



УДК 621.314.222.6.001.42

DOI: 10.31388/2220-8674-2018-2-38

ОЦІНКА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ХАРГ

Адамова С. В.

Таврійський державний агротехнологічний університет

Тел/факс (0619) 42-11-74

Анотація – силовий трансформатор є в енергосистемі одним з найважливіших елементів, що визначають надійність електропостачання. Його здатність нести належне навантаження залежить від стану окремих вузлів і відсутності дефектів, які могли б перейти в пошкодження трансформатора.

Значна частка дефектів, що розвиваються, призводять в подальшому до пошкодження обладнання, може бути визначена своєчасним контролем стану трансформаторного масла. Використання сучасної інформаційної техніки дозволяє істотно підвищити ефективність діагностики на основі аналізу параметрів масла. Існують різні методи інтерпретації результатів аналізів в силу відмінності норм і критеріїв оцінки стану трансформаторів, що часто призводить до різних висновків.

Робота присвячена розгляду основних особливостей організації діагностики розвитку дефектів на основі аналізу розчинених газів в трансформаторі. В якості базової методики використовується методика хроматографічного аналізу газів. На першому етапі діагностування методом ХАРГ визначають концентрації семи газів і порівнюють з граничними значеннями концентрацій, взятих з відповідних нормативних документів. Склад розчинених в маслі газів залежить від характеру пошкодження, що розвивається в трансформаторі, за отриманими даними ХАРГ можна орієнтовно припустити вид розвитку дефекту.

Критерій граничних концентрацій дозволяє виділити із загальної кількості трансформаторного парку трансформатори з можливим розвитком дефекту. Для уточнення діагнозу необхідно визначити співвідношення концентрацій пар з чотирьох газів. Ступінь небезпеки розвитку дефекту встановлюється по відносній швидкості наростання газу.

ХАРГ трансформаторного масла сьогодні є одним з найбільш важливих і ефективних діагностичних методів, що виявляє широке коло проблем устаткування, в тому числі і на ранніх стадіях розвитку.

Ключові слова – силовий трансформатор, хроматографічний аналіз газів, граничні концентрації, газовиділення, відносна швидкість, комплексний метод.

Постановка проблеми. Силовий трансформатор є в енергосистемі одним з найважливіших елементів, що визначають надійність електропостачання. Його здатність нести належне



навантаження залежить від стану окремих вузлів і відсутності дефектів, які могли б перейти в пошкодження трансформатора.

Як відомо, при експлуатації силових трансформаторів трансформаторне масло виконує функції діелектрика і охолоджуючого середовища. Але у трансформаторного масла є ще одна важлива функція: воно є діагностичним середовищем. Значна частка дефектів, що розвиваються, призводять в подальшому до пошкодження обладнання, може бути визначена своєчасним контролем стану трансформаторного масла.

Слід зазначити, що такі фізико-хімічні показники, як кислотне число, вміст водорозчинних кислот і лугів, вологовміст і газовміст масла є традиційними в практиці експлуатації силових трансформаторів протягом багатьох років. Тому доцільно докладно розглянути застосування хроматографічного аналізу газів, розчинених в маслі, який нещодавно був введений до нормативних документів [1, 2].

Аналіз останніх досліджень. В даний час становище в світовій енергетиці характеризується деякими особливостями, що пояснюють підвищену увагу до надійності роботи обладнання енергосистем, і в тому числі силових трансформаторів. Одним з головних шляхів підтримки експлуатаційної надійності є організація ефективного контролю стану працюючого обладнання.

У штатний контроль стану входять вимірювання температури в різних точках трансформатора із застосуванням термосигналізаторів, рівня масла в розширювачі, огляд трансформатора з виявленням зовнішніх ознак несправностей.

В даний час в практиці оцінки стану силових трансформаторів в експлуатації застосовується значна кількість фізико-хімічних показників стану трансформаторного масла. При цьому поряд з показниками, що мають багаторічний досвід застосування і практично повсюдно використовуваними, останнім часом отримали розвиток нові фізико-хімічні показники, що дозволяють визначати дефекти трансформаторів в процесі експлуатації.

Розвиток таких дефектів, як локальні перегріву струмоведучих з'єднань і елементів конструкції кістяка, розряди в маслі, іскріння в контактних з'єднаннях, забруднення і зволоження ізоляції, попадання повітря, окислення і старіння самого масла і твердої ізоляції в різній мірі позначаються на зміні властивостей трансформаторного масла. Тому протягом багаторічної практики експлуатації силових трансформаторів застосовуються різні показники стану трансформаторного масла, розширюється їх перелік, удосконалюються методи вимірювань.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Провести аналіз методу, який би дозволив виявляти дефекти трансформаторів



на ранній стадії їх розвитку, передбачуваний характер цих дефектів і ступінь наявного ушкодження з метою своєчасного попередження несправності трансформаторів і забезпечення їх експлуатаційної надійності

Основна частина. Відповідно до вимог «Обсяг і норми випробувань електроустаткування» в процесі експлуатації силових трансформаторів передбачено вимірювання наступних показників масла: пробивна напруга, вміст механічних домішок, тангенс кута діелектричних втрат масла, температура спалаху в закритому тиглі, кислотне число, вміст водорозчинних кислот і лугів, вологовміст, зміст антиокисної присадки, газовміст масла, хроматографічний аналіз газів, розчинених в маслі, зміст фуранових похідних [1, 2].

Періодичний аналіз проб масла з трансформаторів дозволяє стежити за динамікою процесу старіння трансформатора і своєчасно вживати належних заходів з підтримки його працездатності. Відбір проб, його періодичність і критерії оцінки визначені інструкціями з експлуатації трансформаторів і нормативними документами. Догляд за трансформаторним маслом включає як підтримку його високої якості (сушіння, дегазація, регенерації), так і діагностику стану ізоляції трансформатора за результатами аналізу масла. Використання сучасної інформаційної техніки дозволяє істотно підвищити ефективність діагностики на основі аналізу параметрів масла.

При оцінці технічного стану трансформатора методом хроматографічного аналізу газів, розчинених в маслі (ХАРГ) керуються такими критеріями:

- граничні концентрації, що дозволяють встановити наявність локальних пошкоджень і визначити доцільність постановки на прискорений контроль;
- відношення концепції, що дозволяє уточнити вид дефекту, що розвивається;
- швидкості наростання, що визначає ступінь небезпеки дефекту.

Існують різні методи інтерпретації результатів аналізів в силу відмінності норм і критеріїв оцінки стану трансформаторів, що часто призводить до різних висновків.

Жоден з існуючих методів не може бути прийнятий в якості універсального, базового. Найбільш поширені з них такі: методика МЕК (IEC 60599), методика IEEE, методика Роджерса (CEGB / Rogers Ratios), методика Доренбурга (Dornenburg's method), методика Дюваля, Мюллера (Mailer's method).

Розглянемо основні особливості організації діагностики розвитку дефектів, використовуючи методику хроматографічного аналізу газів. В процесі експлуатації трансформатора відбувається безперервний процес газовиділення, пов'язаного зі старінням масла,



твердих ізоляційних матеріалів і залежить від хімічного складу масла, напруженості електричного поля, режиму роботи і тривалості експлуатації. Особливо інтенсивно відбувається процес газовиділення при наявності пошкоджень в трансформаторі.

На першому етапі діагностування методом ХАРГ визначають концентрації семи газів і порівнюють з граничними значеннями концентрацій, взятих з відповідних нормативних документів[3] (табл. 1).

Таблиця 1.

Граничні концентрації розчинених в маслі газів

Обладнання	Концентрації газів, % об.						
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂
Трансформатори напругою 110-500 кВ	0,01	0,01	0,001	0,01	0,005	$\frac{0,05}{0,06}$	$\frac{0,6(0,2)}{0,8(0,4)}$
Трансформатори напругою 750кВ	0,003	0,002	0,001	0,002	0,001	0,05	0,40

Для CO - в чисельнику наведено значення для трансформаторів з азотним або плівковим захистами масла, в знаменнику - для трансформаторів з вільним диханням. Для CO₂ - в чисельнику наведені значення для трансформаторів з вільним диханням при терміні експлуатації до 10 років, в знаменнику - понад 10 років. У дужках наведені ті ж дані для трансформаторів з плівковим або азотним захистами масла.

Трансформатор має пошкодження при перевищенні граничного значення концентрації хоча б одного з газів. При порівнянні отриманих в результаті аналізу даних про концентрацію з нормативними, можна діагностувати можливі дефекти в трансформаторі (наприклад, пошкодження типу локальних перегрівів, старіння ізоляційних матеріалів, забруднення масла і твердої ізоляції, часткові розряди тощо).

Склад розчинених в маслі газів залежить від характеру, пошкодження що розвивається в трансформаторі, за отриманими даними ХАРГ можна орієнтовно припустити вид розвитку дефекту. У таблиці 2 представлений взаємозв'язок основних газів і найбільш характерних видів дефектів [4].

Визначення основного з характерних газів за результатами ХАРГ проводиться таким чином: розраховуються відносні концентрації газів за формулою[5]:

$$a_i = \frac{A_i}{A_{spi}} \quad (1)$$

де A_i - виміряне значення концентрації і-го газу;

A_{spi} - граничні концентрації і-го газу.



Таблиця 2.

Характерні склади газів, розчинених в маслі, для різних дефектів трансформаторів

Газ	Характерний вид дефекту
Водень (H_2)	Дефекти електричного характеру: часткові розряди, іскрові і дугові розряди;
Метан (CH_4)	Дефекти термічного характеру: нагрів масла і паперово-масляної ізоляції в діапазоні температур (400-600) $^{\circ}C$ або нагрів масла і паперово-масляної ізоляції, що супроводжується розрядами;
Етан (C_2H_6)	Дефекти термічного характеру: нагрів масла і паперово-масляної ізоляції в діапазоні температур (300-400) $^{\circ}C$;
Етилен (C_2H_4)	Дефекти термічного характеру: нагрів масла і паперово-масляної ізоляції вище 600 $^{\circ}C$;
Ацетилен (C_2H_2)	Дефекти електричного характеру: електрична дуга, іскріння;
Окис вуглеводу (CO)	Дефекти термічного характеру: старіння і зволоження масла і / або твердої ізоляції;
Двоокис вуглецю (CO_2)	Дефекти термічного характеру: старіння і зволоження масла і / або твердої ізоляції; нагрів твердої ізоляції.

За розрахунковими відносними концентраціями максимальне значення $a_{i\max}$ відповідає основному газу (крім CO_2 ; CO_2 - основний газ, якщо $a_{CO_2} > 1$);

a_i - характерний газ з високим вмістом;

$0,1 < a_i < 1$ - характерний газ з малим вмістом;

$a_i < 0,1$ - нехарактерний газ.

Перед включенням в роботу нових або тих трансформаторів, що пройшли ремонт, необхідно визначити початкові концентрації розчинених газів (A_i^0) і наступні результати аналізів оцінити в порівнянні з цими значеннями.

При аналізі складу розчинених у маслі газів для діагностики експлуатаційного стану трансформатора необхідно враховувати умови його експлуатації за попередній проміжок часу і фактори, що викликають зміни цього складу розчинених у маслі газів нормально працюючих трансформаторів.

Критерій граничних концентрацій дозволяє виділити із загальної кількості трансформаторного парку трансформатори з можливим розвитку дефекту; такі трансформатори слід взяти під



хроматографічний контроль з прискореним відбором проб масла і проведенням ХАРГ.

Чим менше прийняте значення граничних концентрацій, тим більша кількість трансформаторів буде взято під прискорений контроль і навпаки.

За граничну концентрацію будь-якого газу слід приймати таке значення, нижче якого виявляється концентрація цього газу у 90% загального числа аналізів обстежених трансформаторів прийнятої групи (не менше 50).

Вид розвитку трансформаторних ушкоджень (теплового або електричного) можна орієнтовно визначити за складом вимірних розчинених у ньому газів.

Для уточнення діагнозу необхідно визначити співвідношення концентрацій пар з чотирьох газів: H_2 , CH_4 , C_2H_2 і C_2H_4 .

При цьому слід враховувати тільки такі співвідношення, в яких концентрація хоча б одного з газів була вище граничної концентрації.

$$\text{Умови прогнозування «розряду»} \frac{C_2H_2}{C_2H_4} > 0,1 \text{ і } \frac{CH_4}{H_2} < 0,5$$

$$\text{Умови прогнозування «перегріву»} \frac{C_2H_2}{C_2H_4} < 0,1 \text{ і } \frac{CH_4}{H_2} > 0,5 .$$

Якщо при цьому концентрація $CO < 0,03\%$, то прогнозується перегрів масла, а якщо $CO > 0,03\%$, - перегрів твердої ізоляції.

Умови прогнозування "перегріву" і "розряду":

$$\frac{C_2H_2}{C_2H_4} \geq 0,1 \text{ і } \frac{CH_4}{H_2} > 0,5 \text{ або } \frac{C_2H_2}{C_2H_4} < 0,1 \text{ і } \frac{CH_4}{H_2} \leq 0,5 .$$

Температуру в зоні нагріву можна визначити за формулою:

$$t = 320(\lg \frac{C_2H_4}{C_2H_6}) + 530^\circ C . \quad (2)$$

Для визначення характеру дефекту за табл. 3 необхідно виконати вимоги, наведені вище, щодо граничних концентрацій і концентрацій пар газів.

Відношення CO_2 / CO додатково уточнює характер дефектів, наведених в таблиці 3. Слід мати на увазі, що CO_2 і CO утворюються в маслі трансформатора при нормальних робочих температурах в результаті природного старіння ізоляції. Вміст CO_2 в маслі залежить від терміну роботи трансформатора і способу захисту масла від окислення.

Якщо відношення CO_2 / CO менше 5 або більше 13, слід вважати, що пошкодженням порушена тверда ізоляція. Отримані значення відношень CO_2 / CO слід порівняти з попередніми



значеннями того ж трансформатора або зі значеннями для подібних трансформаторів тієї ж конструкції [5].

У таблиці 3 приведена інтерпретація визначення характеру дефектів силових трансформаторів по відношенню концентрацій використуваних пар газів.

Таблиця 3.

Визначення характеру дефекту в трансформаторі за змістом газів в
маслі

Характер прогнозування дефекта	Відношення характерних газів			Типові приклади
	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	
Нормально	<0,1	0,1-1	≤1	Нормальне старіння
Часткові розряди з низькою щільністю енергії	<0,1	<0,1	<1	Розряди заповнених в порожнинах газом, що утворилися внаслідок неповного просочення або вологості ізоляції.
Часткові розряди з високою щільністю енергії	0,1-3	<0,1	≤1	Те ж, що і в перед. п., але веде до залишення сліду або до пробою твердої ізоляції
Розряди малої потужності	>0,1	0,1-1	≥1	Безперервне іскріння в маслі між сполуками різних потенціалів або плаваючого потенціалу. Проба масла між твердими матеріалами.
Розряди великої потужності	0,1-3	0,1-1	≥3	Силові розряди; іскріння; проба масла між обмотками або котушками або між котушками на землю
Термічний дефект низької температури (<150 °C)	<0,1	0,1-1	1-3	Перегрів ізолюваного провідника
Термічний дефект в діапазоні низьких температур (150-300 °C)	<0,1	≥1	≤1	Місцевий перегрів сердечника через концентрацію потоку. Зростання температури «гарячої точки»
Термічний дефект в діапазоні середніх температур (300-700 °C)	<0,1	≥1	1-3	Те ж, що і в п.7, але при подальшому підвищенні температури "гарячої точки"
Термічний дефект високої температури (> 700°C)	<0,1	≥1	≥3	"Гаряча точка" в осерді; перегрів міді через вихрові струми, погані контакти: циркулюючі струми в осерді або баку

Ступінь небезпеки розвитку дефекту встановлюється по відносній швидкості наростання газу. Якщо відносна швидкість



наростання газів перевищує 10% на місяць, то це вказує на наявність розвитку дефекту в трансформаторі.

Зміна в часі концентрації окремих газів в маслі бездефектних трансформаторів може відбуватися під впливом різних факторів, а також внаслідок природного старіння ізоляції.

Наявність дефекту, що розвивається в трансформаторі, спираючись на ці фактори, призводить, як правило, до помітного зростання концентрації одного або декількох газів. Для бездефектних трансформаторів концентрації газів за термін служби не повинні перевищити граничних значень.

Абсолютна швидкість наростання i -го газу визначається формулою[5]:

$$U_i^{abc} = \frac{A_{mi} A_{(m-1)i}}{T_{\partial}} \left(\frac{\% об}{міс} \right) \quad (3)$$

де A_{mi} , $A_{(m-1)i}$ - два послідовних вимірювання концентрації i -го газу (% об);

T_{∂} - періодичність діагностики - проміжок часу між двома послідовними відборами проб масла для вимірювання концентрації газів (міс).

Відносна швидкість наростання i -го газу визначається за формулою:

$$U_i^{відн} = \frac{U_i^{abc}}{A_{(m-1)i}} \cdot 100(\% вміс). \quad (4)$$

Результати хроматографічного аналізу розчинених газів в маслі силового трансформатора є показниками для проведення позачергових вимірювань опору ізоляцій обмоток, тангенса кута діелектричних втрат обмоток, опору обмоток постійному струму, втрат холостого ходу, тепловізійного контролю поверхонь бака трансформатора і системи охолодження, а також проведення хроматографічного аналізу розчинених газів в маслі бака контактора. За сукупністю результатів вимірювань приймається рішення про проведення подальших заходів з даним трансформатором (залишити трансформатор в роботі з прискореним контролем, провести дегазацію масла, віддати трансформатор в ремонт та інше). Не дивлячись на те, що дані про концентрацію розчинених в маслі газів не дають достовірну інформацію про технічний стан трансформатора і припускають, що для остаточної оцінки технічного стану додаткової інформації про попередні пошкодження, температурного стану верхніх шарів масла, тривалості та кратності перевантажень, режимах



систем охолодження та інше, діагностику трансформатора на основі ХАРГ в даний час можна прийняти як основну.

Висновки. ХАРГ трансформаторного масла сьогодні є одним з найбільш важливих і ефективних діагностичних методів, що виявляє широке коло проблем устаткування, в тому числі і на ранніх стадіях розвитку. Необхідність контролю за зміною складу масла в процесі експлуатації трансформаторів ставить питання про вибір такого аналітичного методу, який зміг би забезпечити надійне якісне і кількісне визначення з'єднань, що містяться в трансформаторному маслі. Хроматографія відповідає вимогам, що представляє собою комплексний метод, який об'єднав стадію поділу складних сумішей на окремі компоненти і стадію їх кількісного визначення. За результатами цих аналізів проводиться швидка і якісна оцінка стану маслonaповненого обладнання.

Література

1. Норми випробування електрообладнання: СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007. – [Чинний від 2007-04-15]. – К., 2007. – 271 с.
2. Норми випробування електрообладнання: ГКД 34.20.302-2002. – [Чинний з 2007-04-15]. – К., 2002. – 33 с.
3. Абрамов Ю. В. Трансформаторное масло как диагностическая среда маслonaполненного оборудования. [Лекционный курс] / Ю. В. Абрамов. – Ростов-на-Дону, 2017. – 32 с.
4. Хроматографический анализ трансформаторного масла [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ntc-retec.ru/hromatograficheskiy-analiz-transformatornogo-masla>
5. Львов М. Ю. Физико-химические методы в практике оценки состояния силовых трансформаторов в условиях эксплуатации: учебно-методическое пособие / М. Ю. Львов, П. П. Кутлер. – М., 2003. – 20 с.

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ХАРГ

Адамова С. В.

Аннотация

Силовой трансформатор является в энергосистеме одним из важнейших элементов, определяющих надежность электроснабжения. Его способность нести долгие нагрузки зависит от состояния отдельных узлов и отсутствия дефектов, которые могли бы перейти в повреждения трансформатора.

Значительная часть развивающихся дефектов, которые приводят в дальнейшем к повреждению оборудования, может быть определена своевременным контролем состояния трансформаторного масла. Использование современной информационной техники позволяет существенно повысить эффективность диагностики на основе анализа параметров масла.



Работа посвящена рассмотрению основных особенностей организации диагностики развития дефектов на основе анализа растворенных газов в трансформаторе. В качестве базовой методики используется методика хроматографического анализа газов. На первом этапе диагностики методом ХАРГ определяют концентрации семи газов и сравнивают с предельными значениями концентраций, взятых из соответствующих нормативных документов. Состав растворенных в масле газов зависит от характера повреждения, развивающегося в трансформаторе, по полученным данным ХАРГ можно ориентировочно предположить вид развития дефекта.

Критерий предельных концентраций позволяет выделить из общего количества трансформаторного парка трансформаторы с возможным развитием дефекта. Для уточнения диагноза необходимо определить соотношение концентраций пар из четырех газов. Степень опасности развития дефекта устанавливается по относительной скорости нарастания газа.

ХАРГ трансформаторного масла сегодня является одним из наиболее важных и эффективных диагностических методов, выявляет широкий круг проблем оборудования, в том числе и на ранних стадиях развития.

EVALUATION OF THE TECHNICAL STATE OF POWER TRANSFORMERS BY THE RESULTS OF CADG

S. Adamova

Summary

A power transformer is one of the most important elements in the power system that determine the reliability of power supply. Its ability to bear the proper load depends of the condition of the individual components and the absence of defects that could transform into damage to the transformer.

A significant part of growing defects leading to further damage of the equipment can be determined by timely monitoring of the transformer oil condition. The use of modern information technology can significantly improve the diagnosis efficiency based on the analysis of the oil parameters.

The work is devoted to consideration of the main features of the diagnostic organization of defect growth based on the analysis of dissolved gases in the transformer. As a basic technique, we use the method of chromatographic analysis of gases. At the first stage of the diagnosis by the CADG method, the concentrations of seven gases are determined and compared with the limiting values of concentrations taken from the relevant regulatory documents. The composition of gases dissolved in the oil depends of the nature of the growing damage in the transformer according to the obtained data of CADG. It is possible to predict roughly the type of defect growth.

The criterion of the limiting concentrations allows isolating of the transformers from the total number of the transformer park with possible defect growth. To clarify the diagnosis, it is necessary to determine the correlation of the concentrations of pairs of four gases. The degree of defect growth danger is determined by the relative rate of gas build-up.

CADG for transformer oil today is one of the most important and effective diagnostic methods and it reveals a wide range of equipment problems, including the early stages of growth.

Keywords: power transformer, gas chromatographic analysis, threshold concentration, gassing, relative speed, complex method.