ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh chránění transformátoru s využitím vysokoimpedanční rozdílové ochrany

Stanislav Vokrouhlík **Plzeň 2017**

Originál (kopie) zadání BP/DP

Abstrakt

Diplomová práce je zadána firmou ABB a je zaměřena na návrh chránění transformátoru s využitím vysokoimpedanční rozdílové ochrany. V práci je popsán princip vysokoimpedanční rozdílové ochrany a nastavení všech ochranných funkcí, které souvisí s koncepcí chránění transformátoru 66/11 kV. Dále v práci je provedena kontrola selektivity všech použitých ochran.

Klíčová slova

Transformátor, vysokoimpedanční rozdílová ochrana, selektivita, stabilizační odpor, nelineární odpor.

Abstract

This master thesis was assigned by ABB company and it is focused on designing the power transformer protection using the high impedance differential protection. Thesis deals with protection concept for 66/11 kV power transformer, hence the principle of high impedance differential protection and settings of all protective functions related to this transformer are described. Finally, the test of selectivity for all used protections was done.

Key words

Transformer, high impedance differential protection, selectivity, stabilizing resistance, nonlinear resistance

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval svému konzultantovi diplomové práce Ing. Martinovi Procházkovi za cenné profesionální rady a připomínky a vedoucí diplomové práce Ing. Janě Jiříčkové, Ph.D. za metodické vedení práce. Dále bych rád poděkoval rodině za trvalou podporu při studiu na Západočeské univerzitě v Plzni.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 16.5.2017 Stanislav Vokrouhlík

Obsah

OBSAH ..... **- 6 -**
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK ..... **- 9 -**
ÚVOD ..... **- 11 -**
1 OBECNÁ KONCEPCE CHRÁNĚNÍ TRANSFORMÁTORU ..... **- 12 -**
1.1 PARAMETRY TR 66/11 KV ..... - 13 -
1.2 ZAPOJENÍ TR ..... - 14 -
1.3 KONCEPT CHRÁNĚNÍ TRANSFORMÁTORU 66/11 KV ..... - 15 -
2 OCHRANY ..... **- 19 -**
2.1 POŽADAVKY NA CHRÁNĚNÍ ..... - 19 -
2.2 PORUCHOVÉ STAVY ..... - 21 -
2.3 ZÁKLADNÍ ČLENY OCHRAN ..... - 23 -
2.3.1 Vstupní člen ..... *- 23 -*
2.3.2 Měřicí člen ..... *- 24 -*
2.3.3 Popudový člen ..... *- 25 -*
2.3.4 Logika ..... *- 26 -*
2.3.5 Koncový člen ..... *- 26 -*
2.3.6 Časový člen ..... *- 26 -*
2.3.7 Napájecí člen ..... *- 27 -*
2.4 ROZDÍLOVÁ OCHRANA ..... - 28 -
2.4.1 Princip ..... *- 28 -*
2.4.2 Nepříznivé vlivy na rozdílové ochrany ..... *- 31 -*
2.5 NADPROUDOVÁ OCHRANA ..... - 34 -
2.5.1 Časově závislá nadproudová ochrana ..... *- 35 -*
2.5.2 Časově polozávislá nadproudová ochrana ..... *- 37 -*
2.5.3 Časově nezávislá nadproudová ochrana ..... *- 38 -*
2.5.4 Mžiková nadproudová ochrana ..... *- 39 -*
2.6 ZEMNÍ OCHRANA ..... - 39 -
2.7 AUTOMATIKA SELHÁNÍ VYPÍNAČE ..... - 40 -
2.8 MECHANICKÉ OCHRANY ..... - 41 -
2.8.1 Buchholzovo relé ..... *- 41 -*

2.8.2 Tepelné ochrany ..... *- 42 -*
2.8.3 Přetlakový ventil ..... *- 42 -*
3 VYSOKOIMPEDANČNÍ ROZDÍLOVÁ OCHRANA ..... - 43 -
3.1 OBECNÝ PRINCIP ..... - 43 -
3.1 DIAGRAMY STAVŮ OCHRANY ..... - 44 -
3.1 HIGH IMPEDANCE RESTRICTED EARTH FAULT PROTECTION ..... - 50 -
4 PŘÍSTROJOVÉ TRANSFORMÁTORY ..... - 51 -
4.1 PŘÍSTROJOVÉ TRANSFORMÁTORY NAPĚTÍ ..... - 51 -
4.2 PŘÍSTROJOVÉ TRANSFORMÁTORY PROUDU ..... - 52 -
4.2.1 Obecné požadavky PTP ..... *- 52 -*
4.2.2 Požadavky PTP pro rozdílovou ochranu ..... *- 53 -*
4.2.3 PTP pro vysokoimpedanční rozdílovou ochranu ..... *- 54 -*
5 VÝPOČET NASTAVENÍ A KONTROLA ODPORŮ ..... - 55 -
5.1 VÝPOČET STABILIZAČNÍHO ODPORU ..... - 55 -
5.2 DIMENZOVÁNÍ NELINEÁRNÍHO ODPORU ..... - 59 -
5.3 KONTROLA STABILIZAČNÍHO ODPORU ..... - 61 -
5.3.1 Kontrola na výkonové ztráty ..... *- 61 -*
5.3.2 Kontrola na proudové a napěťové ztráty ..... *- 63 -*
6 NÁVRH JEDNOTLIVÝCH OCHRAN ..... - 65 -
6.1 NADPROUDOVÁ FÁZOVÁ OCHRANA NA 11 KV ..... - 65 -
6.2 ZÁLOŽNÍ ZEMNÍ OCHRANA NA 11 KV ..... - 66 -
6.3 SMĚROVÁ NADPROUDOVÁ FÁZOVÁ OCHRANA NA 11 KV ..... - 67 -
6.4 AUTOMATIKA SELHÁNÍ VYPÍNAČE ..... - 67 -
6.5 ROZDÍLOVÁ OCHRANA TR ..... - 68 -
6.5.1 Kontrola stability při krajních odbočkách ..... *- 70 -*
6.6 MŽIKOVÁ NADPROUDOVÁ FÁZOVÁ OCHRANA NA 66 KV ..... - 72 -
6.7 NADPROUDOVÁ FÁZOVÁ OCHRANA NA 66 KV ..... - 73 -
7 KONTROLA SELEKTIVITY ..... - 74 -
7.1 POSTUP KONTROLY ..... - 74 -

7.2 VÝSLEDKY KONTROLY ..... - 75 -
7.2.1 Nadproudová a mžiková ochrana na 66 kV ..... *- 75 -*
7.2.2 Zemní záložní ochrana na 11 kV ..... *- 77 -*
7.2.3 Nadproudová a směrová ochrana na 11 kV ..... *- 79 -*
7.2.4 Všechny použité nadproudové ochrany ..... *- 83 -*
7.3 NASTAVOVACÍ TABULKA ..... - 85 -
8 ZÁVĚR ..... - 86 -
SEZNAM OBRÁZKŮ ..... - 87 -
SEZNAM TABULEK ..... - 88 -
SEZNAM ROVNIC ..... - 88 -
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ ..... - 90 -
PŘÍLOHY ..... - 91 -

Seznam symbolů a zkratek

PTP	Přístrojový transformátor proudu
PTN	Přístrojový transformátor napětí
TR	Transformátor
U1	Primární napětí
U2	Sekundární napětí
p	Převod transformátoru
S_n	Jmenovitý výkon TR
I_0	Proud naprázdno
Δu_k	Napětí nakrátko
ΔP_0	Ztráty naprázdno
ΔP_k	Ztráty nakrátko
HV	Strana vyššího napětí
LV	Strana nižšího napětí
1U,1V,1W	Popis primárních fází
2U,2V,2W	Popis sekundárních fází
N	Nulový vodič
K	Dovolená odchylka
T	Perioda
x(t)	Funkce měřené veličiny
t	Čas
A, P	Definované konstanty pro každý typ křivky
α, β, C	Materiálové konstanty varistoru
k	Koeficient časového násobení
emsA,emsB	Elektromotorické napětí strany A, B
$2RL_A$, $2RL_b$	Odpor přívodního vedení strany A, B
R	Odpor
S_{STAB}	Stabilizační odpor
R_{NEL}	Nelineární odpor
K	Bezpečnostní koeficient zvět. zkratový proud
I_k''	Maximální zkratový proud
I_{N1}	Jmenovitý proud na 66 kV

I_{N2}	Jmenovitý proud na11 kV
$u_{k\%}$	Napětí nakrátko
R_c	Celkový odpor
R_{CT}	Odpor PTP
R_L	Odpor kabelu
R_R	Zátěžný odpor připojeného relé
R_s	Stabilizační odpor ochrany
ρ	Měrná rezistivita mědi
l	Délka kabelu
S	Průřez kabelu
U_s	Minimální provozní napětí
U_N	Jmenovité napětí TR na 66 kV
$U_{N+5\ \%}$	Jmenovité napětí na odbočce +5
$U_{N-15\ \%}$	Jmenovité napětí na odbočce +15
$U_{k_max_Rs'}$	Napěťová přetížitelnost odporu R_s
$U_{k_max_Rmax}$	Napěťová přetížitelnost odporu R_{max}
$I_{k_0,5s}$	Krátkodobý proud přes R_s
$I_{k_0,5s'}$	Krátkodobý proud přes R_{max}
I_s	Jmenovitý proud PTP na 11 kV
I_p	Jmenovitý proud PTP na 66 kV
I_{res}	Proud procházející varistorem
I_d	Rozdílový proud
I_{stab}	Stabilizační proud
I_P	Celková primární proudová citlivost systému
I_R	Proudová citlivost relé
I_{res}	Proud procházející varistorem
$\sum I_{mag}$	Suma magnetizačního proudu pro 4 PTP
$I>$	Nastavení mžikové ochrany
I_{Kmax}	Zkratová odolnost rozvodny
P_{var}	Tepelné ztráty na varistoru
t_k	Čas, než dojde k přehřátí
E_{var}	Absorbovaná tepelná energie

ÚVOD

Tato diplomová práce je zaměřena na návrh chránění transformátoru s využitím vysokoimpedanční rozdílové ochrany. Jako chráněný objekt je 40 MV transformátor od firmy Alstom 66/11 kV. Tento neobvyklý transformátor bude následně použit v rozvodně v Kataru.

Práce je zadána firmou ABB pro zpracování, přiblížení a navržení vysokoimpedanční rozdílové ochrany. Tato ochrana se u nás v ČR téměř nepoužívá. Naopak na východě Evropy a v Saudských Emirátech se tato ochrana používá zcela běžně.

Hlavním cílem této práce je navržení celého ochranného konceptu s využitím ochrany RET 670 od ABB, kde bude použita vysokoimpedanční rozdílová ochrana jako hlavní ochrana. Koncept chrání, obsahuje nejen vysokoimpedanční rozdílovou ochranu, ale také klasickou rozdílovou ochranu, dále pak jsou použity nadproudové a nadproudové mžikové ochrany. Nejsou opomenuty ani mechanické ochrany a automatika selhání vypínače.

Práce je rozdělena do několika kapitol, od popsání a vysvětlení co je to ochrana, jaké jsou na ni kladené nároky, přes samotný návrh konceptu chránění a popsání všech použitých ochran až k samotnému návrhu a nastavení jednotlivých ochranných funkcí a kontrole selektivity.

1 Obecná koncepce chránění transformátoru

Transformátory jsou obecně velmi drahá a důležitá zařízení v elektrizační soustavě, proto je velice důležité je chránit. Při provozu nechráněného transformátoru by při vzniku poruchy mohlo dojít ke zničení zařízení a ohrožení lidských životů. Z těchto důvodů se transformátory chrání hned několika ochranami najednou. Používají se ochrany proti vnitřním a vnějším poruchám a ochrany na dynamické a pomalé poruchy. Jelikož v Kataru nemají žádnou normu, která by specifikovala chránění transformátoru, budu vycházet z české normy ČSN 33 3051 (1991) + změna Z1 (2000) a ze zavedené praxe. Norma je rozdělena podle výkonu transformátoru.

- **Transformátory do 1,7 MVA -** nadproudovou zkratovou ochranou na primární straně nebo impedanční, pokud to situace vyžaduje, nadproudovou zkratovou na sekundární (terciální) straně.
- **Transformátory od 1,7 MVA -** nadproudovou a nadproudovou zkratovou ochranou na primární straně nebo impedanční, pokud to situace vyžaduje, nadproudovou zkratovou na sekundární (terciální) straně, plynovou popřípadě rozdílovou, pokud to situace vyžaduje.
- **Transformátory od 5 MVA do 25 MVA -** nadproudovou a nadproudovou zkratovou ochranou na primární straně nebo impedanční, pokud to situace vyžaduje, nadproudovou zkratovou na sekundární (terciální) straně, plynovou popřípadě rozdílovou, pokud to situace vyžaduje, nádobovou ochranu u transformátorů s účinně uzemněným uzlem.
- **Transformátory od 25 MVA -** nadproudovou a nadproudovou zkratovou ochranou na primární straně nebo impedanční, pokud to situace vyžaduje, nadproudovou zkratovou na sekundární (terciální) straně, plynovou popřípadě rozdílovou, pokud to situace vyžaduje, nádobovou ochranu u transformátorů s účinně uzemněným uzlem, po dohodě s výrobcem tepelnou ochranou. [1]

Budu vycházet z poslední podmínky pro transformátory od 25 MVA, protože navrhuji koncept chránění transformátoru od značky ALSTOM s výkonem 40 MVA a napěťovými hladinami 66/11 kV.

1.1 Parametry TR 66/11 kV

Zapojení	Dyn1
U1 (kV)	66
U2 (kV)	11
Sn (MVA)	32/40
f (Hz)	50
i_0 (%)	0,065
ΔP0 (kW)	16,91
ΔPk (kW)	216,4

Tab. 1.1: Štítkové hodnoty TR

Jelikož transformátor má dva pracovní režimy, ONAN (bez chlazení) a ONAF (s chlazením), bylo nutné přepočíst napětí nakrátko ze stavu ONAN na stav ONAF. V tabulce *Tab. 1.2* jsem provedl jednoduchý přepočet napětí nakrátko pomocí obyčejné trojčlenky *(rov. 1.***1)** Přepočet jsem musel provést, protože transformátor má ve stavu ONAN (stav bez chlazení) výkon 32 MAV s ve stavu ONAF (stav s maximálním chlazením) výkon 40 MAV a protože transformátor bude provozován v Kataru, kde je průměrná teplota kolem 33 °, a bude v provozu 24 hodin denně 7 dní v týdnu. Je tedy jasné, že transformátor bude převážnou dobu ve stavu ONAF.

$$u_K\,\% = \frac{14{,}36}{40} * 32 = 17{,}95\,\%$$

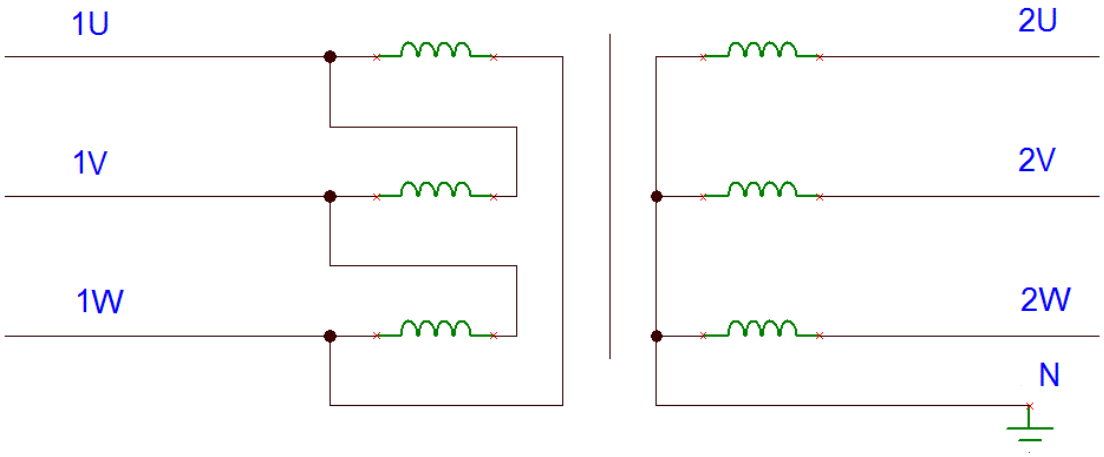
(rov. 1.1)

Napětí nakrátko			
pozice odbočky	1	5	17
HV/LV 32 MVA (%)	14,36	13,91	12,78
HV/LV 40 MVA (%)	17,95	17,39	15,98

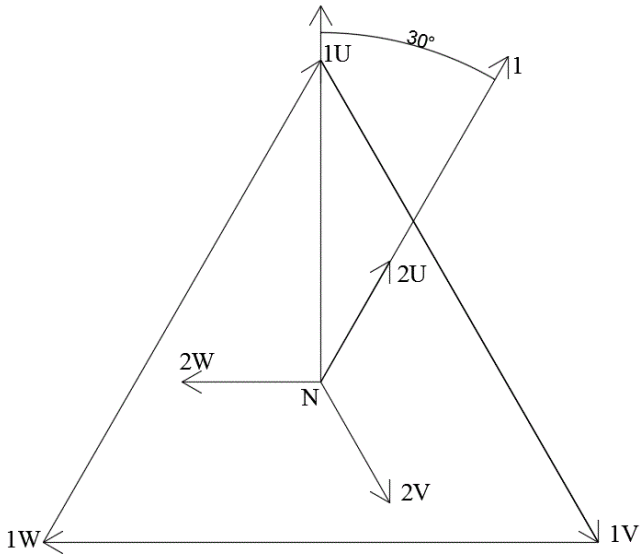
Tab. 1.2: Přepočet napětí nakrátko

1.2 Zapojení TR

Transformátor je zapojen trojúhelník-hvězda s hodinovým číslem 1 (Dyn1). Jeho zapojení je vidět níže na obrázku *obr. 1.1* a hodinové číslo na obrázku *obr. 1.2*, to znamená fázový posun mezi primárním a sekundárním napětím.



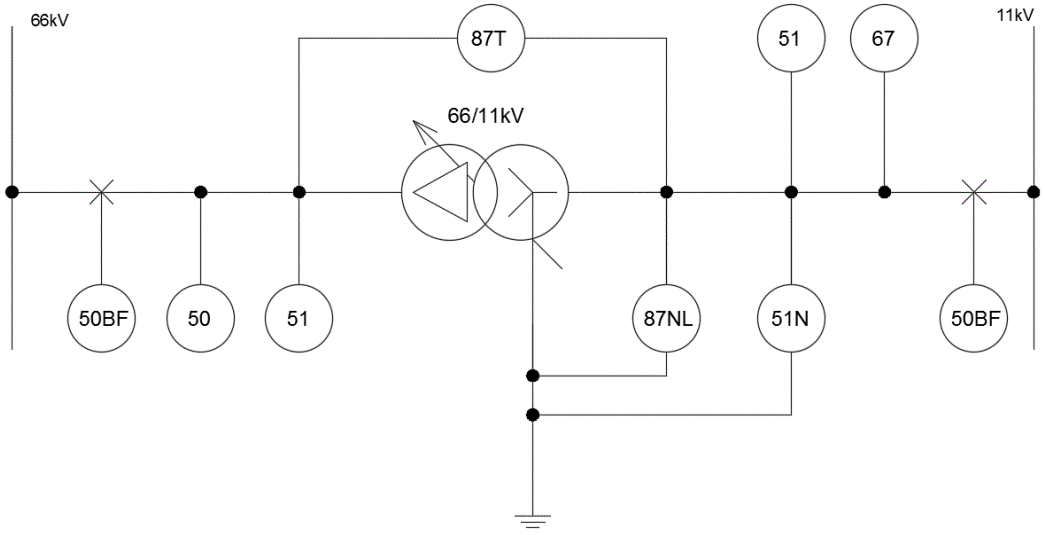
obr. 1.1: Schéma zapojení TR



obr. 1.2: Diagram hodinového čísla 1

1.3 Koncept chránění transformátoru 66/11 kV

Pro chránění transformátoru použiji ochrany od firmy ABB. Jako hlavní ochranu transformátoru použiji ochranu RET 670, která umí více ochranných funkcí. Jako záložní ochrana bude použita ochrana REF 615, která bude chránit transformátor proti zemním poruchám (ANSI značení 51N). Na straně vyššího napětí bude použita ochrana REB 500 BU (automatika selhání vypínače). V ochraně RET 670 nastavím jako hlavní ochrannou funkci transformátoru rozdílovou ochranu (ANSI značení 87T), která bude chránit celý transformátor. Pro stranu nižšího napětí použiji ochrannou funkci High Impedance Restricted Earth Fault Protection (ANSI značení 87NL), u nás v ČR se jí říká vysokoimpedanční zemní rozdílová ochrana. Na straně vyššího napětí bude použita mžiková nadproudová ochrana (ANSI značení 50). Ochrana RET 670 také disponuje nadproudovými ochrannými funkcemi (ANSI značení 51), která bude nastavena na obou stranách transformátoru stejně. Pouze bude přepočtena na jinou proudovou hodnotu podle převodu. Dále ochrana RET 670 umí ochrannou funkci směrové nadproudové ochrany (ANSI značení 67), která bude použita pro chránění strany nižšího napětí. Celý ochranný systém je pak zálohován automatikou selhání vypínače (ANSI značení 50BF), která je použita na vypínač strany vyššího napětí, tak i na vypínač strany nižšího napětí. Celý ochranný koncept je vidět na obrázku níže *obr. 1.3*.



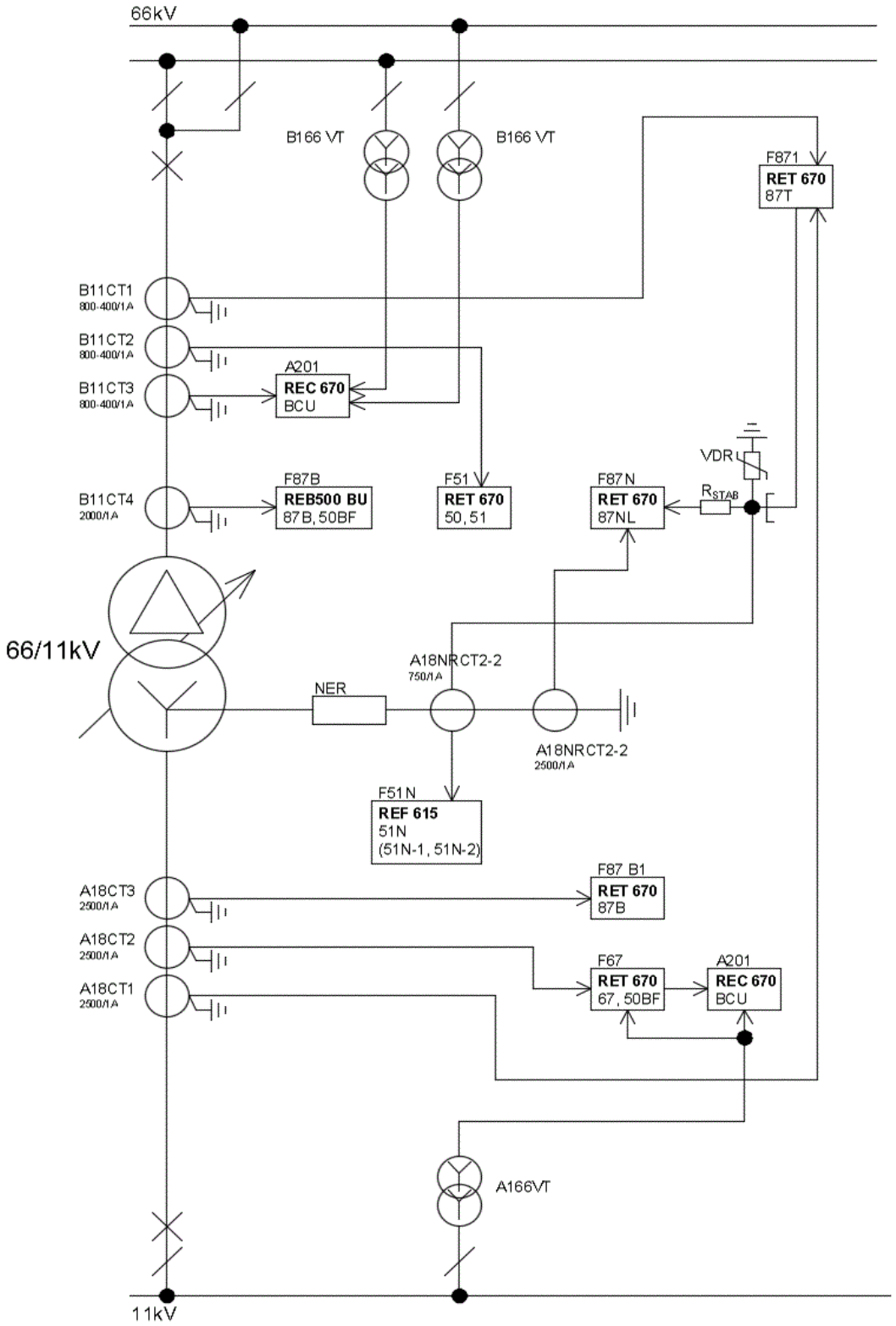
obr. 1.3: Koncept chránění transformátoru 66/11 kV

Tabulka níže *Tab. 1.3:* Seznam použitých ochran a funkcí popisuje jednotlivé bloky ochran, typ a jejich funkci.

Název ochrany	Typ	Funkce ANSI-kódu	Popis	Strana instalace
F871	RET 670	87T	Rozdílová ochrana transformátoru	HV a LV
F87N	RET 670	87NL (LV-N)	Vysokoimpedanční zemní omezující rozdílová ochrana	LV
F51	RET 670	50	Mžiková nadproudová ochrana	HV
F51	RET 670	51	Nadproudová fázová ochrana	HV
F87B	REB 500-BU	50BF	Automatika selhání vypínače	HV
F87B	REB 500-BU	87B	Rozdílová ochrana přípojnic	HV
F87B1	RET 670	87B	Rozdílová ochrana přípojnic	LV
F67	RET 670	67	Směrová nadproudová ochrana	LV
F67	RET 670	50BF	Automatika selhání vypínače	LV
F51N	REF 615	51N-1,2,3	Záložní zemní ochrana	LV
F67	RET 670	51-1,2	Nadproudová fázová ochrana	LV

Tab. 1.3: Seznam použitých ochran a funkcí

Schéma na další stránce zobrazuje propojení jednotlivých ochran s přístrojovými transformátory proudu.



obr. 1.4: Podrobné schéma zapojení ochran TR

Na schématu zapojení, které je výše na obrázku *obr. 1.4* je vidět principiální zapojení ochran. Ochrany jsou zapojeny na měřicí transformátory, kdy na hladině vyššího napětí to jsou přístrojové transformátory proudu B11CT, které jsou přepínatelné v rozsahu v 800-400 A a převádějí měřenou hodnotu na 1A. Na straně nižšího napětí transformátoru to jsou PTP A18CT, které převádí hodnotu proudu na snáze měřitelnou hodnotu 1 A. V mém případě má převod 2500/1 A. Měřicí transformátory na vyvedené nule nižšího napětí transformátoru jsou další dva PTP A18NRCT.

Ze schématu zapojení na obrázku *obr. 1.4* je vidět, že hlavní rozdílová ochrana je připojena na PTP na primární a sekundární straně transformátoru. Vysokoimpedanční zemní rozdílová ochrana je připojena na stranu nižšího napětí a na vyvedenou nulu transformátoru. Ochrana vyhodnocuje poruchu ze čtyř měřicích transformátorů. Jeden na vyvedené nule transformátoru a tři z jednotlivých fází. Odpor R_{STAB} slouží ke stabilizaci porovnávaných proudů zemní omezující rozdílové vysokoimpedanční ochrany. Nelineární odpor označený jako VDR (Voltage Dependent Resistor – rezistor závislý na napětí), dále pak varistor, slouží k zabránění přesycení na PTP a tím chrání samotné PTP a vstupy ochran. Další odpor, označený jako NER, je použit kvůli omezení napěťových špiček na zemnícím vývodu transformátoru.

Dále v konceptu chránění transformátoru nesmí být zapomenuto na ochranu REC 670 s funkcí BCU (Bay control unit). Jedná se o ovládací terminál, který zajišťuje měření a signalizaci obsluze. Ochrany, které nejsou naznačeny v konceptu, jsou použity na chránění. Jedná se o mechanické ochrany, které jsou popsány v další kapitole. [2][3]

2 Ochrany

2.1 Požadavky na chránění

Ochrany se používají pro předejití velkým materiálním ztrátám a ohrožení na lidských životech. Ochrana musí rychle a spolehlivě zareagovat na danou poruchu, poté ji správně vyhodnotit a vybavit. To znamená, že musí ve stanoveném čase vybavit pouze tu část, na které vnikla porucha, aby nedošlo k poškození chráněného zařízení, případně oblasti. Proto po ochranách jsou požadovány tyto vlastnosti:

- **Spolehlivost funkce ochrany –** je schopnost ochrany plnit požadovanou funkci po stanovenou dobu při zachování provozních parametrů ochrany, daných technickými podmínkami. Spolehlivost funkce znamená, že ochrana nesmí při poruše selhat a naopak, že nesmí samovolně působit, neobjeví-li se porucha.
- **Odolnost ochrany rušení –** znamená, že ochranu nesmí ovlivňovat vnější vlivy, které by měly nežádoucí dopad na správnou funkci ochrany, jako je nehostinné prostředí (vlhkost, prašnost…), otřesy, magnetické a elektrické vlivy.
- **Rychlost ochrany –** je dána od doby vzniku poruchy do doby vybavení. Při vzniku zkratu tečou zařízením velké nežádoucí proudy až několika desítek kilo-ampér. Při takto velkých proudech vznikají dynamické a tepelné účinky, zejména při dlouhém trvání zkratu. Díky těmto účinkům pak degraduje izolace chráněného zařízení. Proto se snažíme nastavovat tuto dobu co nejkratší.
- **Citlivost ochrany –** ochrana musí okamžitě reagovat na vzniklou poruchu v chráněném objektu, která se projeví změnou sledované veličiny (napětí, proud nebo odvozením z těchto dvou). Na druhou stranu ochrana musí být necitlivá při přechodových stavech v ES nebo poruchách mimo chráněný objekt.
- **Přesnost ochrany –** poměrná chyba citlivosti ochrany vyjádřená v procentech.
- **Nařiditelnost ochrany –** rozsah všech hodnot s určitou citlivostí, na které lze ochranu nastavit.
- **Přídržný poměr ochrany –** je to poměr vstupní stavové veličiny při návrhu ochrany k velikosti stavové veličiny při rozběhu ochrany. Toto číslo je vždy menší než jedna a je dáno výrobcem.

- **Rozlišovací schopnost –** je schopnost ochrany rozeznat minimální velikost Δx od poruchového a neporuchového stavu. Tato minimální velikost Δx se nazývá rozlišovací schopnost ochrany.
- **Doba působení ochrany –** je časový úsek od vzniku poruchy a signálem na výstupu ochrany.
- **Přetížitelnost ochrany –** je maximální velikost vstupní veličiny, která nebude mít vliv na správnou funkci a životnost ochrany.
- **Spotřeba ochrany –** je příkon potřebný pro správný chod ochrany. Je udáván výrobcem a napájení musí být nezávislé na chráněném zařízení.
- **Absolutní chyba –** je rozdíl mezi naměřenou a skutečnou hodnotou.
- **Zálohování ochran –** se používá u důležitých zařízení. V praxi to znamená, že když selže hlavní ochrana, musí záložní ochrana zajistit ochranu chráněného zařízení.
    - Místní záložní ochrana – pracuje na jiném principu než ochrany hlavní.
    - Vzdálená záložní ochrana – pracuje na stejném principu jako ochrany hlavní.
- **Selektivita ochran –** je schopnost ochrany vybrat z chráněného objektu ten prvek, který je postižen poruchou, a provést jeho odpojení nejbližšími vypínači od ostatních zařízení tak, aby nepoškozená část zůstala v provozu. Selektivita je zajištěna těmito způsoby:
    - Časovým odstupňováním vypínacích časů
    - Odstupňováním hodnoty nastavené veličiny
    - Měřením veličiny na více místech
    - Měřením více veličin současně
    - Směrovým nastavením ochran

[1][7][8]

2.2 Poruchové stavy

Všechna chráněná zařízení musejí být chráněny před těmito jevy, které mohou vzniknout v elektrizační síti a mají nežádoucí vliv na chráněné zařízení.

- **Zkrat –** vzájemné spojení dvou fází, tří fází nebo se zemí. Při zkratu dochází ke zvýšení tepelného i silového namáhání zařízení a celé postižené ES. Zkrat způsobuje zejména degradaci izolace.
- **Zemní spojení –** galvanické spojení jedné fáze se zemí v síti s izolovaným uzlem. Vzniká zvýšené nebezpečí následného zkratu.
- **Přetížení –** vniká průchodem příliš velké energie zařízením. Vzniká zde tepelné namáhání a tím i degradace izolace. Velikost poškození závisí i na době přetížení.
- **Přepětí –** se dělí na atmosférické a provozní. Atmosférické přepětí je způsobeno úderem blesku do vedení nebo indukcí při úderu blesku blízko rozvodného zařízení. Provozní přepětí vznikají při spínacích pochodech.
- **Podpětí –** při konstantním odběru má podpětí za následek proudové přetížení. Může být způsobené nedostatečnou kompenzací sítě.
- **Zvýšení kmitočtu –** bývá způsobené poruchou výkonu, čímž působí mechanicky na chráněná zařízení a připojené stroje.
- **Snížení kmitočtu –** dochází k němu přetížením zdrojů energie v síti a má za následek zvětšení magnetizačních proudů a tím zvětšení ztrát z oteplení.
- **Zpětný tok výkonu –** je porucha nebezpečná zvlášť pro točivé stroje. Zpětný tok výkonu je způsoben buď chybnou regulací výkonu, nebo špatnou energetickou bilancí sítě. [1][7][8][9]

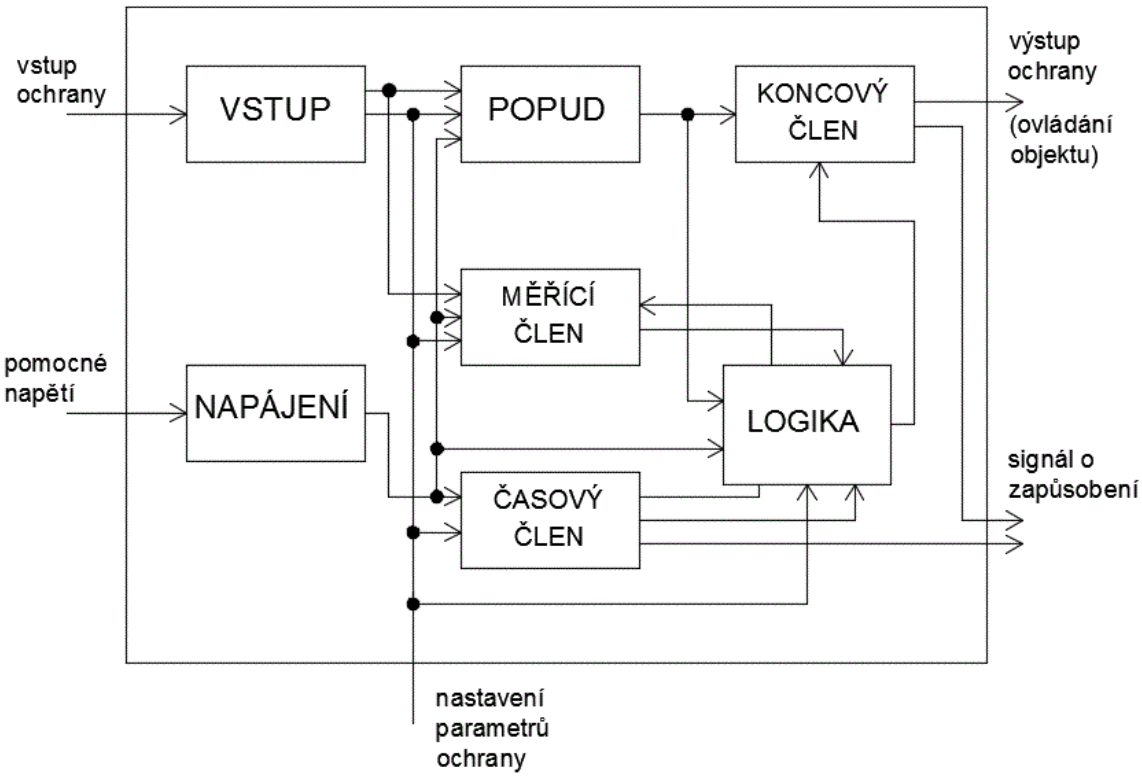
Transformátor musí být chráněn jak před vnějšími, tak i vnitřními poruchami. Rozdělení je patrné z tabulky *Tab. 2.1*.

Druhy poruch		Druhy ochran
Vnější poruchy	Přetížení	Proudová na přetížení Nezávislá nadproudová nebo distanční
	Vnější zkrat	
Vnitřní poruchy (objevující se náhle)	Zkraty ve vinutí	Rozdílová ochrana a plynové relé Nádobová (kostrová) ochrana
	Zkraty ve vinutí a vinutí na nádobu	
Vnitřní poruchy objevující se pozvolna	Špatné galvanické styky, špatná izolace plechů, vnikající mikrooblouky v nádobě – vliv plynů v oleji	Plynové relé
	Porucha chlazení – přehřátí oleje v nádobě – vliv plynů v oleji	

Tab. 2.1: Tabulka poruch a používaných ochran [9]

2.3 Základní členy ochran

Ochrany jsou převážně složeny z následujících bloků. Takové typické blokové schéma je vidět na obrázku. *obr. 2.1*



obr. 2.1: Vnitřní členy ochrany[7]

2.3.1 Vstupní člen

Převádí vstupní měřené hodnoty z PTN a proudu na zpracovatelný signál, které tvoří vstupní hodnoty ochrany 100 V, 5 A nebo 1 A. Eliminuje rušení a chybné signály. Galvanicky odděluje ochranu od okolí. U moderních ochran se používají číslicové vstupní členy, které jsou tvořeny A/D převodníky. Tyto převodníky pak převádí analogový signál na číslicový tvar.

2.3.2 Měřicí člen

Na jeho vstupní svorky je přiveden stav chráněného objektu. Měřicí člen vymezuje prostor působení ochrany a rozhoduje o poruše. To znamená, že posuzuje stav chráněného objektu jako normální, nebo poruchový. Pak se rozlišuje devět typů měřicích členů:

- Střídavý amplitudový člen na střední hodnotu

$$K = \frac{1}{T}\int_0^T |x(t)|dx$$

(rov. 2.1)

- Střídavý amplitudový člen na efektivní hodnotu

$$K^2 = \frac{1}{T}\int_0^T x^2(t)dx$$

(rov. 2.2)

- Stejnosměrný amplitudový měřicí člen

$$K = \frac{1}{T}\int_0^T x(t)dx$$

(rov. 2.3)

- Amplitudový měřicí člen na maximální hodnotu

$$K = max[x(t)]$$

(rov. 2.4)

- Závislý měřicí člen: měří velikost napětí a proudu po dobu trvání poruchy.

$$K = t \cdot (x - x_\infty)$$

$$\mathrm{t} = \infty \quad \mathrm{pro} \quad \mathrm{x} \leq x_\infty$$

$$t = \frac{K}{(x - x_\infty)} \quad pro \;\; x > x_\infty$$

(rov. 2.5)

- Rozdílový měřicí člen: provádí rozdíl amplitud vstupní a výstupní měřené veličiny. Ochrana zapůsobí v případě, je-li rozdíl měřených hodnot větší než nastavované rozmezí K.

$$K = \frac{1}{T}\int_0^T |x_1(t) - x_2(t)|\, dt$$

(rov. 2.6)

- Amplitudový komparátor: je podobný rozdílovému měřicímu členu, akorát má větší citlivost, kde K→0.

$$0 = \frac{1}{T}\int_0^T |x_1(t) - x_2(t)|\, dt$$

(rov. 2.7)

- Součinový měřicí člen

$$K = \frac{1}{T}\int_0^T x_1(t) \cdot x_2(t)\, dt$$

$$je - li \quad x_1(t) = u(t) \quad a \quad x_2(t) = i(t) \qquad pak$$

$$K = P = UIcos\varphi$$

(rov. 2.8)

- Fázový komparátor: je součinový měřicí člen s citlivostí K→0.

2.3.3 Popudový člen

Při vzniku poruchy dává popudový člen signál měřicímu členu a logice, které pak rozhodnou o zapůsobení ochrany, protože ne každá porucha se má řešit touto ochranou. Popudový člen pouze vyšle impuls, který pak rozběhne funkci ochrany. Popudový člen je citlivější než měřicí člen, i když se konstrukčně moc neliší.

2.3.4 Logika

Logika zpracovává signál, který dostala od popudového členu, a určuje funkci měřicího členu. Z výsledných hodnot měřicího členu dává logika signál koncovému členu. Protože všechny vstupy a výstupy logiky jsou booleovské funkce, lze její strukturu tvořit třemi logickými funkcemi: součet, součin a negace. Pak lze logiku realizovat jako:

- Klasické pomocné relé
- Jazýčkové relé
- Diody
- Tranzistory
- Integrované obvody
- Software číslicového procesu

2.3.5 Koncový člen

Koncový člen nejčastěji představuje pomocné relé s výkonovými kontakty. Na jejich vstup přichází signál z logiky nebo časového členu. Koncový člen převádí tento vnitřní signál ochrany na vyšší výkonovou úroveň, aby mohl ovládat akční členy. Signál musí mít dostatečnou úroveň, aby byl odolný vůči rušivým vlivům.

2.3.6 Časový člen

Vstup časového členu je signál z logiky. Časový člen tento signál zpožďuje, to znamená, že prodlužuje dobu působení ochrany. Prodloužení doby působení ochrany se dělá hlavně z těchto tří důvodů:

- Zajištění selektivity
- Využití možné akumulace energie v objektu
- Vyloučení chybného působení ochran

2.3.7 Napájecí člen

Napájení ochrany může být zajištěno několika způsoby:

- Ochrany bez napájení
- Přímé napájení ze staniční baterie
- Napájení přes stabilizátor
- Akumulátor umístěný v ochraně
- Galvanické oddělení přes transformátor a soustavou střídač-usměrňovač
- Napájení z přístrojových transformátorů

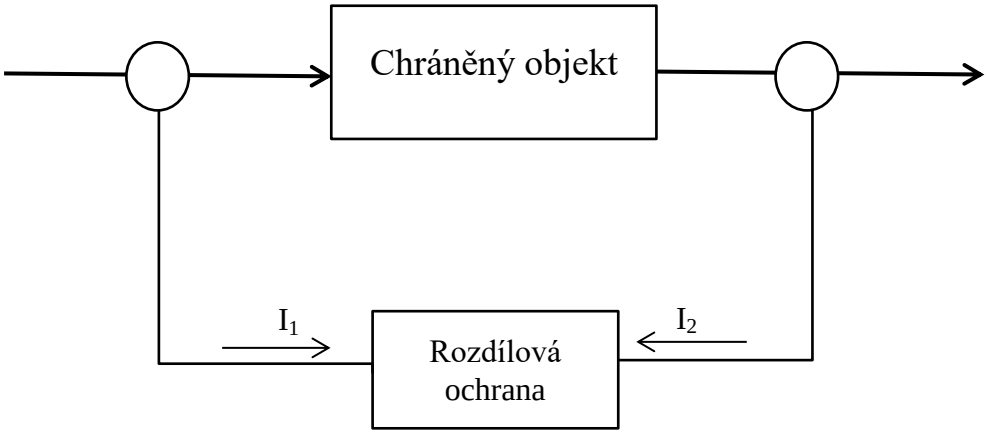
[6][7][8][9]

2.4 Rozdílová ochrana

Rozdílová (diferenciální) ochrana chrání elektrická zařízení proti vnitřním zkratům ve vinutí. Nejčastěji to jsou transformátory, generátory, velké motory, dnes se běžně používá i jako ochrana přípojnic v rozvodně.

2.4.1 Princip

Princip této ochrany je velice jednoduchý. Ochrana porovná vstupní proudy do chráněné oblasti s výstupními proudy z chráněné oblasti.



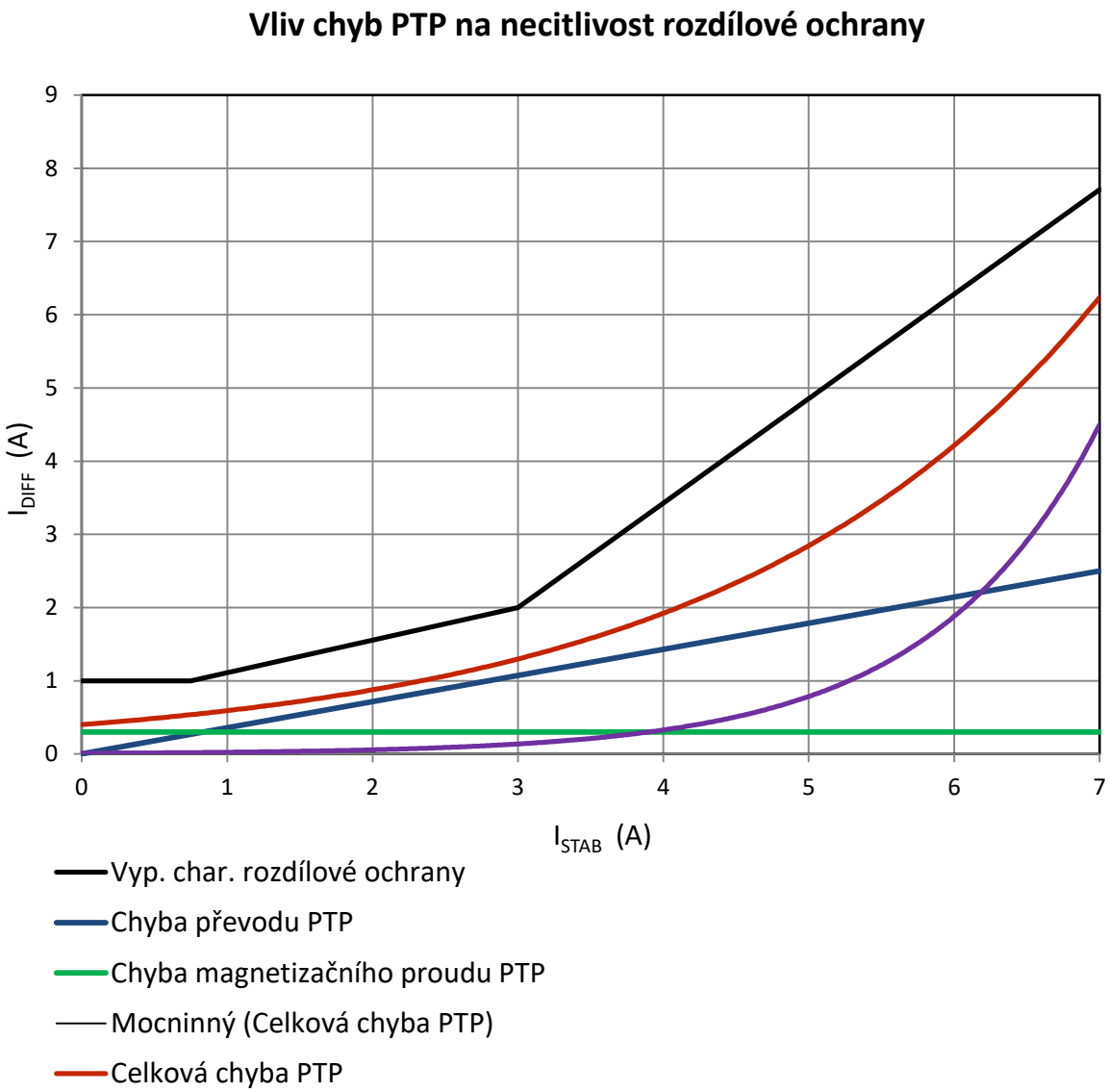
obr. 2.2: Zapojení rozdílové ochrany

V případě, že proudy nebudou splňovat rovnici *(rov. 2.9)* a rozdílový proud bude větší než 0 (platí pouze pro ideální případ), ochrana odpojí chráněný objekt jak na vstupní straně, tak i na výstupní straně chráněného objektu.

$$\Delta I = \left| \sum_{J=1}^{K} I_J \right| = 0 = I_D$$

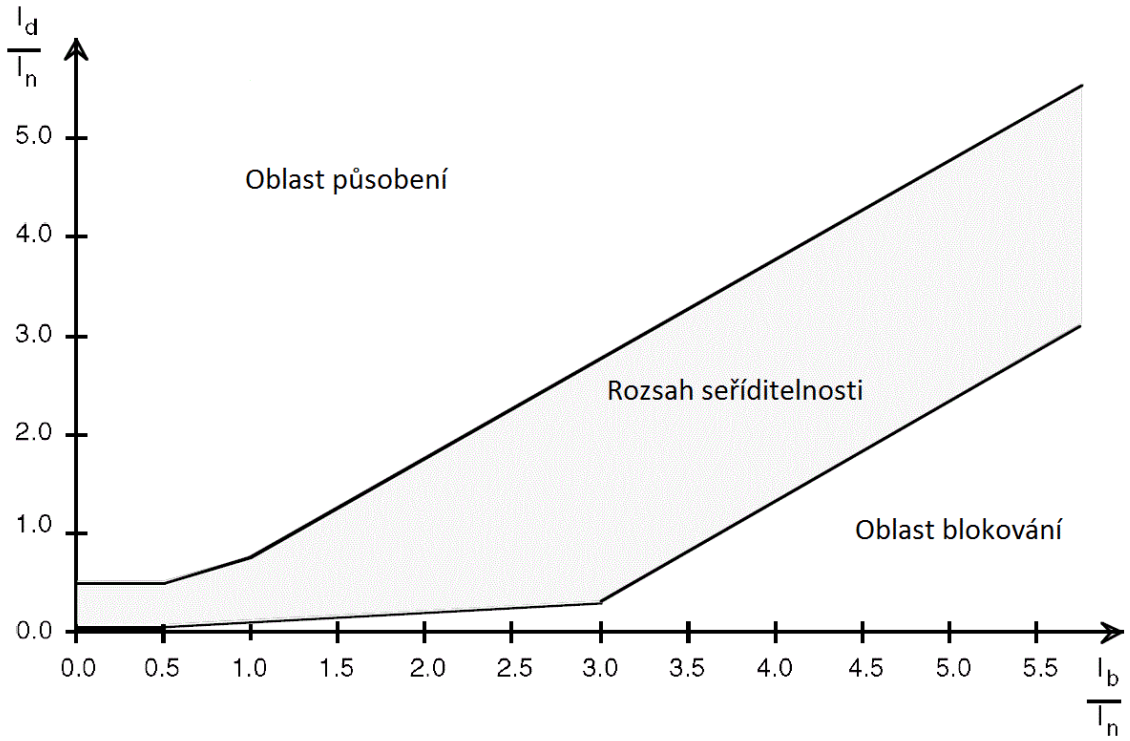
(rov. 2.9)

V praxi se rozdíl proudů porovnává s proudem dovoleným $I_{D.}$ Tento proud odpovídá vypínací charakteristice, která kvůli různým nepřesnostem posouvá I_D a celou charakteristiku nahoru. V tomto posunu jsou zahrnuty všechny chyby PTP (chyba převodu, chyba magnetizační charakteristiky PTP, magnetizační proud). Po sečtení všech chyb je vypínací charakteristika posunuta nad celkovou, jak je vidět na obrázku *obr. 2.3*: Vliv chyb PTP na rozdílovou ochranu.



obr. 2.3: Vliv chyb PTP na rozdílovou ochranu

Na obrázku *obr. 2.4* je vidět vypínací charakteristika rozdílové ochrany. Charakteristika má tři základní části. Nejníže je to oblast blokování, kde ochrana nebude v žádném případě působit. Opak blokovací části je oblast působení. V této oblasti naopak ochrana musí vždy zapůsobit a odpojit transformátor. Třetí částí je oblast seříditelnosti. V rozsahu této oblasti lze nastavovat proudový diferenciální stupeň ochrany.



obr. 2.4: Vypínací charakteristika rozdílové ochrany [3]

Dále tato vypínací charakteristika má dva zlomy, tedy tři stupně náklonu. První stupeň je konstantní, protože slouží k aktivaci ochrany. Druhá část charakteristiky pozvolně stoupá nahoru. To je ovlivněno proudovým poměrem, který vyjadřuje změnu poměru proudu při zatížení, dále zohledňuje chybu jistících transformátorů proudu a změny v poloze odboček. Část třetí je ovlivněna vysokými stabilizačními proudy. Tento případ nastává, pokud je diferenciální proud stejný jako stabilizační proud.

2.4.2 Nepříznivé vlivy na rozdílové ochrany

Jako každá ochrana, tak i rozdílová ochrana transformátoru má své nepříznivé vlivy, které na ni působí a musejí být zohledněny v jejím nastavování. To proto, aby ochrana pracovala správně. Mezi takové hlavní překážky, které musejí být zohledněny, patří převod, hodinové číslo, regulace odboček a zapínání transformátoru.

2.4.2.1 Převod transformátoru

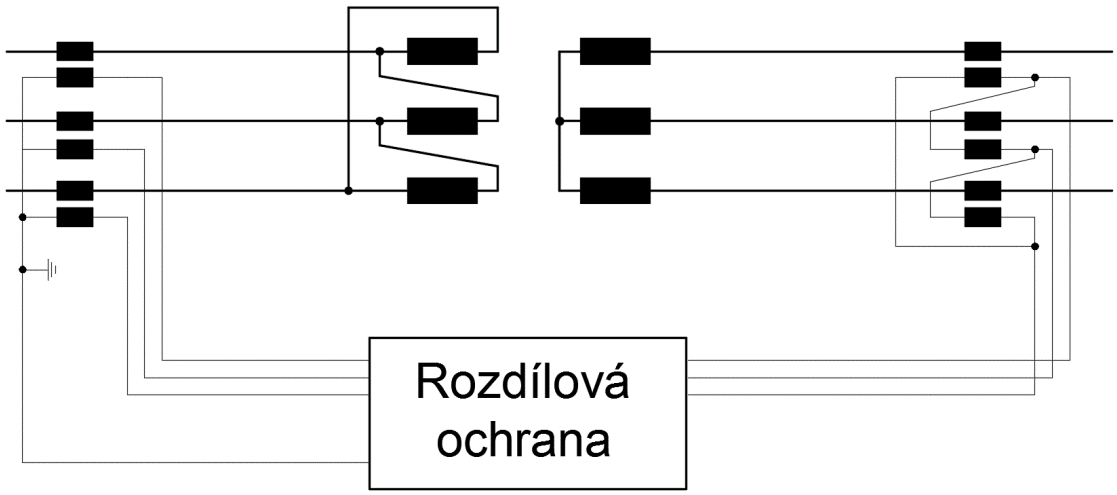
Převážná většina transformátorů má nějaký převod z primární na sekundární stranu transformátoru. Buď to je to snižující, nebo zvyšující převod transformátoru, který se dá vypočíst ze vzorce *(rov. 2.10).* A podle něj se pak musejí vybrat proudové transformátory na primární a sekundární stranu. Proudové transformátory se vyrábějí v určitých typových řadách. Z těchto řad se pak volí PTP s proudem nejbližší jmenovité hodnotě chráněného transformátoru. V případě, že se tyto hodnoty neshodují, vzniká proudová diference na straně nižšího napětí. Tato diference se dá vyrovnat přidáním pomocného transformátoru proudu, který sice pomáhá k vyrovnání fázového natočení vektorů proudu, ale zvětšuje odpor v obvodu zátěže, proto se jeho používání nedoporučuje. Při použití moderní digitální ochrany se převod transformátoru řeší numericky v algoritmu ochrany. Stačí zadat pouze převod transformátoru, převod PTP a ochrana si měřené hodnoty přepočte na požadovanou hodnotu k porovnání.

$$p = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

(rov. 2.10)

2.4.2.2 Hodinové číslo transformátoru

Hodinovým číslem se značí fázový posun napětí mezi primární stranou a sekundární stranou transformátoru. Tento posun se dříve řešil přidáním pomocného PTP se stejným hodinovým číslem, ale v opačném směru. Tím se fázový posun napětí vyrušil. Jenže přidáním pomocného PTP se zhoršovaly vlastnosti ochrany. Proto se používala varianta s rozdílným zapojením proudových PTP. Například pro zapojení Dy1 (zapojení trojúhelník hvězda s hodinovým číslem 1). PTP je zapojeno na primární straně do hvězdy a na sekundární straně zase do trojúhelníka. Tím se vyrušil fázový posun mezi primární a sekundární stranou transformátoru. Zapojení je vidět na obrázku *obr. 2.5.*



obr. 2.5: Vyrušení hodinového čísla [4]

Dnes se u těchto nově používaných digitálních ochran vliv hodinového čísla neřeší rozdílným zapojováním měřicích transformátorů. Dnes se všechny měřící transformátory zapojují do hvězdy, odkud je pak měřená hodnota přivedena do digitální ochrany.

Dnešní digitální ochrany už umí samy přepočítat hodinové číslo a převod transformátoru. Do ochrany se pouze nastaví napětí na primární a sekundární straně a zapojení transformátoru například Dy1. Ochrana si pak vše sama převede a přepočte. Naše použitá ochrana RET670 to provádí ve dvou krocích:

- Všechny fázory proudu jsou fázově posunuty na referenční stranu
- Všechny proudy jsou vždy převedeny na stranu vyššího napětí transformátoru

Tyto dva kroky se počítají současně pomocí rovnice *(rov. 2.11)*, kde jsou vyjádřeny pomocí matic pro různé hodinová čísla.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} IDL_1 \\ IDL_2 \\ IDL_3 \end{bmatrix}}_{1} = \underbrace{A \cdot \begin{bmatrix} IL_{1_W1} \\ IL_{2_W1} \\ IL_{3_W1} \end{bmatrix}}_{2} + \underbrace{\frac{U_{n_W2}}{U_{n_W1}} \cdot B \cdot \begin{bmatrix} IL_{1_W2} \\ IL_{2_W2} \\ IL_{3_W2} \end{bmatrix}}_{3}$$

(rov. 2.11)

V matici jedna jsou obsaženy výsledné přepočtené rozdílové proudy. Druhá matice představuje příspěvek diferenciálního proudu ze strany W1. Poslední třetí část rovnice říká, jaký je příspěvek diferenciálního proudu ze strany W2. Hodnoty matic A, B se volí podle zapojení transformátoru. Matice A je matice referenčního vinutí a matice B se volí podle zapojení a hodinového čísla transformátoru. V mém případě budu volit hodnoty pro zapojení Dy1. Potom rovnice pro přepočet hodinového čísla vypadá takto:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} IDL_1 \\ IDL_2 \\ IDL_3 \end{bmatrix}}_{1} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}' \cdot \begin{bmatrix} IL_{1_W1} \\ IL_{2_W1} \\ IL_{3_W1} \end{bmatrix}}_{2} + \underbrace{\frac{U_{n_W2}}{U_{n_W1}} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} IL_{1_W2} \\ IL_{2_W2} \\ IL_{3_W2} \end{bmatrix}}_{3}$$

(rov. 2.12)

2.4.2.3 Regulace napětí transformátoru

Vlivem regulace napětí na transformátoru pomocí odboček se mění převod transformátoru, ale poměr PTP zůstává stejný, respektive nastavený převod je stejný. Tím se změří falešný rozdílový proud. Jeho velikost závisí na pozici odbočky. Dříve se tento problém řešil tak, že musel být kompenzován snížením přesnosti vlastní rozdílové ochrany.

Dnes se tato skutečnost řeší přidáním senzoru polohy odbočky na transformátor. Senzor je následně spojen s digitální ochranou. Ochrana tuto informaci dokáže zpracovat a podle ní následně upraví a přepočítá nastavení ochrany.

2.4.2.4 Zapínaní transformátoru

Při zapínání transformátoru vznikají velké zapínací proudové rázy, které dosahují 4-8krát I_n transformátoru. Rozdílová ochrana by tento proud vyhodnotila jako vnitřní zkrat, protože do transformátoru teče poměrně velký proud pouze z jedné strany, který musí okamžitě odpojit od sítě. Z tohoto důvodu je důležité zapínací ráz a vnitřní zkrat transformátoru od sebe odlišit. Nejjednodušší a nejúčinnější by bylo zapnout rozdílovou ochranu až po odeznění zapínacího rázu transformátoru. Jelikož tento jev trvá i několik sekund, byl by transformátor po dobu ustalování zapínacího rázu nechráněn. Pro zapínací ráz je typický vysoký obsah 2. harmonické. Tohoto jevu se právě využívá při blokování, při zapnutí. Při zkratu uvnitř chráněného objetu se může vyvinout 2. harmonická, v tomto případě nesmí ochrana blokovat 2. harmonickou. To se zajišťuje algoritmem, který vyhodnocuje tvar a rychlost změny 2. harmonické.[3][6][7][8][9]

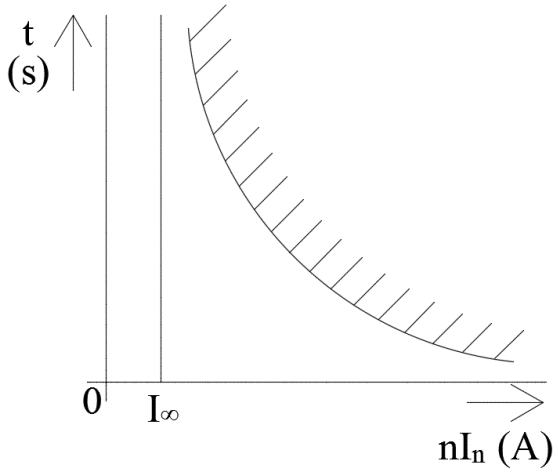
2.5 Nadproudová ochrana

Jedná se nejrozšířenější typ ochran. Jsou používány téměř u všech strojů, zařízení elektrizační soustavy a spotřebičů elektrické energie. Nadproudová ochrana reaguje na zvýšení proudu ve fázích chráněného obvodu, které může vzniknout přetížením nebo zkratem. Přetížení a zkrat se liší velikostí nadproudu, vyjádřenou násobkem jmenovité hodnoty proudu. Přetížení nedosahuje takových hodnot nadproudu jako zkrat, ale trvá delší dobu a to má za následek nadměrné oteplování a tím stárnutí izolace. Ochrana proti přetížení se obvykle vymezuje $1{,}2 \cdot I_n$ až $1{,}6 \cdot I_n$ podle druhu chráněného zařízení. Oproti tomu nadproudová zkratová ochrana se nastavuje v rozmezí od $4I_n$ od $6I_n$. Časové působení nadproudových ochran je velmi rychlé, nebo zpožděné kvůli selektivitě ostatních ochran. Podle charakteristik působení nadproudových ochran se rozdělují na čtyři základní typy:

- Časově závislá nadproudová ochrana
- Časově polozávislá nadproudová ochrana
- Časově nezávislá nadproudová ochrana
- Mžiková ochrana nadproudová ochrana

2.5.1 Časově závislá nadproudová ochrana

Základním úkolem těchto časově závislých ochran je ochrana proti nadměrnému oteplení při přetížení, případně i při zkratu. Vypínací charakteristika časově závislé nadproudové ochrany je naznačena na obrázku *obr. 2.6.*, kde je vidět, že vypínací čas ochrany se zkracuje s velikostí přetížení a naopak. Charakteristika časově závislé nadproudové ochrany se přibližuje tepelné charakteristice chráněného objektu. Charakteristika ochrany však musí být nižší než tepelná charakteristika chráněného objektu, aby byla zaručena ochrana.



obr. 2.6: Charakteristika časově závislé nadproudové ochrany

Časově závislé nadproudové charakteristiky popisují obě normy IEC a ANCI/IEEE. Budu vycházet z normy IEC 60255-151 (Americká norma se jmenuje ANSI C37.112), kde jsou časově závislé nadproudové charakteristiky rozděleny na:

- Normal inverse
- Very inverse
- Extremely inverse
- Short-time inverse
- Long-time inverse

Charakteristiky jsem vypočetl podle vzorce *(rov. 2.13)*, kde jsem hodnoty pro konstanty dosazoval z tabulky *Tab. 2.2.* Koeficient „k“ jsem použil pro všechny funkce stejný 0,6 a proud jsem dosazoval v rozmezí 1 až 70 A. Na obrázku *obr. 2.5* je vidět jejich porovnání.

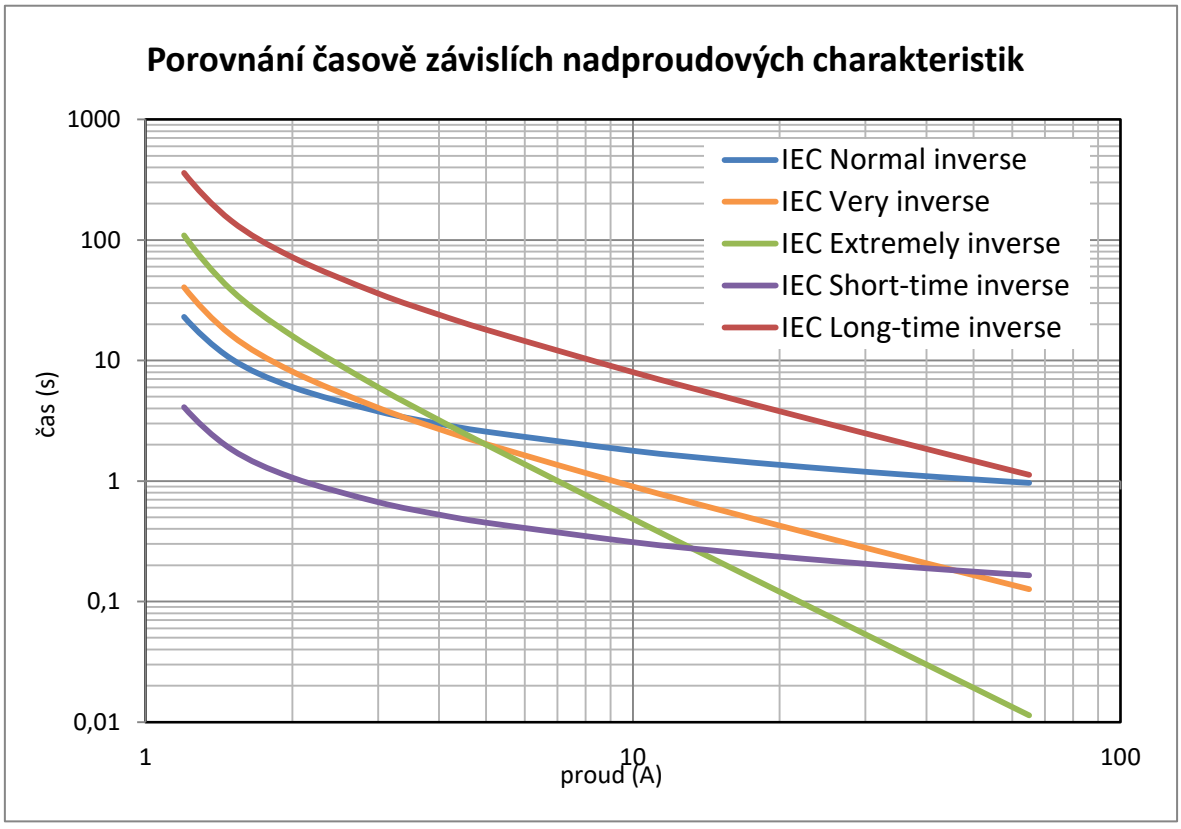
$$t = \left(\frac{A}{\left(\frac{I}{I>}\right)^{P} I^{P} - 1} \right) k$$

(rov. 2.13)

	A	P	K
IEC Normal inverse	0,14	0,02	0,1-1,1
IEC Very inverse	13,5	1	
IEC Extremely inverse	80	2	
IEC Short-time inverse	0,05	0,04	
IEC Long-time inverse	120	1	

Tab. 2.2: Hodnoty použité pro výpočet časově závislých proudových charakteristik

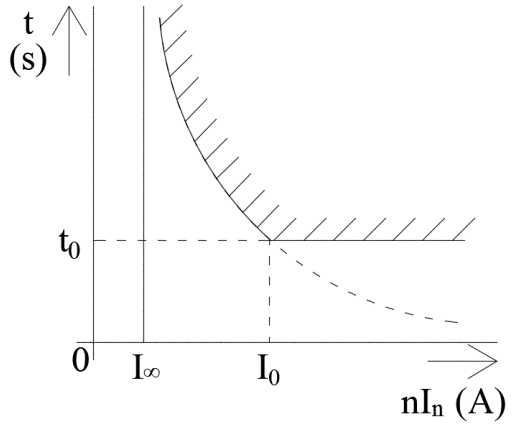
.



obr. 2.7: Porovnání časově závislých proudových charakteristik

2.5.2 Časově polozávislá nadproudová ochrana

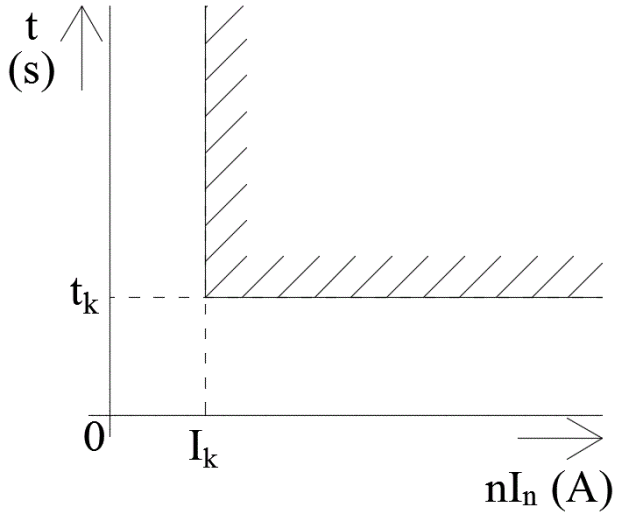
Časově polozávislá nadproudová ochrana se používá především u asynchronních motorů, protože při rozběhu motoru vzniká velký rozběhový proud, který se pohybuje mezi 2-6násobkem, I_na trvá několik vteřin, někdy i desítky vteřin podle velikosti motoru. Proto se charakteristiky časově závislé nadproudové ochrany upravují, aby se od určité meze chovala jako časově nezávislá nadproudová ochrana. Vypínací charakteristika je vidět na obrázku *obr. 2.8*.



obr. 2.8: Charakteristika polozávislé proudové ochrany

2.5.3 Časově nezávislá nadproudová ochrana

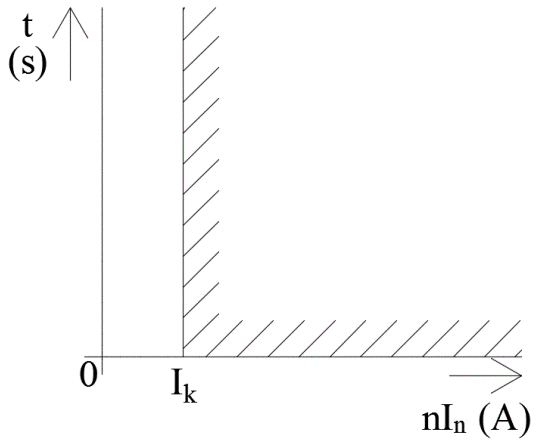
Tento typ ochrany se používá při jištění elektrických strojů a zařízení proti přetížení a zkratu. A to tam, kde je zapotřebí mít pevně nastavenou hodnotu vypínacího proudu bez závislosti na čase. Ochrana vybaví v případě, že měřený proud dosáhne přesně nastavené hodnoty I_k. Vypínací čas je nezávislý na velikosti nadproudu a lze jej v určitých mezích nastavovat, aby byla dodržena selektivita ochran. Vypínací charakteristika časově nezávislé nadproudové ochrany je vidět na obrázku *obr. 2.9.*



obr. 2.9: Charakteristika nezávislé proudové ochrany

2.5.4 Mžiková nadproudová ochrana

Mžiková nadproudová ochrana působí po překročení přesně nastaveného proudu I_k. Ochrana dokáže zapůsobit téměř bez zpoždění. Nepatrné zpoždění je způsobeno vlastní funkcí ochrany, které se pohybuje do 10 ms. Na obrázku níže *obr. 2.10* je vidět vypínací charakteristika mžikové nadproudové ochrany.



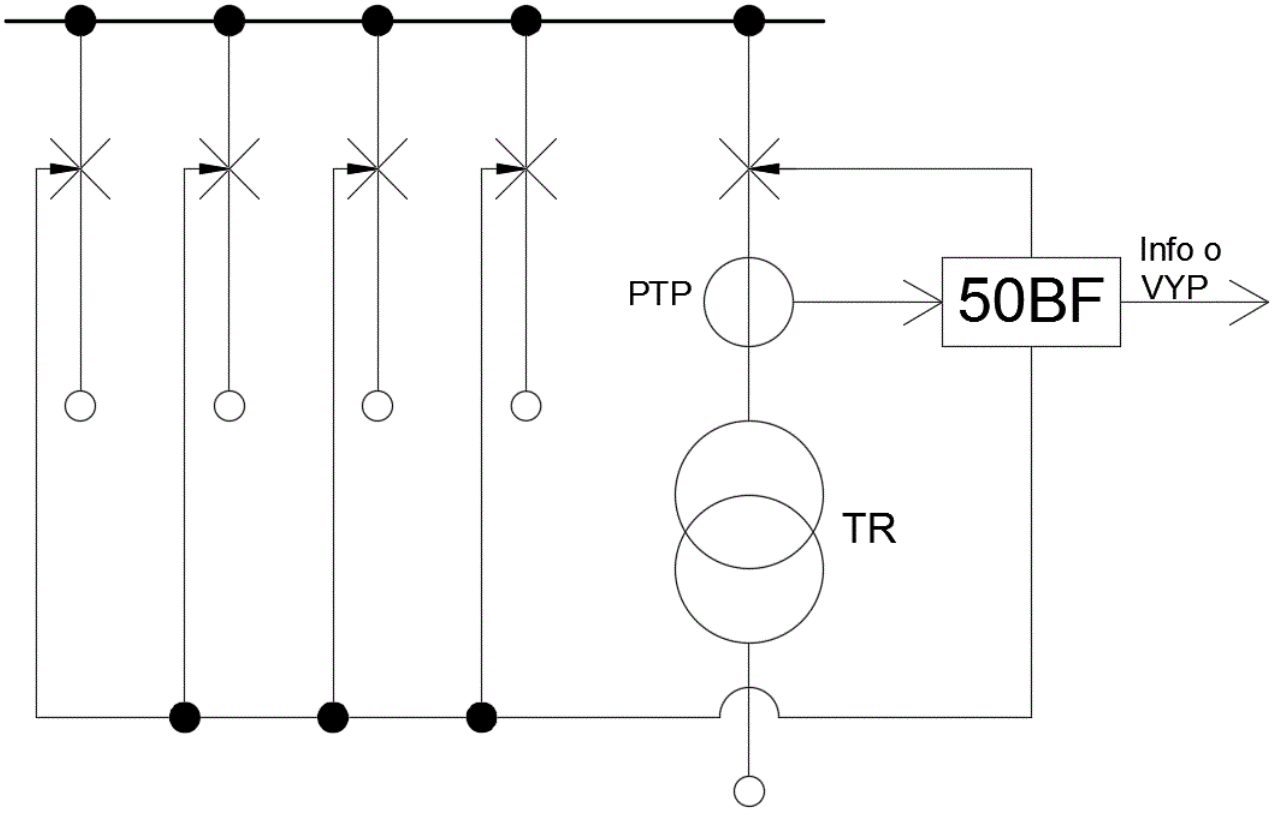
obr. 2.10: Charakteristika mžikové proudové ochrany

2.6 Zemní ochrana

Zemní ochrana je vlastně speciální případ nadproudové ochrany. Na rozdíl od ní však neměří proudy ve fázích, ale součet proudů v zemním vodiči. Jak je z názvu patrné, ochrana chrání objekt pouze proti zemním poruchám, protože při mezifázové poruše bude součet proudů všech tři fází nulový a ochrana to nevyhodnotí jako poruchu. Naopak při zemním spojení přes relé poteče proud, který je úměrný poruchovému proudu. Proud v zemi může být měřen různými způsoby: PTP v uzlu transformátoru, výpočtem jako součet fázových proudů, Holmgreenovo zapojení PTP. Protože neměří fázový proud, může být mnohem citlivější než klasická nadproudová. Obvykle se nastavuje kolem 30 % jmenovitého proudu.[3][6][7][8][9]

2.7 Automatika selhání vypínače

Automatika selhání vypínače slouží jako záložní ochrana. Pracuje na principu porovnávání proudu a vyhodnocování stavu vypínače. To znamená, že v případě poruchy dostane informaci od jiné ochrany, že byl vyslán povel VYP k vypnutí vypínače. Automatika selhání vypínače kontroluje, zda byl povel VYP úspěšný. Kontrola se provádí měřením protékajícího proudu přes PTP. V případě, že přes PTP protéká poruchový proud a povel VYP nebyl úspěšný, automatika selhání vypínače vyšle tzv. retrip (opakovaný povel k vypnutí) a znovu se měří protékající proud přes PTP. Pokud retrip nezafungoval a neodpojil vypínač, automatika selhání vypínače poté vyšle povel VYP na všechny vypínače připojené k přípojnici zajišťující selektivitu s časovým zpožděním (jedná se definitivní vypnutí, obvykle se volí 300 ms), tím se odpojí celá přípojnice od všech přívodů a vývodů připojených na ni.[3][8]



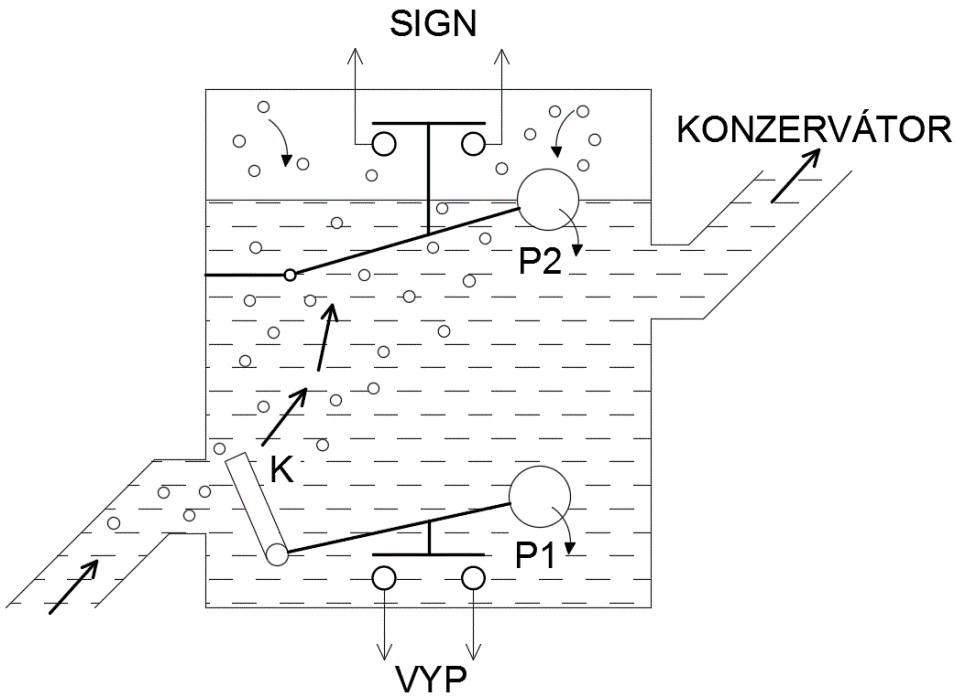
obr. 2.11 Automatika selhání vypínače [3]

2.8 Mechanické ochrany

Mechanické ochrany transformátoru nepracují na elektrickém principu. Působí přes pomocné relé přímo na vypínač. Jsou zcela nezávislé na elektrických ochranách.

2.8.1 Buchholzovo relé

Jedná se o mechanickou ochranu transformátoru. Používá se u olejových transformátorů. Ochrana využívá dvou plováků. Jeden plovák slouží k signalizaci poruchy, druhý plovák slouží k okamžitému vypnutí transformátoru. Buchholzovo relé pracuje na principu vzniku a proudění plynů v oleji. Při zkratech vzniká výboj, který způsobí vznik proudění plynů v oleji transformátoru. Tento plyn proudí přes klapku prvního plováku. Pokud se jedná o dynamickou poruchu, která má za následek rychlé proudění oleje, pak jako první zareaguje první plovák, který je spojen s klapkou, a vypne transformátor. Pokud by došlo k pozvolnému vzniku plynu v oleji, reagoval by pak druhý plovák, který slouží pouze k signalizaci poruchy.



obr. 2.12: Princip Buchholzova relé [9]

2.8.2 Tepelné ochrany

Dále je použita teplotní ochrana oleje a vinutí. Obě ochrany se používají pro hlavní nádobu transformátoru a pro nádobu přepínače odboček. Ochrana snímá teplotu pomocí nějakého tepelného čidla. Převážně jsou tyto ochrany konstruovány se dvěma stupni. První stupeň je pro signalizaci obsluze, tzv. alarm. Primárně je naměřen na pomalé změny teploty, kdy při signalizaci alarmu nemusí dojít k odpojení transformátoru, ale stačí snížit jeho výkon. Druhý stupeň působí přímo na vypínač, slouží k okamžitému odpojení transformátoru a chrání transformátor před rychlými změnami teplot.

2.8.3 Přetlakový ventil

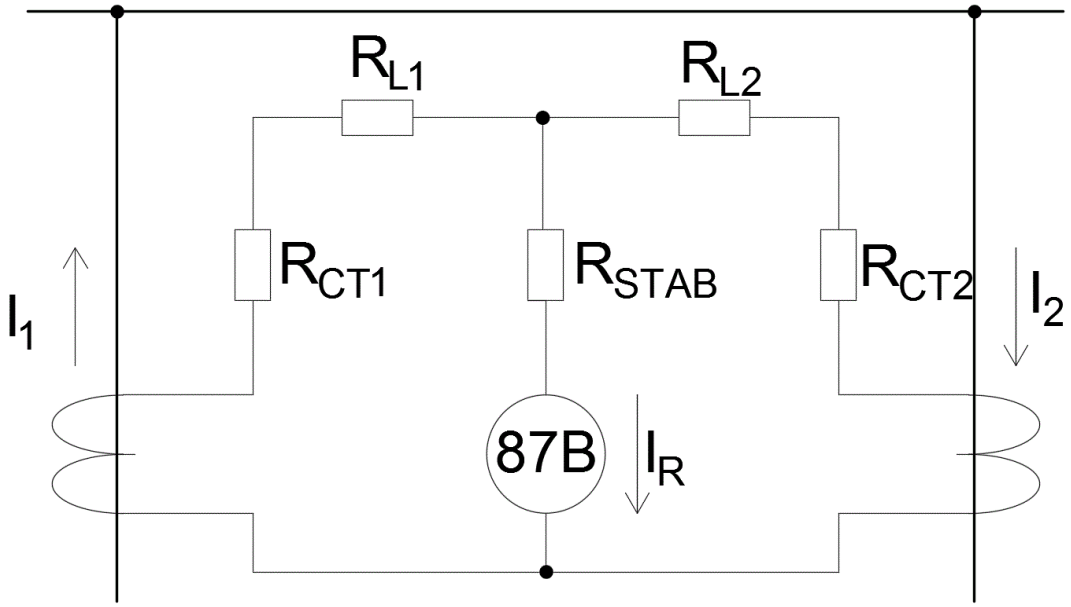
Další mechanickou ochranou je přetlakový ventil, který chrání transformátor před explozí v případě, že dojde k rychlému a prudkému nárůstu vnitřního tlaku (např.: v důsledku prudkého vývinu plynů způsobeného poruchou transformátoru). Poté dojde k rychlému uvolnění (vypuštění) velkého množství oleje z nádoby transformátoru, aby se tlak oleje uvnitř nádoby snížil. Pro případ zapůsobení přetlakového ventilu je ventil vybaven kontakty pro odpojení transformátoru.

[9][10]

3 Vysokoimpedanční rozdílová ochrana

3.1 Obecný princip

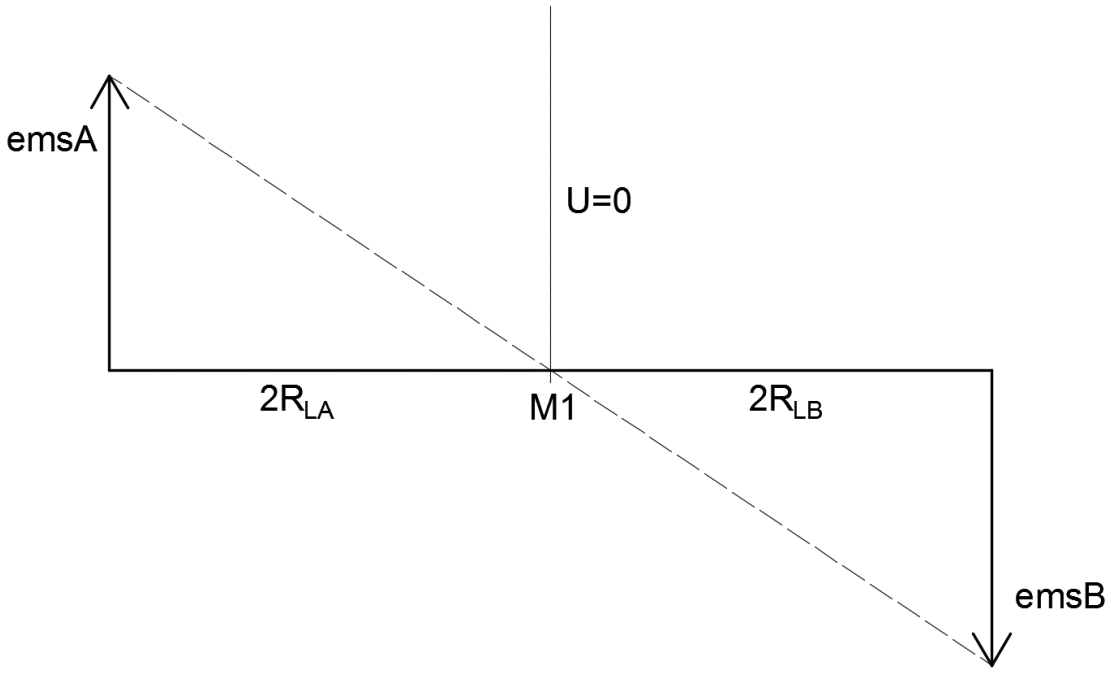
Princip a zapojení vysokoimpedanční rozdílové ochrany je na první pohled stejný jako u běžné rozdílové ochrany. Rozdíl je ve vyhodnocování, zda je v chráněném objektu porucha, či není. Zatímco rozdílová ochrana odečítá od sebe vstupní a výstupní proudy z chráněné oblasti, tak vysokoimpedanční rozdílová ochrana porovnává napětí na spojovacím přívodu s předřadným odporem mezi oběma PTP. V praxi to znamená, že PTP na primární straně vytvoří napětí o určité velikosti a PTP na straně sekundárního vinutí vytvoří stejně veliké napětí v opačném směru. Z toho plyne, že pokud rozdíl těchto dvou napětí je roven nule, jedná se o bezporuchový stav. Schéma zapojení vysokoimpedanční rozdílové ochrany je na obrázku *obr. 3.1*, kde R_L představuje odpor přívodních vodičů a R_{CT} zase odpor PTP. Princip rozdlílové ochrany lze aplikovat na mnohá zařízení, např.: na ochranu generátorů, ochranu přípojnic a nebo jako v našem případě na ochranu nižší strany vinutí transformátoru.[3][4][11][12][13]



obr. 3.1: Schéma zapojení vysokoimpedanční rozdílové ochrany [4]

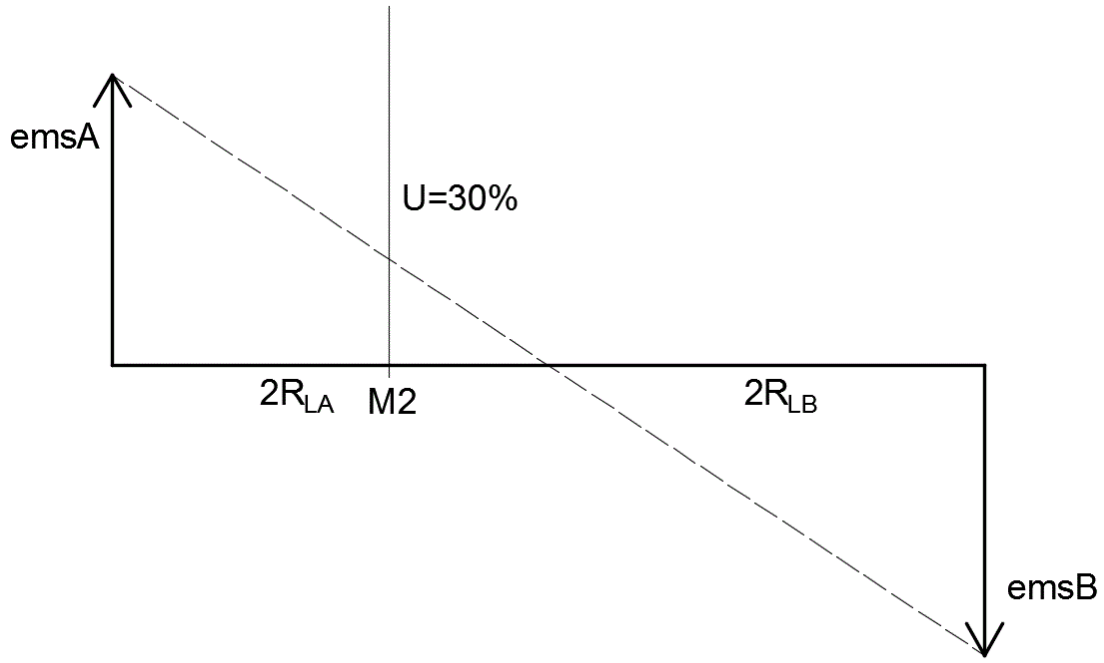
3.1 Diagramy stavů ochrany

Na obrázku *obr. 3.2* je vidět správně nastavený diagram vysokoimpedanční rozdílové ochrany, kdy změřené první napětí (emsA) je stejně veliké jako druhé změřené napětí, ale v opačném směru. Po spojení vrcholů těchto napětí vznikne bod M1. Tento bod pak leží přesně uprostřed. Ochrana tento stav vyhodnotí jako bezporuchový, protože napětí v elektrickém středu zapojení je rovno nule.



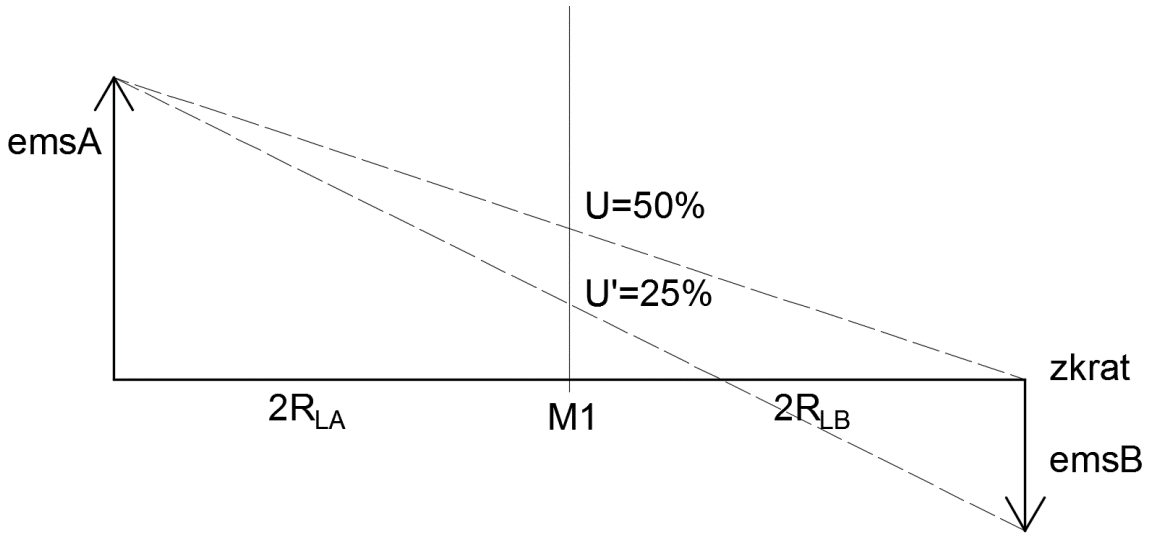
obr. 3.2: Diagram bezporuchového stavu [6]

Jinak je tomu na obrázku *obr. 3.3*, kde bod M2 neleží přesně ve středu mezi oběma naměřenými hodnotami, ale je kousek posunut doleva od středu, přestože jsou obě naměřená napětí stejně veliká, pouze v opačném směru. Toto posunutí bodu M2 je způsobeno nepřesností v provedení ochrany, která je dána velikostí odporu přívodních kabelů a přirozenou nesymetrií ochrany.

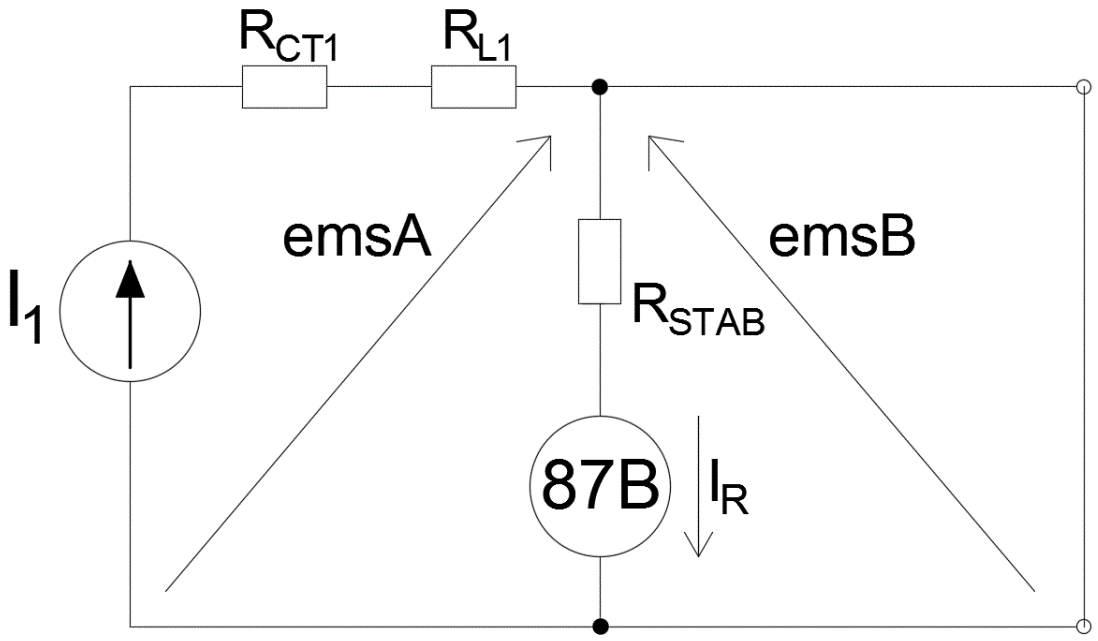


obr. 3.3: Diagram špatně zvoleného bodu M2 [6]

Níže na obrázku *obr. 3.4* je vidět, že z nějakého blíže neurčeného důvodu došlo k přesycení PTP na straně B. Na diagramu jsou znázorněny dva případy. První případ ukazuje, co se stane s napětím U‘, když přesycení není úplné a napětí na straně B se zmenší na polovinu. Potom porovnávané napětí se rovná 25 % U. Ve druhém případě je přesycení PTP úplné. Tomuto stavu odpovídá obrázek *obr. 3.5*, kde přesycení je znázorněno zkratem na straně B. V tomto případě se PTP bude chovat jako zkrat a měřené napětí na straně B se zmenší na nulu. Potom porovnávaná napětí strany A a B, už nebudou nula, ale 50 % U. Z tohoto příkladu pak plyne, že se musí volit napěťová necitlivost vždy nad 50 % U. Praxe však ukazuje, že saturace jen zřídka zničí emsB na úplnou nulu, stanovení napěťové necitlivosti na 50 % U je tedy dobrou mírou necitlivosti.

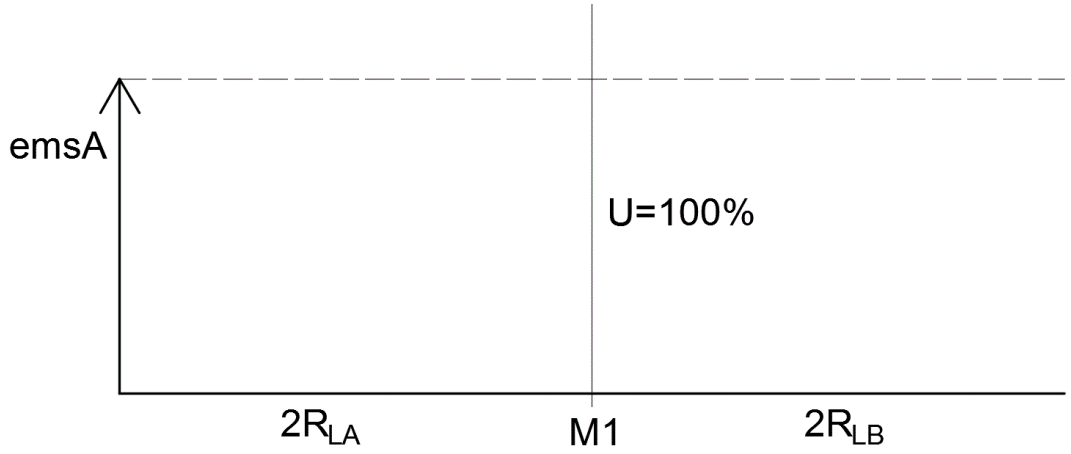


obr. 3.4: Diagram vnější poruchy [6]

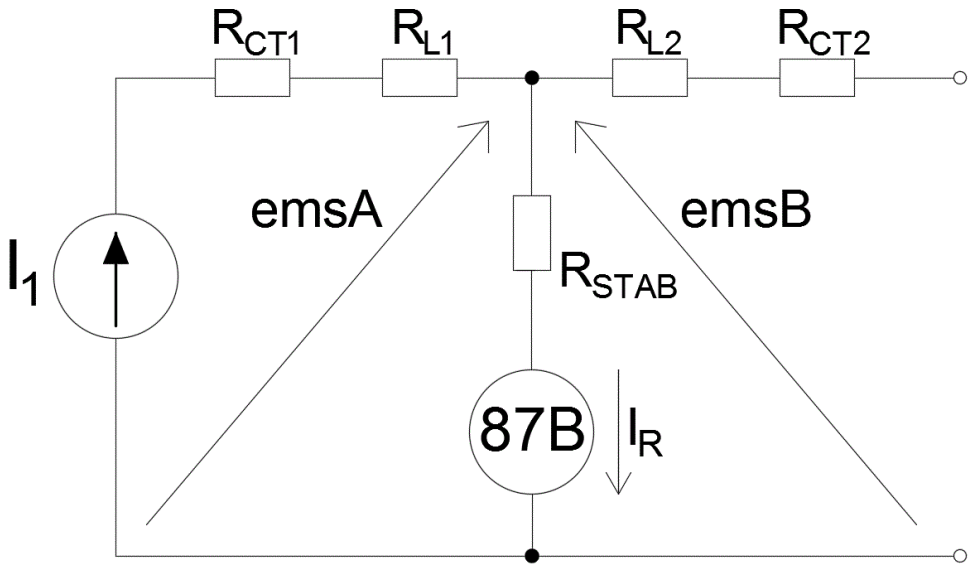


obr. 3.5: Náhradní schéma pro přesycení PTP na straně B

Diagram v případě poruchy uvnitř chráněné oblasti, v mém případě chráněného transformátoru, je vidět na obrázku *obr. 3.6,* kde je patrné, že měřené napětí na straně B úplně zmizelo, to odpovídá poruše napájené z jedné strany. Tomu odpovídá náhradní schéma na obrázku obr. 3.7, které znázorňuje tento případ, kde napájení z jedné strany je znázorněné rozpojenými svorkami na straně B. Díky tomu ochrana už neukazuje nulový rozdíl mezi stranou A a stranou B, ale ochrana detekuje zvýšení napětí na 100 % U, které odpovídá velikosti emsA.

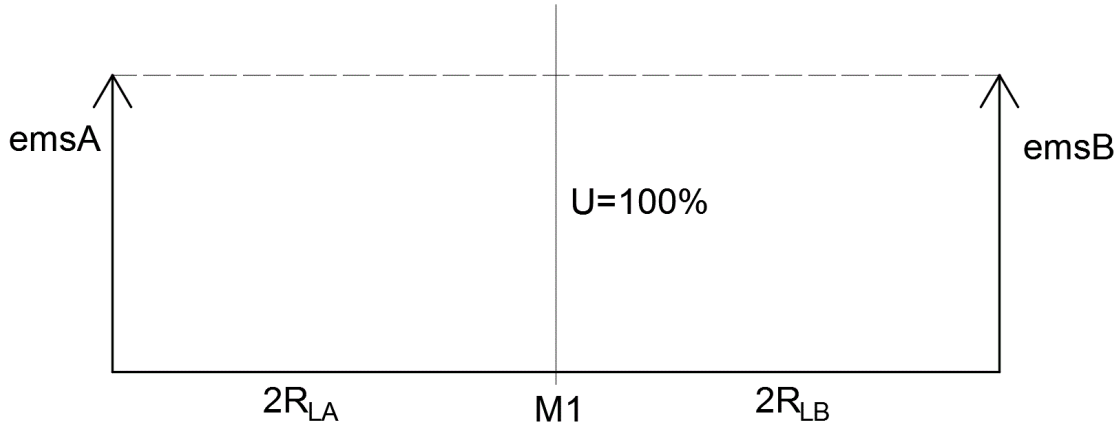


obr. 3.6: Diagram poruchového stavu napájeného z jedné strany [6]

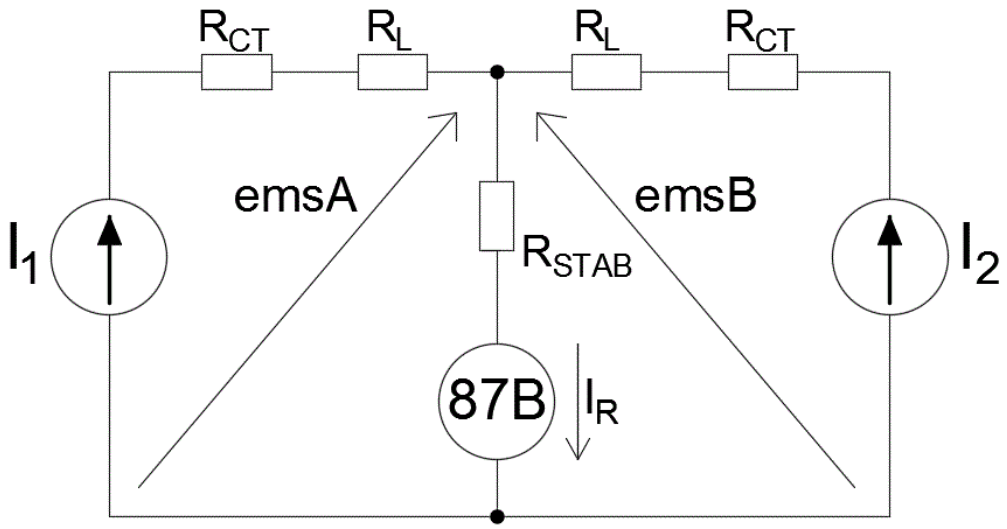


obr. 3.7: Náhradní schéma pro napájení z jedné strany

Na posledním diagramu, který je na obrázku *obr. 3.8*, je taktéž porucha uvnitř chráněného transformátoru, akorát teď je napájena z obou dvou stran (ze strany A a ze strany B). Tomuto případu odpovídá náhradní schéma na obrázku *obr. 3.9*, kde se obrátila polarita zdroje na straně B, tato polarita znázorňuje napájení z obou dvou stran. V takovém případě měřené napětí na straně nezmizí, ale změní se jeho polarita. To znamená, že se napětí na straně A rovná napětí na straně B. Stejně jako tomu je předchozím případě, tak i tady ochrana vyhodnotí chybu jako 100 % U s tím rozdílem, že U=emsA=emsB.[3][4][6][11][12][13]



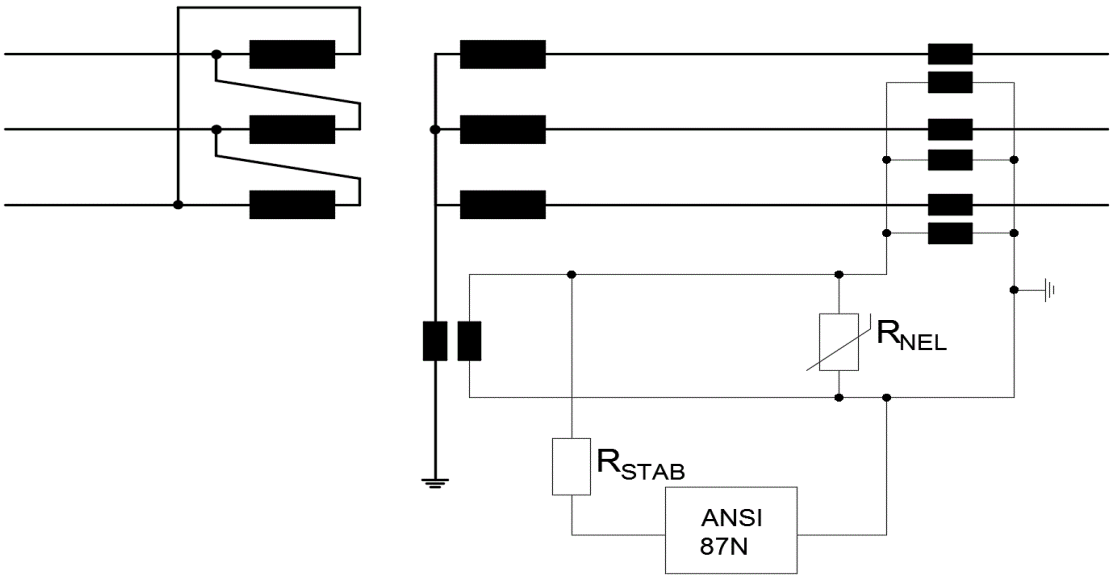
obr. 3.8: Diagram poruchového stavu napájeného z obou stran [6]



obr. 3.9: Náhradní schéma pro napájení z obou stran

3.1 High Impedance Restricted Earth Fault Protection

Do češtiny se dá přeložit jako vysokoimpedanční zemní rozdílová ochrana. Tato ochrana se nechá použít u chránění transformátorů, generátorů, příčných tlumivek, pokud mají vyvedený uzel. U této ochrany pracují všechny PTP paralelně na hranici chráněné oblasti, společně do stabilizačního odporu R, kde se na něm měří napětí. Varistor (nelineární odpor), na obrázku *obr. 3.10* značený jako $R_{nel,}$ slouží k omezení napětí při přesycení PTP. Velké napěťové špičky dokáže varistor ořezat a současně vyhlazuje napěťový průběh, aniž by nějak podstatně měnil velikost střední hodnoty napětí. PTP pro ochranu HIREF musejí být stejné, a to z několika důvodů. Za prvé z důvodu sycení, za druhé musejí mít stejný převodový poměr a měly by mít přibližně stejnou chybu měření. Dále pak musí mít vyčleněno samostatné proudové jádro pro rozdílovou ochranu. Zapojení ochrany REF je vidět na obrázku *obr. 3.10* a je to vlastně speciální případ zapojení rozdílové ochrany pro chránění jednoho vinutí transformátoru (v našem případě strana nižšího napětí) s vyvedeným uzlem. Ochrana porovnává měřený rozdíl mezi součtem jednotlivých fázových proudů s proudem naměřeným ve vyvedeném uzlu. Z toho vyplývá, že zde platí první Kirchhoffův zákon, že součet všech proudů přitékajících do uzlu je v každém okamžiku roven nule.[2][3][4][11][12][13]



obr. 3.10: Zapojení ochrany REF [2]

4 Přístrojové transformátory

Požadavky kladené na PT jsou velmi vysoké, protože se používají k měření elektrických veličin chráněného objektu. V obvodech se při poruchách obvykle vyskytují desítky kiloampér a napětí řádů stovek kilovoltů, proto nejsou ochrany připojeny přímo do obvodu. PT jsou používány hned z několika důvodů:

- Transformují jmenovité proudy a napětí na lépe zpracovatelnou hodnotu, tj. 100 V, 1 A (dříve 5 A).
- Umožňují umístit ochrany mimo rušivé elektrické a magnetické pole objektu.
- Galvanicky oddělují ochranu od chráněného objektu.
- Umožňují umístit ochrany do jedné budovy.

Přístrojové transformátory mají obvykle dvě jádra:

- Jistící jádro – určené pro ochrany, je přesnější a citlivější.
- Měřicí jádro – určené pro měření přístroje, které měří poměry v síti.

4.1 Přístrojové transformátory napětí

Jsou určené na napájení napěťových měřicích systémů, regulačních a jistících systémů. Připojují se primární stranou paralelně k obvodu, kde se sleduje velikost napětí. Na sekundární stranu se připojují měřicí přístroje na měřicí jádro PTN a ochrany se připojují na jistící jádro PTN. Rozlišujeme dva typy PTN:

- **Indukční PTN** - primární a sekundární vinutí jsou galvanicky oddělena. K převodu napětí dochází prostřednictvím magnetického obvodu.
- **Kapacitní PTN** - k převodu napětí zde dochází ve dvou krocích. První krok je tvořen kapacitním děličem a ve druhém kroku je použita kompenzační tlumivka a snižovací transformátor.

4.2 Přístrojové transformátory proudu

Přístrojové transformátory proudu slouží k transformaci hůře měřitelného vysokého proudu na lépe zpracovatelný proud 1 A, dříve 5 A. Déle zajišťují konstantní převodový poměr vstupního a výstupního proudu. PTP se zapojují sériově do měřeného obvodu. Na sekundární stranu se připojují měřicí, regulační a jistící systémy. Stejně jako u PTN mají ochrany vlastní jistící jádro. Aby ochrana mohla porovnávat převedený signál, musejí mít PTP na vstupních a výstupních stranách chráněného objektu stejný převod. V žádném případě nesmí dojít k rozpojení sekundárního obvodu, protože při nekonečně velké impedanci by napětí vzrostlo na vysokou hodnotu a mohlo by dojít k ohrožení lidských životů a zničení samotné ochrany.

4.2.1 Obecné požadavky PTP

Obecně platí, že se PTP nesmí přesytit pro vnější zkraty (na straně vn) a zároveň doba do přesycení při vnitřním zkratu musí být větší než cca 5 ms. Dalším důležitým požadavkem je, že všechny PTP musejí mít stejný převod. Dále se pak požaduje dostatečné nadproudové číslo PTP přepočtené na skutečnou zátěž břemene.

Nesmí být zapomenuto na napětí kolene, které říká, že „čím je ostřejší koleno magnetizační charakteristiky, tím větší pak bude na výstupní straně PTP špičkové napětí“ (zvýšením napětí na svorkách PTP o 10 % dojde ke zvýšení efektivní hodnoty proudu o 50 %). Napětí kolene magnetizační charakteristiky se navrhuje pomocí rovnice *(rov. 4.1*).

$$U_{Kolene} = 2 \cdot K \cdot I_k \cdot (R_{CT} + 2 \cdot R_L)$$

(rov. 4.1)

Kde

I_k	zkratový proud protékající vedením
R_{CT}	odpor $_{PTP}$
R_L	odpor vedení
K	bezpečnostní koeficient (běžně se volí 1-2)

4.2.2 Požadavky PTP pro rozdílovou ochranu

Tyto požadavky vycházejí z podmínky, že rozdílová ochrana nesmí působit při vnějším zkratu v důsledku falešných rozdílových proudů. Při vnitřním zkratu uvnitř transformátoru musí ochrana zaznamenat po určitý krátký časový okamžik rozdílový proud, aby mohla spolehlivě vypínat. Pro každý typ ochrany výrobce udává podmínky, kterým musí daný PTP vyhovět.

$$E_{al\geq}E_{alreg} = 30 \cdot I_{nt} \cdot \frac{I_{sn}}{I_{pn}} \cdot \left(R_{CT} + R_L + \frac{S_R}{I_r^2}\right)$$

(rov. 4.2)

$$E_{al\geq}E_{alreg} = 2 \cdot I_{tf} \cdot \frac{I_{sn}}{I_{pn}} \cdot \left(R_{CT} + R_L + \frac{S_R}{I_r^2}\right)$$

(rov. 4.3)

Kde

E_{al}	sekundární elektromotorické napětí
E_{alreg}	maximální požadované elektromotorické napětí
I_R	zkratový proud protékající vedením
I_{pn}	jmenovitý proud PTP na primárním vinutí
I_{sn}	jmenovitý proud PTP na sekundárním vinutí
I_{tf}	maximální proud základní frekvence
I_{nt}	jmenovitý primární proud transformátoru
R_{CT}	odpor PTP
R_L	odpor vedení
K	bezpečnostní koeficient (běžně se volí 1-2)
S_R	zdánlivý výkon břemene

4.2.3 PTP pro vysokoimpedanční rozdílovou ochranu

Pro vysokoimpedanční rozdílové ochrany se používá třída PX přístrojových transformátorů proudů. Tyto transformátory se vyznačují malou rozptylovou reaktancí. Ta je zajištěna samotnou konstrukcí PTP, kdy jádro tvoří prstencovitý tvar se stejnoměrně rozloženými vzduchovými mezerami. Primární a sekundární vinutí jsou též stejnosměrně rozložena. Maximální budící proud se naměří při jmenovitém napětí kolene v magnetizační budící charakteristice. Na štítkových hodnotách se nacházejí následující údaje:

- Jmenovitý primární a sekundární proud
- Jmenovitý počet závitů – chyba nesmí překročit 0,25 %
- Jmenovité napětí kolena
- Maximální budící proud při jmenovitém napětí kolena
- Maximální odpor sekundárního vinutí – měřený při teplotě 75 °C
- Jmenovitý odpor zátěže
- Rozměrový činitel

[2][3][4]

5 Výpočet nastavení a kontrola odporů

Vstupní data

Transformátor	
Transformátor	66kV/11kV +5 %, -15 %
Zapojení	Dyn1
Výkon TR	40 MVA (32 MVA)
Jmenovitý proud na 11 kV	I_{N2}=2,1 kA
Napětí nakrátko	$u_{k\,\%}$=13,6 % pro 32 MVA
	$u_{k\,\%}$=17 % pro 40 MVA
NER	
Odpor	8,5 Ω
Proudové zatížení	750 A
Maximální časové zatížení	30 s
PTP na 11 kV	
Převod	2500/1 A
Vnitřní odpor	R_{CT}=8,8 Ω
Napětí kolene	U_K=800 V
Magnetizační proud	I_e=20 mA při 400 V

5.1 Výpočet stabilizačního odporu

Zkratový proud

$$I_{k2}^{''} = K \cdot \frac{I_{N2}}{u_{k\%}} = 1{,}5 \cdot \frac{2100}{0{,}17} = 18{,}5\ kA \qquad \text{(rov. 5.1)}$$

Kde

$I_{k2}^{''}$	maximální zkratový proud
K	bezpečnostní koeficient zvětšující zkratový proud
I_{N2}	jmenovitý proud na 11 kV
$u_{k\,\%}$	napětí nakrátko

Výpočet odporu kabelu (přívodu) od PTP do ochrany. Běžně se používá měděný kabel o průměru 6 cm^2. Z dispozice rozvodny vím, že délka 100 m bude dostatečná.

$$R_L = \rho \cdot \frac{l}{S} = 0{,}0169 \cdot \frac{100}{6} = 0{,}28\ \Omega \qquad \text{(rov. 5.2)}$$

Součet celkového odporu

$$R_C = R_{CT} + R_L + R_R = 8{,}8 + 0{,}28 + 0{,}1 = 9{,}18\ \Omega$$

(rov. 5.3)

Kde

R_c	celkový odpor
R_{CT}	odpor PTP
R_L	odpor kabelu
R_R	zátěžný odpor připojeného relé
ρ	měrná rezistivita mědi
l	délka kabelu
S	průřez kabelu

Minimální napětí pro působení.

$$U_s \geq \frac{I_k^{''}}{I_S} \cdot R_C = \frac{18500}{2500} \cdot 9{,}18 \geq 68\ V$$

(rov. 5.4)

Kde

U_s	minimální provozní napětí
I_s	primární proud PTP na 11 KV
$R_{c,,}$	celkový odpor
$I_K^{''}$	maximální zkratový proud

Kontrola na minimální napětí, které nesmí být menší než $U_S \geq 68$ V. Z důvodu větší bezpečnosti ochrany **volím dvojnásobné U_S, tedy 136 V**.

$$2 \cdot U_S \leq \frac{U_k}{3}$$
$$2 \cdot 74 \leq \frac{800}{3}$$
$$\mathbf{136 \leq 267}$$

(rov. 5.5)

Kde

U_s	minimální provozní napětí
U_K	napětí kolene PTP

Štítková hodnota magnetizačního proudu je I_e=20 mA při 400 V. Pro moje zvolené napětí 136 V dopočtu magnetizační proud pomocí trojčlenky, protože se pohybuji v lineární části magnetizační charakteristiky.

I_e=20 mA……...400 V
x……136 V

$$x = \frac{136 \cdot 20}{400} = 6{,}8\ mA$$

(rov. 5.6)

Výrobce Metrosil udává rovnici pro výpočet proudu při omezeném napětí. Tento proud je třeba vypočíst pro další výpočty a zjištění proudové citlivosti relé.

$$I_{res} = 0{,}52 \cdot \left(\sqrt{2} \cdot \frac{U_S}{C}\right)^{\frac{1}{\beta}} = 0{,}52 \cdot \left(\sqrt{2} \cdot \frac{136}{450}\right)^{\frac{1}{0{,}25}} = 17\ mA$$

(rov. 5.7)

Kde

I_{res}	proud procházející varistorem
U_s	minimální provozní napětí
β, C	materiálové konstanty varistoru

Proudová citlivost relé se volí tak, aby celková primární proudová citlivost byla kolem 40 %. Tato citlivost zohledňuje ztráty proudu na PTP, citlivost relé a proud procházející varistorem.

Proudovou citlivost relé I_R volím tedy 0,1 A (běžná hodnota používaná v praxi).

$$I_P = n \cdot \left(I_R + I_{res} + \sum I_{mag}\right) = 2500 \cdot (0{,}1 + 0{,}017 + 4 \cdot 0{,}002) = 312{,}5\ A$$

(rov. 5.8)

Kde

I_P	celková primární proudová citlivost systému
I_R	proudová citlivost relé
I_{res}	proud procházející varistorem
I_{mag}	suma magnetizačního proudu pro všechny PTP

V předchozí rovnici *(rov. 5.*8) jsem spočetl celkovou primární proudovou citlivost systému se zvoleným proudem I_R=0,1 A. Dále zkontroluji, zda je celková primární proudová citlivost systému kolem 40 %. Vycházím z jmenovité hodnoty proudu na odporníku NER, která je 750 A. Na tuto hodnotu proudu odporník omezuje 1fázové zkraty na straně 11 kV.

750 A…..……...100 %
312,5 A……..……..…x %

$$x = \frac{312{,}5 * 100}{750} = 41{,}6\ \%$$

(rov. 5.9)

Proudová citlivost systému je **41.6 %, je tedy splněna.**

Velikost stabilizačního odporu vypočtu pomocí Ohmova zákona. Jelikož ochrana pracuje na proudovém principu a chci, aby ochrana působila právě při napětí U_S, musím spočítat přesnou velikost stabilizačního odporu. Vím tedy, že odporem při napětí U_S poteče proud I_R, z čehož pak dopočtu stabilizační odpor R_S.

$$R_S = \frac{U_s}{I_R} = \frac{148}{0{,}1} = 1480\ \Omega$$

(rov. 5.10)

Kde

R_s	stabilizační odpor ochrany
U_s	minimální provozní napětí
I_R	proudová citlivost relé

Jelikož se takový odpor nevyrábí, volím posuvný odpor, takový, kde se naše vypočtená hodnota bude pohybovat v rozmezí 30-70 % celkové velikosti odporu (kvůli zahřívání posuvného odporu).

Z těchto podmínek volím posuvný odpor 2700 Ω s výkonem 180 W.

5.2 Dimenzování nelineárního odporu

Dále počítám maximální špičkové napětí. V případě, že vyjde menší než 2 kV, odpor NER není třeba uvažovat a můžu jej vypustit. Špičkové napětí neohrozí ochranu. Naopak bude-li špičkové napětí větší než 2 kV, musím s odporem NER počítat v zapojení.

$$U_{Kmax} = 2 \cdot \sqrt{2 \cdot U_K \cdot \left[\frac{I_{Kmax}}{n}(R_S + R_R + R_L + R_{CT}) - U_K\right]}$$

$$= 2 \cdot \sqrt{2 \cdot 800 \cdot \left[\frac{31500}{2500} \cdot (1480 + 0{,}1 + 0{,}28 + 8{,}8) - 800\right]} = 10{,}7\ kV$$

(rov. 5.11)

Kde

U_{Kmax}	maximální špičkové napětí
U_K	napětí kolene
I_{Kmax}	zkratová odolnost rozvodny
n	převod PTP
R_s	stabilizační odpor ochrany
R_{CT}	odpor PTP
R_L	odpor kabelu
R_R	zátěžný odpor připojeného relé

Protože špičkové napětí je větší než dovolené napětí ochrany 10,7 kV>2 kV, musím použít nelineární odpor NER.

Kontrola na maximální tepelné ztráty nelineárního odporu.

$$P_{var} = \frac{I_{Kmax}}{n} \cdot \alpha \cdot C \cdot \left(\sqrt{2} \cdot \frac{I_{Kmax}}{n}\right)^{\beta} = \frac{31500}{2500} \cdot 0{,}87 \cdot 450 \cdot \left(\sqrt{2} \cdot \frac{31500}{2500}\right)^{0{,}25} = 10{,}2\ kW$$

(rov. 5.12)

Kde

P_{var}	tepelné ztráty na varistoru
I_{Kmax}	zkratová odolnost rozvodny
n	převod PTP
α, β,C	materiálové konstanty varistoru

Výpočet doby trvání poruchy, po kterou varistor vydrží pracovat bez přehřátí.

$$t_k = \frac{E_{var}}{P_{var}} = \frac{53333}{10200} = 5{,}2\ s$$

(rov. 5.13)

Kde

t_k	čas, než dojde k přehřátí
E_{var}	absorbovaná tepelná energie
P_{var}	tepelné ztráty na varistoru

Doba 5,2 s je dostatečná, protože časové odstupňování ochran je 200 ms.

Typ	Materiálové konstanty			Max U na relé (V)	Doporučené špičkové napětí (V)	Absorbovaná energie (kJ)	Doba zkratu		
	α	β	C				1 s	2 s	3 s
600A/S1/ S256	**450**	**0,25**	**0,87**	**200**	**1725**	**53333**	**45 A**	**30 A**	**22 A**
600A/S1/ S1088	900	0,25	0,87	350	1725	88000	39 A	23 A	17 A

Tab. 5.1: Nejpoužívanějších typy NER a jeho konstanty

5.3 Kontrola stabilizačního odporu

Návrh stabilizačního odporu už jsem provedl v kapitole výše rovnicí *(rov. 5.*10). Dále provedu výpočet pro kontrolu stabilizačního odporu.

Podmínkou bylo provést proudovou kontrolu a napěťovou kontrolu pro vypočtenou hodnotu stabilizačního odporu a nejvyšší možnou nastavitelnou hodnotu na posuvném odporu. Dále požadoval kontrolu na výkonové ztráty dvěma různými způsoby, také pro obě hodnoty.

5.3.1 Kontrola na výkonové ztráty

Vstupní data

R_S	1480 Ω
R_{max} -Maximální hodnota	2700 Ω
Jmenovitý výkon	180 W
Maximální proud pro 0,5 s	1,85 A

První způsob: kontrolu provedu známým jednoduchým vzorečkem přes napětí a odpor.

- Minimální trvalý výkon pro hodnotu stabilizačního odporu R_S.

$$P_{\min_Rs} = \frac{U_S^2}{R_S} = \frac{136^2}{1480} = 12{,}5\ W$$

(rov. 5.14)

- Minimální trvalý výkon pro hodnotu stabilizačního odporu R_{MAX}.

$$P_{\min_Rmax} = \frac{U_S^2}{R_{MAX}} = \frac{136^2}{2700} = 6{,}9\ W$$

(rov. 5.15)

Obě dvě hodnoty jsou menší než jmenovitý výkon stabilizačního odporu, tudíž **splňují podmínky:** $\mathbf{P_{min_Rs}=12{,}5\ W < 180\ W}$

$\mathbf{P_{min_Rmax}=6{,}9\ W < 180\ W}$

Druhý způsob: kontrolu provedu stejným vzorcem s přidaným koeficientem bezpečnosti.

- Minimální výkon po 1 s pro hodnotu stabilizačního odporu R_S.

$$P_{\min_Rs'} = \frac{U_K^2}{R_S} \cdot K = \frac{800^2}{1480} \cdot 2{,}5 = 1081\ W \quad \text{(rov. 5.16)}$$

- Minimální výkon po 1 s pro hodnotu stabilizačního odporu R_{MAX}.

$$P_{\min_Rmax'} = \frac{U_K^2}{R_{MAX}} \cdot K = \frac{800^2}{2700} \cdot 2{,}5 = 592{,}6\ W \quad \text{(rov. 5.17)}$$

Kde

U_K	napětí kolene
U_s	minimální provozní napětí
K	bezpečnostní koeficient (běžně se 2-3)

Obě dvě hodnoty musí splnit podmínku udávanou výrobcem, která říká, že daný odpor musí vydržet desetinásobek jmenovitého výkonu po dobu 1 s.

Stabilizační odpor splňuje podmínky pro obě hodnoty R_S a R_{MAX}.

splňují podmínky: **P_{min_Rs}´=1081 W < 10·180 W**

P_{min_Rmax}´=592,6 W < 10·180 W

5.3.2 Kontrola na proudové a napěťové ztráty

Proudovou a napěťovou kontrolu provedu vždy pro odpor R_s=1480 Ω a R_{max}=2700 Ω.

- Maximální napětí přes stabilizační odpor při maximální vnitřní poruše při nastavené hodnotě R_S.

$$U_{k_\max_Rs} = 1{,}3 \cdot \sqrt[4]{U_K^3 \cdot R_S \cdot \frac{I_{k2}^{''}}{n}} = 1{,}3 \cdot \sqrt[4]{800^3 \cdot 1480 \cdot \frac{18500}{2500}} = 2000{,}5\ V$$

(rov. 5.18)

- Maximální napětí přes stabilizační odpor při maximální vnitřní poruše při nastavené hodnotě R_{MAX}.

$$U_{k_\max_Rmax} = 1{,}3 \cdot \sqrt[4]{U_K^3 \cdot R_{MAX} \cdot \frac{I_k^{''}}{n}} = 1{,}3 \cdot \sqrt[4]{800^3 \cdot 2700 \cdot \frac{18500}{2500}} = 2324{,}9\ V$$

(rov. 5.19)

- Krátkodobý proud přes stabilizační odpor při maximální vnitřní poruše při nastavené hodnotě R_S.

$$I_{K_0{,}5s} = \frac{U_{k_\max_Rs}}{R_S} = \frac{2000{,}5}{1480} = 1{,}35\ A$$

(rov. 5.20)

- Krátkodobý proud přes stabilizační odpor při maximální vnitřní poruše při nastavené hodnotě R_{MAX}.

$$I_{K_0{,}5s'} = \frac{U_{k_\max_Rmax}}{R_{MAX}} = \frac{2324{,}9}{2700} = 0{,}86\ A$$

(rov. 5.21)

- Napěťová přetížitelnost odporu pro 0,5 s a nastavenou hodnotu R_S

$$U_{K_MAX_Rs'} = R_S \cdot I_{MAX_{0,5s}} = 1480 \cdot 1{,}85 = 2738\ V$$

(rov. 5.22)

- Napěťová přetížitelnost odporu pro 0,5 s a nastavenou hodnotu R_S

$$U_{K_MAX_Rmax'} = R_{MAX} \cdot I_{MAX_{0,5s}} = 2700 \cdot 1{,}85 = 4995\ V$$

(rov. 5.23)

Obě dvě hodnoty jsou menší než maximální proud $I_{max_0,5s}$=1,85 A pro 0,5 s (hodnota převzata z tabulek od výrobce odporu z *Tab. 5.2*), tudíž **splňují podmínky**:

$I_{k_0,5s}$=1,35 A < 1.85 A

$I_{k_0,5s}$´=1,35 A < 1.85 A

Obě dvě hodnoty jsou větší než maximální napětí U_{k_max}, tudíž **splňují podmínky**:

$U_{k_max_Rs'}$=2738 V > $U_{k_max_Rs}$ = 2000,5 V

$U_{k_max_Rmax'}$=4995 V > $U_{k_max_Rs}$ = 2324,9 V

Kde

$U_{K,}$	napětí kolene
I_{k2}	maximální zkratový proud
n	převod PTP
$U_{k_max_Rs}$	maximální napětí při R_S
$U_{k_max_Rmax}$	maximální napětí při R_{MAX}
$U_{K_MAX_Rs'}$	maximální napětí při R_S po dobu 0,5 s
$U_{K_MAX_Rmax'}$	maximální napětí při R_{MAX} po dobu 0,5 s
$I_{K_0,5s}$	maximální proud při R_S po dobu 0,5 s
$I_{K_0,5s'}$	maximální proud při R_{MAX} po dobu 0,5 s

Celkový odpor (Ω)	Max. trvalý proud (A)	Max. proud po 3 s (A)	Max. proud po 1 s (A)	Max. proud po 0,5 s (A)
1500	0,31	1,36	1,8	2,52
2700	**0,23**	**1**	**1,3**	**1,85**
5600	0,16	0,71	0,92	1,29

Tab. 5.2: Proudové konstanty posuvného odporu

6 Návrh jednotlivých ochran

Vstupní data

Transformátor	
Transformátor	66kV/11 kV +5 %, -15 %
Zapojení	Dyn1
Výkon TR	40 MVA (32 MVA)
Jmenovitý proud na 66 kV	I_{N1}350 A
Jmenovitý proud na 11 kV	I_{N2}=2,1 kA
Napětí nakrátko	$u_{k\,\%}$=13,6 % pro 32 MVA
	$u_{k\,\%}$=17 % pro 40 MVA

NER	
Odpor	8,5 Ω
Proudové zatížení	750 A
Maximální časové zatížení	30 s

PTP na 11 kV	
Převod	2500/1 A
Vnitřní odpor	R_{CT}=8,8 Ω
Napětí kolene	U_K=800 V
Magnetizační proud	I_e=20 mA při 400 V

6.1 Nadproudová fázová ochrana na 11 kV

Tato ochrana je použita, jako záložní ochrana hlavní ochrany na straně nižšího napětí transformátoru. Nadproudová fázová ochrana disponuje dvěma časově odstupňovanými funkcemi.

První je použita charakteristika normal inverse (*obr. 2.7*: Porovnání časově závislých proudových charakteristik - modrá char.) se sníženou citlivostí na 150 % jmenovitého proudu na straně nižšího napětí a s časovým násobitelem zpoždění 0,26.

Typ char.	IEC normal inverse time
Počáteční hodnota I_1>	2100 A·1,5=3150 A
k_1	0,26

Druhá je použita charakteristika very inverse (*obr. 2.7*: Porovnání časově závislých proudových charakteristik - červená char.) se sníženou citlivostí na 150 % jmenovitého proudu na straně nižšího napětí a s časovým násobitelem zpoždění 0,42. Takový časový násobitel volím proto, abychom dodrželi selektivitu ochran, v našem případě jejich minimální časové odstupňování o 200 ms

Typ char.	IEC very inverse time
Počáteční hodnota $I_2>$	2100 A·1,5=3150 A
k_2	0,42

Poruchový zapisovač dat bude spuštěn při každém popudu ochrany. Maximální délka zápisu před poruchou bude 0,3 s a po poruše bude 3 s.

6.2 Záložní zemní ochrana na 11 kV

Jak už z názvu vyplývá, jedná se o záložní ochranu na straně nižšího napětí, přesněji na vyvedené nule. Primární funkcí zemní ochrany je pracovat jako záložní ochrana odporu NER a chránit transformátor proti zemním poruchám. Ochrana pracuje ve třech krocích. První stupeň vyšle signál na podélnou spojku přípojnic a v případě nezafungování vyšle ochrana druhý signál (druhý stupeň) do přívodného pole.

Počáteční hodnotu nadproudového stupně volím kolem 40 % jmenovité hodnoty proudu NER, v našem případě volím vypočtený proud z rovnice *(rov. 5.*8) I_p=312,5 A. Třetí stupeň není připojený na vypínač, pracuje pouze jako signalizace-alarm na dispečink, je časově nezávislý a nemá žádné časové zpoždění. Jeho počáteční hodnotu nastavím na 10 % jmenovitého proudu NER.

Typ char.	Časově nezávislá
Počáteční hodnota $I_{E1}>$	312,5 A
Časové zpoždění t_{e1}	3,5 s

Typ char.	Časově nezávislá
Počáteční hodnota $I_{E2}>$	312,5 A
Časové zpoždění t_{e2}	4,5 s

Typ char.	Časově nezávislá
Počáteční hodnota $I_{E3}>$	75 A
Časové zpoždění t_{e3}	0 ms (alarm)

Poruchový zapisovač dat bude spuštěn při každém popudu ochrany. Maximální délka zápisu před poruchou bude 0,2 s a po poruše 5 s.

6.3 Směrová nadproudová fázová ochrana na 11 kV

Ochranu nastavím jako záložní směrovou nadproudovou fázovou ochranu dívající se směrem do transformátoru. V případě poruchy se směr proudu otočí a teče zpět do transformátoru. Ochrana se běžně nastavuje na 50 % jmenovité hodnoty proudu na straně nižšího napětí. Budu však vycházet z celkové proudové citlivosti systému a nastavím citlivost na 41,6 % jmenovité hodnoty proudu na straně nižšího napětí (vypočteno rovnicí *(rov. 5*.**9)** a časovým násobitelem zpoždění 0,75.

Typ char.	IEC normal inverse time
Počáteční hodnota $I_s>$	0,416·2500=1040 A
k_s	0,75
směr	na transformátor

Poruchový zapisovač dat bude spuštěn při každém popudu ochrany. Maximální délka zápisu před poruchou bude 0,2 s a po poruše 3 s.

6.4 Automatika selhání vypínače

Na žádost zákazníka se automatika selhání vypínače bude provozovat pouze s druhým krokem. Nedojde tedy k opětovnému pokusu o vypnutí vypínače, ale rovnou se provede vypnutí všech vypínačů připojených k přípojnici. Ochrana se bude provozovat se sníženou citlivostí na 160 % jmenovité hodnoty proudu na straně nižšího napětí a s časovým zpožděním 300 ms (běžná hodnota vycházející z praxe).

Počáteční hodnota $_{Iasv}>$	1,60·2500=3350 A
Časové zpoždění t_{asv}	300 ms

Poruchový zapisovač dat bude spuštěn při každém popudu ochrany. Maximální délka zápisu před poruchou bude 0,2 s a po poruše 3 s.

6.5 Rozdílová ochrana TR

Rozdílová ochrana společně s vysokoimpedanční rozdílovou ochranou (v našem použití REF protection) jsou použity jako hlavní ochrany transformátoru. Ochranu je nutné nastavit, dopočítat velikost nestabilního stupně a provést kontrolu na polohu odboček. Kontrola se bude počítat na vyžádání zákazníka pro krajní polohy odboček (+5 % a -15 %)

Jako první musím určit I_{dmin} jednoduchým součtem všech tolerancí jednotlivých částí ochrany zhoršující její samotnou přesnost. Jednotlivé tolerance zjistím ze štítkových hodnot. Výslednou toleranci vynásobím jmenovitým proudem strany vyššího napětí transformátoru a tím dostanu I_{dmin}.

Přepínač odboček	15 %	
PTP na 66 kV	3 %	
PTP na 11 kV	3 %	
Měření ochrany	2 %	(chyba způsobena tolerancí ochrany)
Rezerva	7 %	(běžná hodnota z praxe)
Celkem	30 %	

(rov. 6.1)

Samotné zalomení charakteristiky se nechává neměnné od výrobce. Budu pouze posouvat celou charakteristikou nahoru či dolů podle vypočtené hodnoty proudu I_{dmin}.
Podle všech sečtených tolerancí pak volím I_{dmin} jako 30 % I_{n1}.

I_{dmin}	$0{,}3 \cdot I_{n1}$
Konec oblasti 1	$0{,}75 \cdot I_{n1}$
Sklon oblasti 2	40 %
Konec oblasti 2	$3 \cdot I_{n1}$
Sklon oblasti 3	80 %

Nestabilizovaný stupeň musím nastavit, tak aby při běžném zapínání transformátoru spínací proud nebyl příliš vysoký a neovlivňoval chod ochrany. Nicméně spínací proudy jsou veliké a musím zabránit tomu, aby nepřekročily velikost poruchových proudů. Tento maximální průchozí proud lze vypočíst následovně.

$$I_{k1}^{''} = K \cdot \frac{I_{N1}}{u_{k\,\%}} = 1{,}3 \cdot \frac{350}{0{,}17} = 2676\ A = 7{,}64 \cdot I_{N1}$$

(rov. 6.2)

Kde

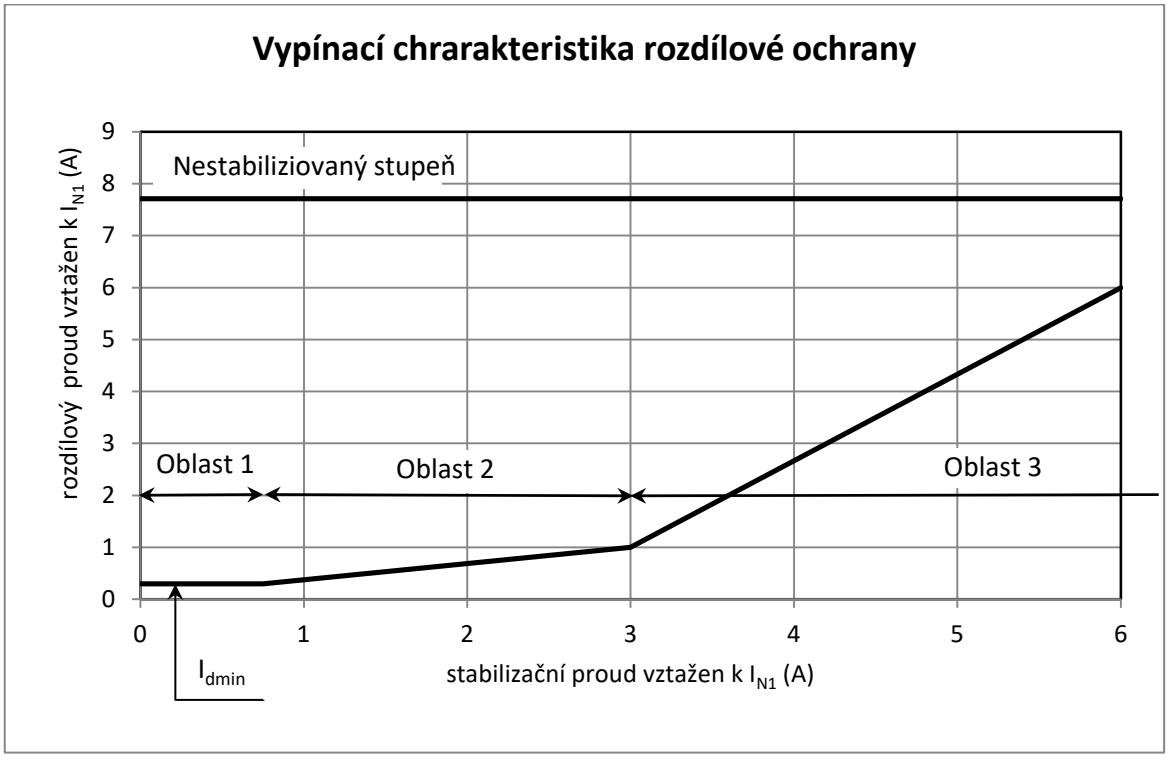
$I_{k1}^{''}$	maximální zkratový proud
K	bezpečnostní koeficient zvětšující zkratový proud (doporučená hodnota 1,3)
I_{N1}	jmenovitý proud na 66 kV
$u_{k\,\%}$	napětí nakrátko

Z důvodu větší bezpečnosti budu nastavovat proud nestabilizovaného stupně větší než vypočtený:

$$\mathbf{I_k^{''} = 2700\ A = 7{,}71 \cdot I_{N1}}$$

(rov. 6.3)

Z výše vypočtených, zvolených a zadaných hodnot můžu sestrojit vypínací charakteristiku rozdílové ochrany transformátoru.



obr. 6.1: Vypínací charakteristika rozdílové ochrany

6.5.1 Kontrola stability při krajních odbočkách

Nejprve provedu kontrolu na polohu odboček při normálním provozním stavu pro oba krajní případy (+5 % a -15 %). V druhém kroku budu provádět stejnou kontrolu na polohu odboček, ale při maximálním zkratovém proudu $I_k^{''}$=2700 A. Obě kontroly budu provádět pro proudy I_d a I_{stab} (použiji největší hodnotu z daného intervalu). Výsledné hodnoty vynesu do grafu.

- **Normální provozní stav pro odbočku +5%**

$$I_d = \left| I_{N1} - I_{N1} \cdot \frac{U_N}{U_{N+5\,\%}} \right| = \left| 350 - 350 \cdot \frac{66}{69{,}3} \right| = 16{,}6\ A = 0{,}048 \cdot I_{N1}$$

(rov. 6.4)

$$I_{stab} = \left| I_{N1}; I_{N1} \cdot \frac{U_N}{U_{N+5\,\%}} \right| = \left| 350; 350 \cdot \frac{66}{69{,}3} \right| = 350\ A = 1 \cdot I_{N1}$$

(rov. 6.5)

- **Normální provozní stav pro odbočku -15 %**

$$I_d = \left| I_{N1} - I_{N1} \cdot \frac{U_N}{U_{N-15\,\%}} \right| = \left| 350 - 350 \cdot \frac{66}{56{,}1} \right| = 61{,}76\ A = 0{,}176 \cdot I_{N1}$$

(rov. 6.6)

$$I_{stab} = \left| I_{N1}; I_{N1} \cdot \frac{U_N}{U_{N-15\,\%}} \right| = \left| 350; 350 \cdot \frac{66}{56{,}1} \right| = 411\ A = 1{,}18 \cdot I_{N1}$$

(rov. 6.7)

- **Při průchodu max. zkratového proudu $I_k^{''}$=2700 A pro odbočku +5 %**

$$I_d = \left| I_k^{''} - I_k^{''} \cdot \frac{U_N}{U_{N+5\,\%}} \right| = \left| 2700 - 2700 \cdot \frac{66}{69{,}3} \right| = 107{,}8\ A = 0{,}037 \cdot I_{N1}$$

(rov. 6.8)

$$I_{stab} = \left| I_k^{''}; I_k^{''} \cdot \frac{U_N}{U_{N+5\,\%}} \right| = \left| 2700; 2700 \cdot \frac{66}{69{,}3} \right| = 2700\ A = 7{,}71 \cdot I_{N1}$$

(rov. 6.9)

- **Při průchodu max. zkratového proudu $I_k^{''}$=2700 A pro odbočku -15 %**

$$I_d = \left| I_k^{''} - I_k^{''} \cdot \frac{U_N}{U_{N-15\,\%}} \right| = \left| 2700 - 2700 \cdot \frac{66}{56{,}1} \right| = 400\ A = 1{,}36 \cdot I_{N1}$$

(rov. 6.10)

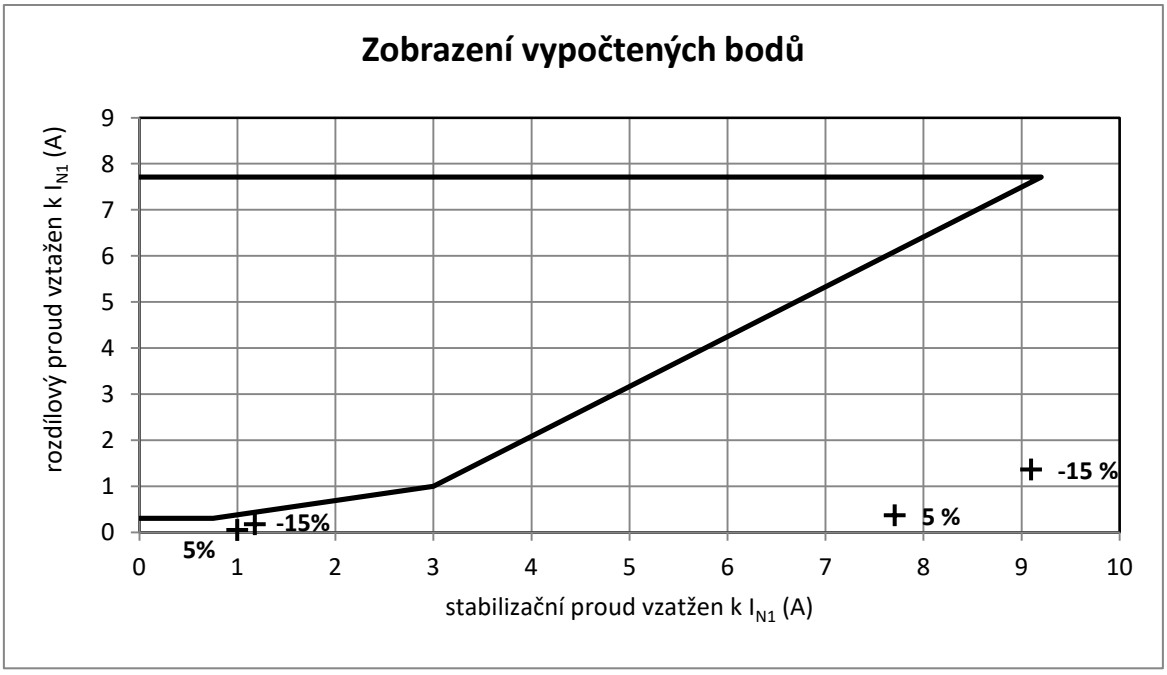
$$I_{stab} = \left| I_k^{''}; I_k^{''} \cdot \frac{U_N}{U_{N-15\,\%}} \right| = \left| 2700; 27000 \cdot \frac{66}{56{,}1} \right| = 3176{,}5\ A = 9{,}1 \cdot I_{N1}$$

(rov. 6.11)

Kde

I_d	rozdílový proud
I_{stab}	stabilizační proud
I_{N1}	jmenovitý proud transformátoru na 66 kV
$I_k^{''}$	maximální zkratový proud
U_N	jmenovité napětí na transformátoru na 66 kV
$U_{N+5\,\%}$	jmenovité napětí na nejvyšší odbočce
$U_{N-15\,\%}$	jmenovité napětí na nejnižší odbočce

Vypočtené hodnoty jsem vynesl do grafu charakteristiky rozdílové ochrany. Na obrázku *obr. 6.2* je vidět, že všechny 4 body jsou pod vypínací charakteristikou, a tudíž nebudou narušovat chod ochrany a můžu říci, že **ochrana je stabilní.**



obr. 6.2: Zobrazení vypočtených bodů v grafu

Poruchový zapisovač dat bude spuštěn při každém popudu ochrany. Maximální délka zápisu před poruchou bude 0,2 s a po poruše 2 s.

6.6 Mžiková nadproudová fázová ochrana na 66 kV

Tato ochrana není časově zpožděná, pracuje jako záložní ochrana transformátoru. Její ochranná funkce se nastavuje na maximální možný průchozí zkratový proud s bezpečnostním faktorem 130 % (hodnota vychází z praxe).

$$I >>= K \cdot \frac{I_{N1}}{u_{k\,\%}} = 1{,}3 \cdot \frac{350}{0{,}17} = 2676\ A = 7{,}64 \cdot I_{N1}$$

(rov. 6.12)

Kde

I>>	nastavení mžikové ochrany
K	bezpečnostní koeficient zvětšující zkratový proud (hodnota z praxe 1,3)
I_{N1}	jmenovitý proud na 66 kV
$u_{k\,\%}$	napětí nakrátko

Z důvodu větší bezpečnosti budu nastavovat proud I>> větší než vypočtený.

I>>=2700 A=7,71· I_{N1}

(rov. 6.13)

6.7 Nadproudová fázová ochrana na 66 kV

Tato časově závislá nadproudová fázová ochrana pracuje jako ochrana transformátoru a navíc chrání 11kV přípojnici. Časově závislá nadproudová fázová ochrana využívá funkci very inverse time (obr. 2.7 červená křivka). Běžně se nadproudové fázové ochraně snižuje citlivost na hodnotu kolem 150 % jmenovité hodnoty proudu transformátoru na 66 kV. Proudovou citlivost si přepočtu na jmenovitý proud PTP na straně 66 kV.

$$1{,}5 \cdot I_{N1} = 1{,}5 \cdot 350 = 525 \text{ A}$$

(rov. 6.14)

$$\frac{525}{I} = \frac{525}{400} = 1{,}31$$

(rov. 6.15)

Typ char.	IEC very inverse time
Počáteční hodnota	I> 400 A·1,31=525 A
k	0,42

Kde

I_{N1}	jmenovitý proud transformátoru na straně 66 kV
I	jmenovitá hodnota proudu PTP na straně 66 kV

7 Kontrola selektivity

V kapitole *2.1* jsem definoval, co je selektivita ochran. Selektivita ochran je důležitá z toho důvodu, aby na jednu určitou poruchu nereagovaly všechny ochrany, ale pouze ochrana na tuto danou poruchu nastavená.

Selektivity ochran lze dosáhnout několika způsoby.

- Časová selektivita
- Proudová selektivita
- Logická selektivita

Budu provádět kontrolu na časovou selektivitu. V průběhu celého výpočtu a nastavování ochran jsem se držel podmínky, že ochrany od sebe musejí být časově odstupňovány o 200 ms. Tento čas je dán časovým zpožděním vypínače (100 ms) a časem odpadu nadřazené ochrany, která po tuto dobu nezapůsobila (20-40 ms), a bezpečnostní rezervou (<50 ms). Z toho plyne, že časové odstupňování je 200 ms (100+40+50=190 ms, proto uvažuji radši 200 ms).

7.1 Postup kontroly

Postup kontroly jsem prováděl vkládáním navržených a vypočtených hodnot jednotlivých ochranných funkcí do grafů. Z těchto grafů pak vyhodnotím, zda jsou ochrany správně nastaveny a správně časově odstupňovány a zda nepřesahují mezní oteplovací charakteristiku transformátoru.

Provedl jsem kontrolu selektivity jak na straně vyššího napětí, tak i na straně nižšího napětí. Dále jsem vynesl všechny ochranné funkce do jednoho grafu.

Poté jsem ze všech nastavených a vypočtených hodnot vytvořil nastavovací tabulku.

7.2 Výsledky kontroly

Před vynesením ochranné funkce 51 (nadproudová ochrana) jsem si spočetl její charakteristiku průběhu. Z návrhu ochrany vím, že se jedná o nadproudovou ochranu s typem charakteristiky IEC very inverse time a počáteční hodnota I>525 A s časovým násobitelem k=0,42. Po dosazení do rovnice níže.

$$t = \left(\frac{A}{\left(\frac{I}{I>}\right)^{P} - 1} \right) k$$

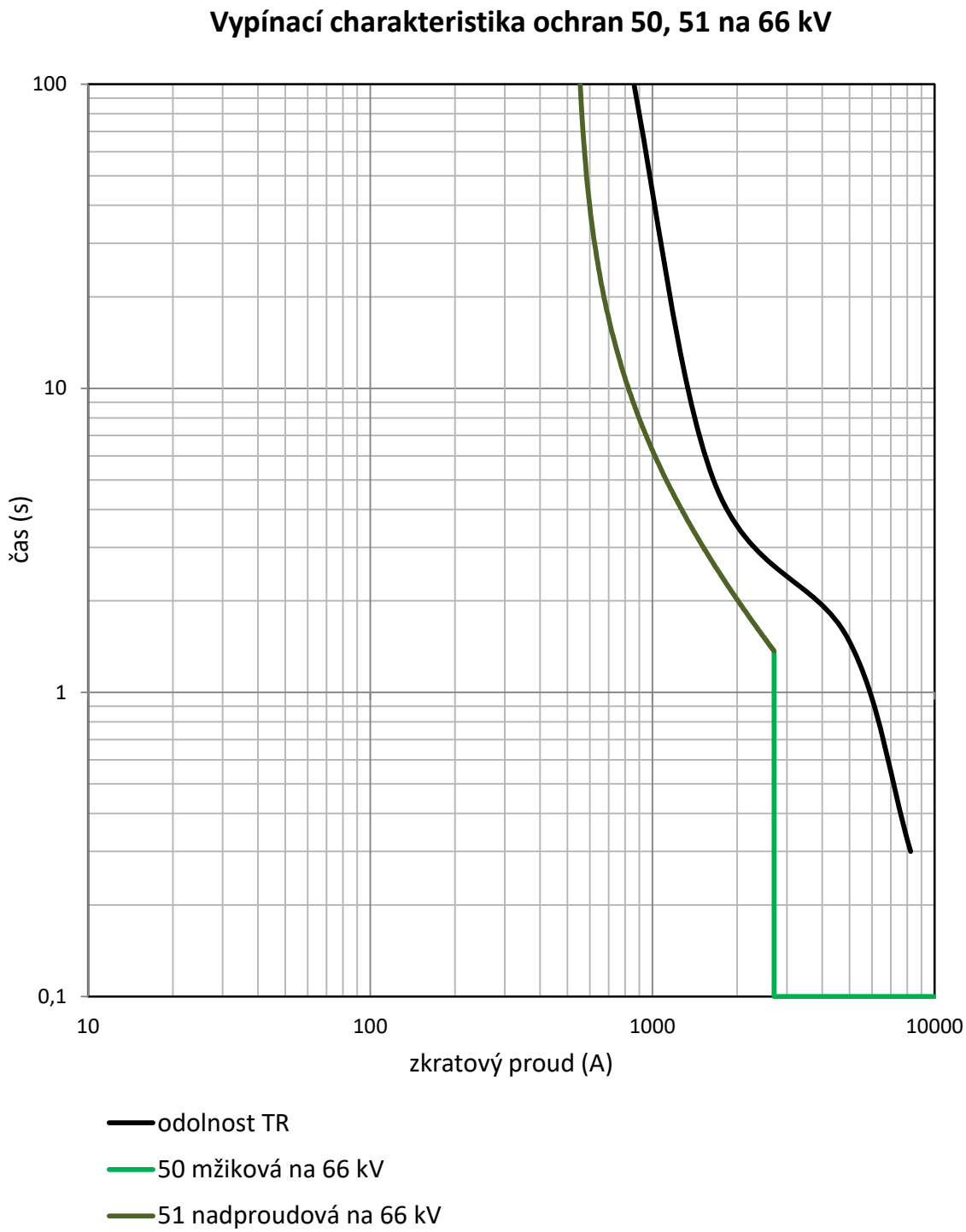
(rov. 7.1)

Kde:

A	13,5	konstanta z tabulky *Tab. 2.2*
P	1	konstanta z tabulky Tab. 2.2
k	0,42	
I>	525 A	

7.2.1 Nadproudová a mžiková ochrana na 66 kV

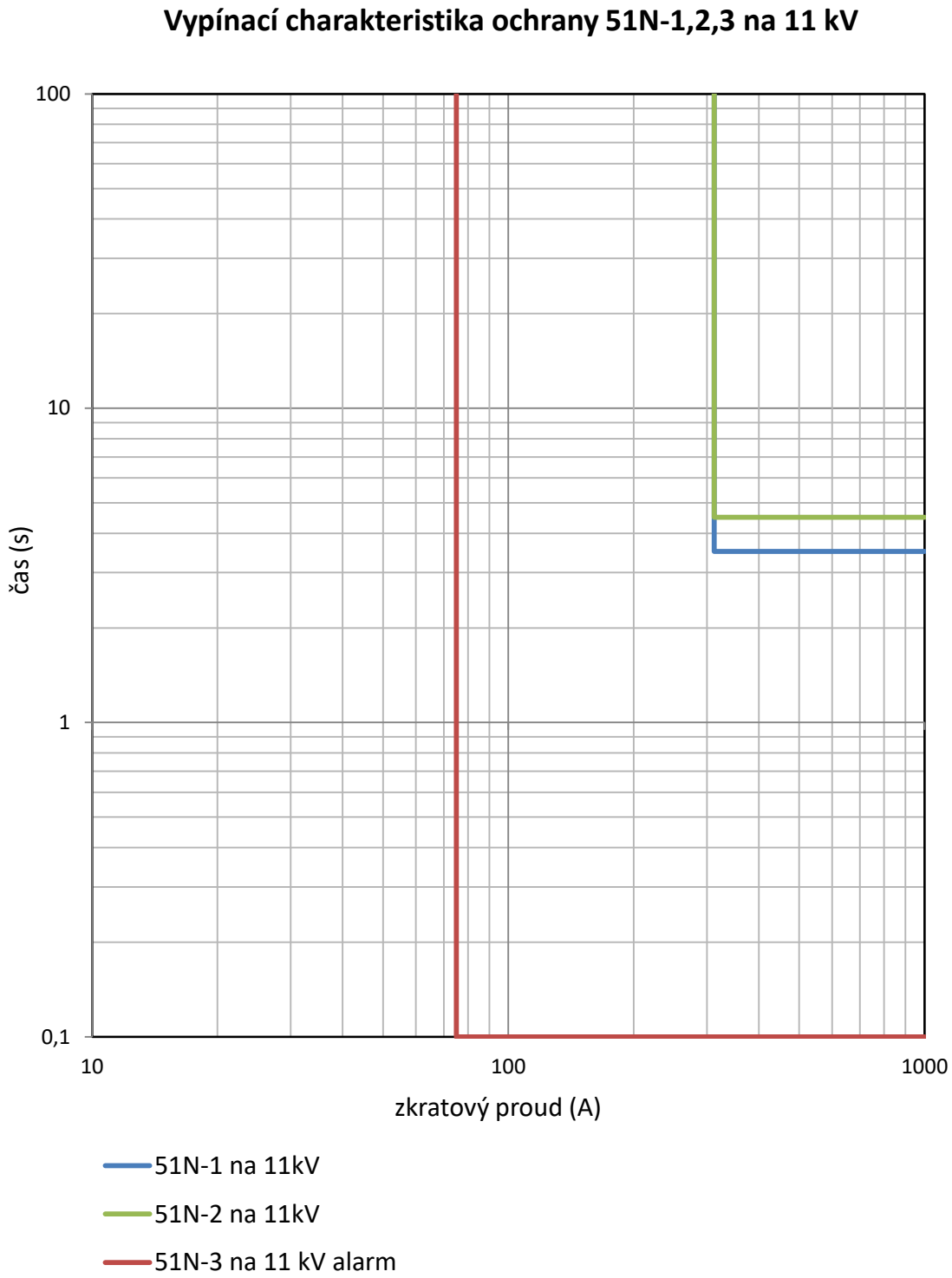
Výsledek kontroly selektivity na straně nižšího napětí je vidět na obrázku *obr. 7.1*, kde kontroluji, zda námi nastavené ochranné funkce 50 a 51 (nadproudová a mžiková nadproudová) nepřekračují tepelnou charakteristiku transformátoru. Z obrázku je jasně patrné, že námi nastavené ochranné funkce jsou v pořádku.



obr. 7.1: Vypínací charakteristika ochrany 50, 51 na 66 kV

7.2.2 Zemní záložní ochrana na 11 kV

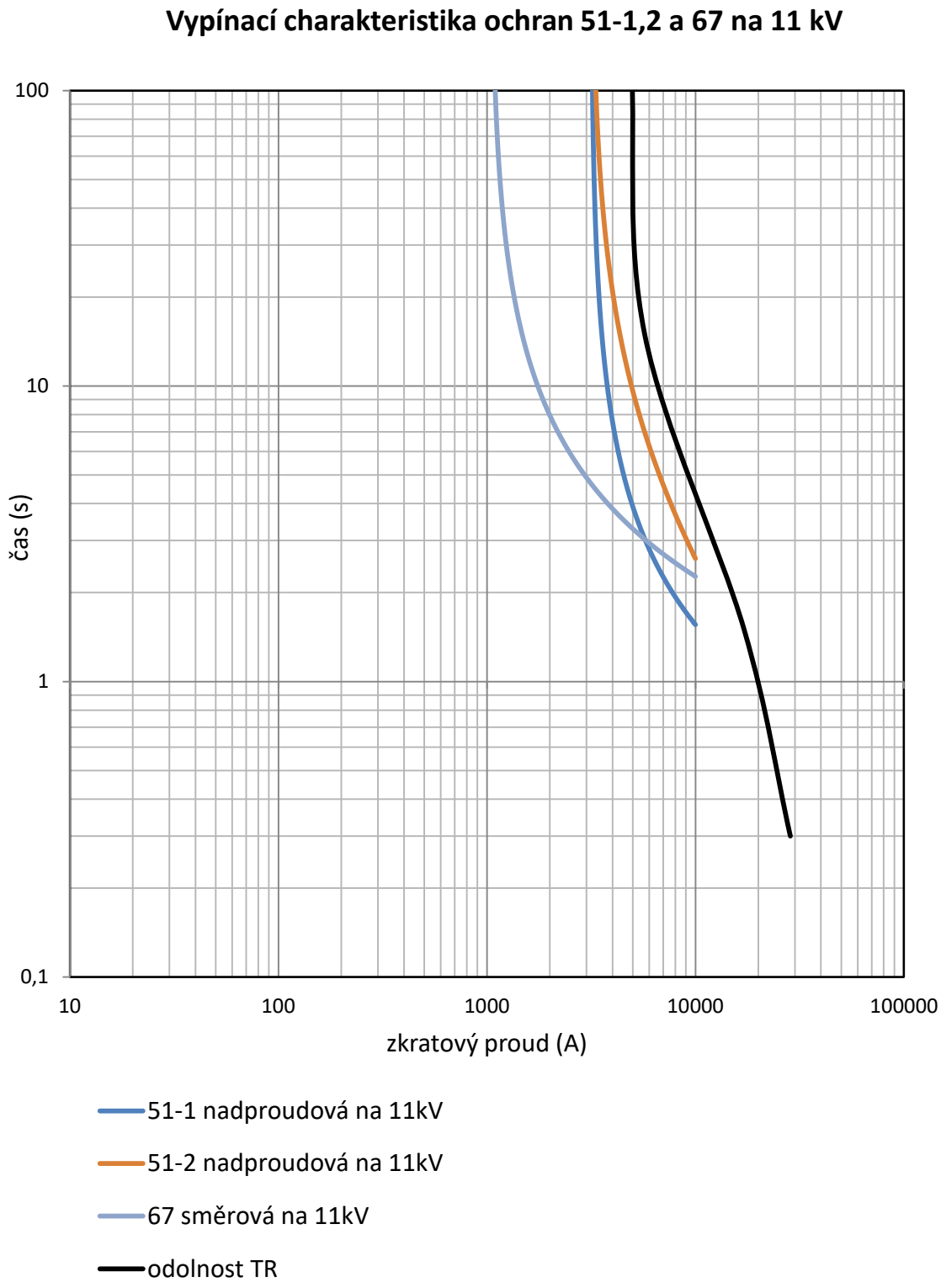
Jako další kontrolu selektivity jsem dělal pro zemní ochranu s třemi stupni ochrany, kde třetí stupeň představuje pouze alarm pro obsluhu. Po vynesení do grafu na obrázku *obr. 7.2* vyčnívá třetí stupeň ochrany, který funguje pouze jako alarm, a proto je nastaven na nižší proudovou hodnotu. Po alarmu následuje první ochranný stupeň, který je nastaven na stejnou proudovou hodnotu jako druhý stupeň s tím, že druhý stupeň ochrany je časově zpožděn kvůli selektivitě ochranného systému. Časovou selektivitu 200 ms mezi jednotlivými ochrannými stupni záložní zemní ochrany jsem dodržel, jak je patrné z grafu níže.



obr. 7.2: Vypínací charakteristika ochrany 51N-1,2,3 na 11 kV

7.2.3 Nadproudová a směrová ochrana na 11 kV

Kontrola časové selektivity prvního stupně nadproudové ochrany a směrové ochrany (ANSI značení 51-1 a 67) odhalila špatné nastavení těchto dvou ochran, jak je vidět na obrázku *obr. 7.2*, kde se tyto dvě charakteristiky kříží. Takové křížení je nedovolené a mohlo by způsobit celkovou nestabilitu celého ochranného systému. Toto konkrétní křížení je způsobeno špatným nastavením ochrany, přesněji špatným zvolením koeficientu časového násobení, který nedostatečně posunul charakteristiku směrové ochrany dolů (ANSI značení 67).



obr. 7.3: Vypínací charakteristika 51-1,2 a 67 na 11 kV

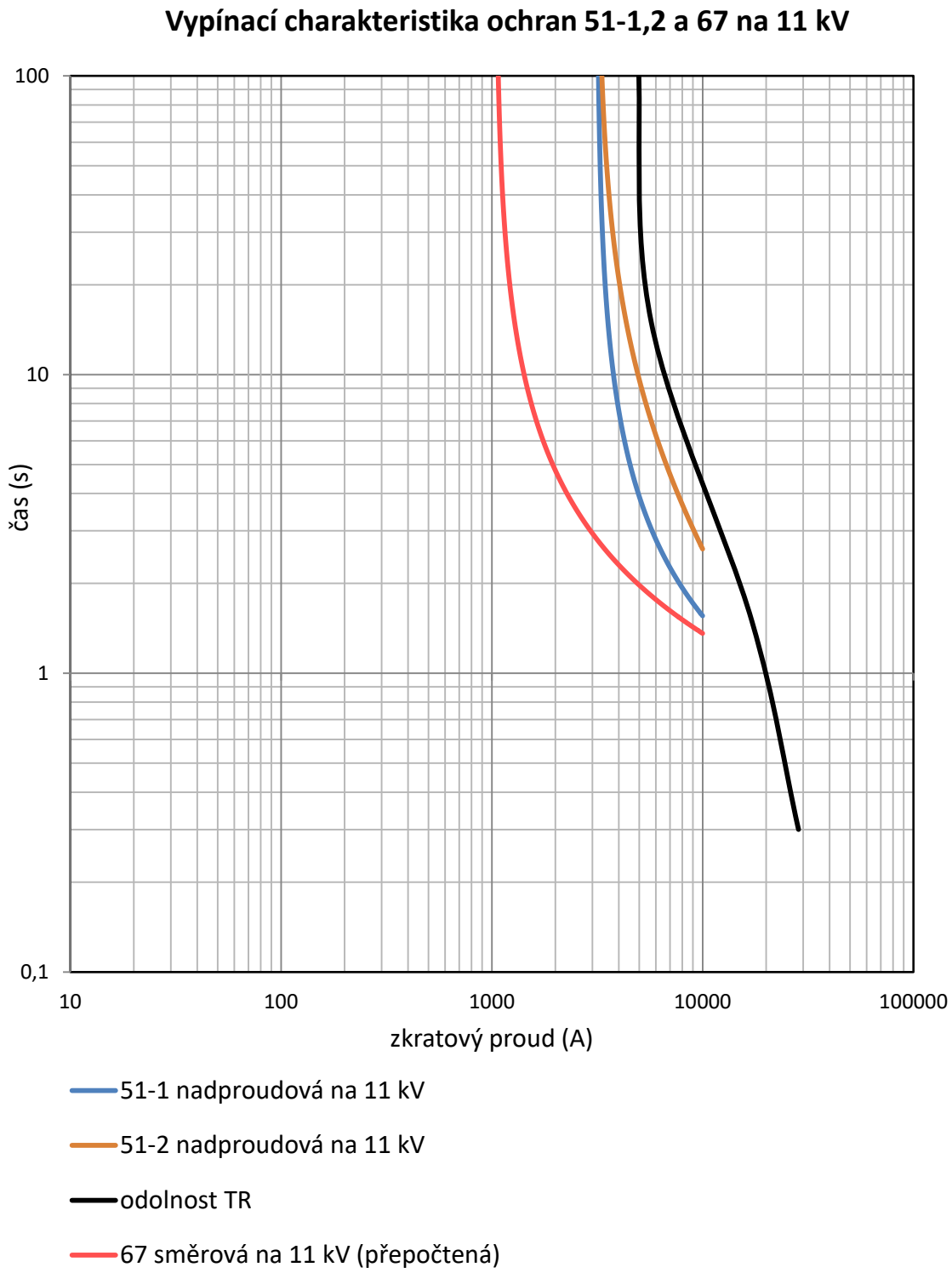
Je zapotřebí znovu nastavit směrovou nadproudovou ochranu s novým koeficientem časového násobení a znovu provést kontrolu časové selektivity. Budu vycházet z původního nastavení, které bylo:

Typ char.	IEC normal inverse time
Počáteční hodnota	$I_s>$ 0,416·2500=1040 A
k_s	**0,75**
směr	na transformátor

V původním nastavení pouze změním koeficient časového násobení k_s=0,75 na nový k_s=0,45. Koeficient časového násobení jsem zmenšil, přičemž jsem docílil celého posunutí charakteristiky dolů při zachování stejné proudové hodnoty a typu charakteristiky. Nové nastavení vypadá takto:

Typ char.	IEC normal inverse time
Počáteční hodnota	$I_s>$ 0,416·2500=1040 A
k_s	**0,45**
směr	na transformátor

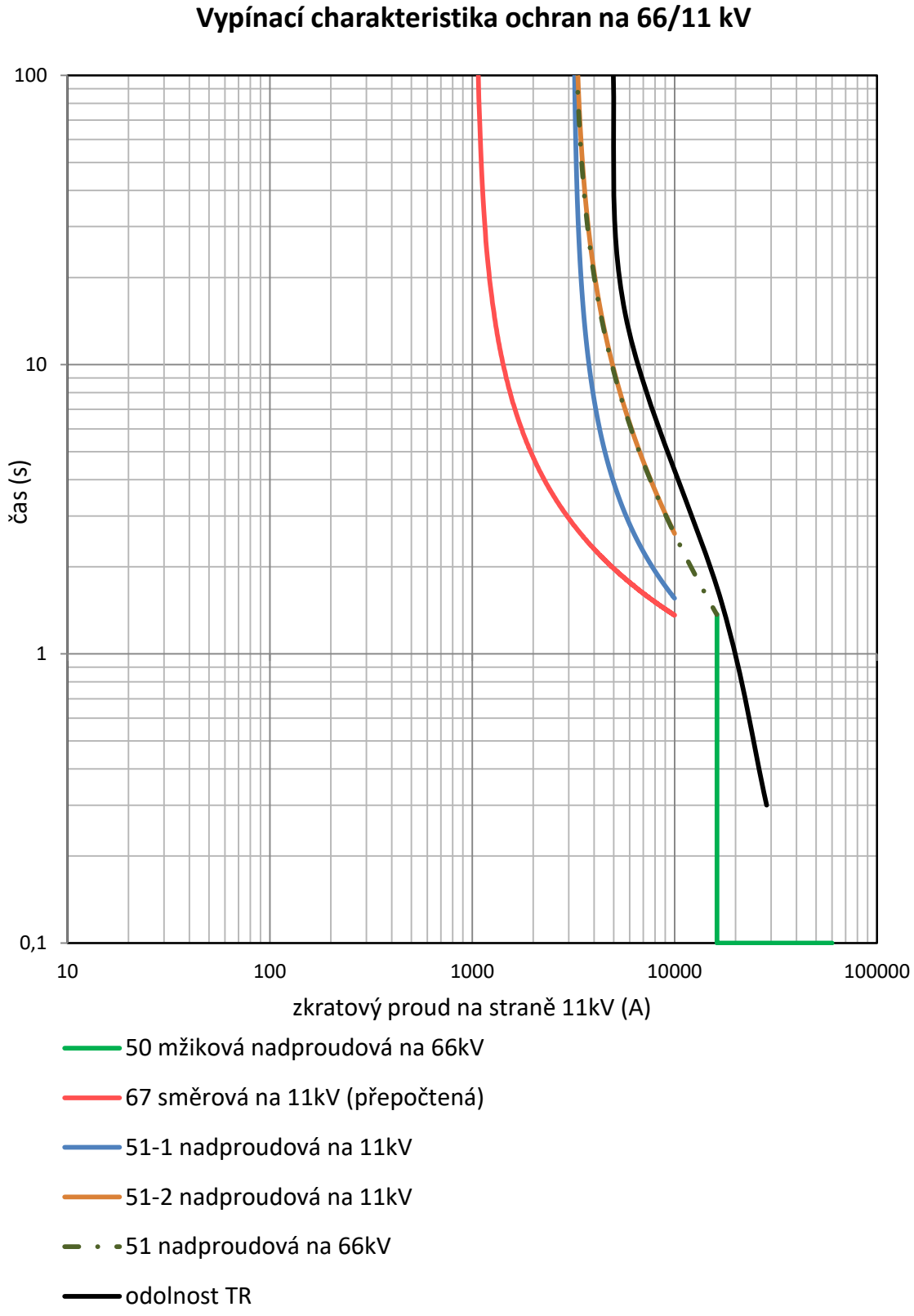
Kvůli úpravě a novému nastavení je zapotřebí znovu zkontrolovat vypínací charakteristiku nadproudové a směrové nadproudové ochrany na 11 kV (ANSI značení 51-1, 67). Na obrázku *obr. 7.4* je vidět, že směrová nadproudová ochrana (ANSI značení 67, na obrázku ta červená) je posunuta dolů a nikde se nekříží. Můžu tedy říci, že je zde splněna časová selektivita ochran.



obr. 7.4: Vypínací charakteristika ochran 51-1,2 a 67 na 11 kV po přepočtu

7.2.4 Všechny použité nadproudové ochrany

Jako poslední kontrolu časové selektivity provedu srovnání všech použitých nadproudových ochran jak na straně nižšího napětí, tak i na ochrany použité na straně vyššího napětí. Před začátkem vytváření grafu je zapotřebí si přepočíst všechny ochrany na jednu stranu transformátoru. Za referenční stranu jsem si zvolil stranu nižšího napětí. Po přepočtu mžikové a nadproudové ochrany (ANSI značení 50,51) na stranu 11 kV jsem byl schopen vytvořit graf *obr. 7.5.* Na grafu je zajímavé, že se druhý stupeň nadproudové ochrany na 11 kV (ANSI značení 51-2 ta oranžová) a nadproudová ochrana na 66 kV (ANSI značení 51 - tmavě zelená čerchovaná) překrývají. Není to chyba, ochranné funkce jsou stejně nastavené, pouze se liší proudovým nastavením, které je ovlivněno převodem transformátoru, z čehož plyne, že nastavená proudová hodnota na 11 kV je šestkrát větší než na 66 kV.



obr. 7.5: Vypínací charakteristika ochran na 66/11 kV

7.3 Nastavovací tabulka

Takovou tabulku (někdy také nastavovací dopis) vytvoří projektant ochran z navržených a vypočtených hodnot jednotlivých ochran. Tuto nastavovací tabulku ochrany dostane do ruky ochranář, který podle ní fyzicky a na místě nastaví ochranu.

Tabulka níže *Tab. 7.1* přehledně a souhrnně popisuje, jak a která ochrana má být nastavena od proudového nastavení až po časové zpoždění.

	PTP	Typ ochrany	funkce ANSI-kódu	Nadproudové ochrany				
				časově závislé			časově nezávislé	
				proudové nastavení (A)	časový násobitel	typ	proudové nastavení (A)	časové zpoždění (s)
Transformátor 40 MVA	800/1 A na 66 kV	RET 670	51	525	0,42	very inverse		
			50				2700	0
	2500/1 A na 11 kV	RET 670	51-1	3150	0,26	normal inverse		
			51-2	3150	0,42	very inverse		
			67 (vpřed)	1040	0,45	normal inverse		
	750/1 A uzel na 11 kV	REF 615	51N-1				312,5	3,5
			51N2				312,5	4,5
			51N (alarm)				75	0

Tab. 7.1: Nastavovací tabulka

8 Závěr

V této diplomové práci se podařilo dosáhnout hlavního cílem a to tedy navržení celého ochranného konceptu s využitím ochrany RET 670 od ABB, kde je použita vysokoimpedanční rozdílová ochrana jako hlavní ochrana.

Pro vytvoření konceptu chránění transformátoru jsou dána určitá pravidla, ale vždy závisí na mnoha okolních faktorech, které nejsou nikde specifikovány. Proto finální návrh konceptu vždy vychází ze zavedené praxe a závisí na zkušenostech projektanta ochrany a na podmínkách zákazníka.

Jelikož je tato práce založena na skutečných hodnotách transformátoru a doplňujících specifických požadavcích a podmínkách, při kterých bude transformátor pracovat. Odpovídá tak skutečnému návrhu chránění transformátoru. Proto by šel tento postup použít na reálný projekt a vedený výpočet by šel přímo aplikovat do praxe.

Jedním z požadavků bylo, aby stabilizační odpor byl přesně nastaven a jeho hodnota se pohybovala v rozmezí 30-70 % celkového posuvného odporníku. Proto byl zvolen odporník o 2700 Ω s nastavenou hodnotou R_S=1480 Ω. Dalším požadavkem bylo provedení výkonové kontroly stabilizačního odporu pro hodnoty R_S=1480 Ω a 2700 Ω dvěma způsoby. Dále bylo dodržováno pravidlo selektivity, že musejí být jednotlivé ochrany odstupňovány o 200 ms. Tento čas je dán součtem časů zapůsobení vypínače, odpadu předřazené ochrany a tolerance.

Při návrhu rozdílové ochrany bylo zapotřebí napočítat celkovou toleranci chyby kvůli posunutí celé charakteristiky nahoru. Dalším požadavkem bylo provedení kontroly na polohu odboček (+5 % a -15 %). Kontrola opět byla provedena dvěma způsoby, při normálním provozu a při vzniku zkratu. Kontrola ukázala, že ochrana pracuje správně.

Při kontrole na selektivitu ochrany bylo odhaleno, že se dvě charakteristiky kříží (ANSI značení 51 a 67 nadproudová a směrová *obr. 7.3*). Při odhalení nesplnění selektivity bylo zapotřebí znovu navrhnout směrovou ochranu. Oprava byla provedena snížením časového koeficientu násobitele z k_1=0,75 na k_2=0,45. Po této opravě bylo zapotřebí znovu provést kontrolu selektivity *obr. 7.4*. Kontrola odhalila, že úprava směrové ochrany pomocí koeficientu časového násobitele byla správná, tudíž celý ochranný systém je stabilní.

Seznam obrázků

OBR. 1.1: SCHÉMA ZAPOJENÍ TR ..... - 14 -
OBR. 1.2: DIAGRAM HODINOVÉHO ČÍSLA 1 ..... - 14 -
OBR. 1.3: KONCEPT CHRÁNĚNÍ TRANSFORMÁTORU 66/11 KV ..... - 15 -
OBR. 1.4: PODROBNÉ SCHÉMA ZAPOJENÍ OCHRAN TR ..... - 17 -
OBR. 2.1: VNITŘNÍ ČLENY OCHRANY[7] ..... - 23 -
OBR. 2.2: ZAPOJENÍ ROZDÍLOVÉ OCHRANY ..... - 28 -
OBR. 2.3: VLIV CHYB PTP NA ROZDÍLOVOU OCHRANU ..... - 29 -
OBR. 2.4: VYPÍNACÍ CHARAKTERISTIKA ROZDÍLOVÉ OCHRANY [3] ..... - 30 -
OBR. 2.5: VYRUŠENÍ HODINOVÉHO ČÍSLA [4] ..... - 32 -
OBR. 2.6: CHARAKTERISTIKA ČASOVĚ ZÁVISLÉ NADPROUDOVÉ OCHRANY ..... - 35 -
OBR. 2.7: POROVNÁNÍ ČASOVĚ ZÁVISLÝCH PROUDOVÝCH CHARAKTERISTIK ..... - 36 -
OBR. 2.8: CHARAKTERISTIKA POLOZÁVISLÉ PROUDOVÉ OCHRANY ..... - 37 -
OBR. 2.9: CHARAKTERISTIKA NEZÁVISLÉ PROUDOVÉ OCHRANY ..... - 38 -
OBR. 2.10: CHARAKTERISTIKA MŽIKOVÉ PROUDOVÉ OCHRANY ..... - 39 -
OBR. 2.11 AUTOMATIKA SELHÁNÍ VYPÍNAČE [3] ..... - 40 -
OBR. 2.12: PRINCIP BUCHHOLZOVA RELÉ [9] ..... - 41 -
OBR. 3.1: SCHÉMA ZAPOJENÍ VYSOKOIMPEDANČNÍ ROZDÍLOVÉ OCHRANY [4] ..... - 43 -
OBR. 3.2: DIAGRAM BEZPORUCHOVÉHO STAVU [6] ..... - 44 -
OBR. 3.3: DIAGRAM ŠPATNĚ ZVOLENÉHO BODU M2 [6] ..... - 45 -
OBR. 3.4: DIAGRAM VNĚJŠÍ PORUCHY [6] ..... - 47 -
OBR. 3.5: NÁHRADNÍ SCHÉMA PRO PŘESYCENÍ PTP NA STRANĚ B ..... - 47 -
OBR. 3.6: DIAGRAM PORUCHOVÉHO STAVU NAPÁJENÉHO Z JEDNÉ STRANY [6] ..... - 48 -
OBR. 3.7: NÁHRADNÍ SCHÉMA PRO NAPÁJENÍ Z JEDNÉ STRANY ..... - 48 -
OBR. 3.8: DIAGRAM PORUCHOVÉHO STAVU NAPÁJENÉHO Z OBOU STRAN [6] ..... - 49 -
OBR. 3.9: NÁHRADNÍ SCHÉMA PRO NAPÁJENÍ Z OBOU STRAN ..... - 49 -
OBR. 3.10: ZAPOJENÍ OCHRANY REF [2] ..... - 50 -
OBR. 6.1: VYPÍNACÍ CHARAKTERISTIKA ROZDÍLOVÉ OCHRANY ..... - 69 -
OBR. 6.2: ZOBRAZENÍ VYPOČTENÝCH BODŮ V GRAFU ..... - 71 -
OBR. 7.1: VYPÍNACÍ CHARAKTERISTIKA OCHRANY 50, 51 NA 66 KV ..... - 76 -
OBR. 7.2: VYPÍNACÍ CHARAKTERISTIKA OCHRANY 51N-1,2,3 NA 11 KV ..... - 78 -
OBR. 7.3: VYPÍNACÍ CHARAKTERISTIKA 51-1,2 A 67 NA 11 KV ..... - 80 -
OBR. 7.4: VYPÍNACÍ CHARAKTERISTIKA OCHRAN 51-1,2 A 67 NA 11 KV PO PŘEPOČTU ..... - 82 -
OBR. 7.5: VYPÍNACÍ CHARAKTERISTIKA OCHRAN NA 66/11 KV ..... - 84 -

Seznam tabulek

TAB. 1.1: ŠTÍTKOVÉ HODNOTY TR ..... - 13 -
TAB. 1.2: PŘEPOČET NAPĚTÍ NAKRÁTKO ..... - 13 -
TAB. 1.3: SEZNAM POUŽITÝCH OCHRAN A FUNKCÍ ..... - 16 -
TAB. 2.1: TABULKA PORUCH A POUŽÍVANÝCH OCHRAN [9] ..... - 22 -
TAB. 2.2: HODNOTY POUŽITÉ PRO VÝPOČET ČASOVĚ ZÁVISLÝCH PROUDOVÝCH CHARAKTERISTIK ..... - 36 -
TAB. 5.1: NEJPOUŽÍVANĚJŠÍCH TYPY NER A JEHO KONSTANTY ..... - 60 -
TAB. 5.2: PROUDOVÉ KONSTANTY POSUVNÉHO ODPORU ..... - 64 -
TAB. 7.1: NASTAVOVACÍ TABULKA ..... - 85 -

Seznam rovnic

(ROV. 1.1): RŘEPOČET NAPĚTÍ NA KRÁTKO ..... - 13 -
(ROV. 2.1): VÝPOČET STŘÍDAVÉ AMPLITUDOVÉ STŘEDNÍ HODNOTY ..... - 24 -
(ROV. 2.2): VÝPOČET STŘÍDAVÉ AMPLITUDOVÉ EFEKTIVNÍ HODNOTY ..... - 24 -
(ROV. 2.3): VÝPOČET STEJNOSMĚRNÉ AMPLITUDY ..... - 24 -
(ROV. 2.4): PODMÍNKA MAXIMÁLNÍ AMPLITUDY ..... - 24 -
(ROV. 2.5): ROVNICE PRO ZÁVISLÝ MĚŘÍCÍ ČLEN ..... - 24 -
(ROV. 2.6): VÝPOČET ROZDÍLU DVOU AMLITUD ..... - 25 -
(ROV. 2.7): KOMPARÁTOR ROZDÍLU DVOU AMLITUD ..... - 25 -
(ROV. 2.8): ROVNICE PRO SOUČTOVÝ MĚŘÍCÍ ČLEN ..... - 25 -
(ROV. 2.9): PODMÍNKA ROZDÍLOVÉ OCHRANY ..... - 28 -
(ROV. 2.10): PŘEVOD TRANSFORMÁTORU ..... - 31 -
(ROV. 2.11): OBECNÝ TVAR ROVNICE PRO PŘEVOD HODINOVÉHO ČÍSLA ..... - 33 -
(ROV. 2.12): ROVNICE PRO PŘEVOD HODINOVÉHO ČÍSLA 1 ..... - 33 -
(ROV. 2.13): ROVNICE NADPROUDOVÝCH CHARAKTERISTIK ..... - 36 -
(ROV. 4.1): VÝPOČET NAPĚTÍ KOLENE ..... - 52 -
(ROV. 4.2): PODMÍNKA 1 PRO ELEKTROMOTORICKÉ NAPĚTÍ ..... - 53 -
(ROV. 4.3): PODMÍNKA 2 PRO ELEKTROMOTORICKÉ NAPĚTÍ ..... - 53 -
(ROV. 5.1): ZKRAVOTOVÝ PROUD ..... - 55 -
(ROV. 5.2): ODPOR PŘÍVODU ..... - 55 -
(ROV. 5.3): CELKOVÝ ODPOR ..... - 56 -
(ROV. 5.4): MINIMÁLNÍ NAPĚTÍ PRO PŮSOBENÍ OCHRANY ..... - 56 -

(ROV. 5.5): DVOJNÁSOBNÉ MINIMÁLNÍ NAPĚTÍ PRO PŮSOBENÍ OCHRANY ..... - 56 -
(ROV. 5.6): MAGNETIZAČNÍ PROUD PRO 136 V ..... - 57 -
(ROV. 5.7): PROUD PROCHÁZEJÍCÍ VARISTOREM ..... - 57 -
(ROV. 5.8): PROUDOVÁ CITLIVOT RELÉ ..... - 57 -
(ROV. 5.9): PROCENTNÍ ZATÍŽENÍ ODPORNÍKU ..... - 58 -
(ROV. 5.10): STABILIZAČNÍ ODPOR ..... - 58 -
(ROV. 5.11): MAXIMÁLNÍ ŠPIČKOVÉ NAPĚTÍ ..... - 59 -
(ROV. 5.12): TEPELNÉ ZTRÁTY VARISTORU ..... - 59 -
(ROV. 5.13): ČAS PŘEHŘÁTÍ ..... - 60 -
(ROV. 5.14): MIN. TRVALÍ VÝKON PRO HODNOTU R_S ..... - 61 -
(ROV. 5.15): MIN. TRVALÍ VÝKON PRO HODNOTU R_{MAX} ..... - 61 -
(ROV. 5.16): MIN. VÝKON PO DOBU 1S PRO HODNOTU R_S ..... - 62 -
(ROV. 5.17): : MIN. VÝKON PO DOBU 1S PRO HODNOTU R_{MAX} ..... - 62 -
(ROV. 5.18): MAX. NAPĚTÍ PŘI PORUŠE PRO HOTNOTU R_S ..... - 63 -
(ROV. 5.19): MAX. NAPĚTÍ PŘI PORUŠE PRO HOTNOTU R_{MAX} ..... - 63 -
(ROV. 5.20): KRÁTKODOBÝ PROUD PŘES ODPOR R_S ..... - 63 -
(ROV. 5.21) : KRÁTKODOBÝ PROUD PŘES ODPOR R_{MAX} ..... - 63 -
(ROV. 5.22): NAPĚŤOVÁ PŘETÍŽITELNOST PRO HODNOTU R_S ..... - 64 -
(ROV. 5.23): NAPĚŤOVÁ PŘETÍŽITELNOST PRO HODNOTU R_{MAX} ..... - 64 -
(ROV. 6.1): VÝPOČET CELKOVÉ TOLERANCE ..... - 68 -
(ROV. 6.2): MAXIMÁLNÍ ZKRATOVÝ PROUD ..... - 69 -
(ROV. 6.3): ZAOKROUHLENÝ MAXIMÁLNÍ ZKRATOVÝPROUD ..... - 69 -
(ROV. 6.4): ROZDÍLOVÝ PROUD PRO ODBOČKU +5% ..... - 70 -
(ROV. 6.5): STABILIZAČNÍ PROUD PRO ODBOČKU +5% ..... - 70 -
(ROV. 6.6): ROZDÍLOVÝ PROUD PRO ODBOČKU -15% ..... - 70 -
(ROV. 6.7): STABILIZAČNÍ PROUD PRO ODBOČKU -15% ..... - 70 -
(ROV. 6.8): ROZDÍLOVÝ PROUD PRO ODBOČKU +5% PŘI ZKTRATU ..... - 70 -
(ROV. 6.9): STABILIZAČNÍ PROUD PRO ODBOČKU +5% PŘI ZKTRATU ..... - 70 -
(ROV. 6.10): ROZDÍLOVÝ PROUD PRO ODBOČKU -15% PŘI ZKTRATU ..... - 71 -
(ROV. 6.11): STABILIZAČNÍ PROUD PRO ODBOČKU -15% PŘI ZKRATU ..... - 71 -
(ROV. 6.12): PROUDOVÉ NASTAVENÍ MŽIKOVÉ OCHRANY ..... - 72 -
(ROV. 6.13): BEZPEČNĚJŠÍ PROUDOVÉ NASTAVENÍ MŽIKOVÉ OCHRANY ..... - 72 -
(ROV. 6.14): SNÍŽENÍ CILTIVOSTI O 150% ..... - 73 -
(ROV. 6.15): PŘEPOČET NA STRANU VYŠŠÍHO NAPĚTÍ ..... - 73 -
(ROV. 7.1): ROVNICE NADPROUDOVÝCH CHARAKTERISTIK ..... - 75 -

Seznam literatury a informačních zdrojů

[1] *ČSN 333051: Ochrany elektrických strojů a rozvodných zařízení*. Praha, 1991.

[2] MANUÁL OCHRANY RET 670: *ABB*

[3] PROTECTION APPLICATION HANDBOOK: *ABB*

[4] ALSTOM. *Restricted Earth Fault Protection: Application Guide*, 2003

[5] GRYM, Rudolf et al. *Chránění II: elektrická zařízení vysokého napětí: chránění zařízení v průmyslu*. Havířov: Iris, 2004. 305 s. Pracovní a učební pomůcka. ISBN 80-903540-0-9.

[6] CHMELÍK, Karel et al. *Chránění III: elektrická zařízení vysokého napětí*. Havířov: Iris, ©2005. 279 s. Pracovní a učební pomůcka. ISBN 80-903540-5-X.

[7] DOHNÁLEK, Petr. *Ochrany pro průmysl a energetiku*. 2. přeprac. vyd. Praha: SNTL, 1991. 339^s. ISBN 80-03-00630-9.

[8] TECNIKA OCHRAN: *Multifunkční ochrana SIPROTEC Compact 7SJ80.* Katalog SIP 3.6.2009

[9] BERAN, Miloš. *Elektrická zařízení tepelných elektráren*. 1. vyd. Plzeň: VŠSE, 1988. skripta 250 s.

[10] IBLER, Zdeněk a BERAN, Miloš. *Elektrárny II*. Plzeň: VŠSE, 1982. 269 s.

[11] JANKOVIC, Ilija. High Impedance Differential protection system versus Low Impedance Differential protection system. In: *2015 68th Annual Conference for Protective Relay Engineers* [online]. IEEE, 2015, s. 898-942 [cit. 2017-04-05]. DOI: 10.1109/CPRE.2015.7102213. ISBN 978-1-4799-8722-1. Dostupné z: http://ieeexplore.ieee.org/document/7102213/

[12] BEHRENDT, Ken, David COSTELLO a Stanley E. ZOCHOLL. Considerations for using high-impedance or low-impedance relays for bus differential protection. In: *2010 63rd Annual Conference for Protective Relay Engineers* [online]. IEEE, 2010, s. 1-15 [cit. 2017-04-05]. DOI: 10.1109/CPRE.2010.5469509. ISBN 978-1-4244-6073-1. Dostupné z: http://ieeexplore.ieee.org/document/5469509/

[13] HOLBACH, Juergen. Comparison between high impedance and low impedance bus differential protection. In: *2009 Power Systems Conference* [online]. IEEE, 2009, s. 1-16 [cit. 2017-04-05]. DOI: 10.1109/PSAMP.2009.5262334. ISBN 978-1-4244-5248-4. Dostupné z: http://ieeexplore.ieee.org/document/5262334/

Přílohy