

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

SYSTÉM CHRÁNĚNÍ PST

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Bc. Jaroslav ŠACH
Osobní číslo: E13N0085P
Studijní program: N2612 Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: Elektroenergetika
Název tématu: System chránění PST
Zadávající katedra: Katedra elektroenergetiky a ekologie

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

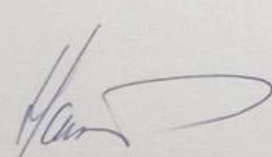
1. Popište princip a funkci Phase Shifting Transformers (dále jen PST).
2. Uveďte účel a přehled aplikací PST.
3. Navrhněte systém chránění PST.
4. Proveďte ověření nastavení systému ochran.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
 Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran
 Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
 Seznam odborné literatury:

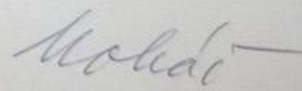
Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

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

Datum zadání diplomové práce: 15. října 2014
 Termín odevzdání diplomové práce: 11. května 2015


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




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

Abstrakt

V této práci je řešena problematika chránění transformátoru s posuvnou fází. Navržený systém chránění pro multifunkční ochranu 7UT87 od firmy Siemens byl testován pomocí testovacího zařízení OMICRON CMC 256-6 a testovacího program TEST Universe. Výsledky byly zpracovány a vyhodnoceny pomocí tabulek a grafů.

Klíčová slova

Transformátor s posuvnou fází, rozdílová ochrana, nadproudová ochrana

Abstract

Problem of protecting phase shifting transformer is solved in this thesis. Designed protection system has been loaded into the Siemens multifunctional protection 7UT87 with using the parameterization software DIGSI 5 V6. Designed protection system was tested by test equipment OMICRON CMC 256-6 and testing program Test Universe.

Key words

Phase shifting transformer, differential protection, overcurrent protection

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 10.5.2015

Jaroslav Šach

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucí diplomové práce Ing. Janě Jiříčkové, Ph.D., Ing. Luboši Benediktovi, zaměstnancům firmy Siemens a Čeps za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích a vypracování diplomové práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	10
ÚVOD	1
1 VÝKONOVÉ ROVNICE PŘENOSU	2
2 TRANSFORMÁTOR S POSUVNOU FÁZÍ.....	4
2.1 PRINCIP PST.....	4
2.2 PŘIPOJENÍ PST DO PŘENOSOVÉ LINKY	5
2.3 PRINCIP ŘÍZENÍ ČINNÉHO VÝKONU ZÁTĚŽNÝM ÚHLEM	6
2.4 TYPY PST.....	6
2.4.1 <i>Přímé, nesymetrické PST.....</i>	<i>7</i>
2.4.2 <i>Přímé, symetrické PST.....</i>	<i>8</i>
2.4.3 <i>Nepřímé, nesymetrické PST</i>	<i>9</i>
2.4.4 <i>Nepřímé, symetrické PST</i>	<i>10</i>
2.5 ZATÍŽENÝ PST.....	11
3 PŘEHLED APLIKACÍ PST.....	14
3.1 PST V ROZVODNĚ MEEDEN, NIZOZEMSKO	14
3.2 PST V ČR A POLSKU.....	15
4 SYSTÉM CHRÁNĚNÍ PST	17
4.1 ROZDÍLOVÁ OCHRANA.....	17
4.2 NADPRODOVÁ A ZKRATOVÁ OCHRANA	17
4.3 CHRÁNĚNÍ PRIMÁRNÍCH VINUTÍ SÉRIOVÝCH A BUDÍCÍCH JEDNOTEK	18
4.4 CHRÁNĚNÍ SEKUNDÁRNÍCH VINUTÍ SÉRIOVÉ A BUDÍCÍ JEDNOTKY	19
4.5 ZÁLOŽNÍ ZEMNÍ NADPRODOVÁ OCHRANA.....	20
4.5.1 <i>Primární zemní ochrana budící jednotky</i>	<i>20</i>
4.5.2 <i>Sekundární zemní ochrana budící jednotky</i>	<i>21</i>
5 NÁVRH SYSTÉMU CHRÁNĚNÍ PST	22

5.1	VÝPOČET ZKRATOVÉHO PROUDU	22
5.2	VÝPOČET SKUTEČNÉHO NADPROUDOVÉHO ČINITELE	25
6	NASTAVENÍ OCHRANNÝCH ZAŘÍZENÍ.....	27
6.1	NASTAVENÍ ROZDÍLOVÝCH OCHRANNÝCH FUNKCÍ.....	28
6.1.1	<i>Primární a sekundární rozdílová ochranná funkce</i>	<i>28</i>
6.1.2	<i>Rozdílová ochranná funkce pro sekundární obvod budícího a sériového transformátoru.....</i>	<i>31</i>
6.2	NASTAVENÍ NADPROUDOVÝCH OCHRANNÝCH FUNKCÍ.....	32
6.2.1	<i>Záložní zkratová ochrana</i>	<i>32</i>
6.2.2	<i>Nadproudová zemní ochrana primáru budícího transformátoru</i>	<i>32</i>
6.2.3	<i>Nadproudová zemní ochrana sekundáru budícího transformátoru</i>	<i>33</i>
7	OVĚŘENÍ NASTAVENÝCH OCHRANNÝCH FUNKCÍ	34
7.1	PRIMÁRNÍ A SEKUNDÁRNÍ ROZDÍLOVÁ FUNKCE	35
7.2	ROZDÍLOVÁ FUNKCE PRO SEKUNDÁRNÍ OBVOD BUDÍCÍHO A SÉRIOVÉHO TRANSFORMÁTORU.....	38
7.3	ZÁLOŽNÍ ZKRATOVÁ OCHRANA	40
7.4	NADPROUDOVÁ ZEMNÍ OCHRANA PRIMÁRU BUDÍCÍHO TRANSFORMÁTORU	42
7.5	NADPROUDOVÁ ZEMNÍ OCHRANA SEKUNDÁRU BUDÍCÍHO TRANSFORMÁTORU	43
8	ZÁVĚR.....	44
9	POUŽITÁ LITERATURA	46
10	SEZNAM PŘÍLOH	47

Seznam symbolů a zkratek

PST.....	Phase shifting transformer
PTP	Přístrojový transformátor proudu
S.....	Zdánlivý výkon [VA]
S_{NO}	Jmenovitý zdánlivý výkon chráněného objektu [VA]
P	Činný výkon [W]
Q.....	Jalový výkon [VAR]
δ	Zátěžný úhel [°]
φ	Fázový posuv mezi napětím a proudem [°]
U_1	Vstupní napětí [V]
U_2	Výstupní napětí [V]
U_N	Jmenovité napětí [V]
I	Proud [A]
X	Reaktance [Ω]
U_M	Výstupní napětí PST [V]
U_{M0}	Vnitřní napětí PST [V]
U_{1adv} , U_{1ret}	Napětí před PST (advance a retard) [V]
α_{adv0} , α_{ret0}	Regulační úhly naprázdno (advance, retard) [°]
α_{adv} , α_{ret}	Regulační úhly při zatížení (advance, retard) [°]
I_{zdroje}	Proud vstupující do primární strany sériového transformátoru [A]
$I_{zátěže}$	Proud vystupující z primární strany sériového transformátoru [A]
$I_{budící}$	Proud tekoucí primární stranou budícího transformátoru [A]
X_{cc}	Poměrná zkratová impedance nejnižší odbočky [%]
R_{ct}	Vnitřní odpor přístrojového transformátoru proudu [Ω]
R_{bn}	Jmenovité břemeno přístrojového transformátoru proudu [Ω]
R_b	Skutečné břemeno připojené na sekundární stranu PTP [Ω]
R_i	Vstupní odpor měřícího členu ochrany [Ω]
R_S	Stykový odpor [Ω]
n_n	Jmenovité nadproudový činitel [-]
n	Skutečný nadproudový činitel [-]
I_{DIFF}	Poměrný rozdílový proud [-]

I_{STAB}	Poměrný satbilizační proud [-]
I_{NS1}	Jmenovitý primární proud na straně zdroje [A]
I_{NS2}	Jmenovitý sekundární proud na straně zdroje [A]
I_{NL1}	Jmenovitý primární proud na straně zátěže [A]
I_{NL2}	Jmenovitý sekundární proud na straně zátěže [A]
I_{NB1}	Jmenovitý primární proud na primáru budiče [A]
I_{NB2}	Jmenovitý sekundární proud na primáru budiče [A]
I_{NR1}	Jmenovitý primární proud na sekundáru budiče [A]
I_{NR2}	Jmenovitý sekundární proud na sekundáru budiče [A]

Úvod

Cílem diplomové práce je návrh systému chránění transformátoru s posuvnou fází (PST). PST jsou transformátory, které spadají do kategorie zařízení FACTS (Flexible AC Transmission Systems).

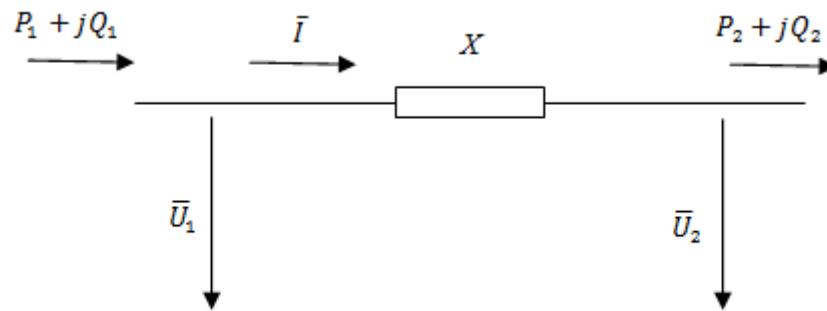
Tyto transformátory jsou čím dál častěji instalovány hlavně na mezistátních linkách. Hlavní motivací jejich použití je kontrola toků činného výkonu skrz tento transformátor. V České republice by mělo k uvedení prvního transformátoru s posuvnou fází dojít v průběhu roku 2016. Konkrétně v rozvodně Hradec u Kadaně za účelem bránit nekontrolovaným přetokům činného výkonu z Německa do České republiky.

První část práce popisuje problematiku PST, přehled jeho aplikací nejen v ČR, ale i v zahraničí.

Diplomová práce se převážně věnuje problematice chránění PST a samotnému návrhu pro konkrétní typ transformátoru s posuvnou fází, který bude instalován v rozvodně společnosti ČEPS a.s. Samotný návrh systému chránění a nastavení ochrany SIPROTEC 7UT87 byl proveden v programu DIGSI 5 V6, kde byla provedena parametrizace ochrany a její nastavení. Pro zkoušení funkčnosti nastavených funkcí zařízení 7UT87 bylo použito testovací zařízení OMICRON CMC 256-6 a software Test Universe.

1 Výkonové rovnice přenosu

Pro snazší pochopení principu a důvodu použití PST je nejprve třeba odvodit výkonové rovnice přenosu, ze kterých budou jasně zřetelné způsoby řízení toků výkonů v elektrizační soustavě. Pro odvození výkonových rovnic uvažují bezztrátové vedení reprezentované pouze reaktancí.



Obrázek 1: Bezeztrátové vedení respektované pouze reaktancí

Komplexní výkon přenášený po vedení

$$\bar{S} = \bar{U} \cdot \bar{I}^* = P + jQ \quad (1.1)$$

kde \bar{I}^* reprezentuje komplexně sdružený proud tekoucí po vedení.

$$\bar{I}^* = \left(\frac{\bar{U}_1 - \bar{U}_2}{jX} \right)^* \quad (1.2)$$

\bar{U}_1 a \bar{U}_2 jsou fázory napětí na začátku a na konci vedení. Činný a jalový výkon je určen jako reálná a imaginární část komplexního výkonu. Po dosazení dostaneme

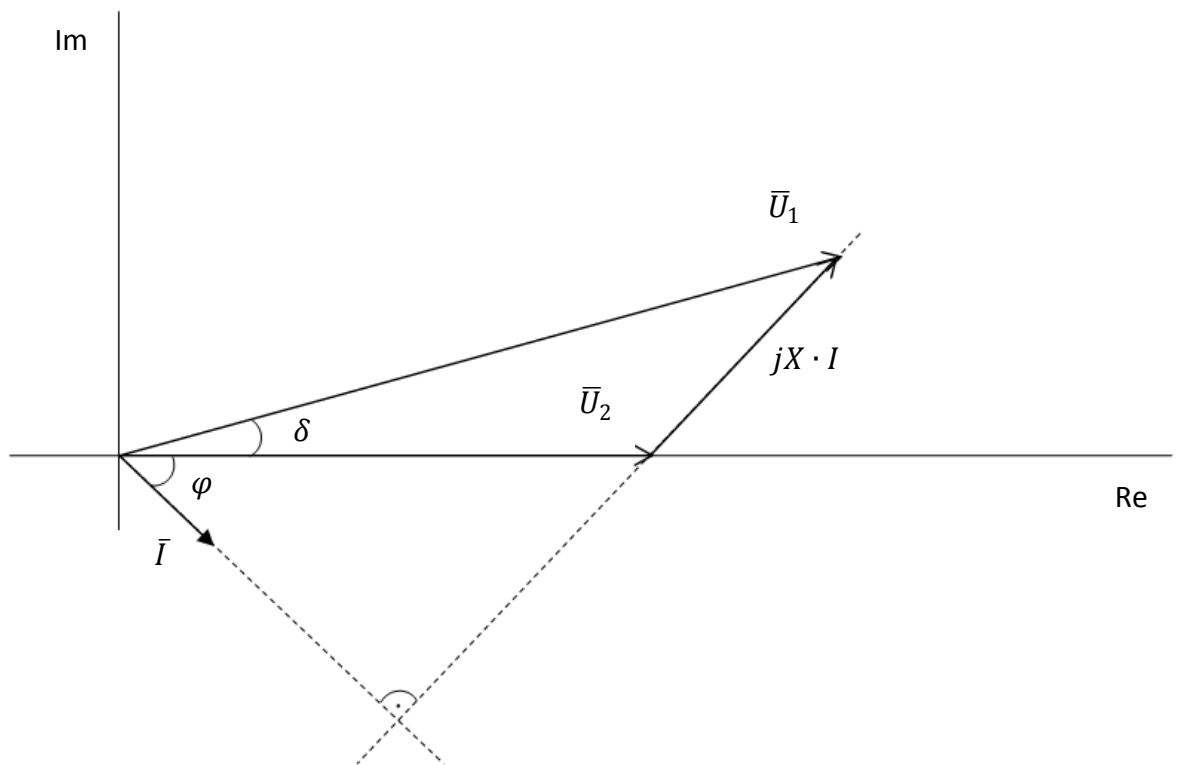
$$P = \operatorname{Re} \left\{ \bar{U} \cdot \left(\frac{\bar{U}_1 - \bar{U}_2}{jX} \right)^* \right\} \quad (1.3)$$

$$Q = \operatorname{Im} \left\{ \bar{U} \cdot \left(\frac{\bar{U}_1 - \bar{U}_2}{jX} \right)^* \right\} \quad (1.4)$$

Činné výkony na začátku a na konci vedení se rovnají, neboť uvažujeme bezztrátové vedení.

Tedy

$$P_1 = P_2 = U_2 \cdot I \cdot \cos\varphi. \quad (1.5)$$



Obrázek 2: Fázorový diagram vedení respektované pouze reaktancí

Z fázového diagramu dostaneme, že

$$X \cdot I \cdot \cos\varphi_2 = U_1 \cdot \sin\delta \tag{1.6}$$

$$I \cdot \cos\varphi = \frac{U_1 \cdot \sin\delta}{X} \tag{1.7}$$

kde δ je zátěžný úhel udávaný ve stupních, který udává úhel mezi fázory napětí \bar{U}_1 a \bar{U}_2

Dále dostáváme:

$$P_1 = P_2 = \frac{U_1 \cdot U_2}{X} \cdot \sin\delta \tag{1.8}$$

Pro další vysvětlení způsobu řízení toku činného výkonu pomocí PST postačí rovnice (1.8). Nicméně pro úplnost uvádím i rovnici jalového výkonu, ale bez odvození.

$$Q_2 = \frac{U_1 \cdot U_2}{X} \cdot \cos\delta - \frac{U_2^2}{X} \tag{1.9}$$

Z rovnice (1.8) lze určit jakými způsoby lze ovlivňovat tok činného výkonu na vedení. V zásadě máme tři možnosti. Regulace napětí U_1 a U_2 , změna reaktance vedení X nebo změna zátěžného úhlu δ . Protože napěťové hladiny v elektrizační soustavě jsou pevně dány a změna reaktance na zatíženém vedení není reálně možná, zbývá změna zátěžného úhlu, tento způsob využívají transformátory s posuvnou fází. Při regulaci zátěžným úhlem tedy platí:

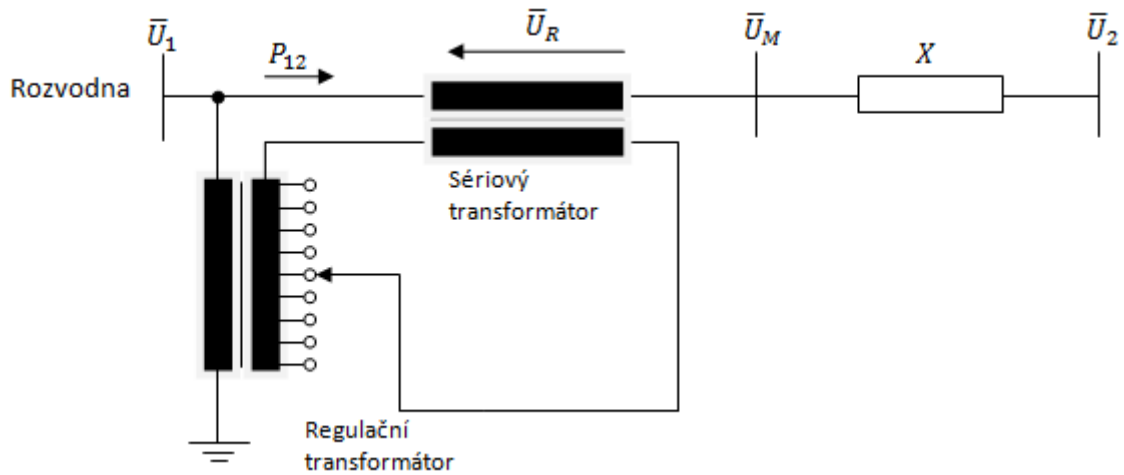
$$P \approx \sin\delta \quad (1.10)$$

2 Transformátor s posuvnou fází

PST jsou transformátory spadající do kategorie zařízení FACTS (Flexible AC Transmission Systems). Zlepšují říditelnost a stabilitu přenosové soustavy. PST je zařízení vhodné pro řízení toků elektrické energie v přenosové soustavě. Jsou umísťovány do vývodu přenosových vedení v rozvodnách velmi vysokého napětí [1]. Nejčastěji jsou použity na mezistátních a mezisystémových vedeních v přenosové soustavě nebo v místech kde vlivem překračování dovolených zatížitelností dochází k riziku výpadku[2].

2.1 Princip PST

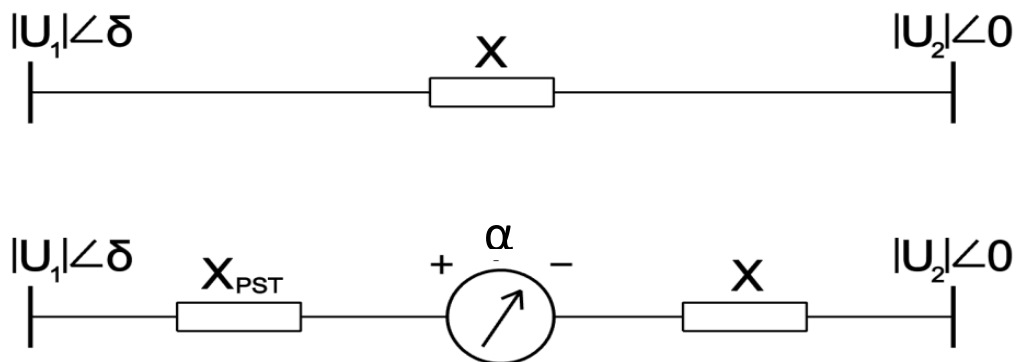
Fázového posunu je dosaženo přidáním regulačního napětí \bar{U}_R do takové fáze, aby bylo dosaženo posuvu výsledného napětí \bar{U}_M . Toho je docíleno použitím dvou transformátorů. Regulačního transformátoru, který je připojen příčně (paralelně) k přenosovému vedení a sériového transformátoru, který je zapojen v sérii s přenosovým vedením a dochází na něm k výslednému fázovému posunu [3,1].



Obrázek 3: PST [1]

Při regulaci je možné dosáhnout vlivem velikosti a úhlu regulačního napětí různých funkcí transformátoru. Je - li regulační napětí ve fázi s fázovým napětím sítě je změněn hlavně napěťový převod transformátoru. Tedy změni se amplituda výsledného napětí, což má vliv na toky jalového výkonu. Je -li regulační napětí pootočeno o úhel (nejčastěji o 90°) je změněn úhlový převod transformátoru, který má převažující vliv na toky činného výkonu [2].

2.2 Připojení PST do přenosové linky



Obrázek 4: Připojení PST do přenosové linky. Převzato z [1]

Transformátor s posuvnou fází (PST) může být modelován s určitou přesností jako reaktance X_{PST} v sérii s regulačním úhlem α , který mění výkonové toky na přenosovém vedení

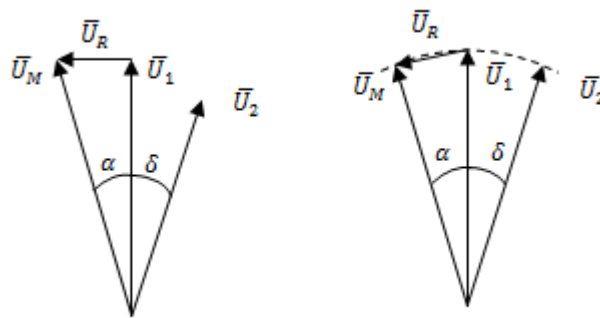
$$P = \frac{U_1 \cdot U_2}{X + X_{PST}} \cdot \sin(\delta + \alpha) \tag{2.1}$$

PST je tedy schopný měnit zátěžný úhel a tím ovlivňovat toky výkonů na vedení. Proto se používá pro efektivní rozdělování výkonových toků mezi přenosová vedení. Rozdělení toku výkonů je prováděno takovým způsobem, aby bylo dosaženo rovnoměrného zatížení

paralelních vedení.[1]

2.3 Princip řízení činného výkonu zátěžným úhlem

Z fázorových diagramů na obrázku 5 je zřejmé jakým způsobem se změní zátěžný úhel mezi napětími na obou stranách vedení, respektive mezi výstupním napětím PST a napětím na konci vedení. Dále je možné z těchto fázorových diagramů určit základní rozdíl mezi symetrickou a nesymetrickou regulací. Při nesymetrické regulaci dochází ke změně velikosti napětí, protože vstřikované napětí je kolmé na vstupní napětí PST. Při symetrické regulaci je zachována velikost napětí a změní se pouze fázový posuv. Symetrické a nesymetrické PST jsou popsány v následujících kapitolách této práce.



Obrázek 5: Fázorový diagram QBT (vlevo) a PAR (vpravo) [1]

2.4 Typy PST

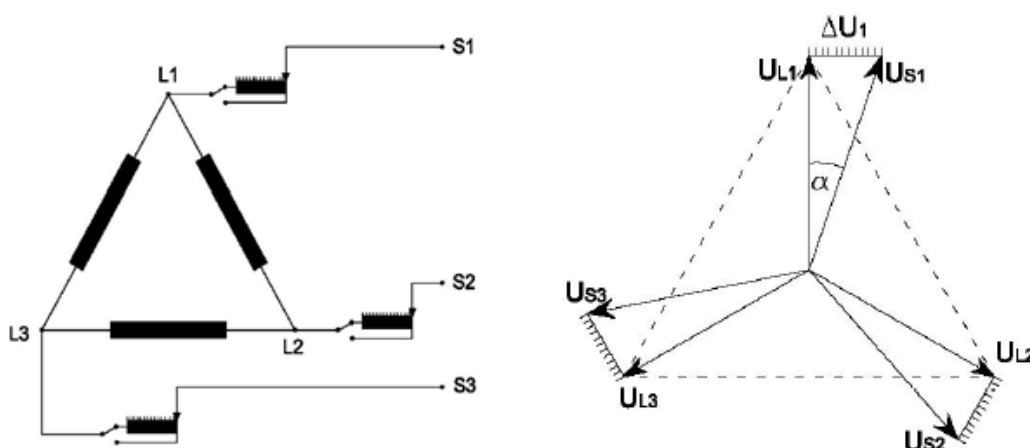
Transformátory s posuvnou fází jsou několika typů. Mohou být rozděleny podle následujících vlastností:

- Přímé PST, které jsou složeny z jednoho třífázového jádra. Fázový posuv je zajištěn vhodným způsobem zapojování vinutí.
- Nepřímé PST, jsou založené na konstrukci se dvěma oddělenými transformátory. První je transformátor regulační (budící) pro regulaci amplitudy napětí a druhý je transformátor sériový pro přičítání nebo odčítání regulačního napětí ve správné fázi.
- Nesymetrické PST, které mají výstupní napětí se změněným fázovým posuvem a amplitudou v porovnání se vstupním napětím. PST s nesymetrickou regulací se nazývají QBT - Quadrature Booster Transformer.

- Symetrické PST, které mají výstupní napětí oproti vstupnímu se změněným fázovým posuvem, ale se stejnou amplitudou. PST s tímto typem regulace se také nazývají PAR - Phase Angle regulator.

Kombinace těchto vlastností vede na čtyři kategorie PST. [4]

2.4.1 Přímé, nesymetrické PST



Obrázek 6: Zapojení přímého nesymetrického PST včetně fázového diagramu. Převzato z [4]

Obrázek 6 ukazuje zapojení tohoto typu PST. Vstupní svorky jsou L1 až L3. Vinutí s odbočkami, které jsou připojeny k vstupním svorkám, mají magnetickou vazbu s vinutími mezi ostatními svorkami. Změnou odbočky je měněno regulační napětí a toto regulační napětí je přidáváno ke vstupnímu napětí, aby bylo dosaženo fázového posuvu α . Směr změny fázového posuvu může být měněn pomocí přepínačů. Tímto způsobem je možné zvyšovat nebo naopak snižovat tok výkonu ve vedení. Vztah mezi zvolenou odbočkou a úhlem α vychází z fázového diagramu obrázek 6.

$$\alpha = \arctan \frac{|\Delta U_1|}{|U_{L1}|} \quad (2.2)$$

Vztah mezi výstupním a vstříkovaným napětím je dán

$$|U_{s1}| = \frac{|\Delta U_1|}{\sin \alpha} \quad (2.3)$$

Po dosazení

$$|U_{s1}| = \frac{|\Delta U_1|}{\sin \left(\arctan \frac{|\Delta U_1|}{|U_{L1}|} \right)} \quad (2.4)$$

Výstupní napětí $|U_{s1}|$ je vždy vyšší než vstupní napětí $|U_{L1}|$.

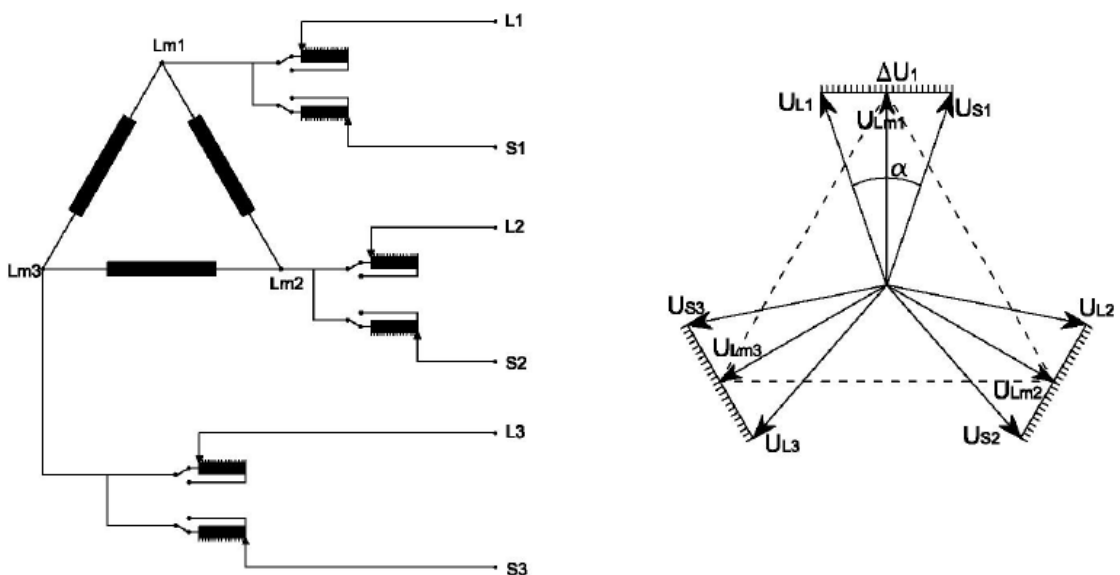
Po dosazení rovnice 2.2 a 2.4 do rovnice 1.8 vyplývá

$$P = \frac{|U_r|}{X + X_{PST}} \cdot \frac{|\Delta U_1|}{\sin(\arctan \frac{|\Delta U_1|}{|U_{L1}|})} \cdot \sin(\delta + \arctan \frac{|\Delta U_1|}{|U_{L1}|}) \quad (2.5)$$

Po úpravě

$$P = \frac{|U_r|}{X + X_{PST}} \cdot (|\Delta U_{L1}| \sin \delta + \Delta U_1 \cos \delta) \quad (2.6)$$

2.4.2 Přímé, symetrické PST



Obrázek 7: Zapojení přímého symetrického PST včetně fázorového diagramu. Převzato z [4]

Přidáním dalšího měniče odboček k nesymetrickému PST získáme symetrický PST. Hlavní výhodou tohoto typu PST oproti nesymetrické konstrukci je vyšší dosažitelná změna úhlu a také to, že amplitudy napětí zůstávají stejné. Jako nevýhoda se jeví vyšší cena zařízení, neboť je nutno přidat další přepínač odboček.

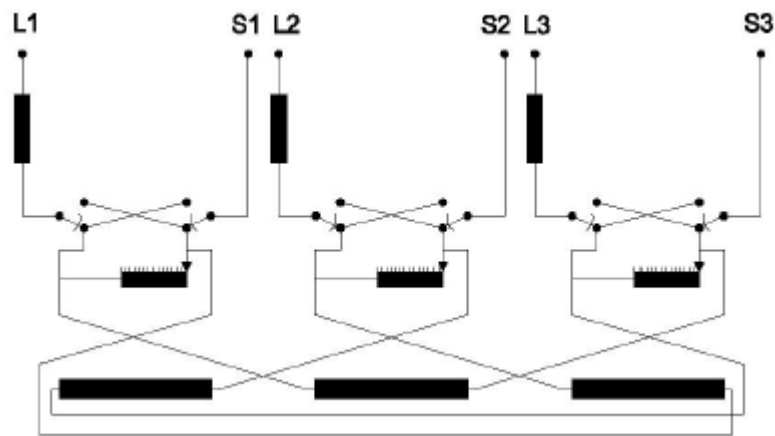
Vztah mezi posunutým (o 90°) napětím ΔU_1 a úhlem α je dán vztahem

$$\alpha = 2 \arcsin \frac{|\Delta U_1|}{2|U_{L1}|} \quad (2.7)$$

Použitím rovnice 2.7 získáme přenášený činný výkon

$$P = \frac{|U_{L1}| |U_r|}{X + X_{PST}} \sin \left(\delta + 2 \arcsin \frac{|\Delta U_1|}{2|U_{L1}|} \right) \quad (2.8)$$

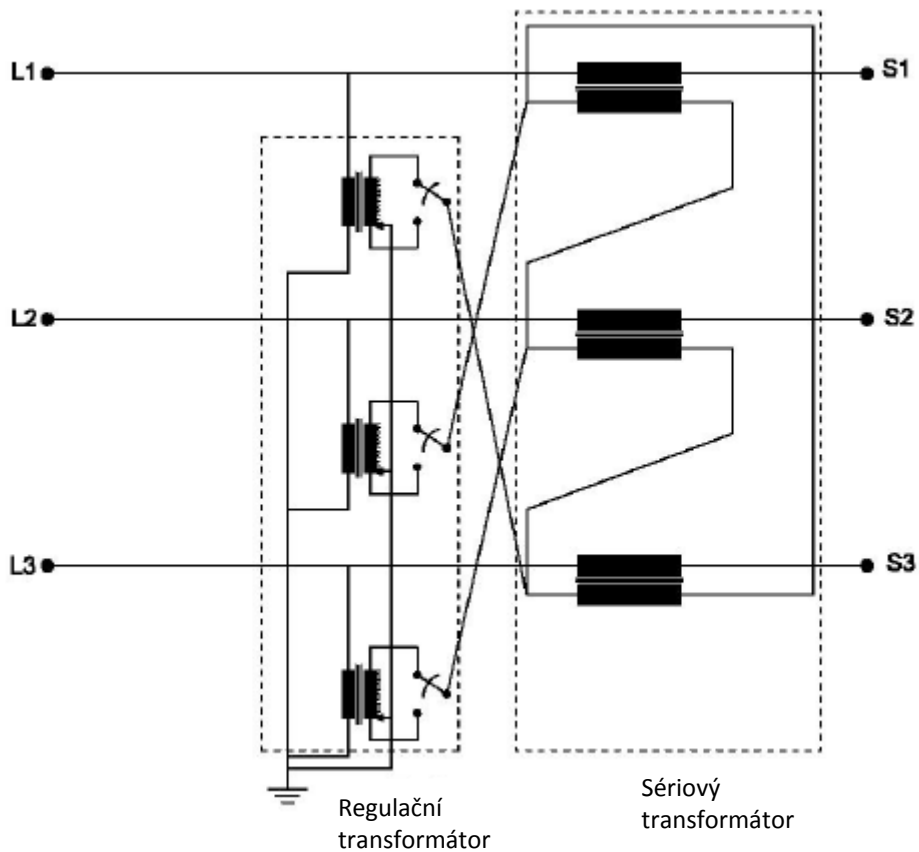
Alternativní realizace přímého, symetrického PST je vidět na obrázku 8. Jedná se o tzv. hexagonální zapojení vinutí PST. Výhodou tohoto zapojení vinutí je nutnost pouze jednoho přepínače odboček na fázi. Jako nevýhoda se jeví potřeba přídavné impedance k ochraně přepínače odboček, když je fázový posuv na nule, protože v tomto případě mohou vzniknout zkratové proudy.[4]



Obrázek 8: Hexagonální zapojení vinutí PST. Převzato z [4]

2.4.3 Nepřímé, nesymetrické PST

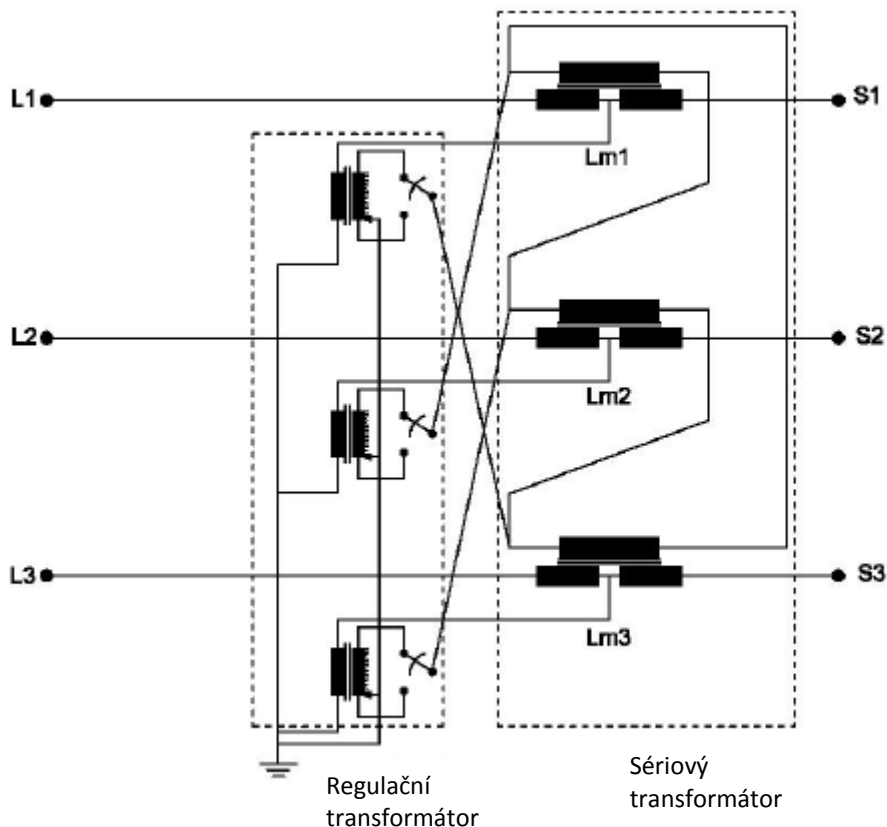
Tento typ PST, jak bylo uvedeno výše, je složen ze dvou transformátorů. Z budícího transformátoru a ze sériového transformátoru. Tyto transformátory jsou umístěny buď ve společné nádobě, nebo ve dvou oddělených nádobách. Hlavní výhodou oddělených nádob je snazší přeprava PST. Na obrázku 9 je znázorněna konfigurace systému. Fázorový diagram tohoto typu PST je stejný jako u přímého nesymetrického PST.[4]



Obrázek 9: Zapojení nepřímého nesymetrického PST. Převzato z [4]

2.4.4 Nepřímé, symetrické PST

Nepřímé, nesymetrické PST mohou být upraveny na symetrické rozdělením vinutí sériového transformátoru na dvě poloviny, viz obrázek 10. Fázorový diagram je stejný jako u přímého symetrického PST.[4]

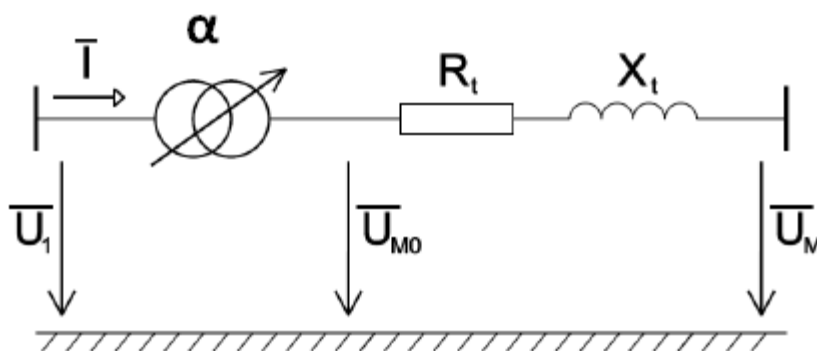


Obrázek 10: Zapojení nepřímého symetrického PST. Převzato z [4]

Tento typ PST je velmi často používaný, protože pro své dvou nebo více nádobové provedení usnadňuje dopravu, a také proto, že při regulaci fázového posuvu zachovává velikost napětí.

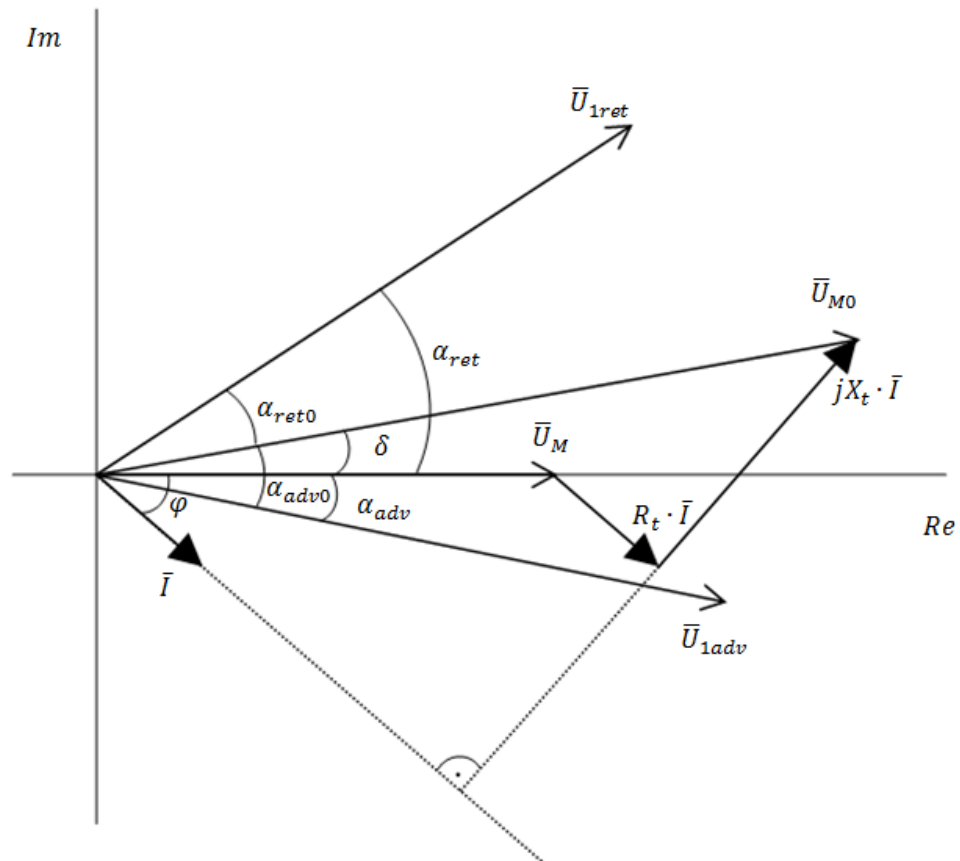
2.5 Zatížený PST

Vlivem průchodu proudu vznikne PST úbytek napětí a dojde ke změně regulačního úhlu. Podle nastavení regulace může PST regulovat vpřed (advance) či zpět (retard), viz fázorový diagram na obrázku 12.



Obrázek 11: Zatížený PST [1]

Při sestavení fázorového diagramu zatíženého PST je třeba uvažovat rozdělení PST na dvě části. Jedna část představuje ideální transformátor, který vytváří fázový posuv α a druhá část je impedance PST. Impedance Z je tvořena odporem PST a reaktancí PST.



Obrázek 12: Fázorový diagram zatíženého PST

Kde

\bar{U}_M je výstupní napětí PST

\bar{U}_{M0} je vnitřní napětí PST

$\bar{U}_{1adv}, \bar{U}_{1ret}$ je napětí před PST (advance a retard)

δ je zátěžný úhel

$\alpha_{adv0}, \alpha_{ret0}$ jsou regulační úhly naprázdno (advance, retard)

$\alpha_{adv}, \alpha_{ret}$ jsou regulační úhly při zatížení (advance, retard)

Vlivem průchodu proudem transformátorem dojde k úbytku napětí. Vnitřní napětí PST je \bar{U}_{M0} . Fázovým posuvem vnitřního napětí o úhel α_{adv0} a α_{ret0} je získáno napětí na vstupu

do PST \bar{U}_1 . Výsledný regulační úhel PST při zatížení se vypočte:

$$\alpha_{adv} = \alpha_{adv0} - \delta \quad (2.9)$$

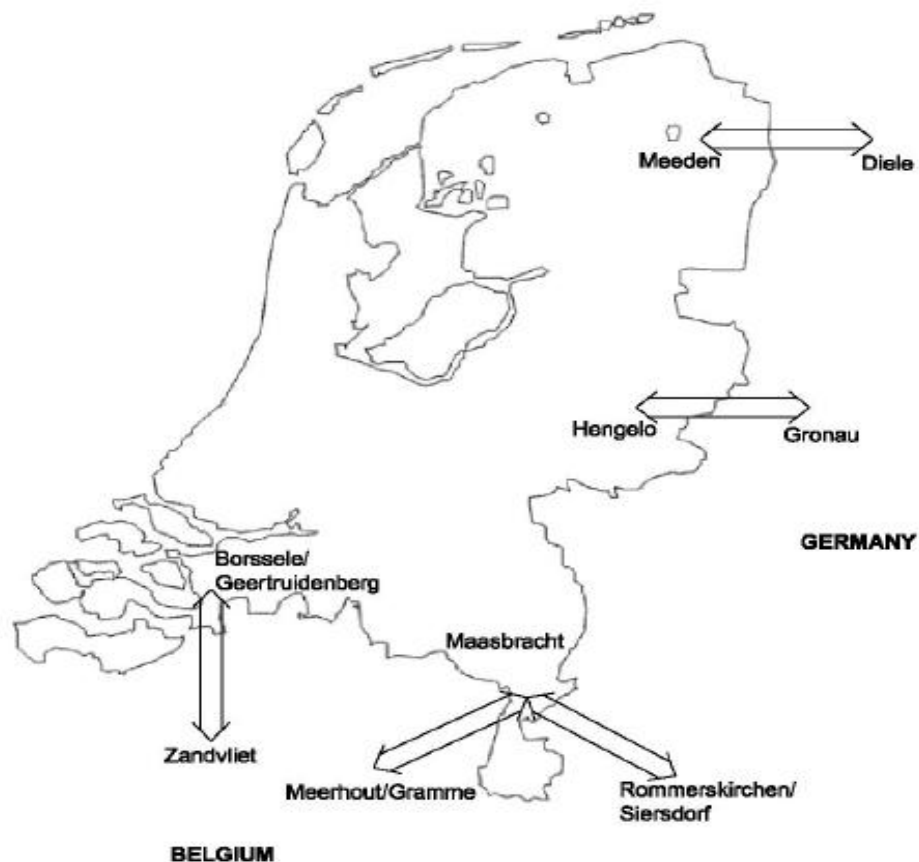
$$\alpha_{ret} = \alpha_{ret0} + \delta \quad (2.10)$$

Z fázorového diagramu a rovnic 2.9 a 2.10 vyplývá, že fázový posuv PST pod zatížením je odlišný od fázového posuvu naprázdno. Při regulaci vpřed (advance) dochází ke zmenšení výsledného fázového posuvu a při regulaci zpět (retard) dochází k zvětšení fázového posuvu. Pokud je známý převažující tok na vedení, je možné tuto vlastnost PST využít při návrhu transformátoru.

3 Přehled aplikací PST

3.1 PST v rozvodně Meeden, Nizozemsko

Nizozemsko má pět propojení mezi sousedními státy Belgií a Německem. Jih Nizozemska je mnohem hustěji obydlen v porovnání se severem země. Z toho plyne, že import výkonu způsobuje vysoké zatížení jižních propojení, konkrétně Massbracht - Rommerskirchen/Siersdorf, oproti mnohem méně zatíženému propojení Meeden - Diele. Tímto přetížením na jihu a odlehčením na severu Nizozemska vznikají omezení pro celkový import výkonu. Proto se provozovatel Nizozemské přenosové soustavy rozhodl tento problém řešit. Jedním z řešení by bylo vybudovat další přenosová vedení, ale tento způsob je velmi zdlouhavý z důvodu složitého vyjednávání mezi provozovateli přenosových soustav ostatních států a zdlouhavým zajišťováním potřebných povolení pro výstavbu. Lepší a rychlejší řešení bylo umístění PST na vhodné místo v Nizozemské přenosové síti. Byla vybrána rozvodna Meeden, protože umístění PST do této rozvodny umožnilo nárůst importu v severní části země a tedy vyrovnání zatížení mezinárodních propojení.



Obrázek 13: Mapa Nizozemska. Převzato z [4]

Byl zvolen symetrický, nepřímý PST. Jak bylo popsáno v předchozích kapitolách, sériový a budící transformátor mohou být konstruovány jako dva oddělené třífázové transformátory, tzn. dvounádobové provedení. Problémem tohoto uspořádání je vysokonapěťové propojení mezi nádobami. V této rozvodně bylo použito třínádobové provedení. Toto provedení spočívá v umístění fáze sériového a budícího transformátoru do jedné nádoby. Je sice potřeba více propojení, ale ty jsou na nižší napěťové úrovni. Každá jednofázová jednotka obsahuje jednofázový sériový transformátor, jednofázový budící transformátor s dvěma měniči odboček a dvěma proudovými transformátory, kteří mají za úkol rozdělit proud rovnoměrně mezi přepínače odboček.[4]

Typ regulace	Symetrická
Jmenovitý výkon	2 x 1000 MVA
Typ chlazení	ONAN
Rozsah odboček	+/- 16 kroků
Fázový posuv bez zatížení	37,2°
Fázový posuv pod zatížením	30°
Zkratová impedance	< 12 % při 1000 MVA
Jmenovité napětí	380 kV

Tabulka 1: Parametry PST použitého v Nizozemsku (rozvodna Meeden)

3.2 PST v ČR a Polsku

V současné době existují výrazné přetoky energie přes Českou republiku a Polsko. Hlavními důvody, proč tyto přetoky energie začaly ohrožovat přenosovou soustavu ČR, jsou výrazný nárůst množství vyrobené elektrické energie ve větrných elektrárnách na severu Německa, v kombinaci s nedostatečnou přenosovou kapacitou vnitrostátní sítě v Německu. Další důvod je odstavení částí jaderných elektráren na jihu Německa a zvyšující se instalovaný výkon fotovoltaických elektráren. Mnohem častěji se stává, že přenosová soustava ČR musí být provozována bez tzv. bezpečnostního kritéria N-1. Toto kritérium zaručuje zachování spolehlivého chodu přenosové soustavy i při výpadku její libovolné části (vedení, transformátor apod.). Česká přenosová soustava se přiblížila blackoutu na přelomu let 2011/2012 a v srpnu 2012.[5]



Obrázek 14: Toky výkonů ve střední Evropě. Převzato z [5]

Tyto okolnosti vedou Českou a Polskou stranu k vybudování PST z důvodu omezení těchto nebezpečných přetoků. Obě strany se dohodli na společném uvedení PST do provozu do konce roku 2016.

V případě České republiky se bude jednat PST umístěný v rozvodně Hradec, která se nachází blízko Kadaně. Bude se jednat o nepřímé PST se symetrickou regulací fázového posuvu. Parametry PST jsou uvedeny v následující tabulce

Jmenovité napětí	420 kV	
Jmenovitý výkon	2 x 850 MVA	
Rozsah regulace úhlu naprázdno	+/- 30°	
Dosažitelný fázový posuv při plném zatížení ve směru „retard“	-38°	
Počet odboček	+/- 32	
Ztráty naprázdno při U_n a odbočce 0	≤ 200kW	
Ztráty naprázdno při U_n a max úhlu	≤ 400kW	
Ztráty nakrátko při U_n a odbočce 0	≤ 1000kW	
Ztráty nakrátko při U_n a max úhlu	≤ 1800kW	
Dovolené přetížení	Střední odbočka	120%
	Krajní odbočka	100%

Tabulka 2: Parametry PST pro ČR

4 Systém chránění PST

V této kapitole popíši a vysvětlím jednotlivé typy ochranných funkcí, které bývají použity při chránění PST. Dále popíši doporučení pro chránění konvenčních PST vydané organizací IEEE. Konvenčním typem PST je myšlen nepřímý, symetrický PST (dvounádobový) se sekundárním sériovým vinutím do trojúhelníku a budícím vinutím zapojeném do uzemněné hvězdy.

4.1 Rozdílová ochrana

Rozdílové ochrany chrání při poruchách uvnitř chráněných objektů. Vyhodnocují poruchový stav na základě porovnávání proudů na vstupu a na výstupu chráněného objektu. Proudů jsou přístrojovými transformátory převedeny na sekundární hodnoty a poté porovnávány rozdílovou ochranou. Pokud jsou proudy stejné na obou stranách chráněného objektu, jedná se o provozní stav a ochrana nepůsobí. Pokud proudy na obou stranách nejsou stejné, jedná se o poruchový stav a ochrana musí zapůsobit. U rozdílových ochran se nenastavuje časové zpoždění, neboť z principu rozdílové ochrany víme, že se porucha nachází uvnitř chráněného objektu a tím je zajištěna selektivnost. Chráněným objektem může být transformátor, generátor nebo krátké vedení. Rozdílová ochrana se dále dělí na podélnou rozdílovou ochranu a příčnou rozdílovou ochranu. Podélná rozdílová ochrana chrání pomocí měření proudu na vstupu a výstupu chráněného objektu, viz výše. Příčná rozdílová ochrana chrání dva stejné paralelně pracující objekty. Měří proudy na vstupu obou chráněných objektů.[6]

4.2 Nadproudová a zkratová ochrana

Jsou to ochrany, které reagují na zvýšený proud oproti nastavené hodnotě. Často jsou použity jako záložní ochrany. Dělí se podle času působení na časově závislé, nezávislé, polozávislé a mžikové. Dále je možné je rozdělit na směrové a nesměrové nadproudové ochrany. Selektivnost u tohoto typu ochran je zajištěna časovým odstupňováním (nejčastěji 100ms) a podpěťovým blokováním. Podpěťové blokování zajistí, že ochrana vypíná tehdy, klesne-li napětí v místě, kde je připojena pod nastavenou úroveň.[6]

4.3 Chránění primárních vinutí sériových a budících jednotek

Pro chránění primárních vinutí PST mohou být použity procentuální rozdílové ochrany. Proudové transformátory na straně zdroje i zátěže sériové jednotky jsou stejně jako na uzemněné straně primárního vinutí budící jednotky zapojeny do hvězdy nebo do trojúhelníku. Zapojení do hvězdy má výhodu při identifikaci fázových poruch. Vzhledem k tomu, že proudové transformátory primární rozdílové ochrany jsou připojeny k primární straně sériové jednotky, rozdílová ochrana nebude ovlivněna přesycením sériové jednotky, které by mohlo nastat při externích poruchách. Primární rozdílové ochrany jsou schopné pokrýt všechny poruchy primárního vinutí. Sekundární rozdílová ochrana a záložní zemní nadproudová ochrana jsou schopny chránit PST před poruchami sekundárního vinutí. Primární rozdílové ochrany jsou zapojeny pro respektování Kirchoffova zákona pro sériovou jednotku PST takto:

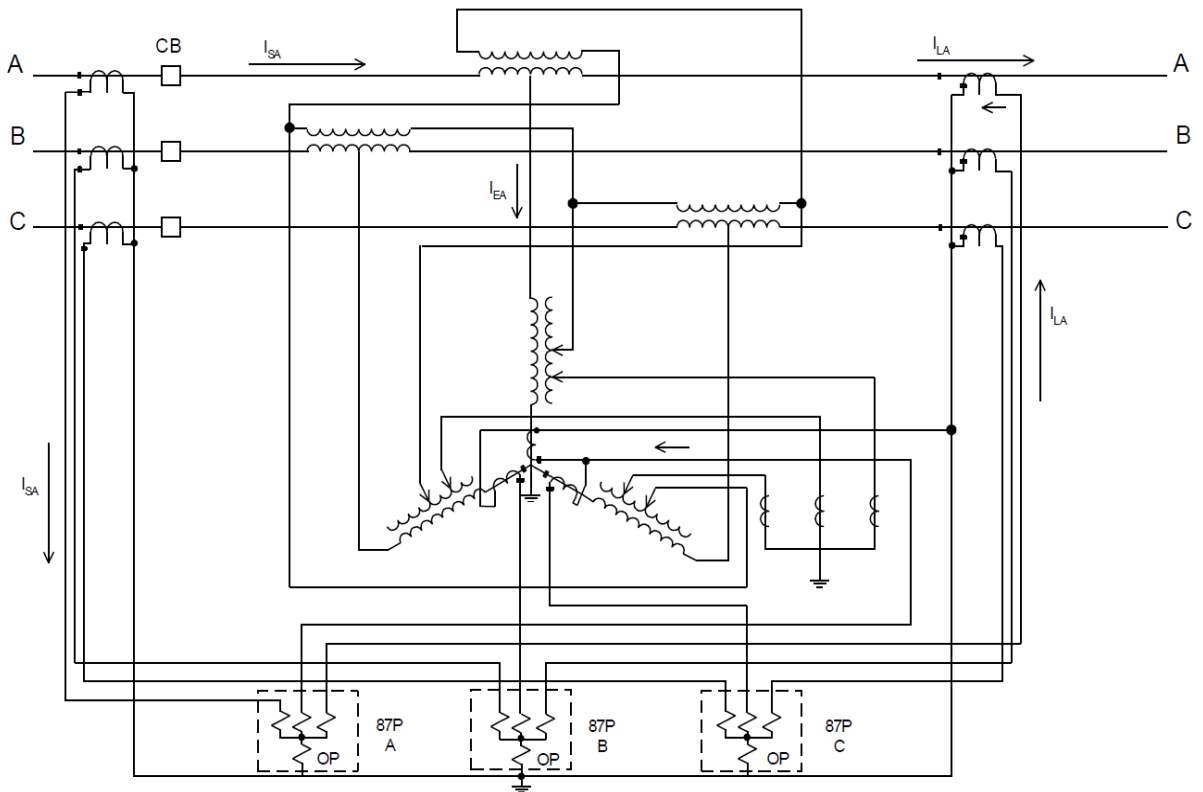
$$I_{Zdroje} = I_{Zátěže} + I_{Budící} \quad (4.1)$$

Kde I_{Zdroje} je proud vstupující do primární strany sériového transformátoru

$I_{Zátěže}$ je proud vystupující z primární strany sériového transformátoru

$I_{Budící}$ je proud tekoucí primární stranou budícího transformátoru

Rovnice 4.1 je dodržena pokud proudové transformátory mají stejný převod, zapojení (hvězda nebo trojúhelník), relé je připojeno na stranu zdroje a zátěže sériové jednotky primárního vinutí a uzemněnou stranu primárního vinutí budící jednotky.[6]



Obrázek 15: Schéma rozdílového relé [6]

4.4 Chránění sekundárních vinutí sériové a budící jednotky

Pro chránění sekundárních vinutí sériové a budící jednotky PST mohou být použity procentuální rozdílové ochrany. Vzhledem k tomu, že jeden okruh sekundární ochrany je zapojen na sekundární straně sériového transformátoru (obrázek 16), může dojít k nežádoucímu zapůsobení ochrany kvůli vlivu přesycení sériového transformátoru. Vliv přesycení sériového transformátoru se projeví hlavně při vnějších poruchách, např. zkratech. Mělo by být analyzováno, zda při poruchách na obou stranách PST při maximálním zkratovém proudu a maximálním fázovém posuvu dojde k přesycení sériové jednotky. Pokud je zřejmé, že k přesycení sériové jednotky může dojít, je nutné použít znečitlivění sekundární rozdílové ochrany v případě vnější poruchy. Tento způsob nastavení rozdílové ochrany může být použit při rozlišení, jestli působení ochrany bylo způsobeno přesycením nebo vnitřními poruchami, může zpožďovat působení ochrany při přesycení.

Připojení a převod přístrojových transformátorů proudu pro rozdílové ochrany musí být určen při plném zatížení při nulovém a maximálním fázovém posuvu. Při neutrální poloze odboček jsou proudy na vstupu a na výstupu primárního vinutí sériového transformátoru stejně velké a nemají fázový posuv. Proud v sekundární straně sériové jednotky se bude

rovnat proudy primárnímu vynásobenému převodem sériové jednotky. Při fázovém posuvu proudy na vstupu a na výstupu se nerovnají a proud v sekundárním obvodu sériové jednotky není snadné určit.[6]

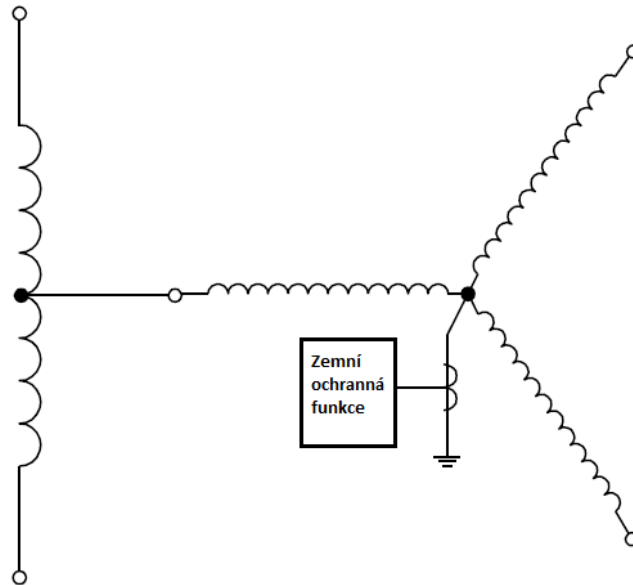
4.5 Záložní zemní nadproudová ochrana

Tento typ ochrany je použit jako záložní ochrana zemní poruch PST. Používá se inverzní nebo velmi inverzní časová zemní nadproudová ochranná funkce, která je aplikována v primární i sekundární straně budící jednotky.

4.5.1 Primární zemní ochrana budící jednotky

Jedním z důležitých aspektů této ochranné funkce je koordinace s primární zemní ochranou na straně sítě. Nutnost této koordinace závisí na tom, zda je nebo není PST zdrojem nulové složky proudu. V třífázovém transformátoru jádrového provedení je směr magnetického toku stejný ve všech třech sloupcích. Tok se uzavírá vnějškem, tedy přes vzduch, což vede k nízké budící impedanci k nulové složce proudu. Výsledkem je, že transformátory této konstrukce vytváří virtuální terciér do trojúhelníku. Proto musí být tato ochranná funkce koordinována se zemní funkcí na straně linky. U transformátorů plášťové konstrukce nebo u třífázových transformátorů složených ze tří jednofázových není nutné sladění se zemní funkcí linky, protože mají vysokou budící impedanci k nulové složce proudu.

Dalším aspektem této ochranné funkce je zabezpečení proti nevyváženému zapínacímu magnetizačnímu proudu. Tyto problémové situace jsou typické pro systémy s vysokou poruchovostí a tam, kde budící proudy transformátorů jsou velké. Pokud jsou PST zapojeny paralelně k sobě, tyto nárazové magnetizační proudy mohou být ještě vyšší. Řešení tohoto problému je zpomalení ochrany (blokování po určitý čas) nebo přidání omezovací funkce druhé harmonické proudu k nadproudové ochraně.[6]



Obrázek 16: Zapojení zemní ochrany v primární straně budícího vinutí.[6]

4.5.2 Sekundární zemní ochrana budící jednotky

Tento typ ochranné funkce nevyžaduje koordinaci se zemní ochranou linky. Výše uvedená doporučení však nemusí úplně platit v praxi. Jak se píše v [7] od doby kdy byla vydaná doporučení [6] uplynula jistá doba, změnila se konstrukce PST, přibyl počet odboček a všechny nové PST jsou chráněny numerickými ochrannými zařízeními.

Vliv odlišné konstrukce PST

Při změně režimu PST z advance na retard nebo naopak je nutné na sériovém vinutí otočit napětí o 180 stupňů. Této změny je možné dosáhnout několika způsoby. Na typech PST, které mají pouze 32 odboček je technicky možné této změny napětí dosáhnout pomocí zatíženého přepínače odboček, otočením směru proudu tekoucím sekundárním vinutím budícího transformátoru. Při pohledu na PST "zvenku" se toto přepínání neprojevívá, protože přepínání mění hodinový úhel budícího transformátoru z $Yy0$ na $Yy6$. U PST s více odbočkami (např. 64 viz [7]) není tento postup možný. Místo toho je použit A/R (advance/retard) přepínač, což je samostatné zařízení připojené k sériovému vinutí. Přepínání pomocí A/R přepínače se projeví při pohledu na PST z "venku". Tyto vnitřní spínací procesy mají velký vliv na sekundární rozdílové relé, které je nutné stabilizovat pro správnou funkci. Navíc tento vnitřní spínací proces je prováděn zcela zvláštním způsobem. Všechny konce sekundárního vinutí do trojúhelníka jsou během přepínání dočasně uzemněny. Což vytvoří úmyslný zkrat v chráněné zóně rozdílové ochrany, což způsobí nerovnováhu rozdílové ochrany. Proto musí být sekundární rozdílová ochrana blokována během přepínání režimu PST. Z těchto důvodů

potřebuje sekundární rozdílová ochrana tři binární vstupy, které budou signalizovat, zda PST je v advance režimu, retard režimu nebo v režimu přepínání.[7]

5 Návrh systému chránění PST

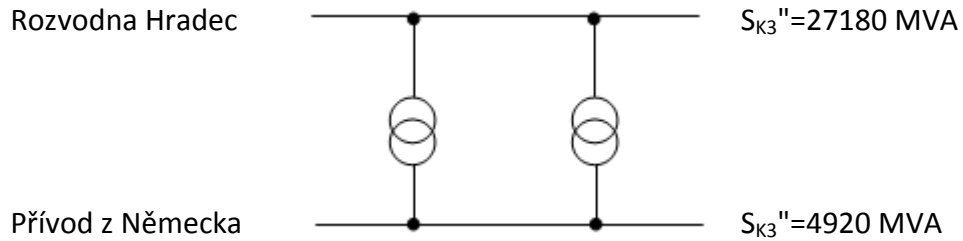
V této kapitole se budu věnovat samotnému návrhu systému chránění PST, který bude použit v rozvodně Hradec. Návrh bude vycházet z informací, které mi jsou k dispozici od firmy ČEPS a.s. a jsou aktuální k roku 2014. Nejprve vypočítám maximální zkratový proud, který by mohl přes PST téci v případě poruchy. Tento vypočtený zkratový proud použiji pro modelování sycení přístrojových transformátorů proudu. Provedu výpočet, zda zvolené přístrojové transformátory jsou vhodné. Dále provedu výpočet nastavení parametrů rozdílových funkcí a záložních nadproudových funkcí. Podle parametrů ochranných funkcí nastavím multifunkční ochranu 7UT87 od firmy Siemens.

Ochrana 7UT87 je součástí už páté řady multifunkčních ochran od firmy Siemens. Je vybavena mikroprocesorem a tedy všechny úlohy od měření až po vysílání povelů na vypínač apod. jsou prováděny digitálně.

5.1 Výpočet zkratového proudu

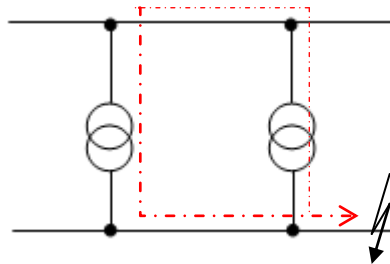
Ze získaných hodnot od společnosti ČEPS jsem provedl výpočet zkratových proudů procházejícím PST. K transformátoru s posuvnou fází jsem přistupoval jako ke standardnímu transformátoru a v náhradním schématu jsem ho nahradil celkovou zkratovou reaktancí. Velikost této impedance jsem určil z tabulky a pro výpočet jsem vždy uvažoval nejnepříznivější stav. To znamená nejnižší reaktanci, což odpovídá nenižší odbočce.

Parametry pro výpočet	
Zkratový výkon v rozvodně Hradec (3f)	27180 MVA
Zkratový výkon po vedení z Německa (3f)	4920 MVA
Poměrná zkratová impedance nejnižší odbočky	12,18%
Napětí	420 kV
Výkon PST	850 MVA



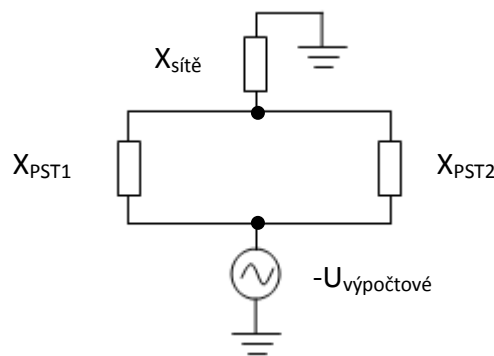
Obrázek 17: Řešené schéma

Nejprve jsem uvažoval zkrat na straně Německa.



Obrázek 18: Cesta poruchového proudu

Na obrázku 18 je znázorněno místo zkratu a směr toku poruchového proudu. Následující rovnice popisují výpočet impedancí náhradního schématu pro výpočet zkratového proudu, který by při poruše protékal oběma transformátory.



Obrázek 19: Náhradní obvod

$$X_{PST1} = \frac{x_{cc}}{100} \cdot \frac{U^2}{S} = 0,1218 \cdot \frac{(420 \cdot 10^3)^2}{850 \cdot 10^6} = 25,277 \Omega \quad (5.1)$$

$$X_{PST2} = \frac{x_{cc}}{100} \cdot \frac{U^2}{S} = 0,1218 \cdot \frac{(420 \cdot 10^3)^2}{850 \cdot 10^6} = 25,277 \Omega \quad (5.2)$$

$$X_{sítě} = \frac{U^2}{S_K''} = \frac{(420 \cdot 10^3)^2}{27180 \cdot 10^6} = 6,49 \Omega \quad (5.3)$$

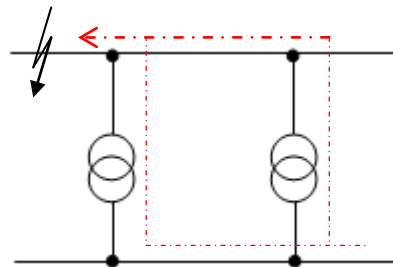
$$X_{celkov\acute{a}} = X_{sítě} + \frac{X_{PST1} \cdot X_{PST2}}{X_{PST1} + X_{PST2}} = 6,49 + \frac{1}{2} \cdot 25,277 = 19,441\Omega \quad (5.4)$$

Z předešlých rovnic vypočteme výsledný zkratový proud.

$$I_K'' = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot X_{celkov\acute{a}}} = \frac{420000}{\sqrt{3} \cdot 19,441} = 12,473 \text{ kA} \quad (5.4)$$

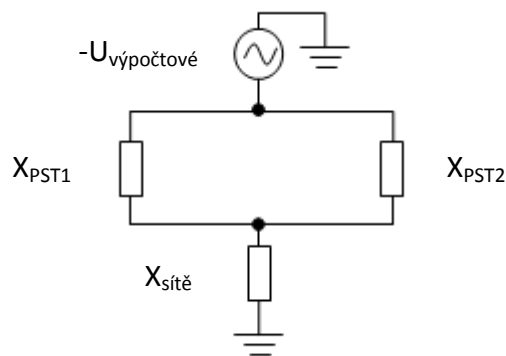
To znamená, že každým PST poteče právě polovina tohoto zkratového proudu. Tedy 6,2365 kA.

Dále budu uvažovat zkrat na straně rozvodny Hradec.



Obrázek 20: Cesta poruchového proudu

Na obrázku 20 je znázorněno místo zkratu a směr toku poruchového proudu. Následující rovnice popisují výpočet impedancí náhradního schématu pro výpočet zkratového proudu, který by při poruše protékal oběma transformátory.



Obrázek 21: Náhradní obvod

Reaktance PST jsou stejné. Změní se pouze reaktance sítě.

$$X_{sítě} = \frac{U^2}{S_K''} = \frac{(420 \cdot 10^3)^2}{4920 \cdot 10^6} = 35,85 \Omega \quad (5.5)$$

$$X_{celkov\acute{a}} = X_{sítě} + \frac{X_{PST1} \cdot X_{PST2}}{X_{PST1} + X_{PST2}} = 35,85 + \frac{1}{2} \cdot 25,277 = 48,49\Omega \quad (5.6)$$

Z předešlých rovnic vypočteme výsledný zkratový proud.

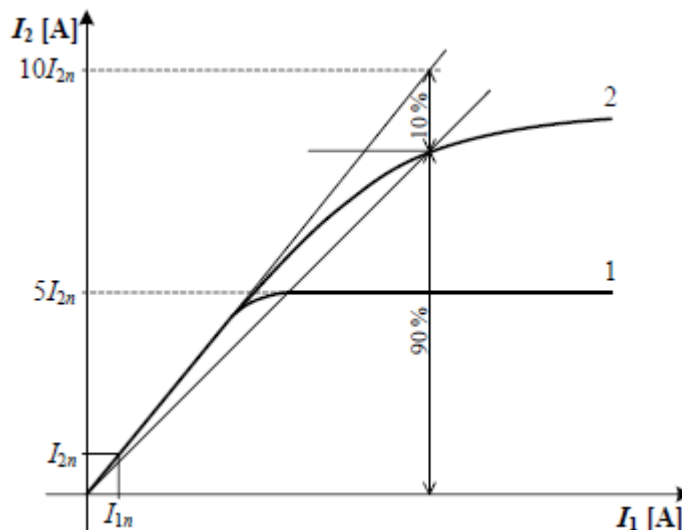
$$I_K'' = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot X_{celkov\acute{a}}} = \frac{420000}{\sqrt{3} \cdot 48,49} = 5 \text{ kA} \quad (5.7)$$

To znamená, že každým PST poteče právě polovina tohoto zkratového proudu. Tedy 2,5 kA.

5.2 Výpočet skutečného nadproudového činitele

Nadproudový činitel

Nadproudový činitel přístrojového transformátoru proudu je násobek jmenovitého primárního proudu, při kterém dosáhne chyba proudu 10% (třída 10P) resp. 5% (třída 5P). Nadproudový činitel by měl být u měřících transformátorů spíše nižší, aby při zvýšeném poruchovém proudu nedošlo k poškození zařízení na sekundární straně. U transformátorů jistících se požaduje nadproudový činitel dostatečně vysoký, aby například rozdílová ochrana nezapůsobila chybně z důvodu přesycení přístrojového transformátoru na jedné straně chráněného objektu. Avšak nesmí být tak vysoký, že by došlo k poškození zařízení na sekundární straně přístrojového transformátoru proudu, např. ochranného relé.



Obrázek 22: Nadproudová charakteristika transformátoru proudu, 1-pro účely měření, 2 pro účely jistění [8]

Přístrojové transformátory proudu se pro potřeby digitálních ochran dimenzují hlavně podle skutečného nadproudového činitele. Skutečný nadproudový činitel se dá určit ze

vztahu

$$n = n_n \cdot \frac{R_{ct} + R_{bn}}{R_{ct} + R_b} \quad (5.7)$$

kde R_{ct} je vnitřní odpor přístrojového transformátoru proudu [Ω],

R_{bn} je jmenovité břemeno transformátoru [Ω],

R_b je skutečné břemeno připojené na sekundární stranu PTP [Ω],

n_n je jmenovité nadproudový činitel.

Přístrojové transformátory proudu, které budou použity při ochráně PST v Hradci, budou typu 5P20 s výkonem 30 VA. Převody se však liší. Přístrojové transformátory proudu na straně zdroje a zátěže sériového transformátoru mají oba shodný převod 1500/1 A. Přístrojový transformátor na primární straně budícího transformátoru má převod 750/1 A a na sekundární straně budícího transformátoru má převod 3000/1 A. Přístrojový transformátor, který je zapojen na sekundární straně sériového transformátoru má převod 1700/1 A.

Vnitřní odpor transformátoru je potřeba zjistit od výrobce. Mě se to však nepodařilo a proto podle mě dostupných informací volím $R_{ct} = 0,1 \Omega$. Jmenovité břemeno PTP jsem určil jako poměr jmenovitého výkonu a jmenovitého sekundárního proudu.

$$R_{bn} = \frac{S_n}{I_{2n}^2} = \frac{30}{1^2} = 30 \Omega \quad (5.7)$$

Skutečné břemeno jsem určil jako součet odporů přívodních vodičů, vstupního odporu měřícího členu ochrany a stykového odporu připojení přívodních vodičů (0,02 Ω).

$$R_b = R_l + R_i + R_s \text{ [}\Omega\text{]} \quad (5.7)$$

Přívodní vodiče jsem uvažoval měděné o průřezu 4 mm² a délce 150 metrů

$$R_l = 2 \cdot \frac{\rho \cdot l}{S} = 2 \cdot \frac{1,68 \cdot 10^{-8} \cdot 150}{4 \cdot 10^{-6}} = 1,26 \Omega \quad (5.7)$$

Vstupní odpor měřícího členu ochrany

$$R_i = \frac{S_{och}}{I_{2n}^2} = \frac{0,1}{1^2} = 0,1 \Omega \quad (5.7)$$

Kde S_{och} jsou ztráty proudového měřicího členu ochrany,

I_{2n} je sekundární jmenovitý proud.

Skutečné břemeno je tedy

$$R_b = 1,26 + 0,1 + 0,02 = 1,38 \Omega \quad (5.7)$$

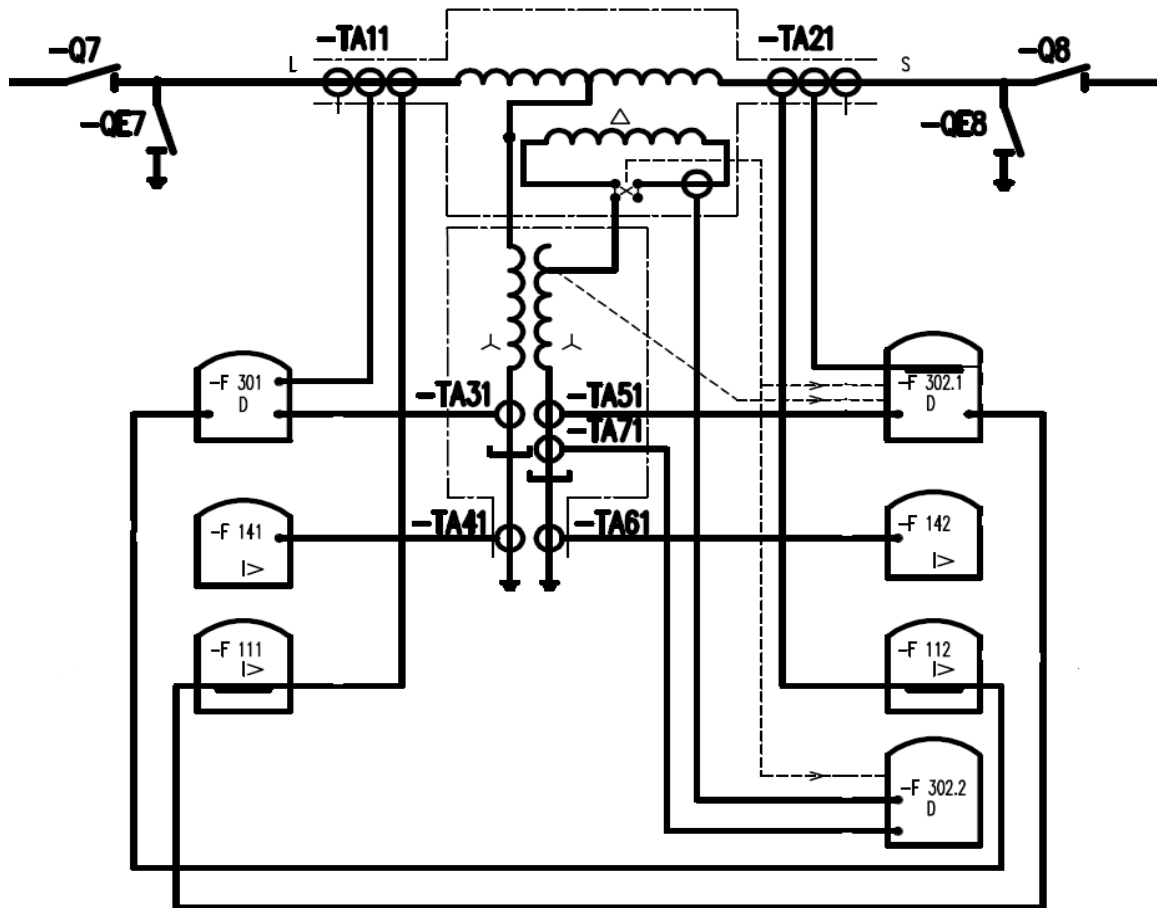
Pak skutečné nadproudový činitel

$$n = 20 \cdot \frac{0,1 + 30}{0,1 + 1,38} = 406,8 \quad (5.7)$$

Skutečný nadproudový činitel je tedy 406,8, to znamená, že přístrojový transformátor proudu je schopný přenést 406,8 násobek jmenovitého proudu s maximálně 5% chybou. To by se mohlo zdát, že je to problém pro proudové vstupy do ochrany, ale vzhledem k tomu, že převod měniče je 1500/1 A a maximální zkratový proud, který jsem vypočítal dle mě dostupných informací, vyšel 6,2365 kA tak sekundárním obvodem poteče maximálně 4,2 A. Tuto velikost proudu proudové vstupy do ochrany bez problému zvládnou, neboť podle manuálu vydrží až 20 A nepřetržitě dlouhou dobu. To znamená, že na straně zdroje a zátěže sériového transformátoru, jsou zvolené přístrojové transformátory vyhovující požadavkům ochrany 7UT87.

6 Nastavení ochranných zařízení

Pro nastavení ochrany SIPROTEC 7UT87 jsem použil program DIGSI 5 V6. Nebudu zde popisovat základní parametrizační úkony, které jsou třeba pro správnou funkci zařízení. Popíši nastavení jen nejdůležitějších parametrů, jako jsou rozdílová, nadproudová funkce, nastavení měřících bodů a stran vinutí PST.



Obrázek 23: Schéma zapojení ochran PST [10]

Obrázek 23 znázorňuje zapojení ochranných funkcí použitých při chránění transformátoru s posuvnou fází. Ochrana F301 je primární rozdílová ochrana. Ochrana F302.1 představuje sekundární rozdílovou ochranu PST. Ochrany F111 a F112 jsou záložní zkratové ochrany. Ochrany F141 a F142 jsou zemní ochranné funkce. Ochrana F302.2 představuje rozdílovou ochranou funkci, která chrání sekundární část budícího transformátoru a sekundární část sériového transformátoru. Ze zapojení měničů ochrany F302.2 je zřejmé, že u této ochranné funkce je nutné otáčení směru proudu při přepnutí AR switche.

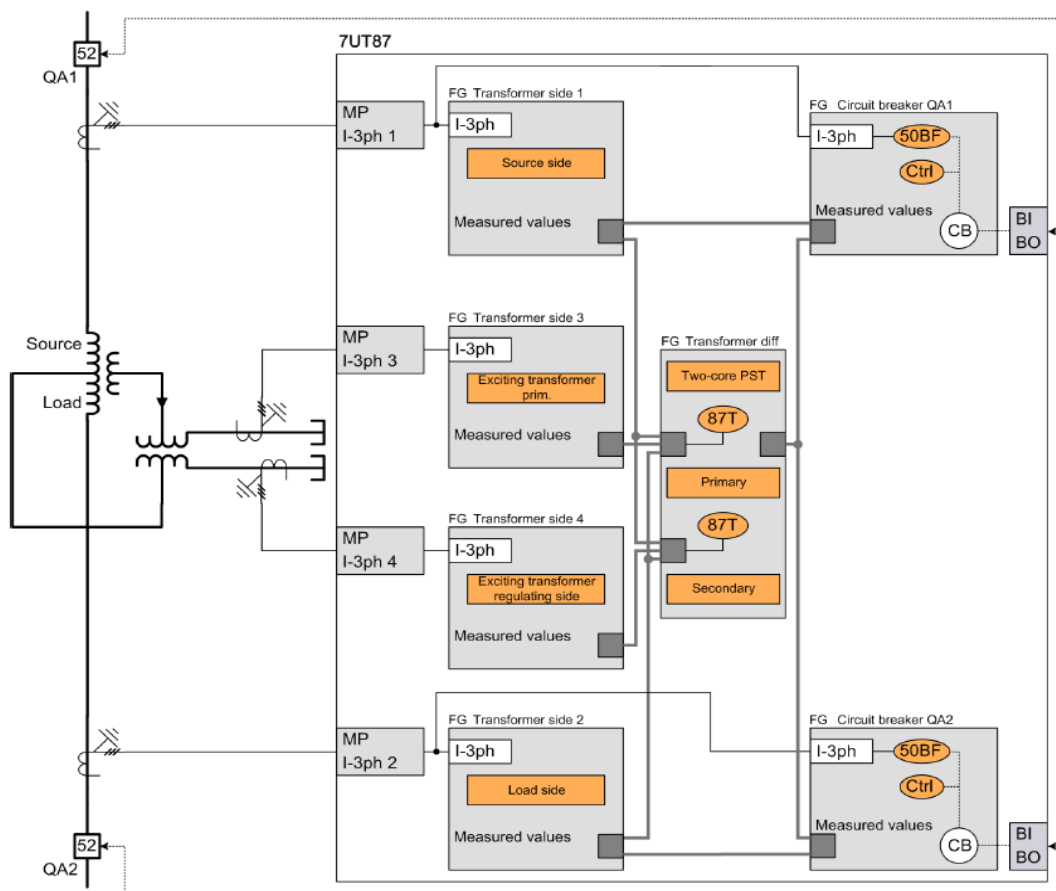
6.1 Nastavení rozdílových ochranných funkcí

6.1.1 Primární a sekundární rozdílová ochranná funkce

V ochranném zařízení 7UT87 jsem použil speciální funkci pro chránění PST, která se jmenuje TWO – CORE PST. Tato funkce mimo jiné obsahuje nastavení AR SWITCHE (přepínač směru). V této funkci je možné nastavení jedné ze tří možností při přepínání AR switche

(blokování rozdílové ochrany, blokování rozdílové ochrany a změna směru měření v mezi obvodu PST nebo AR switch vůbec neuvažovat). Já jsem zvolil blokování rozdílové funkce při přepínání AR switche, protože změna směru proudu v meziobvodu (obvod mezi sekundárním vinutím budiče a sekundárním vinutím sériového transformátoru) PST, kde je zapojen měřicí transformátor proudu pro rozdílovou funkci se neprojeví. Pro simulaci činnosti AR switche jsem použil přepínač stavů a binární vstupy BI 1.1 a BI 1.3.

Ve skutečnosti bude rozdílová ochrana zdvojená pro vyšší spolehlivost. To znamená, že budou použity dvě identické rozdílové ochrany 7UT87. Logické schéma funkce TWO – CORE PST je na obrázku 24.



Obrázek 24: logické schéma funkce Two - core PST[9]

Funkce TWO – CORE PST dále obsahuje nastavení pro dvě rozdílové funkce primární a sekundární. Rozdílová ochranná funkce pro chráněný PST bude použita čtyřbodová, obr. 23. Respektive jedná se o dvě funkce, primární rozdílová ochrana a sekundární rozdílová ochrana. Obě ochrany měří proud na straně zdroje i na straně zátěže PST. Změna nastává u budícího transformátoru, protože primární rozdílová ochrana měří primární stranu budiče a sekundární rozdílová ochrana měří sekundární stranu budiče. Jedná se tedy o dvě tříbodové

funkce, které však běží současně a mají dva společné body. Proto je PST celkově chráněn čtyřbodově.

Nejprve je nutné nastavit čtyři měřící body, které jsou využívány primární a sekundární ochranou. První bod se nazývá Transformer – side 1. Je v něm nastaven zdánlivý výkon 850 MVA, jmenovité napětí 420 kV, zapojení vinutí – do hvězdy, dále je nastaveno, že se jedná o stranu zdroje (Source side). Druhý měřící bod Transformer – side 2 je nastaven stejně jako první bod, ale s tím rozdílem, že je nastaveno, že se jedná o stranu zátěže (Load side). Třetí měřící bod Transformer – side 3 je nastaven jako primární vinutí budícího transformátoru. Výkon tohoto transformátoru jsem vypočetl ze štítku, kde jsou napsány jednotlivé proudy a napětí při dané odbočce. Výpočet jsem provedl pro střední odbočku, tedy

$$S = 3 \cdot U_f \cdot I = 3 \cdot 240335 \cdot 310,7 = 224,02 \text{ MVA.} \quad (6.1)$$

V ochraně bylo tedy nastaveno 224,02 MVA a napětí je stále 420 kV, vinutí je zapojeno do hvězdy. Čtvrtý měřící bod Transformer – side 4 má zdánlivý výkon také 224,02 MVA napětí je však 54,33 kV, což jsem vyčetl ze štítku sériového transformátoru.

General	
Rated values	
911.91.103	Rated apparent power: 850.00 MVA
911.91.102	Rated voltage: 420.00 kV
911.91.101	Rated current: 1168 A
Side data	
911.91.104	Winding configuration: Y (Wye)
911.91.130	Side number: Side 1
911.91.210	M3ph1 uses MeasP with ID: 1
911.91.215	CT mismatch M1-3ph 1: 1.284
Two-core PST	
911.91.167	Two-core side type: Source side
Tap changer	
911.91.44	Tap changer: None
Tap changer phase	
911.91.45	Tap changer: None

Obrázek 25: Nastavení měřícího bodu na straně zdroje

Tímto se dostávám k samotnému nastavení ochranných rozdílových funkcí. Při určování nastavení rozdílové ochranné funkce je nejprve nutné si uvědomit, že příliš citlivé nastavení není prakticky možné. Dle doporučení firmy Siemens se bere obecně pro

transformátory, které neobsahují přepínač odboček $I_{DIFF} = 0,2 I/I_{n0}$. PST sice obsahuje přepínač odboček, ale ten primární rozdílovou ochranu neovlivní. Toto tvrzení vyplývá ze schématu zapojení kde je vidět, že pro primární ochranu platí rovnice 4.1 (viz výše). Hodnota $I_{DIFF} = 0,2 I/I_{n0}$ respektuje magnetizační proudy transformátoru a magnetizační proudy PTP. Já jsem zvolil hodnotu pro nastavení primární rozdílové ochrany $I_{DIFF} = 0,25 I/I_{n0}$, to znamená, že jsem přičetl dalších 5% z důvodu pokrytí dalších chyb měření. Stejně nastavení rozdílového proudu jsem použil i pro sekundární rozdílovou funkci. Časové zpoždění je nastaveno na nulový čas jako u většiny rozdílových ochranných funkcí. Nulové časové zpoždění se u rozdílových ochranných funkcí nastavuje, protože selektivnost chránění je dána jistotou, že se porucha nachází v chráněném objektu.

6.1.2 Rozdílová ochranná funkce pro sekundární obvod budícího a sériového transformátoru

Pro chránění této části PST jsem podle doporučení firmy Siemens použil funkci Single – core PST. Tato rozdílová ochranná funkce nebude ve skutečnosti použita v zařízení 7UT87, ale bude použita v dalším zařízení, které je typu 7UT86. Já však tuto funkci odzkouším v rámci zařízení 7UT87. Na výsledky měření to nebude mít vliv, protože princip fungování této ochranné funkce zůstává stejný.

Ze zapojení této ochrany, které je znázorněno na obrázku 23 (jedná se o rozdílovou ochranu F302.2) je zřejmé, že je potřeba vyřešit otáčení proudu při přepnutí AR switche. Toto otočení směru proudu je řešeno přidáním přepínače odboček, který má nastaveny jen dvě odbočky. Je to odbočka číslo 1, která je nastavena na úhel 0° a odbočka číslo 2, která je nastavena úhel 180° . Na binární vstupy (BI 3.1 a BI 3.2), na kterých ochrana očekává informaci o číslu odbočky, jsou přivedeny signály z AR switche. To znamená, že při přepnutí AR switche dojde ke změně odbočky a ochranná funkce počítá s otočeným směrem proudu. Skutečný přepínač odboček, který je součástí sekundárního vinutí budícího transformátoru není v této funkci vůbec zohledněn. Je to proto, že ze schématu zapojení (obrázek 23) je zřejmé že při změně odbočky nedojde k rozvázání rovnováhy mezi proudem měřeným na sekundární straně sériového transformátoru a proudem měřeným na sekundární straně budícího transformátoru.

Při nastavení je podobně jako při nastavení primární a sekundární rozdílové funkce nutné nastavit měřící body. První bod Transformer – side 1 je zde stejný jako Transformer –

side 4 v nastavení primární a sekundární rozdílové funkce. Druhý měřicí bod Transformer – side 2 respektuje sekundární vinutí sériového vinutí. Toto vinutí je zapojeno do trojúhelníka. Napětí na střední odbočce je podle štítku 54,326 kV. Výkon tohoto transformátoru jsem vypočetl ze štítku, kde jsou napsány jednotlivé proudy a napětí přidané odbočce. Výpočet jsem provedl pro střední odbočku, tedy

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I = \sqrt{3} \cdot 54326 \cdot 1374,4 = 129,32 \text{ MVA.} \quad (6.2)$$

V ochraně jsem tedy nastavil sdružený výkon na hodnotu 129,32 MVA.

Samotné nastavení rozdílového proudu, při kterém působí ochrana, jsem zvolil $I_{DIFF} = 0,25 I/I_{n0}$ ze stejných důvodů jako v primární a sekundární rozdílové ochranné funkci. Časové zpoždění je také nastaveno na nulový čas.

6.2 Nastavení nadproudových ochranných funkcí

Použité nadproudové ochranné funkce při chránění PST jsou pouze záložní. Je použita zkratová ochrana na vstupu do PST a na výstupu sériového transformátoru. Dále záložní zemní nadproudová ochrana primární strany budícího vinutí a zemní ochrana sekundární strany budícího vinutí.

6.2.1 Záložní zkratová ochrana

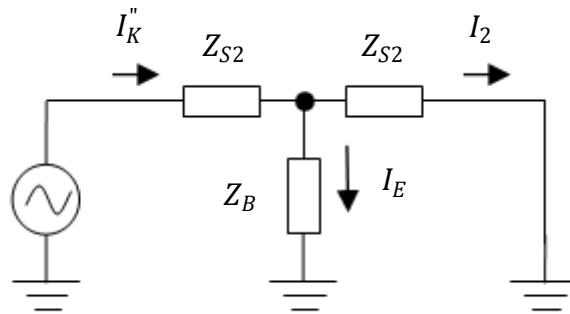
Tato ochranná funkce je zapojena na primární stranu sériového vinutí, viz obrázek 23 (ochrana F111). Na sekundární stranu sériového vinutí je také zapojena zkratová ochrana (F112), která je nastavena stejně jako F111.

Pro nastavení prahové hodnoty proudu pro nastavení nadproudové ochrany jsem využil výpočet zkratového proudu, který může procházet samotným PST. Tento výpočet se nachází v kapitole 5.2, viz výše. Pro nastavení jsem použil tu nejnižší hodnotu zkratového proudu, tedy 2,5 kA. Dle doporučení volím popudovou hodnotu na 2,3 kA. Protože se jedná o záložní ochranu a tyto poruchy by měla nejdříve vyřešit distanční ochrana, volím časové zpoždění mezi časové nastavení zóny 2 a zóny 3 distanční ochrany. Časové zpoždění zóny 2 je 0,6 vteřiny a časové zpoždění zóny 3 je 1,3 vteřiny. Pro záložní zkratovou ochranu volím časové zpoždění 1 vteřinu. Toto nastavení použiji v ochraně F111 i F112.

6.2.2 Nadproudová zemní ochrana primáru budícího transformátoru

Jedná se o nadproudovou ochrannou funkci, která je v obrázku 23 označena jako

F141. Pro nastavení této nadproudové ochranné funkce jsem provedl jednoduchou úvahu. Pokud by protékal zkratový proud PST tak se rozdělí v půlce primárního vinutí sériového transformátoru v poměru impedancí. První z těchto impedancí je poloviční impedance primárního vinutí sériového transformátoru a druhá je impedance primárního vinutí budícího transformátoru. Velikosti impedancí jsem vyčetl ze štítku PST.



Obrázek 26: Schéma výpočtu proudu I_E

$$I_E = I_K'' \cdot \frac{Z_{S2}}{Z_{S2} + Z_B} = 2500 \cdot \frac{27,6}{27,6 + 773,53} = 85,19 \text{ A} \quad (6.3)$$

Nadproudová ochrana byla tedy nastavena na 86 A. časové zpoždění volím také 1 vteřinu, protože i tyto poruchy by měla nejdříve řešit distanční ochrana.

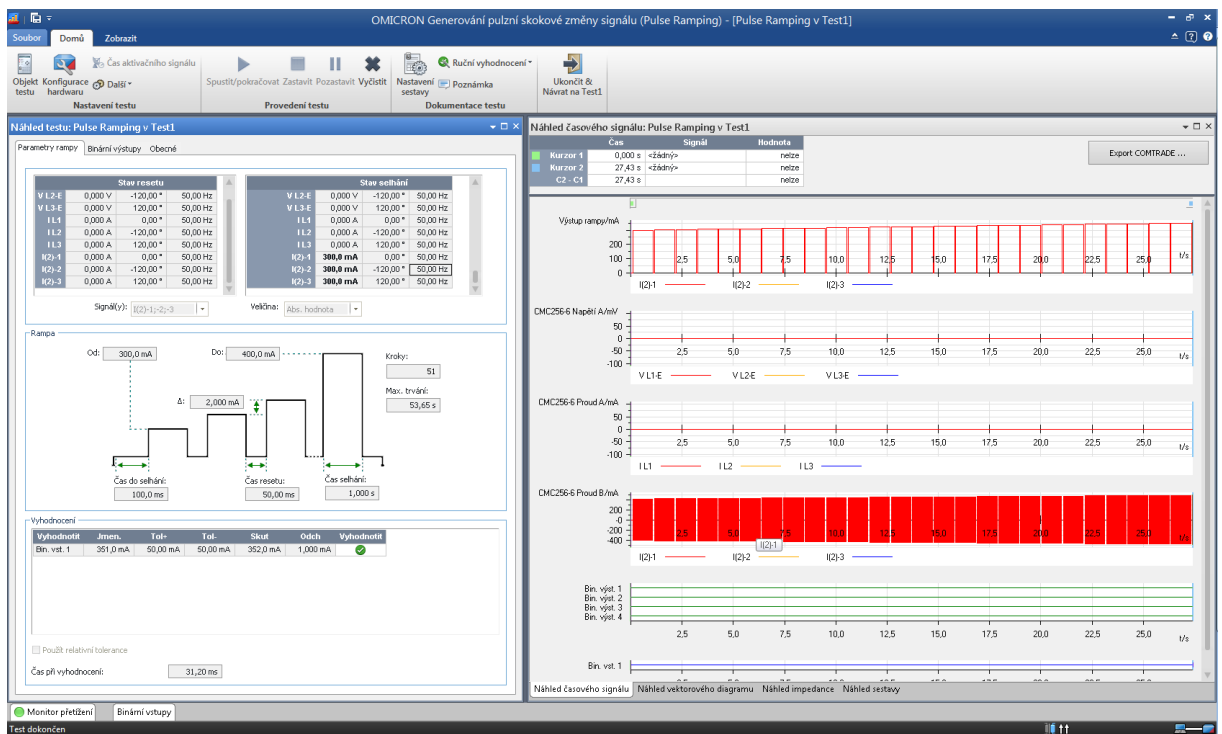
6.2.3 Nadproudová zemní ochrana sekundáru budícího transformátoru

Jedná se o nadproudovou ochrannou funkci, která je v obrázku 23 označena jako F142. Vzhledem k tomu, že přístrojový transformátor, na který je tato ochranná funkce připojena je na vyvedeném uzlu hvězdy, bude zde protékat poruchový proud pouze v případě nějaké nesymetrie. Například jednofázový zkrat v tomto meziobvodě (obvod mezi sekundárem budiče a sekundárem sériového vinutí). Z tohoto důvodu nastavím popudovou hodnotu na polovinu jmenovitého proudu, který protéká sekundárním vinutím budiče. Podle štítku protéká na střední odbočce vinutím 2380,6 A. Zemní nadproudová ochrana je tedy nastavena 1190,3 A. Časové zpoždění volím 0,2 s. Tento čas je oproti nadproudové zemní ochraně primáru budiče poměrně nízký. Tuto volbu jsem učinil, protože je to podle mě závažný poruchový stav, když dojde k poruše v tomto místě a navíc by měla tuto poruchu

řešit rozdílová ochrana F302.2. Takže je ochrana F142 částečně záloha za F302.2. Proto jsem zvolil takové nastavení časového zpoždění.

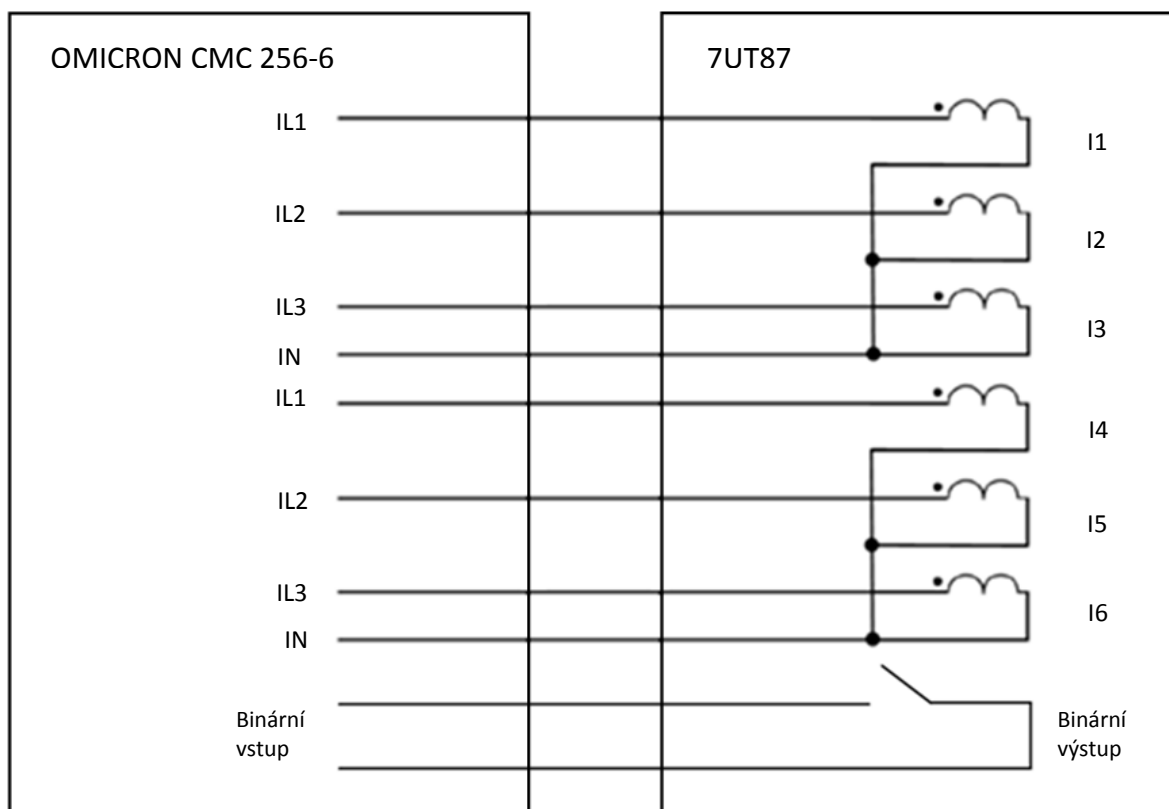
7 Ověření nastavených ochranných funkcí

Pro měření a zkoušení funkčnosti nastavených funkcí zařízení 7UT87 bylo použito testovací zařízení OMICRON CMC 256-6 a software Test universe, který zmiňovaný OMICRON CMC 256-6 ovládá. Pro měření popudových proudů jednotlivých ochranných funkcí jsem použil funkci Pulse ramping, která je součástí softwaru Test universe. Další možností bylo použít modul Quick CMC, ale v tomto měřícím modulu je potřeba hodnoty měnit ručně, což může způsobovat chyby měření, které se při použití funkce Pulse ramping eliminují.



Obrázek 27: funkce Pulse ramping

Ve funkci pulse ramping se nastavují jednotlivé parametry pulzů. Jako například šířka pulzu, šířka mezery mezi pulzy, výška prvního pulzu a výška koncového pulzu. Vždy je nutné nastavit výšku koncového pulzu větší než je očekávaná amplituda proudu, který vyvolá působení ochrany. Výsledkem zkoušky je amplituda proudu při, které došlo k působení a čas od náběžné hrany daného impulzu do vypnutí ochranou.



Obrázek 28: Přehledové schéma zapojení

Na obrázku 28 je naznačeno zapojení mezi testovacím zařízením OMICRON a proudovými vstupy do ochrany 7UT87. Na obrázku je konkrétně naznačeno zapojení pro měření vypínací charakteristiky rozdílové ochranné funkce. Typ zapojení se měnil s každým měření podle typu zkoušky ochranné funkce.

7.1 Primární a sekundární rozdílová funkce

Nejprve jsem ověřil hodnoty proudu, které vyvolají popud této ochranné funkce. Měření jsem provedl třífázově pro všechny čtyři měřící body (strana zdroje, zátěže, primár budiče, sekundár budiče). Vždy jsem zapojil proudový zdroj na dané měřící vstupy ochrany, které odpovídaly zkoušenému měřicímu bodu, a zvyšoval jsem proud do zapůsobení. Hodnotu proudu, při které ochrana zapůsobila, jsem zapsal a porovnal s vypočtenou hodnotou.

Výpočet prahových hodnot, při kterých by měla ochrana působit:

Jmenovitý primární proud na straně zdroje:

$$I_{NS1} = \frac{S_{NO}}{\sqrt{3} \cdot U_N} = \frac{850 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 420 \cdot 10^3} = 1168,4 \text{ A} \tag{7.1}$$

Jmenovitý sekundární proud na straně zdroje (proud v sekundárním obvodu PTP):

$$I_{NS2} = \frac{I_{NS1}}{I_{NPTP1}} = \frac{1168,4}{1500} = 0,779 \text{ A} \quad (7.2)$$

Prahová hodnota působení:

$$I = I_{DIFF} \cdot I_{NS2} = 0,25 \cdot 0,779 = 0,19475 \text{ A} \quad (7.3)$$

Jmenovitý primární proud na straně zátěže:

$$I_{NL1} = \frac{S_{NO}}{\sqrt{3} \cdot U_N} = \frac{850 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 420 \cdot 10^3} = 1168,4 \text{ A} \quad (7.4)$$

Jmenovitý sekundární proud na straně zátěže (proud v sekundárním obvodu PTP):

$$I_{NL2} = \frac{I_{NL1}}{I_{NPTP2}} = \frac{1168,4}{1500} = 0,779 \text{ A} \quad (7.5)$$

Prahová hodnota působení:

$$I = I_{DIFF} \cdot I_{NL2} = 0,25 \cdot 0,779 = 0,19475 \text{ A} \quad (7.7)$$

Jmenovitý primární proud na straně primáru budiče:

$$I_{NB1} = \frac{S_{NO}}{\sqrt{3} \cdot U_N} = \frac{850 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 420 \cdot 10^3} = 1168,4 \text{ A} \quad (7.8)$$

Sekundární proud na straně primáru budiče při jmenovitém proudu objektu (proud v sekundárním obvodu PTP):

$$I_{NB2} = \frac{I_{NB1}}{I_{NPTP3}} = \frac{1168,4}{750} = 1,56 \text{ A} \quad (7.9)$$

Prahová hodnota působení:

$$I = I_{DIFF} \cdot I_{NB2} = 0,25 \cdot 1,56 = 0,39 \text{ A} \quad (7.10)$$

Jmenovitý primární proud na straně sekundáru budiče:

$$I_{NR1} = \frac{S_R}{\sqrt{3} \cdot U_N} = \frac{224,02 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 54,33 \cdot 10^3} = 2380,6 \text{ A} \quad (7.11)$$

Jmenovitý sekundární proud na straně sekundáru budiče (proud v sekundárním obvodu PTP):

$$I_{NR2} = \frac{I_{NR1}}{I_{NPTP4}} = \frac{2380,6}{3000} = 0,794 \text{ A} \quad (7.12)$$

Prahová hodnota působení:

$$I = I_{DIFF} \cdot I_{NB2} = 0,25 \cdot \frac{0,794}{\sqrt{3}} = 0,115 \text{ A} \quad (7.13)$$

Měřeno třífázově						
	Vypočtená hodnota [A]	Změřená hodnota [A]	Časové zpoždění [ms]	Rozdíl v sek. hodnotách [A]	Rozdíl v prim. hodnotách [A]	Chyba[%]
Strana zdroje	0,1948	0,196	33	0,0012	1,8	0,62
Strana zátěže	0,1948	0,196	41,1	0,0012	1,8	0,62
Primár budiče	0,104	0,39	32,7	0,286	214,5	275,00
Sekundár budiče	0,115	0,116	32,1	0,001	3	0,87

Tabulka 3 Změřené náběžné hodnoty při třífázovém měření

Jak je vidět z tabulky, měření provedené pomocí funkce Pulse ramping je velmi přesné a vypočtené hodnoty se liší od změřených jen nepatrně. Časové zpoždění, které bylo změřeno, je způsobeno zpracováním signálu ochranou a zpožděním sepnutí relátka ochrany, protože podle nastavení by měla ochrana působit s nulovým časem.

Dále jsem ověřil funkčnost blokování sekundární rozdílové funkce při přepínání AR switche. Postup tohoto měření byl velmi jednoduchý. Nejprve jsem do zdroje poruchového proudu nastavil takové hodnoty, abych měl jistotu, že vyvolají působení sekundární rozdílové funkce. Poté jsem přepnul přepínačem binární vstupy, na kterých ochrana určovala chování AR switche a pustil poruchový proud. Po nastavenou dobu (12 vteřin) skutečně nedošlo k zapůsobení sekundární rozdílové funkce. Avšak při mezipoloze AR switche a uplynutí doby blokování (12 vteřin), přejde sekundární rozdílová funkce do alarmu a nezapůsobí ani po uplynutí doby blokování. Při přepínání AR switche je blokována pouze sekundární rozdílová funkce, primární rozdílové funkce se toto blokování netýká.

Jako další měření jsem chtěl provést vyhledání vypínací charakteristiky, ale toto měření nebylo možné provést z technických důvodů. Pro takovéto měření je totiž potřeba pouštět proud do všech čtyř bodů kde je zapojena ochrana. Bohužel mě byl k dispozici OMICRON se dvěma proudovými zdroji. Jako možnost se jevila zkouška jednofázově, ale problém byl v tom, že ochrana rozdílové a stabilizační proudu dopočítává i do ostatních fází a tento dopočet způsoboval chybné působení ochrany.

7.2 Rozdílová funkce pro sekundární obvod budícího a sériového transformátoru

Jak bylo zmíněno výše, pro chránění této části byla použita funkce Single -core PST. V této funkci byl také nastaven přepínač odboček, který respektoval otočení proudu v sekundárním obvodu sériového vinutí při přepnutí AR switche.

Sekundární strana budiče je již vypočtena, jsou to rovnice 7.11 až 7.13.

Jmenovitý primární proud sekundáru sériového transformátoru:

$$I_{NSS1} = \frac{S_{SS}}{\sqrt{3} \cdot U_N} = \frac{129,32 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 54,33 \cdot 10^3} = 1374,2 \text{ A} \quad (7.14)$$

Jmenovitý sekundární proud sekundáru sériového transformátoru (proud v sekundárním obvodu PTP):

$$I_{NSS2} = \frac{I_{NSS1}}{I_{NPTP1}} = \frac{1374,2}{1700} = 0,81 \text{ A} \quad (7.15)$$

Prahová hodnota působení (vinutí je zapojeno do trojúhelníku proto $\sqrt{3}$):

$$I = I_{DIFF} \cdot I_{NSS2} = 0,25 \cdot \sqrt{3} \cdot 0,81 = 0,351 \text{ A} \quad (7.16)$$

Měřeno třífázově						
AR switch pozice 1 = 0°						
	Vypočtená hodnota [A]	Změřená hodnota [A]	Časové zpoždění [ms]	Rozdíl v sek. hodnotách [A]	Rozdíl v prim. hodnotách [A]	Chyba[%]
Sekundár budiče	0,1985	0,2	29,8	0,0015	4,5	0,76
Sek. sériového transformátoru	0,351	0,352	33,1	0,001	3	0,28

Tabulka 4: Změřené náběžné hodnoty při třífázovém měření

Z tabulky 4 je vidět, že změřené hodnoty se od vypočtených příliš neliší.

Dále jsem provedl principiálně stejné měření, ale pouze jednofázově. V tomto případě podle manuálu je nutné vypočtené hodnoty působení vynásobit koeficientem 1,5.

Měřeno jednofázově							
AR switch pozice 1 = 0°							
Fáze	Měřený bod	Vypočtená hodnota [A]	Změřená hodnota [A]	Časové zpoždění [ms]	Rozdíl v sek. hodnotách [A]	Rozdíl v prim. hodnotách [A]	Chyba[%]
L1	Sekundár budiče	0,298	0,298	54,1	0,0000	0	0,00
	Sek. sériového transf.	0,527	0,526	47,7	0,0010	1,7	0,19
L2	Sekundár budiče	0,298	0,296	58,5	0,0020	6	0,67
	Sek. sériového transf.	0,527	0,526	44,3	0,0010	1,7	0,19
L3	Sekundár budiče	0,298	0,298	58	0,0000	0	0,00
	Sek. sériového transf.	0,527	0,526	54,6	0,0010	1,7	0,19

Tabulka 5: Změřené náběžné hodnoty při jednofázovém měření

Z tabulky 5 je zřejmé, že ani v tomto případě se vypočtené a změřené hodnoty příliš

neliší, ochrana měřila velmi přesně.

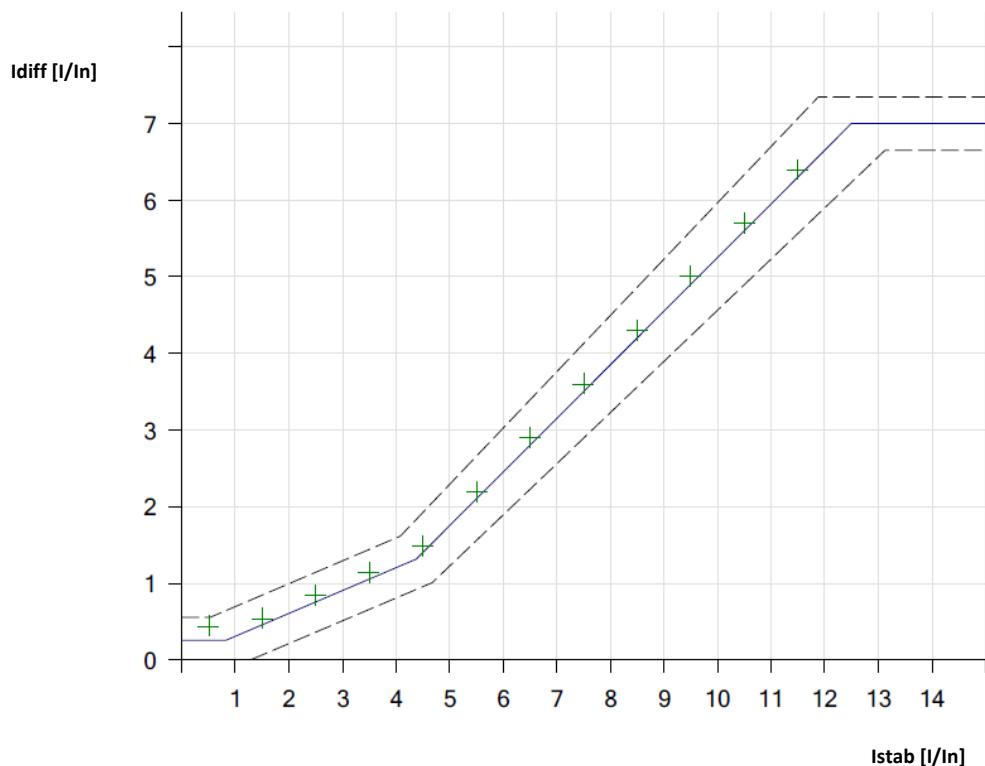
Měření pro přepnutou odbočku respektive AR switch v tomto měření nehraje roli, protože proud byl pouštěn vždy jen do jedné strany chráněného objektu. To znamená, že by hodnoty změřené pro 0° a 180° byly stejné. Jediné, co by se mohlo lišit, by byly časy zpoždění, které jsou však, jak bylo uvedeno výše, dány zpracováním signálu a zpožděním relátek ochrany a nikoliv ochranné funkce.

Dále jsem pomocí vyhledávacího testu ověřil nastavení vypínací charakteristiky. Tento test spočívá v nahrání vypínací charakteristiky do testovacího softwaru a následném zadání několika hodnot stabilizačního proudu, při kterých bude testovací zařízení hledat vypínací charakteristiku.

Istab [I/In]	Idiff jmenovitý [I/In]	Idiff skutečný [I/In]	Relativní chyba [%]	Absolutní chyba [I/In]
0,5	0,25	0,433	73,13	0,1828
1,5	0,45	0,532	18,26	0,0822
2,5	0,749	0,837	11,79	0,0883
3,5	1,047	1,136	8,43	0,0883
4,5	1,394	1,48	6,18	0,0862
5,5	2,095	2,187	4,39	0,092
6,5	2,796	2,903	3,83	0,1072
7,5	3,497	3,601	2,97	0,1037
8,5	4,198	4,3	2,42	0,1017
9,5	4,899	5,001	2,08	0,1017
10,5	5,6	5,701	1,8	0,1011
11,5	6,31	6,395	1,49	0,0938

Tabulka 6: Měření vypínací charakteristiky

Z tabulky 6 je patrné, že toto měření nebylo příliš přesné. Skutečná změřená charakteristika je zhruba o 0,1 I/In výše než bylo nastaveno v testovacím zařízení. Tato chyba byla pravděpodobně způsobena ne zcela identickým nastavením vypínací charakteristiky v testovacím zařízení a v ochranné funkci. To bylo dáno tím, že vypínací charakteristika se nastavuje odlišně ve zkušebním zařízení a v samotné rozdílové ochranné funkci. U prvního měřícího bodu byla zaznamenána chyba největší a to 0,1828 I/In. Takto velká odchylka je způsobena posunutím vypínací charakteristiky, které vyvolá ochrana při zapínacím rázu při zapnutí měření.



Obrázek 29: Měřená vypínací charakterista

Dále bylo zjištěno, že pokud se dostane přepínač odboček do mezipolohy, diferenciální ochrana se přepne do alarmu a zůstane neaktivní. Což je dle mého názoru v pořádku, protože se tímto způsobem ochrana vyvaruje chybnému působení, když dojde například jen ke ztrátě signálu o stavu přepínače odboček.

7.3 Záložní zkratová ochrana

Tuto záložní zkratovou funkci jsem odzkoušel na straně zdroje i na straně zátěže PST. Pro zdárné zkoušení této ochranné funkce, bylo nutné vypnout rozdílové ochranné funkce. Zkoušení probíhalo následovně, v testovacím softwaru Test universe jsem vytvořil zkušební funkci, ve které jsem nastavil několik hodnot proudů, kterými byla zkratová funkce zkoušena. Jednalo se vždy o několik hodnot v rozmezí 90 % až 120 % prahové hodnoty působení. Zkoušení bylo provedeno třífázově i jednofázově ve všech fázích.

Typ	Proud [A]	Očekávaný čas působení [s]	Skutečný čas působení [s]
L1-L2-L3	1,38	bez působení	bez působení
L1-L2-L3	1,45	bez působení	bez působení
L1-L2-L3	1,53	1	bez působení
L1-L2-L3	1,61	1	1,030
L1-L2-L3	1,68	1	1,032
L1-L2-L3	1,84	1	1,028
L1	1,38	bez působení	bez působení
L1	1,45	bez působení	bez působení
L1	1,53	1	1,051
L1	1,61	1	1,028
L1	1,68	1	1,032
L1	1,84	1	1,027
L2	1,38	bez působení	bez působení
L2	1,45	bez působení	bez působení
L2	1,53	1	1,077
L2	1,61	1	1,028
L2	1,68	1	1,026
L2	1,84	1	1,024
L3	1,38	bez působení	bez působení
L3	1,45	bez působení	bez působení
L3	1,53	1	1,043
L3	1,61	1	1,024
L3	1,68	1	1,027
L3	1,84	1	1,027

Tabulka 7: Změřené hodnoty při zkoušení zkratové ochranné funkce - Strana zdroje

V tabulce 7 jsou zaznamenány hodnoty zkušební proud, časy očekávaného zapůsobení zkratové funkce a čas skutečného zapůsobení. Prahová hodnota, při které by tato zkratová funkce měla zapůsobit je 1,53 A a její časové zpoždění by mělo být jedna vteřina. Při měření třífázově při prahové hodnotě je vidět, že ochranná funkce nezapůsobila. Bylo to způsobeno tím, že hodnota 1,53 A je přesně prahová hodnota, při které se ochrana rozhoduje, zda zapůsobí či nikoli. A když je hodnota proudu takto na hraně, není jisté, zda ochrana zapůsobí. Ostatní změřené hodnoty jsou v pořádku.

Typ	Proud [A]	Očekávaný čas působení [s]	Skutečný čas působení [s]
L1-L2-L3	1,38	bez působení	bez působení
L1-L2-L3	1,45	bez působení	bez působení
L1-L2-L3	1,53	1	bez působení
L1-L2-L3	1,61	1	1,029
L1-L2-L3	1,68	1	1,027
L1-L2-L3	1,84	1	1,023
L1	1,38	bez působení	bez působení
L1	1,45	bez působení	bez působení
L1	1,53	1	1,042
L1	1,61	1	1,029
L1	1,68	1	1,027
L1	1,84	1	1,026
L2	1,38	bez působení	bez působení
L2	1,45	bez působení	bez působení
L2	1,53	1	bez působení
L2	1,61	1	1,025
L2	1,68	1	1,032
L2	1,84	1	1,026
L3	1,38	bez působení	bez působení
L3	1,45	bez působení	bez působení
L3	1,53	1	bez působení
L3	1,61	1	1,024
L3	1,68	1	1,030
L3	1,84	1	1,025

Tabulka 8: Změřené hodnoty při zkoušení zkratové ochranné funkce - Strana zátěže

V tabulce 8, která zobrazuje hodnoty z měření zkratové ochranné funkce na straně zátěže PST, je vliv rozhodovací oblasti kolem prahové hodnoty také vidět. Dokonce se projevil vícekrát než při měření na straně zdroje.

7.4 Nadproudová zemní ochrana primáru budícího transformátoru

Měření této ochranné funkce jsem provedl podobně jako zkoušku zkratové ochrany. Pro toto měření bylo nutné zapojit měřící zařízení na svorky ochrany, které slouží pro měření zemních proudů. Znovu jsem nastavil hodnoty v rozmezí 90 % až 120 % prahové hodnoty působení.

Proud [A]	Očekávaný čas působení [s]	Skutečný čas působení [s]
0,108	bez působení	bez působení
0,114	bez působení	bez působení
0,120	1	1,053
0,126	1	1,028
0,132	1	1,024
0,138	1	1,025
0,144	1	1,027

Tabulka 9: Nadproudová zemní ochrana primáru budícího transformátoru

V tabulce 9 jsou zaznamenány hodnoty zkušební proud, časy očekávaného zapůsobení nadproudové funkce a čas skutečného zapůsobení. Prahová hodnota, při které by tato zemní nadproudová funkce měla zapůsobit je 0,12 A a její časové zpoždění by mělo být jedna vteřina. Při tomto měření jsem ověřil, že ochrana se chová přesně podle předpokladů.

7.5 Nadproudová zemní ochrana sekundáru budícího transformátoru

Toto měření probíhalo stejně jako měření zemní ochranné funkce primární strany budiče, pouze bylo měřící zařízení přepojeno na odpovídající svorky.

Proud [A]	Očekávaný čas působení [s]	Skutečný čas působení [s]
0,36	bez působení	bez působení
0,38	bez působení	bez působení
0,40	0,2	0,235
0,42	0,2	0,227
0,44	0,2	0,221
0,46	0,2	0,226
0,48	0,2	0,225

Tabulka 10: Nadproudová zemní ochrana sekundáru budícího transformátoru

V tabulce 10 jsou zaznamenány hodnoty zkušební proud, časy očekávaného zapůsobení nadproudové funkce a čas skutečného zapůsobení. Prahová hodnota, při které by tato zemní nadproudová funkce měla zapůsobit je 0,2 A a její časové zpoždění by mělo být 200 ms. Při tomto měření se ochranná funkce také chovala podle předpokladů, nedocházelo ani k nepřesnostem působení kolem prahové hodnoty působení.

8 Závěr

Cílem práce bylo navrhnout systém chránění pro transformátor s posuvnou fází. Před tím než jsem se věnoval návrhu chránění, jsem popsal a vysvětlil princip fungování transformátorů s posuvnou fází. Dále jsem popsal důvody, proč se čím dál častěji objevují v elektrizačních soustavách a také jsem zmínil několik reálných aplikací v Evropě.

Pro návrh systému chránění jsem si vybral transformátor s posuvnou fází, který bude umístěn v České republice, konkrétně v rozvodně Hradec u Kadaně. Tento stroj by měl bránit nežádoucím přetokům činného výkonu z Německa do České republiky. Do provozu by měl být uveden do konce roku 2016. V době, kdy jsem psal tuto diplomovou práci, probíhaly jednání mezi firmami SIEMENS, ČEPS a TAMINI (výrobce stroje), to znamená, že se několikrát změnil koncept, jak bude řešen systém chránění pro tento transformátor s posuvnou fází. Navržený systém chránění popsaný v této práci jsem vytvořil ve spolupráci s odborným konzultantem, tak jak se nám jevil jako správný a v konečné fázi nemusí odpovídat systému chránění, který bude nakonec použit ve skutečnosti.

Návrh systému chránění jsem provedl v souladu doporučení organizace IEEE a její publikace [6] a podle doporučení konzultanta z praxe. Pro chránění PST jsem použil rozdílové ochranné funkce a záložní zkratové ochranné funkce. Tyto ochranné funkce byly nastaveny a nahrány do multifunkčního ochranného relé 7UT87 pomocí programu DIGSI 5 V6. Software DIGSI 5 V6 a ochranné relé 7UT87 jsou produkty firmy SIEMENS. Jako hlavní ochranná rozdílová funkce byla použita funkce TWO - CORE PST, která je obsažena v parametrizačním programu DIGSI. Tato funkce v sobě obsahuje dvě rozdílové ochranné funkce a to primární a sekundární rozdílovou funkci. Primární ochranná funkce chrání primární strany sériového transformátoru a primár budiče. Sekundární ochranná funkce je zapojena na primární strany sériového transformátoru a sekundár budiče. Další rozdílová ochranná funkce byla použita pro chránění obvodu mezi sekundárem budiče a sekundárem sériového transformátoru. V této rozdílové ochraně už musel být zohledněn přepínač směru proudu, tzv. AR switch. Dále byly použity zkratové ochranné funkce na vstupu a výstupu PST. Jako další ochranné funkce byly použity zemní nadproudové ochranné funkce ve vyvedeném uzlu primáru budiče a sekundáru budiče. Všechny výše uvedené ochranné funkce byly vyzkoušeny a výsledky měření okomentovány, viz kapitola 7. Z technických důvodů nemohla být ověřena vypínací charakteristika funkce TWO - CORE PST, protože na tuto zkoušku jsou potřeba celkem tři

zdrojů třífázového proudu a zařízení, kterým byly zkoušky prováděny, zvládlo pouze dva třífázové proudy. Proto u této funkce byly vyzkoušeny pouze náběžné hodnoty z každé ze čtyř stran. U rozdílové ochrany, která chrání obvod mezi sekundárem budiče a sekundárem sériového transformátoru, bylo zjištěno při měření vypínací charakteristiky, že vždy na počátku měření dochází k navýšení rozdílového proudu, při kterém ochrana působí. Dle mého názoru to bylo způsobeno ochranným relé, které při proudovém rázu zvyšuje rozdílový proud (aby nedocházelo k výpadkům při zapínání stroje). Nadproudové a zkratové ochranné funkce se chovaly podle předpokladů. Pouze kolem prahové hodnoty působení se stalo, že ochrana nezapůsobila. Toto chování je dáno faktem, že kolem prahové hodnoty má ochranná funkce toleranci kde se rozhoduje, zda došlo k poruše či nikoliv.

Tuto diplomovou práci by bylo vhodné doplnit o zkoušku vypínací charakteristiky primární a sekundární rozdílové ochranné funkce, na které je potřeba více proudových zdrojů. A celkový systém chránění by bylo vhodné rozšířit o distanční ochrannou funkci. Což by mohlo být zajímavé z parametrizačního a zkušebního hlediska, neboť jak je známo PST mění impedanci sítě, ve které je zapojen.

9 Použitá literatura

- [1] KOREJČÍK, Michal. NÁVRH TRANSFORMÁTORU S REGULACÍ FÁZE PRO LABORATORNÍ VÝUKU. BRNO, 2012. Diplomová práce. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. Martin Paar, Ph.D
- [2] PTÁČEK, Jiří. REGULACE TOKŮ VÝKONŮ V PROPOJENÝCH ELEKTRIZAČNÍCH SOUSTAVÁCH [ONLINE]. Brno, 2004 [cit. 2015-03-02]. Disertační práce. VUT Brno.
- [3] GRÜNBAUM, Rolf, Mojtaba NOROOZIAN a Björn THORVALDSSON. FACTS – powerful systems for flexible power transmission: ABB Review. [online]. 1999, s. 4-17 [cit. 2014-07-30]. Dostupné z: [http://www05.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/b0f2c8c94b48a6bcc1256fda003b4d42/\\$file/facts_%20eng.%20abb%20review.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/b0f2c8c94b48a6bcc1256fda003b4d42/$file/facts_%20eng.%20abb%20review.pdf)
- [4] Verboomen, J.; Van Hertem, D.; Schavemaker, P.H.; Kling, W.L.; Belmans, R., "Phase shifting transformers: principles and applications," *Future Power Systems, International Conference on*, vol., no., pp.6 pp.,6, 18-18 Nov. 2005 doi: 10.1109/FPS.2005.204302
- [5] ČEPS a.s. [online]. [cit. 2015-05-02]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/CZE/Stranky/default.aspx>
- [6] IBRAHIM, M., F.P. PLUMPTRE, J. BURGER, H. CANDIA, A.A. GIRGIS, J. GOSALA, R. HEDDING, D. JAMISON, D. DAWSON, H. KING, G.P. MOSKOS, T. NAPIKOSTI, J. POSTFOROOSH a C.R. SUFANA. 1 Protection of Phase Angle Regulating Transformers. 1999 [cit. 2015-05-02].
- [7] GAJIC, Z., M. PODBOJ, B. TRAVEN a A. KRAŠOVEC. WHEN EXISTING RECOMMENDATIONS FOR PST PROTECTION CAN LET YOU DOWN. [online]. 2012 [cit. 2015-05-02]. Dostupné z: <http://80.ieeeexplore.ieee.org/dialog/cvut.cz/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6227> 526
- [8] SOUČEK, J. Dimenzování přístrojových transformátorů pro digitální ochrany. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 81 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
- [9] SIEMENS AG. SIPROTEC 5 Transformer Differential Protection 7UT82, 7UT85, 7UT86, 7UT87. [online]. 2014, s. 1470 [cit. 2015-05-02]. Dostupné z: <http://w3.siemens.com/smartgrid/global/en/products-systems-solutions/protection/transformer-differential-protection/pages/7ut87.aspx>
- [10] VÍT, a DLASK. 2014. Blokované schéma ochran PST.

10 Seznam příloh

Příloha 1: Multifunkční relé 7UT87

Příloha 2: Testovací zařízení OMICRON CMC 256-6

Příloha 3: Tabulka ze štítku budícího transformátoru

Příloha 4: Tabulka ze štítku sériového transformátoru



Příloha 1: Multifunkční relé 7UT87



Příloha 2: Testovací zařízení OMICRON CMC 256-6

O.L.T.C.			EXCITING line DU,DV,DW		REGULATION line RU,RV,RW		Z% referred to 850 MVA	
Position	Preselector	Selector	Phase voltage (V)	Phase current (A)	Phase voltage (V)	Phase current (A)		
33	+	17	234206	605.5	61130	2319.9	(*)	
32		16	234691	587.8	59343	2324.7	(*)	
31		15	235164	570.0	57544	2329.3	(*)	
30		14	235624	552.1	55735	2333.9	(*)	
29		13	236070	534.0	53915	2338.3	(*)	
28		12	236504	515.9	52085	2342.6	(*)	
27		11	236924	497.7	50245	2346.8	(*)	
26		10	237331	479.4	48395	2350.8	(*)	
25		9	237723	461.0	46536	2354.7	(*)	
24		8	238101	422.5	44668	2358.4	(*)	
23		7	238465	423.9	42791	2362.0	(*)	
22		6	238814	405.2	40906	2365.5	(*)	
21		5	239149	386.4	39013	2368.8	(*)	
20		4	239468	367.6	37112	2372.0	(*)	
19		3	239773	348.7	35203	2375.0	(*)	
18		2	240061	329.7	33287	2377.9	(*)	
17c		1	240335	310.7	31365	2380.6	(*)	
17b		K	240335	310.7	31365	2380.6	(*)	
17a		17	240335	310.7	31365	2380.6	(*)	
16		16	240592	291.6	29436	2383.1	(*)	
15		15	240834	272.4	27501	2385.5	(*)	
14		14	241060	253.2	25561	2387.7	(*)	
13		13	241269	233.9	23615	2389.8	(*)	
12		12	241463	214.6	21665	2391.7	(*)	
11		11	241639	195.2	19710	2393.5	(*)	
10		-	10	241800	175.8	17750	2395.1	(*)
9		9	241944	156.4	15788	2396.5	(*)	
8		8	242071	136.9	13821	2397.8	(*)	
7		7	242181	117.4	11852	2398.9	(*)	
6		6	242274	97.9	9881	2399.8	(*)	
5		5	242351	78.3	7907	2400.5	(*)	
4		4	242410	58.8	5932	2401.1	(*)	
3		3	242453	39.2	3955	2401.5	(*)	
2	2	242479	19.6	1978	2401.8	(*)		
1	1	242487	0	0	0	(*)		

Příloha 3: Tabulka ze štítku budícího transformátoru

O.L.T.C. EXCITING UNIT			SERIES		EXCITER	
Position	Preselector	Selector	Phase voltage (V)	Phase current (A)	Phase voltage (V)	Phase current (A)
33	+	17	2x62830	1168.4	105881	1339.4
32		16	2x60993	1168.4	102785	1342.1
31		15	2x59144	1168.4	99669	1344.8
30		14	2x57285	1168.4	96535	1347.5
29		13	2x55414	1168.4	93383	1350.0
28		12	2x53533	1168.4	90214	1352.5
27		11	2x51642	1168.4	87027	1354.9
26		10	2x49741	1168.4	83823	1357.2
25		9	2x47831	1168.4	80603	1359.5
24		8	2x45911	1168.4	77368	1361.6
23		7	2x43982	1168.4	74117	1363.7
22		6	2x42044	1168.4	70852	1365.7
21		5	2x40098	1168.4	67572	1367.6
20		4	2x38144	1168.4	64279	1369.5
19		3	2x36182	1168.4	60974	1371.2
18		2	2x34213	1168.4	57656	1372.9
17c		1	2x32237	1168.4	54326	1374.4
17b		K	2x32237	1168.4	54326	1374.4
17a		17	2x32237	1168.4	54326	1374.4
16		16	2x30255	1168.4	50985	1375.9
15		15	2x28266	1168.4	47634	1377.3
14		14	2x26272	1168.4	44273	1378.6
13		13	2x24272	1168.4	40903	1379.8
12		12	2x22267	1168.4	37524	1380.9
11		11	2x20258	1168.4	34138	1381.9
10		10	2x18244	1168.4	30745	1382.8
9		9	2x16227	1168.4	27345	1383.6
8		8	2x14206	1168.4	23939	1384.3
7		7	2x12182	1168.4	20529	1385.0
6		6	2x10155	1168.4	17114	1385.5
5		5	2x 8127	1168.4	13695	1385.9
4		4	2x 6097	1168.4	10274	1386.3
3		3	2x 4065	1168.4	6851	1386.5
2	2	2x 2033	1168.4	3426	1386.7	
1	1	0	1168.4	0	1386.7	

Příloha 4: Tabulka ze štítku sériového transformátoru