

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING**

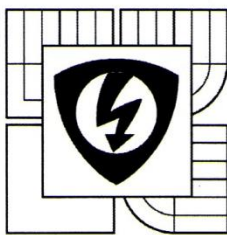
SROVNÁNÍ PŘÍSTROJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ PROUDU A PROUDOVÝCH SENZORŮ S OHLEDEM NA FUNKCI ROZDÍLOVÉ OCHRANY

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S/BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. ZBYNĚK RAJCHMAN

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektroenergetika

Student: Bc. Zbyněk Rajchman

Ročník: 2

ID: 83306

Akademický rok: 2011/12

NÁZEV TÉMATU:

Srovnání přístrojových transformátorů proudu a proudových senzorů s ohledem na funkci rozdílové ochrany

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Princip a vlastnosti přístrojového transformátoru proudu a proudového senzoru.
2. Problematika konfigurace a nastavení digitální rozdílové ochrany pro chránění transformátoru.
3. Vliv způsobu měření proudu na funkce a nastavení ochrany.
4. Testování funkce digitální rozdílové ochrany se senzorovými vstupy.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 18.5.2012

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

Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

předseda oborové rady



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.

Bibliografická citace práce:

RAJCHMAN, Z. Srovnání přístrojových transformátorů proudu a proudových senzorů s ohledem na funkci rozdílové ochrany. Diplomová práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2012, 85 stran.

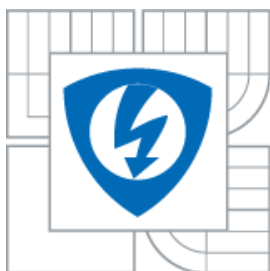
Jako autor uvedené diplomové (bakalářské) práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

SROVNÁNÍ PŘÍSTROJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ PROUDU A PROUDOVÝCH SENZORŮ S OHLEDEM NA FUNKCI ROZDÍLOVÉ OCHRANY

COMPARISON OF INSTRUMENT TRANSFORMERS AND CURRENT SENSORS WITH RESPECT
TO THE FUNCTION OF DIFFERENTIAL PROTECTION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. ZBYNĚK RAJCHMAN

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JAROSLAVA ORSÁGOVÁ, Ph.D.

ABSTRAKT

Přístrojové transformátory proudu a proudové senzory jsou přístroje, které nejčastěji slouží k měření proudů v soustavách vysokého napětí. Jejich úkolem je převádět měřené proudy na hodnoty, které jsou zpracovatelné měřicími a jistícími přístroji.

Teoretickou část práce zahrnuje třetí až sedmá kapitola, které se věnují rozboru, konstrukce a popisu charakteristických vlastností obou přístrojů a problematice chránění transformátorů rozdílovou ochranou. Praktická část práce je obsažena v osmé až desáté kapitole. Ta popisuje průběh laboratorního měření, které má za cíl ověřit teoretické poznatky práce. Závěr práce je věnován vzájemnému porovnání vlastností a shrnutí výsledků laboratorního měření.

KLÍČOVÁ SLOVA: měření proudu; přístrojový transformátor proudu; proudový senzor; Rogowského cívka; třída přesnosti; diferenciální ochrany, přesycení

ABSTRACT

Current transformers and current sensors are devices which are mostly used for current measurement in high voltage systems. These devices transform measured currents to range which are workable for measurement and protection devices.

Theoretical part includes from third to seventh chapter. These chapters contain construction analysis and characteristic points for both device and problems of protecting the transformer with differential protection. Practical part includes from eighth to tenth chapter. This chapter consists results from laboratory measurement. Results are used for verification with theoretical part of the thesis. Conclusion of this thesis comparing properties and summarises results from laboratory measurement.

KEY WORDS: Current Measurement; Current Transformer; Current Sensor; Rogowski Coil; Accuracy Class; deferential protection, saturation

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK	11
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	12
1 ÚVOD.....	14
2 CHARAKTERISTIKA SOUČASNÉHO STAVU MĚŘENÍ PROUDŮ	15
3 PŘÍSTROJOVÉ TRANSFORMÁTORY PROUDU	16
3.1 PARAMETRY PŘÍSTROJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ PROUDŮ.....	16
3.2 PŘÍSTROJOVÉ TRANSFORMÁTORY PROUDU	19
3.3 PROVOZ PŘÍSTROJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ PROUDŮ	20
3.3.1 CHYBA PROUDU	20
3.3.2 CHYBU ÚHLU	21
3.3.3 MAGNETICKÉ VLASTNOSTI JÁDRA.....	21
3.4 ZAPOJENÍ PTP.....	22
3.4.1 ZPŮSOBY ZAPOJENÍ PTP DO OBVODŮ NAPÁJENÍ OCHRAN:.....	22
3.4.2 PŘEVOD A HODINOVÝ ÚHEL:.....	22
3.5 DĚLENÍ TRANSFORMÁTORŮ PROUDU	23
3.5.1 PROVEDENÍ PŘÍSTROJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ PROUDU	24
3.6 ELEKTRONICKÉ TRANSFORMÁTORY PROUDU MALÉHO VÝKONU (LPCT)	26
3.6.1 PRINCIP ELEKTRONICKÝCH TRANSFORMÁTORŮ MALÉHO VÝKONU	26
4 PROUDOVÉ SENZORY	27
4.1 DEFINICE DŮLEŽITÝCH POJMŮ	27
4.2 PRINCIP ROGOWSKÉHO CÍVKY:.....	29
4.2.1 PROVEDENÍ PCB ROGOWSKÉHO CÍVKY	31
4.3 VLASTNOSTI PROUDOVÝCH SENZORŮ	33
4.4 POUŽITÍ PROUDOVÝCH SENZORŮ	34
4.5 PROVEDENÍ PROUDOVÝCH SENZORŮ	35
5 PORUCHY TRANSFORMÁTORŮ.....	36
5.1 PRŮCHOZÍ PORUCHY.....	36
5.2 VNITŘNÍ PORUCHY	36
5.3 PŘÍČINY VZNIKU ZKRATŮ.....	36
6 OCHRANY TRANSFORMÁTORŮ	37
6.1 VYBAVENÍ TRANSFORMÁTORŮ OCHRANAMI	38
6.1.1 TRANSFORMÁTORY DO VÝKONU 1 MVA	38
6.1.2 TRANSFORMÁTORY NAD 1 MVA DO 5 MVA	38
6.1.3 TRANSFORMÁTORY NAD 5 MVA.....	38
7 ROZDÍLOVÁ OCHRANA TRANSFORMÁTORU.....	39
7.1 ZÁKLADNÍ POŽADAVKY NA OCHRANY.....	39

7.2 PRINCIP ROZDÍLOVÉ OCHRANY	39
7.3 VYPÍNAČÍ CHARAKTERISTIKA [19]	40
7.4 BLOKOVÁNÍ ROZDÍLOVÉ OCHRANY PŘI ZAPÍNAČÍM RÁZU	42
8 DIFERENCIÁLNÍ OCHRANA V OCHRANNÉM A ŘÍDÍCÍM TERMINÁLU REF542PLUS [11]	44
8.1 ZÁKLADNÍ POPIS TERMINÁLU	44
8.1.1 ZÁKLADNÍ JEDNOTKA	44
8.1.2 HMI JEDNOTKA.....	45
8.1.3 VYPÍNAČÍ CHARAKTERISTIKA DIFERENCIÁLNÍ OCHRANY V REF542PLUS	46
8.2 NASTAVENÍ A ZAPOJENÍ TERMINÁLU REF 542PLUS PRO TESTOVÁNÍ DIFERENCIÁLNÍCH OCHRANY S POUŽITÍM PTP	47
8.2.1 KONFIGURACE TERMINÁLU REF542PLUS S DIFERENCIÁLNÍ OCHRANOU	48
8.2.1.3 KONFIGURACE KARTY ANALOGOVÝCH VSTUPŮ.....	50
8.2.2 VYTVOŘENÍ FUNKČNÍHO SCHÉMATU V JAZYCE FUPLA:	51
8.2.2.1 ZÁKLADNÍ PRÁCE S FUNKČNÍMI BLOKY A GRAFICKÝMI PRVKY FUPLY:	52
8.2.2.3 POPIS FUNKCE VYTVOŘENÉHO FUNKČNÍHO SCHÉMATU	54
8.3 NASTAVENÍ A ZAPOJENÍ TERMINÁLU REF 542PLUS PRO TESTOVÁNÍ DIFERENCIÁLNÍCH OCHRANY S POUŽITÍM SENZORŮ RC	55
8.3.1 KONFIGURACE KARTY ANALOGOVÝCH VSTUPŮ SE SENZORY	56
9 MĚŘENÍ S PRIMÁRNÍM TESTREM OMICRON CPC 100.....	58
9.1 MĚŘENÍ PŘÍSTROJOVÉHO TRANSFORMÁTORU PROUDU S PRIMÁRNÍM TESTREM CPC 100.....	59
9.2 MĚŘENÍ PROUDOVÝCH SENZORŮ RC S PRIMÁRNÍM TESTREM CPC 100.....	64
10 MĚŘENÍ SE SEKUNDÁRNÍM TESTREM OMICRON CMC 256 PLUS.....	67
10.1 MODUL ADVANCED TRANSPLAY	68
10.2 NASTAVENÍ MODULU ADVANCED TRANSPLAY	68
10.3 MĚŘENÍ PŘÍSTROJOVÉHO TRANSFORMÁTORU PROUDU A PROUDOVÝCH SENZORŮ RC POMOCÍ SEKUNDÁRNÍHO TESTRU CMC 256PLUS	70
11 ZÁVĚR.....	79
POUŽITÁ LITERATURA	80
PŘÍLOHA A	82
PŘÍLOHA B.....	83
PŘÍLOHA C	85

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 3.1 Zapojení přístrojového transformátoru do obvodu</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 3.2 Náhradní schéma přístrojového transformátoru proudu.....</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 3.3 Magnetizační charakteristika přístrojového transformátoru proudu.....</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 3.4 Vyrovnání hodinového úhlu při zapojení Y/D [17]</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 3.5 Provedení podpěrného transformátoru proudu.....</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 3.6 Provedení tyčového transformátoru proudu.....</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 3.7 Provedení násuvného transformátoru proudu.....</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 3.8 Provedení průchodkového transformátoru proudu</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 3.9 Princip funkce elektronického transformátoru malého výkonu [10].....</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 4.1 Princip měření proudu pomocí Rogowského cívky [15]</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 4.2 Náhradní schéma Rogowského cívky [10].....</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 4.3 Výstupní napětí Rogowského cívky pro a) vodič vně, b) uvnitř cívky.....</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 4.4 Princip PCB Rogowského cívky [3]</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 4.5 Princip Rogowského cívky využívající dvou PCB cívek [3]</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 4.6 PCB Rogowského cívka s děleným jádrem [3]</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 4.7 Princip konstrukce PCB cívek pro měření fázových a rozdílových proudů</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 4.8 Provedení proudových senzorů pro vnitřní použití [14]</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 4.9 Schéma a provedení kombinovaného senzoru</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 7.1 Princip činnosti rozdílové ochrany [18].....</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 7.2 Vypínací charakteristika ochrany.....</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 7.3 Průběhy magnetického toku a magnetizačního proudu transformátoru</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek 7.4 Frekvenční charakteristika blokování zapínacího rázu.....</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 8.1 Základní a HMI jednotka terminálu REF542plus</i>	<i>45</i>
<i>Obrázek 8.2 Vypínací charakteristika dif. ochrany REF542plus.....</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 8.3 Zapojení základní jednotky pro testování diferenciální ochrany.....</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 8.4 Hlavní konfigurační okno s popisem nástrojové lišty.....</i>	<i>49</i>
<i>Obrázek 8.5 Nastavení komunikačních parametrů sériového portu</i>	<i>49</i>
<i>Obrázek 8.6 Nastavení parametrů připojených modulů</i>	<i>50</i>
<i>Obrázek 8.7 Dialogové okno pro nastavení analogových vstupů konkrétní nastavení pro CT1 ...</i>	<i>51</i>
<i>Obrázek 8.8 Fyzická a virtuální realizace spoje mezi funkčními bloky, konfigurační tabulka.....</i>	<i>52</i>
<i>Obrázek 8.9 Vytvořené funkční schéma pro testování diferenciální ochrany.....</i>	<i>53</i>
<i>Obrázek 8.10 Zapojení základní jednotky pro testování diferenciální ochrany s RC.....</i>	<i>55</i>

<i>Obrázek 8.11 Dialogové okno pro nastavení analogových vstupů</i>	<i>56</i>
<i>Obrázek 8.12 Dialogové okno pro nastavení převodu a korekčních faktorů konkrétně pro RC1</i>	<i>57</i>
<i>Obrázek 9.1 Čelní panel testovacího systému CPC 100 [20]</i>	<i>58</i>
<i>Obrázek 9.2 Zapojení zesilovače na rozsah 2000 A [20].....</i>	<i>59</i>
<i>Obrázek 9.3 Schéma zapojení pro nastavení jmenovité zátěže</i>	<i>60</i>
<i>Obrázek 9.4 Schéma zapojení pro měření přesnosti</i>	<i>61</i>
<i>Obrázek 9.5 Změřené hodnoty PTP</i>	<i>62</i>
<i>Obrázek 9.6 Detail změřených hodnot PTP</i>	<i>62</i>
<i>Obrázek 9.7 Detail upravené charakteristiky.....</i>	<i>62</i>
<i>Obrázek 9.8 Přesycení PTP primárním testrem.....</i>	<i>63</i>
<i>Obrázek 9.9 Zapojení napěťové sondy</i>	<i>64</i>
<i>Obrázek 9.10 Schéma zapojení pro nastavení jmenovité zátěže</i>	<i>65</i>
<i>Obrázek 9.11 Změřené hodnoty RC</i>	<i>66</i>
<i>Obrázek 9.12 Detail změřených hodnoty RC</i>	<i>66</i>
<i>Obrázek 10.1 Čelní panel testovacího systému CMC 256 plus [21].....</i>	<i>67</i>
<i>Obrázek 10.3 Zapojení proudových výstupů</i>	<i>68</i>
<i>Obrázek 10.2 Popisem nástrojové lišty Advanced TransPlay.....</i>	<i>68</i>
<i>Obrázek 10.4 Binární vstupy.....</i>	<i>69</i>
<i>Obrázek 10.5 Detailní zobrazení - Analogové výstupy</i>	<i>69</i>
<i>Obrázek 10.6 Schéma zapojení PTP</i>	<i>70</i>
<i>Obrázek 10.7 Schéma zapojení RC</i>	<i>71</i>
<i>Obrázek 10.8 Porucha 1, PTP.....</i>	<i>72</i>
<i>Obrázek 10.9 Porucha 1, RC.....</i>	<i>73</i>
<i>Obrázek 10.10 Porucha 2, PTP.....</i>	<i>74</i>
<i>Obrázek 10.11 Porucha 2, RC.....</i>	<i>75</i>
<i>Obrázek 10.12 Porovnání naměřených hodnot poruchy 2.....</i>	<i>76</i>
<i>Obrázek 10.13 Porucha 3, PTP.....</i>	<i>77</i>
<i>Obrázek 10.14 Porucha 3, RC.....</i>	<i>78</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 3-1 Dovolené chyby proudu a úhlu pro měřicí transformátory proudu [9].....</i>	<i>18</i>
<i>Tabulka 3-2 Dovolené chyby pro jistící transformátory proudu [9].....</i>	<i>18</i>
<i>Tabulka 6-1 Způsob chránění jednotlivých druhů poruch</i>	<i>37</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

B	Magnetická indukce
C_c	Kapacita kabelu
CT	Current Transformer
f_N	Jmenovitý kmitočet
H	Intenzita magnetického pole
I_1	Primární proud
I_2	Sekundární proud
I_{1N}	Jmenovitý primární proud
I_{2N}	Jmenovitý sekundární proud
I_d	Diferenciální proud
I_b	Stabilizační proud
I_m	Magnetizační proud
I_{pr}	Jmenovitý primární proud proudového senzoru
K	Koleno magnetizační charakteristiky
k_I	Jmenovitý převod PTP
K_{ra}	Jmenovitý převod elektronického transformátoru
K_a	Skutečný převod elektronického transformátoru
K, L	Primární svorky PTP
k, l	Sekundární svorky PTP
M	Vzájemná indukčnost
N_{N1}	Počet závitů primární strany
N_{N2}	Počet závitů sekundární strany
PTP	Přístrojový transformátor proudu
RC	Rogowski coil
R_a	Činný odpor obvodu chráněného objektu
R_b	Zatěžovací impedance
R_{sh}	Odpor bočníků
R_{br}	Jmenovité břemeno
S_N	Zátěž
S	Plocha závitu
t_{dr}	Jmenovité zpoždění

U_{sr}	Jmenovitý sekundární výstup proudivého senzoru
U_2	Napětí na výstupní PTP
X_a	Reaktance obvodu chráněného objektu
Z	Břemeno
Z_b	Vnější břemeno transformátoru
Z_N	Jmenovité břemeno
Z_0	Příčná impedance PTP
ε_I	Chyba proudu PTP
φ	Chyba úhlu
ε_c	Celková chyba PTP
$\varepsilon_{\%}$	Chyba převodu proudového senzoru
Φ	Magnetický tok
ω	Úhlová rychlost
μ_0	Permeabilita vakua
μ_r	Permeabilita vzduchu

1 ÚVOD

Rozsah elektrických veličin v elektrizačních soustavách je velmi rozsáhlý, proto je nutno přizpůsobovat příslušné proudy a napětí standardním hodnotám, které jsou vhodné pro měřicí, jistící a regulační přístroje. Tento požadavek je dán hledisky technickými i ekonomickými. Tyto přístroje se do elektrických obvodů nezapojují přímo, ale nepřímo přes přístrojové transformátory. Důležitou vlastností proudových transformátorů a senzorů je schopnost galvanického oddělení měřených obvodů vysokého napětí od obvodů měřicích a jistících, což vede ke zvýšení bezpečnosti obsluhy. Měřicí přístroje jsou pak přehledně umístěny ve velínech mimo rozvodny. Podle typu přístroje, který bude v obvodě na transformátor připojen, se pak dělí transformátory na měřicí a jistící. Na oba typy máme většinou rozdílné požadavky. Přístrojové transformátory měřicí musí být přesné především v oblastech, které jsou v okolí jmenovité hodnoty. Nejsou zde kladeny zvláštní požadavky na rychlost odezvy, tzn. že může nastat i dynamické zkreslení přenášené veličiny v přechodném stavu. Naopak přístrojové transformátory jistící musí zajišťovat dostatečně přesný přenos i na hranicích pracovní oblasti, tj. při velkých nadproudech a minimálních napětích. Stačí zde obvykle menší přesnost než u PT měřicích. Dále je vyžadována velká rychlost přenosu, tj. přesná transformace přechodného jevu, který se objevuje v proudu a napětí objektu při poruše. Výjimku tvoří wattové ochrany a ochrany při nesouměrnosti. Jejich požadavky na PT odpovídají požadavkům na měřicí transformátory. V praxi se často konstruují bloky až čtyř transformátorů, z nichž např. dvě jádra slouží pro ochrany, jedno pro regulátory, a jedno pro měřicí přístroje. [1]

Problematika vypnutí poruchy transformátorů se dostává do popředí s rostoucími pořizovacími cenami transformátorů. Pokud totiž nedojde k včasné identifikaci poruchy a po té k včasnému odepnutí transformátoru od zdroje energie, může dojít k tak velké destrukci, že oprava transformátoru již nebude možná. Dnešní tržní prostředí vyžaduje od zařízení vyšší využití, což vede k přetěžování transformátorů a jejich rychlejšímu stárnutí.

Na druhé straně výpadek transformátoru způsobený nadbytečným působením ochrany také vede k velkým finančním ztrátám, zvláště v dnešní době, kdy průmyslová výroba je automatizována a řízena průmyslovými počítači. Obdobný stav je v nevýrobní sféře, například v bankovníctví, kde výpadek elektrické může způsobit nemalé finanční ztráty, ve zdravotnictví mohou dokonce nastat ztráty na životech. [12]

Hlavním cílem této diplomové práce je prozkoumat princip a vlastnosti přístrojových transformátorů a proudových senzorů, konfigurace a nastavení rozdílové ochrany REF542plus pro chránění transformátoru a její testování s použitím přístrojových transformátorů proudů a proudových senzorů.

2 CHARAKTERISTIKA SOUČASNÉHO STAVU MĚŘENÍ PROUDŮ

Pro měření proudů v energetických sítích se dosud běžně používají proudové transformátory s magnetickým jádrem. Měřicí transformátory proudu patří zřejmě k nejrozšířenějším převodníkům pro měření velkých střídavých proudů. Proudové transformátory však mají několik podstatných nevýhod. Nejvýznamnější je nelinearita magnetizační charakteristiky (tzn. závislost magnetické indukce B na intenzitě magnetického pole H) feromagnetickým materiálů používaných pro výrobu magnetických obvodů. Při určité úrovni intenzity magnetického pole (a tedy při určité velikosti měřeného proudu) dojde k tzv. stavu nasycení, kdy se zásadně změní vlastnosti feromagnetika a magnetizační charakteristika se od svého původního lineárního průběhu výrazně odkloní. Pro zajištění potřebného rozsahu linearit je nutné dostatečně dimenzovat průřez magnetického obvodu proudového transformátoru. Tím však značně narostou jeho rozměry a hmotnost. Pro omezení vlivu ztrát vířivými proudy musí být navíc jádro sestaveno z listů feromagnetického materiálů, tím se komplikuje a prodražuje výroba celého proudového transformátoru.

Všechny uvedené obecné nevýhody měřících transformátorů proudu se při jejich použití v jisticích přístrojích projevují zvláště citelně. Z hlediska chránění je velmi nepříjemné, že k nasycení feromagnetického jádra proudového transformátoru dochází v oblasti velkých proudů, tedy právě v oblasti poruchových proudů, jejichž velikost by měla být měřena a vyhodnocována co nejpřesněji. Ani přídavné oteplení způsobené hysterezními ztrátami a ztrátami vířivými proudy nemusí být vždy zanedbatelné.

Naopak u přístrojových transformátorů používaných pouze k měřicím účelům je nasycení jádra pozitivní. Vlivem přesycení se totiž omezí sekundární proud a tím jsou chráněna citlivá a přesná měřicí zařízení, nebo elektroměry před účinky vysokých proudů.[2]

Novým řešením pro měření proudů, nutných pro ochranu a monitorování v systémech vysokého napětí, jsou proudové senzory. Senzory, založené na alternativních principech měření, jsou nástupci klasických měřících transformátorů s cílem snížit velikost, zlepšit výkonnostní parametry a zajistit vyšší stupeň standardizace. Tyto principy nejsou zdaleka nové, avšak teprve nyní, díky postupnému rozšíření použití inteligentních elektronických ochranných zařízení, je možné plně využít výhodných vlastností těchto principů.

Proud v senzoru je měřen na principu Rogowského cívky (Rogowski coil). Rogowského cívka je toroidní cívka bez železného jádra, umístěná kolem primárního vodiče stejným způsobem, jako sekundární vinutí transformátoru proudu.[4] Zásadně se však liší vlastnosti obou převodníků. Díky absenci magnetického jádra nemá proudový senzor žádnou z nevýhod proudových transformátorů. Protože proudové senzory nemají magnetické jádro, které by mohlo být nasyceno, zůstává měřicí rozsah lineární i pro velké proudy. Výstupním signálem Rogowského cívky však není proud, nýbrž napětí.[3]

3 PŘÍSTROJOVÉ TRANSFORMÁTORY PROUDU

Požadavky na měření elektrických veličin chráněného objektu jsou značně náročné. Běžně se vyskytují proudy řádu jednotek kiloampérů a napětí řádu stovek kilovoltů. Proto se ochrana nezapojuje do obvodů přímo, ale přes přístrojové transformátory proudu a napětí.

Smysl použití přístrojových transformátorů můžeme shrnout v následujících bodech:

- a) Transformují jmenovité proudy a napětí objektu na jednotné velikosti určené normou, tj. 100V, 5 A nebo 1 A pro vstup ochran.
- b) Izolují obvody vn a vvn od obvodů ochrany. Tak je zajištěna bezpečnost obsluhy i ochrany.
- c) Umožňují umístit ochrany z dosahu rušivých magnetických a elektrických polí objektu.
- d) Dovolují sčítat nebo odečítat proudy a napětí z několika izolovaných objektů.
- e) Dovolují soustředit ochrany v dozornách, tj. v prostorech, kde je přehledně umístěno řízení celého objektu.
- f) V případech, kde ochrana nemusí po překročení nastavené hodnoty dostávat přesnou informaci, může přístrojový transformátor omezovat sekundární veličiny při poruchových stavech (např. při velkých nadproudech) a tak chránit vstupní obvody ochrany. Jedná se např. o některé nadproudové ochrany, ne však o ochrany rozdílové a distanční.[5]

3.1 Parametry přístrojových transformátorů proudů

Jmenovitý primární proud I_{1N} – efektivní hodnota primárního proudu, která je uvedena na štítku transformátoru a na které je založena jeho činnost. Normalizované hodnoty jmenovitých primárních proudů jsou 10 – 12,5 – 15 – 20 – 25 – 30 – 40 – 50 – 60 – 75 A a jejich dekadické násobky nebo zlomky

Jmenovitý sekundární proud I_{2N} – efektivní hodnota sekundárního proudu, která je uvedena na štítku transformátoru a na které je založena jeho činnost. Normalizované hodnoty jmenovitých sekundárních proudů jsou 1 A, 2 A a 5 A.

Jmenovitý převod k_I – poměr jmenovitého primárního proudu k jmenovitému sekundárnímu proudu

$$k_I = I_{1N} / I_{2N} \quad (3.1)$$

Břemeno Z – celková impedance přístrojů připojených na sekundární svorky transformátoru při daném účinníku

Jmenovité břemeno Z_N – impedance, kterou smí být přístrojový transformátor zatížen, aby byla dodržena předepsaná přesnost

Zátěž S_N – hodnota zátěže ve VA, na které jsou založeny požadavky na předepsanou přesnost. Řada standardně vyráběných jmenovitých výkonů 2,5 – 5 – 10 – 15 – 30 VA.

Chyba proudu – rozdíl mezi jmenovitým a předpokládaným sekundárním proudem.

$$\varepsilon_I = \frac{k_I \cdot I_2 - I_1}{I_1} \cdot 100(\%) \quad (3.2)$$

Chyba úhlu φ – fázový rozdíl mezi fázory primárního a sekundárního proudu Chyba úhlu se považuje za kladnou, jestliže fázor sekundárního proudu předchází fázor primárního proudu.

Jmenovitý kmitočet f_N - hodnota kmitočtu, ze které jsou odvozeny požadavky norem

Celková chyba – efektivní hodnota rozdílu mezi okamžitými hodnotami primárního proudu a okamžitými hodnotami skutečného sekundárního přepočtené na primární stranu

$$\varepsilon_c = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (k_I \cdot i_2 - i_1)^2 dt} \quad (3.3)$$

Nejvyšší napětí pro zařízení – nejvyšší efektivní hodnota sdruženého střídavého napětí pro kterou je transformátor konstruován s ohledem na jeho izolaci

Jmenovitý krátkodobý tepelný proud - efektivní hodnota primárního proudu, který transformátor vydrží po dobu 1 sekundy při zkratovaném sekundárním vinutí, aniž by došlo k poškození transformátoru

Jmenovitý dynamický proud – vrcholová hodnota primárního proudu, kterou transformátor vydrží bez elektrického nebo mechanického poškození elektrodynamickými silami při zkratovaném sekundárním vinutí

Jmenovitý primární nadproud – hodnota minimálního primárního proudu, při které je celková chyba měřicího transformátoru proudu rovna nebo větší než 10 % při jmenovitém sekundárním břemenu

Nadproudové číslo – poměr jmenovitého primárního nadproudu ke jmenovitému primárnímu proudu. Možnosti provedení jsou 5 ; 10 ; 15 ; 20 ; 30

Třída přesnosti PTP - označení přiřazené transformátoru proudu, jehož chyba proudu a chyba úhlu nepřekročí provozní hodnoty v předepsaných provozních podmínkách. Třídy přesnosti měřicích transformátorů proudu jsou 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 5 ; jisticích transformátorů proudu jsou 5P a 10P a jim odpovídají dovolené chyby:

Tabulka 3-1 Dovolené chyby proudu a úhlu pro měřicí transformátory proudu [9]

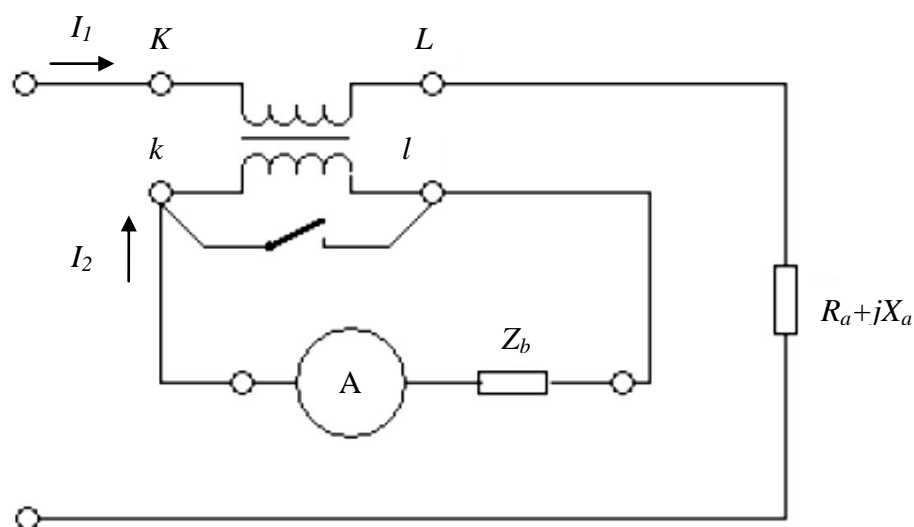
Třída přesnosti	I_n [%]	±Chyba proudu v procentech jmenovitého proudu				±Chyba úhlu v procentech jmenovitého proudu							
		5	20	100	120	Minuty				Centiradiány			
						5	20	100	120	5	20	100	120
0,1		0,4	0,2	0,1	0,1	15	8	5	5	0,45	0,24	0,15	0,1
0,2		0,75	0,35	0,2	0,2	30	15	10	10	0,9	0,45	0,3	0,3
0,5		1,5	0,75	0,5	0,5	90	45	30	30	2,7	1,35	0,9	0,9
1,0		3	1,5	1,0	1,0	180	90	60	60	5,4	2,7	1,8	1,8

Tabulka 3-2 Dovolené chyby pro jisticí transformátory proudu [9]

Třída přesnosti	Chyba proudu v % jmenovitém primárním proudu	Chyba úhlu při jmenovitém primárním proudu		Celková chyba v % při jmenovitém primárním nadproudu
		Minuty	Centiradiány	
5P	1	60	1,8	5
10P	3	-	-	10

3.2 Přístrojové transformátory proudu

Přístrojový transformátor proudu musí zaručit konstantní poměr výstupního a vstupního proudu. Vstupní vinutí je zapojeno do série s obvodem chráněného objektu. Primární vinutí je obvykle tvořeno jediným závitem. K sekundárnímu vinutí jsou připojeny měřicí a jistící přístroje. Primární svorky se standardně označují velkými písmeny, sekundární svorky malými písmeny



Obrázek 3.1 Zapojení přístrojového transformátoru do obvodu

Hlavním znakem PTP je, že jeho výstupní proud I_2 je dán vstupním obvodem, ve kterém je PTP zapojen. Obrázek 3.1 značí:

- I_1 je vstupní proud,
- I_2 výstupní proud,
- X_a reaktance obvodu chráněného objektu,
- R_a činný odpor obvodu chráněného objektu,
- Z_b vnější břemeno transformátoru.

Činnost transformátoru je založena na principu elektromagnetické indukce. Průchodem proudu primárním vinutím se v jádře transformátoru vybudí magnetický tok Φ , který indukuje proud v sekundárním vinutí.

$$\Phi \sim N_{N1} I_{N1} = N_{N2} I_{N2} \quad (3.4)$$

$$\frac{I_{N1}}{I_{N2}} = \frac{N_{N2}}{N_{N1}} = k_I \quad (3.5)$$

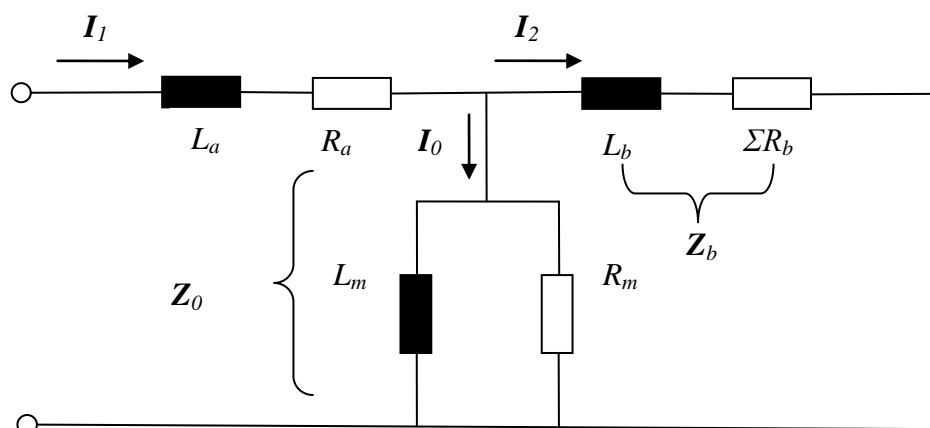
kde N_{N1} je počet závitů vstupního vinutí,
 N_{N2} počet závitů výstupního vinutí,
 k_I jmenovitý převod PTP.

Napětí na výstupní straně je dáno zatížením PTP

$$\bar{U}_2 = \bar{Z}_b \cdot \bar{I}_2 \quad (3.6)$$

Proto nesmí nikdy dojít k rozpojení výstupního proudového obvodu PTP. Výstupní napětí by vzrostlo a mohlo by ohrozit ochranu, obsluhu i samotný PTP, neboť $Z_b \rightarrow \infty = U_2 \rightarrow \infty$. Znamená to, že na výstupní straně se objeví špičkové napětí, které je tím vyšší, čím ostřejší je koleno magnetizační charakteristiky transformátoru. Aby bylo možné zkoušet proudové obvody ochran za provozu, musí být vybaveny zvláštní zkratovací zásuvkou, která zkratuje proudové obvody PTP během zkoušení.

3.3 Provoz přístrojových transformátorů proudů



Obrázek 3.2 Náhradní schéma přístrojového transformátoru proudů

3.3.1 Chyba proudu

Na Obrázek 3.2 je náhradní schéma obvodu z Obrázek 3.1. Vzhledem k velikosti R_a a L_a objektu lze rozptyl na vstupní straně a odpor PTP zanedbat. Z náhradního schématu vyplývá, že transformátor proudů je zatížen chybou proudu, která je způsobena magnetizačním proudem \bar{I}_0 .

$$\varepsilon_I = \left| \frac{k_I \cdot |\bar{I}_2| - |\bar{I}_1|}{|\bar{I}_1|} \right| \cdot 100(\%) \quad (3.7)$$

kde \bar{I}_1 je vstupní proud,
 \bar{I}_2 výstupní proud

3.3.2 Chybu úhlu

$$\varphi_{rad} = \frac{\pi}{180} \varphi_{st} \cong \operatorname{tg} \varphi = \left| \frac{\operatorname{Im} \overline{\Delta I}}{\overline{I_1}} \right| \quad (3.8)$$

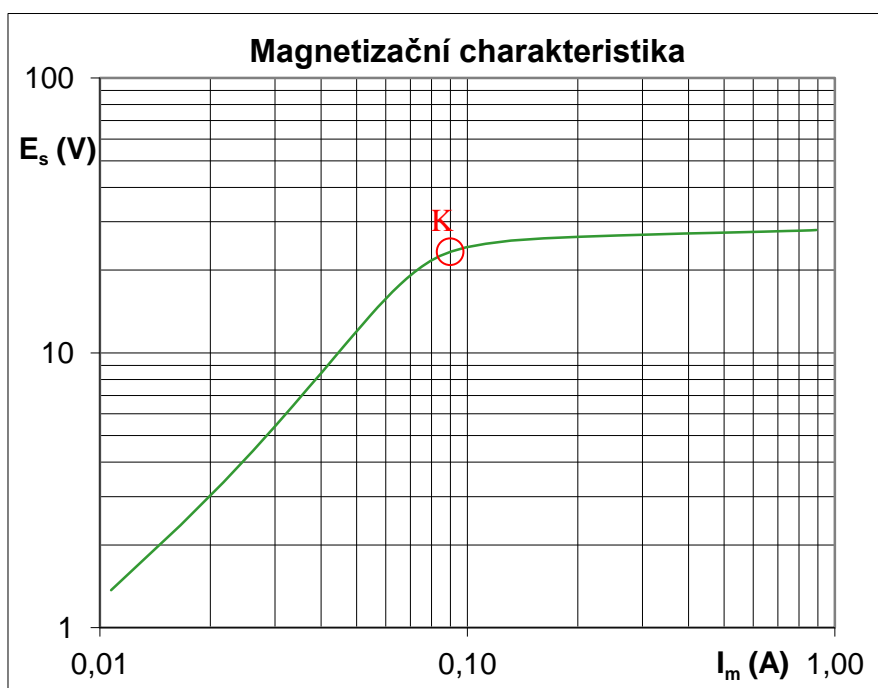
kde $\operatorname{Im} \overline{\Delta I}$ je imaginární složka rozdílu proudu $\overline{\Delta I} = \overline{I_1} - \overline{I_2}$

Obě chyby PTP zvětšují se zatížením transformátoru, tj. se zvětšováním $\overline{Z_b}$. Proto musí mít impedance sekundárního obvodu co nejnižší hodnotu. Naopak, čím má PTP větší příčnou impedanci $\overline{Z_0}$, tím je přesnější. Z toho důvodu je nutný dostatečný průřez magnetického jádra z kvalitního feromagnetického materiálu

Proto je důležité, aby celková spotřeba všech přístrojů připojených do sekundárního obvodu transformátoru nepřekročila dovolené zatížení. Pokud tuto hodnotu překročíme, přestane transformátor pracovat v blízkosti stavu nakrátko. Dojde ke změně jeho skutečného převodu a při měření proudu vznikne značná chyba. [8]

3.3.3 Magnetické vlastnosti jádra

Základní vlastností feromagnetických materiálů je možnost vybudit v nich i poměrně slabým magnetickým polem velmi silnou magnetizaci. Poněvadž je velikost jádra PTP konečná, dochází k jeho nasycení a na magnetizační charakteristice $E_s = f(I_m)$ se objeví nelinearita *Obrázek 3.3*. Bod *K* na magnetizační charakteristice nazýváme bod nasycení.



Obrázek 3.3 Magnetizační charakteristika přístrojového transformátoru proudu

Koleno magnetizační charakteristiky je definováno jako bod, ve kterém zvětšení napětí E_s o 10% způsobí zvětšení magnetizačního proudu I_m o 50 %. Za kolenem charakteristiky mluvíme o nasycení PTP. V této oblasti téměř všechen vstupní proud musí přejít na magnetizační.

Transformátory proudu jsou konstruovány tak, aby do hodnoty jmenovitého primárního proudu zůstaly lineární a měly zaručenou přesnost. Vlivem saturace dochází ke zkreslení výstupních hodnot, což je příčinou chyby měření nebo nesprávné funkce ochranných zařízení.

Tvar magnetizační charakteristiky a poloha kolena K závisí na materiálu jádra, jeho průřezu a délce střední silové čáry. Pro zvýhodnění těchto parametrů a zmenšení rozptylu se PTP vinou zpravidla jako toroidní.

U PTP při zvětšování břemene Z_b roste napětí U_b podle vztahu (3.6). Vzrůst tohoto napětí je omezen velikostí U_{lim} . Jakmile napětí U_b dosáhne hodnoty U_{lim} , dojde k nasycení PTP, rychle se zvětší chyba a při souměrném vstupním proudu dojde ke zkreslení výstupního proudu. Nasycením je proto omezen výkon, tj. jmenovitá zátěž PTP.

3.4 Zapojení PTP

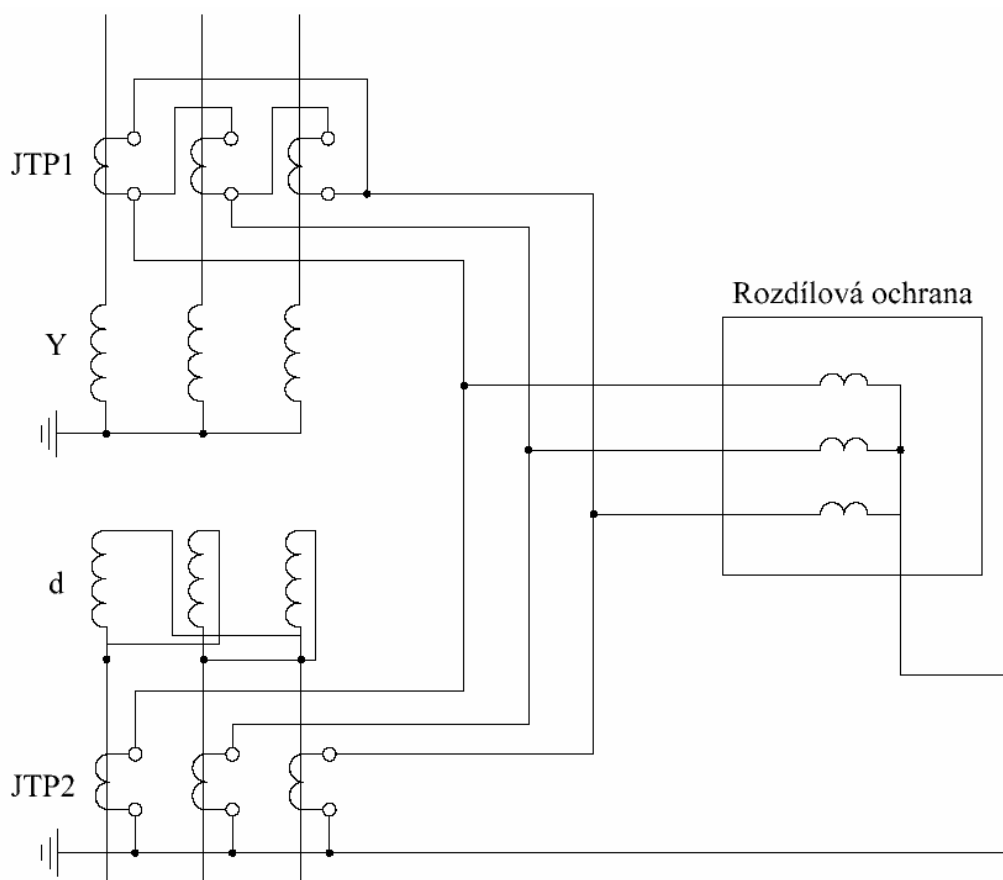
PTP jsou konstrukčně vyhotovené jako jednofázové, v trojfázové soustavě se používají dva nebo tři transformátory, podle druhu ochrany.

3.4.1 Způsoby zapojení PTP do obvodů napájení ochran:

- Do úplné hvězdy – toto zapojení se používá v účinně uzemněných soustavách (zemní spojení)
- Do neúplné hvězdy – toto zapojení se používá v neúčinně uzemněných soustavách (zkrat). Zapojení do neúplné hvězdy znamená zapojení 2 rozběhových členů, jedna fáze se vynechává.
- Do trojúhelníka – toto zapojení se používá pro rozdílové ochrany. Rozběhové členy ochrany připojené na vinutí trojúhelníka reagují na všechny typy zkratů.
- Součtové zapojení – využití pro ochrany vedení. Součtové zapojení znamená spojení sek. vinutí transformátorů do jednoho rozběhového členu ochrany. 80[12]

3.4.2 Převod a hodinový úhel:

Elektromechanické diferenciální ochrany dovedou porovnat jen stejné proudy a stejný fázový úhel. Aby mohly pracovat, musí se zvolit vhodné zapojení a vhodné měniče. Při chránění transformátorů v zapojení Y/D musí dojít k převodu hodinového úhlu. Skupina jistících transformátorů na jedné straně má zapojení sekundárních vinutí stejné jako silový transformátor na straně protější. Spojení sekundárních vinutí transformátorů proudu je tedy zrcadlovým obrazem spojení vinutí silového transformátoru. Pro správnou funkci se ale strana zapojená do trojúhelníku nesmí přizemnit. Převod transformátorů se musí vhodně zvolit tak, aby nebyly za normálního bezporuchového stavu difference. [13]



Obrázek 3.4 Vyrovnání hodinového úhlu při zapojení Y/D [17]

3.5 Dělení transformátorů proudu

Transformátory proudu lze dělit podle několika hledisek. Podle konstrukčního provedení, podle tvaru primárního vinutí, podle magnetického obvodu nebo podle způsobu použití.

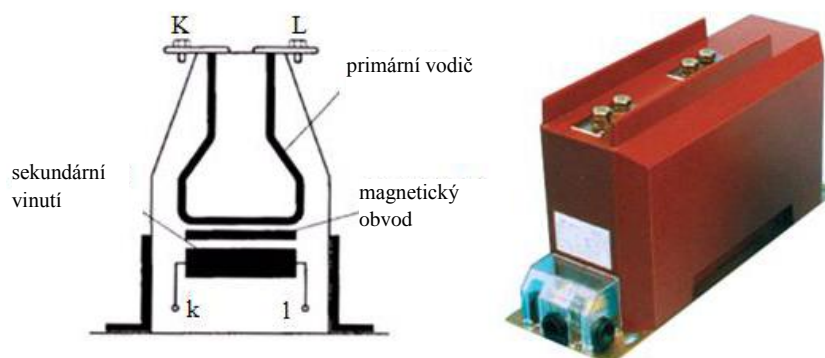
- Podle konstrukčního provedení je lze rozdělit na podpěrné, průchodkové nebo průchozí
- podle tvaru primárního vinutí na jednozávitové, závitové, smyčkové, tyčové, násuvné, prstencové
- podle magnetického obvodu je dělíme na jednojádrové, vícejádrové, kaskádové, sčítací, nízkoreaktační a vysokoreaktační
- Podle způsobu použití transformátory proudu lze rozdělit na měřicí a jisticí. Na oba druhy jsou kladeny rozdílné požadavky, což vyplývá z podmínek, za kterých mají správně pracovat.

3.5.1 Provedení přístrojových transformátorů proudu

Přístrojové transformátory proudu jsou zalévány do epoxidové pryskyřice, která tvoří izolaci pro různé hodnoty napětí. Počet sekundárních vinutí se pohybuje od 1 do 6 a závisí na kombinaci technických parametrů, jako je třída přesnosti, impedance zátěže, velikost zkratového proudu, nadproudový činitel, rozměry transformátoru a jiné. Sekundární vinutí jsou používána pro měřicí nebo jistící účely, případně pro zvláštní použití. Během provozu musí být jedna svorka každého použitého vinutí uzemněna. Nepoužitá vinutí musí být zkratována a uzemněna. [14]

3.5.1.1 Podpěrné transformátory proudu

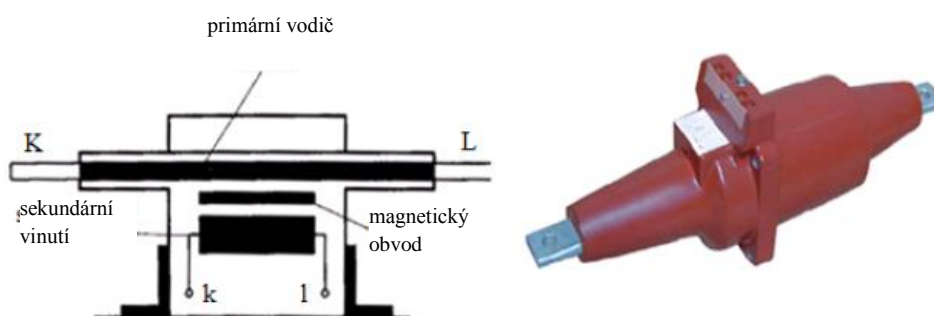
Podpěrné transformátory mají primární svorky umístěné na temeni tělesa. Sekundární svorky jsou umístěny na čelní straně. Spodní část tělesa je uchycena šrouby k rámu rozvaděče, případně k podlaze kobky. Transformátory jsou navrženy buď jako jednozávitové, pro jmenovité proudy od 400 A do 3200 A, nebo s větším počtem závitů na primární straně pro jmenovité proudy od 10 A do 600 A. Mohou mít až dva převody s možností přepínání na primární, nebo sekundární straně. Na *Obrázek 3.5* je znázorněno schéma a skutečné provedení podpěrného transformátoru proudu.



Obrázek 3.5 Provedení podpěrného transformátoru proudu

3.5.1.2 Tyčové transformátory proudu

Tento typ transformátoru má vestavěný vodič ve tvaru pásu, který představuje primární vinutí. Tyčové transformátory mohou mít více převodů s přepínáním na sekundární straně. Při instalaci do rozvaděče jsou tyto transformátory využívány jako průchodky. Jmenovité primární proudy jsou v rozmezí od 100 A do 2500 A. Na *Obrázek 3.6* je znázorněno schéma a skutečné provedení tyčového transformátoru proudu.



Obrázek 3.6 Provedení tyčového transformátoru proudu

3.5.1.3 Násuvné transformátory proudu

Násuvné transformátory proudu se liší od předchozích transformátorů tím, že nemají vestavěné primární vinutí, které je v tomto případě tvořeno rovnou přípojnici. Takový transformátor je vybaven pouze magnetickým obvodem s navinutým sekundárním vinutím. Na přípojnici, ve které chceme měřit proud, se nasouvá. Tyto transformátory se používají pro měření proudů do hodnoty 6000 A. Při proudech větších než 4000 A jsou jádra transformátoru chráněna před působením magnetických polí sousedních přípojníc.

Prakticky stejným způsobem funguje prstencové provedení s tím rozdílem, že jádro nemá čtvercový, ale prstencový tvar a sekundární vinutí je rovnoměrně rozloženo po celém obvodu. Na *Obrázek 3.7* je znázorněno schéma a skutečné provedení násuvného transformátoru proudu.



Obrázek 3.7 Provedení násuvného transformátoru proudu

3.5.1.4 Průchodkové transformátory proudu

Tyto transformátory pracují na stejném principu jako transformátory násuvné. Svou konstrukcí jsou uzpůsobené jako průchodky. Transformátory tohoto typu se používají v rozvodných zařízeních vysokého napětí se jmenovitými proudy do 5000 A. Transformátory mají násuvnou konstrukci s jedním až třemi sekundárními vinutími podle typu použití. Vnitřní otvor je opatřen polovodivým nátěrem, který je vyveden na čelní plochu tělesa a za provozu je propojen s primárním vodičem. Provedení takového transformátoru proudu je na *Obrázek 3.8*.



Obrázek 3.8 Provedení průchodkového transformátoru proudu

3.6 Elektronické transformátory proudu malého výkonu (LPCT)

Transformátory proudu malého výkonu založené na cívkách se železným jádrem představují další vývoj klasických induktivních transformátorů proudu. Protože moderní elektrické přístroje vyžadují malý vstupní výkon, mohou být LPCT dimenzovány pro velké impedance. Důsledkem toho je omezení vlivu saturace jádra, což je hlavní nevýhoda klasických transformátorů proudu, a tím je značně rozšířen měřicí rozsah.

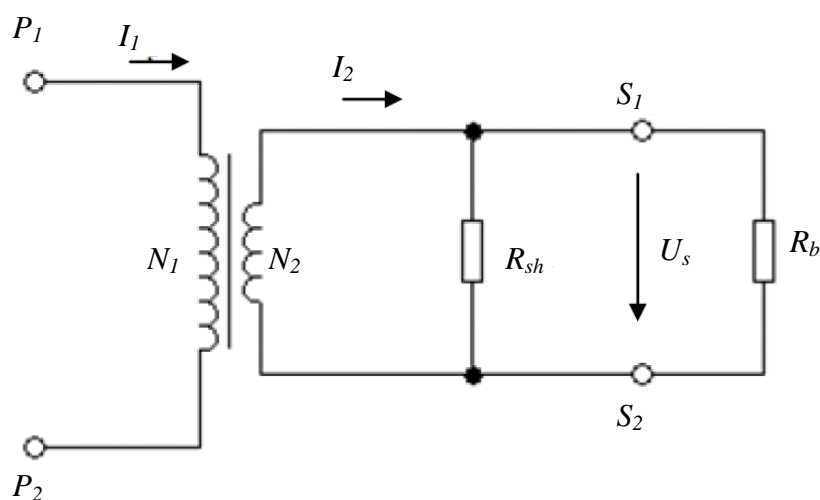
Snížením celkové spotřeby je umožněno měření nadproudů i zkratových proudů s vysokou přesností. Přes široký měřicí rozsah mohou být LPCT konstruovány s menšími rozměry než klasické transformátory srovnatelných parametrů. S rozšířením měřicího rozsahu odpadá dělení klasických transformátorů na měřicí a jistící, protože pro oba účely lze použít jediný elektronický transformátor malého výkonu. 80[10]

3.6.1 Princip elektronických transformátorů malého výkonu

LPCT se skládají z transformátoru proudu s primárním vinutím, malým magnetickým jádrem a sekundárním vinutím s minimalizovanými ztrátami. Sekundární obvod je uzavřen bočником R_{sh} . Tento bočník je součástí LPCT a je velmi důležitý pro funkci a kalibraci transformátoru.

Odpor bočníku je navržen tak, aby spotřeba výkonu pro transformátor byla blízká nule. Sekundární proud I_2 způsobuje úbytek napětí U_s na bočniku, který je úměrný primárnímu proudu v amplitudě a fázi. Výstupním signálem z LPCT je úbytek napětí na bočniku R_{sh} . LPCT se tak stává ideálním z hlediska měřicího rozsahu, přesnosti a menších vnitřních ztrát. Princip funkce je znázorněn na *Obrázek 3.9*. Výstupní napětí je určeno vztahem: [10]

$$U_s = R_{sh} \cdot \frac{N_1}{N_2} \cdot I_1 \quad (3.9)$$



Obrázek 3.9 Princip funkce elektronického transformátoru malého výkonu [10]

4 PROUDOVÉ SENZORY

Modernějším řešením měření proudů a napětí pro jištění a monitorování v energetických systémech vysokého napětí se staly proudové senzory. Proudové senzory byly zavedeny jako následovníci klasických transformátorů proudu. Hnací silou v jejich vývoji byla nutnost standardizovat a optimalizovat výrobu rozvaděčů vysokého napětí, ve kterých jsou alternativou ke klasickým přístrojovým transformátorům proudu.

4.1 Definice důležitých pojmů

Pro další popis proudových senzorů je nutné definovat pojmy, které charakterizují základní veličiny a vlastnosti. [10]

Elektronický přístrojový transformátor - uspořádání jednoho nebo více proudových senzorů, které mohou být zapojeny do přenosového systému a sekundárních převodníků; toto uspořádání je určeno k převodu měřené veličiny pro měřicí přístroje, elektroměry a ochrany nebo řídicí zařízení

Elektronický transformátor proudu - elektronický transformátor proudu, u něhož je výstup ze sekundárního převodníku za normálních podmínek použití prakticky úměrný primárnímu proudu a liší se od něj ve fázi o známý úhel pro příslušné zapojení

Primární svorky - jsou svorky, kterými prochází měřený proud

Primární proudový senzor - elektrické, optické nebo jiné zařízení určené k přenosu signálu odpovídajícímu proudu, který protéká přes primární svorky do sekundárního převodníku přímo, nebo přes primární převodník

Primární převodník - uspořádání, které přeměňuje signál, přicházející z jednoho nebo více primárních senzorů na signál vhodný pro přenosový systém

Přenosový systém - vazební uspořádání na vzdálenost mezi primárními a sekundárními částmi určenými k přenosu systému

Sekundární převodník - uspořádání, které mění signál vyslaný přes vysílací systém na veličinu úměrnou proudu mezi primárními svorkami pro napájení měřicích přístrojů, elektroměrů, jisticích nebo řídicích zařízení

Sekundární obvod - vnější obvod, který získává informační signály ze sekundárního převodníku elektronického přístrojového transformátoru

Jmenovitý kmitočet - hodnota základního kmitočtu, na které jsou založeny požadavky normy

Jmenovitý primární proud I_{pr} - efektivní hodnota složky primárního proudu při jmenovitém kmitočtu, na kterém je založeno provedení elektronického transformátoru proudu

Jmenovitý sekundární výstup U_{sr} - pro analogový výstup je to efektivní hodnota sekundárního napětí při jmenovitém kmitočtu, na které je založena činnost elektronického transformátoru proudu

Jmenovitý převod elektronického transformátoru K_{ra} - jmenovitá hodnota převodu

Skutečný převod elektronického transformátoru K_a - pro analogový výstup je to poměr skutečné efektivní hodnoty primárního proudu ke skutečné efektivní hodnotě sekundárního výstupu elektronického transformátoru proudu

Chyba převodu $\varepsilon_{\%}$: je chyba, kterou elektronický transformátor proudu vnáší do měření proudu, a která vyplývá ze skutečnosti, že skutečný převod se liší od jmenovitého

Pro analogový výstup bude chyba proudu v procentech dána vztahem:

$$\varepsilon_{\%} = \frac{K_{ra} \cdot U_s - I_p}{I_p} \cdot 100 (\%) \quad (4.1)$$

Chyba úhlu φ - pro analogový výstup je to rozdíl fáze mezi fázory primárního a sekundárního proudu; orientace fázorů je zvolena tak, aby se úhel rovnal jeho jmenovité hodnotě při jmenovitém kmitočtu u ideálního elektronického transformátoru; chyba úhlu se považuje za kladnou, když fázor sekundárního výstupu předchází fázor primárního proudu; chyba úhlu se vyjadřuje v minutách nebo centiradiánech

Třída přesnosti: označení přiřazené elektronickému transformátoru proudu, jehož chyba proudu a úhlu nepřekročí povolené mezní hodnoty v předepsaných provozních podmínkách

Nejvyšší napětí pro zařízení U_m - nejvyšší efektivní hodnota sdruženého napětí, pro které je elektronický transformátor proudu konstruován s ohledem na jeho izolaci

Jmenovitá izolační hladina: kombinace hodnot napětí, která charakterizuje izolaci z hlediska jeho schopnosti odolávat elektrickému namáhání

Proud pro vybavení: nejmenší efektivní hodnota primárního proudu nezbytná pro vybavení elektronického transformátoru proudu

Břemeno: impedance sekundárního obvodu vyjádřená v ohmech při $\cos\varphi = 1$

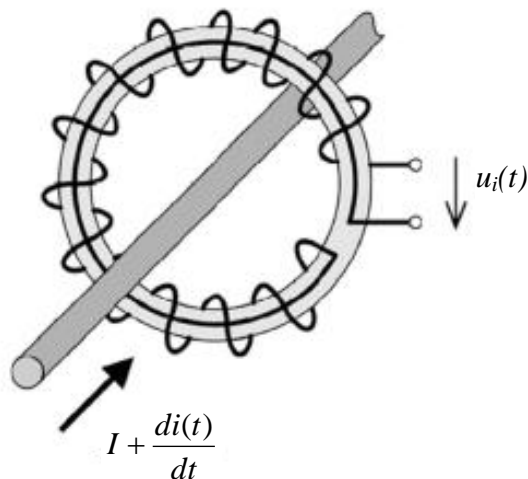
Jmenovité břemeno R_{br} - hodnota břemena, na kterou jsou založeny požadavky na předepsanou přesnost

Jmenovité zpoždění t_{dr} - jmenovitá hodnota času, který je potřebný pro zpracování údajů a jejich přenos

Korekční činitel - chyba proudového senzoru je v celém rozsahu konstantní, a proto ji můžeme korigovat korekčním činitelem. Korekční činitel je měřen pro každý senzor samostatně při kusových zkouškách.

4.2 Princip Rogowského cívky:

Rogowského cívka jako měřící prvek měří změny proudu ve sledovaném vodiči díky indukovanému napětí ve vodiči cívky. Princip je takový, že střídavý proud sledovaného vodiče vytváří kolem sebe střídavé magnetické pole, které způsobí indukci napětí ve vodiči toroidní vzduchové (Rogowského) cívky. Výsledné napětí je tak úměrné změně magnetického toku a tedy i hodnotě střídavého proudu, který ho vyvolal, jak je znázorněno na *Obrázek 4.1*.



Obrázek 4.1 Princip měření proudu pomocí Rogowského cívky [15]

Z toho důvodu, že se jedná o cívku bez železného jádra (vzduchovou cívku) je její důležitou vlastností to že, nemůže dojít k jakémukoliv nasycení jádra a Rogowského cívka zůstává lineárním převodníkem pro libovolně velké proudy.

Další výhodnou vlastností Rogowského senzoru je skutečnost, že na velikost výstupního napětí mají vliv pouze proudy, které obepíná magnetický obvod cívky. Vliv okolních elektrických proudů, které neprocházejí cívku, je potlačen.

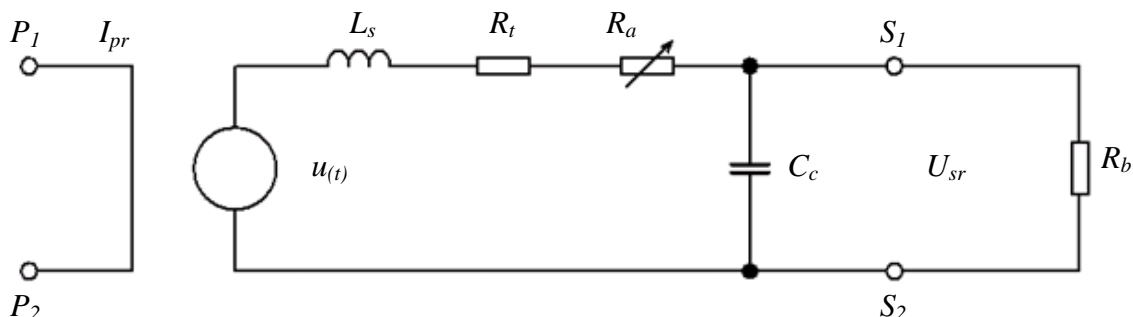
Další důležitým aspektem je přítomnost zpětného vodiče, který prochází podél magnetického obvodu cívky. Zpětně vedený vodič zabraňuje vlivu magnetických toků kolmých na rovinu cívky senzoru. [15]

Jestliže má jádro konstantní průřez a závity jsou navinuty kolmo k průřezu jádra s konstantní hustotou, pak je výstupní napětí definováno rovnicí:

$$u_{(t)} = -\mu_0 \cdot \mu_r \cdot N \cdot S \cdot \frac{di_{(t)}}{dt} = -M \cdot \frac{di_{(t)}}{dt} \quad (4.2)$$

kde μ_0 je permeabilita vakua
 μ_r je relativní permeabilita (permeabilita vzduchu rovna 1),
 N je počet závitů cívky
 S je plocha závitu

Výstupní napětí je úměrné derivaci okamžité hodnoty měřeného proudu. V případě sinusového proudu je výstupní napětí fázově posunuto o 90 stupňů. Výsledný neintegrováný signál je odlišný od průběhu měřeného proudu, avšak integrací tohoto signálu získáme přesný časový průběh měřeného proudu. Integrace výstupního signálu se provádí pomocí pasivních RC (rezistor-kondenzátor) integrátorů nebo operačních zesilovačů. V sítích vysokého napětí integrace výstupního signálu není vždy prováděna v samotné cívce, ale v připojených zařízeních, což vede ke snížení nákladů na výrobu. Na *Obrázek 4.2* je náhradní schéma Rogowského cívky.



Obrázek 4.2 Náhradní schéma Rogowského cívky [10]

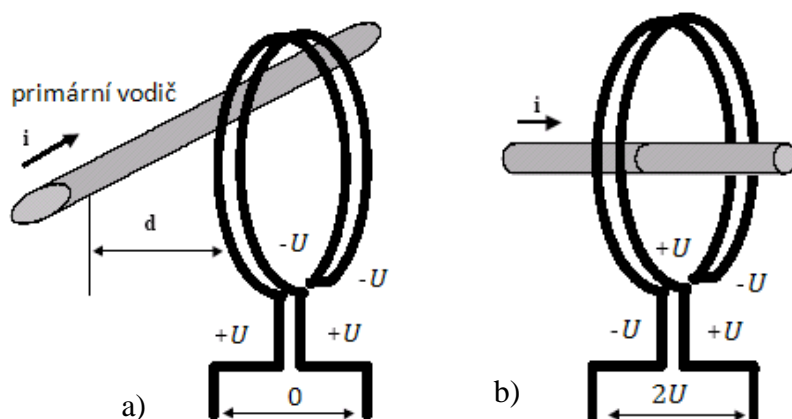
Vinutí cívky je nahrazeno rozptylovou indukčností L_s a odporem R_t , který zahrnuje také odpor připojeného kabelu. Odpor R_a je volitelný, je používám pro potřeby kalibrace. Tento odpor kompenzuje výrobní tolerance v rozměrech vinutí a v hodnotách počtu závitů. Kapacita C_c odpovídá kapacitě připojeného kabelu. Hodnota zatěžovací impedanční R_b musí být velká, ideálně nekonečná, aby nevznikaly chyby měření vlivem úbytků napětí na vinutí a připojeném kabelu. Pro výstupní napětí platí: [10]

$$U_{sr} = \frac{R_b}{R_t + R_a + R_b + j\omega L_s} \cdot j\omega \cdot M \cdot I_{pr} \quad (4.3)$$

Pro $R_b \rightarrow \infty$ pak platí

$$U_{sr} = j\omega \cdot M \cdot I_{pr} \quad (4.4)$$

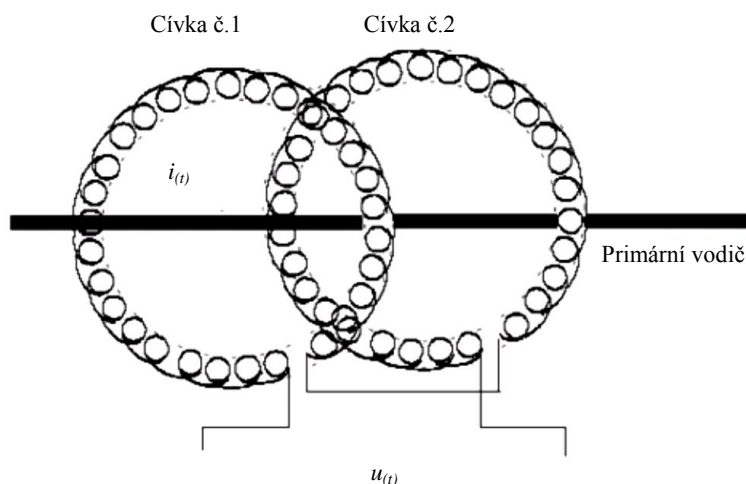
Pro ideální Rogowského cívky je vzájemná indukčnost M nezávislá na umístění vodiče uvnitř cívky. K zabránění vlivu blízkých vodičů, kterými tečou velké proudy, musí být Rogowského cívka zkonstruována ze dvouvodičových smyček spojených v elektricky opačných směrech. Tento způsob odstranění vlivu všech vnějších elektrických polí působících na Rogowského cívku je zobrazen na *Obrázek 4.3a*. Obě smyčky mohou být vytvořeny navinutím na nemagnetické jádro, nebo druhá smyčka může být vytvořena vracejícím se drátem skrz střed vinutí první smyčky. Tento způsob je zobrazen na *Obrázek 4.1*. Jestliže jsou obě smyčky z vinutého drátu, musí být druhé vinutí vinuto v opačném směru. V tomto případě napětí indukované v cívce je dvojnásobné, jak ukazuje *Obrázek 4.3b*. [3]



Obrázek 4.3 Výstupní napětí Rogowského cívky pro a) vodič vně, b) uvnitř cívky

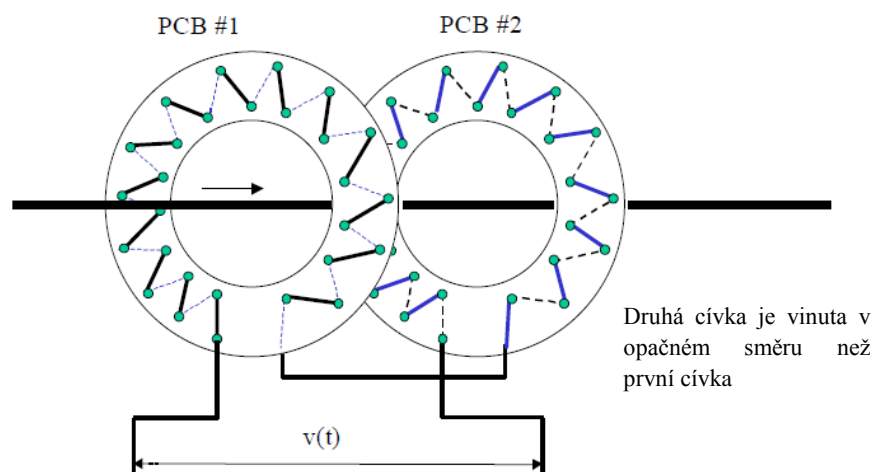
4.2.1 Provedení PCB Rogowského cívky

Tradičně se Rogowského cívky skládají ze dvou vrstev vinutí umístěných na sobě. Nově patentovaný způsob konstrukce Rogowského cívky se skládá ze dvou vzájemně propojených cívek umístěných blízko sebe, viz *Obrázek 4.4*. Druhá cívka je vinuta v opačném směru než první cívka.



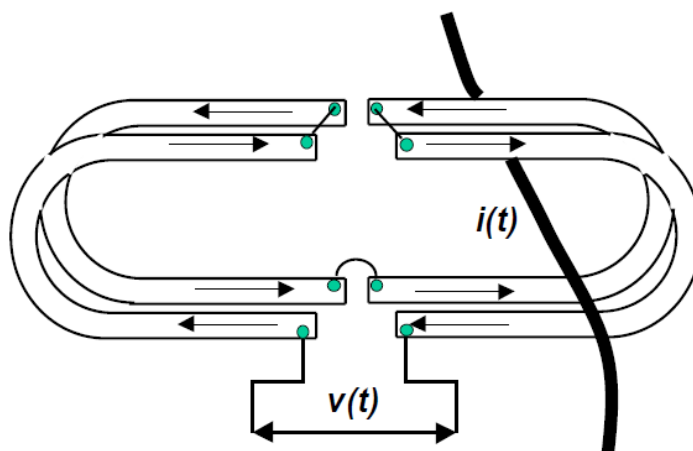
Obrázek 4.4 Princip PCB Rogowského cívky [3]

K dosažení ještě větší přesnosti bylo dosaženo použitím dvou samostatných PCB cívek umístěných blízko sebe, viz *Obrázek 4.5*. Cívky jsou vinuty v opačných směrech (pravotočivě a levotočivě). Vrchní a spodní strana desky plošných spojů je vtisknuta do formy. První cívka má pravotočivý smysl a pokračuje ve směru hodinových ručiček okolo středu desky. Druhá cívka je umístěna stejným způsobem s rozdílem levotočivého vinutí. [3]



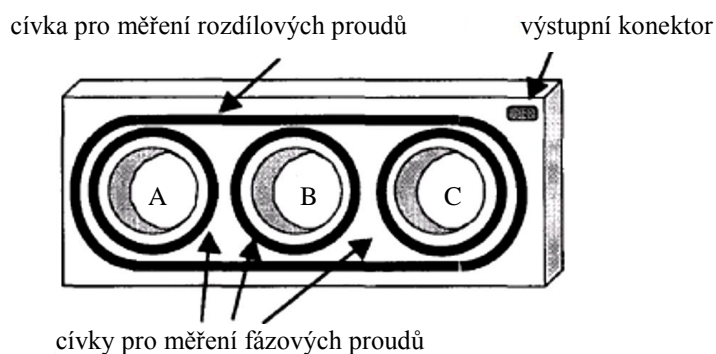
Obrázek 4.5 Princip Rogowského cívky využívající dvou PCB cívek [3]

PCB Rogowského cívky mohou být provedeny v různých tvarech, aby se mohly přizpůsobit konkrétnímu použití. Mohou být také vyrobeny s děleným jádrem pro instalaci bez nutnosti přerušení měřeného vodiče. Na *Obrázek 4.6* je znázorněn oválný tvar Rogowského cívky s děleným jádrem, které umožňuje obejmout trojfázové vodiče pro měření rozdílových proudů, nebo více paralelních vodičů. V tomto případě je jádro rozděleno na čtyři části. První dvě části jsou zkonstruovány se dvěma PCB cívkami s vinutími navinutými v opačném směru. [3]



Obrázek 4.6 PCB Rogowského cívka s děleným jádrem [3]

Konstrukce PCB Rogowského cívek k měření fázových a zemních proudů je znázorněna na *Obrázek 3.7*. Jedná se o čtyři samostatné cívky zabudované v jednom rámu. Tři cívky měří fázové proudy tekoucí jednotlivými vodiči a čtvrtá cívka pro měření rozdílových proudů, které vznikají v případě poruchy některé fáze. [3]



Obrázek 4.7 Princip konstrukce PCB cívek pro měření fázových a rozdílových proudů

4.3 Vlastnosti proudových senzorů

Použitím Rogowského cívek získávají proudové senzory řadu výhodných vlastností, díky kterým nacházejí nové možnosti využití.

Následující technická data jsou založena na přehledu komerčně používaných proudových senzorů. Ve většině případů použití, se proudový senzor skládá z měřicí hlavy a připojovacího kabelu, případně i zabudovaného integrátoru. Druh a délka použitého kabelu mají vliv na celkovou přesnost proudového senzoru. Z tohoto důvodu musí být přesnost každého senzoru zkoušena společně s daným kabelem, který nesmí být nahrazen jiným typem kabelu.

Proudové senzory mají tyto typické vlastnosti: [16]

- **Lineární proudový rozsah:** Proudové senzory mají velmi široký rozsah proudů, které jsou schopny změřit. V současnosti jsou k dispozici senzory s rozsahy od 30 A do 100 kA. Maximální hodnota proudového rozsahu je ovlivněna frekvencí a amplitudou měřeného proudu. Nejnižší a nevyšší hodnota závisí především na použité měřicí technice.

Díky absenci magnetického jádra je zaručena linearita měření v celém proudovém rozsahu. Chyba proudového senzoru je v celém rozsahu lineární a je způsobena reaktancí vinutí, výrobními odchylkami ve vinutí a průřezu jádra a také velikostí zesílení integrátoru.

- **Přesnost měření:** Pokud je jádro a vinutí vyrobeno pečlivě, celková přesnost proudového senzoru může dosáhnout 0,5% pro rozvaděče vysokého napětí. Největšími zdroji nepřesností jsou teplotní změny, výrobní tolerance a vliv ostatních vodičů. Výrobní tolerance v rozměrech vinutí a počtu závitů mohou být kompenzovány kalibračními rezistory, nebo použitím korekčního činitele, který je uveden na štítku senzoru. Korekční činitel je měřen pro každý senzor samostatně při kusových zkouškách.

Dále projevují senzory závislost přesnosti na umístění měřeného vodiče uvnitř měřicí hlavy. Senzory s děleným jádrem vykazují maximální chybu v místě rozdělení jádra. Tato chyba může dosáhnout hodnot od $\pm 1\%$ do $\pm 4\%$. Závislost přesnosti na umístění vodiče uvnitř měřicí hlavy může být minimalizována pečlivým návrhem a použitou technologií výroby.

- **Kmitočtový rozsah:** Pro praktické účely jsou proudové senzory vyráběny pro kmitočty 50 Hz a 60 Hz. Jsou však použitelné pro kmitočty od jednotek Hz po stovky kHz.

- **Výstupní signál:** Běžně používané proudové senzory poskytují bezpečné výstupní napětí, které je typicky vyjádřeno jako citlivost v rozmezí od 0,01 mV/A do 200 mV/A. Rozsah výstupního napětí se pohybuje od 200 mV do 10 V podle typu senzoru.

- **Teplotní závislost:** Většina používaných senzorů má vymezený teplotní rozsah zvláště pro měřicí hlavu a integrační elektroniku. Pro použití mimo uvedený teplotní rozsah se používá speciálních úprav měřicí hlavy nebo speciální kalibrace. Teplotní závislost měřicí hlavy je způsobena roztažností závitů, roztažností jádra cívky a teplotní závislostí vinutí cívky.

- **Elektromagnetická kompatibilita:** Velký vliv na přesnost proudových senzorů mají vnější magnetická pole, která pocházejí od ostatních vodičů v blízkosti umístění senzoru. Vliv těchto vodičů je závislý na vzdálenosti od senzoru a také na velikosti proudu, který protéká vodičem. Problémy mohou nastat v prostředích rozvaděčů vysokého napětí, pokud není vliv vnějších magnetických polí zahrnut do návrhu a provedení proudových senzorů.

4.4 Použití proudových senzorů

Velké množství různých tvarů a velikostí umožňuje použití proudových senzorů v řadě různých aplikací. Jejich kompaktní rozměry a nízká hmotnost umožňují snadnou manipulaci a instalaci v místě potřeby. Proudové senzory našly své využití pro měření a jištění zařízení, ve kterých není možné použít klasické proudové transformátory. Proudové senzory mohou nahrazovat rozměrné klasické transformátory proudu v rozvaděčích vysokého napětí. S velkou výhodou se používají s diferenciálními ochranami strojů, kterými tečou značné proudy.

Typickým příkladem takového použití je chránění transformátorů obloukových pecí, velkých generátorů a motorů. Případným poškozením takového stroje vlivem špatného působení ochrany vznikají značné finanční náklady. U transformátorů obloukových pecí je obvykle nadproudová ochrana použita na primární straně, protože měření proudů na sekundární straně je značně obtížné. Hodnoty proudu na sekundární straně běžně dosahují hodnot desítek kiloampér, což vyžaduje značné průřezy několika vodičů, které bývají chlazeny vodou. Případná porucha na sekundární straně nebývá ochranou zachycena a obvykle se vypíná manuálně obsluhou pece. Použitím ochrany, které jsou napájeny proudovými senzory na primární i sekundární straně můžeme dosáhnout spolehlivého chránění. [3]

4.5 Provedení proudových senzorů

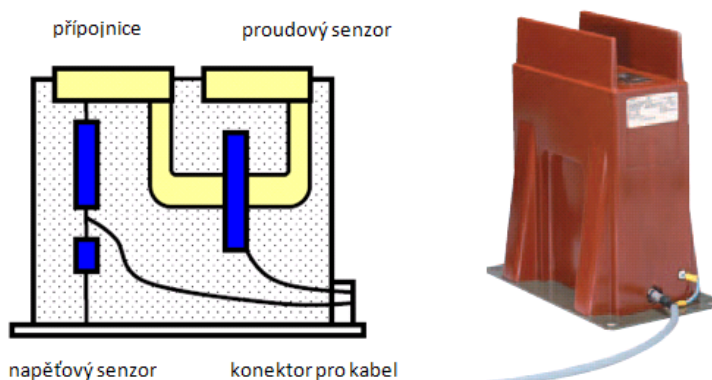
Jak již bylo uvedeno, proudové senzory se vyrábějí pro velice rozličné aplikace. To má za následek množství různých konstrukcí senzorů, aby bylo dosaženo optimálních vlastností pro jednotlivá použití.

Jako první se proudové senzory začaly vyrábět pro běžné měřicí a jistící použití. Jedná se o senzory vyráběné firmou ABB. Provedení takového senzoru je na *Obrázek 4.8a*. Dalším vývojem byly senzory přizpůsobené pro použití v rozvaděčích vysokého napětí, ve kterých jsou složité podmínky z hlediska ovlivňování vnějšími magnetickými poli. Tento typ senzoru je zobrazen na *Obrázek 4.8b*. Tyto senzory pro vnitřní použití mají malé rozměry a hmotnost jen několik kilogramů.



Obrázek 4.8 Provedení proudových senzorů pro vnitřní použití [14]

Dále vyráběnými senzory jsou kombinované senzory proudu a napětí. Tyto senzory jsou rovněž pro vysoké napětí vnitřního použití. Příklad provedení tohoto transformátoru je na *Obrázek 4.9*. Na první pohled, je svým provedením velmi podobný klasickému transformátoru proudu podpěrného provedení. Liší se však připojeným kabelem, se kterým je proudový senzor podroben zkouškám přesnosti.



Obrázek 4.9 Schéma a provedení kombinovaného senzoru

Další provedení senzorů firmy ABB je zobrazeno v *Příloha A*.

5 PORUCHY TRANSFORMÁTORŮ

Vzhledem k místu poruchy vůči transformátoru se poruchy dělí na průchozí a vnitřní.

5.1 Průchozí poruchy

Průchozí poruchy jsou ty, které nastávají vlivem připojených zařízení. Patří sem přetížení, nebo vnější zkrat na připojení objektu. Obě poruchy působí většinou delší dobu a způsobují zvýšení teploty. Pro přetížení se projektuje zvláštní ochrana, při vnějším zkratu působí nadproudová ochrana.

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

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

5.2 Vnitřní poruchy

Tyto poruchy transformátorů dělíme na dvě skupiny:

- Vnitřní poruchy objevující se pozvolna - špatné galvanické styky, špatná izolace plechů, vznikající mikrooblouky v nádobě transformátoru, poruchy chlazení. Poruchy projevující se pozvolna může v počátečním stavu zachytit pouze plynové relé. V tom případě nedojde k masivnímu poškození a je možná oprava transformátoru.
- Vnitřní poruchy objevující náhle – zkraty. A to zkraty na vinutí, zkraty mezi vinutími, zkraty vinutí na nádobu. [13]

5.3 Příčiny vzniku zkratů

Mezi hlavní příčiny vzniku zkratu patří:

- nedokonalost izolace – zestárnutím, přetěžováním vodičů apod.
- vady na elektrickém zařízení – popraskání izolátorů, znečištěním a opálením kontaktů, nedbalá montáž, zanedbaná údržba apod.
- nedostatečné dimenzování – s ohledem na tepelné a mechanické namáhání, apod.
- přepětí – atmosférická nebo při provozních manipulacích
- cizí zásahy – při výkopech, stavebních pracích apod.

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

6 OCHRANY TRANSFORMÁTORŮ

Transformátory je nutné chránit jak při vnějších zkratech či přetíženích, tak i při zkratech vnitřních. Způsoby chránění pro jednotlivé druhy poruch: [17]

Tabulka 6-1 Způsob chránění jednotlivých druhů poruch

Druhy poruch	Druhy ochran
A) Vnější poruchy 1) Přetížení 2) Vnější zkrat	Proudová na přetížení (termokopie) Nezávislá nadproudová nebo distanční
B) Vnitřní poruchy a) Objevující se náhle 1. zkraty ve vinutí 2. zkraty vinutí na nádobu	Rozdílová ochrana a plynové relé Nádobová (kostrová ochrana)
b) Projevují se pozvolna 1. špatné galvanické styky, špatná izolace plechů, vznikají mikrooblouky v nádobě - vývin plynů v oleji 2. porucha chlazení - přehřátí oleje - vývin plynů	Plynové relé

6.1 Vybavení transformátorů ochranami

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

6.1.1 Transformátory do výkonu 1 MVA

- proti zkratu na primární straně jistíme výkonovými pojistkami vn. Doporučuje se použití pojistky s indikací působení
- plynovým relé, pokud se jím vybaví transformátor jištěný pojistkami, slouží relé pro signalizaci.
Jestliže je transformátor vybaven na primární straně vypínačem, pak se použije pro jeho chránění nadproudová ochrana a plynové relé se zapojením na vypínač.
- transformátory vn/nn se na straně nízkého napětí jistí proti přetížení jističi s tepelnými a zkratovými články.

6.1.2 Transformátory nad 1 MVA do 5 MVA

- plynovým relé
- rozdílovou ochranou, avšak pouze ve zdůvodněných případech
- nadproudovou ochranou proti zkratům. Lze ji kombinovat s blokováním na podpětí
- nadproudovou ochranou proti přetížení se signalizací přetížení

6.1.3 Transformátory nad 5 MVA

- plynovým relé
- rozdílovou ochranou, je-li výkon větší než 63 MVA. Pro menší výkony se rozdílová ochrana použije ve zdůvodněných případech, např. když se žádá rychlé vypnutí z důvodů ohrožení spojovacího vedení mezi transformátorem a rozvodnou.
- zemní nádobovou ochranou, zejména pro transformátory vvn/vvn
- termokopii (po dohodě s výrobcem stroje)
- nadproudovou časově nezávislou ochranou. U transformátorů vvn/vvn se doporučuje použít na straně nižšího napětí (obvykle strana 110 kV) distanční ochranu působící v obou směrech, přičemž do přípojnic je ochrana bez rychlého stupně. V případě, že jsou zdroje na obou stranách, používá se dvou distančních ochran jak na primární straně, tak na sekundární straně vinutí. [17]

7 ROZDÍLOVÁ OCHRANA TRANSFORMÁTORU

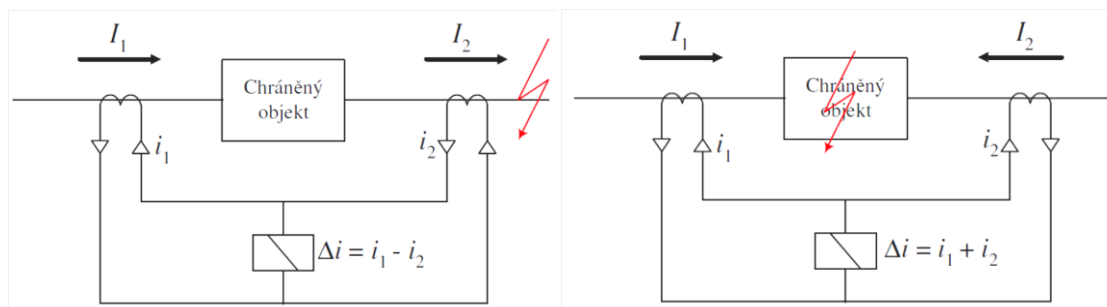
7.1 Základní požadavky na ochrany

Základními požadavky na ochrany jsou: [5]

- Spolehlivost funkce ochrany znamená, že ochrana nesmí samovolně působit, neobjeví-li se porucha. Naopak při poruše nesmí selhat.
- Selektivita je schopnost ochrany nereagovat na poruchy soustavy, které jsou mimo chráněný objekt, nebo se týkají stavové veličiny objektu, na kterou nemá ochrana působit. Smysl selektivity je v tom, že je vypínám co nejmenší úsek energetické soustavy, který je postižen poruchou. Přitom co největší část nepoškozené soustavy zůstane v provozu. Selektivita zmenšuje nebezpečí ztráty stability a zhroucení soustavy
- Rychlost ochrany je dána dobou působení. Velká rychlost ochran zmenšuje nároky na dimenzování chráněného objektu. Teplo akumulované při zkratu uvnitř zařízení je úměrné době trvání poruchy.
- Citlivost ochrany je velikost stavové veličiny, na kterou je ochrana nařízená a podle níž určuje poruchu. V provozu je nutná určitá bezpečnost chránění. Proto je funkce ochrany nastavena na méně nebezpečnou hodnotu stavové veličiny, než odpovídá poruše.
- Přesnost je daná jako procentuální vyjádření skutečné citlivosti ochrany s ohledem na možné nastavení ochrany

7.2 Princip rozdílové ochrany

Jak je patrné z *Obrázek 7.1* chráněný objekt je vymezen přístrojovými transformátory proudu jejichž sekundární proudy vyhodnocuje nadproudový měřící člen zapojený v příčné větvi vedení spojujících obě strany chráněného zařízení. Rozdílová ochrana tak působí pouze v případě vnitřní poruchy (zkratu), kdy je hodnota rozdílového proudu větší než citlivost nadproudového článku. [18]



Obrázek 7.1 Princip činnosti rozdílové ochrany [18]

Podstatná výhoda principu rozdílové ochrany spočívá v tom, že provede bez zpoždění vypnutí při všech zkratech v libovolném místě chráněné oblasti. Proudové transformátory na protějších stranách oddělují chráněnou oblast od zbývajících sítí. Toto přesné vymezení je základem ideální selektivity, která je vlastní principu rozdílové ochrany.

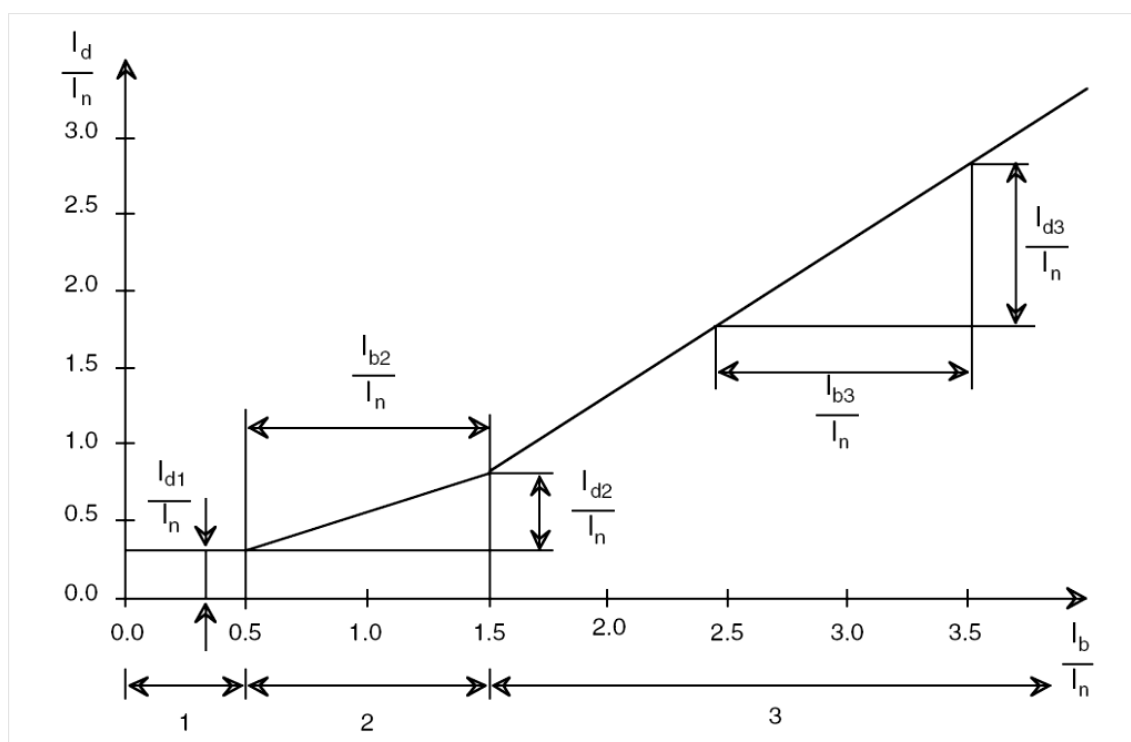
7.3 Vypínací charakteristika [19]

Při označení fázorů sekundárních proudů I_1 a I_2 vstupní a výstupní strany chráněného objektu (základní frekvence) je amplituda diferenciálního proudu I_d definována jako

$$I_d = |\bar{I}_1 - \bar{I}_2| \quad (7.1)$$

V normálním provozním stavu, kdy není v zóně chráněné diferenciální ochranou žádná porucha, jsou proudy I_1 i I_2 stejné a diferenciální proud $I_d = 0$. V praxi není hodnota diferenciálního proudu v normálním provozním stavu nulová. Při chránění výkonového transformátoru je diferenciální proud způsoben nepřesnostmi měřících transformátorů proudu, změnou polohy regulační odbočky, proudem transformátoru naprázdno a zapínacím proudem transformátoru. Diferenciální proud způsobený nepřesnostmi měřících transformátorů proudu a změnou polohy regulační odbočky se zvětšuje přímo úměrně se zatížením transformátoru. U stabilizované diferenciální ochrany je proto diferenciální proud nutný k vypnutí (k aktivaci ochrany) tím vyšší, čím vyšší je zatěžovací proud chráněného objektu. Velikost zatěžovacího proudu je vyjádřena jako stabilizační proud I_b a je definován vztahem

$$I_b = \frac{|\bar{I}_1 + \bar{I}_2|}{2} \quad (7.2)$$



Obrázek 7.2 Vypínací charakteristika ochrany

Základní nastavení stabilizovaného stupně modulu diferenciální ochrany je určeno podle *Obrázek 7.2* jako $\frac{I_{d1}}{I_n}$. V této části 1 vypínací charakteristiky je diferenciální proud nutný k aktivaci ochrany konstantní. Základní nastavení v zásadě zohledňuje proud výkonového transformátoru naprázdno, ale tímto parametrem lze také ovlivnit celkovou úroveň (polohu) vypínací charakteristiky.

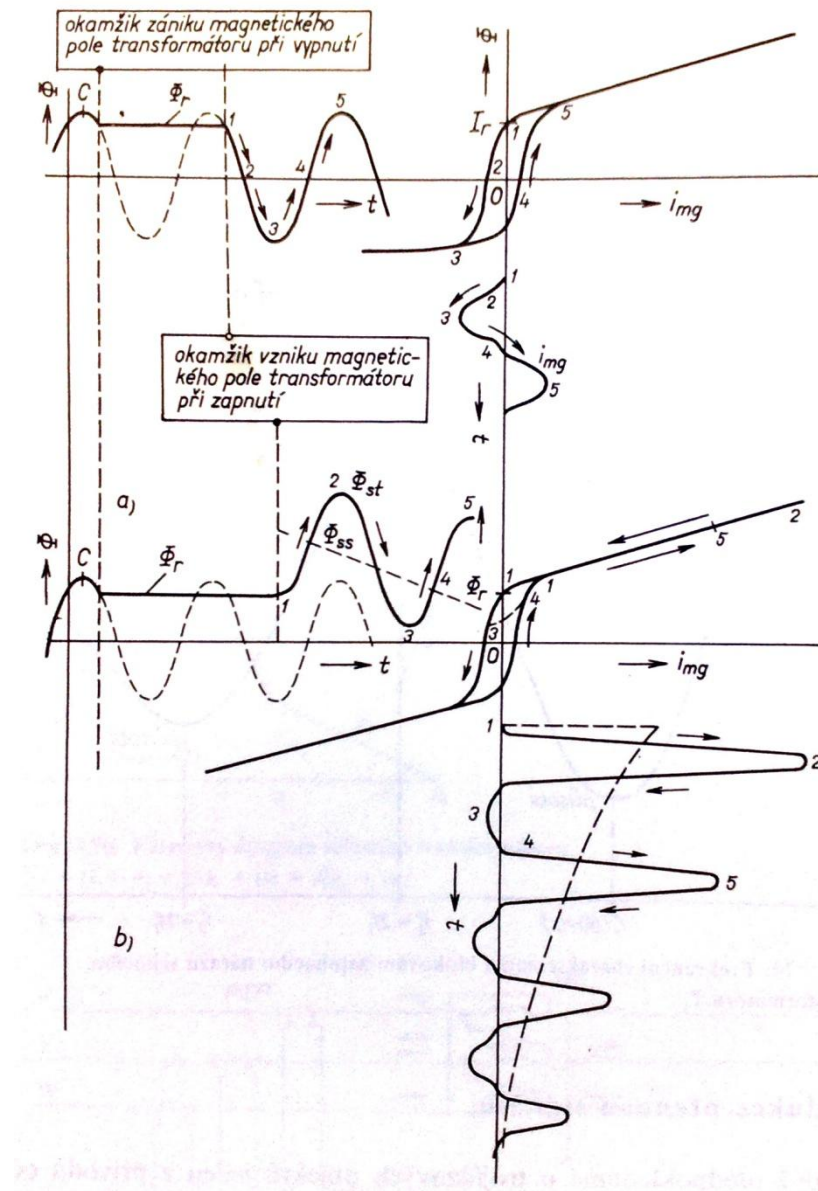
Popudový poměr je definován vztahem $\frac{I_{d2}}{I_{b2}}$. Vyjadřuje průběh charakteristiky v části 2.

V této části směrnice (sklon) charakteristiky vyjadřuje poměr mezi změnou zatěžovacího proudu a změnou diferenciálního proudu nutného k aktivaci vypnutí. Popudový poměr musí zohlednit chyby PTP a změny v poloze regulační odbočky výkonového transformátoru. Příliš vysoký popudový poměr není vhodný, protože se snižuje citlivost diferenciální ochrany pro vyhodnocení mezizávítových zkratů.

Bod druhého zlomu charakteristiky. Pro vysoké stabilizační proudy I_b/I_n . Pro sklon charakteristiky 100% je nárůst diferenciálního proudu stejný jako odpovídající nárůst stabilizačního proudu.

7.4 Blokování rozdílové ochrany při zapínacím rázu

Předpokládáme, že chráněný objekt je transformátor. Jeho provoz znázorňuje magnetizační křivku na *Obrázek 7.3*. V normálních podmínkách je hysterezi smyčka souměrná s magnetizační proud i_{mg} má normální souměrný průběh. Při zapnutí se připojí k napětí jeho magnetizační indukčnost s dlouhou časovou konstantou. Vznikne stejnosměrná složka magnetizačního proudu, která vysune pracovní bod. Při vypnutí transformátoru v libovolném okamžiku přejde pracovní bod na osu $i_{mg} = 0$



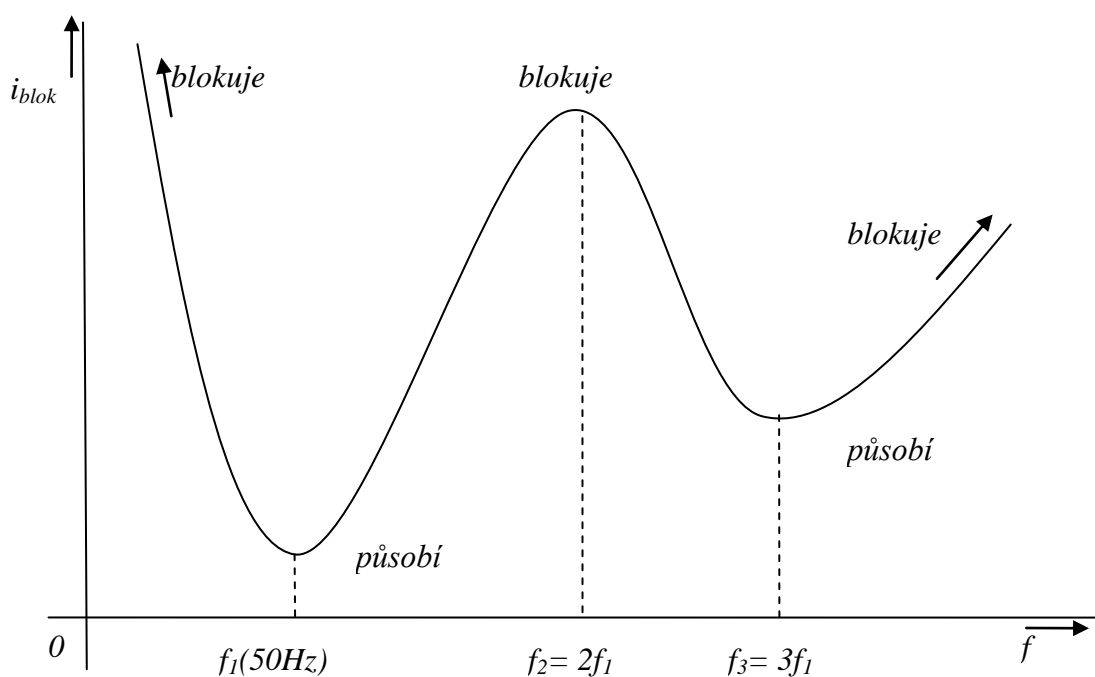
Obrázek 7.3 Průběhy magnetického toku a magnetizačního proudu transformátoru

a) zapnutí transformátoru bez magnetického nárazu,

b) vznik magnetického nárazu

Při zapnutí se pracovní křivka nepohybuje souměrně kolem počátky. Po dobu působení stejnosměrné složky toku ϕ_{ss} je provoz nesouměrný a dochází k podstatnému zvětšení magnetizačního proudu i_{mg} vlivem nasycení jádra. U moderních transformátorů se značně využitým železem jádra je zapínací náraz až desetinásobkem jmenovitého proudu $I_{mg} = 10I_N$.

Zapínací náraz působí na rozdílovou ochranu jako vnitřní porucha. Pro zajištění selektivity musí být ochrana vybavena blokováním při zapínacím rázu. To se dnes nejčastěji realizuje filtry na druhou harmonickou, která tvoří podstatnou složku průběhu i_{mgzap} . Při výskytu druhé harmonické se pomocí filtrů zmenšuje citlivost nebo blokuje ochrana. Typická frekvenční charakteristika takového filtru je na *Obrázek 7.4*. Druhá harmonická a stejnosměrná složka obsažená v zapínacím nárazu blokuje ochranu. Třetí harmonická obsažená v magnetizačním proudu při přepětí a základní harmonická ochrana spouští. Blokování při zapínacím rázu je vhodné u všech strojů s magnetickými obvody, tj. nejen u transformátorů. Např. u generátoru při pomalém nabuzování (najíždění) sice k nárazu nedojde, ale vzhledem k přechodným stavům (nárazové buzení, nárazy ze sítě) je blokování rozdílové ochrany i zde vhodné. [5]



Obrázek 7.4 Frekvenční charakteristika blokování zapínacího rázu

8 DIFERENCIÁLNÍ OCHRANA V OCHRANNÉM A ŘÍDÍCÍM TERMINÁLU REF542PLUS [11]

Pro měření použijeme terminál REF542plus, který integruje v jedné jednotce soubor všech sekundárních funkcí, které jsou určeny pro rozvodny nízkého, vysokého a velmi vysokého napětí tj. chránění, řízení a ovládání, měření, monitorování a samočinnou diagnostiku a komunikaci. Integruje v sobě nepřehledné množství ochranných funkcí především pro rozvodny, motory generátory a transformátory jako jsou např.:

- Proudové ochrany (např. nadproudová ochrana zemní).
- Napěťové ochrany (např. ochrana proti přepětí, podpětí).
- Ochrany vedení (např. ochrana distanční).
- Diferenciální ochrany.
- Tepelné ochrany.
- Specifické funkce a ochrany motoru (např. čítač počtů rozběhů motoru).
- Funkce a ochrany zajištění kvality elektrické energie (regulátor účinníku).

Terminál dále zahrnuje ovládací a automatizační funkce, kterými lze pomocí programového vybavení vytvořit jednoduchou logiku pro blokování např. chybné manipulace nebo blokovací podmínky mezi jednotlivými poli rozvodny. Logické operace jsou realizovány pomocí nejrůznějších typů logických hradel, časovačů, čítačů a klopných obvodů.

8.1 Základní popis terminálu

Terminál REF542plus se skládá z dvou hlavních částí viz *Obrázek 8.1* Základní jednotka (Base Unit) a jednotky pro místní ovládání LD HMI (Local Detached Human Machine Interface). Obě jednotky mezi sebou komunikují pomocí sériového rozhraní RS32.

8.1.1 Základní jednotka

Základní jednotka REF 542plus má architekturu mikroprocesorového zařízení, které pracuje v reálném čase. Je složena z následujících vyjímatelných modulů:

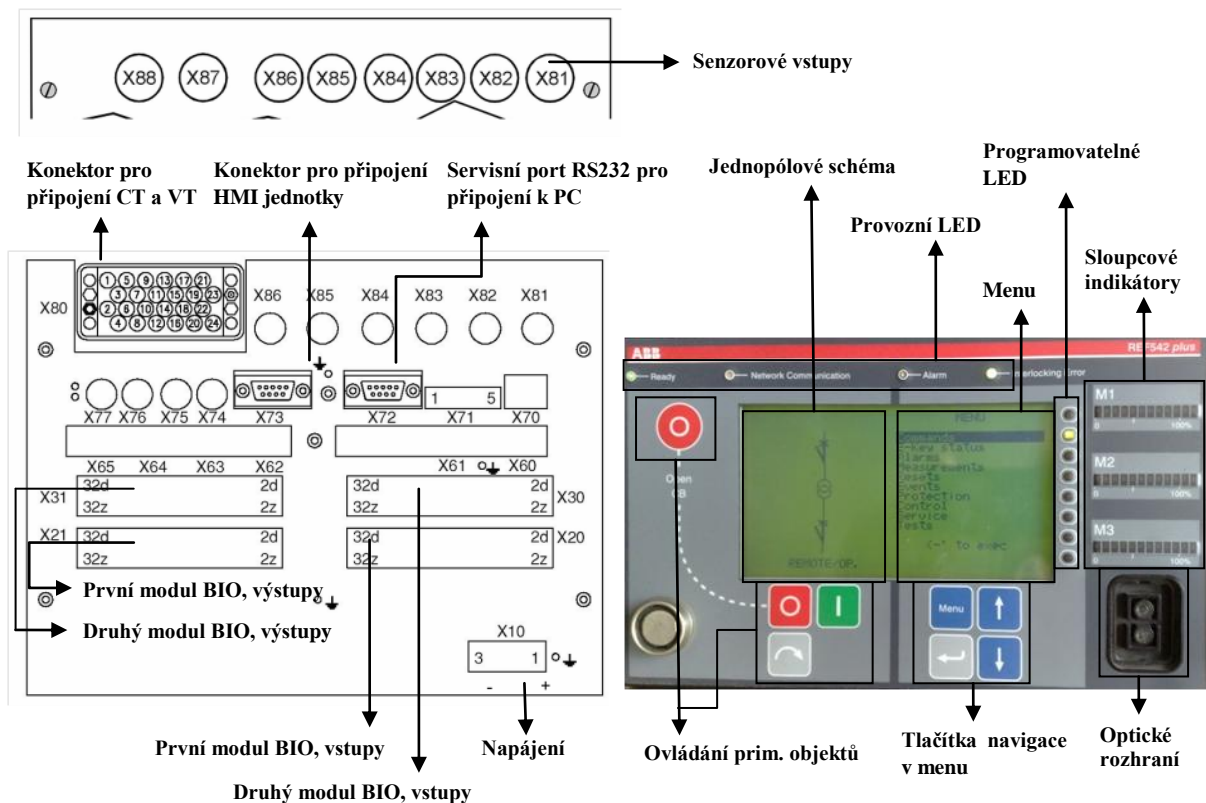
- *Main module* – zpracovává všechny informace, vydává povely a realizuje ochranné funkce
- *Suppy module* – zajišťuje napájení terminálu
- *Analog input module* – zajišťuje příjem logických signálů z vývodového pole a ovládání binárních výstupů terminálu.
- *Communication module* – zajišťuje všechny komunikační procesy (Základní jednotka → HMI, základní jednotka → PC, základní jednotka → ostatní terminály).

8.1.2 HMI jednotka

Jednotka HMI je určena pro místní ovládnání pole rozvodny. Jednotka umožňuje operátorovi nastavovat ochranné funkce, ovládat primární prvky (např. vypínač), resetovat výstražná hlášení (alarmy), měnit pracovní režim terminálu a zobrazuje měřené hodnoty a změnové stavy.

Základní HMI jednotku tvoří následující prvky:

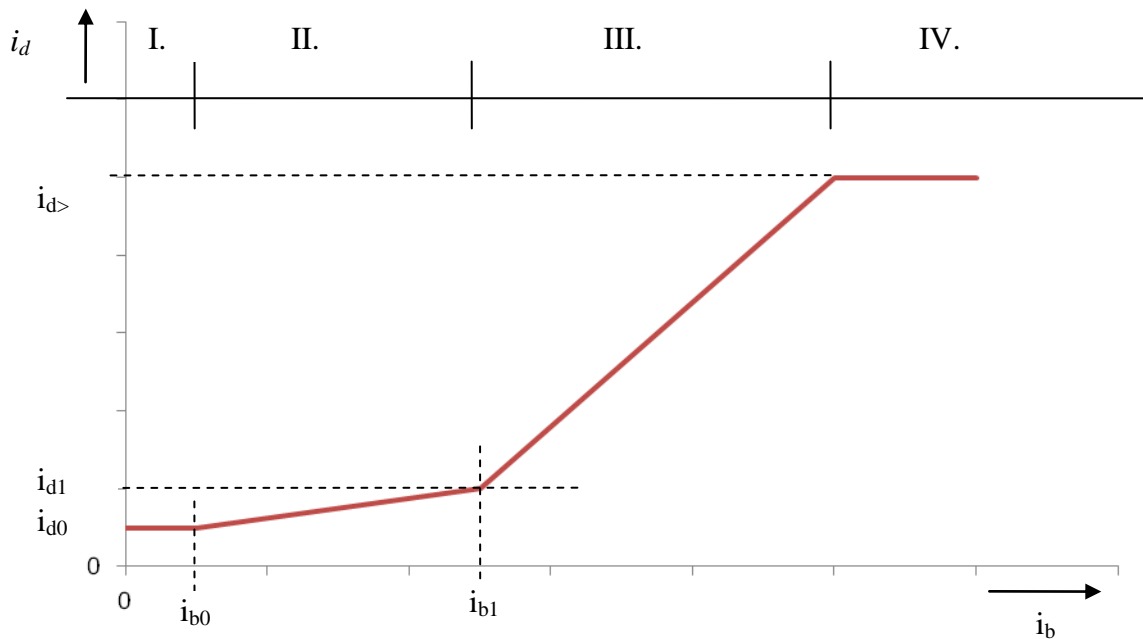
- *Displej* – zobrazuje jednopólové schéma a Menu terminálu.
- *Tlačítka ovládnání primárních prvků pole rozvodny* – např. vypínače.
- *Tlačítka pro navigaci v menu.*
- *Uživatelsky programovatelné LED diody* – slouží pro signalizaci nejručnějších poruch.
- *Provozní signalizační diody* – poskytují informaci o provozním stavu terminálu.
- *Sloupcové indikátory* – slouží pro orientační zjištění velikosti měřené veličiny (proudu)



Obrázek 8.1 Základní a HMI jednotka terminálu REF542plus

8.1.3 Vypínací charakteristika diferenciální ochrany v REF542plus

Vypínací charakteristika diferenciální ochrany v REF542plus znázorněna na *Obrázek 8.2* je rozdělena do čtyř oblastí v závislosti na velikosti protékajícího stabilizačního proudu.



Obrázek 8.2 Vypínací charakteristika dif. ochrany REF542plus

Oblast I:

Tato oblast je určena pro malá proudová zatížení chráněného objektu. Oblast I. je jednoznačně charakterizována body $[0, i_{d0}]$ a $[i_{b0}, i_{d0}]$. V nastavení ochrany se tyto body definují pomocí následujících hraničních proudů:

- i_{d0} *threshold current* (prahová hodnota rozdílového proudu charakterizující oblast I.),
- i_{b0} *unbiased region limit* (stabilizační proud určující velikost oblasti I.).

Oblast II:

V této oblasti jsou detekovány rozdílové proudy pro normální až středně těžká zatížení chráněného objektu. Oblast II. je určena následujícími body $[i_{b0}, i_{d0}]$ a $[i_{b1}, i_{d1}]$. Tyto body jsou v ochraně definovány proudy:

- i_{d1} *slightly biased region threshold* (prahová hodnota rozdílového proudu oblast II.),
- i_{b1} *slightly biased region limit* (stabilizační proud určující velikost v oblasti II.),

Oblast III:

Tato oblast slouží k detekování rozdílových proudů při velmi těžkých zatíženích chráněného objektu. Oblast III. Je definována body $[i_{b1}, i_{d1}]$, strmostí S a proudem i_{d1} . V nastavení ochrany se definují následující parametry:

S *Heavy biased slope* (strmost přímky rozdílového proudu v oblasti III.),
 i_{d1} *Tri by i_{d1}* (prahová hodnota rozdílového proudu pro oblast III.),

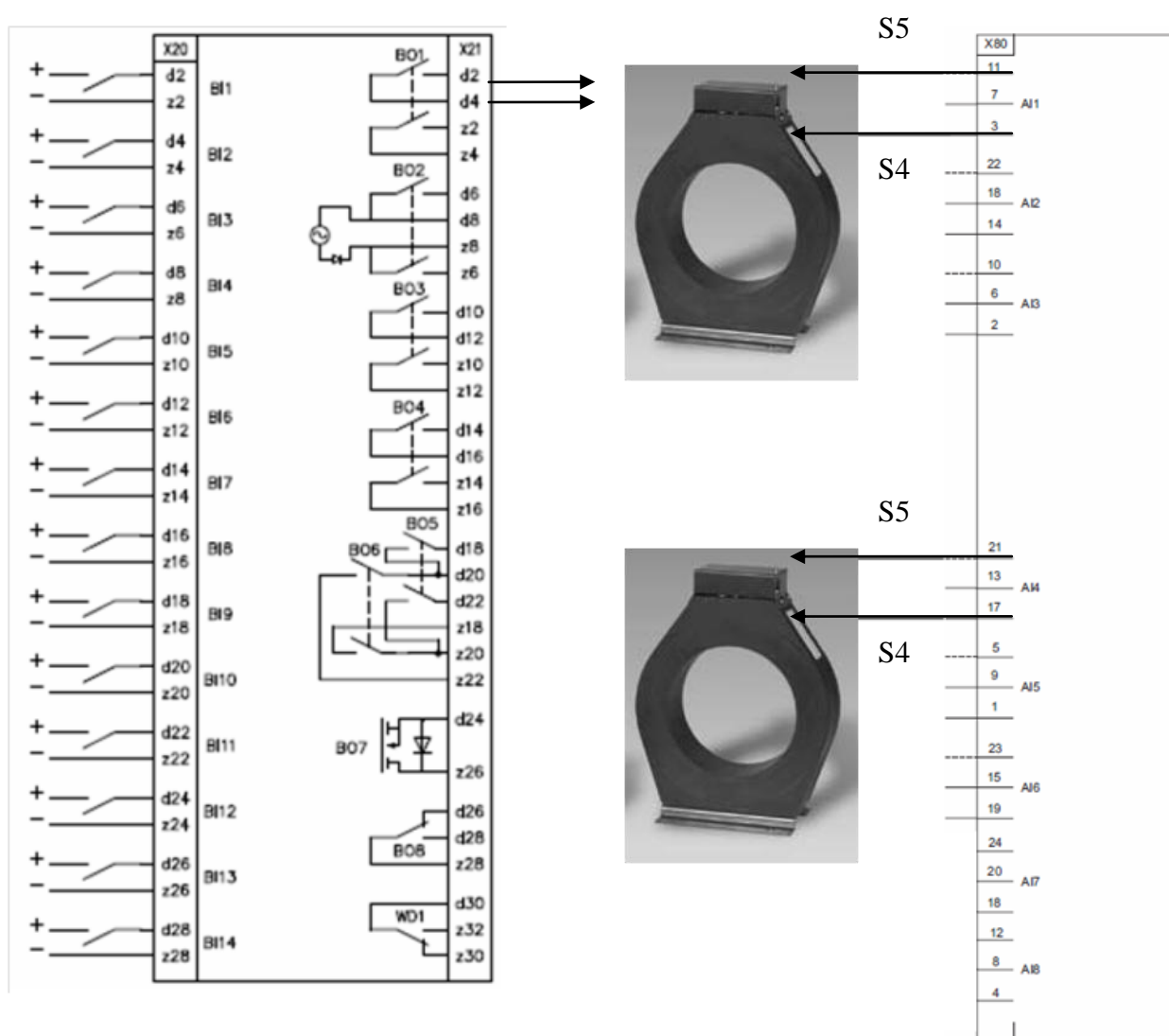
Oblast IV:

Tato oblast definuje tvar vypínací charakteristiky diferenciální ochrany pomocí nastaveného proudu i_{d1} v případě překročení povoleného zatížení proudu i_b protékajícího chráněným objektem.

Všechny výše uvedené hraniční proudy definující vypínací charakteristiku diferenciální ochrany se nastavují v poměrných jednotkách a jsou vztaženy k jmenovitému proudu transformátoru (primárního I_{1N} nebo sekundárního I_{2N}).


8.2 Nastavení a zapojení terminálu REF 542plus pro testování diferenciálních ochrany s použitím PTP

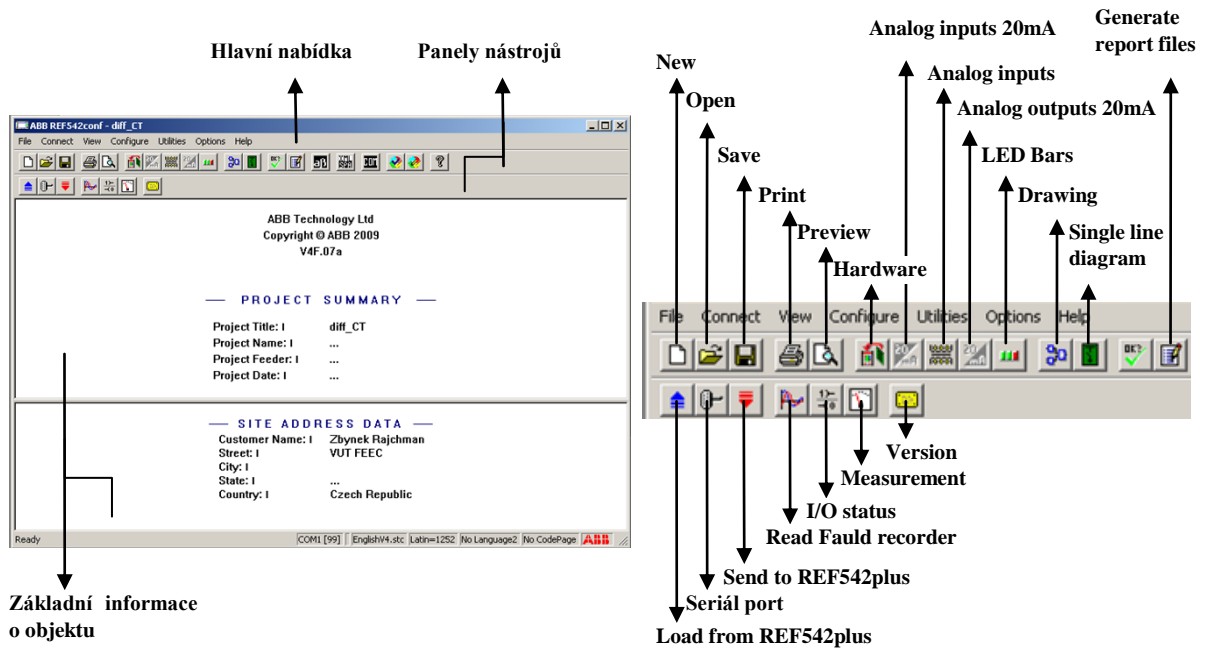
Pro použití terminálu jako diferenciální ochrany transformátoru s CT je nutno použít analogový vstupní kartu s minimálně 6 proudovými vstupy. V tomto případě je použita analogová měřicí karta **750170/807**, která disponuje právě 6 proudovými vstupy. Analogové vstupy jsou realizovány pomocí oddělovacích transformátorů se dvěma proudovými rozsahy (5A a 1A). V tomto případě jsou využity 1A analogové vstupy, čemuž odpovídá i reálné zapojení svorkovnice X80. Na tyto analogové vstupy jsou zapojeny transformátory proudu, v našem případě je to po jednom transformátoru **KOLMA 06 D1** na primárním a na sekundárním vstupu ochrany. Pro tripovací signál z ochrany využijeme jednoho binárního výstupu na svorkovnici **X21** tj. **BO1**. Tento logický signál v praxi reprezentuje povel rozepnutí výkonového vypínače.



Obrázek 8.3 Zapojení základní jednotky pro testování diferenciální ochrany

8.2.1 Konfigurace terminálu REF542plus s diferenciální ochranou

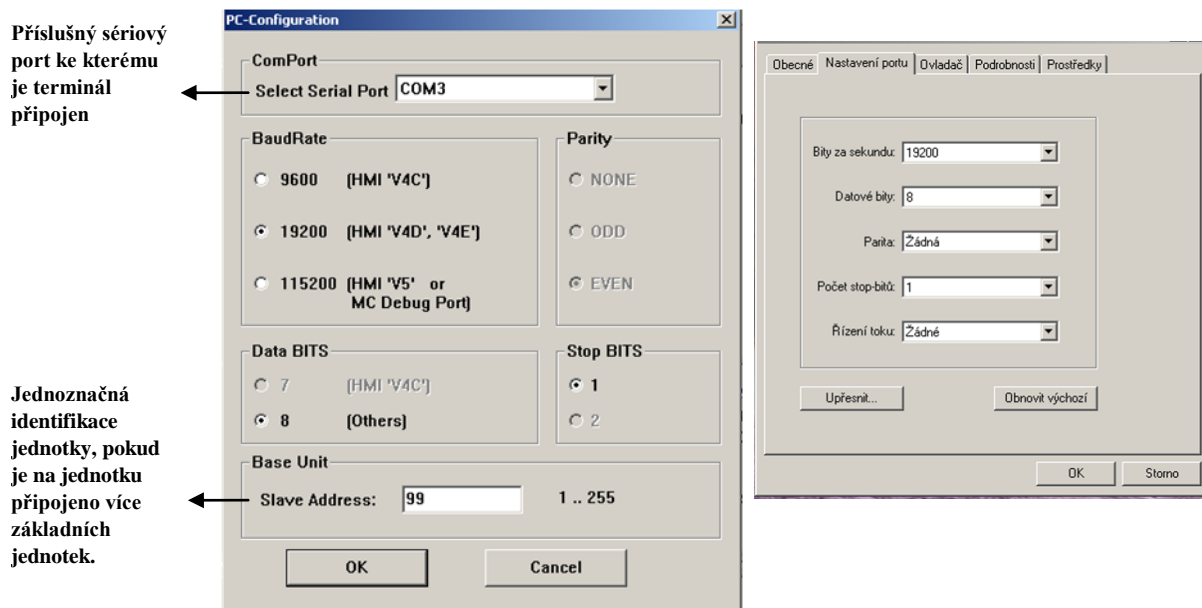
Konfigurace terminálu REF542plus se provádí pomocí programu  *Configuration Tool V4F.07a*. Tento program poskytuje především možnost vytvoření řídicí funkcí a nastavení ochranných funkcí v jazyce FUPLA. Dále slouží pro podrobné nastavení jednotlivých modulů připojených k REF542plus (např. modulu analogových vstupů, komunikačního modulu). Uživatelské rozhraní programu Configuration Tool s popisem základních funkcí je znázorněno na *Obrázek 8.4*.



Obrázek 8.4 Hlavní konfigurační okno s popisem nástrojové lišty

8.2.1.1 Konfigurace připojení terminálu k PC

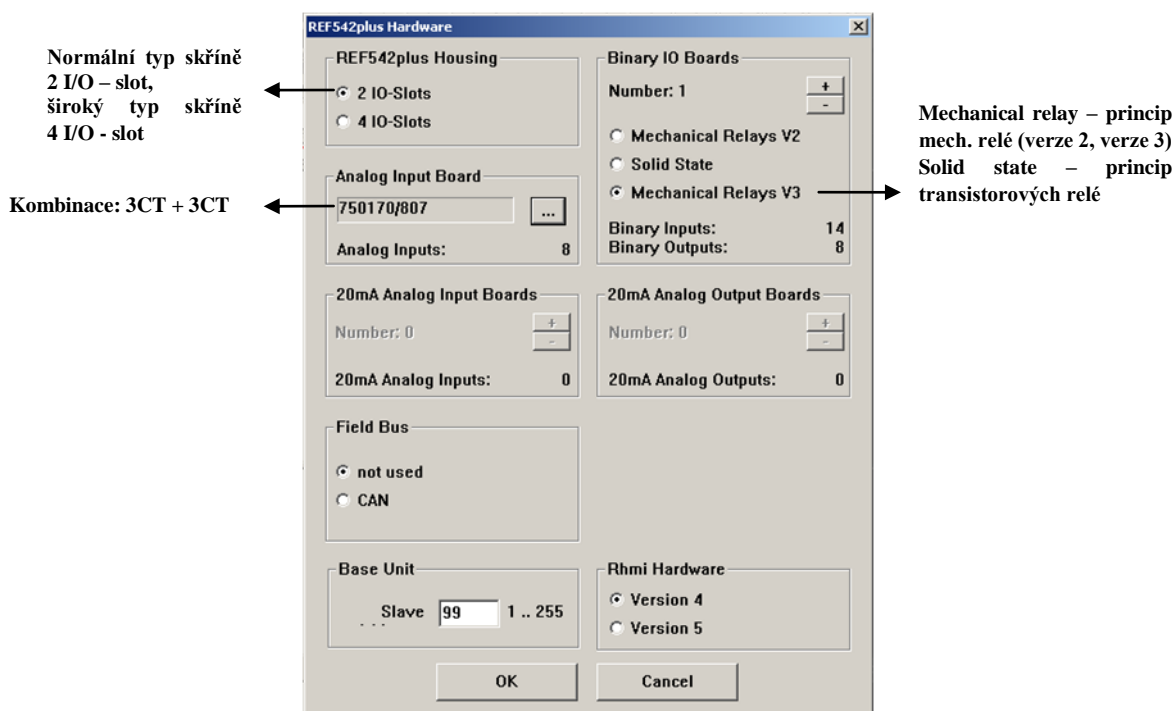
K propojení terminálu s PC použijeme optický sériový kabel. Spustíme program *Configuration Tool* a provedeme nastavení komunikačních parametrů podle *Obrázek 8.5* dialogové okno s nastavením sériového portu se spustí prostřednictvím **Main Menu** → **Connect** → **Serial port**. Stejně nastavený provedeme i pro komunikační port ve *Správce zařízení počítače*.



Obrázek 8.5 Nastavení komunikačních parametrů sériového portu

8.2.1.2 Konfigurace modulů

Konfigurace modulů, které jsou dostupné ve skříní terminálu, se provádí v sekci **Main menu** → **Configurace** → **Hardware**. V tomto dialogovém okně se specifikuje počet I/O karet, typ karty analogových vstupů, počet karet analogových vstupů/výstupů s proudovou smyčkou 20 mA, typ použité provozní sběrnice a verze hardwaru HMI jednotky. Nastavení je pro každý typ terminálu individuální a záleží jen na vybavenosti jednotky. Následující nastavení je určeno pro terminál REF542plus, kterým je vybavena laboratoř elektrických ochran VUT FEKT.

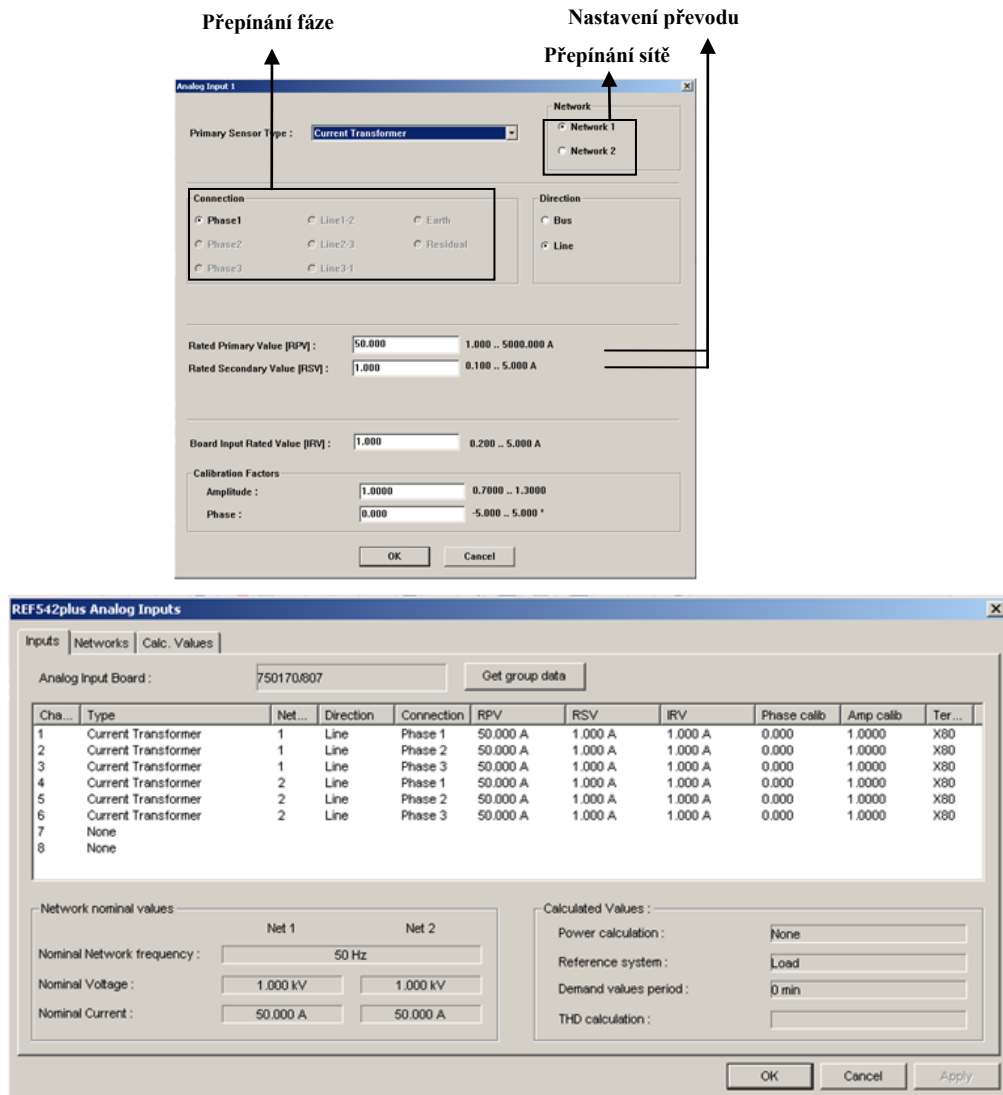


Obrázek 8.6 Nastavení parametrů připojených modulů

V posledním kroku provedeme nastavení jazyka HMI jednotky v sekci **Main** → **HMI** → **Display Language** nastavení jazykové sady na **English V4.stc** a zatrhneme políčko **Save as default**.

8.2.1.3 Konfigurace karty analogových vstupů

Konfigurace analogové karty se provádí v **Main Menu** → **Configure** → **Terminals** → **Analog inputs**. Zobrazí se dialogové okno, ve kterém jsou shrnuté všechny informace o nastavení analogové měřicí karty. Zde se provede nastavení typu použité měřicí analogové karty a především převodů jednotlivých proudových transformátorů. Dvojklikem na jednotlivé transformátory (CT) nastavíme požadované převody tj. v tomto případě 50/1A.



Obrázek 8.7 Dialogové okno pro nastavení analogových vstupů konkrétní nastavení pro CT1

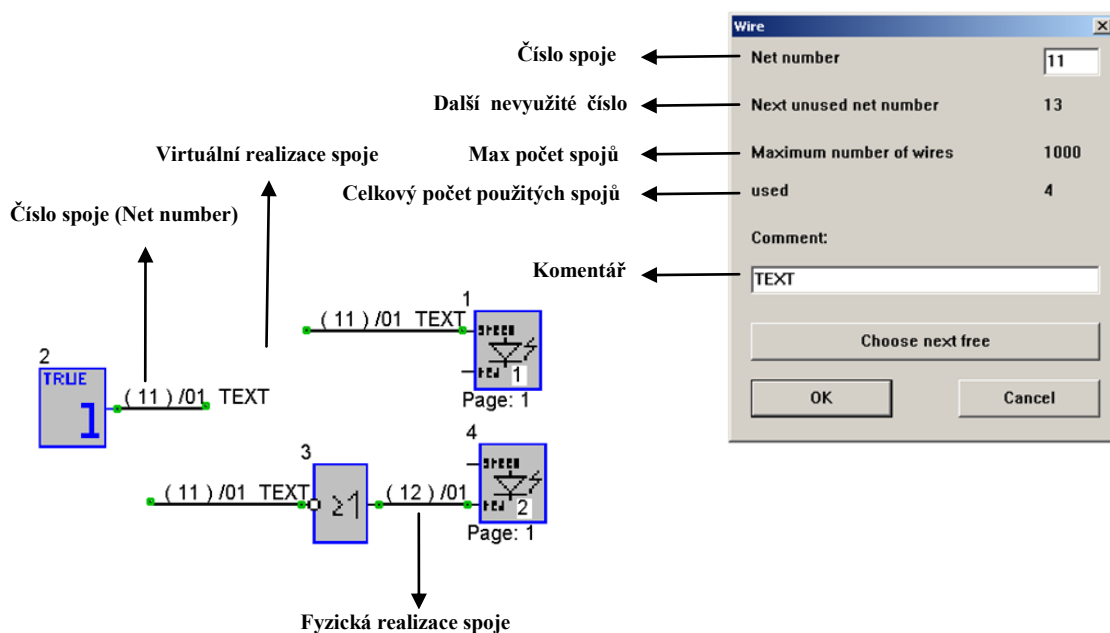
8.2.2 Vytvoření funkčního schématu v jazyce FUPLA:

FUFLA je grafický programovací jazyk, kde jsou všechny funkce realizovány pomocí funkčních bloků. Výhodou programování v tomto jazyce je především názornost a jednoduchost tvorby samotného programu. Každý funkční blok realizovaný Fuplou lze charakterizovat vlastní funkcí, libovolným počtem binárních vstupů, výstupů a vnějšími parametry. Jako vnější parametry je možné si představit napětí U , proud I , časové zpoždění apod. To se týká především funkčních bloků představujících ochranné funkce. Vlastní funkce bloku, na základě binárních vstupů a vnějších parametrů, vybavuje binární výstupy, které jsou propojeny s ostatními funkčními bloky. Všechny takto pospojované bloky tvoří funkční schéma, na jehož základě jsou získávány a vyhodnocovány informace z řídicích i měřicích prvků a jsou vybavovány výkonové prvky.

Grafický editor pro sestavování funkčního schématu se spouští prostřednictvím hlavní nabídky **Main menu** → **Configure** → **Drawing** nebo pomocí tlačítka Drawing na nástrojové liště. Zobrazí se prázdné okno grafického editoru.

8.2.2.1 Základní práce s funkčními bloky a grafickými prvky FUPLY:

Vložení nového bloku – prostřednictvím hlavního menu **Main Menu** → **Insert**.
Vložení nového spoje – prostřednictvím pravého tlačítka myši, pomocí funkce táhnout z výstupu jednoho funkčního bloku do vstupu druhého funkčního bloku. Vhodnější a přehlednější je ovšem využití tzv. „virtuálního spoje“ zobrazeného na *Obrázek 8.8*. Z jednoho i druhého funkčního bloku je vyveden jen krátký spoj a vlastní propojení je provedeno virtuálně pomocí čísla spoje (Net number) v konfigurační tabulce daného spoje.



Obrázek 8.8 Fyzická a virtuální realizace spoje mezi funkčními bloky, konfigurační tabulka.

Zobrazení konfigurační tabulky spojů a jednotlivých funkčních bloků – prostřednictvím dvojkliku levého tlačítka myši na daný prvek.

Posun spojů a funkčních bloků – prostřednictvím levého tlačítka myši, pomocí funkce uchopit přesunout a pustit. Aby byla manipulace s bloky a spoji umožněna, musí být odškrtnuto blokování pohybu bloků v sekce **Options** → **Block Moving of Objects**.

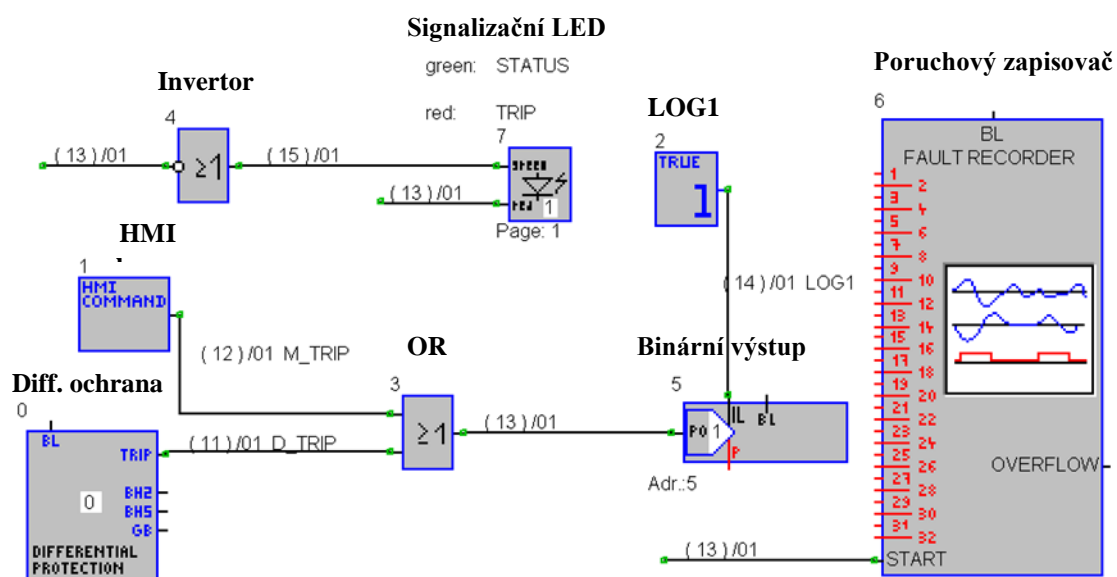
Vymazání spoje a funkčního bloku – prostřednictvím dvojkliku pravého tlačítka myši na daný funkční blok.

8.2.2.2 Postup při sestavování funkčního schématu diferenciální ochrany

Při vytváření funkčního schématu pro testování diferenciální ochrany postupujeme následovně. Na pracovní plochu vložíme funkční bloky:

- diferenciální ochrany **Insert** → **Differential** → **protection** → **Differential protection**,
- logické jedničky **Insert** → **Digital logic 1** → **Constant 1**,
- binárního výstupu **Insert** → **Binary IO** → **1-0**,
- invertoru **Insert** → **Digital logic 1** → **inverter**,
- signalizační LED **Insert** → **Control Panel** → **Indication LED**,
- logické funkce OR **Insert** → **Digital logic 1** → **2 Inp-OR**,
- povelu z HMI jednotky **Insert** → **Control Panel** → **HMI Command**.
- Zapisovač chyb **Insert** → **Fault recorder**

Nyní je nutno provést propojení jednotlivých bloků stejně jako je naznačeno na *Obrázek 8.9* pomocí postupu popsaného v kapitole 8.2.2.1. Jednotlivé spoje lze i podle obrázku popsat pro lepší přehlednost.



Obrázek 8.9 Vytvořené funkční schéma pro testování diferenciální ochrany.

Po propojení všech prvků provedeme parametrizaci následujících funkčních bloků. V bloku *Differential protection* se v záložce *Current* provádí nastavení vypínací charakteristika diferenciální ochrany, jak je popsáno v kapitole 8.1.3. V záložce *Transformer group* lze nastavit měření jiného hodinového úhlu než 0° s krokem 30°. V dalším bloku *I-0* (binární výstup) je nutno specifikovat číslo fyzického binárního výstupu, kterému bude tento blok přiřazen. Jelikož blok bude reprezentovat **BO1** nastavíme *Output No.:* 1. Dále provedeme nastavení bloku *HMI Command*. Tento blok zde plní funkci manuální aktivace tripovacího signálu pro otestování tripovacího signálu. V parametrizaci se definuje jen název příkazu např. *Manual Trip*, který se objeví na HMI jednotce v sekci *Commands*, přes HMI jednotku se tento signál taktéž aktivuje. Dalším blokem, který vyžaduje parametrizaci je blok signalizační LED. Zde se určí číslo LED, která se má rozsvítit a zapíše se text, které se zobrazí na HMI jednotce v sekci *Alarms* v případě rozsvícení jednotlivých barev např. *green: STATUS*, *red: TRIP*. Dále nastavíme blok *Fault recorder*. Zde provedeme pojmenování jednotlivých analogových vstupů, které jsou definovány v záložce *Analog inputs*, dále nastavíme dobu záznamu. Doba záznamu před poruchou na 200ms a dobu záznamu po poruše na 2000ms, celkovou dobu záznamu na vyrovnávací paměti nastavíme na 2500ms.

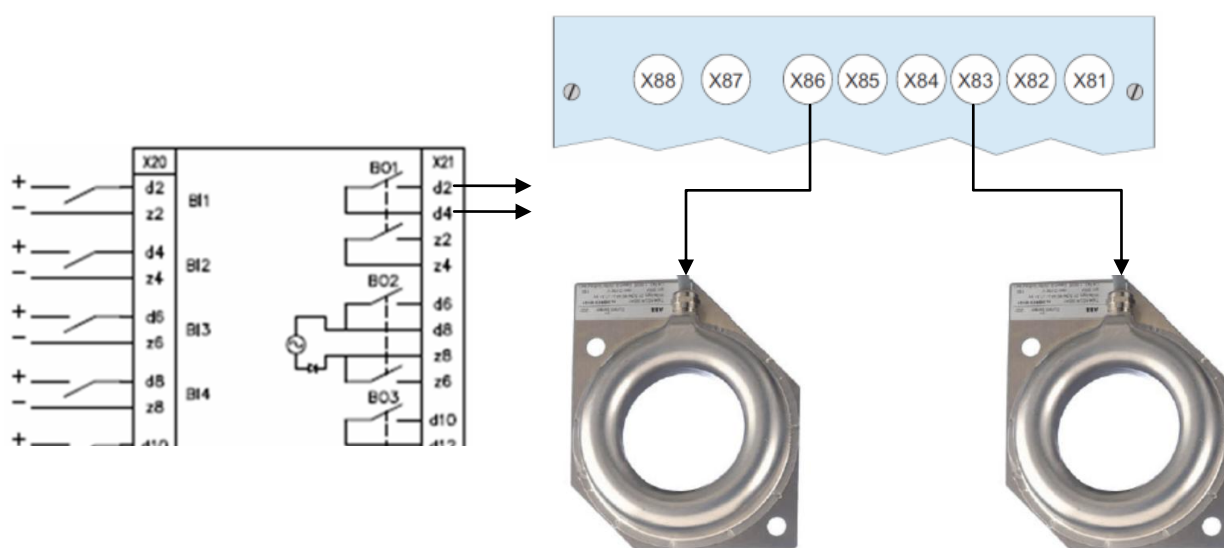
Celý projekt je potřeba nakonec uložit **File** → **Save** a nahrávat do ochrany **Connect** → **Send to REF542plus**. Je potřeba říci, že při každé změně nastavení ve funkčním schématu je nutno nahrát celou konfiguraci do terminálu znovu.

8.2.2.3 Popis funkce vytvořeného funkčního schématu

V normálním provozním stavu je signál *D_TRIP* roven 0, tudíž i signál pro Binární výstup je roven 0 a je rozepnutý. Signál je v invertoru negován a přiveden na vstup *green* signalizační LED. Na HMI jednotce bude v tomto stavu svítit zelená LED s popisem: *STATUS*. V případě, že diferenciální ochrana zaznamená větší proud než je povolený signál *D_TRIP* se překloupí do logické 1. Do logické jedničky se překloupí i signál pro Binární výstup BO1 a sepne. Signalizační LED změní barvu na červenou s popisem: *TRIP*. Aby byl Binární výstup aktivní, musí být na jeho vstup *IL* přivedena LOG1. Pokud provedeme příkaz přes HMI jednotku, překloupí se do logické jedničky signál *M_TRIP* a binární výstup sepne. Poruchový zapisovač se aktivuje stejným signálem jako Binární výstup.

8.3 Nastavení a zapojení terminálu REF 542plus pro testování diferenciálních ochrany s použitím senzorů RC

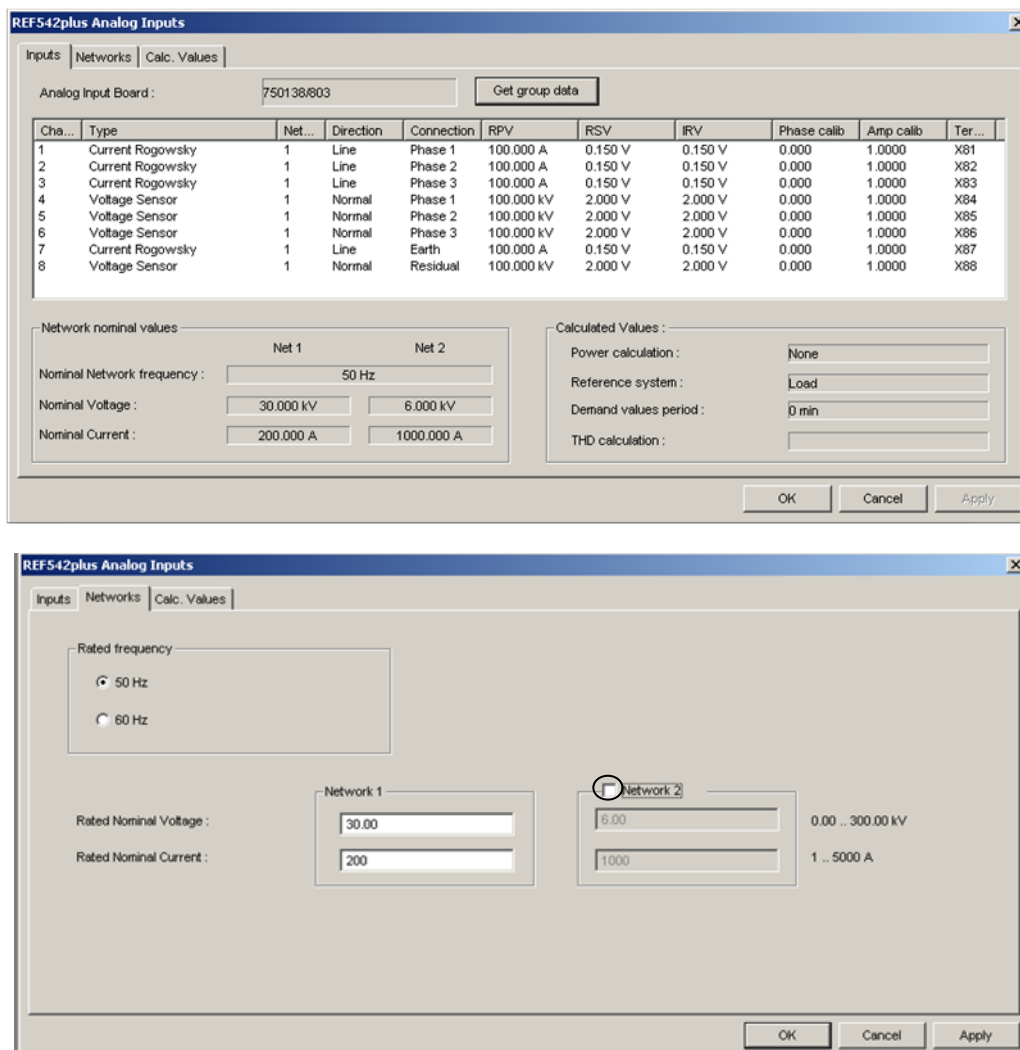
Pro použití terminálu jako diferenciální ochrany transformátoru s RC je nutno použít analogový vstupní kartu s minimálně 6 sensorovými vstupy. V tomto případě je použita analogová měřicí karta **750138/803**, která disponuje 8 sensorovými vstupy. Na tyto vstupy jsou zapojeny proudové senzory, v našem případě je to po jednom transformátoru **KECA 80 A1** na primárním a na sekundárním vstupu ochrany viz. *Obrázek 8.10*. Pro tripovací signál z ochrany využijeme stejný binárního výstupu **BO1** jako u zapojení s PTP.



Obrázek 8.10 Zapojení základní jednotky pro testování diferenciální ochrany s RC

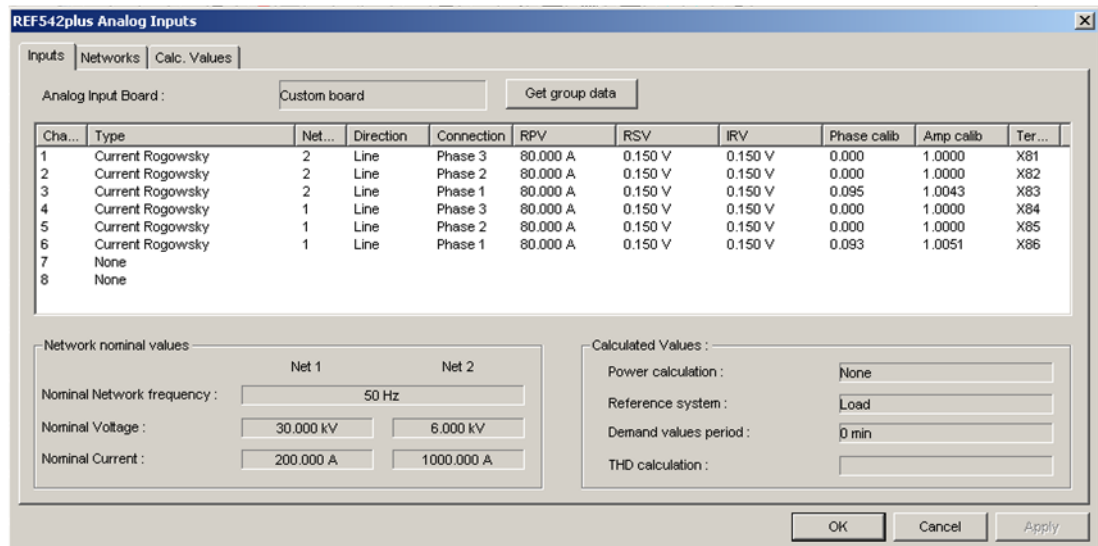
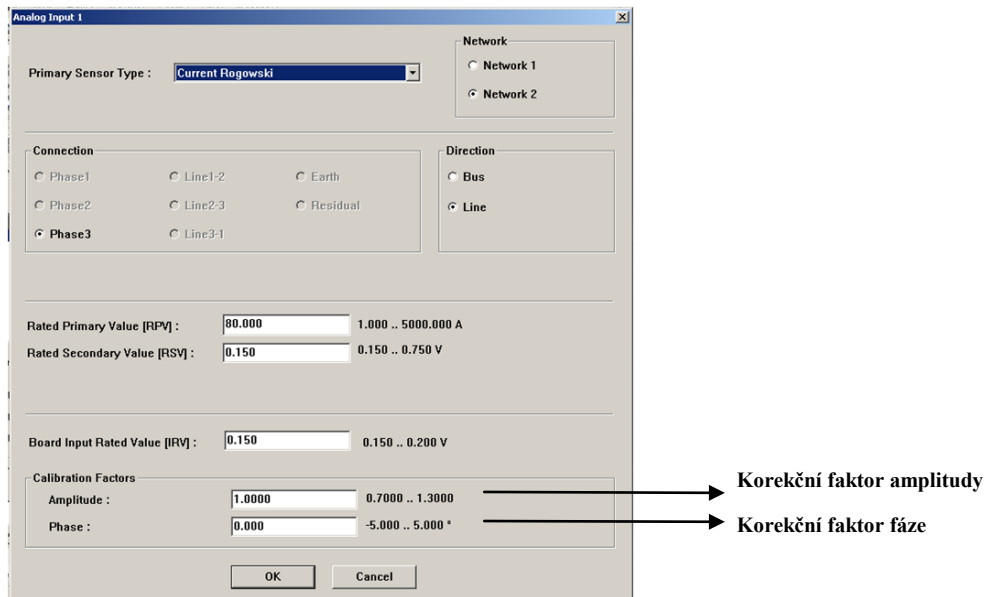
8.3.1 Konfigurace karty analogových vstupů se senzory

Analogové karta **750138/803** je standardně nakonfigurována dle *Obrázek 8.11*. Nejdříve povolíme druhou síť v záložce *Network*. Dále smažeme vstupy 4-8 v záložce *Inputs* a místo nich nakonfigurujeme vstupy 4-6 jako *CR* pro druhou síť jak je na *Obrázek 8.12*



Obrázek 8.11 Dialogové okno pro nastavení analogových vstupů

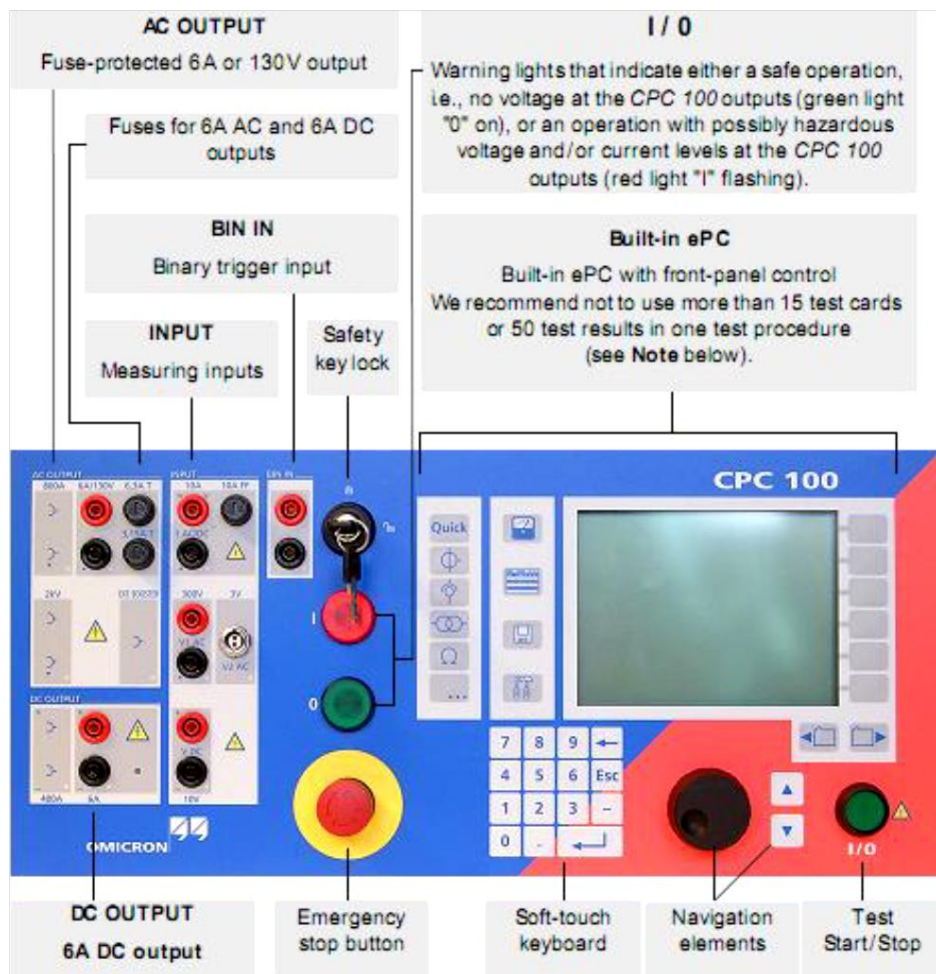
Dvojklikem na jednotlivé senzory (RC) nastavíme požadovaný převod, tj. v tomto případě 80A/150mV. Pro proudové senzory je v nastavení možno použít korekční faktory pro amplitudu a fázi měřeného proudu. Tyto hodnoty jsou štitkové a každý senzor má své vlastní korekční faktory měřených při kusové zkoušce.



Obrázek 8.12 Dialogové okno pro nastavení převodu a korekčních faktorů konkrétně pro RC1

9 MĚŘENÍ S PRIMÁRNÍM TESTEM OMICRON CPC 100

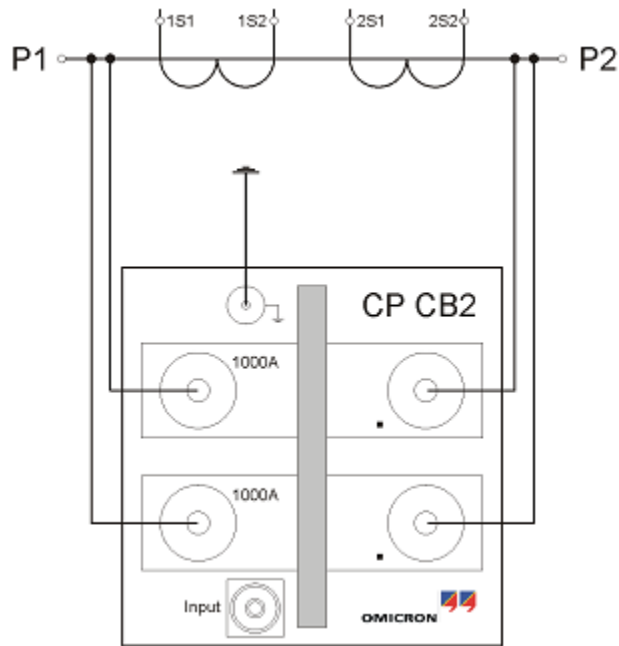
CPC 100 je multifunkční testovací systém, který slouží pro automatizované testování výkonových transformátorů, přístrojových transformátorů proudu a napětí a proudových senzorů. Měření se provádí vkládáním měřicích karet, ve kterých se nastavují použité vstupy a výstupy. Do měřicích karet se postupně navolí požadované hodnoty výstupního proudu a spustí se měření. Naměřené hodnoty se ukládají do karet a po skončení měření je lze uložit na externí médium pomocí USB rozhraní. Na *Obrázek 9.1* je zobrazen čelní panel testovacího systému CPC 100, kterým se ovládá měření. [3]



Obrázek 9.1 Čelní panel testovacího systému CPC 100 [20]

Tento systém je vybaven výstupem vysokého napětí o velikosti 2 kV AC, proudovými výstupy 400 A DC a 800 A AC. Po připojení externího zesilovače je možné dosáhnout hodnoty výstupního proudu až 2000 A AC.

Proudové výstupy z CPC 100 jsou s měřeným přístrojem propojeny kabely, které jsou na jednom konci vybaveny speciálními konektory a na druhém konci kleštěmi. Pro zvýšení rozsahu měření použijeme externí zesilovač proudu CP CB2. Ten nám umožní nastavovat proudy až do hodnoty 2000 A. Zesilovač proudu se propojí s CPC 100 speciálním kabel s koncovkami, jak je zobrazeno na *Obrázek 9.2*, tím získáme výstupní až 2000 A AC



Obrázek 9.2 Zapojení zesilovače na rozsah 2000 A [20]

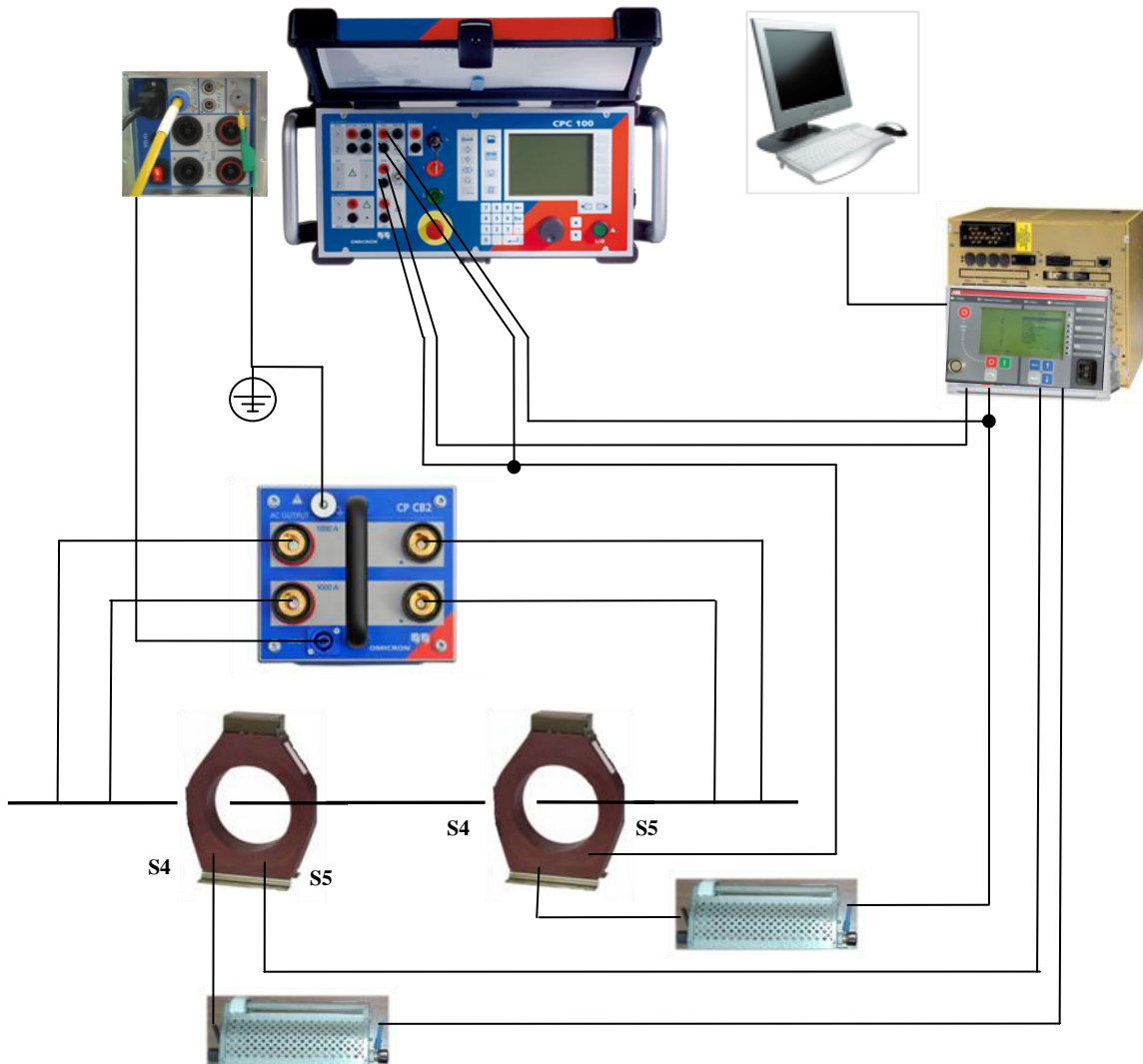
9.1 Měření přístrojového transformátoru proudu s primárním testrem CPC 100

Jak již bylo zmíněno výše, k měření jsme požili přístrojové transformátory proudu firmy ABB a to **KOLMA 06 D1** s možností přepínání odboček. Měřicí transformátor proudu má tyto štítkové hodnoty:

KOLMA 06D1			
50-150-500-750//5; 20//1A		50Hz	
S1-S2-S3-S4-S5		cl.10P10	0.5-3-10-15VA
S1-S2	50/5A	cl.10P10	0.5VA
S2-S3	100/5A	cl.10P10	1.5VA
S3-S4	70/1A	cl.10P10	1VA
S4-S5	50/1A	cl.10P10	0.5VA
S1-S5	150/1A	cl.10P10	4VA
P1x-P2x	20/1A		
ext. 120%		I _{th} : 60xI _{pn} (1s)kA	
0.6/3/-kV		I _{dyn} : 2,5xI _{th} kA	

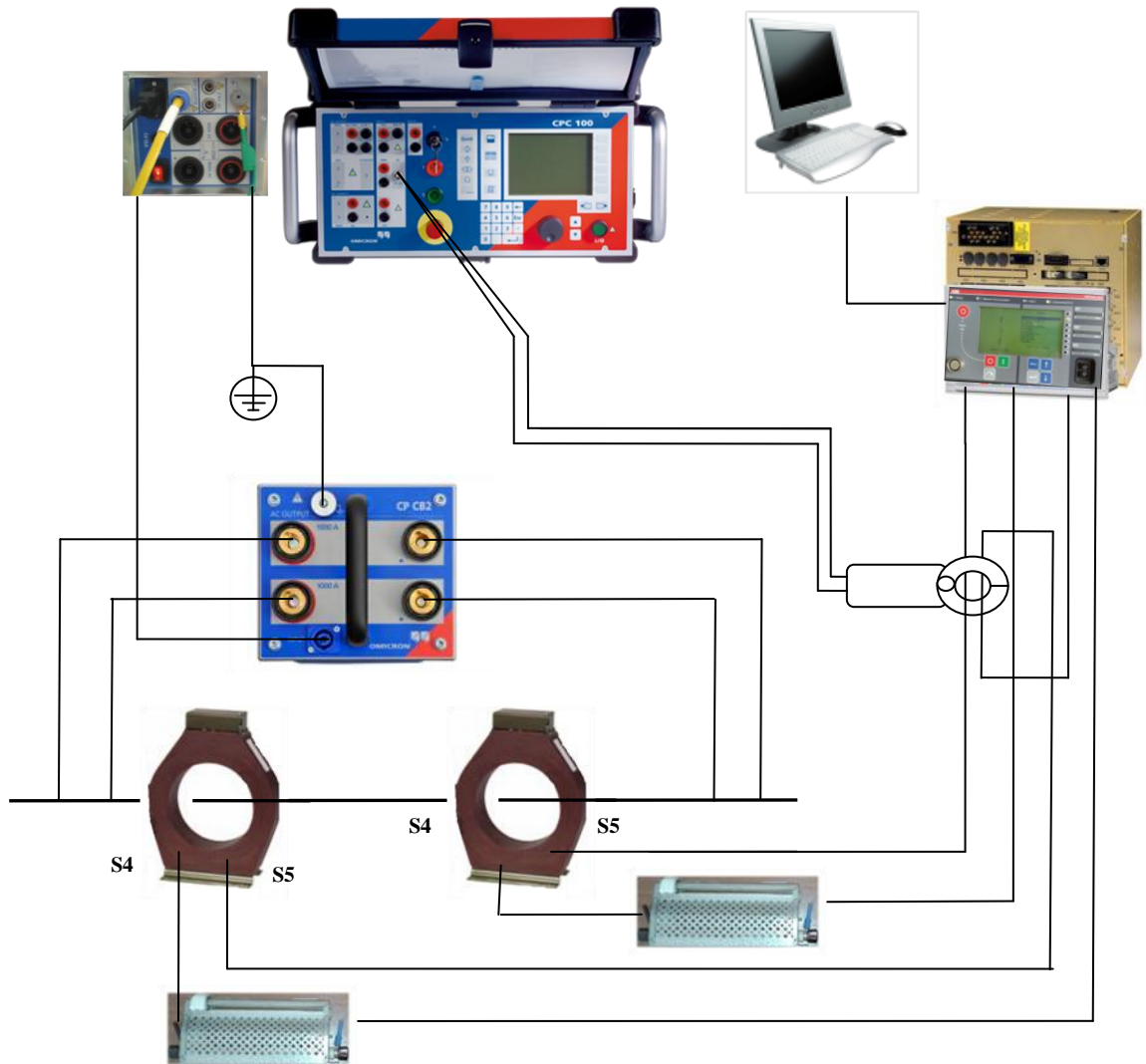
Pro měření zvolíme zapojení S4-S5 s převodem 50/1, to má však jmenovitý výkon jen 0.5VA, pokud chceme proměřit všechny pracovní stavy transformátoru i jeho přesycení, je menší jmenovitý výkon lepší.

Pro nastavení jmenovité zátěže PTP zapojíme obvod podle *Obrázek 9.3*. Jako zátěž sekundárního obvodu je zapojen reostat. Testovací vedení je kabel AXEKCY 150mm²



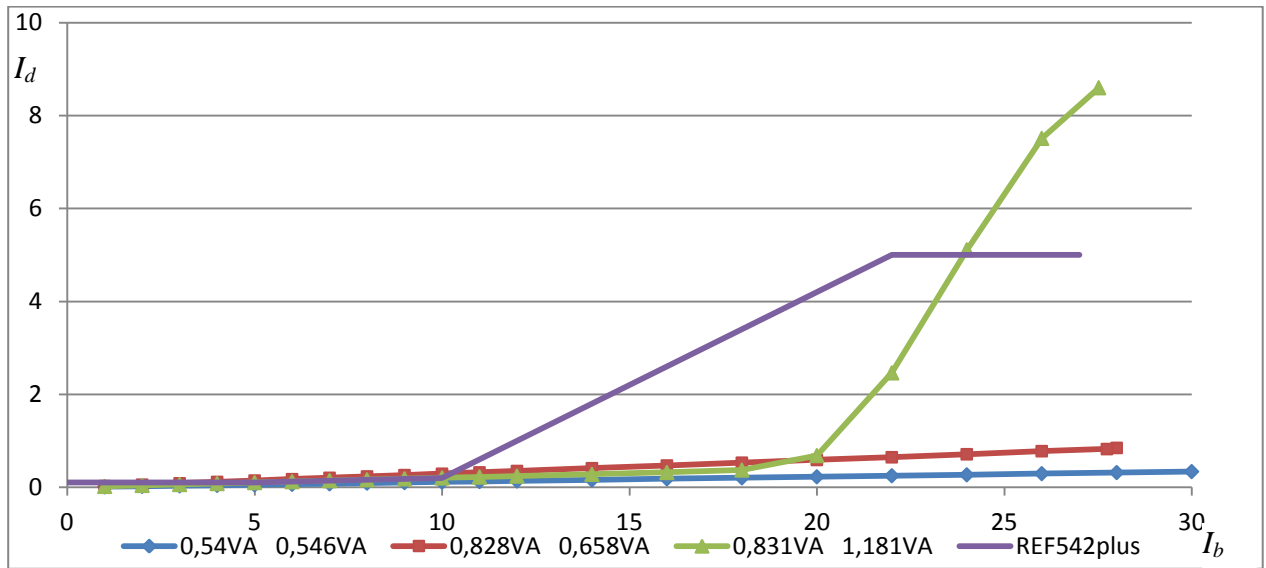
Obrázek 9.3 Schéma zapojení pro nastavení jmenovité zátěže

Na primárním testru Omicron CPC 100 si nejdříve nastavíme proudové kleště C-PROBE1 v záložce *Device Setup* nastavíme vstup V2 AC a převod $0,1000$ V/A. Dále vložíme měřicí kartu *CT Ratio1 (and Burden)* pro měření zátěže. V této záložce nastavíme rozsah na AC 2000 A, primární proud 50A, sekundární 1A a spustíme měření nastavením testovacího proudu 50A. Změnou polohy jezdcu reostatu nastavíme jmenovitou hodnotu zátěže pro jmenovitý proud 50A. Po nastavení zátěže přepojíme obvod podle schématu na *Obrázek 9.4*. Nyní vkládáme měřicí karty *Sequencer*, které nám umožňují vkládat více měřených hodnot do jedné karty. Postupně nastavujeme požadované hodnoty primárních proudů od maximální hodnoty 2000 A do jmenovitých 50A. Mezi jednotlivé nastavené hodnoty proudu vkládáme časovou prodlevu zhruba 5s, z důvodu zamezení oteplení jak testovacího vedení, tak i sekundárního vinutí transformátorů proudů, které je navinuto vodičem o průměru cca 2mm^2 . Kleštěmi C-PROBE1, připojené na napěťový vstup V2, měříme rozdíl sekundárních proudů transformátorů. V kartě *Sequencer* si necháme zaznamenat proud *I Out* a *I Clamp*. Všechny naměřené výsledky uložíme a graficky zpracujeme. Měření zopakujeme pro různé hodnoty nerovnoměrné zátěže připojené k PTP, tím napodobujeme různé délky vodičů od PTP k ochraně a také tím napodobujeme nepřesnost způsobenou převodem transformátorů.

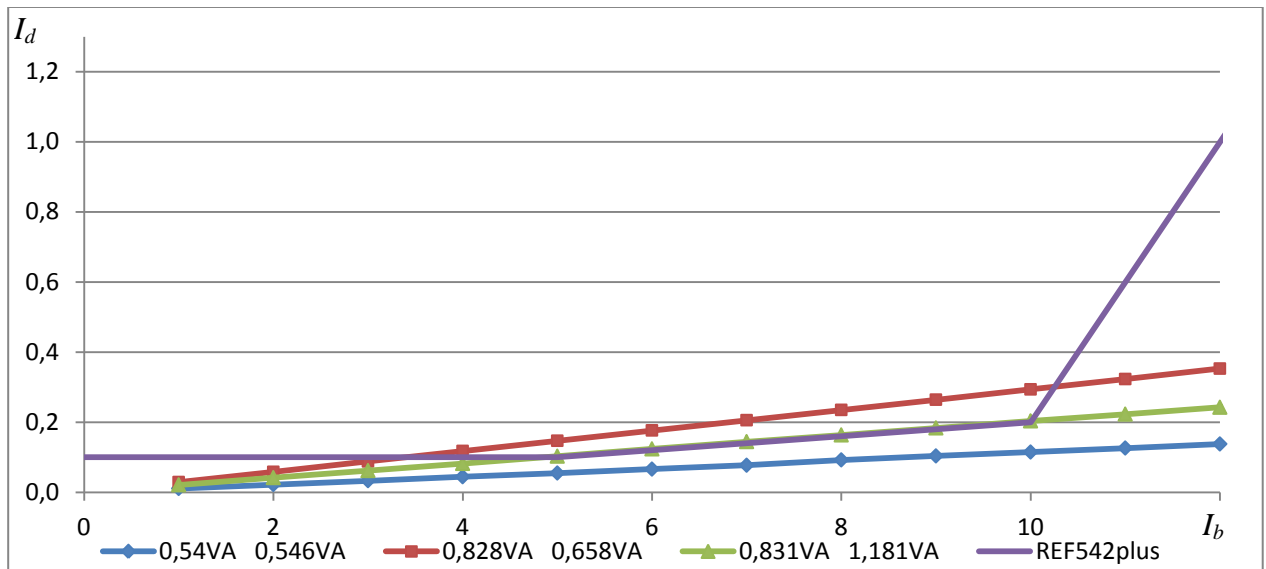


Obrázek 9.4 Schéma zapojení pro měření přesnosti

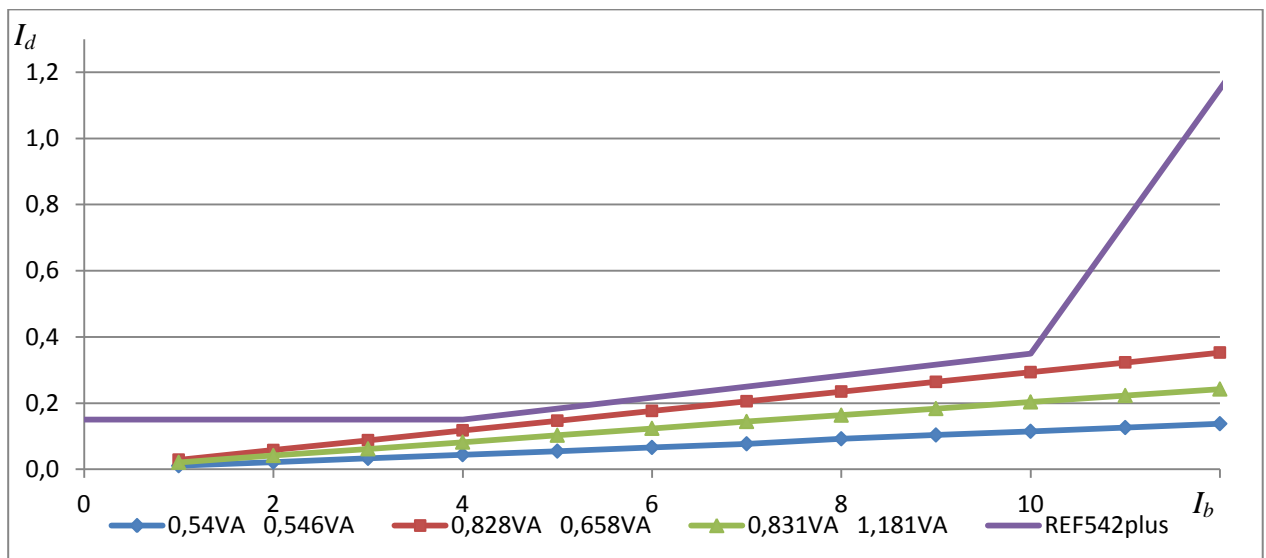
Na Obrázek 9.5 je zobrazen průběh rozdílového proudu pro tři stavy zatížení PTP a je zde zobrazena nejcitlivější vypínací charakteristika rozdílové ochrany REF542plus. Jak je vidět v detailu Obrázek 9.6, tato charakteristika je vyhovující jen pro jmenovité zatížení PTP, ve zbylých případech by ochrana reagovala falešně, proto je třeba citlivost charakteristiky upravit, jak je vidět na Obrázek 9.7



Obrázek 9.5 Změřené hodnoty PTP

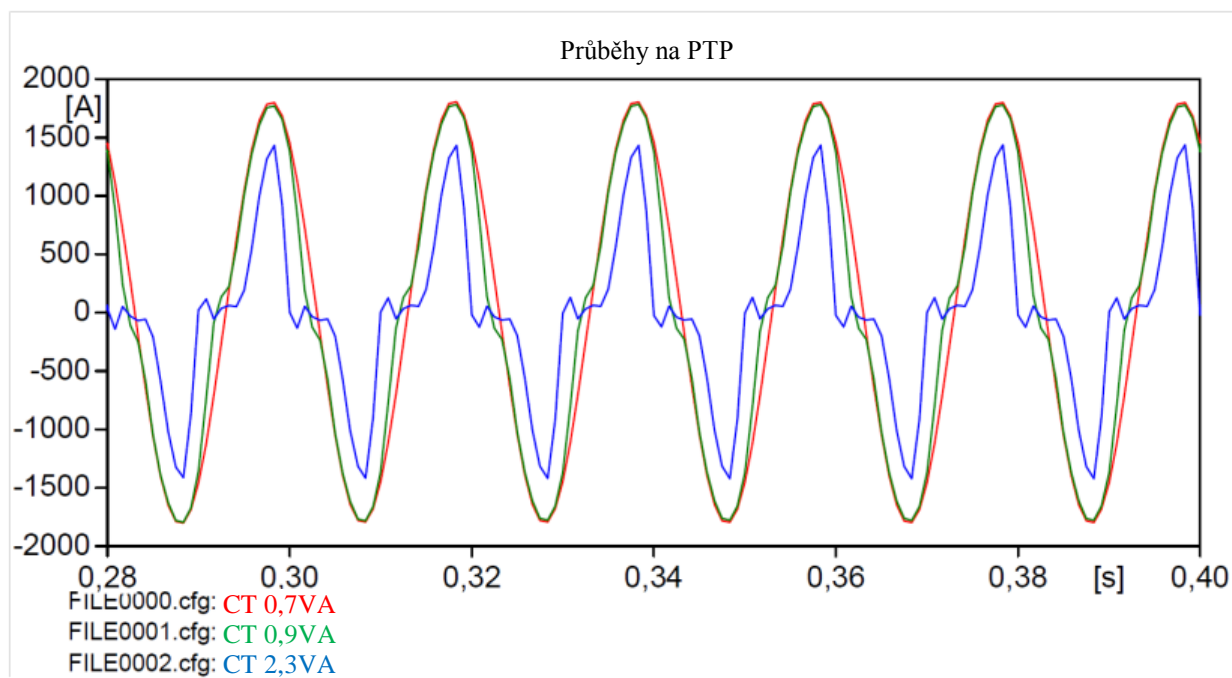


Obrázek 9.6 Detail změřených hodnot PTP



Obrázek 9.7 Detail upravené charakteristiky

K většímu diferenciálnímu proudu dochází kvůli přesycení jednoho z PTP, jak je na *Obrázek 9.8*. To je způsobeno připojením větší zátěže k PTP, ten se pak snadněji přesytí.



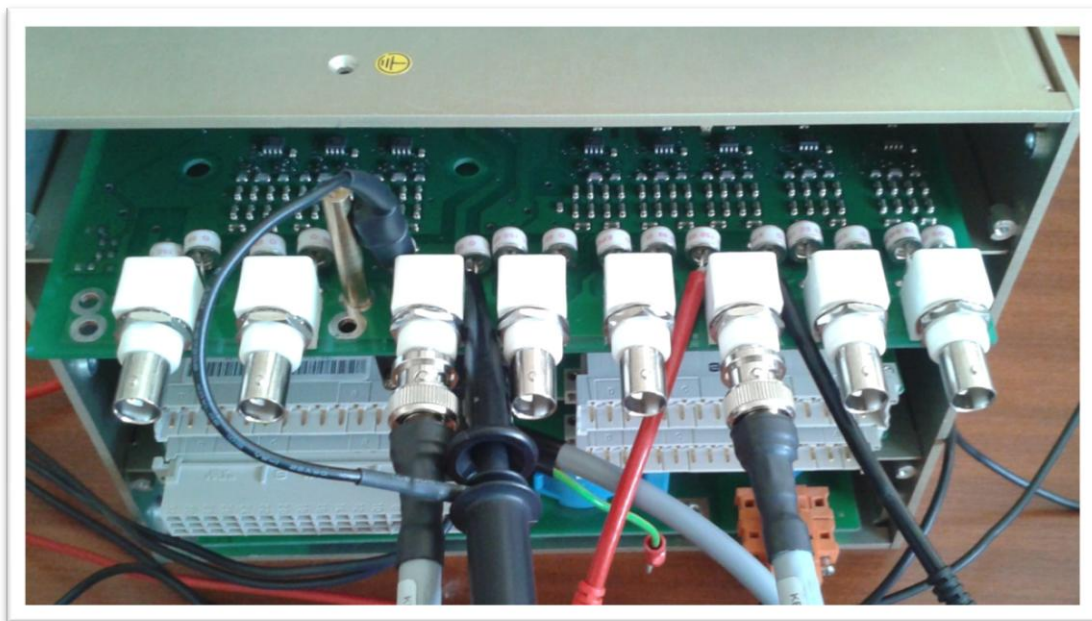
Obrázek 9.8 Přesycení PTP primárním testrem

9.2 Měření proudových senzorů RC s primárním testrem CPC 100

Jak již bylo zmíněno výše, k měření jsme požili senzory RC firmy ABB a to **KECA 80 A1**. Použité proudové senzory RC mají tyto štítkové hodnoty:

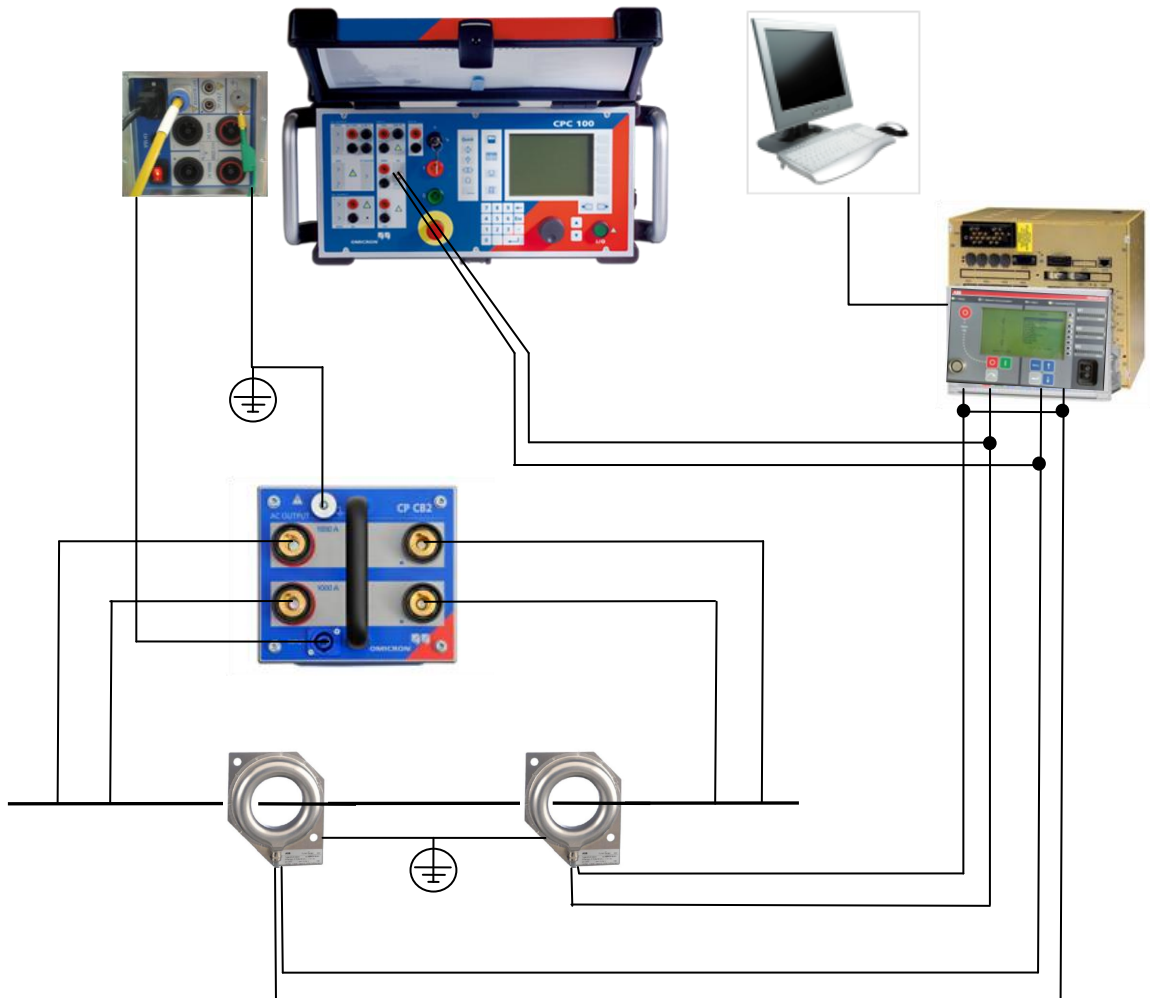
Type: KECA 80A1		Type: KECA 80A1	
Ith/Idyn: 31,5(3s)/80kA	fr: 50/60Hz	Ith/Idyn: 31,5(3s)/80kA	fr: 50/60Hz
Ipr:80A cl:1(3)	Usr: 0,150V, 50Hz	Ipr:80A cl:1(3)	Usr: 0,150V, 50Hz
Cfs: 1,0051 pl:+0,093	Usr: 0,180V, 60Hz	Cfs: 1,0043 pl:+0,095	Usr: 0,180V, 60Hz

Pro toto měření zapojíme senzory KECA do karty **750138/803** a pomocí napěťových sond, napojených dle *Obrázek 9.9*, budeme měřit rozdílové napětí senzorů, ochranu necháme vypnutou. Schéma zapojení obvodu je dle *Obrázek 9.10*.



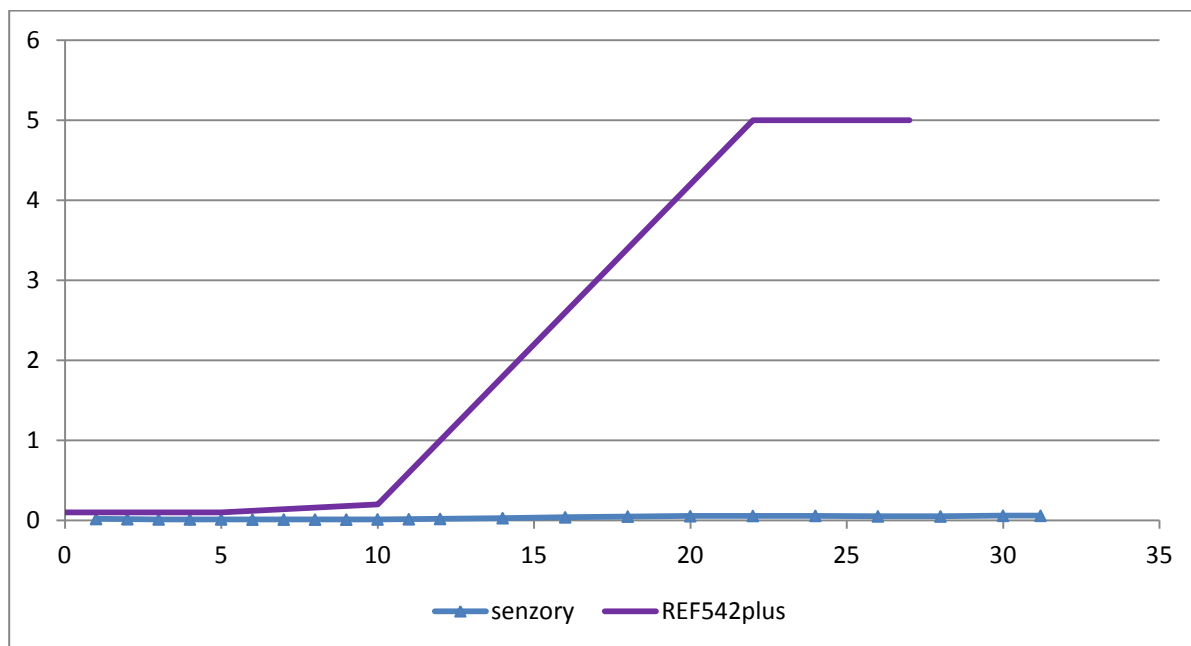
Obrázek 9.9 Zapojení napěťové sondy

Na primárním testru Omicron CPC 100 vložíme měřicí karty *Sequencer*. Postupně nastavujeme požadované hodnoty primárních proudů od maximální hodnoty 2000 A do 50A. Mezi jednotlivé nastavené hodnoty proudu vkládáme časovou prodlevu zhruba 5s. Pomocí napěťových sond zapojených tak, aby se vzájemně odčítali, připojené na napěťový vstup V2, měříme rozdílové napětí senzorů RC. V kartě *Sequencer* si necháme zaznamenat proud *I Out* a *V2 AC*. Všechny naměřené výsledky uložíme a graficky zpracujeme.

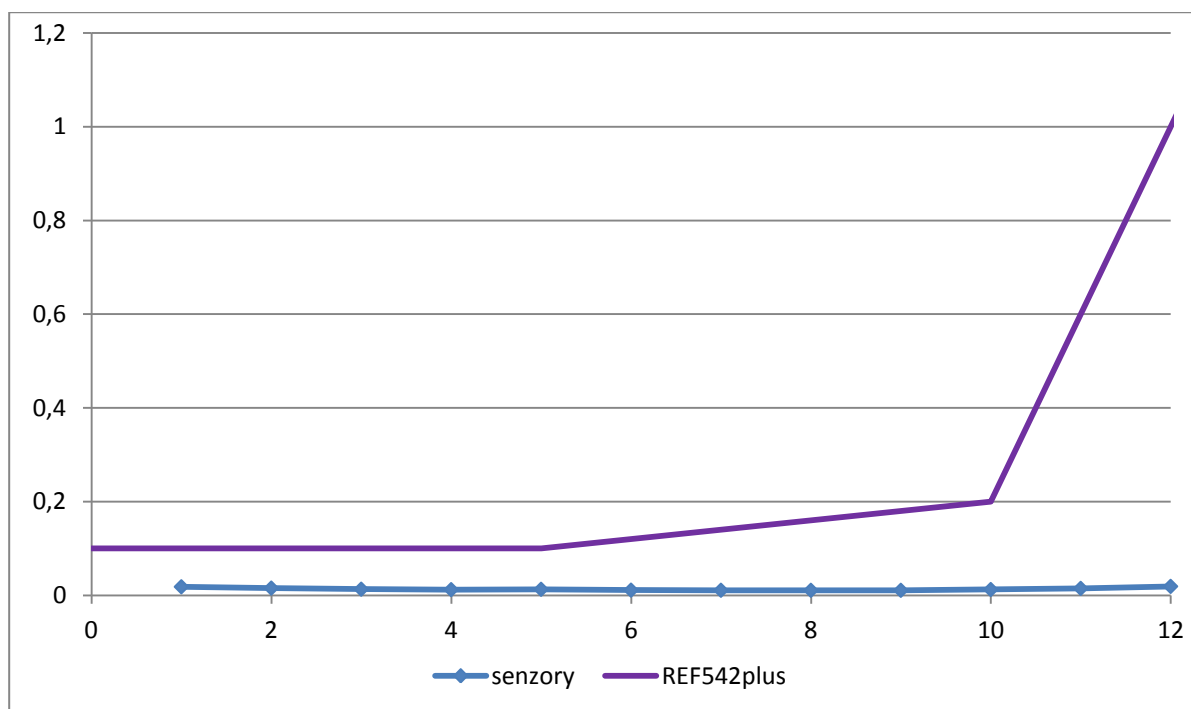


Obrázek 9.10 Schéma zapojení pro nastavení jmenovité zátěže

Na Obrázek 9.11 je zobrazen průběh rozdílového proudu RC a je zde zobrazena nejcitlivější vypínací charakteristika rozdílové ochrany REF542plus. Tato charakteristika je vyhovující a i ve velkých nadproudech, kde je chyba stále velmi malá. V detailu charakteristiky Obrázek 9.12 vidíme průběh chyby rozdílového proudu pro *I* a *II Oblast*, tuto chybu by ochrana změřila ještě menší při použití korekčních faktorů.



Obrázek 9.11 Změřené hodnoty RC



Obrázek 9.12 Detail změřených hodnoty RC

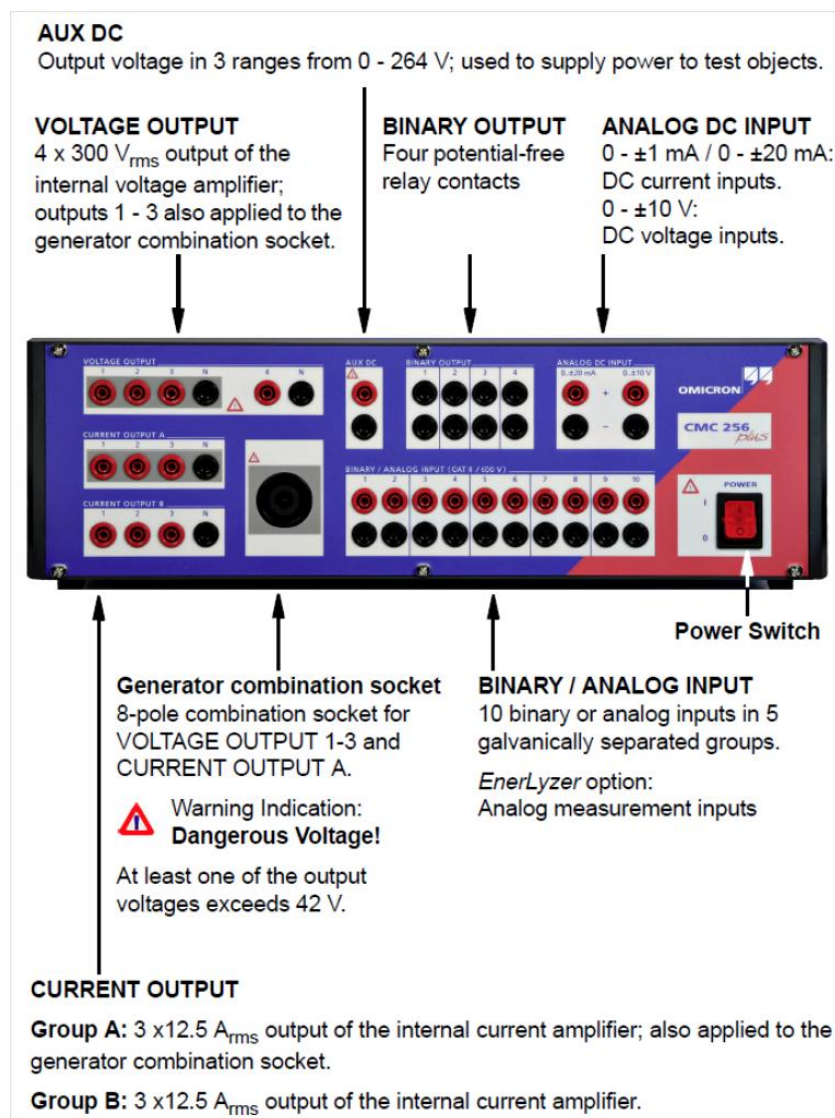
10 MĚŘENÍ SE SEKUNDÁRNÍM TESTEM OMICRON CMC 256 PLUS

Počítačem řízený testovací systém používá koncept funkčního rozdělení mezi softwarem běžícího na počítači a hardwarem CMC 256 připojeným ke zkušebnímu objektu. Zkušební software OMICRON Test Universe.

- Kontroluje zkušební signály
- Zpracovává naměřená data
- Vytváří zprávy
- Generuje údaje

CMC 256 zkušební souprava

- Generuje testovací signály (proudy, napětí, binární signály)
- Měří reakci (analogové a binární) ze zkušebnímu objektu
- Dodává stejnosměrný proud pro testování objektů.



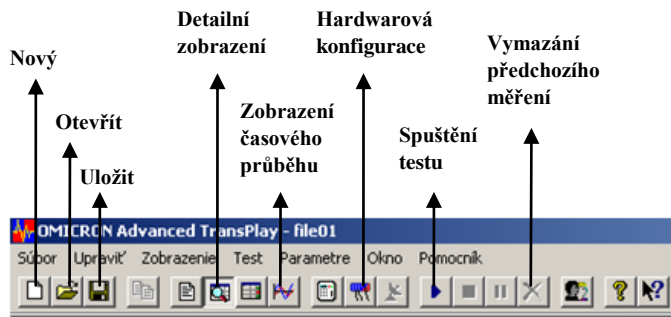
Obrázek 10.1 Čelní panel testovacího systému CMC 256 plus [21]

10.1 Modul Advanced TransPlay

Po spuštění souboru *OMICRON start Page* se otevře prostředí *OMICRON Test Universe*, zde si spustíme modul *Advanced TransPlay*, tímto modulem mohou být data, která byla získána z reálných nebo simulovaných poruch, importována, zpracována nebo generována do testovaného objektu. Data pocházející z jiných zdrojů (simulační programy) než ze zapisovačů poruch musí být v podporovaném formátu. Formáty určené pro import jsou:

- soubory datového formátu Comtrade - *.cfg, *.dat, *.hdr
- soubory formátu L4 - *.pl4
- soubory formátu TRF - *.trf

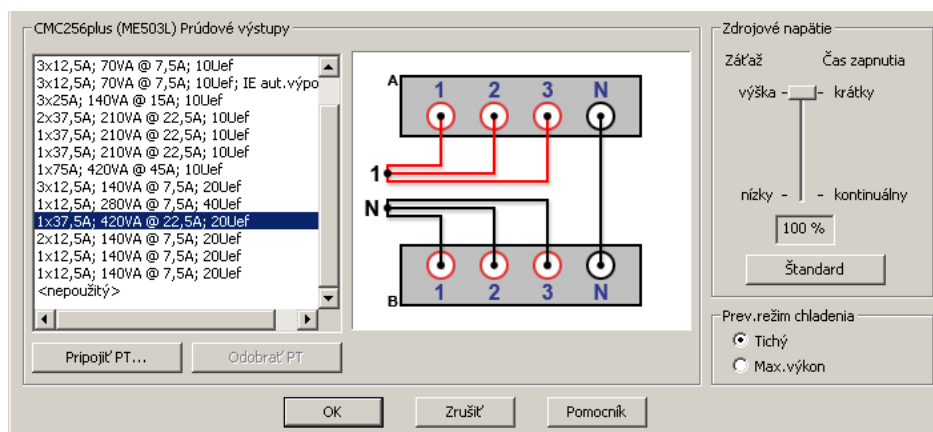
Uživatelské rozhraní programu *Advanced TransPlay* s popisem základních funkcí je znázorněno na *Obrázek 10.2*.



Obrázek 10.2 Popisem nástrojové lišty Advanced TransPlay

10.2 Nastavení modulu Advanced Transplay

Záznam typu Comtrade importujeme – volíme možnost (bez profilu). Po importování signálu si nastavíme Hardwarovou konfiguraci OMICRONU CMC 256plus. V záložce **Parametry** → **HW konfigurace** → **Všeobecně** → **Zkušební souprava** → **Detaily** si nastavíme proudové výstupy **1x37,5A; 420VA @ 22,5A; 20Uef** dle tohoto nastavení se provede i zapojení proudových výstupů.



Obrázek 10.3 Zapojení proudových výstupů

V záložce **Parametry** → **HW konfigurace** → **Binární / Analogové vstupy** se připojí binární vstup **Bin. In. 10** *Obrázek 10.4*. Tímto vstupem se následně spustí testovací signál

			CMC256plus																	
			ME503L																	
Funkcia			Binární	Binární	Binární	Binární	Binární	Binární	Binární	Binární	Binární	Binární	Binární	Binární	Binární	Binární	Binární	Binární	Binární	
Galvanicky volný			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Nominálny rozsah																				
Prevod prúdovej sondy																				
Prah																				
Vstupný signál testovacieho modulu	Zobraziť názov	Svorka	1+	1-	2+	2-	3+	3-	4+	4-	5+	5-	6+	6-	7+	7-	8+	8-	9+	9-
Vypnutie	Vypnutie		X																	
Nepoužitý	Bin. vstup 2				X															
Nepoužitý	Bin. vstup 3						X													
Nepoužitý	Bin. vstup 4							X												
Nepoužitý	Bin. vstup 5								X											
Nepoužitý	Bin. vstup 6									X										
Nepoužitý	Bin. vstup 7										X									
Nepoužitý	Bin. vstup 8											X								
Nepoužitý	Bin. vstup 9												X							
Nepoužitý	Bin. vstup 10																X			
Nepoužitý	Bin. vstup 11																			
Nepoužitý	Bin. vstup 12																			

Obrázek 10.4 Binární vstupy

V okně **Detailní zobrazení** v záložce **Analogové výstupy** nastavíme požadovaný signál a jeho velikost, která je závislá na zvolení proudových výstupů a na samotné proudové smyčce testovacího objektu, tak aby nedošlo k přetížení proudových výstupů OMICRONU CMC256plus. Nastavením podmínky Startu zkoušky v záložce **Všeobecně** nastavíme od **Bin. vstup 10**.

	Kanál	Mierka	Min	Max
V L1-E				
V L2-E				
V L3-E				
IL1	IL1	160,00 %	-11,15 A	17,92 A
V(1)-1				


Zvolený průběh proudu

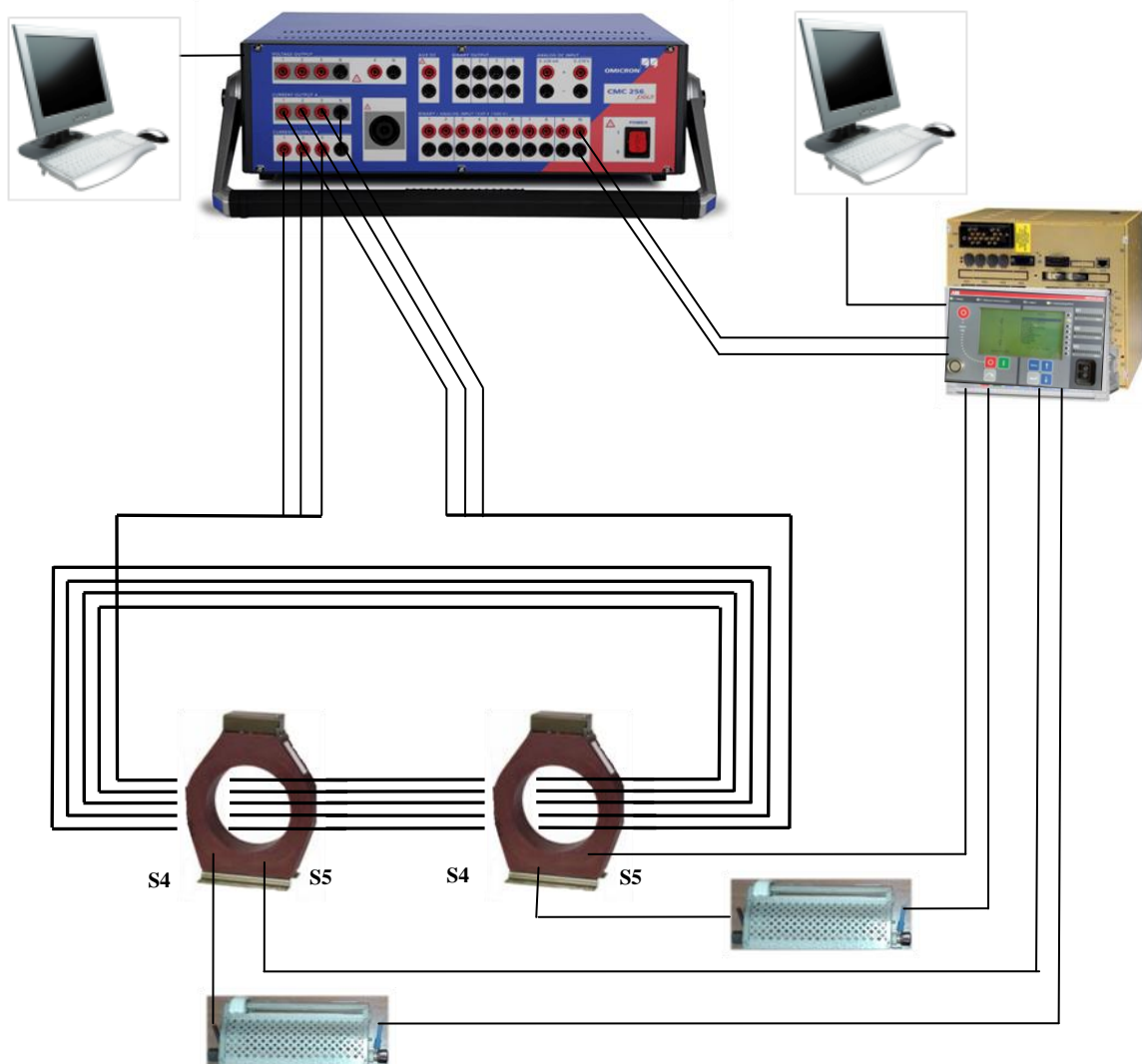
Procentní velikost proudu

Start zkoušky od Bin. vstupu 10

Obrázek 10.5 Detailní zobrazení - Analogové výstupy

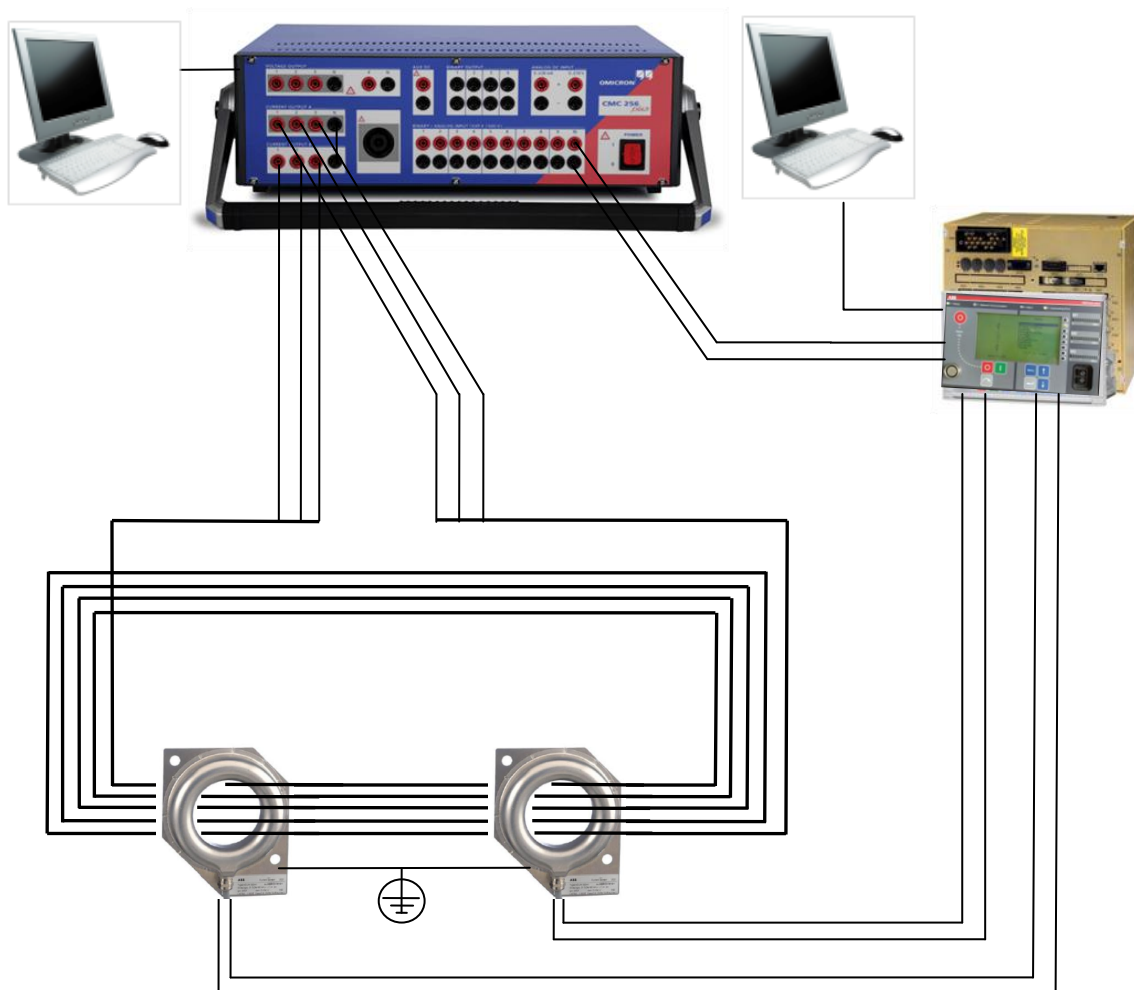
10.3 Měření přístrojového transformátoru proudu a proudových senzorů RC pomocí sekundárního testru CMC 256plus

Pro měření reakce PTP na různé průběhy signálů zapojíme obvod podle *Obrázek 10.6*. Testovací vedení je tvořeno 10 závitů kabelem 4x4mm², kde jsou jednotlivé vodiče zapojeny v sérii, celkově tak získáme na PTP 40-ti násobek výstupního signálu z OMICRONU CMC 256plus. Jako zátěž sekundárního obvodu je zapojen reostat. Test pustíme tlačítkem , samotný průběh testovacího signálu se začne generovat po přivedení signálu na **Bin. vstupu 10**, ten získáme z binárního výstupu **BO1** ochrany REF542plus, kdy v jednotce HMI v sekci Commands spustíme *Manual Trip*, tím se také aktivuje poruchový zapisovač ochrany a signál se zaznamená.



Obrázek 10.6 Schéma zapojení PTP

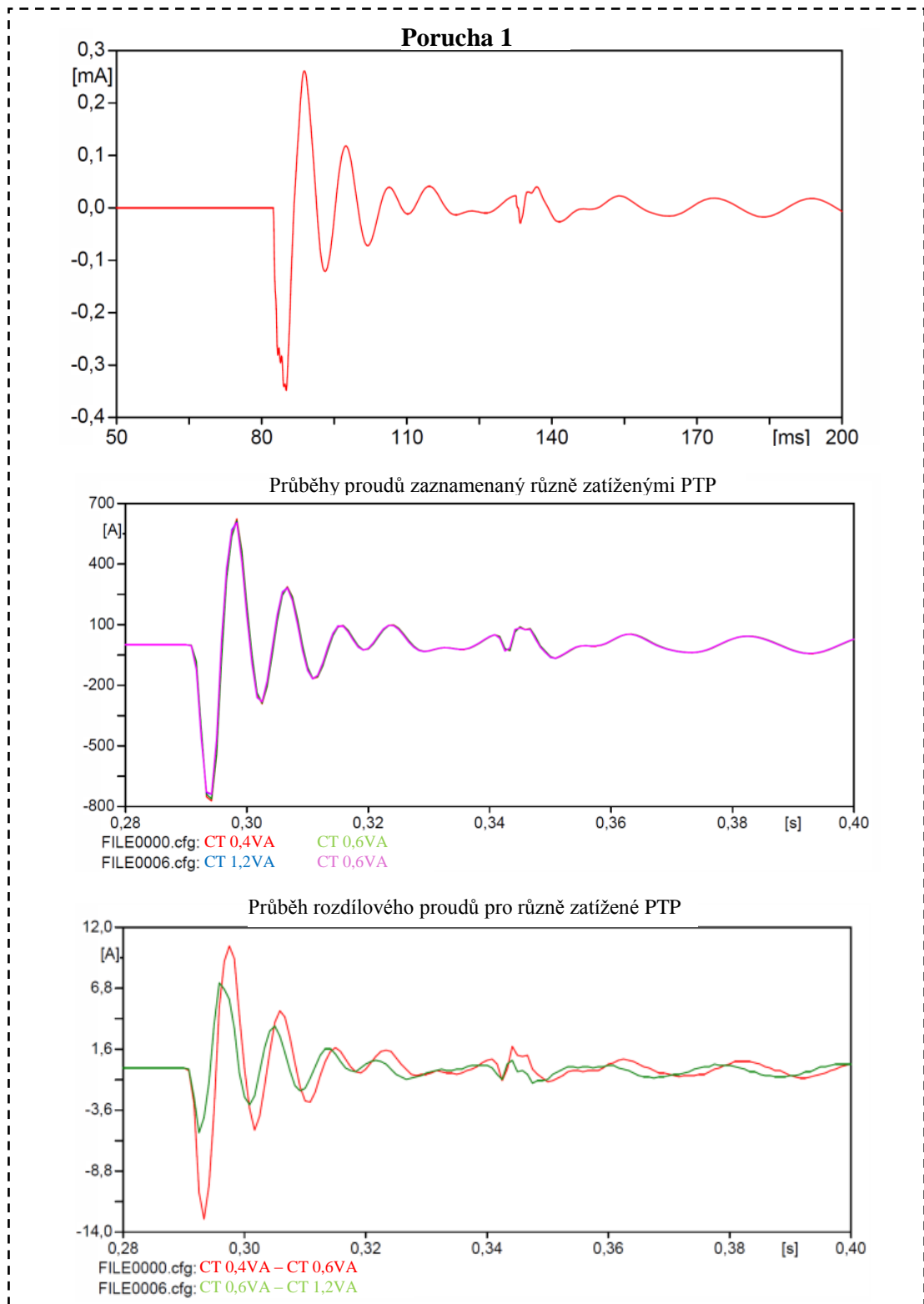
Pro měření s proudovými senzory RC obvod zapojíme dle *Obrázek 10.7*.



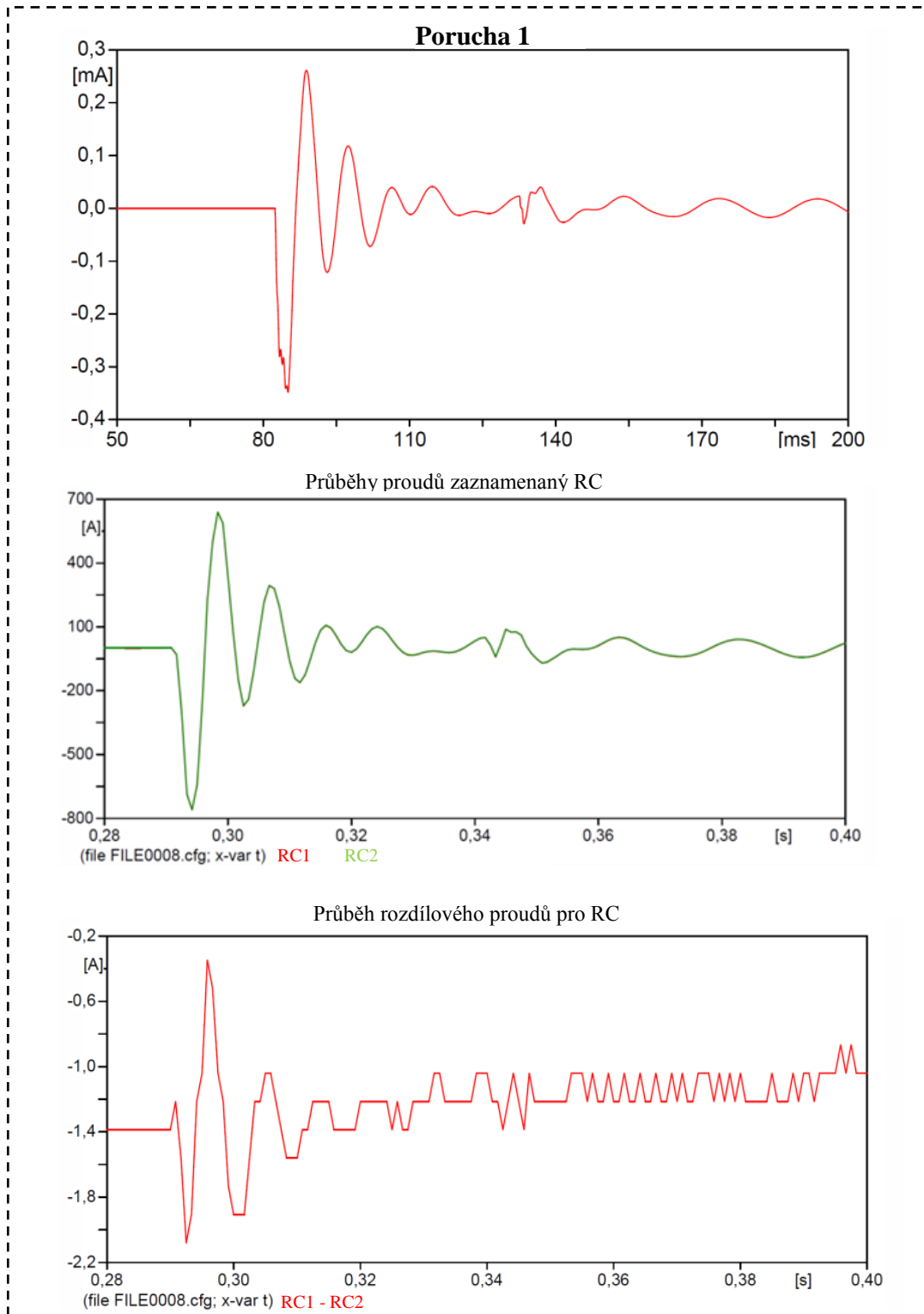
Obrázek 10.7 Schéma zapojení RC

Pro testování máme k dispozici několik signálů poruch, které postupně importujeme do programu *Advanced TransPlay* a provedeme měření. Všechny průběhy zaznamenané ochranou si uložíme a následně provedeme porovnání signálů.

První testovací signál (Porucha 1) je souměrný zkratový proud. Jak je vidět na *Obrázek 10.8* proudové transformátory čtou tento signál dobře. Diferenciální proud vzniká jen díky různému zatížení transformátorů. Stejný signál změřený proudovými senzory RC je na *Obrázek 10.9*. I zde je dobrá odezva na signál, chyba rozdílového proudu je zde velmi malá.

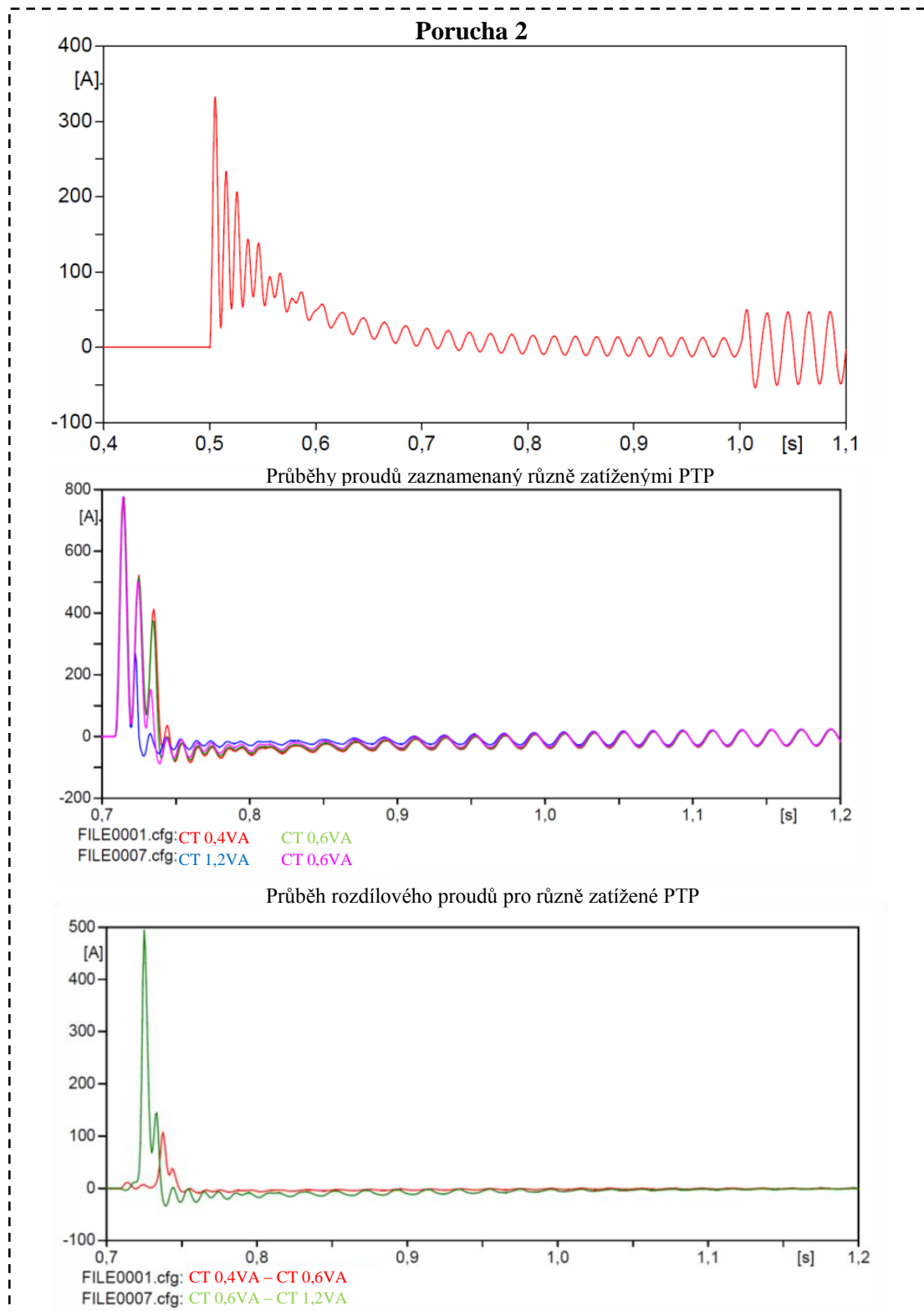


Obrázek 10.8 Porucha 1, PTP



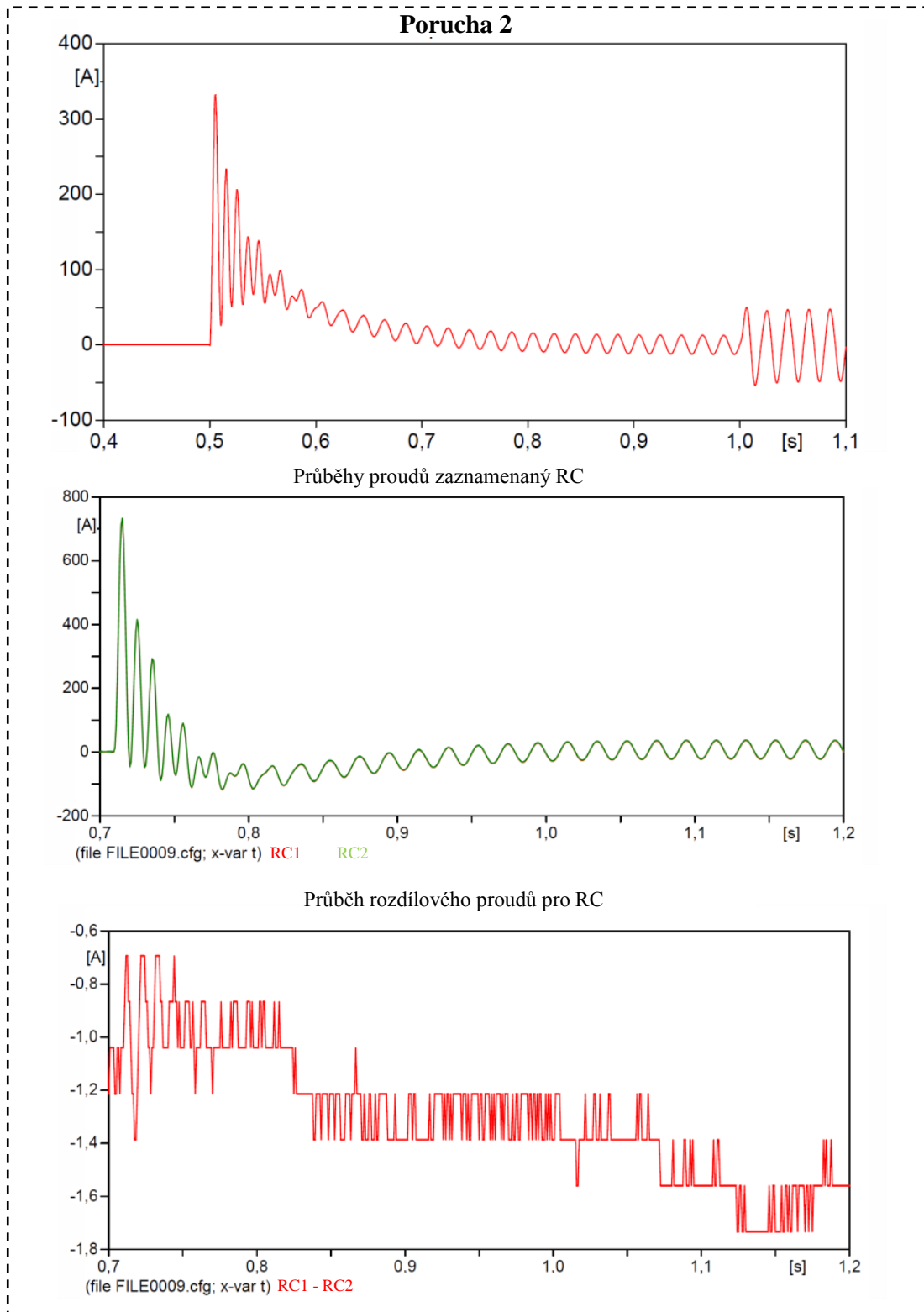
Obrázek 10.9 Porucha 1, RC

Další testovací signál (Porucha 2) je nesouměrný zkratový proud. Jak je vidět na *Obrázek 10.10* proudové transformátory čtou tento signál jen určitou dobu, pak se vlivem přesycení stejnosměrné složky transformátory odmlčí a přestanou věrohodně přenášet signál. Vlivem různého zatížení transformátorů dojde k přesycení v jiném okamžiku. Diferenciální proud vzniká právě tímto přesycením, jak ukazuje *Obrázek 10.10*. Stejný signál změřený proudovými senzory RC je na *Obrázek 10.11*.



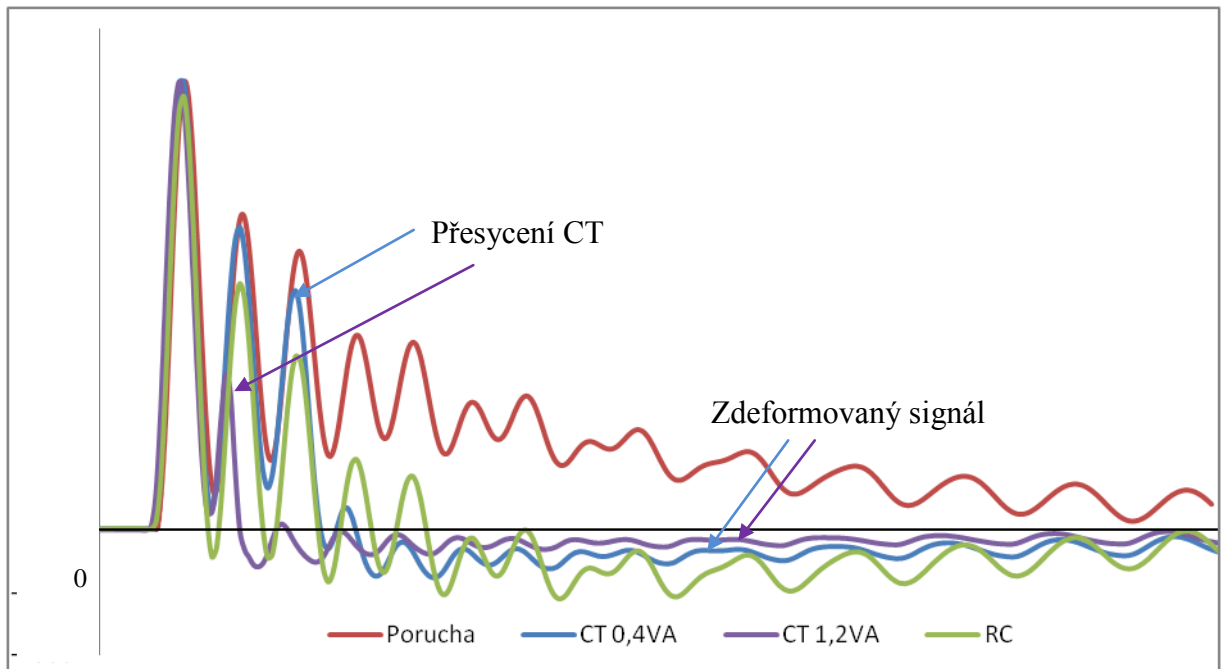
Obrázek 10.10 Porucha 2, PTP

U průběhů poruchy 2 změřené senzory nedochází k přesycení, signál je na obou senzorech změřen stejně a diferenciální proud je malý.



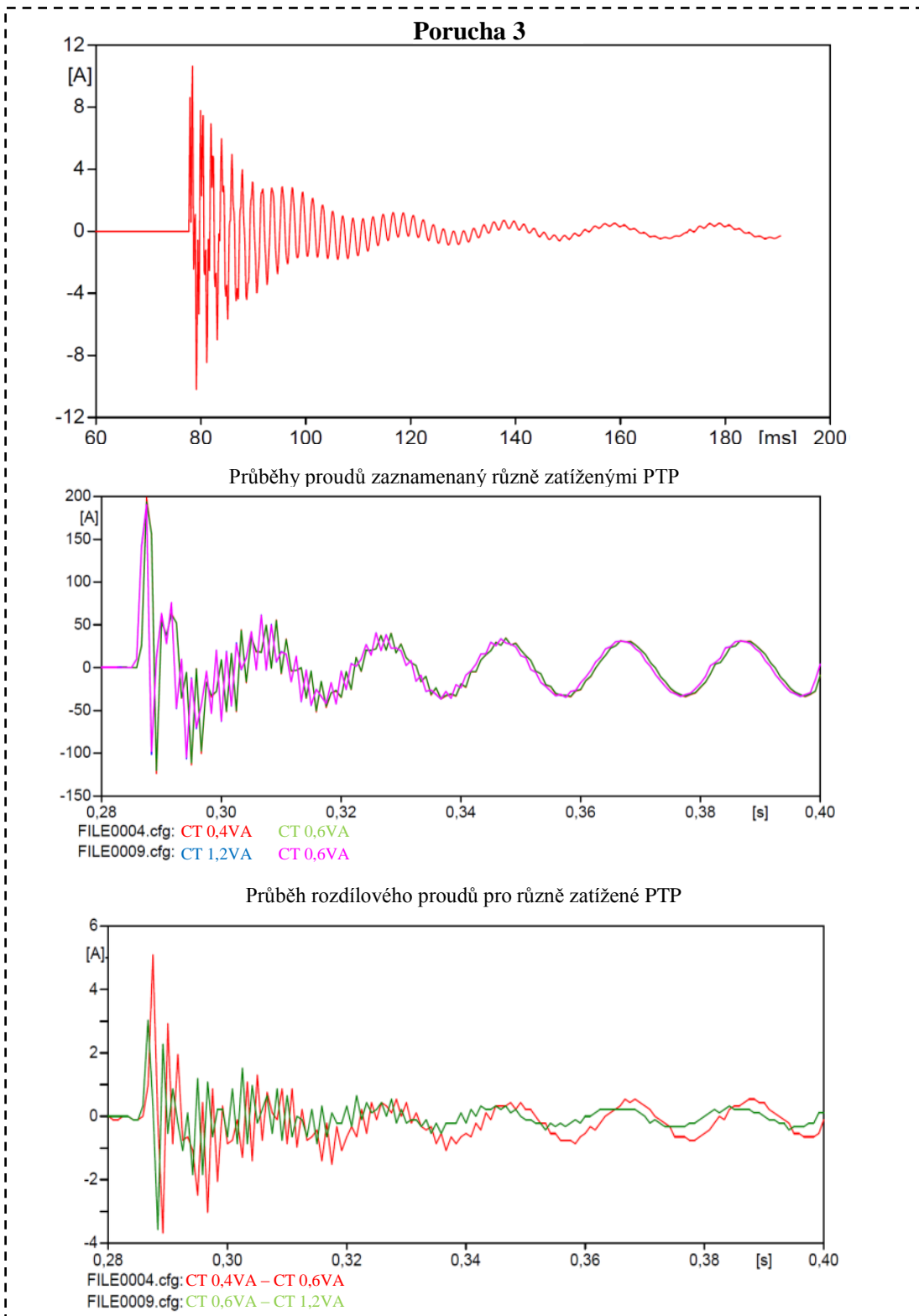
Obrázek 10.11 Porucha 2, RC

Porovnáme-li průběhy signálů *Obrázek 10.12*, vidíme jak PTP a proudové senzory přenášejí signál se stejnosměrnou složkou. Transformátory proudu se vlivem stejnosměrné složky přesytí a dále už přenášejí jen zdeformovaný střídavý signál. Proudové senzory stejnosměrnou složku nepřenášejí, nedochází u nich k přesycení, střídavá složka je přenesena bez deformace.

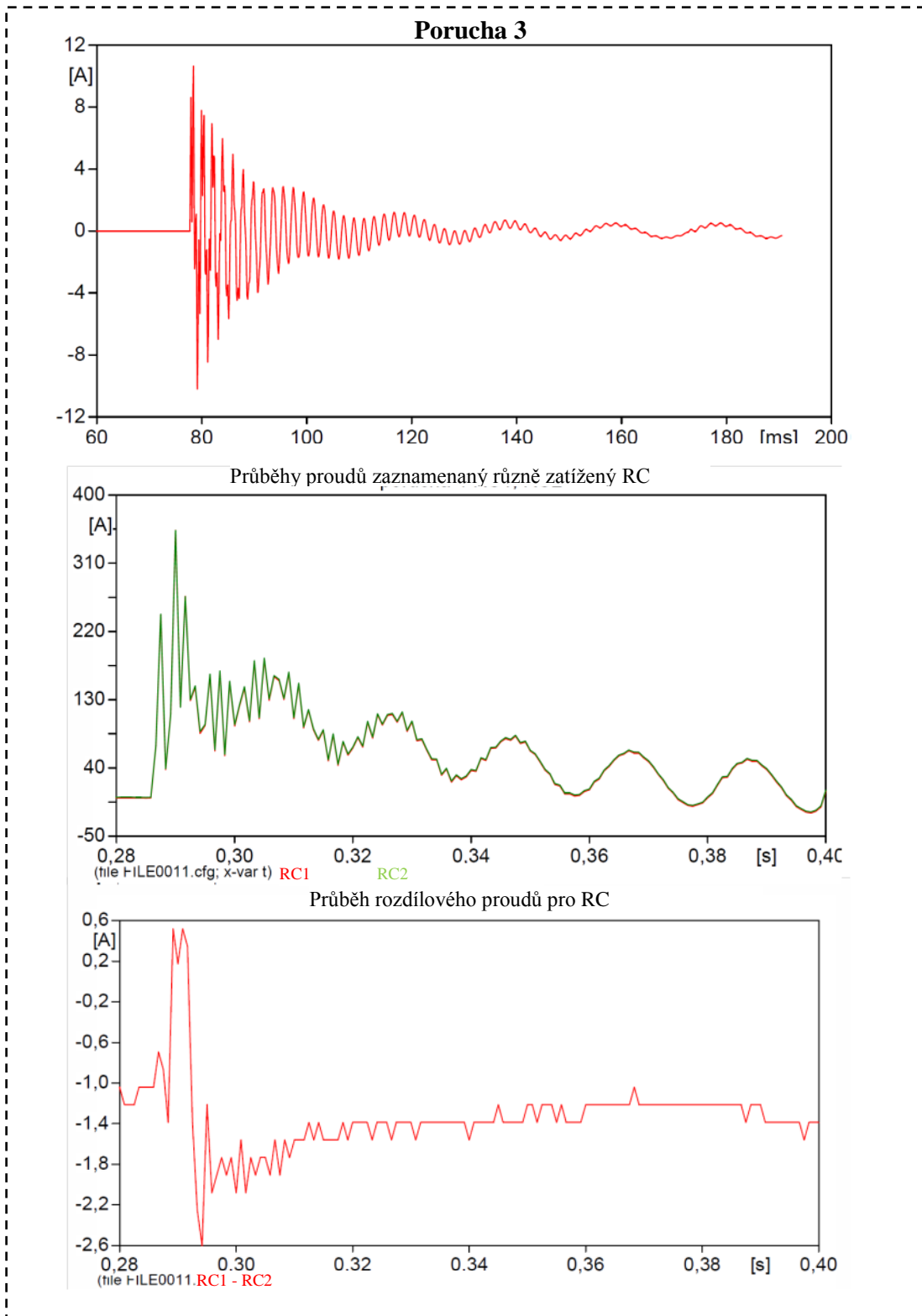


Obrázek 10.12 Porovnání naměřených hodnot poruchy 2

Další testovací signál (Porucha 3) je zemní spojení. Jak je vidět na *Obrázek 10.13* signál zapsaný poruchovým zapisovačem nestíhá zaznamenat vyšší frekvence v tomto signálu. Je to zapříčiněno vzorkovací frekvencí zapisovačem, která je 1,2kHz, to znamená 24 vzorků za 20ms. Stejný signál změřený proudovými senzory RC je na *Obrázek 10.14*.



Obrázek 10.13 Porucha 3, PTP



Obrázek 10.14 Porucha 3, RC

11 ZÁVĚR

Současně používané principy ochranných funkcí digitálních ochran vycházejí zpravidla z vyhodnocení analogových signálů proudů a napětí chráněného objektu. Zdrojem těchto vstupních analogových signálů byly od počátku vzniku elektrického chránění zpravidla přístrojové transformátory proudu a napětí. S nástupem senzorů, které stále častěji nahrazují především klasické přístrojové transformátory proudu, je třeba počítat s kvalitativně i kvantitativně jiným typem signálu na vstupu digitální ochrany. Na základě toho může dojít i k přehodnocení řady ochranných funkcí, jejichž koncepce byla postavena právě na základě spolupráce s klasickými přístrojovými transformátory proudu.

První bod praktické část, bylo proměření PTP a proudových senzorů pomocí primárního testru CPC100. Porovnáme-li *Obrázek 9.5* a *Obrázek 9.11* vidíme, že při použití PTP je třeba dbát na dodržení jmenovitého zatížení, kdy při vyšších proudech, zhruba 20 násobku jmenovitého a při různých zátěžích dochází k přesycení PTP a vzniká velký diferenciální proud. Stejně tak by se projevila chyba převodů PTP. Vezmeme-li v potaz všechny tyto chyby a chybu přesnosti PTP, je třeba upravit vypínací charakteristiku tak, aby ochrana nepůsobila falešně. Při použití senzorů RC je diferenciální proud malý v celém rozsahu vypínací charakteristiky ochrany. Z toho pohledu je vhodné nastavit vypínací charakteristiku na co nejcitlivější hodnoty. V *Oblastech III* a *IV*, vypínací charakteristiky ochrany REF542plus, nám softwarové nastavení dovoluje zadat napevno dané minimální hodnoty. Pro využití výhod proudových senzorů, by bylo zapotřebí upravit toto nastavení, abychom docílili „položení“ vypínací charakteristiky ochrany.

V další části měření jsem testoval PTP a proudové senzory na různé průběhy poruch pomocí sekundárního testru CMC256plus. Zásadní rozdíl v naměřených průbězích, byl při nesouměrném zkratu (porucha 2), kdy se PTP vlivem stejnosměrné složky přesytí a vzniká tak diferenciální proud jak ukazuje *Obrázek 10.10*. Oproti tomu proudové senzory, u kterých k přesycení nedochází, přenáší signál spolehlivě a diferenciální proud je malý jak lze vidět na *Obrázek 10.11*. I pro tento případ platí, že vypínací charakteristika rozdílové ochrany se musí upravit dle vlastností PTP, zatímco na proudové senzory nejsou takové požadavky.

Proudové senzory se pro své vlastnosti jeví jako ideální způsob měření proudů, přesto se jejich plné využití v praxi neuplatňuje.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] MIŠÁK. *Přístrojové transformátory* [online]. 16.3.2010, 16.3.2010 [cit. 2012-05-17]. Dostupné z: http://www.stanislav-misak.com/index.php?option=com_content&view=article&id=74&Itemid=93
- [2] PROCHÁZKA, Martin. *Přístrojové transformátory proudu s důrazem na jištění*. Plzeň, 2006. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI.
- [3] POPEK, Jiří. *POROVNÁNÍ VLASTNOSTÍ PŘÍSTROJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ PROUDU A PROUDOVÝCH SENZORŮ*. Brno, 2010. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [4] ABB V ČESKÉ REPUBLICE. *Proudový senzor pro vnitřní prostředí KECA* [online]. 2012 [cit. 2012-05-17]. Dostupné z: <http://www.abb.cz/product/db0003db004279/c125739900636470c12573a1003e9ba7.aspx?productLanguage=cz&country=CZ>
- [5] DOHNÁLEK, Petr. *Ochrany pro průmysl a energetiku*. Praha: SNTL, 1991. ISBN 80-03-00630-9.
- [6] SVOBODA, Miloslav. *CHRÁNĚNÍ TRANSFORMÁTORU ROZDÍLOVOU OCHRANOU*. Brno, 2010. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [7] JANÍČEK F., CHLADNÝ V., BELÁŇ A., ELESCHOVÁ T., *Digitálne ochrany v elektrizačnej sústave*, STU – Slovenská technická univerzita 2004,
- [8] *Elektrotechnická měření*. Praha: BEN, 2002. ISBN 80-7300-022-9.
- [9] ČSN EN 60044-1:2001. *Přístrojové transformátory-část 1: Transformátory proudu*. Český normalizační institut, 2001.
- [10] ČSN EN 60044-8:2004 *Přístrojové transformátory-část 8: Elektronické transformátory proudu*. Český normalizační institut, 2004.
- [11] STODŮLKA, Ivo. *DIFERENCIÁLNÍ OCHRANA V OCHRANNÉM A ŘÍDÍCÍM TERMINÁLU REF542PLUS*. Brno, 2011. Učební text. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [12] JANÍČEK, František, Vladimír CHLADNÝ, Anton BELÁŇ a Žaneta ELESCHOVÁ. *Digitálne ochrany v elektrizačnej sústave*. Bratislava: STU v Bratislave, 2004. ISBN 80-227-2135-2.
- [13] JÁRA, Jaroslav. *CHRÁNĚNÍ TRANSFORMÁTORU ROZDÍLOVOU OCHRANOU*. Brno, 2008. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [14] ABB V ČESKÉ REPUBLICE. *Přístrojové transformátory a senzory* [online]. 2012 [cit. 2012-05-17]. Dostupné z: <http://www.abb.com/product/cz/9AAC720011.aspx?country=CZ>
- [15] JUŘÍK, Vladimír. *METODIKY A METODY SNÍMÁNÍ JEDNORÁZOVÝCH DĚJŮ*. Brno, 2008. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [16] SHEPARD, D. E., YAUCH, D. W. *An Overview of Rogowski Coil Current Sensing Technology*. [cit. 2012-05-17]. Dostupné z: [http://www.dynamp.com/dynamp/ldadocum.nsf/E710AF6D3E0F6255862565D7004B19DB/\\$file/Report.pdf?OpenElement](http://www.dynamp.com/dynamp/ldadocum.nsf/E710AF6D3E0F6255862565D7004B19DB/$file/Report.pdf?OpenElement)
- [17] HALUZÍK, Evžen. *Ochrany a automatiky v elektrických sítích*. Brno, 1986. Učební text. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.

- [18] ORSÁGOVÁ, Jaroslava. *Elektrické stanice a vedení*. Brno, 2006. Učební text. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [19] ORSÁGOVÁ, Jaroslava. *Měření na stabilizované diferenciální ochraně SPAD 346 C*. Brno, 20. Učební text. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [20] OMICRON: *CPC 100 Reference manual*. OMICRON, 2007
- [21] OMICRON: *CMC 256plus Reference manual*. OMICRON, 2004

PŘÍLOHA A

ABB

ABB

ELECTRONIC TRANSFORMERS

KEVI



VS
OE
LN
TS
AO
GR
E

GIS

KEVA_A



VS
OE
LN
TS
AO
GR
E

AIS

KEVA_B



VS
OE
LN
TS
AO
GR
E

AIS - AX1 (2 versions)



KECA

CL
UV
RS
EN
ST
OR

AIS - BU 3410, OEM



KECB

CS
UE
RN
RS
EO
NR
T

CB Δ - HD4



KECR

CS
UE
RN
RS
EO
NR
T

CB Δ - VD4 (IN-CB)



KEVCY_RE

CS
OE
MN
BS
IO
R

RMU



KEVCY_SA/SB

CS
OE
MN
BS
IO
R

SECTOS NXB (2 versions)



KEVCY_AE

CS
OE
MN
BS
IO
R

AX1



KEVCD

CS
OE
MN
BS
IO
R

AIS - BU 3410, OEM (6 versions)



KEVCI/KEVCA

CS
OE
MN
BS
IO
R

GIS - ZX (2 versions)

KEVO



VS
OE
LN
TS
AO
GR
E

OVS/OVR - outdoor (2 versions)

KEVCS



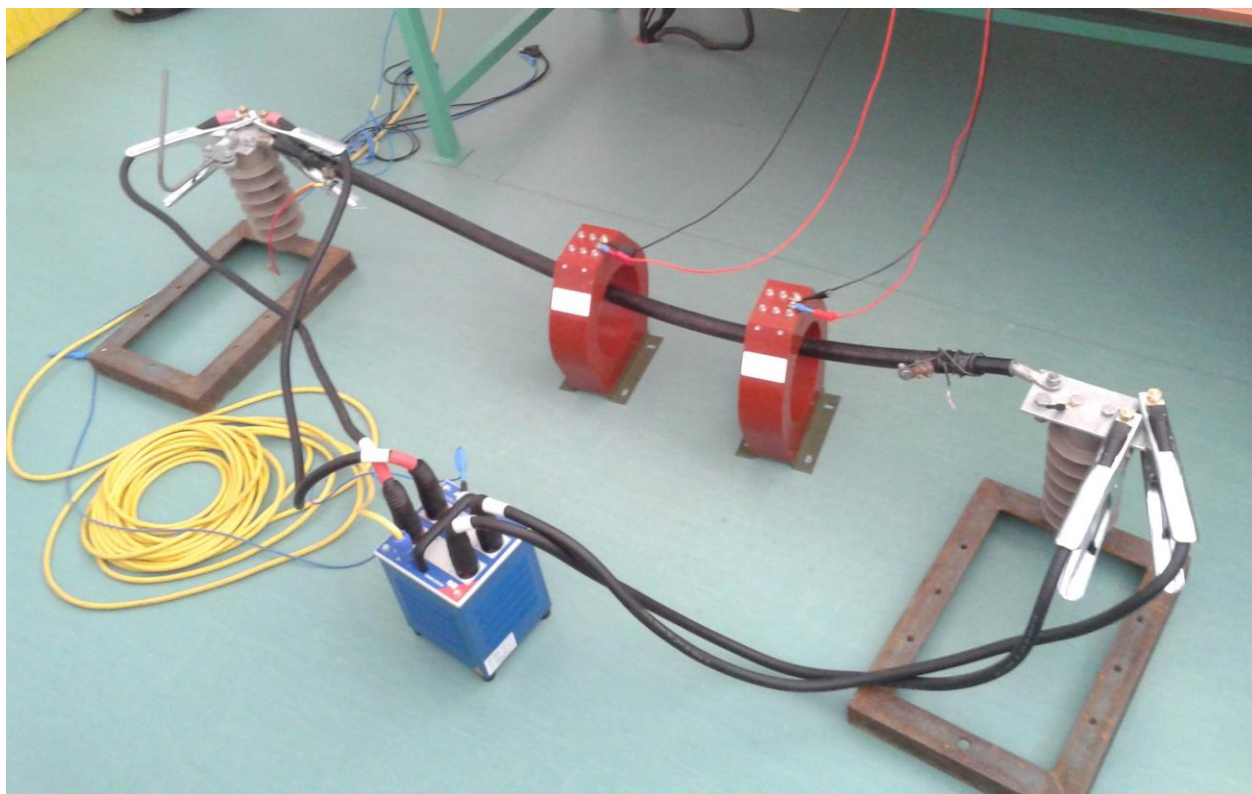
CS
OE
MN
BS
IO
R

AIS - AX1

ABB

ABB

PŘÍLOHA B



0,540VA 0,546VA				
A _{prim} (A)	I _{dif} (mA)	I _d (A)	i _b	i _d
1500	340,7	17,0	30	0,3407
1400	319,0	16,0	28	0,3190
1300	296,0	14,8	26	0,2960
1200	270,8	13,5	24	0,2708
1100	251,1	12,6	22	0,2511
1000	228,7	11,4	20	0,2287
900	206,0	10,3	18	0,2060
800	183,4	9,2	16	0,1834
700	160,9	8,0	14	0,1609
600	137,6	6,9	12	0,1376
550	126,0	6,3	11	0,1260
500	114,6	5,7	10	0,1146
450	103,5	5,2	9	0,1035
400	92,1	4,6	8	0,0921
350	76,9	3,8	7	0,0769
300	65,9	3,3	6	0,0659
250	54,7	2,7	5	0,0547
200	44,0	2,2	4	0,0440
150	32,8	1,6	3	0,0328
100	21,9	1,1	2	0,0219
50	10,6	0,5	1	0,0106
0,831VA 1,181VA				
A _{prim} (A)	I _{dif} (mA)	I _d (A)	i _b	i _d
1400	8610,0	430,5	28	8,6100
1376	8603,0	430,2	27,5	8,6030
1300	7513,0	375,7	26	7,5130
1200	5114,0	255,7	24	5,1140
1100	2465,0	123,3	22	2,4650
1000	685,0	34,3	20	0,6850
900	373,5	18,7	18	0,3735
800	321,2	16,1	16	0,3212
700	281,0	14,1	14	0,2810
600	242,4	12,1	12	0,2424
550	222,8	11,1	11	0,2228
500	203,4	10,2	10	0,2034
450	183,4	9,2	9	0,1834
400	163,4	8,2	8	0,1634
350	144,3	7,2	7	0,1443
300	123,6	6,2	6	0,1236
250	102,8	5,1	5	0,1028
200	82,0	4,1	4	0,0820
150	61,7	3,1	3	0,0617
100	41,6	2,1	2	0,0416
50	21,0	1,1	1	0,0210

0,828VA 0,658VA				
A _{prim} (A)	I _{dif} (mA)	I _d (A)	i _b	i _d
1400	850,0	42,5	28	0,8500
1387	825,0	41,3	27,74	0,8250
1300	780,0	39,0	26	0,7800
1200	713,0	35,7	24	0,7130
1100	649,0	32,5	22	0,6490
1000	591,0	29,6	20	0,5910
900	531,0	26,6	18	0,5310
800	471,0	23,6	16	0,4710
700	412,0	20,6	14	0,4120
600	352,7	17,6	12	0,3527
550	322,9	16,1	11	0,3229
500	293,4	14,7	10	0,2934
450	264,0	13,2	9	0,2640
400	234,8	11,7	8	0,2348
350	205,5	10,3	7	0,2055
300	176,3	8,8	6	0,1763
250	146,8	7,3	5	0,1468
200	117,6	5,9	4	0,1176
150	87,8	4,4	3	0,0878
100	58,0	2,9	2	0,0580
50	28,9	1,4	1	0,0289
RC1 RC2				
A _{prim} (A)	U _{dif} (mV)	I _d (A)	i _b	i _d
1500	5,5	2,9	30	0,0583
1400	4,7	2,5	28	0,0497
1300	4,8	2,6	26	0,0512
1200	5,4	2,9	24	0,0573
1100	5,3	2,8	22	0,0565
1000	5,0	2,7	20	0,0535
900	4,6	2,4	18	0,0485
800	3,7	2,0	16	0,0390
700	2,7	1,4	14	0,0285
600	1,8	1,0	12	0,0192
550	1,4	0,7	11	0,0149
500	1,2	0,6	10	0,0125
450	1,0	0,5	9	0,0109
400	1,0	0,5	8	0,0109
350	1,0	0,5	7	0,0110
300	1,1	0,6	6	0,0112
250	1,2	0,7	5	0,0130
200	1,2	0,6	4	0,0123
150	1,2	0,7	3	0,0132
100	1,5	0,8	2	0,0156
50	1,7	0,9	1	0,0183

PŘÍLOHA C

