České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektroenergetiky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Lucie Šindelářová**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Aplikovaná elektrotechnika

Název tématu: **Problematika návrhu olejového distribučního transformátoru**

Pokyny pro vypracování:

1) Seznamte se s požadavky na distribuční transformátory určené pro provoz v ČR.
2) Proveďte návrh aktivní části distribučního transformátoru 100kVA, 22/0.4kV.
3) Proveďte podrobnější rešerži a analýzu vybraného aspektu návrhu transformátoru.

Seznam odborné literatury:

[1] J. Hampl, K. Nosek : Stavba transformátorů, Vydavatelství ČVUT
[2] M. J. Heathcote : The J & P Transformer Book,Reed Educational and Professional Publishing Ltd 1998
[3] F. Pešák : Výpočty transformátorů, SNTL 1955

Vedoucí: Ing. Ladislav Musil, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016

L.S.

Ing. Jan Švec Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 1. 4. 2015

České vysoké učení technické v Praze – Fakulta elektrotechnická

Katedra elektroenergetiky

Bakalářská práce

Problematika návrhu olejového distribučního transformátoru

Lucie Šindelářová
V Praze, 21 května 2015

České vysoké učení technické v Praze – Fakulta elektrotechnická

Prohlášení

"Prohlašuji, že jsem předloženou bakalářskou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etickým principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací."

V Praze, 21. května 2015

Lucie Šindelářová

České vysoké učení technické v Praze – Fakulta elektrotechnická

Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat svému vedoucímu práce Ing. Ladislavu Musilovi, Ph. D. za pomoc s bakalářskou prací.

Obsah

Obsah....4
Anotace....5
Transformátory....7
Princip činnosti....7
Aktivní části....8
Jádro....8
Vinutí....9
Pasivní část....10
Chladící systém....10
Požadavky na distribuční transformátory....11
Jmenovitý výkon....11
Izolační hladiny....11
Jmenovitá napětí....12
Odbočky....12
Zapojení a hodinový úhel....12
Dimenzování a zapojení nulového bodu....13
Impedance nakrátko....13
Ztráty naprázdno a ztráty při zatížení....13
Zkoušky....14
Vzdálenosti mezi průchodkami....14
Účinnost a napěťový pokles....15
Úbytek napětí....15
Výpočet aktivní části....16
Magnetický obvod....17
Elektrický obvod....18
Rozměry transformátoru....19
Ověření hodnot....20
Srovnání transformátoru s Cu a Al vinutím....23
Závěr....26
Literatura....27
Seznam příloh....28

Anotace

Cílem této práce je poukázat na problematiku návrhu olejového distribučního transformátoru. Teoretická část popisuje základní principy transformátoru, jeho části a požadavky dané technickými normami. Druhá část práce se zabývá návrhem aktivní části transformátoru. Výpočet se provede pro transformátor s měděným vinutím a hliníkovím vinutím. Bude zhodnoceno splnění norem a výhody použití vinutí z hliníku.

The purpose of this paper is to highlight the issue of the draft oil distribution transformer. The theoretical part describes the basic principles of the transformer, its parts or the requirements of the technical standards. The second part deals with the design of the active part of the transformer. The calculation is performed for a transformer with copper winding and aluminium winding. It will be evaluated to meet standards and the benefits of using aluminum windings.

Úvod

Práce je rozdělena na čtyři teoretické kapitoly a dvě praktické. První část vysvětluje, na jakém principu transformátor pracuje a jaké platí základní fyzikální vztahy pro ideální transformátor. Další kapitoly popisují aktivní a pasivní části transformátoru.

Praktická část se zabývá problematikou návrhu aktivní části distribučního transformátoru. Vychází ze starého výpočtu, který se dnes už nepoužívá. Pro vypočítaný průřez spočítáme i ostatní hodnoty a zjistíme, jestli by byl tento transformátor vhodný pro použití.

V další části provedeme stejný výpočet pro transformátor s měděným a hliníkovým vinutím. Vybereme vhodný průřez a na základě výpočtu zhotovíme výkres s rozměry magnetického obvodu a průřez jader. Zhodnotíme použitelnost transformátorů a najdeme rozdíly.

Transformátory

Transformátor je elektrický netočivý stroj, který mění elektrickou energii na elektrickou energii jiných parametrů. Nejjednodušší (jednofázový) transformátor se skládá z magnetického obvodu a dvou okruhů vinutí – primární a sekundární, které jsou od sebe elektricky oddělené. Frekvence v jednotlivých fázích je stejná, jen hodnoty napětí a proudu na vstupu se liší od hodnot na výstupu. Stejný princip platí i u třífázových transformátorů, které se využívají při přenosu a distribuci energie na delší vzdálenosti. Napětí se transformuje na vyšší hodnotu, aby se snížily ztráty ve vedení, a poté se zase sníží na hodnotu, jakou požaduje odběratel.

Princip činnosti

Transformátor je založen na principu elektromagnetické indukce. Při průchodu střídavého proudu v primárním obvodu vzniká magnetické pole, které se šíří magnetickým obvodem transformátoru a v sekundárním obvodu se indukuje napětí. Tomuto jevu se říká Faradayův indukční zákon. (2. Maxwellova rovnice)

$$u_i = -\frac{d\Psi}{dt} = -N\frac{d\Phi}{dt}$$

kde u_i – indukované napětí (V), Ψ – magnetický spřažený tok(Wb), Φ – magnetický tok (Wb) , N – počet závitů (-), t – čas(s).

Aktivní části

Transformátor dělíme na dva "celky" – aktivní a pasivní. Aktivní části se podílejí na šíření elektromagnetické energie. Jde tedy o feromagnetické jádro a vinutí transformátoru. Pasivní část má na starosti odvod vzniklého tepla (ztráty), mluvíme o chladícím systému.

Jádro

Základní požadavky na konstrukci jádra jsou následující: potřebujeme co nejvíce snížit ztráty vířivými proudy a ztráty způsobené hysterezí. Jádro transformátorů není tvořeno jedním masivním kusem kovu, na které je upevněno vinutí, nýbrž několika vzájemně izolovanými plechy z křemičité oceli. Obsah křemíku bývá kolem 3,5 %. Přidaný křemík způsobí, že se zvýší rezistivita, ale ztráty vířivými proudy se zmenší. S rostoucím obsahem křemíku se zvýší pevnost materiálu, ale také jeho křehkost. Takové plechy už nejsou vhodné pro transormátory.

Plechy jádra transormátorů se nejčastěji používají za studena válcované. Mohou být použity i válcované za tepla, které jsou sice levnější, ale při stejných vlastnostech by byly větších rozměrů. Plechy se poté žíhají, což způsobí, že magnetické domény se zorientují a při průchodu magnetického pole kladou nejmenší odpor a hysterezní ztráty jsou co minimální. Tloušťka takových plechů bývá v rozmezí 0,23 mm – 0,35 mm.

Plechy je nutné nastříhat a spojit dohromady. Nejjednodušší způsob je skládání natupo, kdy se plechy stříhají pouze ve dvou rozměrech – jádra a spojky. Stejné tvary se poskládají na sebe a vše se jednoduše spojí dohromady. Výhodou je snadná montáž a demontáž transformátoru, ale takový způsob skládání si nemůžeme dovolit, kvůli velkým magnetickým ztrátám vzniklým v místě spoje. Proto se upřednostňuje druhý způsob tzv. skládání přeplátováním. Plechy nastříháme pod úhlem 90° a jednotlivé obdélníky se poskládají tak, aby neexistoval spoj a jednotlivé vrstvy se překrývali. Pro zlepšení vlastností plechy stříháme pod úhlem 45°, což umožňuje lepší průchod magnetického pole. Třetí způsob je střih E I plechů, který je typický pro menší transformátory.

V dnešní době se používá metoda Step-lap, která plyne z metody přeplátování. Plechy jsou stříhány pod úhlem 45° a po skupinách, nebo jednotlivě jsou skládány na sebe s přesahem, aby při spojení do sebe lépe zapadly. Takový způsob umožňuje minimální magnetické ztráty při průchodu toku a zmenšení hluku transformátoru.

Vinutí

Vinutí dělíme na primární a sekundární, přičemž je zvykem jako primární vinutí označovat vysokonapěťové a jako sekundární nízkonapěťové.

Mezi nejpoužívanější materiál patří měď díky své dobré tepelné a elektrické vodivosti. V posledních letech je trendem navracet se k používání hliníku. Průřez vodiče není pokaždé kruhový, ale může být i obdélníkový, nebo dokonce se používají tenké fólie.

Cívky s vinutím jsou na jádro usazeny třemi způsoby. Prvním je jednoduché usazení, kdy se nejprve navlékne cívka nn a poté vn. Toto pořadí upřednostňujeme kvůli lepšímu odizolování a kvůli zmenšení pravděpodobnosti přeskoku zkratu na uzeměné jádro z cívky vysokého napětí. Nebo můžeme cívky umístit v pořadí nn, vn a nn a pro lepší vlastnosti můžeme jednotlivé vrstvy oddělit pomocí izolačního válce. A poslední možnost je prostřídat jednotlivé cíky nn a vn, ale tato metoda se používá pro větší transformátory.

Pasivní část

Ztráty v transformátoru jsou hysterezní, ztráty vířivými proudy a Jouleovy ztráty vzniklé ve vinutí při průchodu proudu. Všechny tyto ztráty ohřívají stroj a je nutno toto teplo odvádět pryč. K tomu slouží chladící systém.

Chladící systém

Chlazení obstarávájí chladící kanálky, což jsou mezery mezi vodiči transformátoru, kterými koluje vzduch, nebo olej. Vzhledem k tomu, že teplo vzniklé při provozu je velké, musíme ho umět odvádět daleko efektivnějším způsobem. Proto se celý transformátor umisťuje do nádoby, která je chlazena olejem. Nádoba může mít různé tvary. Například boční stěny z ohýbaného ocelového plechu do tzv. vln. Oproti rovné stěně má tvar vlny vetší povrch, což umožňuje lepší odvod tepla a je schopen vyrovnat objemové změny oleje. Další možností je použití trubek, žeber, radiátorů a ke každé variantě můžeme přidat čerpadlo, nebo ventilátor a zajistit tak nucený oběh chladícího média, pro lepší odvod tepla. Celá nádoba musí být hermeticky uzavřena, protože už při nízkém obsahu vody prudce klesá elektrická pevnost[1] minerálního oleje. Transformátory, které nejsou hermeticky uzavřené, se doplňují konzervátorem – nádoba přidělaná na víko, kam uniká chladící kapalina. Musí být ale zajištěno, že kapalina v konzervátoru nepřijde do kontaktu s vlhkým vzduchem. Proto jsou instalované vysoušeče vzduchu.

1 Elektrická pevnost E_{p-} je vlastnost izolantů
je definována jako podíl průrazného napětí U_p ku tloušťce izolantu d
U_p je hodnota napětí, při kterém dojde k průrazu, nebo přeskoku

Požadavky na distribuční transformátory

Požadavky na distribuční transformátory určují české technické normy. Samozřejmě i evropské, které jsme přijali. Jejich cílem je především zvýšit bezpečnost, spolehlivost, kvalitu, ochranu životního prostředí a ochranu spotřebitelů.

Základní norma pro distribuční transformátory je ČSN EN 504 64 – Trojfázové olejové distribuční transformátory 50 Hz od 50 kVA do 2500 kVA s nejvyšším napětím pro zařízení nepřevyšující 36 kV. Jde o transformátory použité v distribuční síti pro nepřetržitý provoz ve vnitřním i venkovním prostředí v nádobě ponořené do minerálního oleje s přirozeným chlazením.

Jmenovitý výkon

Tato norma stanovuje jmenovitý výkon:

50 kVA, 100 kVA, 160 kVA, 250 kVA, 315 kVA, 400 kVA, 500 kVA, 630 kVA, 800 kVA, 1000 kVA, 1250 kVA, 1600 kVA, 2000 kVA, 2500kVA

Podtržené hodnoty jsou preferenční.

Izolační hladiny

Izolační hladina je maximální hodnota napětí, které smí vodičem protékat.

hodnoty pro vn vinutí

3,6 kV – 7,2 kV – 12 kV – 17,5 kV – 24 kV – 36 kV

hodnoty pro nn vinutí

1,1 kV

Jmenovitá napětí

Jmenovité napětí je efektivní hodnota napětí, kterou bychom při provozu měli změřit na vinutí. Tuto hodnotu budeme dále používat při výpočtech.

hodnoty pro vn vinutí

nad 1,1 kV do 36 kV včetně

hodnoty pro nn vinutí

400 V – 410 V – 415 V – 420 V – 433 V

Odbočky

Občas může zákazník požadovat, aby na straně vn byla jedna, nebo několik odboček. Odbočky by měly být v rozsahu ± 2,5 %, nebo 2 x ± 2,5 % z počtu závitů. Maximální počet odboček by neměl být větší než 7.

Každý takový transformátor má být opatřený přepínačem odboček a přepínání se uskutečňuje ve vypnutém stavu.

Zapojení a hodinový úhel

Zapojení volíme trojúhelník, nebo hvězdu. Na straně nižšího napětí musí být hvězda, jinak by nebylo možné připojit nulový vodič do soustavy a tudíž by nebyla zaručena bezpečnost provozování soustavy.

Hodinový úhel je posun mezi fází na vn vinutí a příslušnou fází na nn vinutí. Zapojení i úhel stanovuje zákazník.

Jmenovitý výkon [kV]	50 a 100	≥ 160
$U_n \leq 24$ kV	Yzn nebo Dyn	Dyn
$U_n = 36$ kV	Yzn nebo Dyn	Dyn

Tab. 1 – zapojení vinutí v závislosti na jmenovitém výkonu [2]

Dimenzování a zapojení nulového bodu

Jak už bylo řečeno, strana nižšího napětí musí být zapojena do hvězdy, kvůli vyvedení nulového bodu, který se uplatňuje při zemním spojení. Je tedy pochopitelné, že jej musíme dimenzovat na jmenovitý proud i proud vzniklý při zemním spojení.

Impedance nakrátko

Impedance nakrátko se měří při referenční teplotě 75 °C. Jedno vinutí je napájeno a druhé zkratováno. Z náhradního schématu transformátoru vyplývá, že se uplatní podélné parametry náležící k napájenému vinutí.

$$Zk = \sqrt{Rk^2 + Xk^2}$$

$$Zk = Rk + jXk$$

Z_k – impedance nakrátko (Ω), R_k – odpor vinutí (Ω), X_k – reaktance (Ω)

Často se udává jako poměrná impedance nakrátko.

$$zk = \frac{Zk}{Zn} * 100$$

zk – poměrná imedance nakrátko (%), Zn – jmenovitá impedance (Ω)

Impenance se tedy uvádá poměrná a závisí na jmenovitém výkonu a jmenovitém napětí, které se rozlišuje pouze do hodnoty 24 kV včetně a pro hodnotu 36 kV. V tabulce vybereme vhodnou kombinaci výkonu a napětí a dostaneme jednu ze tří variant impedancí – 4 % – 4,5 % – 6 % .

Ztráty naprázdno a ztráty při zatížení

Norma rozlišuje transformátory podle hladin hluků. Pro vyšší hladinu hluku jsou povoleny vyšší ztráty naprázdno ΔP_0 i ztráty při zatížení ΔP_k. Hodnoty pro jmenovitý výkon 100 kVA jsou v následující tabulce:

ΔP_0	320 W – 260 W – 210 W – 180 W – 145 W
ΔP_k	2150 W – 1750 W – 1475 W – 1250 W

Tab. 2 – hodnoty ztrát naprázdno a při zatížení pro různé hladiny hluku

Zkoušky

Zaždý transformátor je nutno otestovat dříve, než se uvede do provozu. Výrobní kusové zkoušky jsou povinné, ale další si může zákazník vyžádat. To musí být odzkoušeno ve zkušebně a poté zaneseno do dokumentace. Distribuční transformátory se zkouší stejně jako výkonové transformátory a sice podle normy ČSN EN 60076.

Zkoušky dělíme na:

Výrobní kusové zkoušky

- přiloženým napětím
- indukovaným napětím
- měření odporu vinutí
- měření převodu a určení skupiny zapojení
- měření napětí nakrátko a ztrát nakrátko
- měření proudu naprázdno a ztrát naprázdno

Typové zkoušky

- oteplovací zkouška
- rázová zkouška atmosférickým impulzem

Zvláštní zkouška

- ztrátová odolnost
- měření hluku
- měření částečných výbojů

Vzdálenosti mezi průchodkami

Na straně vyššího napětí pro jmenovité napětí do 24 kV včetně a pro atmosférický impulz 125 kV je nutná minimální vzdálenost mezi živými částmi 210 mm a mezi vrcholy stříšek průchodek 120 mm. Pro napětí 36 kV a pro atmosférický impulz 170 kV je minimální vzdálenost mezi živými částmi 280 mm a mezi vrcholy stříšek 180 mm.

Pro stranu nižšího napětí rozlišujeme vzdálenosti středů průchodek podle proudů. Proudy do 250 A – 70 mm, 250 – 2000 A – 150 mm, nad 2000 A – 165 mm.

Účinnost a napěťový pokles

Účinnost η je v každém okamžiku dána poměrem výstupního výkonu P_2 ku vstupnímu výkonu P_1.

$$\eta = \frac{P1}{P2}$$

Z důvodu obtížného určení účinnosti přímým měřením může být účinnost stanovena pomocí zaručovaných, nebo změřených ztrát.

$$\eta = 100 * (1 - \frac{\alpha^2 * P_z + P_0}{\alpha * P + \alpha^2 * P_z + P_0})$$

P_z – ztráty při zatížení (W)

P_0 – ztráty naprázdno (W)

P – jmenovitý výkon (W)

α – činitel doby zatížení (-)

Vzorec platí pro vybrané hodnoty při jmenovitém proudu, napětí, kmitočtu a referenční teplotě.

Úbytek napětí

Platí při jakémkoliv zatížení. Δ φ

$$\Delta u = \alpha * (P * \cos(\varphi) + Q * \sin(\varphi)) + (1/200) * \alpha * (Q * \cos(\varphi) - P * \sin(\varphi))$$

Δu – úbytek napětí (%)

α – činitel doby zatížení I2/I2n (-)

P – ztráty při zatížení (%)

Q- jalový výkon (%)

φ – fázový úhel mezi sekundárním napětím a proudem

Hodnoty zadávané v procentech se vztahují ke jmenovitým hodnotám.

Výpočet aktivní části

Parametry transformátoru závísí na mnoha aspektech. Například na jeho použití, jde-li třeba o autotransformátor, svářecí transformátor, napájecí, kompenzační apod. A nebo na jeho umístění – transformátory používané pod vodou, nebo ve vyšších atmosférických polohách se konstruují trochu jinak.

Takovéto specifické požadavky by měl zákazník hned na začátku sdělit. Další parametry se odvíjejí od technických norem. Zejmén maximální a minimální hodnoty veličin, ale také třeba zapojení. Zákazník může požadovat některé hodnoty nižší, než vyžaduje norma, ne však naopak. Další parametry jsou odvozené z výpočtů, ale i výsledné hodnoty jsou omezeny normou. Většinou se zaokrouhlují na hodnotu nejbližší.

Zadané hodnoty:

S = 100 kVA
U_1 = 22 kV
U_2 = 0,4 kV
f = 50 Hz
Yzn1[2]

S – zdánlivý výkon (výkon všech fází)
U_1 – sdružené napětí na primární straně
U_2 – sdružené napětí na sekundární straně
f – frekvence

Hodnoty dané normami:

ΔP_0 – ztráty naprázdno (v železe)
Δp_k – ztráty nakrátko (v mědi)
u_k – napětí nakrátko
i_0 – proud naprázdno

2 Yzn1 – zapojení lomená hvězda se běžně používá pro 400V do výkonu 250 kVA výhodné po nesymetrická zatížení [1]

Magnetický obvod

Nejprve se budeme zabývat magnetickým obvodem. Jeden z nejdůležitějších parametrů je aktivní průřez jádra transformátoru. Skutečný průřez (geometrický) zjistíme pomocí činitele plnění plechů *kz*, který použijeme z katalogového listu firmy ArcelorMittal viz příloha [1]. Tento parametr nám udává poměr mezi průřezem jádra s izolací a průřezem samotného železa. Je důležité vědět, jakou část jádra skutečně využíváme.

$$S_j = 5 * c * \sqrt{\frac{S * \frac{\Delta P_0}{\Delta P_k} * \rho}{z_{15} * B * 10^4 * f}} * 10^8$$

Sj – aktivní průřez [cm^2]

c – je konstanta pro 3f olejové transformátory – 0,37[3]

ρ – proudová hustota – 3,2 A/cm^2

z_{15} – ztrátové číslo – 0,73 W/kg

B – magnetická indukce [gauss]

f – frekvence [Hz]

Teď tedy geometrický průřez.

$$S_g = \frac{Sj}{k_z}$$

kz – činitel plnění plechů – 0,945

Geometrický průřez přepočteme na geometrický průměr, abychom tušili, kolik stupňů jádra volit. Podle nepřesného geometrického průřezu a tabulky T 10-2 [1] dostaneme počet stupňů a podle T 10-1 [1] dostaneme činitel využití jádra k_0 a faktor plnění jádra k_p. Pro náš průměr jsme překročili hranici čtyř stupňů a volíme tedy pět stupňů. Pro nás platí k_p = 0,98 a k_0 = 1,12.

3 konstanta C [1] – pro 1f trf – 0,5 pro kulaté cívky; 0,65 pro obdélníkové cívky
– pro 3f trf jádrové – 0,37 pro kulaté cívky; 0,47 pro obdélníkové cívky
– pro 1f trf plášťové – 0,9
– pro 3f trf plášťové – 0,6

Dj [cm]	≤ 10	10-25	25-40	40
počet stupňů	do 4	5-6	7-8	8-10

Tab. 3 – počet stupňů jádra v závislosti na průměru kružnice opsané [1]

Podle těchto hodnot určíme přesný průměr kružnice.

$$D_j = k_0 * \sqrt{S_g}$$

D_j – průměr kružnice opsané

k_0 – činitel využití jádra

S_g – geometrický průřez jádra

Elektrický obvod

Nejprve spočítáme hodnoty primárního vinutí a poté sekundárního. Na začátku si musíme přepočítat zadané sdružené napětí na fázové napětí U_f.

$$U_{1f} = \frac{U_1}{\sqrt{3}}$$

Z tohoto napětí spočítáme proud primárním vinutím I_1. Vycházíme z výkonu, ale jeikož je zadaný výkon součtem výkonů ve všech fázích, musíme ještě vydělit třemi.

$$I_1 = \frac{S}{3 * U_{1f}}$$

Nyní známe proud primárním vinutím a víme, že vinutí bude měděné. Známe.li proudovou hustotu mědi, umíme spočítat průřez vodiče $s1$. Proudovou hustotu mědi ρ volíme 3,2 A/mm^2.

$$s_1 = \frac{I_1}{\rho}$$

Z průřezu je nutné spočítat průměr vodiče a tuto hodnotu porovnat s normovanými průměry a sice podle normy ČSN EN 603 17-0-1 – pro lakované měděné vodiče kruhového průřezu.[4]

Dále potřebujeme spočítat magnetický tok ϕ v jádře a počet závitů primárního

4 Tuto normu nelze použít pro jiný než kruhový průřez. Přípustná je minimální deformace, kde stanovený rozdíl mezi největším a nejmenším průměrem je v řádu jednotek tisícin mm.

vinutí N_1.

$$\phi = B * S_j$$

$$N_1 = \frac{U_{1f} * 10^8}{4{,}44 * \phi * f}$$

Hodnoty pro sekundární vinutí spočítáme podle stejných vzorců, které jsme použili pro primární vinutí. Počet závitů N_2 spočítáme pomocí převodu transformátoru.

$$N_2 = \frac{N_1 * U2}{U1}$$

Nesmíme zapomenout, že sekundární strana je zapojená do lomené hvězdy. To znamená, že potřebujeme více závitů, aby se indukovalo požadované napětí. Také bude vinutím protékat větší proud, proto musíme zvolit správný průřez vodiče.

Rozměry transformátoru

Z našeho výpočtu zatím vyplynulo, jaký rozměr budou mít jádra transformátoru. Dalším parametrem bude jejich výška *h [cm]*, kterou určíme přibližně z následujícího vzorce.

$$h = 0{,}45 * \frac{S * 10^{11}}{3 * B * A * f * S_j}$$

A – proudové zatížení olejových transformátorů – 400 A/cm2 ; Obr. 18-3 [1]

Dále nesmíme zapomenout na izolační vzdálenosti. Vycházíme z hodnot podle zkušeností ČKD [1]. Pro hladinu napětí 22 kV je minimální vzdálenost mezi cívkou nn a jádrem transformátoru 21 mm, mezi cívkami nn a vn 18 mm, mezi sousedícími cívkami vn a vn 22 mm a vzdálenost mezi cívkami a spojkami 45 mm.

Známe-li tedy výšku transformátoru, odečteme od ní dva krát izolační vzdálenost od spojky a zbyde nám prostor pro umístění cívek. Je na nás rozhodnout, jaký budeme volit počet cívek. Bývá zvykem volit sudý. Také musíme vzít v úvahu, kolik vrstev bude cívka mít. Nesmíme volit příliš, protože by se zvětšil průměr cívky, celý rozměr transformátoru a ve výsledku by to ovlivnilo reaktanci, tudíž impedanci cívky. Při počítání s rozměry vodičů nesmíme zapomenout na izolaci a maximální toleranci průměru. Na straně primárního vinutí budeme používat lakovaný měděný drát

podle normy ČSN EN 603-17-0-1 (Al ČSN EN 1301-2), na straně sekundárního vinutí použijeme pásovou měď podle normy ČSN EN13599 (Al ČSN EN 1758) pro měď a její slitiny – desky, pásy a plechy pro použití v elektrotechnice.

Zvolíme vhodný počet odboček transformátoru, minimálně dvě pro hodnoty tolerance napětí. Pro 22 kV je tolerance napětí ± 5 %. Regulace se provádí pouze na straně vyššího napětí.

Ověření hodnot

Vypočtené hodnoty nám bohužel nezaručí, že návrh bude vyhovovat. Je nutné jej ověřit. Nejprve spočítáme, kolik železa jsme použili na magnetický obvod. Známe-li rozměry jader a spojek a víme-li, že jsou kruhového průřezu, stačí vypočítat jejich objem a vynásobit husotou železa (ρ = 7900 Kg/m^3). Spočítáme si měrný magnetizační příkon Q_{pom} podle vzorce [1].

$$Q_{pom} = 0{,}42 * f * B * az * 10^{(-5)}$$

A z toho měrný magnetizační příkon [W].

$$Q = Q_{pom} * m_{Fe}$$

m_{Fe} – hmotnost železa [kg]

Z toho spočítáme magnetizační prou.

$$I_m = \frac{Q}{3 * U_{1f}}$$

Dále jsme schopni určit ztráty naprázdno ΔP_z. Uvažujeme-li se součinitelem zvýšení ztrát zpracováním k_{zpr} = 1,15.

$$\Delta P_z = k_{zpr} * z_{15} * \left(\frac{B}{10^4}\right)^2 * m_{Fe}$$

Odpory vinutí určíme pomocí délky středního průměru závitu, tuto hodnotu vynásobíme π a dostaneme střední délku závitu. Tuto hodnotu vynásobíme počtem závitů a dostaneme celkovou délku primárního vinutí. Známe-li délku l i průřez s a rezistivitu mědi (ρ_{Cu} = 0,017*10^{-6}μΩm), spočítáme odpor vinutí.

$$R = \rho Cu * \left(\frac{l}{s}\right)$$

Odpor primárního a sekundárního vinutí ještě vynásobíme součinitelem zvýšení

odporu střídavým proudem a tento celkový odpor musíme převést na primární stranu pro lomenou hvězdu.

$$R_{celk} = R_1 + R_2 * (\frac{4}{3}) * (\frac{N_1}{N_2})^2$$

Abychom mohli spočítat reaktanci X, musíme sečíst dohromady střední průměry primárního i sekundárního vinutí. Tuto hodnotu vynásobit π a dostaneme střední obvod o_s. Dále potřebujeme znát výšku vinutí h_v, kterou jsme si spočítali, a šířku primárního Δ_1 i sekundárního Δ_2 vinutí a šířku mezery mezi nimi Δ.

$$X = (\frac{8 * N_1^2 * f}{h_v}) * (\frac{\Delta_1 + \Delta_2}{3} + \Delta) * o_s * 10^{-8}$$

Impedance nakrátko:

$$Z_k = \sqrt{R_{celk}^2 + X^2}$$

Z toho poměrné napětí nakrátko:

$$u_k = \frac{Z_k * I1_f}{U1_f} * 100$$

Jěště zbývá spočítat ztráty v mědi ΔP_m a účinnost μ transformátoru. Ztráty v mědi určíme ze vzorce:

$$\Delta P_m = 3 * R * I^2$$

Do vzorce dosadíme nejprve hodnoty pro primární vinutí a poté pro sekundární vinutí a tyto dvě hodnoty sečteme. Účinnost transformátoru bude tedy:

$$\mu = \frac{S}{\Delta P_z + \Delta P_m}$$

Výsledek výpočtu

Pro konkrétní transformátor 100 kVA, 22/0,4 kV vychází následující hodnoty:

S_j [cm^2]	110,2
D_j [cm]	12,9
N_1	3998
N_2	74
u_k [%]	5,7
ΔP_z [W]	396,5
ΔP_{Cu} [W]	1851,4
μ [%]	97,8

Tab. 4 – tabulka výsledků transformátoru

Podle našeho výpočtu by se transformátor nekonstruoval. Má nízkou účinnost, vysoké ztráty v železe i ve vinutí. Napětí nakrátko vyšlo dobře, ale podle starých norem by bylo ještě příliš vysoké. Je nutné změnit průřez transformátoru.

Evropská unie vydala nařízení, které snižuje ztráty distribučních a výkonových transformátorů. Platnost je od 1. 7. 2015. viz příloha [5]. Distribuční transformátory jsou ve dnou kategoriích – podle hluku. Maximální ztráty nakrátko budou 1750 W, 2050 W a maximální ztráty naprázdno budou 145 W a 280 W. Další omezení je v plánu od 1. 7. 2021.

Srovnání transformátoru s Cu a Al vinutím

Vycházíme z předchozího výpočtu. Pro hodnoty výkonů a napětí na primární a sekundární straně nejprve spočítáme aktivní průřez jádra a z toho vyplynou další hodnoty transformátoru. Pro orientaci si spočítáme pro několik hodnot průřezů i ostatní veličiny. Tabulka naměřených hodnot viz příloha [2]. Ten samý výpočet provedeme i pro hliníkové vinutí. Nesmíme zapomenout změnit hodnotu rezistivity a hustoty.

Hodnoty uvedené v tabulce jsou pouze přibližné. S jednotlivými průřezy se mění veškeré parametry a výpočet jednoho konkrétního transformátoru by nám zabral příliš času. Klíčové jsou i rozměry transformátoru, proto ve výpočtušířky transformátoru a jednotlivých cívek používáme průměrné hodnoty.

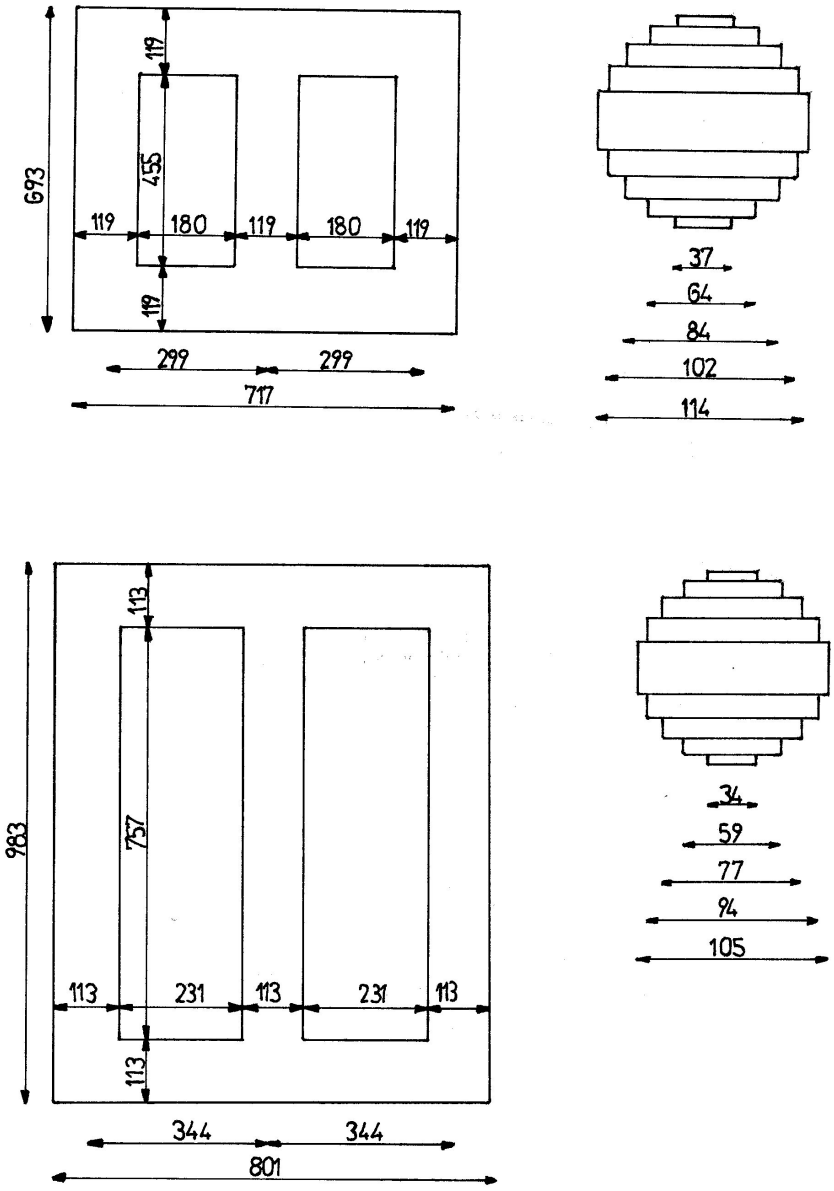
Průřez transformátoru s měděným vinutím snížíme kvůli velkému magnetizačnímu proudu a velkým ztrátám naprázdno. Průřez transformátoru s hliníkovým vinutím naopak zvýšíme z důvodů velké reaktance a velkých ztrát ve vinutí. Zvýší se nám sice ztráty naprázdno, ale zanedbatelně.

Vybereme z tabulky konkrétní průřez jádra a provedeme přesný výpočet. Zajímají nás rozměry odstupňovaného jádra, přesný počet závitů cívky, její rozměr, použité vodiče a rozměr magnetického obvodu transformátoru. Při prvním výpočtu nám vyšel aktivní průřez jádra 110,2 cm^2 pro měděné vinutí a pro hliníkové vinutí 77,9 cm^2.

Spočítané hodnoty:

	Cu	Al
$S_j\ [cm^2]$	95	85
$D_j\ [cm]$	11,9	11,3
N_1	4630	5174
N_2	84	93
m_{Fe}	210	260
$m_{Cu/Al}$	57	30
u_k [%]	10,4	8,6
$\Delta P_z\ [W]$	396,8	491,2
$\Delta P_{Cu/Al}\ [W]$	2117,5	1620,2
μ [%]	97,5	97,9

Tab. 5 – srovnání transformátorů s Cu a Al vinutí



Obr. 2 – nahoře transformátor s Cu vinutím, průřez jádrem
dole transformátor s Al vinutím

Z tabulky je patrné, že pro stejný výkon bude transformátor s hliníkovým vinutím menší. Průřezy jader budou srovnatelné. Podle výpočtu se hmotnost železa zvýší o 50 kg při použití hliníkového provedení. Hmotnost hliníkového vinutí je menší, než měděného. Transformátor s mědí má menší ztráty naprázdno, ale větší ve vinutí.

Dříve se používalo hliníkové vinutí z ekonomických důvodů. V dnešní době se opět vyrábějí transformátory s hliníkovým vinutím. Výroba hliníku je technologicky náročná. Je nutné kvalitně svařit tenké fólie, nebo pásy, dodržet tolerance tahu při vinutí fólie apod. Další argumenty viz příloha [3] firma Trasfor S. A.

Hliníkové vinutí se upřednostňuje u zalévaných transformátorů. Má blízký teplotní koeficient roztažnosti epoxidové pryskyřici, která se užívá při zalévání vinutí. To znamená, že by při větším zatížení měděné vinutí popraskalo a narušila by se elektrická pevnost a spolehlivost. Viz příloha [4] firma Trasfor S. A.

Závěr

V práci byly shromážděny požadavky na distribuční transformátory. Pro výkon 100 kVA bylo uvedeno, jaká omezení ohledně ztrát nás čekají od letošního července a jaká jsou v plánu od července 2021.

Byl proveden návrh aktivní části distribučního transformátoru pro měděné i hliníkové vinutí. Bylo těžké rozhodnout, jaký průřez jádra transformátorů zvolit. Zohledněním jednoho parametru byly potlačeny jiné. Rozhodnuto bylo podle ztrát, reaktance a magnetizačního proudu. V úvahu nebyla brána hmotnost vinutí a jádra, od čehož se odvíjí cena.

Z výpočtu vyplynulo, že transformátor s hliníkovým vinutím bude konstrukčně větší. Vinutí mělo menší hmotnost, ale jádro větší. Ztráty i impedance nakrátko vyšly pro oba transformátory vysoké. Účinnost transformátorů byla nízká ve srovnání s běžnými distribučními transformátory.

Ani jeden z transformátorů nesplňuje současné normy ani nová nařízení Evropské unie. Metoda výpočtu vychází ze starých učebních textů z roku 1971 a použité konstanty jsou na dnešní dobu předimenzované . V dnešní době jde spíše o know-how každé firmy.

Literatura

[1] J. Hampl, K. Nosek : Stavba transformátorů, Vydavatelství ČVUT

[2] ČSN EN 504 64

[3] M. J. Heathcote : The J & P Transformer Book,Reed Educational and Professional Publishing Ltd 1998

[4] F. Pešák : Výpočty transformátorů, SNTL 1955

[5] CG Power Systems: brožura Distribuční transformátory

Seznam příloh

1	Katalogový list firmy ArcelorMittal Frýdek Místek a. s.	2xA4
2	Tabulka hodnot Cu, Al	1xA4
3	Dokument firmy Trasfor S. A	1xA4
4	Dokument firmy Trasfor S. A	16xA4
5	Nařízení EU o ztrátách	4xA4
6	Výpočet z Mathematica Cu	nb
7	Výpočet z Mathematica Al	nb
8	CD	