

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Zkoušky výkonových transformátorů

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **David PÍSAŘ**
Osobní číslo: **E14B0112P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Zkoušky výkonových transformátorů**
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište konstrukční provedení výkonových transformátorů.
2. Uveďte přehled zkoušek, které je třeba provést před uvedením výkonových transformátorů do provozu. U vybraných zkoušek popište základní požadavky na jejich provádění dle platných norem.
3. Proveďte vybrané zkoušky na reálném transformátoru.
4. Analyzujte naměřená data a proveďte vyhodnocení výsledků.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jan Šobra

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Konzultant bakalářské práce:

Ing. Miroslav Písař


inspektor SGS Praha s.r.o

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2017**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce pojednává o funkčních elektrických zkouškách a stručně popisuje konstrukci výkonového olejového transformátoru. Cílem práce je popis klíčových prvků, smyslu a postupu měření. Obsahem práce jsou konkrétní výsledky měření provedeného v dílně výrobce s ohledem na platné technické normy. Dále výpočty a zhodnocení.

Klíčová slova

Třífázový výkonový transformátor, konstrukce, ČSN EN 60076, kusové zkoušky, zvláštní zkoušky, převod napětí, odpor vinutí, měření ztrát a impedancí nakrátko, měření ztrát a proudů naprázdno, účinnost, regulace napětí...

Abstract

This bachelor thesis discusses functional electrical tests and briefly describe the power oil transformer construction. The purpose of this thesis is description of key components, meanings and methods of measurements. The content of the thesis are specific measurement results from manufacturer's test laboratory according to valid standards. Further calculations and evaluation.

Keywords

Three-phase power transformer, construction, ČSN EN 60076, routine tests, special tests, voltage ratio, winding resistance, measurement of load losses and short-circuit impedances, measurement of no-load losses and no-load currents, efficiency, voltage regulation...

Prohlášení

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

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

.....
podpis

V Plzni dne 7.6.2017

David Písař

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Šobrovi za vypsání téma, připomínky, metodické vedení práce a vstřícný přístup. Mé poděkování patří též Ing. Miroslavu Písaři za poskytnutí výsledků, předání znalostí a profesionální rady.

Dále bych chtěl poděkovat své rodině a svým blízkým za trpělivost a podporu během studia.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 VÝKONOVÝ TRANSFORMÁTOR	12
1.1 KONSTRUKČNÍ PROVEDENÍ.....	12
1.1.1 Jádru.....	12
1.1.2 Vinutí.....	12
1.1.3 Přepínač odboček.....	13
1.1.4 Průchodky a měřicí transformátor proudu.....	14
1.1.5 Nádoba.....	14
1.1.6 Konzervátor.....	15
1.1.7 Chlazení.....	16
1.1.8 Měřicí a ochranné vybavení.....	17
1.2 VÝZNAM A POUŽITÍ VÝKONOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ.....	18
1.3 ŠTÍTKOVÉ HODNOTY TRANSFORMÁTORU.....	19
2 ZKOUŠKY	20
2.1 MĚŘENÍ PŘEVODU A KONTROLA VEKTORŮ.....	21
2.1.1 Měření převodu napětí.....	21
2.1.2 Ověření fázového natočení.....	22
2.2 VÝKONOVÉ CHARAKTERISTIKY.....	22
2.2.1 Měření odporu vinutí.....	22
2.2.2 Měření impedance nakrátko a ztrát nakrátko.....	23
2.2.3 Měření ztrát a proudu naprázdno.....	26
2.3 KONDICE IZOLACE.....	28
2.3.1 Měření Izolačního odporu.....	28
2.3.2 Izolační výkonová charakteristika.....	29
2.4 MĚŘENÍ NULOVÉ SLOŽKY IMPEDANCE.....	29
3 NAMĚŘENÉ HODNOTY	31
3.1 MĚŘENÍ PŘEVODU NAPĚTÍ A OVĚŘENÍ FÁZOVÉHO NATOČENÍ - NAMĚŘENÉ HODNOTY.....	32
3.2 VÝKONOVÉ CHARAKTERISTIKY- NAMĚŘENÉ HODNOTY.....	35
3.3 IZOLAČNÍ ZKOUŠKY.....	37
3.4 MĚŘENÍ NULOVÉ SLOŽKY IMPEDANCÍ.....	38
3.5 VÝPOČET ÚČINNOSTI.....	40
3.6 VÝPOČET REGULACE NAPĚTÍ.....	41
4 OVĚŘENÍ HODNOT VÝPOČTY	42
ZÁVĚR	45
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	47
PŘÍLOHY	2

Úvod

Transformátory umožňují ekonomický a spolehlivý přenos elektrické energie. Tu je nutné v elektrizační soustavě několikrát vhodně upravit, proto se označují za jeden z nejdůležitějších prvků. Parametry se liší dle požadavků odběratele. Výkonové transformátory vysokého výkonu jsou většinou vyráběny na zakázku v množství maximálně několika kusů. Nejrozšířenějším typem je olejový se třemi sloupy, avšak nejvyšších výkonů je dosahováno soustavou tří jednofázových zařízení především z důvodu přepravy. Náklady na pořízení mohou být otázkou desítek i stovek milionů korun.

V této práci popisuji blokový transformátor, neboli třífázový olejový transformátor určený pro provoz v elektrárně, kde bude připojen ke generátoru. Dále uvádím část elektrických zkoušek provedených v dílně výrobce, všeobecný rutinní postup u nového zařízení uvádím níže. V první části práce stručně popisuji klíčové prvky konstrukce. Výkonový transformátor podrobený zkouškám musí být kompletně smontovaný. Druhá část patří zkouškám včetně požadavků a použitých postupů s ohledem na rozsah práce. Tato kapitola také obsahuje výpočetní vztahy pro požadované hodnoty, jež nejde měřit přímo. Ve třetí části lze nalézt výsledky konkrétních funkčních zkoušek. V závěru ověřuji některé štítkové hodnoty vztahené k hlavní odbočce.

- **Montáž**

Smontování transformátoru, naplnění olejem.

- **Vizuální kontrola**

Ověřuje odpovídající konstrukční provedení a rozměry dle dokumentace.

- **Elektrické zkoušky**

Kontrola příslušenství, funkční zkoušky (elektrické hodnoty), rázové zkoušky.

- **Mechanické zkoušky**

Zkoumání mechanického stavu, zkouška těsnosti, tlakové zkoušky.

- **Speciální zkoušky**

Zjišťují hladiny hluku a vibrace nádoby.

- **Kontrola dokumentace**

Výkres, protokoly, certifikáty obsahující vybavení a ochranné zařízení.

Seznam symbolů a zkratk

ČSN	Česká státní norma
d	Spojení do trojúhelníku
EN.....	Evropská norma
HV	vinutí vvn
IEC.....	Mezinárodní úřad pro elektrotechniku
LV.....	vinutí vn
N, n	střední bod
OLTC.....	Přepínač odboček
ONAN.....	Transformátor s přirozeným průtokem a přirozeným odvodem tepla
ONAF	Transformátor s přirozeným průtokem a ofukováním
SW	stabilizační vinutí vn
VN, vn	vysoké napětí
VVN, vvn	velmi vysoké napětí
Y, y	Spojení do hvězdy
θ	Teplota vinutí [$^{\circ}\text{C}$]
θ_d	Teplota (oleje) v horní části nádoby [K]
θ_h	Teplota (oleje) v horní části nádoby [K]
ΔP_{Fe}	Ztráty v železe [kW]
η	Účinnost [%]
$\cos\varphi$	Účinník [–]
f	Naměřená frekvence [Hz]
f_N	Jmenovitá frekvence [Hz]
I	Proud [A]
I_0	Naměřený proud naprázdno [A]
$i_{0\%}$	Proud naprázdno ku I_N [%]
I_{1K}	Naměřený proud nakrátko [A]
I_N	Jmenovitý proud [A]
I_{NHV}, I_{NLV}	Jmenovitý proud daného vinutí [A]
k	Koeficient převodu [–]
n	Koeficient zatížení, počet fází [–]
P_0, P'_0	Ztráty naprázdno tj. ΔP_{Fe} [kW]

p_1	Koeficient vztahu k hysterezním ztrátám [–]
p_2	Koeficient vztahu ke ztrátám vířivými proudy [–]
$P_K, \Delta P_K$	Ztráty nakrátko [W]
P_a	Dodatečné ztráty nakrátko [W]
P_{CU}	Ztráty v mědi [W]
P_Z	Dodatečné ztráty naprázdno [W]
R	Odpor vinutí (mezi fázovými svorkami) [Ω]
R_{75}	Odpor vinutí vypočtený pro vztažnou hodnotu 75°C [Ω]
R_Θ	Naměřený odpor při teplotě Θ [Ω]
R_{HV}, R_{LV}	Střední aritmetická hodnota odporu daného vinutí [Ω]
S_N	Jmenovitý zdánlivý výkon [MVA]
T	Teplota pro měď 235 [K]
$\tan\varphi$	Ztrátový činitel [–]
\bar{U}	Ekvivalentní přiložené napětí o frekvenci f [V]
U_0	Napětí naprázdno [kV]
u_2	Regulované napětí na sekundárních svorkách [V]
u_{20}	Napětí na sekundárních svorkách naprázdno [%]
U_{1K}	Naměřené napětí nakrátko [V]
U	Napětí [V]
U_N	Jmenovité napětí [V]
$u_{k\%}$	Napětí nakrátko ku U_N [%]
u_r	Regulace napětí [%]
z	fázová impedance [Ω]
Z_N	Jmenovitá fázová impedance [Ω]
Z_0	Nulová fázová impedance [Ω]
z_0	Nulová fázová impedance ku Z_N [%]

1 Výkonový transformátor

Skládá se z více funkčních bloků. Jedná se o několika komorový elektrický netočivý stroj s téměř ideální účinností a zpravidla dlouhou dobou životnosti.

1.1 Konstrukční provedení

Třífázový olejový transformátor jádrového typu s terciárním vinutím.

1.1.1 Jádro

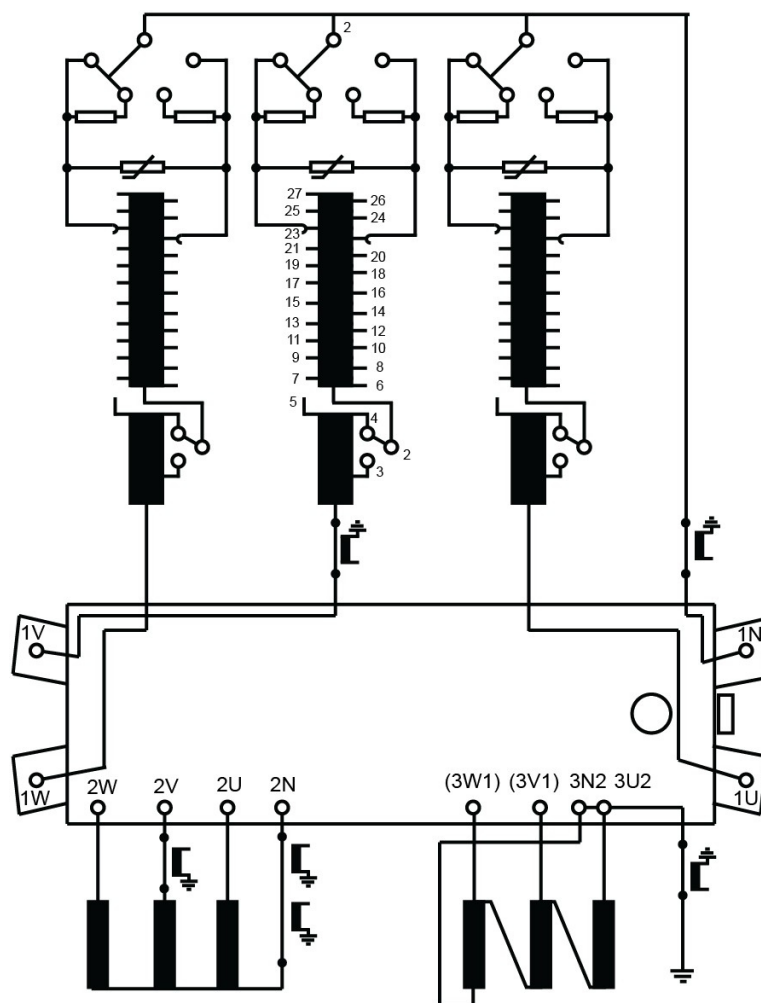
Jádro je uzemněné, vložené do nádoby naplněné transformátorovým olejem. Plechy se vyrábí z ocelových za studena válcovaných orientovaných plechů s keramickou izolací. Jejich spoje jsou nařezány pod úhlem 45° [1]. Jsou tenké pár desetin milimetru a skládají se tak, aby se překrývaly a měli co nejmenší indukční odpor. To znamená pokud možno, aby se ve výsledku co nejvíce blížili kruhu a cívky přilehly. Vinutí jsou od sebe oddělena izolací a spojena nahoře a dole horizontálními spojkami. U jádrového magnetického obvodu se třemi sloupy je po stranách magnetický tok trochu větší než v prostředním sloupu, přestože má delší cestu. Sousledná a zpětná složka toku se ruší ve spojce. Hlavní rozdíl mezi typy konstrukcí je chování při napojení na nesouměrný systém. [2]

1.1.2 Vinutí

Na každém sloupu jsou normální cívky, jež jsou navinuty z kulatých měděných navzájem izolovaných vodičů. Vinutí nižšího napětí se zpravidla umísťuje blíže jádru, aby vinutí vyššího napětí bylo lépe přístupné. Obdélníkové vinutí umožňuje efektivnější využití prostoru a přináší menší náklady na materiál, ale má menší mechanickou pevnost, takže se využívá spíše u menších transformátorů [3]. Z důvodu ještě lepší mechanické pevnosti jsou vinutí pevně stlačena pomocí plátů nebo vzpěr. Vývody jsou připojeny k přepínači odboček. Propojovací vodiče jsou vyrobeny z měděných izolovaných pásků nebo kabelů a jsou pevně připevněny pomocí dřevěných klínek a držáků. Mezi vinutími jsou chladicí kanálky. [1] Po připojení napětí na primární vinutí, začne protékat proud, který vytvoří magnetické pole. To začne působit na sekundární vinutí tak, že se v něm začne indukovat napětí. Při nesouhlasném navinutí mají napětí opačný směr [4]. Zkratové napětí se požaduje co nejmenší.

1.1.3 Přepínač odboček

Zkratkou OLTC se označuje zařízení pro přepínání odboček vinutí v podmínkách, kdy je transformátor pod napětím nebo zatížením [5]. Přepínač tedy umožňuje provádět změnu převodu napětí během provozu na rozdíl od přepojovače [1]. Hlavním úkolem je zajistit konstantní napětí v širokém rozsahu zatěžovacích stavů. Řídí se výstupní napětí přepínáním počtu závitů na vinutí. Přepínání na straně s menšími jmenovitými proudy je výhodnější, protože při větším počtu závitů je jemnější [6]. Přepínač odboček OLTC bývá umístěn v samostatné komoře nainstalované z čela nebo boku hlavní nádoby. Současně mohou tato zařízení také velmi snadno kontrolovat paralelní provoz transformátorů a nabízejí automatický způsob rozpoznání topologie spínacího systému. To znamená, detekovat konfiguraci rozvaděče a přizpůsobit jeho regulační chování [3]. Jedním z předních výrobců je firma Reinhausen. Na obrázku níže je ilustrační schéma pro přepínač odboček OLTC, který má celkem 27 odboček. V příloze C lze nalézt fotku ovládací skříně.



Obrázek 1- ilustrační schéma přepínače odboček OLTC, transformátor typu N

1.1.4 Průchodky a měřicí transformátor proudu

- *Průchodky*

Patří k nejcitlivějším prvkům transformátoru. Bez jejich použití by docházelo ke zkratu, tudíž umožňují a zabezpečují průchod proudu víkem transformátoru. Rozměry a hmotnost závisí především na velikosti požadovaného napětí. Výkonový trojfázový transformátor typu N má 12 průchodek.

- *Měřicí transformátory proudu*

Transformátor může být vybaven měřicím transformátorem proudu, označovaným zkratkou CT, namontovaným na prodloužené spodní části kondenzátorové průchodky nebo na vodičích připojených k olejové průchodce. Jsou používány pro ochranu a monitorování, popřípadě pro napájení topných cívek indikátoru teploty vinutí. [1]

1.1.5 Nádoba

Hlavní komora je vybavena speciálními oky pro zvedání. Nádoba vyhovuje široké řadě funkčních kritérií. Musí disponovat jak dobrou mechanickou pevností pro transport a havarijní stavy, tak schopností odolávat klimatickým vlivům a širokému rozmezí teplot po celou dobu životnosti transformátoru. Nádoba je samozřejmě olejotěsná, protože slouží zároveň jako úložiště izolační kapaliny. Vnitřní povrch nádoby je pokryt barvou odolávající oleji. V drtivé většině případů není hermeticky uzavřena. Vzorky oleje pro kontrolu jeho dielektrické pevnosti je možné odebírat i za provozu z horní a spodní části nádoby. Spodní část zároveň obsahuje zařízení pro vypouštění oleje. Vyrábí se z ocelových plátů a s radiátory. Ovládací skříň se umísťuje na čelo nebo bok nádoby. [1], [3]

- *Radiátory*

Radiátory zrychlují chlazení transformátoru a jsou zásadní při zvyšování zatížení. U distribučních transformátorů jsou integrovány v nádobě. Avšak v případě transformátorů pro elektrárny se obvykle z důvodu dopravy posílají samostatně. Upevňují se postupně a je potřeba věnovat zvláštní pozornost při manipulaci během montáže, neboť jakékoli malé škody mohou způsobit únik oleje. V podstatě jde o chladič z velmi tenkých plechů s jednoduchým principem, který spočívá ve zvětšení plochy pro rozptýlení tepla oleje. Ten vstupuje z kondenzátoru přes horní ventil a po ochlazení se vrací dolním ventilem do nádoby. Tyto uzavírací ventily lze ovládat i ručně. [7]

1.1.6 Konzervátor

Jedná se o dilatační nádobu o objemu přibližně do 10% objemu oleje celkem v transformátoru a chladicím systému. Mívá tvar válce. Bývá převážně umístěna nad víkem hlavní komory. Tento olejový kontejner je opatřen po obou stranách kontrolními kryty, které usnadňují údržbu a čištění. Účelem konzervátoru je kompenzace hladiny oleje, jelikož při zvýšení teploty se objem média zvyšuje. Rovněž funguje jako zásobník izolační kapaliny. Do konzervátoru vstupuje vlhkost vzduchu, která výrazně snižuje izolační vlastnosti oleje, z tohoto důvodu je konzervátor vybaven vysoušečem vzduchu. Pro transformátor s přepínačem odboček se konzervátor skládá ze dvou komor. Hlavní komora konzervátoru je připojena k přepínači přes trubku s plynovým Buchholzovo relé (uvedené v odstavci 1.1.8) a dvěma uzavíracími ventily. Přídavná komora je připojena k přepínači trubkou přes relé indikující průtok oleje. Trubky jsou opatřeny víčkem pro zabránění vniku usazenin a kalů. [1], [7]



Obrázek 2-boční pohled na třífázový olejový výkonový transformátor

1.1.7 Chlazení

Nejefektivnější metodou chlazení je metoda cirkulace oleje pomocí čerpadel a ofukování venkovních radiátorů pomocí ventilátorů namontovaných po obou stranách hlavní komory. Napájecí napětí pro elektromotory ventilátorů je 400 VAC. 1. Skupina se obvykle zapíná při 75°C, 2. Skupina ventilátorů potom při 85°C.

- **ONAN**

Zkratka používaná pro transformátor s přirozeným průtokem oleje přes radiátory a přirozeným odvodem tepla.

- **ONAF**

Zkratka pro transformátor s přirozeným průtokem oleje přes radiátory a ofukováním ventilátory. Nucené proudění vzduchu umožňuje zvyšovat výkon.

Tabulka 1 - Používaná označení chladicího systému

Chlazení	číslo písmene a význam	Označení	Popis
Vnitřní	1. písmeno - chladicí médium	O	Olej (bod hoření < 300°C)
		K	Izolační kapalina s bodem zápalu >300°C
		L	Izolační kapalina s neměřitelnou hodnotou bodu zápalu
	2. písmeno - způsob chlazení	N	Přirozený oběh chladiva v chladičích a vinutí
		F	Nucený oběh chladiva s přirozeným prouděním oleje ve vinutí
		D	Nucený oběh chladiva s usměrněným prouděním oleje v hlavních vinutích
Vnější	3. písmeno - chladicí médium	A	Vzduch
		W	Voda
	4. písmeno - způsob chlazení	N	Přirozený oběh
		F	Nucený oběh

1.1.8 Měřicí a ochranné vybavení

Stejnoseměrné napětí pro signalizaci a měření je 100 V. Do kontrolní měřicí skříně, viz příloha D, jsou přivedeny veškeré údaje. Hodnoty teplot oleje ve spodní a horní části nádoby, teploty všech vinutí, optické senzory, proudové hodnoty v jednotlivých fázích, ovládání ventilátorů, indikace hladiny oleje v nádobě, detekce úniku plynu, ochranné relé OLTC, signalizace a vypnutí od Buchholzova relé, zapnutí/vypnutí ventilátorů.

U následujícího popisu jednotlivých prvků vycházím z návodu pro výkonový transformátor od společnosti ABB a odborné zahraniční knihy Power Transformer. [1], [3]

- ***Magnetický indikátor hladiny oleje***

Standardní ochranné vybavení pro olejové transformátory, které pomocí plováku reaguje na výšku hladiny v konzervátoru. Pokud hladina oleje klesne pod 100 mm ode dna nebo stoupne nad 100 mm od horní části, magnetický indikátor hladiny oleje aktivuje výstrahu.

- ***Bezpečnostní přetlakový ventil***

Zařízení, jež umožňuje vypouštění velkého množství oleje pro udržení tlaku na bezpečné úrovni. Chrání transformátor před poškozením nádoby v případě rychlého a prudkého nárůstu vnitřního tlaku, který by mohl vzniknout během provozu.

- ***Indikátory teploty oleje a vinutí***

Teplotní čidla se umísťují do pouzder naplněných olejem primárně na víko hlavní nádoby, pokud možno v nejteplejších místech. Používají se pro aktivaci výstrahy v případě překročení dovolených teplot a slouží jako zpětná vazba při řízení. Většinou dochází k zapnutí první skupiny ventilátorů u teplotní hodnoty 75°C. Signál pro vypnutí transformátoru by neměl překročit 110°C, pokud není nastaven jinak.

- ***Vysoušeč***

Chrání olej před vlhkostí, jež vniká do konzervátoru. Pro dvoukomorový kondenzátor jsou instalovány dva vysoušeče. Využitím silikagelu se značně zpomalí stárnutí oleje. Při absorbování určitého množství vody mění barvu. Regenerace silikagelu z oranžové zpět na bezbarvou se uskutečňuje v rozmezí 130°C do 150°C.

- **Buchholzovo relé**

Ochranné dvoustupňové relé namontované na vstupním potrubí oleje do konzervátoru zaznamenává pokles nebo nárůst hladiny oleje. Signalizuje uvolněný plyn ze spáleného oleje při závitovém zkratu na vinutí a posléze při prudkém proudění oleje odpíná transformátor od sítě. Chrání před vnitřními poruchami.

1.2 Význam a použití výkonových transformátorů

Transformátory plní zásadní roli v elektrizačních soustavách. Konstrukce závisí na jeho výkonu, napětí i účelu použití. Hlavním úkolem je přeměna střídavých proudů a napětí požadovaných hodnot z primární na sekundární stranu. Elektrická energie se transformuje na magnetickou a opět na elektrickou. Svým provozním principem tento elektrický netočivý stroj také zajišťuje galvanické oddělení elektrického systému. Za provozu zhoršuje jejich hospodárné využití zatěžování menším než jmenovitým napětím, špatný účinník sítě, zbytečná výkonová záloha při instalování i časté vypínání. [6] Distribuční transformátory pracují 24 hodin denně s maximální účinností při polovině plného zatížení. Snižují napětí z přenosové soustavy pro distribuci v blízkosti spotřebitelů na 22kV, kde se dále transformuje obvykle na sdružené napětí 400 V, odpovídající fázovému 230 V. Často je nutné instalovaný výkon rozdělit například z důvodu postupně stoupajícího zatížení v průběhu let. Namísto jednoho transformátoru jsou instalovány dva i více. Podmínkami paralelního chodu transformátorů jsou stejné fázové napětí, sled fází, hodinové číslo a napětí nakrátko. V ideálním případě mají stejný výkon. Při případné poruše jednoho, tak mohou ostatní převzít zatížení plně nebo alespoň částečně. Výhodou je také možnost jeden nebo několik jich odpojit při dlouhodobě sníženém zatížení. [4] Blokované transformátory v elektrárnách slouží jednak k vyvedení vyrobeného elektrického výkonu do přenosové sítě, tak k napájení vlastní spotřeby v případě odstavení generátoru. U těchto transformátorů je strana nižšího napětí obvykle vstupní, kvůli méně nákladné výrobě elektrické energie. Avšak vysoké proudy nejsou praktické pro přenos a způsobují větší ztráty ve vedení. Zvýšení úrovně napětí na výstupní straně umožňuje snížení průřezu vodičů přenosové elektrizační soustavy, a tedy další snížení nákladů. Jmenovité napětí primárního vinutí závisí na typu elektrárny, je od 6 do 20kV. Jmenovité napětí na sekundárním vinutí se dimenzuje podle požadovaného přenosového napětí 110kV, 220kV nebo 410kV. [7]

1.3 Štítkové hodnoty transformátoru

Tabulka 2 – Ilustrační štítek transformátoru

TROJFÁZOVÝ TRANSFORMÁTOR			CE		
Druh		Typ		Číslo	
YN yn0 (+d1)		123(52) / 17,5 / 12 kV		Frekvence 60 Hz	
Krytí IP 50		Chlazení ONAN/ONAF		Tř. izolace F	
ODBOČKY	HV	LV	SW		
1	124 000 V	-	-		
11	110 000 V	13 800 V	6 600 V		
27	88 000 V	-	-		
I_n	262 / 352 A	2092 / 2803 A	1458 / 1954 A		
S_n	50 / 67 MVA	50 / 67 MVA	16,7 / 22,3 MVA		
u_k	22,0 %	Max. doba trvání zkratu		2	s
	110 000 / 13 800 V	Nynas Nytro Libra		21,0	t
P_o	27,0 kW	Celková hmotnost		91,6	t
P_k	210 kW	2015		IEC 60076	

Druh, typ a číslo jsou různé označení výrobci. Ty jsou povinni také uvádět elektrický výkon chladicího systému při chodu naprázdno. Tyto hodnoty musí poskytovat každá dokumentace výrobku spolu s údaji o hmotnosti hlavních komponent. Pokud je to použitelné, je nutno u výkonových transformátorů uvádět index maximální účinnosti a výkon, při němž je dosahován. [8]

Jmenovité hodnoty určují provoz transformátoru za podmínek, na nichž se zakládají záruky a zkoušky. Jedna z odboček je hlavní odbočka, ke které se vztahují stanovené údaje. U transformátoru se jako štítková hodnota udává zdánlivý výkon. Údaj o kombinovaných ztrátách nakrátko transformátoru se vztahuje na předepsanou kombinaci zatížení, neboli výrobce garantuje ztráty naprázdno a jmenovité ztráty nakrátko při jmenovitém proudu na hlavní odbočce.

$$I_N = \frac{S_N}{\sqrt{3} \cdot U_N} \quad (1)$$

2 Zkoušky

Vycházím z české verze ČSN EN 60076 mezinárodního souboru norem IEC 60076, kterému zařízení musí vyhovovat na území evropské unie. Podrobnější přehled charakteristických vlastností různých kombinací trojfázových vinutí a konstrukcí magnetických obvodů je uveden v ČSN EN 60076-8. Související termíny, způsoby zapojení a další nezbytné pro splnění požadavků zkoušení lze nalézt v obecné části ČSN EN 60076-1. Tato část také rozděluje zkoušky na kusové, typové, zvláštní a provozní. Další podrobnější popis, metody a požadavky jednotlivých elektromagnetických zkoušek a měření odporu vinutí je obsahem ČSN 35 1086.

V této kapitole se zaměřuji na kusové funkční zkoušky třífázového výkonového transformátoru, které se musí provést na každém vyrobeném zařízení. Uvádím také pár zvláštních zkoušek na vyžádání provozovatele. Mezi rutinní stanovené elektrické zkoušky dále patří například rázové zkoušky, kusové zkoušky výdržným přiloženým a indukovaným napětí i zkoušení přepínače odboček. Zkoušení předpokládají plně smontovaný testovaný transformátor, neboť vnější součásti a příslušenství mohou ovlivnit jeho chování. Obsah kapitoly se týká primárně měření elektrických hodnot. Veškeré charakteristiky kromě izolace se zakládají na jmenovitých podmínkách a musí se provádět při teplotě okolí mezi 10°C a 40°C. U hodnot, kde se požaduje, aby byly výsledky korigovány na vztažnou teplotu, se pro olejové transformátory volí referenčních 75°C.

Uváděné kusové zkoušky.

- *Měření odporu vinutí*
- *Měření převodu napětí a kontrola fázového natočení*
- *Měření impedance nakrátko a ztrát nakrátko*
- *Měření ztrát a proudu naprázdno*
- *Kusové izolační zkoušky*

Zvláštních zkoušek existuje celá řada a stanovují se obvykle před výrobou.

- *Stanovení kapacit vinutí – země a mezi vinutími*
- *Měření nulové složky impedance*
- *Měření izolačního odporu*

2.1 Měření převodu a kontrola vektorů

Testovací soupravy k určení poměru napětí a polarit jsou navrženy pro jednofázový provoz, pro usnadnění testování se používají doplňkové spínací zařízení [3].

2.1.1 Měření převodu napětí

Převod napětí naprázdno u transformátoru s trojím vinutím se musí kontrolovat pro 2 dvojice vinutí na každé odbočce všech fází, přičemž stačí měřit jednou. Příslušné normy dovolují ověřit převod dle příslušných fázových napětí, pokud je to možné. Obvykle se zkoušení realizuje speciálním můstkem. Přesnost tohoto typu měření je lepší než 0,1%. [5], [9] Zkouška může být realizována pomocí převodníku poměru TTR se zabudovaným napájecím zdrojem. Běžně se používají velmi nízká napětí 8-10V. Dvojice vinutí jedné fáze jsou připojeny k přístroji. Fázové napětí se přivádí pomocí můstkového obvodu a poměr indukovaného napětí se měří na můstku. Pro skupinu spojení Y/d se kontroluje postupným zkratováním fází zapojených do trojúhelníka. Spojují se dvě příslušné sdružené svorky vinutí, měří se na zbylé volné dvojici fází [9]. Na TTR je nastaven teoretický poměr a měl by být změněn, dokud nedojde k vyvážení indikátoru procentuální chyby měřeného od očekávaného poměru v procentech [7]. Je vyžadováno, aby odchylka naměřeného poměru napětí mezi dvěma vinutími byla v rozmezí $\pm 0,5\%$ vypočtené hodnoty [3].

Teoretický poměr napětí mezi HV / LV.

$$\text{Vypoč. hodnoty} = \frac{\text{napětí HV}}{\text{napětí LV}} \quad (2)$$

Teoretický poměr napětí mezi HV / SW.

$$\text{Vypoč. hodnoty} = \frac{\text{napětí HV}}{\sqrt{3} \cdot \text{napětí SW}} \quad (3)$$

$$\text{Odchylka} = \frac{\text{Naměřený poměr} - \text{teoretický poměr}}{\text{teoretický poměr}} \cdot 100 \quad (4)$$

2.1.2 Ověření fázového natočení

V případě trojfázových transformátorů je nutno ověřovat symbol spojení [5]. Označení zapojení vinutí bývá doplněno číslem. Měří se napětí svorek fáze 1U na straně HV a fáze 3U1 na straně stabilizační SW. Svorky jsou spojeny dohromady. Transformátor je napájen symetrickým třífázovým zdrojem 400V. Při zkoušení transformátoru s více vinutími se kontrolují skupiny spojení jednoho vinutí vzhledem k ostatním [9].

- **Hodinové číslo**

Hodinové číslo je charakterizováno jako posuv mezi vstupním a výstupním napětím jedné fáze. Měří se ve směru hodinových ručiček od strany vyššího k nižšímu napětí ve směru sledu fáze. Hodinové číslo jedna se rovná 30°. Hodnoty jsou 0-11.

2.2 Výkonové charakteristiky

Rozdíl teplot nahoře a u dna musí být malý, aby se toho dosáhlo rychleji, je možné cirkulovat olej čerpadlem [5]. Teplo vzniká jednak při přemagnetování materiálu jádra transformátoru a jednak oteplením vodičů protékajícím proudem [6]. V případě, že se transformátor ponechá minimálně 3 hodiny zahřívát po připojení k napětí, považuje se teplota středních vrstev oleje za teplotu vinutí. Ta se určuje jako průměr mezi teplotami oleje nahoře v nádobě a u dna. Střední teplota vinutí se vypočte dle následujícího vztahu.

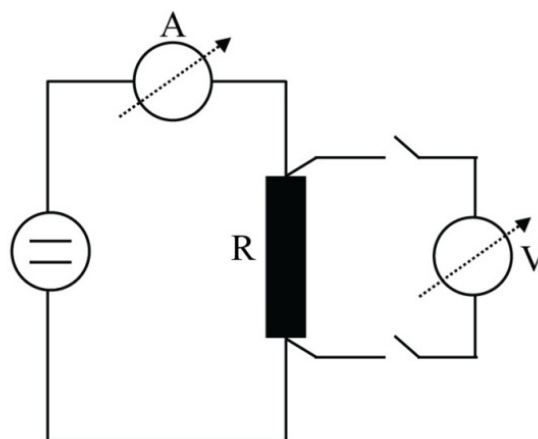
$$\theta = \frac{(\theta_h + \theta_d)}{2} \quad (5)$$

2.2.1 Měření odporu vinutí

Měří se stejnosměrným proudem, který nesmí překročit 15% jmenovitého proudu vinutí. Velké hodnoty mohou způsobit nesprávnost zahříváním vinutí. Dbá se, aby vlivy vlastní indukčnosti byly minimalizovány. Měření pomáhá při určování parametrů jako je výpočet ztrát RI^2 . Ztráty v mědi jsou určovány pouze ve vinutí a svorkách. U trojfázového vinutí spojeného do hvězdy by odpor na fázi měl být polovinou naměřeného odporu mezi dvěma svorkami. U spojení do trojúhelníka je odpor na fázi přibližně 67 % měřenému odporu mezi dvěma svorkami viz tabulky 3 a 4. Je nutné měřit na všech přístupných odbočkách ve všech polohách přepínače. Odpor jednotlivých vinutí nelze měřit odděleně, zároveň při měření jednoho vinutí musí být ostatní rozpojena. U zapojení do hvězdy se

měří ve spojení se svorkou N. U vinutí zapojeného do trojúhelníku se provádí mezi dvojicemi svorek. Vinutí transformátoru jsou většinou pokryta papírovou izolací a ponořena do izolační kapaliny, proto není možné měřit skutečnou teplotu vinutí. Zkoušení se provádí při teplotě okolí, a poté jsou výsledky přepočteny na referenční teplotu. Zaznamenávají se ustálené hodnoty. Pro snížení doby ustálení proudu se doporučuje volit hodnotu proudu minimálně $2\sqrt{2}$ efektivní hodnoty proudu naprázdno pro odpovídající jmenovité napětí transformátoru. Další používané metody jsou můstková nebo úbytku napětí, kde nesmí přesáhnout 20%. Pokud měření netrvá déle než 60 sekund je u těchto metod dovolená hodnota napájecího proudu 0,2 - 0,5 násobek jmenovitého proudu. [7], [9]

- *Schéma zapojení*



Obrázek 3 - Schéma zapojení pro měření odporu vinutí

Základní vzorec.

$$R = \frac{U}{I} \quad (6)$$

Přepočet odporu vinutí pro teplotu 75 °C k naměřené hodnotě R_{Θ} při teplotě Θ .

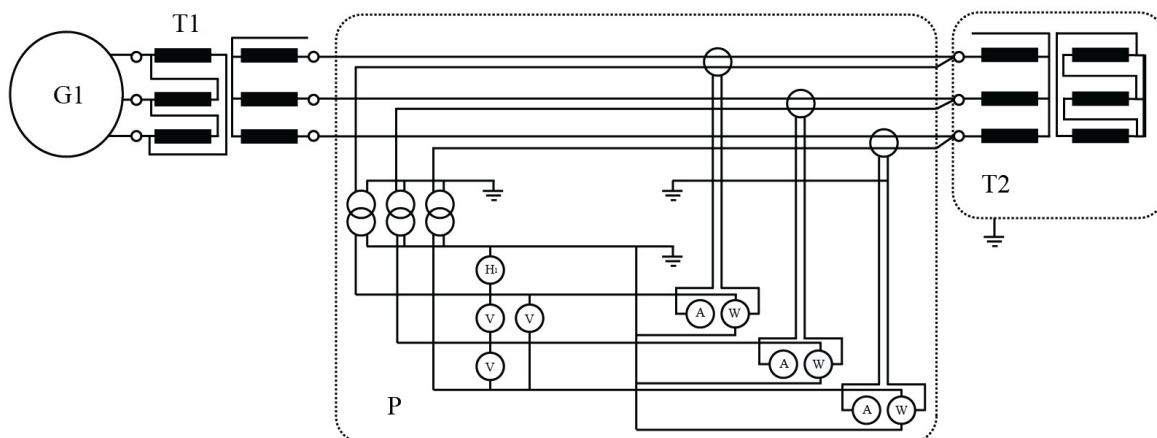
$$R_{75} = R_{\Theta} \frac{(T + 75)}{(T + \Theta)} = R_{\Theta} \frac{(235 + 75)}{(235 + \Theta)} \quad (7)$$

2.2.2 Měření impedance nakrátko a ztrát nakrátko

Zkoušení nakrátko se používá k určení ztrát v mědi při plném zatížení [7]. U velkých

transformátorů vyžaduje toto měření značnou péči a dobré měřicí zařízení s ohledem na malý účinník a velké zkušební proudy. Zvyšování teploty způsobuje znatelné chyby při měření, proto zkoušky musí být provedeny rychle [5]. Transformátor má indukční charakter. Tento chod je havarijný a nežádoucí. Transformátor nemůže trvale pracovat bez poškození vlivem uvolněného tepla, proto se musí účinně chránit.

- **Schéma zapojení**



Obrázek 4 - Měření impedance nakrátko a ztrát nakrátko

G-Generátor, P-Měřicí zařízení, T2 – Testovaný transformátor.

Výstupní svorky jsou spojené bezodpornou spojkou, neboli strana LV je zkratována, případná další vinutí jsou otevřená. Pomalu zvyšujeme napětí, dokud nedosáhneme velikosti jmenovitého proudu strany HV. Měřicí přístroj je připojen na tuto stranu. [10] Zaznamenávají se hodnoty napětí, proudu a ztrát, přičemž ztráty obvykle nejsou zjistitelné přímým měřením.

- **Impedance nakrátko**

Vyjadřuje se pro fázi a vztahuje se k hlavní odbočce, pokud není stanoveno jinak. Na transformátorech majících odbočkové vinutí s rozsahem odboček přesahujícím $\pm 5\%$ se musí měřit impedance nakrátko na hlavní odbočce a na dvou krajních odbočkách. [5]

$$z = \frac{U_{1k}}{\sqrt{3} \cdot I_{1k}} \quad (8)$$

- **Napětí nakrátko**

V praxi se udává napětí nakrátko v procentech jako štítková hodnota. Čím je větší procentní napětí, tím menší je trvalý zkratový proud. [5], [11] Zpravidla čím je vyšší napětí nakrátko, tím menší jsou ztráty i zkratový proud. Tolerance u nového transformátoru je na hlavní odbočce 7,5% až 10% [2].

$$u_{k\%} = \frac{U_{1K}}{U_N} \cdot 100 \quad (9)$$

- **Ztráty nakrátko**

Ztráty nakrátko jsou vztaženy ke jmenovitému proudu ve vinutí s menším jmenovitým výkonem, pokud mají vinutí ve dvojici různé hodnoty jmenovitého výkonu [5]. Napětí aplikované na proud plného zatížení při zkoušce nakrátko je poměrně malé ve srovnání se jmenovitým napětím. Z tohoto důvodu mohou být ztráty v jádru zanedbávány. [7] Ztráty nakrátko se skládají ze ztrát v mědi a dodatečných ztrát. Joulovy ztráty ve vinutí nebolí na činném odporu RI^2 se mění přímo úměrně s odporem vinutí. Všechny ostatní ztráty se mění nepřímo úměrně. [11] Výsledný údaj se musí korigovat na vztažnou teplotu.

$$P_K = P_a + \sum RI^2 \quad (10)$$

Po teplotní úpravě :

$$P_K = P_{ar} + \sum 1,5 \cdot R_r I^2 = P_{ar} + 1,5 \cdot (R_{HV} \cdot I_{NHV}^2 + R_{LV} \cdot I_{NLV}^2) \cdot 10^{-3} \quad (11)$$

- **Účinit nakrátko**

Účinit lze určit ze středních naměřených veličin, neboť v souměrné soustavě vstupních napětí jsou efektivní hodnoty proudů všech fází stejné [4]. Hodnota účinitu se pohybuje od 0 do 1.

$$\cos\varphi_K = \frac{P_{1k}}{\sqrt{3} \cdot U_{1k} \cdot I_{1N}} \quad (12)$$

2.2.3 Měření ztrát a proudu naprázdno

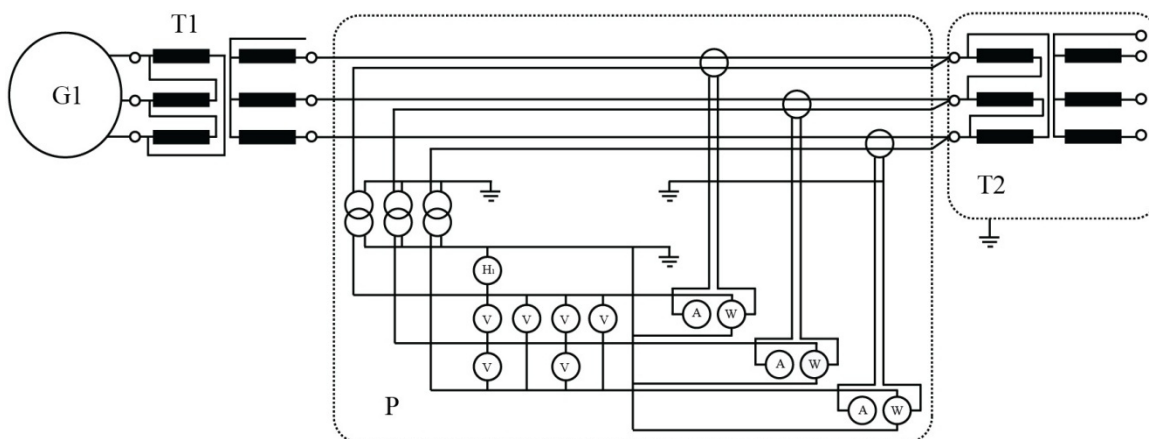
Tato zkouška se používá především k určení ztrát v jádru. Obecně představují střední hladinu ztrát v dlouhodobém provozu. Při měření jsou výstupní svorky rozpojené. Transformátor odebírá ze sítě proud naprázdno I_0 a vznikají v něm ztráty naprázdno. Jestliže zkušební podmínky nedovolují nastavit jmenovitý kmitočet, lze zvolit hodnotu, jež se liší od jmenovitého maximálně o 3%. Vlivem vyššího kmitočtu se zvyšují ztráty. [6], [7], [11]

Přepočet na jmenovitý kmitočet napájecího napětí pro zkoušení.

$$\bar{U} = U_N \cdot \frac{f}{f_n} \quad (13)$$

Napájecí napětí je souměrné a prakticky sinusového tvaru. Pokud není, provádí se korekce křivky. Tvar se kontroluje měřením střední a efektivní hodnoty napětí zároveň. Křivka považuje za sinusovou, když poměr středních aritmetických hodnot tří změřených sdružených napětí se neliší od násobku 1,11 jmenovitého o více než $\pm 2\%$. Další možností je kontrola tvaru pomocí oscilografu, kam se přivádí napájecí napětí a 2 stejné sinusové křivky posunuté vůči sobě o 10 procent amplitudy. Jestliže se povede kontrolované napětí umístit, tak aby nepřesahovalo hranice, považuje se křivka za prakticky sinusovou. [9]

- **Schéma zapojení**



Obrázek 5 - Schéma zapojení pro měření ztrát a proudu naprázdno

G-Generátor, P-Měřicí přístroj, T2-Testovaný transformátor.

Provádí se zpravidla na straně vinutí nižšího napětí, ostatní vinutí se musí ponechat otevřená a vinutí, která by mohla být spojena do otevřeného trojúhelníku, musí mít trojúhelník uzavřen [5]. Při napájeném vinutí spojeném YN se měří mezi fázovou a svorkou N, ve všech třech fázích. Pomalu zvyšujeme napětí, dokud nedosáhneme jmenovité hodnoty. Při měření na jiné než jmenovité odbočce, je třeba napájet napětím odpovídajícím napětí vypočtené hodnotě odbočky. Efektivní hodnota proudu naprázdno, ztráty naprázdno a efektivní hodnota přiloženého napětí se měří současně. Pokud je to stanoveno mezi výrobcem a odběratelem, měří se i doplňkově při nízkém napětí jako zvláštní zkouška, která může být součástí přílohy protokolu, viz příloha A. [7], [9]

- **Ztráty naprázdno**

Ztráty naprázdno vznikají pouze na činném odporu. Ztráty naprázdno představují energeticky neurčitý činný výkon, který se v magnetickém obvodu a z části i v elektrickém obvodu mění na teplo. Velikost ztrát závisí na magnetickém toku. Vstupní výkon se skládá ze ztrát v železe a ztrát v mědi. Joulovy ztráty vznikají v primárního vinutí. Ztráty v železe ΔP_{Fe} v jádře lze rozdělit na ztráty vířivými proudy a ztráty hysterezní. Hysterezní ztráty rostou lineárně s kmitočtem napětí a ztráty vířivými proudy přibližně kvadraticky s kmitočtem [11]. Ztráty v mědi naprázdno mohou být opomíjeny, protože všechny naměřené proudy jsou poměrně malé ve srovnání se jmenovitým proudem a pokles napětí vlivem těchto proudů lze považovat za zanedbatelný. Pokud je to nutné provádí se korekce ztrát naprázdno vlivem tvaru napájecího napětí. První součinitel souvisí se sinusovou křivkou, druhý s frekvencí. Pro transformátorové plechy válcované za studena jsou poměrné ztráty hysterezní $p_1=0,5$ a poměrné ztráty vířivými proudy $p_2=0,5$. [7]

$$P_0 = P'_0 \frac{1}{p_1 + k \cdot p_2} \cdot \frac{1}{p_1 \cdot \frac{f}{f_N} + p_2 \cdot \left(\frac{f}{f_N}\right)^2} \quad (14)$$

- **Proud naprázdno**

Zaznamenávají se efektivní hodnoty proudů. Výsledná hodnota je aritmetický průměr. Velikost proudu naprázdno se vyjadřuje v procentech základní složky proudu napájeného vinutí převedeného na jmenovitý výkon. Obvykle se tato hodnota u energetických transformátorů pohybuje do pěti procent jmenovitého proudu [11].

$$i_0 = \frac{I_0}{n \cdot I_N} \cdot 100 \quad (15)$$

2.3 Kondice izolace

Slouží pro ověření stavu izolačního systému. Patří sem také zkouška atmosférickým impulzem, neboli rázová zkouška a zkoušky přiloženým výdržným napětím a přiloženým indukovaným výdržným napětím.

2.3.1 Měření izolačního odporu

Zvláštní zkouška [5]. Měří se pomocí měřícího přístroje izolačního odporu při napájení stejnosměrným napětím, obvykle 5kV. Izolační odpor se měří mezi vinutími, mezi vinutími a zemí a mezi jádrem a zemí. Výsledné hodnoty bývají několik set až několik tisíc megaohmů. Provádí se všech vinutí s prodlevou 120s. Napájecí napětí se připojuje mezi zkoušené vinutí a zem při uzemnění ostatních vinutí. Hodnoty odporů R_{15} a R_{60} jsou hodnoty pro 15s a 60s. [10]

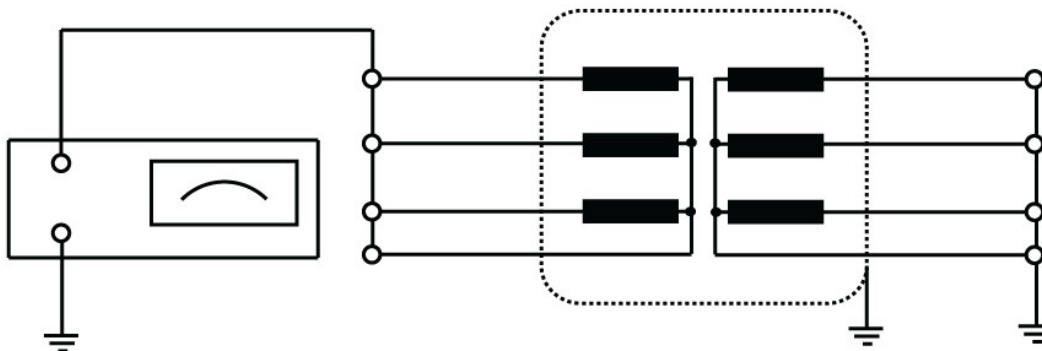
- *Izolační odpor - vinutí*

Ověření izolačního odporu každého vinutí proti zemi a mezi vinutími při 5kV. V reportu se uvádí polarizační index R_{600} / R_{60} . Hodnota odporu R_{600} platí pro 600s.

- *Izolační odpor - jádro a rám*

Kontrola izolace jádra a rámu (kostry) transformátoru. Měřeno při trochu menším stejnosměrném napětí 2,5kV za to pro delší čas 900s, označuje se analogicky R_{900} .

- *Schéma zapojení*



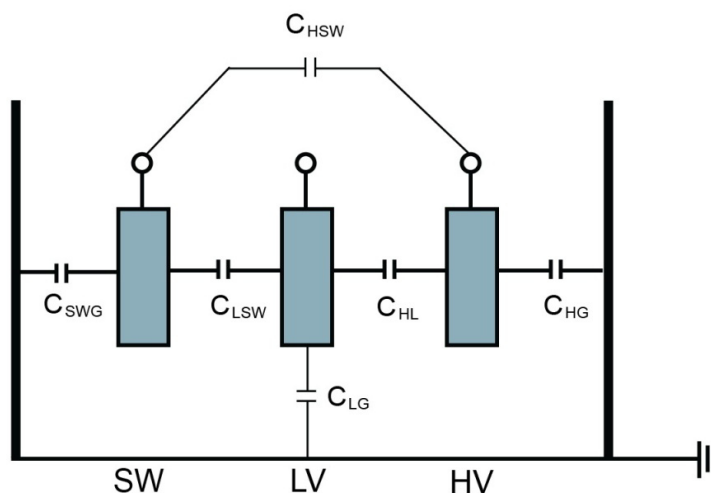
Obrázek 6 - Schéma zapojení pro měření izolačního odporu

2.3.2 Izolační výkonová charakteristika

- *Měření ztrátového úhlu $\text{tg } \delta$ kapacit izolačního systému*

Zvláštní zkouška [5]. Transformátor je během měření uzemněn. Měří se ztráty v oddělovací izolaci mezi vinutím. Většinou se měří pomocí kapacitního můstku, lze použít Scherringův můstek. Obvykle se provádějí při střídavém napětí 10kV. Všechny svorky HV jsou spojeny a označeny H. Všechny svorky vedení LV jsou vzájemně spojeny a označeny L. Spojení se obvykle realizují na velkém terminálu, obvykle spojeným s nádobou transformátoru označenou G vyvedené na zemnicí svorku. Typické hodnoty u nového jsou $\pm 0,5\%$. [10]

- *Schéma zapojení*

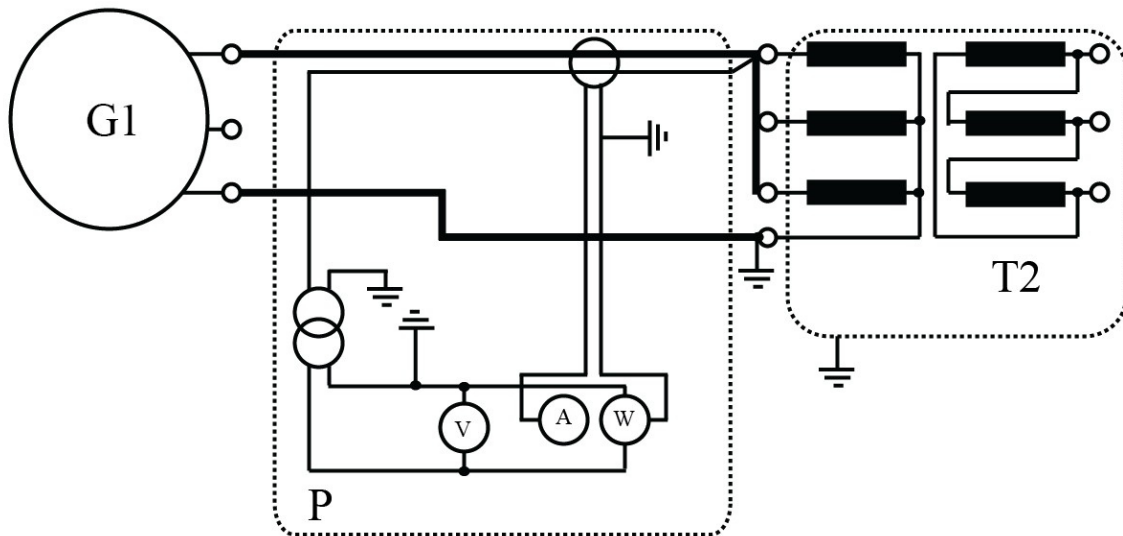


Obrázek 7 - Schéma kapacitního můstku pro měření ztrátového činitele

2.4 Měření nulové složky impedance

Nulová složka se vyskytuje v soustavě fázových vodičů, protéká-li proud středního bodu zemí nebo středním vodičem. V praxi jde o normální stav u 4vodičové rozvodné soustavy s jednofázovým zatížením mezi fází a středním bodem. Záměrně se nulový proud nepřenáší. V transformátoru se třemi sloupkami se magnetické toky trochu liší. Zbytková nulová složka rozptylového toku se ve spojce neruší, ale uzavírá svou cestu vně železného jádra, případně vířivé proudy ve stahovací konstrukci a nádobě vyvolávají dodatečné ztráty. To znamená vysokou reluktanci a nízkou magnetizační impedanci pro přiloženou nulovou složku napětí, tudíž velký magnetizační proud. Magnetizační impedance se obvykle zanedbává. [2]

- *Schéma zapojení*



Obrázek 8 – Schéma zapojení pro měření nulové složky

G-Napájecí generátor, P-Měřící zařízení, T2-Testovaný transformátor

Zvláštní zkouška [5]. Měření nulové složky impedance se měří při jmenovitém kmitočtu mezi spolu spojenými fázovými svorkami vinutí spojených do hvězdy a vyvedenou svorkou uzlu. Obvykle se měří na jmenovité odbočce. Stabilizační vinutí je uzemněné a lze na něj nahlížet jako na zkrat ve vztahu k nulovým složkám napětí. Nulovou složku proudů nelze přenášet mezi třemi vývody vinutí v trojúhelníku. U transformátorů s více vinutími se přiložené napětí určí dohodou mezi výrobcem a odběratelem. Trvání zkoušky nesmí být příliš dlouhé, aby se zamezilo případnému vysokému ohřevu kovových částí konstrukce. Ověřuje se, že zkratová odolnost terciárního vinutí je dostatečná pro maximální nulovou složku proudu. Nulové složky impedance se poněkud liší od hodnot měřených při sousledné složce proudu. Rozdíl obvykle leží mezi 10% a 15% a závisí na uspořádání vinutí. Nulová složka ve fázích by měla mít stejnou amplitudu. [2], [9]

$$Z_N = \frac{U_N}{I\sqrt{3}} \quad (16)$$

$$Z_0 = \frac{3U}{I} \quad (17)$$

3 Naměřené hodnoty

Tato kapitola uvádí výsledky provedených zkoušek na plně smontovaném transformátoru v dílně výrobce při jmenovité frekvenci 60 Hz a teplotě okolí 24°C. Chladicí systém ONAN / ONAF umožňuje zvýšit elektrický výkon z 50 na 67 MVA.

- ***HV - Vinutí VVN***

Sekundární strana 110kV, 262 – 352 A. Spojení YN. Značení fází: 1U, 1V, 1W.

Spojení do hvězdy dovoluje přímé uzemnění nebo uzemnění přes impedanci. Symbol YN znamená právě tuto vlastnost. Y značí, že střední bod, který je zde k dispozici, není spojen se zemí. Typ tohoto vinutí umožňuje umístit odbočky a přepínač odboček v konci každé fáze u středního bodu. Nesouměrnost zatěžovacích proudů, zvláště v tomto bodě ovlivňují stabilitu napětí, rozptylový tok a magnetizaci jádra. Je dovoleno jednofázové zatížení proudem mezi fázemi nebo mezi fází a středním bodem. [2]

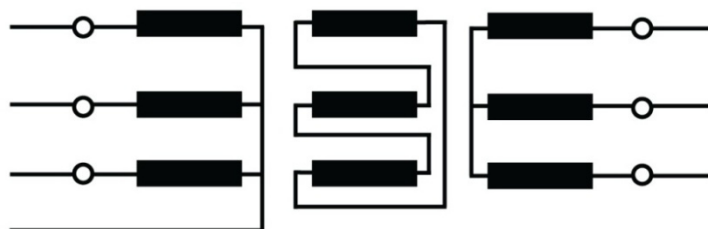
- ***LV - Vinutí VN***

Primární strana 13,8kV, 2092-2803A. Spojení yn0. Značení fází: 2U, 2V, 2W.

- ***SW - Stabilizační vinutí VN***

6,6kV. Proudů 962-1297 A. Spojení d1. Značení fází: 3U, 3V, 3W.

Označuje se jako terciární vinutí. Přídavné kompenzační vinutí spojené do trojúhelníku je hospodárnější pro nízké napětí s velkým proudem. Je určeno ke zmenšení nulové impedance připojené soustavy a tím i činitele uzemnění. Proudů a sdružená napětí mají nulový součet, protože jde o uzavřené spojení. Tento typ vinutí neobsahuje žádnou nulovou složku napětí, avšak uvnitř může téct nulová složka proudu. Indukovaný zkratový vyrovnávací proud dává kompenzační ampéřzávity. [2]



Obrázek 9 - funkce stabilizačního vinutí YNyn + d

3.1 Měření převodu napětí a ověření fázového natočení - naměřené hodnoty

- *Ověření vektorové skupiny voltmetrovou metodou*

400V.

Tabulka 3 – Tabulka hodnot napětí svorek

Strana HV napětí		Strana LV napětí		Napětí mezi svorkami HV a LV	
Svorky	U [V]	Svorky	U [V]	Svorky	U [V]
1U-1V	412	3U1/3W2-3V1	25	1V-3V1	391
1V-1W	414	3V1-3W1	25	1V-3W1	413
1W-1U	414	3W1-3U1/3W2	25	1W-3V1	393
				1W-3W1	393

Vektorový symbol skupiny je určen podle tabulky uvedené níže. Z tabulky a naměřených hodnot vyplývá o vektorovou skupinu 1. Jedná se o hodinové číslo tedy posuv mezi vstupním vinutím HV a stabilizačním SW.

Tabulka 4 - Tabulka pro ověření vektorové skupiny

Symbol vektor. Skupiny	Vztah napětí mezi svorkami
0	1W3W1<1V3W1=1W3V1>1W3W1<1U1V
1	1W3W1<1V3W1>1W3V1=1W3W1<1U1V
2	1W3W1<1V3W1>1W3V1<1W3W1<1U1V
3	1W3W1<1V3W1>1W3V1<1W3W1≥1U1V
4	1W3W1<1V3W1>1W3V1<1W3W1>1U1V
5	1W3W1=1V3W1>1W3V1<1W3W1>1U1V
6	1W3W1>1V3W1=1W3V1<1W3W1>1U1V
7	1W3W1>1V3W1<1W3V1=1W3W1>1U1V
8	1W3W1>1V3W1<1W3V1>1W3W1>1U1V
9	1W3W1>1V3W1<1W3V1>1W3W1≥1U1V
10	1W3W1>1V3W1<1W3V1>1W3W1<1U1V
11	1W3W1=1V3W1<1W3V1>1W3W1<1U1V

- **Měření převodu napětí naprázdno na všech odbočkách**

Měřicí přístroj: Raytech TR-Spy Mark II. Ověřuje se vektorová skupina YN yn01.

Teoretický převod napětí pro odbočku 11 dle rovnice (2).

$$\text{Vypoč. hodnoty} = \frac{110\,000}{13\,800} = 7,971[\text{V}]$$

Tabulka 5 - Měření převodu napětí mezi HV / LV

Odbočka HV	Vypoč. hodnoty	Naměřené hodnoty			Odchylka [%]		
		U	V	W	U	V	W
1	8,967	8,977	8,977	8,985	0,11	0,11	0,20
2	8,868	8,877	8,879	8,886	0,1	0,13	0,21
3	8,768	8,779	8,779	8,787	0,12	0,12	0,22
4	8,668	8,679	8,679	8,687	0,12	0,12	0,21
5	8,569	8,579	8,58	8,586	0,12	0,13	0,2
6	8,469	8,480	8,481	8,488	0,13	0,14	0,22
7	8,370	8,380	8,381	8,388	0,12	0,14	0,22
8	8,270	8,281	8,281	8,288	0,13	0,13	0,22
9	8,170	8,182	8,182	8,188	0,14	0,14	0,22
10	8,071	8,082	8,083	8,089	0,14	0,15	0,23
11	7,971	7,983	7,983	7,989	0,15	0,15	0,23
12	7,871	7,884	7,884	7,89	0,16	0,16	0,24
13	7,772	7,785	7,784	7,79	0,17	0,16	0,23
14	7,672	7,685	7,685	7,69	0,17	0,17	0,23
15	7,572	7,586	7,586	7,592	0,18	0,18	0,26
16	7,473	7,485	7,486	7,492	0,16	0,18	0,26
17	7,373	7,387	7,387	7,393	0,19	0,19	0,27
18	7,274	7,288	7,288	7,294	0,2	0,2	0,28
19	7,174	7,188	7,189	7,194	0,2	0,21	0,28
20	7,074	7,089	7,089	7,095	0,21	0,21	0,29
21	6,975	6,991	6,991	6,996	0,23	0,23	0,31
22	6,875	6,891	6,892	6,896	0,23	0,25	0,31
23	6,775	6,792	6,792	6,792	0,25	0,25	0,25
24	6,676	6,693	6,693	6,693	0,26	0,26	0,26
25	6,576	6,593	6,594	6,598	0,26	0,27	0,33
26	6,476	6,494	6,494	6,499	0,27	0,27	0,35
27	6,377	6,395	6,395	6,399	0,29	0,29	0,35

Měřicí přístroj: Raytech TR-Spy Mark II. Ověřuje se vektorová skupina YN d1.

Teoretický převod napětí pro odbočku 11 dle rovnice (3).

$$V_{\text{ypoč. hodnoty}} = \frac{110\,000}{\sqrt{3} \cdot 6\,600} = 9,623 \text{ [V]}$$

Tabulka 6 - Měření převodu napětí mezi HV / SW

Odbočka HV	Vypoč. hodnoty	Naměřené hodnoty			Odchylka [%]		
		U	V	W	U	V	W
1	10,867	10,901	10,901	10,912	0,32	0,32	0,42
2	10,747	10,779	10,78	10,792	0,30	0,31	0,42
3	10,627	10,659	10,659	10,671	0,30	0,30	0,42
4	10,507	10,539	10,538	10,549	0,31	0,30	0,40
5	10,387	10,417	10,418	10,428	0,29	0,30	0,40
6	10,267	10,297	10,298	10,307	0,30	0,30	0,39
7	10,147	10,176	10,177	10,187	0,29	0,30	0,40
8	10,027	10,056	10,057	10,066	0,29	0,30	0,39
9	9,907	9,935	9,936	9,946	0,29	0,30	0,40
10	9,787	9,814	9,815	9,825	0,28	0,29	0,39
11	9,667	9,694	9,695	9,704	0,28	0,29	0,39
12	9,547	9,572	9,571	9,581	0,27	0,25	0,36
13	9,427	9,451	9,451	9,460	0,26	0,26	0,35
14	9,307	9,330	9,331	9,340	0,25	0,26	0,36
15	9,187	9,210	9,211	9,220	0,25	0,26	0,36
16	9,067	9,090	9,091	9,099	0,26	0,27	0,36
17	8,947	8,970	8,969	8,978	0,26	0,25	0,35
18	8,827	8,849	8,849	8,858	0,25	0,25	0,35
19	8,707	8,729	8,728	8,737	0,26	0,24	0,35
20	8,587	8,607	8,608	8,616	0,24	0,25	0,34
21	8,467	8,488	8,488	8,495	0,25	0,25	0,33
22	8,347	8,366	8,367	8,374	0,23	0,24	0,33
23	8,227	8,247	8,246	8,253	0,25	0,23	0,32
24	8,107	8,126	8,126	8,133	0,24	0,24	0,32
25	7,987	8,005	8,005	8,012	0,23	0,23	0,32
26	7,867	7,883	7,883	7,891	0,21	0,21	0,31
27	7,747	7,764	7,764	7,770	0,22	0,22	0,30

3.2 Výkonové charakteristiky- naměřené hodnoty

- *Měření odporu vinutí*

Tabulka 7 - Naměřené hodnoty odporu

Svorky	1	11	27					
1U - 1V	0,8210	0,7219	0,5348		2U - 2V	0,008910	3U1/3W2 - 3V1	0,004288
1V - 1W	0,8221	0,7233	0,5362		2V - 2W	0,008878	3V1 - 3W1	0,004321
1W - 1U	0,8222	0,7231	0,5359		2W - 2U	0,008915	3W1 - 3U1/3W2	0,004402

Měřicí přístroj: Raytech WR50-30.

Tabulka 8 - Naměřené hodnoty odporu vinutí

Odbočka		R[Ω]	Odbočka		R[Ω]			R[Ω]
1	1U - 1N	0,4109	12	1U - 1N	0,3564	23	1U - 1N	0,2876
	1V - 1N	0,411		1V - 1N	0,3566		1V - 1N	0,2878
	1W - 1N	0,4119		1W - 1N	0,3577		1W - 1N	0,2889
2	1U - 1N	0,4060	13	1U - 1N	0,3514	24	1U - 1N	0,2827
	1V - 1N	0,4060		1V - 1N	0,3517		1V - 1N	0,2829
	1W - 1N	0,4070		1W - 1N	0,3529		1W - 1N	0,2838
3	1U - 1N	0,4010	14	1U - 1N	0,3459	25	1U - 1N	0,2777
	1V - 1N	0,4011		1V - 1N	0,3457		1V - 1N	0,2779
	1W - 1N	0,4022		1W - 1N	0,3465		1W - 1N	0,2790
4	1U - 1N	0,3961	15	1U - 1N	0,3273	26	1U - 1N	0,2727
	1V - 1N	0,3962		1V - 1N	0,3273		1V - 1N	0,2729
	1W - 1N	0,3972		1W - 1N	0,3283		1W - 1N	0,2739
5	1U - 1N	0,3911	16	1U - 1N	0,3223	27	1U - 1N	0,2678
	1V - 1N	0,3913		1V - 1N	0,3223		1V - 1N	0,268
	1W - 1N	0,3923		1W - 1N	0,3233		1W - 1N	0,2691
6	1U - 1N	0,3861	17	1U - 1N	0,3174			
	1V - 1N	0,3863		1V - 1N	0,3174			
	1W - 1N	0,3874		1W - 1N	0,3184			
7	1U - 1N	0,3812	18	1U - 1N	0,3124	LV	2U - 2N	0,004512
	1V - 1N	0,3814		1V - 1N	0,3125		2V - 2N	0,004476
	1W - 1N	0,3825		1W - 1N	0,3135		2W - 2N	0,004427
8	1U - 1N	0,3762	19	1U - 1N	0,3075			
	1V - 1N	0,3764		1V - 1N	0,3076			
	1W - 1N	0,3775		1W - 1N	0,3086			
9	1U - 1N	0,3713	20	1U - 1N	0,3025	SW (otevřený)	3U1 - 3V1	0,006379
	1V - 1N	0,3715		1V - 1N	0,3026		3V1 - 3W1	0,006387
	1W - 1N	0,3727		1W - 1N	0,3036		3W1 - 3W2	0,006452
10	1U - 1N	0,3663	21	1U - 1N	0,2975	SW	3U1 - 3W2	0,01908
	1V - 1N	0,3665		1V - 1N	0,2977			
	1W - 1N	0,3676		1W - 1N	0,2987			
11	1U - 1N	0,3613	22	1U - 1N	0,2926			
	1V - 1N	0,3615		1V - 1N	0,2928			
	1W - 1N	0,3627		1W - 1N	0,2937			

- **Měření Nakrátko**

Měřicí přístroj: Yokogawa Power Analyzer WT 3000.

Tabulka 9 - Měření ztrát nakrátko pro 50MVA

Systém zapojení		1U-1V-1W (HV)			
Zapojení nakrátko		2U-2V-2W (LV)		pro 50 MVA Garantované hodnoty pro odbočku 11:	
				22,0% (+/-7,5%)	210,0 kW (+5%)
Odbočka	Proud [A]	Napětí [V]	z [Ω /Fáze]	u_K [%] 75°C	$P_K (I_N)$ 75°C
1	233 / 2092	29 633	73,4	24	183,724
11	262 / 2092	24 112	53,1	21,9	185,995
27	328/2092	17 145	30,2	19,5	196,04

Tabulka 10 - Měření ztrát nakrátko pro 67MVA

Systém zapojení		1U-1V-1W (HV)			
Zapojení nakrátko		2U-2V-2W (LV)		pro 67 MVA negarantované hodnoty	
Odbočka	Proud [A]	Napětí [V]	z [Ω /Fáze]	u_K [%] 75°C	$P_K (I_N)$ 75°C
1	313 / 2803	39 807	73,4	32,2	331,348
11	352 / 2803	32 399	53,1	29,5	337,47
27	440 / 2803	23 000	30,2	26,1	352,688

Tabulka 11 - Měření ztrát nakrátko pro 22,3 MVA

Systém zapojení		1U-1V-1W (HV)		negarantované hodnoty	
Zapojení nakrátko		3U2-3V2-3W2/3U1 (SW)		pro 22,3 MVA	
Odbočka	Proud [A]	Napětí [V]	z [Ω /Fáze]	u_K [%] 75°C	$P_K (I_N)$ 75°C
1	104,2 / 1 954	19 387	107,4	15,7	57,292
11	117,2 / 1 954	16261	80	14,8	57,929
27	146,4 / 1 954	12039	47,5	13,7	59,776

Tabulka 12 - Měření ztrát nakrátko pro 22,3 MVA

Systém zapojení		2U-2V-2W (LV)		negarantované hodnoty	
Zapojení nakrátko		3U2-3V2-3W2/3U1 (SW)		pro 22,3 MVA	
Odbočka	Proud [A]	Napětí [V]	z [Ω /Phase]	u_K [%] 75°C	$P_K (I_N)$ 75°C
---	933 / 1 954	446	0,28	3,24	49,428

- **Měření Naprázdno**

Měřicí přístroj: Yokogawa Power Analyzer WT 3000. Zapojení 2U-2V-2W.

Tabulka 13 - Měření ztrát a proudu naprázdno

Napětí [V]	[%]	I_{2U} [A]	I_{2V} [A]	I_{2W} [A]	I_0 [A]	I_0/I_N [%]	Po [kW]
12 420	90	2,415	1,697	2,008	2,040	0,035	20,101
13 800	100	3,053	2,094	2,278	2,475	0,042	25,595
15 180	110	4,664	3,312	3,472	3,816	0,065	33,017

- **Měření odporu vinutí naprázdno při nízkém napětí**

Volná samostatná doplňková zkouška, která může být součástí přílohy protokolu viz příloha A.

3.3 Izolační zkoušky

- **Kontrola izolačního odporu**

5 kVDC, odbočka 1. Měřicí přístroj: MEGGER Insulation Tester MIT 52/2.

Tabulka 14 - Izolační odpor vinutí

Vinutí	HV/(LV+SW+NÁD.)	LV/(HV+SW+NÁD.)	SW/(HV+LV+NÁD.)
Hodnota 15s [MOhm]	20 500	13 200	9 740
Hodnota 60s [MOhm]	32 000	25 500	22 100
Hodnota 600s [MOhm]	42 500	46 700	87 600
Polarizační index (R_{600} / R_{60})	1,33	1,83	3,96
Vinutí	HV / LV	HV / SW	LV / SW
Hodnota 15s [MOhm]	42 200	31 300	55 600
Hodnota 60s [MOhm]	48 800	40 300	76 600
Hodnota 600s [MOhm]	76 700	92 600	109 000
Polarizační index (R_{600} / R_{60})	1,57	2,3	1,42

2,5 kVDC, odbočka 1. Měřicí přístroj: MEGGER Insulation Tester MIT 52/2.

Tabulka 15 - Izolační odpor - jádro a rám

	JÁDRO / NÁDOBA	JÁDRO / RÁM	RÁM / NÁDOBA
Hodnota 15s [MOhm]	7 230	9 700	6 110
Hodnota 60s [MOhm]	15 500	26 800	13 000
Hodnota 900s [MOhm]	38 300	50 600	20 600

- **Kapacita a ztrátový činitel $\tan \delta$**

Měřicí příslušenství: C – TAN- BRIDGE typ MIDAS.

Tabulka 16 - Naměřené hodnoty kapacit a ztrátových činitelů

Zemnění	Napětí na	CH A	CH B	Kapacita [nF]	$\tan \delta$ [%] pro 20 °C
Nádobá	HV	SW	LV	$C_{HL} = 7,561$	0,26
Nádobá	HV	SW	LV	$C_{HSW} = 0,133$	0,40
Nádobá	HV	SW	LV	$C_{HG} = 4,191$	0,17
Nádobá	LV	SW	HV	$C_{LG} = 1,201$	0,43
Nádobá	SW	HV	LV	$C_{LSW} = 14,610$	0,30
Nádobá	SW	HV	LV	$C_{SWG} = 13,860$	0,28
Nádobá	HV+LV+SW	-	-	$C_{HG+LG+SWG} = 19,270$	0,26

Korelovat $\tan \delta$ nemá smysl, je ovlivněn vysokou mírou selhání.

3.4 Měření nulové složky impedancí

Měřicí přístroj: Yokogawa Power Analyzer WT 3000 24.

Tabulka 17 - Měření nulové složky impedancí

Vstup		HV (Odbočka 1)	HV (Odbočka 11)
Spojení		(1U + 1V + 1W) / 1N	(1U + 1V + 1W) / 1N
LV		nakrátko	nakrátko
Proud	[A / Fáze]	33,37	33,74
Napětí	[V]	2 268	1 663
Impedance Z_0	[Ω / Fáze]	67,95	49,3
Impedance z_0	[%] ONAN/ONAF	22,2 / 29,8	20,3 / 27,3
Vstup		HV (Odbočka 27)	
Spojení		(1U + 1V + 1W) / 1N	
LV		nakrátko	
Proud	[A / Fáze]	34,33	
Napětí	[V]	968,1	
Impedance Z_0	[Ω / Fáze]	28,20	
Impedance z_0	[%] ONAN/ONAF	18,2 / 24,4	

Tabulka 18 - Měření nulové složky impedancí HV

Vstup		HV (Odbočka 1)	HV (Odbočka 11)
Spojení		(1U + 1V + 1W) / 1N	(1U + 1V + 1W) / 1N
LV		otevřený	otevřený
Proud	[A / Fáze]	33,36	33,74
Napětí	[V]	3 257	2 454
Impedance Z₀	[Ω / Fáze]	97,64	72,88
Impedance z₀	[%] ONAN/ONAF	31,8 / 42,8	30,1 / 40,4
Vstup		HV (Odbočka 27)	
Spojení		(1U + 1V + 1W) / 1N	
LV		otevřený	
Proud	[A / Fáze]	33,53	
Napětí	[V]	1 459	
Impedance Z₀	[Ω / Fáze]	43,51	
Impedance z₀	[%] ONAN/ONAF	28,1 / 37,7	

Tabulka 19 - Měření nulové složky impedancí LV

Vstup		LV	LV
Spojení		(2U + 2V + 2W) / 2N	(2U + 2V + 2W) / 2N
LV		nakrátko (Odbočka 1)	nakrátko (Odbočka 11)
Proud	[A / Fáze]	338,9	344,4
Napětí	[V]	67,64	67,14
Impedance Z₀	[Ω / Fáze]	0,200	0,195
Impedance z₀	[%] ONAN/ONAF	5,24 / 7,02	5,12 / 6,86
Vstup		LV	LV
Spojení		(2U + 2V + 2W) / 2N	(2U + 2V + 2W) / 2N
vn(LV)		nakrátko (Odbočka 27)	nakrátko (Odbočka 11)
Proud	[A / Fáze]	338,1	346,4
Napětí	[V]	63,26	97,56
Impedance Z₀	[Ω / Fáze]	0,187	0,282
Impedance z₀	[%] ONAN/ONAF	4,91 / 6,58	7,40 / 9,91

3.5 Výpočet účinnosti

Určuje poměr výkonu a příkonu. Předpokládá se, že výkonový transformátor nebude během provozu plně zatížen. Z tohoto důvodu se navrhuje tak, aby neměli maximální účinnost při jmenovitém zatížení, ale při menším. Účinnost ovlivňuje i kmitočet, jelikož s rostoucím kmitočtem se ztráty zvyšují. [6], [11]

Pro zatížení jmenovitým výkonem a pro $\cos\varphi = 1$ platí [6].

$$\eta = \frac{P_N}{P_N + \Delta P_{fe} + \Delta P_K} \quad (18)$$

- **Výpočet účinnosti**

Po úpravě je výsledkem účinnost v procentech. Dosazují jmenovitý výkon 67 000kVA, ztráty nakrátko 337,47 kW, ztráty naprázdno 25,595 kW.

$$\eta = \frac{n \cdot S \cdot \cos\varphi}{(n \cdot S \cdot \cos\varphi) + (P_0 + n^2 \cdot P_K)} \cdot 100 \quad (19)$$

$$\eta = \frac{1 \cdot 67\,000 \cdot \cos 1}{(1 \cdot 67\,000 \cdot \cos 1) + (25,595 + 1^2 \cdot 337,47)} \cdot 100 = 99,46 \text{ [%]}$$

Tabulka 20 - Tabulka účinnosti pro odbočku 11, 67MVA

Faktor zatížení - n	cos φ	Účinnost [%]
0,25	1	99,72
0,50	1	99,67
0,75	1	99,57
1,00	1	99,46
1,25	1	99,34

Tabulka 21- Tabulka účinnosti pro odbočku 11, při 67MVA

Faktor zatížení - n	cos φ	Účinnost [%]
0,25	0,8	99,65
0,50	0,8	99,59
0,75	0,8	99,47
1,00	0,8	99,33
1,25	0,8	99,18

3.6 Výpočet regulace napětí

Regulace napětí je procentní podíl rozdílu mezi napětí naprázdno a při plném zatížení. V druhém případě dochází k poklesu napětí vlivem proudu v sekundárním vinutí [7]. Následuje výpočet pro jmenovitý výkon 67 000kVA a jmenovité napětí 13,8kV, ztráty nakrátko 337,47 kW, procentuální hodnotu napětí nakrátko 29,46 %, a napětí na sekundárních svorkách naprázdno 13,8kV.

$$u_r = \frac{P_K}{S} \cdot 100 = \frac{337,47}{67\,000} \cdot 100 = 0,5037 \text{ [%]} \quad (20)$$

$$u_s = \sqrt{(u_K^2 - u_r^2)} = \sqrt{29,46^2 - 0,5037^2} = 29,4557 \text{ [%]} \quad (21)$$

$$u_2 = u_{20} \cdot \left(1 - \frac{u_r}{100}\right) = 13\,800 \cdot \left(1 - \frac{0,5037}{100}\right) = 13\,730 \text{ [V]} \quad (22)$$

$$\eta = \frac{u_{20}}{u_2} \cdot 100 = \frac{13\,800}{13\,730} \cdot 100 = 99,50 \text{ [%]} \quad (23)$$

Tabulka 22 - Tabulka regulace napětí pro odbočku 11 a $\cos\varphi = 1$

Faktor zatížení - n	$\cos\varphi$	u_2 [V]	Účinnost [%]
0,25	1	13 796	99,97
0,50	1	13 783	99,87
0,75	1	13 761	99,72
1,00	1	13 730	99,5
1,25	1	13 700	99,27

Tabulka 23 - Tabulka regulace napětí pro odbočku 11 a $\cos\varphi = 0,8$

Faktor zatížení - n	$\cos\varphi$	u_2 [V]	Účinnost [%]
0,25	0,8	11 357	82,3
0,50	0,8	11 347	82,22
0,75	0,8	11 330	82,1
1,00	0,8	11 305	81,92
1,25	0,8	11 281	81,75

4 Ověření hodnot výpočty

Vypočtené hodnoty při ověřování se vztahují ke jmenovité hlavní odbočce 11.

- *Výpočet odporu vinutí*

Střední aritmetické hodnoty naměřených odporů jednotlivých vinutí z tabulky 8.

$$R_{HV} = \frac{0,7219 + 0,7233 + 0,7231}{3} = 0,7228 \text{ } [\Omega]$$

$$R_{LV} = \frac{0,008910 + 0,008878 + 0,008915}{3} = 0,008901 \text{ } [\Omega]$$

$$R_{SW} = \frac{0,004288 + 0,004321 + 0,004402}{3} = 0,004337 \text{ } [\Omega]$$

Činné ztráty v mědi pro HV/LV a nižší jmenovitý výkon 50MVA dle rovnice (11).

$$\begin{aligned} P_{CU} &= 1,5 \cdot (R_{HV} \cdot I_{NHV}^2 + R_{LV} \cdot I_{NLV}^2) \cdot 10^{-3} \\ &= ((0,7228 \cdot 262^2) + (0,008901 \cdot 2092^2)) \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} = 132,856 \text{ } [\text{kW}] \end{aligned}$$

- *Výpočet Impedance, napětí a ztrát nakrátko*

Fázová impedance pro HV / LV a jmenovité výkony 50MVA i 67MVA. Vycházím z rovnice (8) a tabulek 9, 10.

$$z = \frac{U_{1k}}{\sqrt{3} \cdot I_{1k}} = \frac{24\ 112}{\sqrt{3} \cdot 262} = 53,1 \text{ } [\Omega]$$

Napětí nakrátko pro 50 MVA dle rovnice (9) a tabulky 9.

$$u_{k\%} = \frac{U_{1k}}{U_{1N}} \cdot 100 = \frac{24\ 112}{110\ 000} \cdot 100 = \mathbf{21,9} \text{ } [\%]$$

Obdobně pro zatížení 67 MVA viz tabulka 10.

$$u_{k\%} = \frac{32\,399}{110\,000} \cdot 100 = \mathbf{29,5\%}$$

Výpočet ztrát nakrátko pro výkon 50 MVA. Jde o garantované hodnoty výrobcem.

$$P_K = \sum P \cdot \left(\frac{I_N}{I}\right)^2 = 183,575 \cdot \left(\frac{262,00}{276,23}\right)^2 = 165,146 \text{ [kW]} \quad (24)$$

$$P_Z = P_K - P_{CU} = 165,146 - 132,856 = 32,290 \text{ [kW]} \quad (25)$$

Po úpravě pro referenční teplotu vinutí 75 °C.

$$\begin{aligned} P_{K75} &= P_{CU} + P_{Z75} = P_{CU} \cdot \left(\frac{T + 75}{T + \theta}\right) + P_Z \cdot \left(\frac{T + \theta}{T + 75}\right) \\ &= 132,856 \cdot \left(\frac{235 + 75}{235 + 24}\right) + 32,290 \cdot \left(\frac{235 + 24}{235 + 75}\right) = \mathbf{185,995 \text{ [kW]}} \end{aligned}$$

- **Výpočet proudu a ztrát naprázdno**

Střední aritmetická hodnota proudu naprázdno z tabulky 13.

$$I_0 = \frac{I_U + I_V + I_W}{3} = \frac{3,053 + 2,094 + 2,278}{3} = 2,475 \text{ [A]}$$

Procentuální vyjádření proudu naprázdno ke jmenovitému proudu dle rovnice (15).

$$i_0\% = \frac{I_0}{n \cdot I_N} \cdot 100 = \frac{2,475}{3 \cdot 1954} \cdot 100 = 0,042 \text{ [%]}$$

Hodnoty naměřené pro každou fázi na dvou wattmetrech.

$$P_0 = \frac{P_U + P_V + P_W}{2} = \frac{21,955 + 13,181 + 16,053}{2} = 25,595 \text{ [kW]}$$

Podmínky umožňují měření při jmenovitých hodnotách frekvence i napětí, proto v následujícím výpočtu pouze ověřuji dle rovnice (14).

$$P_0 = 25,595 \cdot \frac{1}{0,5 + 1 \cdot 0,5} \cdot \frac{1}{0,5 \cdot \frac{60}{60} + 0,5 \cdot \left(\frac{60}{60}\right)^2} = P'_0 = \mathbf{25,595 \text{ [kW]}}$$

- **Nulová složka impedancí**

Pro spojení HV (1U+1V+1W) / 1N, LV nakrátko.

Jmenovitá impedance pro výkon 50 MVA dle rovnice (16).

$$Z_N = \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot I_N} = \frac{110\,000}{\sqrt{3} \cdot 262} = 242,4 \text{ [\Omega]}$$

Fázová nulová impedance dle rovnice (17) a hodnot z tabulky 17.

$$Z_0 = \frac{3U}{I} = \frac{1663}{33,74} = 49,3 \text{ [\Omega]}$$

Lze vyjádřit v procentuálním poměru ke jmenovité hodnotě.

$$z_0 = \frac{Z_0}{Z_N} \cdot 100 = \frac{49,3}{242,4} \cdot 100 = 20,3\% \quad (26)$$

Obdobně jmenovitá impedance pro výkon 67 MVA dle rovnice (16).

$$Z_N = \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot I_N} = \frac{110\,000}{\sqrt{3} \cdot 352} = 180,42 \text{ [\Omega]}$$

Fázová nulová impedance z tabulky 18 dle rovnice (24).

$$z_0 = \frac{Z_0}{Z_N} \cdot 100 = \frac{49,3}{180,4} \cdot 100 = 27,3\%$$

Závěr

V první části popisují klíčové prvky konstrukce nejběžnějšího typu blokového transformátoru. Tato zařízení mohou dosahovat obrovských rozměrů a výkonů. Vycházím z výsledků testování v dílně nejmenovaného výrobce vybavené kaskádním generátorem.

Zkoušený výkonový olejový transformátor je navržen na jmenovitou frekvenci 60 Hz pro zahraniční elektrárnu. Připojení ke generátoru se realizuje zapouzdřenými vodiči. Napájecí napětí 13,8kV se v provozu nemění. Konce primárního vinutí LV jsou připojeny k olejovým průchodkám plus jedna je pro uzemnění. Výstupní napětí se řídí přepínáním počtu závitů na sekundárním vinutí. To zajišťuje přepínač odboček Reinhausen (uvedený v kapitole 1.1.3). Menší proudy u vyšších napětí umožňují jemnější řízení, přičemž štítkové hodnoty udávané výrobcem jsou vztaženy ke jmenovitým 110kV tj. hlavní odbočku 11. Konce výstupního vinutí HV jsou připojeny ke třem kondenzátorovým průchodkám plus jedna je nulová. Střední bod je uzemněn přes impedanci uzemňovacími tlumivkami, kvůli omezení zkratových proudů. Terciární vinutí SW je zapojené do trojúhelníka. Při ověřování hodinového úhlu skupiny mezi vinutím HV a SW je výsledkem 1. Toto hodinové číslo se rovná posuvu 30°. U měření převodu napětí naprázdno ověřují pro HV / LV spojení YN yn0. Mezi HV / SW spojení YN d1. V druhém případě při nastavování na měřicím přístroji byla minimálně posunuta hodnota teoretického poměru, aby došlo k vyvážení procentuální chyby měřených od očekávaných do 0,5%.

Odpor na fázi vinutí HV je polovina naměřeného odporu mezi dvěma svorkami. U SW je odpor na fázi roven přibližně 67 % naměřenému odporu mezi dvěma svorkami viz tabulky 3 a 4. Při provozu transformátoru může dojít ke zkratu a zhoršení schopnosti odolávat namáhání. Výrobce udává napětí nakrátko 22%, což odpovídá výslednému $u_{k\%} = 21,9 \%$. Čím vyšší je procentuální napětí nakrátko, tím je lepší zkratová odolnost. Fázová impedance se rovná $53,1 \Omega$, jak pro výkon 50MVA, tak 67 MVA při zapnutém chlazení ventilátory. Ztráty nakrátko jsou vztaženy k menšímu jmenovitému výkonu. Skládají se ze ztrát v mědi a dodatečných ztrát. Pro HV / LV platí $P_{CU} = 132,856 \text{ kW}$, $P_Z = 32,290 \text{ kW}$. Po úpravě na referenční teplotu 75°C dostáváme v součtu $P_{K75} = 185,995 \text{ kW}$. Pro úspěšnou zkoušku je potřebné, aby hodnota nepřesahovala o více než 5 procent 210 kW, jež udává výrobce. Stejná tolerance platí i pro ztráty naprázdno, neboli ztráty v železném jádru. Ty se dále rozdělují na ztráty vířivými proudy a ztráty hysterezní.

Naměřené $P_0 = 25,595$ kW splňuje garantovaných 27 kW. Celkové ztráty jsou součet ztrát naprázdno a ztrát nakrátko, spotřeba výkonu pomocných přístrojů se nezahrnuje. Výsledky těchto měření se používají také k výpočtu regulace napětí a účinnosti transformátoru. Účinnost není menší než 99% viz kapitola 3.5. Výkonové transformátory se obvykle navrhují, aby maximální účinnosti bylo dosahováno při menší než jmenovitém zatížení. Tabulka se ztrátovým činitelem $\tan\delta$ se uvádí obecně pouze pro informaci.

Při nesouměrných provozních podmínkách a nekompenzované nulové složce mohou vznikat zvýšené přídavné ztráty ve vinutí způsobené abnormálním parazitním tokem. Chování při napojení právě na nesouměrný systém je hlavní rozdíl mezi konstrukcemi magnetických obvodů. Cena i ztráty transformátoru se třemi sloupky jsou menší oproti trojfázovým soupravám velkých jednofázových jednotek. Měřením nulové složky se zkouší, jestli zkratová odolnost terciárního vinutí je dostatečná pro maximální nulovou složku proudu při účinném uzemnění v každé z připojených soustav. Pokud není je omezena, jinak přípustná, velikost proudu jakéhokoli dlouhého trvání ve středním bodě. Proto z důvodů jako je souměrnost magnetizace jádra, zatěžovacích proudů a rozptylového toku v přenosových soustavách za normálních provozních podmínek souměrnost třífázového napětí udržuje a obecně nepůsobí žádné problémy.

Naměřené elektrické hodnoty vybraných funkčních zkoušek odpovídají platným normám. Transformátor byl podroben řadě dalších zkoušek, které zde neuvádím s ohledem na rozsah práce a obsáhlost problematiky i metodiky měření. Mezi ně patří především zkoušky atmosférickým a spínacím impulzním napětím, zkoušky oteplovací a dielektrické zkoušky, blíže specifikované v dalších částech ČSN EN 60076-1. Transformátory mají zásadní roli od počátku využívání střídavého proudu Nikolou Teslou. Tato oblast je v současnosti velmi detailně prozkoumána a popsána. Společnosti ABB a Siemens, z jejichž materiálů jsem také čerpal, patří ke špičce v oboru.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] ABB. *Návod pro výkonový transformátor* [online]. 2014. [cit. 2017-04-02]. 66 s. Dostupný z WWW: <http://vfservis.cz/files/000279_Navod_pro_vykonovy_transformator.pdf>.
- [2] ČSN EN 60076-8. *Výkonové transformátory - část 8: Pokyny pro použití*. Praha: Český normalizační institut, 2000. 67 s.
- [3] HARLOW, James H. *Electric Power Transformer Engineering*, 3rd edition. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis, 2012. 693 s. ISBN 978-1-4398-5629-1
- [4] PETROV, Georgij N. *Elektrické stroje 1.*, 1. vyd. Praha: Academia, 1980. 388 s.
- [5] ČSN EN 60076-1: *Výkonové transformátory - část 1: Obecně*. Praha: Český normalizační institut, 2012. 68 s.
- [6] MELICHAR, M. *Výkonová elektrotechnika*. Brno: Vojenská akademie, 2003. 285 s.
- [7] Electrical4U.com. *Electrical transformer* [online]. [cit. 2017-04-11]. Dostupné z WWW: <<https://www.electrical4u.com>>.
- [8] SIEMENS. *Nové EU-požadavky na transformátory* [online]. 2014. [cit. 2017-05-09]. 4 s. Dostupný z WWW: <http://m.energy.siemens.com/br/pool/hq/power-transmission/Transformers/inserts/insert_new-eu-requirements-for-transformers_ecodesign-directive_CZ.pdf>.
- [9] ČSN 35 1086: *Elektrické stroje netočivé. Metody elektromagnetických zkoušek a měření odporu vinutí stejnosměrným proudem*. Praha: Český normalizační institut, 1981. 32 s.
- [10] SIEMENS, *Final electrical testing of transformers and reactors*. Norimberg: Siemens AG-Energy Sector, 2011. 31 s.
- [11] KONÍČEK, V. *Elektrické stroje - Transformátory* [online]. [cit. 2017-05-02] 23 s. Dostupný z WWW: <<http://www.vosaspsekrizik.cz/cs/download/studium/vos/el-stroje-a-pristroje/transformatory.pdf>>.

Přílohy

Příloha A – Měření odporu vinutí naprázdno při nízkém napětí 400 V.

Měřicí přístroje: 2x DMM Gossen-Metrawatt METRAHIT 28S, 1x DMM Gossen-Metrawatt METRAHIT Tech

Tabulka 24 - Doplnková přijímací zkouška

Připojeno	HV	HV	HV	HV	HV	HV	LV	LV
odbočka	1	11	27	1	11	27	---	---
f (Hz)	60	60	60	60	60	60	60	60
U - V (V)	400			230			400	230
V - W (V)	400			230			400	230
W - U (V)	400			230			400	230
I_U (mA)	2,69	3,35	4,79	2,26	2,71	3,78	82,7	58,6
I_V (mA)	1,83	2,19	3,10	1,50	1,77	2,38	56,8	39,0
I_W (mA)	2,93	3,53	4,97	2,35	2,79	3,75	89,8	62,0

Příloha B – Zkoušený výkonový třífázový olejový transformátor



Obrázek 10 - Měřený transformátor

Příloha C – Ovládací skříň přepínače odboček OLTC



Obrázek 11 - Ovládací skříň OLTC

Příloha D – Kontrolní skříň transformátoru



Obrázek 12 - Ovládací skříň transformátoru