

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2016

Bc. Martin Suhaj

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Návrh součtového transformátoru proudu
Design of Differential Current Transformer

2016

Bc. Martin Suhaj

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Martin Suhaj**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika
Téma: **Návrh součtového transformátoru proudu.
Design of Differential Current Transformer**
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor součtových transformátorů proudu.
2. Rozbor diferenciálních ochranných systémů a jejich napájení.
3. Navrhněte součtový MTP pro elektrárenský blok JEDU.
4. Proveďte rozbor řešení včetně dovoleného pole chyb.
5. Realizujte výkres sestavy MTP

Seznam doporučené odborné literatury:


1. Kopeček, Dvořák.: Přístrojové transformátory, SNTL 1964
2. Král, Vaněk.: Elektromagnetické přístroje, VUT Brno 1985
3. Janíček a kol.: Digitální ochrany v elektrizační soustavě, STU Bratislava 2004

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Zdeněk Hytka, CSc.**

Datum zadání: 01.09.2015

Datum odevzdání: 29.04.2016


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Branticích dne: 6.4.2016

Martin Suhaj
.....

Martin Suhaj

Poděkování

Děkuji panu Ing. Zdeňku Hytkovi, Csc. za odborné vedení závěrečné práce, poskytování rad a doporučení.

Abstrakt

Úkolem této práce bylo navrhnout součtový transformátor pro diferenciální ochranu generátoru. Parametry tohoto transformátoru určuje generátor a digitální ochrana. Generátor, pro který jsou uvedeny výpočty, je umístěn na elektrárenském bloku Jaderné elektrárny Dukovany. V této práci je také proveden rozbor přístrojových transformátorů proudu a diferenciálních ochran generátorů.

Klíčová slova:

Měřicí transformátor proudu, součtový transformátor, diferenciální ochrana generátoru, závislost chyb, digitální ochrany

Abstract

The task of this work was to design a differential transformer for differential protection of generator. The parameters of the transformer determines the generator and digital protection. Generator, for which calculations are listed, is on block nuclear power station Dukovany. This work is also done analysis Instrument current transformer ad differential protection of generator.

Keywords:

Measuring current transformer, differential transformer, differential protection of generator, dependency of errors, digital protection

Seznam použitých symbolů a zkratek

Zkratka	Popis	Jednotka
ALF	Nadproudový činitel	[-]
B	Šířka zapouzdřeného jádra	[mm]
B	Magnetická indukce	[T]
B _m	Maximální hodnota magnetická indukce	[T]
B _n	Jmenovitá hodnota magnetická indukce	[T]
B _{sk}	Skutečná hodnota magnetické indukce	[T]
D	Střední průměr jádra	[mm]
D _{1i}	Průměr kruhového průřezu	[mm]
D _{2i}	Vnitřní průměr magnetického obvodu s vinutím	[mm]
D _{3e}	Vnější průměr pouzdra	[mm]
D _{3i}	Vnitřní průměr pouzdra	[mm]
D _e	Vnější průměr jádra	[mm]
D _i	Vnitřní průměr jádra	[mm]
D _{prim}	Průměr primárního vodiče	[mm]
D' _{2i}	Nejmenší možný průměr magnetického obvodu	[mm]
EDU	Jaderná elektrárna Dukovany	[-]
FS _n	Jmenovité nadproudové číslo	[-]
FS _{sk}	Skutečné nadproudové číslo	[-]
FS	Nadproudové číslo	[-]
F ₁	Primární proudění	[A]
F ₂	Sekundární proudění	[A]
H	Výška zapouzdřeného jádra	[mm]
H	Intenzita magnetického pole	[A/m]
I ₁	Primární proud	[A]
I _{1m}	Krajní provozovací proud	[A]
I _{1n}	Jmenovitý primární proud	[A]
I ₂	Sekundární proud	[A]
I _{2n}	Jmenovitý sekundární proud	[A]
I ₁₀	Proud protékající příčnou větví	[A]

I_{20}	Celková chyba transformátoru proudu znázorněné v komplexním diagramu	[A]
I_{Fe}	Proud na krytí ztrát v železe	[A]
I_{μ}	Magnetizační proud	[A]
I_{dn}	Jmenovitý dynamický proud	[A]
I_{thn}	Jmenovitý krátkodobý tepelný proud	[A]
N_1	Počet závitů primárního vinutí	[–]
N_2	Počet závitů sekundárního vinutí	[–]
PTP	Přístrojový transformátor proudu	[–]
PTN	Přístrojový transformátor napětí	[–]
PWR	Tlakovodní reaktor	[–]
P	Zátěž transformátoru proudu	[VA]
P_c	Celková zátěž transformátoru proudu	[VA]
P_{ξ}	Činná složka jmenovité zátěže	[VA]
P_i	Vnitřní zátěž při jmenovitém proudu	[VA]
P_j	Jalová složka jmenovité zátěže	[VA]
P_n	Jmenovitá zátěž	[VA]
R	Činná složka břemene	[Ω]
R_2	Odpor sekundárního vinutí	[Ω]
R_{Fe}	Odpor železa	[Ω]
S	Průřez magnetického obvodu	[mm ²]
S_2	Průřez sekundárního vodiče	[mm ²]
TG	Turbogenerátor	[–]
TP	Transformátor proudu	[–]
T_p	Třída přesnosti	[–]
U_1	Napětí na primárních svorkách	[V]
U_2	Napětí na sekundárních svorkách	[V]
U_{10}	Indukované napětí od společného toku	[V]
U_{20}	Indukované napětí v sekundárním vinutí	[V]
VVER	Vodo-vodní energetický reaktor	[–]
VN	Vysoké napětí	[–]
VVN	Velmi vysoké napětí	[–]

ZVN	Zvlášť vysoké napětí	[–]
X	Jalová složka břemene	[Ω]
X ₂	Rozptylová reaktance sekundárního vinutí	[Ω]
Z	Vnější břemeno transformátoru proudu	[Ω]
Z _c	Celkové břemeno transformátoru proudu	[Ω]
Z _i	Vnitřní břemeno transformátoru proudu	[Ω]
Z _n	Jmenovité břemeno transformátoru proudu	[Ω]
ZV	Zapouzdřené vodiče	[–]
a ₀	Měrné budící proudění celkové	[Am ⁻¹]
a _g	Měrné budící proudění činné	[Am ⁻¹]
b	Šířka magnetického jádra	[mm]
cos φ	Sekundární účinnost transformátoru proudu	[–]
d ₂	Průměr sekundárního vodiče	[mm]
d _{2i}	Průměr izolovaného sekundárního vodiče	[mm]
f	Frekvence	[Hz]
h	Výška magnetického jádra	[mm]
k	Hodnota jmenovitého proudu	[–]
k _n	Jmenovitý převod transformátoru proudu	[–]
l ₂	Střední délka závitů sekundárního vinutí	[mm]
l _m	Střední délka magnetického obvodu	[mm]
n ₂	Počet vrstev sekundárního vinutí	[–]
p _{Fe}	Měrné ztráty v železe	[Wkg ⁻¹]
r	Tloušťka víčka pouzdra	[mm]
s	Šířka stěny pouzdra	[mm]
t _i	Tloušťka izolační vrstvy	[mm]
t ₂	Výška sekundárního vinutí	[mm]
β	Úhel mezi proudem I ₂ a napětím U ₂	[°]
δ _i	Chyba úhlu	[min]
ΔI	Celková chyba transformátoru proudu znázorněná v komplexním diagramu	[A]
γ _{Fe}	Měrná hmotnost	[kg · m ⁻³]
ε _c	Celková chyba	[%]

ε_i	Chyba proudu	[%]
ξ	Činitel plnění magnetického obvodu	[–]
ξ_1	Činitel plnění při skládání vodičů vedle sebe	[–]
ξ_2	Činitel nárůstu výšky sekundárního vinutí	[–]
ρ	Měrný odpor	[Ωm]
σ_{thn}	Proudová hustota primárního vinutí	[–]
φ	magnetický tok	[Wb]
$^{\circ}\text{C}$	Celsiův stupeň	[–]

Obsah

1	Úvod	1
2	Přístrojové transformátory	2
2.1	Účel a význam přístrojových transformátorů	2
2.2	Rozdělení přístrojových transformátorů.....	2
3	Transformátor proudu	3
3.1	Základní názvosloví	4
3.2	Fázorový diagram.....	6
3.2.1	Komplexní diagram chyb	9
3.3	Závislost chyb na jednotlivých veličinách	10
3.3.1	Závislost na proudu	10
3.3.2	Závislost na břemeni	11
3.3.3	Závislost na sekundárním účinníku	12
3.3.4	Závislost na kmitočtu	12
3.3.5	Závislost na primárním proudu ($N_1 I_1$).....	12
3.4	Korekce chyby.....	13
3.4.1	Závitová korekce na sekundární straně	13
3.4.2	Odporový a indukční dělič	13
3.4.3	Paralelní řazení dvou sekundárních vinutí transformátoru.....	14
3.4.4	Rozdělení sekundárního vinutí na dvě paralelní větve.....	14
3.4.5	Provedení neúplného (zlomkového) závitu	14
3.5	Transformátor proudu v nadproudové oblasti	15
3.6	Transformátor proudu při zkratech.....	16
3.7	Napětí na rozpojených sekundárních svorkách transformátoru proudu	16
4	Diferenciální (součtové) transformátory	17
5	Digitální ochrany	18
5.1	Blokové schéma funkce elektrické ochrany	19
5.2	Poruchové stavy	19
5.2.1	Zkrat	19
5.2.2	Zemní spojení	20
5.2.3	Zemní spojení v turbogenerátoru a jejich vliv na provoz.....	21
5.2.4	Přetížení.....	21
5.2.5	Přepětí.....	21

5.2.6	Podpětí.....	21
5.2.7	Snížení kmitočtu.....	21
5.2.8	Zvýšení kmitočtu.....	21
5.2.9	Nesouměrnost proudu.....	21
5.2.10	Nesouměrnost napětí.....	22
5.2.11	Zpětný tok výkonu	22
5.2.12	Ztráta buzení a asynchronní chod	22
5.2.13	Ložiskové proudy.....	22
6	Srovnávací ochrany.....	23
6.1	Princip	23
6.2	Dělení	23
6.3	Rozdílové ochrany.....	23
6.3.1	Příčná rozdílová ochrana	24
6.3.2	Podélná rozdílová ochrana	24
6.4	Základní členy ochran	26
6.4.1	Vstupní člen.....	26
6.4.2	Popudový člen	26
6.4.3	Logika.....	26
6.4.4	Měřicí člen.....	26
6.4.5	Časový člen	28
6.4.6	Koncový člen.....	28
6.4.7	Napájecí člen	28
6.4.8	Filtry souměrných složek	29
7	Jaderná elektrárna Dukovany	30
7.1	Turbogenerátory instalované na EDU	30
7.2	Zapouzdřené vodiče	30
7.2.1	Zapouzdřené vodiče ve vyvedení výkonu generátoru	31
8	Návrh přístrojového transformátoru proudu.....	33
8.1	Sekundární vinutí	34
8.2	Rozměry magnetického obvodu.....	34
8.2.1	Rozměry jádra	35
8.3	Výpočet chyb a kontrola nadproudového čísla	37
8.4	Diagram chyb	42
9	Software pro tvorbu výkresu.....	45

10	Závěr.....	46
-----------	-------------------	-----------

Použitá literatura

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Seznam grafu

Seznam příloh

Přílohy

1 Úvod

Pro bezpečný a spolehlivý provoz zařízení, jako je generátor, transformátor, jsou nutné elektrické ochrany. Dále je pro tyto elektrické ochrany zapotřebí měřících transformátorů, aby mohly vyhodnotit stav daného zařízení.

Přístrojové transformátory proudu jsou přístroje pracující na principu elektromagnetické indukce. Rozlišujeme měřící a jisticí transformátory. Ochrany, jež využívají tyto transformátory pro měření, jsou díky tomu galvanicky odděleny od hlavního měřeného obvodu s vysokým napětím, tímto je zajištěna ochrana a bezpečnost obsluhy a měřících přístrojů.

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout součtový transformátor proudu pro diferenciální ochranu generátoru, který je v provozu na Jaderné elektrárně Dukovany. V této práci je popsán rozbor přístrojových transformátorů. Zaměříme se na základní definice a vlastnosti. Jednotlivé kapitoly týkající se transformátoru proudu se zabývají rozбором fázového diagramu a závislostí vzniku chyb. Také je uveden speciální případ transformátoru proudu, a to součtový transformátor. Dále jsou rozebrány digitální ochrany, jejich základní vlastnosti a poruchy, jež by měly detekovat. Následně se zabýváme speciálním typem ochrany, a to diferenciální ochranou generátoru. A nakonec je uveden výpočet daného měřícího přístroje.

2 Přístrojové transformátory

Přístrojové transformátory přeměňují velikost sledované elektrické veličiny (napětí nebo proudu) na hodnotu vhodnou pro měřicí nebo ochranné přístroje. Zajišťují také elektrické oddělení obvodů ochrany a měření od obvodů vn, vvn a zvn. Umožňují umístění vyhodnocovacích obvodů mimo dosah působení magnetických a elektrických polí energetických zařízení a měřicí a jistící přístroje. (1)

2.1 Účel a význam přístrojových transformátorů

- chrání vhodnou konstrukcí (u PTP) obvody ochrany před škodlivými dynamickými i tepelnými účinky nadproudů při poruchových stavech v elektrizační soustavě
- dovolují přehledné a účelné soustředění měřicích a jistících přístrojů v dozorných mimo rozvodny (2)

2.2 Rozdělení přístrojových transformátorů

Přístrojové transformátory se dělí podle různých hledisek:

a) Podle transformované veličiny:

- přístrojové transformátory proudu (PTP)
- přístrojové transformátory napětí (PTN)
- přístrojové transformátory kombinované

b) podle tvaru a umístění primárních svorek

- transformátor podpěrný
- transformátor průchodkový
- transformátor průchozí (nemá primární vinutí)

c) podle primárního vinutí

- závitové
- jednozávitové
- smyčkové
- tyčové
- násuvné
- prstencové

d) podle magnetického obvodu

- jednojádrové
- vícejádrové (dvoujádrové, jistící a měřicí)
- s rozebíratelným magnetickým obvodem

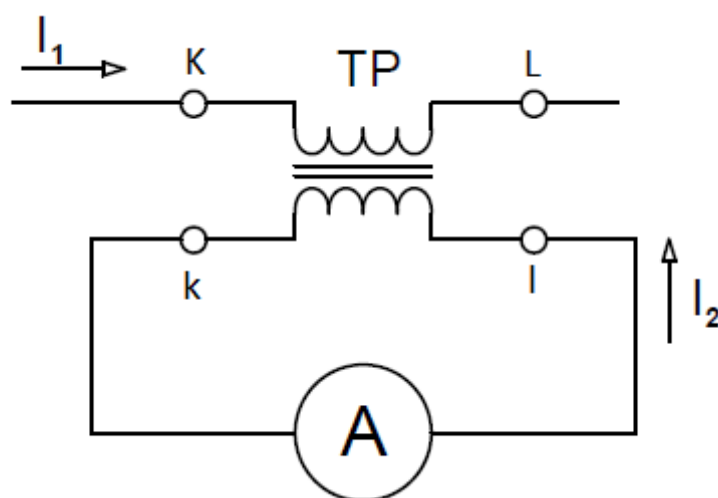
e) podle jiných hledisek

- kaskádové
- integrální (sčítací)
- s několika sekundárními výstupy
- diferenciální (rozdílové) (2) (3)

3 Transformátor proudu

Transformátor pracuje na stejném principu jako výkonový transformátor. Jedná se tedy o Faradayův indukční zákon, neboli při časové změně magnetického toku, procházející plochou závitů, dochází k indukci elektrického proudu v závitě. Poměr primárního a sekundárního proudu je určen poměr závitů primárního a sekundárního vinutí, jestliže zanedbáme vliv chyby proudu. (3)

Transformátor je zapojen sériově do obvodu stejně jako ampérmetr. Toto je také zásadní rozdíl mezi výkonovým transformátorem a transformátorem proudu. Další rozdíl je také v tom, že u transformátoru proudu nemůže dojít k rozpojení svorek za provozu, neboť tímto vzniká havarijný stav. Následek tohoto je, že v sekundárním vinutí se naindukuje maximální napětí, které dosahuje až desítek kilovoltů a tímto vzniká velké nebezpečí jak pro transformátor, tak i pro obsluhu. (3)



Obrázek 1 - Zapojení transformátoru proudu

Jak můžeme vidět na obrázku 1 je zapojení transformátoru proudu. Vstupní (primární) vinutí, jehož proud I_1 je dán zátěží a má se měřit, je zapojen sériově do elektrického obvodu. Směr proudu I_1 byl zvolen od svorky K ke svorce L. Toto vinutí podle konstrukčního uspořádání a velikosti jmenovitého proudu může mít tvar cívky, smyčky o určitém, ale také i přepínatelným počtem závitů, pro velké proudy (nad 1000 A) může být pouhou tyčí. Výstupní (sekundární) vinutí má velký počet závitů izolovaně vinutých na skládaném jádru. Na svorky k a l se připojují přístroje měřící, jistící a signalizační, zapojené do série, tyto přístroje tvoří zátěž proudového transformátoru. Při daném proudu na vstupní straně je dán i proud výstupní strany, a tedy výkon se mění jen změnou napětí na výstupních svorkách k-l a udává se jako zdánlivý výkon ve VA. (4)

3.1 Základní názvosloví

Jmenovitý primární proud (I_{1n}) – efektivní hodnota proudu, která je potřebná k návrhu transformátoru proudu, tato hodnota je vždy uvedena na štítku (3)

Jmenovitý sekundární proud (I_{2n}) – odpovídá jmenovitému proudu dle převodu, také je uvedena na štítku transformátoru. Velikosti tohoto proudu jsou dány 1A a 5A. U násuvných a jednozávitových transformátorů do primárního proudu 200A je hodnota sekundárního proudu 1A a také u transformátorů, kde je délka přívodních vodičů k sekundárním svorkám vedla k jejich nevhodnému dimenzování. Nedoporučuje se nad 1500A jmenovitého proudu. Nejčastěji se užívá 5A. (3)

Krajní provozovací proud (I_{1m}) – může trvale procházet vinutím transformátoru, přičemž je připojeno jmenovité břemeno. Dále není překročeno dovolené oteplení a není změněna třída přesnosti. Pohybuje se běžně na 120% I_{1n} (3)

Vnější břemeno transformátoru proudu (Z) – je to součet impedancí přístrojů a přívodů zapojených na sekundární svorky (3)

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad [\Omega] \quad (1)$$

Vnitřní břemeno transformátoru proudu (Z_i) – je to součet reaktance a činného odporu sekundárního vinutí (3)

$$Z_i = \sqrt{R_2^2 + X_2^2} \quad [\Omega] \quad (2)$$

Celkové břemeno transformátoru proudu (Z_c) – fázový součet vnějšího a vnitřního břemene

Jmenovité břemeno transformátoru proudu (Z_n) – je to břemeno, které lze připojit, aniž by došlo k překročení třídy přesnosti (3)

Zátěž transformátoru (P)

$$P = Z \cdot I_{2n}^2 \quad [VA, \Omega, A] \quad (3)$$

Jmenovitý převod transformátoru proudu (k_n) – je to poměr jmenovitého primárního proudu k jmenovitému sekundárnímu (3)

$$k_i = \frac{I_{1n}}{I_{2n}} \quad [-, A] \quad (4)$$

Skutečný převod – je to poměr skutečného primárního a sekundárního proudu

Chyba proudu (ϵ_i) – příčinou této chyby je že skutečný převod transformátoru proudu se nerovná jmenovitému. Udává se v %. (3)

$$\epsilon_i = \frac{I_2 k_n - I_1}{I_1} \cdot 100 \quad [%, A] \quad (5)$$

Chyba úhlu (δ_i) - rozdíl fáze mezi fázory primárního a sekundárního proudu. Směr fázorů je volen tak, aby u ideálního transformátoru byl roven nule. Udává se v uhlových minutách. (3)

Celková chyba (ε_c) - v podmínkách ustáleného stavu je efektivní hodnota rozdílu mezi okamžitou hodnotou skutečného primárního proudu a okamžitou hodnotou skutečného sekundárního proudu násobenou jmenovitým převodem. Udává se v procentech a je definovaná vztahem: (5)

$$\varepsilon_c = \frac{100}{I_1} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (k_n \cdot i_2 - i_1)^2 dt} \quad [%, A] \quad (6)$$

Třída přesnosti (T_p) – určuje nejvyšší dovolenou chybu při daných podmínkách provozu

Měřicí transformátory:

- 0,1 – přesná laboratorní měření
 - 0,2 – laboratorní měření
 - 0,2s – zvláštní použití
 - 0,5 – měření spotřeby elektrické energie
 - 1 – podružné měření
 - 3 – orientační kontrolní měření
- Jistící transformátory: 5P, 10P (6)

Tabulka 1 - Dovolené chyby měřících transformátorů proudu podle

Primární proud v % I_{1n}	Třídy přesnosti měřících transformátorů proudu							
	0,1		0,2		0,5		1	
	Dovolené chyby proudu ε_i a úhlu δ_i							
	$\pm\varepsilon_i$	$\pm\delta_i$	$\pm\varepsilon_i$	$\pm\delta_i$	$\pm\varepsilon_i$	$\pm\delta_i$	$\pm\varepsilon_i$	$\pm\delta_i$
	[%]	[min.]	[%]	[min.]	[%]	[min.]	[%]	[min.]
5	0,4	15	0,75	30	1,5	90	3,0	180
20	0,2	8	0,35	15	0,75	45	1,5	90
100	0,1	5	0,2	10	0,5	30	1,0	60
120	0,1	5	0,2	10	0,5	30	1,0	60

Tabulka 2 - Dovolené chyby jisticích transformátorů proudu podle

Třída přesnosti	Chyba proudu ε_i a chyba úhlu δ_i při jmenovitém proudu		Celková chyba při jmenovitém primárním proudu
	$\pm\varepsilon_i$ [%]	$\pm\delta_i$ [min.]	
5P	1	60	5
10P	3	-	10

Jmenovitá zátěž (P_n) – je uvedena na štítku. Nepřekračuje 50VA. (3)

$$P_n = Z_n I_{2n}^2 \quad [VA, \Omega, A] \quad (7)$$

Sekundární účinník ($\cos\varphi$) – poměr činné a jalové složky. Pohybuje se okolo $\cos\varphi=0,8$ (3)

$$\cos\varphi = \frac{R}{Z} \quad [-, \Omega] \quad (8)$$

Nadproudivé číslo (FS) – poměr jmenovitého a primárního nadproudu ke jmenovitému proudu

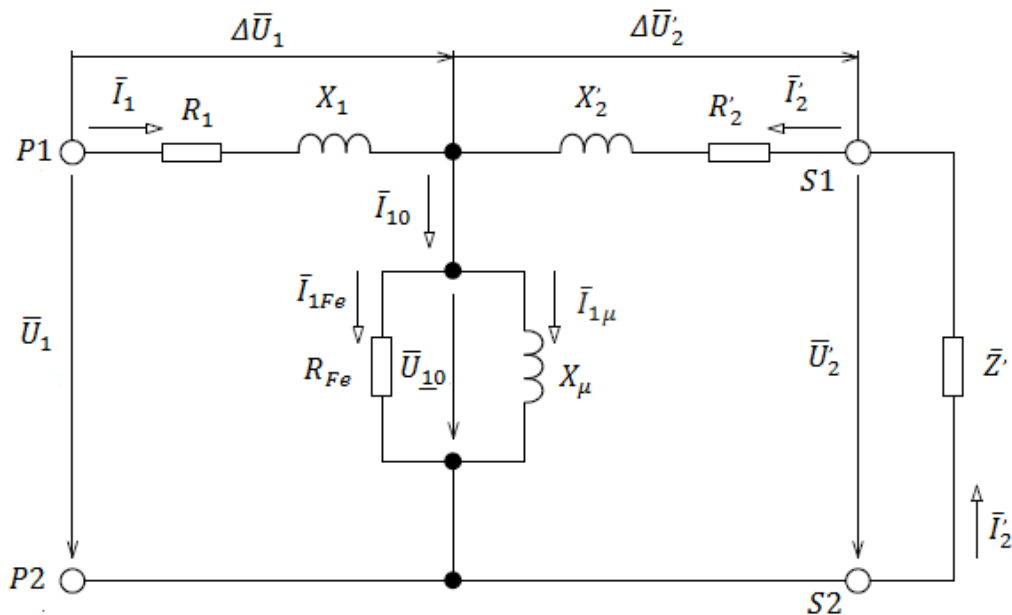
Nadproudový činitel (AFL) – poměr jmenovitého primárního nadproudu při dané přesnosti a jmenovitého primárního proudu (5)

Jmenovitý krátkodobý tepelný proud (I_{thn}) – efektivní hodnota primárního proudu, který transformátor vydrží po dobu 1 sekundy při zkratovaném sekundárním vinutí, aniž by došlo k zničení transformátoru (5)

Jmenovitý dynamický proud (I_{dyn}) – maximální hodnota primárního proudu, kterou transformátor vydrží bez elektrického nebo mechanického poškození elektrodynamickými silami při zkratovaném sekundárním vinutí (5)

3.2 Fázorový diagram

Transformátory proudu napájí proudové systémy měřících, jisticích a regulačních přístrojů. Jejich primární vinutí se zapojuje do série s obvodem, stejně jako ampérmetr. Toto je zásadní rozdíl oproti výkonovým transformátorům nebo transformátorům napětí, které se do obvodu připojují paralelně. Poměrem počtu primárního vinutí N_1 a sekundárního vinutí N_2 je určen (pokud zanedbáme chybu) poměr primárního proudu I_1 a sekundárního proudu I_2 , avšak napětí na obou vinutích jsou dána součinem proudu a příslušných impedancí (musí platit Ohmův zákon). (3)



Obrázek 2 - Náhradní schéma transformátoru

Pro jednotlivé obvody platí

$$\bar{U}_1 = R_1 \cdot \bar{I}_1 + X_1 \cdot \bar{I}_1 + \bar{U}_{10} \quad (9)$$

$$\bar{U}'_2 = R'_2 \cdot \bar{I}'_2 + jX'_2 \cdot \bar{I}'_2 + \bar{U}'_{20} \quad (10)$$

dosadíme proud \bar{I}_1

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_{10} - \bar{I}'_2 \quad (11)$$

úprava rovnice pro \bar{U}_1

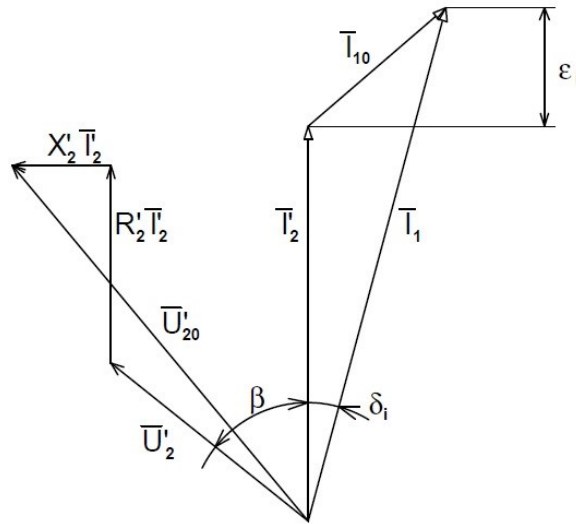
$$\bar{U}_1 = R_1 \cdot (\bar{I}_{10} - \bar{I}'_2) \cdot jX_1 \cdot (\bar{I}_{10} - \bar{I}'_2) + \bar{U}_{10} \quad (12)$$

Provedeme postupnou úpravu rovnic U_2 a U_1

$$\bar{U}_1 - \bar{U}'_2 = R_1 \cdot (\bar{I}_{10} - \bar{I}'_2) \cdot jX_1 \cdot (\bar{I}_{10} - \bar{I}'_2) + \bar{U}_{10} - R'_2 \cdot \bar{I}'_2 - jX'_2 \cdot \bar{I}'_2 - \bar{U}'_{20} \quad (13)$$

$$\bar{U}_1 - \bar{U}'_2 = (R_1 + jX_1) \cdot \bar{I}_{10} + (R_1 + R'_2 + jX_1 + jX'_2) \cdot (-\bar{I}'_2) \quad (14)$$

$$\bar{U}_1 = \bar{U}'_2 + (R_1 + jX_1) \cdot \bar{I}_{10} + (R_1 + R'_2 + jX_1 + jX'_2) \cdot (-\bar{I}'_2) \quad (15)$$



Obrázek 3 - Fázorový diagram

Pro napětí \bar{U}_1 platí

$$\bar{U}_1 = \bar{U}'_2 + \Delta\bar{U}_1 + \Delta\bar{U}_2 \quad (16)$$

V tomto případě je to vlastně úbytek napětí na vstupních svorkách transformátoru proudu K - L a skládá se z úbytků na primárním vinutí, sekundárním vinutí a napětí na vnějším břemeni. Z obrázku 3 je zřejmé, které veličiny budeme sledovat a které mají rozhodující vliv na chyby transformátoru proudu. Celková chyba transformátoru proudu je dána fázorem proudu \bar{I}_{10} , který můžeme rozložit na chybu proudu ϵ_i a chybu úhlu δ_i . Proud I_{10} má stejnou fyzikální podstatu a souvisí tedy s indukovaným napětím \bar{U}'_{20} , které je rozhodující pro magnetickou indukci v magnetickém obvodu. Proto nám postačí, když u transformátoru proudu určíme velikost napětí U_{20} . Fázor \bar{I}_{10} se skládá ze dvou složek: (3)

- magnetizační proud I_μ
- proud na krytí ztrát v železe I_{Fe}

U transformátoru proudu se změnou zátěže na sekundárních svorkách mění napětí \bar{U}'_2 (proud \bar{I}'_2 je dán převodem) a tedy i napětí indukované \bar{U}'_{20} . Podle indukčního zákona je tomuto napětí přímo úměrná hodnota magnetické indukce v magnetickém obvodu, kterému pak odpovídá určité magnetické

napětí a tím i proudu I_{10} . Tudíž může říci, že se zvyšující se zátěží roste proud \bar{I}_{10} (celková chyba). Tato závislost však není lineární - záleží ve které části magnetizační charakteristiky pracujeme. (3)

Následně budeme uvažovat za výchozí sekundární veličiny. Tedy všechny veličiny budou přepočteny na počet závitů sekundárního vinutí podle vztahů: (3)

$$U'_1 = U_1 \cdot \frac{N_2}{N_1} \quad (17)$$

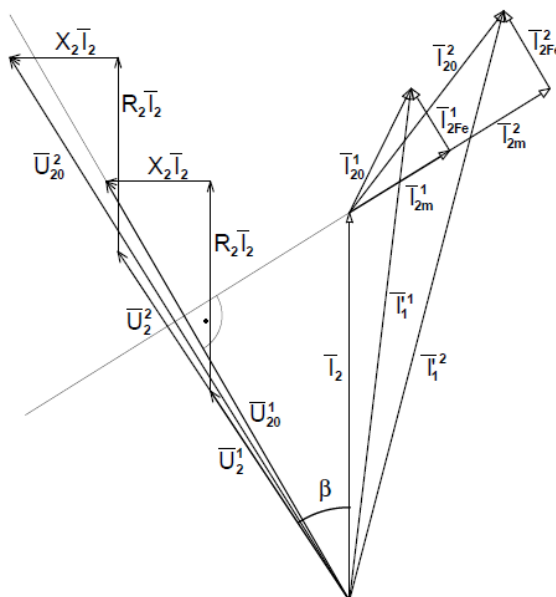
$$I'_1 = I_1 \cdot \frac{N_1}{N_2} \quad (18)$$

$$R'_1 = R_1 \cdot \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \quad (19)$$

$$X'_1 = X_1 \cdot \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \quad (20)$$

Jako výchozí budeme uvažovat fázor \bar{I}_2 . K němu sestrojíme fázorový diagram a znázorníme celkovou chybu pro dvě různé zátěže obrázku 4. Zátěž připojená na sekundární svorky se projeví úbytkem napětí na primárních svorkách podle poměru (3)

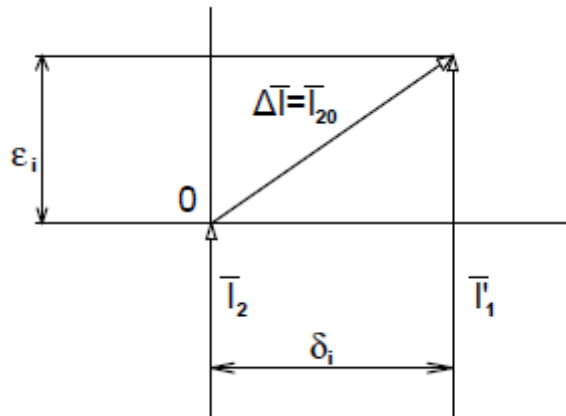
$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (21)$$



Obrázek 4 - Fázorový diagram pro dvě různé zátěže

Rozdíl mezi fázory \bar{I}_2 a \bar{I}'_1 budeme označovat jako fázorovou chybu (celkovou chybu). Tuto chybu pak můžeme rozložit na chybu proudu ε_i , která je vyjádřena v % a chybu úhlu δ_i (vyjadřujeme v min). Z tabulky chyb pro jednotlivé třídy přesnosti jsou myšleny maximálně o úhly 180' a proto můžeme považovat fázory \bar{I}'_1 a \bar{I}_2 prakticky za rovnoběžné a oblouk se středem v počátku fázoru sekundárního proudu o poloměru \bar{I}_2 bude považován za přímku kolmou na fázor proudu \bar{I}_2 . (3)

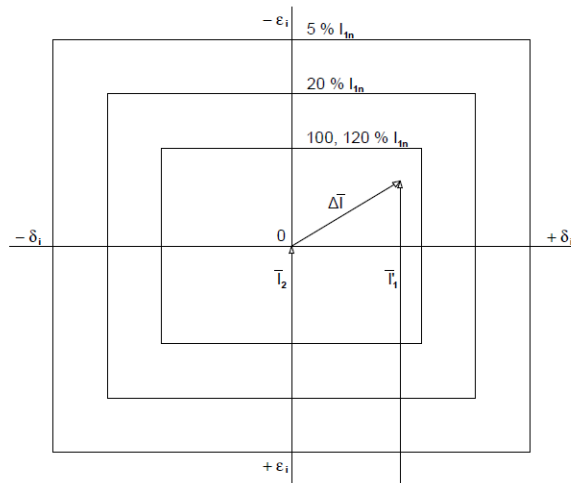
3.2.1 Komplexní diagram chyb



Obrázek 5 – Základ pro vytvoření komplexního diagramu chyb

Diagram na obrázku 5 je základem pro vytvoření komplexního diagramu chyb transformátoru proudu. Zároveň vyjadřuje chybu proudu i chybu úhlu. U transformátoru proudu se hranice chyb mění podle proudu (tabulky 1). Koncový bod se musí pro danou třídu přesnosti vždy pohybovat uvnitř příslušného pole chyb podle toho při jakém proudu (0,1-1,2I_n) se provedlo měření. Pokud bychom chtěli vykreslit tento diagram celý, potřebovali bychom k tomu prostorové znázornění. Jestli budeme kreslit komplexní diagram jako plošný obrazec, musíme uvést jako parametr proud, pro který hranice platí. (3)

Podle velikosti celkové chyby transformátoru, znázorněné v komplexním diagramu, je možné rozhodovat o kvalitě magnetického materiálu při jednotlivých zátěžích a tedy hodnotách magnetické indukce. (3)

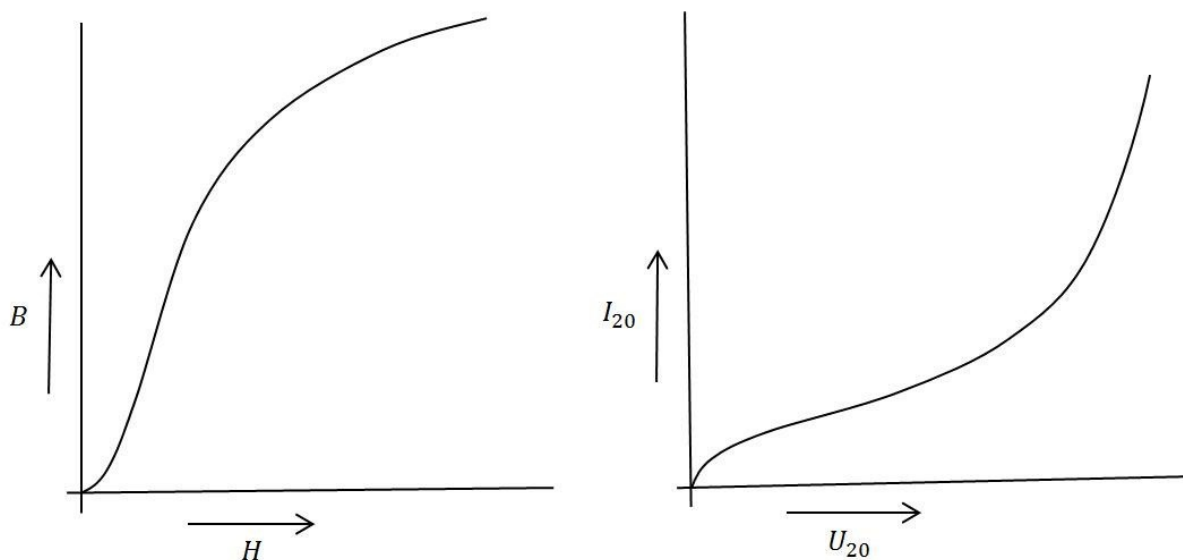


Obrázek 6 - Komplexní diagram chyb

3.3 Závislost chyb na jednotlivých veličinách

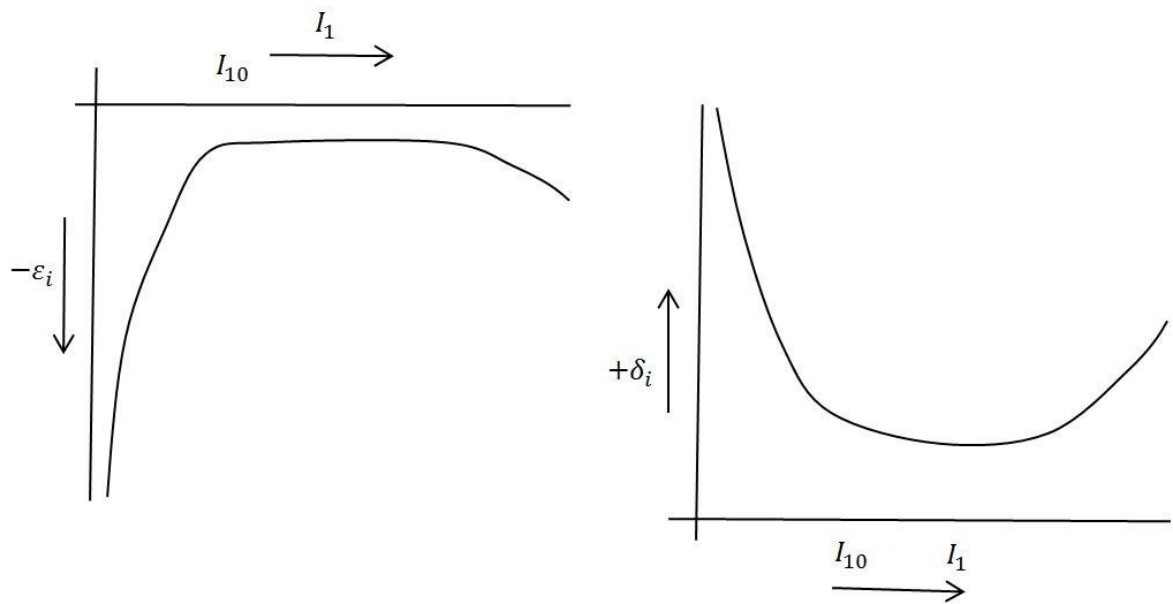
3.3.1 Závislost na proudu

Transformátory proudu se pohybují v širokém rozsahu proudu, ve kterém musí splňovat požadavky třídy přesnosti (0,1 - 1,2 In). Pro odvození závislosti budeme uvažovat konstantní břemeno na sekundárních svorkách. Se změnou proudu se tedy bude měnit i indukované napětí I_{20} a tím i magnetická indukce, které vždy odpovídá určitá velikost proudu I_{20} a jeho složek pro daný transformátor. Z magnetizační charakteristiky $B=f(H)$ můžeme sestavit (pro použitý magnetický obvod a daný převod) budící charakteristiku $I_{20} = f(U_{20})$, což je v podstatě závislost celkové chyby na indukovaném napětí pro konkrétní transformátor. Tato závislost je v jiném měřítku zrcadlovým obrazem magnetizační charakteristiky. (3)



Obrázek 7 - Zrcadlový obraz magnetizační charakteristiky

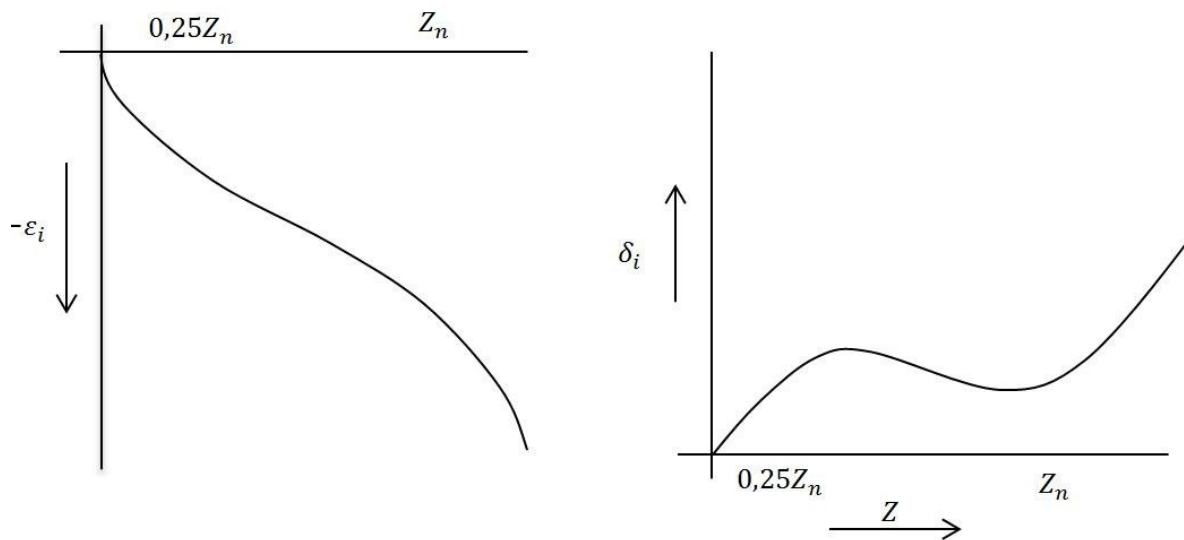
Z charakteristiky je vidět, že závislost celkové chyby na indukovaném napětí (proudu) není lineární a lze dokázat, že nejmenší chyby (proudu, úhlu i celkové) leží v oblasti maximální permeability použitého magnetického obvodu. Vypadá to tak, že transformátor proudu by měl být navržen tak, aby jeho jmenovitý stav byl v této oblasti magnetizační charakteristiky. Je třeba dbát na to, že transformátor musí splňovat všechny podmínky dané třídy přesnosti a dále ještě požadavky na přesnost v nadproudové oblasti. Na obrázku 7 je vidět závislost chyb na proudu. (3)



Obrázek 8 - Závislost na proudu

3.3.2 Závislost na břemeni

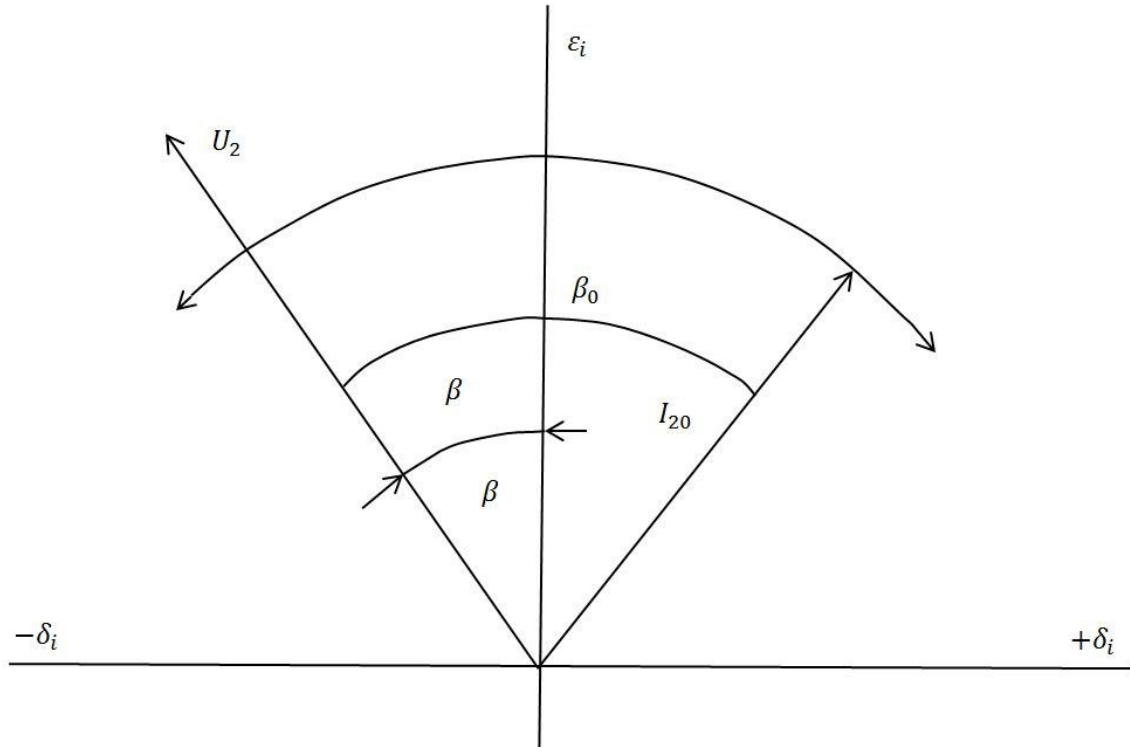
Tuto závislost můžeme odvodit podobně jako závislost na primárním proudu, protože se jedná opět o změnu indukovaného napětí, ale při konstantním proudu. Obecně lze říci, že celková chyba $\Delta I = I_{20}$ s břemenem roste, ale ne lineárně, protože závislost $I_{20} = f(U_{20})$ není lineární. Na obrázku 9 můžeme vidět závislost chyb na břemeni. (3)



Obrázek 9 - Závislost chyb na břemeni

3.3.3 Závislost na sekundárním účinníku

Za předpokladu, že je konstantní břemeno Z a konstantní proud I_1 , koncový bod fázoru I_{20} (celkové chyby) se pak pohybuje po kružnici o poloměru I_{20} a středem v počátku. Změnou úhlu β se mění i velikost chyby ε_i a δ_i . (1)



Obrázek 10 - Závislost chyb na sekundárním účinníku

3.3.4 Závislost na kmitočtu

Změnou kmitočtu se mění nepřímo úměrně magnetická indukce. Při poklesu magnetické indukce klesá také hodnota celkové chyby ΔI a jejich složek ε_i a δ_i . Vzhledem k tomu, že tato závislost je nelineární, ale závislost reaktance vinutí (X_2) a břemene (X) je lineární, je třeba chování transformátoru proudu při jiných kmitočtech posuzovat případ od případu. (3)

3.3.5 Závislost na primárním proudu ($N_1 I_1$)

Pro odvození této závislosti vycházíme z toho, že primární proudění F_1 je rovno sekundárnímu proudění F_2 . Břemeno připojené na sekundární svorky zůstává konstantní. Budeme předpokládat, že primární proudění se změní z F_1 na F'_1 ($N'_1 I_1$). Tudiž můžeme napsat

$$F'_1 = k \cdot F_1 = N'_1 \cdot I_1 = k \cdot N_1 \cdot I_1 \quad (22)$$

pro změněná proudění bude platit

$$F'_1 = F'_2 \quad (23)$$

$$N'_1 \cdot I_1 = N'_2 \cdot I_2 \quad (24)$$

magnetická indukce při původním počtu závitů N_2

$$B = \frac{U_{20}}{4,44 \cdot f \cdot S_j \cdot N_2} \quad [T, V, Hz, m^2] \quad (25)$$

S_j - průřez magnetického obvodu

Při konstantním břemeni zůstává indukované napětí stejné. Pak hodnota magnetické indukce pro počet závitů N_2 bude

$$B' = \frac{U_{20}}{4,44 \cdot f \cdot S_j \cdot k \cdot N_2} = \frac{B}{k} \quad [T, V, Hz, m^2] \quad (26)$$

Jak můžeme vidět, dochází zde ke změně magnetické indukce a tím i k odpovídajícím změnám celkové chyby a jejích složek. Při větší hodnotě primárního proudění jsou tedy chyby menší a naopak. (3)

3.4 Korekce chyby

3.4.1 Závitová korekce na sekundární straně

Korekci chyby můžeme provést změnou počtu závitů na sekundárním vinutí z N_2 na N_2^k . Jestliže chceme posunout křivku chyb proudu o μ % do kladných hodnot, musíme zvětšit proud I_2 o μ % (posunout počátek v komplexním diagramu do záporných hodnot chyb proudu). Odpovídající změna počtu závitů bude:

$$\Delta N_2^k = N_2 \cdot \frac{\mu}{100} \quad (27)$$

Skutečný počet závitů na sekundární straně bude:

$$N_2^k = N_2 - N_2 \cdot \frac{\mu}{100} = N_2 \cdot \left(1 - \frac{\mu}{100}\right) \quad (28)$$

Tato úprava je nejjednodušší, ale dá se provádět většinou jen u transformátorů s velkým prouděním, kdy korekce je dostatečně jemná. Obtížnější poměry jsou však u transformátorů na 13, ale jmenovité proudění (jednozávitové tyčové nebo průchodkové), kde snížení počtu sekundárních závitů o 1 závit může představovat i několik % z celkového počtu závitů N_2 . (3)

3.4.2 Odporový a indukční dělič

V podstatě se jedná o dělič napětí, který se připojí mezi poslední a předposlední závit sekundárního vinutí. Napětí posledního závitu se rozdělí podle nastavení děliče. Odporový dělič je zhotoven z odporového drátu a bývá umístěn na jádru nebo na kostře transformátorů. Posuvný jezdec umožňuje plynulé nastavení závitové korekce mezi oběma krajními polohami a po jeho vyzkoušení se jeho plocha zajistí přivařením nebo připájením. Průřez odporového drátu se dimenzuje na jmenovitý sekundární proud. Tento způsob se využívá např. pro vyrovnání chyb skupiny tří transformátorů proudu pro zemní jištění. (3)

Induktivní dělič se opět připojí mezi poslední a předposlední závit sekundárního vinutí. Magnetický obvod induktivního děliče se z hlediska magnetické indukce dimenzuje stejně jako

magnetický obvod transformátoru. Závitová korekce se zde děje po stupních, které odpovídají jednotlivým závitům induktivního děliče. Průřez vodiče se dimenzuje stejně jako vodič sekundárního vinutí. (3)

3.4.3 Paralelní řazení dvou sekundárních vinutí transformátoru

Celkový průřez jádra se rozdělí na dvě části. Na každou část jádra se navine samostatné vinutí, které musí splňovat podmínku:

$$N_1 \cdot I_1 = N_2' \cdot I_2' = N_2'' \cdot I_2'' \quad (29)$$

Musí platit

$$I_2' + I_2'' = I_{2n} \quad (30)$$

Obě vinutí dimenzujeme podle příslušných proudů I_2' a I_2'' . Korekci provedeme na sekundárním vinutí s větším počtem závitů. Nebudeme-li uvažovat úbytky na vinutí, pak musí platit:

$$U_2' = U_2'' \quad (31)$$

při kmitočtu sítě 50 Hz bude platit:

$$222 \cdot B \cdot S_j' \cdot N_2' = 222 \cdot B \cdot S_j'' \cdot N_2'' \quad (32)$$

Magnetická indukce bude v obou jádrech stejná. Pro poměr závitů bude pak platit: (3)

$$\frac{N_2'}{N_2''} = \frac{S_j''}{S_j'} \quad (33)$$

3.4.4 Rozdělení sekundárního vinutí na dvě paralelní větve

Sekundární vinutí navineme ze dvou paralelních větví, přičemž jejich průřezy volíme podle předpokládaného rozdělení celkového sekundárního proudu. Proudů můžeme rozdělit v poměru 1:4. Korekci provádíme odvinutím příslušného počtu závitů na větvi s menším průřezem. Mohou se zde vyskytovat vyrovnávací proudy, protože napětí na obou paralelních větvích nejsou stejná. (3)

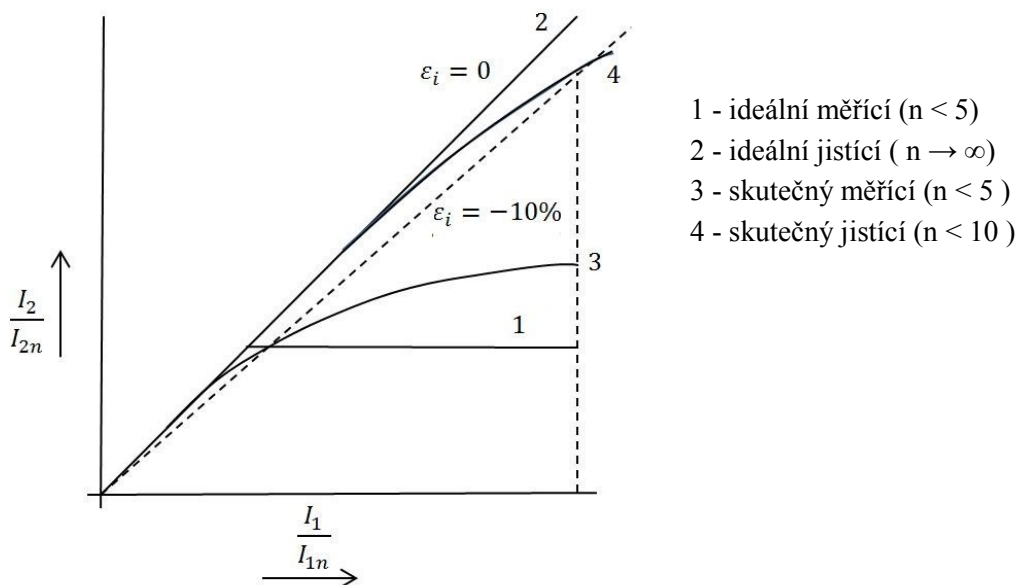
3.4.5 Provedení neúplného (zlomkového) závitu

Poslední závit neobepíná celý průřez magnetického obvodu, ale pouze jeho část (např. 1/3, 1/2, 2/3). Posledním závitem pak neprochází celý magnetický tok, ale pouze jeho část. Indukované napětí je v tomto závitu nižší než v ostatních závitech. Tento způsob korekce chyb je poměrně hodně rozšířen. Jeho nevýhodou je, že se závit musí vložit do jádra už při výrobě (navíjení). Tuto úpravu již nelze realizovat po navinutí sekundárního vinutí. (3)

3.5 Transformátor proudu v nadproudové oblasti

Transformátor proudu má dvě pracovní oblasti – oblast provozní a oblast nadproudovou. V oblasti provozní pracuje transformátor za normálního stavu v síti a v oblasti nadproudové při přetížení a poruchových stavech (zkratech) v síti. Hranici mezi oběma tvoří krajní provozovací proud. Je to největší proud, který může trvale procházet primárním vinutím, při němž nedojde k překročení trvalé dovolené teplotě. Přesnost transformátoru proud v provozní oblasti je dána třídou přesnosti. Pro nadproudovou oblast je určena nadproudová charakteristika a nadproudové číslo. U měřicích transformátorů proudu kryje provozní oblast s měřicím rozsahem, tj. s rozsahem hodnot primárního proudu, v němž jsou stanoveny dovolené chyby pro účely měření. (1)

Pro nadproudovou oblast jsou požadavky pro měřicí a jistící transformátory rozdílné. Měřicí transformátory proudu se používají v provozní oblasti, která se kryje s měřicím rozsahem připojených přístrojů. Pro ochranu připojených přístrojů se používají nadproudová čísla FS 5 a FS 10. Jistící transformátory proudu napájejí proudové obvody ochrany, a proto musí spolehlivě pracovat v nadproudové oblasti. Zde máme zájem o to, aby byla dodržena úměrnost mezi proudem vstupním a výstupním. Pokud toto nedržíme, může dojít ke zkreslení skutečného poměru primárního a sekundárního proudu při nejvyšších zkratových proudech. (4) (7)



Obrázek 11 - Nadproudová charakteristika

Ideální nadproudová charakteristika měřicího transformátoru proudu by probíhala podle přímky $\epsilon_i = 0$ až do malého násobku jmenovitého primárního proudu, a pak by pokračovala po přímce $I_2 = \text{konst.}$, aby připojené měřicí přístroje byly chráněny před škodlivými účinky v síti. Kdežto u jistících transformátorů by nadproudová charakteristika měla probíhat podle přímky $\epsilon_i = 0$ až do nejvyšších hodnot primárního proudu, aby připojené jistící přístroje působily spolehlivě i při nejvyšších zkratových proudech. Těchto charakteristik nelze nikdy dosáhnout, ale pokoušíme se jim přiblížit. (3)

3.6 Transformátor proudu při zkratech

Zkratová odolnost transformátoru proudu je jeho schopnost odolávat dynamickým, tepelným a elektrickým účinkům nadproudů, které jsou způsobeny zkraty nebo podobnými poruchovými stavy v síti, v které transformátor provozuje. (3)

Zkratová odolnost transformátoru proudu zahrnuje jednak zkratovou odolnost vnější a také zkratovou odolnost vnitřní. Vnější zkratová odolnost vyjadřuje schopnost odolat těm účinkům, které vznikají působením nadproudů na jeho bezprostředním okolí (např. dynamické síly od primárních přívodů na primární svorky). Kdežto vnitřní zkratová odolnost představuje schopnost transformátoru odolat těm dynamickým, tepelným a elektrickým účinkům, které vznikají působením nadproudů v něm samotném. Vnitřní zkratová odolnost se dotýká především vlastního návrhu transformátoru proudu a vnější zkratová odolnost pak úzce souvisí s projektem a montáží celého zařízení. (3)

Jmenovitý dynamický proud I_{dn} je vrcholová hodnota nejvyšší (zpravidla první) amplitudy primárního proudu, kterou transformátor snese při sekundárním vinutí spojeného nakrátko, aniž by došlo k poškození kterékoliv jeho části mechanickým nebo elektrickým účinkem proudu nebo přepětí. (3)

Jmenovitý krátkodobý proud I_{thn} je efektivní hodnota primárního proudu, který transformátor snese po dobu jedné sekundy při sekundárním vinutí spojeném nakrátko, aniž se vzniklým teplem poškodí kterákoliv jeho část. Jeho hodnota odpovídá vztahu:

$$I_{thn} = \frac{S_v \cdot \sigma_{thn}}{1000} \quad [\text{kA}, \text{mm}^2, \text{A} \cdot \text{mm}^2] \quad (34)$$

kde S_v - průřez primárního vodiče

σ_{thn} - je proudová hustota vodičů primárního vinutí při jmenovitém krátkodobém proudu (3)

3.7 Napětí na rozpojených sekundárních svorkách transformátoru proudu

U transformátoru proudu nesmí dojít k rozpojení sekundárních svorek za provozu, jelikož se jedná o havarijní stav. V tomto případě se celé primární proudění stává prouděním magnetizačním a během krátkého časového úseku dojde k nasycení magnetizačního obvodu. (3)

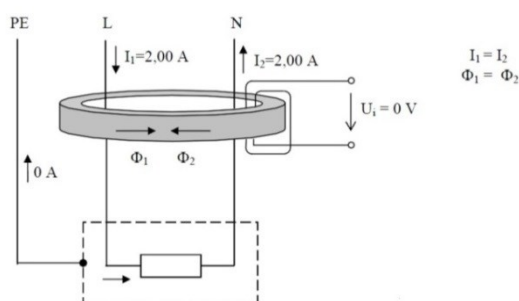
Magnetický tok se od určité velikosti proudění nezvětšuje a zůstává konstantní. Pak během krátkého časového úseku sinusovky dojde ke změně o hodnotu $2\varphi_{max}$. V tomto okamžiku se indukuje v sekundárním vinutí největší napětí, protože platí:

$$U_{20} = N_2 \cdot \frac{d\varphi}{dt} \quad (35)$$

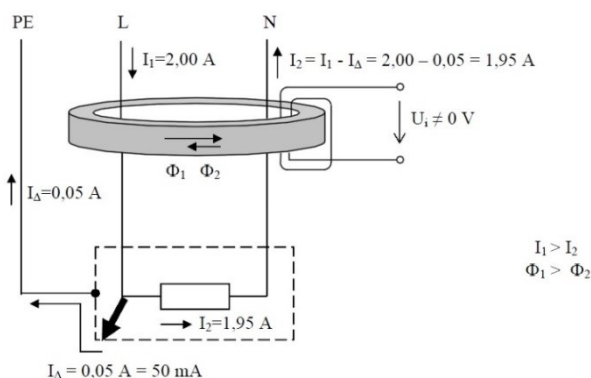
Největší hodnoty bude tedy toto napětí dosahovat při průchodu magnetického toku nulou. Toto napětí je pro transformátor i obsluhu velice nebezpečné, protože může dosáhnout hodnot až desítek kilovoltů. (3)

4 Diferenciální (součtové) transformátory

Jedná se o speciální druh transformátorů proudu, které reagují na rozdílový proud. Pokud je celkový součet primárních proudů uvnitř magnetického obvodu roven nule, pak se v sekundárním vinutí neindukuje žádné napětí. V případě rozdílu proudu ve vodičích dojde, k tomu že se v sekundárním vinutí naindukují napětí. Tyto transformátory se vyrábí jako jednofázové nebo trojfázové. Při provozním zatížení neprotéká jádrem magnetický tok, tudíž se neindukuje napětí v sekundárním vinutí. Dále záleží na tom, zda je zátěž symetrická nebo nesymetrická. Při výskytu izolační poruchy v uzemněném zařízení protéká poruchový proud do země, tímto je narušena proudová rovnováha a jádrem protéká magnetický tok a v sekundárním vinutí se indukují napětí. Po překročení určitého poruchového proudu dochází k vybavení ochran nebo chráničové spouště. Tyto transformátory se převážně vyrábějí jako jednozávitové, což klade vysoké nároky na kvalitu magnetického obvodu. (3)



Obrázek 12 - Funkce součtového transformátoru



Obrázek 13 - Vznik reziduálního proudu

Použití:

- v proudových chráničích
- zemní jištění
- součást ochran generátorů
- snímání nulové složky proudu na vn kabelech

5 Digitální ochrany

Ochrana

- je přístroj, který kontroluje chod určité části energetické soustavy. To vše za pomoci přístrojových transformátorů proudu a napětí, které snímají veličiny chráněného objektu.
- Ochrana musí rozlišit stav objektu, zda je: v normálním, mimořádném a poruchovém stavu (8)

Chráněný objekt

- je daný prvek energetické soustavy např. generátory, transformátory, motory, vedení, atd. (8)

Porucha

- je stav, kdy se objekt nachází mimo meze normálního stavu (2)

Měřená veličina

- jedná se o elektrickou veličinu, tato veličina je vyhodnocována v ochraně (2)

Stavové veličiny

- ukazují aktuální stav chráněného objektu (2)

Funkce ochran

- v případě poruchy – určit místo poruchy a rychle odpojit daný úsek nebo zařízení, a dále signalizovat svou činnost
- v případě abnormálních stavů – informovat o povaze stavu zařízení (8)

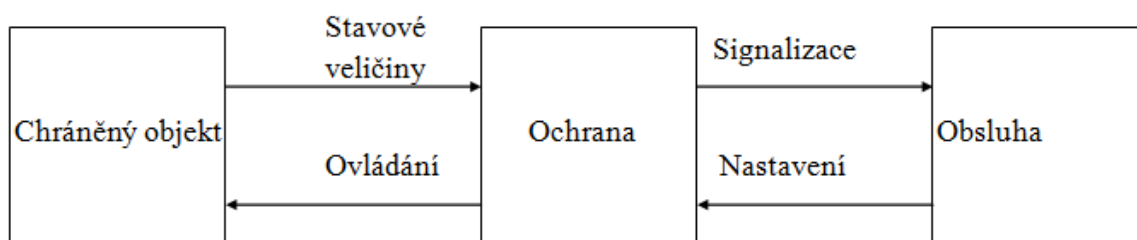
Požadavky na činnost

- spolehlivost – rozumíme tím nízkou pravděpodobnost selhání ochrany při poruše
- citlivost – musí být dostatečně citlivá při poruchách a při abnormálních stavech v daném úseku. Musíme se vyhnout příliš vysoké citlivosti, která by vedla chybnému působení ochrany.
- Rychlost – doba vypnutí poruchy je určena dobou působení ochrany a dobou určenou pro vypnutí
- Selektivita – zajišťuje vypnutí postižené oblasti nejbližšími vypínači k místu poruchy. Tohoto lze dosáhnout časovým odstupňováním působení ochran v jednotlivých chráněných úsecích nebo nastavením úrovní stavové veličiny.
- Nařiditelnost – je to rozsah hodnot měřené veličiny, na kterou lze ochranu nastavit (8)

5.1 Blokové schéma funkce elektrické ochrany

Činnost ochrany je zřejmá ze zjednodušeného **blokového schématu**.

Obsluha provede nastavení a seřízení ochrany. Ochrana nestále zpracovává informace o stavu chráněného objektu. Při změně stavových veličin na hodnoty odpovídající nastavení (citlivost) vyše ochrana rozkaz na vypnutí, odbuzení nebo jinou činnost, současně svůj náběh nebo působení signalizuje obsluze. (2)



Obrázek 14 - Blokové schéma funkce elektrické ochrany

5.2 Poruchové stavy

- zkrat
- Přetížení
- přepětí
- podpětí
- snížení frekvence
- nesouměrnost proudu
- nesouměrnost napětí
- zemní spojení
- zpětný tok výkonu
- ztráta buzení synchronních generátorů (8)

5.2.1 Zkrat

Zkratem je myšleno vodivé spojení mezi fázemi navzájem nebo mezi fází a zemí (kostrou) v sítích s uzemněným zdrojem.

Zkratové proudy dosahují až 10-ti násobků velikosti jmenovitých proudů. Tyto proudy způsobují elektrická i tepelná poškození izolantů, tepelná poškození vodičů (tavení) a také mechanická poškození vlivem dynamických sil (deformace vinutí, izolátorů, čel TG). (2)

Zkratky v turbogenerátoru a jejich vliv na provoz:

Zkratová smyčka má impedanci převážně indukčního charakteru a proto dochází při zkratu v turboalternátoru ke zmenšení činného výkonu a tím k odlehčení stroje. Současně klesá napětí. To má za následek **zmenšení synchronizačního momentu a ztrátu stability**. (2)

Ke zkratu může dojít z různých příčin, například vlivem:

- špatné výroby a montáže, při které dojde k poškození izolací
- nedostatečnou dimenzí zařízení a jeho trvalým přetěžováním
- cizími zásahy nebo chybnou manipulací

V závislosti na elektrické vzdálenosti od generátoru **zkratky dělíme na vnitřní, blízké a vzdálené**.

Vnitřní zkratky jsou zkratky přímo ve vinutí nebo v železe generátoru. Vzniklé nadproudy ohrožují vinutí.

Mezifázový zkrat ve statoru se projevuje většinou zvýšeným hlukem, proudy ve statoru se značně zvýší a nejsou souměrné. K detekci této poruchy je určena okamžitá rozdílová ochrana, která generátor odpojí od sítě a odbudí.

Zkrat v železe statoru vznikne, při poškození izolace mezi plechy magnetického obvodu statoru. V mezním případě může dojít k vytavení železa a k propálení izolace vinutí statoru. Z tohoto důvodu jsou velmi důležité kontroly stavu magnetického obvodu při revizích stroje.

Dvojitý zemní zkrat v obvodu rotoru může znamenat vážnou poruchu. Průběh závisí na umístění zkratu. Můžeme ho zaznamenat například rychlým růstem budícího proudu, poklesem jalového výkonu, přechodem na asynchronní chod, velkým chvěním stroje. Stroj není vybaven ochranou na tuto poruchu. Abychom odvrátili možnost vzniku těžké havárie, je třeba okamžitě řešit výskyt prvního zemního spojení, případně stroj odstavit.

Závitové zkratky ve vinutí rotoru vzniknou porušením izolace mezi jednotlivými závity vinutí, například posunutím izolací vlivem tepelných dilatací vinutí, stárnutím izolace apod. Generátory nejsou chráněny ochranami proti závitovým zkratům. Tyto zkratky vznikají pomalu a postupně. Jejich vliv se projeví až při zasažení cca 20% závitů, kdy namáhání rotoru v důsledku tepelné nesymetrie pólů způsobí chvění stroje.

Blízký zkrat (na přípojnicích), který je mimo úsek chráněný rozdílovou ochranou, bude rozpoznán a vypnut distanční nebo nadproudovou ochranou generátoru. Následky těchto zkratů mohou být také velmi vážné.

Vzdálený zkrat (kdy mezi místem zkratu a generátorem je větší reaktance např. blokového transformátoru, vedení atd.) se projevuje podstatně menšími účinky. (2)

5.2.2 Zemní spojení

Zemní spojení je myšleno vodivé **spojení jedné fáze se zemí v síti, kde je izolovaný nebo kompenzovaný uzel**. Je nebezpečné především pro pravděpodobnost následného zkratu. (2)

5.2.3 Zemní spojení v turbogenerátoru a jejich vliv na provoz

Zemní spojení statorového vinutí generátoru příčinou vzniku je porušením izolace vinutí statoru proti kostře. Zemní statorová ochrana musí okamžitě po detekci poruchy stroj odpojit od sítě a odbudit. Následný průtok poruchového proudu by mohlo zapříčinit vážné poškození plechů magnetického obvodu statoru. Důvod zemního spojení je poté nutno rychle zjistit a odstranit.

Jednopolové zemní spojení vinutí rotoru se projeví poklesem jeho izolačního odporu. Pokles je signalizován ochranou. Příčinu zhoršení je potřeba vyhledat a odstranit. Trvá-li zemní spojení nebo se izolační stav dále zhoršuje, je nutné stroj odstavit a zabránit vzniku druhého zemního spojení, které znamená zkrat ve vinutí rotoru. (2)

5.2.4 Přetížení

Přetížení je průchod příliš velkého proudu zařízením. Způsobuje především tepelná poškození a podstatně urychluje stárnutí izolace. (2)

5.2.5 Přepětí

Přepětí (zvýšení napětí nad dovolenou mez) způsobuje poškození a stárnutí izolace, přídavné ztráty a zvětšení nebezpečí zkratu. Přepětí může být způsobeno poruchou regulace napětí, překompenzováním nebo kapacitní zátěží. (2)

5.2.6 Podpětí

Podpětí má za následek především proudové přetěžování (možná tepelná poškození), pokud připojené zařízení odebírá konstantní výkon. Může být způsobeno poruchou regulace nebo přetížením. (2)

5.2.7 Snížení kmitočtu

Snížení kmitočtu má za následek zvětšení magnetizačních proudů a tím zvětšení ztrát a oteplení. Může nastat přetížením zdrojů v soustavě. (2)

5.2.8 Zvýšení kmitočtu

Tato porucha je nebezpečná především mechanicky, a to jak pro chráněné zařízení (generátor) tak i pro připojené stroje. Může být způsobeno poruchou regulace výkonu. (2)

5.2.9 Nesouměrnost proudu

Nesouměrnost fázových proudů způsobí vznik zpětné složky proudu i_z protékající uzlem. V turbogenerátoru tato zpětná složka proudu vytváří magnetické pole, které se otáčí v opačném smyslu, tj. dvojnásobnou synchronní rychlostí proti rotoru. Tím vznikají v rotoru přídavné vířivé (indukované) ztráty a rotor se může nebezpečně zahřívat. Nesouměrnost proudů může vzniknout např. přerušením vodičů nebo nesouměrností zátěže. (2)

5.2.10 Nesouměrnost napětí

Nesouměrnost napětí má za následek nesouměrnost proudů. Příkladem je např. chod motoru na dvě fáze. Vlivy jsou stejné jako u nesouměrnosti proudu. (2)

5.2.11 Zpětný tok výkonu

Zpětný tok výkonu je přenos činné energie z generátoru do turbíny (hnacího stroje) nebo z motoru do napájecí sítě. Tímto způsobem provozu mohou být poškozeny připojené stroje – turbína nebo naftový motor.

Zpětný tok výkonu je způsoben buď chybnou regulací výkon. Nebo také může být iniciován technologickou poruchou, při které je hnací stroj (turbína, motor) odstaven ochranami. Pro zjištění této poruchy se používají zpětné wattové ochrany, které musí zajistit okamžité následné elektrické odstavením generátoru (2)

5.2.12 Ztráta buzení a asynchronní chod

Ztráta buzení synchronních točivých strojů znamená zmenšení budícího proudu pod mez statické stability. Při ztrátě buzení synchronní stroj přichází o synchronismus.

Motor přejde do asynchronního chodu, jeho otáčky jsou podsynchronní.

Generátor přejde také do asynchronního chodu, ale jeho otáčky budou nadsynchronní. Točivé pole statoru se neotáčí synchronně s rotorem, vznikají přídavné vířivé ztráty a rotor se otepluje. Na přístrojích se tento jev projeví jednak ztrátou budícího proudu, dále kmitáním hodnot proudu statoru a jalového výkonu.

Asynchronní chod není pro generátor přípustný, neboť nadměrné oteplení rotoru může vést k poškození stykových částí v místech nasazení obručí na těleso rotoru. (2)

5.2.13 Ložiskové proudy

Ložiskové proudy působí přídavné oteplení a tím i mechanické poškození ložisek turbogenerátoru. Tvoří se při magnetických nesouměrnostech ve statoru i rotoru stroje. Tím se indukuje napětí mezi hřídelí rotoru a statorem, jehož důsledkem jsou ložiskové proudy. Jejich působení odstraňujeme odizolováním ložiskového pouzdra od kostry statoru. Ochranu lze realizovat průvlekovým přístrojovým transformátorem proudu na hřídeli stroje, k němuž je připojena proudová ochrana hlásící překročení nastavené meze ložiskového proudu. (2)

6 Srovnávací ochrany

6.1 Princip

Srovnávací ochrany srovnávají vstupní a výstupní veličiny chráněného objektu, z tohoto rozdílu určují, zda je porucha přímo v objektu nebo vně. Charakteristické je pro ně to, že se vyznačují rychlým odpojením objektu. (9)

6.2 Dělení

- ochrany s přímým srovnáváním
- ochrany s nepřímým srovnáváním (9)

Přímé srovnávání dále dělíme na:

- a) rozdílové (diferenciální) ochrany
- b) fázové srovnávací ochrany (9)

6.3 Rozdílové ochrany

Rozdílové ochrany vyhodnocují na způsobu rozdílu fázoru proudu na vstupech a výstupech chráněného objektu (generátoru). (9)

Za normálního provozu platí

$$\Delta I = \left| \sum_{j=1}^k \bar{I}_j \right| = 0 \quad (36)$$

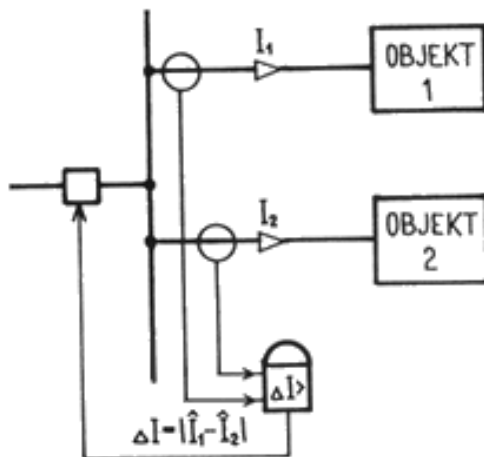
ΔI – rozdílový proud, změřený součtem všech porovnávaných proudů

Rozdílové ochrany dělíme na:

- a) ochranu příčnou
- b) ochranu podélnou (9)

6.3.1 Příčná rozdílová ochrana

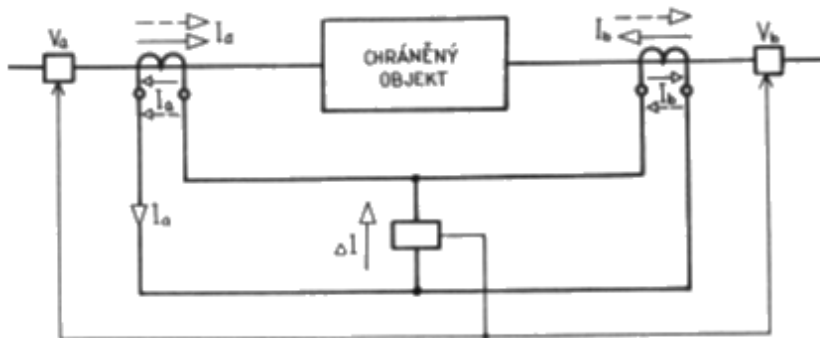
Příčná rozdílová ochrana srovnává proudy dvou totožných objektů, jež pracují paralelně při stejných podmínkách. (9)



Obrázek 15 - Princip zapojení ochrany

6.3.2 Podélná rozdílová ochrana

Podélné rozdílové ochrany srovnávají proudy na vstupu a výstupu chráněného objektu. Tato oblast chránění je vymezena transformátory proudů. (9)

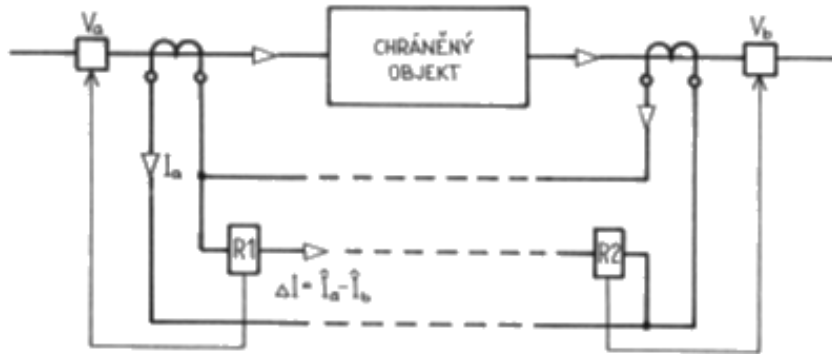


Obrázek 16 - Princip zapojení podélné rozdílové ochrany

Normální stav nastane, zanedbáme-li proudy v příčných admitancích a hodnoty proudů I_a a I_b budou stejně velké. Při dobře zvolených převodech transformátorů proudů jsou stejné i proudy sekundární. Rozdílový proud $\Delta I = 0$. Pokud dojde k poruše uvnitř chráněného objektu, průchozímu proudu se obrátí směr. Poté rozdílový proud tekoucí měřícím členem způsobí vybavení ochrany. Měřící člen je proudový, s nízkou impedancí a s velkou citlivostí. (9)

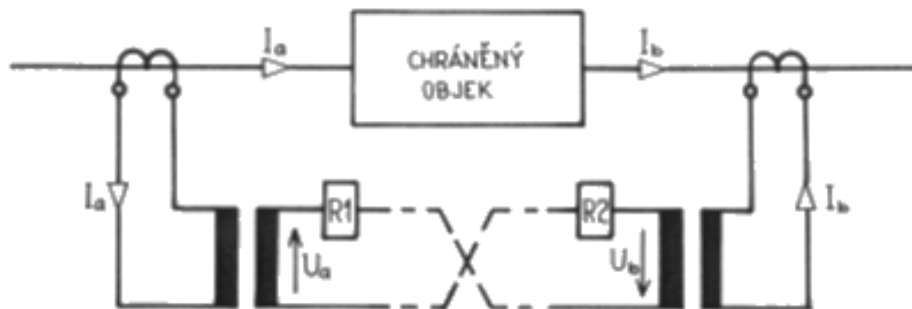
Používají se tři varianty

- a) **Ochrana maloimpedanční** – proudové porovnání. Používá se pro krátké chráněné objekty, má pouze jeden měřicí člen na fázi a ten ovládá přímo vypínače na obou koncích. Pro dlouhé objekty je nutné použít dva měřicí členy. Příklad zapojení je na Obrázku 17. (9)

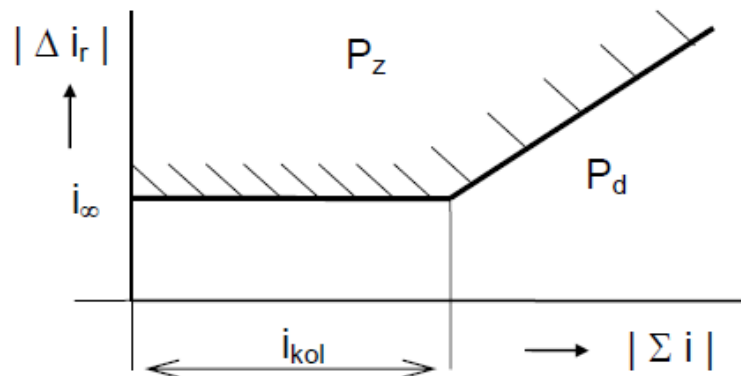


Obrázek 17 - Rozdílová ochrana pro dlouhé objekty

- b) **Ochrana velkoimpedanční** – princip je stejný jako u ochrany maloimpedanční s rozdílem, že měřicí člen má velkou impedanci. Při zkratech dochází k přesycení jisticích transformátorů proudu. (9)
- c) **Ochrana s napět'ovým porovnáním** – je vhodná pro dlouhé objekty. (9)



Obrázek 18 - Ochrana s napět'ovým porovnáním



Obrázek 19 - Charakteristika rozdílové ochrany

6.4 Základní členy ochran

6.4.1 Vstupní člen

Vstupní člen převádí vstupní veličiny (nejčastěji proud a napětí) na dále zpracovatelný tvar a úroveň. Jmenovité vstupní hodnoty ochran jsou 100V, 5A nebo 1A. Tyto hodnoty se přivádí na svorky ochran z přístrojových transformátorů napětí a proudu. Členy provádějící měření uvnitř ochrany pracují na úrovni voltů a miliampérů. Vstupní členy ochrany převádí vstupní veličiny na tyto úrovně pomocí bočníků, děličů a transformátorů. Transformátor, ať již proudový, nebo napěťový, navíc galvanicky odděluje obvody ochrany od okolí. Ve zvláštních případech má měřicí člen stejnosměrný vstupní signál. Proto tedy vstupní člen obsahuje kromě již uvedených částí ještě usměrňovače. Speciální skupinu tvoří vstupní členy číslicových ochran. Jsou to převodníky A/D, které vzorkují a převádějí vstupní veličinu z analogového na číselný tvar. Může obsahovat svodič přepětí a filtraci pro odstranění rušivých harmonických. (8) (10)

6.4.2 Popudový člen

Popudový člen zajišťuje rozběh ochrany. V případě vzniku poruchy v elektrické soustavě dává tento člen informaci o poruše logice a měřicímu členu ochrany. Musí mít vyšší citlivost než měřicí člen. Dále musíme uvažovat o tom, že ne každá porucha by měla být odstraněna jednou ochranou. Rozhodnutí, zda porucha patří do kompetence ochrany, rozhoduje měřicí člen a logika. Popud zaručí pouze rozběh těchto obvodů. Na vstup popudu přichází ze vstupu stavová veličina. Popud se podstatně neliší od měřicího členu ani konstrukcí ani funkcí. Může mít podobnou charakteristiku. Popudový a měřicí člen jedné ochrany nemusí být téhož typu. Některé starší distanční ochrany mají popud nadproudový a měřicí člen je impedanční. Musí platit, že popudový člen je citlivější než měřicí. U elektromechanických a tranzistorových ochran je vhodné zahrnout popud jako nejcitlivější stupeň měřicího členu. Avšak u digitálních ochran, kde popud působí rozběh např. celého počítače, budeme uvažovat tento člen vždy samostatně. Digitální ochrany mívají většinou více druhů popudů. (8) (10)

6.4.3 Logika

Logika zpracovává logický signál z popudu. Poté udává funkci měřicího členu a na základě signálu z měřicího členu určuje funkci koncového členu. Všechny vstupy a výstupy logiky jsou booleovské funkce. Proto její strukturu lze vytvořit jako soustavu tří logických funkcí. A to jsou funkce součtu, součinu a negace. Pro realizaci logiky se užívají klasická relé, diody, tranzistory, integrované obvody nebo software číslicového procesoru. (9)

6.4.4 Měřicí člen

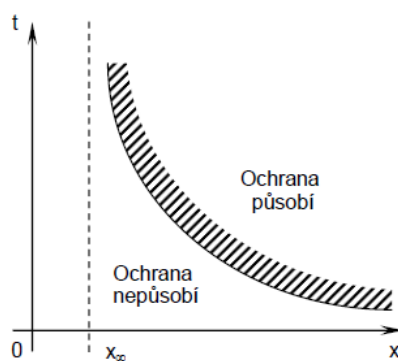
Měřicí člen je nejdůležitější člen. Určuje vlastnosti ochran. Rozhoduje o poruše v objektu. Na jeho vstup je přiveden stav objektu. Měřicí člen určuje oblast mezi normálním stavem a poruchou. Většina vlastností ochrany je závislá na měřicím členu a jeho algoritmu. Těmito vlastnostmi je myšlena selektivita, citlivost a přesnost. Rozdíl mezi měřicím členem napěťové, proudové, nebo kmitočtové ochrany není podstatný. Naopak tyto tři členy mají významný společný znak, a to že měří amplitudu střídavé veličiny napětí nebo proudu. Proto je jednodušší analyzovat měřicí členy nikoli podle zpracovávané veličiny, ale podle charakteru funkce. Základní parametry střídavých veličin jsou

amplituda a fáze. Proto rozeznáváme dva základní typy měřících členů. Amplitudový člen měří amplitudu a součinnový člen je závislý na fázi. Z těchto dvou členů jsou odvozeny další čtyři typy. (8) (9)

Proto rozlišujeme celkem šest měřících členů ochran.

- Amplitudový měřící člen
 - Střídavý amplitudový měřící člen na střední hodnotu
 - Střídavý amplitudový měřící člen na efektivní hodnotu
 - Stejnoseměrný amplitudový měřící člen
 - Amplitudový člen na maximální hodnotu (9)
- **Závislý měřící člen**

Závislý měřící člen měří velikost proudu nebo napětí v závislosti na době trvání poruchy. Doba působení závisí na velikosti vstupní měřené veličiny. Závislé měřící členy používáme v závislých proudových a napěťových ochranách. Používají se např. v ochraně proti přetížení. Dále v ochraně při nesouměrnosti a také tam, kde stavová veličina nepoškozuje objekt přímo svojí velikostí, ale akumulací energie během trvání poruchy. Čím větší měřená veličina, tím je doba působení kratší (viz Obrázek 20). (9)



Obrázek 20 - Charakteristika závislého měřícího členu

- **Rozdílový měřící člen**

Rozdílový měřící člen srovnává velikost dvou vstupních veličin. Působí tehdy, je-li jedna veličina větší než druhá veličina o nastavenou hodnotu citlivosti měřícího členu. Používá se v rozdílových ochranách. (9)

- **Amplitudový komparátor**

Amplitudový komparátor je speciální druh rozdílového měřícího členu s citlivostí blížící se k nule. Realizuje se podobně jako rozdílový člen. Používá se spíše jako součást distančního měřícího členu nebo popudového členu. Jsou-li vstupy napětí a proud, měří fázový komparátor impedanci Z . (9)

- **Fázový komparátor**

Jedná se o součinnový člen s velkou citlivostí blížící k nule. Výstup nezáleží na amplitudách stavových veličin, ale jen na jejich fázovém úhlu. Používá se u srovnávacích ochran. (9)

- **Součinnový měřicí člen**

Součinnový měřicí člen se využívá u wattových a jalových ochran. Tyto členy jsou realizovány elektrodynamickým nebo indukčním relé, analogovým násobením s integrátorem, nebo číslicovým násobením. (9)

6.4.5 Časový člen

Časový člen prodlužuje dobu působení ochrany. Vstupní signál do časového členu je přiváděn z logiky. Použití je z důvodu selektivity, akumulace energie v objektu, vyloučení chybného působení ochrany. (10)

6.4.6 Koncový člen

Koncové členy ochran jsou nejčastěji pomocná relé s výkonovými kontakty. Na vstup se přivádí signál s logiky. Účel koncového členu je upravit signál tak, aby byl schopen předání ovládacím členům zařízení objektu. To znamená, že musí mít dostatečnou velikost a vydržet vnější rušení. Vstupní kontakty musí být dostatečně dimenzovány. (9) (10)

6.4.7 Napájecí člen

Napájení lze provést pomocí akumulátorových baterií nebo ze střídavé sítě. Od napájení ze střídavé sítě se již upouští z důvodu nižší spolehlivosti. Lepší je proto využít akumulátorových baterií a to přímo, přes stabilizátor nebo s galvanickým oddělením. Galvanické oddělení se provádí soustavou: střídač – transformátor – usměrňovač – stabilizátor a filtr.

Ochrany bez napájení

- Ochrany bez napájení jsou ochrany, které nepotřebují pomocné napětí (10)

Přímé napájení ze staniční baterie

- Napájení ze staniční baterie je nejpoužívanějším způsobem napájení (10)

Napájení ze střídavé sítě

- Napájení ze střídavé sítě používá se zřídka, protože může dojít k výpadku (nespolehlivost) (10)

Napájení přes stabilizátor

- Napájení přes stabilizátor se používá především u tranzistorových a číslicových ochran. Zde se vyžaduje lepší stabilizace a filtrace napájecího napětí, než je u elektromechanických členů. (8)

Akumulátor umístěný v ochraně

- Pro napájení tranzistorových ochran se používá akumulátor umístěný v ochraně. U těchto ochran je velký požadavek na chránění proti rušení. Pro dokonalé oddělení napájecích obvodů lze využít tohoto způsobu napájení. Akumulátor je pravidelně dobíjen přes dokonalé filtry. Nabíjecí proud je malý. (10)

Napájení z přístrojových transformátorů

- U napájení z přístrojových transformátorů není třeba staniční baterie. V okamžiku poruchy obvykle klesá napětí chráněného objektu, zatímco jeho proud vzrůstá. Toto napájení je vhodnější u PTP. Také se dá použít napájení z PTN, ale v kombinaci s napájením z PTP. (10)

6.4.8 Filtry souměrných složek

Podle souměrných složek napětí a proudu ochrana zjistí nesymetrické poruchy.

Rozdělení

- Filtry nulové složky proudu a napětí
- Filtry sousledné složky proudu a napětí (9)

7 Jaderná elektrárna Dukovany

Jaderná elektrárna Dukovany je první postavenou jadernou elektrárnou v České republice a patří mezi největší, vysoce spolehlivé a ekonomicky výhodné energetické zdroje elektrické energie. Roční výroba elektrické energie přesahuje 15 TWh, což představuje asi 20% z celkové spotřeby elektřiny v České republice. V porovnání s ostatními významnými výrobci vyrábí elektrárna Dukovany elektřinu s nejnižšími měrnými náklady.

V Jaderné elektrárně Dukovany jsou instalovány čtyři tlakovodní reaktory (PWR). Projektové označení těchto reaktorů je VVER 440/213. VVER znamená Vodou chlazený, Vodou moderovaný Energetický Reaktor. Každý ze čtyř reaktorů má tepelný výkon 1375 MW. Každý disponuje elektrickým výkonem 510 MW.

Elektrárna je uspořádána do dvou hlavních výrobních bloků. V každém z nich jsou dva reaktory se všemi přímo souvisejícími zařízeními včetně strojovny s turbínami a generátory.

První reaktorový blok Jaderné elektrárny Dukovany byl uveden do provozu v roce 1985, druhý a třetí v r. 1986 a čtvrtý v roce 1987.

Turbogenerátor (TG) je třífázový synchronní točivý elektrický stroj, který mění mechanickou energii parní turbíny na elektrickou energii. Na EDU jsou pro každý reaktorový blok instalovány dva turbogenerátory.

7.1 Turbogenerátory instalované na EDU

Generátory mají tyto parametry:

Činný výkon: **255 MW**

Zdánlivý výkon: **300 MVA**

Účinnost ($\cos \phi$): **0,85**

Jmenovité napětí: **15,75 kV**

Jmenovité otáčky: **3000 ot./min.**

Jmenovitý kmitočet: **50 Hz**

Jmenovitý proud statoru: **10 997 A**

Jmenovité budící napětí: **352 V DC**

Jmenovitý budící proud: **2525 A (11)**

7.2 Zapouzdřené vodiče

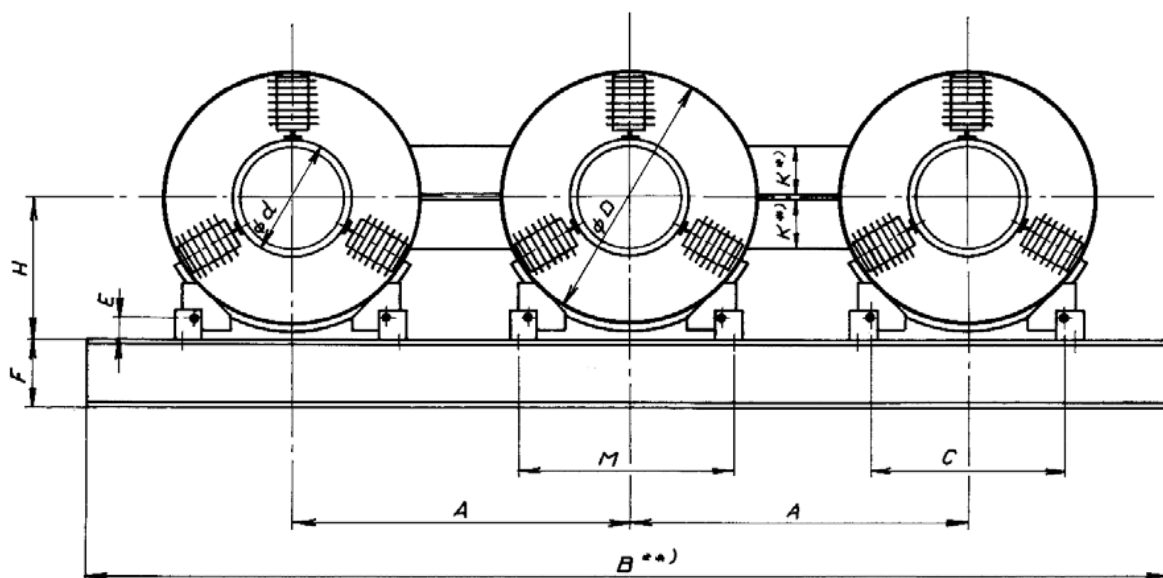
V zapouzdřeném vodiči (ZV) je vlastní trubkový vodič vývodu podpírán pomocí podpěrných izolátorů (vždy na 3 - 8 m délky) v koaxiálním hliníkovém pouzdře. Pouzdro tvoří trubky průměru až 1500 mm, tloušťky stěny 3 - 8 mm, které mohou být samonosné až do délky 20 m. Podélnou tepelnou dilataci zajišťují oboustranně svařované pružné spojky. Všechny spoje zapouzdřených vodičů jsou svařované, šroubové spoje se používají pouze pro připojení elektrických zařízení. Pouzdra vodičů všech tří fází jsou na začátku a na konci trasy spojena nakrátko, celý úsek je jednobodově uzemněn.

(11)

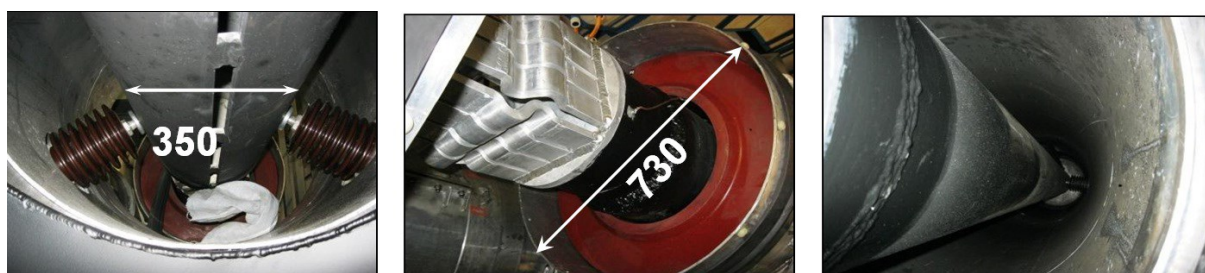
Zapouzdřené vodiče jsou využity na EDU pro vedení velkých elektrických proudů. Konstrukční uspořádání vodičů zajišťuje úplné vzájemné oddělení fázových vodičů a tím vyloučení mezifázových zkratů, bezpečné oddělení fází při zkratových proudech a vzniklých dynamických silách a současně se elektrickým odstíněním vodičů snižují ztráty elektromagnetickým prouděním do okolních kovových konstrukcí. Izolační systém zapouzdřených vodičů je tvořen kombinací keramický izolant - vzduch, resp. epoxidová pryskyřice - vzduch. Zapouzdřené vodiče na EDU mají přirozené chlazení vzduchem. (11)

7.2.1 Zapouzdřené vodiče ve vyvedení výkonu generátoru

Ve vyvedení elektrického výkonu jsou mezi generátorem a blokovým transformátorem použity zapouzdřené vodiče pro jmenovitý proud 11 kA při napětí 15 kV. Vnější průměr vodiče je 350 mm při tloušťce stěny 16 mm, vnější průměr pouzdra 730 mm při tloušťce stěny 6 mm, rozteč mezi fázemi 1 m. Maximální teplota vodiče je 85 °C při I_n a okolí = 35 °C; teplota pouzdra 60 °C při I_n a teploty okolí = 35 °C. (11)



Obrázek 21 - Řez zapouzdřenými vodiči vyvedení výkonu



Obrázek 22 - Zapouzdřené vodiče ve vyvedení výkonu. Červené mezikruží na prostředním

Zapouzdřený vodič má vlastní fázový vodič umístěn v ose pouzdra, které je z elektrovodného hliníku a je uzemněno. Každý díl pouzdra smí být uzemněn pouze jediným strojeným svodem. Jako ochrana proti erozivním účinkům magnetizačních proudů je mechanické upevnění pouzder na podpěrách provedeno izolovaně. Vodič je upevněn třemi izolátory, jejichž osy svírají vzájemně úhly 120° . Izolátor je vybaven elastickou uloženou stavitelnou opěrkou pro ZV. Opěrka tlumí dynamické rázy a umožňuje tepelnou dilataci vodiče. (11)

Mezi pouzdry krajních fází a pouzdrem střední fáze jsou vzduchové mezery. Při případné poruše v jedné fázi nezhoršuje ionizovaný vzduch izolační stav ostatních fází a nevzniká tak mezifázový zkrat. Pouzdra mají stínící účinek na magnetické pole sousedních vodičů. Pro výraznější potlačení magnetického pole jsou úseky ZV vybaveny tzv. kompenzačními deskami, které jsou oboustranně přivařeny k pouzdrům jednotlivých fází. Podélnou dilataci vodiče zachycují svařované lamelové spojky, které jsou umístěny mezi jednotlivými úseky trasy ZV. Dilatační spojky jsou zakryty dvoudílnými kryty. (11)

8 Návrh přístrojového transformátoru proudu

Základní technické parametry daného transformátoru proudu jsou:

- Jmenovitý primární proud: 11000 A
- Jmenovitý sekundární proud: 1 A
- Jmenovitý kmitočet: 50 Hz
- Izolační napětí: 15,75 kV
- Parametry pro jádro:
 - jmenovitá zátěž 5 VA
 - třída přesnosti (0,1) 0,5
 - nadproudové číslo FS 5

Pro jmenovitý převod transformátoru proudu platí vztah

$$k_n = \frac{I_{1n}}{I_{2n}} = \frac{N_2}{N_1} \quad [-,A,-] \quad (37)$$

Následně dosadíme do předešlého vztahu a dostaneme počet závitů sekundárního vinutí

$$k_n = \frac{I_{1n}}{I_{2n}} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{11000}{1} \rightarrow N_2 = 11000 \text{ z} \quad (38)$$

S toho také vyplývá počet primárních vodičů

$$N_1 = 1 \text{ z}$$

Průměr primárního vodiče je dán použitými zapouzdřenými vodiči

$$D_{prim} = 350mm$$

S tohoto průměru určíme kruhový průřez na provlečení primárního vodiče k průměru primárního vodiče pouze, přidáme 40 mm

$$D_{1i} = 390mm$$

Tloušťka vrstvy izolačního předělu z epoxidové pryskyřice

$$t_i = 15mm$$

Výpočet nejmenšího možného průměru magnetického obvodu s navinutým sekundárním vinutím

$$D'_{2i} = D_{1i} + 2 \cdot t_i \quad [mm;mm] \quad (39)$$

$$D'_{2i} = D_{1i} + 2 \cdot t_i = 390 + 2 \cdot 15 = 420mm \quad (40)$$

8.1 Sekundární vinutí

Na sekundární vinutí 1A se používá vodič průměru 0,8 mm, pro vyšší hodnoty jmenovitého krátkodobého proudu (nad devítinásobek jmenovitého primárního proudu) se používají dva vodiče paralelně téhož průměru. Dle prvního uvážení zvolíme $d_2=1,6$ mm neizolovaného a pro izolovaný vodič to bude $d_{2i}=1,7$ mm

Počet vrstev sekundárního vinutí

$$n_2 = \frac{N_2}{\pi \cdot D'_{2i} \cdot \xi_1} \cdot d_{2i} \quad [-;mm] \quad (41)$$

kde ξ_1 je činitel plnění při skládání vodičů vedle sebe (0,9 – 0,93)

$$n_2 = \frac{N_2}{\pi \cdot D'_{2i} \cdot \xi_1} \cdot d_{2i} = \frac{11000}{\pi \cdot 420 \cdot 0,9} \cdot 1,7 = 15,75 \quad (42)$$

Počet vrstev zaokrouhlíme na celé číslo, tedy $n_2 = 16$. Výška sekundárního vinutí je určena ze vztahu

$$t_2 = n_2 \cdot d_{2i} \cdot \xi_2 \quad [mm;mm] \quad (43)$$

kde ξ_2 je činitel nárůstu výšky vinutí

$$t_2 = n_2 \cdot d_{2i} \cdot \xi_2 = 16 \cdot 1,7 \cdot 1,15 = 31,28mm \quad (44)$$

8.2 Rozměry magnetického obvodu

Vnitřní průměr pouzdra magnetického obvodu

$$D'_{3i} = D'_{2i} + 2 \cdot t_2 \quad [mm;mm] \quad (45)$$

$$D'_{3i} = D'_{2i} + 2 \cdot t_2 = 420 + 2 \cdot 31,28 = 482,56mm \quad (46)$$

Vnitřní průměr jádra se vypočítá podle vztahu

$$D'_i = D'_{3i} + 2 \cdot s \quad [mm;mm] \quad (47)$$

kde rozměry $s = 2,5$ mm volím z rozsahu 2 – 2,5 mm

$$D'_i = D'_{3i} + 2 \cdot s = 482,56 + 2 \cdot 2,5 = 487,56mm \quad (48)$$

Vypočtený vnitřní průměr jádra D'_i zaokrouhlíme nahoru na násobky 10, tedy $D_i = 490$ mm . Následně můžeme vypočítat definitivní vnitřní průměr pouzdra D_{3i} a vnitřní průměr magnetického obvodu s vinutím D_{2i}

Vnitřní průměr pouzdra

$$D_{3i} = D_i - 2 \cdot s \quad [\text{mm}; \text{mm}] \quad (49)$$

$$D_{3i} = 490 - 2 \cdot 2,5 = 485 \text{ mm} \quad (50)$$

Vnitřní průměr magnetického obvodu s vinutím

$$D_{2i} = D_{3i} - 2 \cdot t_2 \quad [\text{mm}; \text{mm}] \quad (51)$$

$$D_{2i} = 485 - 2 \cdot 31,28 = 422,44 \text{ mm} \quad (52)$$

8.2.1 Rozměry jádra

Pro výpočet bude na jádro použit materiál Permalloy Py 76 Cu. Maximální magnetická indukce tohoto materiálu je $B_m = 0,5 \text{ T}$

Hodnota jmenovité indukce se počítá ze vztahu

$$B_n = \frac{B_m}{0,9 \cdot FS} \quad [\text{T}; \text{T}] \quad (53)$$

kde FS je nadproudové číslo

$$B_n = \frac{0,5}{0,9 \cdot 5} = 0,1111 \text{ T} \quad (54)$$

Průřez jádra (předběžný výpočet) je vypočten ze vztahu

$$S' = \frac{1,3P}{4,44 \cdot f \cdot N_2 \cdot B_n \cdot \xi \cdot I_{2n}} \quad [\text{m}^2; \text{VA}, \text{Hz}, \text{T}, \text{A}] \quad (55)$$

kde ξ je činitel plnění magnetického obvodu (0,9 - 0,95) a činitel 1,3 vyjadřuje předběžné ztráty v sekundárním vinutí. Po dosazení dostáváme

$$S' = \frac{1,3 \cdot 5}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,1111 \cdot 0,95 \cdot 11000 \cdot 1} = 0,00002522 \text{ m}^2 = 25,22 \text{ mm}^2 \quad (56)$$

Výšku h volíme násobky 5 mm a šířku b volíme jako sudá čísla, přičemž platí $h > b$

Jelikož s předešlého výpočtu víme, že nám nevyhovuje nadproudové číslo, volíme průřez magnetického obvodu větší.

$$h = 15 \text{ mm}$$

$$b = 6 \text{ mm}$$

Tudíž průřez jádra je

$$S = h \cdot b \quad [\text{m}^2; \text{mm}] \quad (57)$$

$$S = 15 \cdot 6 = 90 \text{ mm}^2 \quad (58)$$

A musí platit
 $S \geq S'$

Vnější průměr jádra

$$D_e = D_i + 2 \cdot b \quad [\text{mm}; \text{mm}] \quad (59)$$

$$D_e = 490 + 2 \cdot 6 = 502 \text{ mm} \quad (60)$$

Střední průměr jádra

$$D = D_i + b \quad [\text{mm}; \text{mm}] \quad (61)$$

$$D = 490 + 6 = 496 \text{ mm} \quad (62)$$

Výška zapouzdřeného jádra

$$H = h + 2 \cdot r \quad [\text{mm}; \text{mm}] \quad (63)$$

kde hodnota $r = 2,5 \text{ mm}$

$$H = 15 + 2 \cdot 2,5 = 20 \text{ mm} \quad (64)$$

Šířka zapouzdřeného jádra

$$B = b + 2 \cdot s \quad [\text{mm}; \text{mm}] \quad (65)$$

$$B = 6 + 2 \cdot 2,5 = 11 \text{ mm} \quad (66)$$

Vnější průměr pouzdra

$$D_{3e} = D_{3i} + 2 \cdot B \quad [\text{mm}; \text{mm}] \quad (67)$$

$$D_{3e} = 485 + 2 \cdot 11 = 458,3 \text{ mm} \quad (68)$$

Tabulka 3 - Rozměry jádra

D_i [mm]	D_e [mm]	b [mm]	h [mm]	D [mm]
490	502	6	15	496

Tabulka 4 - Rozměry pouzdra

D_{3i} [mm]	D_{3e} [mm]	B [mm]	H [mm]	s [mm]	r [mm]
485	507	11	20	2,5	2,5

8.3 Výpočet chyb a kontrola nadproudového čísla

Střední délka závitu sekundárního vinutí

$$l_2 = 2 \cdot (B + H) + \pi \cdot t_2 \quad [\text{m;mm}] \quad (69)$$

$$l_2 = 2 \cdot (20 + 11) + \pi \cdot 31,28 = 160,27 \text{mm} \quad (70)$$

Odpor sekundárního vinutí

$$R_2 = \frac{N_2 \cdot l_2 \cdot \rho}{S_2} \quad [\Omega; \text{m}, \Omega \cdot \text{m}, \text{m}^2] \quad (71)$$

$$R_2 = \frac{11000 \cdot 160,27 \cdot 1,7 \cdot 10^{-8}}{2,01062} = 14,82 \Omega \quad (72)$$

Rozptylová reaktance sekundárního vinutí zanedbáváme, protože se jedná o toroidní jádro s rovnoměrným rozložením tohoto vinutí po celém obvodu.

Vnitřní zátěž při jmenovitém proudu

$$P_i = R_2 \cdot I_{2n}^2 \quad [\text{VA}; \Omega, \text{A}] \quad (73)$$

$$P_i = 14,82 \cdot 1^2 = 14,82 \text{VA} \quad (74)$$

Jmenovité břemeno a jeho složky ($\cos\beta=0,8$)

$$Z_n = \frac{P_n}{I_{2n}^2} \quad [\Omega; \text{VA}, \text{A}] \quad (75)$$

$$Z_n = \frac{5}{1^2} = 5 \Omega \quad (76)$$

Činná složka

$$R = Z_n \cdot \cos\beta \quad [\Omega; \Omega] \quad (77)$$

$$R = 5 \cdot 0,8 = 4 \Omega \quad (78)$$

Jalová složka

$$X = Z_n \cdot \sin\beta \quad [\Omega; \Omega] \quad (79)$$

$$X = 5 \cdot 0,6 = 3\Omega \quad (80)$$

Příčemž platí

$$Z_n = \sqrt{R^2 + X^2} \quad [\Omega; \Omega] \quad (81)$$

$$Z_n = \sqrt{4^2 + 3^2} = 5\Omega \quad (82)$$

Činná složka jmenovité zátěže

$$P_{\xi} = P_n \cdot \cos\beta \quad [\text{VA}; \text{VA}] \quad (83)$$

$$P_{\xi} = 5 \cdot 0,8 = 4\text{VA} \quad (84)$$

Jalová složka jmenovité zátěže

$$P_j = P_n \cdot \sin\beta \quad [\text{VA}; \text{VA}] \quad (85)$$

$$P_j = 5 \cdot 0,6 = 3\text{VA} \quad (86)$$

Celková zátěž transformátoru při jmenovitém proudu

$$P_c = \sqrt{(P_{\xi} + P_i)^2 + P_j^2} \quad [\text{VA}; \text{VA}] \quad (87)$$

$$P_c = \sqrt{(4 + 14,82)^2 + 3^2} = 19,06\text{VA} \quad (88)$$

Hodnota jmenovité magnetické indukce při jmenovité zátěži a jmenovitém proudu

$$B_{sk} = \frac{P_c}{4,44 \cdot f \cdot S \cdot \xi \cdot N_2 \cdot I_{2n}} \quad [\text{T}, \text{VA}, \text{Hz}, \text{m}^2, \text{A}] \quad (89)$$

$$B_{sk} = \frac{19,06}{4,44 \cdot 50 \cdot 9 \cdot 10^{-5} \cdot 0,95 \cdot 11000 \cdot 1} = 0,09129\text{T} \quad (90)$$

Kontrola nadproudového čísla

$$FS_{sk} = \frac{B_m}{0,9 \cdot B_{sk}} \quad [-, T] \quad (91)$$

$$FS_{sk} = \frac{0,5}{0,9 \cdot 0,09129} = 6,09 \quad (92)$$

$$FS_{sk} > FS$$

Výpočet chyb provedeme pro 100% a 25% jmenovitého břemene a 5, 20, 100 a 120 % jmenovitého proudu. Následně bude možné vykreslit křivky chyb, které musí být v poli dovolených chyb dle tabulky 1.

Skutečná hodnota magnetické indukce se vypočítá pomocí

$$B_{sk}^k = \frac{\sqrt{((R + R_2) \cdot (k \cdot I_{2n})^2)^2 + (X \cdot (k \cdot I_{2n})^2)^2}}{4,44 \cdot f \cdot S \cdot \xi \cdot N_2 \cdot I_{2n}} \quad [T, \Omega, A, m^2] \quad (93)$$

Kde k je procentuální hodnota proudu

Hodnoty indukci pro 100% jmenovitého břemene

5% jmenovitého proudu

$$B_{sk}^{0,05} = \frac{\sqrt{((4 + 14,82) \cdot (0,05 \cdot 1)^2)^2 + (3 \cdot (0,05 \cdot 1)^2)^2}}{4,44 \cdot 50 \cdot 9 \cdot 10^{-5} \cdot 0,95 \cdot 11000 \cdot 0,2 \cdot 1} = 0,0046T \quad (94)$$

20% jmenovitého proudu

$$B_{sk}^{0,2} = \frac{\sqrt{((4 + 14,82) \cdot (0,2 \cdot 1)^2)^2 + (3 \cdot (0,2 \cdot 1)^2)^2}}{4,44 \cdot 50 \cdot 9 \cdot 10^{-5} \cdot 0,95 \cdot 11000 \cdot 0,2 \cdot 1} = 0,0183T \quad (95)$$

100% jmenovitého proudu

$$B_{sk}^1 = \frac{\sqrt{((4 + 14,82) \cdot (1 \cdot 1)^2)^2 + (3 \cdot (1 \cdot 1)^2)^2}}{4,44 \cdot 50 \cdot 9 \cdot 10^{-5} \cdot 0,95 \cdot 11000 \cdot 1} = 0,0913T \quad (96)$$

120% jmenovitého proudu

$$B_{sk}^{1,2} = \frac{\sqrt{((4 + 14,82) \cdot (1,2 \cdot 1)^2)^2 + (3 \cdot (1,2 \cdot 1)^2)^2}}{4,44 \cdot 50 \cdot 9 \cdot 10^{-5} \cdot 0,95 \cdot 11000 \cdot 1,2 \cdot 1} = 0,1095T \quad (97)$$

Hodnoty pro 25% jmenovitého břemene

$$R' = 0,25 \cdot R = 0,25 \cdot 4 = 1 \Omega \quad (98)$$

$$X' = 0,25 \cdot X = 0,25 \cdot 3 = 0,75 \Omega \quad (99)$$

$$B_{sk}^k = \frac{\sqrt{[(R' + R_2) \cdot (k \cdot I_{2N})^2]^2 + [X' \cdot (k \cdot I_{2N})^2]^2}}{222 \cdot S \cdot \xi \cdot N_2 \cdot k \cdot I_{2N}} \quad [T, \Omega, A, m^2] \quad (100)$$

k - je hodnota jmenovitého proudu

5% jmenovitého proudu

$$B_{sk}^{0,05} = \frac{\sqrt{((1 + 14,82) \cdot (0,05 \cdot 1)^2)^2 + (0,75 \cdot (0,05 \cdot 1)^2)^2}}{4,44 \cdot 50 \cdot 9 \cdot 10^{-5} \cdot 0,95 \cdot 11000 \cdot 0,05 \cdot 1} = 0,0038 T \quad (101)$$

20% jmenovitého proudu

$$B_{sk}^{0,2} = \frac{\sqrt{((1 + 14,82) \cdot (0,2 \cdot 1)^2)^2 + (0,75 \cdot (0,2 \cdot 1)^2)^2}}{4,44 \cdot 50 \cdot 9 \cdot 10^{-5} \cdot 0,95 \cdot 11000 \cdot 0,2 \cdot 1} = 0,0152 T \quad (102)$$

100% jmenovitého proudu

$$B_{sk}^1 = \frac{\sqrt{((1 + 14,82) \cdot (1 \cdot 1)^2)^2 + (0,75 \cdot (1 \cdot 1)^2)^2}}{4,44 \cdot 50 \cdot 9 \cdot 10^{-5} \cdot 0,95 \cdot 11000 \cdot 1} = 0,0758 T \quad (103)$$

120% jmenovitého proudu

$$B_{sk}^{1,2} = \frac{\sqrt{((1 + 14,82) \cdot (1,2 \cdot 1)^2)^2 + (0,75 \cdot (1,2 \cdot 1)^2)^2}}{4,44 \cdot 50 \cdot 9 \cdot 10^{-5} \cdot 0,95 \cdot 11000 \cdot 1,2 \cdot 1} = 0,091 T \quad (104)$$

Z magnetizační charakteristiky (příloha P2) bude pro jednotlivé indukce odečteno měrné budící proudění celkové a_0 a p_{fe} měrné ztráty odečteme z charakteristiky $B_m = f(p_{fe})$ v příloze P2.

Tabulka 5 – Odečet hodnot pro jednotlivé indukce

I_{2n} (%)	Z (%)	B (T)	a_0 (A/m)	p_{fe} (W/kg)
0,05	100	0,0046	0,1	$1,5 \cdot 10^{-6}$
0,2	100	0,0183	0,33	$3,3 \cdot 10^{-5}$
1	100	0,0913	1,05	$1,21 \cdot 10^{-3}$
1,2	100	0,1095	1,196	$1,8 \cdot 10^{-3}$
0,05	25	0,0038	0,083	$1,13 \cdot 10^{-6}$
0,2	25	0,0152	0,287	$2,3 \cdot 10^{-5}$
1	25	0,0758	0,94	$7,9 \cdot 10^{-4}$
1,2	25	0,091	1,048	$1,2 \cdot 10^{-3}$

Měrné budící proudění činné lze spočítat za pomoci vztahu

$$a_g = \frac{p_{fe} \cdot \gamma_{fe}}{4,44 \cdot f \cdot B_{sk}} \quad [Am^{-1}; W/kg, Hz, T, kg \cdot m^{-3}] \quad (105)$$

kde p_{fe} jsou měrné ztráty ve W/kg při magnetické indukci B_{sk} a γ_{fe} , je měrná hmotnost použitého feromagnetického materiálu v kg/m^3 . Pro materiál Permalloy použijeme měrnou hmotnost $7650 kg/m^3$.

Po dosazení do vztahu

$$a_g^{0,05} = \frac{1,5 \cdot 10^{-6} \cdot 7650}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,0046} = 0,0112 \text{ Am}^{-1} \quad (106)$$

Celková chyba transformátoru proudu přepočtená na sekundární počet závitů má velikost

$$I_{20} = a_0 \cdot l_m \cdot \frac{1}{N_2} \quad [\text{A}; \text{Am}^{-1}, \text{m}, -] \quad (107)$$

Kde l_m je střední délka obvodu ($l_m = \pi D$). Po dosazení

$$I_{20}^{0,05} = 0,1 \cdot 1,55823 \cdot \frac{1}{11000} = 1,4 \cdot 10^{-5} \text{ A} \quad (108)$$

Chybu proudu určíme pomocí vztahu

$$\varepsilon_i = -\frac{I_{20}}{I_{2n}} \cos \alpha \cdot 100 \quad [\%; \text{A}] \quad (109)$$

Pro úhel α platí

$$\alpha = 90 - (\beta_c + \gamma) \quad (110)$$

Přičemž úhel β_c vypočteme pomocí vztahu

$$\text{tg} \beta_c = \frac{X}{R + R_2} \quad (111)$$

$$\text{tg} \beta_c = \frac{3}{4 + 14,82} = 0,159 \quad (112)$$

Úhel γ lze vyjádřit

$$\gamma = \sin^{-1} \left(\frac{a_g}{a_0} \right) \quad (113)$$

$$\gamma^{0,05} = \sin^{-1} \left(\frac{0,0112}{0,1} \right) = 6,4 \quad (114)$$

Po dosazení do vztahu (109) bude úhel α roven

$$\alpha^{0,05} = 90 - (9,06 + 6,4) = 74,54^\circ \quad (115)$$

Pote chyba proudu pro 5% jmenovitého proudu je

$$\varepsilon_i^{0,05} = -\frac{1,4 \cdot 10^{-5}}{1} \cos(74,54) \cdot 100 = -0,0075\% \quad (116)$$

Chybu úhlu vypočítáme ze vztahu

$$\delta_i = 3440 \cdot \frac{I_{20}}{I_{2n}} \sin \alpha \quad [\text{min}; \text{A}] \quad (117)$$

Chyba úhlu pro 5% jmenovitého proudu je tedy

$$\delta_i^{0,05} = 3440 \cdot \frac{1,6 \cdot 10^{-5}}{1} \sin(74,1) = 1,059 \text{ min} \quad (118)$$

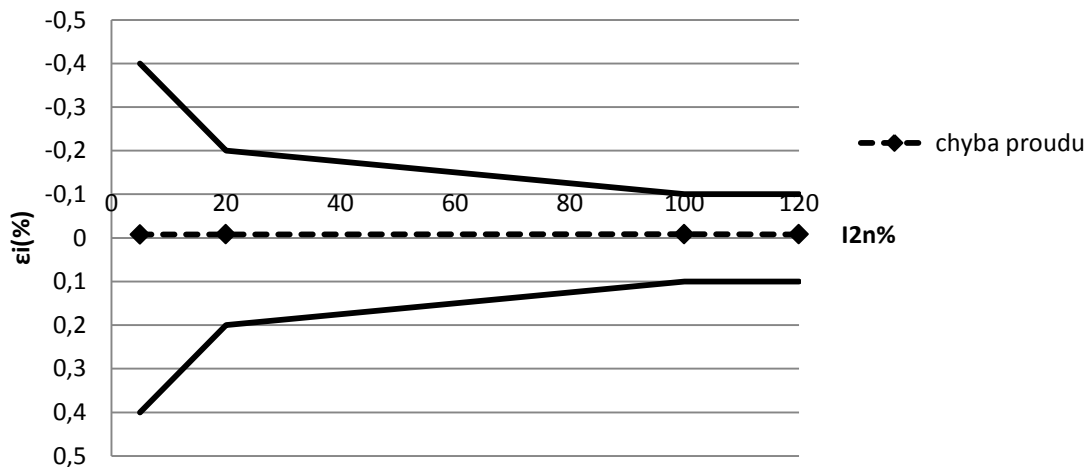
Veškeré vypočtené hodnoty chyb pro 25% a 100% jmenovité zátěže a 5%, 20%, 100%, 120% jmenovitého proudu jsou zahrnuty do tabulky 6. Opakující se výpočty jsou provedeny za pomoci software MS Office Excel. V příloze jsou uvedeny všechny hodnoty výpočtu v tabulce.

Tabulka 6 - Vypočtené chyby

I_{2n}	25% P_n		100% P_n	
	ϵ_i	δ_i	ϵ_i	δ_i
(%)	(%)	(min)	(%)	(min)
5	-0,004	0,797	-0,0075	0,928
20	-0,0046	0,681	-0,008	0,761
100	-0,0054	0,418	-0,0082	0,429
120	-0,0056	0,38	-0,0081	0,396

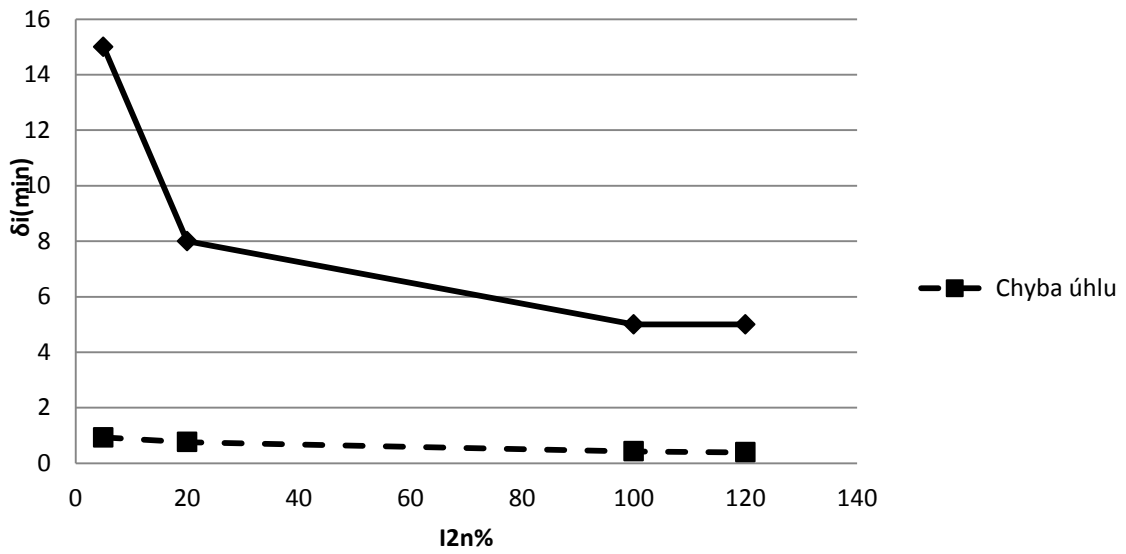
8.4 Diagram chyb

Chyba proudu 100% břemene



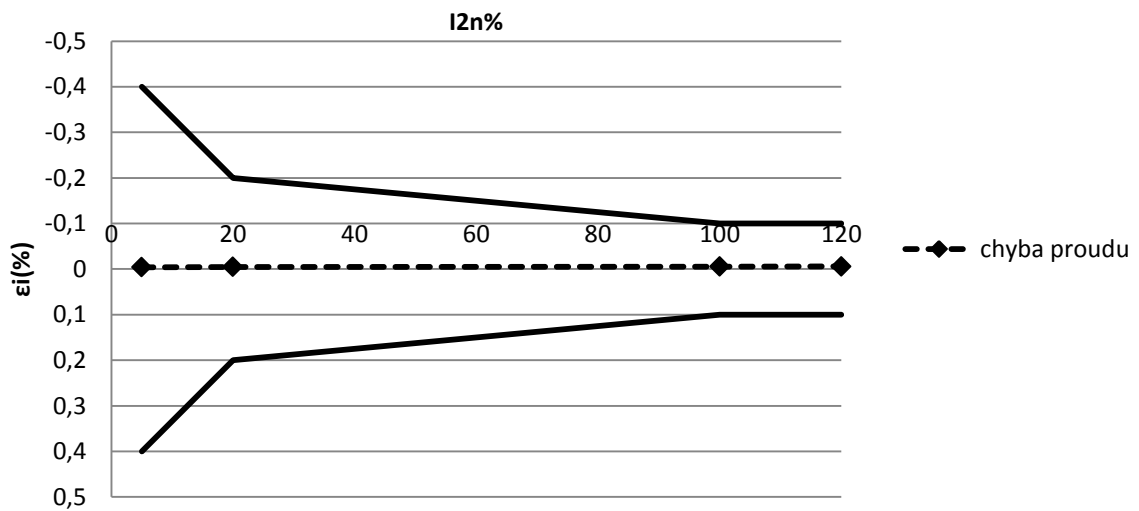
Graf 1 - Chyba proudu 100% břemene

Chyba úhlu 100% břemene



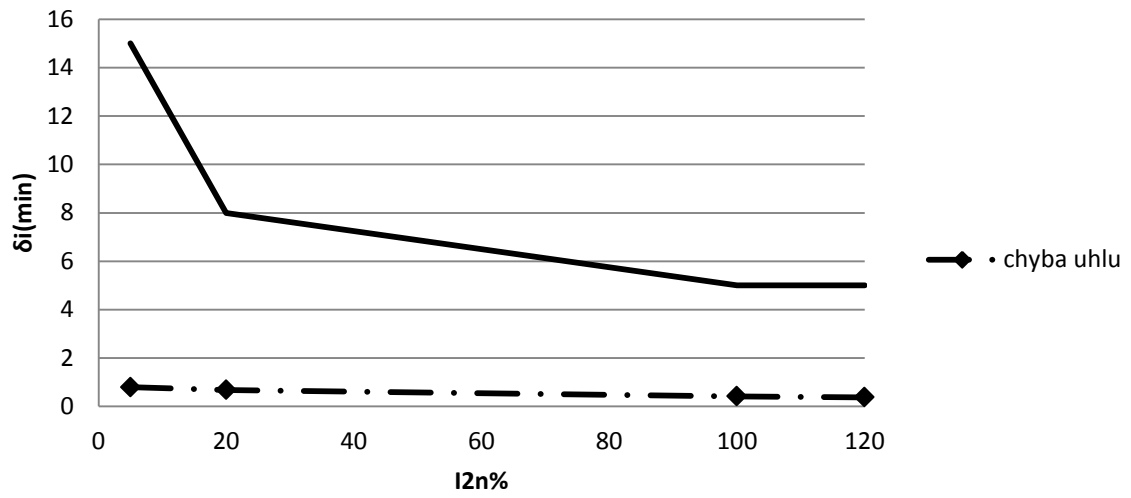
Graf 2 - Chyba úhlu 100% břemene

Chyba proudu 25% břemene



Graf 3 - Chyba proudu 25% břemene

Chyba úhlu 25% břemene



Graf 4 - Chyba úhlu 25% břemene

9 Software pro tvorbu výkresu

Pro tvorbu výkresu navrženého transformátoru proudu byl použit software SolidWorks zkušební verze. Tato verze zahrnuje funkčně stejné rozhraní jako profesionální verze SolidWorks. Verze obsahuje tyto moduly:

- software SOLIDWORKS Premium,
- funkce animací,
- knihovnu norem a předpisů,
- fotorealistické vizualizace,
- eDrawings®,
- SOLIDWORKS Simulation Premium, nástroje pro Metodu konečných prvků (MKP/FEA),
- SOLIDWORKS Motion, nástroje pro analýzu kinematické a pohybové simulace,
- SOLIDWORKS Flow Simulation, nástroje pro analýzu výpočtů dynamiky kapalin (CFD),
- SOLIDWORKS Plastics,
- kompletní on-line dokumentaci a cvičení,

System SolidWorks je 3D CAD parametrický modelář. Je určen pro tvorbu 3D a plošných modelů, práci se sestavami a také pro generování výrobních výkresů. Mezi přednosti tohoto systému patří přehlednost ovládání a sestavených dílů, sestav a výkresů. Dále každá změna v dílu se automaticky přenáší do sestavy, ve které je použit.

10 Závěr

Cílem diplomové práce bylo navrhnout přístrojový transformátor proudu pro ochranu generátoru. Tato ochrana má v sobě více funkcí. Jednou z částí je i diferenciální ochrana. Parametry transformátoru byly určeny dle jmenovitých hodnot generátoru a také z podmínek vycházejících z katalogu dané ochrany. Ochrana, jež je použita, je od firmy ABB a jedná se o model REG 670. Tento generátor je umístěn na elektrárenském bloku Jaderné elektrárny Dukovany. V příloze diplomové práce je také uvedeno schéma zapojení této ochrany na generátor. Parametry generátoru a potřebné rozměry částí pro návrh jsou uvedeny v kapitole 7.

Jelikož tento PTP slouží nejen pro diferenciální ochranu, ale také pro další druhy ochran, zvolili jsme na místo jistícího transformátoru proudu transformátor měřicí. Materiál použitý pro tento PTP jsme nevolili klasický Eo11 pro měřicí transformátory, ale Permalloy. Tento materiál má vysokou permeabilitu, proto se využívá k výrobě jádra pro jistící a součtové transformátory. Pomocí tohoto materiálu můžeme dosáhnout vysoké citlivosti na změnu proudu. Protože PTP slouží také pro měření, jejichž hodnoty využívá diferenciální ochrana, je nutné mít co nevyšší přesnost měření. Jak můžeme vidět z výpočtu, rozměry jsme volili tak, aby tento transformátor mohl být vsazen do zapouzdřeného vodiče. Rozměry zapouzdřeného vodiče jsou uvedeny v kapitole 7.2.1.

Jak jsme již uváděli, pro výpočet jsme použili materiál Permalloy. Díky tohoto materiálu jsou chyby proudu a úhlu minimální, tím je přesnost měření téměř bezchybná.

Ochrana nefunguje na přímém principu porovnávání proudu, jak je tomu obvykle u součtových transformátorů. Tuto funkci plní přímo logika ochrany. Jelikož se měří proudy na jedné fázi před a za objektem, je nutné, aby PTP byly jednotně nastaveny. Tato kompenzace se provádí různými způsoby:

- Měřicí rozdílový člen má dvě vinutí – jedním vinutím protéká tzv. rozdílový proud a druhým kompenzačním vinutím, protéká provozní proud měřicího transformátoru proudu
- Pomocí stejnosměrného relé, usměrňovačů a stabilizačních (kompenzačních) transformátorů
- Transduktory

Měřicí transformátor proudu měří proud na začátku a na konci generátoru. Tyto proudy jsou přiváděny na svorky ochrany a ta dále přes logiku určuje reziduální proud. Tuto hodnotu proudu využívá také pro další funkce ochrany.

Pro zjištění, zda tento návrh byl správný a vhodný do aplikace v praxi, je nutné provést prototypovou zkoušku.

Celý tento model je nakreslen v sestavě ve výkresové dokumentaci - viz příloha P4.

Použitá literatura

- (1) KOPEČEK, Jan a Miloš DVOŘÁK. *Přístrojové transformátory (měřící a jistící)*. Praha: Academia, 1966.
- (2) HRB, Jan a Arnošt CHMELÁŘ. *Provozní předpis: Elektrické ochrany*. Dukovany: ČEZ a.s., 2015.
- (3) KRÁL, Josef a Jaromír VANĚK. *Elektromagnetické přístroje*. Brno: VUT, 1984.
- (4) BAŠTA, Jan, Jaroslav CHLÁDEK a Imrich MAYER. *Teorie elektrických strojů*. Bratislava: ALFA, 1968.
- (5) ČSN EN 61869-1. *Přístrojové transformátory – Část 1: Všeobecné požadavky*. Praha: ÚNMZ, 2013.
- (6) PATOČKA, Miroslav. *Vybrané statě z výkonové elektroniky svazek IV: Magnetické obvody*. Brno: VUT, 2005.
- (7) NOVOTNÝ, Vladimír a Zdeněk VÁVRA. *Spínací přístroje a rozváděče na vysoké napětí*. Praha: SNTL, 1986.
- (8) GRYM, Rudolf. *Chránění II: elektrická zařízení vysokého napětí, chránění zařízení v průmyslu*. Havířov: IRIS, c2004. Pracovní a učební pomůcky.
- (9) HALUZÍK, Evžen. *Ochrany a automatiky v elektrických sítích*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1986.
- (10) JANÍČEK, František. *Digitálne ochrany v elektrizačnej sústave*. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2004. Edícia vysokoškolských učebníc.
- (11) KOLEKTIV, autorů. *Elektrická část JE VVER 440*. Dukovany: ČEZ a.s., 2012.
- (12) Generator protection REG670 2.1 IEC: Technical manual. *ABB Group - Automation and Power Technologies* [online]. 2015 [cit. 2016]. Dostupné z: https://library.e.abb.com/public/9c3f53e035224199a422b48c93d7b463/1MRK502066-UEN_-_en_Technical_manual__Generator_protection_REG670_2.1_IEC.pdf
- (13) FONTI, Paola. Current transformers: how to specify them. *Schneider Electric Group* [online]. 2000 [cit. 2016]. Dostupné z: <http://www.schneider-electric.co.uk/documents/technical-publications/en/shared/electrical-engineering/breaking-techniques-switchgear/general-knowledge/ect194.pdf>
- (14) ČSN EN 61869-2. *Přístrojové transformátory – Část 2: Dodatečné požadavky na transformátory proudu*. Praha: ÚNMZ, 2013.

Seznam obrázků

- Obrázek 1 - Zapojení transformátoru proudu
- Obrázek 2 - Náhradní schéma transformátoru
- Obrázek 3 - Fázorový diagram
- Obrázek 4 - Fázorový diagram pro dvě různé zátěže
- Obrázek 5 – Základ pro vytvoření komplexního diagramu chyb
- Obrázek 6 - Komplexní diagram chyb
- Obrázek 7 - Zrcadlový obraz magnetizační charakteristiky
- Obrázek 8 - Závislost na proudu
- Obrázek 9 - Závislost chyb na břemeni
- Obrázek 10 - Závislost chyb na sekundárním účinníku
- Obrázek 11 - Nadproudová charakteristika
- Obrázek 12 - Funkce součtového transformátoru
- Obrázek 13 - Vznik reziduálního proudu
- Obrázek 14 - Blokové schéma funkce elektrické ochrany
- Obrázek 15 - Princip zapojení ochrany
- Obrázek 16 - Princip zapojení podélné rozdílové ochrany
- Obrázek 17 - Rozdílová ochrana pro dlouhé objekty
- Obrázek 18 - Ochrana s napět'ovým porovnáním
- Obrázek 19 - Charakteristika rozdílové ochrany
- Obrázek 20 - Charakteristika závislého měřicího členu
- Obrázek 21 - Řez zapouzdřenými vodiči vyvedení výkonu
- Obrázek 22 - Zapouzdřené vodiče ve vyvedení výkonu. Červené mezikruží na prostředním

Seznam tabulek

- Tabulka 1 - Dovolené chyby měřících transformátorů proudu podle
- Tabulka 2 - Dovolené chyby jistících transformátorů proudu podle
- Tabulka 3 - Rozměry jádra
- Tabulka 4 - Rozměry pouzdra
- Tabulka 5 – Odečet hodnot pro jednotlivé indukce
- Tabulka 6 - Vypočtené chyby

Seznam grafu

Graf 1 - Chyba proudu 100% břemene

Graf 2 - Chyba úhlu 100% břemene

Graf 3 - Chyba proudu 25% břemene

Graf 4 - Chyba úhlu 25% břemene

Seznam příloh

Příloha P1 Schéma připojení rozdílové ochrany na TG

Příloha P2 Vlastnosti feromagnetických materiálů

Příloha P3 Tabulky výsledků pro magnetický obvod

Příloha P4 Transformátor proudu pro diferenciální ochranu (Výkres)