

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Vliv stejnosměrné složky proudu na chybu převodu
přístrojových transformátorů proudu**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. David TRUHLÁŘ**
Osobní číslo: **E19N0040P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Téma práce: **Vliv stejnosměrné složky proudu na chybu převodu přístrojových transformátorů proudu**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky**

Zásady pro vypracování

1. Proveďte rešerši dostupných informací k jevu přesycení přístrojových transformátorů proudu stejnosměrnou složkou.
2. Proveďte analýzu chování přístrojových transformátorů proudu v oblasti jmenovitého proudu s obsahem stejnosměrné složky.
3. Proveďte analýzu vlivu poměru X/R chráněného zařízení na přesycení přístrojových transformátorů proudu.
4. Proveďte měření na přístrojovém transformátoru proudu. Porovnejte přesnost jeho převodu pro sinusový průběh s různým obsahem superponované stejnosměrné složky – řekl bych mojí představu, jak to měřit.

Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. GRYM Rudolf; HOCHMAN Petr; BERMAN Jiří Chránění II: elektrická zařízení vysokého napětí. Havířov: IRIS, 2004. ISBN 80-903540-0-9

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jana Jiříčková, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky

Datum zadání diplomové práce: **9. října 2020**
Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2021**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



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

V Plzni dne 9. října 2020

Abstrakt

Práce je rozdělena do tří částí. První část práce je zaměřena na popsání parametrů přístrojových transformátorů a popsání jevu přesycení jádra přístrojového transformátoru. Druhá část je zaměřena na praktické měření, na kterém byly ověřeny poznatky získané v první části práce, a to vliv zatížení sekundárního vinutí na odolnost proti přesycení. V poslední části byly navrženo několik variant, jak odstranit jev přesycení na VE Štěchovice, kde docházelo k falešnému vybavování rozdílových ochrany transformátorů při připojování sekundárního vinutí k síti.

Klíčová slova

Přístrojový transformátor proudu, rozdílová ochrana, přesycení

Abstract

The diploma thesis is divided into three parts. The first part of the work is focused on the description of the parameters of instrument transformers and the description of the phenomenon of supersaturation of the instrument transformer core. The second part is focused on practical measurements, on which the findings obtained in the first part of the work were verified, namely the influence of the secondary winding load on the supersaturation resistance. In the last part, several variants were proposed to eliminate the phenomenon of supersaturation at water powerplant Štěchovice, where there was a false equipping of differential protection of transformers when connecting the secondary winding to the network.

Key words

Instrument current transformer, differential protection, oversaturation

Prohlášení

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.

.....

podpis

V Plzni dne 27.5.2021

Bc. David Truhlář

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí diplomové práce Ing. Janě Jiříčkové, Ph.D. za metodické vedení práce.

Dále bych rád poděkoval svému konzultantovi Ing. Janu Markvartovi za obrovskou pomoc při měření, kdy mi dokázal zajistit všechny potřebné měřicí zařízení, software pro analyzování zaznamenaných průběhů a za pomoc při jakémkoliv dotazu, který jsem na něj vznesl.

Další, komu bych tímto chtěl poděkovat je celý kolektiv ve firmě SPIE Elektrovod a.s., který mě neustále motivoval k dokončení práce, kolegovi Václavovi Puldovi a Jiřímu Konopovi za poskytnutí měďných vodičů pro měření, a hlavně svému vedoucímu Mgr. Lubomíru Frundlovi, za jeho trpělivost a ochotu mi umožnit studovat v této nelehké době, kdy jsem již začal pracovat na plný úvazek.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat všem z rodiny, ať už mé nebo ze strany mé přítelkyně Kristýnky, kteří mě neustále nutily do studia a díky nim jsem tam kde jsem a věřím, že mi budou oporou až do samého konce studia.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 PŘÍSTROJOVÝ TRANSFORMÁTOR PROUDU	12
2 NÁHRADNÍ SCHÉMA PTP	12
2.1 PARAMETRY PŘÍSTROJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ PROUDU.....	14
2.1.1 Jmenovitý primární proud I_p	14
2.1.2 Jmenovitý sekundární proud I_s	14
2.1.3 Jmenovitý převod transformátoru.....	14
2.1.4 Třída přesnosti.....	14
2.1.5 Nadproudové číslo.....	15
2.1.6 Skutečné nadproudové číslo.....	15
3 ROZDĚLENÍ PŘÍSTROJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ	16
4 CHYBY PTP A JEJICH VLIV NA SYSTÉM CHRÁNĚNÍ	17
4.1 CHYBA ÚHLU.....	17
4.2 PŘESYCENÍ PTP.....	18
4.2.1 Zapínání transformátoru.....	20
4.2.2 Velikost zapínacího proudu.....	24
5 ANALÝZA VLIVU SS SLOŽKY NA CHOVÁNÍ PTP A SYSTÉM CHRÁNĚNÍ NA VE ŠTĚCHOVICE	28
6 MĚŘENÍ NA PTP	31
6.1 MĚŘENÍ Č.1: PRIMÁRNÍ AC PROUD 50 - 600 A (RESP. 100 – 1200 A)/50 Hz.....	37
6.2 MĚŘENÍ Č.2 : PRIMÁRNÍ AC PROUD JAKO V MĚŘENÍ 1 SE SUPERPONACÍ DC SLOŽKY 25, 50, 100, 200A (RESP. 50, 100, 200, 400 A).....	38
6.3 MĚŘENÍ Č.3 : ZVYŠOVÁNÍ BŘEMENE SEKUNDÁRNÍHO VINUTÍ.....	39
7 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	41
8 NÁVRH ŘEŠENÍ PRO VE ŠTĚCHOVICE	41
ZÁVĚR	43
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	1
PŘÍLOHY	3

Úvod

Ve všech rozvodnách a elektrárnách, je zapotřebí z důvodu bezpečnosti znát a monitorovat hodnoty jednotlivých veličin přenášené nebo vyráběné energie. Jelikož se v takovémto provozu snadno setkáme s proudy velikosti kiloampér a napětím řádově kilovoly, není možné tyto hodnoty měřit standartními ampérmetry a voltmetry. Právě pro tyto účely slouží přístrojové transformátory, a to buď napětí, anebo proudu. Díky těmto transformátorům jsme schopni změřit veličiny řádově kiloampér a kilovolt běžnými měřicími přístroji, jelikož výstup těchto transformátorů bývá řádově ampéry a volty.

V běžném provozu se však setkáváme s různými poruchami, zkraty a dalšími přechodnými ději. Proti těmto vlivům musí být přístrojové transformátory odolné a musejí zachovat své parametry i v takto nestandardních situacích. Proto je vždy nutné před návrhem různých ochran, a to rozdílových, distančních a dalších, které získávají informaci nejčastěji právě z přístrojových transformátorů informaci o velikosti dané veličiny, znát veškeré informace o celém zapojení a možných velikostech nadproudů a přepětí, zatížení, kterým budou dané přístrojové transformátory zatíženy až po takové detaily jako je vzdálenost od měřicího zařízení a jaký má odpor právě propojovací vodič.

Důvodem pro navržení této diplomové práce bylo falešné vybavování ochran z důvodu přesycení jádra přístrojového transformátoru proudu u rozdílové ochrany transformátoru, a to při přípravě pro připojení dalšího z generátorů k síti, do které již dodávalo elektrickou energii sousední soustrojí.

Seznam symbolů a zkratk

I	elektrický proud [ampér - A]
Φ	magnetický tok [weber - W]
R	elektrický odpor [ohm - Ω]
ρ	měrný elektrický odpor [$\Omega \cdot m$]
l	délka vodiče [metr - m]
S	průřez [mm^2]
L	indukčnost [H]
U	elektrické napětí [volt - V]
Z	impedance [ohm]
PTP	přístrojový transformátor proudu
AC	střídavý elektrický proud
DC	stejnosměrný elektrický proud
I_p	jmenovitý primární proud
I_s	jmenovitý sekundární proud
K_n	jmenovitý převod transformátoru
n^*	skutečné nadproudové číslo
n_n	jmenovité nadproudové číslo
φ	úhel [rad, °]
$Im\overline{\Delta I}$	imaginární složka rozdílu proudů v komplexním tvaru
U_{lim}	limitní napětí [V]
I_{lim}	limitní proud [A]
$\frac{d}{dt}$	derivace podle času
u_i	indukované elektromotorické napětí [V]
H	intenzita magnetického pole [A/m]
N	počet závitů
B	magnetická indukce [tesla – T]
μ	permeabilita [-]
U_m	maximální hodnota napětí
t	čas [s]
ψ	fázový posuv [rad, °]
ω	úhlová frekvence [s^{-1}]

τ	časová konstanta [s]
TG	turbogenerátor
T(1,2,3)	transformátor
L(1,2,3)	fázové vodiče
X	reaktance [ohm]
VN	vysoké napětí
R110kV	rozvodna s hladinou napětí 110 kV
P	činný výkon [Watt – W]
S	zdánlivý výkon [voltampér – VA]

1 Přístrojový transformátor proudu

Přístrojové transformátory proudu jsou zařízení, pracující na principu průchodu proudu primárním vinutím. Tento proud I_1 vybudí v jádře transformátoru magnetický tok Φ . Tento tok prochází skrze feromagnetické jádro a v sekundárním vinutí, vybudí proud I_2 , který je úměrný podílu závitů primárního vinutí ku počtu závit sekundárního vinutí. Jelikož je počet závitů primárního vinutí jedna, je poté jednoduché určit, jaký bude proud na sekundární straně transformátoru.

Tyto transformátory také plní v praxi funkci oddělovacích transformátorů, což má vliv na bezpečnost.

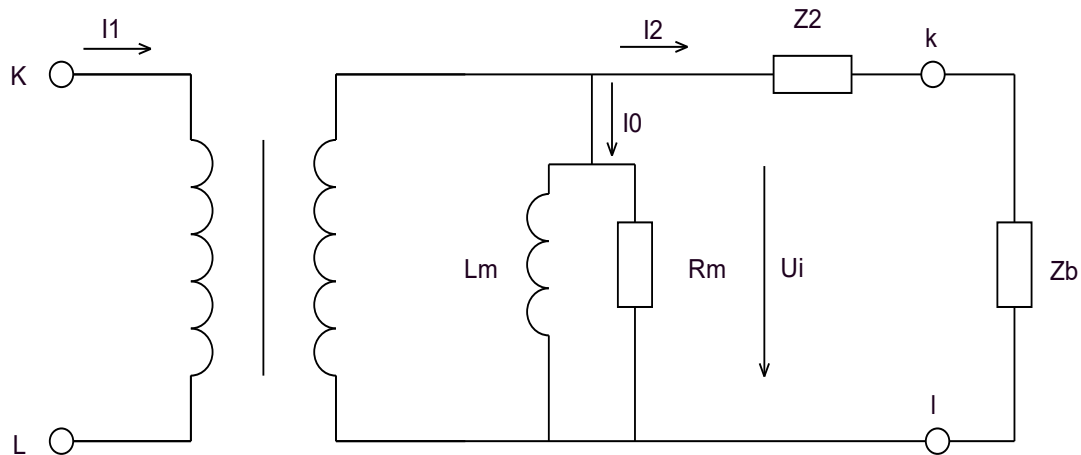
2 Náhradní schéma PTP

Náhradní schéma přístrojového transformátoru proudu vychází ze schématu klasického transformátoru. V primárním vinutí lze zanedbat odpor vodiče, jelikož se v drtivé většině případů jedná o vodiče velikého průřezu a tak ze vzorce (2) je zřejmé, že je zde nepřímá úměra vzhledem k průřezu vodiče. Navíc jsou většinou vodiče z mědi nebo hliníku, což jsou kovy s nízkou rezistivitou, konkrétně pro měď je $\rho_{Cu}=0,0178 [\cdot 10^{-6} \Omega \cdot m]$ a pro hliník $\rho_{Al}=0,0285 [\cdot 10^{-6} \Omega \cdot m]$

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} [\Omega] \quad (2.1)$$

Abychom dosáhli silné vzájemné vazby mezi primárním vodičem a sekundárním vinutím, je zapotřebí použití feromagnetického jádra. Feromagnetické materiály se vyznačují tím, že jsou schopny tvořit takzvané Weissovy domény. Jedná se o dipóly, které v případě magnetizace jsou shodně orientovány a tvoří magnetické pole. Naopak v případě, že na dipóly nepůsobí žádné vnější pole, dipóly jsou náhodně orientovány a výsledný magnetický moment je tak nulový.

Co však nelze zanedbat jsou právě vlastnosti jádra, které je možné při normálních stavech v měřeném, resp. chráněném objektu eliminovat, avšak v případě přechodných dějů jsou vlastnosti jádra příčinou různých nepřesností a zpoždění.



Obrázek 1: Náhradní schéma přístrojového transformátoru proudu

Zapojení přístrojového transformátoru je několik způsobů. Liší se v závislosti na konkrétní aplikaci a na provedení transformátoru. Nejčastěji se však v průmyslu setkáme s průchozími a průvlekovými třístrojovými transformátory, kde primární vinutí je tvořeno v případě průchozího pouze průchodem skrze otvor v přístrojovém transformátoru a v případě průvlekového je nutno připojit primární vodič na již připravené vývody jako je znázorněno na Obrázek 2.



Obrázek 2: Přístrojový transformátor proudu

2.1 Parametry přístrojových transformátorů proudu

Existuje řada parametrů určující jakost a přesnost PTP. Mezi hlavní parametry se řadí nadproudové číslo, třída přesnosti a limitní napětí. Tyto parametry jsou dány konstrukčním zpracováním. Je ovšem vhodné před použitím, tyto parametry zkontrolovat. (1, 17, 18)

2.1.1 Jmenovitý primární proud I_p

Jmenovitý primární proud je hodnota proudu, která je štítkovou hodnotou. Při této hodnotě by měla být hodnota účinnosti stejná, jako je hodnota uváděna na štítku transformátoru.

2.1.2 Jmenovitý sekundární proud I_s

Jmenovitý sekundární proud je proud sekundárním vinutím transformátoru. Tato hodnota je uváděna na štítku transformátoru a zároveň z této hodnoty vyplývá jeho účinnost

2.1.3 Jmenovitý převod transformátoru

Jmenovitý převod transformátoru je podíl primárního ku sekundárnímu jmenovitému proudu transformátoru (3).

$$K_n = \frac{I_p}{I_s} \quad (2.2)$$

2.1.4 Třída přesnosti

Každý transformátor je vyráběn s určitou přesností a konstrukčním zpracováním, čemuž následně odpovídá určitá třída přesnosti. Třídou přesností se rozumí maximální možná chyba měřicího zařízení v procentech při průchodu jmenovitého proudu v primárním vinutí. Pro jistící transformátory proudu jsou nejčastěji používané zařízení s třídou přesnosti 5P nebo 10P, což odpovídá 5 resp. 10% chyba při průchodu jmenovitého proudu primárním vinutím. Písmeno P zde značí, že se jedná o přístrojové transformátory pro ochranná zařízení (P – protection).

Třídy přesnosti máme (od nejpřesnějšího):

0,1 – přesná laboratorní měření

- 0,2 – laboratorní měření
- 0,2S – laboratorní měření (rozšířený proudový rozsah – od 1% I_n)
- 0,5 – měření spotřeby el energie
- 0,5S – měření spotřeby el. energie (rozšířený proudový rozsah – od 1% I_n)
- 1 – podružné měření
- 3 – orientační kontrolní měření
- 5

2.1.5 Nadproudové číslo

Nadproudové číslo je dáno poměrem jmenovitého nadproudu primárním vinutím a proudem jmenovitým. Hlídá se jmenovitý nadproud, při němž velikost chyby je větší než 10%, při jmenovité zátěži.

2.1.6 Skutečné nadproudové číslo

Skutečné nadproudové číslo je nadproudové číslo, které zohledňuje zatížení přístrojového transformátoru proudu vlivem odporu svorek, odporu vinutí a vodičů. Skutečné nadproudové číslo je možné vypočítat následně (4):

$$n^* = n_n \cdot \frac{S_{in} + S_n}{S_{in} + S_a} \quad (2.3)$$

kde: n^* - skutečné nadproudové číslo

n_n – jmenovité nadproudové číslo

S_{in} - zatížení vlivem průchodu proudu sekundárním vinutím

S_n - jmenovitá zátěž připojená k sekundárnímu vinutí. Při této hodnotě zatížení nedojde k chybě při měření než je velikost chyby udávaná třídou přesnosti.

S_a – zatížení vzniklé ztrátami na přívodních vodičích mezi PTP a ochranou a na vstupu ochrany

Pomocí tohoto nadproudového čísla, které zohledňuje skutečnou zátěž připojenou na sekundární vinutí lze vypočítat proud primárním vinutím, při kterém nebude docházet k přesycení přístrojového transformátoru proudu a chyba nebude větší než 10%. Při

důkladnějším rozložení a zkoumání výpočtu bychom dospěli k závěru, že velikost nadproudového čísla přístrojového transformátoru je silně závislá na břemeni, které je připojováno na sekundární vinutí. Jelikož jako břemeno připojované k sekundárnímu vinutí je myšleno také vedení mezi sekundárním vinutím a ochranou, snažíme se tuto vzdálenost minimalizovat, a tak se tyto dvě zařízení v praxi snažíme umísťovat co možná nejbližší k sobě.

Další možností je výpočet dle normy PNE 38 4065 ed.4. Tento výpočet je velice podobný, avšak uvažuje také přechodné děje, které mohou nastat v síti. Mezi tyto děje se řadí například vypnutí bez automatiky OZ, úspěšný OZ nebo neúspěšný OZ.

Výpočet vypadá poté následovně:

$$n_s = \frac{I_K}{I_{pn}} \cdot \frac{R_{ct} + R_b}{R_S} \cdot K_{td} \quad (2.4)$$

kde:

n_s – skutečné nadproudové číslo

I_K – primární zkratový proud protékající PTP

I_{pn} – jmenovitý primární proud PTP

R_{ct} – odpor sekundárního vinutí

R_b – jmenovitá odporová zátěž

R_S – celkový odpor připojen k sekundárnímu vinutí

K_{td} – činitel pro dimenzování pro přechodné děje

Činitel K_{td} je vypočítáván podrobně v normě ČSN EN 61869-2. V praxi je avšak uvažován činitel pro rozdílovou ochranu transformátoru 3-4.

Pokud bude cílem návrhu vyloučit přesycení PTP stejnosměrnou složkou proudu vznikající při přechodných dějích je nutno zajistit a dodržet, aby skutečné nadproudové číslo bylo menší nebo rovno jmenovitému nadproudovému číslu.

3 Rozdělení přístrojových transformátorů

Přístrojové transformátory se v praxi dělí do několika skupin z čehož se nejčastěji jedná o transformátory jistící a měřící. Rozdíl mezi jistícím a měřícím transformátorem je v jeho přesnosti v oblasti zkratových proudů. Od přístrojových transformátorů proudu měřících je vyžadována vysoká přesnost zejména v oblasti jmenovitých hodnot. Nejčastěji

se jedná o kontrolní nebo obchodní měření. Naopak od přístrojových transformátorů proudu jisticích není vyžadovaná vysoká přesnost (chyba 5 – 10%), avšak tato přesnost musí být zachována i v případě zkratových proudů, které jsou několikrát vyšší než proudy jmenovité. To vyplývá z velikosti nadproudového čísla.

4 Chyby PTP a jejich vliv na systém chránění

Systémy chránění jsou silně závislé na přesnosti, resp. chybě. V případě aplikace jisticího přístrojového transformátoru proudu pro rozdílové ochrany je nutné respektovat určité stavy při navrhování a nastavování ochrany. Jedním z nejdůležitějších stavů je zkrat a dalším podstatným stavem je zapínání transformátoru při němž vzniká zapínací ráz. Konkrétně zapínací ráz by měl být při nastavování ochrany řešen tak, že je ochrana po určité dobu tzv. necitlivá, což znamená, že nereaguje. Pro možnost využití této metody je nutno sledování 2. harmonické, která je velice výraznou složkou proudu při zapínacím rázu. Kritérium pro blokaci ochran bývá obsah 2. harmonické 10% z celkového proudu. Avšak toto kritérium nemusí být vždy dostačující, jelikož v případě chybného vybavování ochran na VE Štěchovice byl obsah 2. harmonické 7,6% což by bylo pod hranicí blokace ochrany. Dalším parametrem je určitá tolerance, která bývá $0,2 I_n$ (může se měnit v závislosti na výrobci ochrany a kvalitě použitého PTP)

4.1 Chyba úhlu

$$\varphi_{rad} = \frac{\pi}{180} \varphi_{st} \cong tg\varphi = \left| \frac{Im\overline{\Delta I}}{\overline{I}_1} \right| \quad (4.1)$$

kde rozdíl proudů $\overline{\Delta I} = \overline{I}_1 - \overline{I}_2$.

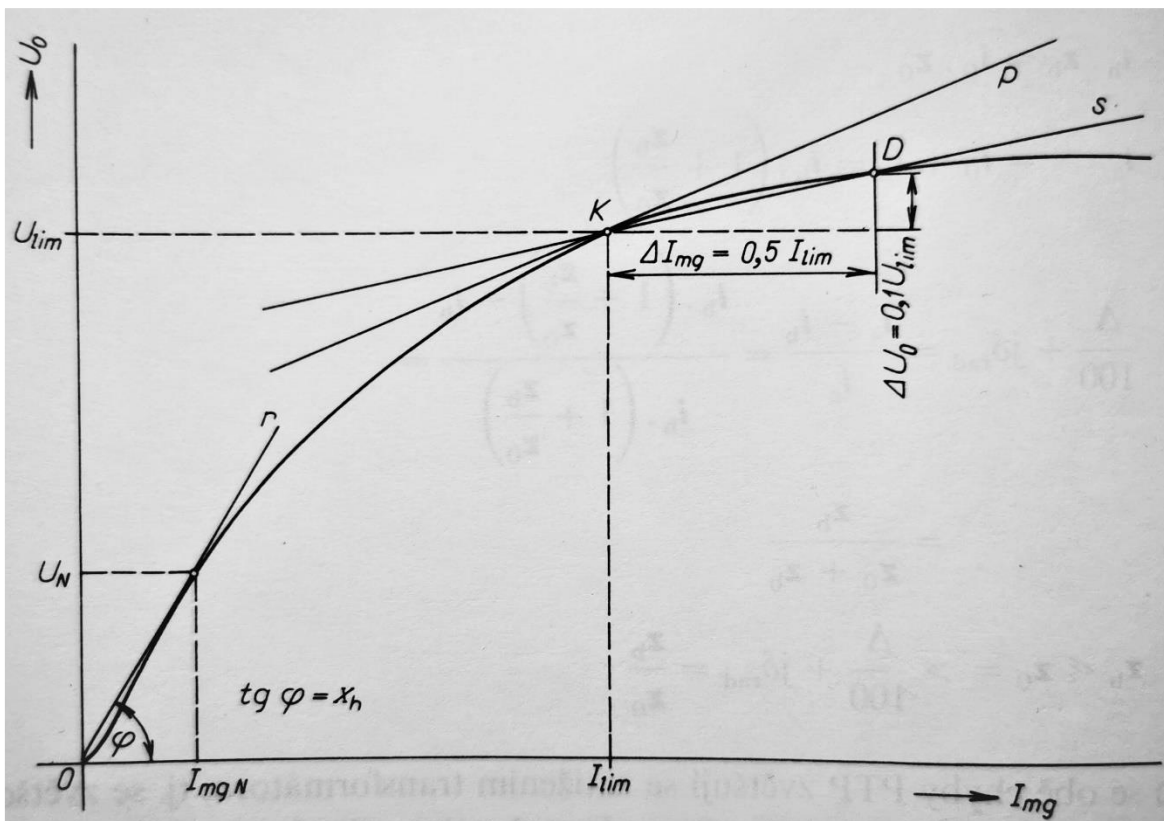
K této chybě dochází vždy. Její velikost však lze snížit snížením velikosti připojeného břemene. Proto je naším cílem při připojování zátěže, kterou může představovat např. ampérmetr, měřicí převodník či jisticí zařízení nepřekročit maximální dovolené zatížení, při kterém je zaručena třída přesnosti transformátoru. Z toho plyne, že se snažíme při návrhu PTP co nejvíce snížit impedanci celého sekundárního vinutí. Na druhou stranu se

snažíme co nejvíce zvýšit příčnou impedanci, která představuje odpor jádra. Čím vyšší je, tím je transformátor přesnější a odolnější proti přesycení jádra.(1)

4.2 Přesycení PTP

K nejčastějším problémům při provozování přístrojových transformátorů proudu u diferenciálních ochran dochází při přechodných jevech. Mezi tyto jevy můžeme zařadit připínání transformátoru, zkrat, spouštění velkých motorů a podobně dynamické jevy. Při běžném provozu je jádro transformátoru pravidelně přepólováno a dochází k tak ke střídavému sycení. Avšak v případech již zmíněných případech je velice často vybudena stejnosměrná složka, která zapříčiní zvýšení primárního proudu přístrojového transformátoru což má za následek zvýšení magnetického toku jádrem transformátoru a plné nasycení jádra transformátoru. Železné jádro pak i při poklesu střídavé složky proudu vykazuje vysoký magnetický tok. V tomto stavu není přístrojový transformátor proudu schopný transformovat, jelikož nedochází ke střídavé magnetizaci. Vlivem toho poté dochází k tomu, že sekundární proud je roven nule.

Při průchodu magnetického toku jádrem dochází k sycení jádra. Každé jádro je schopno přenést pouze určité množství magnetického toku, který je dán magnetizační křivkou jádra. Jedná se o tzv. magnetizační charakteristiku B-H. Limit sycení jádra je dán velikostí permeability μ



Obrázek 3 Magnetizační charakteristika přístrojového transformátoru proudu (16)

Právě tato křivka (Obrázek 3), nám určuje okamžik, respektive hodnotu, při které se začíná jádro sytit. Tímto bodem je bod K, při kterém změna napětí o 10% na sekundární straně vinutí způsobí zvýšení magnetizačního proudu o 50%. Z tohoto tvrzení pak vyplývá podmínka

$$\frac{U_{lim}}{I_{lim}} = 5 \frac{\Delta U_0}{\Delta I_{mg}} \quad (4.2)$$

Výpočet (odhad) limitního napětí můžeme provést podle vztahu

$$U_{lim} = n_n \cdot \left(\frac{S_n}{I_{2n}} + R_2 \cdot I_{2n} \right) \quad (4.3)$$

- kde: U_{lim} - limitní napětí [V]
 n_n - jmenovité nadproudové číslo [p.u.]
 S_n - jmenovitý výkon PTP [VA]
 I_{2n} - sekundární jmenovitý proud [A]
 R_2 - ohmický stejnosměrný odpor sekundárního vinutí PTP

4.2.1 Zapínání transformátoru

Takzvaný zapínací proud je proud, který vzniká následkem rozdílu magnetizačního indukčního toku v okamžiku připnutí transformátoru a magnetického indukčního toku (Φ), kterým by bylo protékáno jádro při již ustáleném stavu. Pro zjednodušení pochopení problematiky budeme uvažovat jednofázový transformátor s jednoduchým magnetickým obvodem.

Intenzita magnetického pole v jádře je popisována 1. Maxwellovou rovnicí v integrálním tvaru. Tato rovnice je často také nazývána zákonem celkového proudu a ve své podstatě se jedná o zobecnění Ampérova zákona:

$$\oint_c H dl = \oint_c H_t dl = \sum_k I_k \quad (4.4)$$

kde c je integrační dráha představující střední délku siločáry v magnetickém obvodu.

Z této rovnice je zřejmé, že magnetické pole vzniká vlivem průchodu pohybujícího se náboje. Pokud nábojů bude více a budou všechny unášeny jedním směrem, hovoříme pak o elektrickém proudu. Aby však docházelo k transformaci, musíme uvažovat proud který bude funkcí času $I_k = I_k(t)$. Stejněho charakteru pak bude i intenzita magnetického pole $H = H(t)$.

Magnetické pole je v jádře transformátoru tvořeno cívkou, ve které je každý závit protékán stejně velkým proudem. Aby byla zachována rovnováha v rovnici (1.MR) bude vhodné nahrazení pravé strany součtem všech příspěvků jednotlivých cívek $\sum_k I_k = \sum_k N_k I_k$, kde N_k je počet závitů cívky a I_k proud protékající k -tou cívkou. Předchozí tvar 1. Maxwellovy rovnice pak můžeme přepsat do tvaru

$$\sum_j H_j(t) l_j = \sum_k N_k I_k(t) \quad (4.5)$$

Magnetický tok protékající jádrem transformátoru je vyjádřen indukovaným elektromotorickým napětím podle Faradayova zákona. Indukované elektromotorické napětí je záporná hodnota změny magnetického indukčního toku v čase. To lze zapsat jako:

$$u_i = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (4.6)$$

Magnetický indukční tok je tvořen magnetickou indukcí B na ploše S , která může být libovolně orientovaná a je definován jako:

$$\Phi = \iint_S B dS = \iint_S B_n dS \quad (4.7)$$

$\Phi = \iint_S B dS = \iint_S B_n dS$ kde B_n je složka magnetické indukce B , která je kolmá na plochu S . V případě, že magnetické pole bude homogenní, lze magnetický indukční tok proměnný v čase definovat jako:

$$\Phi(t) = S \cdot B(t) \quad (4.8)$$

$\Phi(t) = S \cdot B(t)$ Pro popis transformátoru bude velikost elektromotorického napětí po zohlednění všech zjednodušení odvozených v předchozích krocích dána:

$$u_o(t) = -N \cdot S \cdot \frac{dB(t)}{dt} \quad (4.9)$$

Pokud bude dále uvažován ideální lineární materiál s danou permeabilitou μ respektive relativní permeabilitou μ_r bude vztah mezi intenzitou magnetického pole H a magnetickou indukcí B popsán:

$$\mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} \quad (4.10)$$

Ve skutečnosti je však materiál nelineární, a tak je i závislost mezi B a H je nelineární, což popisuje vztah $\mathbf{B} = f(\mathbf{H})$. Obrazem nelinearity je pak tvar, odpovídající hysterezní smyčce při magnetování feromagnetika. Vliv na funkci magnetizace je

minimální. Může ji však mírně ovlivnit teplota, čas, mechanické napětí a jiné $\mathbf{M}(H, M, t, \vartheta, \dots)$.

Při řešení přechodného jevu, který vzniká při připínání transformátoru k distribuční síti budeme předpokládat, že vnější síť je dostatečně tvrdá a průběh napětí je harmonický

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi) \quad (4.11)$$

kde ψ určuje fázový úhel v čase připnutí transformátoru k distribuční síti.

Napětí sítě, které odpovídá napětí vinutí na transformátoru lze pomocí Kirchhofova zákona a se znalostí parametrů vinutí vyjádřit jako elektromotorické napětí:

$$u_{i1} = u(t) - R_1 i_1(t) - L_{1\sigma} \frac{di_1(t)}{dt} \quad (4.12)$$

Z Faradayova indukčního zákona lze integrací získat za předpokladu zanedbání odporu primárního vinutí R_1 a rozptylové indukčnosti $L_{\sigma 1}$ a dosazením indukovaného napětí u_{i1}

$$\int \frac{U_m}{N} \sin(\omega t + \psi) dt = -\phi(t) \quad (4.13)$$

$$-\frac{U_m}{N\omega} \cos(\omega t + \psi) + k = -\phi(t) \quad (4.14)$$

Abychom mohli určit konstantu k , je nutné určení počáteční podmínky v čase $t = 0$. V tento okamžik je magnetický tok dán remanentním magnetickým tokem $\phi(0) = \Phi_r$

$$-\frac{U_m}{N\omega} \cos(\psi) + k = -\Phi_r \quad (4.15)$$

Z toho po úpravě získáme k

$$k = \frac{U_m}{N\omega} \cos(\psi) - \Phi_r \quad (4.16)$$

Po dosazení za k pak získáme výsledný magnetický tok po připojení transformátoru k síti

$$\phi(t) = \frac{U_m}{N\omega} [\cos(\omega t + \psi) - \cos(\psi)] + \Phi_r \quad (4.17)$$

a po převedení funkce \cos na \sin

$$\phi(t) = \frac{U_m}{N\omega} \left[\sin\left(\omega t + \psi + \frac{\pi}{2}\right) - \cos(\psi) \right] + \Phi_r \quad (4.18)$$

Z toho vyplývá, že v závislosti na okamžiku připojení ψ a na velikosti remanentního magnetického toku Φ_r je možnost vyvinutí stejnosměrné složky magnetického toku na kterou je pak superponován magnetický tok odpovídající magnetickému toku v ustáleném stavu

$$\phi(t) = \frac{U_m}{N\omega} \sin\left(\omega t + \psi + \frac{\pi}{2}\right) = \Phi_m \sin\left(\omega t + \psi + \frac{\pi}{2}\right) \quad (4.19)$$

kde amplituda ustáleného magnetického toku je vyjádřena hodnotou Φ_m .

Pro nalezení neoptimálnějšího okamžiku připojení je nutné vyšetření extrémů funkce (4.15).

$$\Phi_m \cos \psi - \psi_r = 0 \quad (4.20)$$

kdy nevznikl žádný přechodný děj a nedojde tak vyvinutí stejnosměrné složky.

Aby byl remanentní tok $\Phi_r = 0$ je nutné, aby napětí sítě bylo maximální tedy $\psi = \frac{\pi}{2}$. V čase $\omega t = \frac{\pi}{2}$ bude jádrem protékat maximální tok s amplitudou odpovídající ustálenému stavu $\Phi_{max} = \Phi_m$.

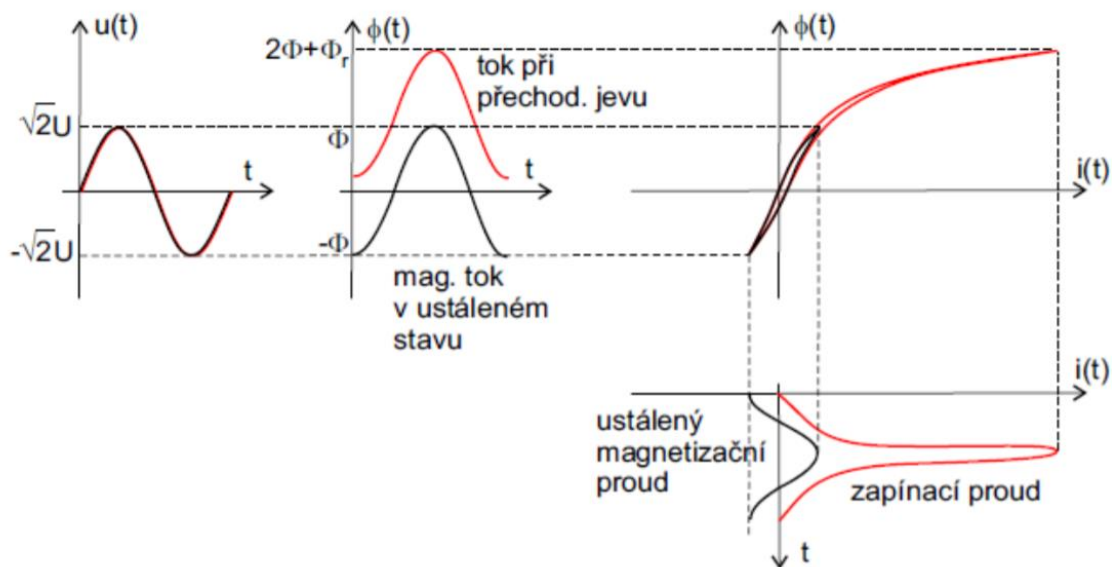
Maximální indukční tok bude protékán jádrem v případě, že

$$\max (\Phi_m \cos \psi - \Phi_r) \quad (4.21)$$

K tomu dojde v případě, že v okamžiku připojení transformátoru k síti bude napětí sítě procházet nulou $\psi = 0$ a za předpokladu, že počáteční magnetický tok Φ_r bude maximální a se záporným znamínkem. Z toho plyne, že v čase $\omega t = \pi$ dosáhne magnetický tok hodnoty

$$\Phi_{max} = 2\Phi_m + \Phi_r \quad (4.22)$$

Tato hodnota je pouze teoretická, jelikož nezohledňuje skutečnou velikost impedanci primárního obvodu. Skutečná velikost bude o něco nižší.



Obrázek 4 Průběh indukčního toku v závislosti na okamžiku připojení (14)

4.2.2 Velikost zapínacího proudu.

Velikost zapínacího proudu je závislá pouze na impedanci primárního vinutí transformátoru. Za předpokladu, že při popisu transformátoru zanedbáme rozptylovou indukčnost a bude uvažovaná konstantní indukčnost magnetického materiálu získáme řešením diferenciální rovnice (4.23) rovnici, která popisuje průběh proudu při přechodovém ději při připínání transformátoru.

$$R_1 i + L_1 \frac{di}{dt} = \sqrt{2} U_0 \sin(\omega t + \psi) \quad (4.23)$$

kde úhel ψ je okamžik připnutí transformátoru k síti. Aby byl výpočet jednodušší, budeme uvažovaná velikost odporu R a indukčnosti L konstantní. V čase $t = 0$ bude dána počáteční podmínka a to $i(t = 0) = 0$.

obecné řešení rovnice (4.20) bude vypadat

$$i_0 = K e^{\lambda t}, \quad (4.24)$$

kde λ je kořen charakteristické rovnice a lze ho určit jako $\lambda = -\frac{R_1}{L_1}$. Pomocí tohoto kořene lze poté vyjádřit časovou konstantu τ určující rychlost odeznívání přechodného děje.

$$\tau = -\frac{1}{\lambda} \quad (4.25)$$

Partikulární řešení neboli stav po odeznění přechodného děje získáme z podmínky kdy $t \rightarrow \infty$

$$R_1 I_0 + j\omega L_0 I_0 = \sqrt{2} U_0 e^{j\psi} \quad (4.26)$$

z kterého získáme proud I_0

$$I_0 = \frac{\sqrt{2} U_0 e^{j\psi}}{R_1 + j\omega L_1} = \frac{\sqrt{2} U_0}{Z} e^{j(\psi - \varphi)} \quad (4.27)$$

Kdy je velikost impedance Z úhlu φ rovna

$$Z = \sqrt{R_1^2 + \omega^2 L_1^2} \quad \varphi = \arctg \frac{\omega L_1}{R_1} \quad (4.28)$$

Abychom získali časově závislé řešení partikulárního řešení je nutné upravit rovnici (4.23) do tvaru

$$i_p = \frac{\sqrt{2}U_0}{Z} \sin(\omega t + \psi - \varphi) \quad (4.29)$$

Celkové řešení diferenciální rovnice (4.20) je tedy

$$i = i_0 + i_p = K e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{\sqrt{2}U_0}{Z} \sin(\omega t + \psi - \varphi) \quad (4.30)$$

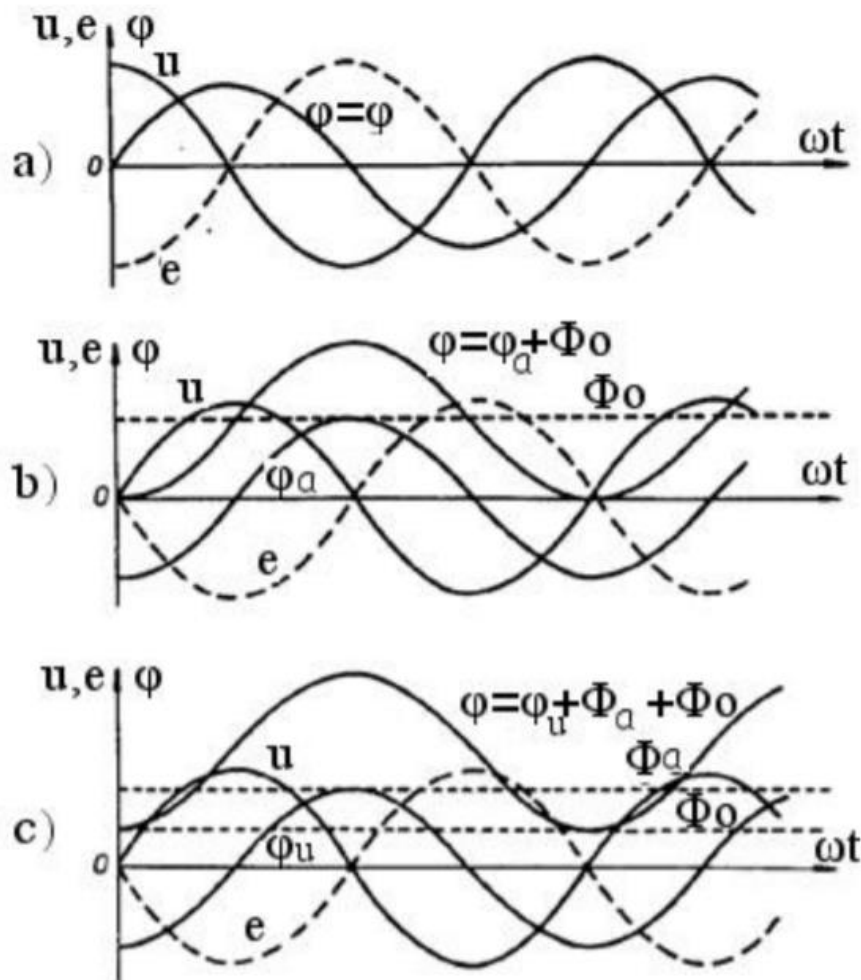
Pro vyřešení počátku přechodného děje vypočteme konstantu K z počáteční podmínky

$$0 = K + \frac{\sqrt{2}U_0}{Z} \sin(\psi - \varphi) \quad (4.31)$$

Výsledný vztah popisující průběh přechodného děje je popsán rovnicí

$$i = \frac{\sqrt{2}U_0}{Z} \left[\sin(\omega t + \psi - \varphi) - e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\psi - \varphi) \right] \quad (4.32)$$

Po podrobném zkoumání a řešení extrémů funkce (4.32) zjistíme, že v okamžiku $\psi = \varphi$ nenastane přechodný děj. Naopak nejvýraznější nastane v okamžiku $\psi = \frac{\pi}{2} - \varphi$.



Obrázek 5 Průběh magnetického toku v závislosti na velikosti napětí v okamžiku zapnutí (15)

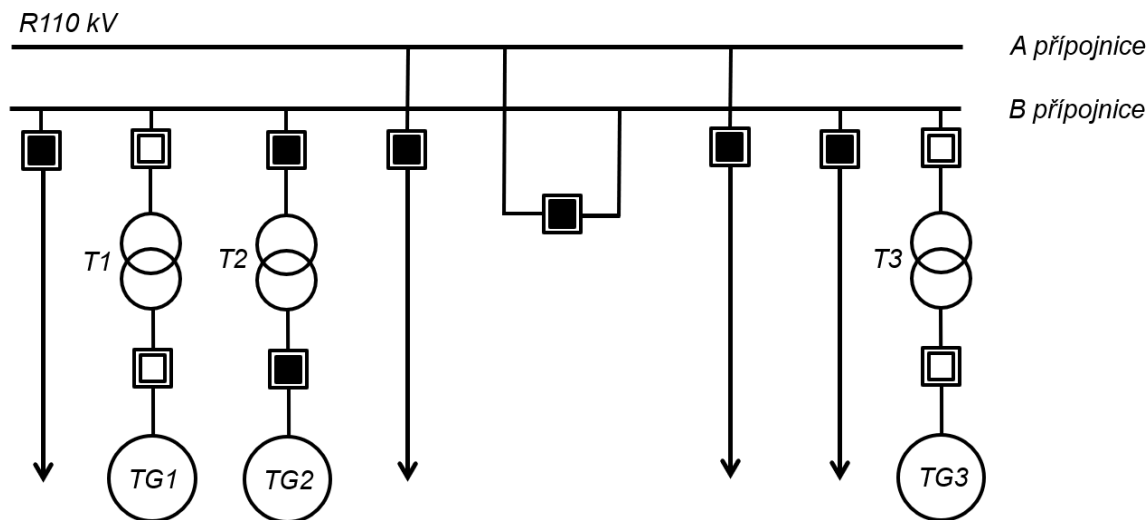
Z obrázku je zřejmé, jak silně závislý je okamžik připojení trafo k síti na velikosti na velikosti indukčního toku, kterým je trafo protékáno.

5 Analýza vlivu ss složky na chování PTP a systém chránění na VE Štěchovice

VE Štěchovice disponuje třemi generátory elektrické energie a tomu odpovídá i použití tří třífázových transformátorů. Právě tyto transformátory jsou ochráněny rozdílovou ochranou, která porovnává proudy, které jsou odečítány z přístrojových transformátorů proudu. Podle požadavků dispečinku jsou jednotlivá soustrojí spouštěna a odpojována v závislosti na zatížení sítě. Transformátory jsou vždy nejprve připojeny sekundárním vinutím k síti. Tím dojde k magnetizaci transformátoru. To je však okamžik, kdy je transformátor nahodile připojen k síti a není sledován okamžik připojení jako je tomu třeba při fázování generátoru k síti, kdy jsou hlídány rozdíly napětí mezi sítí a generátorem, rozdíl frekvence, vzájemné fázové natočení a fázovací soustava také počítá se zpožděním vypínače, a tak je zapínací signál odesílán s určitým časovým předstihem, aby okamžik připnutí byl přesně takový, při němž neprotékají vyrovnávací proudy nebo jen minimální.

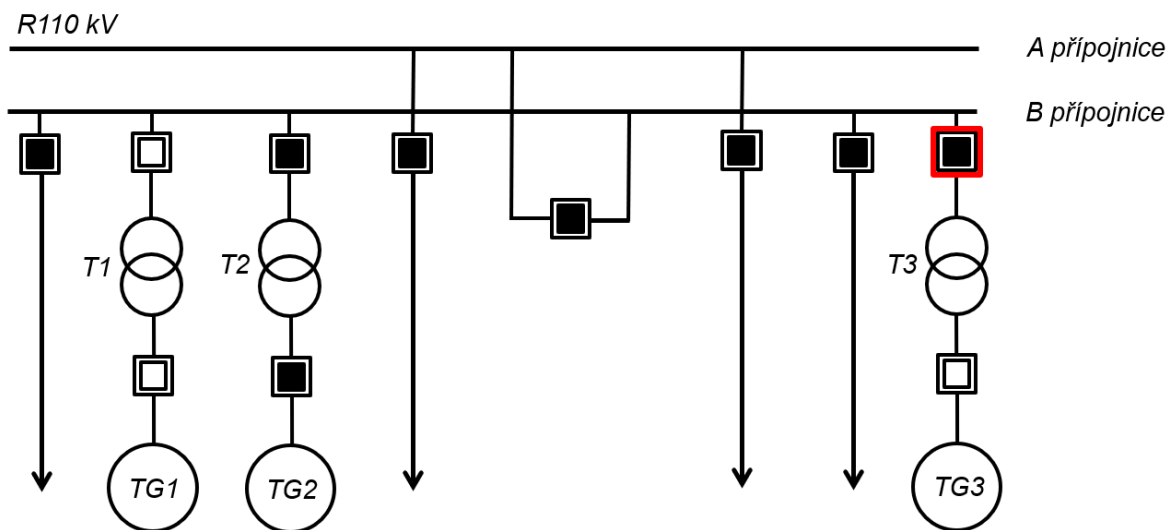
Při připojování transformátoru k síti však není sledováno kdy se připojí, a tak může dojít a také dochází k vyvinutí stejnosměrné složky proudu. Tento jev byl popsán výše. Vlivem takto vyvinutého stejnosměrného proudu dojde k přesycení jádra přístrojového transformátoru a tím ke zkreslenému výsledku měření, na což zareaguje rozdílová ochrana, která odstaví již běžící soustrojí, které je připojeno na společnou sběrnici. Podrobný popis je popsán dále

Na Obrázek 6 je znázorněno zapojení všech soustrojí. V tento okamžik přichází příkaz z dispečinku na najetí a připojení TG3.



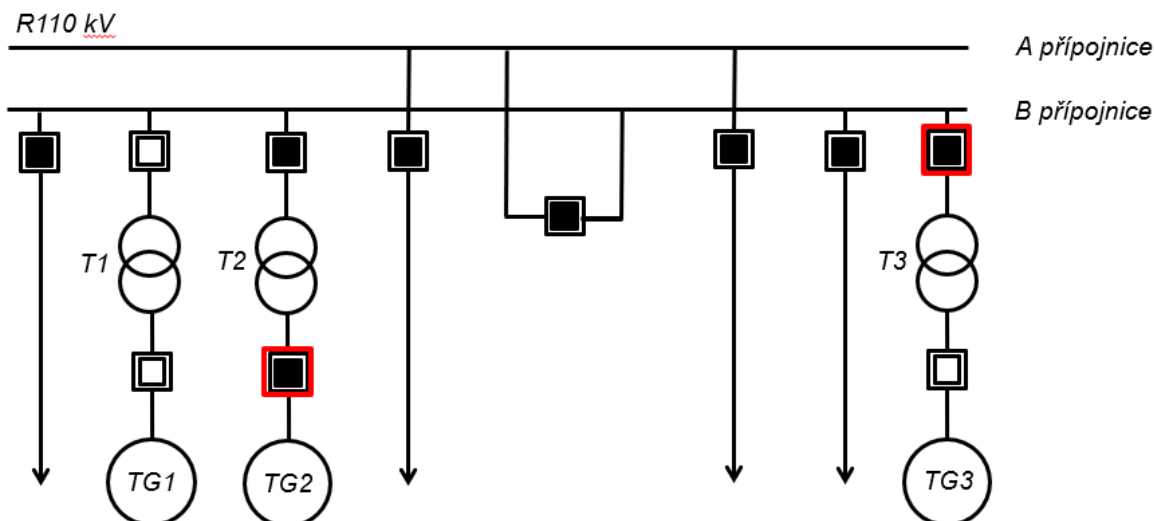
Obrázek 6 Blokové schéma VE Štěchovice před připojením T3

Před připojením TG3 je nutné připojení T3 k vnější síti z důvodu připravení a zmagnetování transformátoru, aby nedošlo k prudkému zatížení generátoru. Proto je sepnut vypínač mezi vnější sítí a sekundárním vinutím transformátoru T3. V tento okamžik začíná protékat proud sekundárním vinutím a probíhá prvotní magnetizace. Nyní však dochází k tomu, že T3 není připojeno v okamžiku napětového maxima a vyvine se stejnosměrná přechodná složka proudu. Ta je v daný okamžik na celé přípojnici B a protéká také do T2.



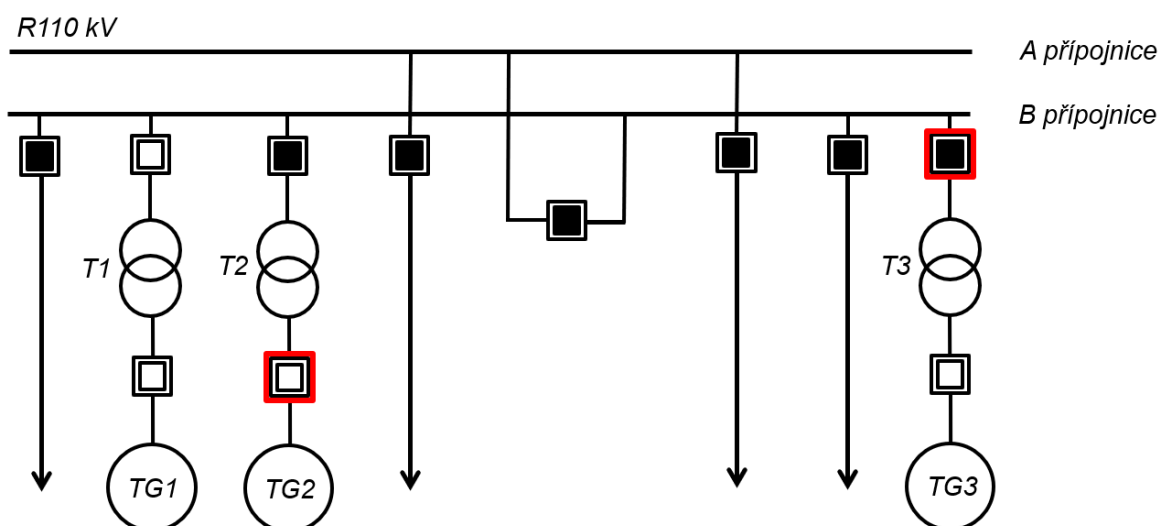
Obrázek 7 Blokové schéma VE Štěchovice v okamžiku připojení sekundárního vinutí blokového transformátoru k síti

Na což okamžitě reaguje rozdílová ochrana na T2, kdy proud skrze PTP primárního vinutí je přenesen v plné výši a PTP na sekundárním vinutí zaznamená rozdíl proudů, jelikož se jedno z PTP přesytilo (konkrétní popsáno dále) a z důvodu předem nastaveného algoritmu pro vybavení rozdílové ochrany je z důvodu ochrany TG2 odpojen vypínač mezi T2 a TG2



Obrázek 8 Blokové schéma VE Štěchovice v okamžiku zareagování rozdílové ochrany

T3 pokračuje dále dle předem naprogramovaného přířazování a TG3 je připojeno pomocí fázovací soupravy k T3 a tím pádem k síti.



Obrázek 9 Blokové schéma VE Štěchovice po zareagování rozdílové ochrany.

6 Měření na PTP

Pro zjištění příčiny odpojení TG2 bylo nutné proměření jednotlivých PTP instalovaných přímo na VE Štěchovice. Zkontrolována byla jisticí jádra použitá pro chránění generátoru hlavní a záložní generátorovou ochranou.

Kontrola byla provedena podle normy IEC 60044-1. Pro měření byl použit OMICRON CT analyzer. Z měření a byly vyhodnoceny tyto parametry:

- Nadproudové číslo
- Třída přesnosti
- Chyba převodu
- Chyba úhlu
- Celková chyba
- Stejnosměrný odpor pro teploty 25°C a 75°C
- Magnetizační charakteristika
- Limitní napětí

Z měření vyplynulo, že všechna jisticí jádra PTP vyhovují dané třídě přesnosti.

Při podrobnějším rozboru výsledků, se však projevíly některé vlastnosti, které pravděpodobně vedly ke zkreslení sekundárního proudu a následně pak k nadbytečnému působení rozdílové ochrany.

- PTP TA2 vykazovaly limitní napětí kolem 37 V, což je pro zapínací ráz blokového transformátoru T3 hraniční hodnota pro zkreslení sekundárního proudu, jak bude ukázáno dále
- Lišila se magnetizační charakteristika PTP TA5 ve vývodu generátoru, a to ve fázi L3. Tento PTP přestože vyhovuje dané třídě přesnosti, vykazuje v magnetizační charakteristice odchylku limitního napětí kolem 25% (u ostatních sad PTP se odchylka pohybovala do 10 %).

Na poruchových průbězích z TG2 lze pozorovat ve fázi L3 resp. L1 jak odchylku úhlu, tak odchylku velikosti fázorů. Ve fázi L2 není odchylka patrná, protože se v ní nevyvinula stejnosměrná složka proudu.

Vzhledem k tomu, že se nejedná o poruchu v chráněné oblasti a ochrana působila nadbytečně, muselo dojít v důsledku přesycení stejnosměrnou složkou ke zkreslení sekundárních proudů PTP a primární proudy se rovnaly.

Abychom mohli určit, které proudy byly věrně přeneseny na sekundární stranu PTP, a které byly zkresleny, vyjdeme z 1. Kirchhoffova zákona. Elektrická soustava vyvedení výkonu generátoru VN $U=10,5$ kV je typu IT s neúčinně uzemněným uzlem. Absence nulového vodiče způsobuje, že vektorový součet fázových proudů L1, L2 a L3 se musí v každém okamžiku rovnat nule (není nulový vodič, kterým by se nulová složka mohla uzavírat).

Pro dva vzorky (okamžiky) poruchy byl proveden vektorový součet okamžitých hodnot proudů v uzlu a vývodu generátoru.

Zatímco ve vývodu, byl součet v řádu jednotek ampér (3 A resp. 8 A), v uzlu byl součet 124 A a 98 A tedy v popudové hodnotě původního nastavení rozdílové ochrany.

Na základě uvedené úvahy lze konstatovat, že zkreslený sekundární proud tekla do ochrany z PTP TA2.

Výpočet (odhad) limitního napětí můžeme provést podle vztahu uvedeném v (6.1)

$$U_{lim} = n_n \cdot \left(\frac{S_n}{I_{2n}} + R_2 \cdot I_{2n} \right) \quad (6.1)$$

kde:

U_{lim} limitní napětí [V]
 n_n jmenovité nadproudové číslo [p.u.]
 S_n jmenovitý výkon PTP [VA]

I_{2n} sekundární jmenovitý proud [A]
 R_2 ohmický stejnosměrný odpor sekundárního vinutí PTP

Vypočtené a změřené hodnoty limitního napětí a změřené hodnoty stejnosměrného odporu sekundárního vinutí PTP (průměr odporů pro interval teplot 25°C až 75°C) jsou uvedeny níže.

Abychom mohli stanovit potřebné limitní napětí, které musí PTP splňovat, aby nedošlo k přesycení stejnosměrnou složkou, vyjdeme ze vztahu uvedeného v [6.1]

$$U_{lim} > 0,7 \cdot I_k \cdot \frac{X}{R} \cdot \Sigma R_2 \quad (6.2)$$

Kde:

U_{lim} limitní napětí [V]
 I_k zkratový proud na sekundární straně
 X/R poměr reaktance a odporu chráněného zařízení
 ΣR_2 součet odporů v sekundárním obvodu PTP

U_{lim} změřená hodnota 37,5 V
 ΣR_2 lze vzít $\approx 1\Omega$
 X/R z napětí nakrátko blokového transformátoru u_k a ztrát nakrátko ΔP_K lze stanovit 17 p.u.

Pro získání hodnoty X a R je nutné provést výpočet těchto parametrů dle níže popsaných vzorečků

$$u_K = z_K = \sqrt{x_k^2 + r_k^2} \quad (6.3)$$

Hodnota u_K je předem známa, jelikož se jedná o štítkovou hodnotu. Za předpokladu vzniku činných ztrát pouze ve vinutí transformátoru, lze vypočítat tuto hodnotu ze ztrát nakrátko.

$$\Delta P_K = 3 \cdot R_{KF} \cdot I_K^2 \quad (6.4)$$

Z čehož po úpravě plyne

$$R_{KF} = \frac{\Delta P_K}{3 \cdot I_K^2} \quad (6.4)$$

Následně po převodu do poměrných veličin

$$r_K = \frac{R_{KF}}{Z_N} = \frac{\frac{\Delta P_K}{3 \cdot I_K^2}}{\frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot I_N}} = \frac{\Delta P_K}{3 \cdot I_K^2} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot I_N}{U_N} \quad (6.5)$$

a za předpokladu, že $I_N = I_K$ platí

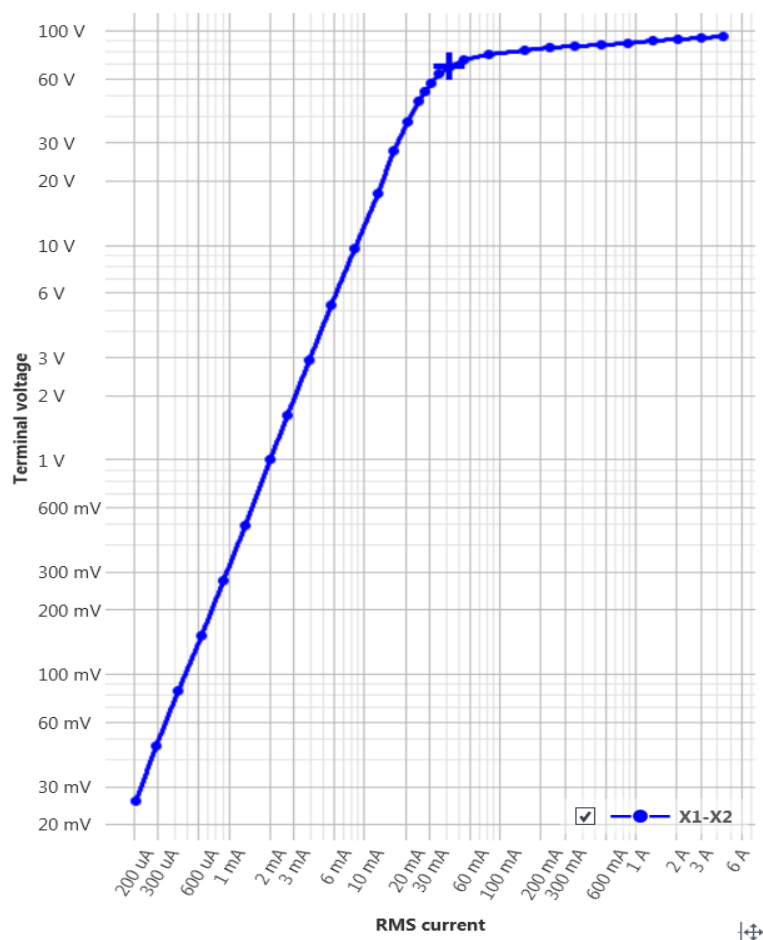
$$r_K = \frac{\Delta P_K}{\sqrt{3} \cdot I_K \cdot U_N} = \frac{\Delta P_K}{S_N} \quad (6.6)$$

Po zohlednění velikosti a řádu daných proměnných a jejich následné dosazení je zřejmé, že odpor lze vcelku zanedbat, jelikož se jedná řádově o mnohem menší hodnotu, než je x_k a to v oblasti zkratových proudů.

Po dosazení vychází sekundární proud, kdy dochází k přesycení 3,1 A. Jmenovitý sekundární proud je 5 A.

Podle uvedeného vztahu v důsledku hodnoty X/R může při vzniku stejnosměrné složky docházet k přesycení PTP i v oblasti proudů nižších než proud jmenovitý ca 60 % I_N jako tomu bylo například u PTP instalovaném na primárním vinutí transformátoru T2

V rámci měření a zjištění podrobných informací o PTP bylo potřeba provedení měření magnetizační charakteristiky, ze které je zřejmý bod K (křížek), který je velice důležitým bodem při řešení problematiky sycení jádra transformátoru.



Obrázek 10 Graf měření magnetizační charakteristiky

Výsledkem měření bylo odečtení bodu K, při kterém přestává být jádro lineární a začíná se zde projevovat příčina sycení, což je značná nelinearita

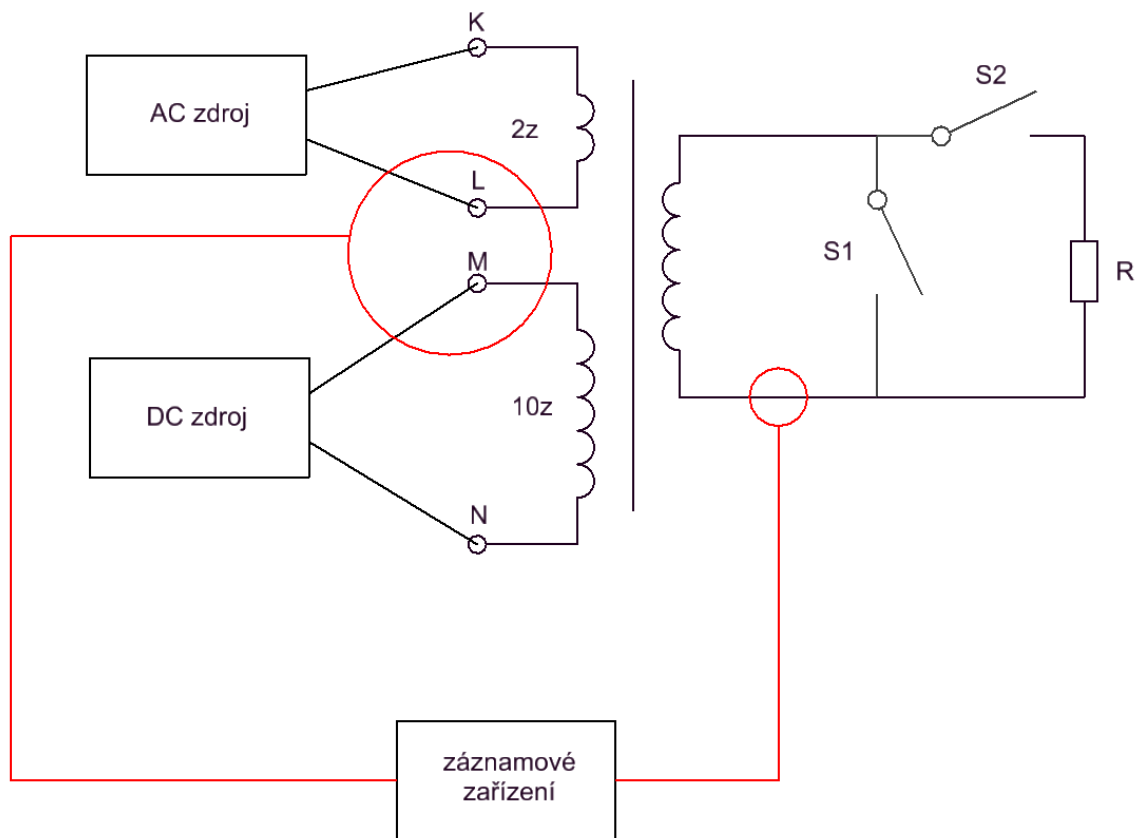
Tap	Ratio	V-kn	I-kn	Ls	Lm	ϵ_{ci}
X1-X2	1000.0 : 5.018	67,75 V	42,06 mA	2,7 mH	6,4 H	0,37 %

Z výše znázorněné tabulky je zřejmé, že limitní napětí U_{lim} dosahuje 67,75V.

Abychom zjistili podrobné chování přístrojového transformátoru proudu, byl poskytnut katedrou elektroenergetiky a ekologie přístrojový transformátor proudu CTT25 od výrobce KPB Intra se shodným převodem 1000/5A, jako na VE Štěchovice, vybavený dvěma sekundárními jisticími jádry. Při výběru byl kladen důraz na maximálně možný rozdíl v parametrech sekundárních jader. Jelikož nebylo možné vybrat transformátor s co nejvíce rozdílným nadproudovými čísly bylo vhodné vybrat transformátor s co nejvíce rozdílným jmenovitým výkonem sekundárního vinutí, a to 15VA a 50VA. Pokud bychom se však

podívali na výpočet nadproudového čísla (2.3) je zřejmé, že nadproudové číslo je silně ovlivněno právě jmenovitým výkonem sekundárního vinutí.

Aby bylo možné provést takového měření, bylo nutné zajistit od firmy OMICRON jejich zdroje proudu, které jsou schopny generovat střídavý proud o velikosti až 800A. Konkrétně se jedná o proudový zdroj OMICRON CPC100. Tento zdroj disponuje také stejnosměrným zdrojem proudu. Avšak po rozboru průběhu bylo zjištěn problém s vyhlazením proudu. Stejnosměrný proud měl průběh podobný proudu po usměrnění diodovým můstkem. Tudiž bylo nutné tento zdroj nahradit jiným zdrojem, a to OMICRON CMC256+ modul „Ramping“, který je schopen generovat proud 0-75 A, a to dle předem nakonfigurované „rampě“. Ze znalosti odeznívání stejnosměrného proudu při přechodném ději víme, že proud odeznívá exponenciálně. Nicméně pro jednoduchost a dostatečnou přesnost měření bylo dostačující nakonfigurovat průběh stejnosměrného proudu lineárně. Při této aproximaci jsme se nedopustili relativně velké chyby, jelikož děj probíhá relativně rychle. Abychom mohli celé průběhy analyzovat byl použit OMICRON CMC256 doplněný o modul „Enerlyzer“ který slouží jako záznamové zařízení „comtrade“ průběhů.



Obrázek 11 Blokové schéma zapojení měření

Na Obrázek 11 je schematicky znázorněno zapojení, při měření zapůjčeného přístrojového transformátoru proudu. Pro střídavý zdroj byly navinuty 2 závity, aby bylo možné měřit do 120% I_n PTP. Jelikož většina měření probíhala s velikostí střídavého proudu 400A byl tento vodič a počet vinutí dostačující, jelikož jednotlivá měření probíhala jen několik vteřin, a tak se nestihl vodič nadměrně zahřát. Byly však provedeny také zkušební měření s hodnotou až 600A, resp. 1200A. Tato měření probíhala taktéž jen několik málo sekund, tím pádem se vodič opět nestihl nadměrně zahřát.

Pro stejnosměrný proud bylo navinuto 10 závitů a to hlavně z důvodu proudového rozsahu zdroje (0-75A). Použit byl proud max. 40 A. Jako vodič byl opět použit izolovaný kabel Cu o průřezu tentokrát 4mm².

Pro měření proudu byly použity proudové sondy. Pro primární vinutí byla použita sonda s rozsahem 0-1400A a 0-15000 Hz. Touto sondou byly protaženy oba vodiče primárního vinutí. Pro sekundární vinutí byla použita sonda s rozsahem 0-10A

Pro změnu zatížení sekundárního vinutí, což má za následek snížení nadproudového čísla jak již bylo vysvětleno výše byly použity výkonový odpor o hodnotě 1Ω a poté 2Ω.

6.1 Měření č.1: Primární AC proud 50 - 600 A (resp. 100 – 1200 A)/50 Hz

Měřicí obvod byl zapojen tak, že dle schéma (Obrázek 11) je sepnut spínač S1, který reprezentuje zkrat sekundárního vinutí. Takto zapojený obvod vykazuje největší nadproudové číslo a vysoké limitní napětí. Tím pádem je velice složité takto zapojený obvod přetížit nebo přesytit.

Měření probíhalo tak, že byl zapnut zdroj AC proudu, který následně protékal primárním vinutím po dobu 1s. Za tuto dobu bylo možné sledovat odeznění spínacího přechodného děje a následné chování PTP. Ze všech měření které jsou přílohou bylo zřejmé, že ani v jednom případě neměl přístrojový transformátor problém věrohodně přenést proud na sekundární stranu.

Při měření, které proběhlo na sekundárním vinutí se jmenovitým výkonem 15VA, bylo zaznamenáno zkreslení primárního proudu. Po zjišťování příčiny bylo dospěno k závěru, že jsme se dostali nad hranici měřicího rozsahu proudové sondy, kdy bylo připojeno 600 resp. 1200A. Hodnoty nastavovaného proudu jsou udávány v efektivních hodnotách, nicméně proudový rozsah sondy je udáván v maximální hodnotě, tj. o $\sqrt{2}$ větší hodnota. Tím pádem hodnota 1200A odpovídala 1697A, což je skutečně mimo rozsah proudové sondy.

Měření proběhlo na obou sekundárních vinutích a pro případ jmenovitého zatížení naprosto vyhovující.

6.2 Měření č.2 :Primární AC proud jako v měření 1 se superpozicí DC složky 25, 50, 100, 200A (resp. 50, 100, 200, 400 A).

Abychom nasimulovali přechodný děj, ke kterému docházelo při připojování transformátoru na VE Štěchovice bylo nutné proměřit PTP, které je připojené k síti, je protékáno střídavým proudem a náhle dojde k vyvinutí stejnosměrné složky proudu. Ve skutečnosti dojde k vyvinutí ihned v okamžiku připojení nicméně výsledný průběh je naprosto stejný.

Sekundární vinutí je zapojeno stejně jako při měření č.1.

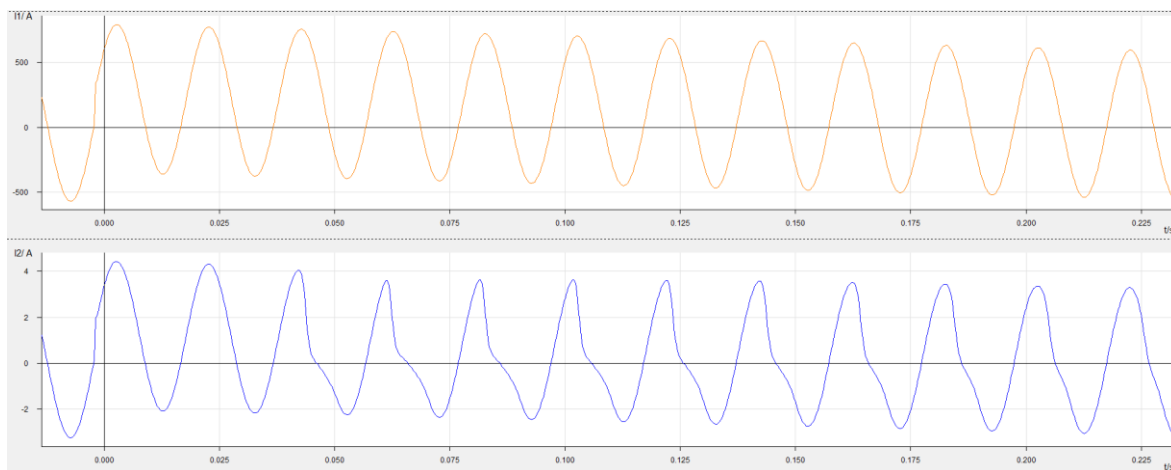
Po ustálení střídavého proudu o velikosti 400A, tj. dle měření po 1ms připnut zdroj DC proudu, který jak již bylo zmíněno odeznívá lineárně po dobu 200ms. Tato doba byla nastavena vzhledem k průběhům, které byly zaznamenány při špatném vybavení ochran.

Také v tomto případě byly obě dvě jádra naprosto vyhovující a proud byl věrohodně přenesen na sekundární vinutí. Nedošlo tak ani v tomto případě k přesycení jádra přístrojového transformátoru.

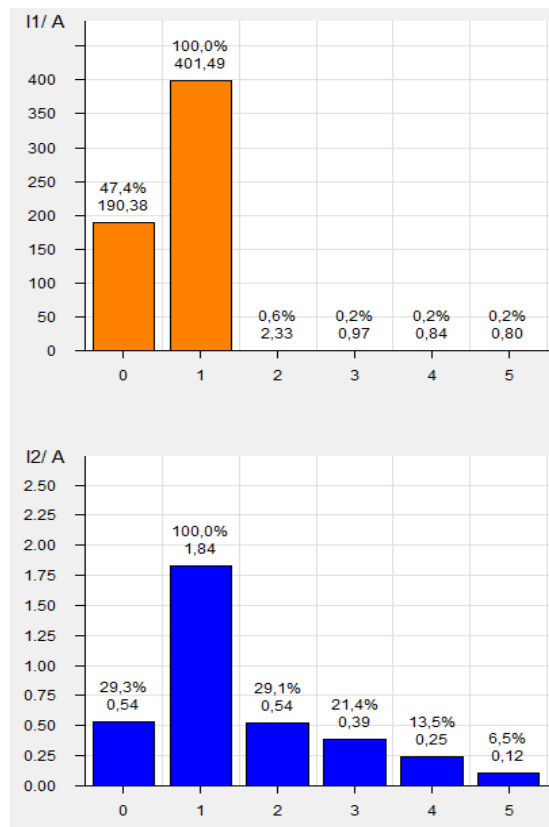
6.3 Měření č.3 : Zvyšování břemene sekundárního vinutí

V tomto měření bylo pro představu a schématické naznačení zapojení dle Obrázek 11 rozpojen spínač S1 a sepnut spínač S2. Tím došlo k připojení zátěže k sekundárnímu vinutí $R=1\Omega$. S takto připojeným odporem proběhlo měření totožné s měřením č.2.

Pro vinutí se jmenovitým výkonem 15VA došlo k přesycení jádra až při superpozici DC proudu o velikosti 200A. Průběh proudu primárního I_1 (nahore) a sekundárního I_2 (dole) vinutí je znázorněn na Obrázek 12. Přesycení je také velice jasně znázorněno na grafu rozkladu vyšších harmonických po Fourierově transformaci (Obrázek 13). V rozkladu je zřejmý vysoký podíl 2. harmonické, která je právě pro tyto stavy přesycení dominantní. Je zřejmé že od cca 40ms dochází ke zkreslení průběhu proudu vlivem přesycení. Tento stav však postupně odeznívá a jak je znázorněno na konci průběhu je již proud takřka totožný. Konkrétně toto zapojení a tento průběh nejlépe reprezentuje průběh při špatném vybavení ochrany na VE Štěchovice.



Obrázek 12 Průběh proudu AC 400A + DC 200A



Obrázek 13 Grafické znázornění rozkladu proudu n vyšší harmonické po Fourierově transformaci

V případě DC proudu 400A tomu bylo v podstatě okamžitě, což je zřejmé z průběhu viz příloha.

V případě zapojení sekundárního vinutí se jmenovitým výkonem 50VA nedošlo k přesycení ani při jednom z měření s $R=1\Omega$.

Dalším bodem měření bylo použití zátěže $R=2\Omega$. Pro jádro o výkonu 15VA bylo měřením zjištěno, že došlo k přesycení již při superpozici DC proudu o velikosti 100A.

Při zapojení jádra s výkonem 50VA došlo k přesycení jádra při zatížení sekundárního vinutí odporem o velikosti $R=2\Omega$ k přesycení jádra a to již při velikosti superponovaného DC proudu 200A

7 Vyhodnocení výsledků

Z výsledků a grafů měření je zřejmé, že čím je větší břemeno sekundárního vinutí, tím dochází k rychlejšímu sycení a k poklesu nadproudového čísla. Při zvýšení zátěže Z_b totiž dojde k nárůstu napětí na této zátěži a tím pádem je rychleji dosaženo limitního napětí, které je, jak již bylo zmiňováno důležitým mezníkem pro zachování přesnosti.

8 Návrh řešení pro VE Štěchovice

Vyřešení problému na VE Štěchovice je dle výše získaných poznatků takové, že by bylo možné zvolit jednu z následujících variant řešení.

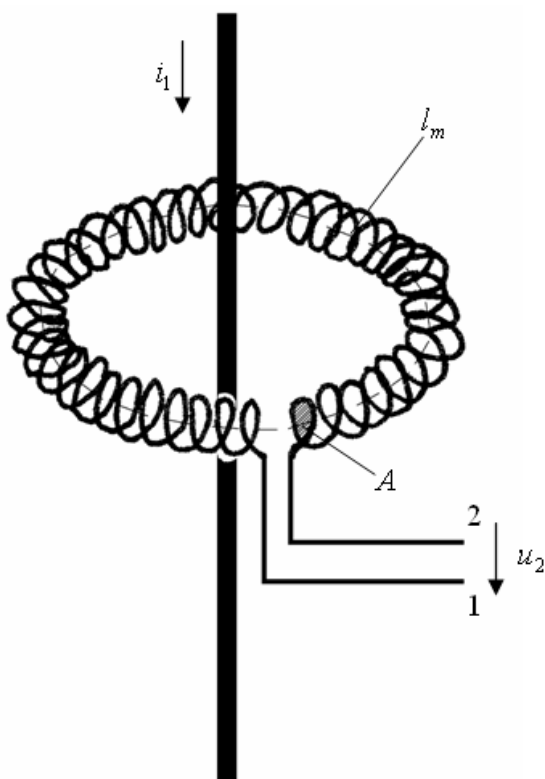
Jako první a momentálně aplikovaná varianta je zvýšení popudové hodnoty rozdílové ochrany. Ta byla navýšena na hodnotu $0,4 I_n$. Takto nastavená ochrana vcelku dobře eliminuje falešné působení ochrany a zároveň ještě stále dostatečně garantuje chránění generátoru.

Další možnou variantou, a to variantou velice vhodnou, avšak finančně nákladnější by bylo zajištění výměny PTP s dostatečným výkonem a velkým nadproudovým číslem, což by mělo za následek zvýšení odolnosti transformátoru proti přesycení, a tak by bylo možné použití standardní velikosti vybavovacího proudu $0,1 I_n$, což by zajistilo vysokou bezpečnost možného přetížení generátoru.

Jako další varianta, která se jeví jako velice vhodná, a to výměna PTP za PTP se vzduchovou mezerou. Takovéto řešení by bylo velice vhodné, a to z důvodu oblasti přesycení až při velmi vysokém nadproudu a pro standardní přetížení PTP je přístrojové trafo takřka nepřesytitelné. Vzduchová mezera o velikosti $0,0001 - 0,0003$ na jednotku střední délky magnetické dráhy sníží v jádře remanentní rok až na hodnotu, která je pro tyto účely přijatelná. Tyto transformátory mívají také menší rozměry. Nevýhodou je však zvýšení chyby úhlu při převodu transformátoru. [11]

Dalším možným řešením by bylo použití Rogowského cívky. Tento způsob měření začíná být poslední dobou často používaný. Důvodem, proč začínají být velice často používány je jejich linearita a v zásadě je nelze přesytit ať už střídavou tak ani stejnosměrnou složkou proudu. Rogowského cívka funguje na principu elektromagnetické indukce, kdy

jádro bývá toroidního tvaru a nemagnetických vlastností $\mu_r = 1$. Nejjednodušším jádrem bývá vzduch. Avšak pro určité pevnostní vlastnosti lze použít jiné izolanty a plasty. (1)



Obrázek 14 Rogowského cívka [13]

Obrazem velikosti primárního proudu je indukované napětí na koncích vinutí Rogowského cívky. Nevýhodou této cívky je, jak už vyplývá z podstaty elektromagnetické indukce, nemožnost měření velikosti stejnosměrného proudu. Další nevýhodou je umístění měřicího zařízení, které musí být umístěno co nejbližší. Vzdálenost se pohybuje okolo 6m avšak vždy je tento údaj udán výrobcem. Přesnost měření se pohybuje okolo 0,2%. (11)

Poslední možností by bylo použití technologie od firmy ABB Synchroswitch PWC600. Toto zařízení sleduje průběhy sinusového průběhu napětí a proudu a s ohledem na časové zpoždění vypínačů odesílá zapínací signál. Pro tuto aplikaci je však zapotřebí třípohonový vypínač (pro každou fázi jeden). To je hlavní z důvodů, proč není v současné době možnost použití této technologie, jelikož na VE Štěchovice je použit jednopohonový vypínač. Výměna nepřípadá z provozních důvodů v současné době v úvahu. (12)

Závěr

Cílem této práce bylo zjištění důvodu nadbytečného vybavování rozdílových ochran transformátorů na vodní elektrárně ve Štěchovicích.

V první části byla provedena rešerše dostupných informací o přístrojových transformátorech proudu a popsání jevu přesycení při jmenovitých hodnotách přístrojového transformátoru proudu a jak k němu dochází.

Pro ověření získaných informací v první části bylo provedeno měření na přístrojovém transformátoru proudu s dvěma odlišnými sekundárními vinutími co do výkonu. Při měření byl sledován vliv stejnosměrné složky proudu na přesycení. K tomu nedošlo, což bylo předpokladem, jelikož se jedná o jistící přístrojový transformátor. Dále byl sledován vliv stejnosměrné složky proudu na přesycení jádra. V případě nezátíženého (zkratovaného) sekundárního vinutí taktéž nedošlo k přesycení. Nicméně při dalším kroku měření, což bylo zvyšování zátěže sekundárního vinutí odporem bylo dokázáno, že se zvyšující se zátěží sekundárního vinutí dochází vlivem úbytku napětí na zátěži ke snížení nadproudového čísla, rychlejšího dosažení limitního napětí tím pádem k rychlejšímu dosažení saturace jádra a tím k nepřesnému měření.

Poslední část byla zaměřena na návrh možných řešení pro eliminaci jevu přesycení jádra, kdy byly zhodnoceny určité klady a zápory s ohledem na aktuálně používanou technologii na VE Štěchovice.

Poznatky z této práce budou sloužit pro případnou rekonstrukci, respektive obnovu technologie měření na VE Štěchovice.

Seznam literatury a informačních zdrojů

1. GRYM, Rudolf, Petr HOCHMAN, Josef MACHOŇ, Jiří BERMANN a Břetislav CICHONĚ. Chránění II.: elektrická zařízení vysokého napětí, chránění v průmyslu. 1. Havířov: IRIS, c2004. ISBN 80-903-5400-9.
2. Měřicí transformátory Brno: Poradna. Měřicí transformátory [online]. Brno: -, - [cit. 2021-5-26]. Dostupné z: <https://www.mtbrno.cz/cz/poradna/>
3. Třídy přesnosti přístrojových transformátorů proudu. Elektrokomponenty AZ spol. s r.o. [online]. -: -, - [cit. 2021-5-26]. Dostupné z: <http://www.eshop.elektrokomponenty.cz/novinky/tridy-presnosti-pristrojovych-transformatoru-proudu/>
4. PNE 38 4065 ED.4. PROVOZ, NAVRHOVÁNÍ A ZKOUŠENÍ OCHRAN A AUTOMATIK. 4. Praha: Podniková norma, 2017.
5. Maxwellovy rovnice. Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-5-26]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Maxwellovy_rovnice
6. Intenzita magnetického pole. Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-5-26]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Intenzita_magnetick%C3%A9ho_pole
7. RAJCHMAN, Zbyněk. Srovnání přístrojových transformátorů proudu a proudových senzorů s ohledem na funkci rozdílové ochrany. Brno, 2012. Diplomová práce. VU Brno. Vedoucí práce Doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.
8. Elektrotechnická měření. 1. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-730-0022-9.
9. POSPÍŠIL, Karel. Zapínací proud transformátoru. Plzeň, 2015. Bakalářská práce. ZČU Plzeň. Vedoucí práce Ing. Jan Šobra.
10. Magnetický tok. Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-5-26]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Magnetick%C3%BD_tok
11. KOJKOVIC, L. Comparative Performance Characteristics of Current Transformers and Rogowski Coils used for Protective Relaying Purposes. IEEE Power Engineering Society General Meeting. Tampa, FL, USA, 2007, 2007, 6. ISSN 1932-5517. Dostupné z: doi:10.1109 / PES.2007.386145
12. PETRILÁKOVÁ, Jana. Vliv řízeného spínání vypínačů na spolehlivý provoz přenosové soustavy. Plzeň, 2020. Diplomová práce. ZČU Plzeň. Vedoucí práce Doc. Ing. Eva Müllerová, Ph.D.

13. Autor: Původně soubor načetl Fesalz na projektu Wikipedie v jazyce němčina – Na Commons přeneseno z de.wikipedia.(Původní text: „Eigenes Bild - Fesalz“), CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2241269>
14. NOVÁK, Miroslav. Přechodový děj při zapnutí transformátoru: Způsoby omezování zapínacího proudu. Liberec, 2003. Disertační práce. Technická Univerzita v Liberci. Vedoucí práce Doc. Ing. Aleš Richter, CSc.
15. JEZIEFSKI, Eugenius. Transformátory: Teoretické základy. 3. oprav. a dopl.vyd. Praha: Academia, 1973, 650 s. ISBN 509-21-875.
16. DOHNÁLEK, Petr. Ochrany pro průmysl a energetiku. 2., přeprac. vyd. Praha: SNTL, 1991. ISBN 80-030-0630-9.
17. ČSN EN 60044-1:2001 Přístrojové transformátory-část 1: Transformátory proudu.

Přílohy

Protokoly z měření