有在开关存在故障或极端应力下,才会导致绝缘油劣化产生乙炔、氢气等故障特征气体,尤其在初期,乙炔的产量几乎为零,但当乙炔含量达到一定数据值时,也就预示分接开关存在大异常,需要进行诊断性分析。在 IEEE Std C57.139TM-2015《IEEE Guide for dissolved gas analysis in transformer load tap changers》中

也明确说明在真空有载分接开关运行过程中可能会有绝缘油劣化产生气体的情况,分接开关绝缘油中气体成分的浓度能够反应分接开关的情况,特别是可能存在的灭弧室故障、机械缺陷或旁路和转向开关的隐患问题^[2]。由于绝缘油本身具备良好的灭弧性能,导致其出现恶性绝缘故障的风险降低,分接开关仍然可稳定运行。但当绝缘油劣化气体含量超出一定限值时,往往预示着转化触头切断了较大的循环电流,就需要对真空有载分接开关的状态进行诊断性检查。

2.2 绝缘油裂解成分

绝缘油的裂解是一个热解过程,往往需要能量输入。这个能量可能是设备局部过热(如接触不良、环流、过热等)产生的热效应,也可能是局部放电(低能量火花)或电弧(高能量放电)的电效应,或者两者兼而有之,而不同故障类型产生的气体组合有所不同,这也是绝缘色谱分析用于故障诊断的理论基础。

当温度低于 300 °C 时,绝缘油通常非常稳定,裂解速度极慢,产生的氢气(H_2)和其他气体量很少,多是由于局部温度不均匀的低能量电效应;在 300 ~ 600 °C 时,设备属于低温过热阶段,绝缘油分子中的 C-H 键和 C-C 键开始断裂,主要产生氢气(H_2)和甲烷(CH_4);随着温度升高,会产生更多的乙烷(C_2H_6)和乙烯(C_2H_4),乙烯(C_2H_4)的产生是温度升高的重要标志;当温度超过 700 °C 时,设备属于高温过热,会产生大量的乙烯(C_2H_4)和乙炔(C_2H_2),虽然乙炔更常与放电关联,但极高温度的过热也会产生少量乙炔。当设备在负载切换、设计缺陷类工况下,局部产生电弧放电时,温度瞬间可达数千度,这是能量最强烈的故障形式,瞬态过热会产生大量各种气体,其中乙炔(C_2H_2)是其最特征性的气体,同时也会产生大量的氢气(H_2)和甲烷(CH_4)。总之,放电主要生成乙炔(C_2H_2)和氢气(H_2);相比之下,发热故障主要产生甲烷(CH_4)等低分子量烃类气体。由于氢气分子小、生成能量低,它往往是最早出现的故障特征气体。当在绝缘油中监测到氢气含量持续增长,表明存在潜伏性故障的重要标志,需要密切关注,故而氢气(H_2)是“早期预警”的信号。但对设备进行诊断分析时,要靠气体组合,而非单一气体,必须对所有特征气体的含量、产气速率以及各种气体的比值进行综合分析诊断。

3 色谱取样要求及分析

3.1 采样要求及检测方法

在绝缘油劣化时,各种故障气体生成速率也受多重因素影响,尤其是负载电流与热力学条件的相互作用,且油循环系统也会影响故障气体的扩散和积聚特性,故而在设备取样分析时要考虑这些因素。采样频率应根据设备的电压等级、容量、重要性、健康状况和历史数据进行动态调整,其核心原则是“风险越高,监测越密”。对于正常设备,常规检测周期参照《输变电状态检修试验规程》的例行试验周期进行^[3]。一旦发现数据异常,要基于设备状态进行调整,采样周期必须立即大幅缩短,以追踪故障发展,当某种气体含量超过注意值时,采样周期应缩短至3个月或更短;若数值超过了警示值,则表明故障可能已经存在,周期要尽可能缩短至1个月;结合其它试验,确认存在故障并进行跟踪时,采样周期要缩短至1周甚至更短,以便精确计算产气速率,判断故障的严重程度和发展速度。在雷击、短路冲击等不良工况下,不考虑上次采样时间,都应在事后24 h内进行取样,并视情况跟进;对于设备重负荷运行期或设备有家族性缺陷或已知有轻微问题时,要增加采样频次。

在正常运行条件下,由于真空有载分接开关的色谱分析数据较低,特别是乙炔浓度通常低于 $1 \mu\text{L/L}$,采样常规的检测仪器精度不足,则无法精确测量气体浓度;而GC-MS气相色谱-质谱联用检测方法是目前最精准的油中溶解气体检测方法,其检测限可达 $0.1 \mu\text{L/L}$ 级,更灵敏,能够识别微量乙炔,特别适用于真空有载分接开关的色谱故障诊断。

3.2 数据预处理

在数据收集后需要进行归类处理。油浸式真空有载分接开关的数据样本要遵循群体一致性和可比性原则,需要至少30台同型号同厂家或相似结构的有载分接开关色谱数值。不同厂家相似结构要考虑由于制造工艺、检测仪器灵敏度、色谱柱效能、校准标准等细微差异所造成的误差,要对数据进行误差补偿,误差系数可根据情况选择“ $0.8 \sim 1.2$ ”;同时,这些色谱数值应尽量选取油负荷、油温、环境温度等运行环境相近的数据进行对比,因为油温高低会影响

气体的析出和溶解速度;负荷会直接影响设备内部温度;油保护方式的不同会影响气体的溶解度和逸散速度,如要求负荷率波动不超过 $\pm 15\%$,且也要做归一化处理^[4-5]。这样选取的数据保证了油色谱数据的准确、可比、可用,具有统计代表性和实际适用性。

3.3 分析方法选择

在油浸式有载分接开关故障诊断中,油中溶解气体分析(dissolved gas analysis, DGA)是诊断潜在故障的重要手段。气体限值一般分为绝对浓度、比值和产气速率三种。油浸式有载分接开关负载越高表示通过的电流越大,操作越频繁表示切换次数越多,则油中气体浓度就越高,如高频操作可能引起可燃气体激增。由于油浸式真空有载分接开关的产气量较小,尤其特征气体乙炔的浓度可能很低,甚至低于 $1 \mu\text{L/L}$,通常等于或接近检测极限,且因仪器设备测量的不确定性,会存在非常大的相对误差,故而油浸式真空有载分接开关进行色谱分析时要关注气体的趋势变化,并计算产气速率。综上所述,因乙炔浓度非常小,一般将DGA分析中气体的绝对浓度和产气速率作为判断油浸真空式有载分接开关故障的限值,通常不采用与乙炔相关的比值法。

真空灭弧式有载分接开关的独特设计使其产气规律与传统油浸式存在显著差异,通过气体组分分析法,可精准识别真空泡失效等隐蔽故障;但对于真空有载分接开关,因单气体成分浓度较低,在对历史数据进行统计分析时,需采用基于操作次数的绝对增加量(即产气速率),进行综合分析。

3.4 色谱分析标准

实际运行过程中,真空有载分接开关油色谱分析中存在频繁检出放电特征气体的情况。因真空有载分接开关不同于变压器本体,油室中除电弧在真空泡内灭弧外,油中还有带着电活动的主触头、转换触头等。运行规范《电力变压器用真空有载分接开关使用导则》(DL/T 1538—2016)中规定:“新投入运行、大修后的油浸式真空有载分接开关可在投运并变换分接后的24 h、3天、1周、1月(或满100次)分别进行色谱跟踪,逐次特征气体组分数值比较应无明显增量”^[6]。目前,根据《电力变压器分接开关运行维修导则》(DL/T 574—2021)的规定:“油浸式真空有载分接开关绝缘油色谱分析,检验周期与变压器

本体一致,乙炔含量的注意值为 $40\text{ }\mu\text{L/L}$;如乙炔含量超过注意值,应缩短检验周期,增长量不宜大于 $10\text{ }\mu\text{L/L}$;若乙炔含量超过以上数值应,与制造厂联系进一步分析处理。”^[7]。目前,色谱分析采用 DL/T 574—2021 作为真空有载分接开关的统一色谱分析的指导性判断导则或标准。因有载分接开关油箱较小,不同类型不同厂家绝缘油量限值存在差异,如 VCM 型真空有载分接开关数值分析得到的限值为 $9.6\text{ }\mu\text{L/L}$,而有些厂家给出的建议是 $100\text{ }\mu\text{L/L}$,规程 DL/T 574—2021 所定义的是 $40\text{ }\mu\text{L/L}$,限值差别很大,故而需要结合具体设备类型进行细致分析,并开展深入研究。

IEEE C57.139 指南给出的参考标准:乙炔的绝对浓度如若大于 $50\text{ }\mu\text{L/L}$,则表示放电非常严重;同时推荐每次操作产气速率注意值乙炔为 $0.5\sim 1.0\text{ }\mu\text{L/L/次}$,如果持续超过此值并呈上升趋势,则强烈预示内部存在如触头烧蚀、真空泡泄漏等故障,故而需要跟设备型号建立基准线;对于真空开关, H_2 的每次操作产气速率注意值可能比乙炔更高一些,同样需要建立基线;一个突然的、数倍于基线的增长就是异常信号。以下结合国内国外的标准进行综合分析。

3.5 数据分析

总溶解加热气体(TDHG)是甲烷、乙烷和乙烯的总含量之和,也可用作异常热条件的指标;像各个加热气体浓度一样,TDHG 可以按比例使用,这样就增加了利用比例进行分析的可能。

对网内 8 台不同厂家故障真空有载分接开关的色谱数据进行分析,发现有些设备的乙炔超标准,有些不超标准但解体后均存在问题,也就说明用单一气体作为评判设备故障分析能力不足。参考 IEEE C57.139 指南进行氢气与总溶解加热气体之比(H_2/TDHG)的计算,发现故障设备接近或大于 0.7,特别是故障设备 8 的超标情况更为严重,因此在乙炔含量较低、不方便计算增长率情况下对上海华明(287 组)和贵州长征(234 组)的色谱数据中进行氢气与总溶解加热气体之比(H_2/TDHG)计算,发现上海华明和贵州长征的 H_2/TDHG 均为 0.77,故而把该值作为真空有载分接开关的警示值。依托这一警示值,反推不同型号真空有载分接开关的阈值。具体信息见表 1。

表 1 故障设备色谱分析

项目	$\text{H}_2(\mu\text{L/L})$	$\text{CH}_4(\mu\text{L/L})$	$\text{C}_2\text{H}_4(\mu\text{L/L})$	$\text{C}_2\text{H}_6(\mu\text{L/L})$	$\text{C}_2\text{H}_2(\mu\text{L/L})$	$\text{H}_2(\text{TDHG})$
故障设备 1	169.2	96.5	137	16.4	923.8	0.68
故障设备 2	92.56	66.65	50.45	0	172.8	0.79
故障设备 3	102.67	43.07	21.26	1.43	76.62	1.56
故障设备 4	124.79	90.7	26.07	2.42	229.28	1.05
故障设备 5	65.1	23	2.6	0.4	18.5	2.50
故障设备 6	194.22	16.32	19.78	0.47	80.98	5.31
故障设备 7	234	63.89	27.01	1.52	158.7	2.53
故障设备 8	19.2	2.1	1	0	13.2	6.19
上海华明	234.9	287.9	13.6	4.7	1.38	0.77
贵州长征	172.2	203.5	16.1	3.6	3.98	0.77

按照厂家型号归类,对在运真空有载分接开关绝缘油故障特征气体进行数据分析,基于四分位法和概率百分位进行值进行综合分析,参考样本真空有载分接开关的乙炔浓度约 90% 为 0,且计算 U_2 值亦为 0,故而参考“真空有载分接开关油中溶解气体限值研究与应用”中的方法对 C_2H_2 体积分数大于 U_2 的数据进行二次分析;最终推荐贵州长征 ZVM 型真空有载分接开关乙炔的故障预警值为 $3.83\text{ }\mu\text{L/L}$, H_2/TDHG 为 1.03;VM 型真空有载分接开关乙炔的故障预警值为 $15.4\text{ }\mu\text{L/L}$, H_2/TDHG 为 0.59;上海华明 SHZV 型真空有载分接开关乙炔的故障预警值为 $10.2\text{ }\mu\text{L/L}$, H_2/TDHG 为 1.21;华明 VCM 型真空有载分接开关乙炔的故障预警值为 $30.8\text{ }\mu\text{L/L}$, H_2/TDHG 为 0.74;建议结合样本数据取样和分析方法进行深度细致分析。具体信息见表 2。

表 2 不同厂家型号的告警值

厂家型号	H_2 $(\mu\text{L/L})$	CH_4 $(\mu\text{L/L})$	C_2H_4 $(\mu\text{L/L})$	C_2H_6 $(\mu\text{L/L})$	$\text{C}_2\text{H}_2(\mu\text{L/L})$ (二次分析)	H_2/TDHG	乙炔告警值(厂家建议) $(\mu\text{L/L})$
贵州长征 ZVM 型(样本 156)	181.43	174.04	11.40	4.41	3.83	1.03	5
贵州长征 VM 型(样本 78)	183.8	300.9	15.7	4.3	15.4	0.59	10
华明 SHZV (样本 77)	347.3	275.9	16.1	4.4	10.2	1.21	20
华明 VCM (样本 210)	227.6	285.7	12.6	3.0	30.8	0.74	100

4 结语

在文中数据分析的基础上,结合中外标准和文献对试验数据分析处理,提出如下建议:

1) 绝缘油采样频率应基于设备运行状态进行动态调整,核心原则为“风险导向,差异化监测”,数据异常时须大幅缩短周期以追踪故障,严重时需周级加密采样;推荐采用 GC-MS 法作为真空型有载分接开关溶解气体分析的检测方法。

2) 数据预处理需确保样本群体一致性与可比性,应选取不少于30台同型或结构相近开关的色谱数据,并考虑制造工艺、仪器差异,进行误差补偿;同时需控制负荷波动、统一油温等运行参数,以消除气体溶解与逸散行为差异,保证数据准确可比、统计可靠。

3) 真空有载分接开关油色谱分析推荐采样操作产气速率基线比较,同时研究提出以 $H_2/TDHG$ 比值作为故障警示值,并据此推导出不同型号开关色谱分析数据的预警阈值,实现更精准的状态评估与故障诊断。

参考文献:

[1] 张德明. 变压器真空有载分接开关 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.

[2] 荀华、郭红兵. 一起油浸式真空有载分接开关绝缘油色谱异常分析[J]. 山西电力, 2020(01): 37-41.

[3] IEEE Power and Energy Society. IEEE Guide for Dissolved Gas Analysis in Transformer Load Tap Changers: IEEE Std C57.139TM-2015 [S]. USA New York: Sponsored by the Transformers Committee. 2015.

[4] 国家能源局. 输变电设备状态检修试验规程: DL/T 393—2021[S]. 北京: 中国电力出版社, 2022.

[5] 国家能源局. 电力变压器用真空有载分接开关使用导则: DL/T 1538—2016 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.

[6] 国家能源局. 电力变压器分接开关运行维修导则: DL/T 574—2021 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2021.

[7] 张志广, 孟建英, 郭红兵. 真空有载分接开关油中溶解气体限值研究与应用[J]. 内蒙古电力技术, 2020.38(03): 70-73.

(上接第19页)

参考文献:

[1] 钱丽莹, 徐昊. 电力系统继电保护三误常见问题研究[J]. 电气技术与经济, 2023(08): 280-282.

[2] 夏东升, 马宏忠, 刘宝稳, 等. 基于DSP和ARM的便携继电保护测试仪设计[J]. 自动化仪表, 2016, 37(05): 90-95.

[3] 侯建武, 姜天岳, 范瑞凝, 等. 一种新型继电保护测试仪设计[J]. 中国科技信息, 2023(06): 83-85.

[4] 李熙芸, 覃云奕, 宋益, 等. 基于国产核心芯片的单兵继电测试设备设计[J]. 长江信息通信, 2022, 35(01): 87-91.

[5] 穆石磊, 刘建锋, 江玉蓉, 等. 基于PSCAD故障数据的数字继电保护测试仪设计[J]. 上海电力学院学报, 2016, 32(02): 6.

[6] 王浩, 李刚, 张鹏. 双向TVS二极管在继电保护设备过压防护中的应用[J]. 电力电子技术, 2024, 58(03): 142-145.

[7] 张伟, 刘敏, 赵亮. 变电站弱电回路抗干扰设计与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(02): 189-194.

[8] 陈洋, 周明, 吴涛. 继电保护测试仪常用防护方案的性能对比[J]. 电气应用, 2024, 43(07): 98-102.

(上接第23页)

参考文献:

[1] 高磊, 闫培丽, 阮思烨, 等. 基于相似度计算的学习型模板库在虚回路设计和校验中的应用[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(07): 205-212.

[2] 张锋, 张朔严, 乔利红, 等. 基于知识图谱的变电站配置文件智能校核技术研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(04): 64-72.

[3] 王文琪, 胡炎, 赵娜, 等. 基于距离权重向量优化模型的虚端子自动连接方法[J]. 电网技术, 2018, 42(01): 346-352.

[4] 范卫东, 冯晓伟, 董金星, 等. 基于历史数据语义相似度的

智能变电站虚端子自动连接[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(17): 179-186.

[5] 牛健, 刘海涛, 赫嘉楠, 等. 基于规则库的SCD文件虚回路隐患自动核查技术[J]. 河北电力技术, 2023, 42(06): 48-52.

[6] 李腾, 吕飞鹏, 王星宇, 等. 基于烟花算法计算莱文斯坦距离权重的虚端子自动连接方法[J]. 电测与仪表, 2023, 60(11): 90-94.

[7] 史卓鹏, 孔祥敏, 魏佳红, 等. 基于K-近邻加权算法的智能站虚端子自匹配方法[J]. 计算机科学, 2025, 52(增刊1): 353-358.

[8] Jianfu Bai, Yifei Li, Mingpo Zheng, et al. A sinh cosh optimizer[J]. Knowledge-based systems, volume 282, 2023, 111081, ISSN 0950-7051.