

# Stanovení obsahu vody ve výkonových transformátorech

V. G. Davydov, O. Roizman

Pro bezpečný provoz transformátoru je třeba za všech provozních podmínek znát obsah vody v izolačním papíru a oleji. Při zdokonalování současných metod určování vlhkosti papíru vznikl pojem „aktivita vody v papíru“ (water-in-paper activity). Pro přesné určení obsahu vody v izolačních soustavách transformátorů jsou nejdůležitějšími parametry rozpustnost vody v oleji a schopnost papírové izolace přijímat vodu. Pro určování obsahu vody lze použít softwarovou aplikaci Transformer Moisture Monitor (TMM). Vývoj nového postupu klasifikace poskytuje uživateli prostředky k rozdělení transformátorů na suché a mokré.

## Úvod

Voda se vyskytuje v transformátorech jako nechtěná látka, snižuje jejich průrazné izolační napětí a výrazně zkracuje životnost transformátoru. Velká vlhkost papíru může vyústit až do vysrážení volné vody, a zvyšuje tak riziko průrazu izolace. Voda kromě toho způsobuje zrychlené stárnutí papíru, korozi vinutí a nádoby a zvyšuje spotřebu aditiv do oleje.

Voda obsažená v transformátoru pochází ze tří hlavních zdrojů: je to voda ze zbytkové vlhkosti v konstrukčních materiálech, voda, která do transformátoru proniká z okolního vzduchu, a voda, která vzniká procesem stárnutí celulózy a oleje.

Zbytková vlhkost v novém transformátoru po vysušení při výrobě a ještě před expedicí je většinou menší než 1 %, ideální je dosažení hodnoty 0,5 %. Nadměrná vlhkost (2 až 4 %) může zůstat v některých součástkách, např. plastových. Během provozu tato vlhkost postupně proniká do oleje a zvyšuje obsah vody v izolační soustavě.

Hlavním zdrojem navlhání transformátoru je ale atmosférická vlhkost. Tady působí tři mechanismy navlhání: za prvé vstřebávání vody přímým vystavením izolace vzduchu (při montáži a údržbě), za druhé zvyšování vlhkosti pronikáním vlhkosti do transformátoru molekulárním a přechodovým (Knudsenovým) prouděním vlivem rozdílu obsahu vody v atmosféře a v oleji v nádrži a za třetí zvyšování vlhkosti viskózním prouděním vlivem vyrovnávání tlaku mezi vnitřkem transformátoru a ovzduším.

Molekulární a Knudsenovo proudění jsou pro nárůst obsahu vody v transformátoru

v podstatě zanedbatelné. Hlavním důvodem pronikání vody do transformátoru je viskózní proudění vlhkého vzduchu přes nedokonalé těsnění, tj. vývodkami, pojistnými ventily, chladicími okruhy atd., při změnách tlaku. Velké množství vody může v krátké době vniknout do transformátoru při prudkém dešti, jestliže je nedokonalé těsnění a současně poklesne tlak uvnitř transformátoru.

## 1. Metody a přístroje pro měření obsahu vody v transformátoru

Výraz „obsah vody v transformátoru“ se používá pro vyjádření celkového obsahu vody nasáknuté v papíru, rozpuštěné a emulgované v oleji a volné vody. Obsah vody se udává v jednotkách jejího objemu nebo hmotnosti. Měrná vlhkost, resp. měrný obsah vody v daném materiálu, vyjadřuje hmotnost vody v jednotkové hmotnosti daného materiálu a udává se v příslušné poměrové jednotce, např. v %. Relativní vlhkost je poměr skutečného množství fyzikálně vázané vody obsažené v dané látce k maximálně možnému množství vody za daných podmínek; poměr množství vody, která se ještě může do látky za daných podmínek fyzikálně navázat, k maximálnímu možnému množství vázané vody je relativní nasycení.

Voda v transformátoru se nachází v různých částech izolační soustavy. Může být v pevné izolaci, rozpuštěná v oleji nebo vysrážená v kapalně podobě na dně nebo stěnách nádoby. Pro měření vlhkosti se používají různé přístroje a metody.

Například pro určení relativní vlhkosti oleje nebo relativního nasycení se často používají polymerové senzory. Měrnou vlhkost oleje lze z naměřené relativní

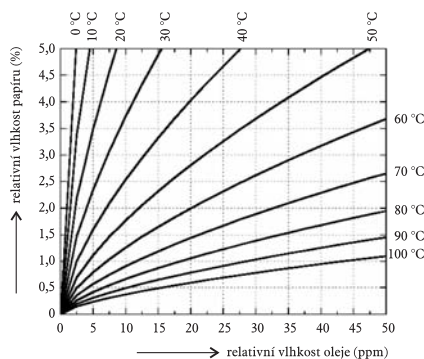
vlhkosti oleje, vyjádřené v ppm (parts per million, tj.  $10^{-4}$  %), snadno určit, je-li známa rozpustnost vody v příslušném oleji za podmínek měření (rozpustnost se mění především s teplotou). Do popředí zájmu se v poslední době dostává přímé (on-line) měření obsahu vody v oleji. Na Monashově univerzitě v Austrálii byl testován velký počet komerčně dostupných senzorů za různých podmínek.

Jinou metodou pro určení měrné vlhkosti oleje je titrace podle Karla Fischera (KF titrace). Tuto analytickou metodu ovšem nelze použít pro přímé měření: je nutné odebrat vzorek oleje a vlastní postup vyžaduje příslušné chemikálie a přístroje. Vzorky musí analyzovat zkušený chemik-analytik, protože je nutné dodržovat přesný postup titrace a interpretace výsledků. Při odebrání vzorků je také nutné přesně změřit teplotu oleje.

Existuje také několik metod založených na měření a analýze dielektrických vlastností izolace. Tyto metody vycházejí ze skutečnosti, že papír a olej mění své dielektrické vlastnosti se vzrůstající vlhkostí. Při měření elektrických vlastností izolace lze zjistit jejich závislost na obsahu vody v soustavě papír-olej. Těmito metodami je ovšem těžké, ne-li nemožné, určit, jaký vliv na změnu elektrických vlastností izolačního systému má vlhkost a jaký jiné faktory. To je zdrojem pochybností o spolehlivosti určení obsahu vody v transformátoru pomocí měření stavu dielektrika. Vyhodnocení výsledků je stále spíše otázkou umění než vědy.

## 2. Obsah vody v papírové izolaci

Jedním z cílů určování vlhkosti olejové náplně je zjištění obsahu vody v papírové izolaci. Výraz „papírová izolace“ je obecný termín pro pevný celulózový materiál, jako je papír, lepenka, dřevo a bavlna. Měrný obsah vody v papíru se označuje zkratkou WCP (Water Content of Paper) a je to poměr mezi hmotností vody a hmotností suchého papíru, vyjádřený v procentech. Hmotnost vody se počítá z rozdílu mezi hmotností suchého a mokrého papíru. Papír se před jeho vážením za sucha většinou suší v troubě. Tradiční WCP se ale vztahuje pouze na papír bez oleje. Pro impregnovaný papír lze WCP také použít, v tomto případě ale s použitím Fischerovy titrace. Po měření vlhkosti oleje se papír odmastí a teprve potom se vysuší. Pro dosažení



Obr. 1 Rovnovážné křivky závislosti relativní vlhkosti papíru na relativní vlhkosti oleje při různých teplotách podle P. J. Griffina

přesných výsledků nesmí tloušťka papíru nebo lepenky přesáhnout několik set mikrometrů. V papírovo-olejové izolační soustavě transformátorů s tenkými i silnými papírovými vrstvami je ovšem situace úplně jiná.

Ve studii zpracované na Monashově univerzitě za podpory Výzkumného ústavu silnoproudé elektrotechniky EPRI (USA) byla vyvinuta nová metoda pro zjišťování vlhkosti v transformátorech založená na zjišťování parametru aktivity vody v papíru. Parametr aktivity vody v papíru se používá k vyjádření vlivu vlhkosti v izolačních systémech nových i starých transformátorů. Používá se také parametr měrný obsah aktivní vody v papíru (WCPA), který vyjadřuje měrný obsah vody v izolaci transformátoru, jež je schopna migrace mezi papírem a olejem. Na základě výsledků měření vznikl graf rovnovážných křivek vyjadřujících závislost WCPA na parametru aktivity vody v papíru při různých teplotách.

Číselně je aktivita vody v papíru rovna relativnímu nasycení papíru vodou dělenému stem.

Existuje několik způsobů, jak vyčíslit hodnotu WCPA papírové izolace v olejovo-papírové izolační soustavě. První z nich je využití zmíněného grafu. V ustáleném stavu se změří teplota izolační soustavy a snímačem relativní vlhkosti se určí relativní nasycení. Z něj se snadno vypočítá aktivita vody v papíru a z grafu se odečte WCPA.

Jiným způsobem vyčíslení hodnoty WCPA papírové izolace v olejovo-papírové izolační soustavě je použití grafu rovnovážných křivek vyjadřujících závislost mezi relativní vlhkostí oleje v ppm, teplotou a relativní vlhkostí papíru (obr. 1), která se u tenkého papíru rovná WCPA. Pro získání hodnoty WCPA je nutné stanovit rovnovážné podmínky v systému a potom změřit měrnou vlhkost oleje pomocí KF titrace. V tomto případě je ovšem zapotřebí měřit ještě jeden parametr, než se určí WCPA, a to rozpustnost vody v oleji.

### 3. Určování vlhkosti v transformátoru za provozu

Výkonový transformátor z hlediska vlhkosti není v provozu nikdy ve stavu rovnováhy. Obě metody uvedené v kap. 2 však vyžadují, aby systém v rovnováze byl, a není proto možné je přímo uplatnit pro určení WCPA. Lze ale použít metodu pro stanovení vlhkosti izolace transformátoru. Tato metoda, vyvinutá na Monashově univerzitě, je založena na algoritmu, jenž zahrnuje tyto tři kroky:

- zjištění skutečného relativního nasycení oleje v transformátoru,
- určení aktivity vody v papíru pro daný transformátorový olej a jeho vlhkost,

- zjištění měrného obsahu aktivní vody v papíru WCPA jako funkce aktivity vody v papíru a teploty.

Na základě tohoto algoritmu byl vytvořen počítačový program pro určování vlhkosti v transformátoru Transformer Moisture Monitor (TMM). TMM získává hodnoty WCPA na základě výpočtu z výstupu kombinovaného snímače vlhkosti Vasala HMP228 a upozorňuje provozovatele, jestliže stav izolace vyžaduje zvýšenou pozornost. Snímač Vasala HMP228 obsahuje kromě senzoru vlhkosti i senzor teploty.

### 4. Nová procedura klasifikace pro diagnostiku vlhkosti off-line

Výzkum na Monashově univerzitě ukázal, že pro přesné stanovení vlhkosti v izolaci transformátoru je nutné nepřetržitě sledovat množství parametrů, jako jsou zatížení transformátoru, teplota a relativní nasycení oleje. Je také nutné měřit rozpustnost vody v oleji.

Takto lze sledovat desítky i stovky transformátorů. Avšak ne všechny transformátory vyžadují nepřetržitě měření. Je možné určit transformátor, jehož vlhkost již vyžaduje trvalé sledování? Existuje požadavek na vytvoření klasifikace, která by roztrídila transformátory podle úrovně vlhkosti.

Jedním ze způsobů je rozdělení na tři úrovně: červená, žlutá a zelená barva určují „vlhký“, „vyžadující pozornost“ a „suchý“ stav transformátoru.

Pro potřebu rozdělení transformátorů z hlediska jejich vlhkosti a potřeby jejich sledování byla vyvinuta nová metoda klasifikace, která má za cíl zefektivnit kontrolu životnosti transformátorů. Spočívá ve stanovení WCPA z měrné vlhkosti oleje stanovené pomocí KF titrace a teploty T vzorku oleje v okamžiku jeho odběru. Zelená oblast odpovídá hodnotě WCPA menší než 1 %, žlutá barva odpovídá WCPA v rozmezí 1 % až 2 % a červená je pro hodnoty WCPA větší než 2 %. Pro danou teplotu a měrnou vlhkost oleje lze dále určit dobu difuze vody přes lepenku tloušťky 1 mm z obou stran ponořenou do oleje. Při teplotě oleje pod 45 °C a měrné vlhkosti oleje pod 20 ppm je doba difuze příliš dlouhá pro spolehlivou diagnostiku s využitím navržené procedury.

Uvedené rozdělení platí pro nový olej. Ovšem rozpustnost vody v novém a starém oleji se mohou podstatně lišit. To znamená, že pro přesnou klasifikaci starších transformátorů je třeba znát rozpustnosti vody v oleji.

Z pohledu nových poznatků, které zde byly uvedeny, musí být přehodnocen názor, že „jestliže měrná vlhkost oleje přesáhne 20 ppm, vyžaduje transformátor zvýšenou

pozornost, jestliže je měrná vlhkost oleje menší než 20 %, nemusí se podnikat žádné kroky.“ Transformátor s novým olejem a hodnotou měrné vlhkosti oleje 20 až 25 ppm bude označen za „pravděpodobně vlhký“, jestliže byl vzorek oleje odebrán při teplotě 55 °C. Byl-li ovšem vzorek odebrán při teplotě 80 °C, bude při stejné vlhkosti transformátor označen jako „pravděpodobně suchý“. Aby bylo možné potvrdit nebo odmítnout toto hodnocení, je ještě nutné po několika hodinách odebrat vzorek za jiných podmínek. Tento příklad ukazuje na důležitost měření teploty oleje při odbírání vzorku, důležitost odebrání druhého vzorku a důležitost doby mezi dvěma odběry.

Je zřejmé, že pouhá znalost měrné vlhkosti získané pomocí KF titrace nestačí pro přesné zjištění stavu vlhkosti transformátoru. Je ještě třeba znát teplotu prvního vzorku oleje, změnu teploty a vlhkosti druhého vzorku i rozpustnost vody v oleji.

### Závěr

Typ oleje, jeho stáří a průtok ovlivňují měření a následné stanovení vlhkosti oleje v papírovo-olejové izolační soustavě. Na přesnost má vliv také umístění snímače vlhkosti.

Parametr rozpustnosti vody je vyžadován pro validaci čidla vlhkosti umístěného v transformátoru. Aktivita vody v oleji je faktor důležitý k určení vlhkosti výkonového transformátoru.

Pro určení vlhkosti transformátoru lze použít software nazvaný Transformer Moisture Monitor (TMM).

*Překlad (skrácený):*

*Jaromír Uher, D-Ex Limited ČR*

**V. G. Davydov**

**Monashova univerzita, Austrálie**

**O. Roizman**

**IntellPower, Austrálie**



**D-Ex Limited spol. s r. o.**

**Zastúpení pre SR:**  
**Pražská 11, 811 04 Bratislava**  
**Tel.: 02/57 29 72 97**  
**Fax: 02/57 29 74 24**  
**e-mail: info@dex.sk**  
**http://www.dex.sk**

**Zastúpení pre ČR:**  
**Optátova 37, 637 00 Brno**  
**Tel.: +420 541 423 211**  
**Fax: +420 541 423 219**  
**e-mail: info@dex.cz**  
**http://www.dex.cz**

26