VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGIMEERING

CHRÁNĚNÍ TRANSFORMÁTORU ROZDÍLOVOU OCHRANOU

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE JAROSLAV JÁRA
AUTHOR

BRNO 2008

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGIMEERING

CHRÁNĚNÍ TRANSFORMÁTORU ROZDÍLOVOU OCHRANOU

PROTECTION OF TRANSFORMER BY DIFFERENTIAL RELAY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE JAROSLAV JÁRA
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE doc. Ing. PETR TOMAN, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2008

VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Jára Jaroslav
Ročník: 3

ID: 74550
Akademický rok: 2007/08

NÁZEV TÉMATU:

Chránění transformátoru rozdílovou ochranou

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Poruchy na transformátorech
2. Chránění transformátorů
3. Návrh rozdílové ochrany pro transformátor 110 kV

DOPORUČENÁ LITERATURA:
podle pokynů vedoucího

Termín zadání: 17.12.2007

Termín odevzdání: 4.06.2008

Vedoucí projektu: doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:
Autor semestrální práce nesmí při vytváření semestrální práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

LICENČNÍ SMLOUVA
POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení:	Jaroslav Jára
Bytem:	Renneská třída 24, 63900, Brno - Štýřice
Narozen/a (datum a místo):	8.9.1955, Brno

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1
Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):
   - ☐ disertační práce
   - ☐ diplomová práce
   - ☒ bakalářská práce
   - ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako ....

(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP:	Chránění transformátoru rozdílovou ochranou
Vedoucí/ školitel VŠKP:	Doc. Ing. Petr Toman, Ph. D.
Ústav:	Ústav elektroenergetiky
Datum obhajoby VŠKP:	

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v*:

- ☒ tištěné formě – počet exemplářů 1
- ☒ elektronické formě – počet exemplářů 1

* hodící se zaškrtněte

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizovaní výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
   - □ ihned po uzavření této smlouvy
   - □ 1 rok po uzavření této smlouvy
   - □ 3 roky po uzavření této smlouvy
   - □ 5 let po uzavření této smlouvy
   - □ 10 let po uzavření této smlouvy

   (z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísni a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: …………………………………….

……………………………………..   ……………………………………………

Nabyvatel   Autor

Bibliografická citace mé práce:

JÁRA, J. Chránění transformátorů. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky, 2008, 67s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Chránění transformátoru rozdílovou ochranou jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne …………………………… Podpis autora ………………………………..

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je zaměřena na poruchy transformátorů, princip chránění těchto transformátorů a návrhem rozdílové ochrany transformátoru.

První část práce se zabývá poruchami transformátorů, rozdělením těchto poruch, druhy zkratů a zemních spojení, příčinami vzniku zkratů a následky poruch olejových transformátorů.

Druhá část bakalářské práce je obecný pohled na problematiku ochran. Zde jsou popsány funkce ochran, požadavky na tyto ochrany jako je selektivita, rychlost působení, citlivost a přesnost, spolehlivost, třídění ochran, způsoby chránění podle druhu poruchy a velikosti jmenovitého výkonu transformátorů. Dále je tu popsán princip diferenciálních ochran. Jsou zde ukázky ochran dnes už historických a současných moderních ochran.

Třetí část popisuje návrh rozdílové ochrany transformátoru. Obsahuje výpočet zkratových poměru na transformátoru, příklad výpočtu třífázového zkratu, kontrolu přístrojových transformátorů proudu, vlastní nastavení ochrany a zhodnocení nastavení.

KLÍČOVÁ SLOVA: poruchy transformátorů, zkraty, ochrany, třídění ochran, způsoby chránění transformátorů, diferenciální ochrany, magnetizační proudy, vnitřní zkraty, vnější zkraty, nadproudové číslo, přístrojový transformátor proudu.

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with transformer failures and principles of their protection and a design of differential protection of transformers.

The first part details with transformer failures, classification of these failures, short-circuit ground faults types, causes of the short-circuit occurrences and consequences of oil-transformer failures.

The second part deals with problems of protection in general with the description of protection function, requirements of protection such as selectivity, speed of response, sensitivity and protection classification, methods of protection according to failure type - size of nominal power of transformers. It further describes principle of differential protections. Finally there are previews of historical and modern protections.

The third part describes a design of differential protection of transformers. It includes short-circuit ratio calculation, example of three phase short-circuit calculation, CT ratio check, actual setting of protection and setting evaluation.

KEY WORDS: transformer failures, short -circuit, protectien, protection clossification, methods of protection transformers, diterential protection, magnetising current, internal faults, through faults, instrument security factor, CT ratio.

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ 13

SEZNAM TABULEK 14

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK 15

1 ÚVOD A CÍL PRÁCE 16

2 PORUCHY TRANSFORMÁTORŮ 17

2.1 PRŮCHOZÍ PORUCHY 17

2.2 VNITŘNÍ PORUCHY 17

3 ZKRATY A ZEMNÍ SPOJENÍ 18

3.1 DRUHY ZKRATŮ A ZEMNÍCH SPOJENÍ 18

3.2 PŘÍČINY VZNIKU ZKRATŮ 18

3.3 VÝZNAM ZKRATOVÝCH VÝPOČTŮ 19

3.4 ZKRAT V TRANSFORMÁTORU 20

4 PRINCIP OCHRAN OBECNĚ 21

4.1 POŽADAVKY KLADENÉ NA OCHRANY 21

4.2 PORUCHOVÉ STAVY 23

4.3 TŘÍDĚNÍ OCHRAN 23

5 OCHRANY TRANSFORMÁTORŮ 24

5.1 VYBAVENÍ TRANSFORMÁTORŮ OCHRANAMI 24

5.2 PLYNOVÉ RELÉ 25

5.3 NÁDOBOVÁ OCHRANA 26

5.4 ROZDÍLOVÁ (DIFERENCIÁLNÍ) OCHRANA TRANSFORMÁTORU 26

5.4.1 POŽADAVKY NA MĚNIČE PRO STABILIZOVANOU DIFERENCIÁLNÍ OCHRANU 27

5.4.2 ZAPOJENÍ OCHRANY, PŘEVOD A HODINOVÝ ÚHEL 28

5.4.3 HISTORIE DIFERENCIÁLNÍCH OCHRAN V ČESKOSLOVENSKU 29

6 VÝBĚR ROZDÍLOVÉ OCHRANY TRANSFORMÁTORU 33

6.1 POROVNÁNÍ VLASTNOSTÍ VYBRANÝCH ROZDÍLOVÝCH OCHRAN [9] 34

6.1.1 STANOVENÍ ZÁKLADNÍCH POŽADAVKŮ NA ROZDÍLOVÉ OCHRANY PODLE K. PROCHÁZKY, ROK 1985 [10] 34

6.1.2 ROZDÍLOVÁ OCHRANA ABB TYPU SPAD [9] 34

6.1.3 ROZDÍLOVÉ OCHRANY TYPU KBCH FIRMY ALSTOM [9] 35

6.1.4 ROZDÍLOVÁ OCHRANA FIRMY SIEMENS TYPU 7UT [9] 36

6.2 VÝSLEDEK POROVNÁNÍ OCHRAN 37

7 NÁVRH ROZDÍLOVÉ OCHRANY TRANSFORMÁTORU 38

7.1 PARAMETRY CHRÁNĚNÉHO TRANSFORMÁTORU 38

7.2 MĚŘÍCÍ TRANSFORMÁTORY PROUDU 39

7.2.1 TOPOLOGIE DVOUVINUŤUVÉHO TRANSFORMÁTORU [8] 39

7.2.2 STANOVENÍ PŘEVODU PROUDOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ 39

7.2.3 NADPROUDOVÉ ČÍSLO 40

7.3 VÝPOČTY ZKRATOVÝCH POMĚRŮ NA CHRÁNĚNÉM TRANSFORMÁTORU ... 42
7.3.1 ZJEDNODUŠENÝ VÝPOČET ... 42
7.3.2 VÝPOČET ZA POMOCÍ POČÍTAČOVÉHO PROGRAMU ... 46
7.4 NASTAVENÍ OCHRANNÉ FUNKCE ... 48
7.4.1 NASTAVENÍ OCHRANY ... 49
7.5 POROVNÁNÍ NASTAVENÍ ... 50
8 ZÁVĚR ... 51
8.1 SOUČASNÝ STAV ... 51
8.2 ZÁVĚRY PRÁCE A JEJÍ PŘÍNOS ... 51
8.3 VÝZNAM A VYUŽITÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ ... 51
8.4 NÁVRH DALŠÍHO POSTUPU ... 52
POUŽITÁ LITERATURA ... 53
PŘÍLOHA A SCHÉMA ZAPOJENÍ ROZDÍLOVÉ OCHRANY PTP ... 54
PŘÍLOHA B DIFERENCIÁLNÍ OCHRANA TRANSFORMÁTORU 7UT512 ... 57
PŘÍLOHA C 7UT612 MANUAL; C53000-G1176-C148-1 [12] ... 66
PŘÍLOHA D PŘEHLEDOVÉ SCHÉMA PAROPLYNOVÉ TEPLÁRNY ČERVENÝ MLÝN ... 67

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 2.1 Olejový transformátor..17
Obrázek 3.1 Požár transformátoru [7] 20
Obrázek 5.1 Princip plynového relé[5]...25
Obrázek 5.2 Nádobová ochrana [5]...26
Obrázek 5.3 Diferenciální proud Id = I1 - I2 [3] 26
Obrázek 5.4 Vyrovnání hodinového úhlu při zapojení Y/D [5] 29
Obrázek 5.5 Elektromechanická diferenciální ochrana PTP od firmy Křižík, n.p. 30
Obrázek 5.6 Elektromechanická diferenciální ochrana R30, n.p. ZPA Trutnov..........................31
Obrázek 5.7 Elektronická diferenciální ochrana RAX1, n.p. ZPA Trutnov 32
Obrázek 6.1 Stabilizační charakteristika rozdílové ochrany[9] 36
Obrázek 6.2 Diferenciální ochrana 7UT612[11]...37
Obrázek 7.1 Transformátot MKA 20 - 40MVA, 121/6,3kV, Teplárny Brno a.s. - PČM 38
Obrázek 7.2 Náhradní schéma pro souslednou složkovou soustavu...42
Obrázek 7.3 Zkratové proudy při trojfázových zkratech 44
Obrázek 7.4 Náhradní schéma pro zpětnou složkovou soustavu 45
Obrázek 7.5 Zkratové proudy při dvoufázových 46
Obrázek 7.6 Skutečná charakteristika nastavované rozdílové ochrany 7UT612........................49

SEZNAM TABULEK

Tabulka 3.1 Přibližná četnost výskytu různých druhů zkratu [3]..19

Tabulka 5.1 Přehled poruch na transformátorech [5]..24

Tabulka 7.1 Tabulka vypočítaných zkratových proudů...47

Tabulka 7.2 Porovnání výsledků orientačního a zpřesněného výpočtu (pouze generátorové proudy)...48

Tabulka 7.3 Tabulka nastavených parametrů ochrany 7UT612 - výtisk z DIGSI 50

Tabulka 7.4 Tabulka nastavených parametrů ochrany 7UT512 - výtisk z DIGSI 3 50

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

ES - elektrizační soustava

In - jmenovitý proud

Un - jmenovité napětí

PTP - jistící transformátory proudu

vn - vysoké napětí

vvn - velmi vysoké napětí

k_S - koeficient stabilizace

I_S - stabilizační proud

Fa limitní faktor

S_{NG} - jmenovitý výkon generátoru

S_{NT} - jmenovitý výkon transformátoru

S_V - vztažný výkon

I_V - vztažný proud

x_g - poměrná reaktance generátoru

x_d'' - poměrná podélná rázová reaktance generátoru

x_t - poměrná reaktance transformátoru

x_s - poměrná reaktance sítě

U_{Fikt} - fiktivní napětí

I_{kg} - zkratový proud generátoru

I_{ks}- zkratový proud sítě

pu - poměrná jednotka

1 ÚVOD A CÍL PRÁCE

Transformátory jsou drahé prvky elektrizační sítě, které rozhodujícím způsobem přispívají k zabezpečení napájení. Optimální výklad chránění transformátoru zajišťuje, že jsou eventuálně se vyskytnuvší poruchy rychle rozpoznány a tím minimalizovány následné škody.[8]

Problematika vypnutí poruchy transformátorů se dostává do popředí s rostoucími pořizovacími cenami transformátorů. Pokud totiž nedojde k včasné identifikaci poruchy a po té k včasnému odepnutí transformátoru od zdrojů energie, může dojít k tak velké destrukci, že oprava transformátoru již nebude možná. V případě transformátorů s olejovou náplní je tendence explozí a požárů transformátorů vzestupná. Tyto následné požáry mají mimo jiné negativní vliv na životní prostředí. Dnešní tržní prostředí vyžaduje od zařízení vyšší využití, což vede k přetěžování transformátorů a jejich rychlejšímu stárnutí. Proto se předpokládá, že počet poruch se v blízké budoucnosti značně zvětší, z 1% v roce 2001 na 2% v roce 2008. Kratší životnost nových transformátorů tento nárůst po roce 2008 ještě prudce zvýší.[7]

Na druhé straně výpadek transformátoru způsobený nadbytečným působením ochran také vede k velkým finančním ztrátám, zvláště v dnešní době, kdy průmyslová výroba je automatizována a řízena průmyslovými počítači. Obdobný stav je v nevýrobní sféře, například v bankovnictví, kde výpadek elektrické může způsobit nemalé finanční ztráty, ve zdravotnictví mohou dokonce nastat ztráty na životech.

Hlavním cílem této bakalářské práce je rozbor poruch na transformátorech, princip chránění a návrh konkrétní rozdílové ochrany transformátoru 121/6,3 kV; 40 MVA. Tento návrh bude obsahovat výpočet poruchových zkratů transformátoru, příklad výpočtu třífázového zkratu, kontrolu měničů, návrh výrobce a typ ochrany, vlastní nastavení ochrany a zhodnocení nastavení.

2 PORUCHY TRANSFORMÁTORŮ

Poruchy transformátorů dělíme dvou skupin:

2.1 Průchozí poruchy

Nastávají vlivem připojených zařízení. Působí většinou delší dobu a přitom způsobují zvýšení teploty. Existují dva typy průchozích poruch: přetížení a vnější zkrat na připojeném objektu, které způsobují menší či větší přetížení transformátoru.

Přetížení je průchod příliš velké energie transformátorem, teplota vinutí roste nad meze povolené pro trvalý provoz a vznikají následující rizika:

- zkrácení životnosti izolace
- poškození izolace
- zvýšení pravděpodobnosti zemního spojení nebo zkratu

2.2 Vnitřní poruchy

Tyto poruchy transformátorů dělíme na dvě skupiny:

a) Vnitřní poruchy objevující se pozvolna - špatné galvanické styky, špatná izolace plechů, vznikající mikrooblouky v nádobě transformátoru, poruchy chlazení. Poruchy projevující se pozvolna může v počátečním stavu zachytit pouze plynové relé. V tom případě nedojde k masivnímu poškození a je možná oprava transformátoru.

b) Vnitřní poruchy objevující náhle – zkraty. A to zkraty na vinutí, zkraty mezi vinutími, zkraty vinutí na nádobu.[1]

Obrázek 2.1 Olejový transformátor

3 ZKRATY A ZEMNÍ SPOJENÍ

Zkratem rozumíme vodivé spojení dvou nebo více fází, popřípadě spojení jedné fáze se zemí v soustavě s přímo uzemněným uzlem, nebo nepřímo uzemněným uzlem pomocí rezistoru.[1]

3.1 Druhy zkratů a zemních spojení

Při zkratu dochází k náhlému poklesu impedance elektrického obvodu, mimořádnému zmenšení napětí - přičemž do místa poruchy tečou zkratové proudy ze všech připojených zdrojů, podle jejich výkonů a elektrické vzdálenosti. Úbytky napětí rostou od místa zdrojů k místu zkratu, takže pokles napětí se projeví v celé soustavě, přičemž největší úbytky jsou v uzlech elektricky blízkých místu zkratu. Nejvíce je ohroženo místo zkratu, kterým protéká výsledný zkratový proud.

Jsou-li zkratem postiženy všechny tři fáze, mluvíme o tzv. zkratu symetrickém, ostatní případy jsou zkraty nesymetrické (jednofázový, dvoufázový a dvoufázový zemní). Poruchový proud má u těchto zkratů převážně induktivní charakter.

V izolované a kompenzované soustavě se spojení jedné fáze se zemí nazývá zemní spojení. Zpětná cesta zkratového proudu je tvořena svodovými odpory a kapacitami vedení k zemi. Tyto kapacity mají velikost řádově jednotky nF na 1 km délky venkovního vedení a až stovky nF pro kabely (u kabelových vedení, kde jsou vodiče v jednom obložení, naprostá většina jednofázových poruch přejde v trojfázový zkrat) a proto příčná impedance vedení převyšuje o několik řádů podélnou impedanci. V izolované soustavě tedy při zemním spojení protékají velmi malé poruchové proudy kapacitního charakteru, řádově jednotky až desítky amper. V soustavě kompenzované se uzel transformátoru uzemňuje přes velkou indukčnost, která (pokud je správně navržena) se dostává do rezonance se zemními kapacitami vedení a v ideálním případě (vykompenzovaný stav) má pak poruchový proud téměř nulovou hodnotu a činný charakter. Charakteristickým jevem při zemních spojeních je pokles napětí postižené fáze na nulovou hodnotu a nárůst napětí zdravých fází na sdruženou hodnotu (platí pro nulový odpor v místě poruchy). Soustavu se zemním spojením lze za určitých okolností provozovat, a zemní spojení nemusí být okamžitě vypnuto, což je vzhledem k četnosti výskytu této poruchy poměrně velká výhoda.

V místě poruchy (zkrat, zemní spojení) vznikají odpory trvalého nebo přechodného charakteru - skládají se z odporu vzniklého oblouku a z odporů ostatních částí cesty proudu z jedné fáze na druhou nebo na zem. Přesné určení tohoto odporu je obtížné. Pro stanovení nejvyšších zkratových proudů předpokládáme tzv. kovový zkrat, tj. případ, kdy odpor poruchy je nulový.

3.2 Příčiny vzniku zkratů

Mezi hlavní příčiny vzniku zkratu patří:

- nedokonalost izolace – zestárnutím, přetěžováním vodičů apod.
- vady elektrickém zařízení – popraskání izolátorů, znečištěním a opálením kontaktů, nedbalá montáž, zanedbaná údržba apod.

- nedostatečné dimenzování – s ohledem na tepelné a mechanické namáhání, malá doskoková vzdálenost apod.
- přepětí – atmosférická nebo při provozních manipulacích
- cizí zásahy – při výkopech, stavebních pracích apod.
- chybná manipulace – zejména s odpojovači, při spínání dvou sítí, které nejsou synchronizovány, apod.

Obecně nejčastější příčinou zkratů je přepětí (viz *Tabulka 2.1*). Vedle atmosférických přepětí (přímý úder blesku do vedení nebo elektrostatická indukce - nepřímý úder) jsou to přepětí provozní, která mohou vznikat např. při spínacích pochodech, zemním spojení a zkratech, vypínání malých indukčních proudů (transformátor naprázdno) nebo při náhlé změně zatížení apod. Všechny uvedené příčiny vzniku zkratu často nemusí působit jednotlivě, ale společně dvě i několik příčin současně nebo následně.

Tabulka 3.1 Přibližná četnost výskytu různých druhů zkratu [3]

	Jednofázové	Dvojfázové	Dvojfázové zemní	Trojfázové
Sítě 22 kV	65 %	8 %	17 %	10 %
Sítě 110 kV	91 %	5 %	3,5 %	0,5 %
Sítě 220 kV	93 %	1 %	5 %	1 %
Sítě kabelové	-	-	-	cca 90 %

3.3 Význam zkratových výpočtů

Mezi základní účinky zkratových proudů patří:

- dynamické účinky
- tepelné účinky
- omezená možnost přerušení proudu vypínači
- indukovaná napětí
- přepětí
- pokles napětí
- ohrožení stability přenosu elektrické energie
- rušení sdělovacích cest

Elektrická zařízení ohrožená zkratovým proudem je nutné kontrolovat nejen na mechanické, ale i na tepelné namáhání. Vedle toho je třeba provádět kontrolu velikosti zotaveného napětí po odepnutí zkratu vypínačem. Zotavené napětí může svojí strmostí narušit nejen izolaci elektrické zařízení, ale i narušit vlastní vypínací proces ve vypínači opětným přeskokem vypínací dráhy a znovuzapálením oblouku mezi kontakty vypínače, což může vést i k havárii vypínače. Zkratové proudy ohrožují nejen bezpečnost provozu elektrické zařízení, ale i bezpečnost obsluhy.

Zkratové proudy mohou dosahovat značných hodnot a způsobit rozsáhlé škody. Je jim třeba předcházet a zařízení ES dimenzovat s ohledem na možný zkrat. Ze zkratových výpočtů můžeme získat charakteristické hodnoty zkratového proudu, které je třeba zohlednit při projektování části ES a při nastavení ochran.

3.4 Zkrat v transformátoru

Z důvodů stálého kontaktu velkého množství oleje s aktivními vysokonapěťovými prvky se považují olejové transformátory za nejrizikovější zařízení v rozvodnách. Přitom transformátory s olejovým dielektrikem jsou nejrozšířenějším typem, protože mají na druhé straně celou řadu předností.

Dojde-li v takovém transformátoru k nízkoimpedanční poruše, dojde k strmému nárustu tlaku v transformátorové nádobě, protože vlivem tepla oblouku dochází k rozkladu a destilaci transformátorového oleje. Z oleje se uvolňuje vodík, metan, kysličník uhelnatý a uhličitý, dusík a další plyny. Tato směs je hořlavá po smíchání s vzdušným kyslíkem výbušná. Pokud nedojde k včasnému odepnutí poruchy od zdrojů energie, nebo rychlému odvedení tlaku z transformátorové nádoby, dochází velmi často k explozi a následnému požáru transformátoru.[7]

Obrázek 3.1 Požár transformátoru [7]

Z výše uvedeného plyne, že je třeba věnovat zvýšenou pozornost správnému navržení a nastavení ochran transformátorů.

Ale i moderní, dokonale navržené a nastavené elektrické a mechanické ochrany nemusí vždy zabránit velkým destruktivním škodám. Důležitou roli hrají správně navržené a umístěné výkonové vypínače. Tato otázka hraje velkou roli hlavně u elektrárenských bloků, kde setrvačná hmota generátorů způsobuje, že výkonové transformátory ve výrobnách jsou vystaveny daleko tvrdším podmínkám než přenosové a distribuční transformátory. Generátory, zvláště výkonů nad 25MW, by měly být vždy vyzbrojeny generátorovými vypínači umístěnými mezi generátorem a blokovým transformátorem.

4 PRINCIP OCHRAN OBECNĚ

Ochrany elektrických strojů a rozvodných zařízení musí plnit tyto činnosti:

- rychle a spolehlivě určit poruchu nebo překročení meze normálního provozu chráněného zařízení;
- vypnout je v čase, který musí být stanoven tak, aby se zabránilo vzniku škod nebo omezil jejich rozsah na stroji nebo zařízení, a zajistila se ochrana osob před účinky elektrické energie;
- snížit riziko požáru v důsledku tepelných účinků zkratového proudu;
- zajistit, aby se porucha nerozšířila na ostatní prvky ES a neohrozila její chod a napájení spotřebitele.[6]

4.1 Požadavky kladené na ochrany

Požadavky kladené na ochrany můžeme shrnout následovně:

- **Spolehlivost funkce ochrany -** musí být vysoká, neboť často působí jednou až za několik let. Spolu s tím souvisí odolnost ochrany proti vibracím, agresivním prostředím, vnějším elektromagnetickým rušivým polím, přetížením při velkých nadproudech a i značným změnám teplot.
- **Odolnost ochrany při rušení** - v energetickém provozu se vyskytuje mnoho vlivů, které mohou ochranu poškodit. Je to především prašné prostředí, obsah agresivních plynů v prostředí elektrárny, otřesy, magnetická a elektrická pole při zkratech apod.
- **Rychlost ochrany -** je důležitá zejména při zkratech, aby se omezily nepříznivé tepelné a silové účinky zkratových proudů na energetická zařízení. Na druhé straně např. při proudovém přetížení vyvolaném záběrným proudem asynchronních motorů, je rychlé působení ochrany nežádoucí.
- **Citlivost a přesnost** ochrany - musí zabezpečit spolehlivé rozlišení poruchy uvnitř chráněného objektu od poruch mimo něj.
- **Naříditelnost ochrany -** rozsah všech hodnot měření nebo stanovené veličiny, na které lze nastavit citlivost ochrany.
- **Přídržný poměr ochrany -** poměr velikosti stanovené veličiny při návratu ochrany k velikosti stanovené veličiny při rozběhu ochrany.
- **Rozlišovací schopnost ochrany -** schopnost ochrany rozeznat dva blízké stavy objektu, které se liší o Δx, z nichž jeden je poruchový a druhý ne. Minimální velikost Δx, kterou ochrana rozliší, nazýváme rozlišovací schopností ochrany.
- **Doba působení ochrany -** časový úsek mezi vznikem poruchy a signálem na výstupu ochrany.
- **Přetížitelnost ochrany** - maximální velikost vstupní veličiny, která působí definovanou dobu a ještě neohrozí životnost ochrany.

- **Spotřeba ochrany -** příkon potřebný pro provoz ochrany.
- **Absolutní chyba -** definovaná jako rozdíl mezi naměřenou a skutečnou hodnotou.
- **Zálohování ochran -** v případě poruchy hlavní ochrany je třeba zajistit vypnutí ochranou záložní. Ty mohou být:
    - *Místní záložní ochrany* pracují na jiném principu než ochrany hlavní, mají samostatné napájení, vypínací obvod (jsou napojeny na jinou cívku vypínače) a měří v jiném místě než hlavní ochrana.
    - *Vzdálené záložní ochrany* pracují na stejném principu jako ochrany hlavní, mají mít jinou charakteristiku. Ochrany působí ve svém úseku jako hlavní, v následujících úsecích jako záložní.

  Pro chránění zvláště důležitých částí elektrizační soustavy se doporučuje použít dvě ochrany hlavní.
- **Selektivita ochran -** je to schopnost ochrany nepůsobit mimo objekt nebo na poruchy dané stavovou veličinou, na kterou ochrana nesmí působit. Vypíná se takto co nejmenší úsek elektrizační soustavy postižené poruchou, čímž se zmenšuje pravděpodobnost ztráty stability soustavy. Stabilitu lze zajistit:
    - Časovým odstupňováním vypínacích časů
    - Odstupňováním hodnoty nastavené veličiny
    - Měřením více veličin současně (impedanční ochrany)
    - Měřením veličin na více místech (diferenciální a srovnávací ochrany)
    - Směrovým nastavením.

Stanovení stupně časové selektivity Δt mezi jednotlivými ochranami

$$\Delta t = t_{V(n-1)} + t_{r(n-1)} + t_{rn} + t_Z \qquad (4.1)$$

$tv_{(n-1)}$ doba vypnutí vypínače předcházejícího (n - 1) úseku

$t_{tr(n-1)}$ celková absolutní nejvyšší kladná chyba časového členu ochrany předcházejícího úseku

t_{rn} celková absolutní nejvyšší záporná chyba časového členu ochrany předcházejícího úseku

t_z záložní čas (zahrnuje nepřesnosti předcházejících činitelů)[1]

4.2 Poruchové stavy

V elektrizační soustavě se mohou vyskytnou tyto základní poruchové stavy, které ohrožují provoz jednotlivých prvků či celé soustavy:

- Zkrat může mít za následek tepelné a mechanické poškození prvků.
- Přetížení způsobuje přehřívání izolace či snížení mechanické pevnosti vodičů. Míra poškození závisí na teplotě přehřátí anebo na jejím časovém integrálu.
- Nadpětí snižuje elektrickou pevnost izolace a zvyšuje pravděpodobnost vzniku zkratu.
- Podpětí může vést k proudovému přetížení.
- Nesouměrnost proudů a napětí snižuje kvalitu dodávky elektrické energie a je nebezpečná zejména pro elektrické točivé stroje, kdy může zpětná složka proudu způsobit přehřívání rotorového vinutí.
- Zemní spojení způsobuje zvýšené napětí. Vzniká v izolovaných sítích, kde uzel zdroje není uzemněn anebo je připojen přes velkou impedanci.
- Asynchronní chod nastává při ztrátě synchronizmu generátorů. Je nebezpečný zejména pro synchronní stroje a turbíny a má za následek také přetěžování vedení a transformátorů.
- Snížení či zvýšení frekvence je nebezpečné zejména v propojených elektrizačních soustavách.[5]

4.3 Třídění ochran

Ochrany můžeme rozdělit podle různých kritérií:

- Podle chráněného objektu: vedení (venkovní, kabelové, trolejové), přípojnice, transformátor, generátor, motor, kondenzátorová baterie, vypínač aj.
- Podle druhu poruchy: zkratová, při přetížení, nadpěťová, podpěťová, kmitočtová, při zemním spojení, při zpětném toku výkonu, při ztrátě buzení, při nesouměrnosti atd.
- Podle měřené veličiny: proudová, impedanční (distanční), napěťová, srovnávací (rozdílová), wattová, kmitočtová, zpětná složka proudu či napětí aj.
- Podle doby působení: mžiková (působí „ihned“ po vzniku poruchy), časově závislá (má dobu působení závislou na velikosti měřené veličiny), časově nezávislá (má konstantní dobu působení po vzniku poruchy).
- Podle konstrukce: elektromechanická relé, statická (transistorová relé), číslicové ochrany.[5]

5 OCHRANY TRANSFORMÁTORŮ

Transformátory je nutné chránit jak při vnějších zkratech či přetíženích, tak i při zkratech vnitřních. Způsoby chránění pro jednotlivé druhy poruch ukazuje tabulka 5.1.

Tabulka 5.1 Přehled poruch na transformátorech [5]

Druh poruchy	Druh ochrany
Vnější poruchy	
Přetížení	Proudová na přetížení (termoskopie)
Vnější zkrat	Nezávislá nadproudová nebo distanční
Vnitřní poruchy objevující se náhle	
Zkraty ve vinutí	Rozdílová ochrana a plynové relé
Zkraty ve vinutí na nádobu	Nádobová (kostrová) ochrana
Vnitřní poruchy projevující se pozvolna	
Špatné galvanické styky, špatná izolace plechů, vznikající mikrooblouky v nádobě – vývin plynů v oleji.	Plynové relé
Porucha chlazení – přehřátí oleje v nádobě – vývin plynů v oleji	

5.1 Vybavení transformátorů ochranami

Na základě zkušeností a doporučení ČSN 33 3051 se užívá nejčastěji těchto druhů ochran silových transformátorů:

A).**Transformátory do výkonu 1 MVA**

a) proti zkratu na primární straně jistíme výkonovými pojistkami vn. Doporučuje se použití pojistky s indikací působení

b) plynovým relé; pokud se jím vybaví transformátor jištěný pojistkami, slouží relé pro signalizaci. Jestliže je transformátor vybaven na primární straně vypínačem, pak se použije pro jeho chránění nadproudová ochrana a plynové relé se zapojením na vypínač.

c) transformátory vn/nn se na straně nízkého napětí jistí proti přetížení jističi s tepelnými a zkratovými články.

B) **Transformátory nad 1 MVA do 5 MVA**

a) plynovým relé

b) rozdílovou ochranou, avšak pouze ve zdůvodněných případech

c) nadproudovou ochranou proti zkratům. Lze ji kombinovat s blokováním na podpětí

d) nadproudovou ochranou proti přetížení

C) **Transformátory nad 5 MVA**

a) plynovým relé

b) rozdílovou ochranou, je-li výkon větší než 63 MVA. Pro menší výkony se rozdílová ochrana použije ve zdůvodněných případech, např. když se žádá rychlé vypnutí z důvodů ohrožení spojovacího vedení mezi transformátorem a rozvodnou.

c) zemní nádobovou ochranou, zejména pro transformátory vvn/vvn

d) termokopií (po dohodě s výrobcem stroje)

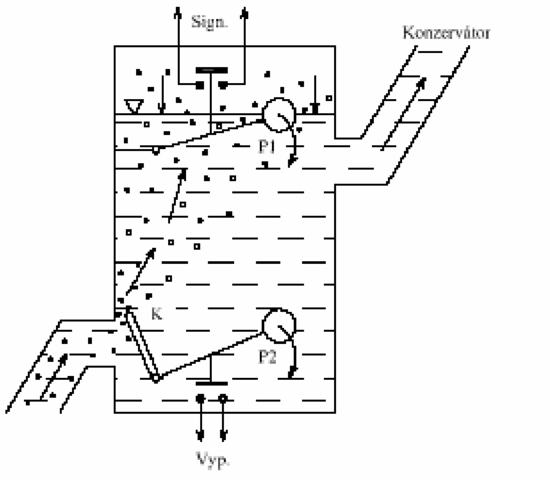
e) nadproudovou časově nezávislou ochranou. U transformátorů vvn/vvn se doporučuje použít na straně nižšího napětí (obvykle strana 110 kV) distanční ochranu působící v obou směrech, přičemž do přípojnic je ochrana bez rychlého stupně. V případě, že jsou zdroje na obou stranách, používá se dvou distančních ochran jak na primární straně, tak na sekundární straně vinutí.[5][6]

5.2 Plynové relé

Plynové relé (někdy též nazývané Buchholzovo relé) se používá u transformátorů s olejovým chlazením. Zapojuje se do potrubí mezi nádobou transformátoru a konzervátorem. Princip působení plynového relé znázorňuje o*brázek 5.1.* Při vnitřním zkratu transformátoru nastává vlivem tepla oblouku anebo ohřátého vodiče rozklad a destilace transformátorového oleje. Z oleje se uvolňuje vodík, metan, kysličník uhelnatý a uhličitý, dusík a další plyny. Poruchy doprovázené vývojem plynů se buď signalizují, anebo při rychlém vývinu plynů se provádí vypnutí transformátoru. Plynové relé má tedy dva stupně působení:

1.stupeň spíná plovák P1 a je použit k signalizaci, že došlo k pomalému vývinu plynů, případně k menšímu úniku oleje z nádoby.

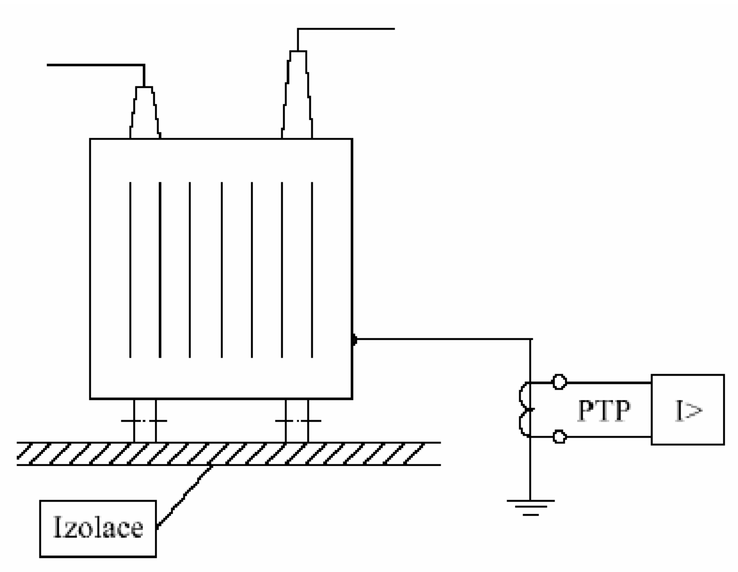
2.stupeň reaguje na rychlý vývin plynů a proudění oleje do konzervátoru při vnitřních zkratech. Toto zachytí nejdříve klapka K a plovák P2, čímž dochází k propojení vypínacího obvodu.[5]



Obrázek 5.1 Princip plynového relé[5]

5.3 Nádobová ochrana

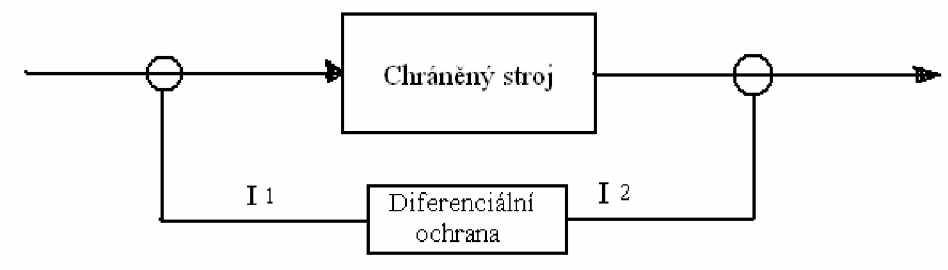
Někdy se nazývá ochrana kostrová. Princip ukazuje *obrázek 5.2.*Transformátor je umístěn na izolační podložce. Kostra transformátoru (nádoba) je spojena se zemnící soustavou transformovny vodičem, který prochází průvlekovým transformátorem proudu. Při přeskoku na průchodkách nebo na vinutí na nádobách protéká proud přes průvlekový transformátor do země a proudová ochrana provádí vypnutí. Aby nedošlo k chybnému působení, musí procházet všechny kabely pomocných obvodů (ventilátory, osvětlení, dálková regulace přepínání odboček aj.) přes průvlekový transformátor proudu.



Obrázek 5.2 Nádobová ochrana [5]

5.4 Rozdílová (diferenciální) ochrana transformátoru

Princip této ochrany je jednoduchý. Ochrana porovnává proudy, které přicházejí do chráněné oblasti s proudy, které z ní odcházejí. Princip ukazuje *obrázek 5.3* V případě vnějších zkratů bude diferenciální proud minimální a ochrana nebude působit. Pokud vznikne porucha uvnitř chráněné oblasti, vyvolá velký diferenciální proud a ochrana okamžitě vypne.[3] Takto pracovala diferenciální elektromechanická ochrana PTP.



Obrázek 5.3 Diferenciální proud Id = I1 - I2 [3]

Moderní diferenciální ochrana musí umět vyřešit mnoho dalších problémů. Musí se vypořádat s různým převodem měničů a s hodinovým úhlem při chránění transformátoru v zapojení Y/D. Musí umět eliminovat netočivou složku proudu. Musí rozeznat zapínací ráz od vnitřní poruchy. Dokonalejší číslicové ochrany si poradí i v případech, kdy dojde k přesycení měničů. Mohou také chránit transformátor při zvýšení napětí vlivem rezonance indukčnosti transformátoru s kapacitou dlouhého vedení.[3]

Nejčastěji se setkáváme s dvoubodovou diferenciální ochranou, ale běžně se používá také tříbodová pro třívinuťové transformátory, nebo generátorové bloky s odbočkou pro vlastní spotřebu. Někteří výrobci nabízejí až pětibodové provedení diferenciální ochrany.[3]

Podmínkou správné funkce každé diferenciální ochrany jsou správně dimenzované měniče. Z tohoto pohledu jsou známy dva základní principy:

1. princip stabilizované proudové diferenciální ochrany.

   Tento princip je u nás nejčastěji používaný. Využívaly ho například už ochrany R30 a RAX1. Viz *obrázek 5.6. a 5.7.* Tento princip je také použit ve všech známých mikroprocesorových ochranách.[3] Tímto typem ochran se bude zabývat další text.

2. princip vysokoimpedanční diferenciální ochrany

   tento princip se používá hlavně jako zemní diferenciální ochrana, pro svou činnost potřebuje na obou stranách stejné měniče s definovaným napětím kolena a magnetizačním proudem.[3]

5.4.1 Požadavky na měniče pro stabilizovanou diferenciální ochranu

Požadavky na měniče pro diferenciální ochrany jsou vždy vyšší než například požadavky na měniče pro nadproudové ochrany. Je zde třeba dodržet doporučení výrobce použité ochrany. Orientačně je možno podle známého vzorce odvozeného pro elektromechanické diferenciální ochrany určit doporučené nadproudové číslo:

$$n^* = 0{,}7 \cdot \frac{X}{R} \cdot \frac{I_k}{I_n} \tag{5.1}$$

Kde: n^* - nadproudové číslo měniče přepočítané na skutečnou zátěž

$\frac{X}{R}$ - časová konstanta obvodu od zdroje až do místa zkratu

$\frac{I_k}{I_n}$ - zkratový násobek pro zkrat za transformátorem

Příklad:

Pro běžné hodnoty sítě 110kV můžeme předpokládat hodnotu X/R asi 10.

Transformátor 110/220kV, 25NVA, ek 11%, I_n =131A.

JTP převod 150/5A.

Zkrat za transformátorem: $\frac{100}{ek} \cdot I_{ntrf} = \frac{100}{11} \cdot 131 = 1191A$

Zkratový násobek - průchozí zkrat: $\frac{I_k}{I_n} = \frac{1191}{150} = 8$

Požadované nadproudové číslo tedy: $n^* = 0{,}7 \,.\, 10 \,.\, 8 = 56$

Na straně 110kV bývá tento požadavek dobře splněn. Pro správnou funkci ochrany by podobné n^* mělo být i na straně 22kV. Je známé, že tam bývají měniče slabší a zpravidla se n^* pohybuje jen kolem 15. V takovém případě může falešně působit i moderní ochrana. Je proto důležité při výměně staré diferenciální ochrany za novou zkontrolovat také měniče.[3]

Moderní mikroprocesorové ochrany mají zpravidla nižší požadavky na nadproudové číslo měničů. Dokonalejší rozeznají přesycení měničů a umí předvídat průběh proudu už u malého (úzkého) vzorku. Vystačí proto i s měniči kde n^* bude 15 -20.

Jiná skupina diferenciálních ochran porovnává vždy jen prvních 5 ms z každé půlvlny. Částečně přesycené měniče tedy její funkci neovlivní. Takové ochraně stačí měnič, kde $n^* = 30 - 40$. [3]

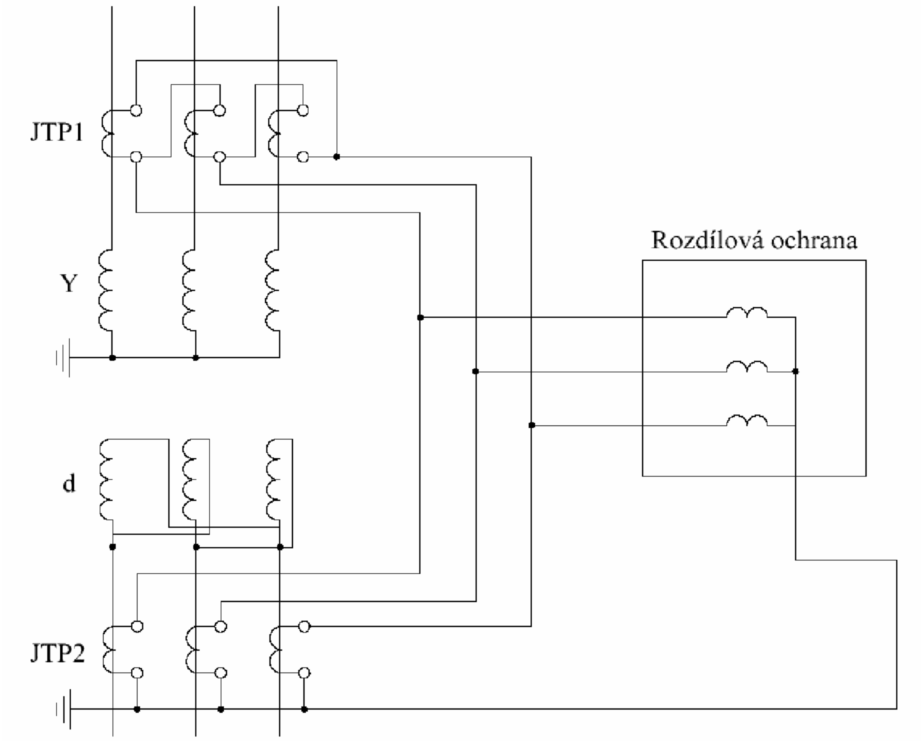
5.4.2 Zapojení ochrany, převod a hodinový úhel

Elektromechanické diferenciální ochrany dovedou porovnat jen stejné proudy a stejný fázový úhel. Aby mohly pracovat, musí se zvolit vhodné zapojení a vhodné měniče. Nejjednodušší je zapojení pro diferenciální ochranu motorů a generátorů, kde jsou všechny měniče do hvězdy.[3]

Složitější situace je při chránění transformátorů hlavně v zapojení Y/D.

V zapojení s pomocnými meziměniči musí tyto jak upravit převod z primárních hodnot, tak i vytvořit repliku hodinového úhlu chráněného transformátoru, protože i v tomto případě jsou všechny hlavní měniče do hvězdy. Princip ukazuje *obrázek 5.4*. Vlastnosti meziměničů však výrazně zhoršují vlastnosti celého zapojení.

Nejpoužívanější bylo zapojení bez meziměničů. Zde skupina jistících transformátorů na jedné straně má zapojení sekundárních vinutí stejné jako silový transformátor na straně protější. Spojení sekundárních vinutí transformátorů proudu je tedy zrcadlovým obrazem spojení vinutí silového transformátoru. Pro správnou funkci se ale strana zapojená do trojúhelníku nesmí přizemnit. Převod transformátorů se musí vhodně zvolit tak, aby nebyly za normálního bezporuchového stavu diference. [3][5]



Obrázek 5.4 Vyrovnání hodinového úhlu při zapojení Y/D [5]

Moderní diferenciální ochrany již žádné meziměniče nepotřebují. Dovedou v širokých mezích měnit převody vstupních transformátorů a zadáním vektorové skupiny upravit hodinový úhel porovnávaných proudů. Pokud je to třeba, provedou současně i eliminaci nulové složky.[3]

5.4.3 Historie diferenciálních ochran v Československu

Rozdílové neboli diferenciální ochrany pracovaly a stále pracují na principu srovnávání proudů před chráněným zařízením a za ním. Zásadní rozdíl mezi rozdílovou ochranou točivých strojů a transformátorů je v tom, že v bezporuchovém stavu o točivých strojů teče v obou jistích skupinách JTP stejný proud, zatímco u transformátorů tomu tak není (protéká jimi stejný výkon).

Rozdílová ochrana transformátorů má na rozdíl od rozdílové ochrany točivých strojů ještě jiná úskalí:

a) Proud za JTP na obou stranách musí být stejný nejen co do velikosti, ale musí být i ve stejné fázi. Ale transformátory nejsou obvykle v zapojení Yy.

b) Aby nedocházelo k chybnému působení při průchozím zkratu, musí mít jistící transformátory stejnou charakteristiku.

c) Při zapínání transformátoru z jedné strany dochází k zapínacímu magnetizačnímu rázu, který se projeví jako proudový náraz velikosti 4 - 11 In, který teče jen jednou skupinou jistících transformátorů.

Různý hodinový úhel byl řešen sadou meziměničů, které se zapojovaly zrcadlově k JTP, magnetizační náraz pak časovým zpožděním ochrany.

Jako největší problém byl u prvních ochran vyrovnávací proud při průchozích zkratech. Již roku 1917 byla patentována konstrukce ochrany, která začne působit, až když vyrovnávací

proudy dosáhnou určitého procenta z celkového proudu tekoucího JTP (čím větší průchozí proud, tím větší vyrovnávací proud). Při překročení tohoto procenta ochrany působila a byla označována jako procentní ochrana. Toto relé mělo dvě vinutí - vypínací vinutí pracovní, jimiž protékal rozdíl proudů i_1 - i_1, a vinutí kompenzační, kterým protékal provozní proud.

Před druhou světovou válkou a ještě krátce po ni byla s českých zemích používána rozdílová ochrana na stejném principu RJJ firmy Křižík a rozdílová ochrana CA firmy Westninghouse. Oba dva typy rozdílových relé byly jednofázové, procentní na indukčním principu. Relé RJJ mělo kotouče dva, jeden popudový a druhý kompenzační.

Další krok ve vývoji československých ochran byla rozdílová ochrana RJL národního podniku Křižík. Balo to trojfázové rozdílové procentní relé a popudovými a kompenzačními články na elektromagnetickém principu. Toto rozdílové relé působilo okamžitě bez časového zpoždění, a proto bývalo doplněno časovým relé. Kolem roku 1949 firma národní podnik Křižík vyrobila rozdílovou ochranu s nadproudovým článkem pod označením AR3T. Tato ochrana byla určena pro dvouvinuťové transformátory a točivé stroje, pro chránění třívinuťových transformátorů bylo nutné přidat pomocnou skříň R3. Ochrana měla tři diferenciální články s označením D_x, D_y, D_z a tři nadproudové články s označením A_x, A_y, A_z. Zapínací magnetizační ráz byl řešen fiktivním zpožděním ochrany, který byl nastavitelný od 0,4 do 0,6 s. Tato ochrana byla roku 1950 přejmenována na rozdílovou ochranu PTP.[3] Její zapojení a popis funkce je popsána v manuálu z roku 1954, viz **příloha A.**

Nevýhodou této již moderní ochrany bylo zpoždění rozdílové ochrany z důvodu zapínacího rázu o 0,5 s. Další nevýhodou byla její velikost a hmotnost (ochrana měla litinovou skříň a celková váha byla 32 kg!), *viz obrázek 5.5.*

Obrázek 5.5 Elektromechanická diferenciální ochrana PTP od firmy Křižík, n.p.

Roku 1956 přichází na trh rozdílová ochrana R20, která je vylepšenou verzí ochrany PTP. Vylepšení je v blokovacím relé „B“, které zablokuje vypínání rozdílové ochrany působením zapínacího rázu. Blokovací relé je ovládáno laděnými pérovými kontakty, které se rozkmitají při

zapínacím rázu (který se projevuje zejména druhou subharmonickou - 25 Hz) a sepnou blokovací relé „B". Tím bylo docíleno, že vypínací časy rozdílové ochrany nebylo již nutné zpožďovat. Působení této ochrany při vnitřních poruchách již bylo 0,08 - 0,1 s. Stejně jako předcházející ochrana vážila však 32 kg.

Další rozdílovou ochranou byla R21T. Tato přišla na trh roku 1961 a byla opět modernější konstrukce. Musely se k ní použít opět meziměniče a na rozdíl od předchozích rozdílových ochran využívala principu tzv. sčítacích transformátorů. Ochrana měla dvě deprézská relé. Relé D1 mělo citlivost seřiditelnou v rozsahu 30 - 100% In a vypínalo v čase cca 80 ms, aby nepůsobilo chybně při zapínacím rázu, bylo opět blokováno frekvenčními relé naladěnými na 25Hz. Relé D2 mělo citlivost seřiditelnou v rozsahu 60 - 200% In a seřizovalo se nad oblast zapínacích proudů. Vypínalo v čase cca 40 ms a nebylo blokováno. Z celkového pohledu lze říci, že se jednalo o rozdílovou ochranu se dvěma stupni. Ochrana vážila jen 8 kg.[3]

Roku 1969 se dostává na trh rozdílová ochrana R30 - viz o*brázek 5.6.* Tato ochrana se liší od předcházejících typů především konstrukcí filtru na vyšší harmonické. Při zapínacím rázu byla ochrana blokována druhou harmonickou. Třetí harmonická, která se vyskytuje v oblouku blokována nebyla, naopak byla blokována pátá harmonická a všechny vyšší. Stabilizace byla provedena lomenou charakteristikou. Ochrana byla konstrukčně jednoduchá, malých rozměrů, vážila jen 8 kg. Měla jedno deprézské relé, které vyhodnocovalo poruchové stavy. Toto relé bylo nastavitelné v rozsahu 0,2 - 1 In ochrany. Doba působení ochrany byla < 50 ms. Konstrukce této ochrany umožnila použití bez meziměničů.[3]

Obrázek 5.6 Elektromechanická diferenciální ochrana R30, n.p. ZPA Trutnov

Aby šlo ZPA Trutnov s dobou, uvedlo v roce 1978 na trh elektronickou rozdílovou ochranu RAX1, viz o*brázek 5.7.* Tato ochrana je v kompletu s ochranou nadproudovou. Obě ochrany mohly být připojeny na jedny jistící transformátory a byly na sobě nezávislé co do vstupů i výstupů. Charakteristika rozdílové ochrany RAX1 byla stejná jako u ochrany R30, stabilizace byla provedena lomenou charakteristikou.. Doba působení rozdílové ochrany byla < 55 ms.[3]

Obrázek 5.7 Elektronická diferenciální ochrana RAX1, n.p. ZPA Trutnov

Touto ochranou by ukončen vývoj a výroba rozdílových ochran v ZPA Trutnov.

6 VÝBĚR ROZDÍLOVÉ OCHRANY TRANSFORMÁTORU

Principy působení rozdílových ochran je jednoduchý – je založen na měření rozdílového proudu při respektování převodu chráněného transformátoru i měřících transformátorů. Příčinou chybných působení jsou magnetizační proudy jak hlavního transformátoru, tak měřících transformátorů. Magnetizační proud transformátoru po dobu zapnutí je obvykle značně větší než jmenovitý. Magnetizační proudy měřících transformátorů dosahují hodnoty několika desítek procent protékajícího proudu a jsou hlavní příčinou nesprávného působení rozdílových ochran [9].

Podle statistiky působení rozdílových ochran v Polsku je nejvíce chybných působení při vnějších zkratech a při zapnutí transformátoru k síti. Další chyby vznikají při projektování, uvádění do provozu, nastavení a zkouškách. U analogových rozdílových ochran nebylo možno analyzovat příčinu chybného působení, neexistovaly poruchové záznamy. V případě jejich nadbytečného působení byla jediná možnost zvýšení nastavení popudového proudu se současným zvýšením koeficientu stabilizace (sklonu charakteristiky), což způsobilo snížení citlivosti ochrany a prodloužení času jejího působení [9].

Jediná možná náprava je aplikace mikroprocesorové techniky. Tato umožňuje eliminovat „vyrovnávací“ transformátory . Objevují se však chybná působení rozdílových ochran , která jsou způsobena jejich nesprávným nastavením, případně nesprávně dimenzovanými transformátory proudu [9].

Charakteristické parametry rozdílové ochrany, které závisí na „stabilizaci“ od jednotlivých harmonických proudu , jsou definované pro statické podmínky. Rozdílová ochrana musí rozhodnout o působení v čase kratším než 35 ms od okamžiku vzniku zkratu. Časové konstanty zániku ss složky zkratového proudu dosahují často hodnoty cca 200 ms a doba trvání magnetizačního proudu transformátoru překračuje 1000 ms. [9].

Na působení rozdílové ochrany mají dále vliv :

- síťové podmínky , které určují rázový zkratový proud , amplitudu a časovou konstantu ss složky,
- konstrukce transformátoru i druh magnetizačních plechů,
- konstrukce měřících transformátorů i druh jejich magnetizačních plechů,
- návrh schéma vstupních obvodů ochrany (proudové transformátory nebo bočníky),
- návrh blokovaní při zapínacích rázech.

Správné výpočty by měly respektovat všechny výše uvedené prvky.

Dokonce i v případě kdy působí rozdílová ochrana správně při jednotlivých poruchách a zapnutích transformátoru, nelze garantovat jednoznačně správnou činnost v dalších případech. Síťové podmínky se mohou měnit a neví se jaký byl koeficient bezpečnosti. Proto by výrobce rozdílové ochrany měl nabídnout takový způsob nastavení ochrany, který by byl jednoduchý pro běžného uživatele.

Uživatel nastavuje na ochraně :

- jmenovité parametry chráněného transformátoru a transformátorů proudu,

- popudový proud ochrany ,

- koeficient stabilizace k_S podle stabilizačního proudu I_S

6.1 Porovnání vlastností vybraných rozdílových ochran [9]

Byly vzaty v úvahu ochrany firem, které mají ve výrobě ochran dlouhou tradici a mají nejlepší reference.

6.1.1 Stanovení základních požadavků na rozdílové ochrany podle K. Procházky, rok 1985 [10]

Z rozboru přenosu sousledné složky při různých spojeních vinutí vychází potřebné vztahy pro úhlové a amplitudové přizpůsobení vstupních obvodů ochrany. Při analýze poměrů při přesycených transformátorech proudu byla užita výpočtová simulace, pomocí které byly určovány rozdílové a součtové proudy, obsah druhé harmonické ve zkratovém obvodu. Byly stanoveny základní podmínky činnosti rozdílových ochran transformátorů.

Pro vnitřní poruchy se uvádí maximální proud až do 25 kA na straně 110 V, pro transformátor 40 MVA je to více jak 100 In. Určení minimálních proudů (při závitových zkratech nebo izolačních vadách) se uvádí velikost 0,06 až 0,08 In jako postačující pro zjištění všech druhů závitových zkratů (rozlišují se závitové zkraty na napájecí straně a na výstupní straně). Při úplném závitovém spojení 0,1 – 0,4 In, pro mezicívkové zkraty se uvádím potřebná citlivost 0,3 – 0,5 In.

Vnější poruchy – jsou poruchy, při kterých ochrana nesmí působit. Je důležitá horní mez proudu, určuje rozsah, ve kterém je zapotřebí vyhodnocovat rozdíl proudu a rozlišit vnitřní a vnější poruchu. Je to i mez pro dimenzováni TP. Za dostačující se považuje $n \geq 10$.

Zapínací ráz transformátoru - maximální zjištěné amplitudy cca 4 In, trvání proudu s amplitudou nad rozběhovou velikost rozdílové ochrany bylo zjištěno i po cca 200 periodách od zapnutí. Výpočetně vyhodnocovaný obsah druhé harmonické byl výrazný i cca 30 %.

6.1.2 Rozdílová ochrana ABB typu SPAD [9]

Stabilizovaný proudový diferenciální stupeň - při chránění transformátorů jsou diferenciální proudy způsobeny nepřesností proudových transformátorů, změnami poloh regulačních odboček, proudem transformátoru naprázdno, zapínacími proudy transformátoru, přesycením transformátoru při provozních situacích (přesycení U/f), přesycení TP při velkých průchozích proudech. Tyto jsou vyvolány především zkraty mimo chráněné pásmo.

Vyhodnocení základních frekvenčních složek je základem pro působení modulu diferenciální ochrany typu SPAD. Aktivace na základě vyhodnocení základních frekvenčních složek je přesné a stabilní - stejnosměrné složky a harmonické složky proudu nezpůsobí chybné působení rozdílové ochrany.

Blokování 2. harmonickou složkou diferenciálního proudu - pro zapínací proud je typický vysoký obsah 2. harmonických složek . Blokáda náběhu stabilizovaného stupně při magnetizačním zapínacím rázu je založena na principu vyhodnocení *poměru* amplitudy druhé harmonické složky odfiltrované z diferenciálního proudu a amplitudy složky základní frekvence Id2f/Id1f.

Při zapnutí výkonového transformátoru a současné poruše uvnitř chráněného úseku není působení modulu ochrany zpožděno, v tomto případě nedochází k blokování 2.harmonickou, toto opatření je realizován samostatným algoritmem.

Blokování 5. harmonickou složkou diferenciálního proudu – je použito při provozních stavech, kdy dochází k přesycení - je založeno na vyhodnocení poměru páté harmonické složky a základní složky diferenciálního proudu.

Mžikový proudový diferenciální stupeň - je samostatně seřiditelný a není stabilizován a působí, pokud základní složka vypočtená z diferenciálního proudu je vyšší než nastavený provozní limit Id/In>> nebo pokud okamžitá hodnota diferenciálního proudu překročí hodnotu 2,5 * Id/In>>.

Poruchový zapisovač - délka záznamu je 38 period, vzorkovací frekvence je 40 vzorků za periodu. Je spuštěn při působení vnitřních vypínacích a blokovacích signálů, kapacita paměti je jeden záznam.

Doporučené parametry proudových transformátorů - doporučená třída přesnosti TP pro diferenciální ochranu typu SPAD je 5 P, která limituje proudovou chybu pro jmenovitý proud na 1 % a fázový posun na 60 úhlových minut, limit celkové chyby pro jmenovitý limit přesnosti primárního proudu (nadproudové číslo) je 5%. Počítá se hodnota limitního faktoru Fa odpovídající skutečné zátěži, musí splnit následující požadavky Fa > 40 a Fa > 4 * Imax1. Pro technické parametry TP třídy X (BS 3938) jsou definovány napětím bodu kolena a odporem sekundárního vinutí.

6.1.3 Rozdílové ochrany typu KBCH firmy ALSTOM [9]

Vyrábí se rozdílové ochrany typu KBCH 120,130,140 – pro transformátory i generátory - základní rozdílová ochrana realizuje rozdílový proud vektorovým součtem jednotlivých proudů, stabilizační proud je polovičním součtem jejich amplitud Vypínací charakteristika je lomená přímka, minimální rozdílový proud je nastavitelný v rozsahu 10 % – 50% In, první přímkový úsek má sklon 20 %, bod „zlomu“ je In, druhá část přímky je se sklonem 80 %. Ochrana obsahuje i další rozdílový stupeň s mžikovým působením při „těžkých“ vnitřních poruchách, vyhodnocuje jen okamžité hodnoty.

6.1.4 Rozdílová ochrana firmy SIEMENS typu 7UT [9]

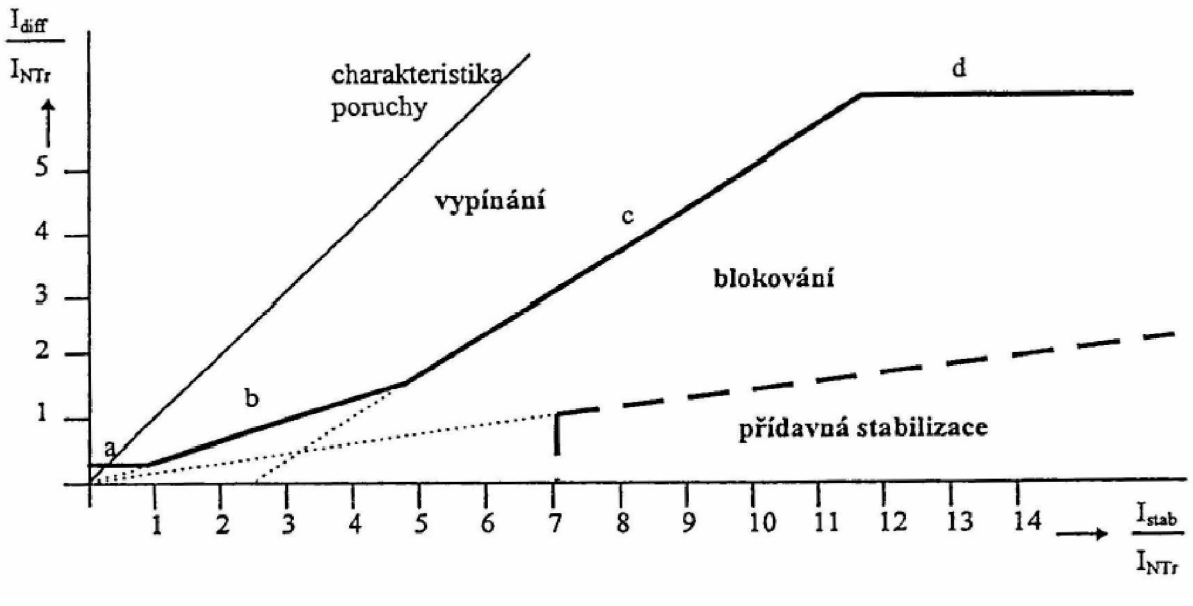
*A*nalogicky jako u předchozích ochran je rozdílový proud definován jako vektorový součet, stabilizační proud jako algebraický součet sekundárních proudů z obou chráněných konců. Při vnitřních poruchách platí $I_{dif} = I_{st}$, tímto je ve vypínacím diagramu určena přímka pro vnitřní poruchu pod úhlem 45°. Vypínací charakteristika ochrany je lomená přímka s úseky, viz *obrázek 6.1*:

a …náběhová citlivost rozdílové ochrany, zohledňuje konstantní chybové proudy jako například magnetizační proudy,

b … zohledňuje proudové chyby, které vznikají chybou převodu TP, vstupními měřícími obvody, přizpůsobením, působením regulátoru odboček,

c …. přímka, která působí pro silnější stabilizaci v oblasti velkých proudů, které mohou vyvolat přesycení TP,

d … přímka, která „představuje" rychlé vypnutí při těžkých vnitřních poruchách transformátoru, vypíná bez ohledu na stabilizační proudy (zkratový proud je větší než InT/uk), rychlé vypnutí pracuje jak se základní harmonickou tak i s okamžitými hodnotami (garantuje vypnutí při přesycení TP - základní harmonická by byla silně utlumena). Ochrana 7UT disponuje tzv. indikátorem přesycení, který pracuje dynamicky. Při vnějších zkratech teče vysoký stabilizační proud, pracovní bod je v oblasti „přídavné stabilizace" , při vnitřních poruchách přejde pracovní bod okamžitě do oblasti poruchové charakteristiky.



Obrázek 6.1 Stabilizační charakteristika rozdílové ochrany[9]

6.2 Výsledek porovnání ochran

Z výše porovnávaných ochran byla vybrána ochrana SIPROTEC, 7UT612 od firmy Siemens (viz *obrázek 6.2*). Ochrany od firmy Siemens již v Teplárnách Brno a.s. jsou instalovány a spolehlivě pracují. Tato unifikace se projeví v úsporách na údržbu a v snazším zaškolení personálu teplárny.

Obrázek 6.2 Diferenciální ochrana 7UT612[11]

Ochrana neklade speciální požadavky na PTP, kompenzuje druh zapojení transformátoru. PTP jsou zapojeny do hvězdy, nemůže tedy u nich docházet k přesycování magnetického obvodu proudem nulové složky. Ochrana obsahuje vedle rozdílové ještě zkratovou ochranu transformátoru a závislou nadproudovou ochranu (tepelný model). Ukázka manuálu této ochrany je uvedena v **příloze B**. Tento manuál je velmi podrobný, má 340 stran a je od roku 2007 k dispozici i v českém jazyce.

7 NÁVRH ROZDÍLOVÉ OCHRANY TRANSFORMÁTORU

Pro návrh ochrany transformátoru v této bakalářské práci byl zvolen již provozovaný blokový transformátor v Teplárnách Brno a.s., Provoz Červený mlýn viz o*brázek 7.1*. Tento blokový transformátor je již v provozu od roku 1998. Přehledové schéma teplárny je v **příloze D**.

Obrázek 7.1 Transformátot MKA 20 - 40MVA, 121/6,3kV, Teplárny Brno a.s. - PČM

7.1 Parametry chráněného transformátoru

Blokový transformátor BAT 20: 40MVA, s převodem 121±5% / 6,3kV, zapojenímYNd1, napětím nakrátko $u_{k\%}$ = 11%, s třídou izolace A, výrobce škoda Plzeň, typ E 37 M-0, výr.č. 0967163, rok výroby 1997. Jedná se blokový transformátor pro vyvedení výkonu generátoru MKA 20.

Generátor MKA 20: 24 MW, 30 MVA, 6,3 kV, cosφ = 0,8, 1500 o/min, xd“ = 15%, výrobce ABB, typ GBA 1120 LB.

Transformátor pracuje do zapouzdřené rozvodny vvn 121kV, I_n = 1600A, SK = 2518MVA.

Jistící transformátory proudu: Strana 121kV - 200/1 A, 30 VA, 5P20,

Strana 6,3kV - 3000/1 A, 30 VA, 5P20.

7.2 Měřící transformátory proudu

Přístrojové transformátory zajišťují převod signálů z energetického systému do ochrany.

7.2.1 Topologie dvouvinuťuvého transformátoru [8]

Strany:

S1 - Strana vyššího napětí chráněného transformátoru

S2 - Strana nižšího napětí chráněného transformátoru

Přiřazení 3-fázových měřených míst:

M1 - Měřené místo pro stranu 1 chráněného transformátoru

M2 - Měřené místo pro stranu 2 chráněného transformátoru

Strana 1 je vždy vztažné vinutí, má proto fázový posun 0° a nemá číslo skupiny spojení. Obvykle je to strana vyššího napětí transformátoru.

7.2.2 Stanovení převodu proudových transformátorů

U transformátorů obecně nejsou protékající proudy měřené na sekundární straně proudových transformátorů shodné, ale jsou dány převodem a skupinou zapojení chráněného transformátoru a jmenovitými proudy proudových transformátorů. Aby byly proudy srovnatelné, musí se nejprve přizpůsobit. [8]

Přizpůsobení se v 7UT612 provádí numericky. Vnější přizpůsobovací transformátory proto nejsou obvykle potřebné. Digitalizované proudy jsou vždy přepočteny na jmenovité proudy transformátoru. Proto je třeba do ochrany zadat jmenovité údaje transformátoru, jako jmenovitý zdánlivý výkon, jmenovitá napětí a jmenovité proudy proudových transformátorů.[8]

$$I_{NS1} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_N} = \frac{40MVA}{\sqrt{3} \cdot 121kV} = 190{,}9A \tag{7.1}$$

Volíme nejbližší jmenovitou hodnotu proudu **PTP 200A / 1A** .

$$I_{NS2} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_N} = \frac{40MVA}{\sqrt{3} \cdot 6{,}3kV} = 3667A \tag{7.2}$$

V tomto případě zvolil dodavatel převod **PTP 3000/1A**. Tato hodnota byla zvolena s ohledem zdánlivý výkon generátoru S_N = 30MVA, čemuž odpovídá I_{NS2} = 2750A. V tomto případě budou PTP lépe využity.

Primární jmenovitý proud $I_{P,měň}$, použitého proudového měniče by měl být zpravidla větší než jmenovitý proud chráněného objektu $I_{N,obj}$. Měla by být však s ohledem na horní mez lineární oblasti ochrany 20 . I_n dodržena následující podmínka [11]:

$$I_{p,měč} > 0{,}75 \cdot I_{N,obj} \tag{7.3}$$

Tato podmínka je dodržena (0,75.I_{NT} = 0,75.3667 = 2750 A < 3000 A)

Normalizované jmenovité sekundární proudy jsou 1 nebo 5A (výjimečně 2A). Z důvodu velkých zkratových proudů je jednoznačně správné 1A provedení PTP a elektrických ochran.

7.2.3 Nadproudové číslo

- Požadované nadproudové číslo PTP pro elektromechanické diferenciální ochrany:

$$n^* = 0{,}7 \cdot \frac{X}{R} \cdot \frac{I_k}{I_n} \tag{7.4}$$

Kde: n^* - nadproudové číslo měniče přepočítané na skutečnou zátěž

$\frac{X}{R}$ - časová konstanta obvodu od zdroje až do místa zkratu

$\frac{I_k}{I_n}$ - zkratový násobek pro zkrat za transformátorem

Pro běžné hodnoty sítě 110kV můžeme předpokládat hodnotu X/R asi 10.

Transformátor 121/6,3kV, 40MVA, ek 11%, I_n =191A.

PTP převod 200/1A.

Zkrat za transformátorem: $I_K = \frac{100}{ek} \cdot I_{ntrf} = \frac{100}{11} \cdot 191 = 1736A$

Zkratový násobek - průchozí zkrat: $\frac{I_k}{I_n} = \frac{1736}{200} = 8{,}86$

Nadproudové číslo: n^* = 0,7 . 10 . 8,86 = <u>60,76</u>

- Nyní musíme určit tzv. skutečné nadproudové číslo příslušného PTP, které je dáno skutečným sekundárním zatížením tohoto PTP. Skutečné nadproudové číslo příslušného PTP určíme ze vztahu:

$$n^* = n_n \cdot \frac{R_{BN} + R_i}{R_{BS} + R_i} \tag{7.5}$$

Kde:

S_n = jmenovitá zátěž PTP = 30 VA

n_n = jmenovité nadproudové číslo PTP = 20

R_{BS} = připojená zátěž PTP, tj. odpor kabelu, svorek a vstupních obvodů ochrany

$R_{BS} = R_{ochrany} + R_{vodiče} + R_{svorek}$

$R_{ochrany}$ - podle údajů výrobce cca. 0,02 Ω

$R_{vodiče}$ - délka 50 m, průřez 4 mm^2, materiál - Cu, ρ_{Cu} = 0,0178571 $\Omega mm^2/m$

R = 2. ρ.l/S = 2.0,0178.50/4 = 0,445 Ω

R_{svorek} - volíme 0,1 Ω

$R_{BS} = R_{ochrany} + R_{vodiče} + R_{svorek}$ = 0,02 + 0,445 + 0,1 = 0,565 Ω

R_{BN} = jmenovitá zátěž PTP, určíme ze vztahu $R_{BN} = S_{nPTP}/I^2_{nPTPsec} = 30/1^2 = 30\ \Omega$

R_i = odpor vinutí PTP, volíme 2,5 Ω

Potom:

Skutečné nadproudové číslo PTP:

$$n^* = n_n \cdot \frac{R_{BN} + R_i}{R_{BS} + R_i} = 20 \cdot \frac{30 + 2,5}{0,565 + 2,5} = 212,1 \tag{7.6}$$

- Moderní mikroprocesorové ochrany mají nižší požadavky na nadproudové číslo. Rozeznají přesycení měničů a umí předvídat průběh proudu už z malého (úzkého) vzorku. Je zde třeba dodržet doporučení výrobce použité ochrany [3], které je v případě diferenciální ochrany Siemens SIPROTEC 7UT[12] , (**Příloha C**) **:**

$$n^* \geq 5 \cdot \frac{I_{k\max}}{I_{NCT}} = 5 \cdot \frac{1736}{200} = 43,4$$

Z výše uvedených výpočtů plyne, že dodavatelem navržený PTP vyhoví s velkou reservou. Je to způsobeno převážně tím, že vnitřní impedance moderní ochrany je mnohonásobně nižší než ochrany elektromechanické. Tímto se zvýší skutečné nadproudové číslo proudového měniče. Nadproudové číslo požadované výrobcem je o 30% nižší než u starších ochran elektromechanických.

7.3 Výpočty zkratových poměrů na chráněném transformátoru

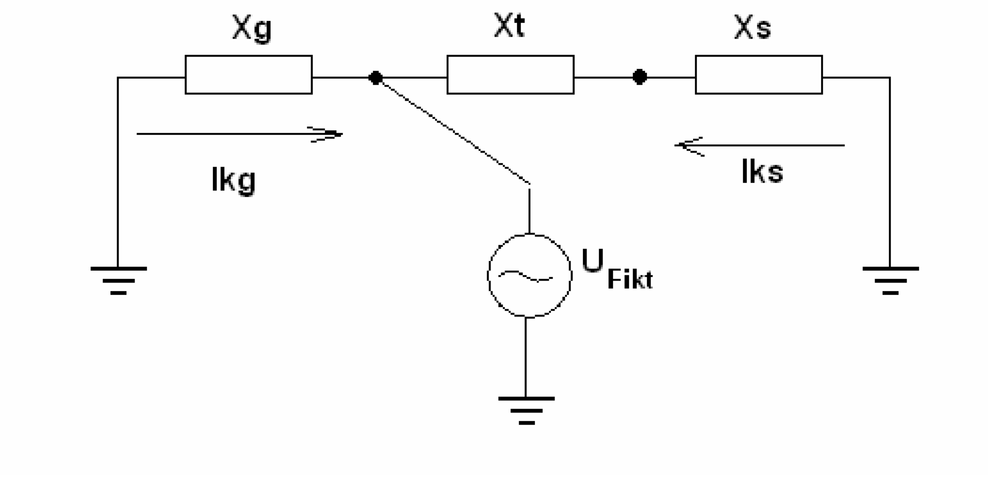
Při výpočtu se zadaly potřebné parametry reaktancí, výkonů, napětí, blokového transformátoru, generátoru a sítě. Byl proveden nejprve zjednodušený zkratový výpočet pro 3 a 2 fázové zkraty a výsledky porovnány s výstupem z programu ISCC08 (vývojová verze).

7.3.1 Zjednodušený výpočet

Zjednodušující předpoklady:

- řešený systém je lineární
- řešený systém splňuje všechny podmínky pro použití metody souměrných složek
- systém byl před poruchou nezatížený, napětí v uzlech byla jmenovitá
- odpory se neuvažují, odpor zkratu se neuvažuje
- parametry všech náhradních prvků systému jsou pro souslednou i zpětnou složku stejné
- zapojení a hodinové číslo transformátoru se neuvažuje
- v daný okamžik je v systému pouze jedna porucha, řešíme pouze rázový (sub-transient) zkrat

- Třífázový zkrat z nezatíženého systému na svorkách generátoru. Použijeme upravenou metodu uzlových napětí. Celý řešený systém je nahrazen jednofázovým schématem, kde zdroje (generátor, síť) jsou reprezentovány náhradní reaktancí mezi uzlem připojení a zemí a podélné prvky (transformátor) náhradní reaktancí mezi danými uzly připojení. Zkrat je reprezentován náhradním fiktivním zdrojem napětí, jehož velikost je rovna předporuchovému napětí v daném uzlu, a orientace tohoto zdroje je opačná $U_{FiktZdr} = -U_{NUzlu}$. Tato metoda je založena na předpokladu, že napětí v místě zkratu je nulové. Proud injektovaný do náhradního obvodu tímto zdrojem způsobí v obvodu úbytek napětí. Superpozicí předporuchového obvodu (všechna napětí jmenovitá, proudy nulové) a obvodu s fiktivním zdrojem získáme poměrně jednoduše orientační výsledky, které jsou však zpravidla pro nastavení ochran dostatečné. Náhradní schéma pro souslednou složkovou soustavu viz *obrázek 7.2.*



Obrázek 7.2 Náhradní schéma pro souslednou složkovou soustavu

Výpočet provedeme v poměrných jednotkách, vztažených na transformátor:

$S_V = S_{NT} = 40$ MVA

$$I_{V6} = \frac{S_T}{\sqrt{3} \cdot U_G} = \frac{40}{\sqrt{3} \cdot 6{,}3} = 3\,666 A$$
$$I_{V110} = \frac{S_T}{\sqrt{3} \cdot U_S} = \frac{40}{\sqrt{3} \cdot 121} = 191 A \qquad (7.7)$$

$$x_g = x_d'' \cdot \frac{S_V}{S_{NG}} = 0{,}15 \cdot \frac{40}{30} = 0{,}200 pu$$

$$x_t = x_k \cdot \frac{S_V}{S_{NT}} = 0{,}11 \cdot \frac{40}{40} = 0{,}110 pu$$

$$x_S = \frac{S_V}{S_{K3f}} = \frac{40}{2518} = 0{,}016 pu$$

$U_{Fikt} = 1$ pu

Zkratový příspěvek generátoru:

$$I_{KG} = \frac{U_{Fikt}}{x_g} = \frac{1}{0{,}2} = 5{,}0 pu \Rightarrow 18{,}33 kA \qquad (7.8)$$

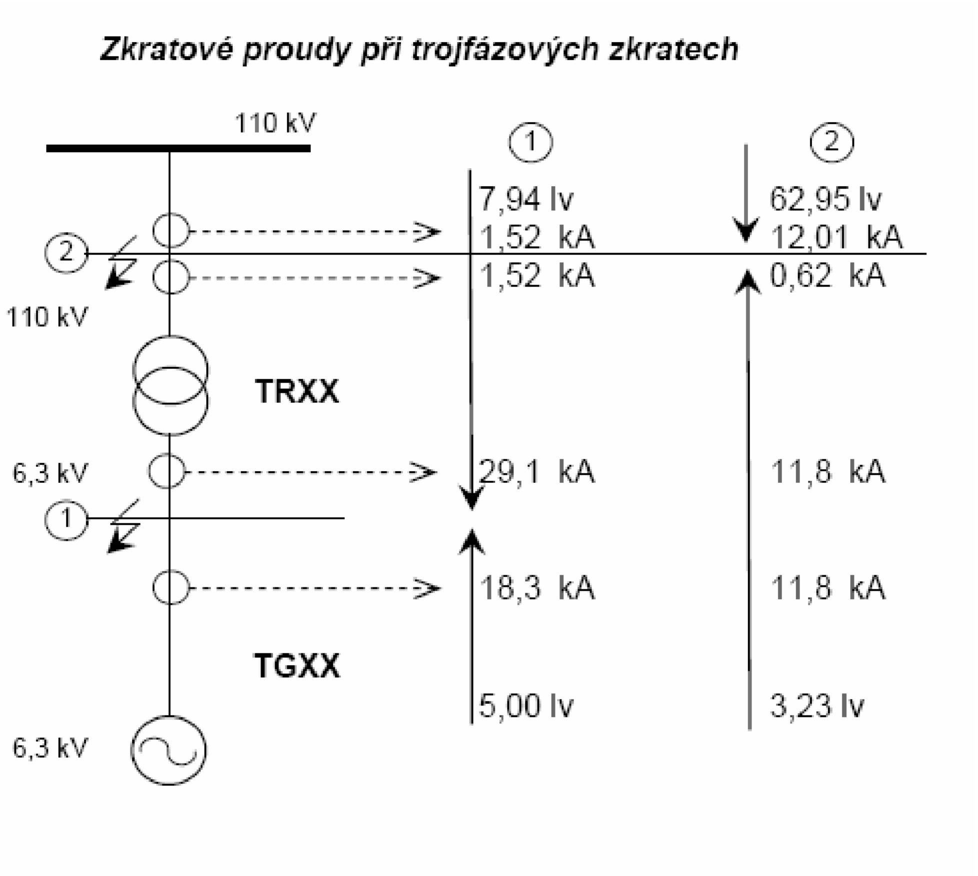
Zkratový příspěvek ze sítě:

$$I_{KS} = \frac{U_{Fikt}}{(x_t + x_S)} = \frac{1}{0{,}11 + 0{,}016} = 7{,}94 pu \Rightarrow 29{,}12 kA \qquad (7.9)$$

Pro zkrat na 110 kV straně je postup analogický.

Poznámka: Třífázový zkrat je symetrický, amplitudy proudů jsou tedy ve všech fázích stejné.

Podrobný přehled výsledků je v *obrázku 7.3*.



Obrázek 7.3 Zkratové proudy při trojfázových zkratech

- Výpočet dvoufázového zkratu vychází ze složkového schématu. Protože jsme ve zjednodušujících předpokladech definovali shodnost parametrů sousledné a zpětné soustavy (u generátoru neplatí, zpravidla je x_2 o 0,02-0,07 pu větší), budou obě schémata stejná viz *obrázek 7.4* kde:

  $x_g^{(1)} = x_g^{(2)} = x_g = 0{,}200$ pu

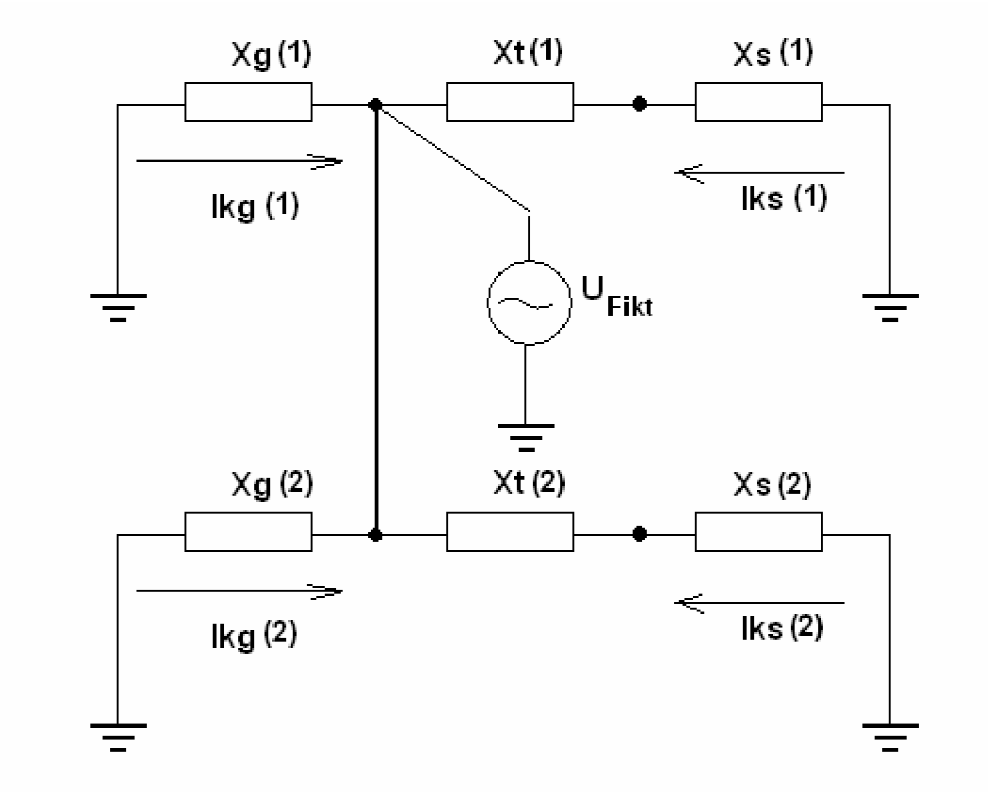
  $x_t^{(1)} = x_t^{(2)} = x_t = 0{,}110$ pu

  $x_s^{(1)} = x_s^{(2)} = x_s = 0{,}016$ pu

Výpočet provedeme obdobně jako u třífázového zkratu:

Zkratový příspěvek generátoru:

$$I_{kg}^{(1)} = -I_{kg}^{(2)} = 0{,}5 \cdot \frac{U_{Fikt}}{\frac{x_g^{(1)} \cdot x_g^{(2)}}{x_g^{(1)} + x_g^{(2)}}} = 0{,}5 \cdot \frac{1}{0{,}1} = 5{,}00\,pu \qquad (7.10)$$



Obrázek 7.4 Náhradní schéma pro zpětnou složkovou soustavu

Vzhledem ke zjednodušujícím předpokladům nemusíme provádět komplikovaně přepočet ze složkových soustav na fázové. V tomto zidealizovaném případě platí, že:

$I_{kg\ L1} = I_{kg}^{(1)} + I_{kg}^{(2)} = 0$ pu

$$\begin{aligned} I_{kgL1} &= I_{kg}^{(1)} + I_{kg}^{(2)} = 0{,}00\,pu \\ I_{kgL2} &= I_{kgL3} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{kg}^{(1)} = 0{,}866 \cdot 5 = 4{,}33\,pu \Rightarrow 15{,}87\,kA \end{aligned} \tag{7.11}$$

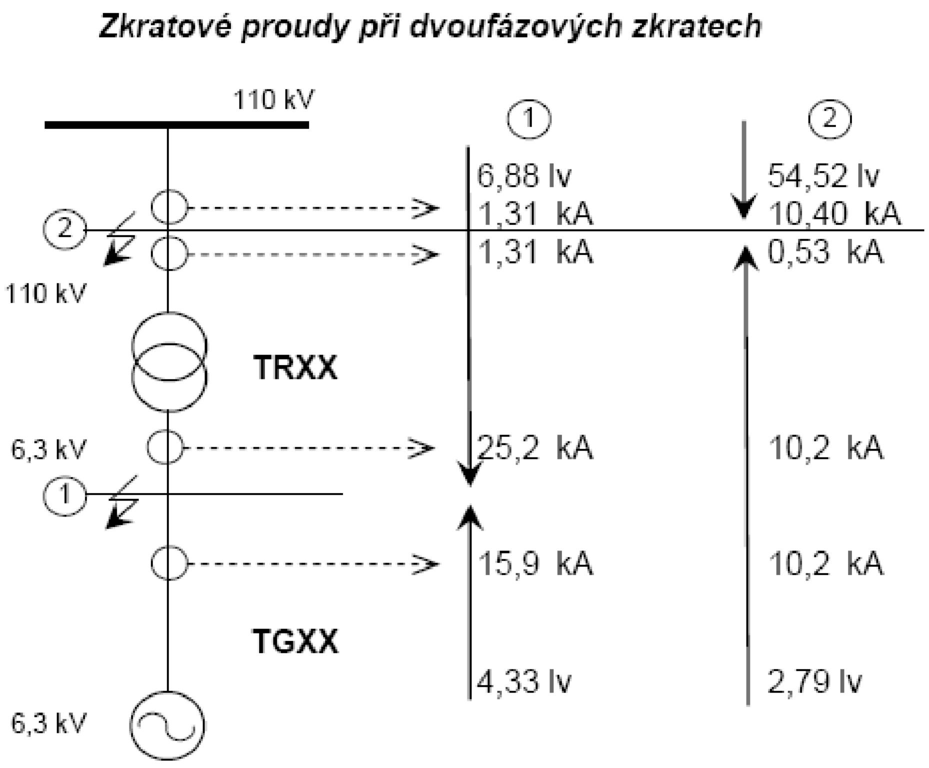
<u>Zkratový příspěvek ze sítě:</u>

... $I_{ks}^{(1)} = - I_{ks}^{(2)} = 7{,}94$ pu

$$\begin{aligned} I_{kSL1} &= 0{,}00\,pu \\ I_{kSL2} &= I_{kSL3} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{kS}^{(1)} = 0{,}866 \cdot 7{,}94 = 6{,}88\,pu \Rightarrow 25{,}22\,kA \end{aligned} \tag{7.12}$$

Pro zkrat na 110 kV straně je postup analogický.

Podrobný přehled výsledků je v *obrázku 7.5*.



Obrázek 7.5 Zkratové proudy při dvoufázových

7.3.2 Výpočet za pomocí počítačového programu

Při výpočtu v programu ISCC08 je použita metoda admitanční matice, výpočet je prováděn v komplexních číslech a admitanční model transformátoru zahrnuje i zapojení a hodinové číslo. Takovýto postup je pro „ruční výpočet“ v podstatě nepoužitelný. Pro kontrolu nastavení ochran je zpravidla dostatečný zjednodušený postup. Za zmínku stojí vliv respektování hodinového čísla při nesymetrických zkratech.

Výsledky výpočtu výpočetního programu jsou v *tabulce 7.1.*

Tabulka 7.1 Tabulka vypočítaných zkratových proudů

Nominální zatížení														
	proudy na straně				Sekundární proudy na straně				Sekundární proudy na straně				Rozdílová ochrana	
	Generátoru		Sítě		Generátoru		Sítě		Generátoru		Sítě			
	I [kA]	°	I [kA]	°	I [A]	°	I [A]	°	/In	°	I/In	°	Istab	Idiff
IL1	2,75	0,0	0,143	30,0	4,58	0,0	3,579	30,0	1,00	0,0	1,00	30,0	2,00	0,00
IL2	2,75	-120,0°	0,143	-90,0°	4,58	-120,0°	3,579	-90,0°	1,00	-120,0°	1,00	-90,0°	2,00	0,00
IL3	2,75	120,0°	0,143	150,0°	4,58	120,0°	3,579	150,0°	1,00	120,0°	1,00	150,0°	2,00	0,00

3F zkrat na svorkách generátoru naprázdno														
	proudy na straně				Sekundární proudy na straně				Sekundární proudy na straně				Rozdílová ochrana	
	Generátoru		Sítě		Generátoru		Sítě		Generátoru		Sítě			
	I [kA]	°	I [kA]	°	I [A]	°	I [A]	°	/In	°	I/In	°	Istab	Idiff
IL1	18,33	-90,0	1,645	-240,0	30,55	-90,0	41,134	-240,0	6,67	-90,0	11,49	-240,0	18,16	18,16
IL2	18,33	150,0°	1,645	0,0°	30,55	150,0°	41,134	0,0°	6,67	150,0°	11,49	0,0°	13,33	18,16
IL3	18,33	30,0°	1,645	-120,0°	30,55	30,0°	41,134	-120,0°	6,67	30,0°	11,49	-120,0°	13,33	18,16

3F zkrat za trafem naprázdno														
	proudy na straně				Sekundární proudy na straně				Sekundární proudy na straně				Rozdílová ochrana	
	Generátoru		Sítě		Generátoru		Sítě		Generátoru		Sítě			
	I [kA]	°	I [kA]	°	I [A]	°	I [A]	°	/In	°	I/In	°	Istab	Idiff
IL1	12,22	-120,0	11,929	-90,0	20,37	-120,0	298,218	-90,0	4,44	-120,0	83,33	-90,0	8,89	78,89
IL2	12,22	120,0°	11,929	150,0°	20,37	120,0°	298,218	150,0°	4,44	120,0°	83,33	150,0°	8,89	78,89
IL3	12,22	0,0°	11,929	30,0°	20,37	0,0°	298,218	30,0°	4,44	0,0°	83,33	30,0°	8,89	78,89

2F zkrat na svorkách generátoru naprázdno														
	proudy na straně				Sekundární proudy na straně				Sekundární proudy na straně				Rozdílová ochrana	
	Generátoru		Sítě		Generátoru		Sítě		Generátoru		Sítě			
	I [kA]	°	I [kA]	°	I [A]	°	I [A]	°	/In	°	I/In	°	Istab	Idiff
IL1	0,00	~	0,823	-180,0	0,00	~	20,567	-180,0	0,00	~	5,75	-180,0	0,00	5,75
IL2	15,87	180,0°	1,645	0,0°	26,46	180,0°	41,134	0,0°	5,77	180,0°	11,49	0,0°	11,55	16,74
IL3	15,87	0,0°	0,823	-180,0°	26,46	0,0°	20,567	-180,0°	5,77	0,0°	5,75	-180,0°	11,55	11,13

2F zkrat za trafem naprázdno														
	proudy na straně				Sekundární proudy na straně				Sekundární proudy na straně				Rozdílová ochrana	
	Generátoru		Sítě		Generátoru		Sítě		Generátoru		Sítě			
	I [kA]	°	I [kA]	°	I [A]	°	I [A]	°	/In	°	I/In	°	Istab	Idiff
IL1	6,11	180,0	0,000	~	10,18	180,0	0,000	~	2,22	180,0	0,00	~	4,44	2,22
IL2	6,11	180,0°	10,331	180,0°	10,18	180,0°	258,264	180,0°	2,22	180,0°	72,17	180,0°	4,44	70,25
IL3	12,22	0,0°	10,331	0,0°	20,37	0,0°	258,264	0,0°	4,44	0,0°	72,17	0,0°	8,89	68,36

1F zkrat za trafem naprázdno														
	proudy na straně				Sekundární proudy na straně				Sekundární proudy na straně				Rozdílová ochrana	
	Generátoru		Sítě		Generátoru		Sítě		Generátoru		Sítě			
	I [kA]	°	I [kA]	°	I [A]	°	I [A]	°	/In	°	I/In	°	Istab	Idiff
IL1	6,96	-90,0	16,009	-90,0	11,60	-90,0	400,213	-90,0	2,53	-90,0	111,83	-90,0	5,07	109,65
IL2	6,96	90,0°	4,004	151,9°	11,60	90,0°	100,110	151,9°	2,53	90,0°	27,97	151,9°	5,07	25,86
IL3	0,00	165,1°	4,004	28,1°	0,00	165,1°	100,110	28,1°	0,00	165,1°	27,97	28,1°	0,00	27,97

7.3.3 Porovnání

Na závěr byly porovnány výsledky „ručního výpočtu“ s výsledky výpočetního programu. Z *tabulky 7.2* je patrné, že obě metody se od sebe liší maximálně o 20%. Zvážíme-li přesnost vstupních parametrů (±15%), přesnost metody (±10%) a v praxi vždy uvažované rezervy (±10%), je zřejmé, že výsledky orientačního výpočtu jsou v mezích tolerance.

Tabulka 7.2 Porovnání výsledků orientačního a zpřesněného výpočtu (pouze generátorové proudy)

Typ/ místo zkratu	3 - fázový		2 - fázový	
	6,3 kV	**110 kV**	**6,3 kV**	**110 kV**
Orientační výpočet	18,3 kA	11,8 kA	15,9 kA	10,2 kA
Zpřesněný výpočet	18,3 kA	12,2 kA	15,87 kA	12,22 kA

7.4 Nastavení ochranné funkce

Hlavním parametrem funkce je nastavení základní citlivosti ochrany na rozdílový proud. Pro generátory obvykle postačuje hodnota 10%, za předpokladu shodnosti uzlových i vývodových PTP. U transformátorů jsou PTP v naprosté většině případů značně rozdílné, takže i při bezporuchovém stavu může ochrana detekovat malý rozdílový proud (obvykle do 5%). V tomto konkrétním případě je poměr jmenovitých primárních proudů PTP 3000/200 = 15, a tedy nastavení základní citlivosti by mělo být minimálně 20%. Transformátor má možnost přepínání odboček ±5%, proto je vhodné nastavení ještě zvýšit. Základní popudovou hodnotu I-IFF> nastavíme na:

⇒ **I-DIFF> = 0,25 I/InO**

Diferenciální ochrana chrání transformátor proti vůbec nejhorší poruše - vnitřnímu zkratu, proto by měla vypínat mžikově. Protože se jedná o vysoce selektivní a spolehlivou ochranu, můžeme si dovolit nulové zpoždění:

⇒ **T I-DIFF> = 0,00 s**

Ochrana dále disponuje záložní funkcí, která v případě, kdy rozdílový proud překročí nastavenou hodnotu, vypíná bez ohledu na stabilizační proudy. Tato funkce, tzv. stupeň rychlého vypínání I-DIFF>> se nastavuje na základě zkratových výpočtů. Teoreticky maximální hodnota průchozího zkratového proudu je dána napětím nakrátko. Všechny vyšší hodnoty už znamenají jednoznačně vnitřní zkrat:

$$\text{I-DIFF>>} \sim \frac{1}{u_k} = \frac{1}{0,011} = 9,1$$

⇒ **I-DIFF>> = 10,0**

⇒ **T I-DIFF>> = 0,00 s**

Z důvodu rozdílné chyby měření PTP se obvykle používá zvýšená stabilizace ochrany proti chybě měření, resp. snižování citlivosti úměrně na stabilizačním proudu. Tato stabilizace je dána nastavením parametrů SLOPE 1 a BASE POINT 1. Volíme nastavení, které mírně zvyšuje popudovou hodnotu ochrany od hodnoty stabilizačního proudu 1 I_N:

⇒ **SLOPE 1 = 0,25**

BASE POINT 1 = 0,00

Stabilizaci ochrany je dále možno zvýšit s ohledem na možné přesycení měničů při zvýšených průchozích proudech (vzdálené zkraty). Nastavené hodnoty byly zvoleny tak, aby zvyšovaly stabilizaci od hodnoty průchozího proudu cca. 1,25 I_{NT}:

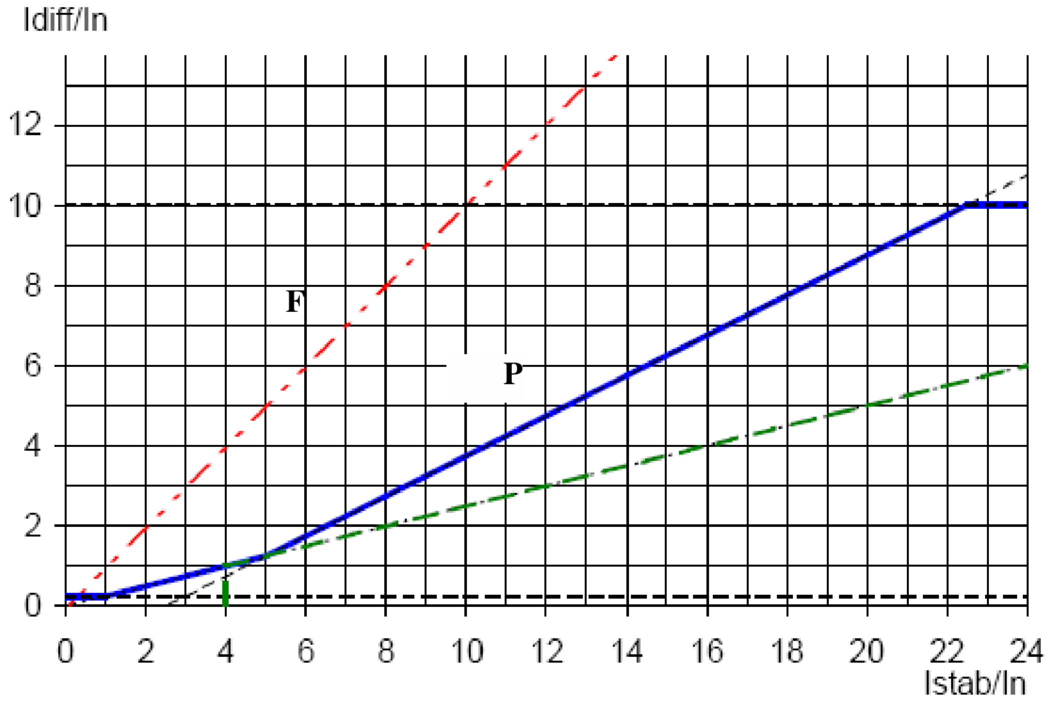
⇒ **SLOPE 2 = 0,50**
BASE POINT 2 = 2,50

Pro vnější poruchy s velkými průchozími proudy je ochrana vybavena přídavnou stabilizací. Počátek přídavné stabilizace na ose ISTAB nastavíme:

⇒ **I-ADD ON STAB. = 4.00 I/InO**
T ADD ON-STAB. = 15 Cycle

Ochrana také dokáže rozpoznat magnetizační proud při zapínání transformátoru, pro který je charakteristická 2.harmonická frekvence. Pokud ochrana detekuje nastavený obsah 2.harmonické složky v měřených proudech, po určitou dobu blokuje případný vypínací povel. Obvykle postačuje základní nastavení od výrobce ochrany.

Výstupem je skutečná charakteristika nastavované ochrany, viz *obrázek 7.6.*



P- charakteristika ochrany, F- charakteristika vnitřní poruchy

Obrázek 7.6 Skutečná charakteristika nastavované rozdílové ochrany 7UT612

7.4.1 Nastavení ochrany

Zapsání vypočítaných parametrů a ochranných funkcí do ochrany se provádí pomocí uživatelského SW DIGSI. V současné době je k dispozici verze 4.

Programování ochrany nástrojem DIGSI není předmětem této práce. Výpis natavení ochrany pomocí DIGSI je v *tabulce 7.3.*

Tabulka 7.3 Tabulka nastavených parametrů ochrany 7UT612 - výtisk z DIGSI

UVOLNĚNÍ FUNKCE:		
0112	87 DIFFERENTIAL PROTECTION	ENABLED
NASTAVENÍ FUNKCE:		
1201	87 DIFFERENTIAL PROTECTION	ON
1205	87 INCREASE OF TRIP CHAR. DURING START	ON
1206	87 INRUSH WITH 2. HARMONIC RESTRAINT	ON
1207	87 N-TH HARMONIC RESTRAINT	5. HARMONIC
1221	87-1 PICKUP VALUE OF DIFFERENTIAL CURR.	0,25 I/INO
1226A	87-1 T I-DIFF> TIME DELAY	0,00 SEC
1231	87-2 PICKUP VALUE OF HIGH SET TRIP	10,0 I/INO
1236A	87-2 T I-DIFF>> TIME DELAY	0,00 SEC
1241A	87 SLOPE 1 OF TRIPPING CHARACTERISTIC	0,25
1242A	87 BASE POINT FOR SLOPE 1 OF CHARAC.	0,00 I/INO
1243A	87 SLOPE 2 OF TRIPPING CHARACTERISTIC	0,50
1244A	87 BASE POINT FOR SLOPE 2 OF CHARAC.	2,50 I/INO
1251A	87 I-RESTRAINT FOR START DETECTION	0,10 I/INO
1252A	87 FACTOR FOR INCREAS. OF CHAR. AT START	1,0
1253	87 MAXIMUM PERMISSIBLE STARTING TIME	5,0 SEC
1261A	87 PICKUP FOR ADD-ON STABILIZATION	4,00 I/INO
1262A	87 DURATION OF ADD-ON STABILIZATION	15 CYCLE
1263A	87 TIME FOR CROSS-BLOCK ADD-ON STABILIZ.	15 CYCLE
1272A	87 TIME FOR CROSS-BLOCKING 2ND HARM.	5 CYCLE
1277A	87 TIME FOR CROSS-BLOCKING N-TH HARM.	3 CYCLE
1278A	87 LIMIT IDIFFMAX OF N-TH HARM.RESTR.	1,5 I/INO

7.5 Porovnání nastavení

Paroplynová teplárna je v provozu od roku 1998. V tomto roce byl celý blok osazen tehdy nejmodernějšími ochrany mi firmy Siemens. Nastavení rozdílové 7UT512 ochrany transformátoru BAT 20 je vytištěno pomocí SW DIGSI 3 a je v *tabulce 7.4.*

Tabulka 7.4 Tabulka nastavených parametrů ochrany 7UT512 - výtisk z DIGSI 3

Settings Parameter set A		
1600	TRANSFORMER DIFFERENTIAL PROTECTION DATA	
1601	State of differential protection	on
1603	Pick-up value of differential current	0.25 I/InTr
1604	Pick-up value of high set trip	9.6 I/InTr
1606	Slope 1 of tripping characteristic	0.25
1607	Base point 2 for slope 2 of tripping charact.	2.5 I/InTr
1608	Slope 2 of tripping characteristic	0.50
1610	State of 2nd harmonic restraint	on
1611	2nd harmonic contend in the different. current	15 %
1612	Time for cross-blocking with 2nd harmonic	0 *1P
1613	Choice a further (n-th) harmonic restraint	5th harmonic
1614	n-th harmonic contend in the differen. current	80 %
1615	Active time for cross-blocking with n-th harm.	0 *1P
1616	Limit IDIFFmax of n-th harmonic restraint	1.5 I/InTr
1617	Max. blocking time at CT saturation	8 *1P
1618	Min. restr. current for blocking at CT satur.	7.00 I/InTr
1625	Trip time delay of diff. current stage IDIFF>	0.00 s
1626	Trip time delay of diff. current stage IDIFF>>	0.00 s
1627	Reset delay after trip has been initiated	0.10 s

Jak je patrné z porovnání tabulek 7.3 a 7.4 nastavení od dodavatele zařízení je defacto shodné s nastavením navrženým v této bakalářské práci.

8 ZÁVĚR

Transformátory jsou cenově jedním z nejdražších prvků přenosové a rozvodové soustavy. Proto jejich ochránění musíme věnovat zvýšenou pozornost neboť jejich výpadek má za následek mnohem větší národohospodářské škody než například výpadek jednotlivých vedení.[5]

Teprve až rozvoj číslicové technologie, která se promítla i do problematiky chránění, přinesl rychlé a spolehlivé chránění ochranami, jejichž vnitřní algoritmy pracují s okamžitými vzorky proudů a napětí, provádějí numerické výpočty potřebných veličin. Přitom veškeré procesy a výpočty v digitálních ochranách probíhají s maximální rychlostí, aby rozhodnutí o vypnutí příslušného silového zařízení bylo vydáno v co nejkratší možné době, aby nedošlo k neopravitelným škodám na zařízení.

Tato bakalářská práce se zabývá teorií chránění transformátorů, která zahrnuje poruchy, jejich rozdělení a příčiny, principy ochran obecně a konkrétní ochrany transformátorů. V této práci byl také předveden historický vývoj ochran a návrh chránění transformátoru digitální rozdílovou ochranou.

8.1 Současný stav

Problematika elektrických ochran obecně se rozvíjí relativně pomalu, neboť současné technologie jsou již na velmi vysoké úrovni a téměř úplně vyhovují reálným požadavkům na chránění. Princip digitální diferenciální ochrany se za posledních 10 let v podstatě nezměnil, jediným vylepšením je stabilizační algoritmus schopný detekovat přesycení PTP. Podstatný rozdíl mezi tzv. moderními digitálními ochranami a dosluhujícími elektromechanickými spočívá v lepší selektivitě digitálních ochran a ve schopnosti rychle působit. Zatímco elektromechanické ochrany působily za určitý čas po vzniku poruchy, digitální jsou schopny působit téměř okamžitě (cca. 10 ms + zpoždění vypínací cesty, tj. relé, čas vypnutí vypínače atd.). Na seminářích v odborné literatuře a na internetu lze najít zprávy o probíhajících výzkumech využití umělé neuronové sítě (UNS), které by teoreticky měly být schopny případné poruchy předvídat a dané zařízení odstavit ještě než k poruše dojde.

8.2 Závěry práce a její přínos

Cílem této práce bylo shrnout teoretické poznatky o chránění transformátorů a na konkrétním příkladu ukázat postup nastavení diferenciální ochrany. Teorie chránění transformátorů byla stručně zmapována, byly popsány nejčastější možnosti poruch a principy chránění proti jejich důsledkům včetně stručného přehledu historického vývoje.

8.3 Význam a využití dosažených výsledků

V závěrečné kapitole této práce byl na konkrétním příkladu předveden postup výpočtu nastavení rozdílové ochrany. Je zde předvedena metoda zjednodušeného výpočtu zkratových proudů a provedeno její srovnání s přesnější metodou provedenou výpočetní technikou. Na základě provedených výpočtů byl vytvořen návrh parametrizace skutečné diferenciální ochrany transformátoru a provedeno porovnání s nastavením stávající rozdílové ochrany.

Ze srovnání metod pro zkratové výpočty vyplývá, že pro nastavení rozdílové ochrany je postačující zjednodušený postup. Chyba oproti zpřesněné metodě je vzhledem nutným rezervám a bezpečnostním odstupům zanedbatelná. Výsledný návrh nastavení ochrany se ve všech podstatných parametrech v podstatě shoduje se skutečným nastavením.

Návrh chránění transformátoru 110kV diferenciální ochranou SIEMENS SIPROTEC 7UT612 provedený podle postupu uvedeného v této práci se shoduje s praxí ověřeným nastavením skutečné ochrany, a lze jej tedy obecně využít i při návrhu ochran jiných transformátorů (pozn. - výsledná parametrizace je platná pouze pro ochrany SIEMENS).

8.4 Návrh dalšího postupu

Pro nastavení základních parametrů diferenciální ochrany platí sice určitá pravidla, ale konkrétní nastavení ochrany vždy závisí na více okolnostech a je z velké části založeno na zkušenostech a úvaze daného projektanta. Pokud by měl být vytvořen obecný návrh postupu, bylo by nutné zvolit vhodný mezinárodní evidenční systém a vytvořit databázi skutečných zařízení a jejich ochran zahrnující praxí ověřená nastavení, evidenci a rozbor poruch a celou řadu dalších informací. Na základě určitých společných znaků by pak teoreticky bylo možné s využitím této databáze definovat určitá obecná pravidla.

POUŽITÁ LITERATURA

[1] GRYM, R., HOCHMAN, P., MACHON, J., BERMANN, J., CICHOŇ B. Chránění II.

[2] HUDECZEK, M., SANTARIUS, P., PANTŮČEK, E., CIHOŇ, B., SATINSKÝ A. Chránění I.

[3] GRYM, HOCHMAN, MACHON, CHMELÍK, HANUŠ, TOMAN. Chránění III

[4] TESAŘOVÁ, M., ŠTROBLOVÁ, M. Průmyslová elektroenergetika. ZČU Plzeň,2000.

[5] HALUZÍK, E., WEIDINGER, L., KRÁTKÝ M. Ochrany a jištění energetických zařízení.

[6] ČSN 33 3051

[7] KATALOG FIRMY SERGI. Transformátorová ochrana.

[8] SIEMENS AKTIENDESELL SCHAFT. Příklady aplikací pro ochrany SIPROTEC. *Energy Automation Division, Postfach 4806.*

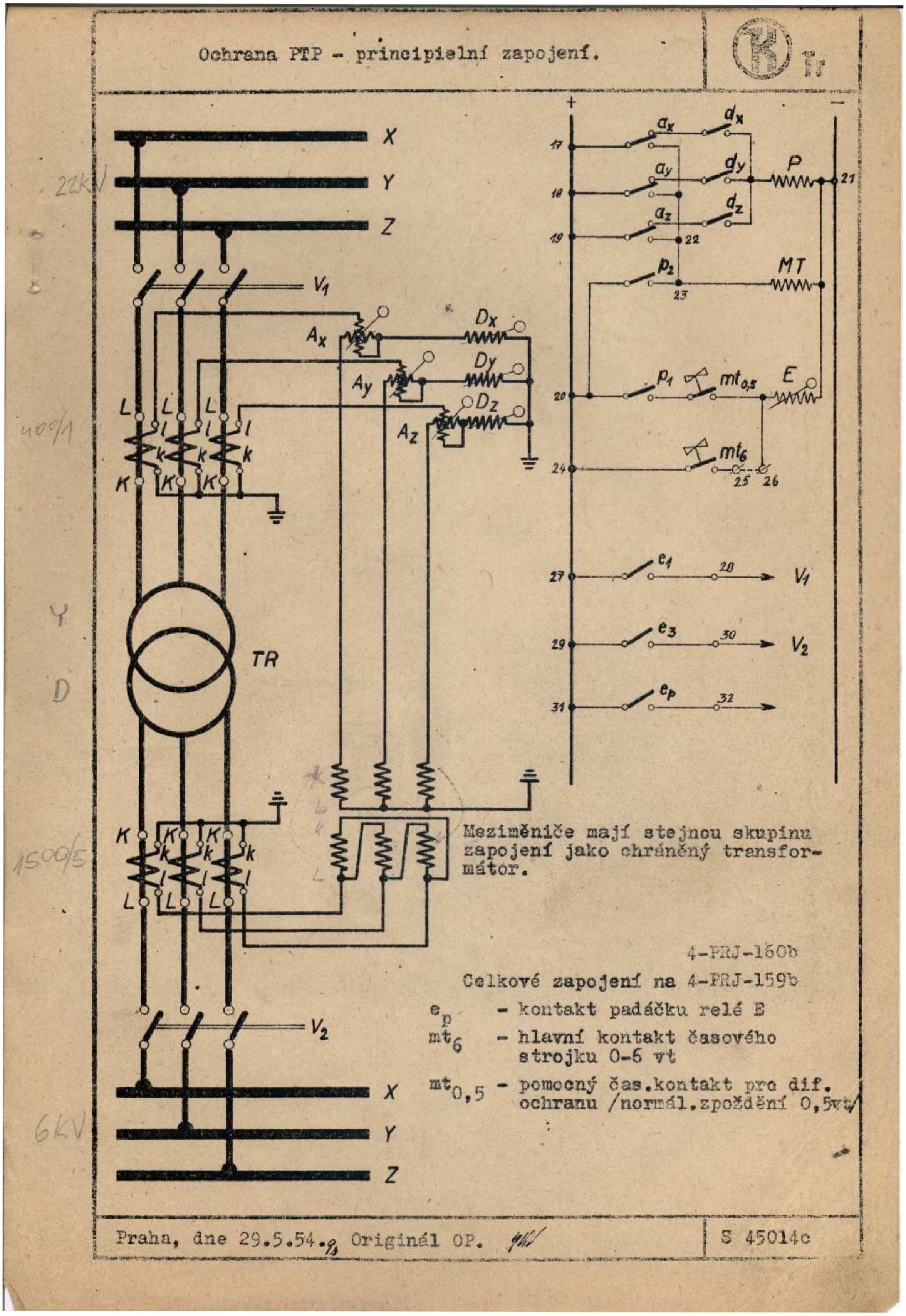
[9] KURAN, Z., POSPÍŠIL, J. Nové možnosti chránění rozdílových ochran. Konference ČK CIRED 2005. Tábor 8. a 9.11 2005.

[10] PROCHÁZKA, K. Základní požadavky na rozdílové ochrany transformátorů. *Dílčí zpráva úkolu 16 01 24 10, EGÚ, 1985.*

[11] KATALOG FIRMY SIEMENS. 7UT612, Diferenciální ochrana, Návod k obsluze, *IEEE Siemens s.r.o., Evropská 33a, Praha 6*

[12] 7UT612 MANUAL. C53000-G1176-C148-1. June 2008, 248 pp. http://siemens.siprotec.de/download_neu/html_nav/ind_dev_e.htm

Příloha A Schéma zapojení rozdílové ochrany PTP



Návod k obsluze rozdílové ochrany PTP firmy Křižík n.p.

Ochrana transformátoru

Vypracovali jsme ochranu, kde v jednom pouzdru je vhodně uspořádána trojfázová ochrana rozdílová a trojfázová nezávislá nadproudá ochrana časová. Rozdílová ochrana je stabilisována a pracuje s časovým zpožděním, aby nenastalo chybné působení ochrany nárazem magnetisačního proudu při zapnutí transformátoru. Může být zapojena na mžikové působení při ochraně generátoru nebo jednotky generátor-transformátor.

Při zkratu mimo obvod, omezený oběma skupinami měřících transformátorů, teče stabilisačními články diferenciální ochrany proud ve stejném směru a proto tyto články přepojí své kontakty, dosáhne-li proud hodnoty na nich seřízené, blokují tím vypínací obvod diferenciálních relé a samy jako nadproudé články spustí časový strojek, který po uběhnutí seřízené doby kontaktem t_3 zapne obvod vypínacího relé E. Každý stabilisační článek má padáček, aby bylo zřejmo, ve které fázi nastala porucha, časový strojek indikuje vlečným ukazatelem dobu trvání poruchy a padáček vypínacího relé indikuje působení ochrany. Zmizí-li porucha před uplynutím doby, seřízené na časovém článku, vrátí se ochrana do původní polohy. Padáčky popudových článků však zůstanou v návěštní poloze, stejně jako vlečný ukazatel indikuje trvání poruchy pokud se indexy společným tlačítkem nevrátí zpět. Při ochraně trojvinuťových transformátorů, kdy je nutno použít dvou souprav stabilisačních článků, je možno, aby nadproudová ochrana vypnula jen ten vypínač, kde došlo k zvýšení proudu nad mez, danou seřízením stabilisačních článků.

Je-li porucha v obvodu mezi měřícími transformátory proudu, ruší se vliv obou cívek stabilisačního článku, kontakt zůstane v klidu, umožňuje funkci článku diferenciálního, který uzavře svůj kontakt, dosáhne-li vyrovnávací proud hodnoty, seřízené na diferenciálním článku. Tak se uzavře obvod pomocného relé P, které připojí časový článek T, a obě relé, časové i pomocné, uzavrou svými kontakty t_2 a p_2 obvod vypínacího relé E. Není-li žádáno zpoždění diferenciální ochrany, na př. při ochraně generátoru, připojí kontakty diferenciálních článků cívku vypínacího relé bez zpoždění. Funkce diferenciálních článků je opět indikována padáčky.

Vypínací relé E má 2 kontakty pro ovládání 2 nezávislých obvodů

316/2

a třetí kontakt, ovládaný padáčkem. Ochrana pracuje plně automaticky a je připravena k další funkci, aniž byly padáčky vráceny do původní polohy.

Dále je na schematu 4-PRJ-159b nakreslena ještě plynová ochrana transformátoru Buchholzovým relé se 2 plováky. Tato ochrana působí i v oblasti malých proudů poruchy, které nemohou býti zjištěny ochranou diferenciální, protože svou velikostí leží v rozsahu vyrovnávacích proudů, způsobených nevyrovnáním převodů měřících transformátorů proudu s napěťovým převodem u regulačních transformátorů. Rozsah ochrany - jak jsme se již zmínili - je omezen jen na nádobu transformátoru. Poruchy uvnitř transformátoru jsou již v zárodku provázeny rozkladem oleje. Tvoří se bubliny plynu, které stoupají v oleji ke konservátoru, procházejí Buchholzovým relé a působí na plováky releových kontaktů. Plynová ochrana působí proto ihned při vzniku jakékoli poruchy v transformátoru. Při malé poruše, kdy vzniká jen málo plynu, hromadí se plyn v horní části plynového relé, stlačuje hladinu oleje, až horní plovák uzavře svůj kontakt a tím obvod padáčkového relé, které signalisuje nebezpečný stav svým padáčkem a připojenou houkačkou nebo jiným zvukovým či optickým signálem. Při větších poruchách nastane mocnější vývin plynu a olejem se šíří tlaková vlna, která působí na dolní plovák relé. Při poruše takového rozsahu je nutno transformátor odpojiti a proto kontakt dolního plováku uzavírá obvod dalšího padáčkového relé, které nejen signalisuje poruchu, ale zároveň svými kontakty vypne vypinače na na obou stranách transformátoru.

Velikou výhodou pro provozní kontrolu je hlášení nebezpečných stavů, hlavně teplot vinutí a oleje. Montují se proto do transformátorů kontaktní teploměry, které ovládají padáčková návěstní relé a zvukový nebo optický signál při dosažení nebezpečného stavu.

TO-91/Mj/Tx
Září 1951.

19.6.54

316/3

Příloha B Diferenciální ochrana transformátoru 7UT512

(Výtah z návodů k obsluze od firmy Siemens)

SIEMENS

7UT612

Diferenciální ochrana

pro chránění transformátorů, generátorů, motorů a přípojnic

Návod k obsluze

©SIEMENS s.r.o., Evropská 33a, Praha 6 31.10.2007

2.2 Rozdílová ochrana

Rozdílová ochrana představuje hlavní funkci přístroje. Pracuje na principu porovnávání proudů. 7UT612 je vhodná pro transformátory, generátory, motory, tlumivky, krátká vedení a (v rámci možných proudových vstupů) uzly (malé rozvodny s přípojnicí). Také je vhodná jako bloková ochrana pro bloky generátor-transformátor.

7UT612 může být rovněž nasazena jako jednofázový přístroj. Pak může být připojeno až 7 konců chráněného objektu, např. přípojnice s až 7 vývody.

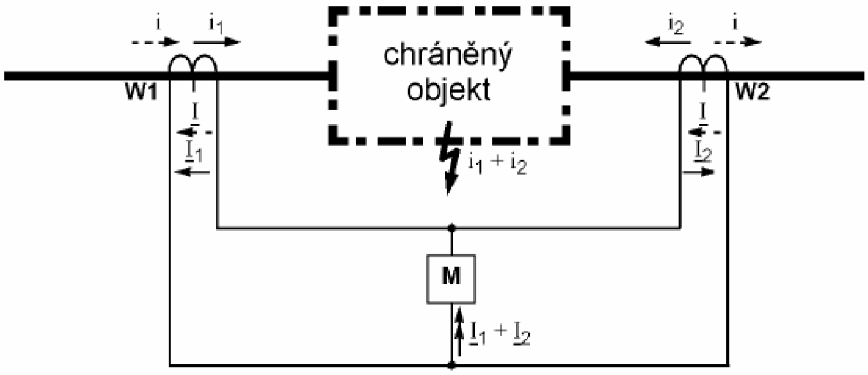
Chráněná oblast je selektivně ohraničena proudovými transformátory na svých koncích.

2.2.1 Popis funkce rozdílové ochrany

Zpracování měřených veličin je závislé na použití rozdílové ochrany. V tomto odstavci je toto zúženo obecně na funkci rozdílové ochrany, nezávisle na tom, jaký je druh chráněného objektu. Přitom je použito jednofázové znázornění. Pak následují charakteristiky jednotlivých chráněných objektů.

Základní princip pro dvě strany

Rozdílová ochrana pracuje na principu porovnávání proudů. Při tom se využívá toho, že chráněným objektem (obrázek 2-7) protéká v bezporuchovém stavu na obou koncích vždy tentýž proud **i** (čárkovaně). Tento teče na jedné straně do uvažovaného objektu a na druhé straně opět vytéká. Rozdíl proudů je prokázanou známkou poruchy uvnitř chráněného objektu. Sekundární vinutí proudových transformátorů **W1** a **W2** na koncích chráněného objektu by mohly být při stejném převodu zapojeny tak, aby se uzavíral proudový obvod se sekundárním proudem **I**, a měřícím členem **M** v příčné větvi neprotékal v bezporuchovém stavu žádný proud.



Obr. 2-7 Základní princip rozdílové ochrany se dvěma konci (jednofázové znázornění)

Při poruše v oblasti, ohraničené proudovými transformátory, dostane měřící člen M součet proudů $i_1 + i_2$, který je úměrný proudům $\underline{I}_1 + \underline{I}_2$, které protékají oběma stranami při poruše. Jednoduché uspořádání dle obrázku 2-7 tedy vede při poruše v chráněné oblasti, kterou protéká poruchový proud, dostatečný pro náběh měřícího členu **M**, spolehlivě k náběhu ochrany.

Proudová stabilizace

Pokud protékají při vnější poruše chráněnou oblastí příliš velké proudy, vyskytuje se při rozdílných převodových poměrech v oblasti sycení proudových transformátorů **W1** a **W2** (obrázek 2-7) v měřícím členu **M** odpovídající rozdílový proud, který by mohl způsobit vypnutí. Chybnému působení ochrany je zabráněno stabilizací.

Pro stabilizaci se u rozdílové ochrany pro chráněný objekt se dvěma konci používá buď rozdíl proudů $|\underline{I}_1 - \underline{I}_2|$ nebo součet absolutních hodnot $|\underline{I}_1| + |\underline{I}_2|$. V oblasti stabilizační charakteristiky, která je nejzajímavější, jsou obě metody shodné. U chráněných objektů s více konci, např. vícevinuťových transformátorů nebo přípojnic je možná pouze součtová metoda. Kvůli tomuto je u 7UT612 použita tato metoda. Je tedy definován:

vypínací nebo rozdílový proud

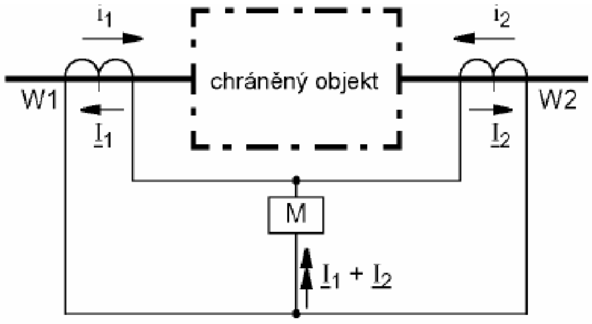
$I_{diff} = |\underline{I}_1 + \underline{I}_2|$

stabilizační proud

$I_{stab} = |\underline{I}_1| + |\underline{I}_2|$

I_{diff} je vypočítáván ze základní harmonické proudů a působí ve vypínacím smyslu, I_{stab} působí proti němu.

Pro objasnění činnosti nechť jsou uvažovány tři důležité provozní stavy s ideálními a přizpůsobenými měřenými veličinami (obrázek 2-9):



Obr. 2-9 Definice proudů

a) Průchozí proud při bezporuchovém provozu nebo při poruše mimo chráněnou oblast:

$\underline{I}_2$ otáčí svůj směr, tzn. mění znaménko, tj. $\underline{I}_2 = -\underline{I}_1$;
kromě toho je $|\underline{I}_2| = |\underline{I}_1|$

$I_{diff} = |\underline{I}_1 + \underline{I}_2| = |\underline{I}_1 - \underline{I}_1| = 0$
$I_{stab} = |\underline{I}_1| + |\underline{I}_2| = |\underline{I}_1| + |\underline{I}_1| = 2 \cdot |\underline{I}_1|$

Chybí vypínací veličina ($I_{diff} = 0$), stabilizace (I_{stab}) odpovídá dvojnásobku protékajícího proudu.

b) Vnitřní porucha, napájení z obou stran např. stejně velkými proudy;

Pak platí $\underline{I}_2 = \underline{I}_1$; kromě toho je $|\underline{I}_2| = |\underline{I}_1|$

$I_{diff} = |\underline{I}_1 + \underline{I}_2| = |\underline{I}_1 + \underline{I}_1| = 2 \cdot |\underline{I}_1|$
$I_{stab} = |\underline{I}_1| + |\underline{I}_2| = |\underline{I}_1| + |\underline{I}_1| = 2 \cdot |I_1|$

Vypínací veličina (I_{diff}) a stabilizační veličina (I_{stab}) jsou stejně velké a odpovídají celkovému zkratovému proudu.

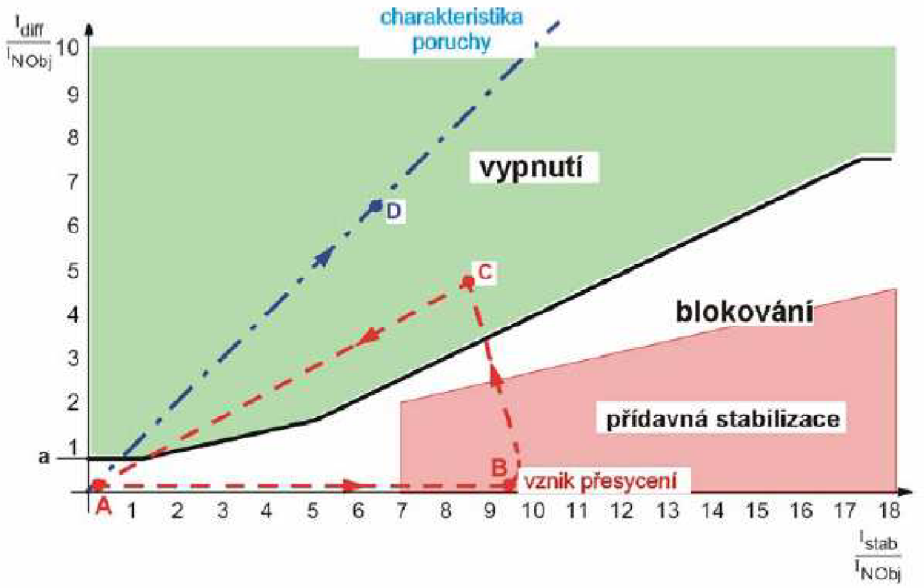
c) Vnitřní porucha, napájení jen z jedné strany:

Pak platí $\underline{I}_2 = 0$

$I_{diff} = |\underline{I}_1 + \underline{I}_2| = |\underline{I}_1 + 0| = |\underline{I}_1|$
$I_{stab} = |\underline{I}_1| + |\underline{I}_2| = |\underline{I}_1| + 0 = |\underline{I}_1|$

Vypínací veličina (I_{diff}) a stabilizační veličina (I_{stab}) jsou stejně velké a odpovídají zkratovému proudu jedné strany.

Při vnitřní poruše je tedy $I_{diff} = I_{stab}$. Tímto je charakteristika pro vnitřní poruchy definována ve vypínacím diagramu přímkou se sklonem 45° (obrázek 2-10, čárkovaná čára).



Obr. 2-10 Vypínací charakteristika rozdílové ochrany s charakteristikou poruchy

Přídavná stabilizace při poruchách mimo chráněnou oblast

Sycení proudových transformátorů při velkých zkratových proudech a/nebo dlouhých časových konstantách sítě nehraje při vnitřních zkratech (v chráněné oblasti) prakticky žádnou roli, protože zkreslení měřených hodnot se projeví ve stejné míře v rozdílovém i stabilizačním proudu. Charakteristika poruchy na obrázku 2-10 platí principiálně i zde. Samozřejmě musí sekundární proud přesyceného transformátoru proudu překročit alespoň náběhovou mez (**a** na obrázku 2-10).

Při vnější poruše, která způsobí velký protékající zkratový proud, může přesycení proudových transformátorů, pokud se na měřících místech projevuje velmi rozdílně, představovat značný rozdílový proud, který, pokud se pracovní bod I_{diff}/I_{stab} nachází ve vypínací oblasti charakteristiky (obrázek 2-10), by mohl vést bez dalších opatření k falešnému vypnutí.

7UT612 disponuje indikátorem přesycení, který takové stavy rozpozná a provede příslušná opatření pro stabilizaci. Indikátor přesycení vyhodnotí dynamický jev rozdílového a stabilizačního proudu.

Čárkovaná čára na obrázku 2-10 ukazuje průběh proudu při vnějších poruchách s přesyceným proudovým transformátorem na jedné straně.

Bezprostředně po vzniku poruchy (**A**) rostou zkratové proudy nejprve silně a způsobí dostatečně velký stabilizační proud (2 x protékající proud). Nyní dojde k přesycení jen na jedné straně (**B**), toto vyvolá rozdílový proud a oslabí proud stabilizační, takže se pracovní bod může přesunout až do vypínací oblasti (**C**).

Při vnitřních zkratech stoupá naproti tomu pracovní bod ihned podél charakteristiky poruchy (**D**), protože stabilizační proud je zhruba stejně velký jako proud rozdílový.

Přesycení proudových transformátorů při vnějších poruchách je tedy rozpoznáno tím, že nejprve protéká velký okamžitý stabilizační proud. Indikátor přesycení provede své rozhodnutí v první čtvrtperiodě. Je-li rozpoznána vnější porucha, je rozdílová ochrana po nastavený čas blokována. Blokování je zrušeno, jakmile je rozpoznáno, že se pracovní bod I_{diff}/I_{stab} nachází staticky (tzn. alespoň jednu periodu) uvnitř vypínací oblasti poblíž charakteristiky poruchy. Tímto jsou rozeznány následné poruchy uvnitř chráněné oblasti také po předchozím vnějším zkratu s přesycením proudových transformátorů.

Stabilizace harmonickými

Obzvláště u transformátorů a příčných tlumivek mohou při zapnutí vzniknout krátkodobě velké magnetizační proudy (Rush), které tečou do chráněné oblasti, ale nikoliv již ven. Působí tak jako jednostranně tekoucí poruchový proud. Také při paralelním spínání transformátorů nebo při přebuzení zvýšeným napětím nebo nízkou frekvencí vznikají nežádoucí rozdílové proudy.

Zapínací náraz může dosáhnout několikanásobku jmenovitého proudu a vyznačuje se relativně vysokým podílem druhé harmonické (dvojnásobek jmenovité frekvence), zatímco ve zkratovém proudu úplně chybí. Překročí-li obsah druhé harmonické v rozdílovém proudy nastavenou mez, je zabráněno vypnutí.

Kromě druhé harmonické může být v 7UT612 použita pro stabilizaci další harmonická (nastavitelná). Na výběr jsou třetí a pátá harmonická.

Statické přebuzení se vyznačuje lichými harmonickými. Zde se pro stabilizaci hodí třetí nebo pátá harmonická. Protože u transformátorů je často třetí harmonická eliminována (např. ve vinutí do trojúhelníku), používá se většinou pátá.

Také u usměrňovacích transformátorů mají liché harmonické vliv, který u vnitřních zkratů neexistuje.

U rozdílových proudů je proto měřen podíl vyšších harmonických. Pro frekvenční analýzu se používají frekvenční filtry, které provádějí Fourierovu analýzu rozdílových proudů. Jakmile jsou podíly vyšších harmonických větší než nastavené meze, provede se při vyhodnocování příslušné fáze stabilizace. Algoritmy filtrů jsou optimalizovány vzhledem k oscilačním jevům tak, aby se ušetřila dodatečná opatření pro stabilizaci při dynamických dějích.

Protože stabilizace při zapnutí pracuje samostatně pro každou fázi, je ochrana optimálně účinná, také pokud je transformátor zapnut do jednofázové poruchy, přičemž může v ostatních zdravých fázích téct zapínací proud. Je ale rovněž možné nastavit ochranu tak, aby překročení dovoleného podílu vyšší harmonické v proudu jen jedné fáze stabilizovalo nejen fázi se zapínacím proudem, ale aby byly zablokovány i zbývající fáze. Tato tzv. funkce „Crossblock" může být omezena na určitou dobu.

Rychlé vypnutí při velkých zkratových proudech

Vnitřní poruchy v chráněné oblasti s velkými proudy mohou být vypínány ihned bez ohledu na stabilizační proudy, pokud je na základě velikosti proudů jisté, že se nemůže jednat o vnější poruchu. U chráněných objektů s velkými vlastními podélnými impedancemi (transformátory, generátory, podélné tlumivky) se dá nalézt hodnota proudu, která nemůže být nikdy překročena při vnějších poruchách.

U transformátoru to je např. (primární) hodnota $\frac{1}{u_{k\ Trafo}} \cdot I_{N\ Trafo}$.

Rozdílová ochrana 7UT612 disponuje nestabilizovaným rychlým vypínacím stupněm. Tento působí tehdy, pokud se díky přesycení proudových transformátorů stejnosměrnou složkou vyskytuje ve zkratovém proudu stejnosměrná složka, která by mohla být stabilizací při zapínání interpretována jako druhá harmonická.

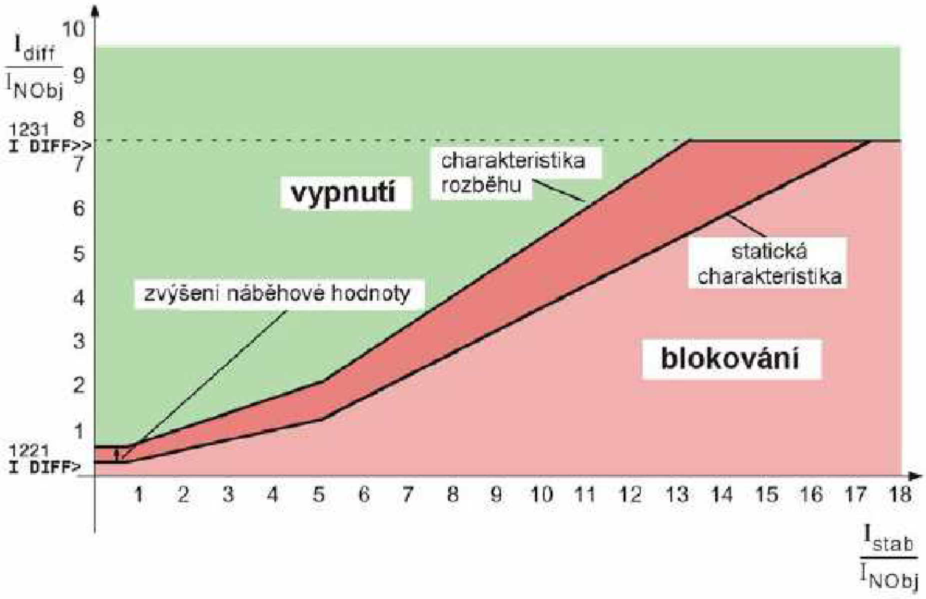
Rychlé vypnutí pracuje jak se základní harmonickou rozdílového proudu tak s okamžitými hodnotami. Zpracování okamžitých hodnot garantuje rychlé vypnutí i tehdy, pokud je základní harmonická utlumena přesycením proudových transformátorů. Kvůli možnému posunu proudů při vzniku zkratu pracuje zpracování okamžitých hodnot od dvojnásobku nastavené hodnoty.

Zvýšení náběhových hodnot při rozběhu

Zvýšení náběhových hodnot je zvlášť vhodné pro motory. Na rozdíl od transformátorů je u motorů zapínací proud proudem protékajícím. Rozdílové proudy mohou ale vzniknout tím, že proudové transformátory mají před zapnutím rozdílné zbytkové magnetizace a tím rozdílné pracovní body svých hysterezí. Tyto rozdílové proudy jsou sice malé, mohou ale při citlivém nastavení působit chybně.

Jako dodatečná záruka proti nadbytečným funkcím při zapnutí chráněného objektu, kterým neprotékal žádný proud, může být při rozběhu použito zvýšení náběhových hodnot.. Pokud stabilizační proud jedné fáze překročil nastavenou hodnotu **ANLAUF-STAB**, je aktivováno zvýšení náběhových hodnot. Je-li stabilizační proud v normálním provozu dvojnásobkem protékajícího proudu, jeho překročení je pak kritériem pro vypnutí chráněného objektu. Náběhová hodnota **I-DIFF>** i ostatní části stupně I_{diff}> se zvýší o nastavený činitel (viz obrázek 2-11).

Obnovení stabilizačního proudu je znakem rozběhu. Po nastaveném čase **Max.ANLAUFZEIT** se charakteristika vrátí zpět.



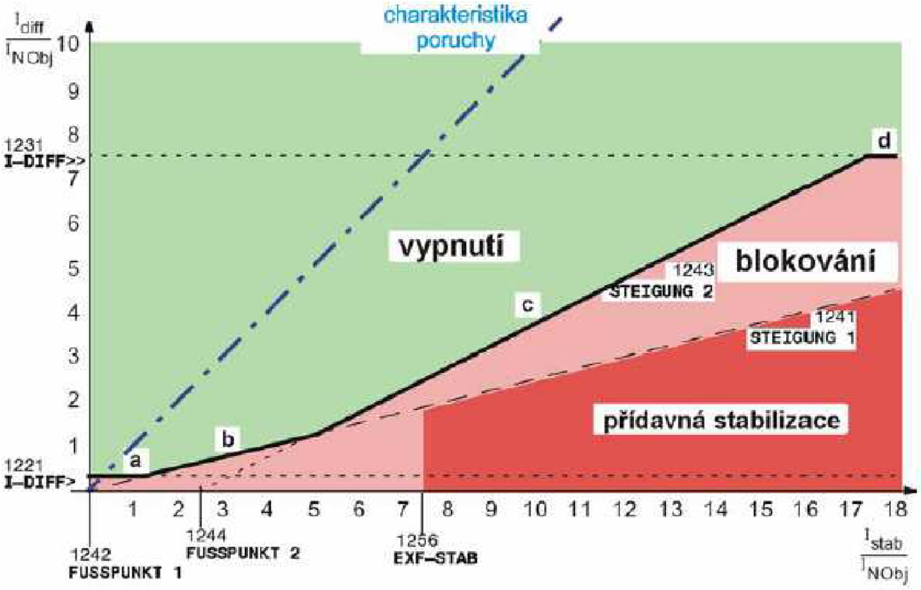
Obr. 2-11 Zvýšení náběhových hodnot při rozběhu

Charakteristika

Obrázek 2-12 ukazuje úplnou vypínací charakteristiku 7UT612. Část **a** představuje mez citlivosti (hodnota **I-DIFF>**) a respektuje konstantní proudové chyby jako např. magnetizační proudy.

Část **b** zohledňuje proudově proporcionální chyby, které se vyskytují kvůli chybám převodu proudových transformátorů a vstupních transformátorů přístroje nebo např. odchylkám v přizpůsobení a přepínání stupňů u transformátorů s regulací napětí.

V oblasti velkých proudů, které mohou vyvolat přesycení proudových transformátorů, se stará část **c** o silnější stabilizaci.



Obr. 2-12 Vypínací charakteristika rozdílové ochrany

Při rozdílových proudech nad částí **d** dojde k vypnutí nezávisle na stabilizačním proudu a stabilizaci harmonickými (hodnota **I-DIFF>>**). Toto je tedy oblast „rychlého vypnutí při velkých zkratových proudech".

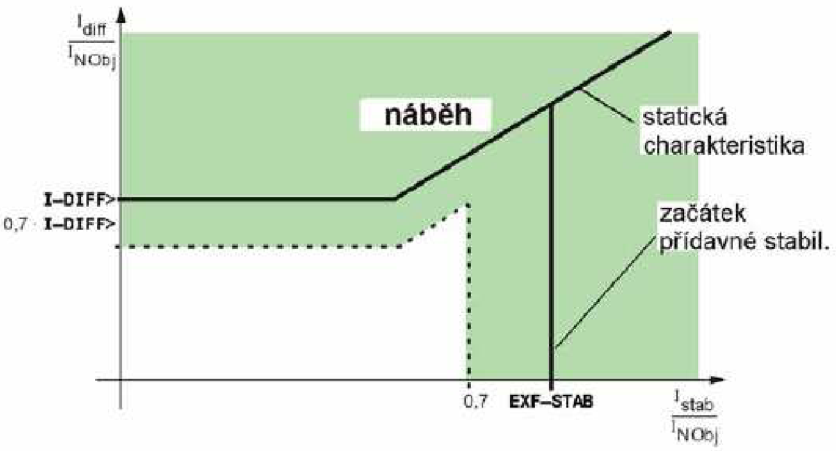
Oblast **přídavné stabilizace** je určena indikátorem přesycení (viz nahoře pod nadpisem „Přídavná stabilizace při poruchách mimo chráněnou oblast").

Veličiny I_{diff} a I_{stab} jsou rozdílovou ochranou uspořádány ve vypínací charakteristice dle obrázku 2-12. Pokud mají tyto veličiny pracovní bod uvnitř vypínací oblasti, dojde k vypnutí.

Náběh, návrat

Obvykle rozdílová ochrana nepotřebuje žádný „náběh", protože detekce poruchy a podmínka vypnutí jsou identické. Avšak jako všechny přístroje SIPROTEC® disponuje rovněž 7UT612 náběhem, který představuje pro řadu následných aktivit okamžik startu. Náběh určuje začátek poruchy. Toto je nutné, aby byly např. ukládány poruchové protokoly a záznamy poruch. Ale také vnitřní funkce potřebují co možná nejpřesnější okamžik začátku poruchy, také pro poruchy mimo chráněnou oblast, jako např. indikátor přesycení, který musí svou úlohu splnit právě při protékajících zkratových proudech.

Náběh je detekován, pokud základní harmonická rozdílových proudů dosáhne 70 % náběhové hodnoty nebo stabilizační proud dosáhne více než 70 % v oblasti přídavné stabilizace (obrázek 2-13). Signál o náběhu je rovněž generován při náběhu rychlého vypínacího stupně pro velké zkratové proudy.



Obr. 2-13 Náběh rozdílové ochrany

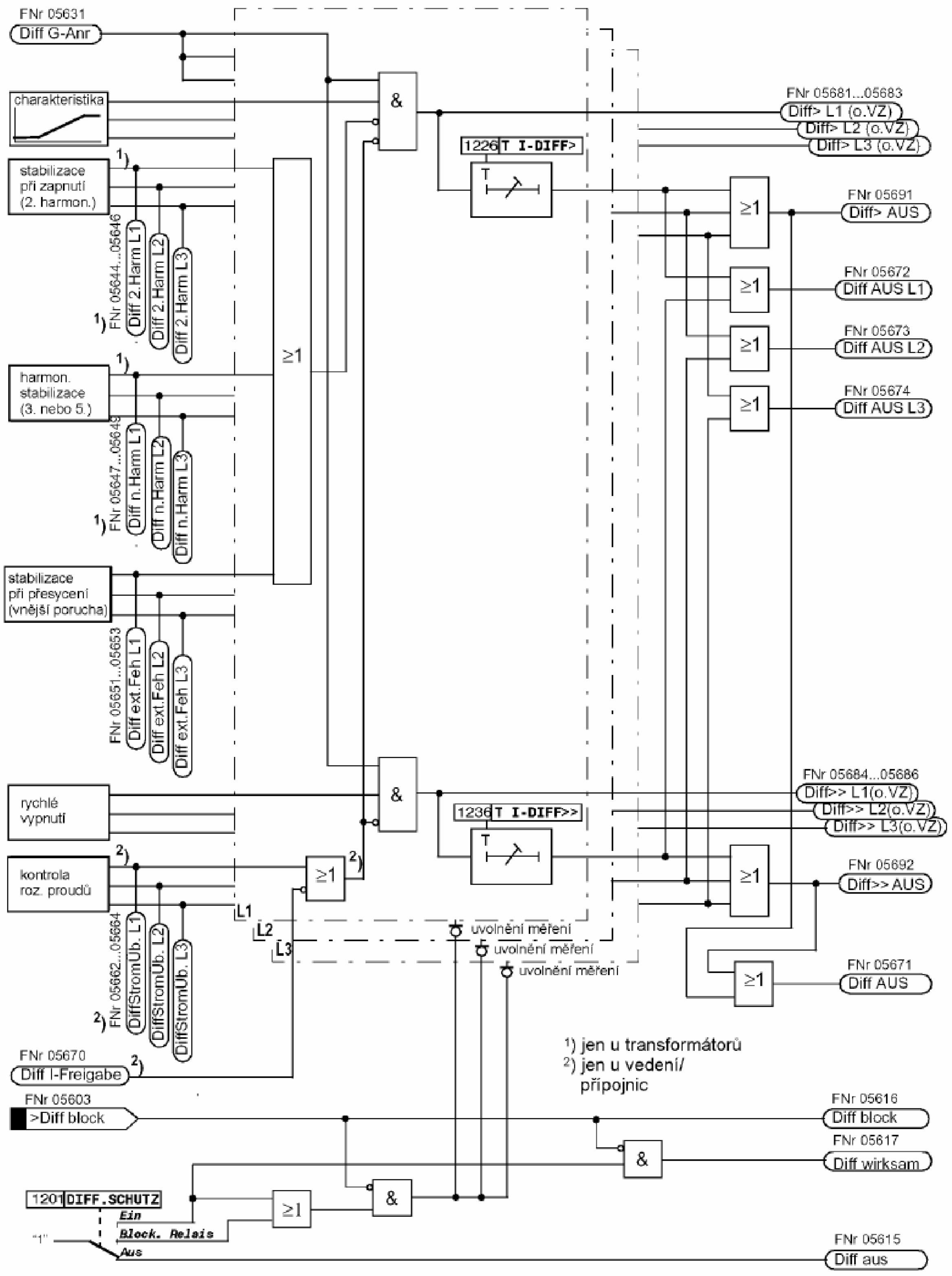
Pokud je aktivována stabilizace vyššími harmonickými, je provedena nejdříve analýza vyšších harmonických (asi 1 perioda), aby byly přezkoušeny podmínky pro stabilizaci. Jinak vypínací povel následuje, pokud jsou splněny podmínky pro vypnutí (vypínací oblast na obrázku 2-12).

V mimořádných případech může být vypínací povel zpožděn.

Obrázek 2-14 ukazuje zjednodušené schéma vypínací logiky.

K návratu dojde, pokud alespoň po dobu 2 period již neexistuje v rozdílových veličinách žádný příznak náběhu, tzn. rozdílový proud klesne < 70 % nastavené hodnoty a také ostatní podmínky náběhu již nejsou splněny.

Pokud nebyl vyslán vypínací povel, je porucha návratem ukončena. Pokud však byl generován vypínací povel, je tento přidržen po dobu minimální délky povelu, která byla pro všechny ochranné funkce nastavena ve všeobecných údajích o přístroji (viz také odstavec 2.1.2 pod nadpisem „Délka povelu", strana 27).



Obr. 2-14 Vypínací logika rozdílové ochrany

Příloha C 7UT612 Manual; C53000-G1176-C148-1 [12] (Požadavky na měřící transformátory)

4.1 General Device Data

4.1.1 Analog Inputs

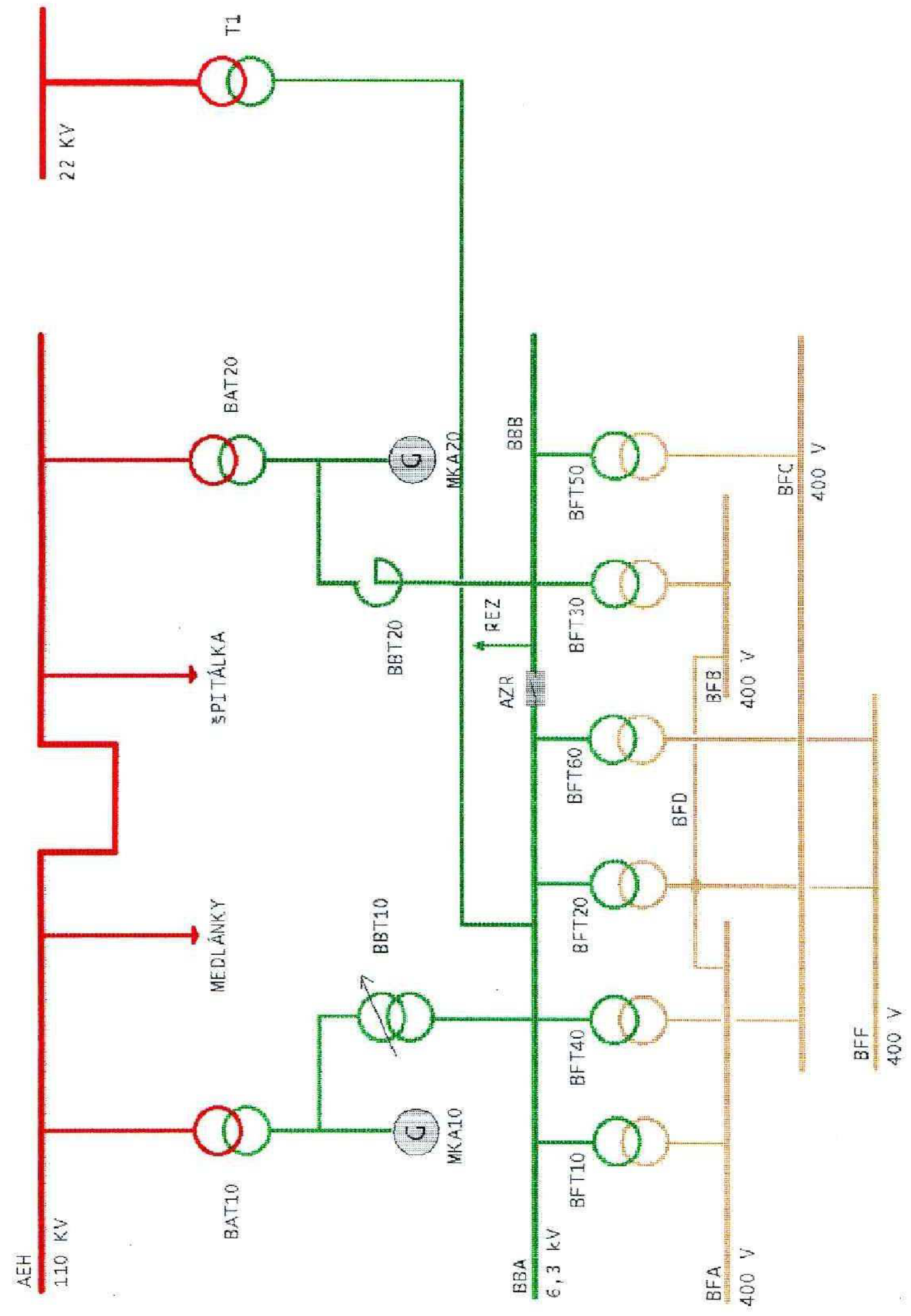
	Nominal frequency	f_N	50 Hz / 60 Hz / $16^2/_3$ Hz (adjustable)
Current Inputs	Nominal current	I_N	1 A or 5 A or 0.1 A (changeable)
	Power consumption per input I_1 to I_7		
	– at I_N = 1 A		approx. 0.02 VA
	– at I_N = 5 A		approx. 0.2 VA
	– at I_N = 0.1 A		approx. 1 mVA
	– for high-sensitivity input I_8 at 1 A		approx. 0.05 VA
	Current overload capability per input I_1 to I_7		
	– thermal (rms)		100 · I_N for 1 s
			30 · I_N for 10 s
			4 · I_N continuous
	– dynamic (pulse)		1250 A (half cycle)
	Current overload capability for high-sensitivity input I_8		
	– thermal (rms)		300 A for 1 s
			100 A for 10 s
			15 A continuous
	– dynamic (pulse)		750 A (half cycle)
Current Transformer Requirements	Underburden factor $n' = n \cdot \frac{P_N + P_i}{P' + P_i}$		$n' \geq 4 \cdot \frac{I_{kd\ max}}{I_{N\ prim}}$ for $\tau \leq 100$ ms; $n' \geq 5 \cdot \frac{I_{kd\ max}}{I_{N\ prim}}$ for $\tau > 100$ ms
	max. ratio of nominal primary current of the current transformers to nominal object current		$\frac{I_{Nprim\ transf}}{I_{Nprim\ obj}} \leq \begin{cases} 4 \text{ for phase currents} \\ 8 \text{ for earth current at I7} \end{cases}$

4.1.2 Power Supply

Direct Voltage — Voltage supply via integrated DC/DC converter:

Nominal power supply direct voltage U_{NDC}	24/48 VDC	60/110/125 VDC
Permissible voltage ranges	19 to 58 VDC	48 to 150 VDC

Nominal power supply direct voltage U_{NDC}	110/125/220/250 VDC
Permissible voltage ranges	88 to 300 VDC

Permissible AC ripple voltage, peak to peak	≤15 % of the nominal power supply voltage

Příloha D Přehledové schéma paroplynové teplárny Červený Mlýn