



شرکت الوند توان انرژی

ترجمه استاندارد (2007) IEC60599:

راهنمای تحلیل نتایج آزمون گازهای محلول و آزاد روغن

تجهیزات الکتریکی در حال بهره برداری



مترجم:

آرش آقائی فر

بهمن 1391

فهرست مطالب

صفحه	موضوع
1	مقدمه
2	(1) دامنه کاربرد
2	(2) منابع و مأخذ
2	(3) تعاریف و اختصارات
5	(4) مکانیزم شکل گیری گاز
6	(5) شناسایی خطا
10	(6) شرایط لازم برای محاسبه نسبتها
14	(7) نحوه تحلیل گازهای آزاد موجود در رله بوخهلتز
16	(8) روش تحلیل مقادیر گازهای محلول در روغن (شکل چهار)
16	(9) گزارش نتایج

مقدمه

آنالیز گازهای محلول و آزاد روغن یکی از پرکاربردترین روشهای عیب یابی جهت شناسایی و ارزیابی خطا در تجهیزات الکتریکی می باشد. هرچند تحلیل نتایج گازهای محلول در روغن غالباً پیچیده بوده و باید با دقت بسیار و توسط متخصصین باتجربه و آشنا به مسائل سرویس و نگهداری عایقها صورت گیرد.

راهنمایی که در دست دارید اطلاعات لازم را برای تسهیل نمودن فرآیند تحلیل ارائه می نماید. گرچه اولین ویرایش این راهنما که در سال 1978 به چاپ رسید، کمکههای فراوانی به صنعت نمود لیکن محدودیتهای خاص خود را داشت. عدم شناسایی عیب در برخی از موارد، فقدان سطوح گاز و این واقعیت که راهنما بیشتر براساس تجارب حاصله از ترانسفورماتورهای قدرت بود را می توان بعنوان نمونه ای از محدودیتهای ذکر نمود. در چاپ دوم تلاش براین بوده است که این نواقص رفع شوند. روشهای تحلیل براساس تجارب بدست آمده از بازرسی تعداد زیادی تجهیز روغنی دچار حادثه شده و سطوح گازها از نتایج آزمونهای جمع آوری شده از سرتاسر دنیا، بدست آمده است.

تجهیزات الکتریکی در حال بهره برداری پرشده با روغن معدنی:

راهنمای تحلیل نتایج آزمون گازهای محلول و آزاد روغن

(1) دامنه کاربرد

این استاندارد بین المللی راهنمایی است که نشان می دهد چگونه می توان با استفاده از مقادیر گازهای محلول یا آزاد موجود در روغن، وضعیت تجهیزات الکتریکی در حال بهره برداری را شناسایی و اقدامات آتی را پیشنهاد نمود. این راهنما برای کلیه تجهیزات الکتریکی پرشده از روغن معدنی با سیستم عایقی متشکل از کاغذ سلولزی یا تخته فشرده قابل استفاده است. اطلاعات مربوط به یک نوع خاص از تجهیز مانند ترانسفورماتور (توزیع، قدرت، اندازه گیری، حمل و نقل و...) راکتور، بوشینگ، سوئیچگیر و کابل روغنی تنها بعنوان راهنمایی در ضمیمه الف ذکر شده است. در صورت استفاده از این راهنما برای سایر سیستمهای عایقی جامد/مایع باید احتیاط نمود. در هر صورت مطالب مطرح شده در این استاندارد باید بصورت راهنما ارائه شده و اقدامات لازم باید با توجه به قضاوت مهندسی مناسب صورت گیرد.

(2) منابع و مأخذ

استانداردهای ذیل جزء لاینفک استاندارد حاضر می باشند. برای مراجعی که تاریخ آن ذکر شده است، ویرایش همان تاریخ معتبر است. کلیه استانداردها ممکن است در ویرایشهای آتی اصلاح شوند و از کلیه افرادی که این استانداردهای بین المللی مبنای توافقات خود قرار می دهند، درخواست می شود از آخرین تغییرات استانداردهای ذکر شده در ذیل اطمینان حاصل کنند.

عنوان	تاریخ انتشار	استاندارد
لغتنامه بین المللی الکتروتکنیک - فصل 191: قابلیت اطمینان و کیفیت سرویس	1990	IEC60050(191)
لغتنامه بین المللی الکتروتکنیک - فصل 212: عایقهای جامد، مایع و گاز	1990	IEC60050(212)
لغتنامه بین المللی الکتروتکنیک - فصل 604: تولید، انتقال و توزیع برق - بهره برداری	1987	IEC60050(604)
راهنمای نمونه برداری از گاز و روغن در تجهیزات الکتریکی روغنی جهت آزمون گازها محلول و آزاد	1992	IEC60567
روغنهای عایقی معدنی: روشهای اندازه گیری 2-فورفورال و ترکیبات مرتبط	1993	IEC61198

(3) تعاریف و اختصارات

(1-3) تعاریف

واژه های مورد استفاده در این استاندارد مطابق ذیل و براساس استانداردهای IEC60050(191)، IEC60050(212) و IEC60050(604) تعریف می شوند:

(1-1-3) خطا

حادثه یا نقص ناخواسته یک مورد که می تواند منجر به خرابی مورد یا تجهیزات وابسته شود. توجه: در تجهیزات الکتریکی، خطا می تواند منجر به آسیب عایقی و خرابی تجهیز بشود یا نشود.

(2-1-3) خطای غیرمخرب

خطایی که منجر به عملیات تعمیر یا تعویض نمی شود.

توجه: بعنوان نمونه می توان به جرقه های خود خاموش شونده در تجهیزات قطع و وصل کننده یا اضافه حرارت بدون کربونیزاسیون روغن اشاره نمود.

3-1-3) خطای مخرب

خطایی که منجر به عملیات تعمیر یا تعویض نمی شود.

4-1-3) حادثه

خطای داخلی که بصورت موقت یا دائمی موجب اختلال در بهره برداری نرمال تجهیز می شود.

توجه: بعنوان نمونه می توان به آلامر گاز، فرمان قطع تجهیز یا نشتی تجهیز اشاره نمود.

5-1-3) خرابی

عدم توانایی تجهیز در انجام وظایف مورد انتظار می باشد.

توجه: خرابی در تجهیزات الکتریکی ناشی از خطای مخرب یا حادثه بوده و منجر به خروج از مدار، تعمیر یا تعویض تجهیز می شود. بعنوان نمونه می توان به شکست داخلی، ترکیدن مخزن، آتش سوزی یا انفجار اشاره نمود.

6-1-3) خطای الکتریکی

تخلیه جزئی یا جرقه ای در طول عایق می باشد.

7-1-3) تخلیه جزئی

تخلیه ای که تنها در بخشی از عایق بین دو هادی را اتصال کوتاه می کند. این پدیده می تواند داخل عایق یا در مجاورت هادی رخ دهد.

توجه 1: کرونا نوعی از تخلیه جزئی بوده که در فضای گازی اطراف هادیهای رخ می دهد که از عایق جامد یا مایع دور هستند. از این واژه نباید برای کلیه اشکال تخلیه جزئی استفاده نمود.

توجه 2: X-واکس مواد جامدی است که بر اثر تخلیه الکتریکی از روغن عایقی معدنی حاصل شده و از بخشهای پلیمریزه شده مولکولهای مایع اصلی تشکیل می شود. ترکیبات قابل مقایسه ای ممکن است در سایر مایعات تحت شرایط مشابه بوجود آید.

توجه 3: جرقه با انرژی کم، مانند جرقه بدلیل وجود ذرات فلزی معلق را گاهی اوقات تخلیه جزئی می نامند. لیکن بهتر است آنرا بعنوان تخلیه با انرژی کم در نظر گرفت.

8-1-3) تخلیه (جرقه ای)

منظور ایجاد جرقه پس از شکست عایقی می باشد.

توجه 1: تخلیه معمولاً با عناوین جرقه، شکست یا اتصال کوتاه تعریف می شود. همچنین از واژه های ذیل نیز استفاده می گردد:

- Sparkover: جرقه از میان روغن
- Puncture: تخلیه بر روی عایق جامد
- Flashover: تخلیه در سطح عایق جامد

- Tracking: تخریب فزاینده سطح عایق جامد بوسیله تخلیه داخلی که منجر به تشکیل سطوح رسانا یا نیمه رسانا می شود.
- Sparking Discharges: که در فیزیک به شکستهای عایقی با چگالی یونیزاسیون زیاد یا جرقه های کم اطلاق می شود.
- توجه 2: بسته به میزان انرژی موجود در جرقه و میزان تخریب مشاهده شده در تجهیز، جرقه را با انرژی کم یا انرژی زیاد می نامند. (بند 5-2 ملاحظه شود)
- 9-1-3 خطای حرارتی
- افزایش زیاد دمای عایق می باشد.
- توجه: دلایل عمده عبارتند از:
 - خنک شوندگی ناکافی
 - اضافه جریانهای گردشی در قطعات فلزی مجاور (ناشی از اتصالات ضعیف، جریانهای گردابی، تلفات پراکندگی یا شار نشتی)
 - اضافه جریانهای گردشی در عایق (ناشی از تلفات عایقی زیاد)، که منجر به فرار حرارتی می شود.
 - اضافه حرارت سیم پیچ داخلی یا اتصالات بوشینگ
- 10-1-3 مقادیر نرمال گاز
- در تجهیزات در حال بهره برداری معمولاً مقادیری گاز یافت می شود بدون آنکه نشانه ای از خطا وجود داشته باشد. این مقادیر گاز تنها ممکن است با درصد اختیاری گاز بالاتر (بعنوان مثال 10 درصد) افزایش یابند. (بند 8-2-1 ملاحظه شود)
- توجه 1: مقادیر نرمال بسته به شرایط بهره برداری (سطح بار، شرایط آب و هوایی و ...) در تجهیزات و شبکه های مختلف متفاوت هستند.
- توجه 2: مقادیر نرمال در بسیاری از کشورها و توسط بسیاری از بهره برداران بعنوان «مقادیر مناسب» تلقی می شود. به منظور اجتناب از تفسیر نادرست از این واژه در این استاندارد استفاده نشده است.

2-3) اختصارات

1-2-3) فرمولها و نامهای شیمیائی

فرمول	نام
N ₂	نیتروژن
O ₂	اکسیژن
CO	مونواکسید کربن
CO ₂	دی اکسید کربن
CH ₄	متان
C ₂ H ₆	اتان
C ₂ H ₄	اتیلن
C ₂ H ₂	استیلن

2-2-3) علائم اختصاری عمومی

DGA : تحلیل گازهای محلول در روغن

CIGRE : انجمن سیگره

S : حد تشخیص تحلیلی

4) مکانیزم تشکیل گاز

1-4) تجزیه روغن

روغن عایقی معدنی از ترکیب مولکولهای مختلف هیدروکربن حاوی گروههای شیمیائی CH_3 ، CH_2 و CH که با پیوند مولکولی کربن-کربن در کنار یکدیگر قرار گرفته اند، بوجود آمده است. برخی از پیوندهای C-H و C-C ممکن است بدلیل خطاهای الکتریکی و حرارتی گسسته شوند. در پی این گسست ترکیبات ناپایداری به صورت رادیکال یا یون مانند H^{\bullet} ، CH_3^{\bullet} ، CH_2^{\bullet} ، یا C^{\bullet} (بهمراه سایر ترکیبات پیچیده تر) بوجود آمده که در طی واکنشهای پیچیده سرعت با یکدیگر ترکیب شده و مولکولهای گازی مانند هیدروژن (H-H)، متان (CH_3-H)، اتان (CH_3-CH_3)، اتیلن ($CH_2=CH_2$) یا استیلن ($CH \equiv CH$) تشکیل می دهند. گازهای هیدروکربن C_3 و C_4 به همراه ذرات جامد کربن و پلیمرهای هیدروکربن (X واکس) سایر ترکیبات محتمل می باشند. گازهای بوجود آمده در روغن حل شده یا در صورتی که در مقادیر زیاد تولید شوند بصورت گاز آزاد در می آیند. این گازها را می توان مطابق استاندارد IEC60567 اندازه گیری نمود.

خطاهای با انرژی کم مانند تخلیه جزئی از نوع پلاسمای سرد (تخلیه کرونا)، موجب گسست ضعیف ترین پیوندها یعنی C-H ($338kJ/Mole$) می شوند. این گسست از طریق واکنشهای یونیزاسیون و تولید هیدروژن بعنوان گاز اصلی اتفاق می افتد. برای شکستن پیوندهای C-C انرژی و/یا دمای بالاتری مورد نیاز است. در این حالت ترکیباتی با پیوند تک گانه کربن ($607kJ/Mole$)، پیوند دوگانه کربن ($720kJ/Mole$)، یا پیوند سه گانه کربن ($960kJ/Mole$) به همراه فرآیندهای مشابه شکست روغن در صنعت پتروشیمی بوجود می آید.

در نتیجه اتیلن در دماهای تقریباً بالای 500 درجه سانتیگراد بیشتر از اتان و متان تولید می شود (هرچند اتان در دماهای پائینتر نیز به مقدار کمتر تولید می شود). به منظور تولید استیلن درجه حرارت باید حداقل بین 800 تا 1200 درجه سانتیگراد بوده و دما مرتباً به مقادیر پائینتر افت کند تا این گاز بصورت پایدار تشکیل شود. از اینرو استیلن بیشتر در حالت جرقه که دمای کانالهای یونیزه هادی به چند هزار درجه سانتیگراد رسیده و سطح تماس آن با روغن اطراف پائینتر از 400 درجه سانتیگراد بوده (بیشتر از این دما روغن تبخیر می شود) و یک لایه بخار روغن/گاز در بین این دو سطح قرار دارد، تشکیل می شود. استیلن همچنین ممکن است در دماهای پائین (کمتر از 800 درجه سانتیگراد) نیز بوجود آید هرچند مقدار آن بسیار کم است. ذرات کربن در درجه حرارت بین 500 تا 800 درجه تشکیل شده و پس از ایجاد جرقه یا در اطراف نقاط بسیار داغ در روغن بوجود می آید.

روغن در صورت اکسید شدن مقادیر کمی مونواکسید و دی اکسید کربن تولید می نماید که در طول زمان مقدار آنها قابل توجه می شود.

2-4) تخریب عایق سلولزی

زنجیره های پلیمری عایق سلولزی جامد (کاغذ، تخته فشرده و تیرکهای چوبی) مقادیر زیادی حلقه های آنهیدروگلوکز و پیوندهای ضعیف مولکولی C-O و پیوندهای گلیکو اسید دارند که از پیوندهای هیدروکربنی روغن ناپایدارتر بوده و در دماهای پائین تجزیه می شوند. بیشتر گسست زنجیره های پلیمر در درجه حرارت های بالاتر از 105 درجه سانتیگراد اتفاق افتاده درحالیکه در دماهای بالاتر از 300 درجه سانتیگراد تجزیه کامل و کربونیزاسیون اتفاق می افتد. با گسست زنجیره های پلیمری، مونواکسید کربن، دی اکسید کربن و آب، به مقدار بیشتری در مقایسه با اکسیداسیون روغن در همان دما، بوجود آمده و همچنین مقادیر کمی گازهای هیدروکربن و ترکیبات فوران تولید می شوند. ترکیبات فوران را می توان مطابق استاندارد IEC61198 اندازه گیری نموده و آنرا به همراه تحلیل گازهای محلول در روغن جهت شناسایی اینکه آیا عایق سلولزی در خطای بوجود آمده نقش دارد یا نه مورد استفاده قرار داد. میزان تولید مونواکسید کربن و دی اکسید کربن نه تنها با دما بلکه با مقدار اکسیژن روغن و رطوبت کاغذ نسبت مستقیم دارد.

3-4) سایر منابع تولید گاز

گازها در برخی موارد نه بدلیل وجود خطا در تجهیز بلکه به علت زنگ زدگی یا سایر ترکیبات شیمیایی بوجود آمده بر روی آهن، سطوح بدون پوشش یا رنگ محافظ بوجود می آیند. هیدروژن ممکن است بر اثر ترکیب آهن با آب، مادامیکه اکسیژن در روغن وجود داشته باشد، تشکیل شود. از اینرو مقادیر زیاد هیدروژن در ترانسفورماتورهایی که برقدار نشده اند، گزارش شده است. هیدروژن همچنین ممکن است بر اثر واکنش آب آزاد با پوشش مخصوص روی سطوح فلزی یا بر اثر واکنشهای کاتالیزوری برخی از انواع فولاد ضد زنگ با روغن (بوئزه روغن حاوی اکسیژن محلول در دمای بالا) بوجود آید. هیدروژن همچنین ممکن است در طی پروسه ساخت یا بر اثر جوشکاری در فولاد ضد زنگ بوجود آمده و به تدریج در روغن آزاد شود. هیدروژن همچنین ممکن است بر اثر تجزیه نوار باریک روغن بین لایه های هسته داغ شده در دمای 140 درجه سانتیگراد و بیشتر تولید شود.

همچنین گازها ممکن است هنگام قرار گرفتن روغن در معرض آفتاب یا در زمان تعمیر تجهیز بوجود آیند. رنگهای داخلی ترانسفورماتور مانند رزینهای آلکیدی و پلی ارتانها حاوی اسیدهای چربی هستند که می توانند گاز تشکیل دهند.

با این وجود اتفاقات فوق الذکر بسیار غیر معمول بوده و می توان آنرا با اجرای آزمون گازهای محلول در روغن در ترانسفورماتور کارنکرده که هیچگاه برقدار نشده است و آزمونهای سازگاری مواد شناسایی نمود. حضور هیدروژن در غیاب سایر گازهای هیدروکربن نشانه ای از این مسئله می تواند باشد.

توجه: مسئله گازهای باقیمانده در روغن ترانسفورماتور از خطای قبلی در بند 3-5 بررسی خواهد شد.

5) شناسائی خطا

تشکیل هر گازی در طول بهره برداری حتی اگر مقدار آن کم باشد ناشی از نوعی تنش است، حتی اگر بسیار کوچک باشد (مانند پیری در درجه حرارت نرمال). هرچند تا زمانی که نرخ تولید گاز کمتر از مقادیر نرمال باشد، نباید آنرا بعنوان «خطا» تلقی نمود بلکه آنرا «تولید گاز نرمال» در نظر می گیریم.

5-1) ترکیبات گازهای محلول

گرچه تولید برخی از گازها با توجه به درجه حرارت یا انرژی موجود در خطا (بند 4-1 ملاحظه شود) بیشتر از گازهای دیگر صورت می گیرد، لیکن همواره ترکیبی از گازهای مختلف همواره در روغن موجود می آید. دلیل این مسئله قواعد ترمودینامیکی است که براساس آن گرچه تولید یک گاز مرجح است لیکن گازهای دیگر هرچند در مقادیر کم بازهم تولید می شوند. مدل‌های ترمودینامیکی بدست آمده از صنعت پتروشیمی نمی تواند بطور دقیق ترکیب گازهای موجود آمده در روغن را پیش بینی کند چراکه این مدلها معادل شرایط ایده آل تعادل گاز/دما بوده که این شرایط در خطاهای واقعی وجود ندارند. همچنین درعمل اختلاف دمائی شدید نیز مثلاً بعلت گردش روغن یا تبخیر در سطوح داغ، بوجود می آید. این مورد بویژه در حالت جرقه شدید که حرارت شدیدی را به لایه بخار روغن/گاز تجزیه شده بین جرقه و روغن منتقل می کند، صدق می کند. این مسئله افزایش در میزان اتیلن در مقایسه با استیلن را توجیه می کند. بعلاوه مدل‌های ترمودینامیکی موجود شامل کاغذ که در درجه حرارتهای بالاتر از 300 درجه سانتیگراد به صورت برگشت ناپذیر به کربن تبدیل می شود، نمی باشد.

5-2) انواع خطا

بازرسی داخلی صدها تجهیز صدمه دیده، طبقه بندی خطاهای قابل مشاهده را مطابق ذیل حاصل نموده است:

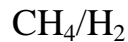
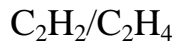
- تخلیه جزئی (PD) از نوع پلاسمای سرد (کرونا) که موجب تجمع احتمالی X-واکس در عایق کاغذی می شود یا از نوع جرقه ای که موجب سوراخ شدن کاغذ می شود که یافتن آن دشوار است.
- تخلیه با انرژی کم (D1) در روغن و/یا کاغذ که نشانه آن کربونیزاسیون در سطح و داخل کاغذ یا ذرات کربن در روغن (مانند روغن دایورتر سوئیچ) می باشد.
- تخلیه با انرژی زیاد (D2) در روغن و/یا کاغذ که نشانه آن تخریب گسترده و کربونیزاسیون کاغذ، ذوب فلز در ابتدا و انتهای محل تخلیه، کربونیزاسیون گسترده در روغن و در برخی موارد خارج شدن دستگاه از مدار به همراه جریان زیاد می باشد.
- خطاهای حرارتی در روغن و/یا کاغذ اگر رنگ کاغذ مایل به قهوه ای شده باشد دما کمتر از 300 درجه سانتیگراد بوده (T1) و اگر کربونیزه شده باشد دمای آن بالای 300 درجه سانتیگراد می باشد. (T2)
- خطاهای حرارتی بالاتر از 700 درجه سانتیگراد (T3) که نشانه آن کربونیزاسیون روغن، تغییر رنگ فلز (800 درجه سانتیگراد) و ذوب فلز (بیشتر از 1000 درجه سانتیگراد) می باشد.

جدول یک: اختصارات

تخلیه جزئی	PD
تخلیه با انرژی کم	D1
تخلیه با انرژی زیاد	D2
خطای حرارتی کمتر از 300 درجه سانتیگراد	T1
خطای حرارتی بین 300 تا 700 درجه سانتیگراد	T2
خطای حرارتی بیشتر از 700 درجه سانتیگراد	T3

3-5) نسبت‌های اساسی گاز

هریک از شش دسته خطا را می‌توان با توجه به ترکیب گازهای هیدروکربن و جدول تحلیل گازهای محلول در روغن شناسایی نمود. نمونه از این تحلیل در جدول دو ذکر شده است که مبنای آن سه نسبت اساسی ذیل است:



جدول دو به کلیه تجهیزات، با پاره ای تغییرات در حدود نسبت گاز با توجه به نوع تجهیز، قابل اعمال است.

جدول دو: تحلیل گازهای محلول در روغن

نوع خطا	شرح خطا	C_2H_2/C_2H_4	CH_4/H_2	C_2H_4/C_2H_6
PD	تخلیه جزئی (بندهای 3 و 4 ملاحظه شود)	تاثیری ندارد ¹	< 0/1	< 0/2
D1	تخلیه با انرژی کم	> 1	0/1-0/5	> 1
D2	تخلیه با انرژی زیاد	0/6-2/5	0/1-1	> 2
T1	خطای حرارتی کمتر از 300 درجه سانتیگراد	تاثیری ندارد ¹	> 1 لیکن تاثیری ندارد ¹	< 1
T2	خطای حرارتی بین 300 تا 700 درجه سانتیگراد	< 0/1	> 1	1-4
T3	خطای حرارتی بیشتر از 700 درجه سانتیگراد	< 0/2 ²	> 1	> 4
توجه:				
الف) در برخی از کشورها بجای نسبت CH_4/H_2 از نسبت C_2H_2/C_2H_6 استفاده می‌شود. همچنین در برخی از کشورها حدود نسبت‌های مورد استفاده کمی متفاوت می‌باشد.				
ب) نسبت‌های فوق بسیار مهم بوده و تنها زمانی باید محاسبه شوند که حداقل یکی از گازها یا مقدار رشد آن بیشتر از مقادیر نرمال باشد.				
پ) حد نسبت $CH_4/H_2 < 0/2$ برای تخلیه جزئی در ترانسفورماتورهای اندازه گیری و حد نسبت $CH_4/H_2 < 0/07$ برای تخلیه جزئی در بوشینگ مورد استفاده قرار می‌گیرد.				
پ) تجزیه گاز مشابه تخلیه جزئی بر اثر تجزیه نوار باریک روغن بین لایه های هسته در دمای بالاتر از 140 درجه سانتیگراد مشاهده شده است (بند 3-4 ملاحظه شود)				
پانویس:				
1) این نسبتها هرچه باشد تاثیری در تحلیل ندارند.				
2) افزایش مقدار استیلن ممکن است نشاندهنده درجه حرارت نقطه داغ بیشتر از 1000 درجه سانتیگراد باشد.				

در جدول دو بین خطاهای D1 و D2 همپوشانی وجود دارد بدین معنی که در برخی موارد هنگام تحلیل نتایج گازهای محلول در روغن باید به هر دو نوع خطا اشاره نمود. تفاوت بین این دو خطا که میزان انرژی موجود در تخلیه می‌باشد می‌تواند در میزان تخریب احتمالی بر تجهیز موثر بوده و اقدامات پیشگیرانه متفاوتی را الزامی سازد.

توجه: در صورتی که نسبت گازها خارج از محدوده جدول دو بوده و خطای مشخصی را نتوان از روی این جدول استنتاج نمود، می‌بایست آنرا ترکیبی از خطاها یا خطای جدید ترکیب شده با مقادیر زیاد گاز پیش زمینه تحلیل نمود. در این حالت نمی‌توان با استفاده از جدول دو خطایابی نمود لیکن با استفاده از نمودارهای گرافیکی بند 5-9 می‌توان نزدیکترین خطا را شناسایی کرد.

همچنین در این حالت استفاده از جدول سه برای تمیز تقریبی بین تخلیه جزئی، تخلیه و خطای حرارتی بهتر از عدم شناسایی عیب است.

جدول سه: تحلیل ساده شده نسبت گازها

C_2H_4/C_2H_6	CH_4/H_2	C_2H_2/C_2H_4	نوع خطا
	$<0/2$		PD
		$>0/2$	D
		$<0/2$	T

نسبت CO_2/CO (4-5)

با افزایش دما، دی اکسید کربن و مونواکسید کربن از کاغذ آغشته به روغن تولید می شوند. نسبت (تصحیح شده) CO_2/CO کمتر از سه معمولاً نشاندهنده وجود خطا در کاغذ و کمی کربونیزاسیون می باشد.

به منظور دستیابی به نسبت قابل اطمینان CO_2/CO در تجهیز مقادیر دی اکسید کربن و مونواکسید کربن باید با توجه به دی اکسید کربن جذب شده از محیط و مقادیر قبلی این دو گاز ناشی از پیری سلولز، اضافه حرارت تیرکهای چوبی و اکسیداسیون طولانی مدت روغن تصحیح شوند. (بند 6-1 و 9 ملاحظه شود) اکسیداسیون روغن بشدت تحت تاثیر میزان اکسیژن موجود بر اثر نحوه طراحی و بهره برداری از تجهیز می باشد.

بعنوان مثال تجهیزات تنفس کننده ای که حدود 10% هوای محلول در روغن داشته باشند، تا $300 \mu l/l$ گاز دی اکسید کربن دارند. در تجهیزاتی بسته، هوا از طریق نشتی های موجود وارد تجهیز شده و میزان دی اکسید کربن متناسب با هوای وارد شده است.

زمانیکه به تخریب کاغذ مشکوک هستید (CO_2/CO کمتر از سه باشد) توصیه می شود ترکیبات فوران تست شده یا در صورت امکان، درجه پلیمریزاسیون نمونه کاغذ اندازه گیری شود.

نسبت O_2/N_2 (5-5)

بدلیل تماس مستقیم روغن با هوا در منبع انبساط تجهیزات تنفس کننده یا بدلیل وجود نشتی در تجهیزات بسته، اکسیژن و نیتروژن بصورت محلول در روغن یافت می شود. در حالت تعادل و با در نظر گرفتن حلالیت اکسیژن و نیتروژن، نسبت O_2/N_2 تقریباً مشابه نسبت این گازها در هوا بوده و نزدیک 0/5 است.

در طول بهره برداری این نسبت در نتیجه اکسیداسیون روغن و/یا پیری کاغذ کاهش می یابد بشرطی که سرعت مصرف اکسیژن بیشتر از سرعت نفوذ آن به روغن باشد. عواملی مانند بار و سیستم حفاظتی تجهیز نیز بر این نسبت تاثیرگذار است لیکن نسبت کمتر از 0/3 را می توان نشاندهنده مصرف زیاد اکسیژن فرض کرد.

نسبت C_2H_2/H_2 (6-5)

کارکرد تپ چنجر تحت بار در ترانسفورماتورهای قدرت گازهایی را تولید می کند که متناسب با خطای تخلیه با انرژی کم (D1) است. اگر امکان ارتباط روغن یا گاز بین محفظه دایورتر سوئیچ تپ چنجر و مخزن اصلی ترانسفورماتور یا بین منابع انبساط ایندو وجود داشته باشد، ممکن است این گازها به روغن مخزن اصلی منتقل شده و تحلیل را دچار خطا کنند. هرچند روند تولید گاز در تپ چنجر مخصوص به خود بوده و با خطای تخلیه با انرژی کم در مخزن اصلی متفاوت است. نسبت C_2H_2/H_2 بیشتر از 2 تا 3 در مخزن اصلی می تواند نشاندهنده نشت روغن دایورتر به روغن مخزن اصلی باشد. این موضوع را می توان با مقایسه مقدار گازهای محلول در روغن مخزن اصلی، دایورتر سوئیچ و منابع انبساط با یکدیگر اثبات نمود.

توجه: در صورتیکه به نشت روغن از تپ چنجر به ترانسفورماتور مشکوک هستید، تحلیل گازهای محلول در روغن ترانسفورماتور را باید با دقت زیاد و کم نمودن مقادیر گازهای وارد شده از تپ چنجر از گازهای مخزن اصلی، انجام داده یا بطور کلی از انجام آن بدلیل غیر معتبر بودن صرفنظر نمایید.

5-7) هیدروکربنهای C_3

روش تحلیل گازها که در فوق به آن اشاره شد، فقط هیدروکربنهای C_1 و C_2 را دربر می گیرد. برخی از مفسرین، مقدار هیدروکربنهای C_3 را نیز لحاظ کرده و معتقدند این گازها اطلاعات تکمیلی در اختیار ما قرار می دهند که تحلیل را دقیقتر می نماید. از آنجا که هیدروکربنهای C_3 به شدت در روغن حل می شوند، مقدار این گازها تحت تاثیر فرار احتمالی آنها به محیط، قرار نمی گیرد و بدلیل همین قابلیت انحلال بالا جدا کردن این گازها از روغن دشوار بوده و تحلیل نتایج بستگی زیاد به روش استخراج مورد استفاده دارد. بعلاوه تجربه نشان داده است که در بیشتر موارد بدون در نظر گرفتن این هیدروکربنها نیز امکان تحلیل رضایت بخش وجود داشته و به منظور احتراز از پیچیدگی، این گازها در روش تحلیلی این استاندارد مورد استفاده قرار نگرفته اند.

5-8) رشد خطا

خطا معمولاً بصورت یک خطای کوچک با انرژی کم شروع شده که ممکن است در طول زمان به خطاهای جدی تر با انرژی بیشتر تبدیل شده و منجر به آلامر گاز، شکست و در نهایت خرابی تجهیز شود. زمانیکه یک خطا در مراحل اولیه شکل گیری شناسایی می شود، نه تنها پایش میزان رشد گازها، بلکه بررسی رشد احتمالی خطا به سمت خطا با انرژی زیاد می تواند مفید باشد.

بعنوان مثال برخی از ترانسفورماتورهای جریان با وجود تولید مقادیر زیاد هیدروژن ناشی از تخلیه جزئی در مدت زمان طولانی بصورت رضایت بخش مورد بهره برداری قرار گرفته اند. هرچند تخلیه جزئی می تواند منجر به تولید X-واکس، افزایش تلفات در سیستم عایقی کاغذ-روغن، ایجاد خطای حرارتی و در نهایت فرار حرارتی یا شکست در تجهیز شود. در سایر موارد ممکن است شکست بدون هشدار قبلی نیز اتفاق افتد.

5-9) نمایش گرافیکی

نمایش گرافیکی نسبت گازها جهت دنبال کردن رشد خطا بصورت چشمی مناسب تر است. نمونه ای از نمودارهای گرافیکی در اشکال یک تا سه نشان داده شده است.

این نمودارها همچنین در مواردی که نسبت گازها در خارج از محدوده ذکر شده در جدول دو قرار گرفته و شناسائی خطا با استفاده از این جدول امکان پذیر نمی باشد، قابل استفاده است. با کمک اشکال یک و دو ناحیه ای که نزدیکتر به خطای مورد نظر است با چشم قابل مشاهده بوده و می توان آنرا بصورت تقریبی معادل این خطا در نظر گرفت. با استفاده از شکل سه همواره قادر به شناسائی خطا خواهیم بود.

6) شرایط لازم برای محاسبه نسبتها

6-1) بررسی مقادیر گازهای محلول در روغن

نمونه برداری و تست گازهای محلول در روغن باید مطابق با استاندارد IEC60567 صورت گیرد.

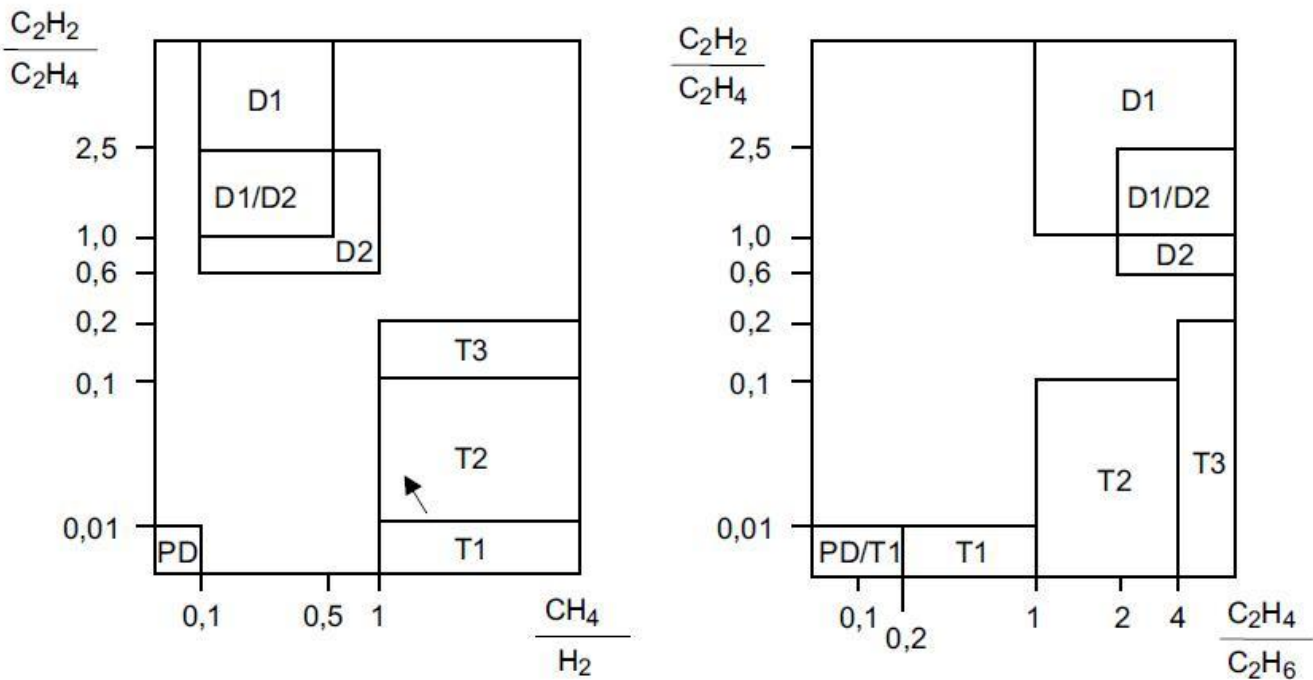
الف) مقادیر $0 \mu\text{l/l}$ یا کمتر از حد تشخیص دستگاه (S) باید با عنوان: «کمتر از حد تشخیص دستگاه برای این گاز» ذکر شود.

(مقادیر پیشنهادی S در استاندارد IEC60567 ملاحظه شود)

ب) در صورتیکه آزمون گازهای محلول در روغن فواصل زمانی نسبتاً کوتاهی تکرار شود (چند روز یا هفته)، تغییرات غیرمنطقی (مانند کاهش ناگهانی مقدار گازها) را می بایست بعنوان مشکل نمونه برداری یا تست تلقی نمود.

پ) نسبت گازها بسیار مهم بوده و تنها در صورتی اقدام به محاسبه این نسبتها باید نمود که حداقل یکی از گازها بالاتر از مقدار نرمال و رشد آن بیشتر از رشد نرمال گاز باشد. (توجه ب در جدول دو و بند 9 ملاحظه شود)

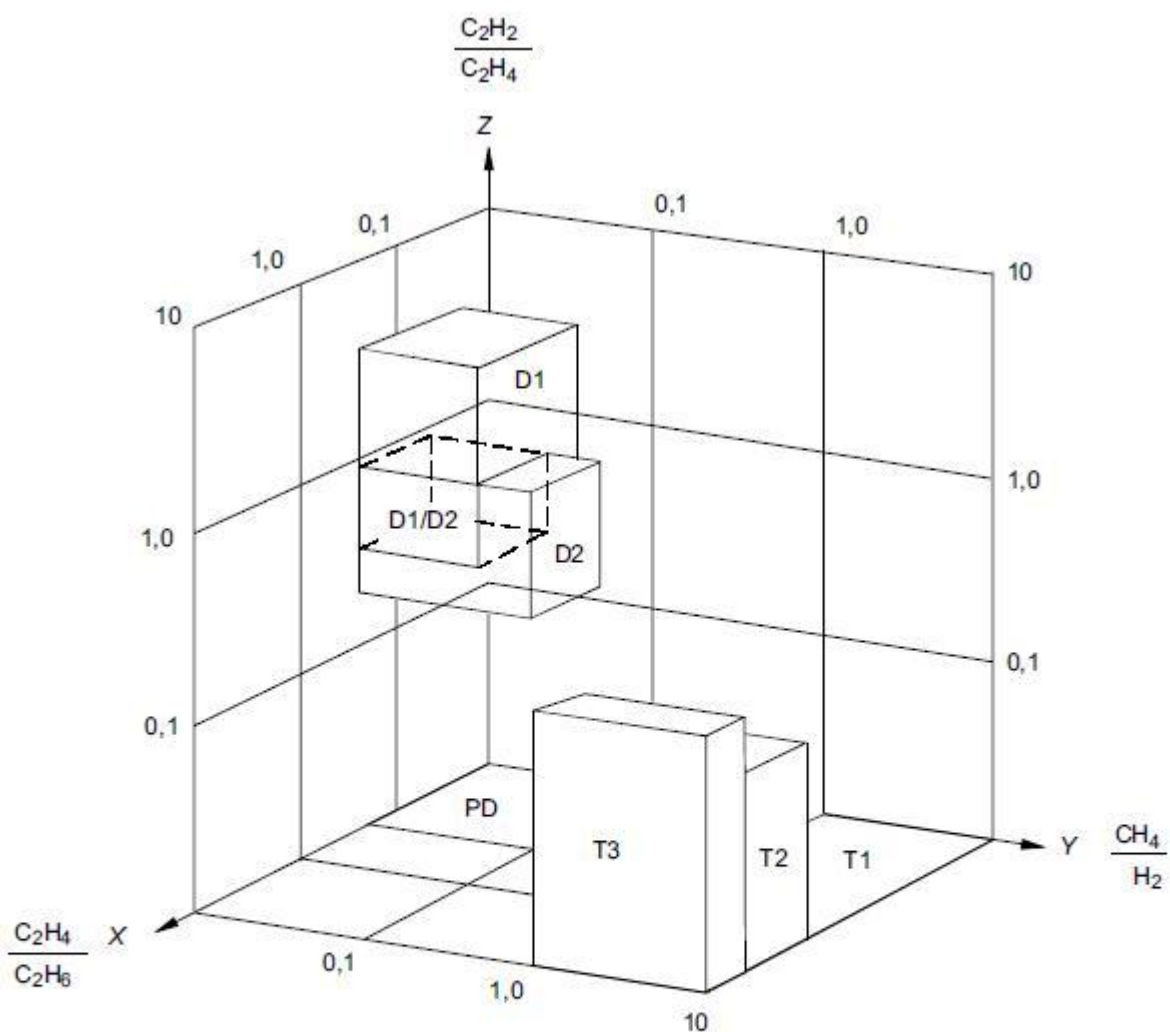
ت) اگر نسبت گازها با مقادیر آزمون قبلی متفاوت باشد بدین معناست که ممکن است خطای جدیدی خود را به خطای قبلی یا کارکرد طبیعی تجهیز تحمیل نموده باشد. به منظور دستیابی به نسبت گازهای معرف خطای جدید لازم است مقادیر گازهای آخرین آزمون از آزمون قبلی کسر شده و مجدداً نسبتها محاسبه شوند. این موضوع بویژه در مورد گازهای مونواکسید کربن و دی اکسید کربن صادق است (بند 5-4). لازم است اطمینان حاصل شود که مقایسه بین نمونه های برداشته شده از یک شیر و ترجیحاً از منطقه ای که روغن در آن جریان دارد، صورت گیرد. همچنین باید عملیات قبلی انجام شده بر روی تجهیز (مانند تعمیرات، گاززدائی یا فیلترینگ) که ممکن است میزان گازها را تحت تاثیر قرار دهد در تحلیل مورد توجه قرار گیرد.



IEC 1 642/98

Key	PD	Partial discharges
	D1	Discharges of low energy
	D2	Discharges of high energy
	T1	Thermal fault, $t < 300 \text{ }^\circ\text{C}$
	T2	Thermal fault, $300 \text{ }^\circ\text{C} < t < 700 \text{ }^\circ\text{C}$
	T3	Thermal fault, $t > 700 \text{ }^\circ\text{C}$

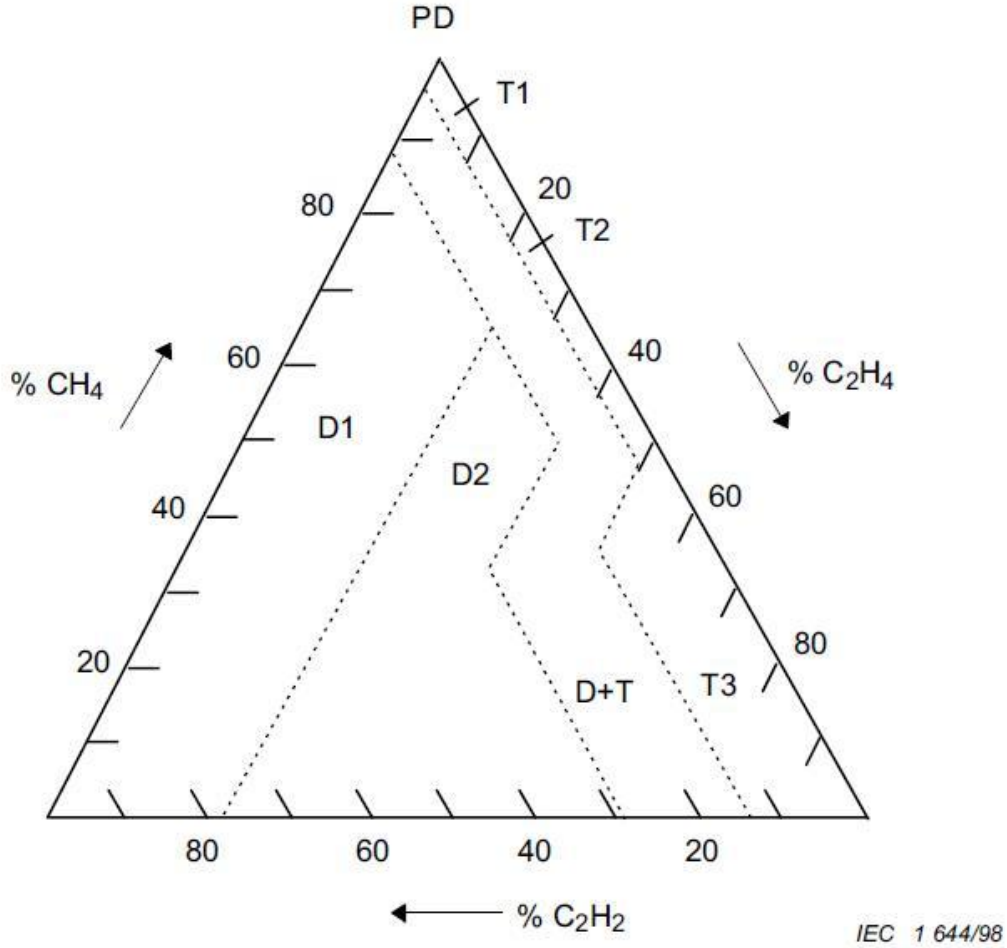
شکل یک: نمودار گرافیکی دوبعدی نسبت گازها



IEC 1 643/98

Key	PD	Partial discharges
	D1	Discharges of low energy
	D2	Discharges of high energy
	T1	Thermal fault, $t < 300$ °C
	T2	Thermal fault, 300 °C $< t < 700$ °C
	T3	Thermal fault, $t > 700$ °C

شکل دو: نمودار گرافیکی سه بعدی نسبت گازها



$$\% C_2H_2 = \frac{100x}{x+y+z} \quad \text{for } x = [C_2H_2] \text{ in microlitres per litre}$$

$$\% C_2H_4 = \frac{100y}{x+y+z} \quad \text{for } y = [C_2H_4] \text{ in microlitres per litre}$$

$$\% CH_4 = \frac{100z}{x+y+z} \quad \text{for } z = [CH_4] \text{ in microlitres per litre}$$

- Key
- PD Partial discharges
 - D1 Discharges of low energy
 - D2 Discharges of high energy
 - T1 Thermal fault, $t < 300 \text{ }^\circ\text{C}$
 - T2 Thermal fault, $300 \text{ }^\circ\text{C} < t < 700 \text{ }^\circ\text{C}$
 - T3 Thermal fault, $t > 700 \text{ }^\circ\text{C}$

Limits of zones				
PD	98 % CH ₄			
D1	23 % C ₂ H ₄	13 % C ₂ H ₂		
D2	23 % C ₂ H ₄	13 % C ₂ H ₂	38 % C ₂ H ₄	29 % C ₂ H ₂
T1	4 % C ₂ H ₂	10 % C ₂ H ₄		
T2	4 % C ₂ H ₂	10 % C ₂ H ₄	50 % C ₂ H ₄	
T3	15 % C ₂ H ₂	50 % C ₂ H ₄		

شکل سه: نمودار گرافیکی نسبت گازها (مثلث دووال)

توجه: خارج شدن گازها از منبع انبساط ترانسفورماتورهای قدرت تنفس کننده بسیار کند صورت می گیرد. از اینرو مقدار گازهای اندازه گیری شده به مقدار ناچیزی از مقدار واقعی گازها در ترانسفورماتور کمتر است. توافق عمومی بر سر میزان کاهش گاز در طول بهره برداری وجود نداشته و برخی آنرا قابل صرف نظر کردن و برخی دیگر آنرا بسته به نوع تجهیز، مهم تلقی می کنند. به منظور اطمینان خاطر می توان مقدار گازهای موجود در منبع انبساط را جهت شناسایی حجم گازهای خارج شده از سیستم اندازه گیری نمود. خروج گاز به مقدار زیاد از ترانسفورماتور می تواند بر روی نسبت گازها، مقادیر نرمال و نرخ رشد گازها تاثیرگذار باشد.

6-2) عدم قطعیت در نسبت گازها

عدم قطعیت در نسبت گازها را می توان با استفاده از میزان دقت شرح داده شده در استاندارد IEC60567 محاسبه نمود. در صورتیکه مقدار گازها بیشتر از ده برابر حد تشخیص دستگاه (S) باشد، دقت نتایج آزمون گازهای محلول در روغن در حد پنج درصد و دقت نسبت گازها در حد ده درصد است. در صورتیکه مقادیر گازها کمتر از ده برابر حد تشخیص دستگاه (S) باشد، دقت نتایج آزمون گازهای محلول در روغن تا حد 20% کاهش یافته و دقت نسبت گازها نیز تا حد 40% کاهش می یابد.

از اینرو زمانیکه مقدار گازها پائین است (کمتر از ده برابر حد تشخیص دستگاه)، هنگام محاسبه نسبتها، می بایست به تغییرات احتمالی ناشی از کاهش دقت، توجه نمود. این موضوع بویژه در مورد ترانسفورماتورهای جریان و بوشینگها که معمولاً مقدار گاز آنها کمتر از ده برابر حد تشخیص دستگاه است، صدق می کند.

7) نحوه تحلیل گازهای آزاد موجود در رله بوخهلتز

در هنگام خطا، نرخ تولید کلیه گازها متناسب با میزان آزاد شدن انرژی است. بهمین دلیل انرژی کم آزاد شده بر اثر تخلیه جزئی یا نقطه داغ با دمای پائین، موجب نرخ پائین تولید گاز و حل شدن احتمالی کلیه این گازها در روغن می شود. انرژی زیاد بوجود آمده بر اثر مواردی مانند خطای هسته، می تواند موجب تولید سریع گاز و پدید آمدن حباب گاز شود. بخشی از گازهای تولید شده در روغن حل شده اما بخش دیگری از گازها بصورت آزاد درآمده و در محفظه جمع آوری گاز رله بوخهلتز وارد می شوند. این گازها می توانند با گازهای محلول در روغن به حالت تعادل برسند.

در صورت وقوع خطای شدیدتر مانند جرقه، انرژی بسیار زیادی تولید شده که موجب تولید سریع گازها در حجم زیاد می شود. (در اینحالت فشار گازهای وارد شده به رله موجب عملکرد رله فشاری موجود در رله بوخهلتز می شود). حبابهای گاز تولید شده سریعاً به سمت رله بوخهلتز حرکت کرده و فرصت کافی برای ایجاد تعادل با گازهای محلول نمی یابند. از اینرو گازهای جمع شده در رله بوخهلتز در حالت تعادل با گازهای محلول در روغن نمی باشند. هرچند اگر این گازها در مدت زمان طولانی در رله باقی بمانند، برخی از آنها در روغن حل شده و ترکیب گازهای آزاد جمع شده در رله را تغییر می دهند. بعنوان مثال گاز استیلین که در هنگام خطای جرقه زنی، به مقدار زیاد تولید می شود، بدلیل قابلیت انحلال بالا، سریعاً در روغن حل شده و ممکن است نتایج گمراه کننده ای را حاصل کند.

اساساً تحلیل گازهای آزاد موجود در رله بوخهلتز مشابه تحلیل گازهای محلول در روغن است. لیکن هنگام عملکرد رله فشار موجود در رله بوخهلتز، احتمال وجود خطای جدی در ترانسفورماتور وجود دارد که باید با سرعت و به منظور شناسایی خطا،

گازها مورد آزمون قرار گیرند. درعین حال احتمال ایجاد آلام در رله بوخهلتز بدلیل تجمع هوا نیز وجود دارد که معمولاً این امر پس از چند روز گرم و کاهش ناگهانی دمای محیط در شب اتفاق می افتد. از اینرو جمع آوری گازهای موجود در رله بوخهلتز (بدون سوزاندن آن) و نمونه برداری از روغن موجود در رله و مخزن اصلی در اسرع وقت بسیار مهم است.

زمانیکه گاز آرام تولید می شود، ارزیابی گازهای محلول در روغن اطلاعات بیشتری از تحلیل گازهای آزاد در اختیار ما می گذارد. همچنین تحلیل گازهای محلول در روغن به منظور شناسایی نرخ رشد گازها و تعیین این مسئله که آیا خطا در حال گسترش است یا نه، بسیار حیاتی است. در هنگام تحلیل گازهای آزاد، تبدیل مقدار گاز آزاد به معادل آن در حالت محلول در روغن با استفاده از جدول چهار و مقایسه نتایج آن با تحلیل گازهای محلول موجود در روغن رله بوخهلتز و مخزن اصلی ضروری است.

با توجه به مطالب ذکر شده، مقایسه مقدار واقعی گاز محلول در روغن با مقدار معادل گازهای آزاد می تواند اطلاعات مفیدی در خصوص مقدار تشکیل حبابهای گاز و نرخ تولید گاز در اختیار ما قرار دهد. محاسبه مقدار گاز محلول معادل گاز آزاد با استفاده از ضریب استوالد و برای تک تک گازها انجام می شود. ضریب استوالد برای یک گاز خاص از فرمول ذیل محاسبه می شود:

$$K = (\text{مقدار گاز در فاز گازی} / \text{مقدار گاز در فاز مایع})$$

مقدار گاز برحسب میکرولیتر در هر لیتر می باشد.

ضریب استوالد برای گازهای مختلف در روغن عایقی معدنی در دماهای 20 و 50 درجه سانتیگراد در جدول چهار ذکر شده است.

جدول چهار: ضریب استوالد برای گازهای مختلف در روغن عایقی معدنی

گاز	k در دمای 20 درجه سانتیگراد	k در دمای 50 درجه سانتیگراد
N ₂	0/09	0/09
O ₂	0/17	0/17
H ₂	0/05	0/05
CO	0/12	0/12
CO ₂	1/08	1/00
CH ₄	0/43	0/40
C ₂ H ₆	2/40	1/8
C ₂ H ₄	1/70	1/40
C ₂ H ₂	1/20	0/9

توجه: مقادیر ارائه شده در این جدول براساس مقادیر میانگین بدست آمده از روغنهای عایقی معدنی جدید است. مقادیر واقعی کمی با ارقام ارائه شده متفاوت است. درهرصورت می توان از مقادیر فوق بدون درنظرگرفتن مقادیر بدست آمده از آزمونها استفاده نمود.

ضریب استوالد مستقل از فشار جزئی گاز می باشد. گرچه این موضوع به ندرت اتفاق می افتد لیکن فرض شده است که فازهای گاز و مایع درجه حرارتهای یکسانی دارند. درهرصورت خطای حاصله بر اثر اختلاف دما در تحلیل بی تاثیر است.

8) روش تحلیل مقادیر گازهای محلول در روغن (شکل چهار)

الف) مقادیر غیرمنطقی گازهای محلول در روغن را رد کرده یا تصحیح کنید (بند 6-1). مقادیر نرخ رشد گاز را با توجه به نتایج آخرین آزمون (با در نظر گرفتن دقت آزمون)، محاسبه کنید.

در صورتیکه مقدار کلیه گازها کمتر از مقادیر مطلق و نرخ رشد گاز نرمال باشند، نتیجه را اینگونه گزارش کنید: «نتایج آزمون گازهای محلول در روغن نرمال است / تجهیز الکتریکی سالم است.»

اگر حداقل یک گاز بالاتر از مقادیر نرمال باشد، نسبت گازها را محاسبه کرده و خطا را با استفاده از جدول دو (بند 5-3) محاسبه کنید. احتمال بروز اشتباه در تحلیل را بررسی کنید (بند 4-3).

در صورت لزوم پیش از محاسبه نسبتها، مقادیر فعلی گازها را از مقادیر قبلی کسر کنید. این مورد بویژه در مورد گازهای دی اکسید کربن و مونواکسید کربن صادق است.

اگر مقادیر گازهای محلول در روغن بالاتر از مقادیر نرمال و کمتر از ده برابر حد تشخیص دستگاه باشد، به بند 6-2 مراجعه کنید.

ب) این موارد را تعیین کنید: بالاتر بودن مقادیر مطلق گاز و نرخ رشد گاز از سطح هشدار، رشد خطا به سمت مراحل نهایی (بند 5-8) و گسترش خطا به عایق کاغذی (بند 4-2 و 5-4)

پ) اقدام مناسب را با توجه بهترین قضاوت مهندسی و/یا استفاده از شکل چهار انتخاب کنید. همچنین موارد ذیل پیشنهاد می شود:

1) در صورت افزایش مقدار مطلق یا نرخ رشد گاز از مقادیر نرمال، زمان نمونه برداری بعدی را کاهش دهید (سه ماهه، ماهانه یا دیگر)

2) در صورت افزایش مقدار مطلق یا نرخ رشد گاز از سطوح هشدار، لازم است اقدام فوری انجام شود.

9) گزارش نتایج

توجه: گزارش باید با توجه به مشخصات ویژه تجهیز تهیه شود.

گزارش تحلیلی نتایج آزمون گازهای محلول در روغن باید حتی الامکان شامل موارد ذیل باشد:

الف) گزارش تحلیلی باید شامل مقدار حد تشخیص دستگاه، روش آزمون تعیین گازهای محلول در روغن و تاریخ انجام آزمون باشد.

توجه: مقادیر $0 \mu\text{l/l}$ یا کمتر از حد تشخیص دستگاه (S) باید با عنوان: «کمتر از حد تشخیص دستگاه برای این گاز» در گزارش تحلیلی ذکر شود.

ب) موارد ذیل در خصوص تجهیز باید در گزارش ذکر شود:

1) تاریخ شروع بهره برداری، ولتاژ، نوع تجهیز (مثلاً ترانسفورماتورهای قدرت یا اندازه گیری) و توان نامی

2) موارد خاص (مانند نوع تنفس تجهیز، نوع تپ چنجر و غیره)

3) حجم روغن

4) تاریخ نمونه برداری از روغن یا گاز

5) محل نمونه برداری

پ) موارد خاص بهره برداری یا حوادث پیش آمده قبل یا بعد از نمونه برداری مانند خروج اجباری از مدار، آلامر گاز، تصفیه فیزیکی، تعمیر و ...

ت) نتایج قبلی آزمون گازهای محلول در روغن

ث) ذکر مقادیر نرمال برای تجهیز (در صورت وجود)

ج) مشخص نمودن یکی از این دو حالت: «نتایج آزمون گازهای محلول در روغن نرمال است / تجهیز الکتریکی سالم است.» یا «امکان وجود خطا در تجهیز وجود دارد»

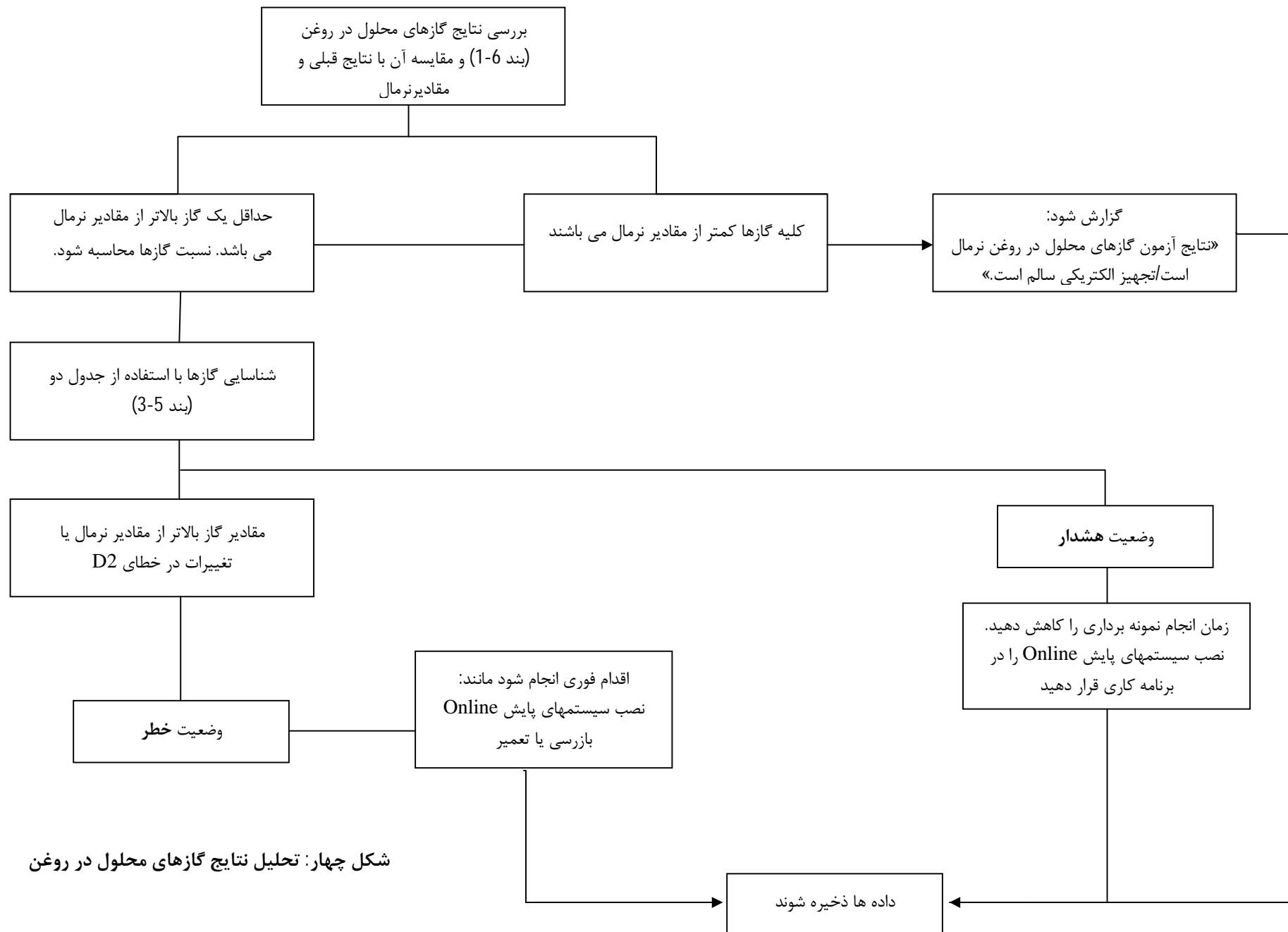
چ) در صورت تشخیص امکان وجود خطا، مشخص کردن نوع خطا با استفاده از جدول دو (بند 5-3 ملاحظه شود) با ذکر مقادیر نسبت گازها

ح) ذکر این مسئله که آیا خطا شامل کاغذ عایقی نیز شده است یا خیر. همچنین مقدار CO_2/CO اقدامات اصلاحی پیشنهادی:

1) برنامه زمانبندی جدید برای نمونه برداری از روغن

2) آزمون اندازه گیری ترکیبات فوران در صورتیکه نسبت CO_2/CO کمتر از سه باشد.

3) سایر آزمونهای لازم



شکل چهار: تحلیل نتایج گازهای محلول در روغن