

Abstrakt

Bakalářská práce je komplexní souhrn prováděných měření na transformátorech. Měření dělím na online a off-line. V praktické části používám plynovou chromatografii a měření elektrické pevnosti.

Klíčová slova

Diagnostika, Plynová chromatografie, Měření, Transformátor, Vinutí, Zkoušky.

Abstract

Bachelor thesis is a complex set of measurements in transformers. I divided measurement into online and off-line. I used gas chromatography and measurement of dielectric strength in the practical part.

Key words

Diagnosis, Gas chromatography, Measurement, Transformer, Winding, Tests.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 31.5.2016

Václav Nedvěd

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Eva MÜLLEROVÁ, Ph.D. Za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále mé rodině za vymezení volného času a mému zaměstnavateli za poskytnutí praktický znalostí.

Obsah

OBSAH	5
ÚVOD	1
1 ZÁKLADNÍ ZKOUŠKY A MĚŘENÍ	3
1.1 KONTROLA NATOČENÍ FÁZÍ – SKUPINA SPOJENÍ.....	4
1.2 ZKOUŠKA PŘILOŽENÝM NAPĚTÍM Z CIZÍHO ZDROJE	5
1.3 ZKOUŠKA ATMOSFÉRICKÝM IMPULZEM	6
1.4 MĚŘENÍ IZOLAČNÍHO ODPORU VINUTÍ, POLARIZAČNÍ INDEX A ČASOVÉ KONSTANTY	7
1.5 MĚŘENÍ ZTRÁTOVÉHO Činitele TGA A KAPACITY VINUTÍ	10
1.6 ZKOUŠKA INDUKOVANÝM STŘÍDAVÝM NAPĚTÍM	14
1.7 MĚŘENÍ ZTRÁT, NAPĚTÍ A PROUDU NAPRÁZDNO	15
1.8 MĚŘENÍ ZTRÁT, NAPĚTÍ A PROUDU NAKRÁTKO	16
1.9 MĚŘENÍ ODPORU VINUTÍ ZA STUDENA SS PROUDEM.....	17
1.10 VYSOKOFREKVENČNÍ DIAGNOSTIKA SFRA	18
1.11 MĚŘENÍ ELEKTRICKÉ PEVNOSTI TRANSFORMÁTOROVÉHO OLEJE.....	20
2 ONLINE DIAGNOSTIKA	21
2.1 MĚŘENÍ NAPĚTÍ A PROUDU	21
2.2 MĚŘENÍ TEPLoty.....	21
2.3 MĚŘENÍ VÝŠKY HLADINY V KONZERVÁTORU	22
3 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ KVALITY IZOLAČNÍHO OLEJE NA DISTRIBUČNÍM TRANSFORMÁTORU	23
3.1 MĚŘENÍ ELEKTRICKÉ PEVNOSTI.....	23
3.2 PLYNOVÁ CHROMATOGRAFIE DGA.....	25
ZÁVĚR	28
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	30

Úvod

Transformátory jsou dalším důležitým stavebním prvkem v transformaci napětí, díky přenosu na delší vzdálenosti. Se stoupající populací a vývojem všech různých technologií, vznikají veliké nároky na elektrickou energii, jak na kvalitu, tak na spolehlivost dodávky. Diagnostika má prioritní cíl předejít poruchovým stavům a zamezit různým nehodám s jakýmkoli následky, ať už ekonomické, ekologické či újmu na zdraví.

Pro tyto účely rozdělím transformátory do skupin podle výkonu:

- a) Suché
 - chladicí medium v podobě plynu (vzduch)
 - napětí < 38kV, výkon < 10 MVA
 - pokud je chladivo SF₆ lze použít do 75kV
- b) Zalévané
 - vinutí pokryté pryskyřicí
 - napětí < 35 kV, výkon < 35 MVA
- c) Izolace olej-papír
 - použití v distribuci, velké blokové a distribuční transformátory
 - napětí >22kV, výkon v desítkách MVA
 - nejrozšířenější systém, [1]

V této práci budu rozebírat jednotlivé zkoušky a měření, které provádějí na distribučních transformátorech 110kV/22kV před instalací a po ní, tj. v době provozu ať už off-line či online. Změřené výsledky z diagnostiky nám říkají, v jakém stavu se daný transformátor nachází, či jaká je na něm závada a jaký bude směr oprav či rekonstrukce nebo výměna některých částí. Nejpodstatnější jsou měření izolačních stavů vinutí, oleje atd. Z nich pak jsme schopni říci jeho stav, respektive stupeň degradace daného izolačního materiálu. Jelikož se veškerá nedestruktivní měření provádí v přímé blízkosti transformátoru, jsou na měřicí přístroje kladeny vysoké nároky na rychlost a kvalitu měření, na přenositelnost, zamezení přístupu rušivým vlivy. Součástí normalizovaných diagnostických postupů je často také požadavek na měření při určité teplotě stroje. Tento požadavek je někdy v provozu obtížně splnitelný a chyby měření, které mohou takto vznikat, významně ovlivní použitelnost výsledků.

Přehled všech prováděných měření v praxi se dá rozdělit do dvou velkých skupin. Jedním je off-line diagnostika, kde testovaný předmět je mimo provoz, tj. odstaven pro danou práci (odpojen přívodu a vývodu). Tím druhým je online diagnostika, kdy je zařízení v provozu. Do této kategorie by se dali zařadit i ochrany a jištění transformátoru, jelikož měříme napětí a proudy v jednotlivých fázích. Na základě vývoje těchto dvou skupin a jejich periodických měření, jsme schopni s určitou pravděpodobností vyvodit závěr, v jakém stavu se bude daný transformátor nacházet. Díky znalosti průběhu sledovaných parametrů jsme schopni zajistit opravu nebo jinou manipulaci ještě před možnou poruchou. Periodické měření pro nn/vn stroje v období 1-4 roky, vn/vvn 1-2 roky, veškeré stroje s výkonem > 100 MVA každý rok. Celkové rozdělení všech zkoušek, kterými transformátor projde je zaznamenán v *tab. 1.1.*

Tab. 1.1. Zkoušky transformátorů a jejich rozdělení do jednotlivých skupin [1]

Název zkoušky nebo měření	zkouška		
	typová	kusová	zvláštní
Měření izolačního odporu	+	+	-
Měření odporu vinutí za studena stejnosměrným proudem	+	+	-
Měření převodu napětí naprázdno na všech odbočkách	+	+	-
Kontrola natočení fází	+	+	-
Zkouška přiloženým napětím z cizího zdroje	+	+	-
Zkouška indukovaným napětím	+	+	-
Měření ztrát naprázdno a proudu naprázdno	+	+	-
Měření charakteristiky naprázdno	+	-	-
Měření ztrát nakrátko a proudu nakrátko	+	+	-
Oteplovací zkouška	+	-	-
Zkouška elektrické pevnosti izolace atmosférickým impulzem:			
a) na vinutí se jmenovitým napětím do 132 kV	+	-	+
b) na vinutí se jmenovitým napětím nad 132 kV	+	+	-
Měření ztrátového činitele kapacity vinutí na transformátoru:			
a) na vinutí se jmenovitým napětím do 132 kV	-	-	+
b) na vinutí se jmenovitým napětím nad 132 kV	+	+	-
Zkratová zkouška	+	-	-

Měření nulové složky reaktance na transformátoru			
a) na jmenovitém napětí menším než 110 kV	-	-	+
b) na jmenovitém napětí 110 kV a vyšším	-	-	+*)
Měření hluku na transformátorech:			
a) s výkonem do 1600 kVA včetně	+	-	-
b) s výkonem nad 1600 kVA	-	-	+
Zkouška přepínače odboček	+	+	-
Zkouška el. pevnosti izolace spínacími impulzy	-	-	+
Měření částečných výbojů	-	-	+
Měření ochrany rádiového příjmu před rušením	-	-	+
Zkouška oleje pro transformátory s olejovou náplní			
a) zkouška průrazného napětí	+	+	-
b) měření obsahu vody v oleji transformátorů se jmenovitým napětím 110 kV a vyšším	+	+	-
c) měření $\text{tg}\delta$, R_0 a ϵ_r oleje transformátorů se jmenovitým výkonem 110 kV a vyšším	+	+	-
+ vykonává se; - nevykonává se			
*) Pro transformátory určené pro energetiku – typová zkouška			

V praxi je však možné, že u dvou stejných transformátorů dospět k jiným výsledkům. Závisí to na stáří stroje, možném využití (jeho procentuální zatížení). Jeho vnitřní nerovnoměrná teplota má velký vliv na izolaci. Jeho umístění, jestli se nachází v kobce či na volném prostranství. To je spojeno s povětrnostními podmínkami, např. v horských oblastech/nížinách. Tohle vše prodlužuje nebo zkracuje možnou živostnost izolačních materiálů, průchodek a různých dalších prvků, které jsou na transformátoru připevněny.

1 Základní zkoušky a měření

Nadřazené rozdělení zkoušek by se dalo zvolit na destruktivní a nedestruktivní. V mé práci se budu zabývat těmi nedestruktivními, tj. těmi, které se mohou libovolně opakovat, ať už v počtu jednotlivých měření po sobě jdoucích, tak ve stanovené periodicitě. U destruktivních zkoušek zkoumáme výsledky jen v případě trvalé poruchy. Již není možné transformátor provozovat, neboť dynamické účinky proudu nám zdeformovali část stroje.

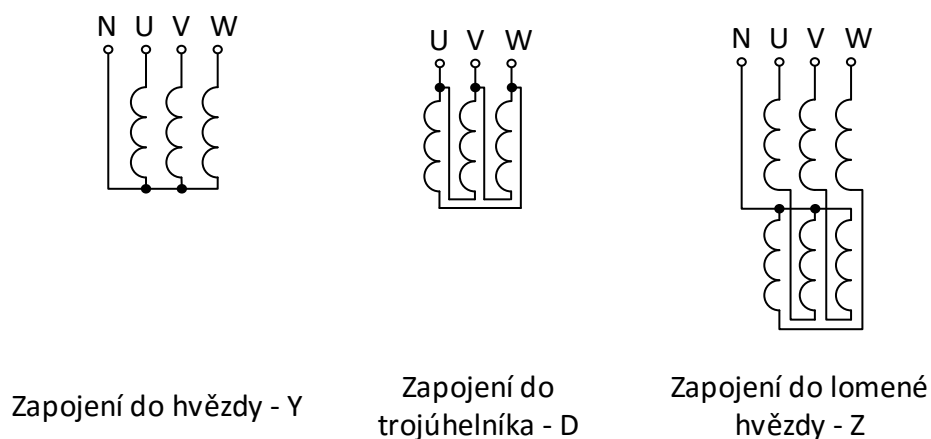
Mezi destruktivní zkoušky také patří zrychlení degradace izolačních schopností. V tomto měření urychlujeme proces stárnutí izolace při sledování jednotlivých parametrů stroje.

Všechny tyto nedestruktivní zkoušky probíhají ve výrobním závodě, ještě před samotnou přepravou. Některé však jsou prováděny i po transportu a usazení na dané místo. Pokud by se při přepravě vyskytl uvnitř nádoby nežádoucí stav. Jsme schopni ho odhalit ještě před uvedením do provozu a předejít značným ekonomickým škodám na novém zařízení.

1.1 Kontrola natočení fází – skupina spojení

Fázový posun mezi stejně označenými svorkami vstupního a výstupního vinutí se udává tzv. hodinovým úhlem (1 hodina = 30°). Hodinový úhel patří mezi důležité štítkové údaje transformátorů. Hlavní roli hraje opět při určování možnosti paralelního chodu transformátorů, kdy je stejný hodinový úhel jednou z nezbytných podmínek. Natočení fází se udává symbolem, který vyjadřuje spojení vinutí vyššího napětí (velká písmena Y, D, Z), spojení vinutí nižšího napětí (malá písmena y, d, z) a hodinový úhel v hodinách. Např. Yd5 značí, že vinutí vyššího napětí je spojeno do hvězdy, nižšího do trojúhelníku a fázový úhel měřený od fáze vyššího napětí ke stejné fázi nižšího napětí je 5h (150°).

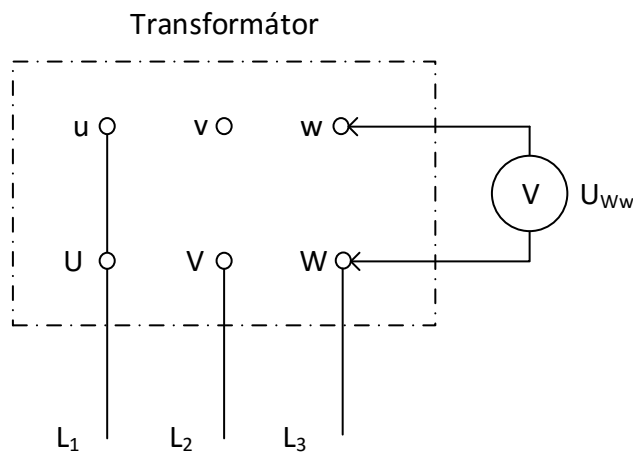
Existují různé kombinace spojení vinutí transformátoru (Yy, Dy, Dz, Yd, Yz).



Obr. 1.1.1 Druhy zapojení vinutí transformátoru

Pro určení hodinového úhlu můžeme využít měření napětí transformátoru voltmetrem. Na naměřeném transformátoru vodivě propojíme dvě stejně označené svorky strany nižšího a vyššího napětí (např. U, u). Stranu vyššího napětí napájíme sníženým souměrným trojfázovým napětím. Voltmetrem změříme postupně jednotlivé fázové a sdružené hodnoty napětí. Protože svorky U a u mají stejný potenciál, je tento vrchol trojúhelníku napětí nižší i

vyšší strany totožný. K určení vrcholů v , w použijeme naměřená napětí U_{Vv} , U_{Wv} , U_{Uv} , U_{Ww} , jejichž velikost (ve zvoleném měřítku) opíšeme z vrcholů V a W . Průsečíky příslušných kružnic určují vrcholy v a w v trojúhelníku strany nižšího napětí. Vrcholy v a w také prochází kružnice opsaná z vrcholu $U \equiv u$ o poloměru U_{Uw} . Je-li sled u , v , w stejný jako sled U , V , W (pravotočivý), je sled fází, který svírají např. úsečky UV a uv měřený vždy od úsečky vyššího napětí k úsečce nižšího napětí, ve smyslu označení vrcholů U , V , W .



Obr. 1.1.2 Schéma zapojení měření jednotlivých napětí, konkrétně U_{Ww} [1]

1.2 Zkouška přiloženým napětím z cizího zdroje

Při této zkoušce se ověřuje elektrická pevnost izolace zkoušeného vinutí proti ostatním vinutím a uzemněným částem. Izolační systém v tomto prostoru tvoří izolace vodičů a válce z transformátorové lepenky. Tyto pevné papírové izolanty ve spojení s olejem vytváří nejdůležitější izolační část transformátoru.

Zkoušky se musí provádět na kompletně smontovaných transformátorech. Výjimku tvoří olejové transformátory, u nichž se nepředepisuje namontování chladičů a dalších pomocných částí, pokud jsou tyto části v provozním stavu elektricky odstíněny vzhledem k vývodům. Napětí se přivádí mezi zkratované zkoušené vinutí a uzemněné vývody všech ostatních vinutí, které nejsou elektricky spojeny se zkoušeným vinutím, uzemněný magnetický obvod, kovový plášť nebo nádobu. Zkušební napětí se měří na straně vyššího napětí měřicího obvodu. Jako hodnotu zkušebního napětí bereme vrcholovou hodnotu dělenou $\sqrt{2}$.

1.3 Zkouška atmosférickým impulzem

Zkouškami elektrické odolnosti se zjišťuje, zda je dostačující elektrická pevnost mezi:

- jednotlivými vinutími navzájem;
- vinutím a uzemněnými částmi transformátoru (kostrou, nádobou apod.);
- závity, vrstvami a cívkami každého vinutí.

Izolační hladina vinutí transformátoru (zkušební napětí) se volí podle druhu sítě a zařízení, na které bude transformátor připojený.

V tab. 1.3.1 jsou uvedena zkušební napětí vinutí transformátoru s plnou izolací. Platí pro transformátory, které mají vinutí spojené do trojúhelníku a vinutí spojené do hvězdy pro provoz s izolovaným nulovým bodem. [1]

Tab. 1.3.1 Zkušební napětí vinutí transformátoru s plnou izolací [1]

Jmenovité napětí [kV]	Nejvyšší dovolené napětí [kV]	Přiložené zkušební napětí s kmitočtem 50 Hz [kV]	Indukované zkušební napětí mezi svorkami [kV]	Rázové zkušební napětí [kV]
do 1	do 1,1	3	2	-
6	7,2	22	12	60
10	12	28	20	75
22	25	50	44	150
35	38,5	75	70	190
110	123	230	220	550
220	245	460	440	1050

V tab. 1.3.2 jsou uvedena skutečná napětí pro vinutí transformátoru s redukovanou izolací. Platí pro transformátory s vinutím zapojeným do hvězdy pro provoz s účinně uzemněným nulovým bodem.

Tab. 1.3.2 Zkušební napětí vinutí transformátoru s redukovanou izolací [1]

Jmenovité napětí [kV]	Nejvyšší dovolené napětí [kV]	Indukované zkušební napětí proti zemi a mezi svorkami [kV]	Rázové zkušební napětí [kV]
110	123	195	450
220	245	395	900
400	420	630	1425

Rázové zkušební napětí – plná rázová napěťová vlna o tvaru 1,2/50 μ s.

U transformátorů připojených k takovým zařízením, kde se nevyskytují vyšší přepětí, anebo mají účinnou ochranu proti přepětím, mohou být použita zkušební napětí se sníženou hladinou. [1]

1.4 Měření izolačního odporu vinutí, polarizační index a časové konstanty

Měření izolačního odporu patří mezi nejstarší diagnostické metody v profylaktice transformátorů. Izolační odpor citlivě reaguje na nejslabší místo izolačního systému. Jeho pokles je často spojen s vlivem vlhkosti a vodivých nečistot. Při měření se provádějí dvě odečtení absorpčního proudu, a sice v čase 15 a 60 s po přiložení napětí na měřený objekt [3]. Za absolutní velikost izolačního odporu se považuje hodnota změřená 60 s po přiložení měřícího napětí. Obě hodnoty jsou výchozími pro určení minutového polarizačního indexu p_{i1} .

$$p_{i1} = \frac{i_{15}}{i_{60}} [-],$$

kde i_{15} je absorpční proud odečtený 15 s po přiložení napětí, i_{60} je absorpční proud odečtený 60 s po přiložení napětí na zkoušený objekt.

Časová konstanta τ stroje je další veličinou charakterizující stav izolačního systému. Absolutní velikost časové konstanty nezávisí na geotermických rozměrech vinutí stroje, což v praxi umožňuje objektivní hodnocení izolačního systému strojů bez ohledu na jejich napětí, výkon a typ. Stanovíme ji z naměřených hodnot izolačního odporu a kapacity stroje. Kapacitu stroje lze uvažovat jako její jmenovitou hodnotu (dána výpočtem při konstrukci vinutá), nebo ji lze změřit (libovolným způsobem).

$$\tau = R_{iz60} \cdot C_{50} [s],$$

kde R_{iz60} je izolační odpor určený v čase 60 s po zapojení měřícího napětí [$M\Omega$], C_{50} je kapacita izolace změřená při 50 Hz [μ F].

Pro měření užíváme přístrojů pro přímé měření odporu. Měříme za normálních podmínek při relativní vlhkosti menší než 90% (měření nelze provádět za deště, mlhy, sněžení), při teplotě větší než +10 °C. Měření izolačního odporu se provádí v souladu s tab. 1.4 podle schématu uvedeného na obr. 1.4 při stejnosměrném napětí 2,5kV (měřicí napětí by nemělo překročit hodnotu jmenovitého napětí stroje). Aby během měření nedošlo ke zkracení naměřených hodnot vlivem případného zbytkového náboje, je třeba přísně dodržovat vybíjecí intervaly.

Měření se provádí na oboustranně odpojeném stroji od rozvodné sítě při respektování všech bezpečnostních opatření po vyrovnání a ustálení teplot všech částí stroje (tedy asi dvě hodiny po odstavení a vypnutí čerpadel). Před měřením se všechna vinutí transformátoru spojí nakrátko a minimálně na pět minut spojí s kostrou stroje (pro odstranění zbytkového náboje). Transformátorová nádoba stroje musí být uzemněna (při měření musí být zajištěno uzemnění do jednoho bodu) a při měření nesmí být žádné vinutí nezapojeno (buď se musí spojit s kostrou, nebo s měřícím napětím). Měří se odpor jednotlivých vinutí proti sobě s připojenou či uzemněnou nádobou.[1]

Tab. 1.4 Zapojení vinutí transformátoru při měření izolačního odporu [1]

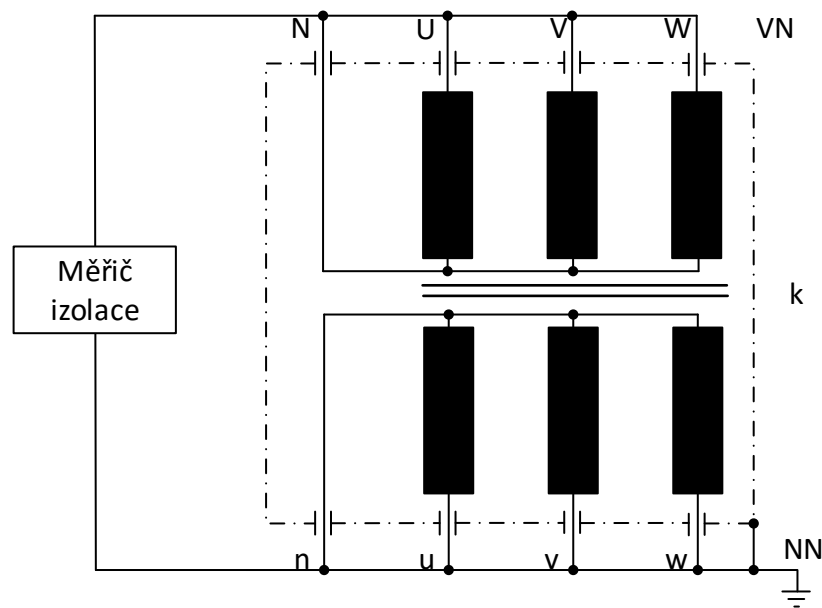
Transformátory s dvojitým vinutím		Transformátory s trojitým vinutím	
měřené vinutí	uzemněno	měřené vinutí	uzemněno
VN	NN, k	VN	SN, NN, k
NN	VN, k	SN	VN, NN, k
VN+NN	k	NN	VN, SN, k
-	-	VN + SN	NN, k
-	-	VN + SN + NN	K

VN – vinutí vyššího napětí

NN – vinutí nižšího napětí

SN – vinutí středního napětí

k – kostra, nádoba



VN – strana vyššího napětí

NN – strana nižšího napětí

k – kostra

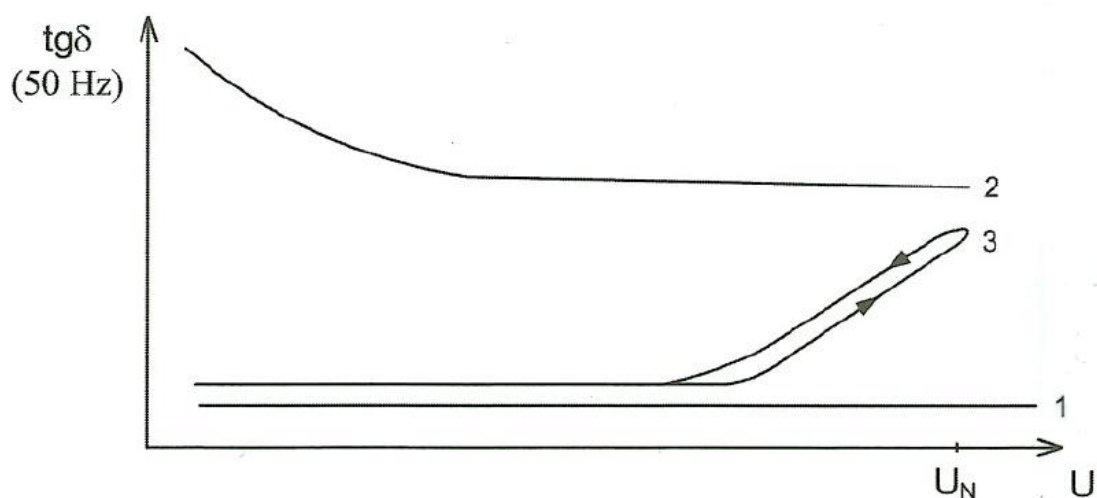
Obr. 1.4 Schéma měření izolačního odporu

Měří se také dílčí izolační odpory mezi jednotlivými vinutími transformátoru. Vinutí, jejichž vliv má být vyloučen, se v tomto případě musí připojit ke stínícímu vývodu. Vývody vinutí, na nichž se provádí měření, je nutné vzájemně propojit. Při opakovaných měřeních izolačního odporu se doporučuje dodržet vždy stejný sled jednotlivých měření, způsob zapojení a polaritu měřicího napětí.

Při posuzování naměřených hodnot porovnáváme aktuální hodnoty s hodnotami z předchozího měření, eventuálně s hodnotami nového stroje. Je-li změna vyšší než 40%, je nutné vyšetřit její příčinu. Minimální hodnota polarizačního indexu u nových strojů a strojů po revizi by neměla být menší než 1,7; u provozovaných strojů 1,3. Časová konstanta se pohybuje v závislosti na provozním napětí stroje v rozpětí 5 až 10. Při celkovém hodnocení uvedených veličin je nutné respektovat i výsledky příslušných zkoušek izolačního oleje (průrazné napětí, obsah vody, celkový obsah plynu, atd.). [1]

1.5 Měření ztrátového činitele $\text{tg}\delta$ a kapacity vinutí

Ztrátový činitel charakterizuje činné ztráty polarizací v izolaci. Se zvyšující se hodnotou ztrátového činitele se izolace více zahřívá a rychleji stárne (izolace obsahuje velké množství polárních látek, např. vodu, reakční produkty stárnutí a mechanické nečistoty). Ztrátový činitel proto dává obraz o celkovém stavu izolace z jeho velikosti, která je ovlivněna pevnou i kapalnou částí dielektrika, lze identifikovat, zda je izolační soustava zestárlá nebo navlhla (obr. 1.5). V omezené míře reaguje také na vznik částečných výbojů.



- (1) kvalitní, nenavlhnutá izolace, malý $\text{tg}\delta$
- (2) navlhlá izolace, stabilní hodnota ztrát
- (3) suchá, kvalitní izolace, „mírné koleno“ v závislosti na částečných výbojích

Obr. 1.5. Závislost napětí na ztrátovém činiteli

Kapacita vinutí se sama o sobě pro hodnocení obvykle nepoužívá. Její změny však mohou indikovat poškození izolace a v případě lokálních poruch i pomoci k jejich odhalení. Velikost kapacity vinutí se proto sleduje jako znak kvality izolantu, která by se v průběhu provozu stroje neměla příliš lišit.

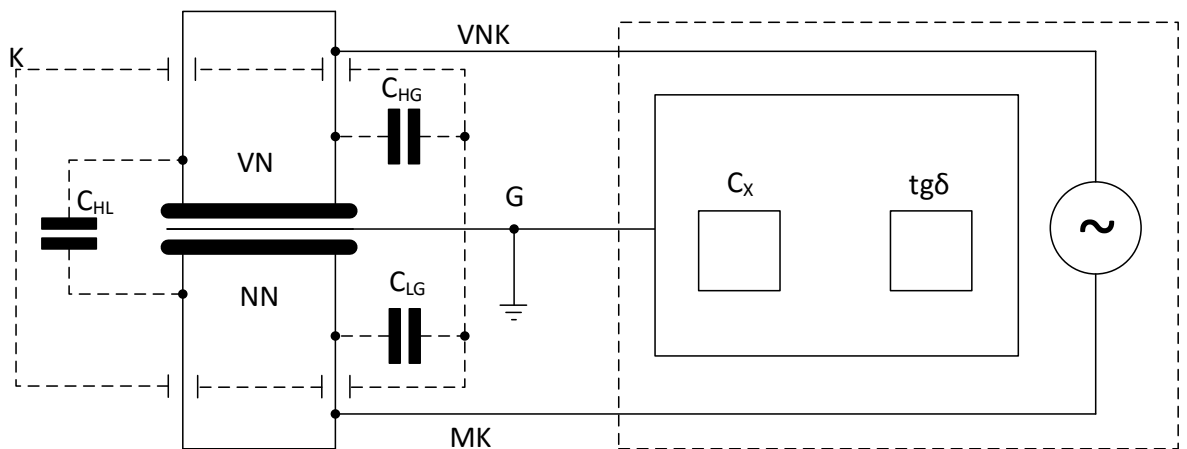
Dielektrické ztráty stroje vyjadřované ztrátovým činitelem $\text{tg}\delta$ měříme můstkovou metodou při střídavém napětí. Měření kapacity a ztrátového činitele se provádí střídavým napětím 10 kV. Pokud tomuto napětí nevyhovuje izolační hladina měřeného vinutá, použije se nejbližší nižší zkušební napětí, a to z řady 0,5-1-2-5 kV (např. pro vinutí izolační hladiny 6,3 kV použijeme měřicí napětí 5 kV, pro vinutí 3,2 kV měříme při napětí 2 kV apod.). Pokud je to možné, doporučuje se provádět měření při teplotě 20 °C, a to po ustálení teplot ve všech

jeho částech při chladnutí z provozní teploty.

Měření kapacit a ztrátového činitele je značně citlivé na vliv parazitních vazeb s okolím. To se vztahuje zejména na měření transformátorů v provozu, většinou v blízkosti dalších vn a vvn zařízení pod napětím.

Jestliže naměřené hodnoty nevyhovují požadavkům, je nutné zkontrolovat další veličiny charakterizující konstrukční uspořádání stroje, např. napětí nakrátko, stejnosměrný odpor vinutí, proud naprázdno atd.

Dvouvinutový stroj měříme podle schématu na obr. 1.5.1. V tomto případě měříme nejčastěji na uzemněném objektu, přičemž vinutí připojené k měřicímu přívodu je na virtuální (zdánlivé) zemi. Tím se eliminuje kapacita mezi vinutím vyššího a nižšího napětí C_{HL} .



VN – vinutí vyššího napětí

NN - vinutí nižšího napětí

K – kostra (nádoba) transformátoru

VNK – vysokonapěťový přívod můstku

MK – měřicí přívod můstku

G – kostra (zem) můstku

C_{HG} – kapacita mezi vinutím vyššího napětí a kostrou transformátoru

C_{HL} – kapacita mezi vinutím vyššího a nižšího napětí

C_{LG} – kapacita mezi vinutím nižšího napětí a kostrou transformátoru

C_X – naměřená kapacita

Obr. 1.5.1 Schéma měření ztrátového činitele $tg\delta$ a kapacity vinutí pro dvojinutový transformátor

Pro připojení můstku k transformátoru se kabel VNK zapojí na vinutí vyššího napětí a měřicí kabel MK na vinutí nižšího napětí. Kostra (zem) napájecího zdroje můstku se spojí

s nádobou transformátoru. Měří se ztrátový činitel a kapacita mezi oběma vinutími (kapacita C_{HL}), v uvedeném zapojení mezi vinutím vyššího napětí a kostrou (nádobou) transformátoru (kapacita C_{HG}), pak jejich paralelní kombinace. Po přepojení přívodů napájecího zdroje (změně „polarity“) se výše uvedené měření zopakují. Nakonec se kabel VNK připojí na obě vodiče spojená vinutí, měřící přívod MK se volně vyvěsí a provede se pouze podle uvedeného zapojení měření při obou „polaritách“.

Hodnoty ztrátového činitele a kapacity se vypočtou z naměřených hodnot při obou „polaritách“ podle vzorců:

$$tg\delta = \frac{tg\delta_1 \cdot C_1 + tg\delta_2 \cdot C_2}{C_1 + C_2}, \quad C = \frac{C_1 + C_2}{2},$$

kde C_1 , $tg\delta_1$ jsou hodnoty změřené při jedné „polaritě“ zdroje, C_2 , $tg\delta_2$ jsou hodnoty změřené při opačné „polaritě“ zdroje.

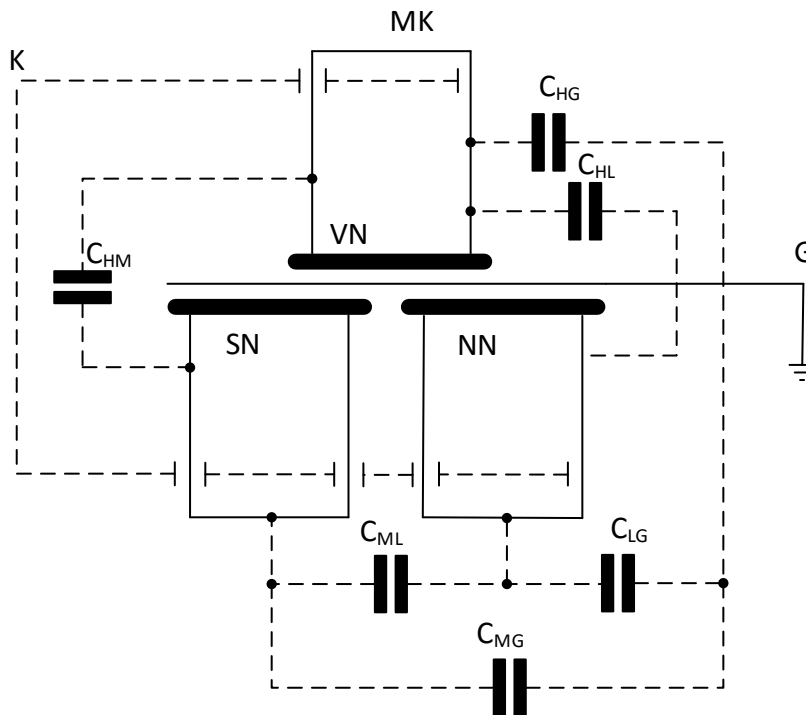
Při měření na trojvinutovém transformátoru se postupuje obdobně. Schéma vzájemných kapacit je na obr. 1.5.2. Opět se měří při obou „polaritách“ a počítá se výsledný ztrátový činitel a kapacita podle vzorců $tg\delta$, C . I zde lze určit zmíněné vzájemné kapacity a ztrátové činitele.

Pro možnost srovnávání hodnot naměřených při různých teplotách stroje lze provádět přepočet naměřených hodnot na referenční teplotu (20 °C). Použijeme přepočítávací koeficient K (tab. 1.5) pro transformátory s izolační kapalinou minerální olej v souladu s ANSI/IEEE C 57.12.90-1980 a využijeme následující vztah:

$$tg\delta_{20} = \frac{tg\delta_g}{K},$$

kde $tg\delta_{20}$ je přepočítaný ztrátový činitel na 20 °C, $tg\delta_g$ je ztrátový činitel změřený při aktuální teplotě.

Hodnocení získaných výsledků provádíme na základě porovnávání aktuálních hodnot s výsledky dřívějších periodických kontrol. Jako limitní lze považovat hodnoty u nových strojů 100 až 400 kV 0,01, u strojů po opravě 0,15, pro stroje v provozu 0,03. U nových s pracovním napětím do 70 kV se hodnoty zvyšují na 0,02, po opravě či revizi 0,03, pro stroje v provozu 0,08. Při velkých změnách hodnot kapacity změřených při po sobě jdoucích měřeních (10 až 30%) je nutné hledat jejich příčinu zejména tehdy, došlo-li k samovolnému zlepšení $tg\delta$. Může se totiž jednat o vážnou závadu izolačního systému. To pochopitelně neplatí po výměně izolačního oleje. Při celkovém hodnocení stroje je nutné respektovat i výsledky příslušných zkoušek izolačního oleje. [1]



VN – vinutí vyššího napětí

SN – vinutí středního napětí

NN - vinutí nižšího napětí

K – kostra (nádobu) transformátoru

G – kostra (zem) můstku

C_{HL} – kapacita mezi vinutím vyššího a nižšího napětí

C_{HG} – kapacita mezi vinutím vyššího napětí a kostrou transformátoru

C_{HM} – kapacita mezi vinutím vyššího a středního napětí

C_{ML} – kapacita mezi vinutím středního a nižšího napětí

C_{MG} – kapacita mezi vinutím středního a kostrou transformátoru

C_{LG} – kapacita mezi vinutím nižšího napětí a kostrou transformátoru

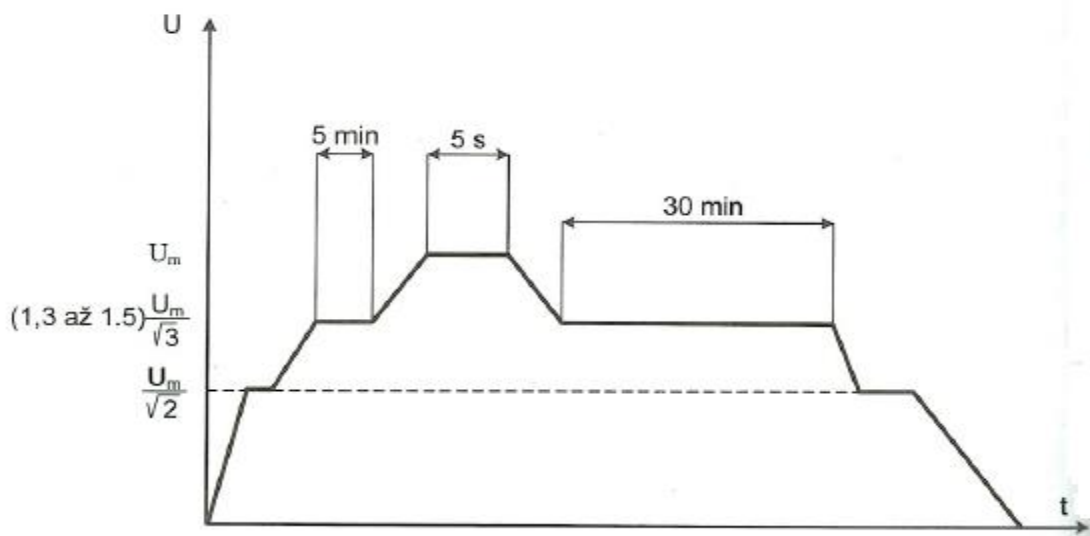
Obr. 1.5.2 Schéma měření ztrátového činitele $tg\delta$ a kapacity vinutí pro trojvinutový transformátor

Tab. 1.5. Převodní tabulka pro olejové transformátory

Teplota měřeného objektu ϑ [°C]	Koeficient pro přepočet K [-]
10	0,8
15	0,9
20	1,00
25	1,12
30	1,25
35	1,40
40	1,55
45	1,75
50	1,95
55	2,18
60	2,42
65	2,70
70	3,00

1.6 Zkouška indukovaným střídavým napětím

Zkouška se provádí při uzemněném nulovém bodu zkoušeného vinutí. Zbývající vinutí se v zapojení do hvězdy uzemní v nulovém bodu, v zapojení do trojúhelníku se uzemní jeden z vývodů. Časový průběh zkušebního napětí mezi fázovými vývody a nulovým bodem musí odpovídat následujícímu schématu.

**Obr. 1.6.** Schéma měření ztrát, napětí a proudu nakrátko

Během celé zkoušky dlouhodobým indukovaným napětím se měří částečné výboje (amplituda zdánlivého výboje). Určuje se hodnota zapalovacího a zhasacího napětí během zvyšování a snižování zkušebního napětí. [1]

1.7 Měření ztrát, napětí a proudu naprázdno

Při měření nejprve na zapojený transformátor přivedeme pomocí regulačního transformátoru napájecí napětí, které je rovno 120% U_{1N} . Toto napětí pomalu snižujeme po cca 10% a při každé hodnotě napětí změříme příslušné proudy a výkony. Zároveň odečítáme hodnotu napětí U_{20} pro vypočtení převodu transformátoru p_u .

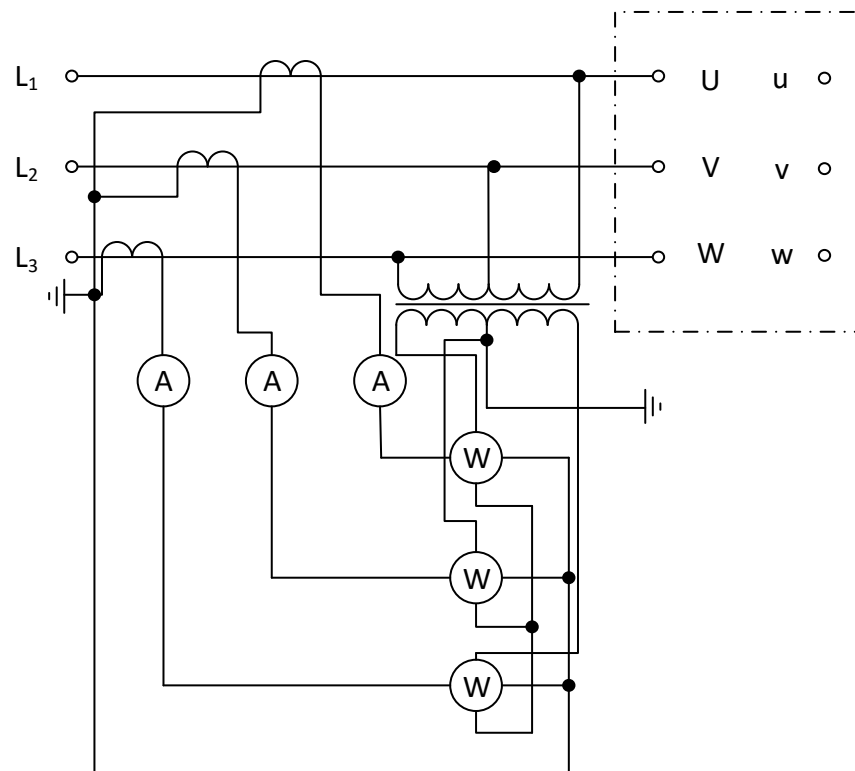
Převod napětí naprázdno (p_u) transformátoru je z praktického hlediska definován jako poměr napětí strany vyššího napětí U_{10} ku napětí strany nižšího napětí U_{20} . Hodnota vstupního napětí (U_{10}) a proudu (I_{10}) se vypočte jako střední hodnota napětí a proudů jednotlivých fází (U, V, W).

$$p_u = \frac{U_{10}}{U_{20}} [-]$$

$$U_{10} = \frac{1}{3} \cdot (U_{UV0} + U_{VW0} + U_{UW0}) [V]$$

$$I_{10} = \frac{1}{3} \cdot (I_U + I_V + I_W) [A] [1]$$

Ztráty naprázdno a proud naprázdno se měří podle schématu na obr. 1.8. Napájení trojfázového transformátoru musí být sinusové souměrné ve všech fázích. Vinutí trojfázového transformátoru zapojeného do trojúhelníku musí být během zkoušky naprázdno zkratováno.



Obr. 1.7. Schéma měření ztrát, napětí a proudu naprázdno[1]

1.8 Měření ztrát, napětí a proudu nakrátko

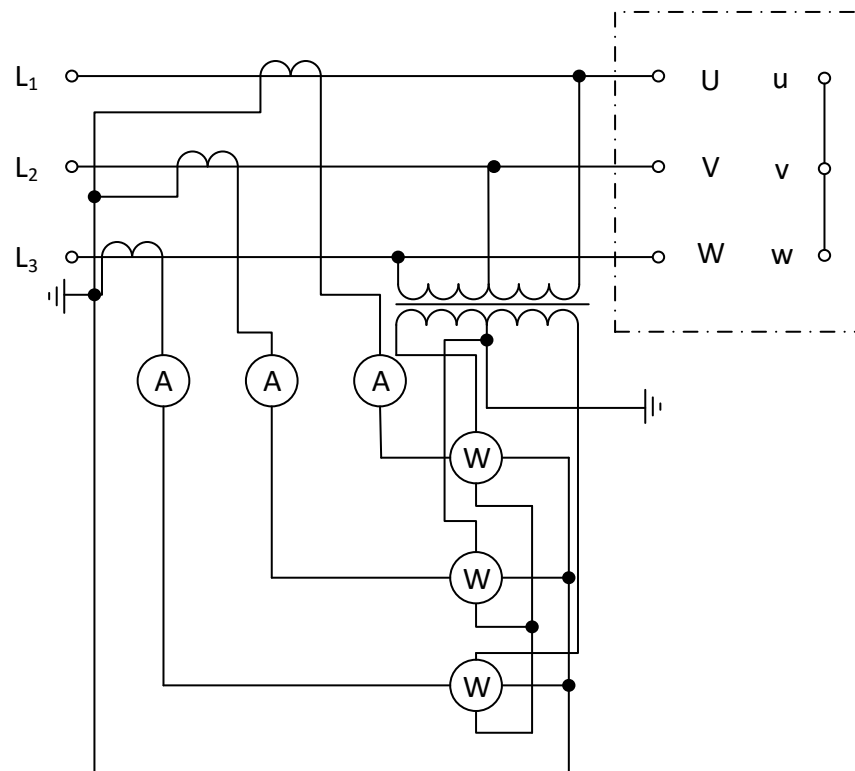
Na zapojený transformátor přivedeme pomocí regulačního transformátoru nulové napájecí napětí ($U_{IN} = 0V$) a pomalu zvyšujeme až do okamžiku, kdy primárním vinutím začne protékat proud $120\% I_{IN}$. Tento proud pomalu snižujeme po cca 10% až k 0 a při každé hodnotě proudu změříme příslušné napětí a výkony. Měření musí probíhat rychle, protože teplota vinutí vlivem protékajícího proudu rychle stoupá. Na straně spojené nakrátko obvykle neměříme proud, protože impedance cívky ampérmetru by ovlivnila měření. Jeho velikost můžeme určit z napájecího proudu I_{1K} a z převodu transformátoru.

Při zkoušení transformátorů nakrátko se proud a napětí stanoví stejně jako v případě měření naprázdno – jako střední aritmetická hodnota údajů přístrojů ve všech třech fázích.

$$U_{1K} = \frac{1}{3} \cdot (U_{UVK} + U_{VWK} + U_{UWK}) [V]$$

Procentní napětí nakrátko:

$$u_k = \frac{U_{1K}}{U_{IN}} \cdot 100 [\%] [1]$$



Obr. 1.2. Schéma měření ztrát, napětí a proudu nakrátko

1.9 Měření odporu vinutí za studena ss proudem

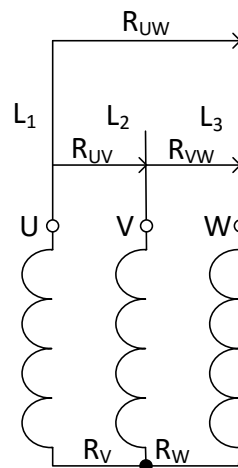
Činný odpor se měří pro všechna vinutí jak na výstupní, tak i na vstupní straně transformátoru. Odpor se musí měřit na všech odbočkách vinutí, které jsou přístupny pro připojení měřicích přístrojů, a při všech polohách přepínače odboček vinutí. Při měření musí být transformátor bezpečně odpojený od sítě (na primární a sekundární straně) a teplota stroje by měla být přibližně shodná s teplotou okolí. Odpor se měří buď přímou, nebo můstkovou metodou. Při měření odporu jednoho vinutí musí být ostatní vinutí rozpojena. Velikost proudu při měření nesmí převýšit 0,2 násobek hodnoty jmenovitého proudu vinutí. Pro snížení doby ustálení proudu se doporučuje volit hodnotu proudu nejméně $2 \cdot \sqrt{2} \cdot I_0$, kde I_0 je efektivní hodnota proudu naprázdno, odpovídající jmenovitému napětí transformátoru. Pokud jsou přístupny všechny konce vinutí, měříme odpor mezi dvojicemi svorek (začátků vinutí) a z těchto hodnot pak vypočítáme odpor jednotlivých fází.

Při určení činného odporu se nejprve změří odpory mezi svorkami U, V, W – R_{UV}, R_{UW}, R_{VW} . Pokud zjišťujeme jen střední hodnotu odporu jedné fáze, nebo když se naměřené hodnoty odporů mezi svorkami liší pouze minimálně, můžeme stanovit odpor fáze R_F jako střední hodnotu z naměřených hodnot dle následujícího vztahu:

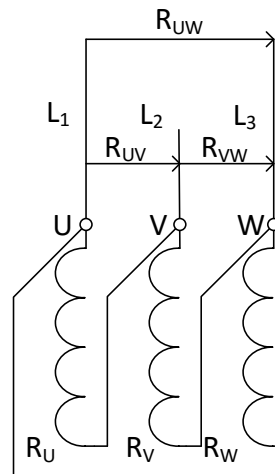
$R_f = \frac{1}{6}(R_{UV} + R_{UV} + R_{VW})[\Omega]$. Jsou-li naměřené hodnoty odporů mezi svorkami stejné, nebo téměř stejné, můžeme vypočítat odpor fází dle vztahů:

$$R_f = 0,5.R_s \text{ pro připojení do hvězdy (obr. 1.9.1),}$$

$$R_f = 1,5.R_s \text{ pro připojení do trojúhelníka (obr. 1.9.2).}$$



Obr. 1.9.1 Vinutí zapojené do hvězdy

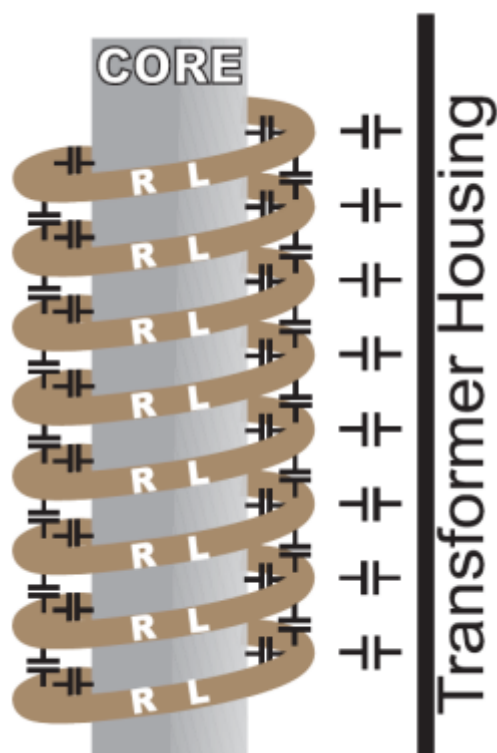


Obr. 1.9.2 Vinutí zapojené do trojúhelníka [1]

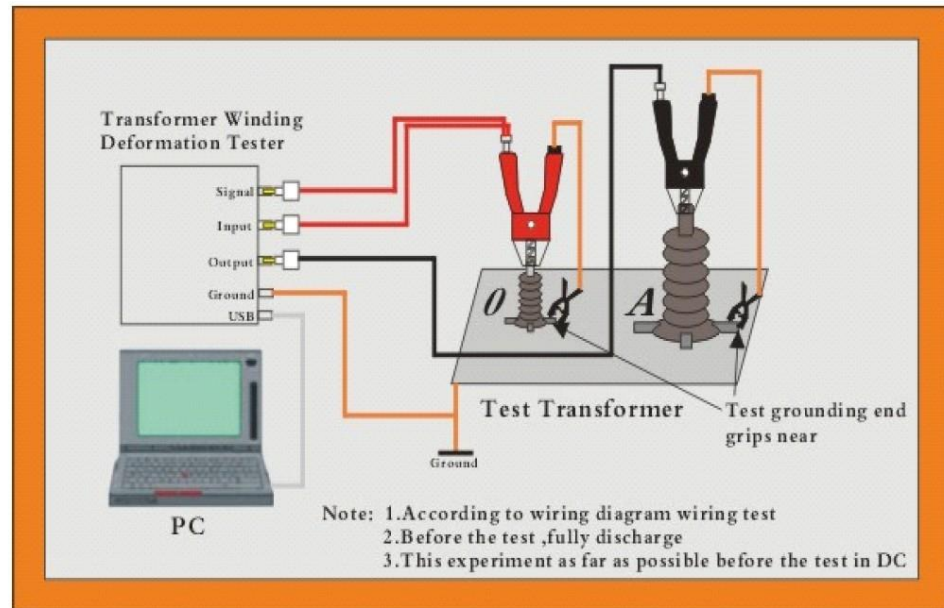
1.10 Vysokofrekvenční diagnostika SFRA

Vysoko frekvenční analýza je nová metoda na poli diagnostiky transformátorů a nabízí možnosti vyhledání změn a poruch v transformátoru po mechanické stránce a to i bez toho, aby transformátor bylo nutné odvézt z pozice do prostor servisní organizace a transformátor

rozebrat. Metoda vychází z principu měření útlumu generovaného signálu a vzájemného posunu vůči referenci. Vzhledem k tomu, že transformátor lze přirovnat k velkému a složitému RLC článku, můžeme říct, že v náhradním schéma lze transformátor nahradit již jmenovaným RLC obvodem. Měří se tedy útlum a fázový posun signálu v zadaném frekvenčním pásmu a to v mezních hodnotách 1Hz až 10 MHz. Z matematického hlediska by se dalo měření popsat jako podíl signálu na vstupu a výstupu, přičemž signál (U a I) lze vyjádřit jako impedanci, pak tedy impedance, kterou měřím je $Z = |Z| * e^{j\phi}$. Pokud tuto křivku vyneseme do grafu, kde na jedné ose bude naměřený útlum a na ose druhé bude zadané frekvenční pásmo, můžeme říct, že jsme naměřili frekvenční charakteristiku transformátoru. Tato charakteristika má tvar vždy jiný a dá se říct, že ani dva identické transformátory stojící vedle sebe nemají stejnou frekvenční charakteristiku, avšak je velmi podobná. Tvar naměřené charakteristiky ovlivňuje především fyzické vnitřní uspořádání transformátoru, druh transformátoru (autotransformátor, transformátor dvou vinutí, transformátor s terciárním vinutím atd.), napěťová hladina jednotlivých vývodů, druh zapojení jednotlivých vývodů (hvězda – trojúhelník a případně jejich fázový posun). [9]



Obr. 1.10.1 *Náhled na 1 sloupek 1 vinutí*



Obr. 1.10.2 Připojení měřicího přístroje SFRA101E [10]

1.11 Měření elektrické pevnosti transformátorového oleje

Elektrická pevnost je poměr napětí, při kterém nastane průraz izolantu, k jeho tloušťce v místě průrazu. Při zkoušce oleje jde konkrétně o poměr průměrné efektivní hodnoty průrazného napětí k vzdálenosti elektrod (obr. 1.11.1 Měřicí elektrody). [6]

Číselná velikost E_p je snadno experimentálně zjistitelná, zato proces, probíhající v materiálu před dosažením kritického stavu, je u kapalných a tuhých látek velmi komplikovaný a obtížně teoreticky zvládnutelný. Závisí totiž na řadě faktorů. Jsou to:

- stupeň nehomogenity elektrického pole,
- časový průběh pole resp. napětí na elektrodách, které může být stejnosměrné, střídavé nf (nejčastěji průmyslového kmitočtu), střídavé vf anebo rázové (s různým tvarem průběhu napětí),
- teplota materiálu,
- doba působení pole či napětí. [7]

Obr. 1.11.1 Měřicí elektrody

2 Online diagnostika

2.1 Měření napětí a proudu

Jedním ze základních parametrů, které je vhodné zařadit do skupiny veličin pro monitorování, je měření provozních parametrů transformátorů (napětí a proudů jednotlivých fází). Měření provozních napětí a proudů umožňuje získat veličiny potřebné pro stanovení okamžitého zatížení transformátoru. Navíc na hodnotě zatěžovacího proudu závisí velikost Jouleových ztrát ve vinutí, a proto můžeme na základě jeho stanovení odhadovat velikost tepelného zatížení izolačního systému transformátoru. Archivace naměřených hodnot provozních veličin v průběhu provozu transformátoru dále hraje důležitou roli také z hlediska zaznamenání informací o životě sledovaného stroje a způsobu jeho zatěžování.

Měření proudů a napětí jednotlivých fází se provádí pomocí měřicích transformátorů, které bývají umístěny v kondenzátorových průchodkách. Tyto měřicí transformátory bývají mnohdy běžnými doplňky transformátorů (v podstavě průchodek), proto je vhodné při konkrétním návrhu monitorovacího systému vždy individuálně zvážit možnost využití stávajících zařízení. Jedná se hlavně o zvážení možnosti využití výstupního signálu příslušného měřicího transformátoru pro připojení do řídicího systému. [1] Z těchto hodnot se přepočte činný a jalový výkon dle naprogramovaných hodnot v řídicím systému. Schéma principu měření pomocí měřicími transformátory napětí a proudu je na obr. 1.7.

2.2 Měření teploty

Nárůst teploty při běžném zatížení stroje citlivě reaguje na počátek poruchy. Proto je vhodné mezi sledované parametry zařadit měření teploty oleje v horní části transformátorové nádoby a teploty vinutí. [4] Teplota oleje v horní části transformátorové nádoby se měří pomocí jímkových odporových teploměrů, jejichž součástí bývají vestavěné převodníky pro změnu výstupní veličiny teploměru (odpor) na proudový unifikovaný signál 4-20 mA. V případě volby jiného způsobu komunikace s řídicím počítačem je možno využít i jiné převodníky (RS-232, RS-485 apod.). Okolní teplotu je možno měřit pomocí prostorových průmyslových teploměrů k měření teploty vzduchu. Přímé měření teploty vinutí - jádra případně průchodek ve výkonových transformátorech (teplotní rozsah $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+225\text{ }^{\circ}\text{C}$, přesnost $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$) - se dělá senzorem TPT ve spojení s jednotkou pro zpracování signálů Nortech TT. Rozložení teplot na povrchu transformátorové nádoby lze měřit pomocí

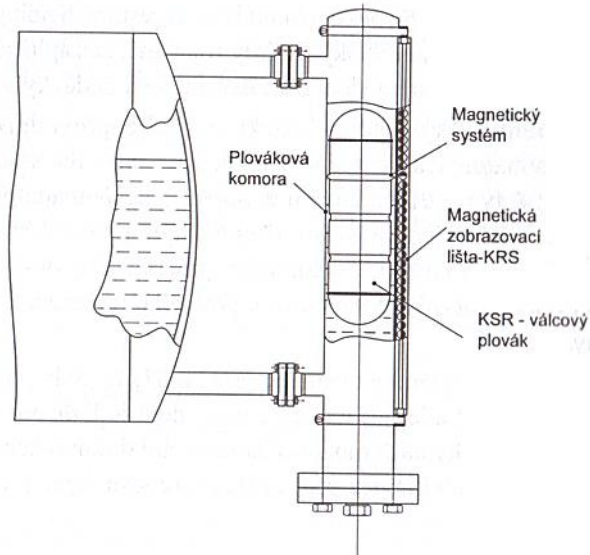
kontaktních povrchových magnetických snímačů teploty GMF. [5]



Obr.2.2 Měřicí sonda PT100 (hodnota 100Ω) [8]

2.3 Měření výšky hladiny v konzervátoru

Pro elektrické měření výšky hladiny oleje se používají obtokové stavoznaky, které bývají k nádobě s kapalinou připevněny z boční strany pomocí přírub. Kapalina v plovákové komoře je ve stejné výšce jako nádoba a určuje polohu plováku v tělese stavoznaku. Výška hladiny je zobrazena magnetickou zobrazovací lištou, kterou tvoří sloupec magnetických válečků. Změnu indikace výšky hladiny je způsobena magnetickým polem permanentního magnetu umístěného v plováku. [5]



Obr. 2.3 Princip snímání výšky hladiny [1]

3 Praktické měření kvality izolačního oleje na distribučním transformátoru

Nejdůležitější při této diagnostice je správný odběr vzorků. Vzorky by se neměly odebírat za velmi vlhkého počasí, deště, sněhu popřípadě mlhy. Veškeré tyto okolnosti nám zhoršují parametry odebraného vzorku a později i dochází k nepřesnosti měření. Tato nepřesnost spočívá v tom, že transformátorový olej je hydrofobní, tudíž na sebe velice dobře váže vodu popřípadě její další skupenství. Odběr se provádí do speciálních lahvích na chemické látky. Její objem je 1L vyskytuje se jak v čirém tak v barevném (hnědém) provedení.

V této části bych se věnoval praktickému měření izolačního stavu transformátorového oleje a tvorbě plynu v něm. Jako zkoušený předmět jsem použil transformátor na jedné nejmenované Pražské rozvodně pod označením T 101. Jedná se o model 7ERZ35M od firmy Škoda vyrobený v roce 1978 s výkonem 63MVA. Tento transformátor napájí rozpínací stanice poměrně velkého sídliště Stodůlky a přilehlé okolí. Veškerá data z historie měření jsou jen od roku 2010. V předchozích letech nebyla věnována tak velká pozornost plynové chromatografii a nejsou z ní zaznamenané výsledky.

3.1 Měření elektrické pevnosti

Při tomto měření používáme měřicí přístroj Baur DTA100C. Ve zkušební nádobě jsou 2 zkušební elektrody, které jsou půlkulovitého tvaru, vzdáleny od sebe 2,5mm. Tento tvar je dán, však normou podle které měříme. Dodržujeme normu IEC 60156:1995.



Obr. 3.1.1 Měřicí přístroj na zjištění průrazného napětí Baur DTA100C

Tab. 3.1.a Hodnoty naměřených průrazných napětí

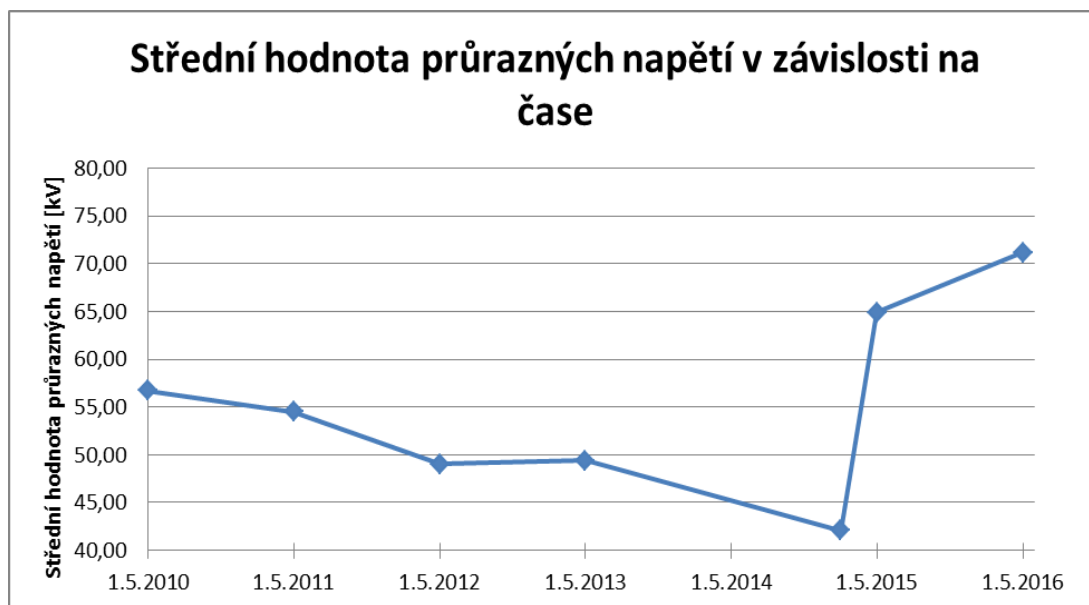
Datum	Teplota v místnosti [°C]	1. měření [kV]	2. měření [kV]	3. měření [kV]	4. měření [kV]	5. měření [kV]	6. měření [kV]
5. 5. 2010	28	59,1	53,1	62,4	55,7	51,9	58,1
26. 5. 2011	26	61,3	59,6	56	55,7	49,8	44,7
16. 5. 2012	27	61,8	38,6	54,5	35,1	36,2	68
17. 5. 2013	26	58,1	33	63,9	42,4	52,4	46,5
4. 2. 2015	26	41,7	38,6	44,6	45,9	42	39,8
14. 5. 2015	27	69,8	67,7	63,5	59,1	65,4	63,8
13. 5. 2016	24	63,8	54,5	78,4	77,4	78,5	74,5

Tab. 3.1.b Hodnoty naměřených průrazných napětí (pokračování)

Střední hodnota [kV]	Střední hodnota směrodatné odchylky [kV]	Poznámka
56,72	3,93	
54,52	6,23	
49,03	14,28	
49,38	11,15	
42,10	2,77	Připojení vakuového vysoušeče oleje
64,88	3,71	
71,18	9,88	

Jak je možné vidět z tabulky 3.1.a a 3.1.b, že elektrická pevnost izolačního oleje pomalu

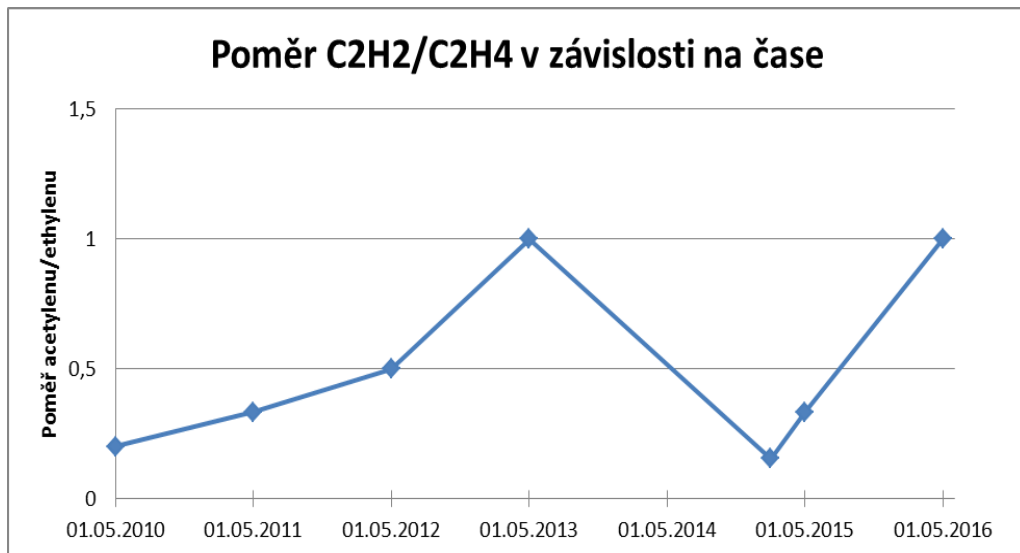
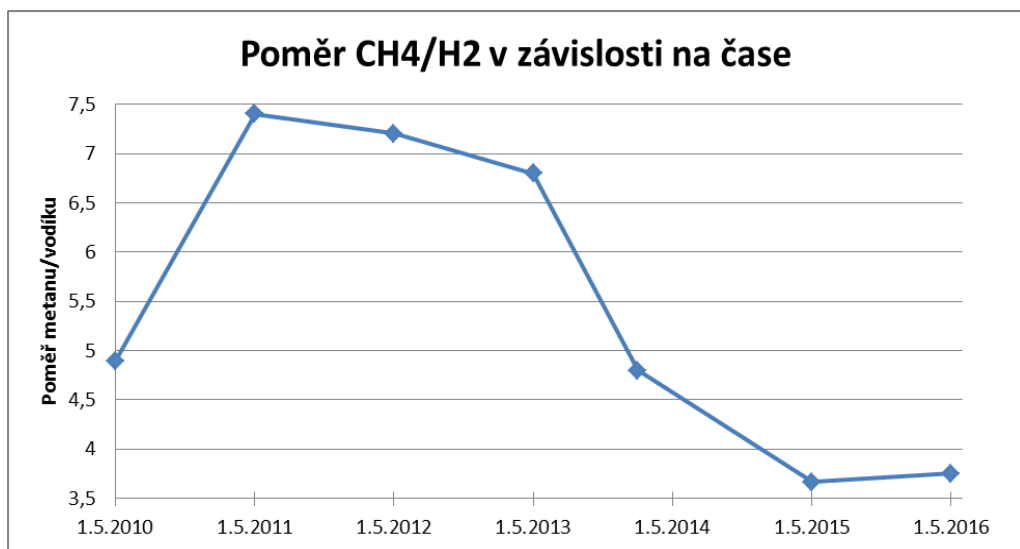
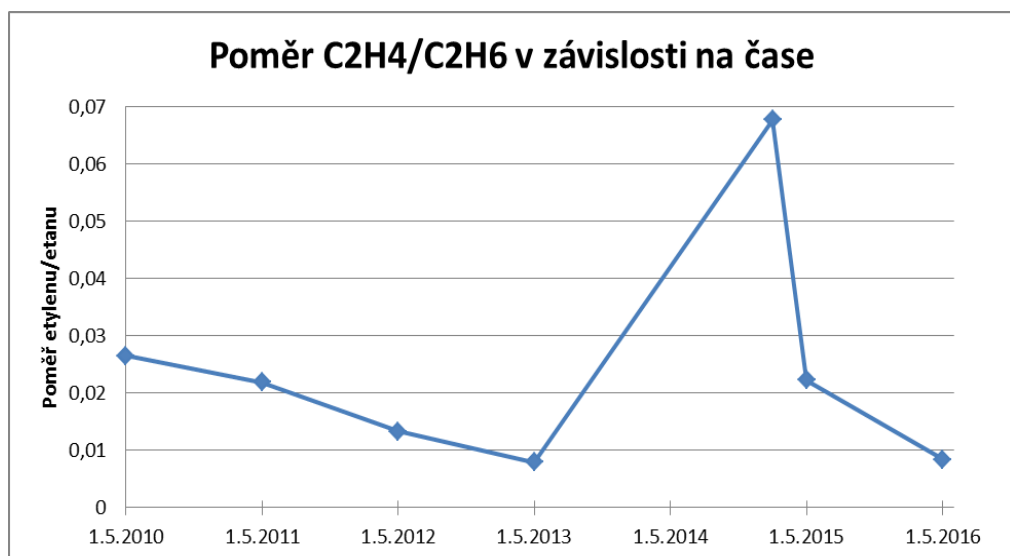
klesala. Výměna celé náplně by byla v takovém měřítku neekonomická, jelikož se jedná o dost starý transformátor. Na obrázku 3.1.2 je vidět postupné zlepšení od data, kdy byl připojen vakuový vysoušeč.

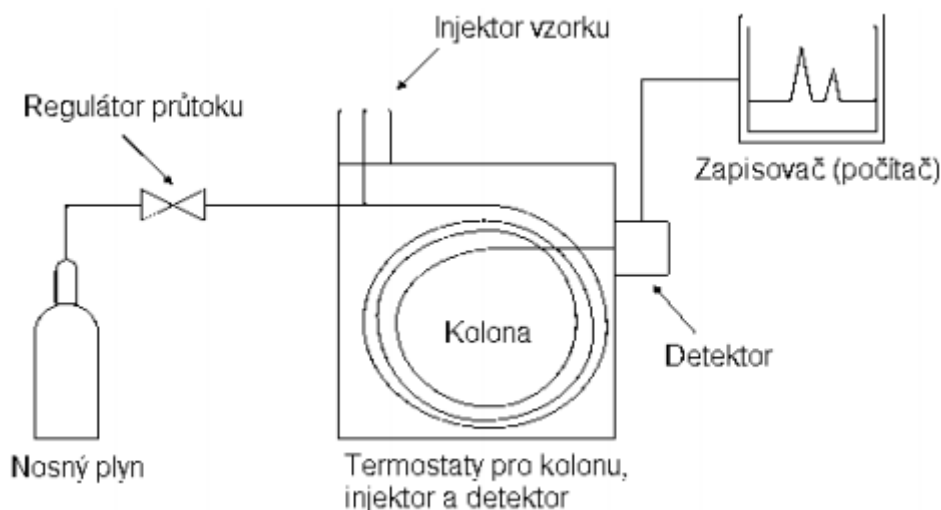


Obr. 3.1.2 Graf závislosti středních hodnot průrazných napětí z jednotlivých ročních měření na čase

3.2 Plynová chromatografie DGA

Tento druh diagnostiky využívá tepelných, elektrických či jejich kombinovaných nežádoucích dějů. Při těchto stavech dochází k tvorbám plynů. Výsledkem toho nepřímého měření jsou pak poměry mezi jednotlivými plyny. Tento způsob reprodukce se nazývá Rogersovy poměry. Na nás je pak porovnání pomocí složení a množství plynů, oproti normě ČSN EN 60599 (tab. 3.2.2). Plyny však mohou vznikat i při normálním provozu v důsledku krátkodobého přetížení. Tato metoda však může odhalit i nahodilé stavy, které však nejsou rizikové.

Obr. 3.2 Poměr C₂H₂/C₂H₄ v časeObr. 3.3 Poměr CH₄/H₂ v časeObr. 3.4 Poměr C₂H₄/C₂H₆ v čase



Obr. 3.5 Zjednodušené schéma plynového chromatografu [11]

Tab. 3.2.1 Jednotlivé hodnoty naměřených plynů v obsahu vzorku

Datum	Vodík [ppm]	Oxid uhličitý [ppm]	Oxid uhelnatý [ppm]	etylen [ppm]	etan [ppm]	metan [ppm]	acetylen [ppm]	Celkový součet rozpuštěných plynů [-]
5.5.2010	9	6230	477	5	189	44	1	723
26.5.2011	5	7263	465	3	137	37	1	241
16.5.2012	5	8530	368	2	151	36	1	266
17.5.2013	5	7907	304	1	127	34	1	471
4.2.2015	10	8430	421	13	192	48	2	840
14.5.2015	9	5693	396	3	135	33	1	577
13.5.2016	8	5331	378	1	120	30	1	530

Tab. 3.2.2 Poměrová tabulka hodnot

C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆
0,2	4,888889	0,026455
0,333333	7,4	0,021898
0,5	7,2	0,013245
1	6,8	0,007874
0,153846	4,8	0,067708
0,333333	3,666667	0,022222
1	3,75	0,008333

Tab. 3.2.3 Poměrová tabulka možných poruch [13]

Třída	Charakteristická chyba	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆
PD	Dílčí výboje	NS	<0,1	<0,2
D1	Výboje nízké energie	>1	0,1-1	>1
D2	Výboje vysoké energie	0,6-2,5	0,1-1	>2
T1	Teplotní defekt t<300°C	NS	>1	<1
T2	Teplotní defekt 300°C<t <700°C	<0,1	>1	1-4
T3	Teplotní defekt t>700°C	<0,2*	>1	>4

NS – nesignifikantní

*Zvyšující se hodnota může znamenat hot-spot teplotu přesahující 1000°C



Obr. 3.5 Vakuový vysoušeč Altmann VS-06 [12]

Závěr

Tato práce má zobrazit pohled na diagnostické metody, které se provádějí na transformátorech s izolačním olejem. V teoretické části jsem popsal metody, které jsou poměrně hodně rozšířené, ale ne však všechny používáme při samotné údržbě transformátoru.

V naší firmě se používají jenom tyto zkoušky při údržbě transformátoru:

- Měření izolačního odporu a výpočet polarizačního indexu
- Měření elektrické pevnosti oleje
- Měření plynové chromatografie DGA

Nesmím opomenout také online diagnostiku, která se neustále zdokonaluje a vyvíjí. Online diagnostika se dá také doplnit i ochranami použitými na transformátorech, neboť i ty jsou navrhovány jako měřáky proudu a napětí. Tato problematika, ale není náplní této práce.

Výkonové transformátory je nutné diagnostikovat nejen z důvodu zamezení finanční ztrátě, kvality energetické sítě, ale také zamezení ohrožení zdraví a ekologickým katastrofám zapříčiněné vylitím či shořením izolačního oleje.

V praktickém měření jsem chtěl ukázat měření izolačního stavu oleje a měření plynové chromatografie. Včas jsme odhalili možný problém. Jak vyplývá v tab. 3.2.1 Jednotlivé hodnoty naměřených plynů v obsahu vzorku. Od 4. 2. 2015 do 14. 5. 2015 jsme připojili vakuový vysoušeč VS-06 oleje od firmy Altmann. Hodnoty před sušením nebyly provozu schopné. Vakuový vysoušeč je určen pro dlouhodobé a bezobslužné zařízení sušení izolačního oleje transformátoru (Obr. 3.5 vakuový vysoušeč). Současně s tímto sušením je také provedeno částečné odplynění. Zvýšili jsme tímto sušením hodnotu průrazného napětí (obr. 3.1.2). Přístroj nám extrahoval z oleje vodu, která se do oleje dostala z celulózy. Při porovnání hodnot z tabulky 3.2.2 s hodnotami dle tabulkou 3.2.3 [13] je patrné, že tomto transformátoru dochází v místě poruchy nad 700°C. Tento transformátor se zařadil do plánu investic na výměnu do konce roku 2018.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MENTLÍK, Václav. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vydání. Praha: BEN, 2008. 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9
- [2] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. 1. vydání. Praha: BEN, 2006. 235 s. 80-7300-189-6
- [3] NEUMANN, Jacek. ELDIAG, s.r.o., *Přehled vybraných diagnostických metod izolačních systémů přístrojových transformátorů*, V Praze 5/1999 [cit. 18.5.2016]. Dostupné z: <http://www.eldiag.cz/cz/texty/prehled-vybranych-diagnosticky-metod-izolacnich-systemu-pristrojovych-transformatoru>
- [4] MENTLÍK, Václav.; PROSTR, Pavel. *Teplotní parametry výkonových transformátorů*. Ostrava: Tanger, 2007. ISBN 978-80-86840-31- 4
- [5] MENTLÍK, Václav.; PROSTR, Pavel. *Možnosti laboratorního výzkumu on-line diagnostiky výkonových transformátorů* Dostupné z: <http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce1/100.pdf>
- [6] HRBEK, Vladimír. *Instalace, provoz a údržba transformátorů* 1. vydání. SNTL, 1974. 04-541-74
- [7] Dostupné z: http://martin.feld.cvut.cz/~koblizek/X13MTV-lab_soubory/uloha_5.pdf
- [8] Obr. 1: Průmyslové teplotní čidlo Pt100 – firma ZPA. *Měření teploty - RTD teplotní modul Siemens EM 231*, Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/987>
- [9] Dostupné z: <http://www.megger.sk/wp-content/uploads/2014/03/FRA-DIAGNOSTIKA-V%C3%9DKONOV%C3%9DCH-TRANSFORM%C3%81TOR%C5%AE.pdf>
- [10] *Trasformer Winding Deformation Testers external wiring diagram*, Dostupné z: <http://www.xaapt.com/2013/0316/133.html>
- [11] Obr. 1: Zjednodušené schéma plynového chromatografu Dostupné z: http://cheminfo.chemi.muni.cz/chem_sekce/predmety/C7300/GC/uvod.pdf
- [12] Obr Dostupné z: <http://www.ars-altmann.com/products.php?cat=4&pid=2>
- [13] ČSN EN 60599, *Elektrická zařízení v provozu plněná izolačním olejem – Pokyn pro interpretaci výsledků analýz rozpuštěných a volných plynů*. ÚNMZ 2000