



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

NÁHRADA ELEKTROMECHANICKÝCH OCHRAN V TNS VRAŇANY

REPLACEMENT OF ELECTROMECHANICAL PROTECTIONS IN TNS VRAŇANY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Karolína Čechová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.

BRNO 2022

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Studentka: Bc. Karolína Čechová

ID: 203146

Ročník: 2

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Náhrada elektromechanických ochran v TNS Vraňany

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Popis stávajícího stavu TNS, změny v technologii stanice dle připravované výměny stávajících transformátorů za nové a definice požadavků na jejich nový systém chránění
2. Základní zkratový výpočet pro požadavky nastavení ochranných funkcí a návrh přístrojových transformátorů
3. Dimenzování přístrojových transformátorů
4. Parametrizace a konfigurace vybraných IED pro chránění
5. Sekundární testy navržených ochranných funkcí
6. Základní ekonomické zhodnocení výměny ochran

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího závěrečné práce

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 24.5.2022

Vedoucí práce: doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.

prof. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Rekonstrukce trakční napájecí stanice Vraňany zahrnuje v současné době pouze výměnu stávajících výkonových transformátorů za nové. Hlavním důvodem pro výměnu transformátorů je překročení doby jejich projektované životnosti. Podle požadavků investora se v rámci projektu uvažuje pouze výměna transformátorů, ale už není zahrnutý nový systém chránění. Přitom právě bezporuchový provoz výkonových transformátorů úzce souvisí se zajištěním spolehlivé dodávky elektrické energie. Hlavním cílem této práce je navrhnout nový systém chránění pro výkonové transformátory, jenž nahradí ten stávající. V rámci teoretické části je popsán aktuální stav napájecí stanice, porovnána změna zkratových poměrů po instalaci nových transformátorů. Dále je provedena kontrola přístrojových transformátorů proudu, zda vyhovují požadavkům na nový systém chránění. Praktická část je zaměřena na výběr ochranného terminálu, výpočet primárního nastavení ochranných funkcí a následně provedení jejich sekundárních testů. Na závěr je vyhodnocena ekonomická náročnost celého investičního záměru.

Klíčová slova

Trakční napájecí stanice, výkonový transformátor, ochrana, zkratový proud, přístrojový transformátor proudu, ochranná funkce

Abstract

The reconstruction of the traction substation Vraňany currently involves only the replacement of power oil transformers. The main reason for their replacement is the fact that the power transformers have already exceeded their designed lifecycle. According to an investor requirement, only the transformer replacement is considered, however, a new system of protection is not included. Even though the fault-free operation of power transformers is closely related to ensuring reliable and safe electric power supply. The main aim of the thesis is to design a new system of protection for power transformers to replace the present one. In the theoretical part of the thesis is described the current state of the traction substation along with a calculation of short circuit current ratios and their comparison with the new ones considering the installation of the new power transformers. In the next part are inspected instrument current transformers if they comply with the requirements for the new protection system. The practical part of the thesis focuses on the selection of protection relay, calculation of the primary setting for selected protection functions, and subsequently conducting their functional tests. In conclusion, the economic part of the planned investment is estimated.

Keywords

Traction substation, power oil transformer, protection system, short circuit current, instrument current transformer, protective function

Bibliografická citace

ČECHOVÁ, Karolína. *Náhrada elektromechanických ochran v TNS Vraňany* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/142397>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Jaroslava Orságová.

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala mé vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jaroslavě Orságové, Ph.D., za její cenné rady, předané zkušenosti a příjemnou spolupráci při zpracování mé diplomové práce a také za trpělivost a čas, který mi věnovala. Dále bych zde chtěla poděkovat kolegům z I&C Energo za jejich spolupráci při řešení daného tématu.

Obsah

Seznam obrázků.....	9
Seznam tabulek.....	11
Úvod.....	12
1 Aktuální stav TNS Vraňany.....	13
1.1 Popis rozvodny 110/22 kV.....	13
1.2 Dispoziční řešení TNS Vraňany.....	15
2 Transformátory.....	17
2.1 Stávající transformátory.....	17
2.2 Nové transformátory.....	19
3 Ochrany.....	21
3.1 Rozdílová ochrana R 30.....	22
3.2 Nadproudové ochrany AT 31 a AT 12X.....	24
3.3 Digitální distanční ochrana Siemens SIPROTEC 7SA87.....	25
3.4 Nádobová (kostrová) ochrana.....	28
3.5 Plynové relé.....	29
4 Výpočet zkratových poměrů v rozvodně.....	30
4.1 Zkratové poměry před chráněným zařízením na straně 110 kV.....	30
4.2 Zkratové poměry za chráněným zařízením strana 22 kV.....	32
5 Dimenzování přístrojových transformátorů.....	34
5.1 Dimenzování pro pomalé ochrany.....	35
5.2 Dimenzování pro rychlé ochrany.....	36
5.3 Kontrola PTP pro rozdílovou ochranu na straně 110 kV.....	37
5.4 Kontrola PTP pro rozdílovou ochranu na straně 22 kV.....	40
6 Požadavky na chránění transformátorů.....	42
7 Ochrana ABB REX640.....	43
7.1 Nastavení rozdílové ochrany.....	45
7.2 Nastavení nadproudové ochrany.....	48
7.3 Nastavení distanční ochrany.....	54
8 Testování charakteristik ochranných funkcí terminálu ABB řady REX640.....	55
8.1 Testování charakteristiky nadproudové ochrany.....	58
8.2 Testování charakteristiky distanční ochrany.....	63
8.3 Testování charakteristiky rozdílové ochrany.....	65
9 Ekonomické posouzení výměny ochrany.....	69
9.1 Náklady spojené s projektováním.....	69
9.2 Náklady spojené s dodávkami nového zařízení.....	70

9.3	Náklady spojené s demontáží stávajícího zařízení	72
9.4	Náklady spojené s montáží nového zařízení.....	72
9.5	Náklady spojené se zkouškami a uvedením zařízení do provozu	73
	Závěr.....	75
	Reference	78
	Seznam symbolů a zkratk	80
	Příloha A.....	82
	Příloha B.....	83
	Příloha C.....	90

Seznam obrázků

Obrázek 1 Umístění TNS Vraňany v elektrizační soustavě ČR [1]	13
Obrázek 2 Rozvodna Vraňany 110 kV	14
Obrázek 3 Jednopolové schéma TNS Vraňany [2]	15
Obrázek 4 Výkonové transformátory v TNS Vraňany	19
Obrázek 5 Rozdílová ochrana R 30	23
Obrázek 6 Nadproudové ochrany A 12 X a AT 31	24
Obrázek 7 Distanční ochrana SIPROTEC 7SA87	26
Obrázek 8 Princip získávání naměřených hodnot [16]	27
Obrázek 9 Polygonální charakteristika digitální distanční ochrany	28
Obrázek 10 Kostrová ochrana transformátoru [9]	29
Obrázek 11 Princip činnosti plynového relé [9]	29
Obrázek 12 Náhradní schéma s místem zkratu na straně 110 kV	30
Obrázek 13 Náhradní schéma s místem zkratu na straně 22 kV	32
Obrázek 14 PTP na straně 110 kV	39
Obrázek 15 Štítkové parametry PTP na straně 22 kV	40
Obrázek 16 Multifunkční ochrana ABB REX640 [21]	43
Obrázek 17 Balíčky ochranných funkcí [21]	44
Obrázek 18 Zapojení ochrany od ABB REX640	44
Obrázek 19 Nastavení stabilizační charakteristiky	47
Obrázek 20 Charakteristika dvoustupňové nadproudové ochrany	50
Obrázek 21 Charakteristika zkratové nadproudové ochrany na straně 22kV	52
Obrázek 22 Časová koordinace nezávislých nadproudových ochrann	53
Obrázek 23 Kruhová charakteristika nízkoimpedanční ochrany [22]	54
Obrázek 24 Nastavené parametry testovaného zařízení v modulu QuickCMC	55
Obrázek 25 Parametry snímače proudu v modulu QuickCMC	56
Obrázek 26 Parametry snímače napětí v modulu QuickCMC	56
Obrázek 27 Nastavení parametrů funkce PHLPTOC na straně 110 kV v PCM600 ...	57
Obrázek 28 Nastavení parametrů funkce PHHPTOC na straně v PCM600	57
Obrázek 29 Nastavení parametrů funkce PHHPTOC na straně 22 kV v PCM600	57
Obrázek 30 Nastavení parametrů funkce UZPDIS na straně 110 kV v PCM600	57
Obrázek 31 Nastavení funkce TR2PTDF	58

Obrázek 32 Testování charakteristiky 1.stupně nadproudové ochrany v modulu QuickCMC	58
Obrázek 33 Porovnání výsledných charakteristik 1.stupně nadproudové ochrany	59
Obrázek 34 Porovnání výsledných charakteristik 2.stupně nadproudové ochrany	61
Obrázek 35 Porovnání výsledných charakteristik zkratové nadproudové ochrany na straně 22kV	62
Obrázek 36 Nastavení tvaru kruhové charakteristiky	63
Obrázek 37 Nastavení toleranční oblasti kruhové charakteristiky	64
Obrázek 38 Kruhová charakteristika pro třífázové zkraty typu L1-L2-L3	64
Obrázek 39 Nastavení parametrů ochranného terminálu	66
Obrázek 40 Nastavení parametrů stabilizační charakteristiky	66
Obrázek 41 Výsledná stabilizační charakteristika	67
Obrázek 42 Procentuální zastoupení jednotlivých nákladových skupin	73

Seznam tabulek

Tabulka 1 Parametry rozvodny 110 kV [2].....	16
Tabulka 2 Parametry vypínačů strany 110 kV [2].....	16
Tabulka 3 Parametry PTP pro měření transformátorů 110 kV pole č.2 a č.4 [2].....	16
Tabulka 4 Parametry PTP pro měření přívodních vedení 110 kV pole č.1 a č.3 [2] ...	17
Tabulka 5 Parametry PTN na straně 110 kV [2]	17
Tabulka 6 Parametry PTP na straně 22 kV v kobkách R1 a R14 [2]	17
Tabulka 7 Technické parametry stávajících transformátorů [3].....	18
Tabulka 8 Technické parametry nových transformátorů [4].....	20
Tabulka 9 Technické parametry rozdílové ochrany R 30 [2], [11]	23
Tabulka 10 Technické parametry ochran AT 31 a AT 12X [2], [13].....	25
Tabulka 11 Nastavení distanční ochrany Siemens SIPROTEC 7SA87 [2]	27
Tabulka 12 Požadavky na chránění síťových transformátorů [6]	42
Tabulka 13 Nastavené body stabilizační charakteristiky	47
Tabulka 14 Možnosti nastavení nadproudové ochrany [22]	48
Tabulka 15 Nastavení nadproudové ochrany $3I>$ [22].....	50
Tabulka 16 Nastavení nadproudové ochrany $3>>I$ na primární straně [22].....	51
Tabulka 17 Nastavení nadproudové ochrany $3>>I$ na sekundární straně [22].....	52
Tabulka 18 Naměřené a vypočtené časy 1.stupně nadproudové ochrany	59
Tabulka 19 Naměřené časy 2.stupně nadproudové ochrany	60
Tabulka 20 Naměřené časy zkratové nadproudové ochrany na straně 22kV.....	62
Tabulka 21 Výsledné hodnoty bodového testu rozdílové ochrany	68
Tabulka 22 Seznam nově dodaných zařízení	70
Tabulka 23 Nastavená konfigurace relé REX640	71
Tabulka 24 Nastavená konfigurace relé REF611	72
Tabulka 25 Celkové odhadované náklady.....	73

Úvod

Trakční napájecí stanice Vraňany, jenž je situována ve Středočeském kraji, je využívána pro napájení trakčního úseku železnice již od roku 1979. Stanice je napájena dvěma přívodními linkami, a to V178 z Elektrárny Mělník a V118 z rozvodny Prahy sever.

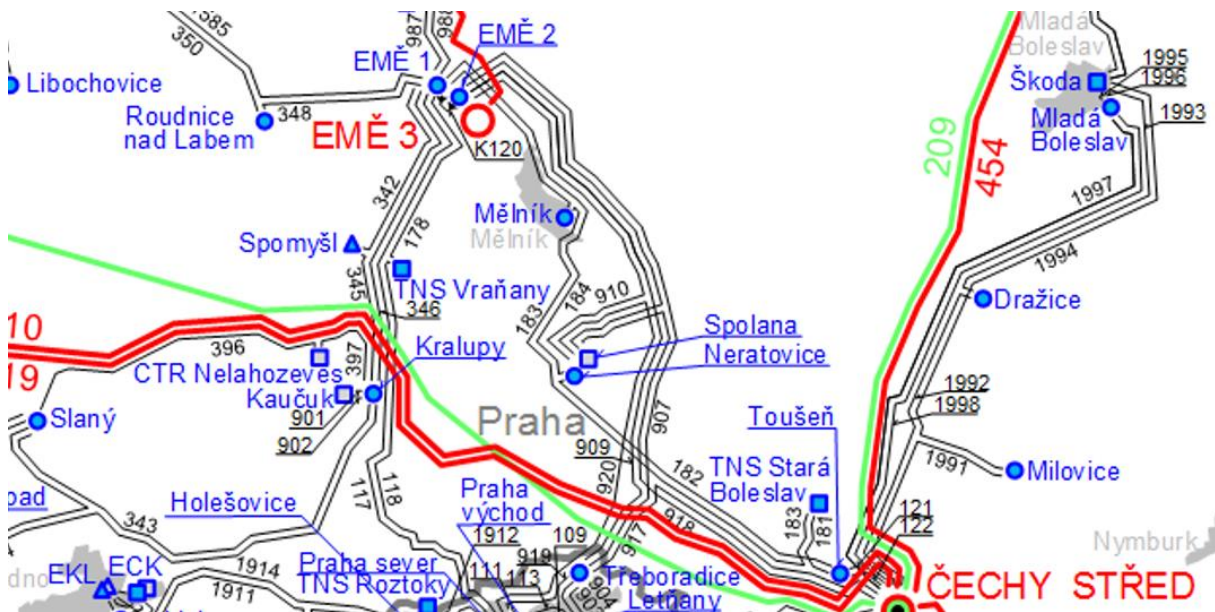
V současné době je zpracovávána projektová dokumentace týkající se rekonstrukce trakční napájecí stanice, jmenovitě výměny stávajících výkonových transformátorů za nové. Podle požadavků investora se uvažuje pouze o výměně transformátorů, ale projekt nezahrnuje systém chránění, který má být zachován. Jelikož se jedná o původní systém chránění, tedy elektromechanické ochrany, tak s ohledem na jejich morální zastarání je jejich výměna nezbytná pro zajištění spolehlivého a bezpečného provozu napájecí stanice. Teoretická část práce zahrnuje popis současného stavu TNS Vraňany spolu s popisem jeho stávajícího systému chránění. Cílem práce je návrh nového systému chránění, který již bude splňovat současné požadavky na chránění výkonových transformátorů dle ČSN 33 3051. Výměna výkonových transformátorů je spojena se změnou zkratových poměrů, jelikož dojde ke zvýšení jmenovitého výkonu z 10 MVA na 16 MVA. Změna zkratových poměrů musí být zohledněna při návrhu nového systému chránění, pro který je nutno zkontrolovat z hlediska požadavků pro dimenzování přístrojových transformátorů proudu. Z toho důvodu je nutné provést kontrolu, zda PTP splňují požadavky či nikoliv. Tato kontrola je důležitá pro zajištění spolehlivého provozu napájecí stanice.

V praktické části jsou stanoveny současné požadavky na systém chránění a je vybrán konkrétní ochranný terminál. Na základě dostupných informací, získaných od provozovatele napájecí stanice, jsou vybrány ochranné funkce, pro které je dále proveden výpočet primárního nastavení. Toto nastavení je následně ověřeno prostřednictvím sekundárních testů ochranných funkcí na vybraném ochranném terminálu pomocí testovacího zařízení Omicron CMC 256plus. Závěrečná část práce je zaměřena na ekonomické posouzení spojené s výměnou systému chránění. V rámci ekonomického posouzení je stanovena celková odhadovaná cena a doba investičního záměru.

1 Aktuální stav TNS Vraňany

1.1 Popis rozvodny 110/22 kV

Trakční napájecí stanice (TNS) Vraňany se nachází v obci Vraňany ve Středočeském kraji, jak je ilustrováno na Obrázek 1. TNS byla uvedena do provozu v roce 1979 a je napájena dvěma přívodními linkami uhelnou elektrárnou Mělník a rozvodnou Praha-sever na napěťové hladině 110 kV. Jejím současným vlastníkem a provozovatelem je společnost Správa železnic.



Obrázek 1 Umístění TNS Vraňany v elektrizační soustavě ČR [1]

TNS Vraňany slouží primárně jako trakční měniřna, jejíž hlavním účelem je zajistit přeměnu odebrané elektrické energie z distribuční soustavy a zabezpečit tak napájení daného železničního vedení na požadovanou hodnotou napětí spolu s druhem proudu. V případě TNS Vraňany se jedná o transformaci na stejnosměrnou soustavu na napěťové hladině 3 kV, které je docíleno za pomoci trakčních transformátorů a usměrňovačů. Rozvodná část na straně 110 kV je provedena zapojením do H-schématu se dvěma přívodními linkami V178 Mělník a V118 Praha sever a podélným dělením přípojnic se dvěma odpojovací v příčné spoje, viz Obrázek 3. Tento způsob zapojení zajišťuje navýšení bezpečnosti práce při údržbě. Stanice je provozována s příčnou spojkou pod napětím s tím, že v provozu je pouze transformátor T101. Zatímco druhý transformátor T102 je pod napětím, ale pracuje naprázdno.

Hlavní budova stanice je dvoupatrová. V přízemí jsou umístěny vývody vedení napěťové hladiny 22 kV. Rozvodná část 22 kV je situována v prvním patře spolu s velínem, revizní místností, napájením vlastní spotřeby a místností s akumulací baterií. Stanice je provozována s obsluhou, ale je možné ji ovládat dálkově pomocí řídicího systému z dispečinku v Praze. Dálkové ovládání lze učinit pouze v případě, pokud je místním přepínačem umožněno. Zároveň ji lze kontrolovat přes totožný řídicí systém, který se nachází ve velínu rozvodny. Část rozvodny 22 kV je provedena jednosystémově s podélným dělením přípojnic. Na této napěťové hladině se nachází celkem čtrnáct vývodových polí se dvěma podélnými spojkami přípojnic, jak je uvedeno v příloze A na straně 82.

Dvě podélné spojky přípojnic jsou zvoleny kvůli třem vývodovým polím pro připojení tří jednofázových trakčních transformátorů spolu s trakčními usměrňovači, jenž zajišťují převod 22/3 kV na stejnosměrné napětí. Tato strana soustavy za trakčním usměrňovačem je řešena jako soustava izolovaná od země a je využívána pouze pro napájení daného úseku tratě.

Ve venkovní části rozvodny 110 kV se nachází dva identické výkonové transformátory chlazené olejem, označené jako T101 a T102 norské výroby od firmy ASEA-PER KURE ^{A/S}, o jmenovitém výkonu 10 MVA, jak je ilustrováno na Obrázek 2. Transformátory byly vyrobeny v roce 1979 z čehož vyplývá, že se již pohybují za hranici jejich projektované životnosti. Z tohoto důvodu dojde k výměně těchto transformátorů za novější typ od společnosti ETD, které byly vyrobeny v roce 2013, a momentálně se nacházejí v trakční měnič Pečky provozované společností SUDOP Praha a.s. Výměnu transformátorů doprovází také celkové navýšení jmenovitého výkonu na hodnotu 16 MVA. Nové transformátory jsou rozměrově menší se zhruba stejnou hmotností, ale zároveň disponují nižším obsahem oleje. [3],[4]

Spolu s výměnou transformátorů je nadále žádoucí nahradit také stávající kabeláž na napěťové hladině 22 kV. Jelikož se jedná o původní kabeláž, která je fyzicky zastaralá s velmi špatným stavem izolace, tak by se při jejím ponechání po instalaci nových transformátorů mohla velmi zvýšit pravděpodobnost poruchy v rozvodně. Proto by bylo vhodné, kdyby výměnu transformátorů doprovázela instalace nové kabeláže a s tím by bylo spojené i položení nové kabelové trasy.

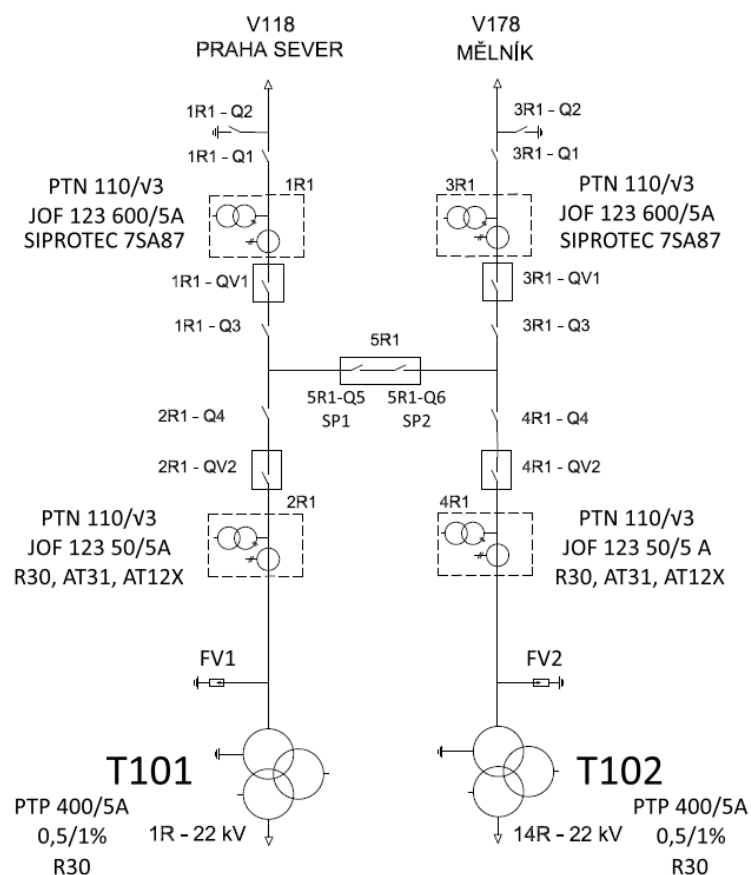


Obrázek 2 Rozvodna Vraňany 110 kV

Nová kabelová trasa bude pravděpodobně vedena podél staré železnice, která se nachází za stanovištěm transformátorů, a vedla by podél jímky až k trakčním transformátorům. Prostor pod trakčními transformátory je podsklepený, tudíž by muselo dojít k jeho proražení a napojení na stávající kabely 22 kV. Odhadovaná délka nové kabelové trasy se zatím pohybuje v rozmezí do 100 m.

1.2 Dispoziční řešení TNS Vraňany

Uspořádání napájecí stanice je řešeno jednoduchým systémem přípojníc a je podélně děleno dvěma odpojovací v příčné spojce zapojené do série. Tento způsob zapojení se používá pro jednoduché napájecí rozvodny na napěťové hladině 110 kV. Uspořádání umožňuje provádět údržbu během provozu, čímž je zabezpečena spolehlivost dodávky elektrické energie. Přístrojové vybavení stanice je zobrazeno na jednopólovém schématu, viz Obrázek 3, a je v souladu se všeobecnými pravidly pro elektrické instalace stanovené normou ČSN EN 61936-1. [5]



Obrázek 3 Jednopólové schéma TNS Vraňany [2]

Prvním prvkem jsou svodiče přepětí FV, jejichž hlavním účelem je svedení případného přepětí, vzniklého například při zásahu blesku vedení, které by mohlo mít za následek poškození transformátoru. Tyto svodiče musí být navrženy nebo umístěny tak, aby za žádných okolností nebyla ohrožena obsluha v případě jejich poškození. Je zde nutné zmínit, že minulý

rok došlo k samovolnému výbuchu svodiče přepětí FV2, který byl způsobem jeho morálním zastaráním. Mezi spínací prvky se řadí odpojovače a zemnicí nože 1R1-Q2 a 3R1-Q2, které umožňují případnou práci na zařízení. Měření přírodních linek je zajištěno prostřednictvím přístrojových transformátorů proudu (PTP) a napětí (PTN) v rozvodných polích 1R1 a 3R1. Tato pole jsou chráněna distanční ochranou Siemens SIPROTEC 7SA87. Pro účely měření hodnot na transformátorech T101 a T102 jsou využívány PTP a PTN v polích 2R1 a 4R1, kde jsou zároveň připojeny ochrany nadproudové AT31 a AT12X spolu s ochranou rozdílovou R30, která je dále připojena na straně 22 kV v kobkách 1R a 14R. PTP jsou vyrobeny firmou Emil Piffner, zatímco PTN jsou od ENERGOINVEST, a na rozdíl od PTP patří k původní výbavě stanice. Dalším velice důležitým prvkem jsou vypínače QV od společnosti ŠKODA s jmenovitým vypínacím proudem 1250 A. Parametry zařízení rozvodné části 110 kV spolu s parametry PTP na straně 22 kV jsou uvedeny v následujících tabulkách.

Tabulka 1 Parametry rozvodny 110 kV [2]

Jmenovité napětí	110 kV
Nejvyšší provozní napětí	123 kV
Jmenovitý proud přípojnic	100 A
Jmenovitý oteplovací proud	31,5 kA
Jmenovitý dynamický proud	80 kA
Vypínací proud	18,4 kA

Tabulka 2 Parametry vypínačů strany 110 kV [2]

Napětí	110 kV	Zapínací proud	46 kA
Proud	1250 A	Vypínací proud	18,4 kA
Kmitočet	50 Hz	Zkušební rázové napětí	550 kV
Výkon 3f	3500 MVA	Krátkodobý nadproud	28 kA 1s
Ovládané napětí	110 kV	Rok výroby	1979

Tabulka 3 Parametry PTP pro měření transformátorů 110 kV pole č.2 a č.4 [2]

Typ	JOF 123	Jmenovitý sekundární proud	5 A
Rok výroby	2002	Jmenovitý převod	50/5/5 A
Kmitočet	50 Hz	Jádro 1	30 VA, 0.5 FS5
Nejvyšší provozní napětí	123 kV	Jádro 2	60 VA, 5P20
Zkušební střídavé napětí	230 kV	Jádro 3	15 VA, 0.2 FS5
Nárazové výdržné napětí	550 kV	Váha oleje	55 kg
Mezní termický proud	31,5 kA 1s	Norma	IEC 60044-1
Mezní dynamický proud	80 kA	Výrobce	PIFFNER

Tabulka 4 Parametry PTP pro měření přívodních vedení 110 kV pole č.1 a č.3 [2]

Typ	JOF 123	Jmenovitý sekundární proud	5 A
Rok výroby	2008	Jmenovitý převod	600/5/5 A
Kmitočet	50 Hz	Jádro 1	30 VA, 0.5 FS5
Nejvyšší provozní napětí	123 kV	Jádro 2	30 VA, 0.5 FS5
Zkušební střídavé napětí	230 kV	Jádro 3	60 VA, 5P10
Nárazové výdržné napětí	550 kV	Váha oleje	55 kg
Mezní termický proud	31,5 kA 1s	Norma	IEC 60044-1
Mezní dynamický proud	80 kA	Výrobce	PIFFNER

Tabulka 5 Parametry PTN na straně 110 kV [2]

Typ	UH11-15	Zkušební střídavé napětí	230 kV
Rok výroby	1979	Nárazové výdržné napětí	550 kV
Jmenovité primární napětí	$110/\sqrt{3}$	Třída přesnosti	0,2
Nejvyšší provozní napětí	123 kV	Pomocné vinutí	50 VA/3P

Tabulka 6 Parametry PTP na straně 22 kV v kobkách R1 a R14 [2]

Jmenovitý převod	400/5/5 A
Třída přesnosti	0,5
Nadproudové číslo	FS5
Max. chyba	1%
Sekundární proud	5 A
Jádro 1	15 VA, 0.5, FS5
Jádro 2	30 VA, FS5

2 Transformátory

2.1 Stávající transformátory

Výkonové transformátory T101 a T102 ve venkovní části rozvodny jsou třífázové olejové se třemi vinutími, viz Obrázek 4. Jak již bylo dříve zmíněno, jedná se o dva identické transformátory s jmenovitým napětím na primární straně $110 \pm 8 \times 2\%$ kV. Na sekundární straně transformátorů je hodnota napětí 23 kV a terciární napětí je 6,3 kV. Primární strana je řešena jako přímo uzemněná, zatímco sekundární strana není uzemněná. Terciární vinutí je izolované, zapojené do trojúhelníku pro kompenzaci netočivé složky proudu. Transformátory nemají tlumivku, protože strana 22 kV je řešena jako izolovaná od země. Zatížení nulového bodu je nastaveno na 100 %. Regulace napětí je prováděna automatickým přepínačem odboček pod zatížením na straně 110 kV, s účinně uzemněným nulovým bodem. Hodnota jmenovitého výkonu obou transformátorů je 10 MVA. Další technické parametry jsou uvedeny v Tabulka 7. [3]

Tabulka 7 Technické parametry stávajících transformátorů [3]

Označení	T101, T102
Provedení dle norem	IEC 76
Výrobce	ASEA-PER KURE ^{A/S}
Rok výroby	1979
Provedení	Třífázový, olejový, venkovní
Jmenovitý výkon	10 MVA
Jmenovitý převod	110 ± 8 x 2% / 23 / (6,3) kV
Napětí nakrátko	10,6 %
Jmenovitý proud	52,5 / 251 / (289) A
Ztráty nakrátko	66 kW
Způsob chlazení	ONAN
Skupina spojení	YN/yn0/(d)
Hodinový úhel	0
Váha oleje	9,2 t
Celková hmotnost	32 t

Transformátory jsou chlazené prostřednictvím technologie ONAN (Oil natural air natural). Generované teplo v jádře a ve vinutí transformátoru, způsobené procházejícím proudem, je přeneseno na olej v nádobě. Teplo způsobí ohřátí oleje, který poté stoupá pomocí přirozeného proudění směrem vzhůru a následně do radiátoru. Vzniklé teplo se rozptýlí do okolí transformátoru v důsledku přirozené konvekce vzduchu. Tímto procesem je zajištěna pravidelná cirkulace oleje v nádobě transformátoru a odvod tepla prostřednictvím přirozeného proudění vzduchu do okolního prostředí. Tento způsob chlazení se využívá u transformátorů s jmenovitým výkonem do 30 MVA.

Samotná nádoba je ocelová, osazena závěsnými a tažnými oky pro umožnění přesunu transformátoru. Na spodní části jsou umístěna kolečka, která umožňují posun transformátoru v podélném směru. Nádoba je vybavena plynovým relé, které je umístěno do potrubí mezi víko transformátoru a kondenzátor. Dále by zde měla být instalována kostrová ochrana, která se vyžaduje u transformátorů s účinně uzemněným nulovým bodem vinutí o jmenovitých výkonech v rozmezí 5 až 25 MVA. Tato ochrana zde ale chybí, tudíž lze konstatovat, že to není v souladu s platnou normou týkající se ochrany elektrických strojů a rozvodných zařízení ČSN 33 3051, která ji v tomto případě vyžaduje. Pro instalaci této ochrany by bylo nutné provést izolaci kolejnic pod transformátorem proti zemi. [6]



Obrázek 4 Výkonové transformátory v TNS Vraňany

Transformátory jsou umístěny na samostatných stanovištích, která jsou vzájemně ohraničené ze dvou bočních stran stěnami, které plní funkci protipožární ochrany. Výška stanoviště je 7 m, jeho celková délka 22 m a délka boční stěny je zhruba 4 m. Stanoviště každého transformátoru je uzemněno pomocí rovných pásek FeZn, které propojují pomocné ocelové konstrukce a kolejnice. Celé stanoviště je zastřešené, ale i přesto se pod něj dostane velké množství vody při silných deštích, která se následně musí manuálně odčerpávat ze záchytné jímky, což je problematické. Nádoba je umístěna na betonovém stání, které je vysoké zhruba 81 cm, široké 1,2 m a dlouhé 3 m. U betonových stání je nutné ověřit jejich současnou statickou stabilitu a zhodnotit tak, jestli bude nezbytné provést úpravy nebo je zcela vyměnit pro umístění nových transformátorů. Přístup ze zadní strany k transformátorům je chráněn oplocením.

2.2 Nové transformátory

Výkonové transformátory vyrobené společností ETD jsou třífázové olejové se třemi vinutími označené jako T101 a T102. Tyto transformátory mají stejné napětové parametry jako stávající umístěné v TNS Vraňany, tedy s jmenovitým napětím na primární straně $110 \pm 8 \times 2\%$ kV. Na sekundární straně je hodnota napětí 23 kV a na terciární 6,3 kV. Střed vinutí na straně vyššího napětí je přímo uzemněn. Terciární vinutí je izolované, zapojené do trojúhelníku pro kompenzaci netočivé složky proudu. Jmenovitý výkon obou transformátorů je 16 MVA. V následující tabulce jsou zobrazeny další parametry Tabulka 8. [4]

Tabulka 8 Technické parametry nových transformátorů [4]

Označení	T101, T102
Provedení dle norem	ČSN EN 60 076
Výrobce	ETD
Rok výroby	2013
Provedení	Třífázový, olejový, venkovní
Jmenovitý výkon	16 MVA
Jmenovitý převod	110 ± 8 x 2% / 23 / (6,3) kV
Napětí nakrátko	11,5 % ± 7,5 %
Jmenovitý proud	84 / 402 A
Ztráty nakrátko	79 kW + 15 %
Ztráty naprázdno	14 kW + 15 %
Ztráty celkové	93 kW + 10 %
Materiál vinutí	Cu
Olej	Inhibovaný, tř. II A, bez obsahu PBC
Dovolené oteplení oleje (při teplotě okolí + 40°C)	60 K
Dovolené oteplení vinutí (při teplotě okolí + 40°C)	65 K
Způsob chlazení	ONAN
Skupina spojení	YN/yn0/(d)
Hodinový úhel	0
Váha oleje	9 t
Celková hmotnost	34,145 t
Celkové rozměry	5510 x 3445 x 4065 mm
Přístrojové vybavení	Plynové relé, ochranné relé regulace, pojistkový tlakový ventil, vysoušeč vzduchu, ukazatel hladiny oleje přepínacího zařízení, ovládací skříň

Transformátory jsou dimenzovány na trvalou zátěž jmenovitým zatížením, tak aby střední hodnota oteplení vinutí nepřesáhla 65 K a zároveň oteplení oleje v horní části nádoby nebude vyšší než 60 K. Stejně jako v předešlém případě jsou chlazeny metodou ONAN. Uvnitř

nádoby je umístěn ukazatel hladiny oleje. Samotná nádoba je vybavena plynovým relé a také kostrovou ochranou, která působí při zkratech na průchodkách transformátoru. Spolehlivé působení ochrany je zajištěno protáhnutím průvlekového přístrojového transformátoru proudu k přívodům zařízení z pomocných obvodů, k nimž patří například osvětlení nebo ventilátory. Při instalaci tohoto typu ochrany je nutné, aby kolejnice umístěné pod transformátorem byly izolované. [4]

3 Ochrany

Zajištění spolehlivé dodávky elektrické energie je v současnosti velmi důležité a souvisí do značné míry také s bezporuchovým provozem výkonových transformátorů. Poněvadž je to právě tento typ transformátorů, který zajišťuje přenos a distribuci elektrické energie ke koncovým odběratelům, a z tohoto důvodu patří k nejdůležitějším prvkům v elektrizační soustavě. Během jejich provozu jsou vystaveny různým typům namáhání, které mohou ovlivnit jejich komponenty určitými degradačními mechanismy, které zvyšují pravděpodobnost poruchy. Poruchu transformátoru mohou doprovázet vážné ekonomické následky, jelikož se jedná o velmi nákladné zařízení a jeho porucha je často spojena s přerušением dodávky elektrické energie, což může způsobit finanční ztráty jejich provozovatelům. Proto musí být věnována velká pozornost chránění transformátorů před poruchami. Druhy poruch lze v zásadě rozdělit na dva typy, a to průchozí neboli vnější a vnitřní.

Průchozí poruchy jsou způsobeny vlivem připojených zařízení, tedy se nejedná o poruchu samotného transformátoru. Mezi tyto poruchy patří přetížení a vnější zkrat. Obě poruchy působí většinou delší dobu a mají za následek oteplení transformátoru. Nadměrný ohřev transformátoru představuje závažný problém, který může vést ke zvýšené degradaci kvality chladicího oleje a izolace vinutí. Tento jev je například také doprovázen zvýšenou koncentrací plynů rozpuštěných v oleji, jejichž množství závisí na teplotě oleje, a s tím přímo souvisí také zhoršení stavu izolace vinutí. Pro chránění před tímto typem poruchy se využívají ochrany nadproudové. [7]

V porovnání s průchozími poruchami vznikají vnitřní poruchy přímo v transformátoru. Tyto poruchy lze nadále rozdělit na náhlé a pozvolné. U náhlých poruch je možná okamžitá detekce a jsou způsobeny zkraty na svorkách, vinutích nebo mezi nimi, ale také zkratem na nádobu. Pozvolné poruchy je celkem obtížné detekovat v jejich prvopočátku, protože se jedná například o poruchy chlazení, špatné galvanické styky a izolace plechů, chybnou regulaci, popřípadě vyrovnávací proudy vzniklé během paralelního spojení transformátorů. Poruchy chlazení jsou spojené s nežádoucím nárůstem teploty a tvorbou bublinek, což může vyústit ve vznik částečných výbojů mezi vinutím a zvýšenou koncentrací furanových látek v izolačním oleji, které vznikají při degradaci pevné izolace. Špatné galvanické styky nebo izolace plechů může stát za vznikem elektrických oblouků v nádobě transformátoru. Při náhlých poruchách se uplatňuje ochrana rozdílová, nadproudová, distanční a plynové relé. Pro zachycení pozvolných poruch se používá pouze plynové relé. [8]

Ochrany jako takové, patří také k nákladným zařízením a jejich využitelnost lze velmi obtížně předvídat. Jelikož může nastat to, že chráněné zařízení po dobu jeho životnosti nepostihne žádná porucha a ochrana nebude nikdy využita. Pravděpodobnost případné poruchy však nesmí být podceněna za žádných okolností, nicméně to ale neznamená, že je nutné zařízení chránit všemi dostupnými ochranami. Výběr adekvátního systému ochran pro výkonové transformátory na našem území je dán podnikovou normou PNE 38 4065. Podle této normy by transformátory na napěťové hladině VVN/VN měly být chráněny ochranami rozdílovou, nadproudovou z obou stran, plynovým relé a zároveň je požadována automatická regulace napětí. Pro doplnění chránění, v odůvodněných případech, mohou být použity také ochrany distanční a kostrová. [6]

3.1 Rozdílová ochrana R 30

Rozdílová ochrana je založená na principu porovnávání fázorů proudů na vstupu a výstupu chráněného zařízení. Chráněný transformátor je vymezen z obou stran přístrojovými transformátory proudu (PTP), jejichž sekundární proudy jsou vyhodnoceny pomocí nadproudového měřicího členu. Kvůli tomuto zapojení působí rozdílová ochrana pouze v případě vnitřní poruchy, kdy hodnota rozdílového proudu přesahuje nastavenou citlivost nadproudového čísla. Podrobný popis principu činnosti rozdílové ochrany je uveden v [8], [9], [10], [14].

V současné době je v trakční napájecí stanici Vraňany použita rozdílová ochrana typu R 30 je založena na principu stabilizované proudové diferenciální ochrany, viz Obrázek 5. Jedná se o starší typ elektromechanické ochrany, která se vyznačuje její nízkou spotřebou, rychlostí působení a zachováním velké citlivostí i při malých prouděch. V rozdílové ochraně R 30 jsou fázory proudů porovnávány v citlivém a přesném magnetoelektrickém relé, které disponuje otočnou cívkou. Citlivost měřicího relé je seřizena předpětím direkční pružiny se stupnicí v násobcích jmenovitého proudu. V měřicích a blokovacích obvodech jsou instalovány germaniové diody, který slouží pro usměrnění těchto obvodů. Použití těchto diod zajišťuje nepatrnou spotřebu ochrany. [11]



Obrázek 5 Rozdílová ochrana R 30

Další technické parametry ochrany R 30 jsou uvedeny v Tabulka 9.

Tabulka 9 Technické parametry rozdílové ochrany R 30 [2], [11]

Jmenovitý proud	5 A
Jmenovitá frekvence	50 Hz
Pomocné stejnosměrné napětí	110 V
Seřiditelnost diferenciálního členu	0,2 až 1,0 násobek I_n
Zlom stabilizačního charakteristiky	Cca dvojnásobek průchozího proudu
Sklon stabilizační charakteristiky	0,8
Trvalá přetížitelnost součtového proudového obvodu	$2,4I_n$ (průchozí proud)
Tepelná přetížitelnost obou proudových obvodů	$50I_n$ po dobu 1 s
Dynamická přetížitelnost obou proudových obvodů	$100\sqrt{2}I_n$
Trvalá přetížitelnost pomocného stejnosměrného obvodu	$1,1U_n$
Zaručená funkce při podpětí	$0,8U_n$ v pomocném obvodu
Spotřeba v součtovém obvodu	0,1 VA na jeden PTP

Nastavení ochrany	
Nastavení	46/184 A
Nastavený rozdílový proud	4,58 A
Násobek nominálního proudu	0,92

3.2 Nadproudové ochrany AT 31 a AT 12X

Nadproudové ochrany slouží pro chránění vedení nebo zařízení při zkratech, proudovém přetížení nebo zemních spojení. Nejčastěji se používají v radiálních sítích VN, kde jsou úseky vedení často spojeny v sérii. Funkční princip této ochrany je založen na měření velikosti fázových proudů a/nebo zemního proudu. Ochrana působí v nastaveném čase, pokud jeden z naměřených proudů překročí nastavenou hodnotu nadproudového článku. Tyto ochrany musí reagovat na různými způsoby na odlišné typy nadproudů. V případě zkratu je kladen požadavek na okamžité vypnutí ochrany a při nadproudech se uplatní časové zpoždění. Proto se výsledná charakteristika ochrany skládá z kombinace různých charakteristik, ze kterých vycházejí rozdílně odstupňované nadproudy. Detailnější popis principu funkce nadproudových ochran lze nalézt v [8], [10], [12].

V současné době je použita ochrana typu AT 31 je nadproudová časově závislá ochrana využívána pro chránění při 3f zkratech a přetížení. Ochrana je provedena jako třífázová s třemi měřicími články. Ochrana typu AT 12X je nadproudová s časově nezávislou charakteristikou pro chránění při 1f zkratech. Ochrany jsou ilustrovány viz Obrázek 6. Od předchozí řady AT se liší použitím přesného elektronického časového článku spolu se zařazením novějšího typu proudových článků s širším rozsahem možností proudového nastavení. Ochrana je provedena s jednofázovým relé, tedy s jedním měřicím článkem. Tento typ ochran byl použit tam, kde byly požadovány nízké nároky na spotřebu v proudovém obvodu a také vysoký přídržný poměr. Přesný časový článek zabezpečuje spolehlivé působení ochrany, a tím i selektivní jištění. [13]



Obrázek 6 Nadproudové ochrany A 12 X a AT 31

Technické parametry ochran AT 31 a AT 12X jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 10 Technické parametry ochran AT 31 a AT 12X [2], [13]

Ochrany	AT 31	AT 12X
Jmenovitý proud	5 A	2,5 A
Stejnoseměrné napájecí napětí	110 V	110 V
Jmenovitá frekvence	50 Hz	50 Hz
Nastavitelnost	0,8 – 1,6 A	0,8 – 1,6 A
Přesnost	± 5%	± 5%
Časové zpoždění	6 s	12 s
Nastavení ochrany		
Nastavení	78 A 1,5 s	50 A 12 s
Nastavený rozběhový proud	7,8 A	5 A
Násobek nominálního proudu	1,56	2

3.3 Digitální distanční ochrana Siemens SIPROTEC 7SA87

Distanční ochrany jsou nejčastěji využívány pro základní nebo záložní chránění elektrického vedení na napěťových hladinách ZVN, VVN a na VN jsou použity méně často. Zároveň je lze také aplikovat pro chránění transformátorů a generátorů, kde plní funkci buď doplňkové nebo záložní ochrany, protože hlavní roli v tomto případě zde plní ochrana rozdílová. [12]

Funkce distanční ochrany je založena na měření impedance zkratové smyčky z měření proudu a napětí, které je uskutečněno prostřednictvím přístrojových transformátorů proudu a napětí. Změřenou impedanci je nutné přepočítat podle převodů měřících transformátorů a určit tak skutečnou impedanci vedení. Napětí a proud v místě ochrany stanovují velikost impedance zkratové smyčky spolu se vzdáleností zkratu od ochrany. Princip distanční ochrany tedy vyplývá ze sledování impedance sítě. Vysoká hodnota impedance značí, že ve chráněném úseku se nevyskytuje porucha. V opačném případě, kdy je hodnota impedance nízká, naopak signalizuje poruchový stav. Více o principu funkce distanční ochrany je uvedeno v [9], [12].

Digitální ochrana od společnosti Siemens SIPROTEC 7SA87 je navržena pro chránění linkového vedení, jenž je ilustrována na Obrázek 7. Zároveň plní funkci záložní rozdílové ochrany pro transformátory, generátory, motory a všechny druhy linkového vedení. Využívá se pro detekci a selektivní působení při jednopólových a třípólových zkratech ve vedeních napájených buď z jedné nebo obou stran. Zařízení obsahuje šest nezávislých měřících smyček. [15]

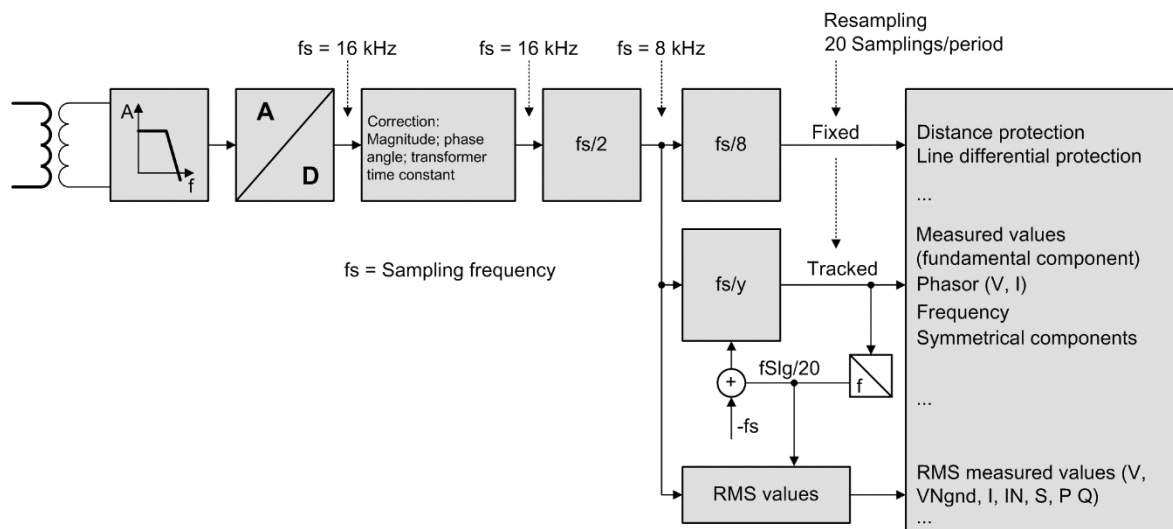


Obrázek 7 Distanční ochrana SIPROTEC 7SA87

Zařízení je vybaveno výkonnou funkcí pro získávání naměřených hodnot, s čímž také souvisí vysoká četnost odběru vzorků a zároveň vysoké rozlišení měření. Tyto vlastnosti zajišťují vysoký stupeň přesnosti měření v širokém dynamickém rozsahu. Integrovaný A/D převodník sigma/delta představuje hlavní zdroj pro získávání naměřených hodnot a je doplněn funkcí ochrany oversampling, která podporuje vysoké rozlišení měřícího přístroje. Naopak při požadavku některé z měřících metod na snížení vzorkovací frekvence by se uplatnila funkce down sampling. V digitálních systémech mohou nastat jisté odchylky ve jmenovité hodnotě frekvence, které mohou způsobovat chyby. Pro zajištění správné funkce ochrany jsou aplikovány dva procesy, které se odvíjí od použitého algoritmu. Tyto procesy jsou následující:

- Sledování vzorkovací frekvence (sampling-frequency tracking) – Vstupní signály jsou na vstupu analogových kanálů skenovány pro detekci platných signálů. Poté je nastavena frekvence proudového zdroje a požadovaná frekvence vzorkování je určena pomocí algoritmu pro převzorkování. Sledovaný rozsah se pohybuje v rozmezí od 10 Hz až do 90 Hz.
- Ustálená vzorkovací frekvence (fixed sampling frequency) – Souvisí s korekcí filtračních koeficientů. Metoda pracuje v omezeném kmitočtovém rozsahu, při jmenovité hodnotě frekvence ± 5 Hz. V rámci této metody se stanoví frekvence zdroje a v závislosti na stupni frekvenční odchylky jsou korigovány filtrační koeficienty. Tato metoda se používá pro distanční ochrany a pro funkce rozdílové ochrany při chránění linek vedení.

Obrázek 8 zobrazuje příklad zpracování vzorkovacích dat po přijetí naměřených hodnot.



Obrázek 8 Princip získávání naměřených hodnot [16]

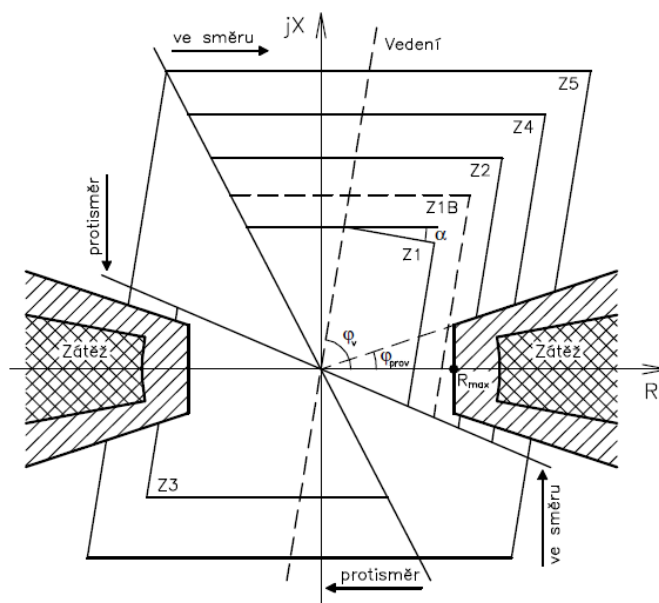
Pro konfiguraci ochrany se využívá rozhraní DIGSI 5. Prostřednictvím tohoto uživatelského rozhraní si lze dle potřeby nastavit zařízení pro export a vizualizaci dat o případné poruše. Integrovaný editor umožňuje graficky definovat parametry rozvodny a chráněného zařízení. Zároveň lze k jednotlivým prvkům přiřadit příslušné ochranné funkce. Konfigurace a parametrizace stanice je zprostředkována systémem Siemens IEC 61850. [16]

Současné nastavení distanční ochrany je zobrazeno v Tabulka 11. Toto nastavení odpovídá polygonální charakteristice, která je zobrazena na Obrázek 9.

Tabulka 11 Nastavení distanční ochrany Siemens SIPROTEC 7SA87 [2]

Funkce	Nastavení	Hodnoty: Sekundární		
Vypínací režim	1+3 pólový			
Distanční ochrana fázová (21)	$T1 = 0s$	$R/Re = 9,76/9,76\Omega$	$X = 9,11\Omega$	Vpřed
	$T1B = 0s$	$R/Re = 13,74/13,74\Omega$	$X = 12,32\Omega$	Vpřed
	$T2 = 0,5s$	$R/Re = 15,42/15,42\Omega$	$X = 12,71\Omega$	Vpřed
	$T4 = 1,5s$	$R/Re = 19,56/19,56\Omega$	$X = 14,96\Omega$	Vpřed
Distanční ochrana zemní (21G)	$T5 = 4,1s$	$R/Re = 70/70\Omega$	$X = 100\Omega$	Vpřed
	$T3 = 6s$	$R/Re = 50/50\Omega$	$X = 25\Omega$	Vzad
	$TOZ = 0s$	OZ-tové zóny: Z1, Z1B		
Nouzová nadproudová (50, 51)	$I > 530A$		$I \gg 1000A$	
	$T = 6s$		$T = 2s$	
Lokátor poruch	$X \text{ na km} = 0,39 \Omega/\text{km}$			

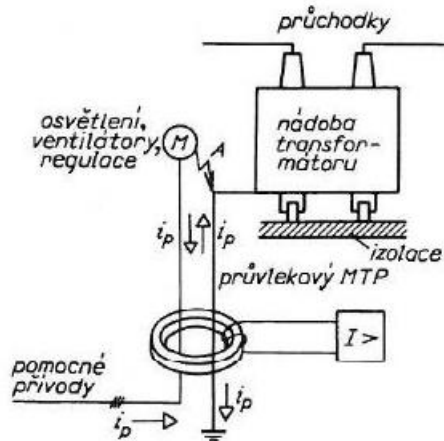
Vypínač	Nastavení				
Automatický OZ	Počet OZ cyklů	1	1+3 pólový	Start OZ	Dist (Z1, Z1B)
	Beznapěťové pauzy	1p	1000ms	3p	400ms



Obrázek 9 Polygonální charakteristika digitální distanční ochrany

3.4 Nádobová (kostrová) ochrana

Nádobová neboli kostrová ochrana vybaví, pokud dojde k přeskočení na průchoďkách nebo spojení vinutí transformátoru s jeho kostrou, což má za následek to, že nádobou transformátoru začne protékat zemní proud, viz Obrázek 10. Při instalaci této ochrany musí být kolejnice pod transformátorem izolovány proti zemi. Obvykle jsou transformátory umístěny na betonovém základu, který poskytuje dostatečný izolační odpor. Z hlediska zachování selektivity ochrany je nutné brát v potaz to, že v případě vzniku zkratu v pomocných obvodech ochrana nemá působit. Pro zajištění správného působení ochrany je tedy nutné přívody k těmto zařízením protáhnout průvlekovým PTP, což vyvolá vzájemné odečítání zkratových proudů v pomocných obvodech, a tím zajistí selektivitu ochrany. [10]

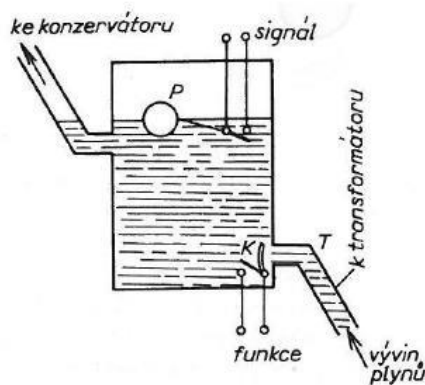


Obrázek 10 Kostrová ochrana transformátoru [9]

Stávající transformátory postrádají kostrovou ochranu. Její funkci totiž nahrazuje ochrana rozdílová. Obvykle se využívá společného chránění kostrovou i rozdílovou ochranou, nebo se použije systém sebekontroly IRF. Spolu s ochranou rozdílovou musí být instalována i ochrana nadproudová časově nezávislá dle ČSN 33 3051. [17]

3.5 Plynové relé

Ochrana plynovým relé je využívána u transformátorů, které jsou chlazené olejem. Plynové relé je součástí výkonového transformátoru a je umístěno v potrubí mezi víkem transformátoru a konzervátorem, viz Obrázek 11. Při vzniku vnitřní poruchy transformátoru, způsobené většinou špatnými galvanickými styky nebo izolaci plechů, dochází ke vzniku elektrického oblouku, který způsobí zvýšení teploty izolačního oleje. Nadměrné ohřátí izolačního oleje má za následek zvýšenou koncentraci rozpuštěných plynů v oleji, jejichž množství závisí na teplotě oleje. Tyto plyny mohou být například vodík, metan, ethan, oxid uhličitý a oxid uhelnatý. Uvolňování těchto plynů způsobí snížení hladiny izolačního oleje v nádobě a tento jev je signalizován pomocí plováku. Pokud by nastalo rychlejší proudění plynů, tak by došlo k vypnutí transformátoru prostřednictvím klapky. Z čehož vyplývá, že plynové relé má dva stupně působení.



Obrázek 11 Princip činnosti plynového relé [9]

První stupeň slouží pro případ pomalého vývinu plynů nebo malého úniku těchto plynů z nádoby, kdy se plyny začínají hromadit nad hladinou izolačního oleje, a tím ho vytlačují z plynového relé směrem do konzervátoru. V prvním stupni se využívá pro signalizaci a spínání plovák. Druhý stupeň už zahrnuje rychlý vznik plynů, který může nastat v případě vnitřního zkratu v nádobě a způsobí to, že olej začne proudit do konzervátoru. Zde se uplatňuje klapka, která olej nejdříve zachytí a následně dojde prostřednictvím jejího pohybu ke spojení s vypínacím obvodem transformátoru. [10]

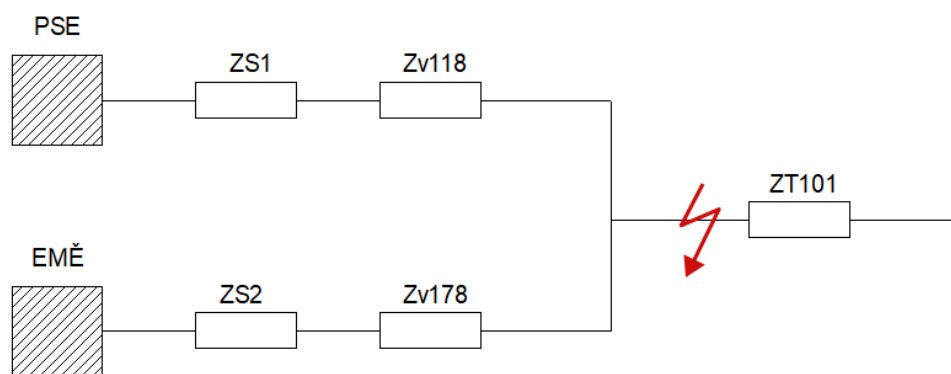
4 Výpočet zkratových poměrů v rozvodně

Výpočet zkratových poměrů v rozvodně je proveden dle normy ČSN 60909-0 ed.2. pro maximální třífázový zkrat před a za chráněnými transformátory. Výsledky výpočtů budou použity pro dimenzování přístrojových transformátorů proudu na straně 110 a 22 kV a posouzení, zda stávající PTP vyhovují novým zkratovým poměrům.

TNS Vraňany jsou napájeny z obou přírodních linek najednou s tím, že příčná spojka je pod napětím. Transformátor T101 je pod zatížením, zatímco druhý transformátor T102 je pod napětím, ale pracuje naprázdno. Z toho vyplývá, že v provozu je pouze vývod z T101 a druhý je vypnutý. T102 tedy plní funkci záložní a v případě poruchy nebo odstavení T101 převezme celé zatížení.

V rámci výpočtu jsou stanoveny stávající zkratové poměry a jejich změna po instalaci nových transformátorů. Jednotlivá zařízení v rozvodně byly nahrazeny pro přehlednost náhradními impedancemi na Obrázek 12 a Obrázek 13. Hodnoty pro výpočet jsou převzaty z Tabulka 7 a Tabulka 8, parametry sítě byly poskytnuty provozovatelem distribuční soustavy. Pro výpočet maximálního zkratového proudu je uvažován napěťový součinitel roven $c = 1,1$.

4.1 Zkratové poměry před chráněným zařízením na straně 110 kV



Obrázek 12 Náhradní schéma s místem zkratu na straně 110 kV

- Náhradní impedance rozvodny Praha sever je určena jako:

$$Z_{S1} = \frac{c \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I_{kQ1}} = \frac{1,1 \cdot 110 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 22,62 \cdot 10^3} = 3,088 \Omega$$

$$X_Q = 0,995 \cdot Z_{S1} = 0,995 \cdot 3,0884 = 3,072 \Omega$$

$$R_Q = 0,1 \cdot X_Q = 0,1 \cdot 3,072 = 0,307 \Omega$$

$$\bar{Z}_{S1} = R_Q + jX_Q = (0,307 + j3,072) \Omega$$

Pro výpočet impedance vedení V118 je známá pouze reaktance a délka vedení. Odpor vedení je určen z průřezu vodiče a rezistivity materiálu:

$$S = 240 \text{ mm}^2, \rho_{AL} = 0,0293 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m}, l_{V118} = 27,5 \text{ km}$$

$$X_{V118} = X_V \cdot l_{V118} = 0,39 \cdot 27,5 = 10,725 \Omega$$

$$R_{V118} = \rho_{AL} \cdot \frac{l_{V118}}{S} = 0,0293 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{27,5}{240 \cdot 10^{-6}} = 0,003 \Omega$$

$$\bar{Z}_{V118} = R_{V118} + jX_{V118} = (0,003 + j10,725) \Omega$$

- Náhradní impedance elektrárny Mělník je určena jako:

$$Z_{S2} = \frac{c \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I_{kQ2}} = \frac{1,1 \cdot 110 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 17,27 \cdot 10^3} = 4,045 \Omega$$

$$X_Q = 0,995 \cdot Z_{S2} = 0,995 \cdot 4,045 = 4,024 \Omega$$

$$R_Q = 0,1 \cdot X_Q = 0,1 \cdot 4,024 = 0,402 \Omega$$

$$\bar{Z}_{S2} = R_Q + jX_Q = (0,402 + j4,024) \Omega$$

- Pro výpočet vedení V178 platí stejné parametry jako pro V118, liší se pouze délka vedení $l_{V178} = 13,2 \text{ km}$, takže:

$$X_{V178} = X_V \cdot l_{V178} = 0,39 \cdot 13,2 = 5,148 \Omega$$

$$R_{V178} = \rho_{AL} \cdot \frac{l_{V178}}{S} = 0,0293 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{13,2}{240 \cdot 10^{-6}} = 0,001 \Omega$$

$$\bar{Z}_{V178} = R_{V178} + jX_{V178} = (0,001 + j5,148) \Omega$$

- Celková impedance do místa zkratu je následující:

$$\bar{Z}_{celk} = \frac{(\bar{Z}_{S1} + \bar{Z}_{V118}) \cdot (\bar{Z}_{S2} + \bar{Z}_{V178})}{\bar{Z}_{S1} + \bar{Z}_{V118} + \bar{Z}_{S2} + \bar{Z}_{V178}}$$

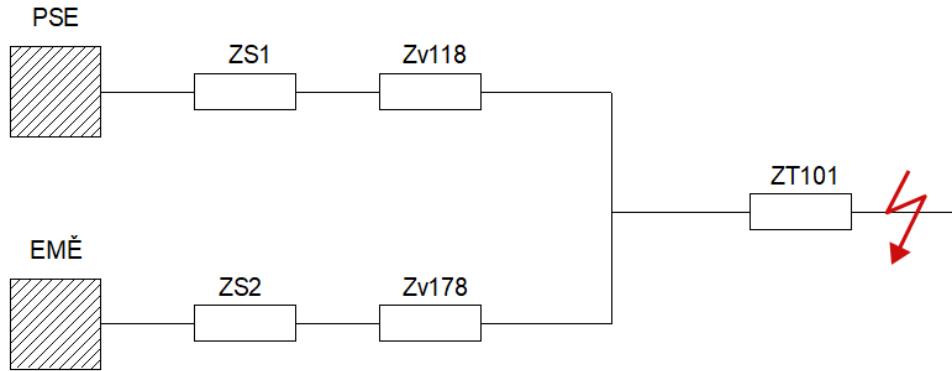
$$\bar{Z}_{celk} = \frac{(0,307 + j3,072 + 0,003 + j10,725) \cdot (0,402 + j4,024 + 0,001 + j5,148)}{0,307 + j3,072 + 0,003 + j10,725 + 0,402 + j4,024 + 0,001 + j5,148}$$

$$\bar{Z}_{celk} = (0,195 + j5,510) \Omega$$

- Výsledný zkratový proud v místě zkratu je určen jako:

$$I''_{k3,1} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |\bar{Z}_{celk}|} = \frac{1,1 \cdot 110 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot |0,195 + j5,510|} = 12,67 \text{ kA}$$

4.2 Zkratové poměry za chráněným zařízením strana 22 kV



Obrázek 13 Náhradní schéma s místem zkratu na straně 22 kV

Náhradní impedance síťových napáječů a vedení z předchozího výpočtu musí být přepočteny na napětíovou hladinu místa zkratu 22 kV.

- Přepočtená hodnota náhradní impedance rozvodny Prahy sever je určena jako:

$$\bar{Z}_{S1,22} = \bar{Z}_{S1} \cdot \left(\frac{U_V}{U_n}\right)^2 = (0,307 + j3,072) \cdot \left(\frac{22 \cdot 10^3}{110 \cdot 10^3}\right)^2 = (0,012 + j0,122) \Omega$$

- Přepočtená hodnota vedení V118 je následující:

$$\bar{Z}_{V118} = (R_{V118} + jX_{V118}) \cdot \left(\frac{U_V}{U_n}\right)^2 = (0,003 + j10,725) \cdot \left(\frac{22 \cdot 10^3}{110 \cdot 10^3}\right)^2$$

$$\bar{Z}_{V118} = (0,0001 + j0,429) \Omega$$

- Přepočtená hodnota náhradní impedance elektrárny Mělník je následující:

$$\bar{Z}_{S2,22} = \bar{Z}_{S2} \cdot \left(\frac{U_V}{U_n}\right)^2 = (0,402 + j4,024) \cdot \left(\frac{22 \cdot 10^3}{110 \cdot 10^3}\right)^2 = (0,016 + j0,161) \Omega$$

- Přepočtená hodnota vedení V178 je následující:

$$\bar{Z}_{V178} = (R_{V178} + jX_{V178}) \cdot \left(\frac{U_V}{U_n}\right)^2 = (0,001 + j5,148) \cdot \left(\frac{22 \cdot 10^3}{110 \cdot 10^3}\right)^2$$

$$\bar{Z}_{V178} = (0,0001 + j0,205) \Omega$$

Příklad výpočtu náhradní impedance stávajících transformátorů T101 a T102 je uveden pouze pro T101, jelikož se jedná o dva identické transformátory.

$$Z_{T101} = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_V^2}{S_{nT}} = \frac{10,6}{100} \cdot \frac{(23 \cdot 10^3)^2}{10 \cdot 10^6} = 5,607 \Omega$$

$$R_{T101} = \frac{\Delta P_K}{S_{nT}} \cdot \frac{U_{nT}^2}{S_{nT}} = \frac{66 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^6} \cdot \frac{(23 \cdot 10^3)^2}{10 \cdot 10^6} = 0,349 \Omega$$

$$X_{T101} = \sqrt{Z_{T101}^2 - R_{T101}^2} = \sqrt{5,607^2 - 0,349^2} = 5,596 \Omega$$

$$\bar{Z}_{T101} = R_{T101} + jX_{T101} = (0,349 + j5,596) \Omega$$

$$K_{T101} = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot x_T} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot \left(\frac{X_{T101} \cdot S_{nT}}{U_n^2} \right)}$$

$$K_{T101} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot \frac{5,596 \cdot 10 \cdot 10^6}{(23 \cdot 10^3)^2}} = 0,982$$

$$\bar{Z}_{T101K} = \bar{Z}_{T101} \cdot K_{T101} = (0,349 + j5,596) \cdot 0,982 = (0,343 + j5,499) \Omega$$

- Celková impedance do místa zkratu je následující:

$$\bar{Z}_{celk} = \frac{(\bar{Z}_{S1,22} + \bar{Z}_{V118}) \cdot (\bar{Z}_{S2,22} + \bar{Z}_{V178})}{\bar{Z}_{S1,22} + \bar{Z}_{V118} + \bar{Z}_{S2,22} + \bar{Z}_{V178}} + \bar{Z}_{T101K}$$

$$\bar{Z}_{celk} = \frac{(0,012 + j0,122 + 0,0001 + j0,429) \cdot (0,016 + j0,161 + 0,0001 + j0,205)}{0,012 + j0,122 + 0,0001 + j0,429 + 0,016 + j0,161 + 0,0001 + j0,205 + 0,343 + j5,499}$$

$$\bar{Z}_{celk} = (0,343 + j5,508) \Omega$$

- Výsledný zkratový proud je určen jako:

$$I''_{k3,22} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |\bar{Z}_{celk}|} = \frac{1,1 \cdot 22 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot |0,343 + j5,508|} = 2,53 \text{ kA}$$

Výpočet náhradní impedance nových transformátorů. Stejně jako v předchozím případě se jedná o dva identické transformátory, proto je příklad výpočtu proveden pouze jednou.

$$Z_{TN} = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_V^2}{S_{nT}} = \frac{11,5}{100} \cdot \frac{(23 \cdot 10^3)^2}{16 \cdot 10^6} = 3,802 \Omega$$

$$R_{TN} = \frac{\Delta P_K}{S_{nT}} \cdot \frac{U_{nT}^2}{S_{nT}} = \frac{79 \cdot 10^3}{16 \cdot 10^6} \cdot \frac{(23 \cdot 10^3)^2}{16 \cdot 10^6} = 0,163 \Omega$$

$$X_{TN} = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{3,802^2 - 0,163^2} = 3,798 \Omega$$

$$\bar{Z}_{TN} = R_{TN} + jX_{TN} = (0,163 + j3,798) \Omega$$

$$K_{TN} = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot x_T} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot \left(\frac{X_{TN} \cdot S_{nT}}{U_n^2} \right)} =$$

$$K_{TN} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot \frac{3,798 \cdot 16 \cdot 10^6}{(23 \cdot 10^3)^2}} = 0,977$$

$$\bar{Z}_{TNK} = \bar{Z}_{TN} \cdot K_{TN} = (0,163 + j3,798) \cdot 0,977 = (0,159 + j3,713) \Omega$$

- Celková impedance do místa zkratu při uvažování nového transformátoru je určena následovně:

$$\bar{Z}_{celkN} = \frac{(\bar{Z}_{S1,22} + \bar{Z}_{V118}) \cdot (\bar{Z}_{S2,22} + \bar{Z}_{V178})}{\bar{Z}_{S1,22} + \bar{Z}_{V118} + \bar{Z}_{S2,22} + \bar{Z}_{V178}} + \bar{Z}_{TNK}$$

$$\bar{Z}_{celkN} = \frac{(0,012 + j0,122 + 0,0001 + j0,429) \cdot (0,016 + j0,161 + 0,0001 + j0,205)}{0,012 + j0,122 + 0,0001 + j0,429 + 0,016 + j0,161 + 0,0001 + j0,205 + 0,159 + j3,713}$$

$$\bar{Z}_{celkN} = (0,167 + j3,934) \Omega$$

- Výsledný zkratový proud je následující:

$$I''_{k3,N} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |\bar{Z}_{celkN}|} = \frac{1,1 \cdot 22 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot |0,167 + j3,934|} = \mathbf{3,55 \text{ kA}}$$

- Porovnání stávajících a nových zkratových poměrů je provedeno následovně:

$$\Delta\delta = \frac{I''_{k3N} - I''_{k3}}{I''_{k3,N}} \cdot 100 = \frac{3,55 - 2,53}{3,55} \cdot 100 = \mathbf{28,73 \%}$$

Z výsledných zkratových poměrů je zřejmé, že po instalaci nových transformátorů dojde k nárůstu zkratových poměrů o 28,73 % oproti původním hodnotám.

5 Dimenzování přístrojových transformátorů

Zajištění spolehlivé funkce ochran se odvíjí od požadavků výrobce ochran na dané parametry přístrojových transformátorů a jejich spojovací vedení mezi nimi a příslušnými ochranami. Jestliže ochrana není schopna bezchybného působení za všech provozních podmínek s přesycenými přístrojovými transformátory proudu nebo kapacitními transformátory napětí, v tom případě musí být podmínky omezující spolehlivý provoz ochran uvedeny. [19]

Pro ochrany se využívají jistící přístrojové transformátory proudu (JTP), u kterých je kladen důraz na rychlost a přesnost přenosu informací při přechodných jevech, které mohou způsobit velké nadproudy nebo minimální napětí v chráněném objektu během poruchy. Při

přechodném jevu dochází k náhlé změně časových konstant střídavé sítě, a to vede ke změnám v magnetickém obvodu PTP. Z tohoto důvodu je nezbytné navrhnout JTP tak, aby tyto náhlé změny nezpůsobily přesycení jádra stejnosměrnou složkou proudu. Pro ochranu je důležité, aby PTP v případě vzniku zkratu dokázaly věrně replikovat časový průběh primárního střídavého proudu na sekundární stranu. PTP tedy musí být dimenzovány tak, aby i největší stejnosměrný proud byl za všech okolností menší než magnetizační proud kolena magnetizační charakteristiky. Přesycení jádra PTP stejnosměrnou složkou proudu ovlivní informaci předanou ochraně, a to v některých případech může způsobit zpožděné působení ochrany nebo i její selhání. [20]

Digitální ochrany mohou pracovat s určitou mírou zkreslení vstupních proudů, která může být způsobena přesycením jádra PTP. Tato míra zkreslení se liší u jednotlivých typů ochrany a jejich výrobců. Proto je vhodné již ve fázi jejich volby vycházet z požadavků jednotlivých typů ochrany na PTP. Pro digitální ochrany se PTP dimenzují především na základě skutečného nadproudového čísla n_{skut} , které závisí na velikosti skutečného břemene na sekundární straně R_b a zároveň se uvažuje zanedbání reaktance. Skutečné nadproudové číslo se dle [19] určí jako

$$n_{skut} = n_n \cdot \frac{R_{ct} + R_{bn}}{R_{ct} + R_b}, \quad (1)$$

kde n_n je jmenovité nadproudové číslo PTP [-],

R_{ct} je odpor sekundárního vinutí PTP [Ω],

R_{bn} je jmenovité břemeno [Ω],

R_b je skutečné břemeno (zahrnuje součet rezistancí přívodního vedení, vstupního odporu ochrany a stykového odporu přívodního vedení) [Ω] [9].

Základní rozdělení požadavků na dimenzování PTP je provedeno pro ochrany pomalé a rychlé.

5.1 Dimenzování pro pomalé ochrany

Pro ochrany pomalé neboli s časovým zpožděním kvůli selektivitě není uvažován při návrhu PTP přechodný stav. Doba působení ochrany je delší než doba trvání přechodné složky primárního proudu a chráněný objekt je tedy možné uvažovat při působení ochrany v ustáleném stavu. Z tohoto důvodu je možné zanedbat pro pomalé ochrany vliv přechodné složky primárního proudu. PTP jsou schopné pracovat až do takových proudů a výkonů, kdy hodnota sekundárního napětí dosáhne definované hodnoty limitního napětí U_{lim} a proudu kolena magnetizační charakteristiky, které zároveň patří mezi hlavní parametry pro dimenzování. Mezi další parametry se řadí také nadproudové číslo n , které přímo souvisí s nasycením jádra. Požadované parametry na správné dimenzování pro pomalé ochrany jsou následující:

- a) Primární a sekundární jmenovitý proud PTP,
- b) Hodnota požadovaného limitního napětí U_{lim} / jmenovitý výkon S_n / nadproudové číslo n ,
- c) Přesnost.

Jmenovitý primární I_{1n} a sekundární proud I_{2n} , spolu s nimi i převod p , lze určit na základě znalosti jmenovitých proudů chráněného zařízení a ochrany

$$p = \frac{I_{1n}}{I_{2n}}. \quad (2)$$

Limitní hodnota napětí U_{lim} kolena magnetizační charakteristiky se zjistí podle velikosti skutečného břemene R_b a maximálního zkratového proudu I_{Bmax} , který je přepočtený na sekundární stranu

$$U_{lim} > I_{Bmax} \cdot \sum R_b. \quad (3)$$

Další možnost představuje určení skutečného nadproudového čísla PTP. To lze zjistit, jak uvádí [20] z poměru maximálního zkratového proudu k proudu jmenovitému

$$\frac{I_{Bmax}}{I_{2n}} = \frac{I_{Amax}}{I_{1n}} = n_{skut}. \quad (4)$$

5.2 Dimenzování pro rychlé ochrany

Na rozdíl od pomalých ochran, kde se předpokládalo, že přechodná složka proudu má krátkodobý charakter v porovnání s dobou působení ochrany, je nezbytné u rychlých ochran uvažovat vliv přechodné složky primárního proudu. Doba působení ochrany je krátká vzhledem k časové konstantě chráněného objektu, která je dána poměrem indukčnosti L_a a činného odporu R_a . Pokud bude indukčnost větší, než činný odpor povede to k navýšení časové konstanty chráněného objektu τ nad dobu působení ochrany t_p , tak je nutné uvažovat při dimenzování PTP vliv přechodné složky primárního proudu na požadavky

$$L_a > R_a \Rightarrow t_p < \tau. \quad (5)$$

Spolu se zvyšováním hodnoty primárního proudu roste úměrně i proud magnetizační a sekundární. Od určité hodnoty primárního proudu dochází k přesycení jádra, což vede k výraznému nárůstu magnetizačního proudu na úkor proudu sekundárního a dochází tak ke zkreslení sinusového průběhu proudu spolu se snížením jeho efektivní hodnoty. Pokud tedy magnetizační proud v určitém časovém intervalu dosáhne velikosti limitního proudu I_{lim} dochází k nasycení jádra PTP. V porovnání se souměrným přetížením, přetížení způsobené stejnosměrnou složkou proudu vyvolá nesouměrný průběh sekundárního proudu. Stejnoseměrná složka magnetizačního proudu nesmí přesáhnout I_{lim} proud kolena magnetizační charakteristiky. Požadavky, které je nutné znát pro projektování rychlých ochran jsou následující:

- a) Jmenovité proudy chráněného zařízení a ochrany I_{1n}, I_{2n} ,
- b) Maximální zkratový proud I_{Bmax} ,
- c) Parametry chráněného zařízení X_a a R_a ,
- d) Celkovou zátěž PTP $\sum R_b$.

Nejprve je nutné určit převod obdobně jako v případě pomalých ochran. Následně na základě parametrů je možné stanovit, zda vyhovuje hodnota limitního napětí U_{lim} a proudu I_{lim} vybraného PTP. V uvedeném vztahu není známá hodnota odporu sekundárního vinutí R_b a proto zůstanou spolu s U_{lim} obecně vyjádřeny. Veličiny X_a , R_a a R_{kab} jsou konstantní, protože se předpokládá stejný typ kabelu u PTP a ochrany

$$U_{lim} > 0,7 \cdot I_{Bmax} \cdot \frac{X_a}{R_a} \cdot (R_o + R_{kab} + R_b), \quad (6)$$

kde R_o je vstupní odpor ochrany,

R_{kab} je odpor přívodů PTP a ochrany,

R_b je odpor sekundárního vinutí PTP.

Vybrán je PTP, který svými hodnotami U_{lim} a R_b vyhovuje této nerovnosti, což platí v tomto případě pro ochranu rozdílovou. Pro ochrany distanční a nadproudové časově nezávislé se zmenšuje koeficient z 0,7 na 0,5. [20]

5.3 Kontrola PTP pro rozdílovou ochranu na straně 110 kV

Kontrola PTP na straně 110 kV, viz Obrázek 14, je provedena s ohledem na požadavky rozdílové ochrany, jelikož pro tento typ ochrany musí PTP splnit přísnější podmínky než pro ochrany jiné. Pro spolehlivou funkci rozdílové ochrany je nutné, aby během doby jejího působení v čase t_k nedošlo vlivem stejnosměrné složky proudu k přesycení jádra PTP. Pro tento účel se využívá činitele pro přechodné stavy K_{td} , který lze stanovit následovně

$$K_{td} = \frac{\omega \cdot T_p \cdot T_s}{T_p - T_s} \cdot \left(e^{-\frac{t_k}{T_p}} - e^{-\frac{t_k}{T_s}} \right) + 1, \quad (7)$$

kde K_{td} je činitel pro přechodné stavy,

T_p je časová konstanta primárního obvodu ($T_p = \frac{X}{\omega \cdot R}$ zkratové impedance obvodu),

T_s je časová konstanta sekundárního obvodu PTP,

t_k je doba působení ochrany.

Primární časová konstanta je určena z poměru reaktance a odporu zkratového obvodu.

$$T_p = \frac{X}{\omega \cdot R} = \frac{5,5105}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,1953} = 89,8 \text{ ms.}$$

Časová konstanta sekundárního obvodu T_s není známá. Z tohoto důvodu bude její hodnota odhadnuta na základě primární časové konstanty na $T_s = 5 \text{ s}$. Doba působení ochrany se předpokládá $t_k = 10 \text{ ms}$, pak přechodový činitel bude

$$K_{td} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,0898 \cdot 5}{0,0898 - 5} \cdot \left(e^{-\frac{0,01}{0,0898}} - e^{-\frac{0,01}{5}} \right) + 1 = 3,96.$$

Dále se určí hodnota skutečného nadproudového činitele n_{skut} , který musí splňovat následující podmínku

$$n_{skut} \geq K_{td} \cdot \frac{I''_{kmax}}{I_{1n}}. \quad (8)$$

Pro výpočet n_{skut} se vychází ze vztahu (1), ze kterého vyplývá, že nejprve se musí stanovit hodnoty odporů R_{ct} , R_{bn} , R_o a R_{kab} , kde odpor sekundárního vinutí PTP byl určen na základě jiného zařízení s podobnými parametry $R_{ct} = 1 \Omega$.

- Pro výpočet odporu kabelu: $\rho_{cu} = 0,0179 \cdot 10^{-6} \Omega m$, $l_{kab} = 60 \text{ m}$, $S = 4 \text{ mm}^2$

$$R_{kab} = \frac{2 \cdot \rho_{cu} \cdot l_{kab}}{S} = \frac{2 \cdot 0,0179 \cdot 10^{-6} \cdot 60}{4 \cdot 10^{-6}} = 0,537 \Omega.$$

- Pro vstupní odpor ochrany: $S = 0,1 \text{ VA}$

$$R_o = \frac{S}{I_{SN}^2} = \frac{0,1}{5^2} = 4 \cdot 10^{-3} \Omega.$$

- Skutečné břemeno

$$R_b = R_{kab} + R_o = 0,537 + 4 \cdot 10^{-3} = 0,541 \Omega.$$

- Jmenovité břemeno

$$R_{bn} = \frac{S_n}{I_{2n}^2} = \frac{60}{5^2} = 2,4 \Omega.$$

- Skutečné nadproudové číslo

$$n_{skut} = n_n \cdot \frac{R_{ct} + R_{bn}}{R_{ct} + R_b} = 20 \cdot \frac{1 + 2,4}{1 + 0,541} = 44,1.$$

- Stanovení převodu dle

$$I_{NT1} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{16 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 110 \cdot 10^3} = 84 \text{ A}$$

se volí nejbližší jmenovitá hodnota PTP tedy 100/5/5 A. Z toho lze usoudit, že současné PTP s převodem 50/5/5 A nevyhovují.

- Dále je provedena kontrola pro horní mez lineární oblasti rozdílové ochrany $20 \cdot I_N$

$$0,75 \cdot I_{NT1} = 0,75 \cdot 84 = 63 \text{ A},$$

podmínka je splněna < 100 A.

- Průchozí zkrat na primární straně je

$$I''_{kmax} = I''_{k3,N} \cdot \frac{U_V}{U_n} = 3,55 \cdot 10^3 \cdot \frac{22 \cdot 10^3}{110 \cdot 10^3} = 710 \text{ A}.$$

- Činitel symetrického zkratového proudu

$$K_{ssc} = \frac{I''_{kmax}}{I_{1n}} = \frac{710}{100} = 7,1.$$

- Nyní se provede kontrola n_{skut}

$$n_{skut} \geq K_{ssc} \cdot K_{td},$$

$$44,1 \geq 7,1 \cdot 3,96 = 28,12,$$

$$44,1 \geq 28,12.$$

Podmínka za těchto předpokladů je splněna pro PTP s jmenovitým převodem 100/5/5 A. Současné PTP by podmínice nevyhověly, jelikož je jejich převod nižší než je jmenovitý proud chráněného transformátoru.



Obrázek 14 PTP na straně 110 kV

5.4 Kontrola PTP pro rozdílovou ochranu na straně 22 kV

Pro PTP za chráněným zařízením bude provedena kontrola pro požadavky rozdílové ochrany jako v předešlém případě. Pro tento výpočet se předpokládá hodnota jmenovitého nadproudového čísla $n_n = 5$, jenž není jednoznačně uvedena na štítku, viz Obrázek 15.



Obrázek 15 Štítkové parametry PTP na straně 22 kV

- Nejprve se stanoví primární časová konstanta T_p

$$T_p = \frac{X}{\omega \cdot R} = \frac{3,934}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,167} = 74,8 \text{ ms.}$$

Činitel pro přechodné stavy K_{td} , kde na základě primární časové konstanty je odhadnuta sekundární časová konstanta $T_s = 6 \text{ s}$ a doba působení ochrany se předpokládá $t_k = 10 \text{ ms}$

$$K_{td} = \frac{\omega \cdot T_p \cdot T_s}{T_p - T_s} \cdot \left(e^{-\frac{t_k}{T_p}} - e^{-\frac{t_k}{T_s}} \right) + 1,$$

$$K_{td} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,0748 \cdot 6}{0,0748 - 6} \cdot \left(e^{-\frac{0,01}{0,0748}} - e^{-\frac{0,01}{6}} \right) + 1 = 3,94.$$

Pro výpočet n_{skut} se vychází opět ze vztahu (1) a jsou nejprve stanoveny hodnoty odporů R_{ct} , R_{bn} , R_o a R_{kab} , kde odpor sekundárního vinutí PTP byl určen na základě jiného zařízení s podobnými parametry $R_{ct} = 1 \Omega$.

- Pro výpočet odporu kabelu: $\rho_{cu} = 0,0179 \cdot 10^{-6} \Omega \text{m}$, $l_{kab} = 15 \text{ m}$, $S = 4 \text{ mm}^2$

$$R_{kab} = \frac{2 \cdot \rho_{cu} \cdot l_{kab}}{S} = \frac{2 \cdot 0,0213 \cdot 10^{-6} \cdot 15}{4 \cdot 10^{-6}} = 0,16 \Omega$$

- Pro vstupní odpor ochrany: $S = 0,1 \text{ VA}$ je následující:

$$R_o = \frac{S}{I_{SN}^2} = \frac{0,1}{5^2} = 4 \cdot 10^{-3} \Omega.$$

- Skutečné břemeno je určeno jako:

$$R_b = R_{kab} + R_o = 0,16 + 4 \cdot 10^{-3} = 0,134 \Omega.$$

- Jmenovité břemeno je následující:

$$R_{bn} = \frac{S_n}{I_{2n}^2} = \frac{30}{5^2} = 1,2 \Omega.$$

- Skutečné nadproudové číslo je určeno jako:

$$n_{skut} = n_n \cdot \frac{R_{ct} + R_{bn}}{R_{ct} + R_b} = 5 \cdot \frac{0,5 + 1,2}{0,5 + 0,134} = 13,4.$$

- Jmenovitý převod je stanoven následovně:

$$I_{NT2} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{16 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 23 \cdot 10^3} = 402 \text{ A.}$$

Volí se nejbližší jmenovitá hodnota PTP tedy 400/5/5 A.

- Dále se provede kontrola pro horní mez lineární oblasti rozdílové ochrany $20 \cdot I_N$

$$0,75 \cdot I_{NT1} = 0,75 \cdot 402 = 301 \text{ A,}$$

podmínka je splněna < 400 A.

- Činitel symetrického zkratového proudu je určena jako:

$$K_{ssc} = \frac{I_k''}{I_{pn}} = \frac{3,55 \cdot 10^3}{400} = 8,87.$$

$$K_{td} = 3,93$$

- Nyní se provede kontrola požadavků na hodnotu n_{skut} :

$$n_{skut} \geq K_{ssc} \cdot K_{td},$$

$$13,4 \geq 8,87 \cdot 3,93 = 34,86.$$

$$13,4 \geq 34,86$$

Podmínka není splněna. Tento PTP nevyhovuje požadavkům kvůli nízké hodnotě jmenovitého nadproudového čísla. Z tohoto důvodu je vhodné ho nahradit jiným s následujícími parametry 400/5/5 A, $n_n = 15$, $S_n = 60 \text{ VA}$.

- Skutečné nadproudové číslo je určeno jako:

$$n_{skut} = n_n \cdot \frac{R_{ct} + R_{bn}}{R_{ct} + R_b} = 15 \cdot \frac{0,5 + 2,4}{0,5 + 0,134} = 68,61.$$

- Nyní se provede kontrola požadavků na hodnotu n_{skut} :

$$n_{skut} \geq K_{ssc} \cdot K_{td},$$

$$45,74 \geq 8,87 \cdot 3,93 = 34,86.$$

$$68,61 \geq 34,86$$

Je patrné, že podmínka s navrženými parametry je splněna s velkou rezervou.

6 Požadavky na chránění transformátorů

Současné požadavky na chránění výkonových transformátorů s jmenovitým výkonem 16 MVA dle normy ČSN 33 3051 jsou shrnuty v následující tabulce. Od zmíněných požadavků se bude dále odvíjet samotný návrh a nastavení ochranných funkcí vybrané ochrany od výrobce ABB řady REX640.

Tabulka 12 Požadavky na chránění síťových transformátorů [6]

Transformátor VVN/VN		
Druh ochrany	$5 < S < 25$ MVA	Poznámky
Nadproudová zkratová nebo impedanční (primární)	X	Doporučuje se použít dvoustupňová nadproudová ochrana
Nadproudová zkratová (sekundární)	X	
Nadproudová zkratová (terciální)	X	
Nadproudová při přetížení	X	Ochrana se použije pokud není použita (kvalitativně vyšší) tepelná ochrana
Plynová	X	
Rozdílová	X	Pouze tehdy, jestliže nevyhoví časové nastavení nadproudové časově nezávislé ochrany a nemůže být (např. z důvodu selektivity) použita nadproudová mžiková ochrana
Zemní nádobová	X	Použije se u transformátorů s účinně uzemněným nulovým bodem vinutí
<i>Poznámka – použité značení v tabulce</i>	<i>X ochrana se použije</i>	

Výkonové transformátory patří mezi nejdůležitější zařízení elektrizační soustavy a během svého provozu jsou vystaveny různým poruchám a abnormálním podmínkám, jak již bylo zmíněno v kapitole 3, které mohou mít nepříznivý vliv na jejich výkon a životnost. Transformátor v případě poruchy musí být co možná nejrychleji odpojen od zdroje. Od toho se odvíjí i požadavek na jejich ochraně, kde je požadována vysoká citlivost pro detekci poruch a zároveň odolnost proti falešnému působení při vnějších poruchách. Toho lze obvykle docílit použitím rozdílové ochrany, která se ve valné většině případů používá jako ochrana hlavní pro chránění transformátorů. Funkci záložní ochrany plní ochrana nadproudová, ale v některých případech může být použita i jako hlavní.

Mezi další důležité faktory, které je nutné sledovat se řadí stav pevné izolace transformátoru, jejíž degradace je ovlivněna zejména zvýšenou provozní teplotou izolačního oleje. Teplota oleje má zásadní vliv na stav pevné izolace a je proto nezbytné ji pravidelně monitorovat, aby nepřesáhla hodnotu samovznícení oleje. V tomto případě se obvykle využívá pro sledování stavu pevné izolace tepelná ochrana, senzory pro sledování hot spotů a další parametr, který se sleduje je míra degradace pevné izolace.

Ochrana musí tedy zajistit komplexní ochranu transformátoru při zkratech, přetíženích, zemních poruchách a dalších nepříznivých provozních vlivech. [22]

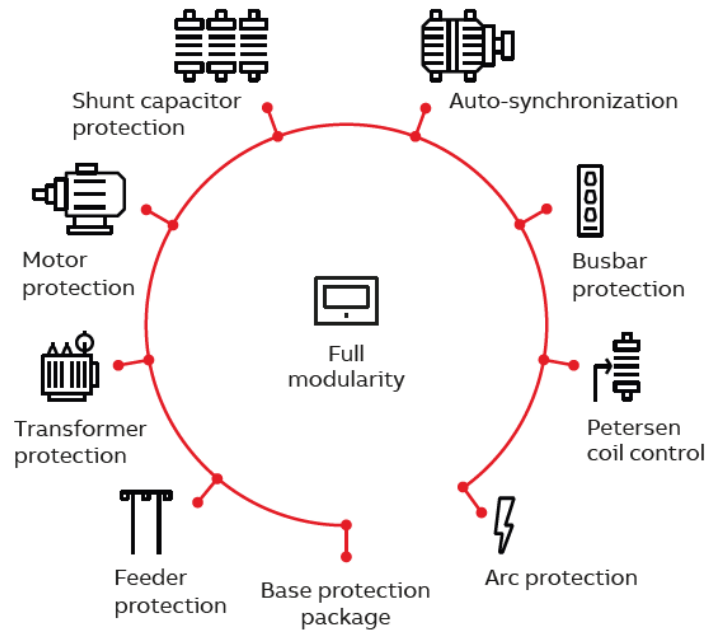
7 Ochrana ABB REX640

Multifunkční ochrana REX640, která je ilustrována na Obrázek 16, nabízí plně modulární uspořádání, prostřednictvím kterého zajišťuje vysokou flexibilitu při výběru požadované konfigurace ochranných funkcí. Ochrana je speciálně navržena pro podporu při digitalizaci rozvodů a lze ji aplikovat pro jednoduché nebo dvojitě systémy přípojnic.



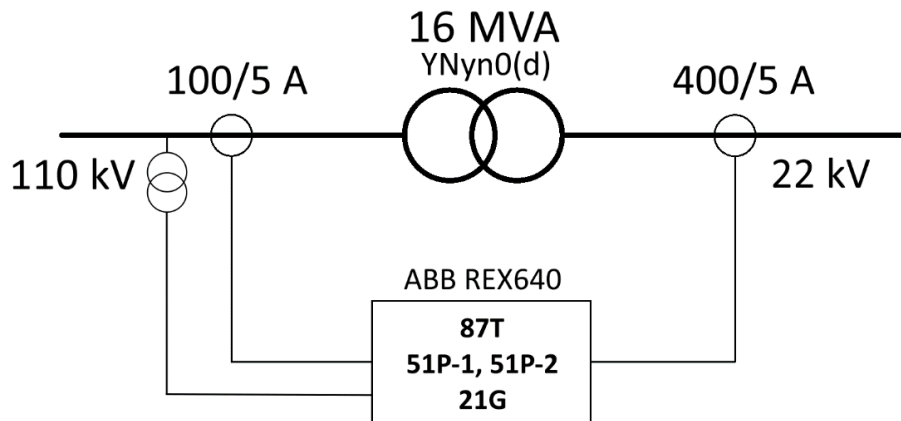
Obrázek 16 Multifunkční ochrana ABB REX640 [21]

Celkové vybavení ochrany je tvořeno konceptem balíčků ochranných funkcí, které jsou složeny předdefinovanými soubory, které si lze vybrat pro konkrétní aplikaci. Balíčky zahrnují ochranné a řídicí funkce, jenž je možné navzájem kombinovat. Tyto funkční balíčky jsou uvedeny v Obrázek 17. [21]



Obrázek 17 Balíčky ochranných funkcí [21]

Pro účel praktické části diplomové práce budou využity pouze ochranné funkce pro chránění transformátoru, které jsou navrženy dle normy v Tabulka 12. V rámci práce budou navrženy pouze následující ochranné funkce a to rozdílová, nadproudová a distanční. Pro nastavení dalších ochranných funkcí je třeba detailní znalost parametrů transformátoru, které nejsou k dispozici. Předpokládané schéma zapojení ochranných funkcí je znázorněno na Obrázek 18.



Obrázek 18 Zapojení ochrany od ABB REX640

7.1 Nastavení rozdílové ochrany

Stabilizovaná charakteristika rozdílové ochrany musí zajistit vysokou citlivost při malých poruchových proudech, tak aby ochrana mohla zachytit vznikající poruchu ve vymezené chráněné oblasti. V opačném případě, kdy nastane porucha mimo chráněnou oblast a zároveň se vyskytnou velké zkratové proudy, je nutné citlivost diferenciálního stupně ochrany výrazně snížit. Z toho vyplývá, že charakteristika ochrany plynule snižuje vlastní citlivost na úroveň diferenciálního proudu se zvyšujícím se procházejícím proudem. Tento proces je určen podle různých algoritmů ochrany.

Diferenciální proud lze určit ze součtu fázorů proudů, které přicházející z primární a sekundární strany a směřují k chráněnému objektu. V bezporuchovém stavu je v chráněné oblasti součet těchto proudů roven nule a v ideálním případě tedy i diferenciální proud.

- Diferenciální proud je určen následovně:

$$I_d = |\bar{I}_{n1} + \bar{I}_{n2}|.$$

- Stabilizační proud je určen jako:

$$\frac{I_b}{I_n} = \frac{\bar{I}_{n1} + \bar{I}_{n2}}{2}.$$

Běžný regulační transformátor 110/23 kV s ± 8 odbočkami s hysterezi 2% může změnit vyrovnaný stav diferenciálního proudu až o 16%. Nadále se mohou projevit chyby PTP třídy 5P na primární a 5P na sekundární straně tedy celkově 10%. Chyba převodu ochrany se může pohybovat do 5% a dále je nutné počítat s menší rezervou pro ostatní chyby zhruba 4%. Celková chyba, kterou je nutno respektovat v nastavení citlivého stupně je tedy:

$$S = 16 + 10 + 5 + 4 = 40 \text{ \%}.$$

Doporučené nastavení základního stupně citlivosti pro popudovou hodnotu ochrany *Low operate value* = I_{d1} , kde P' představuje ztráty naprázdno (obvykle do 10%) dle [23] bude následující:

$$I_{d1} = 0,5 \cdot S + P' = 0,5 \cdot 40 + 10 = 30 \text{ \%}.$$

$$I_{d1} = 0,3$$

Rozdílová ochrana má vysoký stupeň selektivity a jedná se o velmi spolehlivou ochranu, tudíž si zde můžeme dovolit nastavit nulové zpoždění při jejím působení.

$$\Rightarrow t_{vyp>} = 0 \text{ s}$$

Ochrana je dále vybavena záložní funkcí, jenž vypíná bez ohledu na hodnoty stabilizačních proudů v případě, kdy diferenciální proud přesáhne nastavenou hodnotu. Tato funkce se nazývá vysoké nastavení *High stage value* = $I_d \gg$ a představuje druhý stupeň rozdílové ochrany, který není stabilizovaný. Funkce se aktivuje buď při překročení nastavené hodnoty diferenciálního proudu základní harmonické nebo pokud bude okamžitá hodnota diferenciálního proudu 2,5 krát vyšší než nastavená hodnota. Násobek 2,5 ($= 1,8 \times \sqrt{2}$) vychází z maximálního nesymetrického zkratového proudu. Teoretickou hodnotu maximálního

průchozího zkratového proudu lze určit z parametru napětí nakrátko. Vyšší hodnoty naznačují, že se jedná o vnitřní zkrat. [22], [23]

$$I_d \gg \frac{1}{u_k} = \frac{1}{0,115} = 8,69$$

$$\Rightarrow I_d \gg = 9,0$$

$$\Rightarrow t_{vyp} \gg = 0 \text{ s}$$

Kvůli chybám měření PTP je nutné zvýšit stabilizaci ochrany, tím že se sníží nastavená citlivost úměrně na stabilizačním proudu. Tato stabilizace je určena následovně pro první část charakteristiky $0\%I_n < I_b < \text{End section 1}$, kde hodnota diferenciálního proudu pro vypnutí je zastoupena konstantou.

$$\text{Slope section 1} = \frac{I_{d1}}{I_n} = 0,3$$

$$\text{End section 1} \Rightarrow I_{d1} = 0,3, I_{b1} = 0,5$$

V druhé části charakteristiky platí $\text{End section 1} < I_b/I_n < \text{End section 2}$ a je vyjádřeno *Slope section 2*. V této části charakteristiky je zahrnuta menší přesnost PTP při zvýšené hodnotě průchozích proudů a je zde dále možné navýšit stabilizaci ochrany. Nastavené hodnoty jsou zvoleny tak, aby zvýšili stabilizaci ochrany, která se bude odvíjet od průchozího proudu. Sklon této části charakteristiky je určen následovně.

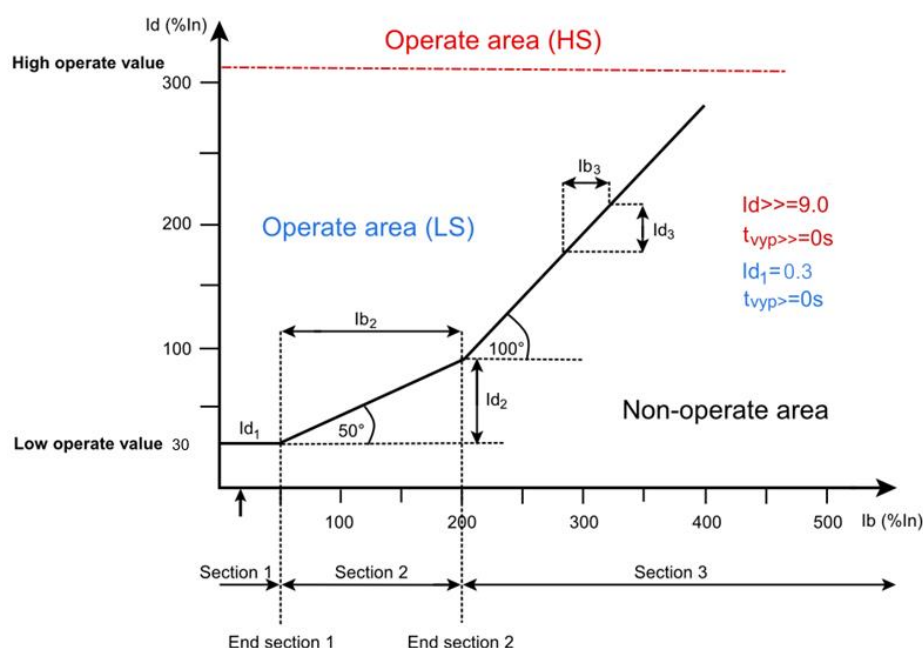
$$\text{Slope section 2} = 50\%$$

$$\text{End section 2} \Rightarrow \frac{I_{b2}}{I_n} = 2I_n \quad \frac{I_{d2}}{I_n} = 1,15I_n$$

Třetí část charakteristiky, kde $I_b/I_n > \text{End section 2}$, sklon je dán nastavením *Slope section 3*, jenž definuje nárůst diferenciálního proudu, který koresponduje se zvýšeným stabilizačním proudem. Pro vnější poruchy je v rámci ochrany zahrnuta přídavná stabilizaci při velkých průchozích prouděch. Počáteční hodnotu stabilizace je nastavena následovně.

$$\text{Slope section 3} = 100\%$$

Výsledná stabilizační charakteristika je ilustrována na Obrázek 19.



Obrázek 19 Nastavení stabilizační charakteristiky

Počáteční citlivost charakteristiky rozdílové ochrany lze nastavit podle Tabulka 13.

Tabulka 13 Nastavené body stabilizační charakteristiky

Values	Low operate value	Section 1	Section 2	Section 3	High operate value
I_d (% I_n)	30	30	115	—	900
I_b (% I_n)	—	50	200	—	—
Slope (%)	—	—	50	100	—

Rozdílová ochrana je dále schopna rozpoznat nárazový magnetizační proud při připojení transformátoru k síti, který může dosahovat hodnot $4 - 8I_n$, jehož hodnota bude postupně klesat až k ustálenému stavu danému sekundární zátěží. Pro tento proud je charakteristická vysoká hodnota druhé harmonické složky proto je ochrana vybavena blokovací funkcí při zapínání transformátoru. Pro nastavení blokovací funkce se využívá parametr I_{d2f}/I_{d1f} a obvykle vyhovuje základní nastavení od výrobce ochrany, tedy 20 %.

Další funkce, kterou je nutné zmínit je blokování při přepětí, kdy se zvyšující se hodnotou napětí zároveň dochází k nárůstu magnetizačního proudu a tím dochází k přesycení jádra transformátoru. Při tomto se sleduje úroveň páté harmonické a sleduje se poměr I_{d5f}/I_{d1f} v diferenciálním proudu. Výpočet je prováděn pro každou fázi samostatně. V rámci ochranné funkce je nastavena úroveň páté harmonické na 35 %, od které bude funkce blokovat a další vyšší úroveň, kde bude toto blokování zrušeno.

Ochrana pro měření využívá PTP. Jelikož se jejich převody na primární a sekundární straně obvykle velmi liší, je proto nezbytné provést jejich korekci. Požadavky na korekci se dále odvíjejí podle způsobu zapojení výkonového transformátoru, které uvádí příslušný výrobce ochrany. V tomto konkrétním případě pro zapojená YNy0(d) je vyžadována korekce PTP na primární i sekundární straně chráněného transformátoru.

- Korekce PTP 100/5/5 A na primární straně

$$CT \text{ ratio correction} = \frac{I_{n1,PTP}}{I_{nT1}} = \frac{100}{84} = 1,19$$

- Korekce PTP 400/5/5 A na sekundární straně

$$CT \text{ ratio correction} = \frac{I_{n1,PTP}}{I_{nT2}} = \frac{400}{402} = 0,995 \approx 1$$

Po provedené korekci PTP jsou naměřené hodnoty proudů a nastavené hodnoty v rozdílové ochraně vyjádřeny v násobcích jmenovitého proudu chráněného transformátoru $I_n(\times I_n)$ nebo v jeho procentní hodnotě $I_n(\%I_n)$. [22]

7.2 Nastavení nadproudové ochrany

Nadproudová ochrana plní funkci záložní ochrany. Ochranné funkce zahrnují nastavení pro nadproudovou ochranu při přetížení, zkratu a mžikovou, viz Tabulka 14. Dle požadavků na chránění transformátoru bude nastavena na primární straně dvoustupňová nadproudová ochrana při přetížení a zkratu a na straně sekundární nadproudová zkratová, která bude sloužit k chránění přípojníc. Výpočet nastavení je proveden dle [19].

Tabulka 14 Možnosti nastavení nadproudové ochrany [22]

Popis funkce	IEC 61850 identifikace	IEC 60617 identifikace	ANSI/IEEE C37.2 číslo zařízení
Nadproudová ochrana při přetížení, nízký stupeň	PHLPTOC	$3I >$	51P-1
Zkratová nadproudová ochrana, vysoký stupeň	PHHPTOC	$3I \gg$	51P-2
Mžiková nadproudová ochrana, okamžitý stupeň	PHIPTOC	$3I \gg \gg$	50P

Nadproudová ochrana transformátoru se obvykle nastavuje na dva stupně, a to nízký a vysoký. Nízký stupeň je nastavený na časově závislé charakteristice, zatímco vysoký stupeň má časově nezávislou charakteristiku, a ochrana zde vypíná mžikově. Ochrana je dále vybavena senzory pro detekci nárazového proudu při připojování transformátoru k síti, které násobí nastavenou hodnotu proudu tak, aby nedocházelo k falešnému působení ochrany.

- Nastavení nadproudové ochrany $3I >$ - nízký stupeň nadproudové ochrany chrání transformátor při přetížení, $1,2I_{NT1} = 100,8$ A, převod PTP 100/5/5 A:

$$I_r \geq \frac{k_b \cdot 1,2I_{NT}}{k_p \cdot p_{ptp}} = \frac{1,2 \cdot 100,8}{0,95 \cdot 20} = 5,93 \text{ A } (I_n \text{ ochrana}).$$

- Vstupní hodnotu pro ochranu je nutné převést na poměrné jednotky, kde $I_{n0} = 5$ A vyjadřuje vstupní proud ochrany:

$$\frac{I_s}{I_n} = \frac{I_r}{I_{n0}} = \frac{5,93}{5} = 1,19I_n.$$

- Vypínací čas ochrany je určen následovně pro poruchový proud $1,25I_n$:

$$t_{vyp} = \frac{k}{\left(\frac{I_p}{I_s}\right)^\alpha - 1} \cdot T_p = \frac{0,14}{\left(\frac{1,25}{1,19}\right)^{0,02} - 1} \cdot 1 = 142,33 \text{ s}.$$

Nastavení zkratové nadproudové ochrany $3I \gg$, kde vysoký stupeň ochranná funkce slouží pro vypínání zkratů a zároveň plní funkci záložní ochrany na sekundární straně transformátoru. Funkce je nastavena na průchozí zkrat I''_{Kmin} . Pro výpočet nastavení se vychází z hodnoty minimálního dvoufázového zkratu s uvažováním hodnoty napěťového součinitele $c = 1$ a s předpokladem $\bar{Z}_{celk}^{(1)} = \bar{Z}_{celk}^{(2)}$. Hodnota impedance je převzata z kapitoly 4.

$$I''_{Kmin22kV} = \frac{c \cdot U_n}{|2 \cdot Z_{celk}^{(1,2)}|} = \frac{1 \cdot 22 \cdot 10^3}{|2 \cdot (0,1674 + j3,934)|} = 2793,61 \text{ A}$$

- Výpočet průchozího zkratu na primární straně je určen jako:

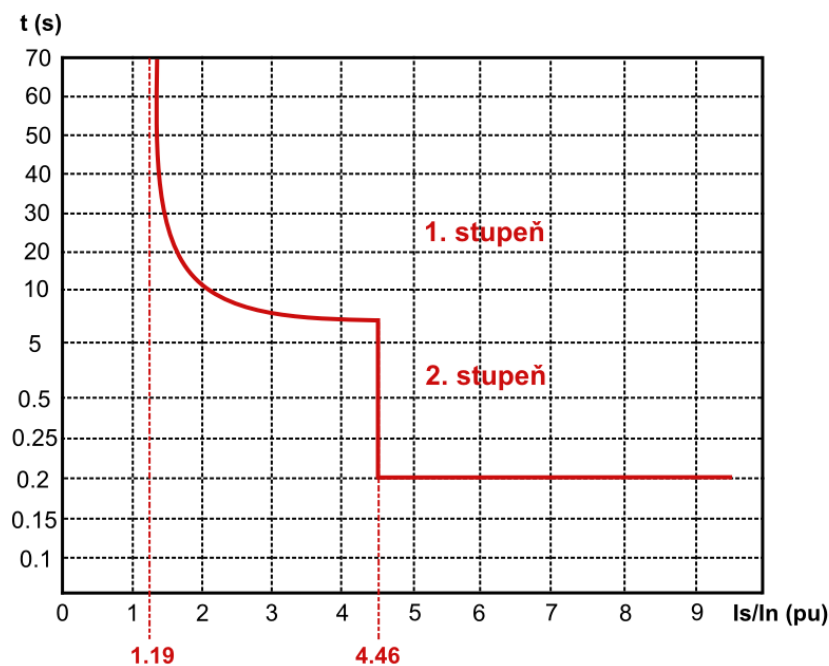
$$I''_{Kmin110kV} = I''_{Kmin22kV} \cdot \frac{U_V}{U_N} = 2793,61 \cdot \frac{22 \cdot 10^3}{110 \cdot 10^3} = 558,72 \text{ A}.$$

- Nastavení vstupní hodnoty pro ochranu na primární straně transformátoru 2.stupeň je následující:

$$I_r \leq \frac{I''_{Kmin110kV}}{k_c \cdot p_{ptp}} = \frac{558,72}{1,2 \cdot 20} = 23,28 \text{ A } (I_n \text{ ochrana}).$$

$$\frac{I_s}{I_n} = \frac{I_r}{I_{n0}} = \frac{23,28}{5} = 4,66I_n \quad t_k = 200 \text{ ms}$$

Charakteristika dvoustupňové nadproudové ochrany je ilustrována na Obrázek 20. základní nastavení $3I >$ a $3I \gg$ je uvedeno v následujících tabulkách.



Obrázek 20 Charakteristika dvoustupňové nadproudové ochrany

Nastavení dvoustupňové nadproudové ochrany na primární straně $3I >$ a $3I \gg$ je uvedeno v následujících tabulkách.

Tabulka 15 Nastavení nadproudové ochrany $3I >$ [22]

Parameter	Values (Range)	Unit	Default	Description
Start value	0.10-40.00	xIn	1.19	Start value
Start value Mult	0.8-10.0		1.0	Multiplier for scaling the start value
Time multiplier	0.025-15.0		1.000	Time multiplier in IEC/ANSI IDMT curves
Operating curve type	1=ANSI Ext. inv. 2=ANSI Very inv. 3=ANSI Norm. inv. 4=ANSI Mod. inv. 5=ANSI Def. Time 6=L.T.E. inv. 7=L.T.V. inv. 8=L.T. inv. 9=IEC Norm. inv. 10=IEC Very inv. 11=IEC inv. 12=IEC Ext. inv. 13=IEC S.T. inv. 14=IEC L.T. inv. 15=IEC Def. Time 17=Programmable 18=RI type 19=RD type 20=UK rectifier		9=IEC Normal inverse	Selection of time delay curve type

Tabulka 16 Nastavení nadproudové ochrany $3I \gg I$ na primární straně [22]

Parameter	Values (Range)	Unit	Default	Description
Start value	0.05-5.00	xIn	4.66	Start value
Start value Mult	0.8-10.0		1.0	Multiplier for scaling the start value
Time multiplier	0.025-15.0		1.000	Time multiplier in IEC/ANSI IDMT curves
Operate delay time	40-300000	ms	200	Operate delay time
Operating curve type	1=ANSI Ext. inv. 3=ANSI Norm. inv. 5=ANSI Def. Time 9=IEC Norm. inv. 10=IEC Very inv. 12=IEC Ext. inv. 15=IEC Def. Time 17=Programmable		15=IEC Def. Time	Selection of time delay curve type

Pro nastavení zkratové nadproudové ochrany $3I \gg I$ na sekundární straně je nutné určit impedanci kabelu, který je veden z vývodu transformátoru až do příslušné kobky v rozvodně. V rámci výpočtu se předpokládá, že zkrat se nachází na konci kabelu, tedy na přípojnicích. Parametry kabelu 22-AXEKVCEY jsou následující: $S = 240 \text{ mm}^2$, $R_k = 0,125 \text{ } \Omega/\text{km}$, $L_k = 0,36 \text{ mH/km}$, $l = 100 \text{ m}$.

- Výpočet impedance kabelu je určen jako:

$$\bar{Z}_{kab}^{(1,2)} = R_k \cdot l + j \cdot \omega \cdot L_k \cdot l = 0,125 \cdot 0,1 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,36 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1$$

$$\bar{Z}_{kab}^{(1,2)} = (0,012 + j0,011) \Omega$$

- Minimální dvoufázový zkratový proud na straně 22 kV je následující:

$$I''_{Kmin22kV} = \frac{c \cdot U_n}{|2 \cdot Z_{celk}^{(1,2)} + 2 \cdot Z_{kab}^{(1,2)}|} = \frac{1 \cdot 22 \cdot 10^3}{|2 \cdot (0,167 + j3,934) + 2 \cdot (0,012 + j0,011)|}$$

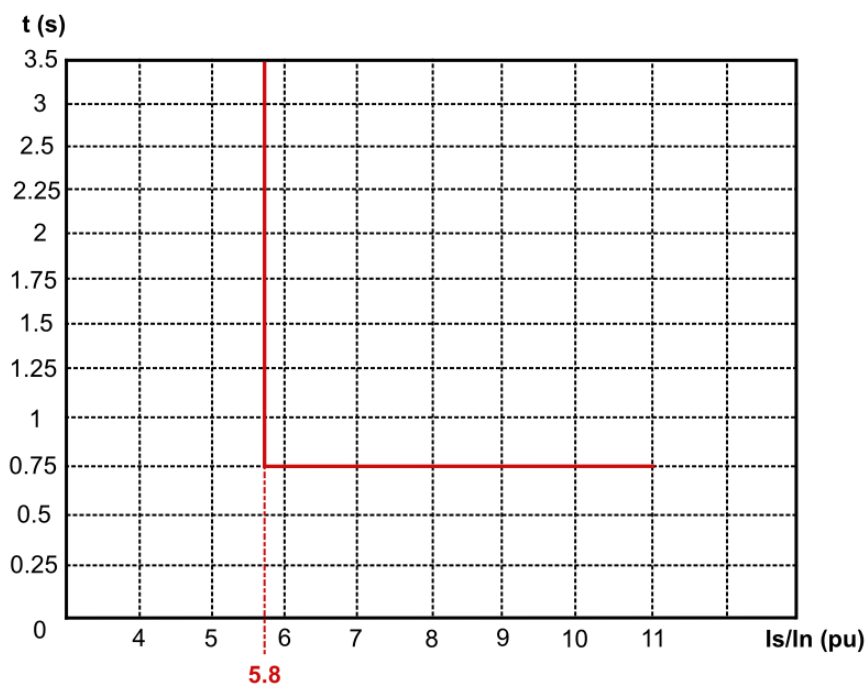
$$I''_{Kmin22kV} = 2785,47 \text{ A}$$

Nastavení vstupní hodnoty pro ochranu na sekundární straně transformátoru je určeno jako:

$$I_r \leq \frac{I''_{Kmin22kV}}{k_c \cdot p_{ptp}} = \frac{2785,47}{1,2 \cdot 80} = 29,02 \text{ A } (I_n \text{ ochrana})$$

$$\frac{I_S}{I_n} = \frac{I_r}{I_{n0}} = \frac{29,02}{5} = 5,8 I_n \quad t_k = 750 \text{ ms}$$

Charakteristika nezávislé nadproudové ochrany je uvedena na Obrázek 21.



Obrázek 21 Charakteristika zkratové nadproudové ochrany na straně 22kV

Nastavení nadproudové ochrany $3I \gg$ na sekundární straně je uvedeno v následující tabulce.

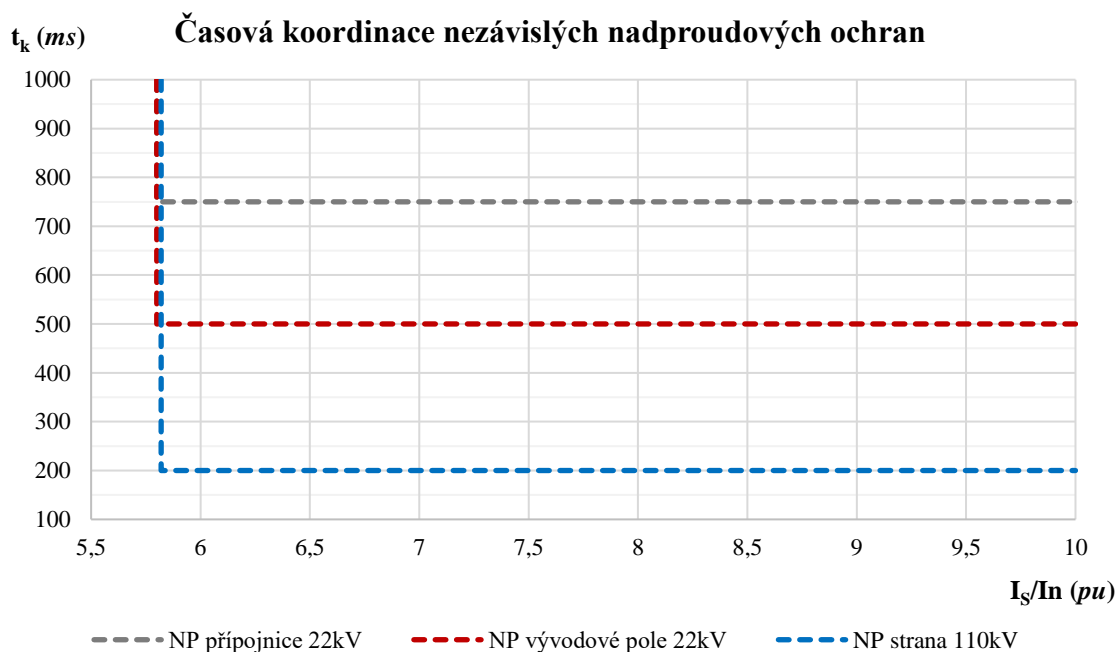
Tabulka 17 Nastavení nadproudové ochrany $3 \gg I$ na sekundární straně [22]

Parameter	Values (Range)	Unit	Default	Description
Start value	0.05-5.00	xIn	5.8	Start value
Start value Mult	0.8-10.0		1.0	Multiplier for scaling the start value
Time multiplier	0.025-15.0		1.000	Time multiplier in IEC/ANSI IDMT curves
Operate delay time	40-300000	ms	750	Operate delay time
Operating curve type	1=ANSI Ext. inv. 3=ANSI Norm. inv. 5=ANSI Def. Time 9=IEC Norm. inv. 10=IEC Very inv. 12=IEC Ext. inv. 15=IEC Def. Time 17=Programmable		15=IEC Def. Time	Selection of time delay curve type

Zkratové nadproudové ochrany na vývodových polích jsou časově odstupňované na $t_k = 500 \text{ ms}$. Kvůli selektivnímu působení ochrany a jejich vzájemné koordinaci, je zvolena delší časová prodleva této ochrany, tedy $t_k = 750 \text{ ms}$.

Vzhledem k malému rozdílu mezi popudovými hodnotami zkratových nadproudových ochran na primární a sekundární straně, způsobené zejména krátkou kabelovou trasou na vývodu výkonového transformátoru, která představuje ve zkratovém výpočtu zanedbatelnou impedanci, jsou mezi výslednými popudovými hodnotami zkratových proudů minimální rozdíly, jak je ilustrováno na Obrázek 22. Z tohoto důvodu je možné předpokládat, že pokud by nastal zkrat na přípojnicích, zapůsobila by na něj i nadproudová ochrana na primární straně, a to v kratším čase než ochrany na sekundární straně, které jsou navrženy pro tento účel. Proto je nutné přizpůsobit časovou koordinaci těchto ochran s ohledem na tuto situaci zavedením logické funkce na vývodech, kdy v případě zkratu na přípojnicích dojde k zablokování funkce ochrany na primární straně spolu s navýšením jejího času vybavení z 200 ms na 1 s. Tímto způsobem by měla být zajištěna selektivita působení zkratových nadproudových ochran.

Dalším možným řešením by mohlo být doplnění nadproudové ochrany na primární straně o funkci podpěťového odblokování pro zachování navrženého času. Tímto způsobem by ochrana vybavila v případě úbytku napětí způsobeného zkratem v místě jejího připojení, kdy by klesla hodnota napětí na nastavenou popudovou hodnotu. Nicméně, podobně jako v předchozím případě by se hodnota úbytku napětí příliš nelišila od úbytku napětí na sekundární straně při zkratu na přípojnicích ze stejného důvodu. Zde by navíc vybavila dříve distanční ochrana, která je pro tento scénář navržena. Významný úbytek napětí by nastal pouze tehdy, pokud by zkrat vznikl v jedné polovině impedance transformátoru a jednalo by se tedy o vnitřní zkrat. Avšak v této situaci by vybavila ochrana rozdílová, která je zálohována ochranou distanční.



Obrázek 22 Časová koordinace nezávislých nadproudových ochran

7.3 Nastavení distanční ochrany

Nízkoimpedanční ochrana je obecně využívána jako záložní ochrana pro chránění transformátorů při zkratech. Používá se zejména v situaci, kdy jsou vyžadovány delší vypínací časy kvůli zachování časové selektivity. Ochranná funkce je založena na principu kruhové charakteristiky impedanční roviny.

Výsledná hodnota impedance je vypočtena z naměřených fázových hodnot proudů a napětí získaných prostřednictvím PTP a PTN na straně vyššího napětí transformátoru. Pokud je velikost naměřeného proudu menší než $0,02I_n$, kde I_n představuje nominální proud, impedance se kvůli malé vstupní hodnotě proudu nevyhodnocuje a její hodnota je určena jako maximální. Pokud se vektorová hodnota impedance vyskytne v prostoru kruhové charakteristiky funkce vydá pokyn pro spuštění nastaveného časového intervalu, po jehož uplynutí dojde k zapůsobení ochrany. Při nastavení je uvažována $1,5Z_T$, aby ochrana působila i na odporové poruchy. Rozsah kruhové charakteristiky *Polar reach* je určen ze 150% hodnoty primární impedance transformátoru a nominální impedance ochrany. [22]

$$Z_{T110kV} = u_k \cdot \frac{U_N^2}{S_n} = 0,115 \cdot \frac{(110 \cdot 10^3)^2}{16 \cdot 10^6} = 86,97 \Omega$$

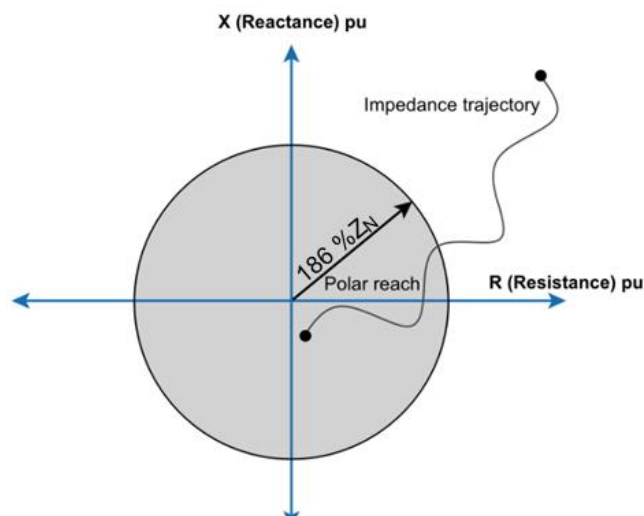
- Dále je vypočtena nominální impedance ochrany následovně:

$$Z_N = \frac{U_N^2}{\sqrt{3} \cdot I_{1n}} = \frac{110^2}{\sqrt{3} \cdot 100} = 69,86 \Omega$$

- Rozsah kruhové charakteristiky *Polar reach* se určení jako:

$$Polar\ reach = \frac{1,5 \cdot Z_{T110kV}}{Z_N} \cdot 100 = \frac{1,5 \cdot 86,97}{69,86} \cdot 100 = 186 \% Z_N, t_{vyp} = 1\ s$$

Výsledný rozsah kruhové charakteristiky slouží jako vstupní hodnota do programu PCM600 pro určení rozsahu výsledné kruhové charakteristiky, jak je ilustrováno na Obrázek 23.



Obrázek 23 Kruhová charakteristika nízkimpedanční ochrany [22]

Časové nastavení této ochrany je zvoleno s ohledem na selektivní působení a časovou koordinaci s nadproudovými ochranami na vývodech. Pro rychlejší čas působení by bylo nutné zvolit polygonální charakteristiku.

Další možností pro chránění transformátoru by mohla poskytnout i distanční ochrana, která se v současné době využívá pro chránění přívodního vedení. Z jejího nastavení, které je uvedeno v Tabulka 11 je patrné, že třetí zóna je nastavená na reverzní směr, tedy směrem k transformátoru. Nicméně, z časového odstupňování je zřejmé, že se s chráněním transformátoru nepočítá, protože nastavený čas je 6 s. Pokud by byl tento čas působení nastaven na nižší hodnotu dala by se tato distanční ochrana použít pro chránění transformátoru.

8 Testování charakteristik ochranných funkcí terminálu ABB řady REX640

Simulace nastavení ochranných funkcí je provedena v laboratoři prostřednictvím testovacího zařízení Omicron CMC 256plus, ochranného terminálu ABB řady REX640, programu PCM600 a stolního počítače.

Nastavení parametrů testovaného zařízení je provedeno v modulu QuickCMC v němž je možné otestovat nastavení pro všechny druhy ochranných funkcí. Nejprve je nutné zadat parametry testovaného zařízení, které v tomto případě bude představovat přístrojový transformátor proudu na primární straně chráněného transformátoru. Mezi důležité parametry, které je nutné nakonfigurovat, patří hodnota napětí na primární straně transformátoru a jmenovitý převod PTP. Dále se stanovuje citlivost detekce přetížení, kde pro digitální ochrany je vhodné zvolit vysoký stupeň citlivosti. Nakonec se zvolí požadované limitní hodnoty a je možné také doplnit informace o testovaném zařízení. Výsledné nastavení je zobrazeno na Obrázek 24.

The screenshot shows the 'Nastavení zařízení' (Device Settings) window in the QuickCMC software. The interface is organized into several panels:

- Zařízení (Device):**
 - Název/popis: PTP
 - Výrobce: Pfiffner
 - Typ zařízení: JOF 123
 - Adresa zařízení:
 - Výrobní číslo/model:
 - Doplňující informace 1:
 - Doplňující informace 2:
- Jmenovité hodnoty (Rated values):**
 - Počet fází: 2 (radio button), 3 (radio button, selected)
 - f nom: 50,000 Hz
 - Primární (Primary):
 - v: 110,000 kV (L-L)
 - 63,509 kV (L-N)
 - Sekundární (Secondary):
 - v: 100,000 V (L-L)
 - 57,735 V (L-N)
 - I jmen.: 100,000 A (Primary), 5,000 A (Secondary)
- Zbytkové napětí a proud (Residual voltage and current):**
 - Směr zbytkového napětí: 3 * V0
 - Směr zbytkového proudu: -3 * I0
 - Přístrojová transformátory
 - VN: 63,509 kV (Primary), 57,735 V (Secondary)
 - IN: 100,000 A (Primary), 5,000 A (Secondary)
- Jiné vlastnosti zařízení (Other device properties):**
 - Čas rozpojení: 20,000 ms
 - Limity:
 - V max: 500,000 V (L-L)
 - I max: 1,000 kA
 - Citlivost detekce přetížení:
 - Vysoký
 - Vlastní
 - Nizký
 - Vypnuto
 - Filtry eliminace odrazu a rušení:
 - Čas eliminace odrazu: 3,000 ms
 - Čas eliminace rušení: 0,000 s
- Rozvodna (Substation):**
 - Název: TNS Vraňany
 - Adresa:
- Pole (Field):**
 - Název:
 - Adresa:

Buttons at the bottom: OK, Storno, Nápověda.

Obrázek 24 Nastavené parametry testovaného zařízení v modulu QuickCMC

Dalším krokem je konfigurace hardwaru, ve kterém je nezbytné provést nastavení proudových a napěťových snímačů spolu s jejich výstupy, jak je uvedeno na Obrázek 25 a Obrázek 26.

Konfigurace simulace snímače proudu

Výstup nízké úrovně: LL out 1-3 Použít korekční koeficienty

Zobrazená hodnota (RMS): 5,00 A

Výstupní hodnota (RMS): 150,00 mV

Typ snímače: Rogowski

Dynamický rozsah: Velký rozsah

OK Storno Odstranit Nápověda

Obrázek 25 Parametry snímače proudu v modulu QuickCMC

Konfigurace simulace snímače napětí

Výstup nízké úrovně: LL out 4-6 Použít korekční koeficienty

Zobrazená hodnota (RMS): 100,00 V

Výstupní hodnota (RMS): 5,50 V

OK Storno Odstranit Nápověda

Obrázek 26 Parametry snímače napětí v modulu QuickCMC

Nastavení parametrů jednotlivých ochranných funkcí je provedeno v programu PCM600, který je speciálně určený pro konfiguraci terminálu REX640. V rámci tohoto programu jsou nastaveny komunikační protokoly, logika jednotlivých ochranných funkcí a jejich parametry. Tyto parametry jsou následně nahrány do terminálu REX640 a zároveň se uloží i do programu Test universe. Jelikož je možné v modulu QuickCMC vykreslit pouze vektorový diagram nikoliv charakteristiky jednotlivých funkcí, tak pomocí tohoto modulu budou testovány zatím pouze vypínací časy. Nastavení charakteristik funkcí bude testováno prostřednictvím testovacích modulů, které jsou na jednotlivé ochranné funkce zaměřené. Nastavení parametrů ochranných funkcí vychází z přechozích výpočtů nastavení. Zadané parametry v programu PCM600 jsou následující.

✓	PHLPTOC1: 1				
✓	3I>(1)				
✓	Operation	on			
✓	Num of start phases	1 out of 3			
✓	Setting Group 1		<input checked="" type="checkbox"/>		
✓	Start value	1,19	xIn	0,05	5,00
✓	Start value Mult	1,0		0,8	10,0
✓	Time multiplier	1,000		0,025	15,000
✓	Operating curve typ	IEC Norm. inv.			

Obrázek 27 Nastavení parametrů funkce PHLPTOC na straně 110 kV v PCM600

✓	PHHPTOC1: 1				
✓	3I>>(1)				
✓	Operation	on			
✓	Num of start phases	1 out of 3			
✓	Setting Group 1		<input checked="" type="checkbox"/>		
✓	Start value	4,66	xIn	0,10	40,00
✓	Start value Mult	1,0		0,8	10,0
✓	Operate delay time	200	ms	40	300000
✓	Operating curve typ	IEC Def. Time			

Obrázek 28 Nastavení parametrů funkce PHHPTOC na straně v PCM600

✓	PHHPTOC1: 1				
✓	3I>>(1)				
✓	Operation	on			
✓	Num of start phases	1 out of 3			
✓	Setting Group 1		<input checked="" type="checkbox"/>		
✓	Start value	5,80	xIn	0,10	40,00
✓	Start value Mult	1,0		0,8	10,0
✓	Operate delay time	750	ms	40	300000
✓	Operating curve typ	IEC Def. Time			

Obrázek 29 Nastavení parametrů funkce PHHPTOC na straně 22 kV v PCM600

✓	Impedance protection				
✓	UZPDIS1: 1				
✓	Z<G(1)				
✓	Operation	on			
✓	Measurement mode	DFT			
✓	Impedance Meas mod	3Phase-to-phase			
✓	Setting Group 1		<input checked="" type="checkbox"/>		
✓	Polar reach	186	%Zn	1	6000
✓	Operate delay time	1000	ms	40	200000

Obrázek 30 Nastavení parametrů funkce UZPDIS na straně 110 kV v PCM600

✓	Differential prot				
✓	TR2PTDF1: 1				
✓	3dl>T(1)				
✓	Operation	on			
✓	CT connection type	Type 2			
✓	Winding 1 type	YN			
✓	Winding 2 type	y			
✓	Clock number	Clk Num 0			
✓	Zro A elimination	Winding 1 and 2			
✓	CT ratio Cor Wnd 1	1,19		0,40	4,00
✓	CT ratio Cor Wnd 2	1,00		0,40	4,00
✓	Setting Group 1		☑		
✓	High operate value	900	%I _r	500	3000
✓	Low operate value	30	%I _r	5	50
✓	Slope section 2	50	%	10	50
✓	End section 2	115	%I _r	100	500
✓	Restraint mode	Waveform			

Obrázek 31 Nastavení funkce TR2PTDF

8.1 Testování charakteristik nadproudové ochrany

Cílem testování charakteristik nadproudové ochrany je ověřit, zda vypočtené časy pro různé hodnoty poruchového proudu odpovídají časům naměřeným. Nastavení nadproudové ochrany při přetížení vychází z předešlých výpočtů a je zadáno do nastavení programu PCM600 a následně nahráno do ochranného terminálu, viz Obrázek 27. Samotný test je proveden prostřednictvím modulu QuickCMC, ve kterém byla velikost proudu postupně zvyšována v intervalu $0,1I_n$ ve všech fázích až do popudové hodnoty druhého stupně nadproudové ochrany, viz Obrázek 32.

Náhled testu: Test_Nadproudova-ochrana

Analogové výstupy

Nastavit režim: Přímý

V L1-E	1,000 Vn	0,00 °	1,000 fn
V L2-E	1,000 Vn	-120,00 °	1,000 fn
V L3-E	1,000 Vn	120,00 °	1,000 fn
I L1	1,250 In	0,00 °	1,000 fn
I L2	1,250 In	-120,00 °	1,000 fn
I L3	1,250 In	120,00 °	1,000 fn

Analogové vstupy

V ss: nelze I ss: nelze

Binární výstupy

1 Bin. výstup 1	☑
2 Bin. výstup 2	☑
3 Bin. výstup 3	☑
4 Bin. výstup 4	☑

Zapnout trigger

Vypnout Zpoždění:

Binární vstupy / Aktivační signál

Vypnutí 141,7 s

Popud 35,30 ms

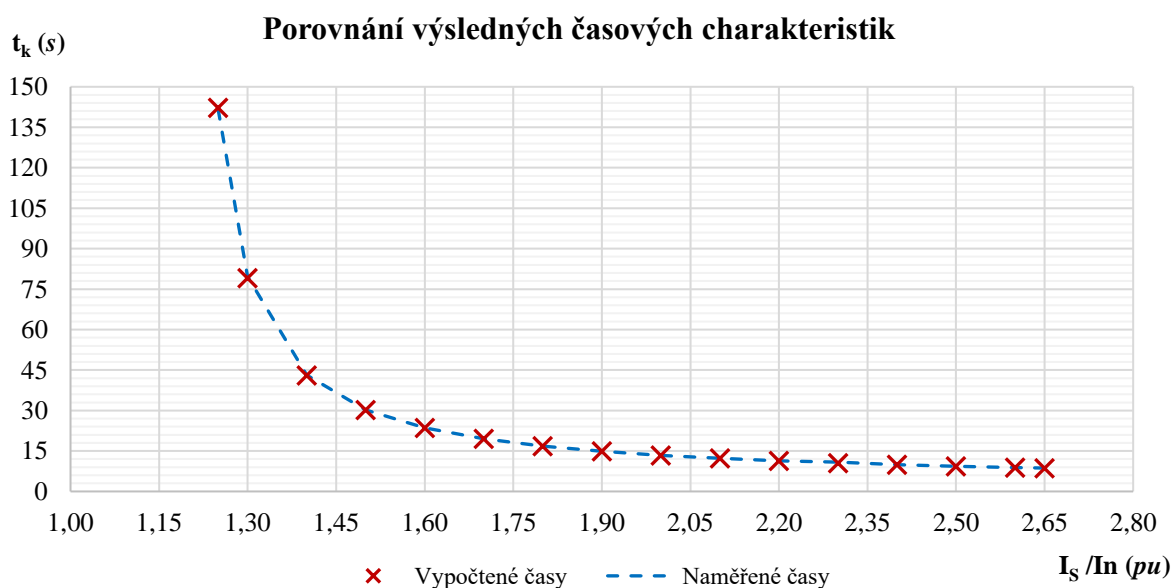
Obrázek 32 Testování charakteristik 1.stupně nadproudové ochrany v modulu QuickCMC

Naměřené časy ochranou byly zaznamenány a následně porovnány s vypočtenými. Vypočtené časy pro jednotlivé násobky poruchového proudu vycházejí ze vztahu viz kapitola 7.2. Pro první stupeň nadproudové ochrany jsou výsledné časy zobrazeny v Tabulka 18 a graficky zobrazeny v Obrázek 33.

Tabulka 18 Naměřené a vypočtené časy 1.stupně nadproudové ochrany

I_s (pu)	$t_{skutečný}$ (s)	$t_{vypočtený}$ (s)	t_{popud} (ms)
1,25	141,70	142,23	35,3
1,3	79,74	79,12	35,7
1,4	43,13	43	32,5
1,5	30,20	30,17	32,4
1,6	23,59	23,57	33,6
1,7	19,55	19,56	30,7
1,8	16,84	16,85	30,7
1,9	14,88	14,89	28,5
2,0	13,41	13,4	29,1
2,1	12,26	12,25	28,9
2,2	11,32	11,32	28,3
2,3	10,93	10,55	29,8
2,4	9,92	9,91	28,5
2,5	9,37	9,34	25,9
2,6	8,89	8,89	28,5
2,65	8,67	8,67	24,5

Výsledné časy jsou porovnány v následujícím grafu.



Obrázek 33 Porovnání výsledných charakteristik 1.stupně nadproudové ochrany

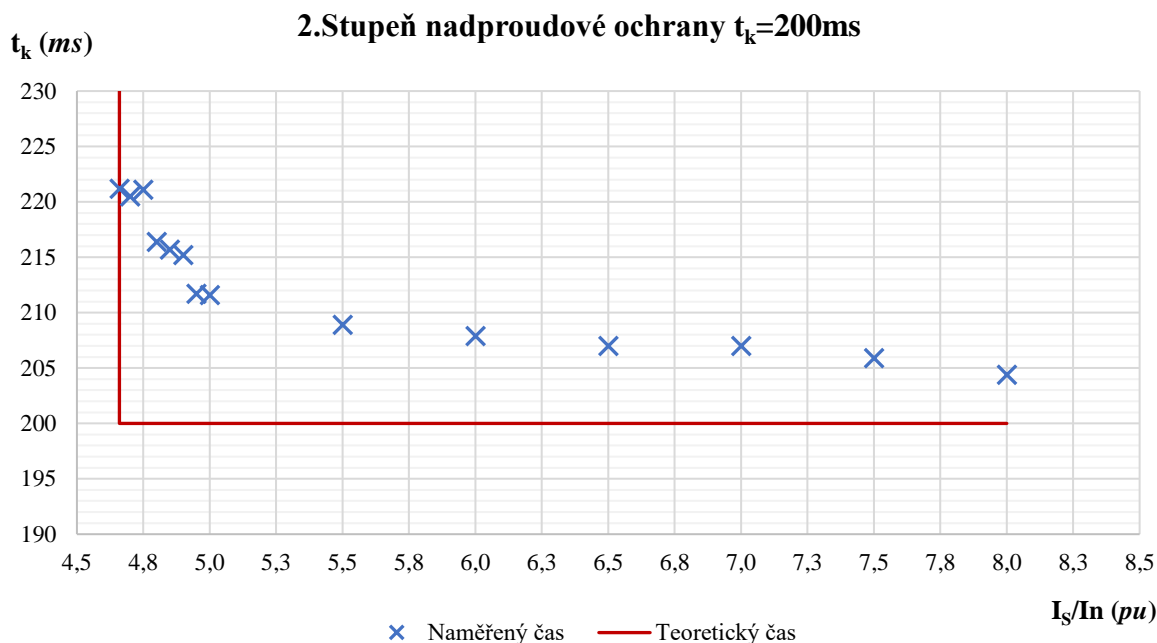
Z výsledných hodnot je patrné, že vypočtené časy se v porovnání s naměřenými příliš neliší. Z toho lze usoudit, že teoretická vypínací charakteristika je velmi přesná s minimálními rozdíly oproti skutečné. Druhý stupeň nadproudové charakteristiky je měřen obdobně jako první. Rozdíl je pouze v počáteční popudové hodnotě, která je zvolena na základě výpočtu nastavení.

V tomto případě není nutné teoretický vypínací čas počítat, protože je dán konstantní hodnotou, která byla navržena na $t_k = 200$ ms, viz Obrázek 34. Naměřené časy jsou shrnuty v následující tabulce.

Tabulka 19 Naměřené časy 2.stupně nadproudové ochrany

Is/In (pu)	$t_{skutečný}$ (ms)	$t_{teoretický}$ (ms)	t_{popud} (ms)
4,66	221,2	200	26,3
4,70	220,5	200	25,9
4,75	221,1	200	26,3
4,80	216,4	200	26,6
4,85	215,7	200	26
4,90	215,2	200	25,6
4,95	211,7	200	22,4
5,00	211,6	200	22,1
5,50	208,9	200	24,2
6,00	207,9	200	23
6,50	207,0	200	22,4
7,00	207,0	200	22,3
7,50	205,9	200	21,2
8,00	204,4	200	19,8

Dále jsou naměřené a teoretické časy porovnány v následujícím grafu.



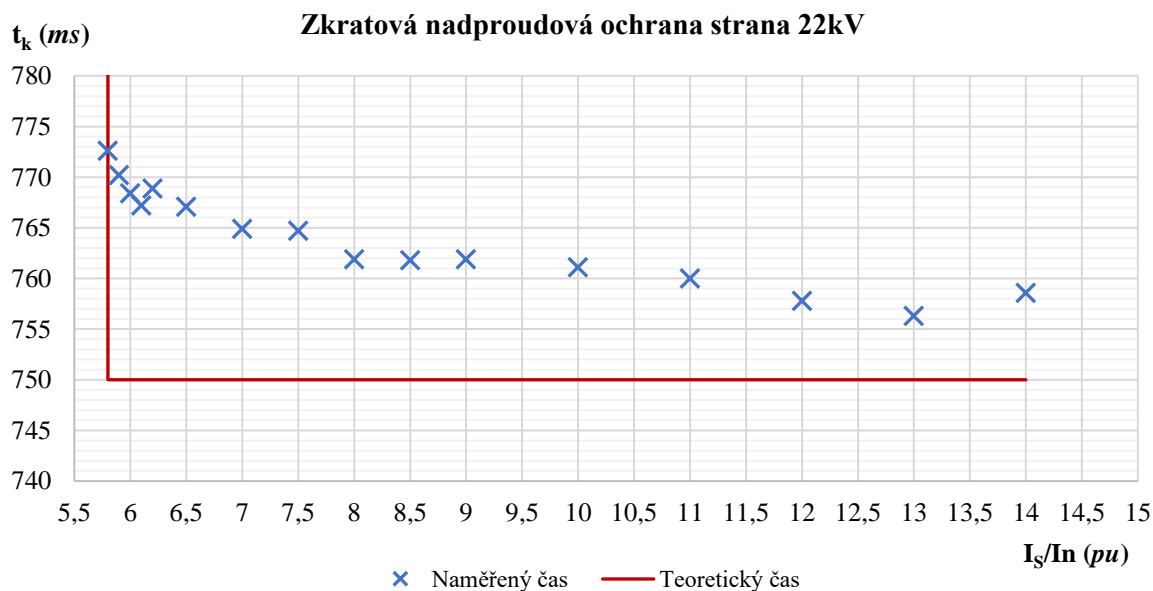
Obrázek 34 Porovnání výsledných charakteristik 2.stupně nadproudové ochrany

Z výsledných naměřených hodnot je zřejmé, že neodpovídají teoretickému času. Tato odchylka je s největší pravděpodobností způsobena zhoršenou citlivostí samotného ochranného terminálu, kterou má při působení v okolí popudové hodnoty. Zhoršená citlivost se projevuje časovým zpožděním, které je nejvýraznější v okolí $4,66 - 5,0I_n$ poruchových proudů v časovém rozmezí 215 – 221 ms. Nicméně, nejrychleji ochrana vybavila v oblasti $5,5 - 8I_n$ poruchových proudů, a to v časovém intervalu 204 – 207 ms. Z toho vyplývá, že citlivost ochrany v této oblasti je vyšší než v okolí popudové hodnoty. Časové zpoždění při působení ochrany je nutné zahrnout do návrhu nastavení funkce nadproudové ochrany a uvést tuto skutečnost v projektové dokumentaci.

Na závěr se ověřila časová charakteristika zkratové nadproudové ochrany na napěťové hladině 22kV určená pro chránění přípojnic. Zde byla počáteční popudová hodnota rovna $5,8I_n$ poruchového proudu s navrženým vypínacím časem 750 ms, viz Obrázek 35. Naměřené hodnoty jsou zobrazeny v následující tabulce a porovnány graficky, viz Tabulka 20.

Tabulka 20 Naměřené časy zkratové nadproudové ochrany na straně 22kV

I_s (pu)	$t_{skutečný}$ (ms)	$t_{teoretický}$ (ms)	t_{popud} (ms)
5,8	772,6	750	22,6
5,9	770,2	750	25,5
6	768,4	750	23,7
6,1	767,2	750	22,6
6,2	768,9	750	24,2
6,5	767,1	750	22,3
7	764,9	750	25,1
7,5	764,7	750	24,9
8	761,9	750	22,1
8,5	761,8	750	22,1
9	761,9	750	22
10	761,1	750	21,3
11	760	750	20,3
12	757,8	750	23
13	756,3	750	21,5
14	758,6	750	18,8



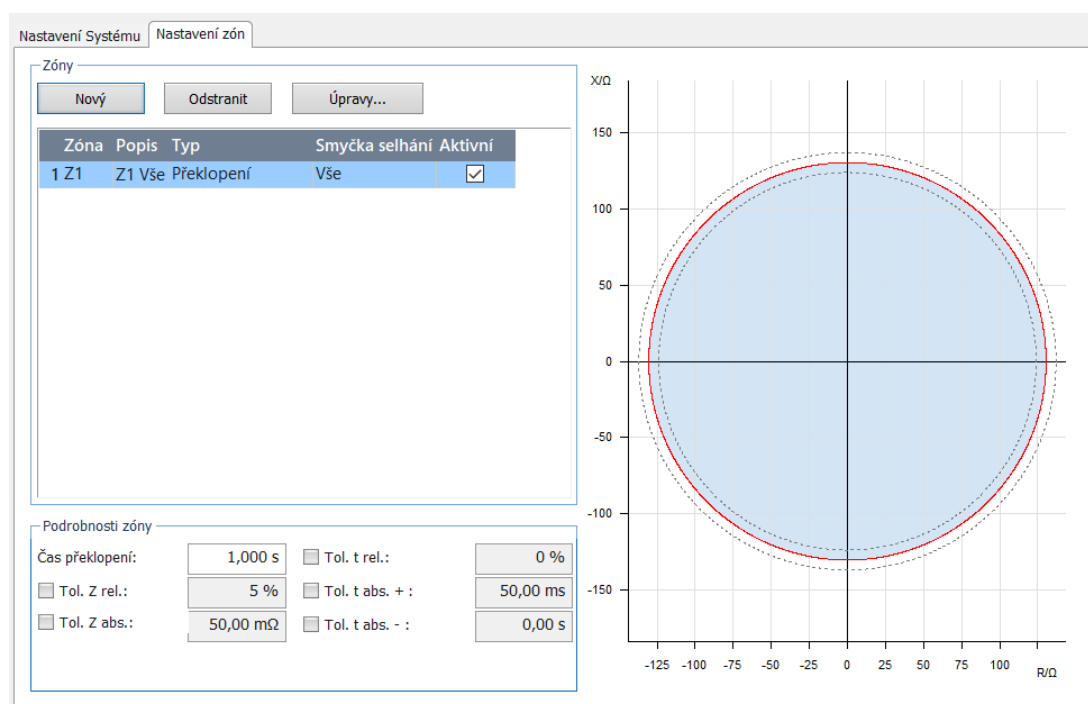
Obrázek 35 Porovnání výsledných charakteristik zkratové nadproudové ochrany na straně 22kV

Obdobně jako v předchozím případě výsledné časy nejsou v souladu s předpokládaným teoretickým časem. V tomto případě se nejdelší časová prodleva vyskytuje v oblasti 5,8 – 6,5 I_n poruchového proudu, tedy stejně jako v předchozím případě v okolí popudové hodnoty. Naopak nejrychleji reaguje ochranný terminál při 11 – 14 I_n a to v čase 756,3 ms, což je důkazem vysoké citlivosti ochranného terminálu v této oblasti.

8.2 Testování charakteristiky distanční ochrany

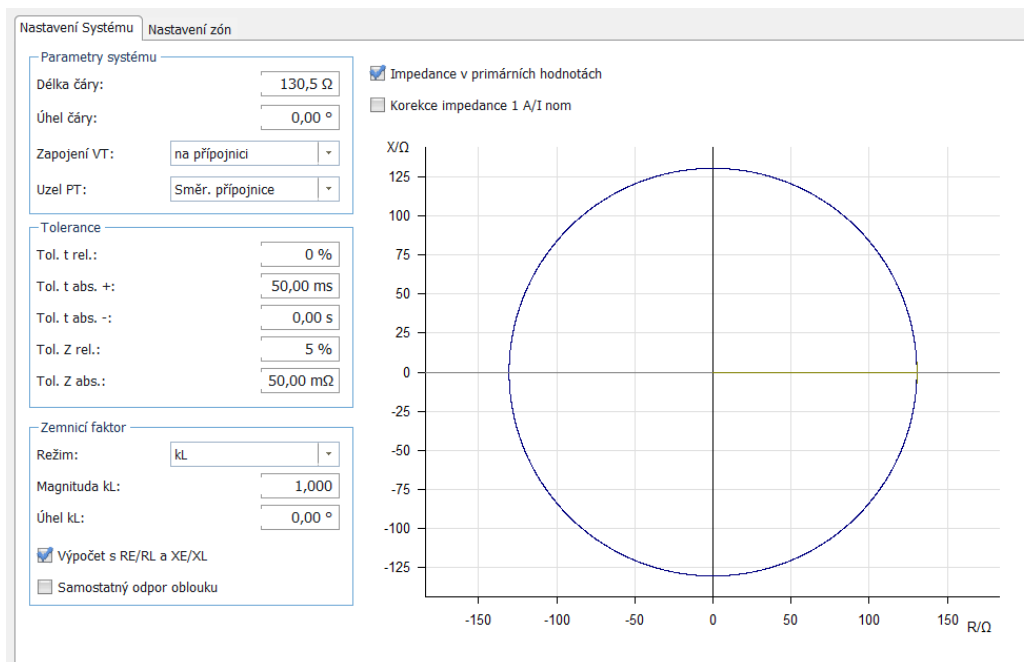
Testování správné funkce distanční ochrany je provedeno na základě bodového testu. V rámci bodového testu jsou rozmístěny jednotlivé body do oblasti chráněné zóny charakteristiky i mimo ni. Cílem bodového testu je ověřit, zda ochrana vybaví, poklesne-li impedance chráněného transformátoru do oblasti kruhové charakteristiky. Výsledná hodnota impedance zvolených bodů je vyhodnocena ochranou na základě jejich umístění v charakteristice.

Charakteristiku distanční ochrany lze definovat v nastavení „Objekt testu“ zvolením možnosti „Distance“ a následně „Nastavení zón“, kde je vybrán požadovaný tvar charakteristiky a čas působení, viz Obrázek 36.



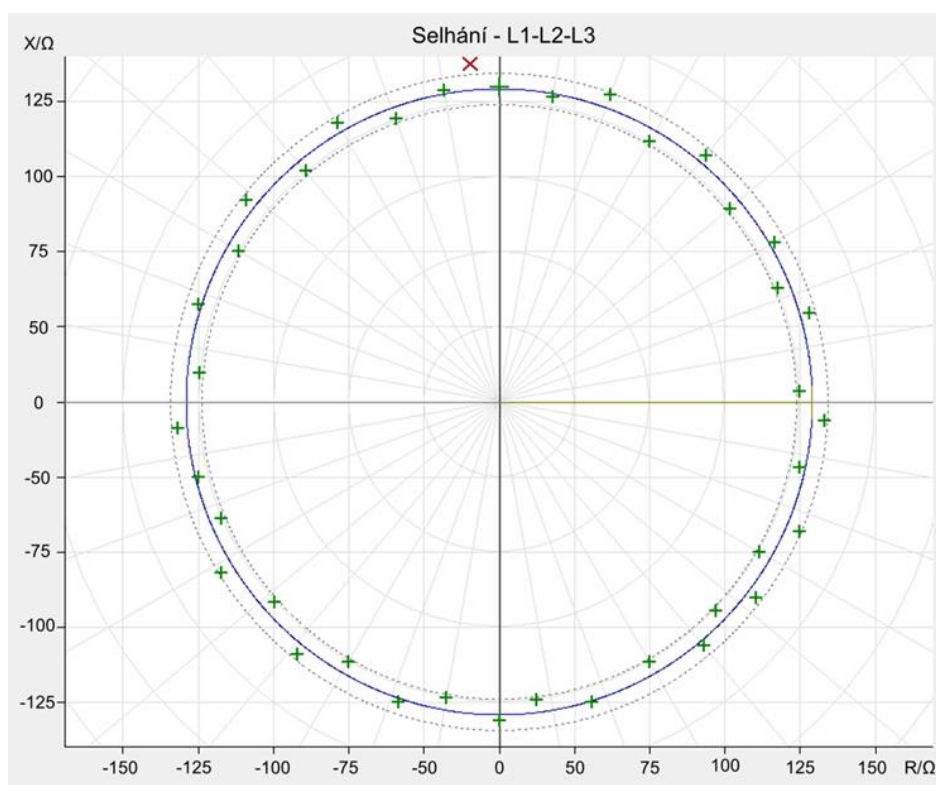
Obrázek 36 Nastavení tvaru kruhové charakteristiky

V sekci „Nastavení systému“ jsou doplněny další parametry charakteristiky spolu s její toleranční oblastí. V rámci nastavení je zadána 150% hodnota impedance transformátoru na primární straně, jak je uvedeno na Obrázek 37. Tato hodnota vychází z předešlého výpočtu nastavení distanční ochrany v kapitole 7.3. Tento způsob nastavení je vhodný pro měření třífázových zkratů, ale pro měření jednofázových a mezifázových zkratů je nutné přepnout nastavení měření na mód „1Phase-to-phase“ v programu PCM600. Po vytvoření kruhové charakteristiky je zvolen model testu, kterým je v tomto případě konstantní testovací proud o hodnotě 10 A. Typ selhání je zvolen „Náhodně“, aby se podmínky testování co nejvíce přiblížily reálným podmínkám sítě. Na závěr je nutné nastavit v sekci „Aktivační signál“ vypínací logiku na logickou funkci OR a u binárního vstupu pro vypnutí přepnout na stav 1 pro jeho aktivaci.



Obrázek 37 Nastavení toleranční oblasti kruhové charakteristiky

Jednotlivé body jsou zpracovány ochranným relé podle výchozího nastavení ochranné funkce a jejich vyhodnocení je provedeno automaticky. Výsledky jsou zobrazeny graficky v kruhové charakteristice pro třífázové, mezifázové a jednofázové poruchy, spolu se souhrnným vyhodnocením jednotlivých bodů v tabulkách. Výsledek měření bodového testu pro třífázovou poruchu je uveden ve výsledné kruhové charakteristice, viz Obrázek 38. Výsledné hodnoty pro jednotlivé typy poruch jsou shrnuty v příloze B na straně 83.



Obrázek 38 Kruhová charakteristika pro třífázové zkraty typu L1-L2-L3

Z výsledků bodového testu vyplývá, že ochranný terminál ve všech případech vybavil dle očekávání pouze s menšími odchylkami ve vypínacích časech. Největší odchylka mezi předpokládanou dobou vypnutí a skutečnou dobou vypnutí se vyskytla u jednofázového zkratu a to 12,8% u bodu s impedancí $\bar{Z} = (129,0 \angle 80^\circ)\Omega$. Tento bod se již nachází na hranici toleranční zóny, tudíž tato odchylka mohla být způsobena zhoršenou citlivostí ochrany v této oblasti. Oproti tomu se u třífázového zkratu projevila největší časová odchylka 6,8%, což je ve výsledném zhodnocení shledáno jako zanedbatelná odchylka. Z výsledných hodnot časových odchylek lze tedy usoudit, že ochrana vyhodnotila všechny testované body, které se nacházely v oblasti kruhové charakteristiky nebo v čase toleranční oblasti, s velmi vysokým stupněm citlivosti v časech blízkých předpokládané době vypnutí. V rámci testování byly v charakteristice rozmístěny i body, které se nacházely mimo chráněnou zónu a cílem bylo zjistit, zda na ně ochrana nebude působit falešně. V tomto případě ochrana správně vyhodnotila body nacházející se mimo chráněnou zónu a nevybavila. Celkový test lze tedy považovat za úspěšný.

8.3 Testování charakteristiky rozdílové ochrany

Testování funkce rozdílové ochrany je provedeno formou bodového testu podobně jako v případě distanční ochrany s tím rozdílem, že souřadnice jednotlivých bodů v charakteristice jsou dány poměrem hodnot I_{dif}/I_{bias} . Test je realizován v modulu „Diff operating characteristic“ v němž je otestována nastavená stabilizační charakteristika ochrany a její stabilita při vnějších poruchách. V průběhu měření jsou vyhodnoceny časy působení při různých rozdílových proudech, které jsou následně porovnány s referenčním časem ochranného terminálu. Nastavení ochranné funkce v PCM600 je uvedeno na Obrázek 31.

V rámci nastavení testovacího modulu je vyžadována řada vstupních parametrů zaměřených na informace o chráněném zařízení, PTP, ochranném terminálu, stabilizační charakteristice a harmonických. Za chráněný objekt je vybrán výkonový transformátor a jsou zadány požadované parametry. Po zadání parametrů jsou automaticky vypočteny jmenovité proudy transformátoru na primární a sekundární straně. Dále jsou vyžadovány údaje o jmenovitých převodech PTP na primární a sekundární straně chráněného transformátoru. Hodnoty druhé a páté harmonické vycházejí z původního nastavení od výrobce ochrany, které se považuje za zcela dostačující. Tato nastavení jsou shrnuta v příloze C na straně 90. Samotné nastavení související s ochranným terminálem a stabilizační charakteristikou vychází s předešlého výpočtu nastavení ochranné funkce v kapitole 7.1. Zde je zvolena nulová tolerance v oblasti proudu a času s důrazem na požadavek vysoké selektivity a citlivosti rozdílové ochrany. Vypínací časy základního $I_d >$ a vysokého stupně $I_d \gg$ ochrany jsou nastaveny na 0 s vzhledem k požadavku na mžikové působení ochrany, viz Obrázek 39. Jednotlivé body zlomu jsou zadány pro vykreslení stabilizační charakteristiky, viz Obrázek 40. Dále je automaticky vypočten i sklon individuálních oblastí charakteristiky.

Chráněný objekt PT Ochranné zařízení Definice charakteristiky Harmonická

Výpočet I_{bias} $(|I_p| + |I_s|) / K1$

Koeficient K1 = 2,00

Není kombinovaná charakteristika

Referenční vinutí Primární

Referenční proud Jmenovitý proud chráněného objektu Jmenovitý proud proudového transformátoru

Nastavení času testu / Model transformátoru
 Test Max: 1,500 s
 Zpoždění: 0,250 s

Eliminace netočivé složky IL - IO žádný Mezitransformátor YD Mezitransformátor YDY

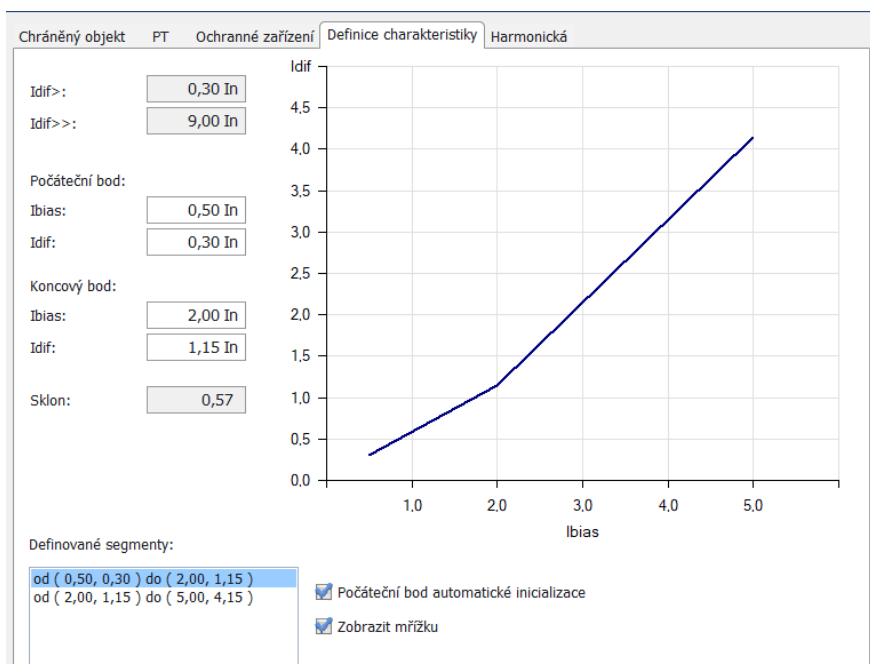
Nastavení dif. proudu
 Idif> 0,30 In
 Idif>> 9,00 In

Nastavení dif. času
 tdif> 0,000 s
 tdif>> 0,000 s

Tolerance proudu:
 relativní: 0,00 %
 absolutní: 0,00 In

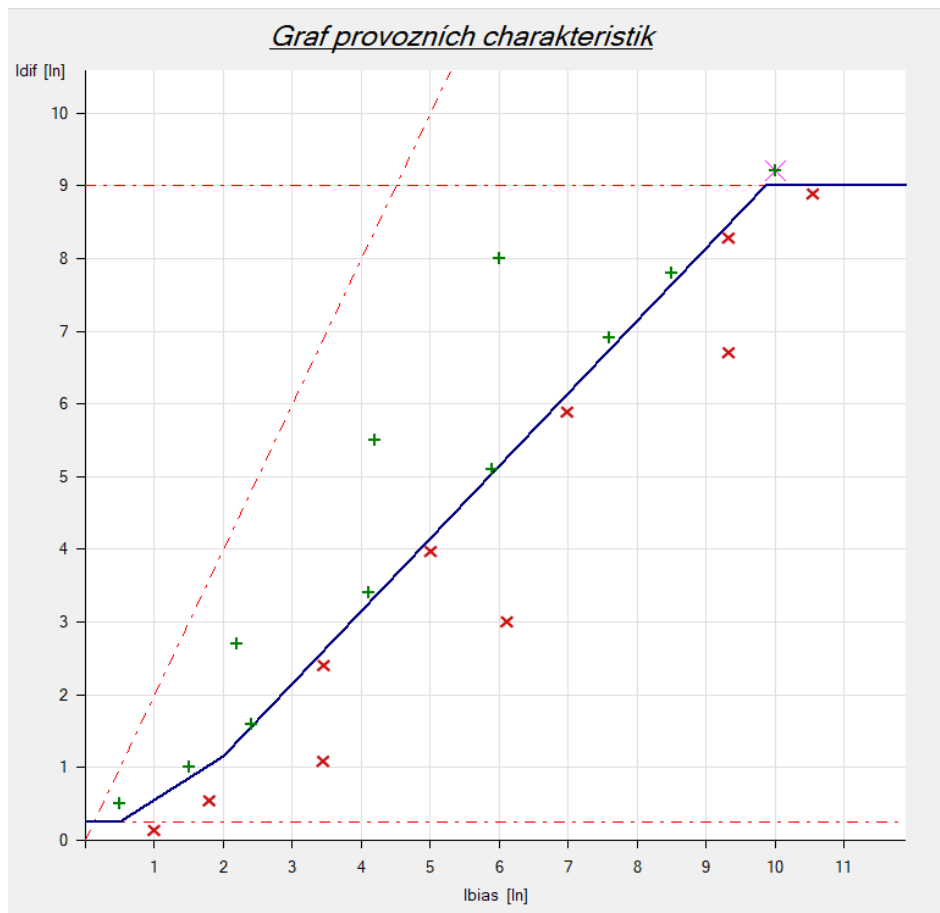
Tolerance času:
 relativní: 0,00 %
 absolutní: 0,000 s

Obrázek 39 Nastavení parametrů ochranného terminálu



Obrázek 40 Nastavení parametrů stabilizační charakteristiky

Testovací body jsou rozmístěny v okolí stabilizační charakteristiky v chráněné zóně i mimo ni. Cílem testu je ověřit, zda ochranný terminál dokáže správně rozlišit mezi vnější a vnitřní poruchou podle změřené hodnoty rozdílového proudu. Výsledky jsou zobrazeny graficky na Obrázek 41 v testované charakteristice rozdílové ochrany spolu s vyhodnocením výsledných hodnot rozdílového a stabilizačního proudu pro jednotlivé body v Tabulka 21.



Obrázek 41 Výsledná stabilizační charakteristika

Tabulka 21 Výsledné hodnoty bodového testu rozdílové ochrany

I_{dif} (A)	I_{bias} (A)	$t_{skutečný}$ (s)	$t_{teoretický}$ (s)
0,5I _n	0,5I _n	0,041	0,0
0,2I _n	1,0I _n	0,04	-
1,0I _n	1,5I _n	0,039	0,0
0,7I _n	1,8I _n	0,037	-
1,6I _n	2,4I _n	0,038	0,0
1,1I _n	3,4I _n	0,036	-
2,7I _n	2,2I _n	0,035	0,0
2,4I _n	3,4I _n	0,037	-
3,4I _n	4,1I _n	0,037	0,0
3,0I _n	6,1I _n	0,024	-
4,0I _n	5,0I _n	0,028	-
5,5I _n	4,2I _n	0,035	0,0
5,1I _n	5,9I _n	0,023	0,0
5,9I _n	6,9I _n	0,022	-
8,0I _n	6,0I _n	0,024	0,0
6,9I _n	7,6I _n	0,023	0,0
6,7I _n	9,3I _n	0,02	-
7,8I _n	8,5I _n	0,022	0,0
8,3I _n	9,3I _n	0,021	-
9,2I _n	10,0I _n	0,02	0,0
8,9I _n	10,6I _n	0,02	-

Z výsledku měření vyplývá, že ochranný terminál ve všech případech správně vyhodnotil všechny body umístěné v stabilizační charakteristice rozdílové ochrany s vysokou mírou citlivosti. Ochranný terminál vybavil pouze v případech, kdy se body nacházely v definované chráněné zóně. Z toho lze usoudit, že ochrana splnila požadavek na selektivní působení při rozlišení mezi poruchou vnitřní a vnější. Nejdelší naměřený vypínací čas byl v porovnání s referenčním zjištěn v první oblasti stabilizační charakteristiky a to 41 ms. Tato časová odchylka je ale z hlediska porovnání s nastaveným časem více než přijatelná. Lze tedy konstatovat, že ochranný terminál uspokojil veškeré požadavky na spolehlivé a selektivní působení při vnitřních i vnějších poruchách a reagoval s velmi vysokou mírou citlivosti. Celkový test lze tedy považovat za úspěšný.

9 Ekonomické posouzení výměny ochran

V předchozích kapitolách již byly zmíněny další nutné investice, které jsou spojené s výměnou výkonových transformátorů v TNS Vraňany. Mezi hlavní investice se řadí výměna přístrojových transformátorů proudu v rozvodně 110 kV a 22 kV, jenž nesplňují nutná kritéria pro jejich správnou funkci vzhledem k instalaci nových zařízení a systému chránění. Současný stav kabeláže určený pro systém chránění a přístrojové transformátory proudu sice nevykazuje špatný stav, nicméně během manipulace by mohlo dojít k neúmyslnému poškození. Lze tedy usoudit, že stávající kabeláž pro systém chránění nebude možné využít s důrazem na bezpečnost a spolehlivost provozu, a proto je v rámci návrhu uvažována jeho kompletní výměna. Dále se předpokládá dobrý stav kabelových systémů, které mohou být nadále využity, pokud při samotných montážních pracích nebude zjištěn opak. Tato výměna by zahrnovala výměnu kabelových nosných systémů, případně by se jednalo pouze o náhradu nevyhovujících úseků. Pro zjednodušení nebude v rámci ekonomického posouzení uvažováno s výměnou kabeláže návazných zařízení, která by byla přímo ovlivněná výměnou přístrojových transformátorů proudu nebo zapojením nových terminálů chránění.

Z hlediska ekonomického posouzení nákladů spojených s výměnou stávajícího systému chránění, lze rozdělit potřebné investiční náklady do následujících skupin:

- 1) Náklady spojené s projektováním
- 2) Náklady spojené s dodávkami nového zařízení
- 3) Náklady spojené s demontáží stávajícího zařízení
- 4) Náklady spojené s montáží nového zařízení
- 5) Náklady spojené se zkouškami a uvedením do provozu, včetně nákladů spojených se zaškolením obsluhy

9.1 Náklady spojené s projektováním

Náklady spojené s projektováním zahrnují třístupňovou projektovou dokumentaci, kterou lze také nazvat třífázovou. V první fázi je vypracován koncepční projekt, ve kterém je vymezeno základní řešení spojené s výměnou systému chránění. Samotný koncepční projekt dále specifikuje základní zařízení spolu s požadavky na zařízení nové a zároveň vymezuje rozsah demontážních a montážních prací. Koncepční projekt může nadále sloužit jako základ pro stavební povolení, pokud to z hlediska legislativního bude vyžadováno.

Druhá fáze se zabývá zpracováním detailní prováděcí dokumentace, známé tako jako detail design. Prováděcí dokumentace bude obsahovat detailní řešení související s výměnou systému chránění, vypracováním svorkových schémat a aplikací konkrétního zařízení. Nezbytnou součástí projektu je výpočet nastavení a konfigurace vybraného ochranného terminálu. Projekt dále obsahuje přesné postupy související s organizací demontážních a montážních prací.

Poslední etapa bude zpracována po dokončení montážních prací a uvedení nového zařízení do trvalého provozu. Veškeré provedené změny, které vznikly v rámci montáží a

uvedení zařízení do provozu, budou zakresleny do dokumentace skutečného provedení (as-built).

9.2 Náklady spojené s dodávkami nového zařízení

V rámci této skupiny nákladů bude nutné dodat nové zařízení na základě požadovaných specifikací, které vyplnou z projektové dokumentace. Dodávka se týká zařízení, jejichž souhrn je zobrazen v následující tabulce.

Tabulka 22 Seznam nově dodaných zařízení

Zařízení	Počet
Přístrojové transformátory proudu pro rozvodnu 110 kV s parametry 100/5/5 A, jistící jádro 5P20, 60 VA	6ks
Ocelové stoličky pro přístrojové transformátory proudu v rozvodně 110 kV	6ks
Epoxidem zalité přístrojové transformátory proudu pro rozvodnu 22 kV (vstupní rozváděče) s parametry 400/5/5 A, jistící jádro 5P15, 60 VA	6ks
Terminály chránění společnosti ABB (Hitachi) řady REX640 s příslušenstvím pro základní chránění nových výkonových transformátorů	2ks
Terminály chránění společnosti ABB (Hitachi) řady REF611 pro funkci nádobové (kostrové) ochrany	2ks
Průvlekové jistící transformátory proudu pro nádobové (kostrové) ochrany nových výkonových transformátorů	2ks
Montážní deska pro osazení nových terminálů chránění do stávajícího panelu chránění, umístěného ve velínu TNS Vraňany	1ks
Montážní materiál pro odizolování podvozků od stávající kolejnice nových výkonových transformátorů (například deska z materiálu Pertinax – papír jako výztuž a fenolformaldehydová pryskyřice jako pojivo)	2 sady
Kabeláž s příslušným montážním materiálem (kabelové koncovky, kabelová oka apod.)	2 sady
Pomocný montážní materiál společný pro oba transformátory (spojovací materiál, bužírky, návlačky, konzervační spreje, kabelové štítky apod.)	1 sada

Za nejdůležitější položku lze považovat samotné terminály chránění. Vzhledem k tomu, že v rámci diplomové práce byl vybrán ochranný terminál od společnosti ABB řady REX640, který je popsán a výpočet nastavení ochranných funkcí dále simulován, je i v rámci ekonomického posouzení uvažováno s tímto typem terminálu. Pro tento účel poskytla společnost Hitachi Energy Czech Republic s.r.o. prostřednictvím společnosti I&C Energo a.s. technicko-obchodní nabídku s ohledem na velikost a konkrétní aplikaci zařízení pro provozovatele železniční sítě byl zvolen terminál REX640 v této konfiguraci viz Tabulka 23.

Tabulka 23 Nastavená konfigurace relé REX640

Nastavená konfigurace relé REX640	
Komunikační modul	COM: RJ45(LHMI) + 2xLC + RJ45 + SFP 100M LC rack
BIO modul	4x BIO: 14BI + 8SO
Analogový modul	AIM:6CT + 4VT
PSM	PSM: 48 – 250VDC a 100 – 240VAC + 3SO + 2SSO + 2PO +3PO včetně TCS
Konektory CT a VT (platí také modul SIM)	Šroubové konektory
Signální konektory	Žádné
Base functionality	Included
Aplikace (kromě základní funkčnosti)	APP8 – balíček funkcí pro chránění výkonového transformátoru
	APP10 – OLTC balíček ovládání (automatický regulátor napětí)
Protokoly	IEC 61850
Jazyk	English and Czech
Connectivity level	PCL3 Connectivity level
Cena v Kč bez DPH za 1ks	220 615,00

Z důvodu samostatného umístění ovládací jednotky (panel HMI) od jednotky silové, bude terminál doplněn o 3m připojovací kabel. Zásah do nastavené logiky ovládání přepínače odboček a samotného regulátoru se sice nepředpokládá, ale v rámci ekonomického posouzení je uvažována také příprava na změnu technologie, která by se týkala přechodu na automatickou regulaci napětí, a to za použití převodníku POT220-19. Převodník obsahuje diodovou matici, která převádí 17 vstupních signálů o poloze odbočky transformátoru na 5ti bitovou adresu v BCD kódu. [24] Výstupy se obvykle připojí do ovládacího rozváděče transformátoru, kde je provedeno galvanické oddělení pomocí optoelektronických modulů a dále do samotného ochranného terminálu.

Jak již bylo zmíněno, systém chránění je doplněn o ochranný terminál pro funkci nádobové ochrany, který bude zajištěn použitím terminálu REF611. Nastavení terminálu je shrnuto v Tabulka 24.

Tabulka 24 Nastavená konfigurace relé REF611

Nastavená konfigurace relé REF611	
Typ a provedení	Kompletní relé REF611HBBAAA1NN11G
Standart	IEC
Standartní konfigurace /Analogové vstupy	Nesměrová nadproudová a nesměrová zemní (4I + 4BI (I_0 1/5A))
Komunikační modul	Ethernet 100Base FX (LC)
Komunikační protokoly	IEC 61850
Jazyk	English
Napájecí zdroj	48-250 Vdc; 100-240 Vac
Verze	Verze výroby 2.0

9.3 Náklady spojené s demontáží stávajícího zařízení

Vzhledem k instalaci nového systému chránění je nutné provést demontáž stávajícího zařízení, ve které se uvažuje i s výměnou následujících prvků:

- Stávající přístrojové transformátory proudu s příslušenstvím v rozvodnách 110kV a 22kV
- Demontáž stávajících elektromechanických ochran
- Demontáž stávajícího panelu, svorek a další
- Demontáž stávající kabeláže

9.4 Náklady spojené s montáží nového zařízení

V těchto nákladech je zahrnuta instalace nových zařízení. Výkonové transformátory budou po jejich instalaci na stanoviště připojeny na novou vnější kabeláž. Zároveň bude nutné připojit do terminálů chránění nejen proudové obvody z nových přístrojových transformátorů proudu, ale také signály ze strojního vybavení. Především se jedná o výstupy z Bucholzova relé v nádobě každého transformátoru, plynového relé v nádobě přepínače odboček a výstupy z měření teplot jednotlivých vinutí transformátoru. Dále se to také týká měření teploty izolačního oleje ve spodní a horní části nádoby spolu s působením bezpečnostního ventilu.

Instalaci přístrojových transformátorů proudu budou doprovázet menší stavební práce v rozvodně 110 kV související s případnou sanací základů ocelových stoliček. V rozvodné části 22 kV bude instalace zahrnovat pouze drobné změny v rámci skříně. Celkové náklady spojené s montáží nového zařízení jsou zohledněny jako rozpočtová rezerva v rámci ekonomického posouzení.

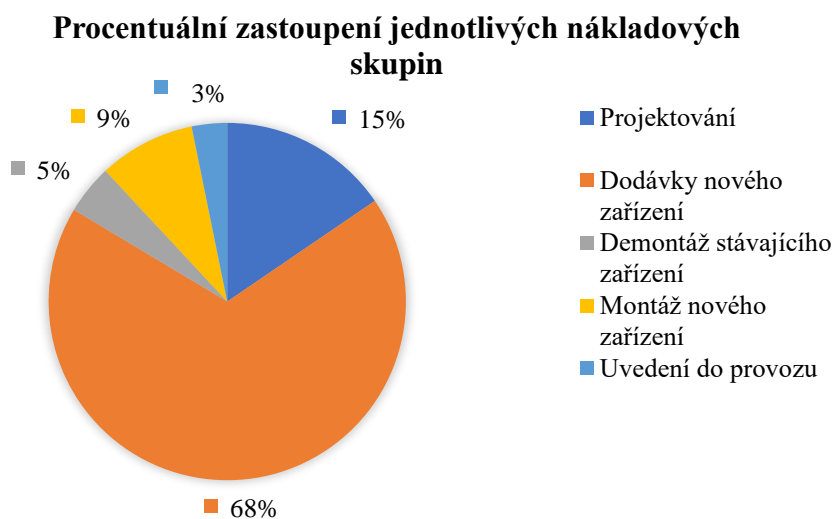
9.5 Náklady spojené se zkouškami a uvedením zařízení do provozu

Zde jsou shrnuty veškeré činnosti, které bude nutné provést po ukončení montážních prací. Tyto činnosti zahrnují různé napěťové zkoušky kabelů, ověření správnosti zapojení jednotlivých obvodů v souladu s projektovou dokumentací, případně její opravou (red-pen). Dále se bude jednat o vystavení příslušných revizních zpráv spolu protokoly a samozřejmě uvedení zařízení do provozu. V rámci terminálů ochrany je provedeno ověření správně nastavených hodnot v souladu se závěry výpočtu primárního nastavení ochranných funkcí, případně je provedena korekce nastavených hodnot během uvádění zařízení do provozu. Během uvádění ochranných terminálů do provozu je využito testovací zařízení, kde jsou simulovány poruchové stavy na příslušné proudové svorky terminálů chránění, a tím je ověřována správná funkce ochrany. Po vystavení protokolů o nastavení ochrany a zaškolením obsluhy je možné uvést zařízení do trvalého provozu.

Celkové odhadované náklady spojené s případnou výměnou systému chránění jsou uvedeny v následující tabulce a jejich procentuální zastoupení v celkové ceně je zobrazeno na Obrázek 42.

Tabulka 25 Celkové odhadované náklady

Nákladová skupina	Název	Celkové odhadované náklady v Kč bez DPH
1	Náklady spojené s projektováním	773 150,00
2	Náklady spojené s dodávkami nového zařízení	3 402 870,00
3	Náklady spojené s demontáží stávajícího zařízení	223 910,00
4	Náklady spojené s montáží nového zařízení	436 800,00
5	Náklady spojené se zkouškami a uvedením do provozu, včetně nákladů spojených se zaškolením obsluhy	159 700,00
Celkem		4 996 430,00



Obrázek 42 Procentuální zastoupení jednotlivých nákladových skupin

Výpočet odhadovaných nákladů vychází z podkladů, které byly poskytnuty pracovníky I&C Energo a.s. Jedná se především o cenové nabídky na dodávané zařízení, odhady náročnosti projektových prací, demontážně-montážních prací a odhady spojené s uváděním zařízení do provozu. Celkové náklady jsou založené na kvalifikovaném odhadu, kterým je vyjádřena ekonomická náročnost výměny systému chránění. Je zde nutné zmínit, že celkové náklady jsou do značné míry ovlivněny investicemi související s výměnou přístrojových transformátorů proudu, kabeláže a pracemi, které jsou spojeny se záměnou montážního panelu ve velínu rozvodny. Úroveň navržených cen je značně ovlivněna ekonomickou situací v době zpracování diplomové práce.

Celková doba investičního záměru je odhadnuta na 8-10 měsíců. Nicméně, vzhledem na možnou nedostupnost základních komponent ochranných terminálů, jenž jsou mikroprocesory, může nastat neplánové prodloužení odhadované doby, na což upozorňuje i samotný výrobce ochrany. Mezi další aspekty, které se mohou nepříznivě promítnout na finální hodnotě celkových nákladů, patří i nedostatek základních materiálů potřebných pro výrobu zařízení a případně také kabelů. Uvedené odhadované ceny jsou v cenové úrovni prvního kvartálu roku 2022. S ohledem na aktuální vysokou míru inflace lze předpokládat růst veškerých vstupů, které se mohou promítnout do celkových nákladů v budoucnu.

Závěr

Trakční napájecí stanice Vraňany slouží pro napájení železniční tratě již od roku 1979, kdy byla uvedena do trvalého provozu. Jelikož se napájecí stanice skládá téměř výhradně z původního vybavení, nastal zde požadavek pro její postupnou rekonstrukci, která začne výměnou stávajících výkonových transformátorů. V rámci teoretické části práce byl popsán aktuální stav napájecí stanice a provedeny výpočty pro přípravu návrhu nového systému chránění, které byly dále využity v praktické části práce. Praktická část práce se soustředila na výpočet primárního nastavení ochranných funkcí pro vybraný ochranný terminál a provedení jejich sekundárních testů. Na závěr bylo realizováno ekonomické posouzení výměny systému chránění. Nový systém chránění je nezbytný, jelikož současné elektromechanické ochrany nevyhovují kvůli jejich morálnímu zastarání.

Výkonové transformátory, jejichž rok výroby koresponduje s rokem uvedení napájecí stanice do provozu, se již pohybují za hranicí jejich projektované životnosti. Překročení této hranice přímo souvisí se zvýšenou pravděpodobností vzniku poruchy, jenž by měla za následek přerušení dodávky elektrické energie. Z toho vyplývá hlavní důvod pro jejich výměnu. Výměna stávajících transformátorů za nové sebou přináší změnu zkratových poměrů v napájecí stanici, protože nové transformátory mají vyšší hodnotu zdánlivého výkonu a napětí nakrátko. Proto bylo nutné určit změnu zkratových poměrů, která nastane po instalaci nových transformátorů. Z výsledku výpočtů je patrné, že dojde k navýšení zkratových poměrů ve srovnání se stávajícími o 28,73% na napěťové hladině 22 kV.

V následujícím kroku bylo nutné ověřit správnou funkci přístrojových transformátorů proudu, a to v obou případech před a za chráněným zařízením, pro zajištění spolehlivé funkce systému chránění. Pro ověření správné funkce přístrojových transformátorů proudu se vybrala ochrana rozdílová, protože kritéria pro její dimenzování jsou považována za jedny z nejpřísnějších. Pro výpočet se vycházelo ze štítkových hodnot přístrojových transformátorů a neznámé parametry byly odhadnuty na základě zařízení s podobnými parametry. Posuzovaným parametrem byla hodnota skutečného nadproudového čísla, která musela být vyšší nebo rovna poměru zkratového proudu a jmenovitého primárního proudu přístrojového transformátoru vynásobené činitelem pro přechodné stavy. Z výsledků výpočtů je zřejmé, že přístrojové transformátory na napěťové hladině 110 kV nevyhovují z důvodu nízkého jmenovitého převodu, jelikož jmenovitý proud na primární straně nového transformátoru je vyšší než současně nastavená měřená hodnota. Proto je zde doporučena výměna za přístrojový transformátor s jmenovitým převodem 100/5/5 A, který již vyhovuje aktuálním požadavkům. Zhodnocení přístrojových transformátorů na sekundární straně 22 kV bylo provedeno na základě dostupných informací, které vycházely z uvedených štítkových parametrů. Z výsledků výpočtů je patrné, že tyto přístrojové transformátory nevyhovují kvůli nízké hodnotě jmenovitého nadproudového čísla a jmenovitého výkonu jistícího jádra. Zde je tedy také navržena výměna za přístrojový transformátor s jmenovitým výkonem jistícího jádra 60 VA a jmenovitým nadproudovým číslem 15. Tyto výměny jsou důležité pro zajištění spolehlivé funkce systému chránění a bezpečného provozu napájecí stanice.

Praktická část byla zaměřena na samotný návrh nového systému chránění dle současných požadavků na chránění výkonových transformátorů dané normou ČSN 33 3051, který zahrnoval výběr ochranného terminálu, výpočet primárního nastavení ochranných funkcí a následné provedení jejich sekundárních testů za použití testovacího zařízení Omicron CMC 256plus. V návrhu je uvažováno s využitím multifunkčního ochranného terminálu od výrobce ABB řady REX640 vybavené balíčkem ochranných funkcí určených pro chránění výkonového transformátoru. Tento terminál byl vybrán na základě jeho dostupnosti v laboratoři. Vzhledem k množství informací, které byly poskytnuty od provozovatele napájecí stanice, samotný návrh zahrnuje pouze využití ochrany rozdílové, nadproudové při přetížení a zkratu a ochrany distanční. Výsledné výpočty primárního nastavení vybraných ochranných funkcí byly nahrány do ochranného terminálu prostřednictvím programu PCM600.

Pro funkci hlavní ochrany transformátoru byla vybrána ochrana rozdílová, u které musí být zajištěna její vysoká citlivost, selektivita a stabilita při vnějších poruchách. Sestavení stabilizační charakteristiky a výpočet nastavení jednotlivých oblastí bylo provedeno s ohledem na typ chráněného transformátoru, chyby přístrojových transformátorů proudu a s uvažováním rezervy pro další možné chyby. Dále bylo nutné provést korekci přístrojových transformátorů proudu kvůli jejich rozdílným převodům a nastavit v parametrizaci ochranné funkce eliminaci netočivé složky proudu. Cílem testování nastavené stabilizační charakteristiky bylo ověřit, zda ochrana správně vybaví pouze v případě vnitřní poruchy a naopak zůstane stabilní bude-li se jednat o poruchu vnější. Z výsledného bodového testu je patrné, že ochranný terminál správně vyhodnotil ve všech případech body rozmístěné v stabilizační charakteristice s vysokou mírou citlivosti a selektivně vybavil pouze v případě, kdy se body nacházely v definované chráněné zóně. Nejdelší časová prodleva při působení byla zjištěna v první oblasti stabilizační charakteristiky a to 41 ms. Tato časová odchylka je ale z hlediska porovnání s nastaveným časem více než přijatelná, a proto lze konstatovat, že výsledná charakteristika rozdílové ochrany splnila požadavky na spolehlivé a selektivní působení.

Další ochrannou funkcí uvažovanou v návrhu byla ochrana nadproudová při přetížení a zkratu. Dle požadavků na chránění transformátoru byla na primární stranu nastavena dvoustupňová nadproudová ochrana a na stranu sekundární za účelem chránění přípojníc ochrana zkratová. V rámci výpočtu nastavení charakteristik nadproudových ochranných bylo nutné stanovit jejich popudové hodnoty a časy působení. Pro ochranu při přetížení byly vypočteny teoretické vypínací časy pro stanovené popudové hodnoty poruchových proudů při uvažování normální inverzní charakteristiky, které byly následně porovnány s časy naměřenými ochranným terminálem. Z výsledné charakteristiky je zřejmé, že rozdíly mezi nimi jsou minimální. Z toho lze tudíž usoudit, že navržená teoretická charakteristika je v souladu s charakteristikou skutečnou. Při návrhu nadproudových ochranných při zkratu bylo nutné zohlednit jejich blízké popudové hodnoty na primární a sekundární straně. Ty byly způsobené krátkou kabelovou trasou na vývodu transformátoru, která ve výsledném zkratovém výpočtu představovala téměř zanedbatelnou impedanci. Proto bylo nutné v návrhu uvažovat se zavedením logické funkce na vývodech, která v případě vzniku zkratu na přípojnících zablokuje vybavení zkratové ochrany na primární straně a zároveň zvýší její čas působení z 200 ms na 1 s. Tímto způsobem bude zajištěna vzájemná selektivita nadproudových ochranných při zkratu. Během testování nezávislých charakteristik zkratových nadproudových ochranných se v obou

případech vyskytovala největší časová odchylka vybavení ochranného terminálu v oblasti popudových hodnot. Tyto časové odchylky byly ovlivněny zhoršenou citlivostí ochranného terminálu v této oblasti charakteristiky. Nicméně, v porovnání s navrženými časy působení se jedná o zanedbatelné odchylky.

Poslední navrhovanou funkcí byla ochrana distanční, jež plní funkci záložní ochrany. Pro nastavení této funkce byla použita 150% hodnota impedance transformátoru na primární straně a nominální impedance ochrany. Z výsledné hodnoty byl stanoven rozsah kruhové charakteristiky, která byla následně otestována pro jednofázové, mezifázové a třífázové zkraty za použití bodového testu. Ze závěrů bodových testů vyplývá, že ochranný terminál ve všech případech vybavil dle očekávání pouze s menšími odchylkami ve vypínacích časech. Ochranný terminál správně vybavil pouze v případech, kdy se testované body nacházely v oblasti kruhové charakteristiky nebo v čase její toleranční oblasti.

Na závěr bylo provedeno ekonomické posouzení výměny systému chránění, ve kterém byly uvažovány náklady spojené s projektováním, demontáží stávajícího zařízení, montáží zařízení nového a uvedením zařízení do trvalého provozu. Největší procentuální zastoupení v rámci jednotlivých nákladových skupin představují náklady na dodání nového zařízení, které tvoří 68% celkových odhadovaných nákladů. Toto výrazné zastoupení je způsobeno zejména požadavkem na výměnu přístrojových transformátorů proudu, jež nesplňují požadovaná kritéria pro jejich správnou funkci vzhledem k instalaci nových zařízení a systému chránění. Ekonomická náročnost spojená s výměnou systému chránění byla odhadnuta v současné ekonomické situaci na částku přibližně 5 milionů korun s dobou trvání investičního záměru na 8-10 měsíců. Nicméně, při přihlédnutí k aktuální vysoké míře inflace lze předpokládat růst veškerých vstupů, které se mohou nepříznivě promítnout na finální hodnotě odhadovaných nákladů a době investičního záměru.

Z výše uvedených závěrů lze konstatovat, že výměna a návrh nového systému chránění v TNS Vraňany představuje značně komplexní záležitost, která je spojena s vysokými nároky na zajištění spolehlivého provozu výkonových transformátorů spolu s celkovou ekonomickou náročností investičního záměru.

Reference

- [1] *Mapa elektrizační soustavy ČR*. In: OTE [online]. 2020 [cit. 2021-10-09]. Dostupné z: <https://www.ote-cr.cz/cs/statistika/elektrizacni-soustava-cr.png>
- [2] *Jednopolové schéma TNS Vraňany a parametry zařízení: 110/22 kV*. Interní materiály I&C Energo.
- [3] *Technické parametry transformátorů T101 a T102*. ASEA-PER KURE A/S, 1979.
- [4] *Rekonstrukce R110 kV a T110 kV trakční měnárna Pečky: Soupis strojů a zařízení*. 2. Praha: SUDOP PRAHA, 2011.
- [5] ČSN 61936-1. *Elektrické instalace nad AC 1 kV*. Česká technická norma, Prosinec 2011.
- [6] ČSN 33 3051. *Ochrany elektrických strojů a rozvodných zařízení*. Česká technická norma, 1992.
- [7] ČECHOVÁ, Karolína. *Řízení životnosti výkonového olejového transformátoru*. 2020. Bakalářská. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Mgr. Pavel Sedláček.
- [8] HALUZÍK, Evžen. *Ochrany a automatiky v elektrických sítích*. Brno: VUT, 1986, 160 s.
- [9] ORSÁGOVÁ, Ph.D., doc. Ing. Jaroslava. *Elektrické stanice a vedené*. Brno: Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií Vysoké učení technické v Brně, 2017.
- [10] ONDRÁŠEK, Milan. *Elektrárny II*. 2. vyd. Brno: VUT, 1988, 240 s.
- [11] *Diferenciální ochrana R 30 pro stroje a transformátory* [online]. In: . s. 12 [cit. 2021-11-18]. Dostupné z: <https://www.dohnalek.cz/2.html>
- [12] TLUSTÝ, Josef, Jan KYNCL, Ladislav MUSIL, Jan ŠPETLÍK, Jan ŠVEC, Petr HAMOUZ, Zdeněk MÜLLER a Miroslav MÜLLER. *Monitorování, řízení a chránění elektrizačních soustav*. Praha: České vysoké učení technické, 2011, 255 s. : il., grafy. ISBN 978-80-01-04940-2.
- [13] *AT 12 XI, 21 XI, 31 XI Nadproudové časové ochrany* [online]. In: . 1988, s. 8 [cit. 2021-11-18]. Dostupné z: <https://www.dohnalek.cz/2.html>
- [14] ORSÁGOVÁ, Ph.D., doc. Ing. Jaroslava. *Rozvodná zařízení*. Brno: Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií Vysoké učení technické v Brně, 2015.
- [15] Distance protection SIPROTEC 7SA87. *Siemens* [online]. [cit. 2021-11-18]. Dostupné z: <https://new.siemens.com/global/en/products/energy/energy-automation-and-smart-grid/protection-relays-and-control/siprotec-5/distance-protection/distance-protection-siprotec-7sa87.html>
- [16] *SIPROTEC 5 Distance Protection, Line Differential Protection, and Breaker Management for 1 – Pole and 3 – Pole Tripping 7SA87, 7SD87, 7SL87, 7VK87* [online]. In: . 08/25/2021, s. 2262 [cit. 2021-11-18]. Dostupné z: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/440/109742440/att_1077536/v1/SIP5_7SA-SD-SL-VK-87_V08.80_Manual_C011-G_en.pdf
- [17] ČSN 33 3505 ed. 2. *Drážní zařízení – Pevná trakční zařízení – Základní požadavky na elektrické napájecí a spínací stanice*. 04/2010n. 1.
- [18] ČSN EN 60909-0 ed. 2: *Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách – Část 0: Výpočet proudů*. Evropská technická norma, 2016.
- [19] *PNE 38 4065: Provoz, navrhování a zkoušení ochrany a automatik*. 3. Podniková norma energetiky pro rozvod elektrické energie, 2008.

- [20] DOHNÁLEK, Petr. *Ochrany pro průmysl a energetiku*. 2. vydání Praha: SNTL, 1991, 339 s. ISBN 80-03-00630-9.
- [21] Protection and control REX640. *ABB* [online]. 2022 [cit. 2022-02-25]. Dostupné z: <https://new.abb.com/medium-voltage/digital-substations/protection-relays/multiapplication/protection-and-control-rex640>
- [22] *REX640 Technical manual* [online]. In: . *ABB*, 2020-12-09, s. 1816 [cit. 2022-02-25]. Dostupné z: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1MRS759142&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- [23] JÁRA, Jaroslav. *Chránění transformátoru rozdílovou ochranou*. Brno, 2008. Bakalářská. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
- [24] Převodník odboček transformátoru POT 110 /24, 220/. *Elsport* [online]. [cit. 2022-03-21]. Dostupné z: <https://www.elsport.cz/vyroba.html>

Seznam symbolů a zkratek

Zkratky:

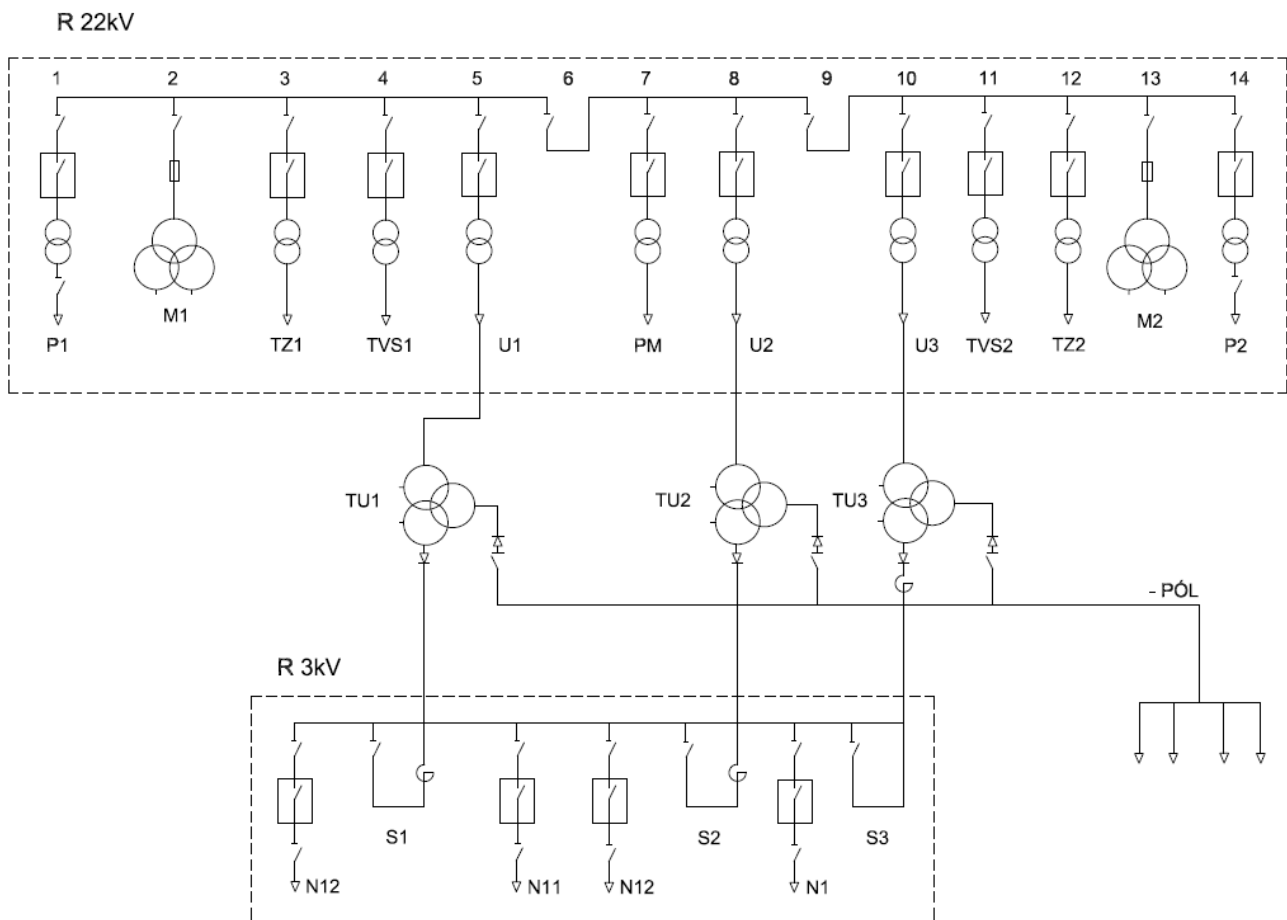
PTP	Přístrojový transformátor proudu
PTN	Přístrojový transformátor napětí
TNS	Trakční napájecí stanice
VN	Vysoké napětí
VVN	Velmi vysoké napětí

Symboly:

α	Index algebraické funkce	[-]
c	Napěťový součinitel	[-]
$\Delta\delta$	Relativní odchylka	[%]
I_{Amax}	Maximální zkratový proud na primární straně	[A]
I_{Bmax}	Maximální zkratový proud na sekundární straně	[A]
I_b, I_{bias}	Stabilizační proud	[A]
I_d, I_{dif}	Diferenciální proud	[A]
I''_{kQ}	Souměrný rázový zkratový proud	[A]
I''_{k3}	Počáteční souměrný rázový zkratový proud	[A]
I''_{Kmin}	Minimální rázový zkratový proud	[A]
I_{n0}	Vstupní proud ochranného terminálu	[A]
I_r	Rozběhový proud	[A]
I_S/I_n	Vstupní hodnota proudu ochranného terminálu	[pu]
I_{1n}, I_{pn}	Primární proud PTP	[A]
I_{2n}, I_{sn}	Sekundární proud	[A]
k	Konstanta ochranného terminálu	[-]
k_b	Koeficient bezpečnosti	[-]
k_c	Koeficient citlivosti	[-]
k_p	Přidržený poměr ochranného terminálu	[-]
K_{SSC}	Činitel symetrického zkratového proudu	[-]
K_T	Korekční součinitel transformátoru	[-]
K_{td}	Činitel pro přechodné stavy	[-]
l_{kab}	Délka kabelu	[m]
l_v	Délka vedení	[km]
n_n	Jmenovité nadproudové číslo	[-]

n_{skut}	Skutečné nadproudové číslo	[-]
ω	Úhlová rychlost	[rad/s]
p	Jmenovitý převod	[-]
ΔP_k	Ztráty nakrátko	[W]
p_{ptn}	Jmenovitý převod přístrojového transformátoru napětí	[-]
p_{ptp}	Jmenovitý převod přístrojového transformátoru proudu	[-]
ρ_{AL}	Rezistivita hliníku	[Ωm]
ρ_{cu}	Rezistivita mědi	[Ωm]
R_b	Skutečné břemeno	[Ω]
R_{bn}	Jmenovité břemeno	[Ω]
R_{ct}	Odpor sekundárního vinutí	[Ω]
R_{kab}	Odpor kabelu	[Ω]
R_o	Vstupní odpor ochrany	[Ω]
R_Q	Odpor síťového napáječe	[Ω]
R_T	Odpor transformátoru	[Ω]
R_V	Odpor vedení na jednotku délky	[Ω/km]
S	Průřez vedení	[mm^2]
S_{nT}	Jmenovitý výkon transformátoru	[VA]
τ	Časová konstanta chráněného objektu	[s]
t_p, t_k, t_{vyp}	Doba působení ochrany	[s]
T_p	Časová konstanta primárního obvodu	[s]
T_p	Časový násobitel	[-]
T_s	Časová konstanta sekundárního obvodu	[s]
u_k	Napětí nakrátko	[%]
U_{lim}	Limitní napětí	[V]
U_{nQ}	Jmenovité napětí síťového napáječe	[V]
U_V	Vztažné napětí	[V]
X_Q	Reaktance síťového napáječe	[Ω]
X_T	Reaktance transformátoru	[Ω]
X_V	Reaktance vedení na jednotku délky	[Ω/km]
Z_N	Nominální impedance ochranného terminálu	[Ω]
Z_S	Náhradní impedance síťového napáječe	[Ω]
Z_T	Náhradní impedance transformátoru	[Ω]
Z_V	Náhradní impedance vedení	[Ω]

Příloha A



Příloha 1 Jednopolové schéma rozvodny 22/3 kV [1]

Příloha B

$ Z $ (Ω)	φ ($^\circ$)	$t_{teoretický}$ (s)	$t_{skutečný}$ (s)	δ (%)	I_{Test} (A)	Vyhodnocení
132,1	90,0	1	1,053	5,3	10,0	Úspěšné
126,4	80,0	1	1,054	5,4	10,0	Úspěšné
136,0	70,0	1	1,067	6,7	10,0	Úspěšné
127,6	60,0	1	1,036	3,6	10,0	Úspěšné
132,2	50,0	1	1,064	6,4	10,0	Úspěšné
126,2	40,0	1	1,039	3,9	10,0	Úspěšné
133,0	30,0	1	1,032	3,2	10,0	Úspěšné
126,1	22,3	1	1,026	2,6	10,0	Úspěšné
134,2	16,0	1	1,055	5,5	10,0	Úspěšné
127,0	1,9	1	1,06	6,0	10,0	Úspěšné
134,8	-3,3	1	1,029	2,9	10,0	Úspěšné
126,9	-12,3	1	1,031	3,1	10,0	Úspěšné
135,7	-23,3	1	1,045	4,5	10,0	Úspěšné
128,7	-30,0	1	1,039	3,9	10,0	Úspěšné
134,4	-37,4	1	1,037	3,7	10,0	Úspěšné
127,7	-44,0	1	1,046	4,6	10,0	Úspěšné
135,9	-50,0	1	1,054	5,4	10,0	Úspěšné
126,5	-60,0	1	1,038	3,8	10,0	Úspěšné
133,5	-72,8	1	1,053	5,3	10,0	Úspěšné
127,2	-82,9	1	1,022	2,2	10,0	Úspěšné
135,3	-90,0	1	1,055	5,5	10,0	Úspěšné
124,8	-100,0	1	1,064	6,4	10,0	Úspěšné
135,1	-108,5	1	1,024	2,4	10,0	Úspěšné
125,6	-120,0	1	1,063	6,3	10,0	Úspěšné
132,0	-128,6	1	1,068	6,8	10,0	Úspěšné
124,4	-138,3	1	1,048	4,8	10,0	Úspěšné
134,7	-148,4	1	1,044	4,4	10,0	Úspěšné
125,2	-157,2	1	1,040	4,0	10,0	Úspěšné
133,0	-166,0	1	1,035	3,5	10,0	Úspěšné
131,2	-175,3	1	1,031	3,1	10,0	Úspěšné
126,2	174,6	1	1,042	4,2	10,0	Úspěšné
128,6	162,1	1	1,056	5,6	10,0	Úspěšné
129,2	150,0	1	1,038	3,8	10,0	Úspěšné
130,3	141,4	1	1,049	4,9	10,0	Úspěšné
143,5	100,0	-	1,035	-	10,0	Úspěšné

Příloha 2 Výsledek bodového testu pro třířákový zkrat L1-L2-L3

$ Z $ (Ω)	φ ($^\circ$)	$t_{teoretický}$ (s)	$t_{skutečný}$ (s)	δ (%)	I_{Test} (A)	Vyhodnocení
133,5	90,0	1	1,121	12,1	10,0	Úspěšné
129,0	80,0	1	1,128	12,8	10,0	Úspěšné
128,1	70,0	1	1,114	11,4	10,0	Úspěšné
134,1	60,0	1	1,113	11,3	10,0	Úspěšné
125,9	50,0	1	1,112	11,2	10,0	Úspěšné
133,0	40,0	1	1,131	13,1	10,0	Úspěšné
125,5	30,0	1	1,089	8,9	10,0	Úspěšné
132,3	22,3	1	1,115	11,5	10,0	Úspěšné
128,0	15,9	1	1,090	9,0	10,0	Úspěšné
133,3	1,9	1	1,116	11,6	10,0	Úspěšné
128,7	-3,3	1	1,112	11,2	10,0	Úspěšné
131,9	-12,3	1	1,118	11,8	10,0	Úspěšné
130,0	-23,3	1	1,087	8,7	10,0	Úspěšné
132,3	-30,0	1	1,107	10,7	10,0	Úspěšné
126,0	-37,4	1	1,104	10,4	10,0	Úspěšné
133,8	-43,9	1	1,120	12,0	10,0	Úspěšné
125,7	-50,0	1	1,117	11,7	10,0	Úspěšné
134,4	-60,0	1	1,124	12,4	10,0	Úspěšné
126,5	-72,8	1	1,082	8,2	10,0	Úspěšné
135,5	-82,9	1	1,087	8,7	10,0	Úspěšné
126,4	-90,0	1	1,077	7,7	10,0	Úspěšné
133,3	-100,0	1	1,064	6,4	10,0	Úspěšné
128,1	-108,5	1	1,103	10,3	10,0	Úspěšné
134,2	-157,2	1	1,098	9,8	10,0	Úspěšné
128,8	-165,9	1	1,101	10,1	10,0	Úspěšné
136,0	-175,2	1	1,121	12,1	10,0	Úspěšné
125,0	174,6	1	1,080	8,0	10,0	Úspěšné
132,5	162,1	1	1,110	11,0	10,0	Úspěšné
135,6	150,0	1	1,111	11,1	10,0	Úspěšné
132,4	141,4	1	1,106	10,6	10,0	Úspěšné
129,4	130,0	1	1,086	8,6	10,0	Úspěšné
130,1	120,0	1	1,092	9,2	10,0	Úspěšné
131,4	110,0	1	1,106	10,6	10,0	Úspěšné
134,8	110,0	1	1,086	8,6	10,0	Úspěšné
150,0	-60,0	-	1,064	-	10,0	Úspěšné

Příloha 3 Výsledek bodového testu pro jednofázový zkrat L1-E

$ Z $ (Ω)	φ ($^\circ$)	$t_{teoretický}$ (s)	$t_{skutečný}$ (s)	δ (%)	I_{Test} (A)	Vyhodnocení
133,7	88,4	1	1,053	5,3	10,0	Úspěšné
127,6	73,1	1	1,015	1,5	10,0	Úspěšné
132,5	60,0	1	1,088	8,8	10,0	Úspěšné
126,0	50,0	1	1,076	7,6	10,0	Úspěšné
132,5	37,3	1	1,053	5,3	10,0	Úspěšné
127,2	30,0	1	1,06	6,0	10,0	Úspěšné
132,0	17,2	1	1,069	6,9	10,0	Úspěšné
130,0	7,59	1	1,059	5,9	10,0	Úspěšné
133,5	-2,8	1	1,073	7,3	10,0	Úspěšné
125,1	-10,0	1	1,053	5,3	10,0	Úspěšné
131,3	-20,0	1	1,053	5,3	10,0	Úspěšné
125,6	-30,0	1	1,085	8,5	10,0	Úspěšné
132,0	-37,6	1	1,071	7,1	10,0	Úspěšné
125,6	-45,0	1	1,057	5,7	10,0	Úspěšné
135,2	-57,5	1	1,056	5,6	10,0	Úspěšné
132,9	-70,0	1	1,033	3,3	10,0	Úspěšné
124,6	-82,6	1	1,068	6,8	10,0	Úspěšné
134,3	-92,3	1	1,043	4,3	10,0	Úspěšné
126,1	-103,6	1	1,054	5,4	10,0	Úspěšné
134,5	-112,7	1	1,04	4,0	10,0	Úspěšné
129,7	-123,2	1	1,092	9,2	10,0	Úspěšné
137,3	-135,0	1	1,059	5,9	10,0	Úspěšné
127,8	-142,2	1	1,081	8,1	10,0	Úspěšné
130,4	-156,6	1	1,063	6,3	10,0	Úspěšné
133,1	-166,6	1	1,076	7,6	10,0	Úspěšné
126,5	-177,9	1	1,051	5,1	10,0	Úspěšné
136,0	171,5	1	1,022	2,2	10,0	Úspěšné
128,3	161,5	1	1,059	5,9	10,0	Úspěšné
135,1	150,0	1	1,048	4,8	10,0	Úspěšné
131,3	138,5	1	1,091	9,1	10,0	Úspěšné
130,4	118,1	1	1,031	3,1	10,0	Úspěšné
127,5	97,5	1	1,078	7,8	10,0	Úspěšné
156,4	54,5	-	1,049	-	10,0	Úspěšně

Příloha 4 Výsledek bodového testu pro mezifázový zkrat typu L1-L2

$ Z $ (Ω)	φ ($^\circ$)	$t_{teoretický}$ (s)	$t_{skutečný}$ (s)	δ (%)	I_{Test} (A)	Vyhodnocení
130,4	90,0	1	1,116	11,6	10,0	Úspěšné
135,1	81,6	1	1,108	10,8	10,0	Úspěšné
124,1	71,5	1	1,130	13,0	10,0	Úspěšné
136,0	60,0	1	1,102	10,2	10,0	Úspěšné
125,0	52,9	1	1,140	14,0	10,0	Úspěšné
131,5	42,0	1	1,109	10,9	10,0	Úspěšné
136,1	33,0	1	1,094	9,4	10,0	Úspěšné
126,8	20,0	1	1,111	11,1	10,0	Úspěšné
132,8	-2,8	1	1,073	7,3	10,0	Úspěšné
124,3	0,0	1	1,143	14,3	10,0	Úspěšné
134,6	-10,0	1	1,118	11,8	10,0	Úspěšné
125,5	-20,0	1	1,095	9,5	10,0	Úspěšné
134,6	-28,8	1	1,113	11,3	10,0	Úspěšné
127,0	-40,0	1	1,113	11,3	10,0	Úspěšné
133,5	-50,0	1	1,137	13,7	10,0	Úspěšné
126,0	-60,0	1	1,092	9,2	10,0	Úspěšné
133,8	-73,9	1	1,133	13,3	10,0	Úspěšné
126,7	-90,0	1	1,144	14,4	10,0	Úspěšné
133,2	-102,4	1	1,103	10,3	10,0	Úspěšné
124,8	-113,4	1	1,097	9,7	10,0	Úspěšné
133,9	-128,1	1	1,085	8,5	10,0	Úspěšné
128,5	-140,0	1	1,11	11,0	10,0	Úspěšné
133,0	-157,0	1	1,119	11,9	10,0	Úspěšné
127,2	-170,0	1	1,096	9,6	10,0	Úspěšné
136,4	177,2	1	1,088	8,8	10,0	Úspěšné
126,6	160,0	1	1,114	11,4	10,0	Úspěšné
132,0	141,6	1	1,11	11,0	10,0	Úspěšné
127,2	130,0	1	1,123	12,3	10,0	Úspěšné
136,4	115,8	1	1,109	10,9	10,0	Úspěšné
126,6	100,0	1	1,132	13,2	10,0	Úspěšné
148,1	80,0	-	1,129	-	10,0	Úspěšné

Příloha 5 Výsledek bodového testu pro mezifázový zkrat typu L2-L3

$ Z $ (Ω)	φ ($^\circ$)	$t_{teoretický}$ (s)	$t_{skutečný}$ (s)	δ (%)	I_{Test} (A)	Vyhodnocení
133,7	85,4	1	1,108	10,8	10,0	Úspěšné
126,4	70,0	1	1,108	10,8	10,0	Úspěšné
132,9	53,8	1	1,135	13,5	10,0	Úspěšné
128,0	36,7	1	1,078	7,8	10,0	Úspěšné
136,0	27,0	1	1,091	9,1	10,0	Úspěšné
123,8	13,2	1	1,106	10,6	10,0	Úspěšné
128,6	-5,2	1	1,143	14,3	10,0	Úspěšné
133,1	-10,0	1	1,088	8,8	10,0	Úspěšné
125,8	-22,3	1	1,117	11,7	10,0	Úspěšné
132,4	-37,4	1	1,106	10,6	10,0	Úspěšné
125,6	-47,1	1	1,102	10,2	10,0	Úspěšné
134,7	-57,7	1	1,095	9,5	10,0	Úspěšné
126,2	-70,0	1	1,117	11,7	10,0	Úspěšné
133,7	-80,0	1	1,132	13,2	10,0	Úspěšné
127,2	-93,1	1	1,106	10,6	10,0	Úspěšné
131,6	-106,9	1	1,129	12,9	10,0	Úspěšné
128,0	-125,9	1	1,135	13,5	10,0	Úspěšné
134,4	-130,0	1	1,133	13,3	10,0	Úspěšné
124,9	-150,0	1	1,125	12,5	10,0	Úspěšné
134,9	-165,1	1	1,105	10,5	10,0	Úspěšné
126,9	175,2	1	1,109	10,9	10,0	Úspěšné
132,2	164,2	1	1,132	13,2	10,0	Úspěšné
125,9	150,0	1	1,10	10,0	10,0	Úspěšné
136,4	143,5	1	1,122	12,2	10,0	Úspěšné
131,9	133,5	1	1,10	10,0	10,0	Úspěšné
126,2	120,0	1	1,122	12,2	10,0	Úspěšné
134,6	114,3	1	1,109	10,9	10,0	Úspěšné
126,2	107,9	1	1,118	11,8	10,0	Úspěšné
134,2	100,0	1	1,133	13,3	10,0	Úspěšné
150,0	101,4	-	1,10	-	10,0	Úspěšné

Příloha 6 Výsledek bodového testu pro mezifázový zkrat typu L3-L1

$ Z $ (Ω)	φ ($^\circ$)	$t_{teoretický}$ (s)	$t_{skutečný}$ (s)	δ (%)	I_{Test} (A)	Vyhodnocení
131,3	85,2	1	1,109	10,9	10,0	Úspěšné
124,6	68,3	1	1,086	8,6	10,0	Úspěšné
132,7	50,0	1	1,094	9,4	10,0	Úspěšné
129,5	35,7	1	1,111	11,1	10,0	Úspěšné
136,1	18,1	1	1,082	8,2	10,0	Úspěšné
127,4	6,5	1	1,101	10,1	10,0	Úspěšné
129,6	-10,0	1	1,112	11,2	10,0	Úspěšné
133,0	-27,5	1	1,118	11,8	10,0	Úspěšné
125,9	-32,8	1	1,104	10,4	10,0	Úspěšné
130,3	-46,8	1	1,095	9,5	10,0	Úspěšné
127,2	-55,6	1	1,111	11,1	10,0	Úspěšné
136,1	-68,0	1	1,136	13,6	10,0	Úspěšné
122,2	-83,4	1	1,081	8,1	10,0	Úspěšné
131,9	-100,0	1	1,129	12,9	10,0	Úspěšné
127,6	-111,9	1	1,108	10,8	10,0	Úspěšné
130,7	-121,7	1	1,109	10,9	10,0	Úspěšné
128,3	-130,0	1	1,128	12,8	10,0	Úspěšné
131,4	-140,0	1	1,077	7,7	10,0	Úspěšné
127,1	-152,0	1	1,136	13,6	10,0	Úspěšné
136,4	140,0	1	1,119	11,9	10,0	Úspěšné
125,8	131,8	1	1,089	8,9	10,0	Úspěšné
130,4	124,1	1	1,136	13,6	10,0	Úspěšné
125,5	110,0	1	1,119	11,9	10,0	Úspěšné
134,6	100,0	1	1,077	7,7	10,0	Úspěšné
149,6	33,2	-	1,122	-	10,0	Úspěšné

Příloha 7 Výsledek bodového testu pro jednofázový zkrat typu L2-E

$ Z $ (Ω)	φ ($^\circ$)	$t_{teoretický}$ (s)	$t_{skutečný}$ (s)	δ (%)	I_{Test} (A)	Vyhodnocení
131,2	85,9	1	1,101	10,1	10,0	Úspěšné
134,6	75,9	1	1,122	12,2	10,0	Úspěšné
123,7	63,8	1	1,130	13,0	10,0	Úspěšné
130,3	35,4	1	1,102	10,2	10,0	Úspěšné
127,2	22,3	1	1,140	14,0	10,0	Úspěšné
136,1	8,0	1	1,136	13,6	10,0	Úspěšné
122,2	-5,5	1	1,081	8,1	10,0	Úspěšné
131,9	-18,4	1	1,129	12,9	10,0	Úspěšné
127,6	-30,0	1	1,108	10,8	10,0	Úspěšné
130,7	-42,2	1	1,109	10,9	10,0	Úspěšné
128,3	-54,8	1	1,128	12,8	10,0	Úspěšné
130,3	-66,8	1	1,077	7,7	10,0	Úspěšné
133,7	-80,0	1	1,136	13,6	10,0	Úspěšné
128,0	-90,0	1	1,081	108,1	10,0	Úspěšné
137,4	-108,1	1	1,137	13,7	10,0	Úspěšné
126,0	-124,3	1	1,092	9,2	10,0	Úspěšné
128,5	-135,0	1	1,133	13,3	10,0	Úspěšné
133,0	-142,9	1	1,144	14,4	10,0	Úspěšné
127,2	-153,9	1	1,103	10,3	10,0	Úspěšné
136,4	-166,4	1	1,097	9,7	10,0	Úspěšné
126,6	-177,9	1	1,085	8,5	10,0	Úspěšné
132,0	170,0	1	1,110	11,0	10,0	Úspěšné
127,2	154,9	1	1,122	12,2	10,0	Úspěšné
128,5	140,0	1	1,10	10,0	10,0	Úspěšné
149,7	124,8	-	1,109	-	10,0	Úspěšné

Příloha 8 Výsledek bodového testu pro jednofázový zkrat typu L3-E

Příloha C

Chráněný objekt PT Ochranné zařízení Definice charakteristiky Harmonická

Chráněný objekt: Transformátor

Skupina vektorů: YY0

Počet vinutí: 2 3

Jmenovité hodnoty

	Primární	Sekundární	Terciární
Název vinutí/větve:	Primární	Sekundární	Terciární
Napětí:	110,00 kV	23,00 kV	30,00 kV
Výkon:	16,00 MVA	16,00 MVA	40,00 MVA
Skupina vektorů:	Y	Y0 (Y0°)	D0 (D0°)
Uzemnění uzlu:	Ano	Ne	Ne
Proud:	83,98 A	401,64 A	769,80 A
PT v trojúhelníkovém zapojení:	Ne	Ne	

Příloha 9 Nastavení parametrů chráněného zařízení

Chráněný objekt PT Ochranné zařízení Definice charakteristiky Harmonická

Jmenovité hodnoty PT

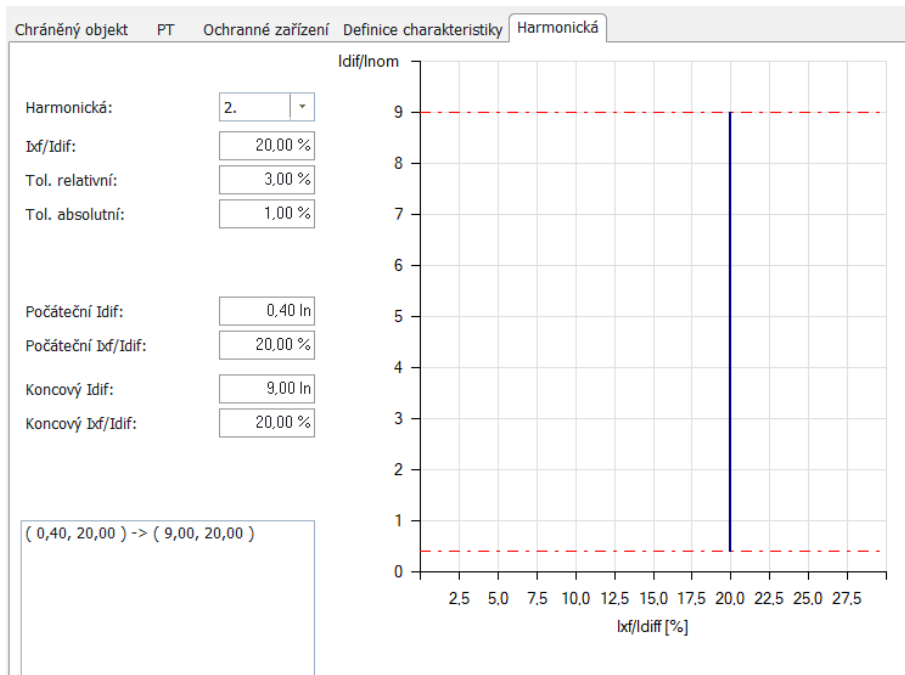
	Primární	Sekundární	Terciární
Primární proud:	100,00 A	400,00 A	800,00 A
Sekundární proud:	5,00 A	5,00 A	1,00 A
Uzemnění uzlu:	směr do chrán. obj.	směr do chrán. obj.	směr do chrán. obj.

Použít vstupy měření zemního proudu (PT)

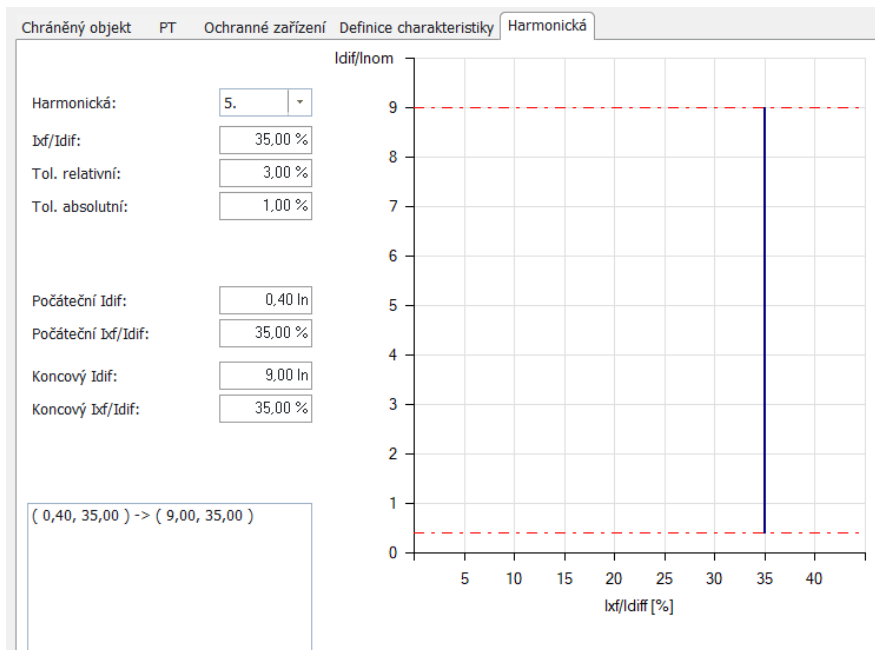
Jmenovité hodnoty zemního PT

	Primární	Sekundární	Terciární
Primární proud:	200,00 A	800,00 A	800,00 A
Sekundární proud:	1,00 A	1,00 A	1,00 A
Uzemnění uzlu:	směr do chrán. obj.	směr do chrán. obj.	směr do chrán. obj.

Příloha 10 Nastavení parametrů PTP



Příloha 11 Nastavení parametrů 2.harmonické



Příloha 12 Nastavení parametrů 5.harmonické