

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Komplexní řešení diferenciálního modelu třífázového
transformátoru v jazyce DYNAST**

vedoucí práce: doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.

2013

autor: Bc. Jiří Košťál

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jiří KOŠŤÁL**
Osobní číslo: **E11N0120P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Název tématu: **Komplexní řešení diferenciálního modelu třífázového transformátoru v jazyce DYNAST**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

Vytvořte komplexní model třífázového transformátoru

1. Uveďte teorii fungování třífázového transformátoru.
2. Sestavte matematický diferenciální model transformátoru.
3. Napište a odlaďte model transformátoru v jazyce DYNAST.
4. Model identifikujte na reálných parametrech a ověřte jeho správnou funkčnost pro základní provozní stavy.
5. Proveďte reprezentativní výpočty ustálených a přechodných dějů na transformátoru.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Bašta, Chládek, Mayer: Teorie elektrických strojů
2. Bartoš, V.: Elektrické stroje
3. Mühlbacher, J., Noháč, K.: Přechodné jevy v elektrizačních soustavách - řešené příklady
4. Mann, H., Ševčenko, M.: Snadné počítačové modelování dynamických soustav

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.**

Katedra elektroenergetiky a ekologie

Konzultant diplomové práce:

Prof. Ing. Jan Mühlbacher, CSc.

Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2012**

Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2013**


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




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Anotace

Předkládaná diplomová práce je zaměřena v teoretické části na popis principu fungování třífázového transformátoru z hlediska uvažování konstrukčního uspořádání a matematického vyjádření probíhajících dějů při chodu transformátoru. Praktická část se zabývá tvorbou programů pro různá zapojení třífázového transformátoru jádrového a plášťového typu.

Klíčová slova

třífázový transformátor, programovací jazyk DYNAST, sycení, stavy nakrátko a naprázdno, zapojení vinutí transformátoru, diferenciální popis transformátoru, ustálený a přechodný stav

Abstract

The submitted theses is focused in the theoretical part on the description of function of three phase transformer in term of respect the constructional configuration and mathematical expression of processes during the movement of transformer. The practical part deals with creation of programs core and shell three phase transformer for different connection.

Key words

three phase transformer, DYNAST programming language, saturation, short circuit and off-load, winding connection of transformer, differential description of transformer, steady and transient state

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou 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 diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 28.4.2013

Jméno příjmení

.....

Poděkování

Zejména bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Karlu Noháčovi, Ph.D. za jeho trpělivost a čas, který věnoval kontrolám této práce, za konzultace a nastínění dané problematiky. Dále za cenné rady, připomínky a metodické vedení práce.

OBSAH

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
ÚVOD	14
1 TEORIE FUNGOVÁNÍ TŘÍFÁZOVÉHO TRANSFORMÁTORU	15
1.1 KONSTRUKCE	15
1.1.1 Magnetický obvod	15
1.1.2 Vinutí.....	16
1.2 PRINCIP FUNGOVÁNÍ	18
1.3 MAGNETIZACE MAGNETICKÉHO OBVODU	19
1.3.1 Souměrný magnetický obvod.....	21
1.3.1.1 Hvězda - hvězda (Yy), hvězda - lomená hvězda (Yz)	21
1.3.1.2 Hvězda s uzemněným nulovým bodem - hvězda (YNy).....	21
1.3.1.3 Hvězda - trojúhelník (Yd).....	21
1.3.1.4 Trojúhelník - hvězda (Dy).....	22
1.3.2 Nesouměrný magnetický obvod.....	22
1.3.2.1 Hvězda - hvězda (Yy), hvězda - lomená hvězda (Yz)	22
1.3.2.2 Hvězda s uzemněným nulovým bodem - hvězda (YNy).....	22
1.3.2.3 Hvězda - trojúhelník (Yd).....	22
1.3.2.4 Trojúhelník - hvězda (Dy).....	23
2 SESTAVENÍ MATEMATICKÉHO DIFERENCIÁLNÍ MODELU TRANSFORMÁTORU	23
2.1 ROVNICE A NÁHRADNÍ SCHÉMA TRANSFORMÁTORU	23
2.2 POPIS JEDNOTLIVÝCH PRVKŮ SCHÉMATU	26
2.2.1 Stav nakrátko	26
2.2.2 Stav naprázdno.....	28
2.3 VÝPOČET PRVKŮ TRANSFORMÁTORU	30
2.3.1 Transformátor v přenosové soustavě	30
2.3.1.1 stav nakrátko	31
2.3.1.2 stav naprázdno	32
2.3.2 Transformátor v distribuční soustavě	33
2.3.2.1 stav nakrátko	34
2.3.2.2 stav naprázdno	35
2.4 MATEMATICKÝ POPIS DIFERENCIÁLNÍCH MODELŮ TRANSFORMÁTORU	36
2.4.1 Zapojení hvězda - hvězda (Yy)	37
2.4.2 Zapojení hvězda - trojúhelník (Yd).....	39
2.4.3 Zapojení hvězda - lomená hvězda (Yz).....	41

3	TVORBA MODELŮ TRANSFORMÁTORU V JAZYCE DYNAST	43
3.1	PROGRAM DYNAST	43
3.1.1	<i>Dynast Shell</i>	44
3.1.2	<i>Dynast Solver</i>	45
3.2	MODEL Y TŘÍFÁZOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ	46
3.2.1	<i>Jednofázový transformátor</i>	47
3.2.2	<i>Třífázový transformátor</i>	49
4	OVĚŘENÍ SPRÁVNÉ FUNKČNOSTI MODELU NA REÁLNÝCH PARAMETRECH PRO ZÁKLADNÍ PROVOZNÍ STAVY	50
4.1	MODEL PŘI STAVU NAKRÁTKO	50
4.2	MODEL PŘI STAVU NAPRÁZDNO	53
5	VÝPOČET USTÁLENÝCH A PŘECHODNÝCH DĚJŮ NA TRANSFORMÁTORU	56
5.1	TRANSFORMÁTOR S VEDENÍM A ZÁTĚŽÍ	56
5.2	JEDNOFÁZOVÝ ZKRAT NA TRANSFORMÁTORU S VEDENÍM A ZÁTĚŽÍ	61
5.3	TŘÍFÁZOVÝ ZKRAT NA TRANSFORMÁTORU S VEDENÍM A ZÁTĚŽÍ	64
	ZÁVĚR	69
	POUŽITÁ LITERATURA	70
6	PŘÍLOHY	1
6.1	TŘÍFÁZOVÉ OLEJOVÉ TRANSFORMÁTORY SPOLEČNOSTI ETD TRANSFORMÁTORY, A. S. - TABULKA Č. 1 [13]	2
6.2	TŘÍFÁZOVÉ OLEJOVÉ TRANSFORMÁTORY SPOLEČNOSTI ETD TRANSFORMÁTORY, A. S. - TABULKA Č. 2 [13]	3
6.3	TŘÍFÁZOVÉ DISTRIBUČNÍ TRANSFORMÁTORY SPOLEČNOSTI BEZ TRANSFORMÁTORY, A. S. - OLEJOVÉ (1) [14]	4
6.4	TŘÍFÁZOVÉ DISTRIBUČNÍ TRANSFORMÁTORY SPOLEČNOSTI BEZ TRANSFORMÁTORY, A. S. - OLEJOVÉ (2) [14]	5
6.5	TŘÍFÁZOVÉ DISTRIBUČNÍ TRANSFORMÁTORY SPOLEČNOSTI BEZ TRANSFORMÁTORY, A. S. - SUCHÉ (1) [15]	6
6.6	TŘÍFÁZOVÉ DISTRIBUČNÍ TRANSFORMÁTORY SPOLEČNOSTI BEZ TRANSFORMÁTORY, A. S. - SUCHÉ (2) [15]	7
6.7	TŘÍFÁZOVÉ DISTRIBUČNÍ TRANSFORMÁTORY SPOLEČNOSTI BEZ TRANSFORMÁTORY, A. S. - AMORFNÍ [15]	8
6.8	POROVNÁNÍ CHOVÁNÍ TRANSFORMÁTORU V ZAPOJENÍ YNYN A YND NA JEDNOFÁZOVÉM ZKRATU A JEHO NÁSLEDNÉ VYPNUTÍ U ZDROJE	9

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

angl.	.....	Anglické
B [T]	.....	Magnetická indukce
B_{\max} [T]	.....	Maximální magnetická indukce
BEZ	.....	Bratislavské elektrotechnické závody
B_{μ} [T]	.....	Magnetická indukce hlavního magnetického obvodu
Dy	.....	Zapojení třífázového transformátoru do trojúhelník - hvězda
DYNAST	.....	Simulační program
DYNCAD	.....	Grafické prostředí programu DYNAST
ES	.....	Elektrizační soustava
ETD	.....	Elektrotechnická továrna Doudlevice
f [Hz]	.....	Frekvence
H [A/m]	.....	Intenzita magnetického pole
H_C [A/m]	.....	Koercitivní intenzita magnetického pole (<i>koercitivní síla</i>)
HTML	.....	HyperText Markup Language (<i>jazyk pro zápis webových stránek</i>)
I_{Fe} [A]	.....	Proud procházející železem
$I_{k\max}$ [A]	.....	Okamžitý maximální zkratový proud
I_n [A]	.....	Jmenovitý proud
I_0 [A]	.....	Proud naprázdno
i_0 [-]	.....	Proud naprázdno v poměrných jednotkách
I_{μ} [A]	.....	Magnetizační proud
I_{1k} [A]	.....	Proud nakrátko
K [-]	.....	Integrační konstanta
k [-]	.....	Převod transformátoru
k_v [-]	.....	Činitel vinutí
l [m ²]	.....	Střední délka indukční čáry magnetického toku
$L_{1,2}$ [H]	.....	Indukčnost
L_{12} [H]	.....	Vzájemná indukčnost
$L_{1\sigma}$ [H]	.....	Rozptylová indukčnost primární strany

$L_{2\sigma}$ [H]	.....	Rozptylová indukčnost sekundární strany převedena na primární
L_{μ} [H]	.....	Magnetizační indukčnost
L_h [H]	.....	Hlavní indukčnost magnetického obvodu
m [-]	.....	Počet fází
magn.	.....	Magnetický
N_1, N_2	.....	Počet závitů
n_i^p, n_i^s	.....	Počet závitů primární/sekundární strany
nn	.....	Nízké napětí
např.	.....	Například
Obr.	.....	Obrázek
ODAF	.....	Oil Directed Air Forced (<i>řízené chlazení proudem oleje a nádoba je ofukována vzduchem z ventilátorů</i>)
ONAN	.....	Olejové přirozené chlazení transformátoru se vzduchem chlazenou nádobou
PDF	.....	Portable Document Format (<i>formát souboru vyvinutý firmou Adobe pro ukládání dokumentů nezávisle na softwaru i hardwaru</i>)
p. j.	.....	Poměrné jednotky
resp.	.....	Respektive
R_{Fe} [Ω]	.....	Činný odpor v železe
R_m [H^{-1}]	.....	Magnetický odpor
R_m^{jadro} [H^{-1}]	.....	Magnetický odpor jádra
R_m^{pom} [H^{-1}]	.....	Magnetický odpor pomocného jádra
R_m^{SP} [H^{-1}]	.....	Magnetický odpor spojky
$R_{1,2}$ [Ω]	.....	Činný odpor
R_k [Ω]	.....	Činný odpor nakrátko
R_2' [Ω]	.....	Činný odpor přepočtený na primární stranu
U_i [V]	.....	Indukované napětí
U_k [V]	.....	Napětí nakrátko
u_k [-]	.....	Napětí nakrátko v poměrných hodnotách
U_n [V]	.....	Jmenovité napětí

v	.....	K-tá harmonická
v_n	.....	Vysoké napětí
S [m^2]	.....	Průřez magnetického obvodu
S_n [VA]	.....	Jmenovitý výkon
t [s]	.....	Čas
t_j	.....	To jest
$tzv.$	.....	Takzvané
X_k [Ω]	.....	Reaktance nakrátko
$X_{1,2}$ [Ω]	.....	Reaktance (induktivní)
X_2' [Ω]	.....	Reaktance sekundární strany (induktivní) přepočtena na primární stranu
X_{12} [Ω]	.....	Vzájemná reaktance
X_{12}' [Ω]	.....	Vzájemná reaktance přepočtena na primární stranu
$X_{1\sigma}$ [Ω]	.....	Rozptylová reaktance
$X_{2\sigma}'$ [Ω]	.....	Rozptylová reaktance sekundární strany přepočtena na primární stranu
X_μ [Ω]	.....	Reaktance hlavního magnetizačního toku
Y_0 [Ω]	.....	Admitance příčné větve transformátoru ve stavu naprázdno
y_0 [-]	.....	Poměrná admitance v příčné větvi transformátoru
$YNyn$	.....	Zapojení třífázového transformátoru do hvězda - hvězda s uzemněnými uzly
YNy	.....	Zapojení třífázového transformátoru do hvězda - hvězda s uzemněným uzlem na straně vyššího napětí
Yy	.....	Zapojení třífázového transformátoru do hvězda - hvězda
Yd	.....	Zapojení třífázového transformátoru do hvězda - trojúhelník
Ynd	.....	Zapojení třífázového transformátoru do hvězda - trojúhelník s uzemněným uzlem na straně vyššího napětí
Yz	.....	Zapojení třífázového transformátoru do hvězda - lomená hvězda
Z_k [Ω]	.....	Impedance nakrátko
Z_0 [Ω]	.....	Impedance netočivé složky transformátoru
$\bar{Z}_{1,2,3}$ [Ω]	.....	Impedance náhradního T-článku

λ [-]	.....	Langrangeův koeficient
μ [H/m]	.....	Permeabilita
ω [rad/s]	.....	Úhlová rychlost
ρ [Ω m]	.....	Měrná rezistivita
Φ [Wb]	.....	Magnetický tok
Φ_{1h} [Wb]	.....	Hlavní magnetický tok
$\Phi_{1\sigma}$ [Wb]	.....	Rozptylový magnetický tok
ΔP_{Fe} [W]	.....	Ztráty v železe
ΔP_{jk} [W]	.....	Joulovy ztráty nakrátko
ΔP_{j0} [W]	.....	Joulovy ztráty naprázdno
ΔP_d [W]	.....	Přídavné ztráty
ΔP_k [W]	.....	Ztráty nakrátko
ΔP_0 [W]	.....	Ztráty naprázdno

ÚVOD

V dnešní době existuje velká řada typů transformátorů pro širokou škálu výkonů. Pak záleží na tom, v jakých podmínkách mají pracovat a podle toho se u nich můžeme setkat s daným konstrukčním provedením, aby splňovaly kladené nároky. V úvodu diplomové práce se zabývám popisem rozdílu základních používaných způsobů zapojení vinutí pro souměrné a nesouměrné uspořádání magn. obvodu s tím, že jsem hlavně kladl důraz, jak se uzavírá poruchová netočivá složka proudu.

V dalších částech jsem systematicky popsal, z čeho se skládá náhradní schéma transformátoru a co nám z jeho znalosti lze získat při analýze stavů nakrátko a naprázdno. Z pochopené problematiky a stanoveních matematických popisů fungování zapojení Yy , Yd a Yz byly znalosti použity pro tvorbu cíle diplomové práce, kterými byly programy většinu možných typů zapojení vinutí. Aby uměly uvažovat sycení, respektovaly rovinné uspořádání magn. obvodu a byly sestaveny pro transformátory jádrového a plášťového typu.

Na závěr se v práci provádí porovnání získaných průběhů z sestavených programů určitého typu zapojení vinutí s matematicky vyjádřenou skutečností děje analytickou metodou. Výsledkem je ukázat, že programy jsou účelné a schopné k použití při metodické analýze dané problematiky.

1 TEORIE FUNGOVÁNÍ TŘÍFÁZOVÉHO TRANSFORMÁTORU

Nedílnou součástí k zlepšení přenosu a rozvodu na velké vzdálenosti je transformátor. Transformátor je netočivý elektrický stroj k přeměně/transformaci (*od tohoto odvozen název*) vstupních hodnot napětí a proudu na jiné za takřka nezměněného přenášeného výkonu a stejné frekvence. Pod pojmem „takřka“ lze chápat určitá vlastní spotřeba transformátoru. Mimo změnu přenášených hodnot napětí a proudů může změnit počet fází.

Pro svoji poměrně jednoduchou obsluhu a údržbu jsou vhodným zařízením k ekonomickému přenášení výkonu elektrizační soustavou (*ES*), jelikož transformují na vyšší napětí při nízkém proudu. Malé proudy přispívají k minimalizaci Joulových ztrát a k zabezpečení míry přeneseného výkonu k spotřebiteli.

1.1 Konstrukce

1.1.1 Magnetický obvod

Základem, neřkuli nejdůležitějšími částmi stroje jsou bezesporu magnetický (*magn.*) obvod a vinutí. Magn. obvod je tvořen ze vzájemně izolovaných feromagnetických plechů, což omezuje ztráty v železe. Jako plechy jsou nejčastěji použity orientované tloušťky 0,35 mm, válcované za tepla, které dovolují magn. indukci ve směru válcování o vysoké hodnotě $B_{\max} = 1,8$ T. To vede ke snížení průřezu jádra a následnému snížení hmotnosti a nákladů za materiál při stejných ztrátách magn. obvodu.

Postupným skládáním plechů sestavíme magn. obvod. Máme dvě alternativy skládání: S tupým stykem nebo přeplátováním. První se tolik nedoporučuje. Je použitelná např. pro tlumivky. Vlivem překrytí jader dochází k uzavírání vodivé cesty pro vířivé proudy, zvyšují se ztráty v železe a zvyšují se úbytky magn. napětí. Přeplátování má sice také, leč v daleko menší míře než s tupým stykem. [1]

Magn. obvod skládaný z plechů rozlišujeme do dvou základních profilů průřezu - **kruhový a obdélníkový**. K docílení maximálního využití magn. jádra k maximálnímu možnému toku by měl tvar jádra korespondovat s tvarem cívky. U malých se používá obdélníkový. U velkých transformátorů s ohledem na deformaci vodiče při velkých silových účincích během poruchových stavů (*např. zkratech*) se přešlo ke kruhovému. K němu se lze

přiblížit odstupňováním s různě širokými plechy. Doporučuje se stupňů co nejvíce, aby se co nejlépe využil prostor mezi cívkou a magn. obvodem.

U pomocných jader a spojek se aplikovala stejná myšlenka stavby, i když nenesou žádná vinutí. Je to z toho důvodu, aby byla rovnoměrně rozložena magn. indukce po průřezu. [10]

Z hlediska uspořádání vinutí a jader, resp. koncepcí magn. obvodu rozlišujeme dva základní typy - **jádrové a plášťové**. Třífázové transformátory plášťové jsou tvořeny spojením tří jednofázových jednotek plášťových transformátorů vedle sebe pomocí magn. spojek. Vinutí má uložené na středních sloupcích nesoucí veškerý magn. tok. Tok se uzavírá přes pomocná jádra a spojky o polovičním průřezu než-li jádro s vinutím.

Koncepce jádrového typu je jednoduchá. Na každém jádře je umístěna jedna fáze s vinutím vstupním a výstupním. Pro vznik třífázového jádrového typu je zapotřebí tři jednofázová. Příslušná jádra bez vinutí se mohou spojit v jedno a jelikož je součet okamžitých hodnot toků nulový, můžeme si dovolit společné jádro zcela vynechat. V praxi dostaneme rovinné uspořádání s menší nesymetrií, která vyvolává zvýšené požadavky na magnetizační proudy v krajních jádrech. Pro potřeby dnešní doby se taková nesymetrie toleruje. Z konstrukčního a ekonomického hlediska by neměly význam provádět úpravy. O nich se dá polemizovat u malých strojů. Vyskytují se v menší míře. [16]

1.1.2 Vinutí

Při konstrukci je kladen důraz na pevnostní vlastnosti po stránce mechanické u vodičů (*při zkratech*) a u izolací po stránce elektrické, které se zkoušejí zkouškami s krátkodobými napěťovými rázy a koneckonců i proti nadměrnému tepelnému namáhání. Sledují se dva hlavní parametry - jmenovitý proud I_n a jmenovité napětí U_n . Velikost proudu rozhoduje o zvoleném průřezu vodiče. Pro malé hodnoty je kruhový, pro vyšší čtyřhranný měděný s částmi z hliníku.

Druhy vinutí:

- I. Podle vzájemné polohy vinutí
 - a) sousedé (*válcové, polohové*) - jednoduché nebo dělené
 - b) prostřídané (*kotoučové*) - méně frekventované, pro menší napětí
- II. Podle způsobu vinutí cívek

- a) polohové
- b) kotoučové

Charakteristické spojení vinutí a jejich použití:

a) Hvězda - hvězda (Yy)

Jedná se o nejjednodušší zapojení a z toho plyne jeho cena. Používá se tam, kde je menší riziko nesymetrického zatížení, které se popřípadě kompenzuje přidáním třetího pomocného vinutí zapojeného do trojúhelníka. Takovými místy jsou např. transformační stanice, transformátory středních výkonů.

Uvažované kombinace spojení: $Yy0$, $Yy6$

b) Trojúhelník - hvězda (Dy)

Vstupní vinutí do trojúhelníka částečně potlačuje vliv nesymetrie. Při poruše jedné fáze trojúhelníka se dovozuje provoz v tzv. spojení V (*otevřený trojúhelník*). Magn. toky se uzavírají přes poškozenou fázi, které jsou rovny k součtu toků na zdravých fázích. Používají se s velmi zatíženými uzly pro vyšší výkony nad 400 kVA, kde již nelze použít Yz .

Uvažované kombinace spojení: $Dy1$, $Dy5$, $Dy7$, $Dy11$

c) Hvězda - trojúhelník (Yd)

Výhodné u blokových transformátorů velkých výkonů. Uzel nulového bodu se uzemňuje buď přímo a nebo u menších výkonů přes zhášecí tlumivku.

Uvažované kombinace spojení: $Yd1$, $Yd5$, $Yd7$, $Yd11$

d) Hvězda - lomená hvězda (Yz)

Lomená hvězda účinně potlačuje nesymetrické zatížení u výkonů do 315 kVA. Nevýhodou zapojení je bezesporu větší nákladnost při nutnosti vyššího počtu závitů (o 15 %) než při spojení Yy . Přidavne se zvětšují při nárůstu hmotnosti napětí nakrátko a rozptyl.

Spojení umožňuje přepnutí z lomené hvězdy na hvězdu paralelním spojením vinutí na jednom jádře. Důsledkem je pokles napětí na $\frac{1}{\sqrt{3}}$ původní hodnoty.

Uvažované kombinace spojení: $Yz1$, $Yz5$, $Yz7$, $Yz11$

1.2 Princip fungování

Podstata fungování je založena na elektromagnetické indukci. Na vinutí, umístěné axiálně s magn. jádrem, se přivádí střídavý harmonický proud. Proud průchodem cívkou budí harmonický magn. tok, který je na rozdíl od točivých strojů plně spřažen s vinutím (*činitel vinutí* $k_v=1$). Má dvě složky - hlavní ϕ_{1h} a rozptylový $\phi_{1\sigma}$. První zmiňovaný se uzavírá magn. jádrem a zabírá se sekundárním vinutím, do nichž indukuje magnetické napětí u_{i2} . Po zatížení sekundárního vinutí vyvolává vzniklý proud vznik druhého magn. toku. Taktéž vznikají dvě stejné složky toku jako na primární straně. Rozptylová složka se nepodílí na přenosu energie, k zvýšení magn. napětí a magn. toku, jelikož se uzavírá přes vzduch kolem vinutí.

Součtem obou příspěvků hlavních magn. toků dostáváme celkový hlavní magn. tok, který prochází jádrem v provozním stavu.

$$\phi_h(t) = \phi_{1h}(t) + \phi_{2h}(t) = \phi_{\max} \cdot \sin(\omega t + \alpha) \quad (1.1)$$

Zároveň by měl platit nulový součet magn. toků ze všech tří jader, které se uzavírají nad středním jádrem. Případnou nenulovost lze konstrukčně řešit jedním nebo dvěma přidavnými jádry na bočních stranách původního magn. obvodu.

Zmíněný tok, jak bylo popsáno pro uvádění transformátoru do chodu, indukuje do obou vinutí podle zákona elektromagnetického zákona napětí u_{i1} a u_{i2} :

$$u_{i1} = N_1 \cdot \frac{d\phi_h}{dt} = N_1 \cdot \phi_{\max} \cdot \omega \cdot \cos(\omega t + \alpha) \quad [V] \quad (1.2)$$

$$u_{i2} = N_2 \cdot \frac{d\phi_h}{dt} = N_2 \cdot \phi_{\max} \cdot \omega \cdot \cos(\omega t + \alpha) \quad [V] \quad (1.3)$$

Ze znalosti napětí určíme známý a potřebný vztah pro převod k .

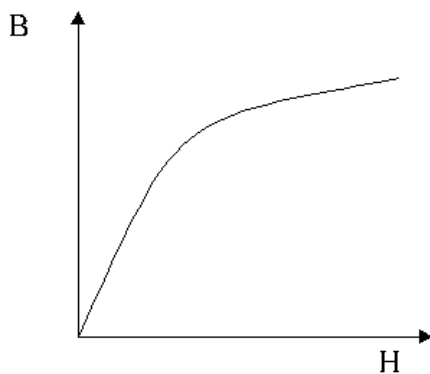
$$k = \frac{U_{i1ef}}{U_{i2ef}} = \frac{\frac{N_1 \cdot \phi_{\max} \cdot \omega}{\sqrt{2}}}{\frac{N_2 \cdot \phi_{\max} \cdot \omega}{\sqrt{2}}} = \frac{N_1}{N_2} \cong \frac{U_1}{U_2} \quad [-] \quad (1.4)$$

1.3 Magnetizace magnetického obvodu

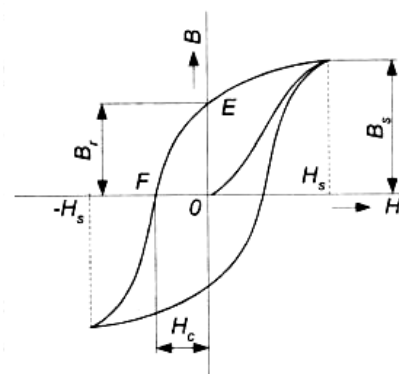
Magnetizace je spojena s řadou problémů, které mají vliv na funkci stroje. Nelinearita a konstrukční nesymetrie magn. obvodu. Zkoumaný děj vysvětlíme na jednofázovém transformátoru při chodu naprázdno. Pro třífázové stroje je odvození průběhu magnetizačního proudu stejné, jen se musí vyřešit uzavírání toků vzniklých průchodem proudů některých vyšších harmonických. Stroj je magnetován magnetizačním proudem dosahující obvyklých hodnot v rozmezí od 0,1 % do 10% jmenovitého proudu I_n . Větší hodnota náleží většinou k strojům malého výkonu a menší pro vysokovýkonové transformátory.

Průběh magnetizačního proudu není harmonický, jak bude později vysvětleno a ukázáno. Za předpokladu harmonického magn. toku a znalosti průběhu magnetizační charakteristiky $\phi = f(I_\mu)$ (resp. $B = f(H)$) se dá graficky transformací souřadnic odvodit podoba průběhu magnetizačního proudu.

Tvar magnetizační charakteristiky je ovlivněna vlastnostmi transformátorových plechů, jejich rozměry, konstrukcí magn. obvodu a zda zahrnujeme respektování vlivu hystereze a vířivých proudů. Bez respektování ztrát je křivka v podobě tzv. křivky prvotní magnetizace. S respektováním ztrát a remanence se mění na tzv. hysterezní smyčku.

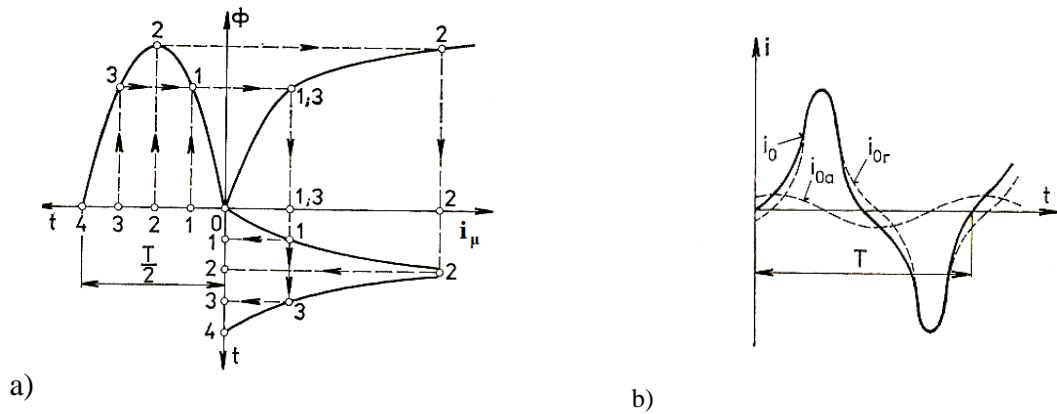


Obr. 1.1: Křivka prvotní magnetizace [11]



Obr. 1.2: Hysterezní smyčka [12]

Aplikací grafické transformace souřadnic, která spočívá k převedení hodnoty magnetizačního toku v čase t přes magnetizační křivku, resp. hysterezní smyčku, která slouží jako převodní funkce k vykreslení magnetizačního proudu v čase t .



Obr. 1.3: a) Konstrukce časového průběhu magnetizačního proudu [1]
b) Průběh magnetizačního proudu [1]

Abychom měli kompletně popsány obě varianty, měl by se při respektování ztrát doplnit průběh magnetizačního proudu o proud kompenzující vířivé proudy.

Z průběhu magnetizačního proudu na obr. 1.3 b) je vidět existence vlny vyšších harmonických. Následně z Fourierovy analýzy na jednotlivé řády vyplývá, že proud obsahuje pouze liché harmonické $v = 2k - 1$, kde $k=1, 2, \dots$.

Provedeme rozbor vyšších harmonických proudů pro trojfázovou soustavu a fázové proudy:

$$\begin{aligned}
 i_a &= \sum_{v=1}^{\infty} I_{mv} \sin v\omega t \\
 i_b &= \sum_{v=1}^{\infty} I_{mv} \sin v\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) \\
 i_c &= \sum_{v=1}^{\infty} I_{mv} \sin v\left(\omega t - \frac{4}{3}\pi\right)
 \end{aligned} \tag{1.5}$$

Dosadíme do jednotlivých harmonických za v a lze učinit závěr, že harmonické řádu

$$\begin{aligned}
 v = 6k + 1 & \quad \text{mají pravotočivý sled fází} \\
 v = 6k - 1 & \quad \text{mají levotočivý sled fází} \\
 v = 3(2k - 1) & \quad \text{mají charakter netočivé složky}
 \end{aligned} \tag{1.6}$$

kde $k=1, 2, \dots$

[2]

Největší účinek na chod stroje má třetí skupina, která obsahuje liché harmonické dělitelné třemi. Popíšeme si jejich účinek u nejběžnějších způsobů zapojení při souměrném a nesouměrném magn. obvodě.

1.3.1 Souměrný magnetický obvod

Jak bylo dříve zmíněno, magn. toky tří fází jsou od sebe vzájemně pootočený o 120° a mají stejné magnetizační proudy co do velikosti. Obvody jsou nejčastěji spojené do hvězdy a vinutí navinuta na vnější jádro.

Probereme základní způsoby zapojení primárního a sekundárního vinutí

1.3.1.1 Hvězda - hvězda (Yy), hvězda - lomená hvězda (Yz)

Jelikož spojení nemá vyveden nulový bod jak na primární, ani na sekundární straně, nemohou protékat třetí harmonické a její liché násobky dělitelné třemi. Je to zapříčiněno tím, že musí v okamžitém čase součet proudů být vždy nulový. Když nejsou zpozorovány složky vyšších harmonických v proudu, zákonitě se musí vzhledem nelineární závislosti magn. toku na proudu objevit právě v magn. toku. Sekundárně ze zákona elektromagnetické indukce ve fázovém napětí. Ve sdružených napětích se vyruší fázorovým rozdílem dvou fázových.

K uzavření magn. toku dochází u jádrového typu rozptylovými cestami od spojky ke spojce, stahovací konstrukcí a nádobou transformátoru. Ztráty se zvětšují o malou hodnotu vířivými proudy. Ve větší míře jsou ztráty zaznamenány u plášťového typu, jehož magn. tok se uzavírá hlavním magn. obvodem.

1.3.1.2 Hvězda s uzemněným nulovým bodem - hvězda (YNy)

Přítomností nulového bodu již mohou na vstupní straně vyšší harmonické protékat. Jsou malé s nepatrnými rezonančními pochody a eventuálně mohou narušit správné zapůsobení vypínače a ochrany.

1.3.1.3 Hvězda - trojúhelník (Yd)

Bez nulového bodu se opět neuzavírají proudy třetích harmonických na vstupní straně a objevuje se třetí harmonická a její liché násobky v magn. toku. Magn. tok indukuje do vinutí spojeného do trojúhelníka napětí deformované vyššími harmonickými. Prochází proud třetí a vyšších harmonických, které dává vzniku magn. toku. Tok kompenzuje v primárním vinutí třetí harmonické původního magn. toku.

1.3.1.4 Trojúhelník - hvězda (Dy)

Princip je obdobný jako u zapojení Yd . Síť nemůže dodat transformátoru proudy vyšších harmonických dělitelné třemi. Magn. tok vyšších harmonických o stejné velikosti a fázi indukují napětí, v trojúhelníku se napětí sečtou a dají vzniknout proudu o trojnásobné frekvenci. Proud vyvolá opět magn. tok stejných parametrů, který působí opačným smyslem než tok, který proud vyvolal. Tímto se zbaví tok vyšších harmonických.

1.3.2 Nesouměrný magnetický obvod

Hlavní rozdíl od souměrného obvodu je uložení jader všech fází v jedné rovině. Krajiní jádra mají delší cestu než prostřední. Zákonitě mají co do velikosti odlišné magnetizační proudy a vzniká nesymetrie.

1.3.2.1 Hvězda - hvězda (Yy), hvězda - lomená hvězda (Yz)

Vzhledem nesymetrii obvodu se u magn. toku objevují další liché harmonické. Dominantní převaha na třetí harmonické však zůstává.

1.3.2.2 Hvězda s uzemněným nulovým bodem - hvězda (YNy)

V nulovém bodě se objevují i jiné liché harmonické nedělitelné třemi, jelikož nejsou hodnoty magnetizačních proudů stejné. Jejich součet nedává nulu. Přesto hlavní podíl v nulovém bodě zůstává na třetí harmonické.

1.3.2.3 Hvězda - trojúhelník (Yd)

Platí podmínka, že součet proudů v -harmonických fází musí být nulový. Podmínky dosáhneme jen tehdy, pokud dodáme fázovým vinutím přídavný proud o stejné velikosti a fázi. Proud vyvolává magn. tok uzavírající konstrukcí transformátoru. Indukuje na výstupu trojúhelníku jednosměrné proudy, které kompenzují přídavné proudy na vstupu. Princip je platný pouze pro harmonické nedělitelné třemi. U ostatních dělitelných třemi jsou vedeny krajními přírady na vstupu. Tady zesiluje buzení a vrací se středním jádrem, kde naopak

buzení snižují. Tím se doplnily kompenzující účinky, které nesymetrií nebyl schopen trojúhelník vyvážit.

1.3.2.4 Trojúhelník - hvězda (Dy)

Zapojení je o něco složitější než u souměrného. Síť může pro transformátor dodávat harmonické nedělitelné třemi. Pro ostatní harmonické se část vytváří v trojúhelníku, zbytek dodává síť.

[2], [3]

2 SESTAVENÍ MATEMATICKÉHO DIFERENCIÁLNÍ MODELU TRANSFORMÁTORU.

Nejprve než přejdeme k sestavení matematického modelu transformátoru diferenciálními rovnicemi pro jednotlivá zapojení, odvodíme si základní rovnice transformátoru při ustáleném stavu, z jejichž znalosti poté budeme schopni namodelovat náhradní schéma transformátoru při respektování všech okolností: Míry ztrát, rozptylu a vzájemné vazby magn. obvodu s indukčnostmi co do vlivu sycení.

2.1 Rovnice a náhradní schéma transformátoru

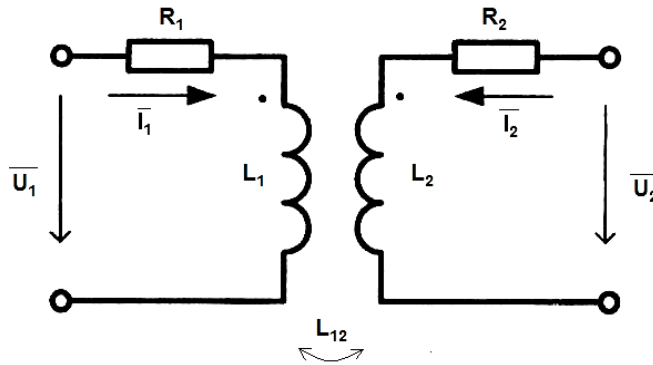
Náhradní schéma je kombinací pasivních parametrů obvodu, které popisují chování stroje při jeho provozních stavech. Jako stavy chápeme chod nakrátko, kdy se identifikují velikosti parametrů náhradního schématu v podélné větvi T-článku a při chodu naprázdno ve větvi příčné.

Nejdříve vyjdeme ze dvou základních rovnic vzniklých II. Kirchhoffovým zákonem, které popisují schéma obr. 2.1 s dvěma magn. vázanými obvody. Rovnice platí nejenom pro jednofázové transformátory, ale i pro libovolné vícefázové, pokud uvažujeme symetrii napětí každé fáze, vinutí a magn. obvodu. S jediným detailem čím se liší, je fázové posunutí napěťových a proudových poměrů o 120° nebo 240°. Od tohoto zapojení plynule přejdeme k častějšímu zobrazení ve tvaru T-článku. Posléze se doplní o vliv rozptylového toku a respektování ztrát v magn. obvodu.

Platí rovnice v ustáleném stavu:

$$\bar{U}_1 = (R_1 + j\omega L_1)\bar{I}_1 + j\omega L_{12}\bar{I}_2 = (R_1 + jX_1)\bar{I}_1 + jX_{12}\bar{I}_2 \quad (2.1)$$

$$\bar{U}_2 = j\omega L_{12}\bar{I}_1 + (R_2 + j\omega L_2)\bar{I}_2 = jX_{12}\bar{I}_1 + (R_2 + jX_2)\bar{I}_2 \quad (2.2)$$



Obr. 2.1: Schématické znázornění transformátoru [4]

Nyní přikročíme k náhradě T-článkem. Skládá se ze tří impedancí \bar{Z}_1 , \bar{Z}_2 v podélné větvi a \bar{Z}_3 v příčné větvi. Aplikací stejného postupu jako u předešlého schématu u obr. 2.1 dostaneme opět dvě podobné rovnice. Po porovnání se vztahy (2.1) a (2.2) získáváme podobu impedancí náhradního T-článku:

$$\begin{aligned} \bar{Z}_1 &= R_1 + (X_1 - X_{12})j & \bar{Z}_2 &= R_2 + (X_2 - X_{12})j \\ \bar{Z}_3 &= jX_{12} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Další problémem, který se u schématu objevuje, je převod k . Ve většině případů se jeho hodnota pohybuje nad číslem jedna, eventuelně pod ním. Případy, kdy se rovná jedné, nejsou tak časté. Vyskytují se pouze tam, kde potřebujeme galvanicky oddělit zařízení od zdroje, čímž se významně chrání před rozdílem el. potenciálu, snižuje zkratové proudy a minimálně také velikost přepětí.

Převod nerovnající se jedné bohužel způsobuje to, že by se induktivní zátěž na sekundární straně chovala jako zátěž kapacitní (vzájemná reaktance X_{12} je větší než X_2). To je nepřijatelné. Schéma by pak bylo kmitočtově závislé. Proto chceme ponechat induktivní charakter zátěže, ale musíme převést jednu stranu, většinou stranu sekundární, na druhou. Tím dosáhneme požadovaný převod $k=1$.

Rovnice (2.1) a (2.2) po úpravách vypadají takto:

$$\bar{U}_1 = (R_1 + jX_1)\bar{I}_1 + jX'_{12}\bar{I}'_2 \quad (2.4)$$

$$\bar{U}'_2 = jX'_{12}\bar{I}_1 + (R'_2 + jX'_2)\bar{I}'_2 \quad (2.5)$$

kde jsou s čárkou označeny přepočtené veličiny

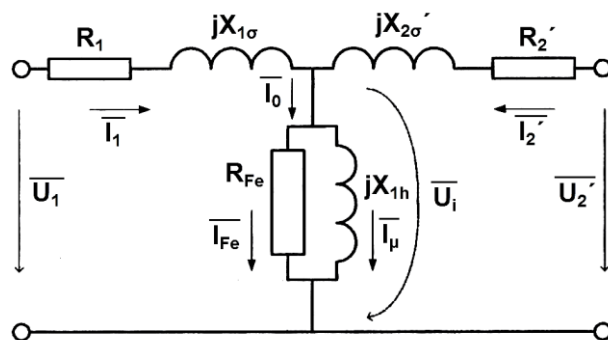
Dále zavedeme rozptylovou reaktanci $X_{1\sigma}$ a $X_{2\sigma}'$ jako náhradu za reaktanční složku \bar{Z}_1 a \bar{Z}_2 T-článku v podélné větvi, kterou jsme získali přepočtem.

$$X_{1\sigma} = X_1 - X'_{12} = X_1 - X_{1h} = X_1 - X_\mu \quad (2.6)$$

$$X'_{2\sigma} = X'_2 - X'_{12} = X'_2 - X_{1h} = X'_2 - X_\mu \quad (2.7)$$

Rovnost X'_{12} s X_{1h} opravdu platí, když si uvědomíme, že vzájemnou reaktanci po přepočtení vypočteme jako součin reaktancí primárního magn. toku a přepočtené reaktance sekundární magn. toku, a to celé pod druhou odmocninou. A když si uvědomíme, že přepočtená reaktance X'_{2h} je rovnocenná s X_{1h} , vychází přepočtená vzájemná reaktance shodně s X_{1h} . A jelikož protéká příčnou větví pouze magnetizační proud, kde je reaktance X_{1h} , můžeme si dovolit ji pojmenovat magnetizační reaktancí X_μ .

Náhradní schéma je skoro kompletní. Zbývá doplnit o odpor R_{Fe} paralelně k magnetizační reaktanci, protože slouží jako člen, který respektuje činné ztráty vyvolané hlavní magn. tokem. Součtem s proudem, kterým jim prochází a magnetizačním proudem v druhé větvi dává dohromady obecně tzv. budící proud, který ve stavu transformátoru naprázdno je pro nás známý pod pojmem proud naprázdno I_0 .



Obr. 2.2: Úplné náhradní schéma transformátoru [4]

2.2 popis jednotlivých prvků schématu

V předešlé kapitole jsme si systematicky odvodili náhradní schéma. Skládá se z kombinací odporů a reaktancí, které charakterizují danou část zařízení - magn. obvod a vinutí transformátoru. K jejich identifikaci vede řada metod. V praxi se osvědčili dvě experimentální newattové metody při jeho mezních stavech. Hovoříme o stavu nakrátko a naprázdno.

2.2.1 Stav nakrátko

Stavem nakrátko rozumíme chod, kdy je spojení svorek na sekundární straně dokrátko a proudy I_{1k} , I_{2k}' jsou ustáleny. Výstupní napětí na svorkách je nulové. Taktéž zatěžovací impedance je nulová a má-li transformátor uzavřený magn. obvod, lze zjednodušeně psát impedanci obvodu jako součet impedancí podélné větve. Zjednodušení bereme v úvahu jen tehdy, pokud je sycení magn. obvodu malé. Nesnižuje impedanci příčné větve, tudíž nezvyšuje ani magnetizační proud. Proto ji můžeme pro její minimální vlivy zanedbat. Případné účinky jsou zahrnuty v přídavných ztrátách.

Vyjádříme-li impedanci nakrátko v poměrných jednotkách (*p. j.*), upravíme ji, dostáváme důležitý parametr, uváděný mezi štítkovými hodnotami stroje a tím je napětí nakrátko. Je to napětí, které musíme dodat na vstupní svorky, aby jsme vinutím protlačili jmenovitý proud I_{1n} . Běžně u malých transformátorů bývá v rozmezí 4 - 5 %, u větších kolem 10 - 12 %. Hodnota ukazuje, jak je transformátor tvrdým zdrojem. Takže čím je napětí nakrátko větší, tím je procházející proud menší, je méně tvrdý zdroj a více zkratu odolný.

Zaměříme se na ztráty. Ztrátami nakrátko definujeme takové, které vznikají průchodem proudu ve vinutí. Jedná se o Joulovy ztráty ΔP_{jk} , kterým připadá hlavní část z celkových ztrát nakrátko a dále v nepatrném množství na přídavné ztráty ΔP_d ve vinutí a z rozptylových magn. toků v kovových konstrukčních částech.

$$\Delta P_k = \Delta P_{jk} + \Delta P_d \quad (2.8)$$

Pro Joulovy ztráty platí:

$$\Delta P_{jk} = m(R_1 + R_2')I_{1n}^2 \quad (2.9)$$

kde

m počet fází

$R_1, R_2' \dots$ odpory vinutí nižší a vyšší strany

I_{1n} stejnosměrný jmenovitý proud při stavu nakrátko

Uvedené odpory odpovídají při rovnoměrnému rozložení proudové hustoty. Pokud bychom dosadili tzv. efektivní odpory, tj. odpory proti střídavému proudu, bereme v potaz přídatné ztráty. Je to dáno tím, že se u masivních vinutí nižšího napětí a u vyššího napětí transformátorů velkých výkonů projevuje při kmitočtu $f=50$ Hz povrchový jev, který vytlačuje proud více k povrchu. Efektivní průřez se zmenší, elektrický odpor vzroste. Jako účinné opatření se osvědčilo dělení vodičů na paralelní větve, které navíc opakovaně cyklicky zaměňujeme (*permutujeme*).

Pro laboratorní měření a výpočty si vystačíme se vztahy (2.9) a (2.10).

Pro přídatné ztráty platí:

$$\Delta P_d \approx I_{1n}^2 \frac{1}{\rho} \approx f^2 \quad (2.10)$$

kde

I_{1n} jmenovitý zatěžovací proud

ρ měrná rezistivita

f frekvence

Ze vztahů je zřejmé, že se u obou objevuje zatěžovací proud I_1 . Proto jsou ztráty ve stavu nakrátko závislé na jeho změně.

Zavedli jsme si pojmy napětí nakrátko, ztráty nakrátko a jak se spočtou. Rádi je využijeme pro výpočet prvků podélné větve. Veškerý dodávaný výkon se spotřebovává na pokrytí ztrát. Velikost ztrát tedy známe. Rovněž vztah, jak je spočítat. Jedinými neznámými nám zůstávají hledané odpory a jmenovitý proud. Proud si snadno vyjádříme pomocí podílu zdánlivého výkonu a jmenovitého napětí.

Dosazením vypočteme celkový odpor větve.

$$R_k = R_1 + R_2' = \Delta P_k \left(\frac{U_n}{S_n} \right)^2 \quad (2.11)$$

Odpory vinutí při zjednodušujících předpokladech lze uvažovat za rovné. Rovnají se tedy k polovině činného odporu impedance nakrátko.

$$R_1 = R_2' = \frac{R_k}{2} \quad (2.12)$$

Nyní si popíšeme výpočet druhé složky impedance nakrátko - rozptylovou reaktanci. Reaktance představuje převážnou část impedance, dosahuje hodnot o řád větší než činné odpory R_1, R_2' . A jelikož se rozptylové toky uzavírají výhradně v neferomagnetickém prostředí, nemusíme u ní zkoumat, jak se projeví sycení jádra. Obvykle ji považujeme za konstantní. Pro její výpočet vyjdeme z již vypočteného odporu a impedance nakrátko, kterou známe z napětí nakrátko. Pouze ji opravíme na ohmy přepočtem do fyzikálních jednotek.

Následně aplikací Pythagorovy věty dostaneme konečný vztah:

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = X_{1\sigma} + X'_{2\sigma} \quad (2.13)$$

Stejně jako u odporu platí zjednodušení o rovnosti reaktanci na obou napěťových stranách transformátoru.

2.2.2 Stav naprázdno

Naprázdnno znamená, že transformátor je nulově zatížen. Výstupní spojky jsou rozpojeny, výstupní proud je nulový a proud naprázdno I_0 se rovná vstupnímu. Rovněž v tomto stavu se generují při střídavé magnetizaci magn. tokem ztráty. Mezi ně zařazujeme ztráty v železe ΔP_{Fe} , které jsou tvořeny ztrátami zapříčiněné hysterezí a vířivými proudy. Dále sem patří s minimální velikostí Joulový ztráty ΔP_{j0} , které hlavně pro velké stroje můžeme bez obav velké chyby zanedbat, jelikož jsou úměrné kvadrátu proudu naprázdno, který u těchto strojů dosahuje hodnot do jednoho procenta jmenovitého proudu I_n .

Obecně platí:

$$\Delta P_0 = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{j0} \quad (2.14)$$

Při návrhu transformátoru si hledíme toho, aby byly ztráty co nejmenší, resp. aby byl provoz z ekonomického hlediska neoptimálnější. Proto se držíme trendu, aby byl poměr mezi ztrátami naprázdno a nakrátko cca 1:4 - 1:3.

Důvod je ten, že jsou ztráty v železe hrazeny ze sítě proudem I_{Fe} . A to jest tehdy, kdy je připojeno na napětí (*tehdy ve všech případech*). Naproti tomu Joulovy ztráty stavu nakrátko jsou úměrné druhé mocnině zatěžovacího proudu a svého maxima dosahují při špičkových stavech, při kterých se provozují v daleko menší míře než v normálním pracovním režimu. Proto je rozumné mít menší ztráty v železe, resp. ztráty naprázdno.

Z náhradního schématu je vidět, že proud prochází přes primární část podélné větve a přes celou příčnou větev. Ztráty vznikají na činném fiktivním odporu R_{Fe} magn. obvodu a na odporu vinutí R_1 . Platí pro ně vztah:

$$\Delta P_0 = m(R_1 I_0^2 + R_{Fe} I_{Fe}^2) \quad (2.15)$$

kde

- m počet fází
- R_1, R_{Fe} odpor vinutí a fiktivní odpor magn. obvodu
- I_0 proud naprázdno
- I_{Fe} proud v železe

Vezme-li na vědomí, že platí $R_{Fe} \gg R_1$, nedopustíme se velké nepřesnosti. Můžeme pokládat ztráty naprázdno za ztráty v železe.

$$\Delta P_0 \approx \Delta P_{Fe} = m R_{Fe} I_{Fe}^2 \quad (2.16)$$

Odtud vychází vztah pro velikost odporu R_{Fe}

$$R_{Fe} = \frac{\Delta P_{Fe}}{3 I_{Fe}^2} = \frac{U_n^2}{\Delta P_{Fe}} \quad (2.17)$$

Máme zaveden fiktivní činný odpor. Schází vyřešit druhý prvek paralelní větve. Opět fiktivní veličina popisující vliv indukovaného napětí ve vinutí na velikosti magnetizačního proudu. Existence proudu je zde proto, že transformátor není ideální, nemá nekonečnou magn. vodivost a je nutné dodávat vstupním vinutím určité množství proudu, aby se vytvořil magn. tok [6]. K vyjádření definičního vztahu pro reaktanci opět vyjdeme z podobné filosofie jako u stavu nakrátko, kde jsme brali na vědomí, že se rovná impedance nakrátko s napětím nakrátko v p. j. . V druhém případě, v příčném provedení, je podobná formule - proud naprázdno se rovná příčné admitanci y_0 v p. j. při stavu naprázdno.

Vypočteme susceptanci B_μ podle vztahu 2.18

$$B_\mu = \sqrt{Y_0^2 - \frac{1}{R_{Fe}^2}} \quad (2.18)$$

Provedeme převrácenou hodnotu a dostaneme magnetizační reaktanci X_μ

$$X_\mu = \frac{1}{B_\mu} = \frac{U_{i1}}{I_\mu} \quad (2.19)$$

2.3 Výpočet prvků transformátoru

V této kapitole názorně předvedeme výpočet parametrů transformátorů v přenosové a distribuční soustavě, které dále využijeme při simulování transformátoru pro charakteristická zapojení.

2.3.1 Transformátor v přenosové soustavě

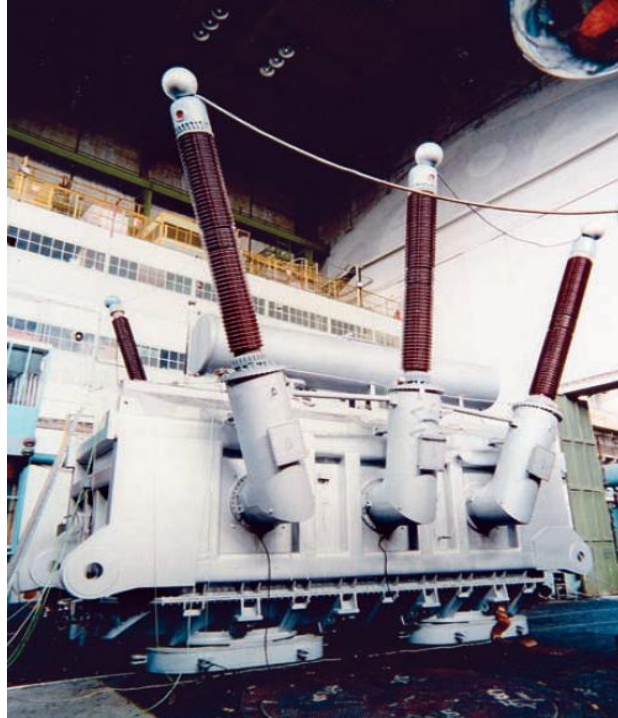
Mezi transformátory přenosové soustavy zařazujeme takové, které vyvádí elektrický výkon přímo z elektráren velkých výkonů nebo přenáší výkon z napěťových hladin 220, 400 kV na nižší pro distribuční rozvod ke konečným zákazníkům.

Zvolil jsem si transformátor o výkonu 410 MVA od společnosti ETD Transformátory, a. s. . Na trh jej dodává v provedení YNd5, s chlazením typu ODAF - z angl. zkratky Oil Directed Air Forced. Z překladu to znamená, že vinutí jsou řízeně chlazena proudem oleje a nádoba ofukována vzduchem z ventilátorů. Spuštění ventilátorů závisí na teplotě oleje. Je vybavené frekvenčními měniči, kteří regulují otáčky a tím udržují konstantní teplotu oleje v nádobě.

Parametry transformátoru:

- Jmenovitý výkon: $S_n=410$ MVA
- Jmenovité napětí strany vyššího napětí: $U_{n1}=410$ kV
- Jmenovité napětí strany nižšího napětí: $U_{n2}=22$ kV
- Ztráty naprázdno: $\Delta P_0=224$ kW
- Ztráty nakrátko: $\Delta P_k=668$ kW

- Napětí nakrátko: $u_k=12,5 \%$
- Proud naprázdno: $i_0=0,2 \%$



Obr. 2.3: Transformátor přenosové soustavy z 22 kV na 410 kV [13]

2.3.1.1 stav nakrátko

- impedance nakrátko Z_k

$$Z_k = \frac{u_k}{100} \frac{U_{n1}^2}{S_n}$$

$$Z_k = \frac{12,5}{100} \frac{(410 \cdot 10^3)^2}{410 \cdot 10^6} = 51,25 \Omega$$

- odpory vinutí R_1, R_2'

$$R_k = \Delta P_k \left(\frac{U_{n1}}{S_n} \right)^2$$

$$R_k = 668 \cdot 10^3 \left(\frac{410 \cdot 10^3}{410 \cdot 10^6} \right)^2 = 0,668 \Omega$$

činné odpory vinutí R_1, R_2' jsou poloviční vůči R_k

$$R_1 = R_2' = 0,334 \Omega$$

- rozptylové reaktance $X_{1\sigma}, X_{2\sigma}'$

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = X_{1\sigma} + X_{2\sigma}'$$

$$X_k = \sqrt{51,25^2 - 0,668^2} = 51,246 \Omega$$

rozptylové reaktance $X_{1\sigma}, X_{2\sigma}'$ jsou poloviční vůči X_k

$$X_{1\sigma} = X_{2\sigma}' = 25,623 \Omega$$

- rozptylové indukčnosti $L_{1\sigma}, L_{2\sigma}'$

$$L_{\sigma} = L_{1\sigma} + L_{2\sigma}' = \frac{X_k}{\omega}$$

$$L_{1\sigma} = L_{2\sigma}' = \frac{25,623}{2\pi \cdot 50} = 0,082 \text{ H}$$

2.3.1.2 stav naprázdno

- admittance naprázdno Y_0

$$Y_0 = \frac{i_0}{100} \frac{S_n}{U_{n1}^2}$$

$$Y_0 = \frac{0,2}{100} \frac{410 \cdot 10^6}{(410 \cdot 10^3)^2} = 4,878 \cdot 10^{-6} \text{ S}$$

- odpory vinutí R_{Fe}

$$R_{Fe} = \frac{U_{n1}^2}{\Delta P_{Fe}}$$

$$R_{Fe} = \frac{(410 \cdot 10^3)^2}{224 \cdot 10^3} = 750\,447 \Omega$$

- magnetizační reaktance X_μ

$$B_\mu = \sqrt{Y_0^2 - \frac{1}{R_{Fe}^2}}$$

$$X_\mu = \frac{1}{B_\mu} = \frac{1}{\sqrt{Y_0^2 - \frac{1}{R_{Fe}^2}}} = \frac{1}{\sqrt{(4,878 \cdot 10^{-6})^2 - \frac{1}{750\,447^2}}} = 213\,108 \, \Omega$$

- magnetizační indukčnost L_μ

$$L_\mu = \frac{X_\mu}{\omega}$$

$$L_\mu = \frac{213\,108}{2\pi \cdot 50} = 678,34 \, \text{H}$$

2.3.2 Transformátor v distribuční soustavě

Tyto transformátory jsou nejčtenějšími ze všech transformátorů. Rozvádí elektrickou energii v širším spektru napěťových hladin od 110 kV, po vn až nn.

Pro výpočet jsem zvolil transformátor vyráběný slovenskou společností BEZ Transformátory, a. s. s měděným vinutím o jmenovitém výkonu $S_n=2 \text{ MVA}$, zapojením Dyn1, chlazením ONAN (*olejové přirozené chlazení se vzduchem chlazenou nádobou*) a s převodem napětí s napětí 22 kV na 0,4 kV.

Parametry transformátoru:

- Jmenovitý výkon: $S_n=2 \text{ MVA}$
- Jmenovité napětí strany vyššího napětí: $U_{n1}=22 \text{ kV}$
- Jmenovité napětí strany nižšího napětí: $U_{n2}=0,4 \text{ kV}$
- Ztráty naprázdno: $\Delta P_0=3,1 \text{ kW}$
- Ztráty nakrátko: $\Delta P_k=26 \text{ kW}$
- Napětí nakrátko: $u_k=6 \%$

- Proud naprázdno: $i_0=0,5 \%$



Obr. 2.4: Transformátor distribuční soustavy z 0,4 kV na 22 kV [14]

2.3.2.1 stav nakrátko

- impedance nakrátko Z_k

$$Z_k = \frac{u_k}{100} \frac{U_{n1}^2}{S_n}$$

$$Z_k = \frac{6}{100} \frac{(22 \cdot 10^3)^2}{2 \cdot 10^6} = 14,52 \Omega$$

- odpory vinutí R_1, R_2'

$$R_k = \Delta P_k \left(\frac{U_{n1}}{S_n} \right)^2$$

$$R_k = 26 \cdot 10^3 \left(\frac{22 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^6} \right)^2 = 3,146 \Omega$$

činné odpory vinutí R_1, R_2' jsou poloviční vůči R_k

$$R_1 = R_2' = 1,573 \Omega$$

- rozptylové reaktance $X_{1\sigma}, X_{2\sigma}'$

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = X_{1\sigma} + X_{2\sigma}'$$

$$X_k = \sqrt{14,52^2 - 3,146^2} = 14,175 \Omega$$

rozptylové reaktance $X_{1\sigma}, X_{2\sigma}'$ jsou poloviční vůči X_k

$$X_{1\sigma} = X_{2\sigma}' = 7,088 \Omega$$

- rozptylové indukčnosti $L_{1\sigma}, L_{2\sigma}'$

$$L_{\sigma} = L_{1\sigma} + L_{2\sigma}' = \frac{X_k}{\omega}$$

$$L_{1\sigma} = L_{2\sigma}' = \frac{7,088}{2\pi \cdot 50} = 0,023 \text{ H}$$

2.3.2.2 stav naprázdno

- admitance naprázdno Y_0

$$Y_0 = \frac{i_0}{100} \frac{S_n}{U_{n1}^2}$$

$$Y_0 = \frac{0,5}{100} \frac{2 \cdot 10^6}{(22 \cdot 10^3)^2} = 2,066 \cdot 10^{-5} \text{ S}$$

- odpory vinutí R_{Fe}

$$R_{Fe} = \frac{U_{n1}^2}{\Delta P_{Fe}}$$

$$R_{Fe} = \frac{(22 \cdot 10^3)^2}{3,1 \cdot 10^3} = 156 \, 130 \Omega$$

- magnetizační reaktance X_{μ}

$$B_{\mu} = \sqrt{Y_o^2 - \frac{1}{R_{Fe}^2}}$$

$$X_{\mu} = \frac{1}{B_{\mu}} = \frac{1}{\sqrt{Y_o^2 - \frac{1}{R_{Fe}^2}}} = \frac{1}{\sqrt{(2,066 \cdot 10^{-5})^2 - \frac{1}{156\,130^2}}} = 50\,911 \, \Omega$$

- magnetizační indukčnost L_{μ}

$$L_{\mu} = \frac{X_{\mu}}{\omega}$$

$$L_{\mu} = \frac{50\,911}{2\pi \cdot 50} = 162,06 \, \text{H}$$

2.4 Matematický popis diferenciálních modelů transformátoru

(matematický popis byl sestaven za pomoci podkladu [11])

Popis se skládá ze schématu strany primární a sekundární, které respektuje dané zapojení. Doplněné o parametry v každé fázi, které charakterizují transformátor. Pod nimi jsou sepsány všechny rovnice v diferenciální podobě jak pro obě napěťové hladiny transformátoru, tak i pro magn. obvod. Při tvorbě rovnic magn. obvodu je u všech variant uvažován proměnný magn. odpor R_m v závislosti na magn. toku, čímž je model vylepšen o respektování sycení magn. obvodu.

Pro běžné přechodné a ustálené stavy je již model dostačující. Nicméně jsou případy, kdy je zapotřebí neopomenout hysterezi. Model by musel být rozšířen zavedením tří úprav:

- a) Nově dvojznačně definovaný magn. odpor

$$\text{pro } \frac{d\phi}{dt} > 0 \text{ a } \frac{d\phi}{dt} < 0 \quad (2.20)$$

- b) Nenulová šířka hysterezní smyčky v ose H

Zavede se do rovnic magn. obvodu (2.23), (2.28) a (2.31) koercitivní sílu H_c s různým

znaménkem při $\frac{d\phi}{dt} > 0$ a $\frac{d\phi}{dt} < 0$

$$c) H_c = f(|U|)$$

Respektuje dynamické vlastnosti feromagnetika a proměnnou šířku hysterezní smyčky vzhledem k sycení.

Následující modely nerespektují tyto úpravy.

2.4.1 Zapojení hvězda - hvězda (Yy)

definované symboly: U_i napětí zdroje

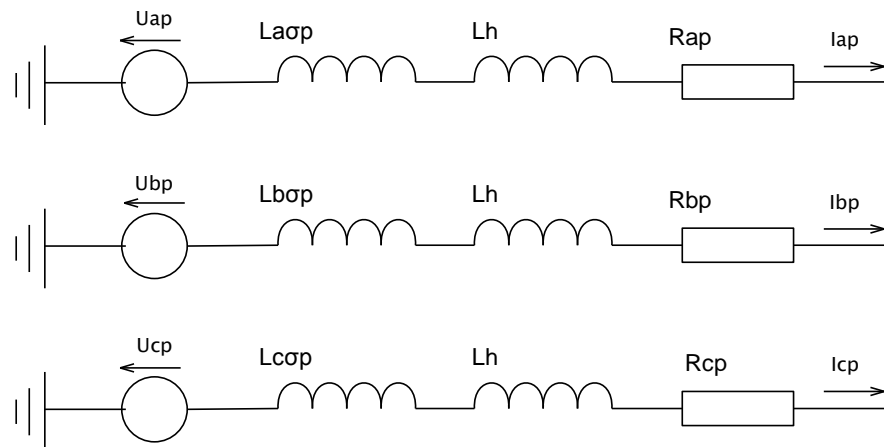
$L_{i\sigma}^P, L_{i\sigma}^S$ rozptylová indukčnost primární/sekundární strany fáze i

R_i^P, R_i^S odpor primární/sekundární strany fáze i

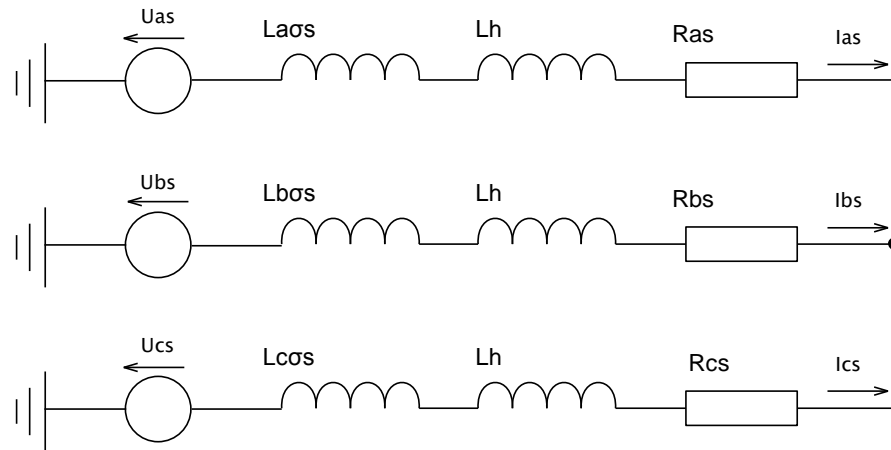
I_i^P, I_i^S proud v primárním/sekundárním vinutí fáze i

n_i^P, n_i^S počet závitů primární/sekundární strany fáze i

L_h hlavní indukčnost magn. obvodu



Obr. 2.5: Zapojení hvězda - hvězda (primární vinutí) [11]



Obr. 2.6: Zapojení hvězda - hvězda (sekundární vinutí) [11]

primární strana :

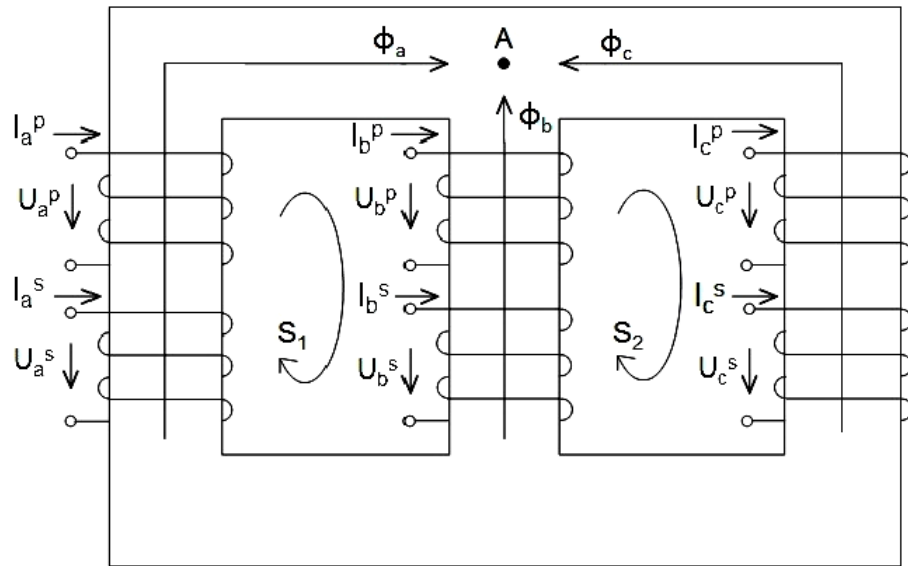
$$\begin{aligned}
 U_a^p &= R_{a'a}^{pp} + L_{a\sigma}^p \frac{di_a^p}{dt} + n_a^p \frac{d\phi_a}{dt} \\
 U_b^p &= R_{b'b}^{pp} + L_{b\sigma}^p \frac{di_b^p}{dt} + n_b^p \frac{d\phi_b}{dt} \\
 U_c^p &= R_{c'c}^{pp} + L_{c\sigma}^p \frac{di_c^p}{dt} + n_c^p \frac{d\phi_c}{dt}
 \end{aligned} \tag{2.21}$$

sekundární strana

$$\begin{aligned}
 U_a^s &= R_{a'a}^{ss} + L_{a\sigma}^s \frac{di_a^s}{dt} + n_a^s \frac{d\phi_a}{dt} \\
 U_b^s &= R_{b'b}^{ss} + L_{b\sigma}^s \frac{di_b^s}{dt} + n_b^s \frac{d\phi_b}{dt} \\
 U_c^s &= R_{c'c}^{ss} + L_{c\sigma}^s \frac{di_c^s}{dt} + n_c^s \frac{d\phi_c}{dt}
 \end{aligned} \tag{2.22}$$

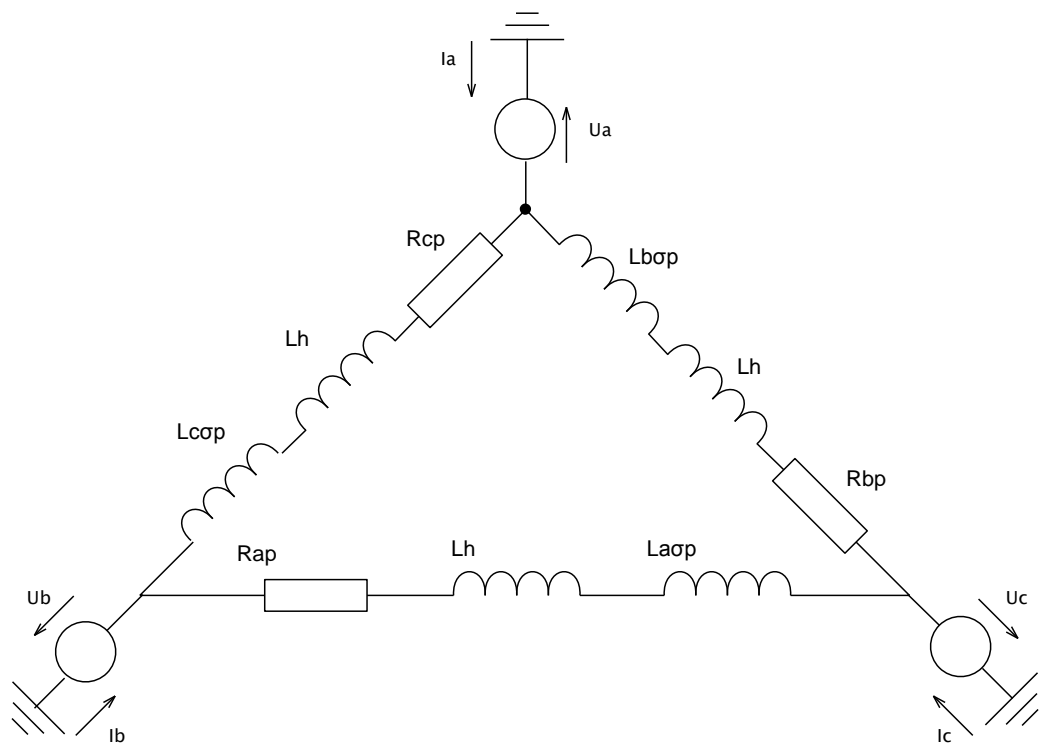
magnetický obvod

$$\begin{aligned}
 S_1: 0 &= R_{ma}(\phi_a)\phi_a - n_{a'a}^{pp}i_a^p - n_{a'a}^{ss}i_a^s - R_{mb}(\phi_b)\phi_b + n_{b'b}^{pp}i_b^p + n_{b'b}^{ss}i_b^s \\
 S_2: 0 &= R_{mb}(\phi_b)\phi_b - n_{b'b}^{pp}i_b^p - n_{b'b}^{ss}i_b^s - R_{mc}(\phi_c)\phi_c + n_{c'c}^{pp}i_c^p + n_{c'c}^{ss}i_c^s \\
 A: 0 &= \phi_a + \phi_b + \phi_c
 \end{aligned} \tag{2.23}$$

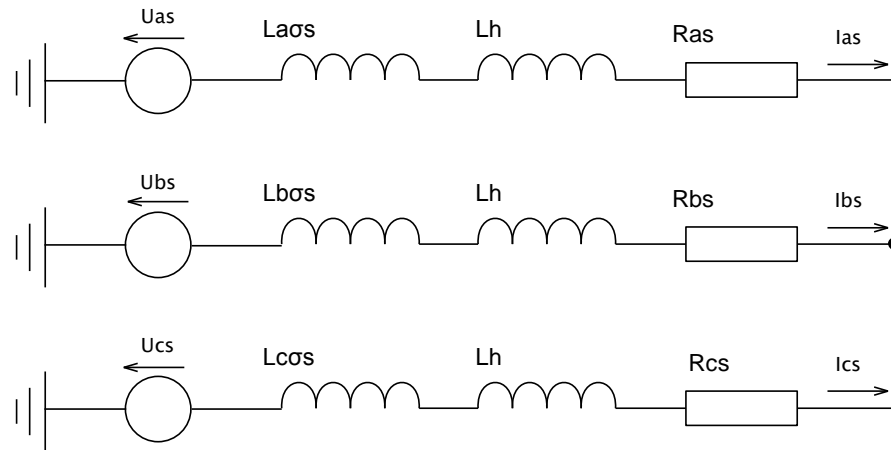


Obr. 2.7: Grafický popis magnetického obvodu

2.4.2 Zapojení hvězda - trojúhelník (Yd)



Obr. 2.8: Zapojení hvězda - trojúhelník (primární vinutí) [11]



Obr. 2.9: Zapojení hvězda - trojúhelník (sekundární vinutí) [11]

primární strana

$$\begin{aligned}
 0 &= -U_b + R_{c'c'}^{pp} + L_{c\sigma}^p \frac{dI_c^p}{dt} + n_c \frac{d\phi_c}{dt} + U_a \\
 0 &= -U_a + R_{b'b'}^{pp} + L_{b\sigma}^p \frac{dI_b^p}{dt} + n_b \frac{d\phi_b}{dt} + U_c \\
 0 &= -U_c + R_{a'a'}^{pp} + L_{a\sigma}^p \frac{dI_a^p}{dt} + n_a \frac{d\phi_a}{dt} + U_b
 \end{aligned} \tag{2.24}$$

$$\begin{aligned}
 0 &= I_c^p - I_b^p - I_a^p \\
 0 &= I_a^p - I_c^p - I_b^p \\
 0 &= I_b^p - I_a^p - I_c^p
 \end{aligned} \tag{2.25}$$

sekundární strana

$$\begin{aligned}
 U_a^s &= R_{a'a'}^{ss} + L_{a\sigma}^s \frac{dI_a^s}{dt} + n_a^s \frac{d\phi_a}{dt} \\
 U_b^s &= R_{b'b'}^{ss} + L_{b\sigma}^s \frac{dI_b^s}{dt} + n_b^s \frac{d\phi_b}{dt} \\
 U_c^s &= R_{c'c'}^{ss} + L_{c\sigma}^s \frac{dI_c^s}{dt} + n_c^s \frac{d\phi_c}{dt}
 \end{aligned} \tag{2.26}$$

$$0 = I_a^s + I_b^s + I_c^s \tag{2.27}$$

magnetický obvod

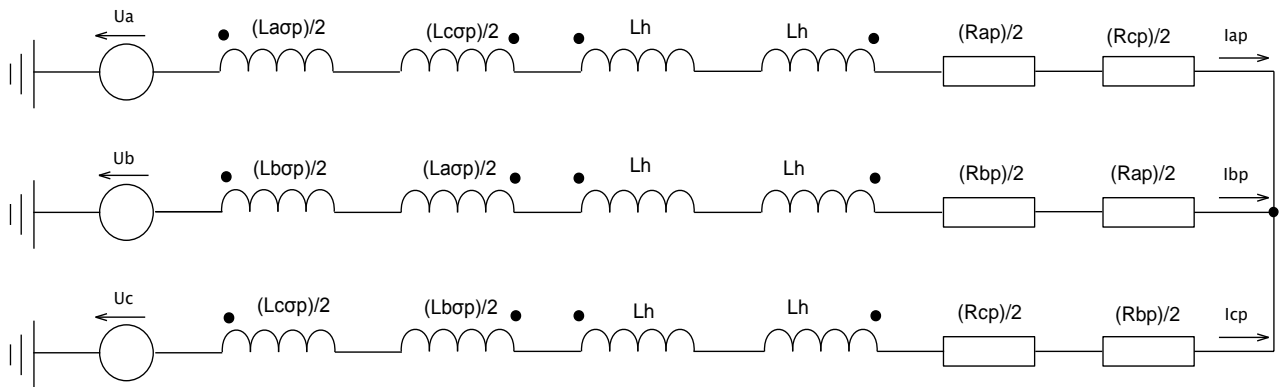
$$S_1: 0 = R_{ma}(\phi_a)\phi_a - n_{a'a'}^{pp} - n_{a'a'}^{ss} - R_{mb}(\phi_b)\phi_b + n_{b'b'}^{pp} + n_{b'b'}^{ss}$$

$$S_2 : 0 = R_{mb}(\phi_b)\phi_b - n_b^p i_b^p - n_b^s i_b^s - R_{mc}(\phi_c)\phi_c + n_c^p i_c^p + n_c^s i_c^s \quad (2.28)$$

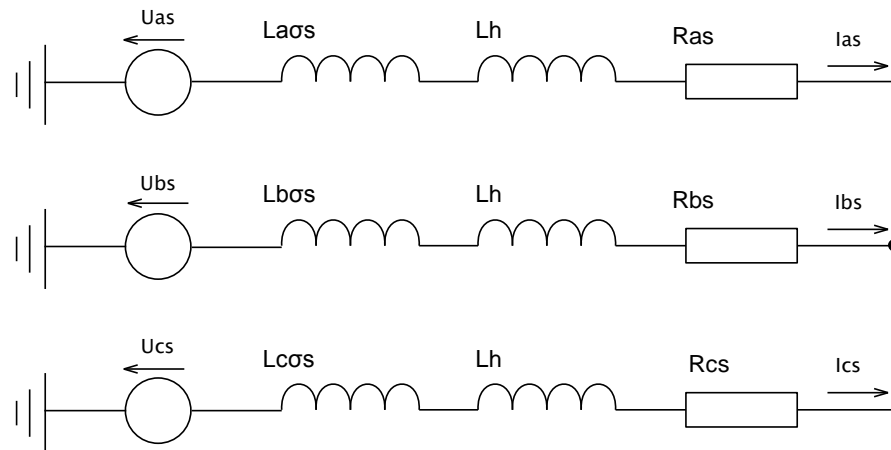
$$A : 0 = \phi_a + \phi_b + \phi_c$$

Grafický popis magn. obvodu je autentický s zapojením hvězda - hvězda (Yy)

2.4.3 Zapojení hvězda - lomená hvězda (Yz)



Obr. 2.10: Zapojení hvězda - lomená hvězda (primární vinutí)



Obr. 2.11: Zapojení hvězda - lomená hvězda (sekundární vinutí) [11]

primární strana

$$U_a^p = \frac{R_a^p}{2} i_a^p + \frac{L_{a\sigma}^p}{2} \frac{di_a^p}{dt} + \frac{n_a^p}{2} \frac{d\phi_a}{dt} - \frac{n_c^p}{2} \frac{d\phi_c}{dt} + \frac{R_c^p}{2} i_a^p - \frac{L_{c\sigma}^p}{2} \frac{di_a^p}{dt}$$

$$U_b^p = \frac{R_b^p}{2} i_b^p + \frac{L_{b\sigma}^p}{2} \frac{di_b^p}{dt} + \frac{n_b^p}{2} \frac{d\phi_b}{dt} - \frac{n_a^p}{2} \frac{d\phi_a}{dt} + \frac{R_a^p}{2} i_b^p - \frac{L_{a\sigma}^p}{2} \frac{di_b^p}{dt} \quad (2.29)$$

$$U_c^p = \frac{R_c^p}{2} I_c^p + \frac{L_{c\sigma}^p}{2} \frac{dI_c^p}{dt} + \frac{n_c^p}{2} \frac{d\phi_c}{dt} - \frac{n_b^p}{2} \frac{d\phi_b}{dt} + \frac{R_b^p}{2} I_c^p - \frac{L_{b\sigma}^p}{2} \frac{dI_c^p}{dt}$$

sekundární strana

$$U_a^s = R_a^s I_a^s + L_{a\sigma}^s \frac{dI_a^s}{dt} + n_a^s \frac{d\phi_a}{dt}$$

$$U_b^s = R_b^s I_b^s + L_{b\sigma}^s \frac{dI_b^s}{dt} + n_b^s \frac{d\phi_b}{dt} \quad (2.30)$$

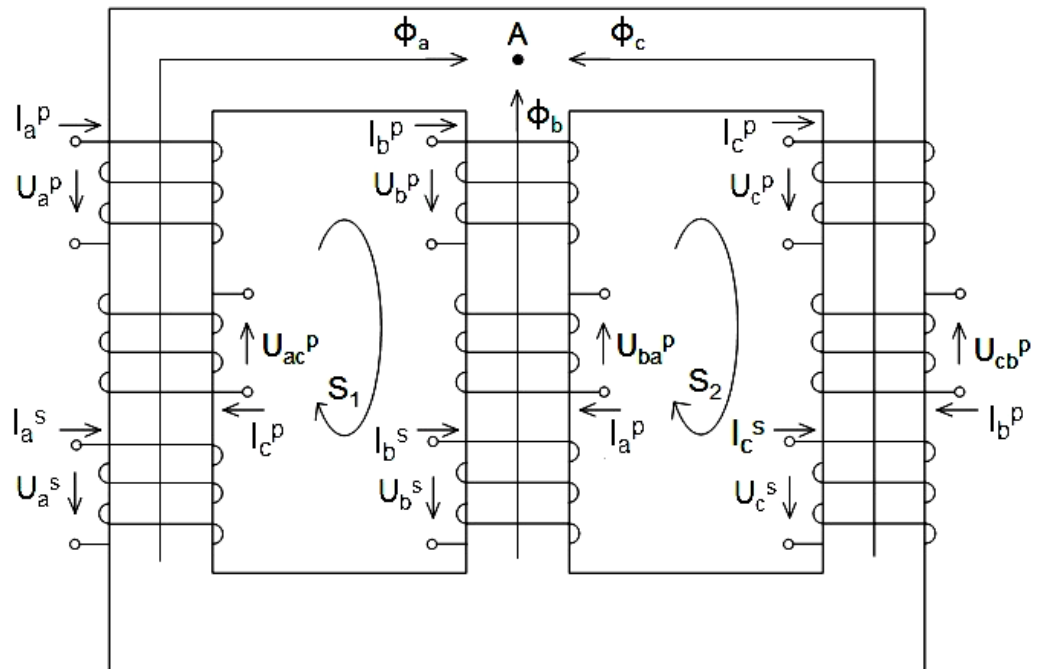
$$U_c^s = R_c^s I_c^s + L_{c\sigma}^s \frac{dI_c^s}{dt} + n_c^s \frac{d\phi_c}{dt}$$

magnetický obvod

$$S_1: 0 = -n_a^s I_a^s + \frac{n_a^p}{2} I_c^p - \frac{n_a^p}{2} I_a^p + R_{ma}(\phi_a)\phi_a - R_{mb}(\phi_b)\phi_b + \frac{n_b^p}{2} I_b^p - \frac{n_b^p}{2} I_a^p + n_b^s I_b^s$$

$$S_2: 0 = -n_b^s I_b^s + \frac{n_b^p}{2} I_a^p - \frac{n_b^p}{2} I_b^p + R_{mb}(\phi_b)\phi_b - R_{mc}(\phi_c)\phi_c + \frac{n_c^p}{2} I_c^p - \frac{n_c^p}{2} I_b^p + n_c^s I_c^s \quad (2.31)$$

$$A: 0 = \phi_a + \phi_b + \phi_c$$



Obr. 2.12: Grafický popis magnetického obvodu

3 TVORBA MODELŮ TRANSFORMÁTORU V JAZYCE DYNAST

V současné době je spektrum nabídky počítačových simulací v elektroenergetice široká. Simulace poskytují snadnější pochopení podstaty chodu simulovaného objektu a dá se říct i jakousi prevencí před vznikem událostí, které by se s časem mohli objevit. Požadavky na ně kladené jsou dosti široké. Nestací, aby programy uměly řešit elektrické problémy. Často musejí ovládat také zákonitosti z oborů jako jsou např. mechanika, hydromechanika, teplo a jiné. Jedním z vhodných programů, používaných v energetice, je program DYNAST.

3.1 Program DYNAST

(zpracováno na základě podkladu [7])

Vznik a postupný vývoj simulačního programu DYNAST¹ se datuje ke konci sedmdesátých let na elektrotechnické fakultě ČVUT Praha. Program má pomoci uživateli věrně se přiblížit simulací a analýzou dynamického chování objektů k reálnému chování modelovaného zařízení. Cílem programu je poskytnout řešení složitých modelů bez širokých znalostí programovacích jazyků.

Dokáže simulovat a analyzovat lineární a nelineární dynamické soustavy, ke kterým nabízí program různé postupy k jejich popisu. Jedním z nich je popis rovnicemi implicitně algebraických, diferenciálních nebo jejich kombinací. Dále v grafické nadstavbě DYNCAD lze využít z nabídky prvků vícepólových fyzikálních schémat a schémat blokových. Pro takto zadané úlohy dokáže program analyzovat následující operace:

- Přejížděné průběhy na počáteční podmínky a buzení
- Statické a ustálené odezvy a jejich závislost na změnách parametrů
- Fourierovu analýzu ustálených periodických odezev
- Linearizaci v okolí pracovního bodu

Pro linearizované modely umí DYNAST:

- Laplaceovy obrazy odezev na buzení a počáteční stav
- Přenosové funkce a jejich koeficienty a kořeny polynomů
- Složky frekvenčních charakteristik přenosových funkcí

¹název vytvořen ze slov DYNamika A STATika

Výpočetní algoritmus programu DYNAST spočívá na dvou základních částí - volně šiřitelný program DYNAST Shell a řešič úlohy DYNAST Solver. Krátce si je popíšeme, ať víme jakou přesnou funkci mají a jaký je sled operací při řešení úlohy.

3.1.1 Dynast Shell

Integrované prostředí Dynast Shell slouží jako prostředník pro vytvoření simulační úlohy a její následné analýzy. V menu si vybíráte z nabídky možných způsobů řešení, jak danou úlohu vyřešíte. Buď to textovou formou či grafickou, dále pak nabízí dvě doplňkové funkce pro nadefinování nového submodelu a vytvoření knihovnic funkcí uživatelem.

Struktura textového souboru zadání úloh má jednotnou formu. Začíná na prvním řádku názvem analyzované úlohy. Následuje sekvence nepovinných funkčních předpisů, kde podle libosti může uživatel nakonfigurovat podobu výstupu v PDF souboru nebo HTML (*jaké grafy a jak se mají zobrazit, zadání úlohy, výpis skriptu a mnoho dalších*). Poté následuje blok SYSTEM, kde je popsána úloha soustavami nelineárních rovnic, tak i fyzikálními nebo blokovými schémata.

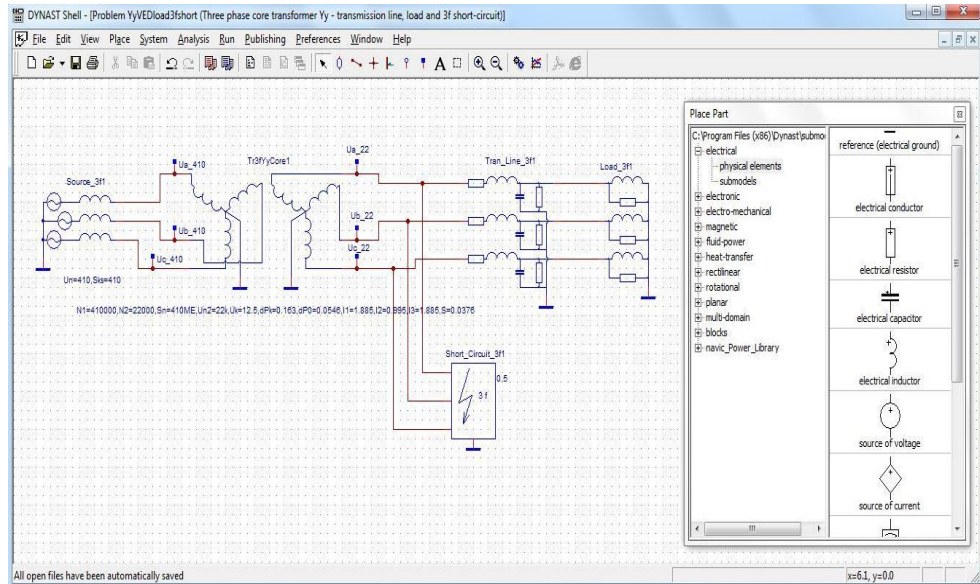
V poslední části definujete sekce, kde volíte metodu řešení, definujete meze, případně počáteční podmínky a jaké parametry se mají zobrazit v grafickém znázornění. Konec programu symbolizujeme příkazem *END.

Celková struktura programu:

```
*: Název úlohy
    ::: sekce konfigurace výstupu
*SYSTEM;
    data pro sekci SYSTEM
*sekce;
    data pro další sekci
*sekce;
    ...
*END;
```

Grafické prostředí je přehledné a intuitivní. V menu nechybí stejné funkce jako má textový editor. Nechybí nastavení metody analýzy v ANALYSIS módu, mód SYSTEM a RUN pro vložení textových zápisu prvků rovnou do textové souboru, aniž byste se musel

nutně na něj přecházet. K tomu je přidán mód pro grafické ztvárnění úlohy v módu PLACE. K zprehlednění vývojáři umístili obsah tohoto módu do lišty nabídky nejpoužívanějších příkazů. V PLACE najdeme veškeré značky fyzikálních prvků a základních bloků, ale i obsáhlé knihovny submodelů reálných část.

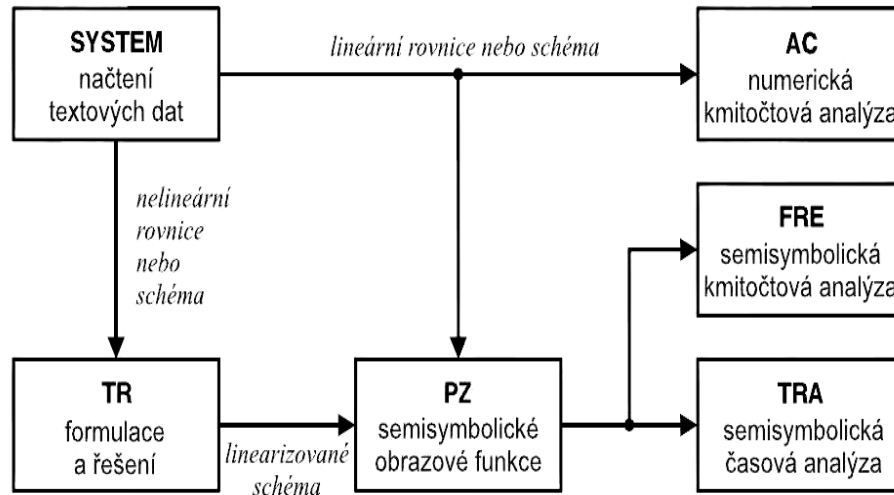


Obr. 3.1: Grafický editor včetně modelu

3.1.2 Dynast Solver

Jeho funkcí je spočítat zadanou úlohu popsanou v DYNAST Shellu a poslat zpět výsledky prostřednictvím DYNAST Shellu. Celý proces řešení probíhá on-line primárně na vzdáleném serveru, tj. na serveru tvůrců programu. Poskytuje neomezený počet řešitelných rovnic a aplikovaných výpočtových metod. Pokud se nelze připojit k internetu, mohou uživatelé využít program v režimu offline. Bez zakoupeného softwarového klíče se rozsah výpočtových operací velice snižuje (*na pouhých 8 diferenciálních rovnic*), nicméně základní úlohy program zvládá.

Řešič se skládá z několika sekcí, které mají na starost jednotlivé režimy analýzy. Strukturu a vzájemné vazby mezi sekcemi nám ukazuje obr. 3.2 .



Obr. 3.2: Skladba a vzájemné vazby DYNAST Solveru [7]

O sekci **SYSTEM** jsem se zmínil v úvodu, načítá z popisu modelu rovnice, fyzikální a bloková schémata. Identifikuje charakter řešené úlohy, zda se jedná o lineární nebo nelineární. Nelineárním charakterem se zabývá sekce **TR**. Analyzuje s několika opakováním pro jiné parametry jak přechodné odezvy dynamických soustav, tak ustálené stavy. Umí i u ustálených periodických průběhů vypočítat kmitočtové spektrum Fourierovou analýzou a linearizaci v okolí pracovního bodu.

Zbylé sekce se zabývají lineárními a linearizovanými systémy. Sekce **PZ** provádí semisymbolickou analýzu, z níž je schopna určit tvar přenosové funkce (*póly a nuly*) a obrazy Laplaceové transformace. Dále sekce **AC** se stará o numerickou kmitočtovou analýzu, sekce **FRE** o numerickou kmitočtovou analýzu semisymbolických přenosových funkcí a nakonec sekce **TRA** semisymbolicky a numericky analyzovat časové průběhy.

3.2 Modely třífázových transformátorů

Po instalaci programu DYNAST je knihovna funkcí obsahující kromě jiných součástí pro jiná odvětví, nedostačující k modelování třífázového transformátoru. Nacházejí se v ní pouze základní elektrické součástky. Proto bylo zapotřebí, rozšířit knihovnu o další prvky. Nejprve bylo nutné vytvořit si model jednofázového transformátoru. Pro tento model a později i pro další se popisy činnosti modelu prováděly v souborech typu submodel. Submodel se tak trochu liší od běžného popisu vyšetřovaného problému. Nemohou se v něm provádět analýzy, neplatí pro něj žádné časové a frekvenční závislosti. Slouží k editaci nového prvku a k popsání jeho vnitřního principu fungování.

Struktura každého submodelu je následující:

```

:: popis modelované reálné části
::: sekce konfigurace výstupu
submodel                               :: popis typu submodelu
pól,                                   :: popis pólu
...
pól/                                   :: popis pólu
parametr [= hodnota],                 :: [jednotka] popis parametru
parametr [= hodnota],                 :: [jednotka] popis parametru
...
parametr [= hodnota];                 :: [jednotka] popis parametru.
...
dynamika
...
EO@;
    :: proměnná [jednotka] popis proměnné
    ...

```

Na začátku skriptu se nepovinně objevuje funkční komentář uvozený dvojtečkami, který pojmenovává součástku v tabulce vlastností modelu (*Submodel Properties*). Pod ní následuje stejně jako u textového editoru, nastavení vzhledu výstupu pro publikaci. Na to navazuje jméno souboru submodelu a zároveň označení typu pro grafickou značku. Dále soupis pólu shodnými s uzly modelu a soupis parametrů, které se dají vně submodelu uživatelem specifikovat. V poslední části, v sekci dynamika, uživatel charakterizuje příkazy a rovnicemi chování submodelu.

3.2.1 Jednofázový transformátor

K vytvoření transformátoru vyjdeme z obecného předpisu pro submodel. V sekci dynamika jsme doplnili o příkazy, které respektují sycení magn. toku. Sycení má vliv na

velikost magn. odporu. Čím je větší, tím je magn. odpor větší. Proto míru sycení se v mých modelech respektuje proměnným magn. odpor R_m v závislosti na magn. toku, který v práci zavádím pomocí funkce $(1/\mu) = f(\phi)$ zadanou tabulkou. Obě veličiny jsem odečítal z poskytnuté magnetizační křivky. Hodnotu μ dostávám jako poměr intenzity magn. pole H a magn. indukce B . Magn. tok vypočteme podle vzorce 3.1 s neměnnou orientovanou plochou S , dodanou od tuzemských výrobců transformátorů.

$$\phi = \int_s \mathbf{B} d\mathbf{S} \quad (3.1)$$

$$\phi = \mathbf{B} \cdot \mathbf{S} \quad (3.2)$$

Abychom měli skutečnou závislost magn. odporu na magn. toku, stačí tabelovanou funkci vynásobit příslušnou délkou střední indukční čáry magn. toku daného jádra a vydělit jeho průřezem S . Pro jádrové zapojení řešení vyhovuje. Uživatel si akorát zvolí pro konkrétní magn. jádro jeho délku střední indukční čáry. Je zřejmé, že se budou velikosti lišit, krajní jádra ji mají o něco delší a ve výsledku vychází magn. odpor taktéž větší. O trochu komplikovanější je situace u plášťového provedení. Ke krajním jádrům jsou přiložena pomocná jádra, aby odlehčily oběma spojkám. Spojky se posléze vyrábějí s menším průřezem. Pro model to znamená nutně zahrnout jejich magn. odpory k magn odporu krajních jader jednoduše jejich vzájemnou paralelní kombinací. Toto opatření však přineslo potřebu vytvořit další model jednofázového transformátoru.

$$\text{magn. odpor jádra: } R_m = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{l_i}{S} \quad [\text{H}^{-1}] \quad (3.3)$$

- **jádrový typ:** Pro jednotlivé jádro se liší délkou střední indukční čáry l_i
- **plášťový typ:** Platné jen pro prostřední jádro

$$\text{magn. odpor krajního jádra plášťového typu } R_m = \frac{R_m^{\text{pom}} \cdot R_m^{\text{jadro}}}{R_m^{\text{pom}} + R_m^{\text{jadro}}} + R_m^{\text{SP}} \quad [\text{H}^{-1}] \quad (3.4)$$

R_m^{pom} ... magn. odpor pomocného jádra

R_m^{jadro} ... magn. odpor jádra

R_m^{SP} ... magn. odpor spojky

Máme vyřešenu otázku s magn. odpory. Zbývá nadefinovat parametry T-článku a rovnici pro celkový hlavní magn. tok. V grafickém editoru si nakreslíme transformátor v klasickém

provedení jako T-článek. Hodnoty odporů a rozptylových indukčností zadáme obecně, jelikož se hodnoty počítají v nadřazeném submodelu třífázového transformátoru daného zapojení a jsou z něj dosazovány do obecného pojmenování.

Vzájemnou vazbu mezi oběma vinutími nelze snadno v programu DYNAST realizovat. Program neumí pracovat s proměnnou indukčností v závislosti na proměnném procházejícím proudu, a proto se vazba nahrazuje dvěma řízenými napěťovými zdroji, jejichž napětí u_1 a u_2 jsou závislé na magn. toku z Faradayova indukčního zákona.

$$u_1 = N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt} \text{ [V]} \quad (3.5)$$

$$u_2 = N_2 \cdot \frac{d\phi}{dt} \text{ [V]} \quad (3.6)$$

K určení hlavního magn. toku vyjdeme z Hopkinsova zákona. Magn. napětí generují obě indukčnosti. V našem případě napěťové zdroje. Magn. odpor je již nadefinován. Mění se v závislosti na provozním stavu transformátoru.

Pro náš případ má tuto podobu:

$$\phi = \frac{N_1 \cdot I_1 + N_2 \cdot I_2}{R_m} \text{ [Wb]} \quad (3.7)$$

3.2.2 Třífázový transformátor

Po naprogramování jednofázového transformátoru se plynule přesune k třífázovému. Postup je podobný. Jako parametry se v submodelu vkládají štitkové hodnoty a rozměry magn. obvodu - délka středních indukční čar jádra, spojek, eventuálně pomocného jádra a údaj o velikosti průřezu. V sekci dynamika se z nich vypočítají prvky T-článku transformátoru, vloží se za stejné prvky jednotlivých modelů jednofázových transformátorů, z nichž je třífázový transformátor sestaven. V grafickém editoru pak tyto jednofázové transformátory patřičně spojíme podle konkrétního typu zapojení.

4 OVĚŘENÍ SPRÁVNÉ FUNKČNOSTI MODELU NA REÁLNÝCH PARAMETRECH PRO ZÁKLADNÍ PROVOZNÍ STAVY

Po dokončení programů následuje kontrola, zda opravdu fungují tak, jak v reálném provozu pracuje. Abych mohl relevantně posoudit jejich správnost, využil jsem vypočítaných parametrů ve druhém bodě diplomové práce k provedení simulace transformátoru v zapojení YNyn pro stavy nakrátko a naprázdno. Provedl jsem analýzu průběhů: Průběhy proudů před vstupem do transformátoru jsem porovnal s průběhy, které mi poskytlo řešení diferenciální rovnice pro proud nakrátko a naprázdno.

4.1 Model při stavu nakrátko

Řešíme-li třífázový transformátor při stavu nakrátko, můžeme pro výpočet provést zjednodušení. Jako první připadá k úvahu převedení problému na jednofázový transformátor. Vypočte se pro jednu fázi a u ostatních fází se průběh upraví o fázový úhel zdroje, který ji napájí. Druhé zjednodušení spočívá v zanedbání vlivu magnetizační reaktance a činné části impedance příčné větve náhradního schématu transformátoru. Tudiž na průběh proudu při stavu nakrátko bude mít vliv jako jediná podélná větev.

Obvod popíšeme diferenciální rovnicí:

$$R_k \cdot i_k + L_\sigma \frac{di_k}{dt} = \frac{u_k}{100} \cdot U_m \cdot \sin(\omega t + \alpha) \quad (4.1)$$

kde $\alpha = 0^\circ \dots$ fáze a

$\alpha = -120^\circ \dots$ fáze b

$\alpha = 120^\circ \dots$ fáze c

Výsledný proud nakrátko z diferenciální rovnice se skládá ze dvou složek - přechodná (*stejnoseměrná*) a ustálená (*střídavá*).

$$i_k(t) = i_{ko}(t) + i_{kp}(t) \quad (4.2)$$

Přechodná složka se řeší jako homogenní rovnice dosazením obecného exponenciálního vztahu, kde figurují mezi neznámými integrační konstanta K a Lagrangeův koeficient λ .

$$R_k \cdot i_k + L_\sigma \frac{di_k}{dt} = 0$$

$$R_k \cdot (K \cdot e^{\lambda t}) + L_\sigma \frac{d(K \cdot e^{\lambda t})}{dt} = 0$$

$$\lambda = -\frac{R_k}{L_\sigma} = -\frac{0,668}{0,164} = -4,073$$

$$\tau = -\frac{1}{\lambda} = -\frac{1}{-4,073} = 0,246 \text{ s}$$

Střídavou složku spočteme jednoduše z Ohmova zákona za použití symbolicko-komplexní metody.

$$\overline{i_{kp}} = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{\overline{U_{fmax}}}{Z_k} \quad (4.3)$$

$$\overline{i_{kp}} = \frac{12,5}{100} \cdot \frac{\frac{410|0^\circ}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2}}{0,668 + i51,246} = 0,817 \angle -89,25^\circ \text{ kA}$$

Dosadíme do vztahu 4.2

$$i_k(t) = K \cdot e^{-4,073t} + 0,817 \cdot \sin(\omega t - 89,25^\circ)$$

Integrační konstantu K učíme z nulové počáteční podmínky pro $t=0$ s.

$$K = 0,817$$

Výsledné matematické vyjádření proudů nakrátko

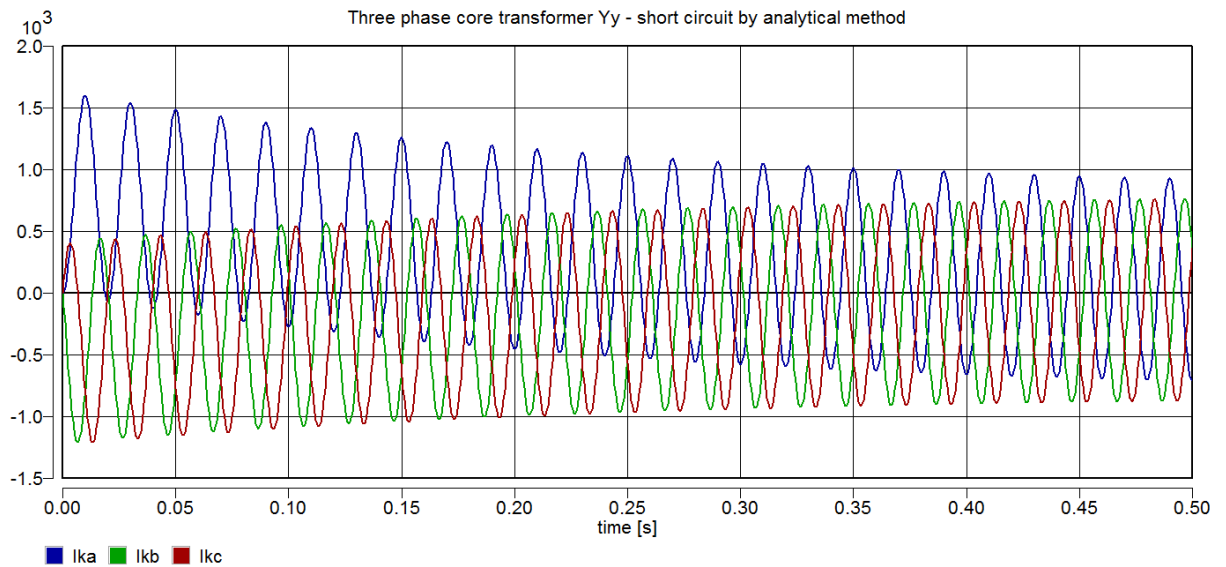
$$i_{ka}(t) = 0,817 \cdot e^{-4,073t} + 0,817 \cdot \sin(\omega t - 89,25^\circ) \text{ kA}$$

$$i_{kb}(t) = -0,399 \cdot e^{-4,073t} + 0,817 \cdot \sin(\omega t - 209,25^\circ) \text{ kA}$$

$$i_{kc}(t) = -0,418 \cdot e^{-4,073t} + 0,817 \cdot \sin(\omega t + 30,75^\circ) \text{ kA}$$

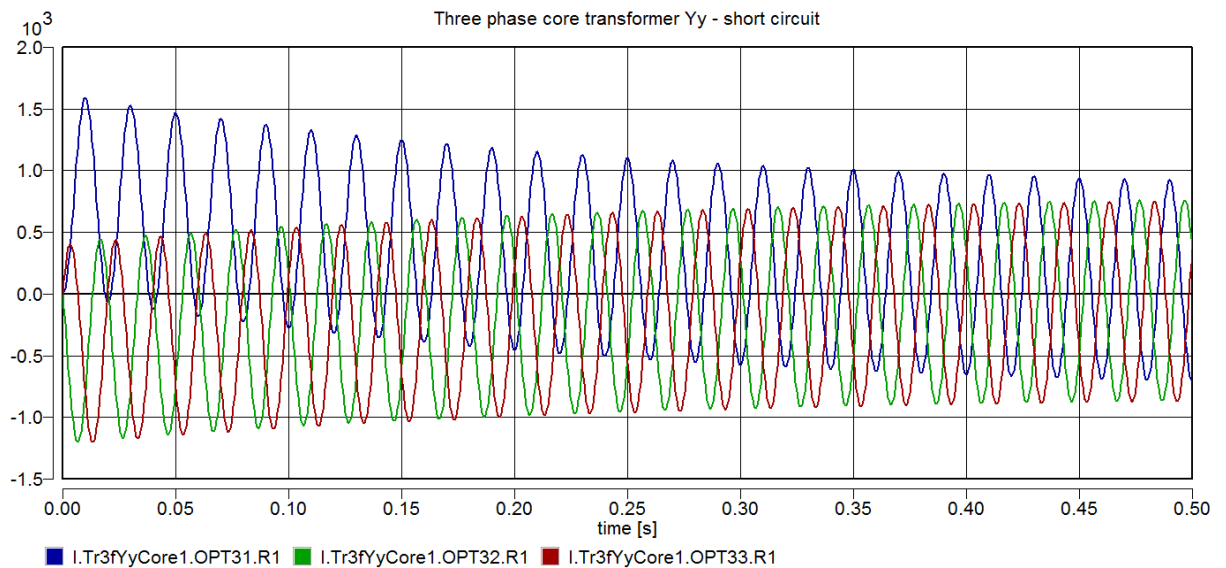
Pro transformátor plášťového provedení magn. obvodu jsou výpočty a výsledky totožné.

Graficky průběhy proudů vypadají takto:



Obr. 4.1: Průběhy proudů nakrátko - výpočtem

a pomocí zhotoveného modelu v programu DYNAST



Obr. 4.2: Průběhy proudů nakrátko - program DYNAST

Průběhy jsou téměř identické. Okamžité hodnoty se liší řádově o jednotky ampér. Například v místě vrcholu obalové křivky vychází od matematického vyjádření o 9,74 A (0,58 %) menší a o 22,7 A (1,39 %) větší od teoretické hodnoty amplitudy, když by transformátorem procházel jmenovitý proud I_n .

V ustáleném stavu vycházejí o 5,485 A (0,65 %) menší od matematického vyjádření a o 20,69 A (2,53 %) větší od teoretické hodnoty amplitudy.

Výpočet R_1 a R_2 pro jiná zapojení

V předchozím výpočtu jsme předvedli, jak by se počítal proud nakrátko pro zapojení vinutí Yy . U jiných zapojení je postup totožný. Liší se velikostmi pasivních prvků R a X , které se určí z bilance tepelných ztrát. Uvedl bych to na příkladu zapojení Yd . Vinutí zapojené do trojúhelníka má o odmocninu ze tří větší odpor, takže se zařízení více ohřívá. Na druhou stranu jím prochází, také o odmocninu ze tří, naopak menší proud. Vložíme do rovnice ztrát nakrátko, vyjádříme odpor R_1 nebo R_2 a máme skutečný poměr rozdělení rezistance nakrátko. Obdobně se postupuje u dalších typů zapojení.

Tab. 4.1: Podíl R_1, R_2 na R_k a X_1, X_2 na X_k

	R_1 [Ω]	R_2 [Ω]	X_1 [Ω]	X_2 [Ω]
Yy	$0.5 \cdot R_k$	$0.5 \cdot R_k$	$0.5 \cdot X_k$	$0.5 \cdot X_k$
Yd	$0.634 \cdot R_k$	$1.098 \cdot R_k$	$0.634 \cdot X_k$	$1.098 \cdot X_k$
Yz	$0.464 \cdot R_k$	$0.536 \cdot R_k$	$0.464 \cdot X_k$	$0.536 \cdot X_k$
Dd	$0.867 \cdot R_k$	$0.867 \cdot R_k$	$0.867 \cdot X_k$	$0.867 \cdot X_k$
Dz	$0.867 \cdot R_k$	$0.577 \cdot R_k$	$0.867 \cdot X_k$	$0.577 \cdot X_k$

4.2 Model při stavu naprázdno

Při rozboru vyjdeme ze základní napěťové rovnice obvodu připojeného transformátoru naprázdno

$$u_1 = R_1 \cdot i_0 + N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (4.4)$$

Jenže tato rovnice je závislá na dvou neznámých. Na proudu naprázdno i_0 a magn. toku ϕ . Proto se uplatňuje předpoklad téměř lineární závislosti proudu na magn. toku. Téměř lineární je z toho důvodu, že indukčnost s časem roste až dojde systém k ustálenému stavu, kde se nárůst zastaví.

$$i_0 = \frac{N_1 \cdot \phi}{L_\mu} \quad (4.5)$$

Nyní se nám nabízejí dvě možnosti. Buď nahradíme ve vztahu 4.4 magn. tok výrazem s proudem i_0 ze vztahu 4.5 a nebo nahradíme proud výrazem s magn. tokem. Druhou volbou respektujeme nelineární závislost magn. toku a proudu a nezpůsobujeme takové chyby než při řešení s proudem. Výsledný průběh proudu bychom si odvodili pomocí magnetizační křivky. Bohužel pro matematické vyjádření je postup nemožný a musíme si zvolit způsob první, méně přesný.

Dosazením získáváme diferenciální výraz:

$$R_1 \cdot i_0 + L_\mu \frac{di_0}{dt} = U_m \cdot \sin(\omega t + \alpha) \quad (4.6)$$

Další postup výpočtu je shodný jako se prováděl při stavu nakrátko. Nejprve si vypočteme ustálenou složku.

$$\begin{aligned} \overline{i_{0p}} &= \frac{\overline{U_{f\max}}}{\overline{Z_k}} = \frac{\overline{U_{f\max}}}{(R_1 + iX_\mu)} \\ \overline{i_{0p}} &= \frac{\frac{410|0^\circ}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2}}{0,334 + i213,108} = 1,57|_{-89,99^\circ} \text{ A} \end{aligned} \quad (4.7)$$

Poté Lagrangeův koeficient λ a časovou konstantu K pro přechodnou složku

$$\begin{aligned} R_1 \cdot i_0 + L_\mu \frac{di_0}{dt} &= 0 \\ R_1 \cdot (K \cdot e^{\lambda t}) + L_\mu \frac{d(K \cdot e^{\lambda t})}{dt} &= 0 \\ \lambda &= -\frac{R_1}{L_\mu} = -\frac{0,334}{678,34} = -4,924 \cdot 10^{-4} \\ \tau &= -\frac{1}{\lambda} = -\frac{1}{-4,924 \cdot 10^{-4}} = 2\,030,97 \text{ s} \end{aligned}$$

Dosadíme do vztahu 4.2

$$i_0(t) = K \cdot e^{-4,924 \cdot 10^{-4} t} + 1,57 \cdot \sin(\omega t - 89,99^\circ)$$

Integrační konstantu K učíme z nulové počáteční podmínky pro $t=0$ s.

$$K = 1,57$$

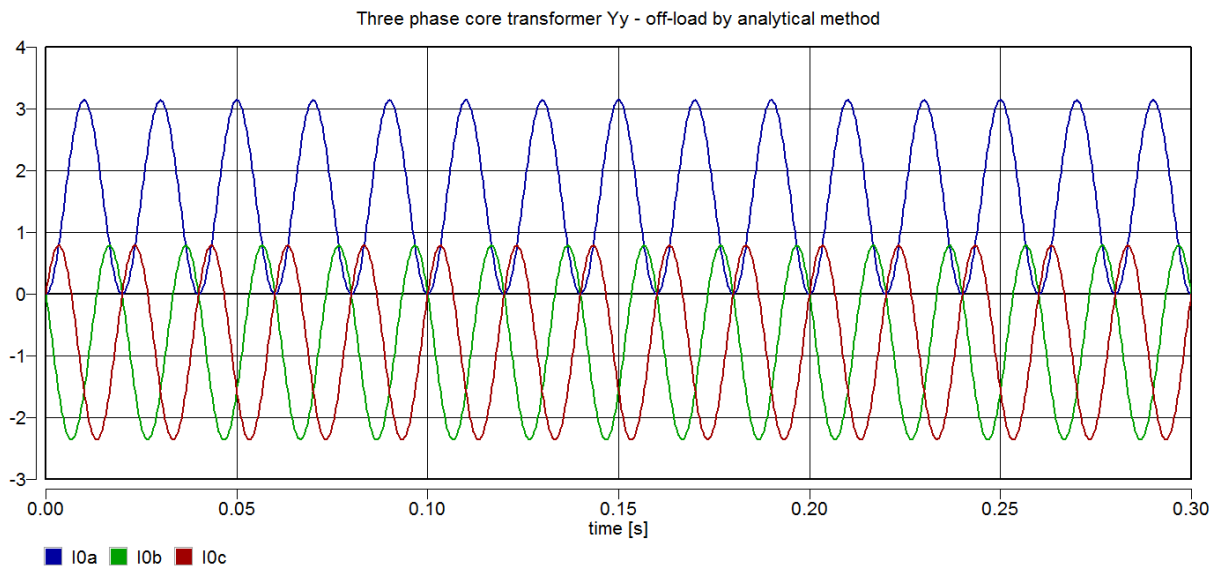
Výsledné matematické vyjádření proudů naprázdno

$$i_{0a}(t) = 1,57 \cdot e^{-4,924 \cdot 10^{-4} t} + 1,57 \cdot \sin(\omega t - 89,99^\circ) \text{ A}$$

$$i_{0b}(t) = -0,785 \cdot e^{-4,924 \cdot 10^{-4} t} + 1,57 \cdot \sin(\omega t - 209,99^\circ) \text{ A}$$

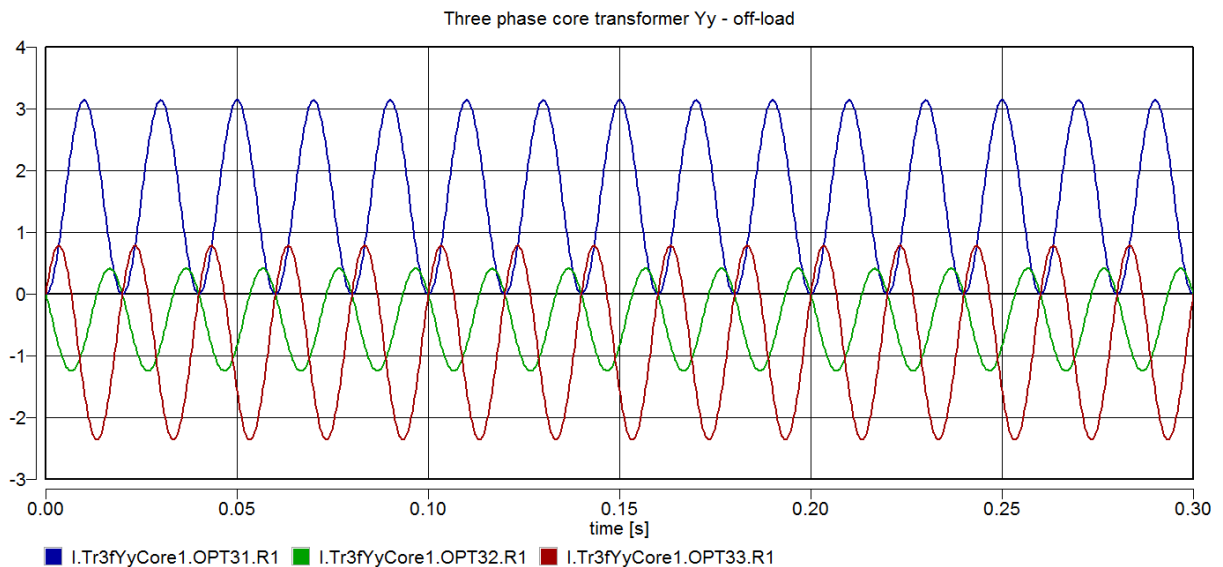
$$i_{0c}(t) = -0,785 \cdot e^{-4,924 \cdot 10^{-4} t} + 1,57 \cdot \sin(\omega t + 30,01^\circ) \text{ A}$$

Graficky průběhy proudů vypadají takto:



Obr. 4.3: Průběhy proudů naprázdno - výpočet

a pomocí zhotoveného modelu v programu DYNAST



Obr. 4.4: Průběhy proudů naprázdno - program DYNAST

Rozdíly ve stavu naprázdno pro obě krajní jádra jsou takřka nulové. Začínají se projevovat až od 4. desetinného místa. Zatímco průběh proudu v prostředním magn. jádře je menší. Vysvětlení bychom našli v tom, jak je model řešený. Model je napsán tak, aby respektoval rovinné uspořádání magn. obvod. Tudíž má prostřední jádro o zhruba polovinu kratší střední indukční čáru magn. toku než-li mají jádra na krajích. Magnetizační reaktance dosahuje vyšších hodnot a proud je ve výsledku menší, přibližně poloviční ve srovnání s ostatními proudy.

Chyba není ani veliká při porovnání amplitud proudu fáze s teoretickou hodnotou skutečného proudu naprázdno. Chyba činí cca 0,126 A (3,86 %).

5 VÝPOČET USTÁLENÝCH A PŘECHODNÝCH DĚJŮ NA TRANSFORMÁTORU

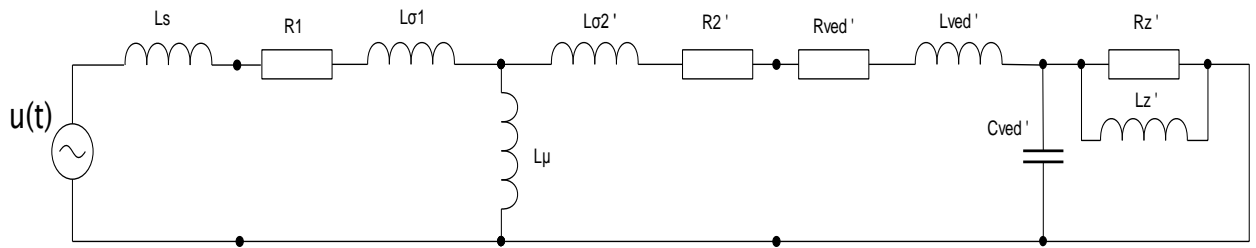
Zde bych plynule navázal na výpočty, které jsem provedl v bodě čtyři a názorně bych předvedl postup, jak se řeší ustálené a přechodné děje pro třífázový transformátor při stavech, kdy napájí vedení se zátěží. Dále kdy se odehraje na jedné fázi porucha jednofázovým zkratem a jako poslední porucha třífázovým zkratem. Všechny výpočty byly dělány pro jeden typ transformátoru přenosového rozvodu v zapojení YNyn s parametry uvedené v druhém bodě diplomové práce.

5.1 Transformátor s vedením a zátěží

Transformátor, který je připojen na zátěž, je jednou z nejběžnějších provozních situací, kdy transformátor převádí z jedné napěťové hladiny na druhou a přes vedení dodává el. energii k pracujícímu zařízení. Parametry vedení 400 V a 22 kV mi poskytla sekce Rozvoj sítí západ energetické společnosti E.ON a odebírané činné a jalové výkony jsem po doporučení pracovníka společnosti počítal s účínkem $\cos \varphi = 0,95$ a s 50 % zatížením z jmenovitého výkonu transformátoru.

Při výpočtu jsem vzal symetrické zatížení všech fází a převedl úlohu na řešení jedné fáze. Na obr. 5.1 můžete vidět náhradní schéma celé úlohy od napájecí soustavy přes transformátor a vedení k zátěži. Dalším krokem bylo vypočítat dílčí hodnoty pasivních prvků vedení a

zátěže, sečíst s prvky transformátoru a sítě a tím nahradit celou soustavu jednou ekvivalentní impedancí.



Obr. 5.1: Náhradní schéma transformátoru s vedením a se zátěží

Nyní názorně popíšu postup výpočtu. Pasivní prvky za sekundární stranou transformátoru jsem převedl na primární stranu.

ZÁTĚŽ

parametry: účinník $\cos \varphi = 0,95$

činný výkon $P = 195 \text{ MW}$

jalový výkon $Q = 64 \text{ MVar}$

- odpor R_z'

$$R_z' = \frac{U_n^2}{P} \cdot p^2 \text{ [}\Omega\text{]}$$

$$R_z' = \frac{(22 \cdot 10^3)^2}{195 \cdot 10^6} \cdot \left(\frac{410}{22}\right)^2 = 862,05 \text{ }\Omega$$

- reaktance X_z'

$$X_z' = \frac{U_n^2}{Q} \cdot p^2 \text{ [}\Omega\text{]}$$

$$X_z' = \frac{(22 \cdot 10^3)^2}{64 \cdot 10^6} \cdot \left(\frac{410}{22}\right)^2 = 2 \text{ } 626,563 \text{ }\Omega$$

VEDENÍ

parametry kabelu 240AXEKCY:

$$R=0,128 \text{ ohm/km}, X=0.198 \text{ ohm/km}, B=94 \text{ } \mu\text{S/km}, l=20 \text{ km}$$

- odpor R'_{ved}

$$R'_{\text{ved}} = R \cdot l \cdot p^2 \text{ } [\Omega]$$

$$R'_{\text{ved}} = 0,128 \cdot 20 \cdot \left(\frac{410}{22}\right)^2 = 889,124 \text{ } \Omega$$

- reaktance cívky vedení X'_{ved}

$$X'_{\text{ved}} = X \cdot l \cdot p^2 \text{ } [\Omega]$$

$$X'_{\text{ved}} = 0,198 \cdot 20 \cdot \left(\frac{410}{22}\right)^2 = 1\,374,81 \text{ } \Omega$$

- příčná kapacitní reaktance vedení X'_c

$$X'_c = \frac{1}{B \cdot l} \cdot p^2 \text{ } [\Omega]$$

$$X'_c = \frac{1}{94 \cdot 10^{-6} \cdot 20} \cdot \left(\frac{410}{22}\right)^2 = 184\,748,489 \text{ } \Omega$$

ZDROJ

$$X_s = \frac{U_n^2}{S_k} \text{ } [\Omega]$$

$$X_s = \frac{(410 \cdot 10^3)^2}{10^{10}} = 16,81 \text{ } \Omega$$

CELKOVÁ IMPEDANCE

$$\overline{Z}'_1 = \frac{R'_z \cdot iX'_z}{R'_z + iX'_z} = \frac{862,05 \cdot i2\,626,563}{862,05 + i2\,626,563} = 819,064 \angle 18,17^\circ \text{ } \Omega$$

$$\underline{Z}'_2 = \frac{\overline{Z}'_1 \cdot (-iX'_c)}{\overline{Z}'_1 + (-iX'_c)} = \frac{819,064|18,17^\circ \cdot (-i184\,748,489)}{819,064|18,17^\circ + (-i184\,748,489)} = 820,191|17,93^\circ \Omega$$

$$\underline{Z}'_3 = \overline{Z}'_2 + R_{\text{ved}}' + iX_{\text{ved}}' + R_{2\sigma}' + iX_{2\sigma}' = 2\,349,565|44,71^\circ \Omega$$

$$\underline{Z}'_4 = \frac{\overline{Z}'_3 \cdot iX'_\mu}{\overline{Z}'_3 + iX'_\mu} = \frac{2\,349,565|44,71^\circ \cdot i213\,108}{2\,349,565|44,71^\circ + i213\,108} = 2\,331,403|45,156^\circ \Omega$$

$$\overline{Z} = \overline{Z}'_4 + R_1 + iX_{1\sigma} + iX_s = 1\,644,407 + i1\,695,45 = 2\,361,911|45,88^\circ \Omega$$

Nyní již víme impedanci, její činnou a jalovou část, z nichž se poté vypočítají Lagrangeův koeficient λ a časová konstanta τ .

$$R \cdot i + L \frac{di}{dt} = 0$$

$$R \cdot (K \cdot e^{\lambda t}) + L \frac{d(K \cdot e^{\lambda t})}{dt} = 0$$

$$\lambda = -\frac{R}{L} = -\frac{1\,644,407}{\frac{1\,695,45}{100\pi}} = -304,701$$

$$\tau = -\frac{1}{\lambda} = -\frac{1}{-304,701} = 0,0033 \text{ s}$$

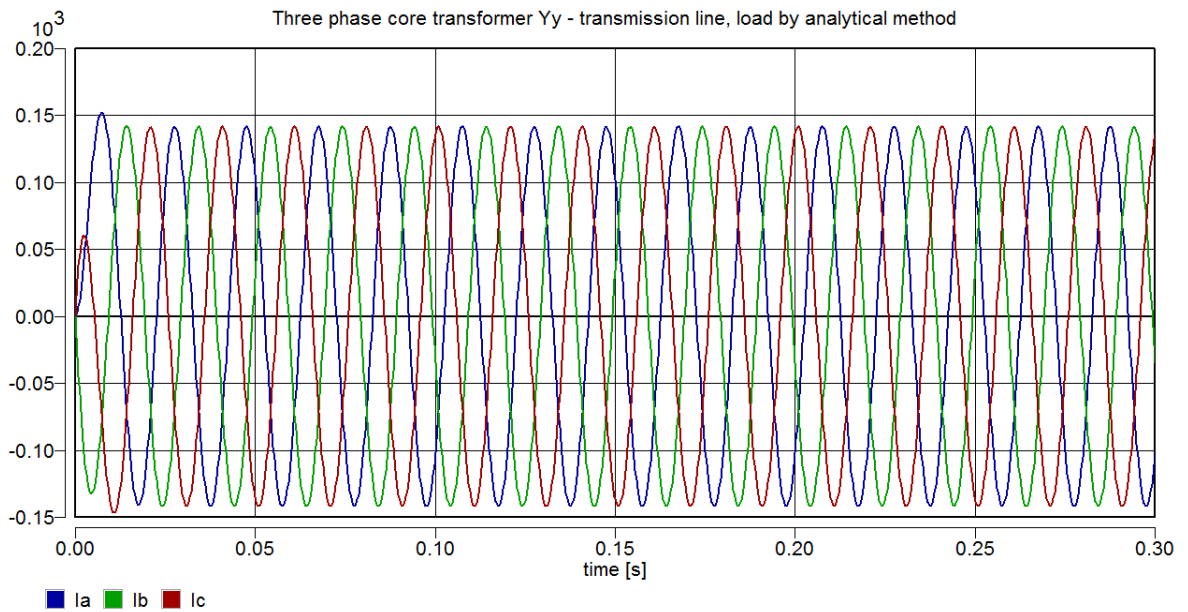
Další kroky jsou identické s předchozími stavy. Uvedl bych pouze výsledné matematické vyjádření proudů:

$$i_a(t) = 0,102 \cdot e^{-304,701t} + 0,1417 \cdot \sin(\omega t - 45,88^\circ) \text{ kA}$$

$$i_b(t) = 0,035 \cdot e^{-304,701t} + 0,1417 \cdot \sin(\omega t - 165,88^\circ) \text{ kA}$$

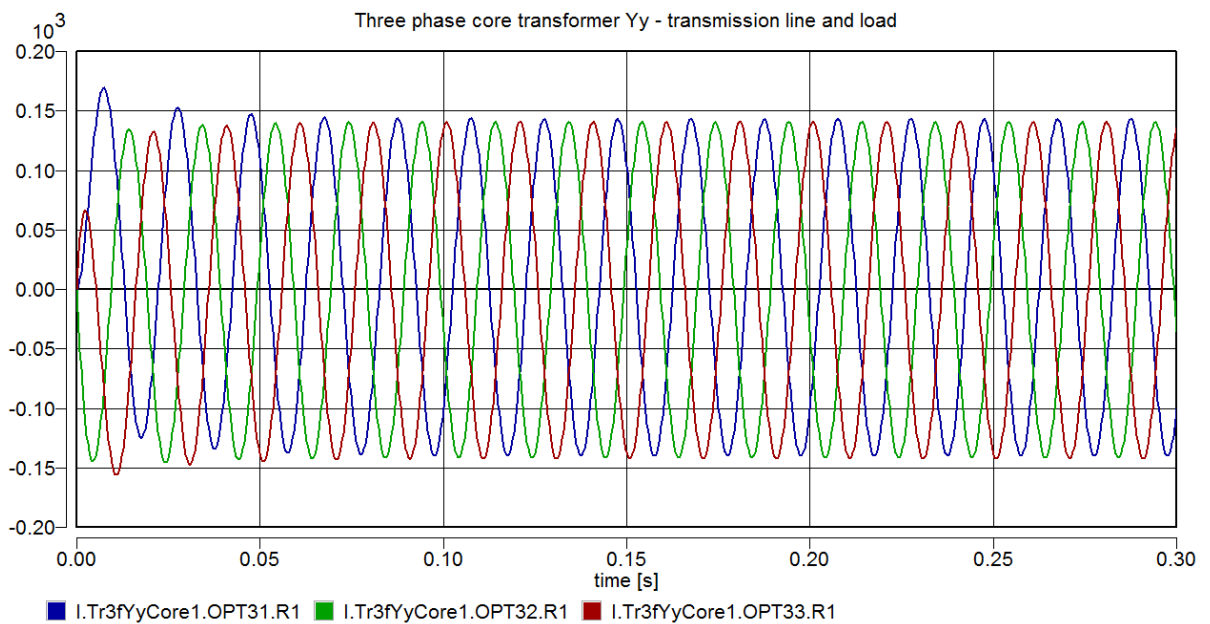
$$i_c(t) = -0,136 \cdot e^{-304,701t} + 0,1417 \cdot \sin(\omega t + 74,12^\circ) \text{ kA}$$

Graficky průběhy proudů vypadají takto:



Obr. 5.2: Průběhy proudů na vstupu do transformátoru - výpočtem

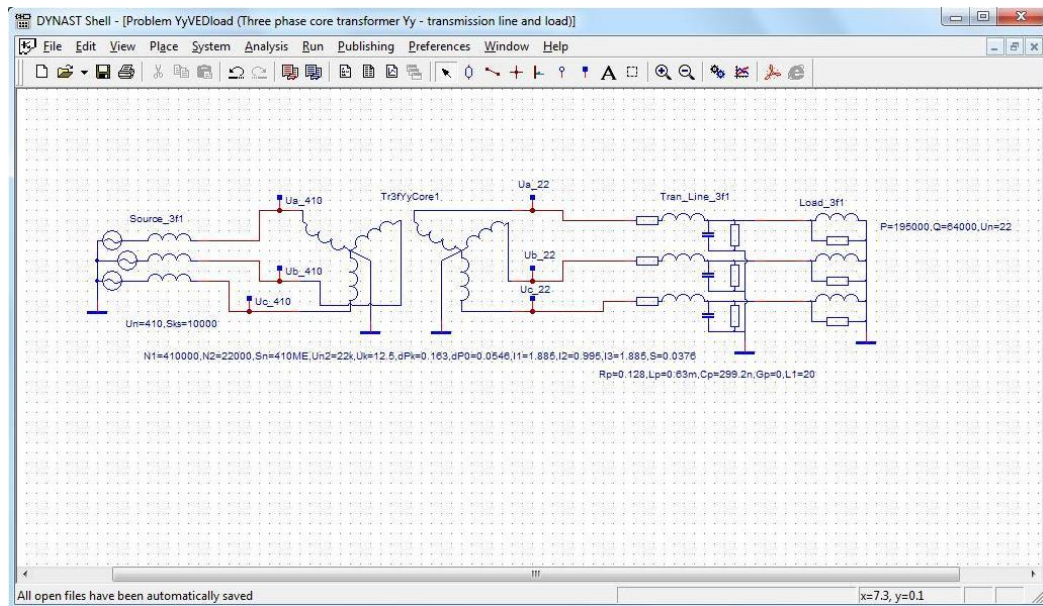
a pomocí zhotoveného modelu v programu DYNAST



Obr. 5.3: Průběhy proudů na vstupu do transformátoru - program DYNAST

Průběhy jsou téměř identické. V místě první periody přechodného děje dosahuje proud z matematické analýzy hodnot $I_a = 152,23$ A a v ustáleném stavu hodnot $I_a = 141,52$ A. Hodnoty z programu DYNAST vycházejí větší, konkrétně u přechodného děje cca $I_a = 169,24$ A a v ustáleném stavu $I_a = 143$ A.

Kompletní řešený případ

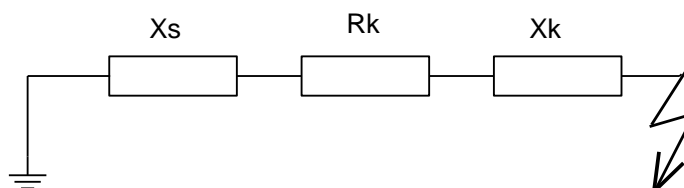


Obr. 5.4: Schéma transformátoru s vedením a zátěží v programu DYNAST

5.2 Jednofázový zkrat na transformátoru s vedením a zátěží

Případ jednofázového zkratu nahlížíme jako na problém nesymetrické poruchy, kdy se tato situace řeší metodou souměrných složek. Pro jednotlivé souměrné složky se sestaví náhradní schéma, spočte se jejich impedance cesty zkratu a dosadí se do vztahu pro jednofázový zkrat. Tím si vypočteme ustálenou složku průběhu proudu. Složku přechodnou určíme stejným způsobem, jako jsme již použili, řešením rovnice 4.2.

Začneme náhradním schématem. Schéma obr. 5.4, jelikož zkrat nastal hned za výstupy transformátoru, nebude mít ve všech případech impedanci sítě, ale bude mít vždy impedanci transformátoru. Reaktance zdroje se neobjeví u schématu pro netočivou složku pro takové případy, kdy zapojení transformátoru nedovoluje netočivé složce se uzavřít v obvodu transformátoru. Týká se to konkrétně zapojení, kdy je na vstupu vinutí zapojené do trojúhelníka a hvězdy s izolovaným uzlem a u zapojení YNy. U zapojení YNd se impedance netočivé složky omezí podle lit. [8] na 70 - 90 % Z_0 .



Obr. 5.5: Náhradní schéma pro souslednou, zpětnou, eventuelně netočivou složku

(X_s = reaktance zdroje, R_k, X_k = reálné a imaginární prvky impedance transformátoru podélné větve)

Dále si spočteme hodnoty prvků náhradního schématu.

ZDROJ NAPĚTÍ

parametry: Napětí $U_n = 410$ kV

Zkratový výkon $S_k = 10$ GVA

$$X_s^{(1)} = X_s^{(2)} = \frac{U_n^2}{S_k} \quad [\Omega]$$

$$X_s^{(1)} = X_s^{(2)} = \frac{(410 \cdot 10^3)^2}{10^{10}} = 16,81 \quad \Omega$$

$$X_s^{(0)} = 3 \cdot X_s^{(1)} = 3 \cdot 16,81 = 50,43 \quad \Omega$$

TRANSFORMÁTOR

$$R_k = 0,668 \quad \Omega$$

$$X_k = 51,246 \quad \Omega$$

IMPEDANCE SOUMĚRNÝCH SLOŽEK

$$\overline{Z_k^{(1)}} = \overline{Z_k^{(2)}} = R_k + i(X_s^{(1)} + X_k^{(1)}) = 0,668 + i68,056 \quad \Omega$$

$$\overline{Z_k^{(0)}} = R_k + i(X_s^{(0)} + X_k^{(0)}) = 0,668 + i101,676 \quad \Omega$$

a dosadíme do vztahu pro maximální jednofázový zkrat, čímž si odvodíme velikost proudu pro fázi a:

$$I_{k1f \max}'' = \frac{3 \cdot \overline{U_n}}{\sqrt{3} \cdot (\overline{Z_k^{(1)}} + \overline{Z_k^{(2)}} + \overline{Z_k^{(0)}})} \cdot \sqrt{2} \quad [\text{kA}]$$

$$I_{k1f \max}'' = \frac{3 \cdot 410 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot ((0,668 + i68,056) + (0,668 + i68,056) + (0,668 + i101,676))} \cdot \sqrt{2} = 4,223 \angle -89,52^\circ \quad \text{kA}$$

a pro fázi c fázově posunu o 120° .

$$I_{k1f}'' = 4,223 \underline{30,48^\circ} \text{ kA}$$

Číslo nám udává ustálenou složku zkratového proudu fáze. Určíme pro ni Lagrangeův koeficient λ , časovou konstantu τ a integrační konstantu K při vzniku zkratu v čase $t=0,1$ s, pro nichž vychází počáteční podmínka $i_c(0,1)=0,136$ kA.

$$\lambda = -\frac{R}{L} = -\frac{2,004}{\frac{237,79}{100\pi}} = -2,648$$

$$\tau = -\frac{1}{\lambda} = -\frac{1}{-2,648} = 0,378 \text{ s}$$

$$K = \frac{0,136 - 4,223 \cdot \sin(360 \cdot 50 \cdot 0,1 + 30,48)}{e^{-2,648 \cdot 0,1}} = -2,613$$

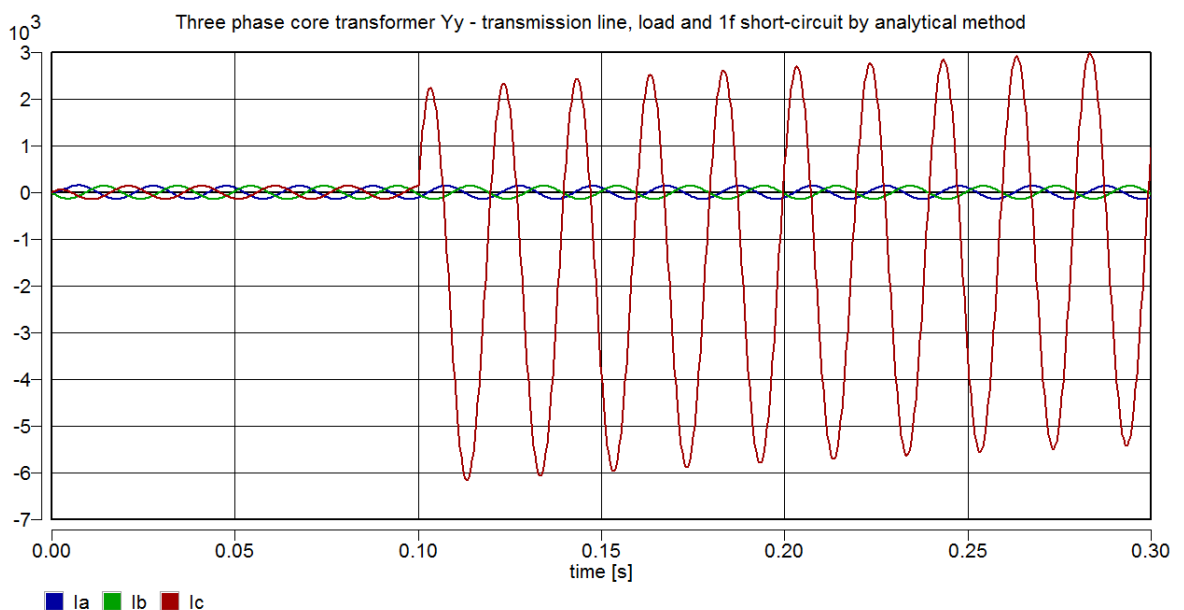
Průběhy obou nepostížených fází jsem ponechal stejné, jak vyšly v bodě s vedením a zátěží. Změnila se postížená fáze:

$$i_a(t) = 0,102 \cdot e^{-304,701t} + 0,1417 \cdot \sin(\omega t - 45,88^\circ) \text{ kA}$$

$$i_b(t) = 0,035 \cdot e^{-304,701t} + 0,1417 \cdot \sin(\omega t - 165,88^\circ) \text{ kA}$$

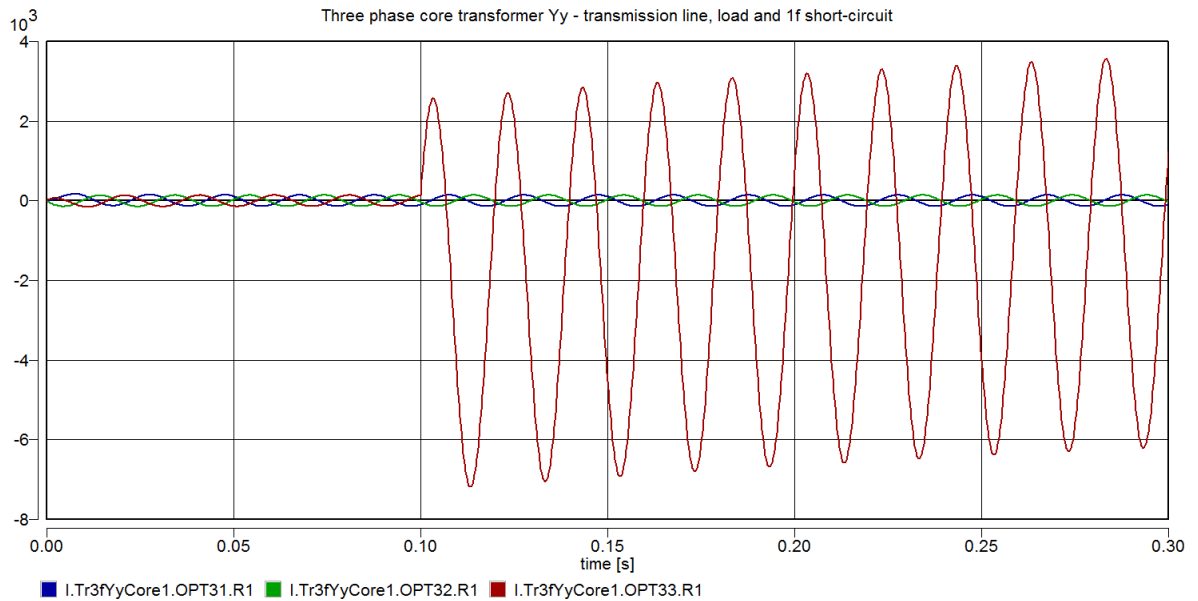
$$i_c(t) = -2,613 \cdot e^{-2,648t} + 4,223 \cdot \sin(\omega t + 30,48^\circ) \text{ kA}$$

Graficky průběhy proudů vypadají takto:



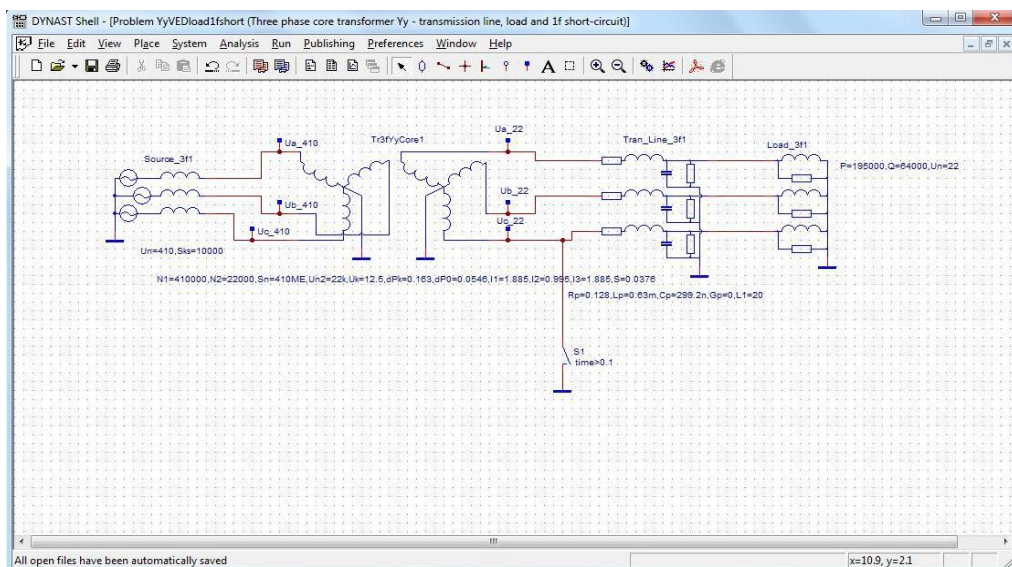
Obr. 5.6: Průběhy proudů na vstupu do transformátoru při 1f zkratu - výpočtem

a pomocí zhotoveného modelu v programu DYNAST



Obr. 5.7: Průběhy proudů na vstupu do transformátoru při 1f zkratu - program DYNAST

Kompletní řešení případ



Obr. 5.8: Schéma transformátoru, vedení se zátěží a 1f zkratem v programu DYNAST

5.3 Třífázový zkrat na transformátoru s vedením a zátěží

Pro tento případ poruchy nám postačí, když budeme uvažovat s jednou fází a ostatní jsou navzájem posunuté o $\pm 120^\circ$. Zkrat nastal hned za výstupem transformátoru. Proto si můžeme

dovolit použít vztah, který nám vlastně vyšel při řešení při stavu nakrátko, změním-li napájecí napětí na jmenovité.

Obecná rovnice vypadá následovně:

$$i_k''(t) = \sqrt{2} \cdot \frac{U_n}{Z_k} \cdot (-\sin(\alpha - \varphi_k) \cdot e^{-\lambda t} + \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k)) \quad (5.1)$$

Z hlediska zkoumání zkratu pro dimenzování vodičů nás zajímá, jak moc přesáhne zkratový proud jmenovité hodnoty. Největších hodnot proud dosáhne tehdy, kdy se maximálně vyvine stejnosměrná složka, tj pro $\alpha - \varphi_k = \pm \frac{\pi}{2}$. Samozřejmě se maximální hodnota projeví pouze v jedné fázi a platí, že součet počátečních velikostí proudů stejnosměrné složky fází je nulový. Vztah 5.1 se změní vzhledem k respektování maximálního projevu proudu při vyvinutí kladné stejnosměrné složky na:

$$i_k''(t) = \sqrt{2} \cdot \frac{U_n}{Z_k} \cdot (e^{-\lambda t} - \cos(\omega t)) \quad (5.2)$$

Pro maximální hodnotu proudu se omezíme na zjednodušení, které lze pozorovat z průběhu proudu a to, že maximální hodnota nastává blízkosti první poloviny kmitu.

Odvozením obdržíme čas $t = \frac{\pi}{\omega} = 0,01 \text{ s}$. Dále dosazením za impedanci nakrátko

$Z_k = z_k \cdot Z_n$ se po úpravách vztah 5.9 mění na konečnou podobu $I_{k_{\max}}''$:

$$I_{k_{\max}}'' = \sqrt{2} \cdot \frac{I_n}{z_k} \cdot \left(1 + e^{-\frac{\pi R_k}{\omega L_k}} \right) \quad (5.3)$$

VÝPOČET

Z výsledných průběhů proudu se zátěží a vedení zjistíme okamžité hodnoty proudů v čase $t=0,1 \text{ s}$, které nám poslouží jako počáteční hodnoty.

Nabývají těchto hodnot:

$$i_1(0,1) = -0,102 \text{ kA} \quad i_2(0,1) = -0,035 \text{ kA} \quad i_3(0,1) = 0,136 \text{ kA}$$

Při výpočtu zkratu ještě nesmíme opomenout vypočítat si reaktanci zdroje, kterou jsme v předchozích stavech kromě poruchy jedné fáze vynechali. Její hodnota neměla výrazný vliv na výsledné hodnoty.

$$X_s = \frac{U_n^2}{S_k} [\Omega]$$

$$X_s = \frac{(410 \cdot 10^3)^2}{10^{10}} = 16,81 \Omega$$

Spočteme si střídavou složku:

$$\bar{i}_{kp} = \frac{\bar{U}_{f \max}}{Z_k + iX_s}$$

$$\bar{i}_{kp} = \frac{\frac{410|0^\circ}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2}}{0,668 + i51,246 + i16,81} = 4,919 \underline{-89,44^\circ} \text{ kA}$$

Dále si spočteme integrační konstanty K pro všechny fáze:

$$K_1 = \frac{-0,102 - 4,919 \cdot \sin(360 \cdot 50 \cdot 0,1 - 89,44^\circ)}{e^{-3,084 \cdot 0,1}} = 6,557$$

$$K_2 = \frac{-0,035 - 4,919 \cdot \sin(360 \cdot 50 \cdot 0,1 - 209,44^\circ)}{e^{-3,084 \cdot 0,1}} = -3,34$$

$$K_3 = \frac{0,136 - 4,919 \cdot \sin(360 \cdot 50 \cdot 0,1 + 30,56^\circ)}{e^{-3,084 \cdot 0,1}} = -3,22$$

Výsledné matematické vyjádření zkratových proudů:

$$i_{ka}''(t) = 6,557 \cdot e^{-3,084t} + 4,919 \cdot \sin(\omega t - 89,44^\circ) \text{ kA}$$

$$i_{kb}''(t) = -3,34 \cdot e^{-3,084t} + 4,919 \cdot \sin(\omega t - 209,44^\circ) \text{ kA}$$

$$i_{kc}''(t) = -3,22 \cdot e^{-3,084t} + 4,919 \cdot \sin(\omega t + 30,56^\circ) \text{ kA}$$

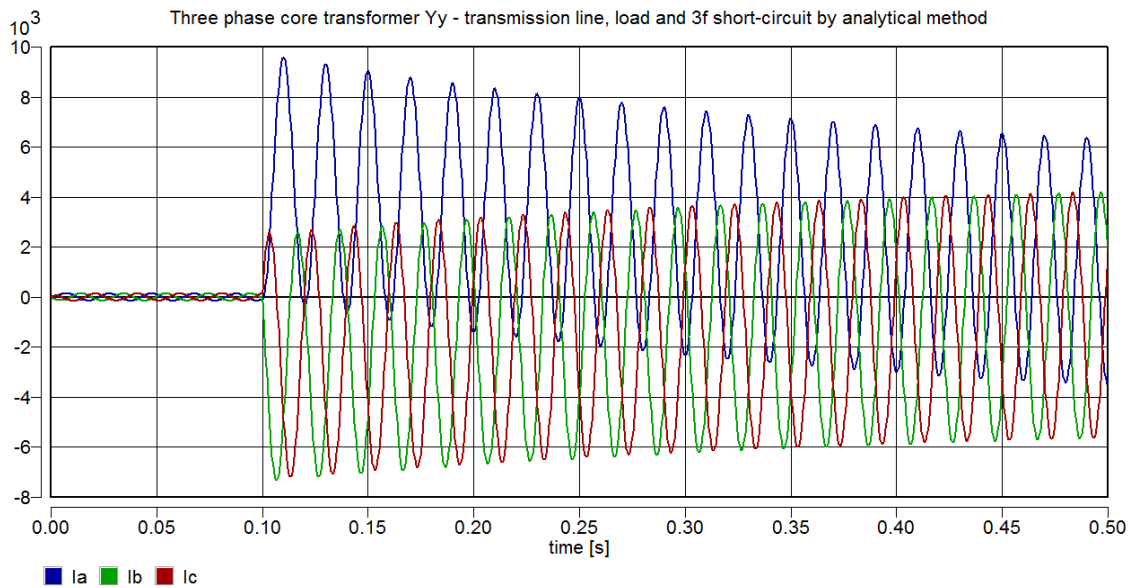
Maximální okamžitý zkratový proud vychází:

$$(korekce - úvaha poměrné impedance sítě \quad Z_s = \frac{X_s}{Z_n})$$

$$I_{k \max}'' = \sqrt{2} \cdot \frac{I_n}{Z_k + Z_s} \cdot \left(1 + e^{-\frac{\pi R_k}{\omega L}} \right) [\text{kA}]$$

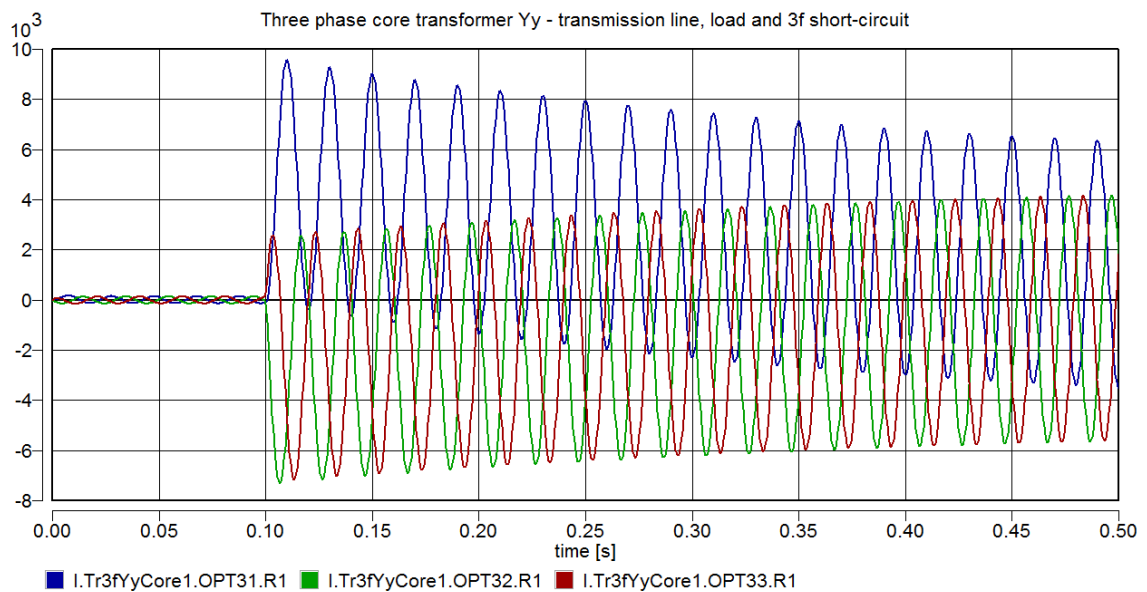
$$I_{k \max}'' = \sqrt{2} \cdot \frac{577,4}{0,125 + 0,041} \cdot \left(1 + e^{-\frac{\pi \cdot 0,668}{68,056}} \right) = 9,689 \text{ kA}$$

Graficky průběhy proudů vypadají takto:



Obr. 5.9: Průběhy proudů na vstupu do transformátoru při 3f zkratu - výpočet

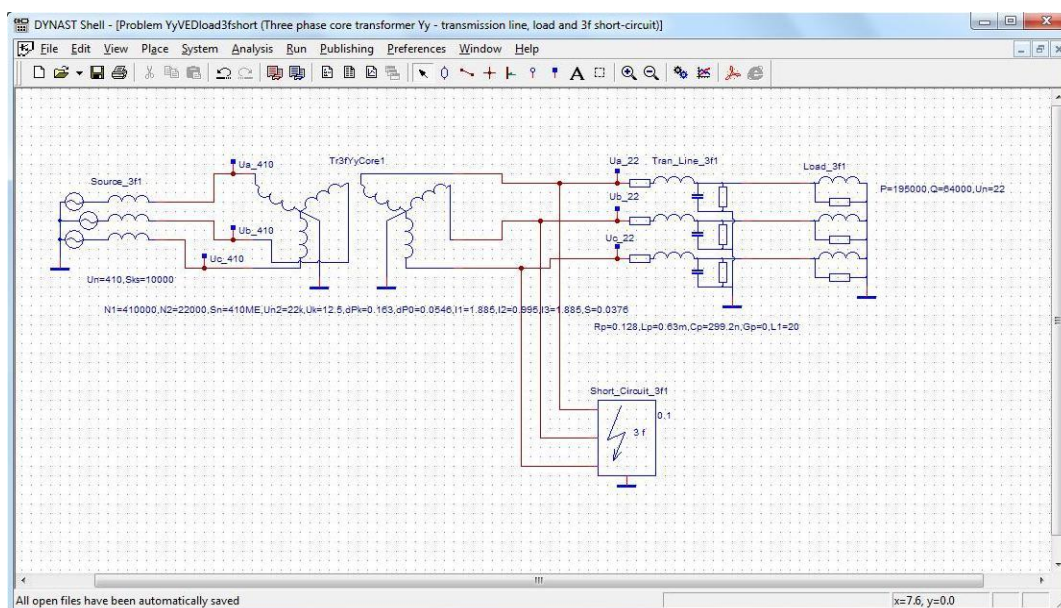
a pomocí zhotoveného modelu v programu DYNAST



Obr. 5.10: Průběhy proudů na vstupu do transformátoru při 3f zkratu - program DYNAST

Hodnoty okamžitého maximálního zkratového proudu řešené výpočtem dosahuje hodnot $I_{k_{max}} = 9,583$ kA. Chyba od teoretické hodnoty činí cca 0,106 kA (1,09 %). V porovnání s výsledkem z programu DYNAST je o něco málo menší, kdy maximální okamžitá hodnota dosahuje hodnoty $I_{k_{max}} = 9,57$ kA. Takže chyba je cca 0,119 kA (1,23 %).

Kompletní řešený případ



Obr. 5.11: Schéma transformátoru, vedení se zátěží a 3f zkratem v programu DYNAST

ZÁVĚR

Tato diplomová práce měla za cíl vypracovat funkční modely třífázového transformátoru pro různé zapojení vinutí. S tímto úkolem se dá víceméně souhlasit, že se podařilo splnit. O ověření funkčnosti programu se lze přesvědčit v bodech 4 a 5 diplomové práce, kde byl program porovnáván dohromady na pěti základních příkladech zapojení YNyn transformátoru přenosové soustavy jádrového provedení s výsledky, které mi poskytla matematická analýza příslušného stavu. Jak si lze z obr. 4.1 - 4.4, obr. 5.2 - 5.3, obr. 5.6 - 5.7 a obr. 5.9 - 5.10 ověřit, program dosahuje poměrně kvalitních a přesných výsledků jako jsem si teoreticky odvodil matematickou analýzou.

Programy respektují současnou podobu transformátorů. Jejich rovinné uspořádání, většina možná řešení elektrického obvodu u transformátoru až po uvažování pracovního chodu stroje v oblastech sycení magn. jádra. Bohužel zde se muselo ustoupit od původního záměru aproximovat poskytnutou magnetizační křivku křivkou získanou vhodnou metodou. V úvahu přicházeli metoda nejmenších čtverců, Langrangeova aproximace nebo Bezierova křivka. U první zmíněné se nepovedlo matematicky dojít k takové křivce, která by dokázala dokonale křivku aproximovat. Dále u Langrangeovy aproximace a obecně u aproximace polynomem n -tého řádu jsem se setkal s nepříjemnou skutečností, že aproximovaná křivka obsahovala nepříjemné kmity. A u poslední metody Bezierovou křivkou jsem co se týče kvality aproximace byl nejbližší k ideálnímu průběhu, téměř přesně kopírovala magnetizační křivku. Bohužel, aby byla metoda použita, musela by se provést složitá inverze, kterou jsem nebyl schopen s jistotou matematicky, ani pomocí specializovaného programu provést. Proto se v programu sycení popisuje čistě tabulkou respektující magnetizační křivku.

V budoucnu by se mohlo uvažovat o vylepšení. Doplnit sycení hysterezí magn. jádra, která by pomohla například k přesnějšímu vyšetření vlivu zapínacího proudu. Složitost tohoto fyzikálního jevu, jeho dokonalé pochopení sahá nad rámec této diplomové práce.

POUŽITÁ LITERATURA

Knižní literatura:

- [1] Petrov, G. N.: *Elektrické stroje 1*, Academia, Praha 1980
- [2] Měřička, J., Hamata, V., Voženílek, P.: *Elektrické stroje*, Vydavatelství ČVUT, Praha 2001
- [3] Jezierski, E.: *Transformátory - Teoretické základy*, Academia, Praha 1973
- [4] Bašta, J., Chládek, J., Mayer, I.: *Teorie elektrických strojů*, SNTL/ALFA, Praha 1968
- [5] Bartoš, V.: *Teorie elektrických strojů*, ZČU, Plzeň 2006
- [6] Mravec, R.: *Elektrické stroje a přístroje - I. Elektrické stroje*, SNTL, Praha 1982
- [7] Mann, H., Ševčenko, M.: *Snadné počítačové modelování dynamických soustav*, ČVUT, Praha 2008
- [8] Hejtmánková, P., Kocmich, M., Mertlová, J.: *Přenos a rozvod elektrické energie*, ZČU, Plzeň 1995
- [9] Mühlbacher, J., Noháč, K.: *Přechodné jevy v elektrizačních soustavách - řešené příklady*, ZČU, Plzeň 1995

Internetové zdroje:

- [10] Červený, J: *Projektování elektrických zařízení* Online (11.2. 2011)
<http://webs.zcu.cz/fel/kev/+PEZ/P%fdedn%a0%e7ky/Microsoft%20Word%20-%20Projektov%a0n%a1%20elektrick%ecch%20za%fd%a1zen%a1.pdf>
- [11] Stránka doc. Ing. Karla Noháče. Ph.D. Online (13.10. 2012)
<http://home.zcu.cz/~nohac/Transformator/Transformator.htm>
- [12] hysterezní smyčka Online (13.10. 2012)
<http://elektrika.cz/terminolog/eterminolog2definition.2006-04-01.3825234139>
- [13] katalog transformátorů ETD Transformátory, a. s. Online (26.11. 2012)
http://www.etd-bez.cz/upload/File/ETD_Catalogue_CZ.pdf
- [14] katalog transformátorů BEZ Transformátory, a. s. Online (26.11. 2012)
http://www.bez.sk/transformatory/upload/File/olej/olejove_SK_BA.pdf
- [15] katalog transformátorů BEZ Transformátory, a. s. Online (22.12. 2012)

<http://www.bez.sk/transformatory/index.php?goto=ho73CTpq&sekce=ho73CTpq&lng=cz>

Ostatní zdroje:

- [16] Bakalářská práce Bc. Jiří Košťál: *Vyvedení výkonu z bloku velkého výkonu*, Plzeň 2011

6 PŘÍLOHY

SEZNAM PŘÍLOH:

6.1	TŘÍFÁZOVÉ OLEJOVÉ TRANSFORMÁTORY SPOLEČNOSTI ETD TRANSFORMÁTORY, A. S. - TABULKA Č. 1 [13].....	2
6.2	TŘÍFÁZOVÉ OLEJOVÉ TRANSFORMÁTORY SPOLEČNOSTI ETD TRANSFORMÁTORY, A. S. - TABULKA Č. 2 [13].....	3
6.3	TŘÍFÁZOVÉ DISTRIBUČNÍ TRANSFORMÁTORY SPOLEČNOSTI BEZ TRANSFORMÁTORY, A. S. - OLEJOVÉ (1) [14].....	4
6.4	TŘÍFÁZOVÉ DISTRIBUČNÍ TRANSFORMÁTORY SPOLEČNOSTI BEZ TRANSFORMÁTORY, A. S. - OLEJOVÉ (2) [14].....	5
6.5	TŘÍFÁZOVÉ DISTRIBUČNÍ TRANSFORMÁTORY SPOLEČNOSTI BEZ TRANSFORMÁTORY, A. S. - SUCHÉ (1) [15].....	6
6.6	TŘÍFÁZOVÉ DISTRIBUČNÍ TRANSFORMÁTORY SPOLEČNOSTI BEZ TRANSFORMÁTORY, A. S. - SUCHÉ (2) [15].....	7
6.7	TŘÍFÁZOVÉ DISTRIBUČNÍ TRANSFORMÁTORY SPOLEČNOSTI BEZ TRANSFORMÁTORY, A. S. - AMORFNÍ [15].....	8
6.8	POROVNÁNÍ CHOVÁNÍ TRANSFORMÁTORU V ZAPOJENÍ YNYN A YND NA JEDNOFÁZOVÉM ZKRATU A JEHO NÁSLEDNÉ VYPNUTÍ U ZDROJE	9

6.1 Třífázové olejové transformátory společnosti ETD Transformátory, a. s. - tabulka č. 1 [13]

	Třífázový transformátor - JE Dukovany	Třífázový transformátor - MEDCOM	Třívínutový 3f transformátor - IEM	Transformátor se sníženým hlukem - JME, a.s., Brno	Třífázový transformátor - Jugoslávie	Zvyšovací transformátor - IEO - ZAFARANA
Jmenovitý výkon S_n [MVA]	300	25	63/31,5/31,5	25/25/(8)	410	75
Jmenovitý napětí VN [kV]	420	220±8x1,25 %	115±9x1,78 %	110±8x2 %	410	237±8x1,25 %
Jmenovitý napětí NN1 [kV]	15,75	12	10,5	23	22	22
Jmenovitý napětí NN2 [kV]	neuveďeno	neuveďeno	10,5	6,3	-	-
Napětí nakrátko u_k [%]	17,5	13	$u_{k12} = 11$ (63 MVA)	11,5	12,5	11,5
			$u_{k13} = 10,5$ (31,5 MVA)			
			$u_{k23} = 21$ (31,5 MVA)			
Proud naprázdno i_0 [%]	0,05	0,15	0,05	0,15	0,2	0,1
Zapojení	neuveďeno	neuveďeno	YNd11/d11	YNyn0/(d)	YNd5	Dyn11
Chlazení	ODAF	ONAN (<15 MVA) ONAF1 (<20 MVA) ONAF2 (>20 MVA)	ONAN/ONAF	ONAN	ODAF	ONAN/ONAF1/ONAF2

Další specifikace	uzel VN buď přímo nebo trvale uzemněn	uzel VN buď přímo nebo trvale uzemněn	navržen na nízké teploty až - 45°C	uzel VN buď přímo nebo trvale uzemněn	strana NN připravena k připojení zapouzdřených vodičů	strana NN připravena k připojení zapouzdřených vodičů
	zkoušen podle ČSN EN 60 076	zkoušen podle IEC 76	zkoušen podle GOST 11 677-85	zkoušen podle IEC 76 a ČSN 351080	zkoušen podle IEC 76	zkoušen podle IEC 76
	vzájemně odizolované orientované plechy tloušťky 0,3 mm	vzájemně odizolované orientované plechy tloušťky 0,23 mm	vzájemně odizolované orientované plechy tloušťky 0,3 mm	vyrovnávací vintu 6,3 kV pro kompenzaci nesymetrického zatížení	vybaven on-line monitorovacím systémem pro měření částečných výbojů	pracuje v extrémních podmínkách (teplota nad 55 °C)
	vybaven on-line monitorovací zařízení TRANSFIX		řízení napětí probíhá způsobem CFVV ¹⁾	řízení napětí probíhá způsobem CFVV ¹⁾	vybaven teplotními čidly pro monitorování teploty vintu	vybaven vakem pro důsledné oddělení oleje -> menší stárnutí

¹⁾ přepínání odboček pod zatížením beze změny sycení magnetického obvodu, kdy ztráty naprázdno jsou konstantní na všech odbočkách.

6.2 Třífázové olejové transformátory společnosti ETD Transformátory, a. s. - tabulka č. 2 [13]

	Třífázový transformátor - ACTHERM s.r.o.	Třífázový transformátor - ČEZ, SME Ostrava	Třífázový transformátor - PRE Praha	Třívinuťový 3f transformátor - EGYPT ALU	Třífázový transformátor s tlumivkou - RETROFIT s r. o.	Třífázový transformátor pro měniče - CONVERTEAM (Fr.)
Jmenovitý výkon S_n [MVA]	25/25/(8)	50	63/63/(21)	150/150/50	40	51
Jmenovitý napětí VN [kV]	220±8x1,25 %	110±8x2 %	110±8x2 %	220±8x1,25 %	22	33
Jmenovitý napětí NN1 [kV]	23	23	23	145	0,5/ 0,63/ 0,85	2,4
Jmenovitý napětí NN2 [kV]	6,3	6,3	6,3	12	-	-
Napětí nakrátko u_k [%]	10,71	11,5	17	13	21/ 15/ 7,8	13
Proud naprázdno i_0 [%]	0,1	0,15	0,15	0,2	- / -/ 0,25	0,05
Zapojení	YNyn0 / (d)	YNyn0/(d)	YNyn0/(d)	YNyn0d11	Yd	Dyn1
Chlazení	ONAN (<15 MVA)/ ONAF	ONAN (<30 MVA)/ ONAF	ONAN (<38 MVA)/ ONAF	ONAN/ONAF1/ONAF2	OFWF	ONAN (<41 MVA)/ ONAF

Další specifikace	uzel VN buď přímo nebo trvale uzemněn	uzel VN buď přímo nebo trvale uzemněn	uzel VN buď přímo nebo trvale uzemněn	pro práci v náročných klimatických podmínkách	vestavená předřadná tlumivka o výkonu 12MVA _r	navržen na přenos proudu se složkami vyšších harmonických
	zkoušen podle ČSN EN 60 076	zkoušen podle IEC 76 a ČSN 351080	zkoušen podle ČSN EN 60 076	zkoušen podle IEC 76	zkoušen podle ČSN EN 60 076	zkoušen podle ČSN EN 60 076 a IEC 61 378
	řízení napětí probíhá způsobem CFVV ¹⁾	řízení napětí probíhá způsobem CFVV ¹⁾	řízení napětí probíhá způsobem CFVV ¹⁾		system VFVV (s proměnným magn. tokem) pro realizaci převodu	
			pro rozvodny v bytové zástavbě			

¹⁾ přepínání odboček pod zatížením beze změny sycení magnetického obvodu, kdy ztráty naprázdno jsou konstantní na všech odbočkách.


6.3 Třífázové distribuční transformátory společnosti BEZ Transformátory, a. s. - olejové (1) [14]

TYP [TOHn]	268/22	298/22	318/22	338/22	358/22	378/22	388/22	398/22	408/22	418/22	428/22	438/22
Jmenovitý výkon S_n [kVA]	50	100	160	250	400	630	800	1 000	1 250	1 600	2 000	2 500
Jmenovitý napětí VN [kV]	22 (6, 10)											
Jmenovitý napětí NN [V]	400/231, 420/242 nebo na požádání jiné											
Napětí nakrátko $u_k (75^\circ\text{C})$ [%]	4						6					
Proud naprázdno i_0 [%]	2	2	1,8	1,8	1,6/1,4	1/1,1	0,8	0,7/0,8	0,6	0,6	0,5	neuveveno
Ztráty nakrátko ΔP_0 [W]	1 350	2 150	3 100	4 200	6 000	8 700	10 500	13 000	16 000	20 000	26 000	26 500
Ztráty naprázdno $\Delta P_k (75^\circ\text{C})$ [W]	125/190	210/320	300/460	425/650	610/930	800/1 000	930/1 400	1 100/1 700	1 350/2 100	1 700/2 600	2 100/3 100	2500/-
Zapojení	Yzn1						Dyn1					
Chlazení	ONAN											

Další specifikace	<p>hermeticky uzavřený, zcela naplněný systém izolační hladina: U_m 25 kV, LI 150, AC 50/3 odbočky na VN: $\pm 2 \times 2,5$ % třída izolace: A rad Co - Ck (AC'), rad CoDk (BC') rad EoDk (BA')</p>
--------------------------	---

6.4 Třífázové distribuční transformátory společnosti BEZ Transformátory, a. s. - olejové (2) [14]

TYP [TOHn]	299/22	319/22	339/22	359/22	379/22	389/22	399/22	409/22	419/22	429/22
Jmenovitý výkon S_n [kVA]	100	160	250	400	630	800	1 000	1 250	1 600	2 000
Jmenovitý napětí VN [kV]	22 (6, 10)									
Jmenovitý napětí NN [V]	400/231, 420/242 nebo na požádání jiné									
Napětí nakrátko $u_k(75^\circ\text{C})$ [%]	4		4 / 6		4 / 6		6			
Proud naprázdno i_0 [%]	neuveдено									
Ztráty nakrátko ΔP_0 [W]	130/145/ 210	190/210/ 300	260/300/ 425	380/430/ 610	450/600/560/ 860/840	580/-	650/770/ 1 100	850/-	1 070/-/ 1 700	1 300/-
Ztráty naprázdno $\Delta P_k(75^\circ\text{C})$ [W]	1 250/ 1 475	1 700/ 2 000	2 350/ 2 750	3 250/ 3 850	4 800/ 5 400/5 600	6 400/-	7 600/ 9 000/9 200	10 000/-	12 750/-/ 14 000	16 400/-
Zapojení	Yzn1	Yzn1	Yzn1/Dyn1	Dyn1						
Chlazení	ONAN									

Další specifikace		hermeticky uzavřený, zcela naplněný systém izolační hladina: U_m 25 kV, LI 150, AC 50/3 odbočky na VN: $\pm 2 \times 2,5$ % třída izolace: A rad $B_k - A_0$ (C - C' -30%) max se sníženými ztráty rad $B_k - A_0$ (C - C' -30%) max rad $B_k C_0$ max (CC' max)
------------------------------	--	--

6.5 Třífázové distribuční transformátory společnosti BEZ Transformátory, a. s. - suché (1) [15]

TYP [aTSE]	692/10	712/10	732.10	752/10	772/10	782/10	792/10	802/10	812/10	822/10	832/10
Jmenovitý výkon S_n [kVA]	100	160	250	400	630	800	1 000	1 250	1 600	2 000	2 500
Jmenovitý napětí VN [kV]	6, 10										
Jmenovitý napětí NN [V]	400/231, 420/242 nebo na požádání jiné										
Napětí nakrátko $u_k(75^\circ\text{C})$ [%]	6										
Proud naprázdno i_0 [%]	0,8	0,6	0,55	0,4	0,35	0,35	0,3	0,3	0,25	0,25	0,2
Ztráty nakrátko ΔP_0 [W]	360	610	820	1 110	1 370	1 700	2 000	2 500	2 800	3 500	4 300
Ztráty naprázdno $\Delta P_k(75^\circ\text{C})$ [W]	1 900	2 720	3 660	4 900	6 700	7 700	8 800	10 500	12 300	14 900	18 300
Zapojení	Yyn0 (při 231 V)			Dyn1 (při 400, 420 V)							
	Yzn1 (při 400, 420 V)			Dy1 (při 525 V)							
	Yy0 (při 525 V)										
Chlazení	AN										

Další specifikace	zkoušeno podle STN EN 60076 a STN 351110 třída izolace: F odbočky na vinutí VN: $\pm 2 \times 2,5$ % vinutí z Al třída požárních vlastností: F1 třída odolnosti vůči prostředí: E2 třída klimatické odolnosti: C2 izolační hladina: 6 kV U_m 7,2 kV LI 60 AC 20 a 10 kV U_m 12 kV LI 75 AC 28
--------------------------	--

6.6 Třífázové distribuční transformátory společnosti BEZ Transformátory, a. s. - suché (2) [15]

TYP [aTSE]	692/22	712/22	732.22	752/22	772/22	782/22	792/22	802/22	812/22	822/22	832/22
Jmenovitý výkon S_n [kVA]	100	160	250	400	630	800	1 000	1 250	1 600	2 000	2 500
Jmenovitý napětí VN [kV]	22										
Jmenovitý napětí NN [V]	400/231, 420/242 nebo na požádání jiné										
Napětí nakrátko $u_k(75^\circ\text{C})$ [%]	6										
Proud naprázdno i_0 [%]	0,8	0,6	0,55	0,4	0,35	0,3	0,3	0,3	0,25	0,25	0,25
Ztráty nakrátko ΔP_0 [W]	460	650	880	1 200	1 650	2 000	2 300	2 800	3 100	4 000	5 000
Ztráty naprázdno $\Delta P_k(75^\circ\text{C})$ [W]	1 800	2 500	3 300	4 800	6 800	8 200	9 600	11 500	14 000	16 600	20 000
Zapojení	Yyn0 (při 231 V)			Dyn1 (při 400, 420 V)							
	Yzn1 (při 400, 420 V)			Dy1 (při 525 V)							
	Yy0 (při 525 V)										
Chlazení	AN										

Další specifikace	<p>zkoušeno podle STN EN 60076 a STN 351110</p> <p>třída izolace: F</p> <p>odbočky na vinutí VN: $\pm 2 \times 2,5$ %</p> <p>vinutí z Al</p> <p>třída požárních vlastností: F1</p> <p>třída odolnosti vůči prostředí: E2</p> <p>třída klimatické odolnosti: C2</p> <p>izolační hladina: 22 kV U_m 25 kV LI 125 AC 50</p>
-------------------	--

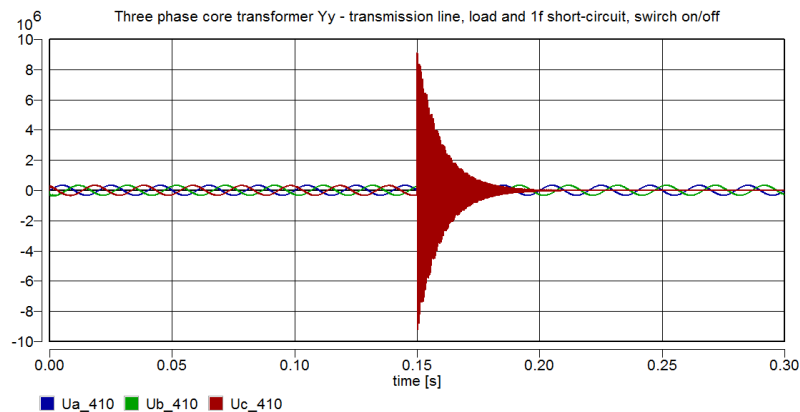
6.7 Třífázové distribuční transformátory společnosti BEZ Transformátory, a. s. - amorfní [15]

TYP [TOHn]	330/22.1	350/22.1	370/22.1	TE 790/10.1
Jmenovitý výkon S_n [kVA]	250	400	630	1 000
Jmenovitý napětí VN [kV]	22	22	22	10
Jmenovitý napětí NN [V]	420/242	420/242	420/242	231/400/420/525
Napětí nakrátko $u_{k(75^\circ\text{C})}$ [%]	4	6	6	6
Ztráty nakrátko ΔP_0 [W]	120	150	210	650
Ztráty naprázdno $\Delta P_{k(75^\circ\text{C})}$ [W]	2 500	4 600	6 500	8 800
Zapojení	Dyn1	Dyn1	Dyn1	Dyn5
Chlazení	ONAN	ONAN	ONAN	AN

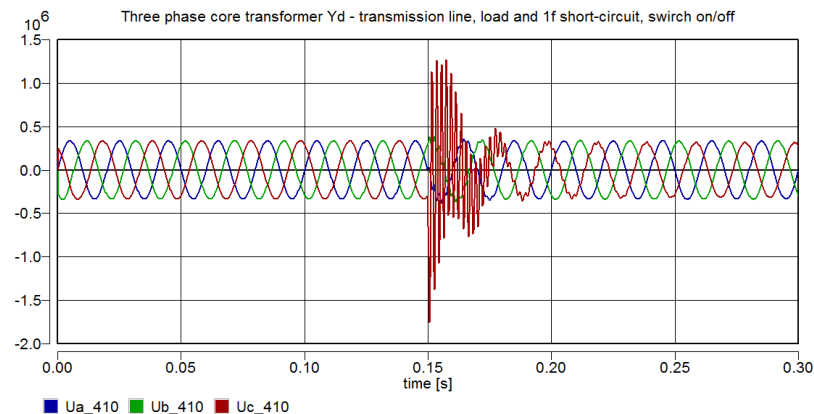
Další specifikace	<p>olejové transformátory hermeticky uzavřený, zcela naplněný systém izolační hladina: U_m 25 kV, LI 150, AC 50/3 odbočky na VN: $\pm 2 \times 2,5$ % třída izolace: A zkoušeno podle STN EN 50464 (EN 50464)</p>	<p>suchý transformátor třída izolace: F třída požárních vlastností: F1 třída odolnosti vůči prostředí: E2 třída klimatické odolnosti: C2 krytí IP 00 odbočky: $\pm 2 \times 2,5$ % zkoušeno podle STN EN 50464 (EN 50464) izolační hladina: 10 kV U_m 12 kV LI 60 AC 28</p>
--------------------------	---	---

6.8 Porovnání chování transformátoru v zapojení YNyn a YNd na jednofázovém zkratu a jeho následné vypnutí u zdroje

Napětí na vstupu do transformátoru (*hladina 410 kV*)

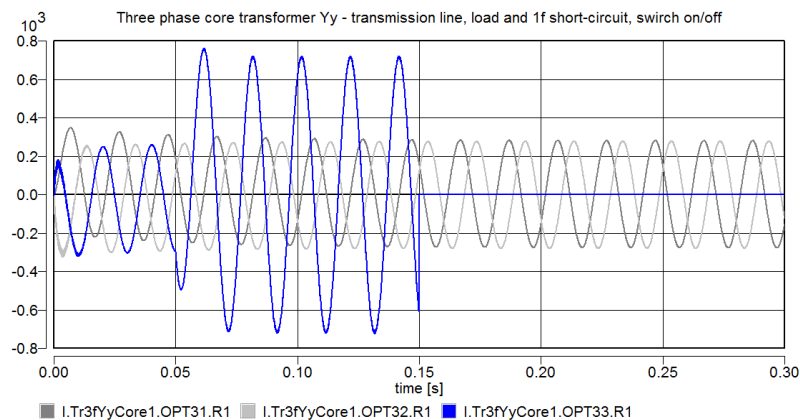


Obr. 6.1: Napětí zapojení vinutí YNyn na hladině 410 kV

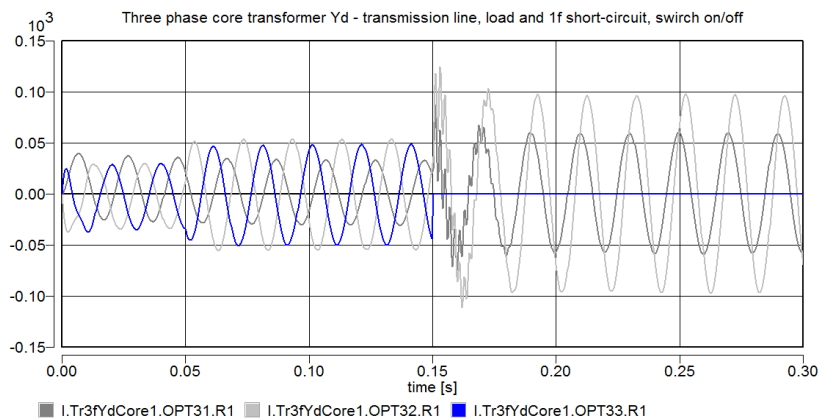


Obr. 6.2: Napětí zapojení vinutí YNd na hladině 410 kV

Průdy na vstupu do transformátoru (*hladina 410 kV*)

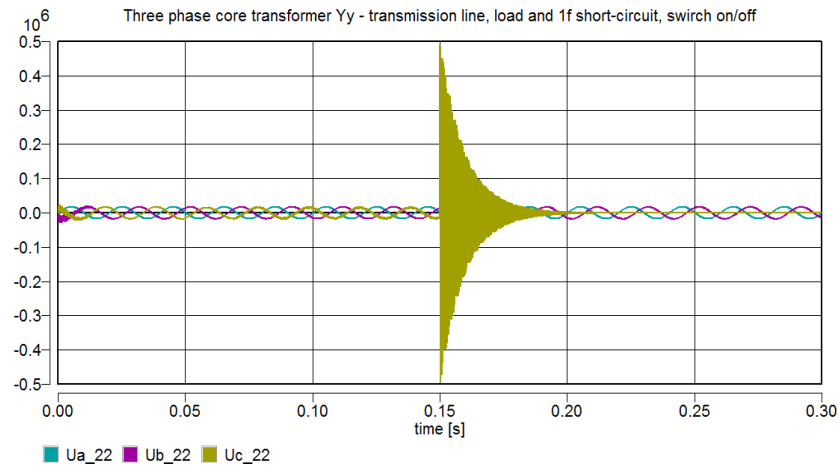


Obr. 6.3: Průdy zapojení vinutí YNyn na hladině 410 kV

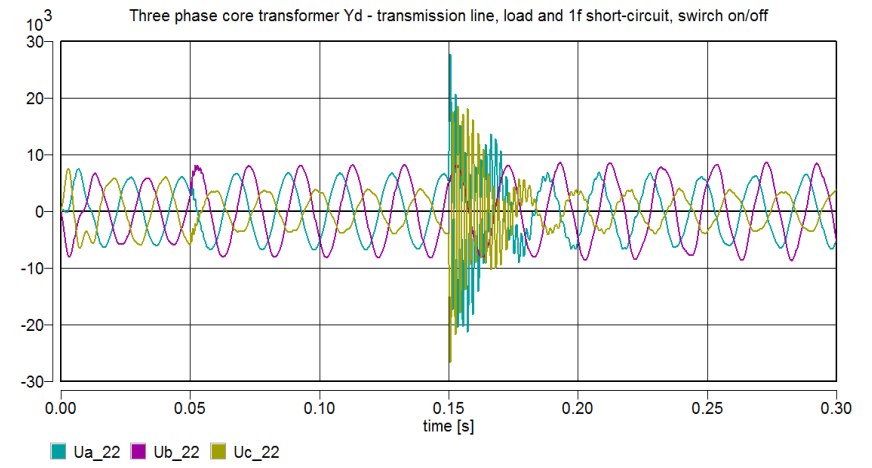


Obr. 6.4: Průdy zapojení vinutí YNd na hladině 410 kV

Napětí na výstupu z transformátoru (hladina 22 kV)

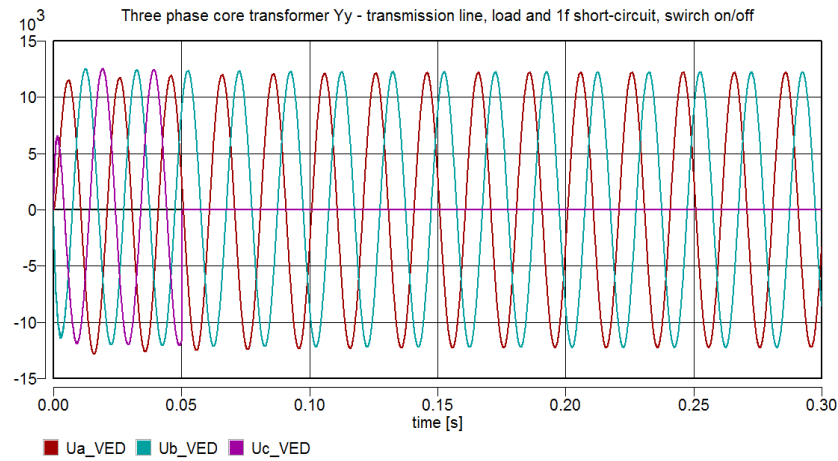


Obr. 6.5: Napětí zapojení vinutí YNyn na hladině 22 kV

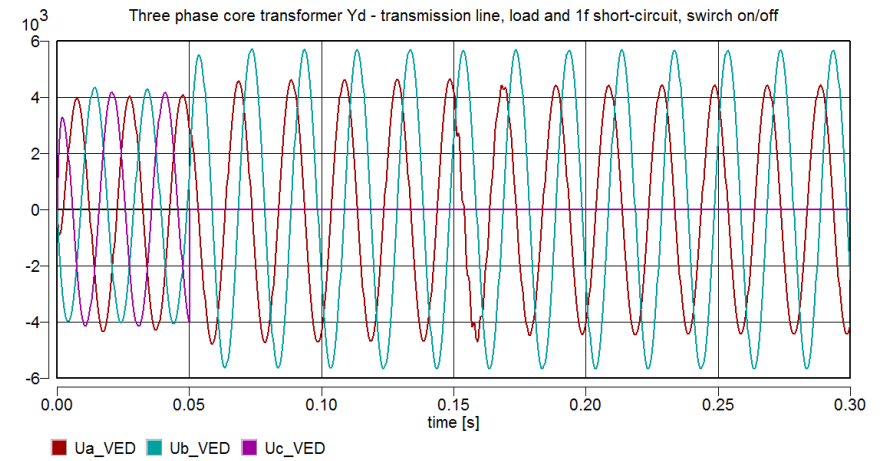


Obr. 6.6: Napětí zapojení vinutí YNd na hladině 22 kV

Napětí za vedením (hladina 22 kV)

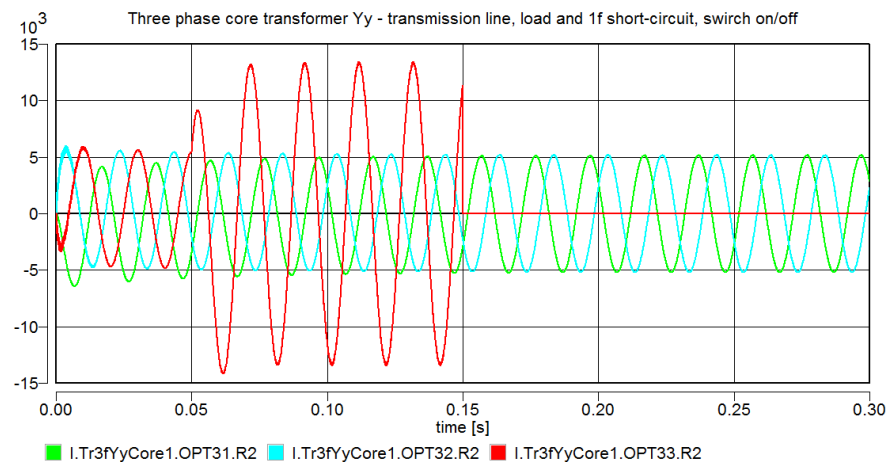


Obr. 6.7: Napětí za vedením - zapojení YNyn

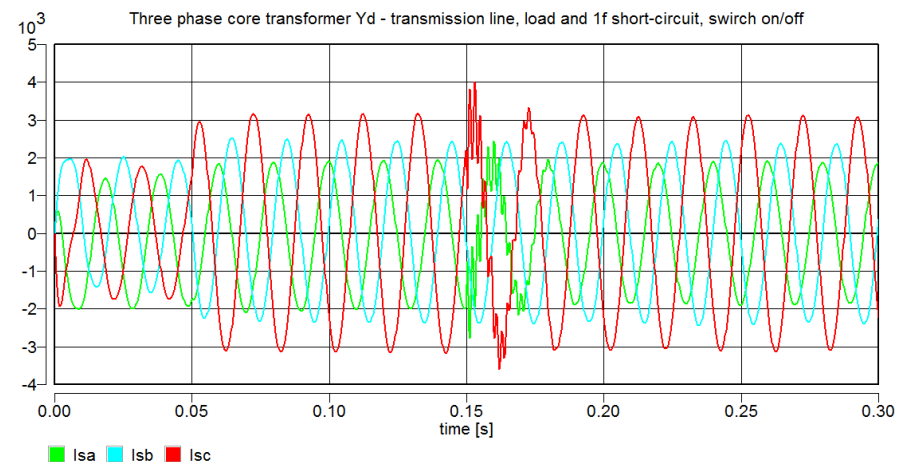


Obr. 6.8: Napětí za vedením - zapojení YNd

Proudy na výstupu z transformátoru (hladina 22 kV)

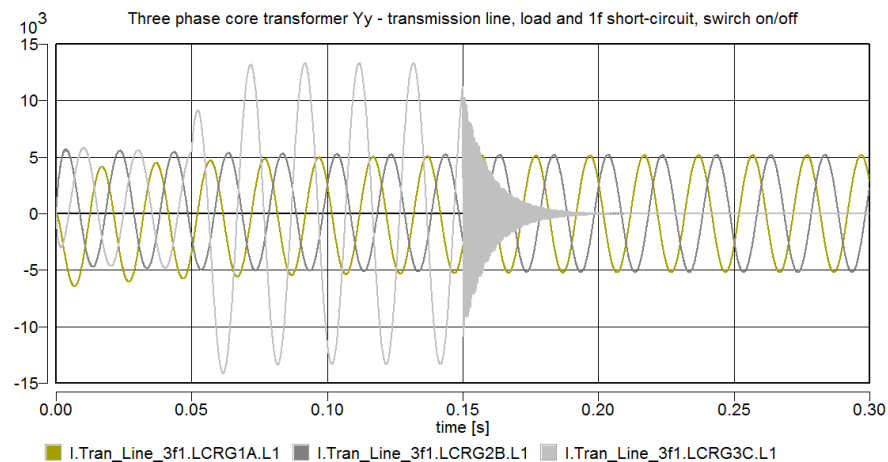


Obr. 6.9: Proudy zapojení vinutí YNyn na hladině 22 kV

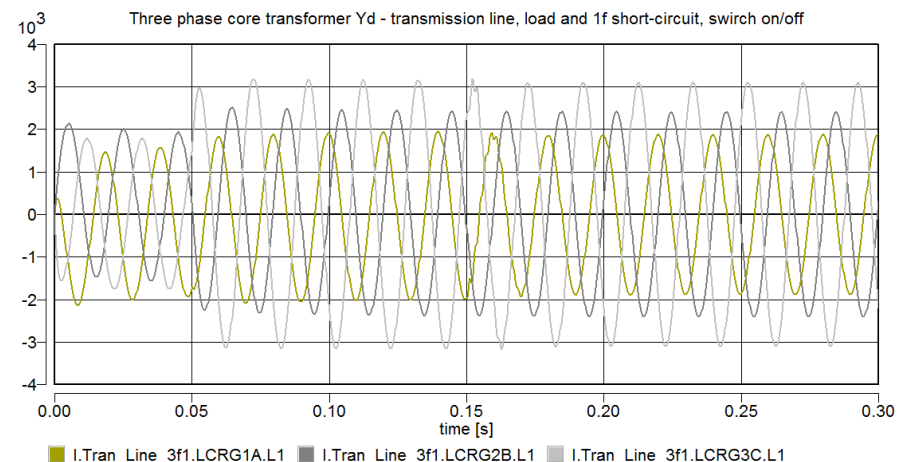


Obr. 6.10: Proudy zapojení vinutí YNd na hladině 22 kV

Proudy za vedením (hladina 22 kV)



Obr. 6.11: Proudy za vedením - zapojení YNyn



Obr. 6.12: Proudy za vedením - zapojení YNd