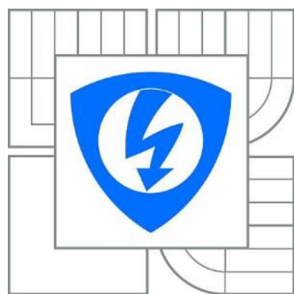




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

CHRÁNĚNÍ TRANSFORMÁTORU ROZDÍLOVOU OCHRANOU

DIFFERENTIAL PROTECTION FOR POWER TRANSFORMER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

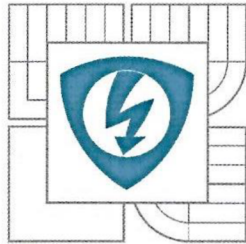
ZUZANA BUKVIŠOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JAROSLAVA ORSÁGOVÁ,
Ph.D.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Studentka: Zuzana Bukvišová
Ročník: 3

ID: 154685
Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Chránění transformátoru rozdílovou ochranou

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Digitální rozdílová ochrana transformátoru – princip činnosti, možnosti nastavení
2. Výpočet nastavení rozdílové ochrany pro zadaný typ transformátoru
3. Konfigurace a nastavení digitální ochrany a otestování její správné funkce

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 9.2.2015

Termín odevzdání: 28.5.2015

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

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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:

BUKVIŠOVÁ, Z. *Chránění transformátoru rozdílovou ochranou*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 66 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D..

Poděkování:

Ráda bych poděkovala vedoucí své bakalářské práce doc. Ing. Jaroslavě Orságové, Ph.D., za cenné rady a vstřícnost při zpracování této práce. Mé díky dále patří všem těm, kteří mi svojí ochotou při práci pomohli.

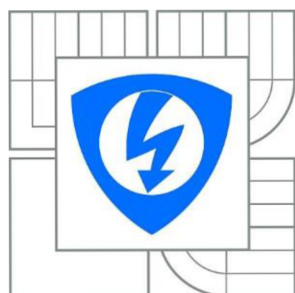
Prohlášení:

Jako autorka uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědoma 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



Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

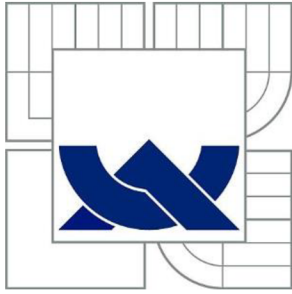
Bakalářská práce

Chránění transformátoru rozdílovou ochranou

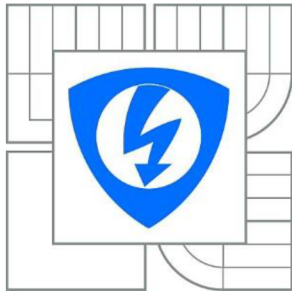
Zuzana Bukvišová

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

FEKT VUT v Brně, 2015



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



Faculty of Electrical Engineering and Communication

Department of Electrical Power Engineering

Bachelor's Thesis

Differential Protection for Power Transformer

Zuzana Bukvišová

Supervisor: doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.

FEKT VUT Brno, 2015

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá problematikou chránění výkonového transformátoru a podrobněji se zaměřuje na ochranu rozdílovou. Vysvětluje její princip a blíže seznamuje s nastavením vypínací charakteristiky, přičemž je uveden celý postup jejího výpočtu.

Na přístrojích SPAD 346 C a REF542plus, které lze využít pro rozdílové chránění, bylo provedeno měření vypínací charakteristiky a práce v závěru konfrontuje dosažené výsledky z měření na obou ochranách. Otestována byla funkce obou ochran pro případy, kdy se rozdílový proud vyskytuje ve všech fázích, popř. pouze v jedné, a porovnána byla i rychlost vybavení pro případy prudkého nárůstu proudu. Jako testovací zařízení byl použit přístroj OMICRON CMC 256 plus. Výsledky měření jsou zpracovány v tabulkách a grafech, které jsou součástí práce.

KLÍČOVÁ SLOVA: rozdílová ochrana, chránění transformátoru, přístrojový transformátor proudu, vypínací charakteristika

ABSTRACT

This thesis explores power transformer protection and focuses on differential protection. It attempts to explain its principles and operating characteristic settings.

The measurement was executed on devices SPAD 346 C and REF542plus, which can be used for differential protection. At the end, there is a comparison of results of operating characteristic measurement on both devices. Their function was tested at different cases, specifically when the differential current occurs in all phases or just one. The thesis includes a comparison of reaction times under fast increase of current. OMICRON CMC 256 plus was used as the test device. The data obtained by the measurement are processed in tables and charts.

KEY WORDS: differential protection, transformer protection, instrument current transformer, operating characteristic

OBSAH

Seznam obrázků.....	10
Seznam tabulek.....	12
Seznam symbolů a zkratek	13
1 Úvod	15
2 Ochrany obecně.....	16
2.1. Poruchové stavy	16
2.2. Rozdělení ochran	17
2.3. Požadavky na ochrany	18
3 Ochrany transformátorů.....	19
3.1. Poruchy transformátorů	19
3.2. Volba ochran podle jmenovitého výkonu transformátoru	19
3.2.1. Transformátory do výkonu 1 MVA	19
3.2.2. Transformátory od 1 MVA do 5 MVA	20
3.2.3. Transformátory nad 5 MVA.....	20
3.3. Plynové relé	20
3.4. Zemní nádobová ochrana.....	21
3.5. Rozdílová ochrana	21
3.5.1. Příčiny falešných rozdílových proudů	24
3.5.2. Blokování ochrany	24
3.5.3. Zemní ochrana.....	25
3.5.4. Historie rozdílových ochran na území Československa.....	26
3.6. Další ochrany transformátoru	29
3.6.1. Proudová zkratová ochrana	29
3.6.2. Distanční a směrová ochrana	29
3.6.3. Srovnávací ochrana	30
3.6.4. Ochrana proti přetížení.....	30
3.6.5. Ochrana před zvýšeným magnetickým tokem	30
4 Příkladové transformátory proudu	31
4.1. Zapojení PTP	31
4.2. Základní parametry PTP	32
4.3. Měření nulové složky proudu	33
4.4. Připojení ochran k PTP	34
5 Seznámení s přístroji	35
5.1. SPAD 346 C.....	35
5.2. REF542plus	36
5.3. OMICRON CMC 256plus.....	36

6 Základní srovnání nastavení rozdílové ochrany pro SPAD 346 C a RE542plus	37
6.1. Vypínací charakteristika	37
6.1.1. Parametrizace ochrany SPAD 346 C	38
6.1.2. Parametrizace ochrany REF542plus	40
6.2. Řešení hodinového úhlu.....	41
6.2.1. SPAD 346 C.....	41
6.2.2. REF542plus.....	42
7 Měření vypínací charakteristiky	43
7.1. Zapojení pracoviště.....	45
7.2. Nastavení přístroje SPAD 346 C	46
7.3. Nastavení přístroje REF542plus	47
7.4. Nastavení testovacího zařízení OMICRON CMC 256plus	50
8 Výsledky měření.....	54
8.1. Měření při rozdílných trendech zkoušky	54
8.2. Měření při změně proudu v jedné fázi	56
8.3. Porovnání rychlosti působení ochran.....	58
8.4. Celkové zhodnocení výsledků	60
9 Závěr	61
10 Reference	62
Příloha – měřené hodnoty	63

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 3.1: Princip plynového relé [2].....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 3.2: Zemní nádobová ochrana [2]</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 3.3: Charakteristika rozdílové ochrany [2]</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 3.4: Princip rozdílové ochrany [2]</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 3.5: Zapojení rozdílové ochrany při spojení vinutí transformátoru v hodinovém</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 3.6: Rozdílová zemní ochrana transformátoru při zapojení vinutí do hvězdy [3]</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 3.7: Zemní ochrana vinutí zapojených do trojúhelníka [3]</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 4.1: Zapojení PTP do obvodu objekt – ochrana [2]</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 4.2: Měření nulové složky pomocí Holmgreenovy metody [2]</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 4.3: Měření nulové složky proudu průvlekovým transformátorem [2]</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 6.1: Obecná vypínací charakteristika</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 6.2: Vypínací charakteristika ochrany SPAD 346 C [5]</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 6.3: Mezní vypínací charakteristiky ochrany SPAD 346 C</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 6.4: Vypínací charakteristika ochrany REF542plus</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 6.5: Mezní vypínací charakteristiky ochrany REF542plus</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 6.6: Typové zapojení proudových transformátorů – typ I [5]</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 6.7: Typové zapojení proudových transformátorů – typ II [5]</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 7.1: Propojení ochrany SPAD 346 C s testovacím zařízením</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 7.2: Propojení ochrany REF542plus s testovacím zařízením</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 7.3: Nastavení vypínací charakteristiky v ochraně SPAD 346 C</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 7.4: Nastavení přizpůsobení vektorové skupiny</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 7.5: Nastavení parametrů sériového portu</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 7.6: Parametry připojených modulů</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 7.7: Nastavení analogových vstupů</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 7.8: Funkční schéma pro testování rozdílové ochrany</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 7.9: Nastavení parametrů vypínací charakteristiky</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 7.10: Určení hodinového úhlu a uzemnění chráněného transformátoru</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 7.11: Úvodní okno testovacího modulu QuickCMC</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 7.12: Okno detailní konfigurace hardwaru</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 7.13: Okno přiřazení analogových výstupů</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 7.14: Přiřazení binárních a analogových vstupů</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 8.1: Vypínací charakteristika ochrany REF542plus pro trend 10 mA/ 0,5 s při změně proudu všech tří fází</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 8.2: Vypínací charakteristika ochrany REF542plus pro trend 10 mA/ 0,5 s při změně proudu jedné fáze</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 8.3: Měření rychlosti vypnutí</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 8.4: Průběh proudu zkoušky</i>	<i>60</i>
<i>Obr. A - 1: Vypínací charakteristika ochrany SPAD 346 C pro trend 10 mA/ 0,5 s při změně proudu všech tří fází</i>	<i>63</i>

<i>Obr. A - 2: Vypínací charakteristika ochrany SPAD 346 C pro trend 2 mA/ 0,5 s při změně proudu všech tří fází</i>	<i>64</i>
<i>Obr. A - 3: Vypínací charakteristika ochrany REF542plus pro trend 2 mA/ 0,5 s při změně proudu všech tří fází</i>	<i>65</i>
<i>Obr. A - 4: Vypínací charakteristika ochrany SPAD 346 C pro trend 10 mA/ 0,5 s při změně proudu jedné fáze</i>	<i>66</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 2.1: Přehled dělení ochran [2].....</i>	<i>17</i>
<i>Tabulka 3.1: Druhy ochran při dané poruše [1].....</i>	<i>19</i>
<i>Tabulka 7.1: Parametry transformátoru</i>	<i>43</i>
<i>Tabulka 7.2: Parametry PTP</i>	<i>43</i>
<i>Tabulka 7.3: Přehled nastavovaných hodnot vypínací charakteristiky.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabulka 8.1: Měřené hodnoty pro trend 10 mA/ 0,5 s a změnu všech tří fází primární strany pro ochranu REF542plus</i>	<i>55</i>
<i>Tabulka 8.2: Odchytky měřených hodnot od hodnot ležících na vypínací charakteristice .</i>	<i>56</i>
<i>Tabulka 8.3: Měřené hodnoty pro trend 10 mA/ 0,5 s a změnu jedné fáze primární strany pro ochranu REF542plus (proud dodáván do všech fází) – zapojení YNd1</i>	<i>57</i>
<i>Tabulka 8.4: Vliv hodinového úhlu na funkci ochrany.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabulka 8.5: Záznam časů vybavení ochran</i>	<i>59</i>
<i>Tabulka A - 1: Měřené hodnoty pro trend 10 mA/ 0,5 s a změnu všech tří fází primární strany pro ochranu SPAD 346 C</i>	<i>63</i>
<i>Tabulka A - 2: Měřené hodnoty pro trend 2 mA/ 0,5 s a změnu všech tří fází primární strany pro ochranu SPAD 346 C</i>	<i>64</i>
<i>Tabulka A - 3: Měřené hodnoty pro trend 2 mA/ 0,5 s a změnu všech tří fází primární strany pro ochranu REF542plus</i>	<i>65</i>
<i>Tabulka A - 4: Měřené hodnoty pro trend 10 mA/ 0,5 s a změnu jedné fáze primární strany pro ochranu SPAD 346 C (proud dodáván do všech fází) – zapojení YNd1.....</i>	<i>66</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Δi [A]	rozdíl proudů
ES	elektrizační soustava
i_{∞} [A]	trvale nastavený rozdíl
i_{θ} [A]	nulová složka proudu
I_l [A]	primární proud
$\frac{I_1}{I_n}$ [-]	transformační poměr na primární straně
I_{1om} [A]	proud primární strany nastavovaný na testovacím zařízení
I_{Ivyb} [A]	proud zaznamenaný testovacím zařízením při vybavení ochrany
I_2 [A]	sekundární proud
$\frac{I_2}{I_n}$ [-]	transformační poměr na sekundární straně
I_{2om} [A]	proud sekundární strany nastavovaný na testovacím zařízení
$\frac{I_{2tp}}{I_n}$ [-]	bod druhého zlomu charakteristiky u SPAD 346 C
I_a [A]	vstupní proud
I_b [A]	stabilizační proud
I_{b0} [-]	limitní úroveň nestabilizované oblasti u REF542plus
I_{b1} [-]	limitní úroveň mírně stabilizované oblasti u REF542 plus
$\frac{I_b}{I_n}$ [-]	bod prvního zlomu u SPAD 346 C
I_b [A] (kap. 4.1)	výstupní proud
I_d [A]	rozdílový proud
I_{d0} [-]	proudová popudová úroveň u REF542plus
I_{d1} [-]	proudová úroveň mírně stabilizované oblasti u REF542plus
I_{d_och} [A]	odpovídající rozdílový proud na křivce vypínací charakteristiky
$I_d >$ [-]	prahová hodnota diferenciálního proudu pro čtvrtou oblast u REF542plus
$\frac{I_d}{I_n} \gg$ [-]	mžikový proudový diferenciální stupeň u SPAD 346 C
$\frac{I_{d2f}}{I_{d1f}}$ [-]	poměr druhé a základní harmonické proudu u SAPD 346 C
$\frac{I_{d5f}}{I_{d1f}}$ [-]	poměr páté a základní harmonické proudu u SPAD 346 C
i_k [A]	koleno charakteristiky
I_n [A]	jmenovitý proud
i_U [A]	proud fází L1
i_V [A]	proud fází L2
i_W [A]	proud fází L3
JTP	jistící transformátor proudu
L1, L2, L3	fáze
MTP	měřicí transformátor proudu
nn	nízké napětí
p_l [-]	korekce transformačního poměru na primární straně

p_2 [-]	korekce transformačního poměru na sekundární straně
PI_n [-]	základní nastavení trvale dovoleného rozdílu u SPAD 346 C
PT	přístrojový transformátor
PTN	přístrojový transformátor napětí
PTP	přístrojový transformátor proudu
R	relé
R_a [Ω]	činný odpor obvodu chráněného objektu
S [-]	popudový směr u SPAD 346 C
T	transformátor
U_1 [V]	primární napětí
U_2 [V]	sekundární napětí
U_a [V]	napětí na straně chráněného objektu
U_b [V]	napětí na straně ochrany
vn	vysoké napětí
vvn	velmi vysoké napětí
X_a [Ω]	reaktance obvodu chráněného objektu
Z_b [Ω]	impedance zátěže na výstupu

1 ÚVOD

Správné fungování výkonových transformátorů je nejen otázkou technická, ale též ekonomická. Společnost je v dnešní době závislá na dodávce elektrické energie a její přerušení může mít dalekosáhlé následky. V elektrizační soustavě tvoří transformátory velice důležitý prvek, který je nutné efektivně chránit před poruchami, neboť jeho výměna je značně nákladná.

Ochrana je zařízení zajišťující provozní bezpečnost a spolehlivost dané části energetického systému. Ochrany musí být schopny spolehlivě rozpoznat poruchu a v co nejkratším možném čase příslušně zareagovat. Vhodným nastavením musí být zamezeno i nežádoucímu působení ochran, které by s sebou přineslo zbytečné materiální škody. V praxi často dochází ke kombinování jednotlivých typů ochran pro dosažení větší bezpečnosti provozu elektrizační soustavy.

Cílem této bakalářské práce je seznámení se s nejčastějšími ochranami transformátorů a jejich principem, podrobněji bude rozebrána ochrana rozdílová a kapitola bude věnována rovněž přístrojovým transformátorům, které hrají na poli chránění nemalou úlohu. Praktickou částí práce je srovnání funkce dvou přístrojů určených pro rozdílové chránění, jmenovitě se jedná o zařízení SPAD 346 C a REF542plus.

2 OCHRANY OBECNĚ

Různé typy transformátorů vyžadují různé druhy ochran. Volba ochran se odvíjí od mnoha faktorů, jako je důležitost daného stroje v rámci obvodu, způsob navinutí a uzemnění nebo požadavky na řízení.

2.1. Poruchové stavy

Provoz soustavy i jednotlivých prvků mohou ohrozit různé nebezpečné stavy. Dále uvedené patří mezi základní.

Zkrat může tepelně i mechanicky poškodit vodiče. Snížení činného zatížení způsobeného zkratem navíc může vést ke ztrátě stability synchronních generátorů, asynchronnímu chodu elektrizační soustavy nebo až k jejímu případnému rozpadu.

Přetížení ohrožuje izolaci, snižuje mechanickou pevnost vodičů a zvyšuje riziko vzniku zkratu. Poškození závisí na teplotě nebo časovém integrálu.

Nadpětí snižuje elektrickou pevnost izolačních materiálů a zvyšuje nebezpečí vzniku zkratu.

Podpětí může vést při konstantním výkonu zátěže k proudovému přetížení.

Nesouměrnost proudů a napětí je rizikem především pro točivé stroje, kdy zpětná složka může zapříčinit nadměrné přehřívání rotorů. Nesouměrnost snižuje kvalitu dodané energie.

Zemní spojení v izolovaných sítích, kdy uzel zdroje není uzemněn nebo je uzemněn přes impedanci, způsobuje zvýšení napětí v nepostížených fázích. To může vést až ke zkratu.

Zpětný tok výkonu je porucha, která je velice nebezpečná pro turbíny. Při jejím poškození a uzavření přívodu páry totiž může generátor pracovat jako synchronní motor a dále protáčet turbínu, čímž se její poškození ještě zvětšuje. Vzniká i při paralelním provozu sítí různých napětí, kdy např. část výkonu teče sítí 22 kV a je zpět vracena do sítě 110 kV, což může vést k přetížení vedení o nižší hladině napětí a nekontrolovaným tokům energie.

Kývání synchronních strojů se projevuje jako fiktivní zkrat. Tento zkrat se zdánlivě pohybuje po spojovacích vedeních mezi synchronními stroji. Ochrany by však neměly působit až do okamžiku, než dojde ke ztrátě stability.

Asynchronní chod nastává, pokud generátor vypadne ze synchronizmu. Způsobuje přetěžování spojovacích vedení a transformátorů a zvláště nebezpečný je pro synchronní stroje a turbíny.

Snížení kmitočtu bývá signálem pro nedostatek činného výkonu v elektrizační soustavě (ES) nebo pro nesprávně seřízenou regulaci otáček turbín. Pokud je příčinou nedostatek výkonu, řeší se tato situace snížením spotřeby. To se dnes již provádí v mnoha oblastech automaticky za využití hromadného dálkového ovládání, popřípadě použitím kmitočtových relé. Změna kmitočtu má nepříznivý vliv na provoz turbín i spotřebičů [1].

2.2. Rozdělení ochran

Zjednodušeně můžeme ochrany dělit podle typu chráněného objektu, podle druhu poruchy, podle konstrukce a podle doby působení. Podrobnější dělení zobrazuje *Tabulka 2.1.*

Tabulka 2.1: Přehled dělení ochran [2]

Podle typu chráněného objektu	Podle druhu poruchy	Podle konstrukce	Podle doby působení	Podle funkčního principu
Ochrany generátoru	Ochrany při zkratu	Ochrany číslicové	Ochrany mžikové	Ochrany proudové
Ochrany motoru	Ochrany při přetížení	Ochrany elektromechanické	Ochrany časově závislé	Ochrany napěťové
Ochrany transformátoru	Ochrany při zemním spojení	Ochrany tranzistorové	Ochrany časově nezávislé	Ochrany rozdílové
Ochrany přípojnic	Ochrany podpěťové			Ochrany distanční
Ochrany kabelu	Ochrany nadpěťové			Ochrany srovnávací
Ochrany vedení	Ochrany při nesouměrnosti			Ochrany wattové
Ochrany troleje	Ochrany podfrekvenční			Ochrany frekvenční
Ochrany vypínače	Ochrany nadfrekvenční			Ochrany jalové
Lokomotivní ochrany	Ochrany při zpětném toku výkonu			Ochrany při nesouměrnosti
	Ochrany při ztrátě buzení			

Ochrana mžiková má zapůsobit prakticky okamžitě po vzniku poruchy a její rychlost je omezena pouze dobou, za kterou dojde ke zpracování informací, *ochrana časově závislá* má dobu působení závislou na některé stavové veličině, zatímco doba působení *ochrany časově nezávislé* je konstantní.

Základními stavebními prvky *elektromechanických ochran* jsou klasická elektrická relé. Tento typ se používá již velice dlouho a je často označován za *klasické ochrany*.

Vnitřní obvody *tranzistorové ochran* sestávají z integrovaných obvodů, diod a tranzistorů, přičemž jednotlivé tranzistorové obvody nahrazují klasická relé. Doporučuje se řešit tento typ ochran jako souborné skříně celého objektu. *Číslicové ochrany* mají uvnitř

sebe zabudovány číslicové (digitální) obvody. Tento typ dokáže zpracovat široké spektrum informací o celém objektu [2].

2.3. Požadavky na ochrany

Mezi základní požadavky, které jsou na ochrany kladeny, podle [2] řadíme:

- *Spolehlivost*, která znamená, že ochrana nepůsobí jindy než při poruše. S ní souvisí odolnost při rušení (např. při práci v prašném prostředí nebo v blízkosti rušivých elektrických a magnetických polí), selektivita (schopnost rozlišit poruchy a stavy, na které zareagovat má a na které ne), snadná údržba a dostatečná životnost;
- *Rychlost*, která je určena dobou působení. Rychlé vypnutí omezuje silové a tepelné účinky poruchových proudů a zvyšuje stabilitu soustavy;
- *Citlivost*, jíž je velikost stavové veličiny, na kterou je ochrana nastavena a podle které identifikuje poruchu;
- *Přesnost*, poměrná chyba citlivosti v jednotkách procent;
- *Úspora prostoru*, za jejímž účelem se používají polovodičové součástky s číslicovou technikou;
- *Kompatibilita ochran* s ostatní řídicí technikou, která má za úkol zjednodušit přenos signálů, projektování i provoz zařízení a jeho údržbu.

3 OCHRANY TRANSFORMÁTORŮ

Ochrany se obecně projektují tak, aby spolehlivě stanovily poruchu nebo překročení meze normálního provozu a dokázaly vypnout v takovém čase, aby nedošlo k poškození zařízení. Při projektování se vychází z normy ČSN 33 3051, která přesně určuje typy ochran, kterými musí být zařízení vybaveno, a rovněž stanovuje pravidla zálohování ochran a selektivity.

Norma ČSN 33 3051 se dělí na ochrany alternátorů, transformátorů, elektromotorů, přípojníc a vedení. Tyto chráněné objekty se pak dále člení podle velikosti jmenovitého výkonu a příslušný rozsah výkonů pak určuje, jakými ochranami musí dané zařízení disponovat [2].

3.1. Poruchy transformátorů

Poruchy transformátorů rozeznáváme průchozí a vnitřní.

Vnitřní poruchy se dělí na dvě skupiny. První skupinou jsou poruchy s možnou okamžitou detekcí, druhou pak poruchy, které se projevují pozvolna. Do první skupiny patří například zkraty na svorkách a na vinutí nebo zemní poruchy. Zástupci druhé skupiny jsou poruchy způsobené špatnými galvanickými styky, špatnou izolací plechů, poruchami chlazení či nesprávnou regulací napětí. Tyto poruchy vznikají postupně [2].

Tabulka 3.1 uvádí druhy ochran aplikované při různých poruchách.

Tabulka 3.1: Druhy ochran při dané poruše [1]

Druh poruchy		Druh ochrany	
Vnější poruchy	Přetížení	Proudová na přetížení (termokopie)	
	Vnější zkrat	Nezávislá nadproudová nebo distanční	
Vnitřní poruchy	Objevující se náhle	Zkraty ve vinutí	Rozdílová ochrana a plynové relé
		Zkraty vinutí na nádobu	Nádobová (kostrová) ochrana
	Objevující se pozvolna		Plynové relé

3.2. Volba ochran podle jmenovitého výkonu transformátoru

Jmenovitý výkon je jedním z parametrů, na jehož základě volíme jednotlivé typy ochran. Základní dělení je následující.

3.2.1. Transformátory do výkonu 1 MVA

Tyto transformátory se proti zkratům jistí výkonovými pojistkami pro vysoké napětí. Zároveň je doporučeno použít pojistky s indikací působení. Pokud je transformátor jištěný pojistkami, výbava plynovým relé slouží pro signalizaci. Je-li transformátor opatřen na primární straně vypínačem, využívá se pro jeho chránění nadproudová ochrana a plynové

relé se zapojením na vypínač. Transformátory vn/nn jsou na straně nízkého napětí jištěny proti přetížení jističi s tepelnými a zkratovými články.

3.2.2. Transformátory od 1 MVA do 5 MVA

Transformátory o výkonech v rozmezí 1 až 5 MVA se nejčastěji jistí plynovým relé, nadproudovou ochranou proti přetížení se signalizací přetížení, proti zkratům pak ochranou nadproudovou a ve zvláštních případech pak i ochranou rozdílovou.

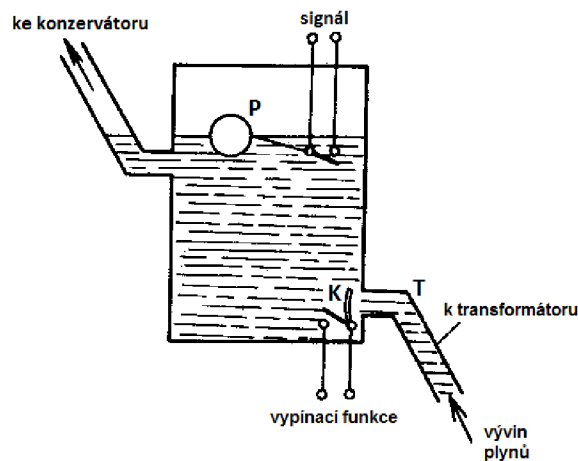
3.2.3. Transformátory nad 5 MVA

Jako ochrana pro transformátory o jmenovitém výkonu nad 5 MVA je stejně jako v předchozím případě plynové relé. Při výkonech nad 63 MVA používá rozdílová ochrana. Pro menší výkony ji však můžeme použít, chceme-li např. docílit rychlého vypnutí, aby se předešlo ohrožení spojovacího vedení mezi transformátorem a rozvodnou. Transformátory vvn/vvn bývají vybaveny zemní nádobovou ochranou.

Dalšími možnostmi ochrany jsou termokopie a nadproudová časově nezávislá ochrana. Na straně nižšího napětí (většinou 110 kV) u transformátorů vvn/vvn je doporučeno použití ochrany distanční působící v obou směrech, která je do přípojnic bez rychlého stupně. Pokud jsou zdroje na obou stranách, používá se distanční ochrana na primáru i na sekundáru [1].

3.3. Plynové relé

Plynové relé se používá pro ochranu transformátorů s olejovým chlazením. Lze se setkat i s jeho druhým názvem, Buchholzovo relé. Vkládá se do potrubí mezi víko transformátoru a konzervátor. Jeho princip je zobrazen na *Obr. 3.1*. V normálním provozu je relé naplněno olejem. Vnitřní porucha transformátoru, která vyvolá rozklad a destilaci transformátorového oleje vlivem tepla oblouku nebo ohřátého vodiče, vede k náhlému vzniku plynů, které způsobí zrychlení proudění oleje v trubici T. Klapka K reaguje na rychlý vznik plynů a proudění oleje směrem ke konzervátoru při vnitřních zkratech, což vede k propojení vypínacího obvodu. Plovák P indikuje nebezpečné snížení hladiny oleje a slouží k signalizaci, že došlo k pomalému vývinu plynů. [1, 2].



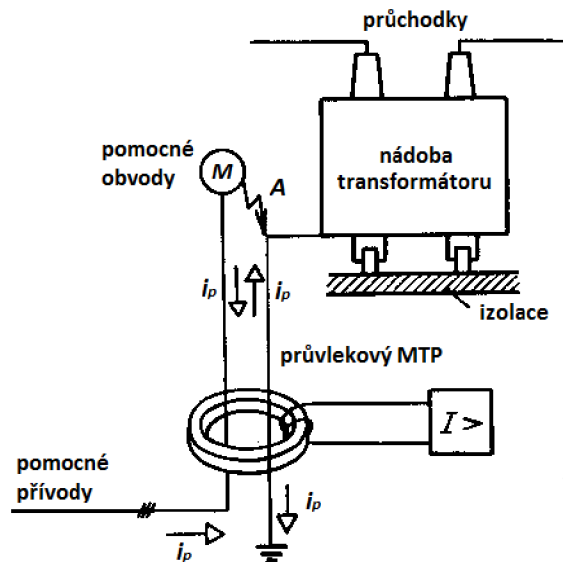
Obr. 3.1: Princip plynového relé [2]

3.4. Zemní nádobová ochrana

Zemní nádobová ochrana se též nazývá zemní kostrová. Jedná se o zvláštní druh ochrany. Své využití nachází u sítí s účinně uzemněným nulovým bodem transformátoru.

Princip je znázorněn na *Obr. 3.2*. Ochrana působí, pokud dojde k přeskoku na průchodkách nebo jinému zkratu, při kterém zemní proud prochází kostrou transformátoru. Aby ochrana nepůsobila chybně na zkraty v pomocných obvodech (ventilátory, osvětlení, dálková regulace přepínání odboček), musí být přívody k těmto zařízením protaženy průvlekovým transformátorem proudu. Ochrana je pak selektivní, neboť se zkratový proud pomocných obvodů vzájemně odečítá. To je patrné i z *Obr. 3.2* (zkrat v bodě A a proud i_p).

Při použití této ochrany musí být kolejnice pod transformátorem, potrubím apod. izolovány proti zemi. Většinou k tomu stačí odpor betonového základu, ovšem podmínkou je, aby kolejnice nebyly vodivě spojeny s armaturou základu [1, 2, 3].



Obr. 3.2: Zemní nádobová ochrana [2]

3.5. Rozdílová ochrana

Rozdílová, neboli diferenciální ochrana transformátorů má na rozdíl od ostatních rozdílových ochranných možností tři vývodů u strojů se třemi vinutími proti dvěma u generátoru, dále možnost připojení k objektu, který má vstupní a výstupní strany nestejně spojené (např. Yd), a blokování při zapínacím nárazu transformátoru [2].

Proudové rozdílové ochrany se jako ochrany transformátorů používají už začátku minulého století. Jejich princip je jednoduchý. Kdyby v transformátoru nevznikla porucha, vstupní i výstupní proud se sobě rovnají. V případě jednofázového transformátoru se dvěma vinutími se porovnávají proudy na obou stranách transformátoru odděleně. U trojfázových transformátorů se dvěma vinutími by však tento způsob vyžadoval použití

šesti relé a dvanácti proudových transformátorů a ani tak nebudou všechny poruchy zjištěny, a proto se rozdílové ochrany různě modifikují [3].

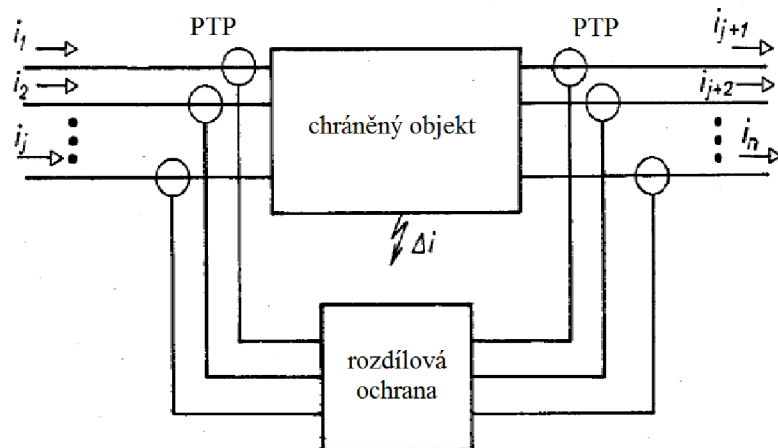
Princip ochrany znázorňuje *Obr. 3.3*. Při normálním provozu platí rovnice 3.1

$$\Delta i = \left| \sum_{j=1}^n \mathbf{i}_j \right| = 0 \text{ (A; A)}. \quad (3.1)$$

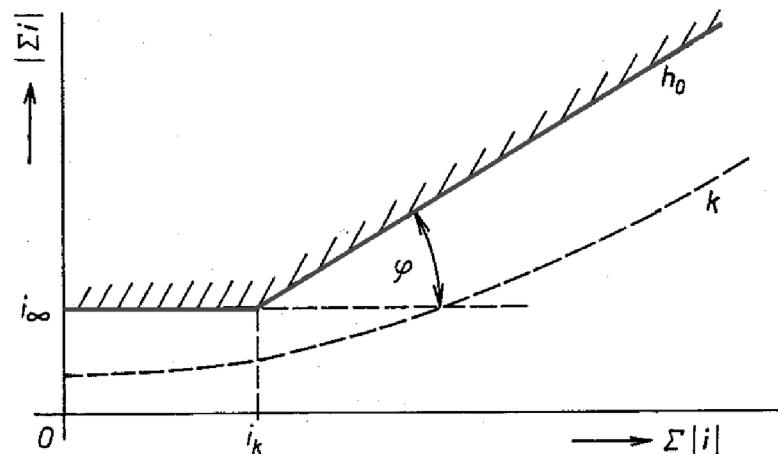
Při závadě dojde k porušení rovnováhy a platí rovnice 3.2

$$\Delta i = \left| \sum_{j=1}^n \mathbf{i}_j \right| > 0 \text{ (A; A)}. \quad (3.2)$$

Na *Obr. 3.4* je charakteristika rozdílové ochrany. Ochrana působí, pokud se rozdílový proud Δi zvětší nad hodnotu nastavení ochrany i_∞ (trvale dovolený rozdíl). Velké průchozí proudy, které by způsobil např. zkrat mimo chráněný objekt, však tento rozdílový proud vlivem nepřesností přístrojových transformátorů zvětšují, což by mohlo vést k chybnému působení ochrany. Křivka k zobrazuje závislost chyby Δi na $\sum i$. Z tohoto důvodu ochrana zmenšuje citlivost Δi v závislosti na průchozím proudy kolena charakteristiky i_k úměrně k velikosti průchozího proudu $\sum_{j=1}^n |\mathbf{i}_j|$ [2].



Obr. 3.4: Princip rozdílové ochrany [2]



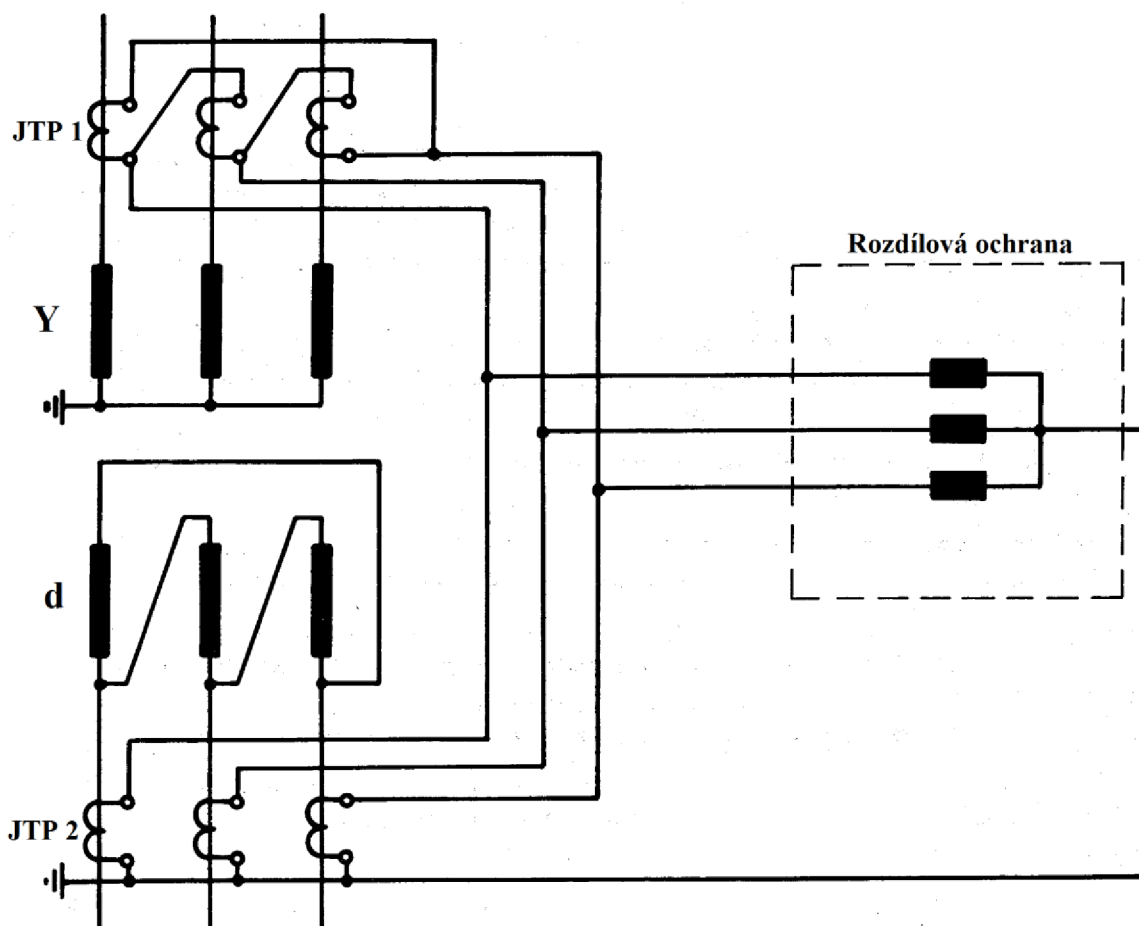
Obr. 3.3: Charakteristika rozdílové ochrany [2]

Jistící transformátory proudu, na něž je ochrana zapojena, nemívají dokonale sladěné převody. To může být příčinou chybného působení ochrany při normálním provozu nebo při vnějších zkratech. Správně provedenou kompenzací a seřazením citlivosti rozdílového měřícího členu se těmto problémům může předejít.

Kromě sladění jistících transformátorů proudu je nutné provádět i vyrovnání fázového natočení proudů v případě, že jsou vinutí silového transformátoru spojena v různém úhlu. Na *Obr. 3.5* je příklad vyrovnání fázového natočení pro zapojení transformátoru Yd .

Rozdílný hodinový úhel spojení lze řešit tak, že skupina jistících transformátorů na primární straně transformátoru bude zapojena ve stejném hodinovém úhlu jako sekundární vinutí transformátoru a naopak. Spojení sekundárního vinutí transformátorů proudu tedy bude zrcadlovým obrazem ke spojení vinutí chráněného transformátoru [1].

V současnosti již umí digitální ochrany tento problém řešit přímo vhodným nastavením převodu.



Obr. 3.5: Zapojení rozdílové ochrany při spojení vinutí transformátoru v hodinovém úhlu Yd [1]

Aby byla zajištěna bezproblémová funkce každé diferenciální ochrany, je nutné věnovat zvýšenou pozornost dimenzováním měničů. Rozlišujeme dva základní principy.

Princip stabilizované proudové diferenciální ochrany je nejpoužívanější. Využívá se ve všech známých mikroprocesorových diferenciálních ochranách a využit byl už v ochranách R30 a RAX1.

Princip vysokoimpedanční diferenciální ochrany se používá především jako zemní diferenciální ochrana. Pro svoji činnost vyžaduje na obou stranách totožné měniče s definovaným napětím kolena i magnetizačním proudem [4].

3.5.1. Příčiny falešných rozdílových proudů

Během provozu transformátoru mohou vznikat i jevy, které nejsou poruchami, na něž má ochrana reagovat, a přitom způsobí zvýšené rozdílové proudy. Vhodnými opatřeními je nutné tyto děje spolehlivě rozpoznat a zabránit tak chybnému působení ochran.

3.5.1.1. Zapínací náraz

Při zapnutí transformátoru se na vstupu objeví velký zapínací proud, který může dosahovat čtyř- až osminásobku jmenovité hodnoty proudu transformátoru a může klesat ke své ustálené hodnotě i několik vteřin. Takový přechodný jev se objevuje také při napájení transformátoru z obou stran.

Protože by diferenciální ochrana vyhodnotila takový stav jako poruchu a okamžitě by zapůsobila, je nutné tento zapínací ráz nějak odlišit od vnitřní poruchy a zablokovat diferenciální funkci. Není příliš vhodné aplikovat řešení, kdy se ochrana při zapínání jednoduše zablokuje a uvolní se, teprve až zapínací ráz odezní, neboť je třeba počítat i se situací, kdy se transformátor zapíná do poruchy.

Pro zapínací náraz je typické, že obsahuje velký podíl 2. harmonické. Toho lze využít pro blokádu při zapnutí. Obsah 2. harmonické se v každé fázi liší a souvisí s tím, v jakém okamžiku dochází k připojení proudu. Tato složka však může vzniknout i při zkratu uvnitř transformátoru a v takovém případě je blokáda ochrany nežádoucí. Tomu umí předcházet samostatné algoritmy vyhodnocující u diferenciálního proudu tvar a rychlost změny [4].

3.5.1.2. Přesycení transformátoru proudem

Při některých vnitřních nebo vnějších poruchách, při kterých protékají velké proudy, existuje velká pravděpodobnost saturace proudových transformátorů. Následkem přesycení obsahují proudy v sekundárním vinutí PTP značné množství harmonických, zejména pak třetí harmonické. I malá chyba amplitudy střídavého proudu způsobená přesycením už však zavíná chybu funkce ochrany [3].

3.5.2. Blokování ochrany

Rozdílový proud je při vnitřních poruchách téměř sinusový, zatímco v nárazovém proudu nebo při přebuzení obsahuje vysoké množství harmonických. Rozdílový proud je proto filtrován prostřednictvím naladěných filtrů a výstup z těchto filtrů se používá na omezení ochrany.

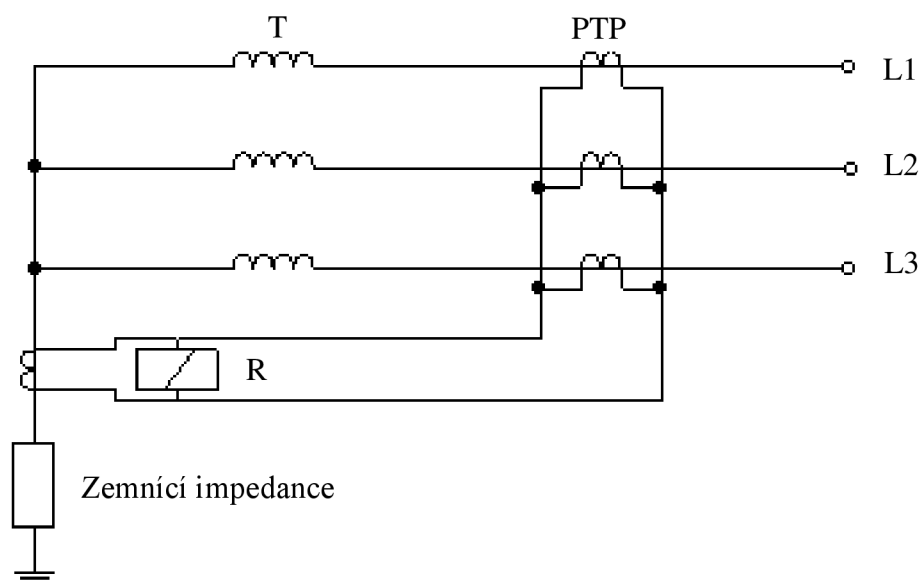
Harmonická omezovací funkce, využívající pro blokování všechny harmonické, si s sebou nese riziko, že při vnitřních poruchách dojde k saturaci proudových transformátorů. Ty pak v proudu produkují převládající třetí harmonickou. Tato složka má dostatečnou velikost na to, aby během vnitřních poruch blokovala ochranu, což by mohlo působit havárie transformátoru. Z toho důvodu se obvykle pro omezování používá druhá a pátá harmonická. Takto je rozdílová ochrana během nárazu blokována druhou harmonickou a během přebuzení pátou harmonickou, ale třetí harmonickou, která je produkována v průběhu vnitřních poruch saturovanými proudovými transformátory, blokována není [3].

Blokování rozdílové ochrany při zapínacím rázu lze provést i časovým zpožděním působení. To je voleno podle časové konstanty tlumení rázového magnetizačního proudu. Časové zpoždění ovšem není žádoucí z důvodu požadavku na co nejrychlejší působení ochrany. U moderních ochran se proto používá právě blokování s využitím filtrů [1].

3.5.3. Zemní ochrana

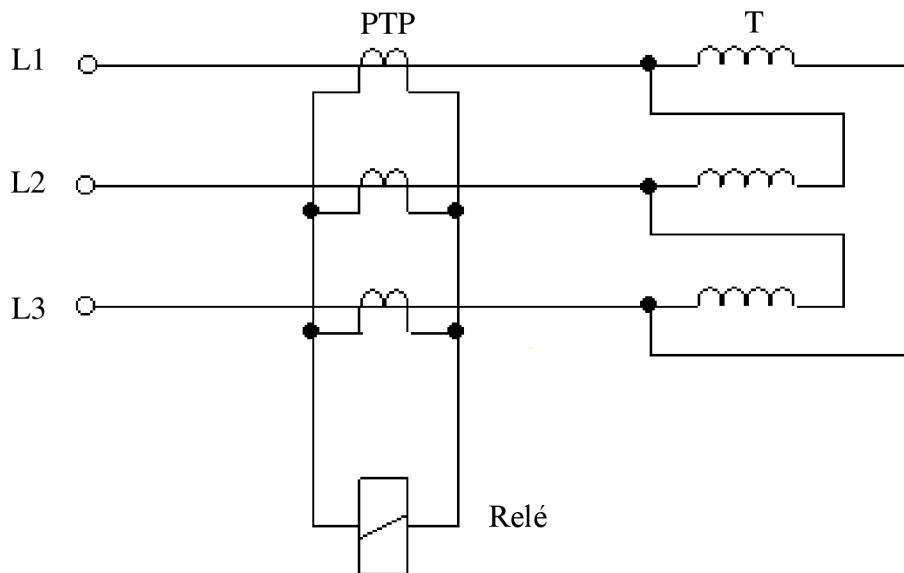
Velikost úseku vinutí, které v případě zemních poruch chráníme rozdílovou ochranou, závisí na metodě uzemnění. Pokud je vinutí uzemněno přes uzemňovací impedanci, tečou při zemním spojení na části vinutí v blízkosti uzemněného konce natolik malé rozdílové proudy, že nestačí na zapůsobení ochrany.

V takovém případě se proto používá zemní ochrana. Tento způsob ochrany se také řadí do skupiny proudových rozdílových ochran. V zapojení do hvězdy je využito čtyř transformátorů proudu se stejným převodem a relé, jak je zobrazeno na *Obr. 3.6*. Jeden z proudových transformátorů je zapojený v uzemněném uzlu a ostatní ve fázových vinutích. Pokud na chráněném vinutí porucha není, popřípadě se vyskytuje porucha mezifázová, která neobsahuje zem, je rozdílový proud zemní ochrany roven nule. Při vzniku zemního spojení se rovnováha naruší a přes relé teče proud, který je úměrný poruchovému proudu [3].



Obr. 3.6: Rozdílová zemní ochrana transformátoru při zapojení vinutí do hvězdy [3]

Zemní spojení ohrožuje i transformátory zapojené do trojúhelníka, které jsou připojeny na síť s uzemněnými transformátory, popřípadě uzemněným nulovým bodem. Takové poruchy by měla rozeznat proudová rozdílová ochrana. Často se ovšem používá oddělená zemní ochrana (viz Obr. 3.7), kdy se použijí pouze tři proudové transformátory, jejichž primární vinutí je zapojeno v přívodních vodičích vinutí transformátoru, a relé s vysokou impedancí, nebo s procentuálním omezením s nastavením nejvýše 20 % hodnoty jmenovitého proudu [3].



Obr. 3.7: Zemní ochrana vinutí zapojených do trojúhelníka [3]

3.5.4. Historie rozdílových ochran na území Československa

Principem rozdílových ochran je, že porovnávají proudy před a za chráněným zařízením. Nejdůležitější rozdíl mezi diferenciální ochranou točivých strojů a transformátorů spočívá v tom, že za normálního stavu bez poruchy teče u točivých strojů oběma měřicími skupinami přístrojových transformátorů proudu stejný proud, zatímco u transformátorů toto neplatí.

V bezporuchovém stavu jsou u točivých strojů oba proudy v rovnováze a přes relé neprotéká žádný proud. Vznikne-li uvnitř chráněné oblasti porucha, rovnováha proudů se poruší a přes relé v můstku protéká rozdílový proud. Pro první rozdílové ochrany se používalo indukční relé s otočným kotoučem, kde s rostoucím proudem klesala doba vypnutí. Jako rozdílová ochrana může být použito i klasické proudové relé.

U rozdílové ochrany transformátorů proudy protékající skupinou proudových transformátorů stejné nejsou a mají i jiné převody. Na rozdíl od diferenciální ochrany točivých strojů je třeba počítat s dalšími problémy.

Za měřicí skupinou PTP musí být na obou stranách stejný, a to nejen co se velikosti týče, ale rovněž i fáze musí být stejné. Problém, který nastává při zapojení vinutí transformátoru v různém hodinovém úhlu, se v minulosti řešil pomocí vyrovnávacích transformátorů, tzv. meziměničů.

Chybnému působení ochrany při průchozím zkratu by měly mít měřicí transformátory na obou stranách chráněného transformátoru co nejpodobnější charakteristiku. Tento problém se musel řešit vhodným výběrem PTP, aby se docílilo co nejmenšího vyrovnávacího proudu. Další možností bylo znečitlivění rozdílového relé.

Problémy spojené s magnetizačním nárazem se dříve řešily zpožděním vypínání diferenciální ochrany o 0,3 až 0,5 s, neboli do doby, do které by měl zapínací náraz klesnout na zhruba 20 % jmenovité hodnoty proudu transformátoru.

Největším problémem býval vyrovnávací proud během průchozích zkratů. Navržena byla taková konstrukce, kdy měla ochrana začít působit, teprve až vyrovnávací proudy dospějí k určitému procentu celkového proudu, který protéká měřicími transformátory. Když bylo toto procento převýšeno, bylo jasné, že se jedná o proud poruchový. V roce 1917 byla patentována takzvaná procentní ochrana, která na tomto principu pracovala. Relé sestávalo ze dvou vinutí. Pracovním vypínacím vinutím procházel rozdílový proud a kompenzačním vinutím protékal normální provozní proud.

V českých zemích byla před druhou světovou válkou a krátce po ní používána rozdílová relé od firmy Křížík RJJ a rozdílová relé CA od firmy Westinghouse. Po válce se u nás rozdílová relé CA začala vyrábět pod ČKD a rozdílová relé RJJ vyráběl národní podnik Křížík. Obě tato relé byla jednofázová a procentní na indukčním principu.

Národní podnik Křížík podnikl další krok ve vývoji rozdílových ochrany vývojem ochrany RJJ3. Jednalo se o trojfázové diferenciální procentní relé s popudovými a kompenzačními články. Toto relé odstartovalo éru elektromagnetických rozdílových ochrany. Působilo okamžitě a bez časového zpoždění a z toho důvodu se doplňovalo časovým relé.

Dalším počinem podniku Křížík byla kolem roku 1949 stabilizovaná ochrana s nadproudovým členem pod označením AR3T. Sloužila na ochranu dvouvinutových transformátorů a točivých strojů (motorů a generátorů). Přidáním pomocné skříně R3T bylo však možné chránit i třívínutové transformátory. Ochrana disponovala třemi diferenciálními články, označenými D_x , D_y a D_z , a třemi články nadproudovými s označením A_x , A_y a A_z . Fixní zpoždění rozdílové ochrany řešilo problém se zapínacím magnetizačním rázem. Toto zpoždění bylo nastavitelné od 0,4 do 0,6 s.

Roku 1950 byla tato ochrana přejmenována na rozdílovou ochranu PTP, která byla určena pro ochranu dvouvinutových transformátorů a točivých strojů s označením PTP-H. Pro chránění třívínutových transformátorů bylo zapotřebí přídavné skříně PTP-P. Tato ochrana byla moderní, nicméně její nevýhoda spočívala ve zpoždění rozdílové ochrany souvisejícím se zapínacím rázem o 0,5 s. Mezi další nevýhody se pak dále řadila její hmotnost a rozměry, neboť ochrana měla litinovou skřín s celkovou váhou 32 kg. S tímto typem ochrany se lze ještě v dnešní době setkat, a sice v rozvodnách z padesátých let.

Vylepšenou verzí ochrany PTP, která na trh přišla roku 1956, byla rozdílová ochrana R20. Vylepšení spočívalo v přidání blokovacího relé „B“, které mělo za úkol blokovat vypínání ochrany při zapínacím rázu. Toto relé bylo ovládáno laděnými pérovými kontakty, jež se při zapínacím rázu rozkmitaly a sepnuly blokovací relé „B“. Díky tomuto provedení již nebylo zapotřebí rozdílovou ochranu zpožďovat. Působení ochrany při

vnitřních poruchách se dostalo na 0,08 až 0,1 s. I tuto ochranu je možné na mnohých místech nalézt ještě dnes. Dala se použít pro třívinuťové transformátory za pomoci přídavné skříň PTP-P. Její hmotnost dosahovala jako u předešlého typu 32 kg.

Rok 1961 s sebou přinesl ochranu s novou konstrukcí s názvem R21T. Na rozdíl od předchozích typů využívala princip tzv. sčítacích transformátorů, ale k jejímu provozu byly opět zapotřebí meziměničů. Ochrana měla zabudována dvě deprézská relé. Citlivost u relé D1 byla seřiditelná v rozsahu 30 až 100 % jmenovité hodnoty proudu a k jeho vypnutí došlo zhruba v čase 80 ms. Frekvenční relé naladěná na 25 Hz a realizována za pomoci mechanických laděných kontaktů pak blokovala relé D1, aby nedocházelo k chybnému působení při zapínacím rázu. Relé D2 s citlivostí 60 až 200 % jmenovité hodnoty proudu se nastavovalo nad oblast zapínacích proudů. Relé vypínalo v čase 40 ms a nebylo blokováno. Celkově lze tvrdit, že se jednalo o diferenciální ochranu se dvěma stupni. Pro poruchy s menším proudem se využíval pomalejší stupeň, rychlejší stupeň náležel poruchám s proudy vyššími. Pro třívinuťové transformátory bylo potřeba dodat pomocnou skříň R21P.

Mezi ochranou R21T a ostatními typy byl jeden obrovský rozdíl. Tato ochrana byla pouze rozdílová a bylo tedy nutné ji doplnit o další ochrany (nadproudovou a zkratovou). Ochrana však byla velice spolehlivá, rychlá a mezi nesporné výhody se řadily i její rozměry a hmotnost pouhých 8 kg.

Stejného roku na trh dorazila i ochrana R21G, která byla určena pro chránění synchronních strojů. Využívala jednoho deprézského relé D seřiditelného od 20 do 100 % jmenovité hodnoty proudu a jeho doba působení dosahovala hodnoty 40 ms. Pro chránění blokového třívinuťového transformátoru spolu s generátorem se přidávala pomocná skříň R21P.

Z důvodů inovace se u této ochrany vyměnila skříň a použil se jiný typ relé. Ochrana pak byla přejmenována na R21T-M a pomocná skříň určená pro třívinuťový transformátor na R22P. Rozdílová ochrana R21G byla roku 1969 inovována tím způsobem, že se změnilo zapojení uzlu vnitřních proudových transformátorů na jinou svorku a její název se změnil na R21G-M.

Při výrobě výkonových transformátorů se stále více používaly orientované transformátorové plechy, u nichž magnetizační proud rychle roste. Tento proud se vyznačuje vysokým podílem třetí harmonické a výskytem páté a vyšší harmonické. Tento proud prochází transformátorem pouze z napájení strany, a tudíž může být ochranou vyhodnocen jako vnitřní porucha. Využívání orientovaných plechů tedy mělo za následek zvětšení zapínacího rázu a s tím spojená chybná vypínání transformátoru.

Rok 1969 přinesl proslulou rozdílovou ochranu R30, která se od předchozích typů lišila zejména v konstrukci filtru na vyšší harmonické. Blokování při zapínacím rázu zajišťovala druhá harmonická, třetí harmonická, přestože se vyskytuje v oblouku, blokována nebyla, zato byla blokována pátá harmonická a dále všechny vyšší. Ochrana měla přijatelné rozměry a byla i konstrukčně jednoduchá. Její váha byla 8 kg. Jedno deprézské relé vyhodnocovalo poruchové stavy a doba zapůsobení ochrany byla menší než 50 ms. Její konstrukce navíc umožnila její použití bez meziměničů. Vyžadováno však bylo

použití samostatných měřicích transformátorů pro rozdílovou ochranu a dalších měřicích transformátorů pro zbývající ochrany. To byly také hlavní důvody k návratu k meziměničům, se kterými původní návrh nepočítal. Přestože existovalo riziko nesprávného působení ochrany při průchozích zkratech, vespělá konstrukce této ochrany se s těmito problémy vyrovnala a jedná se tak o nejlepší ochranu vyrobenou v ZPA Trutnov.

Ochrana RAX1 byla tranzistorová rozdílová ochrana s nadproudovou ochranou uvedená na trh v roce 1978. Na jedny měřicí transformátory byly připojeny obě ochrany, které na sobě byly co do výstupů i vstupů nezávislé. Ochrana působila do doby menší než 55 ms, avšak nesetkala se s pozitivním ohlasem. Reputaci této ochrany nesvědčil jak fakt, že následovala za výjimečnou ochranou R30, tak její váha 21 kg a složité nastavování. Největším problémem však byly bezesporu neustálé změny parametrů ochrany zaviněné součástkami.

Vývoj a výroba ochran v ZPA Trutnov tímto skončily a výroba ochran R30 a RAX1 dále pokračovala pod firmou Dohnálek [4].

3.6. Další ochrany transformátoru

Plynové relé, nádobová ochrana a rozdílová ochrana patří mezi ochrany základní, neboť se vyznačují rychlým působením při vnitřních poruchách. Vnější zkraty mimo transformátor musí vypínat jim příslušná ochrana, avšak při jejím selhání může dojít k přílišnému přetížení transformátoru průchozím proudem. Z toho důvodu se základní ochrany doplňují o ochranu záložní, která působí se zpožděním nutným pro dodržení selektivního vypínání [1].

3.6.1. Proudová zkratová ochrana

Lze užít trojfázovou nadproudovou ochranu. Zvýšení její citlivosti docílíme podpětovým blokováním. Koordinaci s ostatními ochranami poskytuje časový článek. Tento typ ochran může působit v rychlém stupni při blízkých zkratech, kdy je napětí zkratové smyčky nízké. Při vzdálených zkratech, a tedy při vyšších napětích, je ochrana blokována. Používá se jako záloha pro rozdílovou ochranu [2, 3].

3.6.2. Distanční a směrová ochrana

Distanční ochranu používáme, požadujeme-li ještě větší selektivitu, než nám poskytne ochrana proudová zkratová. Obvykle pomocí ní chráníme transformátory velkých výkonů vvn/vvn.

Distanční a směrová ochrana se využívá při chránění transformátorů v mřížových sítích, kdy se využívá jejich směrového působení. Zkrat v mřížové síti může být napájen ze sítě vn i nn. Proto se k jističi na straně nn instaluje distanční ochrana se směrovým působením. Na straně vn má chráněný transformátor pojistky [2].

3.6.3. Srovnávací ochrana

Používá se spíše zřídka, avšak je vhodná jako společná ochrana transformátoru a vedení. Požadavkem na ni je, aby nebyla citlivá na zapínací náraz, a proto má buď blokování, nebo malou citlivost, která ochranu nenechá zapůsobit na zapínací náraz [2].

3.6.4. Ochrana proti přetížení

Při přetížení lze použít závislou nebo nezávislou nadproudovou ochranu s časovým zpožděním. Ani jedna z nich však přesně nemodeluje procesy uvnitř stroje. V současnosti je nejdokonalejší ochranou transformátoru tepelný obraz, tzv. termokopie. Tato ochrana může být řazena i do skupiny ochran základních. Termokopie respektuje přímý vliv nadproudu i teplotu chladicí látky, a tudíž i intenzitu chlazení. Sonda tepelného obrazu se u transformátoru umísťuje do chladicího oleje pod víko [2].

3.6.5. Ochrana před zvýšeným magnetickým tokem

Tento typ ochran se využívá zejména v případech spojení generátoru s transformátorem. Používá se, když je třeba sledovat hladiny toku v transformátoru. Ochrannou veličinou je poměr jednotkového napětí a jednotkové frekvence, neboť magnetický tok je přímo úměrný napětí a nepřímo úměrný frekvenci [3].

4 PŘÍSTROJOVÉ TRANSFORMÁTORY PROUDU

Měření elektrických veličin u chráněného objektu je často velice náročné. Nežádka se objevují vysoké hodnoty proudů a napětí, a proto není možné zapojovat ochranu do obvodu přímo. V takových případech se využívá přístrojových transformátorů (PT).

Použití přístrojových transformátorů má mnoho opodstatnění, která lze shrnout v následujících bodech [1, 2].

- Přístrojové transformátory umožňují transformaci jmenovitých hodnot napětí a proudů objektu na hodnoty o jednotných velikostech, které udává norma (100 V, 5 A nebo 1 A). Tyto velikosti jsou již vhodné k napájení jisticích a měřicích zařízení.
- PT jsou schopné izolovat obvody vn i vvn od obvodů jisticích a měřicích přístrojů. Tím se nejen zjednoduší konstrukce přístrojů z důvodu nižších izolačních hladin, ale zajistí se tím i bezpečnost obsluhy.
- Díky PT je možné umístit měřicí přístroje i ochrany na místě mimo dosah rušivých elektromagnetických polí.
- Umožňují sčítání i odečítání proudů a napětí z vícera izolovaných obvodů.
- Ochrany je možné soustředit v dozornách, což zpřehledňuje řízení celého objektu.
- Přístrojový transformátor je též schopen omezovat sekundární veličiny při poruchových stavech v případech, kdy ochrana nevyžaduje po překročení nastavené hodnoty zcela přesnou informaci. Tím se ochrání vstupní obvody ochrany. Toto se týká některých nadproudových ochran, ne však ochrany diferenciální nebo distanční.

V závislosti na připojených zařízeních na výstupní straně dělíme přístrojové transformátory na jisticí a měřicí.

Měřicí transformátory jsou určeny pro měřicí přístroje. Na jejich přesnost je kladen velký důraz především v oblasti jmenovité hodnoty, zatímco v přechodných stavech, jako je např. zkrat či přepětí, velká přesnost vyžadována není.

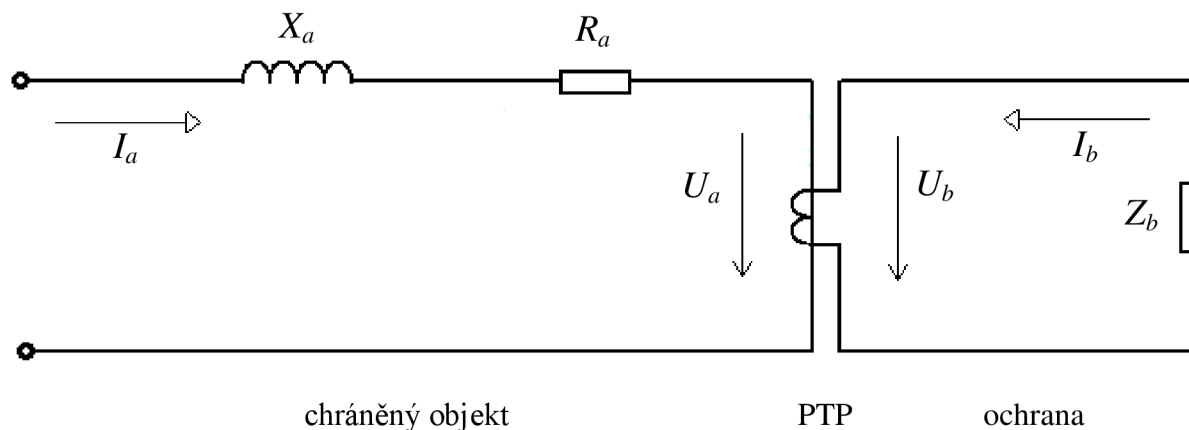
Jisticí transformátory jsou určeny pro ochrany. Zde je naopak vyžadována značná přesnost při nadproudech a nízkých napětích a důležitá je i rychlost přenosu, tedy přesná transformace přechodového jevu. Na rozdíl od měřicích přístrojových transformátorů se nevyžaduje přesnost při normálním provozu.

Přístrojové transformátory se dělí podle měřené veličiny na přístrojové transformátory napětí (PTN) a přístrojové transformátory proudu (PTP) [1, 2].

4.1. Zapojení PTP

Přístrojový transformátor proudu musí zaručovat konstantní poměr výstupního proudu ku vstupnímu. Vstupní vinutí se zapojuje sériově s obvody chráněného objektu. Na rozdíl od PTN se konstrukce PTP od konstrukce silového transformátoru výrazně liší.

Na Obr 4.1 je znázorněno schéma zapojení PTP do obvodu s objektem a ochranou. PTP se vyznačuje především nezávislostí proudu I_a na velikosti zátěže Z_b na výstupu. Tento vstupní proud I_a je určen vstupním obvodem, v němž je přístrojový transformátor proudu zapojen. Ve schématu dále figuruje I_b jako výstupní proud, X_a jako reaktance a R_a jako činný odpor obvodu chráněného objektu a Z_b jako vnější zátěž transformátoru [2].



Obr. 4.1: Zapojení PTP do obvodu objekt – ochrana [2]

Konstrukce proudových transformátorů neumožňuje rozpojení sekundárního odvodu. Pokud by k rozpojení sekundárních svorek došlo, mohlo by to vést k nárůstu napětí, které by mohlo ohrozit obsluhu. Pokud se totiž hodnota zátěže blíží k nekonečnu, pak i sekundární napětí roste nade všechny meze. Pokud je tedy třeba do sekundárního obvodu vřadit další přístroj, musí se nejdříve zkratovat sekundární svorky transformátoru proudu, poté se provede zapojení požadovaného přístroje a teprve pak se mohou sekundární svorky rozpojit [1, 2].

4.2. Základní parametry PTP

Důležité hodnoty pro jistící transformátory udává následující přehled podle [1].

Jmenovitý převod nabývá tvaru např. 100/5 A nebo 100/1 A. Jmenovitý sekundární proud tedy bývá 5 A nebo 1 A.

Třída přesnosti se dělí do skupin 5P a 10P. Označení písmenem P je odvozeno od anglického výrazu pro jistící transformátor (*Protection*). Obě skupiny mají stanovené přípustné chyby proudu a úhlu při definovaných podmínkách.

Jmenovitý nadproudový činitel udává násobek jmenovitého primárního proudu, při kterém dosáhne chyba sekundárního proudu při jmenovitém zatížení hodnoty udané třídou přesnosti.

Účinnost zkušebních břemen pro měření chyby proudu a úhlu je pro zátěže nad 5 VA roven hodnotě 0,8. Pro zátěže menší je roven 1,0.

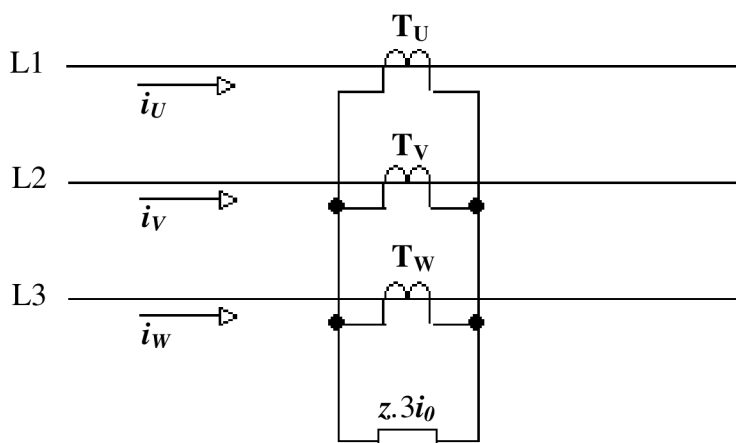
Jmenovité zatížení se udává v jednotkách VA a lze z něj určit i jmenovitou zátěžnou impedanci.

Dalšími důležitými parametry jsou i *jmenovitý nárazový (dynamický) zkratový proud*, *jmenovitý oteplovací zkratový proud*, *jmenovité napětí rozvodné soustavy* a *zkušební střídavé a rázové napětí*.

4.3. Měření nulové složky proudu

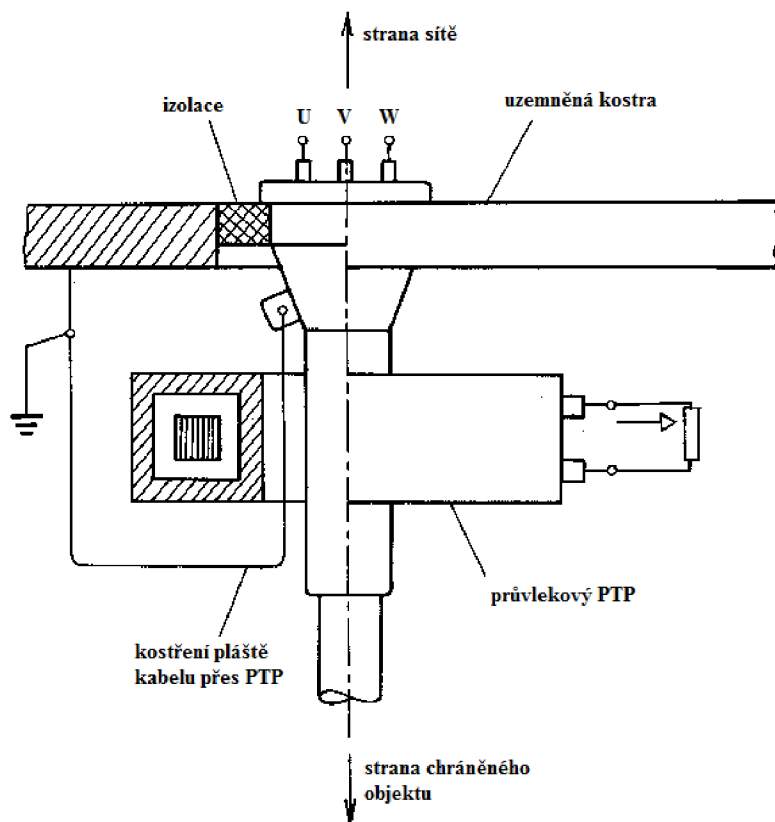
Občas vyžaduje ochrana na vstupu nulovou složku proudu i_0 . V takovém případě je vhodné odvodit hodnotu i_0 přímo z transformátoru proudu podle rovnice (4.1) dle schématu na *Obr. 4.2*. Takto obdržíme na výstupní zátěži proud $3i_0$. Tomuto zapojení se říká Holmgreenova skupina. Chyby použitých transformátorů T_U , T_V a T_W se musí lišit jen minimálně, ale absolutní chyba důležitá není. Tímto způsobem můžeme přesně měřit nulovou složku [2].

$$i_0 = \frac{1}{3}(i_U + i_V + i_W) \text{ (A; A, A, A)} \quad (4.1)$$



Obr. 4.2: Měření nulové složky pomocí Holmgreenovy metody [2]

Kde je to možné, tam je výhodnější použít místo Holmgreenovy skupiny raději průvlekový transformátor. Tím se dosáhne vyšší přesnosti. Tato možnost je výhodná zejména pro kabelové linky. Protože se v zapojení, které zobrazuje *Obr. 4.3*, nesmí přičítat zemní proud pláště, zemní se plášť před průvlekovým transformátorem. Pokud se zemní hlava kabelu za transformátorem, umísťuje se izolovaně a zemnicí vodič se protáhne zpět [2].



Obr. 4.3: Měření nulové složky proudu průvlekovým transformátorem [2]

4.4. Připojení ochran k PTP

Při připojení ochran je nutné respektovat polaritu přístrojových transformátorů. Výstupní svorky PTP se během provozu nesmí rozpojit, neboť by vzniklo nebezpečné přepětí, které by ohrozilo izolaci transformátoru i bezpečnost osob. Montáž proto musí být provedena velice pečlivě. Každý výstupní obvod PTP musí tvořit smyčku a svorky musí být dotaženy. Z téhož důvodu se nesmějí výstupní obvody PTP spojovat pájením.

V praxi by měly montáž výstupních obvodů provádět dvě osoby, přičemž jedna z nich provádí propojení a druhá kontroluje polaritu svorek, uzavřenost smyček výstupních obvodů, správné propojení jednotlivých fází a dotažení svorek.

Samostatné uzemnění PTP pro rozdílové ochrany, které jsou zapojené na výstupu do trojúhelníka, se neprovádí. Místo toho se v jediném místě uzemňuje celý systém výstupních stran PTP, které jsou galvanicky spojené.

Veškeré neuzemněné fáze výstupu PTN musí být co nejbližší ke svorkám vybaveny pojistkami nebo jističi [2].

5 SEZNÁMENÍ S PŘÍSTROJI

Další částí této bakalářské práce je praktické využití teoretických znalostí rozdílových ochran při práci s přístroji SPAD 346 C a REF542PLUS. V této kapitole budou stručně představeny oba tyto přístroje a testovací souprava OMICRON CMC 256plus.

5.1. SPAD 346 C

Modul stabilizované diferenciální ochrany SPCD 3D53, který je součástí zařízení SPAD 346 C firmy ABB, poskytuje dvouvinutovým transformátorům a blokům generátor/transformátor rychlou a spolehlivou ochranu proti zkratům mezi vinutím, mezizávitovým poruchám, zemním spojením a zkratům. Generátorům zajišťuje zkratovou ochranu a ochranu před zkraty mezi vinutím.

Ochrana diferenciálním relé porovnává fázové proudy na obou stranách chráněného objektu. Modul ochrany je plně digitální. Diferenciální i stabilizační proud je výpočtem získán ze základních frekvenčních složek a stejnosměrné a harmonické složky se číslicově filtrují.

Chrání-li přístroj dvouvinutové výkonové transformátory, provede se číslicové přizpůsobení k vektorové skupině na straně vvn i vn.

Z čelního panelu lze provést korekci transformačního poměru a samostatně lze seřadit i mžikový diferenciální proudový stupeň nebo provozní charakteristiku. Modul se vyznačuje i krátkými časy působení při částečné saturaci transformátorů proudů. Stabilizace předchází nechtěným operacím zařízení při chybách mimo chráněnou oblast a při zapínacím nárazu transformátoru.

Blokovací funkce vyhodnocuje poměr druhé harmonické a základní složky frekvence rozdílového proudu a poskytuje tak ochranu proti nechtěnému působení při zapínacích proudech. Dochází-li k přesycení transformátoru, vyhodnocuje blokovací funkce poměr páté harmonické a základní frekvenční složky. V provozních stavech s vysokým přepětím, kdy dojde k nárůstu poměru páté harmonické a základní složky, však může být tato funkce potlačena.

Displej modulu ochrany zobrazuje nastavené, měřené a zaznamenané ochrany. Kontrolu na správnost zvolené vektorové skupiny a připojení měřicích obvodů umožňuje zobrazení fázových proudů a úhlů při zvýšené citlivosti.

Zápis a čtení požadovaných hodnot se provádí přímo prostřednictvím displeje a tlačítek na panelu, k obsluze lze však využít i PC vybaveného příslušným softwarem.

Modul disponuje i ochranou selhání vypínače. Integrovaný poruchový zapisovač navíc umožňuje záznam fázových proudů a digitálních signálů. Přístroj je odolný proti elektrickému a elektromagnetickému rušení, což poskytuje možnost jeho využití i ve ztížených provozních podmínkách. Vysoká spolehlivost je zajištěna neustálou kontrolou hardwaru a softwaru.

Přístroj SPAD 346 C je dále vybaven modulem pro ochranu před zemní poruchou SPCD 2D55 a kombinovaným modulem ochrany pro zemní poruchy a nadproudové ochrany SPCJ 4D28 [5].

5.2. REF542plus

Terminál REF542plus od firmy ABB v jedné jednotce spojuje všechny sekundární funkce, které jsou v rozvodnách vn určeny pro měření, chránění, ovládání, komunikaci, monitorování a samočinnou diagnostiku. Jednotka obsahuje nejen nadproudové ochrany s nezávislým i závislým časovým zpožděním, ale rovněž směrové, časově zpožděné nadproudové ochrany. K dispozici je i distanční ochrana pro nadzemní vedení.

Terminál REF542plus sestává ze dvou částí- základní jednotky Base Unit a jednotky odděleného rozhraní místního ovládání LD HMI. Obě části propojuje sériový kabel. V základní jednotce lze najít napájecí zdroj, hlavní modul i moduly analogových a binárních vstupů a výstupů. K terminálu lze připojit i přídavné moduly. Jednotka LD HMI (Local Detached Human Machine Interface) slouží k místnímu ovládání primárních prvků pole rozvodny, nastavení hodnot ochrany a k vizualizaci událostí.

Tento terminál obsahuje velké množství ochranných funkcí, které lze spolu kombinovat. Obsahuje prvky pro ochranu motoru, velké výkonové transformátory lze pak chránit diferencíální ochranou a zemní ochranou s vymezenou zónou působení. Tyto funkce dále doplňuje podpěťová a přepěťová ochrana, kontrola synchronního stavu a frekvenční ochrana, které slouží k ochraně pro pole spínačů přípojnic, pro přívody, popř. pro jiné aplikace. Využit lze i distanční ochrany vedení, tepelné ochrany kabelů, transformátorů a motorů a dalších [6].

5.3. OMICRON CMC 256plus

Přístroj OMICRON CMC 256plus nachází využití v aplikacích, kdy je vyžadována velká přesnost. Je vynikající testovací soupravou pro zařízení ochrany a univerzálním kalibrátorem. Vysoká přesnost umožňuje jeho využití pro kalibraci širokého spektra měřících přístrojů.

Analogové testovací signály jsou digitálně generovány pomocí DSP technologie, což dopomáhá u testovacích signálů k dosažení velké přesnosti dokonce i při malých amplitudách. Přístroj disponuje šesti proudovými a čtyřmi napěťovými výstupy s nezávisle nastavitelnými hodnotami amplitudy, frekvence a fáze. Všechny výstupy jsou odolné proti přetížení i zkratu a jsou chráněny proti přehřátí.

Při využití speciálního softwaru může deset binárních vstupů alternativně pracovat jako analogové měřicí vstupy. Jednotku lze tedy využít též jako multifunkční multimetr [7].

6 ZÁKLADNÍ SROVNÁNÍ NASTAVENÍ ROZDÍLOVÉ OCHRANY PRO SPAD 346 C A RE542PLUS

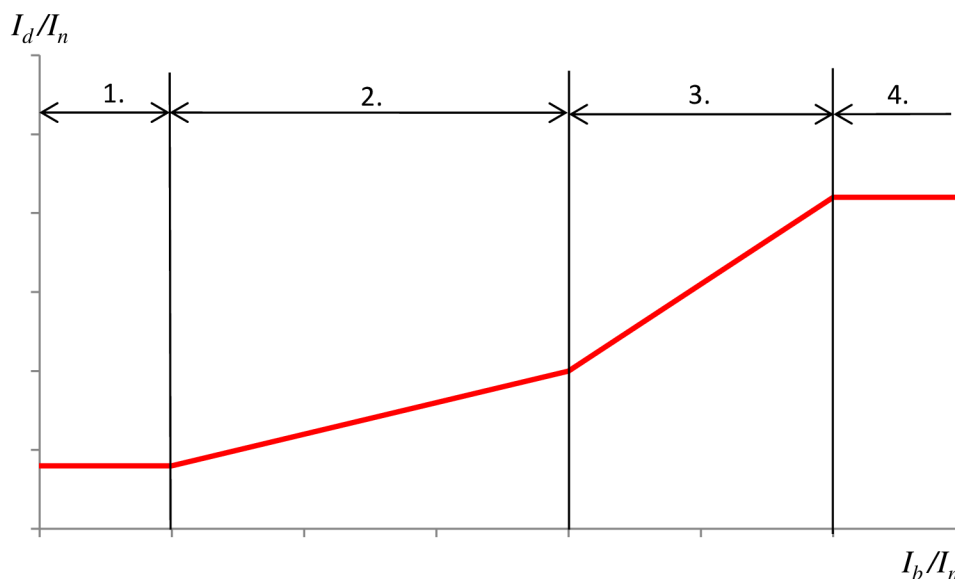
Tato kapitola se věnuje porovnání základních možností nastavení ochran SPAD 346 C a REF542plus.

6.1. Vypínací charakteristika

Vypínací charakteristika je u obou ochran rozdělena do čtyř oblastí, jak lze pozorovat na *Obr. 6.1*. V této charakteristice je rozdílový a stabilizační proud vztažen ke jmenovité hodnotě chráněného zařízení, přičemž stabilizační proud nahrazuje proud provozní. Označíme-li fázory sekundárních proudů I_1 a I_2 , pak je amplituda rozdílového proudu vypočtena z rovnice (6.1) a amplituda proudu stabilizačního z rovnice (6.2).

$$I_d = |I_1 - I_2| \text{ (A; A, A)} \quad (6.1)$$

$$I_b = \frac{|I_1 + I_2|}{2} \text{ (A; A, A)} \quad (6.2)$$



Obr. 6.1: Obecná vypínací charakteristika

Neboť se rozdílový (diferenciální) proud způsobený nepřesností transformátorů proudu a změnou polohy regulační odbočky zvětšuje přímo úměrně se zatížením transformátoru, je rozdílový proud potřebný k vypnutí tím vyšší, čím větší je stabilizační proud chráněného objektu.

V první oblasti charakteristiky je rozdílový proud pro aktivaci ochrany konstantní. Tím je zohledněna chyba diferenciálních proudů zapříčiněná malým přesycením transformátoru a především chodem výkonového transformátoru naprázdno.

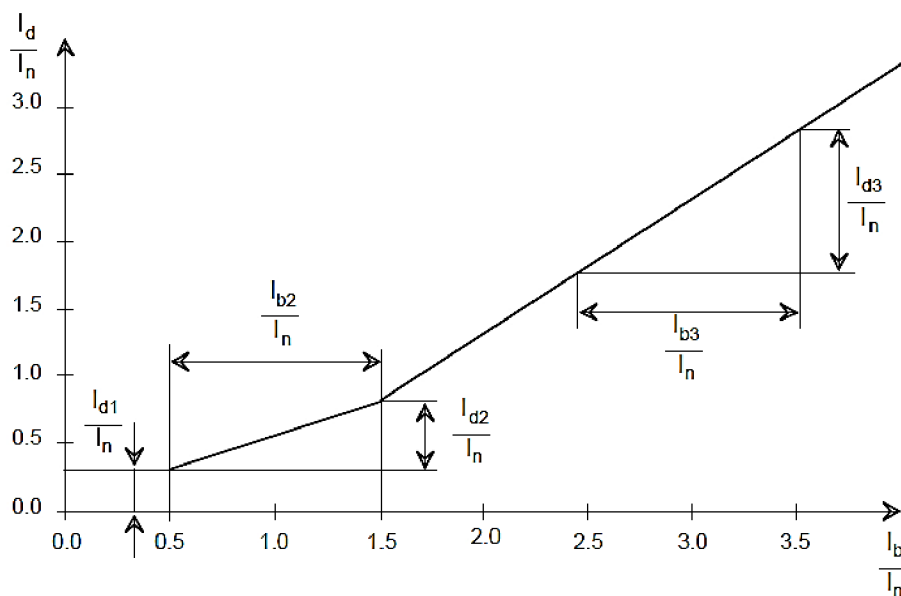
Nastavení druhé oblasti vypínací charakteristiky bere v úvahu třídu přesnosti a nadproudový činitel MTP, regulaci přepínače odboček výkonového transformátoru, pozici druhého bodu zlomu charakteristiky i chybu způsobenou převodovými transformátory v ochraně u přesnosti A/D převodníku (poslední chybu lze uvažovat maximálně v rozsahu 2 %).

Třetí oblast odpovídá těžkým zatížením chráněného objektu a čtvrtá oblast definuje tvar charakteristiky při překročení povoleného stabilizačního proudu, který chráněným objektem protéká [5].

6.1.1. Parametrizace ochrany SPAD 346 C

Třífázové diferenciální chránění umožňuje modul SPCD 3D53. Nastavení ochrany je nejlepší provádět prostřednictvím počítače a programu *CAP 505*. Vypínací charakteristika se nastavuje v záložce *Screen2* položky *Main settings parameters selection*. Následující text čerpá ze zdroje [5].

Základní nastavení P/I_n lze provést v rozsahu 5 až 50 %. Toto nastavení na *Obr. 6.2* odpovídá hodnotě $\frac{I_{d1}}{I_n}$. Pro chránění transformátoru se většinou využívají hodnoty v rozmezí 20 až 40 %. **Bod prvního zlomu** charakteristiky je pevný, a to $\frac{I_b}{I_n} = 0,5$.



Obr. 6.2: Vypínací charakteristika ochrany SPAD 346 C [5]

Popudový směr S se nastavuje v rozmezí 10 až 50 % a definuje se vztahem $S = \frac{I_{d2}}{I_{b2}}$. Zohledňuje chyby, které diferenciální proud ovlivňují v druhé oblasti vypínací charakteristiky. V případě, že se významně liší nadproudové činitele PT na straně VN a VVN, musí se popudový směr nastavit na vyšší hodnotu, než by tomu bylo v případě nadproudových činitelů se stejnou hodnotou.

Bod druhého zlomu charakteristiky $\frac{I_{2tp}}{I_n}$ se pohybuje v rozsahu 1,0 až 3,0. Nastavení jeho hodnoty se odvíjí od příspěvku zkratového výkonu v chráněné zóně. Při

chránění blokového transformátoru v bloku transformátor/generátor je tento příspěvek obvykle ze dvou směrů a doporučené nastavení je v tomto případě v mezích od 1,5 do 2,0. Od druhého zlomu pak charakteristika roste se sklonem 100 %.

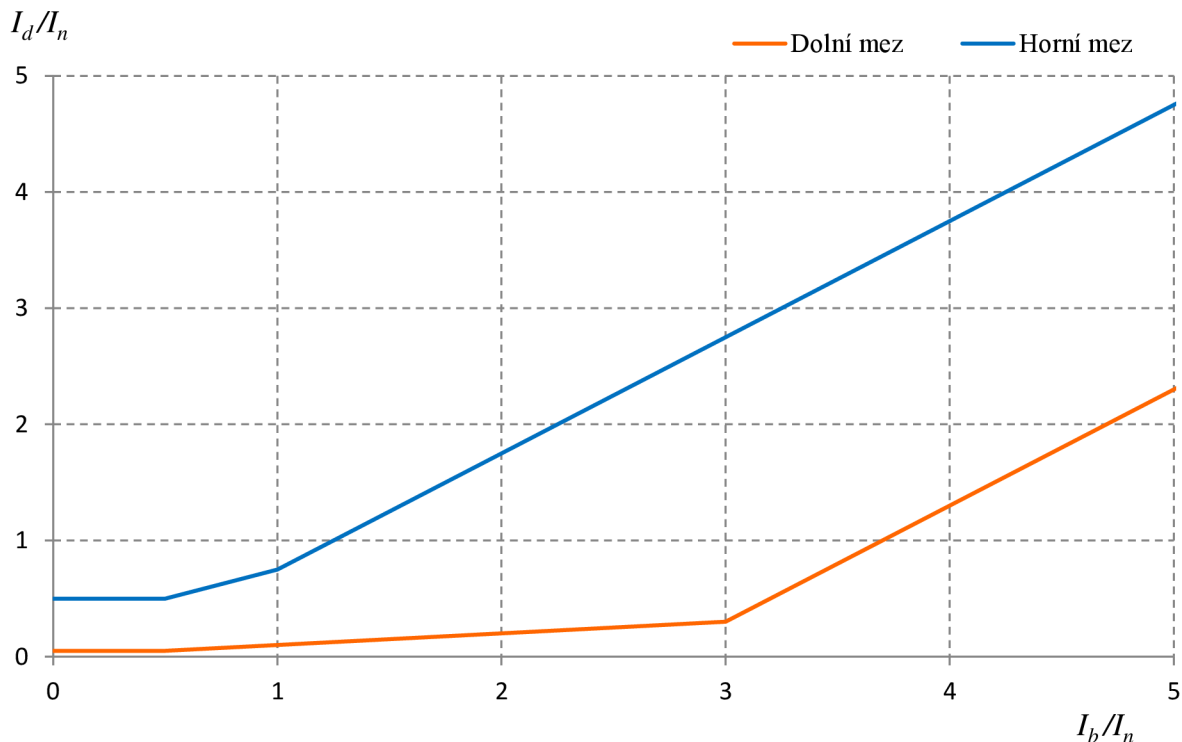
Dalším nastavitelným parametrem je **mžikový proudový diferenciální stupeň** $\frac{I_d}{I_n} \gg$, který není stabilizován. Jeho hodnota se pohybuje v rozmezí 5 až 30 I_n . V případě chránění výkonových transformátorů se většinou volí hodnoty od 6 do 10 I_n .

Ochrana disponuje i blokováním ochrany při zapnutí transformátoru a při provozních situacích, kdy dochází k přebuzení chráněného objektu. V prvním případě k tomu slouží vyhodnocení poměru druhé a základní harmonické $\frac{I_{d2f}}{I_{d1f}}$ v rozsahu 10 až 20 %, ve druhém případě pak páté a základní harmonické $\frac{I_{d5f}}{I_{d1f}}$ v mezích 10 až 50 %.

Hodnota $\frac{I_d}{I_n} \gg$ slouží pro funkci negující blokování v případě, poměr mezi pátou a základní frekvenční složkou rozdílového proudu přesáhne nebezpečnou hladinu v provozních stavech s vysokým přepětím. Její hodnotu lze nastavit od 10 do 50 %.

Poměry $\frac{I_1}{I_n}$ a $\frac{I_2}{I_n}$ korigují transformační poměr PTP v případě, že se sekundární proudy PTP neshodují se jmenovitými proudy chráněného transformátoru. Jejich nastavení je možné v rozmezí 0,40 až 1,50 I_n .

Na *Obr. 6.3* je zobrazeno mezní nastavení vypínací charakteristiky ochrany.



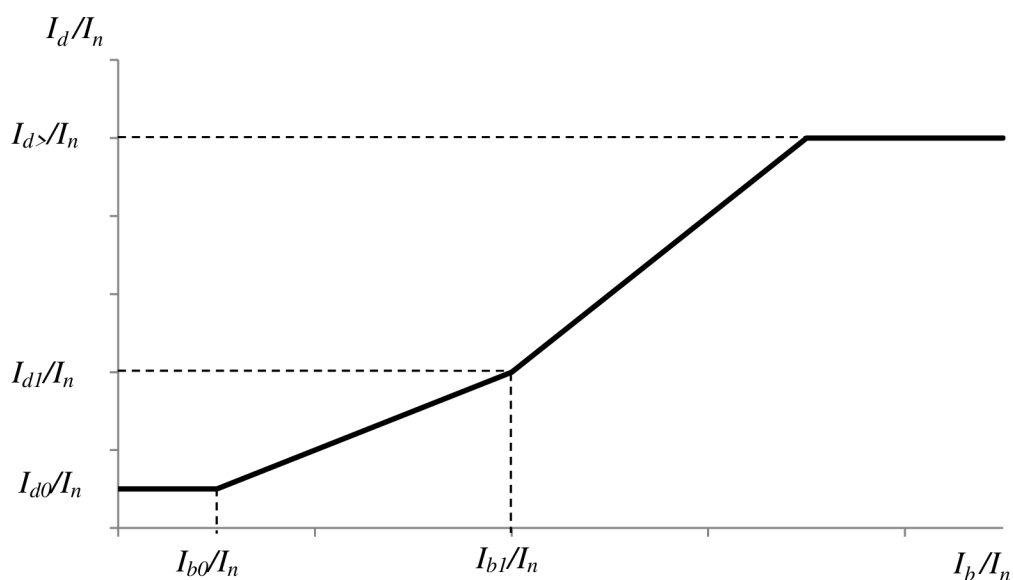
Obr. 6.3: Mezní vypínací charakteristiky ochrany SPAD 346 C

6.1.2. Parametrizace ochrany REF542plus

Terminál REF542plus se nastavuje za pomoci programu *Configuration Tool*. Zde se zadávají komunikační parametry sériového portu pro propojení ochrany s počítačem i parametry připojených modulů.

Analogovou kartu lze nakonfigurovat při načtení *Main Menu: Configure: Terminals: Analog inputs*. Zde se vybírá typ použité karty, jmenovité parametry sítě a především převody jednotlivých PTP.

Funkční schéma rozdílové ochrany se vytváří prostřednictvím grafického programovacího jazyka FUPLA. Každému vytvořenému funkčnímu bloku lze přiřadit vlastní funkci, vnější parametry i počet binárních vstupů a výstupů. Grafický editor lze spustit přes *Main Menu: Configure: Drawing*. Parametry vypínací charakteristiky se nastavují v bloku *Differential protection*. Její obecný tvar znázorňuje Obr 6.4.



Obr. 6.4: Vypínací charakteristika ochrany REF542plus

Jedním z nastavitelných parametrů je **jmenovitý proud I_n** na primární a na sekundární straně transformátoru. Ten se může u obou případů pohybovat v rozmezí hodnot 10,00 až 100 000,00 A.

První oblast charakteristiky je určena body $[0; I_{d0}]$ a $[I_{b0}; I_{d0}]$. Hodnota I_{d0} (threshold current) je nastavitelná v rozsahu 0,10 až 0,50 p.u. a hodnota I_{b0} (unbiased region limit) v rozsahu 0,50 až 5,00 p.u.

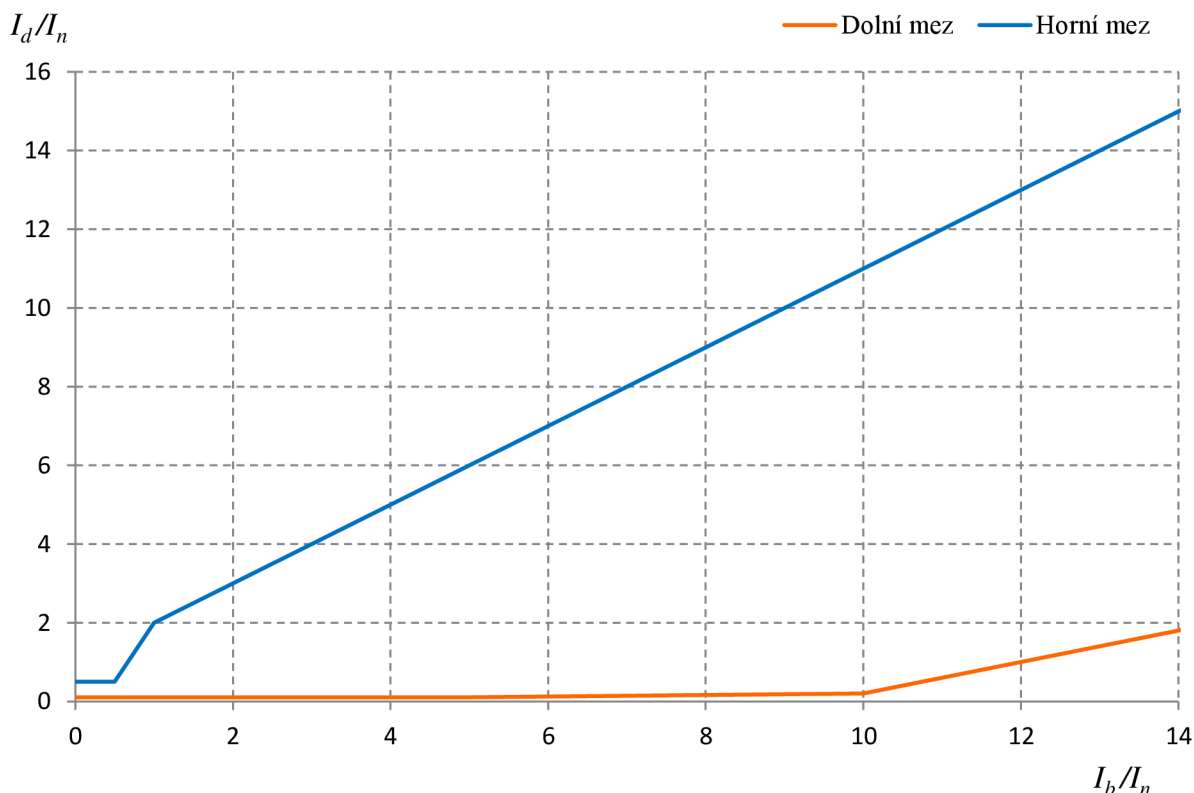
Druhý zlom vypínací charakteristiky je definován bodem $[I_{b1}; I_{d1}]$. Hodnotu I_{d1} (slightly biased region threshold) lze nastavit v mezích od 0,20 do 2,00 p.u., hodnotu I_{b1} (slightly biased region limit) v rozsahu 1,00 až 10,00 p.u.

Strmost S (heavy biased slope) přímky ve třetí oblasti může uživatel volit v rozmezí hodnot 0,40 až 1,00.

Prahovou hodnotu diferenciálního proudu pro čtvrtou oblast $I_d >$ (trip by I_d) je možné nastavit v hodnotách 5,00 až 40,00 p.u.

Stejně jako u ochrany SPAD 346 C, i zde lze využít funkce **blokování**. Blokování druhou harmonickou frekvencí může nabývat hodnot 0,10 až 0,30 I_d , blokování pátou harmonickou má rozsah tentýž.

Obr 6.5 znázorňuje mezní vypínací charakteristiky ochrany. Ze strmosti přímky ve druhé oblasti lze usoudit, že je možné využít zařízení REF542plus i jako rozdílovou ochranu přípojníc.



Obr. 6.5: Mezní vypínací charakteristiky ochrany REF542plus

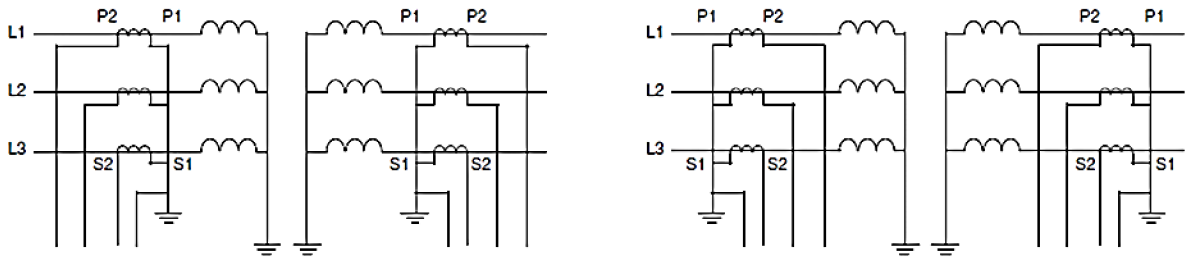
Pro přehlednost se v dalším textu uvádějí body určující vypínací charakteristiku v poměru se jmenovitou hodnotou (jako tomu je u ochrany SPAD 346 C).

6.2. Řešení hodinového úhlu

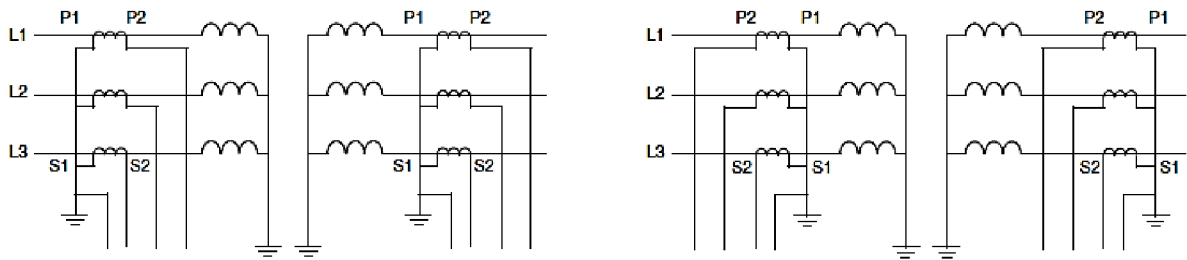
Uživatel musí kromě mezních hodnot vypínací charakteristiky zadávat i způsob zapojení a uzemnění chráněného transformátoru.

6.2.1. SPAD 346 C

Fázový rozdíl mezi proudy I_1 a I_2 je kompenzován číslicově. K tomu se využívá přepínačů SGF1/3...8. Obr. 6.6 a Obr. 6.7 znázorňují dva typy připojení přístrojových transformátorů na ochranu. U typu I (Obr. 6.6) jsou PTP strany VVN i VN uzemněny buď uvnitř, nebo vně chráněné zóny. Proudů ochranou mají v tomto zapojení shodný směr. Typové schéma II (Obr. 6.7) se liší tím, že uzemnění jedné strany je provedeno uvnitř chráněné zóny, ale uzemnění druhé vně. Proudů ochranou tedy mají směr opačný.



Obr. 6.6: Typové zapojení proudových transformátorů – typ I [5]



Obr. 6.7: Typové zapojení proudových transformátorů – typ II [5]

Uživatel si volí přizpůsobení k vektorové skupině v nastavení *Configuration of main SGF switchgroup selection*. V záložce *Screen2* a v rámečku *New values* lze vybrat použitou vektorovou skupinu ze seznamu nejčastěji používaných zapojení výkonového transformátoru, včetně uzemnění.

6.2.2. REF542plus

Uzemnění a hodinový úhel VVN i VN strany výkonového transformátoru se u ochrany REF542plus nastavuje společně s dalšími parametry přímo ve funkčním bloku diferenciální ochrany. Dvojklikem na funkční blok *Differential protection* lze zadat potřebné parametry ochrany. Uživatel nastavuje velikost hodinového úhlu v poli *Transformer group* a způsob uzemnění v poli *Transformer Earthing*. Zde se volí, zda má chráněný objekt uzemněnou primární a/nebo sekundární stranu.

7 MĚŘENÍ VYPÍNACÍ CHARAKTERISTIKY

Výpočet nastavení vypínací charakteristiky pro konkrétní transformátor byl proveden podle zdroje [5]. Parametry chráněného transformátoru zobrazuje *Tabulka 7.1*, parametry PTP *Tabulka 7.2*.

Tabulka 7.1: Parametry transformátoru

Zdánlivý výkon	26 MVA
Napětí primárního vinutí U_1	23 kV
Napětí sekundárního vinutí U_2	6,3 kV
Proud primárního vinutí I_1	653 A
Proud sekundárního vinutí I_2	2383 A
Zapojení	YNd1
Přepínač odboček	2 x 2,5 %

Tabulka 7.2: Parametry PTP

Převod PTP na primární straně	750:1 A
Převod PTP na sekundární straně	2500:1 A
Přesnost PTP	5P20

Nastavovanou hodnotu strmosti charakteristiky S ve druhé oblasti lze získat výpočtem dle rovnice (7.1). Přesnost PTP se určuje pomocí třídy přesnosti. Je-li tedy třída přesnosti v tomto případě 5P, je maximální celková chyba rovna 5 %. Při výpočtu je třeba zohlednit i fakt, že je transformační poměr PTP na obou stranách výkonového transformátoru většinou přizpůsoben vzhledem ke střední odbočce regulačního rozsahu. Chyba způsobená přizpůsobovacími transformátory v ochraně a přesností A/D převodníku nabývá maximálně 2 %. Záloha je 5 %.

$$S = (\text{přesnost PTP}) + (\text{přepínač odboček}) + (\text{chyba přizpůsobení}) + (\text{záloha}) = 2 \cdot 0,05 + 2 \cdot 0,025 + 2 \cdot 0,02 + 0,05 = 0,24 \quad (7.1)$$

Základní nastavení $\frac{P}{I_n}$ pro SPAD 346 C, popř. $\frac{I_{do}}{I_n}$ pro REF542plus, se vypočítá dle vztahu (7.2). Chyba způsobená proudem naprázdno je uvažována 10 %. Bod prvního zlomu charakteristiky $\frac{I_b}{I_n}$ pro SPAD 346 C ($\frac{I_{bo}}{I_n}$ pro REF542plus) je vzhledem k první jmenované ochraně zvolen na hodnotu 0,5.

$$\frac{P}{I_n} = \frac{I_b}{I_n} \cdot S + (\text{chyba proudem naprázdno}) = 0,5 \cdot 0,24 + 0,1 = 0,22 \quad (7.2)$$

Druhý zlom charakteristiky nastává v bodě $\frac{I_{2tp}}{I_n}$ (SPAD 346 C), popř. $\frac{I_{b1}}{I_n}$ (REF542plus), o velikosti 2,0. Pro nastavení ochrany REF542plus je potřeba přepočítat strmost charakteristiky S ve druhé oblasti na hodnotu $\frac{I_{d1}}{I_n}$ podle vzorce (7.3).

$$\frac{I_{d1}}{I_n} = S \cdot \left(\frac{I_{b1}}{I_n} - \frac{I_{b0}}{I_n} \right) + \frac{I_{d0}}{I_n} = 0,24 \cdot (2 - 0,5) + 0,22 = 0,58 \quad (7.3)$$

Ve třetí oblasti vypínací charakteristiky je nastavená strmost 100 % a mžikový proudový diferenciální stupeň (prahová hodnota rozdílového proudu pro čtvrtou oblast) má hodnotu 10,0.

Tabulka 7.3 uvádí souhrn výsledků pro nastavení obou ochran.

Tabulka 7.3: Přehled nastavovaných hodnot vypínací charakteristiky

Oblast	SPAD 346 C	REF542plus	Hodnota
1	$\frac{P}{I_n}$	$\frac{I_{d0}}{I_n}$	0,22
	$\frac{I_b}{I_n}$	$\frac{I_{b0}}{I_n}$	0,50
2	S	-	0,24
	-	$\frac{I_{d1}}{I_n}$	0,58
	$\frac{I_{2tp}}{I_n}$	$\frac{I_{b1}}{I_n}$	2,00
3	S	S	1,00
	$\frac{I_d}{I_n} \gg$	$\frac{I_d}{I_n} >$	10,00

Dalším důležitým výpočtem pro správné otestování funkce ochrany je korekce transformačního poměru (p_1 a p_2). Podle něj je třeba upravit velikosti proudů, které se nastavují na testovacím zařízení OMICRON CMC 256plus. Tento poměr se vypočte ze jmenovitých proudů chráněného transformátoru (I_1 a I_2) a jmenovitých primárních proudů PTP (I_{nPTP1} a I_{nPTP2}) podle rovnic (7.4) a (7.5).

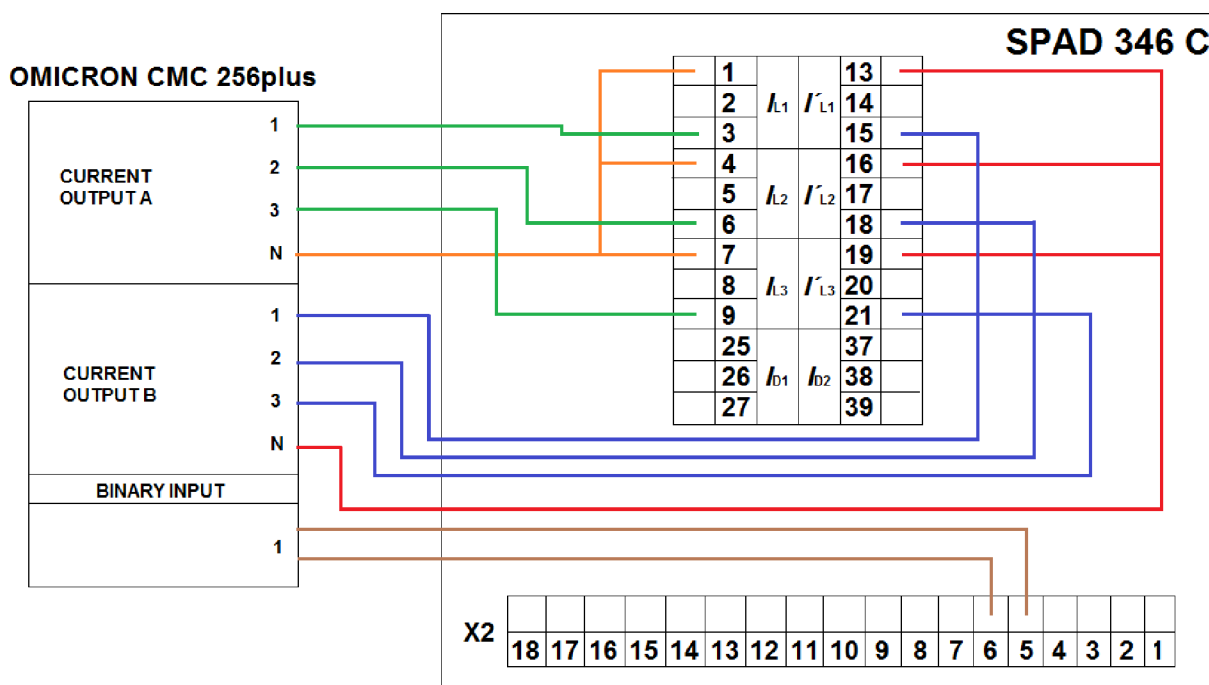
$$p_1 = \frac{I_1}{I_{nPTP1}} = \frac{653}{750} = 0,87 \quad (7.4)$$

$$p_2 = \frac{I_2}{I_{nPTP2}} = \frac{2383}{2500} = 0,95 \quad (7.5)$$

7.1. Zapojení pracoviště

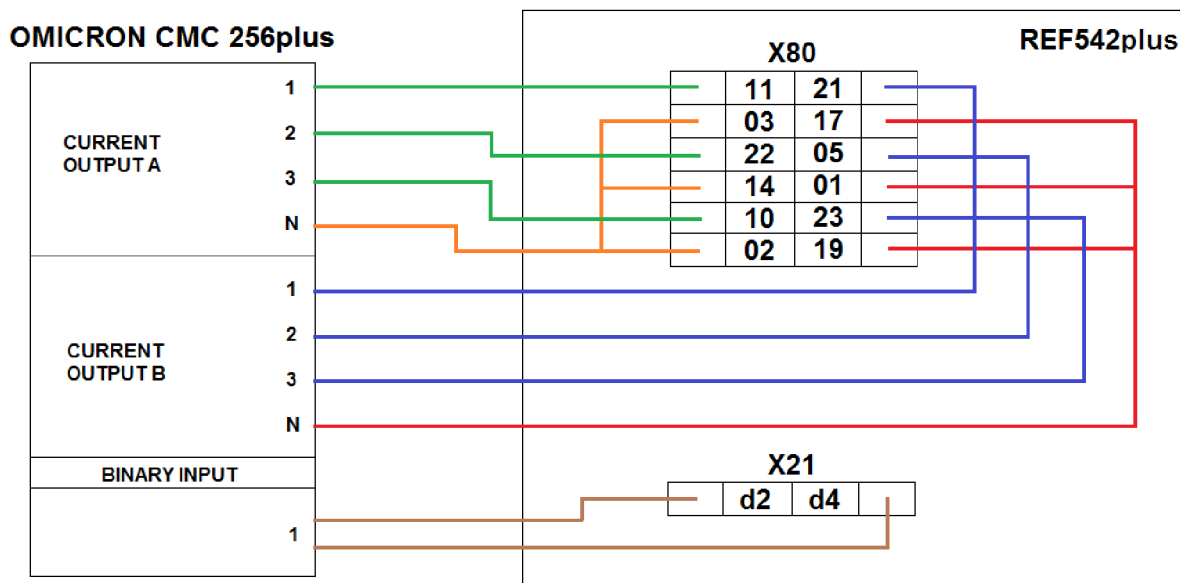
K propojení testovací sady OMICRON CMC 256plus slouží port ETH1. Komunikace ochrany s počítačem se realizuje přes sériový port. *Obr. 7.1* a *Obr. 7.2* znázorňují propojení ochrany s testovacím zařízením.

Na *Obr. 7.1* lze vidět spojení testovací sady s ochranou SPAD 346 C. Pro tripovací signál, který reprezentuje povel rozepnutí vypínače, byl využit binární výstup ze svorkovnice X2. Zbýlých dvanáct vodičů propojovalo v závislosti na zvoleném typovém zapojení PTP (typ I nebo typ II) proudové výstupy testovacího zařízení s šesti proudovými vstupy ochrany. PTP mohou mít jmenovitý sekundární proud 1 A nebo 5 A. Tento proud je automaticky zvolen připojením na správné svorky modulu analogových vstupů. Totéž platí pro přístroj REF542plus. Pro potřeby současného měření byl tento proud v obou případech stanoven na hodnotu 1 A.



Obr. 7.1: Propojení ochrany SPAD 346 C s testovacím zařízením

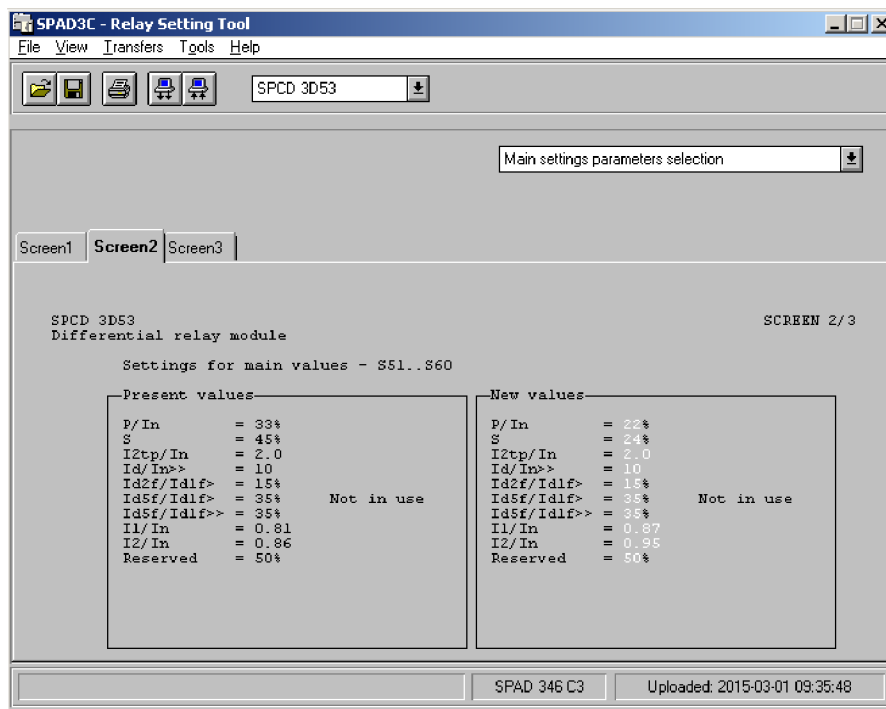
U ochrany REF542plus se vedly vodiče z proudových výstupů zařízení OMICRON CMC 256plus ke svorkovnici X80 (*Obr. 7.2*). Pro tripovací signál se využívalo binárního výstupu na svorkovnici X21.



Obr. 7.2: Propojení ochrany REF542plus s testovacím zařízením

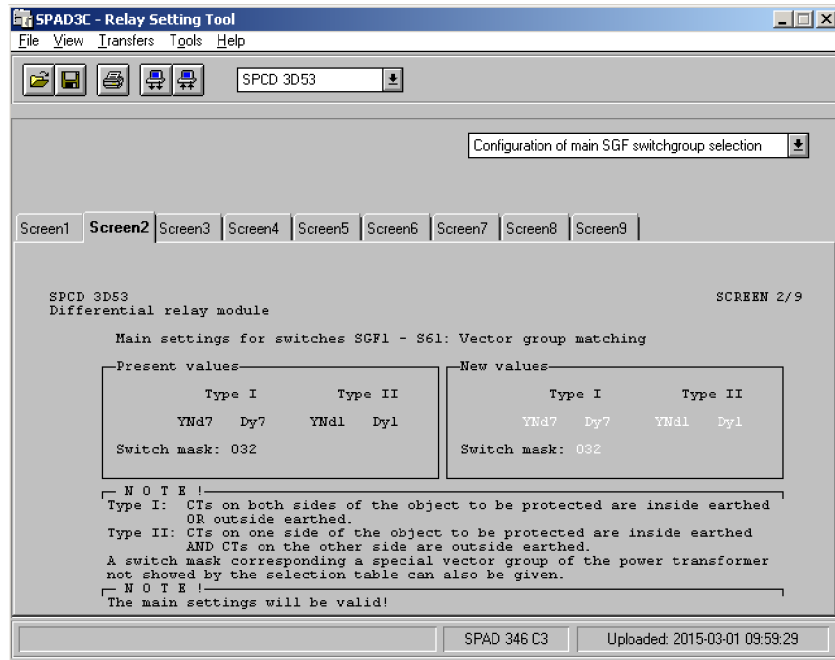
7.2. Nastavení přístroje SPAD 346 C

Ochrana lze nastavit pomocí počítače a programu *CAP 505*. Po otevření projektu *SPAD 3C* se objeví nabídka konfiguračních nástrojů, ze kterých se vybere možnost *Relay Setting Tool*. V záložce *Screen2* položky *Main settings parameters selection* se zadávají parametry vypínací charakteristiky (Obr. 7.3). Nastavení se do ochrany nahrává pomocí tlačítka *Download*, které se nachází v horní liště (ikona počítače s šipkami směřujícími dolů).



Obr. 7.3: Nastavení vypínací charakteristiky v ochraně SPAD 346 C

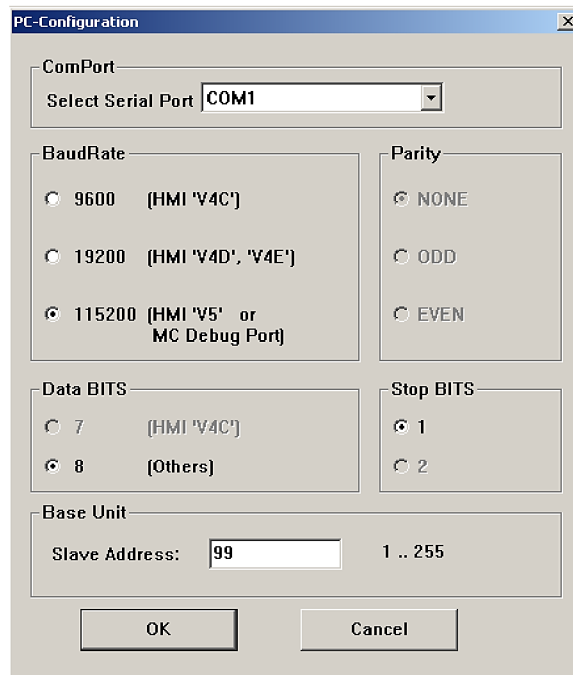
Přizpůsobení k vektorové skupině lze provést při načtení položky *Configuration of main SGF switchgroup selection*. V závislosti na zapojení ochrany k testovacímu zařízení se v záložce *Screen2* a v rámečku *New values* vybere typ zapojení chráněného transformátoru (Obr. 7.4). Nastavení je opět potřeba nahrát do ochrany.



Obr. 7.4: Nastavení přizpůsobení vektorové skupiny

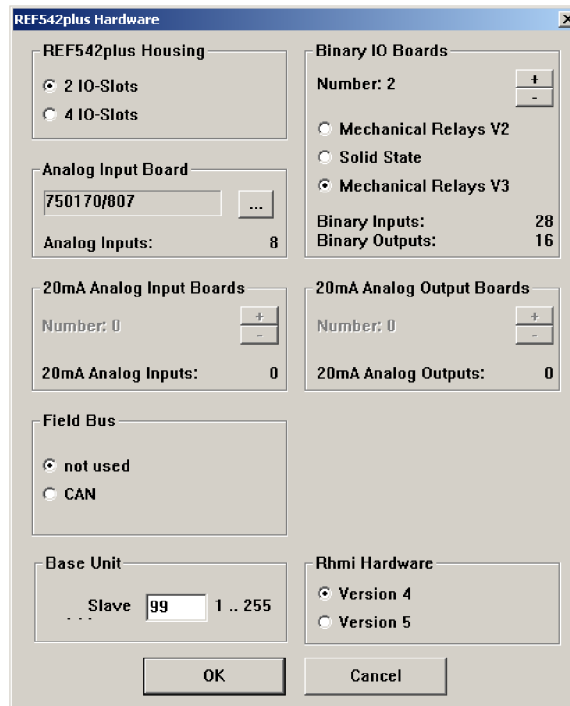
7.3. Nastavení přístroje REF542plus

Po propojení ochrany s počítačem a testovacím zařízením se spustí program *Configuration Tool*. Sériový port je potřeba nastavit prostřednictvím *Main Menu: Connect: Serial port* (viz Obr. 7.5).



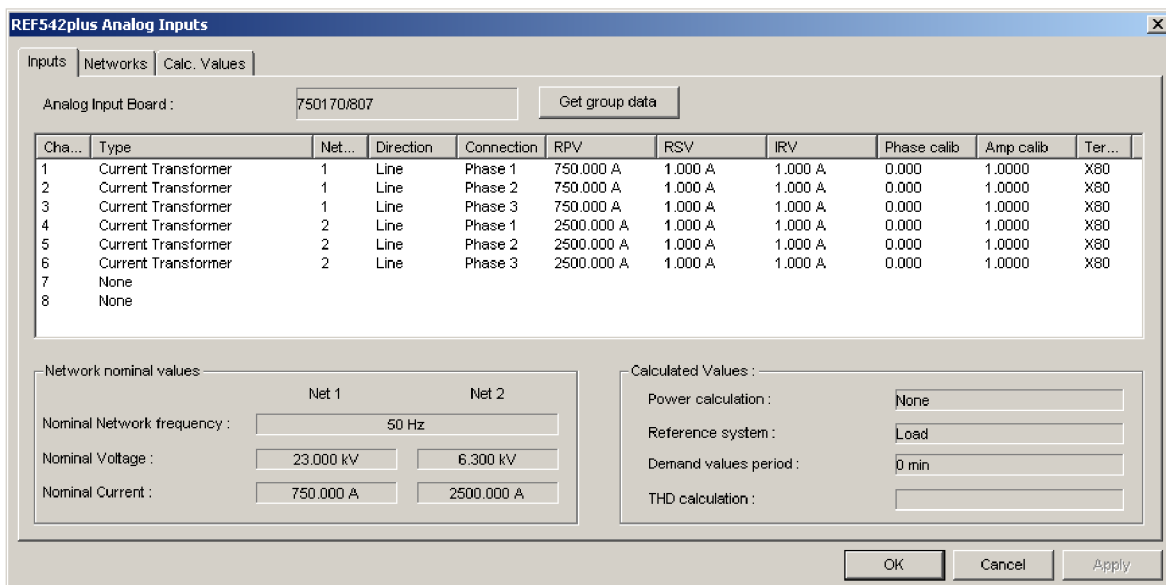
Obr. 7.5: Nastavení parametrů sériového portu

Při zvolení *Main menu: Configure: Hardware* lze nakonfigurovat moduly, jež jsou ve skříní terminálu dostupné. Toto nastavení zobrazuje Obr. 7.6.



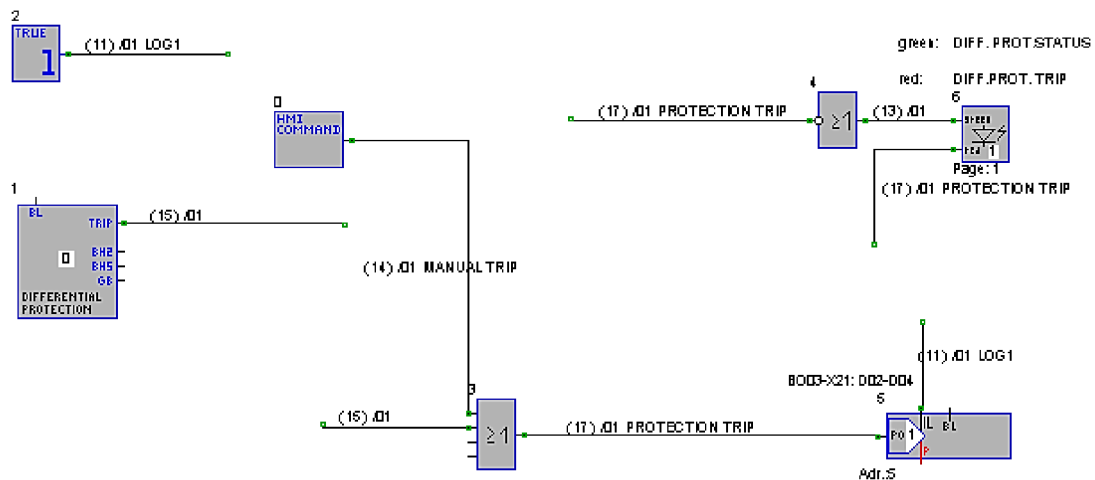
Obr. 7.6: Parametry připojených modulů

Pro konfiguraci analogové karty je potřeba zvolit *Main menu: Configure: Terminals: Analog inputs*. Prvním krokem je výběr požadované měřicí analogové karty. V tomto konkrétním případě je zapotřebí šesti proudových transformátorů, jejichž parametry se nastavují v okně, které se objeví při dvojkliku na jednotlivé PT. Záložka *Networks* umožňuje nastavení jmenovitých parametrů sítí. Dialogové okno, které slouží ke konfiguraci analogových vstupů, a konkrétní nastavované hodnoty zobrazuje Obr. 7.7.



Obr. 7.7: Nastavení analogových vstupů

Po načtení vytvořeného funkčního schématu rozdílové ochrany (Obr. 7.8) lze přistoupit k parametrizaci samotné vypínací charakteristiky.



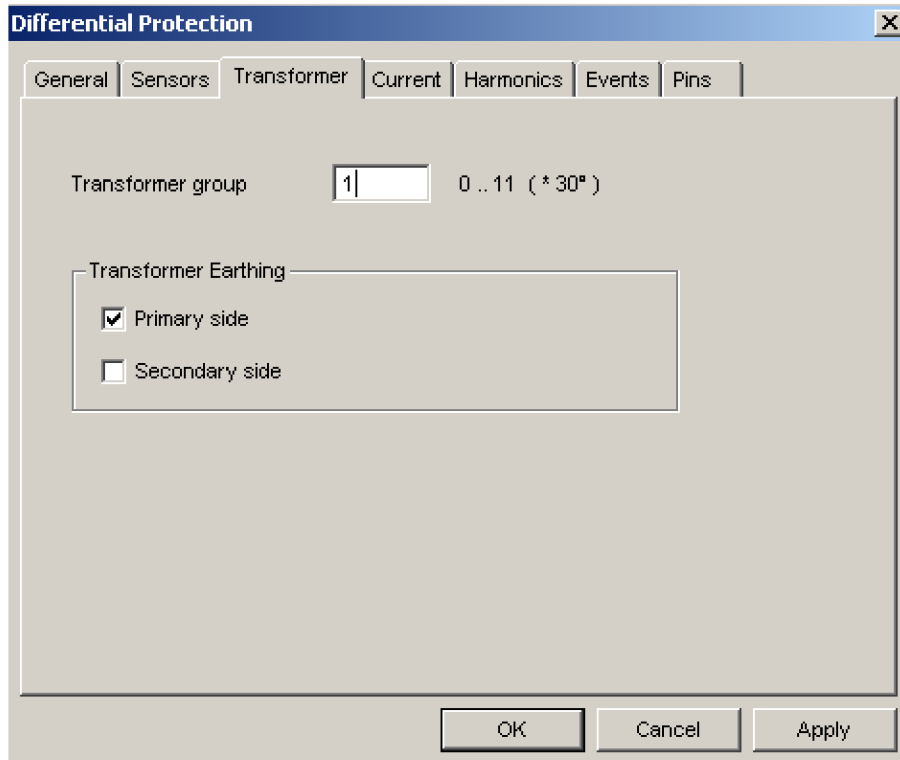
Obr. 7.8: Funkční schéma pro testování rozdílové ochrany

Dvojklikem na blok diferenciální ochrany (*Differential protection*) se otevře dialogové okno, které umožňuje zadat vypočtené hodnoty nastavení vypínací charakteristiky (Obr. 7.9) i údaje o zapojení chráněného transformátoru (Obr. 7.10).

Differential Protection			
Parameter Set	Set 1	Set 2	
Primary nominal current	653.00	100.00	10.00 .. 100000.00 A
Secondary nominal current	2383.00	100.00	10.00 .. 100000.00 A
Threshold current	0.22	0.20	0.10 .. 0.50 I _r (p.u.)
Unbiased region limit	0.50	0.50	0.50 .. 5.00 I _r (p.u.)
Slightly biased region threshold	0.58	0.20	0.20 .. 2.00 I _r (p.u.)
Slightly biased region limit	2.00	3.00	1.00 .. 10.00 I _r (p.u.)
Heavily biased slope	1.00	0.40	0.40 .. 1.00
Trip by I _d >	10.00	6.00	5.00 .. 40.00 I _r (p.u.)

OK Cancel Apply

Obr. 7.9: Nastavení parametrů vypínací charakteristiky



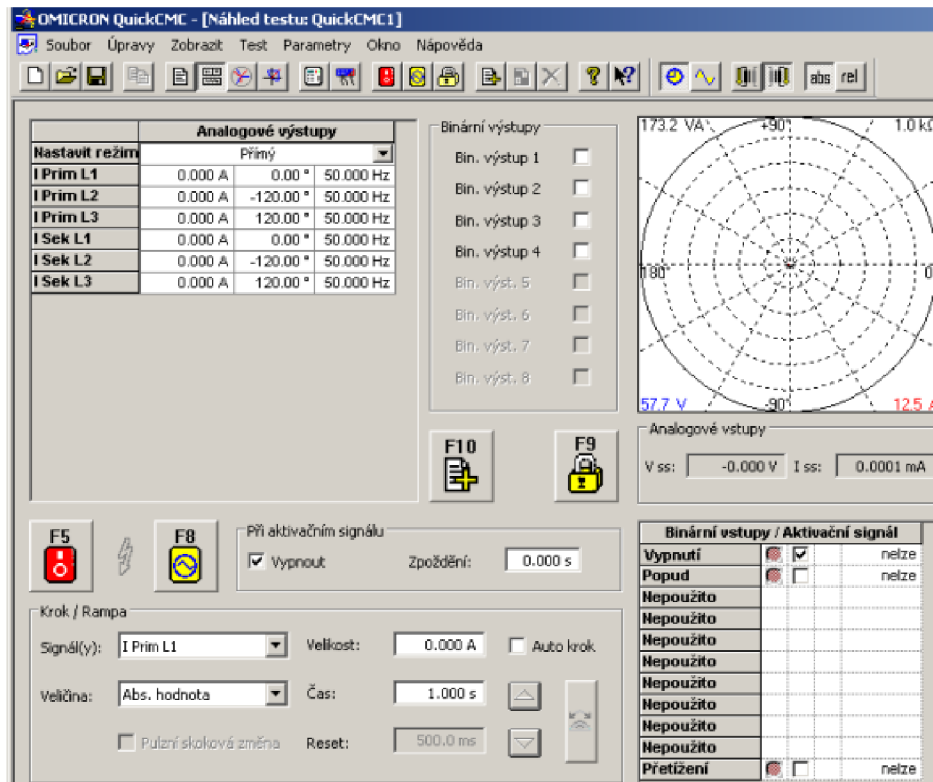
Obr. 7.10: Určení hodinového úhlu a uzemnění chráněného transformátoru

7.4. Nastavení testovacího zařízení OMICRON CMC 256plus

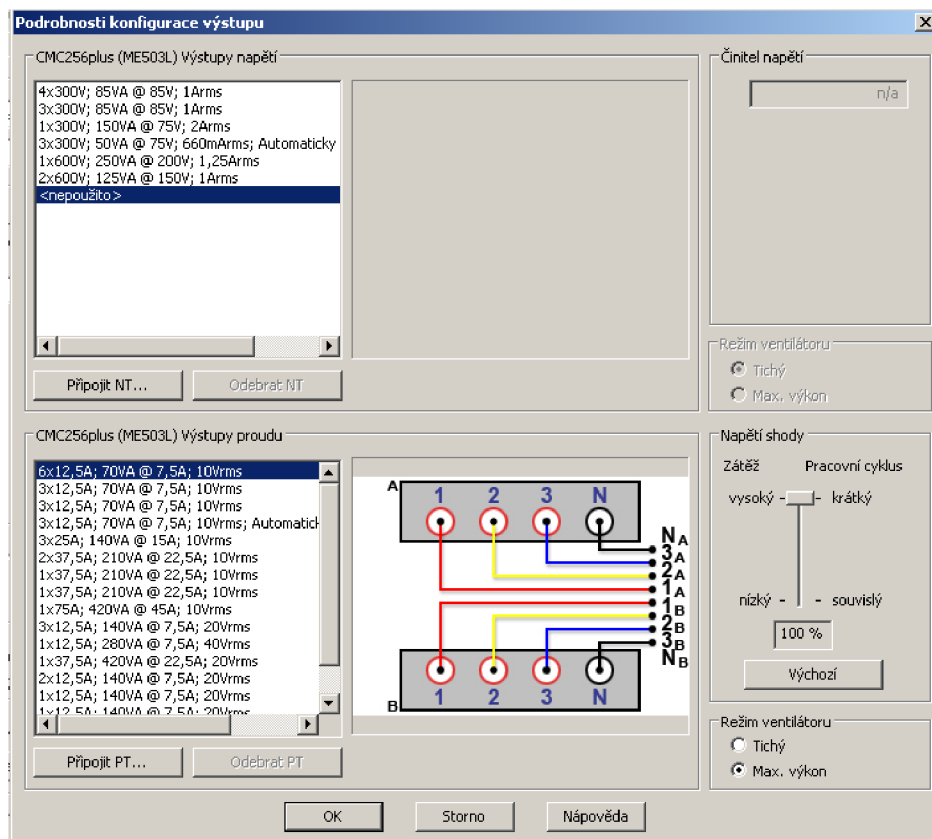
Pro nastavení proudů vstupujících do ochrany je zapotřebí nejprve spustit počítačový program OMICRON Test Universe. Otevře se startovací stránka, která nám umožní přiřadit k programu dané zkušební zařízení a poté zvolit testovací modul QuickCMC. Tím se zobrazí okno na *Obr. 7.11*.

Před tím, než se přistoupí k zadávání konkrétních hodnot nastavovaných proudů, je potřeba správně nastavit hardware. K tomu se lze dostat prostřednictvím příslušné ikony v horní liště. Okno se otevře na záložce *Obecné*.

Okno podrobné hardwarové konfigurace zobrazuje *Obr. 7.12*. Zde je potřeba navolit jednotlivé výstupy z testovacího zařízení. Pro potřeby současného měření se v horní části okna zruší použití napěťových výstupů a ve spodní části se vybere možnost šesti 12,5 A výstupů. Konfigurace se potvrdí stiskem tlačítka *OK*. Tím se uživatel dostane opět na stránku hardwarové konfigurace.

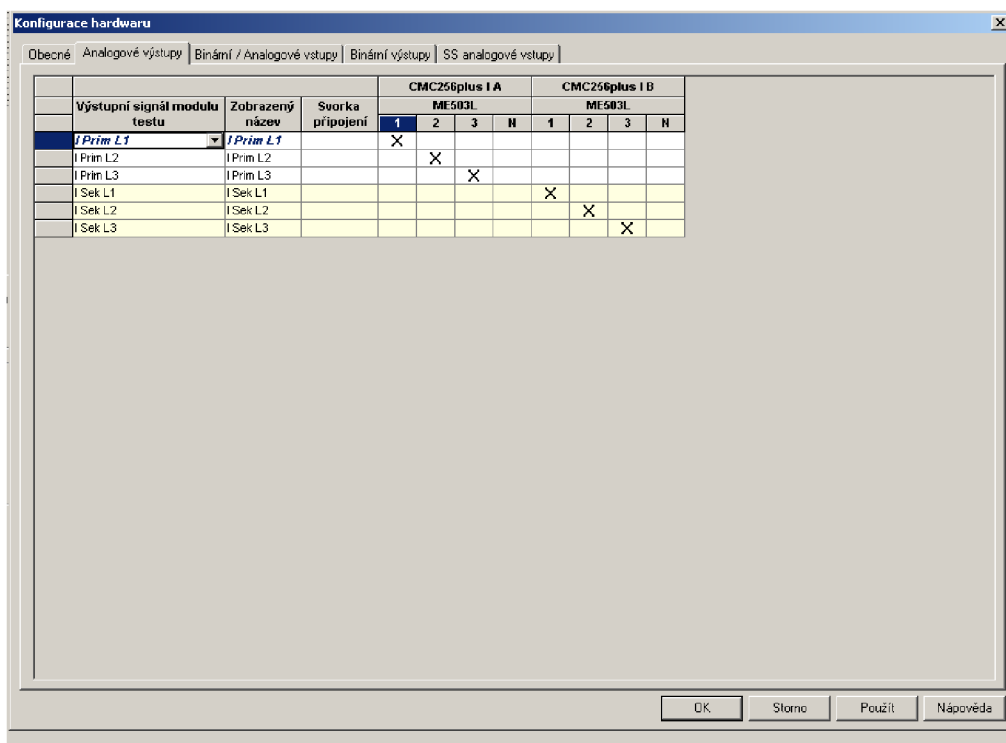


Obr. 7.11: Úvodní okno testovacího modulu QuickCMC

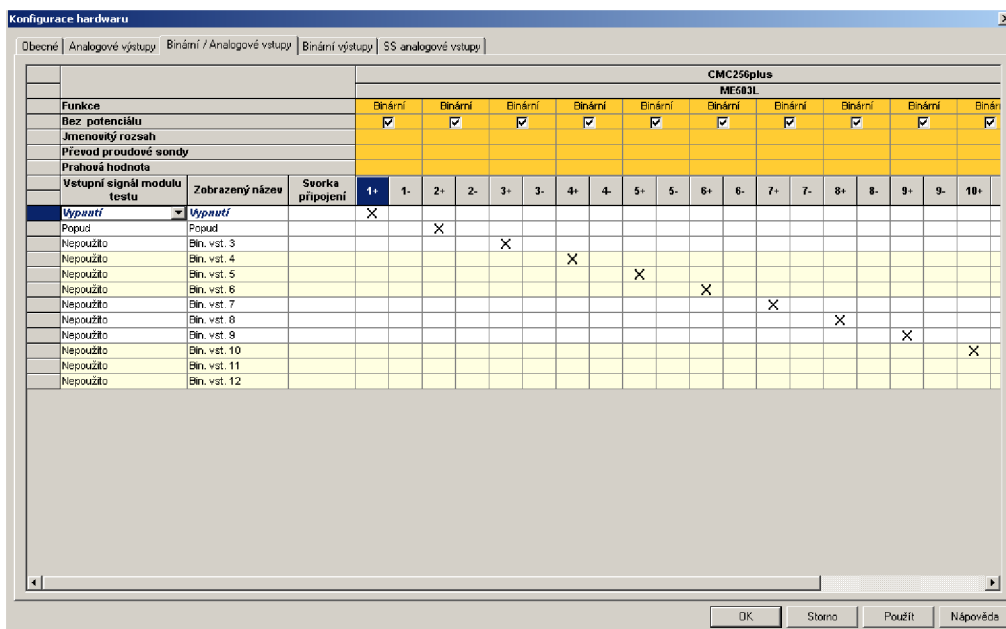


Obr. 7.12: Okno detailní konfigurace hardwaru

V záložce *Analogové výstupy* lze jednotlivé proudové výstupy vhodně pojmenovat (Obr. 7.13). V záložce *Binární / Analogové vstupy* je pak potřeba zkontrolovat přiřazení jednotlivých funkcí daným vstupům (Obr. 7.14).



Obr. 7.13: Okno přiřazení analogových výstupů



Obr. 7.14: Přiřazení binárních a analogových vstupů

Nyní lze přistoupit k zadávání jednotlivých proudů testovacího zařízení. To se provádí v okně, které zobrazuje *Obr. 7.11*. Kromě velikosti a fázového natočení proudů je možné nastavit i jejich frekvenci a vlastnosti kroku, po kterém se budou jednotlivé veličiny měnit. Test se spouští pomocí červeného tlačítka F5. Hodnoty proudů se zvyšují buď manuálně pomocí šipek nahoru a dolů, nebo automaticky.

8 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Tvar vypínací charakteristiky byl vypočten dle postupu uvedeného v předchozí kapitole a byl shodný pro všechna provedená měření. Specifika jednotlivých měření jsou popsána v následujícím textu v příslušných podkapitolách.

8.1. Měření při rozdílných trendech zkoušky

Prvním úkolem praktického měření bylo porovnání výsledků při různém nastavení zkoušky typu Trend. Nastavení trendu lze uskutečnit v okně, ve kterém se mimo jiné provádí zadávání hodnot jednotlivých proudů.

Provedena byla celkem čtyři měření (dvě na každé ochraně), přičemž krok proudu byl nastaven na 10 mA/ 0,5 s a ve druhém měření na 2 mA/ 0,5 s. Hodnota proudu takto rostla ve všech třech fázích na primární straně. Hodinový úhel byl nastaven dle zvoleného chráněného transformátoru, tedy YNd1.

V příloze jsou umístěny všechny tabulky naměřených hodnot i sestavené grafy. V následujícím textu jsou v kompletní podobě uvedeny pouze výsledky jednoho z měření na přístroji REF542plus a poté konečné srovnání výsledků.

Tabulka 8.1 zobrazuje naměřené hodnoty proudů při použití ochrany REF542plus, přičemž se hodnota proudu měnila ve všech třech fázích na primární straně o 10 mA za 0,5 s. I_1 označuje počáteční proud primární strany, I_2 proud strany sekundární. Proudů nastavovaných na testovacím zařízení OMICRON CMC 256 plus jsou však ovlivněny korekcí transformačního poměru, a proto se musí proudy I_1 a I_2 přepočítat podle vztahů (8.1) a (8.2).

$$I_{1om} = I_1 \cdot p_1 \quad (8.1)$$

$$I_{2om} = I_2 \cdot p_2 \quad (8.2)$$

Proud I_{1vyb} značí proud zaznamenaný testovacím zařízením při vybavení ochrany, I_d je rozdílový proud vypočtený podle rovnice (8.3) a I_b je stabilizační proud získaný z rovnice (8.4). Tomuto stabilizačnímu proudu odpovídá na křivce vypínací charakteristiky rozdílový proud I_{d_och} . Poslední sloupec tabulky ukazuje, o kolik se měřený rozdílový proud odchýlil od požadované hodnoty.

$$I_d = \frac{I_{1vyb}}{p_1} - I_2 \quad (8.3)$$

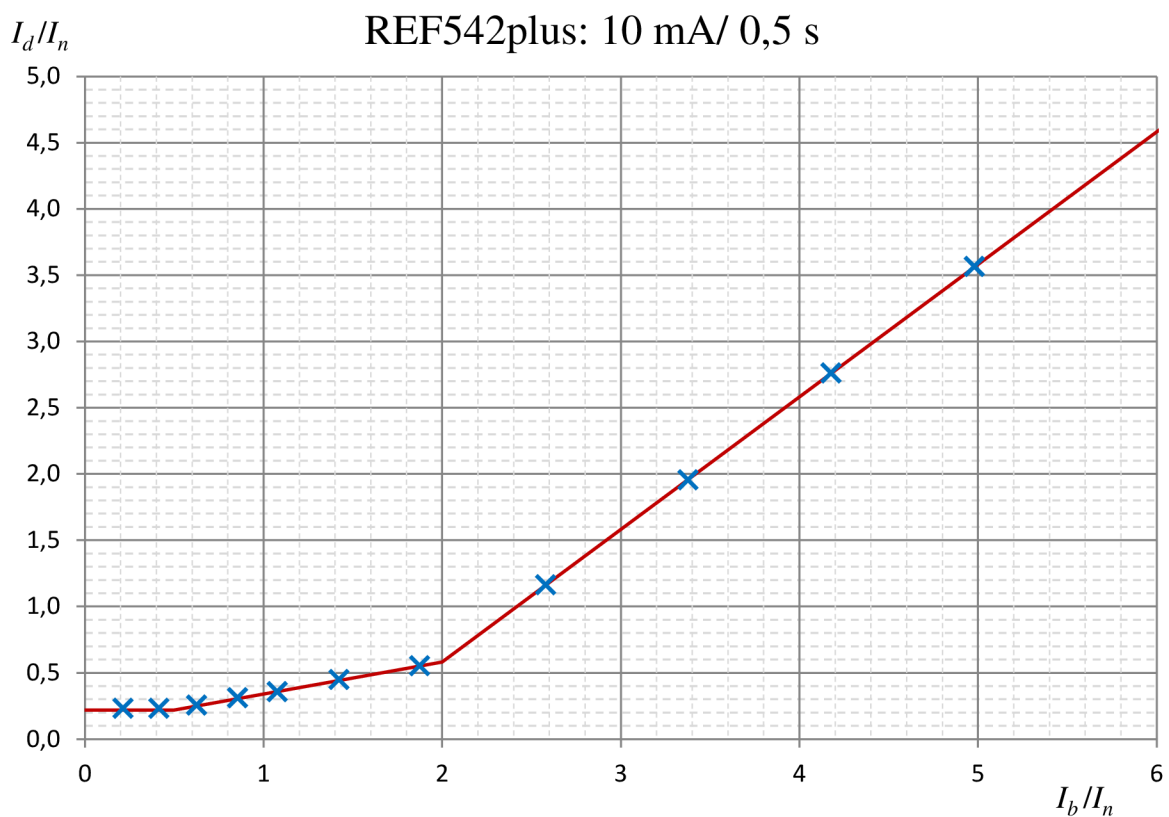
$$I_b = \frac{\frac{I_{1vyb}}{p_1} + I_2}{2} \quad (8.4)$$

Při hodinovém úhlu YNd1 se fázový posun sekundárního proudu první fáze nastaví na hodnotu -30° .

Tabulka 8.1: Měřené hodnoty pro trend 10 mA/ 0,5 s a změnu všech tří fází primární strany pro ochranu REF542plus

I_1 [A]	I_2 [A]	I_{1om} [A]	I_{2om} [A]	I_{Ivyb} [A]	I_d [A]	I_b [A]	I_{d_och} [A]	$I_d - I_{d_och}$ [A]
0,1	0,1	0,087	0,095	0,287	0,230	0,215	0,220	0,010
0,3	0,3	0,261	0,285	0,461	0,230	0,415	0,220	0,010
0,5	0,5	0,435	0,475	0,655	0,253	0,626	0,250	0,003
0,7	0,7	0,609	0,665	0,879	0,310	0,855	0,305	0,005
0,9	0,9	0,783	0,855	1,093	0,356	1,078	0,359	-0,003
1,2	1,2	1,044	1,140	1,434	0,448	1,424	0,442	0,006
1,6	1,6	1,392	1,520	1,872	0,552	1,876	0,550	0,002
2,0	2,0	1,740	1,900	2,750	1,161	2,580	1,160	0,001
2,4	2,4	2,088	2,280	3,788	1,954	3,377	1,957	-0,003
2,8	2,8	2,436	2,660	4,836	2,759	4,179	2,759	-0,000
3,2	3,2	2,784	3,040	5,884	3,563	4,982	3,562	0,001

Obr. 8.1 zachycuje grafické zobrazení měřených hodnot, přičemž červená křivka představuje nastavení vypínací charakteristiky v ochraně a modré značky reprezentují body vybavení ochrany.



Obr. 8.1: Vypínací charakteristika ochrany REF542plus pro trend 10 mA/ 0,5 s při změně proudu všech tří fází

Při nastavení drobnějšího kroku proudů testovacího zařízení bylo možno pozorovat zmenšení odchylky bodů vybavení ochrany od zadané vypínací křivky ($I_d-I_{d_{och}}$). Z toho tedy lze usoudit, že spolu s rostoucí velikostí skoku proudu roste též odchylka od požadované hodnoty rozdílového proudu.

Zmenšování velikosti kroku však nemusí nutně přinést přesnější působení ochrany. To demonstruje právě druhá polovina naměřených hodnot v případě použití ochrany REF542plus, kdy se odchylka od bodů ležících na křivce výrazně zvýšila oproti měření s nastavením většího kroku. Měření je trvale zatíženo chybou nejen samotné ochrany, ale rovněž nejistotou testovacího zařízení. Zatímco větší krok je schopen takto způsobené odchylky od vypínací charakteristiky přeskočit, při pomalém nárůstu proudu se již projeví. Při vyšších hodnotách stabilizačního proudu roste celková nejistota měření.

Tabulka 8.2 zobrazuje výsledky výpočtů těchto odchylek pro všechna čtyři měření.

Tabulka 8.2: Odchylky měřených hodnot od hodnot ležících na vypínací charakteristice

SPAD 346 C		REF542plus	
<i>Id-Id_{och} [A]</i>		<i>Id-Id_{och} [A]</i>	
10 mA/ 0,5s	2 mA/ 0,5 s	10 mA/ 0,5s	2 mA/ 0,5 s
0,010	0,001	0,010	0,003
0,010	0,003	0,010	0,003
0,004	0,001	0,003	-0,002
0,006	0,001	0,005	-0,001
0,010	0,000	-0,003	-0,003
0,009	0,000	0,006	-0,006
0,006	0,002	0,002	-0,006
0,031	0,003	0,001	-0,007
0,033	0,003	-0,003	-0,014
0,034	0,001	0,000	-0,014
0,041	x	0,001	-0,015

Odchylky měřených bodů od bodů ležících na křivce jsou ve všech případech velice malé, a proto lze prohlásit, že obě ochrany pracují téměř rovnocenně. Zařízení REF542plus však při vyšších hodnotách stabilizačního proudu dosahuje odchylek menších, než je tomu u přístroje SPAD 346 C.

8.2. Měření při změně proudu v jedné fázi

V tomto měření se nastavení vypínací charakteristiky nelišilo od nastavení v předchozím případě, rozdíl ale spočíval v tom, že zatímco dříve rostl proud z testovacího zařízení stejně ve všech třech fázích na primární straně, nyní zůstávala hodnota proudu ve druhé a třetí fázi na počáteční hodnotě a proud první fáze na primární straně vzrůstal o 10 mA za 0,5 s.

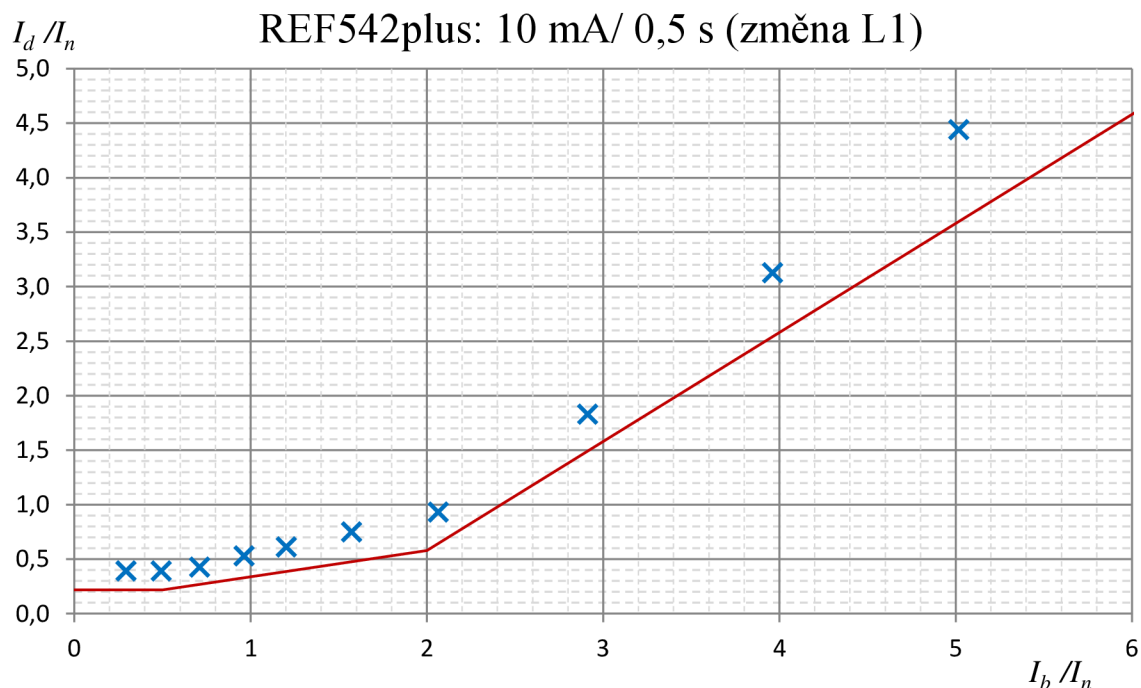
Ochrana by však měla správně vyhodnotit, že porucha nastává pouze v první fázi, a vybavit při rozdílovém proudu první fáze o stejné velikosti, jako tomu bylo v předchozím měření.

Při hodinovém úhlu YNd1 však ochrana vybavovala později než v případě růstu ve všech fázích. Stejný problém nastával při nastavení proudu druhé a třetí fáze na hodnotu 0 A (na primární i sekundární straně), kdy byl proud dodáván pouze jednofázově. V tomto případě se navíc vyskytl ten problém, že již u třetího měřeného bodu (stabilizační proud 0,5 A) ochrana vybavovala ihned po spuštění testu.

Naměřené hodnoty v *Tabulce 8.3* graficky zobrazuje *Obr. 8.2*.

Tabulka 8.3: Měřené hodnoty pro trend 10 mA/ 0,5 s a změnu jedné fáze primární strany pro ochranu REF542plus (proud dodáván do všech fází) – zapojení YNd1

I_1 [A]	I_2 [A]	I_{1om} [A]	I_{2om} [A]	I_{Llyb} [A]	I_d [A]	I_b [A]	I_{d_och} [A]
0,1	0,1	0,087	0,095	0,427	0,391	0,295	0,220
0,3	0,3	0,261	0,285	0,601	0,391	0,495	0,220
0,5	0,5	0,435	0,475	0,805	0,425	0,713	0,271
0,7	0,7	0,609	0,665	1,069	0,529	0,964	0,331
0,9	0,9	0,783	0,855	1,313	0,609	1,205	0,389
1,2	1,2	1,044	1,140	1,694	0,747	1,574	0,478
1,6	1,6	1,392	1,520	2,202	0,931	2,066	0,596
2,0	2,0	1,740	1,900	3,33	1,828	2,914	1,494
2,4	2,4	2,088	2,280	4,808	3,126	3,963	2,543
2,8	2,8	2,436	2,660	6,296	4,437	5,018	3,598
3,2	3,2	2,784	3,040	7,786	5,749	6,075	4,655



Obr. 8.2: Vypínací charakteristika ochrany REF542plus pro trend 10 mA/ 0,5 s při změně proudu jedné fáze

Měření tedy bylo provedeno pro jiná zapojení hodinového úhlu transformátoru. Poté, co se této skutečnosti přizpůsobilo nastavení obou ochran i fázová natočení proudů dodávaných testovacím zařízením, bylo provedeno měření, které mělo odhalit, zda se ochrana chová stejně i u dalších typů hodinového úhlu. Z měření vyplynulo, že pro některá zapojení se výsledky nelišily od výsledků obdržných v předchozí podkapitole, kdy se navyšoval proud ve všech třech fázích. V ostatních případech však body ležely nad křivkou vypínací charakteristiky stejně, jako to zobrazuje *Obr. 8.2*.

Tabulka uvádí, pro které hodinové úhly bylo měření provedeno. Zeleně jsou vyznačeny ty hodinové úhly, u nichž body vybavení ležely na křivce, červená barva značí zapojení, při nichž se objevil problém uvedený výše. Měření proběhlo na přístroji SPAD 346 C i REF542plus.

Tabulka 8.4: Vliv hodinového úhlu na funkci ochrany

YNd1
Yd1
YNyn0
Yy0
Yy6

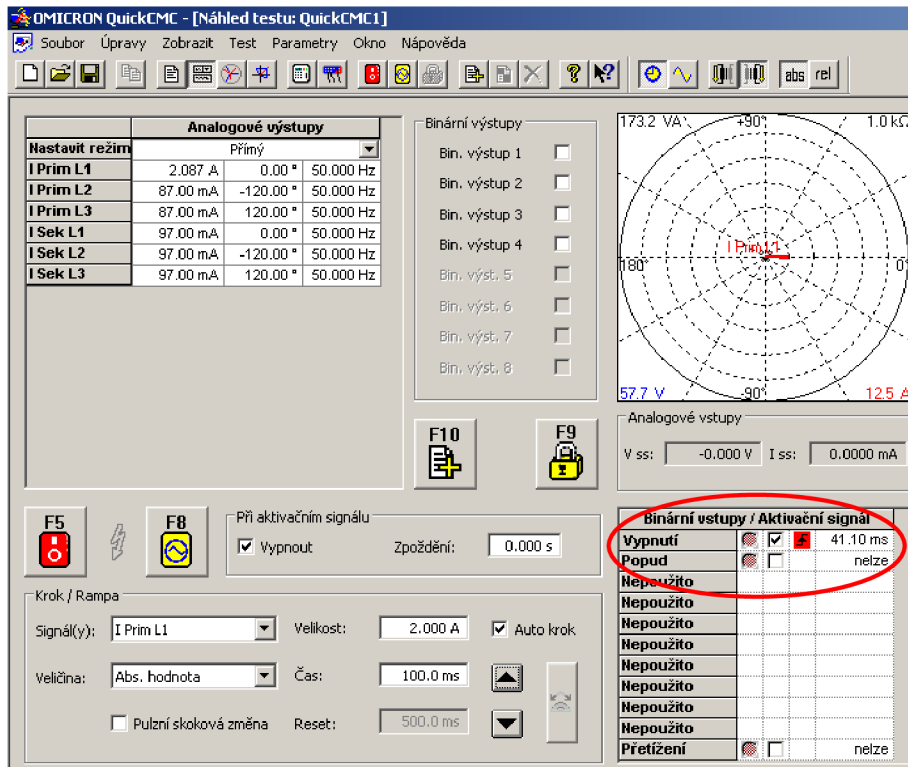
U měření s nepříznivými výsledky byl při otevření sekce *Measurement*, která je k dispozici v menu HMI jednotky ochrany REF542plus a v níž lze pozorovat současnou hodnotu rozdílového proudu v každé fázi, během měření zastoupen rozdílový proud nejen ve fázi L1, ale rovněž v jedné z fází dalších, ve které být neměl. Třetí fáze již měla diferenciální proud nulový.

Proč se při zvyšování proudu pouze jedné fáze výsledky liší od měření s růstem všech tří fází, přestože by ochrana měla vyhodnotit, ve které fázi se porucha nachází, se bohužel odhalit nepodařilo. K většímu pochopení by přispěla znalost algoritmu, podle kterého ochrana vyhodnocuje velikost rozdílového proudu.

8.3. Porovnání rychlosti působení ochran

Posledním úkolem bylo zjistit, zda je ochrana schopna rychle vybavit při skokové změně proudu. Pro hodinový úhel Yy0 byl krok proudu nastaven na 2 A za 100 ms (nejkratší nastavitelný časový úsek). Proud se o tuto hodnotu zvyšoval pouze v první fázi na primární straně.

Při tomto nastavení vybavila ochrana již při prvním kroku proudu (jak zobrazuje *Obr. 8.3*). Čas vypnutí je uveden v pravé dolní části okna. Pro objektivnější zhodnocení výsledků bylo měření provedeno desetkrát pro obě ochrany. Výsledky jsou uvedeny v *Tabulce 8.5*.



Obr. 8.3: Měření rychlosti vypnutí

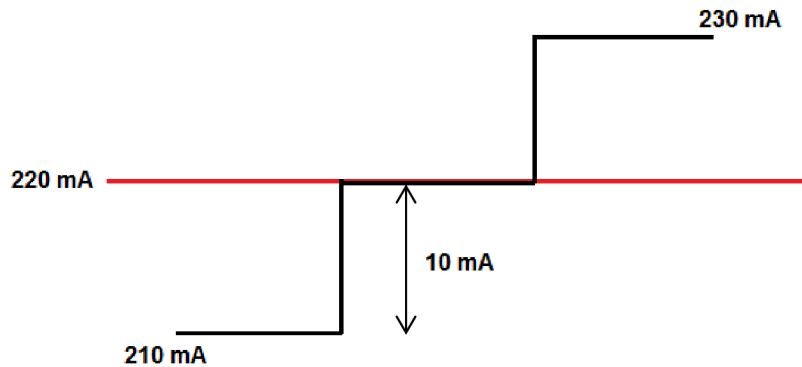
Tabulka 8.5: Záznam časů vybavení ochran

SPAD 346 C	REF542plus
Čas vybavení [ms]	
37,3	47,7
38,7	45,7
41,5	43,3
37,8	41,9
37,4	47,8
38,5	46,2
37,1	43,0
38,1	44,5
40,3	43,0
40,7	41,1
Průměrná hodnota času vybavení [ms]	
38,74	44,43

Z výsledků vyplývá, obě ochrany jsou schopny rychle vypínat i prudký nárůst proudu. Z porovnání vychází, že vypínací časy ochrany SPAD 346 C jsou o několik milisekund kratší. Větší rozdíl nicméně mezi oběma přístroji není.

8.4. Celkové zhodnocení výsledků

Strmost trendu zkoušky ovlivňuje přesnost, s jakou budou body vybavení ležet na vypínací křivce. Zdůvodnění lze snadno ukázat na *Obr 8.4*. V první části charakteristiky je trvale dovolený rozdílový proud nastaven na 22 % jmenovité hodnoty. Při jmenovité hodnotě rovné 1 A je tedy křivka charakteristiky nastavena na 220 mA (červená přímka). Roste-li proud skokově po 10 mA, dojde k vybavení ochrany nad touto hladinou, tedy na hodnotě rozdílového proudu 230 mA.



Obr. 8.4: Průběh proudu zkoušky

V ostatních částech charakteristiky, kdy přímky rostou s určitou strmostí, mohou odchylky měřených bodů nabývat i menších hodnot než 10 mA. Při vyšších stabilizačních proudech se však projevují další nejistoty zkreslující měření.

Nižší hodnota skoku proudu posouvá bod vybavení blíže ke křivce charakteristiky, zároveň však existuje riziko, že se vlivem chyb posune bod vybavení pod křivku, tedy do oblasti, ve které ochrana působit nesmí. Odchyłka se však pohybuje v nízkých řádech a na funkčnosti ochrany neubírá.

Co do schopnosti chránit transformátor rozdílovou ochranou jsou přístroje SPAD 346 C i REF542plus takřka rovnocenné. Hlavní rozdíly spočívají zejména v uživatelské přívětivosti. Nastavení prvně jmenované ochrany je totiž o poznání snazší než konfigurace přístroje REF542plus. I s již sestaveným funkčním schématem rozdílové ochrany je samotné zadávání parametrů časově náročnější a komplexnější, což se však může v jistých aplikacích prokazovat naopak jako výhoda.

9 ZÁVĚR

Úvodní část této bakalářské práce se zabývala obecnou teorií chránění transformátoru. Byly uvedeny základní způsoby chránění nejen ve vztahu k poruše, ale též v souvislosti s vlastnostmi samotného transformátoru. Největší pozornost byla věnována rozdílové ochraně, přičemž pochopení jejího principu se stalo základním kamenem celé teoretické části práce.

Rozdílová ochrana porovnává proudy, které do ní vstupují, a vyhodnocuje jejich rozdíl. Překročí-li hodnota tohoto rozdílu nastavené meze, které určuje nastavená vypínací charakteristika, ochrana vybaví. Proud se do ochrany přivádějí za využití jistících transformátorů proudu, jejichž primární proudy by měly co nejlépe odpovídat skutečnému proudu, který protéká vodičem v dané části chráněné oblasti.

Pro konkrétní výkonový transformátor byla navržena vypínací charakteristika rozdílové ochrany. Jako zařízení ochrany se k dispozici nabídly přístroje od firmy ABB SPAD 346 C a REF542plus, úlohu testovacího zařízení zastoupil přístroj OMICRON CMC 256plus. Zadávání parametrů samotné vypínací charakteristiky i velikostí protékajících proudů se uskutečnilo prostřednictvím počítače.

Zvyšování proudu probíhalo po nastavených krocích. Na přístroji OMICRON CMC 256plus lze zadávat nejen hodnotu, o jakou se proud při každém kroku zvětší či zmenší, ale též dobu, za kterou tak učiní. Vypínací charakteristika obou ochran tedy byla proměřena pro dva různé trendy zkoušky, přičemž z výsledků vyplynulo, že menší skokové změny proudu umožňují dosažení vyšší přesnosti, s jakou body vypnutí leží na zadané křivce vypínací charakteristiky.

Při měření vypínací charakteristiky, kdy se zvyšoval proud pouze jedné fáze primární strany, se podařilo dosáhnout stejných výsledků, jako při změně proudu ve třech fázích, pouze v případech, kdy žádná ze stran transformátoru nebyla zapojena do trojúhelníka ani nebyla uzemněna. Přestože příčina těchto problémů objasněna nebyla, znalost způsobu vyhodnocení rozdílového proudu zařízením ochrany by mohla k odhalení odpovědi značně dopomoci.

Porovnání výsledků z měření na přístrojích SPAD 346 C a REF542plus přineslo zjištění, že obě ochrany pracují takřka rovnocenně a je tudíž možné obě dvě použít pro chránění transformátoru rozdílovou ochranou. Největší rozdíl spočíval v uživatelském rozhraní a způsobech zadávání jednotlivých parametrů vypínací charakteristiky.

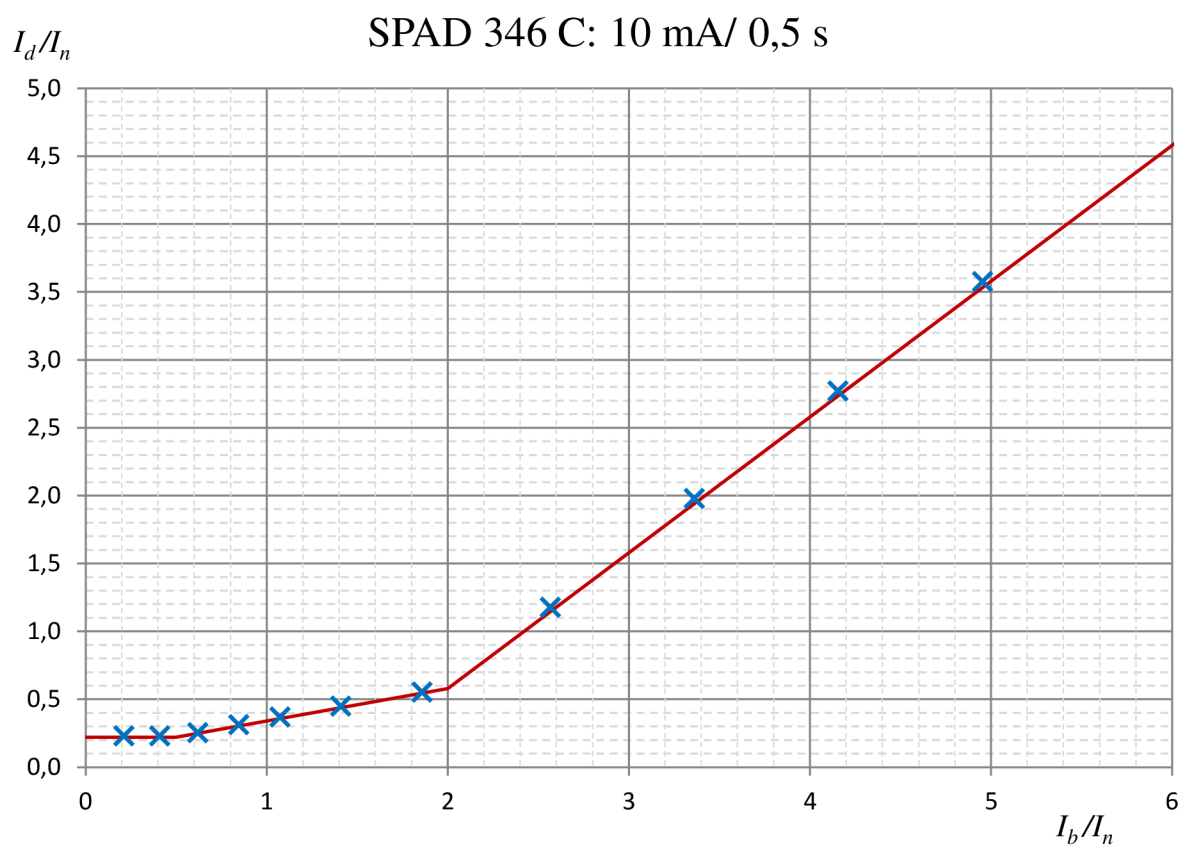
10 REFERENCE

- [1] HALUZÍK, Evžen. *Ochrany a automatiky v elektrických sítích*. 1. vyd. Brno: VUT, 1986, 160 s.
- [2] DOHNÁLEK, Petr. *Ochrany pro průmysl a energetiku*. 2. přepr.vyd. Praha: SNTL, 1991, 339 s. ISBN 80-030-0630-9.
- [3] *Digitálne ochrany v elektrizačnej sústave*. 1. vyd. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2004, 360 s. ISBN 80-227-2135-2.
- [4] CHMELÍK, Karel et al. *Chránění III: elektrická zařízení vysokého napětí*. Havířov: IRIS, 2005, 279 s. ISBN 80-903540-5.
- [5] ABB. *SPAD 346 C Stabilized Differential Relay: User's manual and Technical description*. 2002. 178 s. Document ID: 1MRS 750096-MUM EN.
- [6] ABB. *REF542plus: Multifunkční terminál chránění a ovládání pole rozvodny*. 62 s. Document ID: 1VTA 100001- Rev. L, cs – Release 2.0 – SP1 – SW verze V4D02 – 2004.06.
- [7] OMICRON. *CMC 256plus: The High Precision Relay Test Set and Universal Calibrator* [online]. 2013 [cit. 2015-01-04]. Dostupné z: https://www.omicron.at/fileadmin/user_upload/pdf/literature/CMC-256plus-Brochure-ENU.pdf

PŘÍLOHA – MĚŘENÉ HODNOTY

Tabulka A - 1: Měřené hodnoty pro trend 10 mA/ 0,5 s a změnu všech tří fází primární strany pro ochranu SPAD 346 C

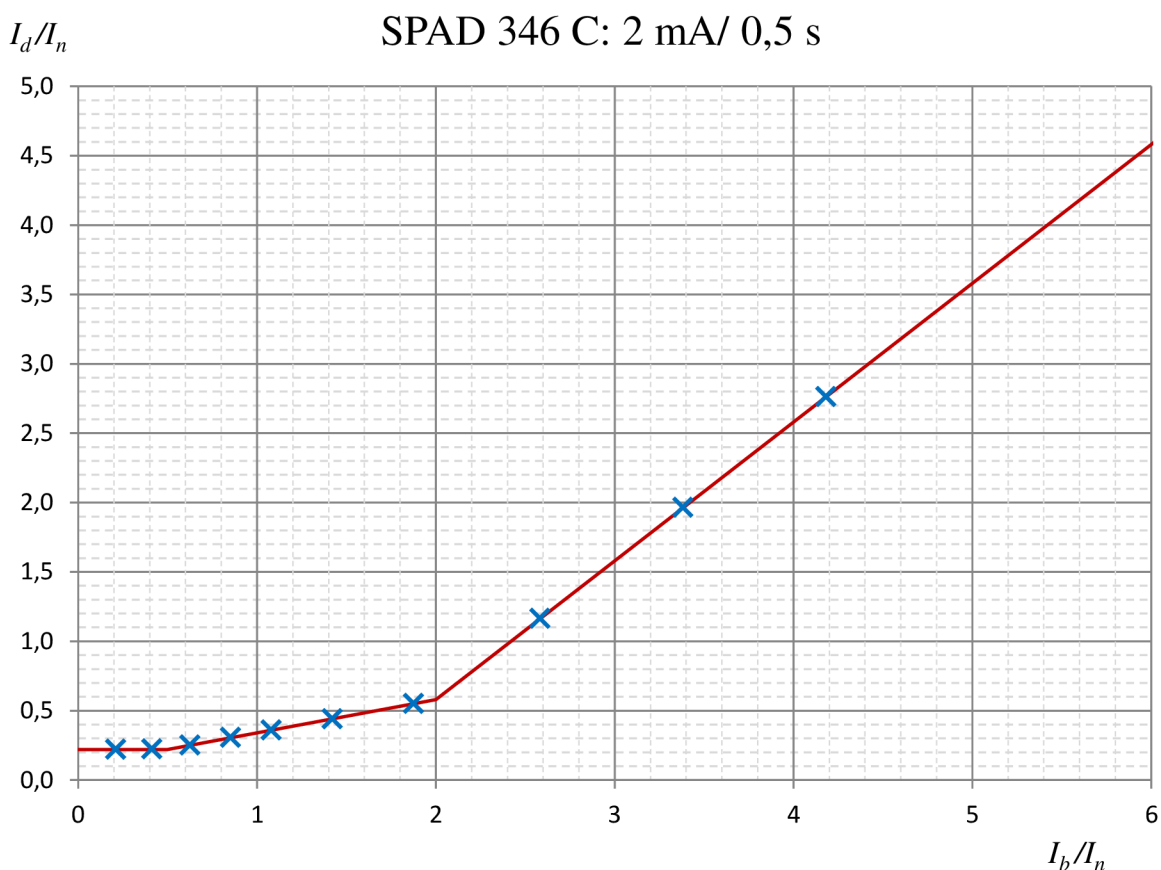
I_1 [A]	I_2 [A]	I_{1om} [A]	I_{2om} [A]	I_{1vyb} [A]	I_d [A]	I_b [A]	I_{d_och} [A]	$I_d - I_{d_och}$ [A]
0,1	0,1	0,087	0,095	0,287	0,230	0,214	0,220	0,010
0,3	0,3	0,261	0,285	0,461	0,230	0,412	0,220	0,010
0,5	0,5	0,435	0,475	0,655	0,253	0,621	0,249	0,004
0,7	0,7	0,609	0,665	0,879	0,310	0,848	0,304	0,006
0,9	0,9	0,783	0,855	1,103	0,368	1,075	0,358	0,010
1,2	1,2	1,044	1,140	1,434	0,448	1,412	0,439	0,009
1,6	1,6	1,392	1,520	1,872	0,552	1,859	0,546	0,006
2,0	2,0	1,740	1,900	2,764	1,177	2,568	1,146	0,031
2,4	2,4	2,088	2,280	3,808	1,977	3,364	1,944	0,033
2,8	2,8	2,436	2,660	4,846	2,770	4,156	2,736	0,034
3,2	3,2	2,784	3,040	5,894	3,575	4,954	3,534	0,041



Obr. A - 1: Vypinací charakteristika ochrany SPAD 346 C pro trend 10 mA/ 0,5 s při změně proudu všech tří fází

Tabulka A - 2: Měřené hodnoty pro trend 2 mA/ 0,5 s a změnu všech tří fází primární strany pro ochranu SPAD 346 C

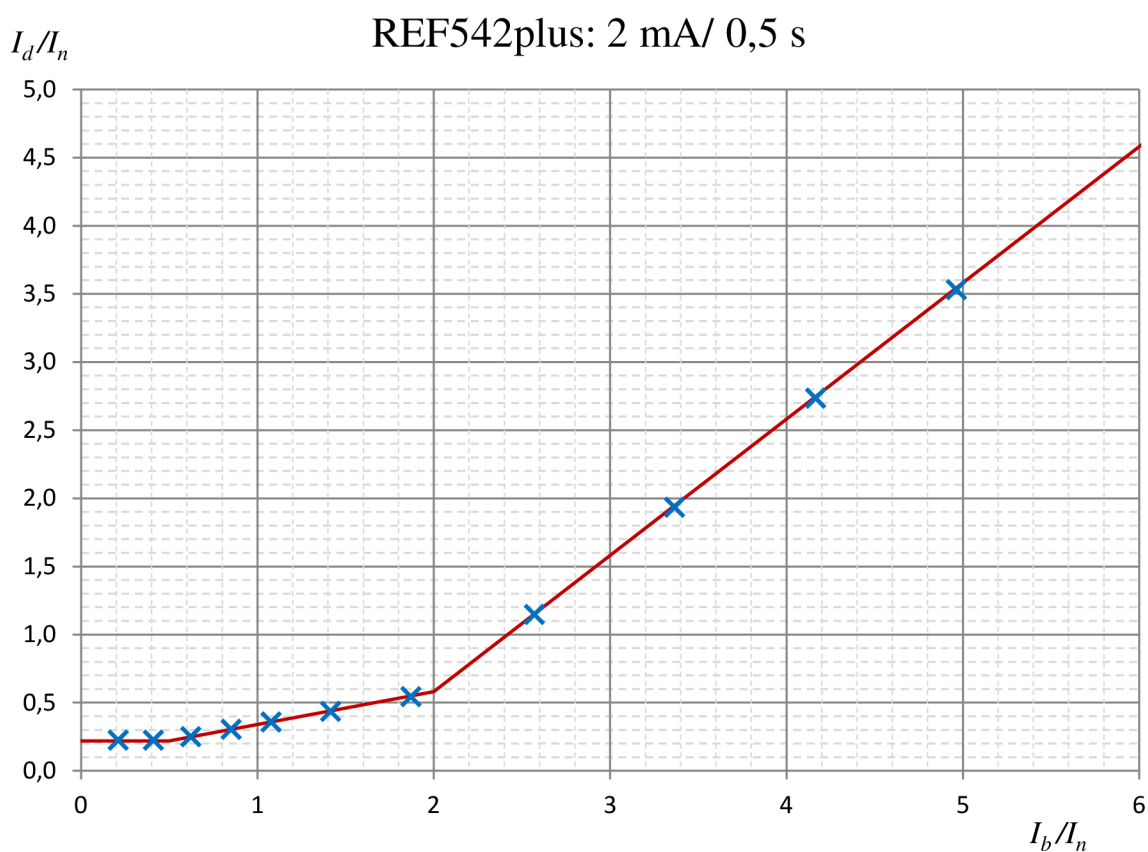
I_1 [A]	I_2 [A]	I_{1om} [A]	I_{2om} [A]	I_{1vyb} [A]	I_d [A]	I_b [A]	I_{d_och} [A]	$I_d - I_{d_och}$ [A]
0,1	0,1	0,087	0,095	0,279	0,221	0,210	0,220	0,001
0,3	0,3	0,261	0,285	0,455	0,223	0,411	0,220	0,003
0,5	0,5	0,435	0,475	0,653	0,251	0,625	0,250	0,001
0,7	0,7	0,609	0,665	0,875	0,306	0,853	0,305	0,001
0,9	0,9	0,783	0,855	1,095	0,359	1,079	0,359	0,000
1,2	1,2	1,044	1,140	1,428	0,441	1,421	0,441	0,000
1,6	1,6	1,392	1,520	1,872	0,552	1,876	0,550	0,002
2,0	2,0	1,740	1,900	2,754	1,166	2,583	1,163	0,003
2,4	2,4	2,088	2,280	3,798	1,966	3,383	1,963	0,003
2,8	2,8	2,436	2,660	4,84	2,763	4,182	2,762	0,001
3,2	3,2	2,784	3,040	Vybavila ochrana SPCJ 4D28 (nadproudová a zemní)				



Obr. A - 2: Vypínací charakteristika ochrany SPAD 346 C pro trend 2 mA/ 0,5 s při změně proudu všech tří fází

Tabulka A - 3: Měřené hodnoty pro trend 2 mA/ 0,5 s a změnu všech tří fází primární strany pro ochranu REF542plus

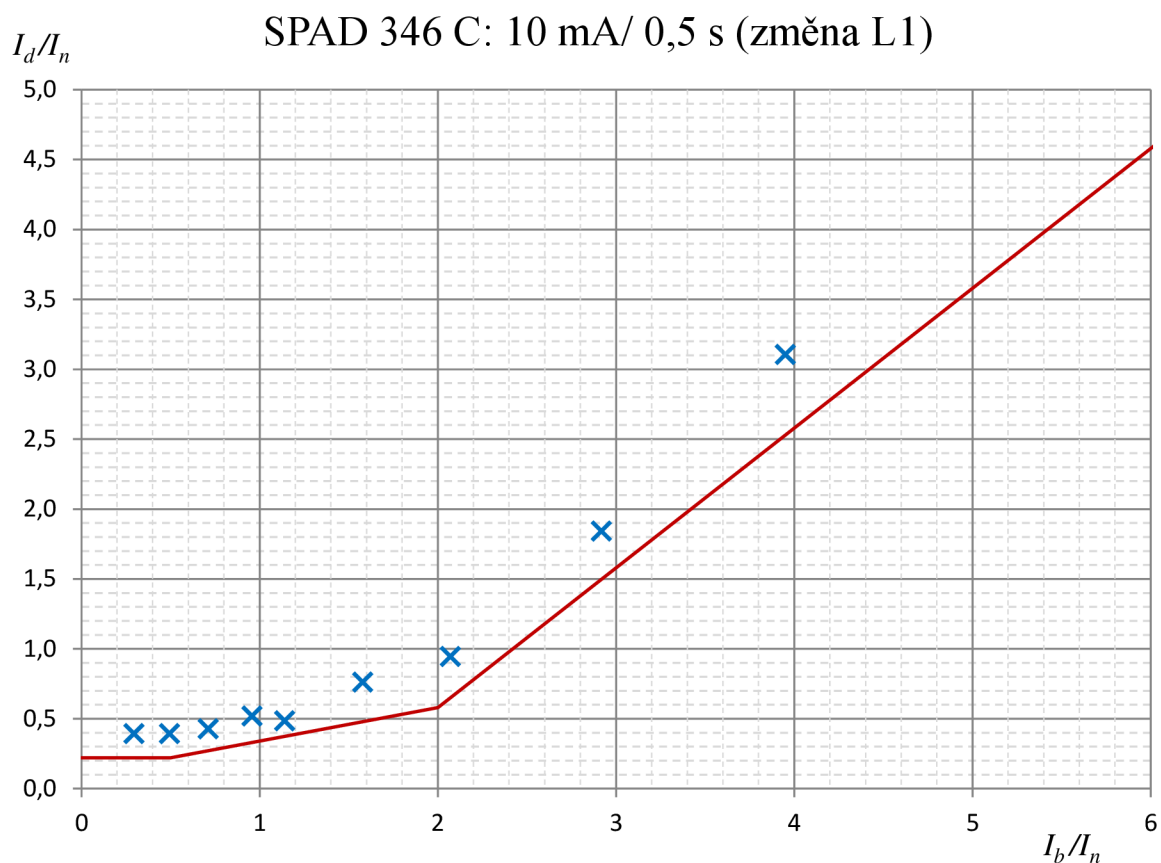
I_1 [A]	I_2 [A]	I_{1om} [A]	I_{2om} [A]	I_{Ivyb} [A]	I_d [A]	I_b [A]	I_{d_och} [A]	$I_d - I_{d_och}$ [A]
0,1	0,1	0,087	0,095	0,281	0,223	0,211	0,220	0,003
0,3	0,3	0,261	0,285	0,455	0,223	0,411	0,220	0,003
0,5	0,5	0,435	0,475	0,651	0,248	0,624	0,250	-0,002
0,7	0,7	0,609	0,665	0,873	0,303	0,852	0,304	-0,001
0,9	0,9	0,783	0,855	1,093	0,356	1,078	0,359	-0,003
1,2	1,2	1,044	1,140	1,422	0,434	1,417	0,440	-0,006
1,6	1,6	1,392	1,520	1,864	0,543	1,871	0,549	-0,006
2,0	2,0	1,740	1,900	2,736	1,145	2,572	1,152	-0,007
2,4	2,4	2,088	2,280	3,77	1,933	3,367	1,947	-0,014
2,8	2,8	2,436	2,660	4,814	2,733	4,167	2,747	-0,014
3,2	3,2	2,784	3,040	5,854	3,529	4,964	3,544	-0,015



Obr. A - 3: Vypínací charakteristika ochrany REF542plus pro trend 2 mA/ 0,5 s při změně proudu všech tří fází

Tabulka A - 4: Měřené hodnoty pro trend 10 mA/ 0,5 s a změnu jedné fáze primární strany pro ochranu SPAD 346 C (proud dodáván do všech fází) – zapojení YNd1

I_1 [A]	I_2 [A]	I_{1om} [A]	I_{2om} [A]	I_{L1vyb} [A]	I_d [A]	I_b [A]	I_{d_och} [A]
0,1	0,1	0,087	0,095	0,427	0,391	0,295	0,220
0,3	0,3	0,261	0,285	0,601	0,391	0,495	0,220
0,5	0,5	0,435	0,475	0,805	0,425	0,713	0,271
0,7	0,7	0,609	0,665	1,059	0,517	0,959	0,330
0,9	0,9	0,783	0,855	1,203	0,483	1,141	0,374
1,2	1,2	1,044	1,140	1,704	0,759	1,579	0,479
1,6	1,6	1,392	1,520	2,212	0,943	2,071	0,597
2,0	2,0	1,740	1,900	3,34	1,839	2,920	1,500
2,4	2,4	2,088	2,280	4,788	3,103	3,952	2,532



Obr. A - 4: Vypínací charakteristika ochrany SPAD 346 C pro trend 10 mA/ 0,5 s při změně proudu jedné fáze