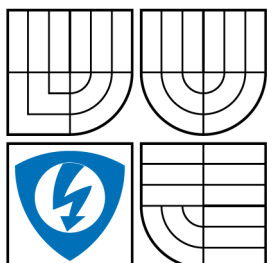


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

DIMENZOVÁNÍ PŘÍSTROJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ PRO DIGITÁLNÍ OCHRANY

DESIGN OF INSTRUMENT TRANSFORMERS FOR DIGITAL PROTECTION RELAYS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

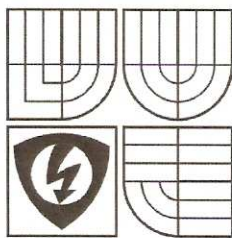
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JAN SOUČEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. PETR TOMAN, Ph.D.

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor

Elektroenergetika

Student: Souček Jan, Bc.

Ročník: 2

ID: 83240

Akademický rok: 2008/09

NÁZEV TÉMATU:

Dimenzování přístrojových transformátorů pro digitální ochrany

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Obecná teorie pro připojení ochrany a automatik na přístrojové transformátory, doporučení výrobců digitálních ochrany a požadavky norem ČSN a PNE.
2. Stanovení požadavků na dimenzování přístrojových transformátorů a přívodního vedení pro nejběžnější typy digitálních ochrany.
3. Praktický výpočet návrhu parametrů přístrojového transformátoru a přívodního vedení pro konkrétní zadanou ochranu a chráněné zařízení.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího.

Termín zadání: 9.2.2009

Termín odevzdání: 25.5.2009

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

Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

předseda oborové rady



UPOZORNĚNÍ:

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

Bibliografická citace práce:

SOUČEK, J. *Dimenzování přístrojových transformátorů pro digitální ochrany*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 81 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Diplomová práce

Dimenzování přístrojových transformátorů pro digitální ochrany

Bc. Jan Souček

vedoucí: doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2009

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Electrical Power Engineering**

Master's Thesis

Design of instrument transformers for digital protection relays

by

Bc. Jan Souček

Supervisor: doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Brno University of Technology, 2009

Brno

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá přístrojovými transformátory, které se používají ve spojení s číslicovými ochranami. Především tedy jistícími transformátory třídy P a transformátory dimenzovanými pro přechodové jevy, které jsou důležité např. pro rychlé diferenciální nebo distanční ochrany.

V úvodní části práce jsou zahrnuty základní pojmy, veličiny a vztahy, které se týkají přístrojových transformátorů, proudu a napětí. Dále jsou uvedena schémata zapojení těchto transformátorů vhodná pro konkrétní typy sítí a poruch, které je potřeba identifikovat. Tato schémata a poruchy jsou doplněna matematickými vztahy, případně fázorovými diagramy. Uvedené informace odpovídají současným normám.

Úkolem další části je zpracovat požadavky na dimenzování přístrojových transformátorů proudu, které kladou digitální ochrany firem ABB, AREVA a Siemens. Tyto požadavky, které většinou určují minimální nadproudové číslo nebo limitní napětí přístrojového transformátoru proudu, jsou rozepsány pro jednotlivé ochranné terminály, případně pro konkrétní ochranné funkce.

Součástí práce je počítačový program, zpracovaný formou makra v programu Microsoft Office Excel pomocí programovacího jazyka Visual Basic for Applications. Program využívá vztahy uvedené v této práci a lze ho použít pro rychlé dimenzování přístrojových transformátorů proudu pro ochranné terminály uvedených výrobců.

KLÍČOVÁ SLOVA: Dimenzování; Požadavky; Přístrojový transformátor proudu; Přístrojový transformátor napětí; Digitální ochrana; Nadproudové číslo; Limitní napětí; Program

ABSTRACT

Master's thesis is concerned with instrument transformers, which are used in conjunction with numerical protection relays. Therefore mainly with protective transformers of class P and transformers dimensioned for transient effects, which are important e.g. for fast differential or distance protections.

The introduction includes fundamental notions, quantities and equations, which refers to instrumental current and voltage transformers. Below are mentioned connection diagrams of these transformers applied to specific electrical network types and faults, of which identification is required. These diagrams and faults are supplied with math equations and eventually with phasor diagrams. Noted informations corresponds to the present standards.

Task of the next part is to compile requirements for dimensioning of current transformers, which imposes digital protections from ABB, AREVA and Siemens companies. These requirements, which mostly defines the minimal accuracy limit factor or the knee-point voltage of current transformer, are specified for individual protection terminals, eventually for specific protective functions.

Part of the thesis is computer program developed as macro in the Microsoft Office Excel program via Visual Basic for Applications programming language. Program uses equations noted in this work and it can be used for quick dimensioning of current transformers for protective terminals from manufactures mentioned above.

KEY WORDS: Dimensioning; Requirements; Current Transformer; Voltage Transformer; Digital protection; Accuracy Limit Factor; Knee-Point Voltage; Program

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	11
SEZNAM TABULEK	13
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	14
1 ÚVOD A ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ PŘÍSTROJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ	17
2 PŘÍSTROJOVÉ TRANSFORMÁTORY PROUDU	19
2.1 ROZDĚLENÍ PŘÍSTROJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ PROUDU	19
2.2 ZÁKLADNÍ POJMY JISTICÍCH TRANSFORMÁTORŮ PROUDU.....	20
2.3 PŘÍSTROJOVÉ TRANSFORMÁTORY PROUDU V NADPROUDOVÉ OBLASTI.....	23
2.4 TRANSFORMÁTORY PROUDU PRO PŘECHODOVÉ JEVY	24
2.5 PROUDOVÉ SENZORY	28
2.6 ELEKTRONICKÉ TRANSFORMÁTORY PROUDU	28
2.7 ZAPOJENÍ PŘÍSTROJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ PROUDU DO OBVODŮ NAPÁJENÍ OCHRAN	29
2.7.1 ZAPOJENÍ PŘÍSTROJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ PROUDU DO ÚPLNÉ HVĚZDY	29
2.7.2 ZAPOJENÍ PŘÍSTROJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ PROUDU DO NEÚPLNÉ HVĚZDY	30
2.7.3 ZAPOJENÍ PŘÍSTROJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ PROUDU DO TROJÚHELNÍKA	31
2.7.4 SOUČTOVÉ ZAPOJENÍ PŘÍSTROJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ PROUDU	32
3 PŘÍSTROJOVÉ TRANSFORMÁTORY NAPĚTÍ	34
3.1 ZÁKLADNÍ POJMY PŘÍSTROJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ NAPĚTÍ.....	34
3.2 KAPACITNÍ TRANSFORMÁTORY NAPĚTÍ.....	36
3.3 NAPĚŤOVÉ SENZORY	37
3.4 ELEKTRONICKÉ TRANSFORMÁTORY NAPĚTÍ.....	38
3.5 ZAPOJENÍ PŘÍSTROJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ NAPĚTÍ	38
3.5.1 JEDNOFÁZOVÉ JEDNOPÓLOVĚ IZOLOVANÉ TRANSFORMÁTORY NAPĚTÍ.....	38
3.5.2 DVOUPÓLOVĚ IZOLOVANÉ TRANSFORMÁTORY NAPĚTÍ	41
4 POŽADAVKY NA DIMENZOVÁNÍ TRANSFORMÁTORŮ PROUDU.....	43
4.1 POŽADAVKY NA PTP PRO OCHRANY SIEMENS	44
4.1.1 NADPROUDOVÉ OCHRANY	45
4.1.2 DIFERENCIÁLNÍ OCHRANY	45
4.1.3 DISTANČNÍ OCHRANY	47
4.2 POŽADAVKY NA PTP PRO OCHRANY ABB	48
4.2.1 NADPROUDOVÉ OCHRANY A OCHRANY PŘI ZEMNÍCH PORUCHÁCH	48
4.2.2 DIFERENCIÁLNÍ OCHRANY	49
4.2.3 DISTANČNÍ OCHRANY	52
4.3 POŽADAVKY NA PTP PRO OCHRANY AREVA	52
4.3.1 NADPROUDOVÉ OCHRANY A TERMINÁLY PRO ŘÍZENÍ NAPÁJEČŮ.....	53
4.3.2 OCHRANY MOTORŮ.....	59
4.3.3 OCHRANY GENERÁTORŮ.....	62
4.3.4 DIFERENCIÁLNÍ OCHRANY TRANSFORMÁTORŮ	65

4.3.5 OCHRANY PŘÍPOJNIC.....	66
4.3.6 DIFERENCIÁLNÍ A SROVNÁVACÍ OCHRANY VEDENÍ.....	67
4.3.7 DISTANČNÍ OCHRANY	69
5 PROGRAM PRO DIMENZOVÁNÍ PTP	72
5.1 OKNO PARAMETRŮ OCHRAN, OCHRANNÝCH FUNKCÍ A ZKRATOVÝCH POMĚRŮ	73
5.1.1 OKNO OCHRAN SIEMENS	73
5.1.2 OKNO OCHRAN ABB.....	74
5.1.3 OKNO OCHRAN AREVA	75
5.2 OKNO PARAMETRŮ PTP, PŘÍVODU A PŘÍDAVNÉ ZÁTĚŽE.....	76
5.3 OKNO PRO KONTROLU DIMENZOVÁNÍ.....	77
6 ZÁVĚR.....	79
POUŽITÁ LITERATURA	80

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2-1</i> Sčítací transformátor proudu	19
<i>Obr. 2-2</i> Dvoujádrový transformátor proudu se dvěma výstupy.....	19
<i>Obr. 2-3</i> Transformátor proudu s pomocným autotransformátorem a dvěma výstupy.....	19
<i>Obr. 2-4</i> Proudová charakteristika transformátoru proudu pro různá vnější břemena	21
<i>Obr. 2-5</i> Úhlová chyba transformátoru proudu.....	23
<i>Obr. 2-6</i> Nadproudová charakteristika transformátoru proudu 1-pro účely měření 2-pro účely jistění	23
<i>Obr. 2-7</i> Zapojení přístrojových transformátorů proudu do úplné hvězdy.....	29
<i>Obr. 2-8</i> Zapojení přístrojových transformátorů proudu do neúplné hvězdy	31
<i>Obr. 2-9</i> Zapojení přístrojových transformátorů proudu do trojúhelníka	32
<i>Obr. 2-10</i> Součtové zapojení transformátorů proudu	33
<i>Obr. 3-1</i> Kapacitní přístrojový transformátor napětí	37
<i>Obr. 3-2</i> Zapojení jednopólově izolovaných transformátorů napětí.....	39
<i>Obr. 3-3</i> Fázorový diagram primárních napětí sítě při jednofázovém zemním spojení ve fázi L1	40
<i>Obr. 3-4</i> Fázorový diagram sekundárních napětí PTN při jednofázovém zemním spojení ve fázi L1.....	40
<i>Obr. 3-5</i> Fázorový diagram primárních napětí sítě při jednofázovém zemním zkratu ve fázi L1..	41
<i>Obr. 3-6</i> Fázorový diagram sekundárních napětí PTN při jednofázovém zemním zkratu ve fázi L1	41
<i>Obr. 3-7</i> Zapojení dvoupólově izolovaných přístrojových transformátorů napětí pro měření a jistění	42
<i>Obr. 4.1</i> Distanční ochrana.....	47
<i>Obr. 4.2</i> Zapojení PTP pro ochranu transformátoru.....	50
<i>Obr. 4.3</i> Detektor nasycení.....	52
<i>Obr. 4.4</i> Zemní ochrana pro neuzemněné sítě nebo pro sítě uzemněné přes vysokou impedanci – funkce SEF.....	58
<i>Obr. 4.5</i> Zemní ochrana při vnitřních poruchách v uzemněných soustavách – vysokoimpedanční REF.....	59
<i>Obr. 5.1</i> Program Dimenzování PTP pro digitální ochrany.....	72
<i>Obr. 5.2</i> Okno ochran Siemens	73
<i>Obr. 5.3</i> Zápis parametrů pro diferenciální ochrany v listu Ochrany Siemens.....	73
<i>Obr. 5.4</i> Okno ochran ABB	74
<i>Obr. 5.5</i> Okno ochran AREVA	75
<i>Obr. 5.6</i> Okno parametrů PTP, přívodu a přídatné zátěže	76

<i>Obr. 5.7 Okno nastavení.....</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 5.8 Okno přídatné zátěže.....</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 5.9 Okno pro kontrolu dimenzování – příklad pro nadproudové ochrany Siemens</i>	<i>78</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 2-1 Dovolené chyby proudu jistících transformátorů proudu.....</i>	<i>23</i>
<i>Tab. 2-2 Dovolené chyby pro transformátory proudu třídy TPX, TPY a TPZ [4].....</i>	<i>25</i>
<i>Tab. 3-1 Dovolené chyby napětí jistících transformátorů napětí.....</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 4-1 Činitel K_{td} pro diferenciální ochrany Siemens.....</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 4-2 Činitelé $K_{td(a)}$ a $K_{td(b)}$ pro distanční ochrany Siemens.....</i>	<i>47</i>
<i>Tab. 4-3 Proudové obvody ochrany P111.....</i>	<i>53</i>
<i>Tab. 4-4 Proudové obvody ochran P120 – P123, P125 – P127.....</i>	<i>53</i>
<i>Tab. 4-5 Specifikace PTP pro ochrany P120 – P123, P125 – P127, P130C, P132, P138, P139, P141 – P145.....</i>	<i>54</i>
<i>Tab. 4-6 Proudové obvody ochrany P124.....</i>	<i>54</i>
<i>Tab. 4-7 Proudové obvody ochran P141 – P145.....</i>	<i>55</i>
<i>Tab. 4-8 Proudové obvody ochran P220, P225.....</i>	<i>60</i>
<i>Tab. 4-9 Doporučení pro zapojení PTP.....</i>	<i>60</i>
<i>Tab. 4-10 Doporučení pro dimenzování PTP.....</i>	<i>61</i>
<i>Tab. 4-11 Proudové obvody ochran P241 – P243, P341 – P344.....</i>	<i>61</i>
<i>Tab. 4-12 Specifikace PTP pro ochrany P241 – P243, P341.....</i>	<i>61</i>
<i>Tab. 4-13 Proudové obvody ochran P741 – P743.....</i>	<i>66</i>
<i>Tab. 4-14 Proudové obvody ochrany P521.....</i>	<i>67</i>
<i>Tab. 4-15 Proudové obvody ochran P541 – P546, P547.....</i>	<i>68</i>
<i>Tab. 4-16 Proudové obvody ochran P441, P442, P444, P443, P445 (MiCOMho).....</i>	<i>70</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Značka	Význam	Značka jednotky
A	Proudový člen	
A	Průřez přívodního vedení	mm ²
A _{L1}	Proudový člen fáze L1	
A _{L2}	Proudový člen fáze L2	
A _{L3}	Proudový člen fáze L3	
A _N	Proudový člen ve středním vodiči	
B	Susceptance přívodních vodičů	S
C ₁	Kondenzátor kapacitního děliče	F
C ₂	Kondenzátor kapacitního děliče	F
CTFactor	Koeficient pro diferenciální ochrany ABB	-
E _{al}	Jmenovitá ekvivalentní dovolená sekundární elektromotorická síla	V
E _{alreq}	Minimální hodnota sekundární elektromotorické síly	V
E _k	Limitní napětí	V
G	Konduktance přívodních vodičů	S
I ₀	Netočivá složka proudu	A
I ₁	Sousledná složka proudu; Primární proud	A
I _{1n}	Jmenovitý primární proud	A
I _{1z}	Jmenovitý primární zkratový proud	A
I ₂	Zpětná složka proudu; Sekundární proud	A
I _{2n}	Jmenovitý sekundární proud	A
I _{diff>}	Proudové nastavení reziduální diferenciální ochrany nebo vysokoimpedančního prvku REF	A
I _f	Maximální sekundární průchozí fázový poruchový proud	A
I _{fe}	Maximální sekundární průchozí zemní poruchový proud	A
I _{f,max}	Maximální sekundární poruchový proud	A
I _{f,max,int}	Maximální sekundární příspěvek napáječe do vnitřní poruchy	A
I _{fn}	Maximální sekundární zemní poruchový proud	A
I _{fp}	Maximální sekundární fázový poruchový proud	A
I _{f,Z1}	Maximální sekundární fázový zkratový proud na konci 1.zóny	A
I _{fe,Z1}	Maximální sekundární zemní zkratový proud na konci 1.zóny	A
I _{L1}	Proud ve fázi L1	A
I _{L2}	Proud ve fázi L2	A
I _{L3}	Proud ve fázi L3	A
I _m	Magnetizační proud	A
I _{minSat}	Nastavení minimálního saturačního proudu pro detektor nasycení	A
I _N	Proud středním vodičem	A
I _o	Nastavení zemního poruchového proudu	A
I _{op}	Primární vybavovací proud	A
I _S	Proudové nastavení vysokoimpedančního prvku REF	A
I _{s1}	Nastavená hodnota rozdílového vybavovacího proudu	A
I _{scc,f}	Maximální poruchový proud procházející přes dva hlavní transformátory proudu ale mimo výkonový transformátor	A
I _{scc,max}	Maximální zkratový proud	A
I _{scc,max(close-in)}	Maximální zkratový proud na začátku 1. zóny	A
I _{scc,max(ext.fault)}	Maximální vnější zkratový proud	A
I _{scc,max(zone1-end)}	Maximální zkratový proud na konci 1. zóny	A
I _{scc,tf}	Maximální poruchový proud procházející přes dva hlavní transformátory proudu a výkonový transformátor	A
I _{sn}	Nastavení stupně 2 a 3 pro zemní poruchy	A
I _{sp}	Nastavení stupně 2 a 3 pro fázové poruchy	A
I _{st}	Rozběhový proud přepočtený na sekundární stranu	A

I_{th}	Jmenovitý krátkodobý tepelný proud	A
I_V	Součtový proud	A
$I_{>>}$	Nastavení zkratové spouště ochrany	A
K	Rozměrový parametr	-
K_e	Součinitel závislý na průchozím zemním poruchovém proudu a primární časové konstantě	A
K_p	Součinitel závislý na průchozím fázovém poruchovém proudu a primární časové konstantě	A
K_s	Součinitel závislý na průchozím poruchovém proudu	-
K_{ssc}	Jmenovitý činitel symetrického zkratového proudu	-
K_t	Součinitel závislý na čase působení	-
K_{td}	Jmenovitý činitel pro dimenzování pro přechodové jevy	-
L	Indukčnost kompenzační tlumivky	H
N	Poměr maximálního zemního poruchového proudu a jmenovitého primárního proudu transformátoru proudu	-
P_{ct}	Ekvivalentní výkon ztracený v sekundárním vinutí transformátoru	W
P_e	Ekvivalentní výkon ztracený v externí zátěži	W
P_i	Výkonové ztráty vstupního proudového obvodu ochrany	W
P_n	Jmenovitý výkon	W
R	Rezistence přívodních vodičů a přístrojů	Ω
R_b	Skutečný odpor zátěže transformátoru proudu	Ω
R_{bn}	Jmenovitý odpor zátěže	Ω
R_{ct}	Vnitřní rezistence	Ω
R_i	Vstupní odpor proudového obvodu ochrany	Ω
R_{in}	Odpor zemního vstupu ochrany	Ω
R_{ip}	Odpor fázového vstupu ochrany	Ω
R_l	Odpor fáze přívodního vedení	Ω
R_r	Přídavná zátěž	Ω
R_S	Stabilizační odpor	Ω
R_s	Stykový odpor připojení přívodního vedení	Ω
S	Zátěž	VA
S_n	Jmenovitá zátěž	VA
T_p	Stanovená primární časová konstanta	s
T_{pe}	Primární časová konstanta zemní smyčky	s
T_s	Jmenovitá časová konstanta sekundární smyčky	s
U_0	Netočivá složka napětí	V
U_1	Sousledná složka napětí; Primární napětí	V
U_{12}	Napětí na vstupním vynutí transformátoru	V
U_2	Zpětná složka napětí; Sekundární napětí	V
U_{al}	Jmenovité ekvivalentní dovolené sekundární budicí napětí	V
U_{L1}	Napětí fáze L1	V
U_{L2}	Napětí fáze L2	V
U_{L3}	Napětí fáze L3	V
U_V	Součtové napětí	V
U_f	Primární hodnota fázového napětí	V
U_s	Stabilizační napětí	V
X	Reaktance přívodních vodičů a přístrojů	Ω
X_i	Vnitřní reaktance	Ω
Y	Břemeno přístrojového transformátoru napětí	S
Y_n	Jmenovité břemeno přístrojového transformátoru napětí	S
Z	Vnější břemeno přístrojového transformátoru proudu	Ω
Z_A	Impedance rozběhového členu A	Ω
Z_{PTP}	Impedance sekundárního vinutí transformátoru proudu	Ω
Z_b	Vnější břemeno	Ω
Z_c	Celkové břemeno přístrojového transformátoru proudu	Ω
Z_f	Tlumící obvod	Ω

Z_i	Vnitřní břemeno přístrojového transformátoru proudu	Ω
Z_n	Jmenovité břemeno přístrojového transformátoru proudu	Ω
a	Fázor natočení	-
a	Součinitel závislý na primární časové konstantě a frekvenci	-
a_1	Součinitel závislý na primární časové konstantě	-
a_2	Součinitel závislý na primární časové konstantě a frekvenci	-
f	Frekvence	Hz
f_{min}	Minimální frekvence generátoru	Hz
f_n	Jmenovitá frekvence generátoru	Hz
k	Součinitel závislý na primární časové konstantě a frekvenci	-
k_I	Jmenovitý proudový převod	-
k_U	Jmenovitý napěťový převod	-
l	Délka přívodního vedení	m
n	Skutečné nadproudové číslo	-
n_{ct}	Koeficient podle zapojení transformátorů proudu	-
n_n	Jmenovité nadproudové číslo	-
t'	Čas prvního průchodu proudu	S
t'_{al}	Přípustná doba pro mez přesnosti prvního průchodu proudu	S
t''_{al}	Přípustná doba pro mez přesnosti druhého průchodu proudu	s
t_{fr}	Doba necitlivosti během opětného zapínání	s
t_{Diff}	Operační čas diferenciální ochrany	S
δ_I	Chyba úhlu proudu	°
δ_U	Chyba úhlu napětí	°
ε_I	Relativní chyba proudu	%
$\hat{\varepsilon}_I$	Nejvyšší špičková okamžitá chyba proudu	%
ε_U	Relativní chyba napětí	%
ρ	Rezistivita	$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$
φ	Fázový posun	°
ω	Úhlová frekvence	$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$

1 ÚVOD A ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ PŘÍSTROJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ

Cílem diplomové práce je poskytnout soupis základní teorie přístrojových transformátorů, tzn. jejich rozdělení a základní pojmy. Důraz je kladen zejména na přístrojové transformátory pro jistění a dále na parametry nezbytné pro volbu vhodných transformátorů pro připojení do jistících obvodů ochran. Dalším úkolem je zpracovat požadavky, které kladou digitální ochrany firem ABB, AREVA a Siemens na přístrojové transformátory proudu a přívody. V neposlední řadě je pak, po konzultaci se zadavatelem, tvorba komplexního počítačového programu na dimenzování přístrojových transformátorů pro konkrétní ochrany a chráněná zařízení.

Rozsah měřených elektrických veličin v elektrizačních soustavách je poměrně velký. Přizpůsobovat proudové a napěťové systémy měřících, jistících a regulačních přístrojů takto rozsáhlým požadavkům není žádoucí jak z hlediska technického tak ekonomického. Z tohoto důvodu se tyto přístroje zapojují do elektrických obvodů silnoprůdých zařízení přes přístrojové transformátory. Přístrojové transformátory se dělí na přístrojové transformátory měřící a přístrojové transformátory jistící. Většinou jsou přístrojové transformátory konstruované tak, že mají zvlášť výstupy pro měřící přístroje a zvlášť pro jistící přístroje [1].

Hlavní funkcí přístrojových transformátorů je:

- transformovat hodnoty proudů a napětí na standardní hodnoty vhodné pro napájení proudových a napěťových obvodů jednotně vyrobených systémů přístrojů a ochran,
- izolovat obvod vysokého napětí od obvodu nízkého napětí, do kterého se zapojují měřící přístroje a ochrany,
- oddělit měřící a jistící přístroje z dosahu působení silných magnetických a elektrických polí proudových obvodů silnoprůdých zařízení, a tím vyloučit jejich nepříznivé účinky na správnou funkci připojených měřících a jistících přístrojů,
- umožnit v oddělených obvodech vytvořit součty nebo rozdíly proudů a napětí,
- umožnit přehledné a účelné soustředění měřících a jistících přístrojů v dozornách mimo rozvodny, a tím přispět k lehkému a pohotovému ovládní a řízení provozu rozvodny a z ní napájených elektrických sítí,
- pomocí vhodné konstrukce chránit systémy měřících a jistících přístrojů před škodlivými účinky poruchových proudů.

Přístrojové transformátory dělíme podle transformované veličiny na:

- *přístrojové transformátory proudu (PTP)* jsou transformátory, které mají v měřícím rozsahu sekundární proud úměrný primárnímu proudu. Tyto proudy se mohou lišit jen chybou amplitudy a úhlu v předepsané toleranci,
- *přístrojové transformátory napětí (PTN)* jsou transformátory, které mají v měřícím rozsahu sekundární napětí úměrné primárnímu napětí. Napětí se mohou lišit jen chybou amplitudy a úhlu v předepsané toleranci,

- *přístrojové transformátory kombinované* mají přístrojový transformátor proudu a napětí v jednom konstrukčním celku.

Podle převodu přístrojové transformátory dělíme na:

- *nepřepínatelné* – mají neměnný (stálý) převod,
- *přepínatelné* – jejich vinutí je možné přepnout do několika rozdílných jmenovitých převodů. Podle toho, které vinutí se přepíná je můžeme rozdělit na:
 - o *primárně přepínatelné* – nové hodnoty jmenovitých převodů se dosáhnou různým spojováním primárních vinutí nebo přepínáním jejich odboček,
 - o *sekundárně přepínatelné* – nové hodnoty jmenovitých převodů se dosáhnou různým spojováním sekundárních vinutí nebo přepínáním jejich odboček.

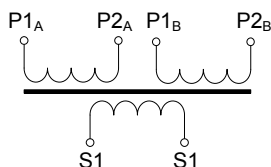
2 PŘÍSTROJOVÉ TRANSFORMÁTORY PROUDU

Přístrojové transformátory proudu napájejí proudové systémy měřících, jistících a regulačních přístrojů. Jejich primární strana se zapojí do série se silnoproudým zařízením, jehož proud je potřeba měřit. Na sekundární stranu PTP se zapojí potřebné sekundární přístroje [1].

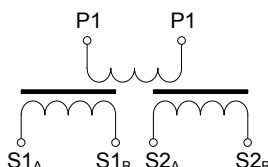
2.1 Rozdělení přístrojových transformátorů proudu

Přístrojové transformátory proudu můžeme rozdělit podle různých hledisek. Podle počtu primárních a sekundárních vinutí se PTP dělí na:

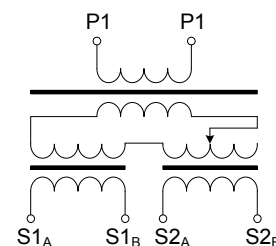
- sčítací přístrojový transformátor proudu (*obr. 2-1*), který má několik izolovaných vstupních obvodů a jeden sekundární,
- přístrojový transformátor s několika sekundárními výstupy, který může být řešený dvěma způsoby, a to jako vícejádrový PTP (*obr. 2-2*) nebo s pomocnými transformátory, případně autotransformátory (*obr. 2-3*).
- kaskádový transformátor proudu.



Obr. 2-1 Sčítací transformátor proudu [1]



Obr. 2-2 Dvoujádrový transformátor proudu se dvěma výstupy [1]



Obr. 2-3 Transformátor proudu s pomocným autotransformátorem a dvěma výstupy [1]

Podle počtu závitů primárního vinutí se přístrojové transformátory proudu dělí na:

- *jednozátvitový přístrojový transformátor proudu* – vodič primárního vinutí prochází magnetickým obvodem jen jednou. Konstrukčně může být vyrobený jako podpěrný, průchozí, průchodkový, tyčový, násuvný nebo prstencový,
- *závitový přístrojový transformátor proudu* – vodič primárního vinutí prochází magnetickým obvodem několikrát. Může být vyrobený jako podpěrný, průchozí, průchodkový nebo smyčkový.

Podle velikosti rozptylové reaktance se rozlišují přístrojové transformátory proudu:

- *nízkoreaktanční přístrojové transformátory proudu* – jsou to transformátory, u kterých bez použití závitové korekce celková amplitudová chyba naměřená přímou metodou nepřesáhne hodnotu 130 % v porovnání s hodnotou, která byla změřená nepřímou metodou,
- *vysokoreaktanční přístrojové transformátory proudu* – jsou to transformátory, u kterých celková amplitudová chyba naměřená přímou metodou je vyšší jako 130 % hodnoty, která byla změřená nepřímou metodou.

Zvláštní skupinou PTP jsou tzv. *jistící transformátory proudu*. Jsou to transformátory, které jsou definované parametry jako je třída přesnosti, jmenovitá zátěž, nadproudový činitel, amplitudová chyba a úhlová chyba, tj. parametry, které se neudávají u běžných transformátorů proudu. Tyto transformátory se dělí podle použití na:

- *transformátory proudu pro distanční jištění* – jsou to přístrojové transformátory proudu pro napájení distančních ochran,
- *transformátory proudu pro rozdílové jištění* – jsou to přístrojové transformátory proudu s vhodnou nadproudovou charakteristikou určené pro napájení rozdílových ochran,
- *transformátory proudu pro jištění při zemních poruchách* – jsou to přístrojové transformátory proudu s charakteristikou vhodnou pro funkci filtru netočivé složky proudu, která slouží k identifikaci zemních poruch [1].

2.2 Základní pojmy jisticích transformátorů proudu

Základními elektrickými veličinami, které blíže určují vlastnosti přístrojových transformátorů proudu jsou:

Jmenovitý primární proud I_{1n} přístrojového transformátoru proudu je efektivní hodnota primárního proudu, která je podkladem pro konstrukci PTP. Je uvedena na štítku.

Jmenovitý sekundární proud I_{2n} přístrojového transformátoru proudu je efektivní hodnota proudu uvedená na štítku, odpovídající, podle jmenovitého proudového převodu, jmenovitému primárnímu proudu. Velikost jmenovitého sekundárního proudu může být 1 A, 2 A nebo 5 A. Přednostně se má používat 5 A. V případě, že by použití transformátoru s jmenovitým sekundárním proudem 5 A vyvolalo při větší délce přívodů od sekundárních svorek transformátoru proudu k přístrojům nevhodné dimenzování průřezu vodičů přívodu, je potřeba zvolit PTP s jmenovitou hodnotou sekundárního proudu 1 A, případně 2 A.

Jmenovitý převod přístrojového transformátoru proudu k_I je poměr jmenovitého primárního proudu I_{1n} ke jmenovitému sekundárnímu proudu I_{2n}

$$k_I = \frac{I_{1n}}{I_{2n}} \quad (2.1)$$

Celkové břemeno přístrojového transformátoru proudu Z_c je vektorový součet vnitřního břemene Z_{ct} a vnějšího břemene Z . Vnitřním břemenem Z_{ct} rozumíme vektorový součet rezistence R_{ct} a reaktance X_{ct} sekundárního vinutí transformátoru. Vnější břemeno Z je vektorový součet impedancí přístrojů a vodičů přívodů připojených na sekundární svorky transformátoru. Platí vztahy

$$Z_c = \sqrt{(R_{ct} + R)^2 + (X_{ct} + X)^2} \quad (2.2)$$

$$Z_{ct} = \sqrt{R_{ct}^2 + X_{ct}^2} \quad (2.3)$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (2.4)$$

kde R je rezistence přívodních vodičů a přístrojů $[\Omega]$,

X je reaktance přívodních vodičů a přístrojů $[\Omega]$.

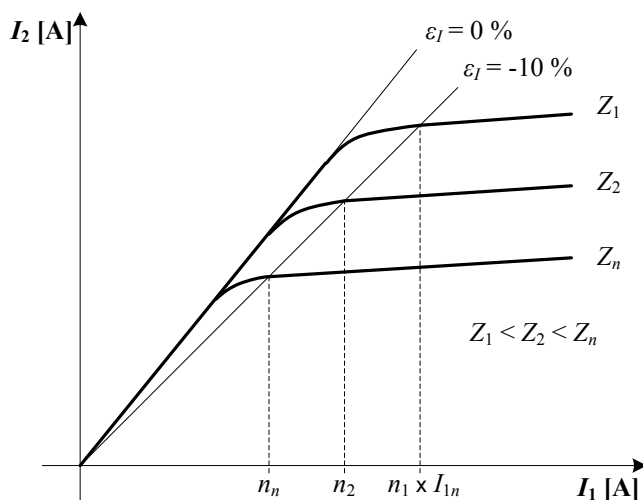
Jmenovité břemeno přístrojového transformátoru proudu Z_n je impedance, kterou je možné v měřicím rozsahu zatížit přístrojový transformátor proudu, přičemž se nepřekročí dovolená chyba.

Od velikosti tohoto vnějšího břemene závisí tvar nadproudové charakteristiky, a tím i velikost nadproudového čísla (obr. 2-4).

Podle velikosti břemene se mění přesycení měřícího transformátoru proudu. Pro výpočet nadproudového čísla n přístrojového transformátoru zatíženého břemenem Z jiným než je Z_n platí přibližně vztah:

$$n \cong n_n \frac{Z_n}{Z} \quad (2.5)$$

Ze vztahu (2.5) plyne, že pokud bude na sekundární straně transformátoru proudu připojeno menší břemeno než je Z_n pak nadproudové číslo bude větší než je jmenovité n_n .



Obr. 2-4 Proudová charakteristika transformátoru proudu pro různá vnější břemena [1]

Zátěž přístrojového transformátoru proudu S je součin vnějšího břemene Z a čtverce jmenovitého sekundárního proudu I_{2n}

$$S = Z I_{2n}^2 \quad (2.6)$$

Jmenovitá zátěž přístrojového transformátoru proudu S_n je součin jmenovitého vnějšího břemene Z_n a čtverce jmenovitého sekundárního proudu I_{2n}

$$S_n = Z_n I_{2n}^2 \quad (2.7)$$

Podle předchozích vztahů můžeme úpravou získat vztahy

$$n \cong n_n \frac{S_n}{S} \quad (2.8)$$

Výkon sekundární strany transformátoru proudu při jiném proudu I_1 než je I_{1n} se určí jako

$$S = S_n \frac{I_1^2}{I_{1n}^2} \quad (2.9)$$

Měřicí rozsah je rozsah hodnot primárního proudu, pro který jsou stanoveny dovolené hodnoty chyb pro účely měření a dovolené oteplení. Měřicí rozsah měřících transformátorů proudu obvykle v rozmezí od 10 % do 120 % jmenovitého primárního proudu. Měřicí transformátory proudu mohou mít i rozšířený rozsah, a to do 150 % až 200 % jmenovitého primárního proudu.

Jistící rozsah je rozsah primárních hodnot transformované veličiny, pro který jsou stanoveny hodnoty chyb pro účely jištění.

Přístrojový transformátor proudu má dvě pracovní oblasti. První je *oblast provozní*, ve které transformátor proudu pracuje za normálního chodu sítě. Druhá je *oblast nadproudová*, ve které pracuje při proudovém přetížení a poruchových stavech chráněného elektrického zařízení. Přesnost PTP v provozní oblasti je dána třídou přesnosti. V nadproudové oblasti je přesnost charakterizovaná nadproudovou charakteristikou a nadproudovým číslem (nadproudovým činitelem).

Třída přesnosti je označení přidělené přístrojovému transformátoru proudu, které určuje jeho největší dovolené chyby při předepsaných podmínkách provozu. Třídy přesnosti měřících transformátorů proudu jsou 0,1-0,2-0,5-1-3-5. Třídy přesnosti jistících transformátorů proudu v nadproudové oblasti jsou 5P a 10P. Třída přesnosti určuje dovolené amplitudové chyby proudu a dovolené chyby úhlu.

Relativní chyba amplitudy proudu ε_I je chyba způsobená tím, že skutečný převod transformátoru se nerovná jmenovitému převodu. Důvodem je skutečnost, že část proudu I_m teče do magnetizačního obvodu hlavní indukčnosti transformátoru proudu. Relativní chyba amplitudy proudu vyjádřená v procentech je dána:

$$\varepsilon_I = \frac{I_m}{I_1} 100 = \frac{k_I I_2 - I_1}{I_1} 100 \quad (2.10)$$

kde I_1 je primární proud,

I_2 je sekundární proud odpovídající primárnímu proudu,

k_I je jmenovitý převod.

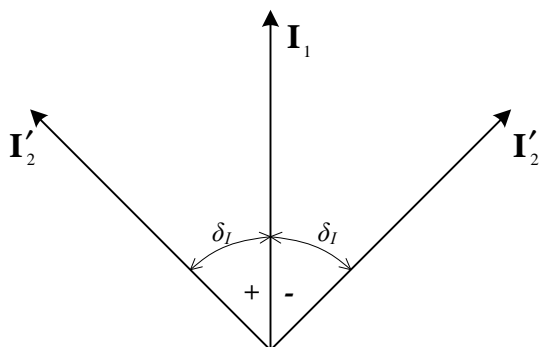
Dovolené chyby proudu jistících transformátorů proudu jsou uvedeny v *tab. 2-1*.

Tab. 2-1 Dovolené chyby proudu jistících transformátorů proudu

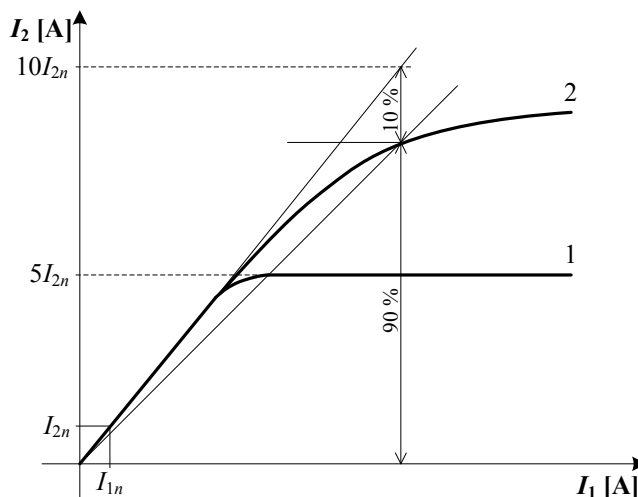
Třída přesnosti	Při jmenovitém primárním proudu		Celková chyba amplitudy při jmenovitém nadproudu ε_c [%]
	Chyba proudu $\pm \varepsilon_I$ [%]	Chyba úhlu $\pm \delta_I$ [min.]	
5P	1	60	5
10P	3	-	10

Hodnoty chyb proudu v tab. 2-1 se nesmí překročit v měřicím rozsahu 50 % až 100 % jmenovitého břemene a při jmenovitém primárním proudu.

Chyba úhlu transformátoru proudu δ_I je rozdíl úhlů mezi vektorem primárního proudu a vektorem sekundárního proudu. Směr vektorů se volí tak, že pro ideální transformátor se úhel δ_I rovná nule. Chyba úhlu je kladná, když vektor sekundárního proudu I'_2 předbíhá vektor primárního proudu I_1 . V opačném případě je chyba úhlu záporná, viz obr. 2-5 [1].



Obr. 2-5 Úhlová chyba transformátoru proudu [1]



Obr. 2-6 Nadproudová charakteristika transformátoru proudu 1-pro účely měření 2-pro účely jištění [1]

2.3 Přístrojové transformátory proudu v nadproudové oblasti

Nadproudovou oblastí se rozumí oblast primárních proudů, jejichž hodnoty jsou vyšší než je měřicí rozsah přístrojového transformátoru proudu.

Nadproudová charakteristika je závislost sekundárního proudu na primárním v nadproudové oblasti PTP, obr. 2-6. Vlivem feromagnetických vlastností magnetického obvodu nastává její zakřivení. Od měřicích transformátorů proudu se vyžaduje rychlé zakřivení nadproudové charakteristiky, aby měřicí přístroje připojené na sekundární stranu byly chráněny proti škodlivým účinkům poruchových proudů primární strany. U jistících transformátorů proudu by

měla být nadproudová charakteristika přímková, aby i při největších zkratových proudech PTP věrně reprodukoval primární proud. Nadproudová oblast je charakterizována nadproudovým číslem.

Nadproudové číslo n transformátoru proudu je n -násobek jmenovitého primárního proudu při kterém relativní amplitudová chyba proudu dosáhne hodnotu -10 %, resp. -5 %.

Jmenovité nadproudové číslo n_n je n -násobek jmenovitého primárního proudu I_{1n} , při kterém je relativní chyba sekundárního proudu -10 %, když je transformátor zatížený jmenovitým břemenem Z_n při jmenovitém účinníku $\cos \varphi_n = 0,8$ induktivního charakteru a při jmenovité frekvenci. Nadproudové číslo měřících transformátorů proudu má být co nejmenší. Hodnoty jmenovitých nadproudových čísel měřících transformátorů proudu mají být $n < 5$, v krajním případě $n < 10$.

Jmenovitý primární nadproud při dané třídě přesnosti je primární proud, při kterém celková chyba jistícího transformátoru proudu dosáhne udanou hodnotu. Jmenovitý primární nadproud je součin jmenovitého primárního proudu a nadproudového činitele.

Nadproudový činitel jistícího transformátoru proudu je násobek jmenovitého primárního proudu, při kterém celková chyba transformátoru proudu dosáhne stanovenou hodnotu -10 % (třída 10P) nebo -5 % (třída 5P). Doporučené hodnoty jistících transformátorů proudu jsou 5, 10, 15, 20, 30. Jistící transformátory proudu pro napájení ochran musí mít nadproudový činitel $n > 10$ [1].

2.4 Transformátory proudu pro přechodové jevy

Tyto transformátory proudu slouží pro napájení rychlých ochran jako jsou rozdílové ochrany, distanční ochrany apod.

Při náhlé změně časových konstant střídavé sítě z důvodu vzniku zkratu vznikají změny v magnetickém obvodu přístrojového transformátoru proudu. Přístrojový transformátor proudu pro jištění musí být navrhnout tak, aby se při těchto změnách nepřesýtil stejnosměrnou složkou proudu, ale věrně reprodukoval časový průběh primárního střídavého proudu na sekundární stranu. Obvyklý návrh PTP, jako je dimenzování podle jmenovité zátěže, třídy přesnosti a nadproudového činitele v těchto případech nestačí. Musí být zabezpečeno, aby největší stejnosměrný proud byl vždy menší než magnetizační proud kolena magnetizační charakteristiky transformátoru proudu. Přesycení transformátoru proudu stejnosměrnou složkou proudu, a tím pádem chybná informace pro ochranu, může v některých případech způsobit jen opožděné vypnutí. V jiných případech může způsobit selhání ochrany.

Rozdílové ochrany nesmí působit na blízké zkraty mimo chráněnou oblast. Transformátor proudu během trvání přesycení přenáší na sekundární stranu zkreslené střídavé proudy po dobu trvání přechodného jevu. Toto krátké odmlčení proudového transformátoru proudu může způsobit chybný náběh rozdílové ochrany.

Na transformátor proudu pro distanční jištění nejsou kladeny tak vysoké požadavky. Přesycení transformátoru způsobí jen opožděnou činnost ochrany [1].

Třídy jisticích transformátorů proudu jsou následující [4]:

- *třída TP* - přesnost je definována celkovou chybou při stabilním primárním symetrickém proudu. Remanentní magnetický tok je bez omezení. Těmto transformátorům se věnují předchozí kapitoly 2.2 a 2.3.
- *třída TPS* - nízký rozptylový tok transformátoru. Remanentní magnetický tok je bez omezení. Chyba při daném převodu nesmí překročit $\pm 0,25$ %.
- *třída TPX* - mez přesnosti definována okamžitou vrcholovou chybou. Remanentní magnetický tok je bez omezení.
- *třída TPY* - mez přesnosti definována okamžitou vrcholovou chybou. Remanentní magnetický tok nepřekročí 10 % hodnoty magnetického toku při nasycení.
- *třída TPZ* - mez přesnosti definována okamžitou špičkovou chybou střídavé složky proudu během průchodu proudu obsahujícího pouze aperiodickou stejnosměrnou složku proudu. Chyba stejnosměrné složky je bez omezení. Remanentní magnetický tok je zanedbatelný.

Tab. 2-2 Dovolené chyby pro transformátory proudu třídy TPX, TPY a TPZ [4]

Třída	Při jmenovitém primárním proudu		Za podmínky mezní přesnosti
	Chyba proudu ε_I [%]	Chyba úhlu δ_I [min.]	Nejvyšší špičková okamžitá chyba $\hat{\varepsilon}_I$ [%]
TPX	$\pm 0,5$	± 30	10
TPY	$\pm 1,0$	± 60	10
TPZ	$\pm 1,0$	180 ± 18	10

Důležité pojmy transformátorů proudu pro přechodové jevy:

Stanovená primární časová konstanta T_p je časová konstanta aperiodické stejnosměrné složky primárního proudu. Může být vyznačena na štítku transformátorů TPX, TPY a TPZ jako jejich jmenovitá hodnota. Normalizované hodnoty v milisekundách jsou 40 – 60 – 80 – 100 – 120.

Jmenovitá časová konstanta sekundární smyčky T_s je hodnota časové konstanty sekundární smyčky transformátoru proudu. Určí se jako poměr součtu magnetizační a rozptylové indukčnosti a odporu sekundární smyčky.

Jmenovitá odporová zátěž R_{bn} je jmenovitá hodnota odporové zátěže připojené k sekundární straně transformátoru. Normalizované hodnoty pro třídu TP při jmenovitém sekundárním proudu 1 A jsou 2,5 – 5 – 7,5 – 10 – 15 (přednostně 5 a 10). Pro jiný sekundární proud se tyto hodnoty upraví v obráceném poměru ke druhé mocnině tohoto proudu.

Jmenovitý činitel symetrického zkratového proudu K_{ssc} je dán vztahem:

$$K_{ssc} = \frac{I_{1z}}{I_{1n}} \quad (2.11)$$

kde I_{1z} je jmenovitý primární zkratový proud, tzn. efektivní hodnota symetrického primárního zkratového proudu.

Normalizované hodnoty tohoto činitele jsou 3 – 5 – 7,5 – 10 – 12,5 – 15 – 17,5 – 20 – 25 – 30 – 40 – 50 (přednostně 10, 15 a 20).

Jmenovitý činitel pro dimenzování pro přechodové stavy K_{td} je teoretická hodnota představující dimenzování pro přechodový stav. Výpočet závisí na daném provozním cyklu. Pro jednoduchý provozní cyklus (pouze vypnutí) se dá určit jako:

$$K_{td} = \omega \frac{T_p T_s}{T_p - T_s} \left(e^{-t'_{al}/T_p} - e^{-t'_{al}/T_s} \right) + 1 \quad (2.12)$$

kde t'_{al} je přípustná doba pro mez přesnosti prvního průchodu proudu.

A pro cyklus s automatickým opětným zapnutím potom:

$$K_{td} = \left[\omega \frac{T_p T_s}{T_p - T_s} \left(e^{-t'_{al}/T_p} - e^{-t'_{al}/T_s} \right) + 1 \right] e^{-(t_{fr} + t''_{al})/T_s} + \omega \frac{T_p T_s}{T_p - T_s} \left(e^{-t''_{al}/T_p} - e^{-t''_{al}/T_s} \right) + 1 \quad (2.13)$$

kde t''_{al} je přípustná doba pro mez přesnosti druhého průchodu proudu,
 t_{fr} je doba necitlivosti během opětného zapínání.

Jmenovitá ekvivalentní dovolená sekundární elektromotorická síla E_{al} je efektivní hodnota ekvivalentní e.m.s. sekundárního obvodu při jmenovitém kmitočtu. Určí se podle vztahu

$$E_{al} = K_{ssc} K_{td} (R_{ct} + R_{bn}) I_{2n} \quad (2.14)$$

Jmenovité ekvivalentní dovolené sekundární budící napětí U_{al} je efektivní hodnota sinusového napětí jmenovitého kmitočtu nutná pro zajištění, aby elektromotorická síla E_{al} aplikovaná do sekundárního vinutí transformátoru vytvořila magnetizační proud, při němž nejvyšší dovolená chyba proudu nepřekročí hodnotu pro příslušnou třídu tohoto transformátoru proudu. Pro dimenzování transformátorů třídy TPS se toto napětí stanoví podle vztahu

$$U_{al} \geq K K_{ssc} (R_{ct} + R_{bn}) I_{2n} \quad (2.15)$$

kde K je rozměrový parametr.

Jmenovitý krátkodobý tepelný proud I_{th} je efektivní hodnota primárního proudu, který transformátor vydrží 1 sekundu při zkratovaném sekundárním vinutí aniž by došlo k poškození transformátoru. Normalizované efektivní hodnoty v kiloampérech jsou 6,3 – 8 – 10 – 12,5 – 16 – 20 – 25 – 31,5 – 40 – 50 – 63 – 80 – 100.

Volba mezi jistíci transformátory proudu většinou závisí na praktických zkušenostech provozovatele a na použitém jistícím zařízení. Nezbytný je výpočet činitele pro dimenzování pro přechodové jevy. Dá se použít vztah (2.12), případně (2.13).

I když jsou požadavky transformátorů třídy TP definovány pro symetrický sinusový primární proud, mohou být v některých případech použity i pro přechodové jevy. Mohou se takto použít transformátory s nízkým rozptylovým magnetickým tokem a dodatečným dimenzováním pro přechodové jevy. Důležité je vzít v úvahu vnitřní zátěž transformátoru (odpor vinutí) vzhledem k celkovému provedení. Schopnosti transformátoru proudu se mohou definovat například maximálními budicími napětím, potřebným k vybuzení proudu na sekundární straně

$$E_{al} \approx K_{ssc} K_{td} (R_{ct} + R_{bn}) I_{2n} \approx K_{ssc} K_{td} \frac{P_{ct} + P_e}{I_{2n}} \quad (2.16)$$

kde P_{ct} je ekvivalentní výkon ztracený v sekundárním vinutí transformátoru,
 P_e je ekvivalentní výkon ztracený v externí zátěži.

Transformátory třídy TPS mají nízký rozptylový magnetický tok a přesně definovaný převod. Tyto požadavky jsou nezbytné u jistících obvodů pro mezifázové poruchy a zemní spojení. Limity použití pro měřicí jistící relé bývají založeny na empirických vzorcích odvozených z výsledků zkoušek a provozních zkušeností. Při přerušení primárního proudu, když je transformátor silně nasycen, dojde (v důsledku poklesu magnetického toku na úroveň remanence) k velmi rychlému útlumu sekundárního proudu. Doby opětovného nastavení pro jistící relé nejsou významně ovlivněny tlumíci charakteristikami transformátorů třídy TPS. Podobně je tomu i u transformátorů třídy TPX, ovšem s rozdílem dovolených chyb a možných vlivů, které mohou vyžadovat konstrukční činitel větší než 1,1.

Remanentní magnetický tok transformátorů třídy TPY musí být menší než 10 % toku nasycení. Z tohoto důvodu se bude sekundární proud během přechodu ze stavu nasycení do stavu remanence udržovat delší dobu na vyšší hodnotě, než by tomu bylo u transformátorů třídy TPS nebo TPX. Pro provozní cyklus s automatickým opětovným zapnutím bude činitel K_{td} výrazně ovlivňován vztahem mezi časovou konstantou sekundárního obvodu T_s a dobou necitlivosti t_{fr} . Jelikož celková dovolená chyba je 10 %, musí se činitel K_{td} uvažovat v souvislosti s časovou konstantou sekundární smyčky

$$\frac{100K_{td}}{\omega T_s} = \varepsilon \leq 10\% \quad (2.17)$$

Remanentní magnetický tok transformátorů TPZ je zanedbatelný a jejich dovolené časové konstanty jsou stanoveny. Tlumící sekundární proud po silné saturaci bude mít vyšší hodnotu než u transformátorů třídy TPY. Tyto transformátory se dají použít pro jistící systémy, které nejsou příliš závislé na aperiodické složce proudu [4].

2.5 Proudové senzory

Změny v konstrukčním řešení vn elektrických stanic a zmenšování rozměrů vn rozvaděčů způsobilo, že v těchto zařízeních se v poslední době začaly používat senzory proudu. K nejdůležitějším vlastnostem senzorů proudu patří malé rozměry, možnost rychlého projektování, flexibilita pro budoucí zvyšování výkonů vn vývodů v distribučních elektrických stanicích, vysoká spolehlivost, elektromagnetická kompatibilita a minimální údržba.

Hlavní částí proudového senzoru je Rogowského cívka, která je rovnoměrně navinutá bez magnetického jádra. Proudový senzor se skládá z toroidního vinutí a proudového vodiče procházejícího středem toroidu. Výstupní napětí ze senzoru je úměrné derivaci proudu podle času.

Poněvadž proudový senzor neobsahuje feromagnetické jádro, nemůže dojít k jeho přesycení. Takový proudový senzor má velký dynamický rozsah a garantovanou vysokou linearitu proudu na výstupu v širokém frekvenčním pásmu, řádově víc než několik MHz. Protože v proudovém senzoru nedochází k nelineárním jevům, může se použít na měření proudů od několika ampér až po stovky kiloampér. Nejnižší a nejvyšší hodnota proudu je převážně závislá na měřící elektronice, která je součástí digitální ochrany.

Při precizní výrobě proudového senzoru se dosahuje celková amplitudová relativní chyba převodu proudu do 0,5 %. Nejdůležitějšími příčinami chyb proudových senzorů jsou: změna teploty, výrobní tolerance, vliv proudů (magnetických polí) od sousedních fází, konečná délka primárního vodiče. Teplotní závislost je možné snížit použitím speciálních materiálů s nízkými teplotními koeficienty. Jinou možností je měření teploty senzoru a následná kompenzace teplotní závislosti. Výrobní toleranci, vliv proudů sousedních fází a délku primárního vodiče je možné eliminovat vhodnou konstrukcí proudového senzoru a jeho optimálním umístěním ve vn rozvaděči.

Proudový senzor navržený pro frekvenci 50 Hz umožňuje měřit střídavé proudy s frekvenčním rozsahem od několika Hz do několika kHz. Tento frekvenční rozsah je dostatečný i pro přenos deformovaných průběhů poruchových proudů a vyhodnocování kvality elektrické energie [1].

2.6 Elektronické transformátory proudu

Elektronické transformátory proudu sestávají z jednoho nebo více proudových senzorů, které mohou být zapojeny do přenosového systému a sekundárních převodníků. Toto uspořádání je určeno k převodu měřeného proudu pro měřící přístroje, elektroměry a ochrany nebo řídicí zařízení. Výstup sekundárního převodníku elektronických PTP je za normálních podmínek použití úměrný primárnímu proudu. Výstup mohou mít analogový nebo digitální. Pro měření primárního proudu lze použít proudový transformátor, Rogowského cívku, senzory založené na Hallově principu, Rogowského cívku na plošném spoji, bočník, magnetorezistivní senzory nebo optické senzory [6].

2.7 Zapojení přístrojových transformátorů proudu do obvodů napájení ochran

Přístrojové transformátory proudu se vyrábějí jako jednofázové. Ve trojfázové soustavě se používají dva nebo tři PTP v závislosti na typu chránění, zapojeny primárně do jednotlivých fází chráněného zařízení. V trojfázové soustavě se typy poruch identifikují podle přítomnosti symetrických složek proudů a napětí. Proto jisticí transformátory proudu vhodným zapojením sekundárních vinutí vytvářejí filtry symetrických složek proudu [1].

2.7.1 Zapojení přístrojových transformátorů proudu do úplné hvězdy

Sekundární vinutí jsou zapojené do úplné hvězdy, obr. 2-7. Do hvězdy jsou zapojeny i vstupní obvody ochrany, které jsou napájeny z jisticích transformátorů proudu.

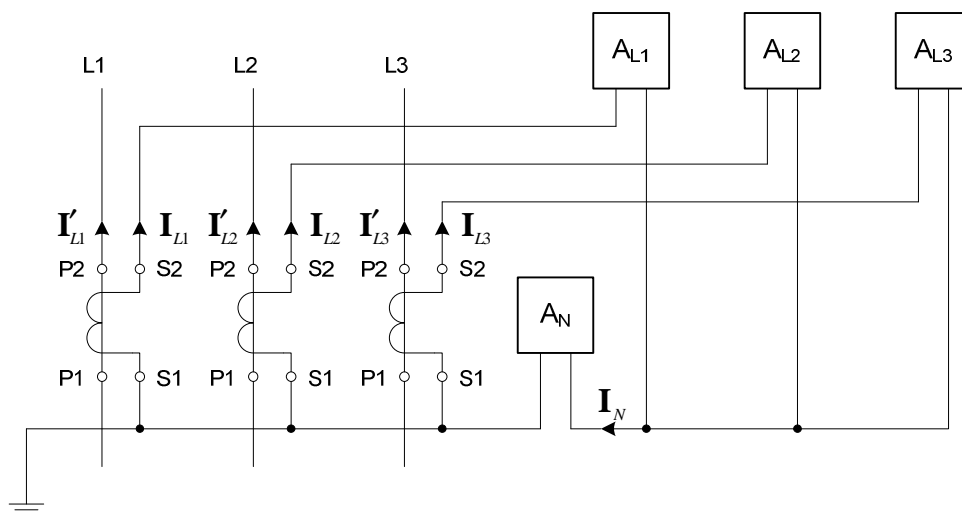
V normálním provozu protékají přes proudové členy A_{L1} , A_{L2} a A_{L3} následující proudy

$$\mathbf{I}_{L1} = \mathbf{I}_1 \quad \mathbf{I}_{L2} = \mathbf{a}^2 \mathbf{I}_1 \quad \mathbf{I}_{L3} = \mathbf{a} \mathbf{I}_1 \quad (2.18)$$

Zpětným vodičem do uzlu přístrojových transformátorů v normálním provozu neteče žádný proud

$$\mathbf{I}_N = \mathbf{I}_{L1} + \mathbf{I}_{L2} + \mathbf{I}_{L3} = \mathbf{I}_1 + \mathbf{a}^2 \mathbf{I}_1 + \mathbf{a} \mathbf{I}_1 = 0 \quad (2.19)$$

V reálných podmínkách v tomto obvodu může téct určitý minimální proud \mathbf{I}_N . Jeho velikost závisí na použitých PTP (úhlové a amplitudové chyby apod.) a nevyváženosti primárních proudů jednotlivých fází. Nadproudový člen A_N musí být nastavený tak, aby na takový proud nereagoval.



Obr. 2-7 Zapojení přístrojových transformátorů proudu do úplné hvězdy [1]

Zpětným vodičem nebude téct výrazný proud v případě trojfázového symetrického zkratu na primární straně ani při proudovém přetížení chráněného zařízení.

Nesymetrické zkraty jsou charakterizovány vznikem všech tří symetrických složek proudu $\mathbf{I}_1, \mathbf{I}_2, \mathbf{I}_0$. V jednotlivých fázích budou protékat následující proudy

$$\begin{aligned}\mathbf{I}_{L1} &= \mathbf{I}_1 + \mathbf{I}_2 + \mathbf{I}_0 \\ \mathbf{I}_{L2} &= \mathbf{a}^2 \mathbf{I}_1 + \mathbf{a} \mathbf{I}_2 + \mathbf{I}_0 \\ \mathbf{I}_{L3} &= \mathbf{a} \mathbf{I}_1 + \mathbf{a}^2 \mathbf{I}_2 + \mathbf{I}_0\end{aligned}\quad (2.20)$$

Rozběhové členy A_{L1}, A_{L2} a A_{L3} budou působit na všechny tři symetrické složky proudů. Zpětným vodičem při nesymetrických zkratech, při kterých se objeví netočivá složka proudu, bude protékat proud

$$\mathbf{I}_N = \mathbf{I}_{L1} + \mathbf{I}_{L2} + \mathbf{I}_{L3} = 3\mathbf{I}_0 \quad (2.21)$$

Zapojení přístrojových transformátorů proudu ve zpětném vodiči vytváří filtr netočivé složky proudu. Relé A_N , na základě přítomnosti netočivých složek proudu, bude identifikovat zemní poruchy.

Z výše uvedeného vyplývá, že zapojení přístrojových transformátorů proudu do úplné hvězdy je nutné použít v účinně uzemněných soustavách, protože pomocí nadproudových členů $A_{L1}, A_{L2}, A_{L3}, A_N$ je možné identifikovat všech 11 typů poruch, které se v těchto soustavách mohou vyskytnout [1].

2.7.2 Zapojení přístrojových transformátorů proudu do neúplné hvězdy

Zapojení přístrojových transformátorů proudu do neúplné hvězdy je znázorněno na *obr. 2-8*. V normálním provozu rozběhovými členy A_{L1} a A_{L3} protékají proudy

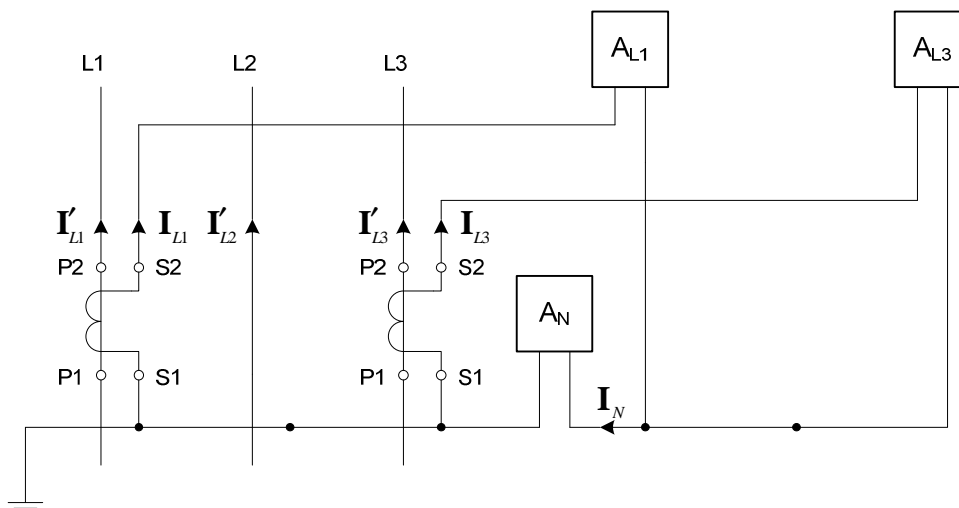
$$\mathbf{I}_{L1} = \mathbf{I}_1 \quad \mathbf{I}_{L3} = \mathbf{a} \mathbf{I}_1 \quad (2.22)$$

Ve zpětném vodiči teče jejich součet

$$\mathbf{I}_N = \mathbf{I}_{L1} + \mathbf{I}_{L3} = \mathbf{I}_1 + \mathbf{a} \mathbf{I}_1 = -\mathbf{a} \mathbf{I}_1 = -\mathbf{I}_{L2} \quad (2.23)$$

Proud ve zpětném vodiči se tedy rovná záporné hodnotě proudu chybějící fáze. To stejné bude platit při symetrických trojfázových zkratech a proudových přetíženích chráněného zařízení.

V případě dvoufázových zkratů závisí proudové poměry na umístění přístrojových transformátorů proudu do jednotlivých fází chráněného zařízení.



Obr. 2-8 Zapojení přístrojových transformátorů proudu do neúplné hvězdy [1]

Pokud zkrat vznikne mezi fázemi ve kterých jsou zapojené přístrojové transformátory proudu, např. zkrat L1-L3, obr. 2-8, potom proud ve zpětném vodiči bude nulový, protože proud $\mathbf{I}_{L1} = -\mathbf{I}_{L3}$. Tedy poruchové proudy jsou stejně velké, ale mají opačné znaménko. Součet proudů bude nulový.

Když zkrat vznikne mezi fázemi tak, že jedna z nich nemá přístrojový transformátor proudu nainstalován, např. zkraty L1-L2, L3-L2, potom proud ve zpětném vodiči bude stejný jako proud poškozené fáze přepočítaný převodem na sekundární stranu.

Zapojení přístrojových transformátorů proudu do neúplné hvězdy se používá pro zachycení mezifázových zkratů v neúčinně uzemněných soustavách [1].

2.7.3 Zapojení přístrojových transformátorů proudu do trojúhelníka

Zapojení přístrojových transformátorů proudu do trojúhelníka je zobrazeno na obr. 2-9. Při tomto zapojení protékají vinutími rozběhových členů A_{L1} , A_{L2} a A_{L3} proudy dané rozdíly proudů v sekundárních vinutích přístrojových transformátorů proudu.

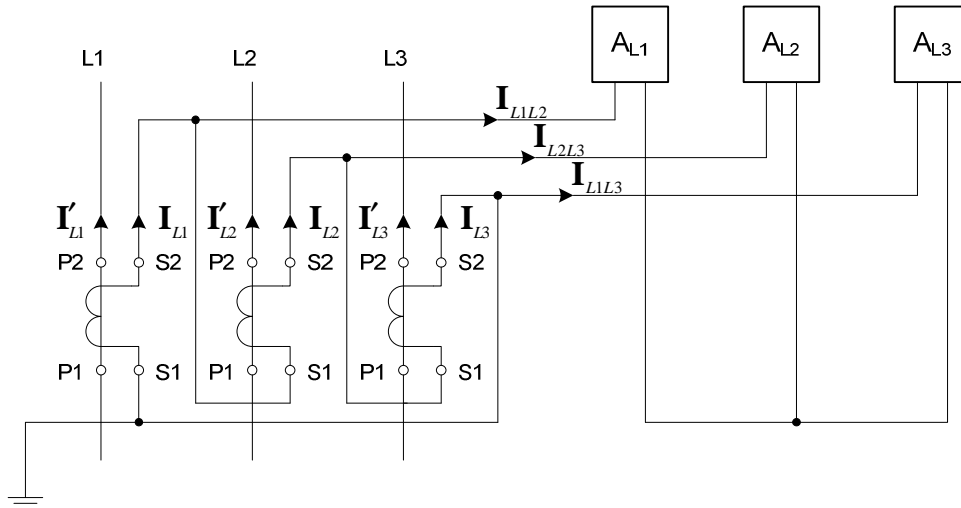
$$\mathbf{I}_{L1L2} = \mathbf{I}_{L1} - \mathbf{I}_{L2} \quad \mathbf{I}_{L2L3} = \mathbf{I}_{L2} - \mathbf{I}_{L3} \quad \mathbf{I}_{L3L1} = \mathbf{I}_{L3} - \mathbf{I}_{L1} \quad (2.24)$$

V normálním provozu bude přes cívku rozběhového členu A_{L1} protékat proud

$$\mathbf{I}_{L1L2} = \mathbf{I}_{L1} - \mathbf{I}_{L2} = \mathbf{I}_1 - \mathbf{a}^2 \mathbf{I}_1 = (1 - \mathbf{a}^2) \mathbf{I}_1 = -j\sqrt{3} \mathbf{a} \mathbf{I}_1 = -j\sqrt{3} \mathbf{a} \mathbf{I}_{L1} \quad (2.25)$$

Cívkou rozběhového členu A_{L1} bude protékat proud $\sqrt{3}$ -krát větší než je fázová hodnota proudu \mathbf{I}_{L1} . Fázor proudu \mathbf{I}_{L1} je natočený o úhel 30° v kladném směru.

Podobné poměry nastanou při trojfázovém symetrickém zkratu a proudovém přetížení chráněného zařízení.



Obr. 2-9 Zapojení přístrojových transformátorů proudu do trojúhelníka [1]

V případě nesymetrických zkratů cívkou rozběhového členu A_{L1} bude protékat proud

$$\mathbf{I}_{L1L2} = \mathbf{I}_{L1} - \mathbf{I}_{L2} = \mathbf{I}_1 + \mathbf{I}_2 - (\mathbf{a}^2 \mathbf{I}_1 - \mathbf{a} \mathbf{I}_2) = (1 - \mathbf{a}^2) \mathbf{I}_1 + (1 - \mathbf{a}) \mathbf{I}_2 \quad (2.26)$$

Z výpočtu proudů (2.26) vyplývá, že zapojení do trojúhelníka působí jako filtr na souslednou a zpětnou složku proudu. Netočivá složka se uzavírá ve vnitřním vinutí trojúhelníka a na výstupu filtru se neobjeví. Rozběhové členy připojené na jistící transformátory proudu zapojené do trojúhelníka budou reagovat na všechny typy mezifázových zkratů. Zemní zkraty není možno identifikovat pomocí zapojení PTP do trojúhelníka, protože rozběhové členy ochrany nemají na vstupu netočivé složky proudů.

Hlavní použití přístrojových transformátorů zapojených do trojúhelníka je pro rozdílovou ochranu transformátoru [1].

2.7.4 Součtové zapojení přístrojových transformátorů proudu

Součtové zapojení přístrojových transformátorů proudu, tzv. Holmgreenovo zapojení je zobrazeno na obr. 2-10. Základní podmínkou správné činnosti tohoto zapojení je, aby impedance sekundárních vinutí transformátorů $Z_{PTP} \gg Z_A$, tj. impedance PTP, byly o mnoho větší než impedance rozběhového členu A. Tímto je zabezpečený tok proudu směrem do vstupního obvodu ochrany. Druhou podmínkou je, aby impedance sekundárních vinutí použitých přístrojových transformátorů proudu byly přibližně stejné. Touto podmínkou se vylučuje vzájemné šuntování vinutí transformátorů proudu Holmgreenovy skupiny.

3 PŘÍSTROJOVÉ TRANSFORMÁTORY NAPĚTÍ

Přístrojové transformátory napětí jsou určeny pro napájení napěťových systémů měřících, jistících a regulačních přístrojů. Jejich primární strana se připojí paralelně k obvodu kde se sleduje velikost napětí. Na sekundární stranu se připojí potřebné elektrické přístroje.

Provedení přístrojových transformátorů napětí může být různé. Podle způsobu transformace se rozlišují:

- *indukční přístrojový transformátor napětí* – primární a sekundární vinutí jsou navzájem svázána prostřednictvím magnetického obvodu,
- *kapacitní přístrojový transformátor napětí* – primární napětí se na výslednou sekundární hodnotu transformuje ve dvou stupních. Transformace napětí se v prvním stupni uskutečňuje použitím kapacitních děličů napětí a v druhém stupni je použité měřící příslušenství, které obsahuje druhý indukční transformační stupeň a pomocná zařízení (*obr. 3-1*). Měřící příslušenství s pomocným zařízením obvykle obsahuje prvky pro kompenzaci chyb převodu napětí, a také prvky pro útlum ferorezonance.
- *elektronický transformátor napětí* – jeden nebo více napěťových senzorů, které mohou být připojeny do přenosového systému a sekundárního konvertoru

Podle počtu fází a podle izolace primárního vinutí přístrojové transformátory napětí mohou být:

- jednofázový jednopólově izolovaný přístrojový transformátor napětí,
- jednofázový dvoupólově izolovaný přístrojový transformátor napětí,
- trojfázový plně izolovaný přístrojový transformátor napětí,
- trojfázový uzemněný přístrojový transformátor napětí.

Podle počtu sekundárních výstupů se přístrojové transformátory napětí dělí na PTN s jedním nebo více výstupy. Zvláštním provedením jsou kaskádové transformátory napětí [1].

3.1 Základní pojmy přístrojových transformátorů napětí

Základními elektrickými veličinami, které blíže určují vlastnosti transformátorů napětí, jsou následující veličiny:

Jmenovité primární napětí U_{1n} je efektivní hodnota primárního napětí, která je podkladem pro konstrukci PTN. Je uvedena na štítku PTN.

Jmenovité sekundární napětí U_{2n} je efektivní hodnota napětí uvedená na štítku, podle jmenovitého napěťového převodu, odpovídající jmenovitému primárnímu napětí. Pro trojfázové izolované a dvojfázové izolované přístrojové transformátory napětí jmenovitá hodnota sekundárního napětí je 100 V nebo 110 V (pro rozsáhlé sekundární obvody i 200 V). Pro trojfázové uzemněné transformátory a jednopólově izolované transformátory je jmenovitá hodnota sekundárního napětí $100/\sqrt{3}$, $110/\sqrt{3}$, případně $200/\sqrt{3}$.

Jmenovitý převod k_U je poměr jmenovitého primárního napětí U_{1n} ke jmenovitému sekundárnímu napětí U_{2n}

$$k_U = \frac{U_{1n}}{U_{2n}} \quad (3.1)$$

Břemeno Y je admitance přístrojů a přívodů připojených na sekundární svorky transformátoru

$$Y = \sqrt{G^2 + B^2} \quad (3.2)$$

kde G je konduktance přívodních vodičů a přístrojů [S],

B je susceptance přívodních vodičů a přístrojů [S].

Jmenovitým břemenem Y_n se rozumí admitance, kterou může být přístrojový transformátor zatížený v měřicím rozsahu bez toho, aby se překročily dovolené chyby.

Zátěž S je součin břemene Y a čtverce jmenovitého sekundárního napětí U_{2n}

$$S = YU_{2n}^2 \quad (3.3)$$

Jmenovitá zátěž S_n je součin břemene Y_n a čtverce jmenovitého sekundárního napětí U_{2n}

$$S_n = Y_n U_{2n}^2 \quad (3.3)$$

Krajní zátěž rozumíme zátěž, kterou je možno trvale zatížit sekundární vinutí při trvale zvýšeném napětí, přičemž chyba napětí nesmí překročit -10 % a oteplení nesmí být vyšší než je dovolené.

Třída přesnosti je označení přidělené přístrojovému transformátoru napětí, které určuje jeho největší dovolené chyby při předepsaných podmínkách provozu. Třída přesnosti měřicích transformátorů napětí jsou 0,1-0,2-0,5-1-3. Třída přesnosti určuje dovolené amplitudové chyby napětí a dovolené chyby úhlu.

Relativní chyba amplitudy napětí ε_U je chyba způsobená tím, že skutečný převod transformátoru se nerovná jmenovitému převodu. Relativní chyba amplitudy napětí vyjádřená v procentech je dána vztahem

$$\varepsilon_U = \frac{k_U U_2 - U_1}{U_1} 100 \quad (3.4)$$

kde U_1 je primární napětí,

U_2 je sekundární napětí odpovídající primárnímu napětí,

k_U je jmenovitý převod přístrojového transformátoru napětí.

Dovolené chyby napětí jistících transformátorů napětí jsou uvedeny v *tab. 3.1*.

Tab. 3-1 Dovolené chyby napětí jistících transformátorů napětí

Třída	Chyba napětí $\pm \varepsilon_U$ [%]	Chyba úhlu $\pm \delta_U$ [min.]
3P	3	120
6P	6	240

Chyba úhlu δ_U je rozdíl úhlů mezi fázorem primárního napětí a fázorem sekundárního napětí. Směr fázorů napětí U_1 a U_2 se volí tak, že pro ideální transformátor se úhel δ_U rovná nule. Chyby úhlů jistících přístrojových transformátorů jsou uvedeny v tab. 3-1.

Hodnoty chyb napětí a úhlu uvedené v tab. 3-1 se nesmí překročit pro zátěž v rozsahu 25 % až 100 % jmenovité zátěže, při jmenovitém sekundárním účinníku $\cos \varphi = 0,8$ a při napětí se jmenovitou frekvencí v rozsahu 5 % jmenovitého napětí až do zvýšeného napětí [1].

3.2 Kapacitní transformátory napětí

Kapacitní přístrojový transformátor napětí se skládá z kapacitního děliče C_1 a C_2 , kompenzační tlumivky L , snižovacího transformátoru T a speciálního tlumícího obvodu Z_f , který slouží k potlačení ferorezonančních jevů, obr. 3-1a. Na výstupní svorky a-n přístrojového transformátoru napětí se připojí impedance vnějšího břemene Z_b . Na odbočce z kapacitních děličů C_1 a C_2 se získá snížené napětí přibližně 1 až 4 kV, jehož velikost je závislá na konstrukci transformátoru napětí. Na odbočku kapacitních děličů se připojí indukčnost L a snižovací transformátor T . Primární a sekundární vinutí transformátoru T je přizpůsobeno tak, aby se na sekundární straně dosáhlo jmenovité napětí $100/\sqrt{3}$ V, vhodné pro napájení měřících přístrojů a napěťových obvodů ochran.

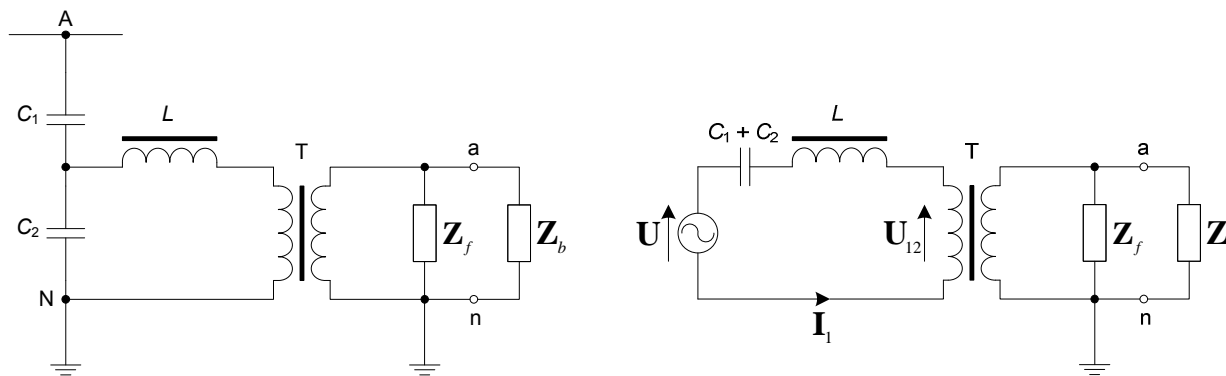
Hlavním účelem indukčnosti L je eliminovat úhlovou chybu sekundárního napětí přístrojového transformátoru, která je způsobena kapacitami děliče (C_1 a C_2) při zemním zkratu. Napětí U_{12} na vstupním vinutí transformátoru T , obr. 3-1b, při průtoku proudu I_1 vinutím je

$$\begin{aligned}
 U_{12} &= \frac{C_1}{C_1 + C_2} U_f - I_1 \left(j\omega L + \frac{1}{j\omega(C_1 + C_2)} \right) = \\
 &= U - I_1 \left(j\omega L + \frac{1}{j\omega(C_1 + C_2)} \right)
 \end{aligned}
 \tag{3.5}$$

kde U_f je primární hodnota fázového napětí.

Pro eliminaci úhlové chyby je potřeba, aby indukčnost L byla v rezonanci s kapacitami ($C_1 + C_2$) při jmenovité síťové frekvenci, což se dosáhne splnění následující podmínky:

$$L = \frac{1}{\omega^2} \frac{1}{C_1 + C_2}
 \tag{3.6}$$



Obr. 3-1 Kapacitní přístrojový transformátor napětí [1];

a) schéma zapojení

b) náhradní schéma pro kompenzaci chyby úhlu

Kapacitní transformátor napětí je velmi citlivý na vznik ferorezonačních jevů, které vznikají při sériovém a paralelním spojení kapacit C a indukčnosti L se železným jádrem.

Ferorezonance vzniká v obvodech, ve kterých při přechodových jevech může dojít k přesycení magnetického obvodu s indukčností, která se potom chová jako nelineární prvek. Zatímco LC lineární oscilační obvod má jen jednu rezonační frekvenci, obvod LC se stejnými elektrickými parametry, ale s přesycovaným magnetickým obvodem může kmitat s libovolnou frekvencí v určitém rozsahu frekvencí. Proto obvody s různými součinou LC se mohou dostat do rezonance se základní frekvencí 50 Hz, případně se subharmonickými frekvencemi 50 Hz. Ferorezonanční jevy mohou mít charakter přechodný, ale i trvalý. Projevují se zvýšeným napětím a přítomností subharmonických frekvencí na sekundárních svorkách kapacitního transformátoru napětí. Proto je potřeba na těchto transformátorech udělat opatření, aby se tyto jevy v co nejkratším čase utlumily. Pro utlumení ferorezonančních jevů byla vyvinuta celá řada různých zapojení a tlumících impedancí Z_f , které se používají u kapacitních transformátorů napětí [1].

3.3 Napěťové senzory

Ve funkci přístrojových transformátorů napětí se mohou použít napěťové senzory. Napěťový senzor je konstrukčně řešený jako odporový dělič s velmi velkou rezistencí. Stejně jako proudový senzor ani napěťový senzor nemá magnetický obvod. Výstupní napětí je úměrné vstupnímu primárnímu napětí v poměrně širokém měřicím rozsahu. Použití napěťových senzorů si vynutilo snižování rozměrů vn rozvaděčů, a to zejména u plynem izolovaných vn rozvaděčů (SF6), kde jsou rozměry poloviční v porovnání se vzduchem izolovanými vn rozvaděči.

Výhody napěťových senzorů spočívají v tom, že u nich nemůže dojít k přesycení magnetického obvodu, a tedy nemůže dojít ani k vzniku ferorezonance. Mají malé rozměry a nízkou hmotnost. Vysoká linearita napěťového převodu umožňuje redukovat typy vyráběných senzorů, protože stejný typ senzoru může být použit pro rozsah několika jmenovitých fázových napětí.

U napěťových senzorů nesmí dojít ke změně rezistencí napěťového děliče ve všech normálních i poruchových stavech provozu. Přesnost napěťových senzorů v normálních podmínkách provozu je $\pm 0,5 \%$. Přesnost $\pm 0,2 \%$ požadovaná pro účely měření se může dosáhnout teplotní kompenzací výstupního napětí z napěťového senzoru, případně použitím

materiálů rezistorů s co nejmenšími teplotními koeficienty. Frekvenční rozsah měření napěťového senzoru je nižší než u proudového senzoru – několik kHz. Tento frekvenční rozsah postačuje pro napájení obvodů ochrany a měření kvality elektrické energie [1].

3.4 Elektronické transformátory napětí

Elektronické transformátory napětí sestávají z jednoho nebo více napěťových senzorů, které mohou být zapojeny do přenosového systému a sekundárních převodníků. Výstup sekundárního převodníku elektronických PTN je za normálních podmínek použití úměrný primárnímu napětí. Pro měření primárního napětí lze použít napěťový transformátor, odporový dělič, kapacitní dělič, impedanční dělič nebo optické senzory [5].

3.5 Zapojení přístrojových transformátorů napětí

Na sekundární svorky přístrojových transformátorů napětí se připojují napěťové obvody měřících a jistících přístrojů. Měřící a jistící obvody přístrojů, které se připojí na stejné napěťové výstupy transformátoru napětí, jsou vzájemně rozděleny a tím jsou i samostatně jištěny [1].

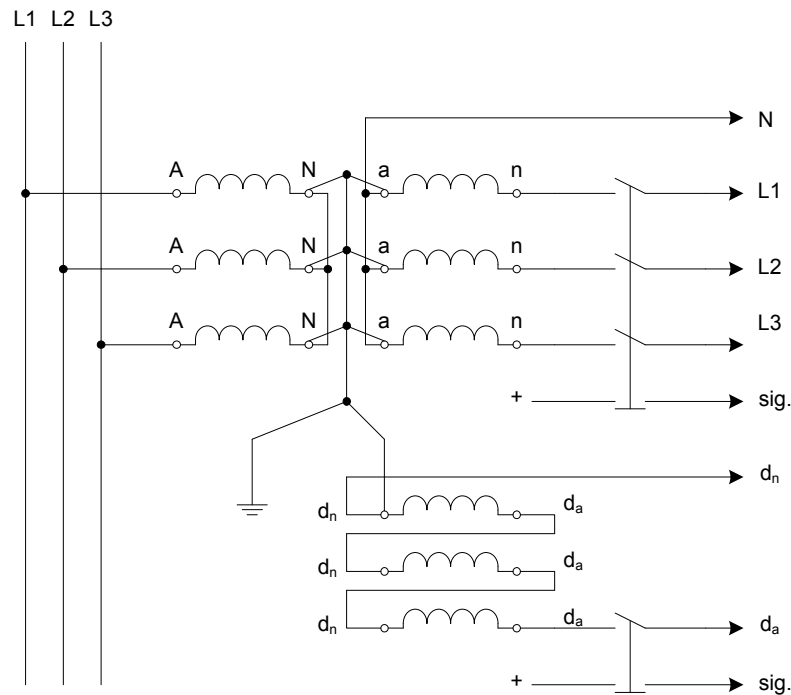
3.5.1 Jednofázové jednopólově izolované transformátory napětí

Jednofázové jednopólově izolované transformátory napětí se v trojfázové soustavě zapojí podle obr. 3-2. V daném schématu jsou použity tři přístrojové transformátory napětí. Každý transformátor má dvě sekundární vinutí. Na jedno z vinutí se připojí napěťové obvody přístrojů pro měření a jištění, druhé vinutí má speciální funkci. Hlavní sekundární vinutí je zapojeno do hvězdy. Na výstupu tohoto vinutí je fázová hodnota napětí $100/\sqrt{3}$ V, výjimečně $110/\sqrt{3}$ V. Druhé sekundární vinutí všech tří přístrojových transformátorů napětí se zapojí do otevřeného trojúhelníka. Jmenovité napětí druhého sekundárního vinutí je $100/3$ V, výjimečně $110/3$ V. Uzel primárního a sekundárního vinutí se uzemní. Dále se uzemňuje jedna z koncových svorek otevřeného trojúhelníka.

Na svorky otevřeného trojúhelníka se připojí nadpěťová ochrana. V normálním provozu se napětí na otevřeném trojúhelníku prakticky rovná nule:

$$U_V = U_{L1} + U_{L2} + U_{L3} = U_1 + a^2 U_1 + a U_1 = 0 \quad (3.7)$$

Ve skutečnosti se na svorkách otevřeného trojúhelníka objeví malé napětí asi 2-3 % U_n , které vznikne vlivem existující úhlové chyby a amplitudové chyby použitých transformátorů napětí, nesymetrie fázových napětí a vlivu vyšších harmonických vyskytujících se v chráněné síti.



Obr. 3-2 Zapojení jednopólově izolovaných transformátorů napětí [1]

Při nesymetrických poruchách v chráněné síti vzniká na výstupu otevřeného trojúhelníku napětí U_V , jehož velikost je:

$$U_V = U_{L1} + U_{L2} + U_{L3} = (U_1 + U_2 + U_0) + (a^2U_1 + aU_2 + U_0) + (aU_1 + a^2U_2 + U_0) = 3U_0 \quad (3.8)$$

Sekundární vinutí přístrojových transformátorů napětí zapojená do otevřeného trojúhelníku působí jako filtr na netočivou složku napětí $3U_0$. Vzhledem k tomu, že při mezifázových trojfázových a dvoufázových zkratech se netočivá složka napětí nevyskytuje, zapojení sekundárních vinutí do otevřeného trojúhelníku se používá na napájení napěťových obvodů ochran, které slouží na identifikaci zemních poruch.

Velikost napětí $3U_0$ závisí na způsobu provozu sítě z hlediska uzemnění uzlu transformátoru. V síti s neúčinně uzemněným uzlem transformátoru, když vznikne kovové zemní spojení, např. ve fázi L1, vzniknou napěťové poměry podle obr.3.3. Poškozená fáze při spojení fáze L1 se zemí získá potenciál země. Zdravé fáze, které měli fázové napětí vůči zemi, se změny na sdružené hodnoty

$$U'_{L2} = U_{L1L2} = \sqrt{3}U_{L2} \quad U'_{L3} = U_{L1L3} = \sqrt{3}U_{L3} \quad (3.9)$$

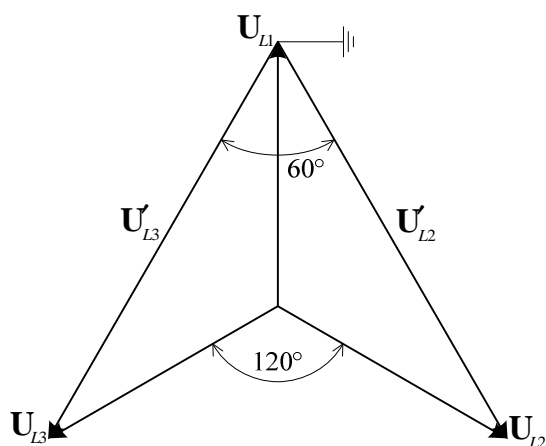
Sdružené napětí zdravých fází se objeví na primárních svorkách A-N přístrojových transformátorů napětí, protože jejich uzel N je uzemněný. Napětí fáze $U_{L1} = 0$, protože poškozená fáze L1 je spojena se zemí. Převodem sdružených napětí na sekundární stranu PTN se na vinutích d_a-d_n původní fázové napětí zvýší o $\sqrt{3}$, obr. 3.4.

$$U'_{L2'} = \sqrt{3}U_{L2'} = \sqrt{3}U_f \quad U'_{L3'} = \sqrt{3}U_{L3'} = \sqrt{3}U_f \quad (3.10)$$

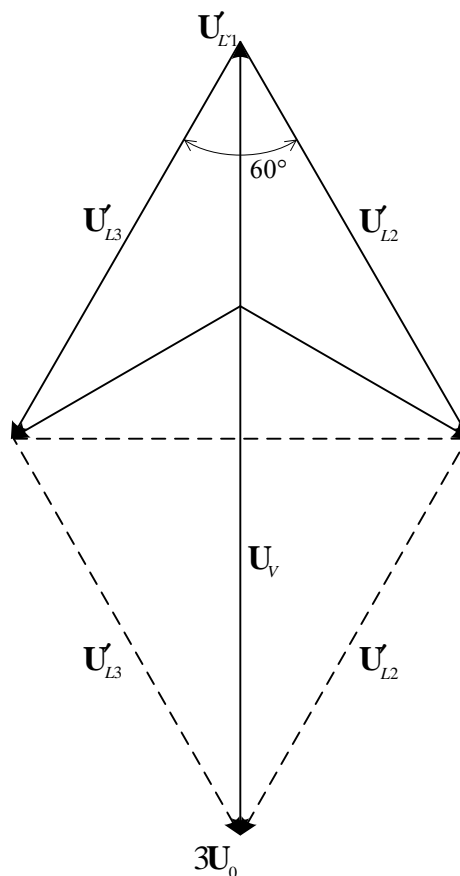
Součet těchto dvou fázorů napětí představuje výstupní napětí na otevřeném trojúhelníku $3U_0$. Výsledný fázor $3U_0$ dělí úhel mezi napětími $U_{L2'}$ a $U_{L3'}$ na polovinu, což je 30° . Podle obr. 3.4 je velikost výsledného napětí

$$U_V = 3U_0 = U'_{L2'} \cos 30^\circ + U'_{L3'} \cos 30^\circ = \sqrt{3} \cos 30^\circ (U_f + U_f) = 3U_f \quad (3.11)$$

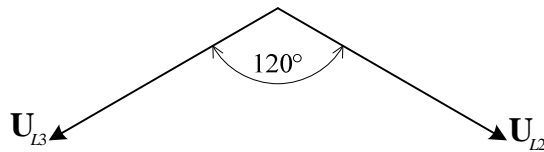
V síti s neúčinně uzemněným uzlem transformátoru se při kovovém zemním spojení na výstupních svorkách otevřeného trojúhelníku objeví maximální napětí netočivé složky složky $3U_0$. Velikost tohoto napětí $3U_0$, podle vztahu (3.11), se rovná trojnásobku sekundární fázové hodnoty napětí, tj. $3U_0 = 3 \frac{100}{3} = 100V$.



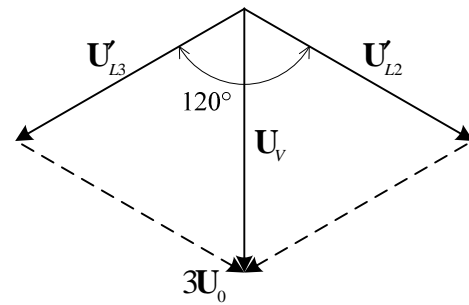
Obr. 3-3 Fázorový diagram primárních napětí sítě při jednofázovém zemním spojení ve fázi L1 [1]



Obr. 3-4 Fázorový diagram sekundárních napětí PTN při jednofázovém zemním spojení ve fázi L1 [1]



Obr. 3-5 Fázorový diagram primárních napětí sítě při jednofázovém zemním zkratu ve fázi L1 [1]



Obr. 3-6 Fázorový diagram sekundárních napětí PTN při jednofázovém zemním zkratu ve fázi L1 [1]

V síti s účinně uzemněným uzlem, v místě jednofázového zkratu, např. fáze L1, bude napětí poškozené fáze rovné nule, obr. 3-5. Primární vinutí přístrojového transformátoru napětí ve fázi L1 je tímto jednofázovým zkratem vyzkratováno, tj. $U_{L1} = 0$ (ve skutečnosti to nebude nulová hodnota, ale úbytek napětí který vznikne mezi místem zabudování PTN a místem zkratu). Fázová napětí nepoškozených fází si zachovají svou velikost a vzájemný úhel 120° , obr. 3-5.

Na obr. 3-6 jsou znázorněna napětí na sekundární straně PTN při zkratu ve fázi L1. Součet fázorů napětí U_{L2} a U_{L3} představuje napětí otevřeného trojúhelníku $3U_0$. Fázor $3U_0$ rozděljuje úhel mezi fázory U_{L2} a U_{L3} na polovinu, což je 60° .

Jelikož o velikosti napětí platí $U_{L2} = U_{L3} = U_f$, pak podle obr. 3-6 platí

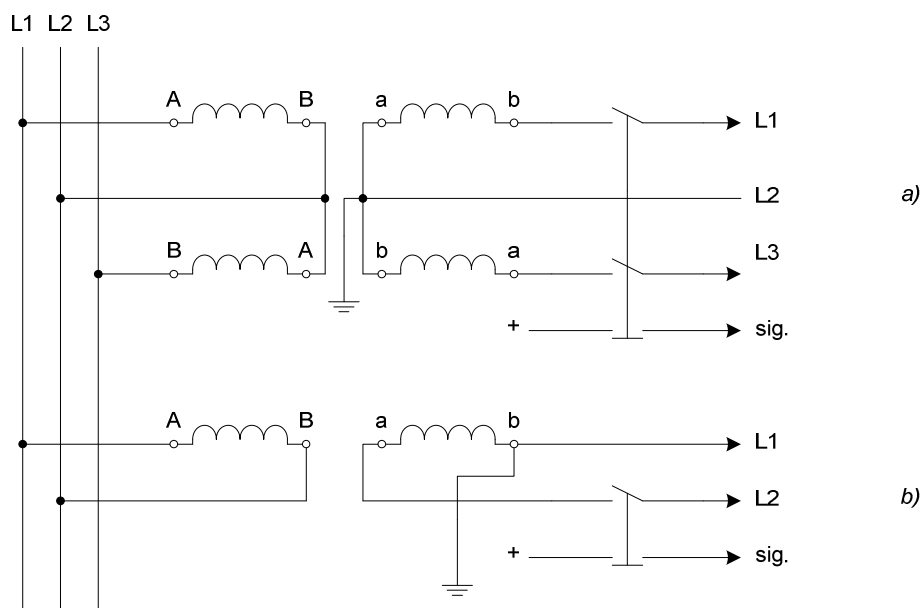
$$U_V = 3U_0 = U_{L2} \cos 60^\circ + U_{L3} \cos 60^\circ = 2U_f \cos 60^\circ = U_f \quad (3.12)$$

V síti, která je provozovaná s účinně uzemněným uzlem transformátoru, vznikne maximální hodnota netočivé složky napětí při jednofázovém kovovém zkratu. Velikost tohoto napětí je $3U_0 = \frac{100}{3} \text{ V}$ [1].

3.5.2 Dvoupólově izolované přístrojové transformátory napětí

Dvoupólově izolované přístrojové transformátory napětí se v trojfázové soustavě, při požadavku mít všechna tři napětí na sekundární straně, zapojí do tvaru písmene V, podle obr. 3-7a.

Přístrojové transformátory napětí se připojují primární stranou na sdružená napětí. Na svorkách PTN sekundární strany jsou k dispozici sdružená napětí. Připojení dvojpólově izolovaného přístrojového transformátoru napětí k trojfázové síti pro získání jen jedné sdružené hodnoty napětí je znázorněno na obr. 3-7b. Zároveň je na obr. 3-7 znázorněno jištění sekundárních obvodů PTN a signalizace vypnutí jističů [1].



Obr. 3-7 Zapojení dvoupólově izolovaných přístrojových transformátorů napětí pro měření a jistění [1];

a) trojfázových sdružených napětí,

b) sdruženého napětí mezi fázemi L1-L2

4 POŽADAVKY NA DIMENZOVÁNÍ TRANSFORMÁTORŮ PROUDU

Jak je uvedeno výše, volba třídy transformátoru proudu závisí hlavně na praktických zkušenostech. Firma AREVA ale naproti tomu uvádí jistá doporučení použití jednotlivých tříd, která jsou dále uvedena [21]:

- Třída P – všeobecné použití, především pro nadproudové ochrany,
- Třída PX – vysokoimpedanční diferenciální ochrany, jsou použitelné pro většinu ochranných aplikací,
- Třída TPS – především vysokoimpedanční diferenciální ochrany,
- Třída TPX – použití pro ochrany vedení,
- Třída TPY – typicky pro ochrany vedení s opětovným zapnutím,
- Třída TPZ – speciální aplikace, např. diferenciální ochrana velkých generátorů.

Ve většině aplikací se dají použít transformátory třídy P, často ovšem s podmínkou dostatečného předdimenzování.

Přístrojové transformátory proudu třídy P se pro potřeby digitálních ochran dimenzují především podle skutečného nadproudového čísla n . Toto číslo je závislé na velikosti skutečného břemene na sekundární straně, přičemž se zanedbávají reaktance. Skutečné nadproudové číslo se dá určit podle vztahu

$$n = n_n \frac{R_{ct} + R_{bn}}{R_{ct} + R_b} \quad (4.1)$$

kde R_{ct} je vnitřní odpor transformátoru proudu [Ω],
 R_{bn} je jmenovité břemeno transformátoru proudu [Ω],
 R_b je skutečné břemeno připojené na sekundární stranu [Ω].

Vnitřní odpor transformátoru proudu je nutné zjistit od výrobce.

Jmenovité břemeno můžeme určit ze jmenovité zátěže a jmenovitého sekundárního proudu

$$R_{bn} = \frac{S_n}{I_{2n}^2} \quad (4.2)$$

Skutečné břemeno potom odpovídá součtu rezistencí přívodního vedení, vstupního odporu ochrany a stykového odporu připojení přívodního vedení (uvažuje se asi 20 m Ω). V dokumentaci ochran bývají většinou uvedeny výkonové ztráty vstupního proudového obvodu ochrany P_i . Vstupní odpor se pak určí z těchto výkonových ztrát a jmenovitého sekundárního proudu. Platí následující vztahy

$$R_b = 2R_l + R_i + R_s \quad (4.3)$$

$$R_l = \frac{\rho \cdot l}{A} \quad (4.4)$$

$$R_i = \frac{P_i}{I_{2n}^2} \quad (4.5)$$

- kde R_l je odpor fáze přívodního vedení [Ω],
 ρ je rezistivita materiálu přívodního vedení [$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$],
 l je délka přívodního vedení [m],
 A je průřez přívodního vedení [mm^2],
 R_i je vstupní odpor proudového obvodu ochrany [Ω],
 R_s je stykový odpor připojení přívodního vedení [Ω].

Často se dimenzování provádí podle tzv. limitního napětí E_k (v anglické literatuře pod názvem Knee-Point Voltage). Toto napětí je definováno jako efektivní hodnota sekundárního napětí transformátoru proudu při napájení ze sekundární strany a primárních svorkách rozpojených, které když se zvýší o 10 %, tak magnetizační proud se zvýší o 50 %.

Firma Siemens uvádí vztahy pro určení limitního napětí transformátorů třídy P, popř. určení nadproudového čísla pomocí limitního napětí. Pro výpočet limitního napětí platí

$$E_k = \frac{(R_{ct} + R_{bn}) \cdot I_{2n} \cdot n_n}{1,3} \quad (4.6)$$

A pro výpočet nadproudového čísla pak:

$$n_n = \frac{1,15 \cdot E_k}{(R_{ct} + R_{bn}) \cdot I_{2n}} \quad (4.7)$$

Firma AREVA uvádí výpočet obdobný vztahu (4.6)

$$E_k = (R_{ct} + R_{bn}) \cdot I_{2n} \cdot n_n \quad (4.8)$$

Pokud není znám vnitřní odpor transformátoru, je možné ho zanedbat. Je zřejmé, že výpočet pomocí vztahu (4.6) je o něco skeptičtější na schopnosti proudového transformátoru třídy P.

Požadavky na nadproudové číslo či limitní napětí pro jednotlivé typy ochran se u každého výrobce poměrně liší. Z tohoto důvodu lze těžko stanovit nějaká všeobecná doporučení. V dalších kapitolách jsou proto uvedeny požadavky firem Siemens, ABB a AREVA.

4.1 Požadavky na PTP pro ochrany Siemens

Primární jmenovitý proud transformátoru proudu se volí podle provozního proudu chráněného zařízení, přičemž by měl splňovat podmínku

$$I_{1n} < \frac{I_{scc, \max}}{100} \quad (4.9)$$

kde $I_{scc, \max}$ je maximální zkratový proud [A].

V opačném případě může proudový transformátor poškodit ochranu, protože nedochází k syčení magnetického obvodu. Hodnota sekundárního jmenovitého proudu se volí přednostně 5 A, v případě dlouhého vedení od transformátoru k ochraně pak 1 A [7].

Dále uvedené informace vycházejí z prezentace [7] - CT Dimensioning (Dimenzování PTP) dostupné na stránkách společnosti Siemens. Požadavky jsou zjednodušeny pro možnost rychlého výpočtu.

4.1.1 Nadproudové ochrany

Pro nadproudové ochrany je důležité především aby nedošlo k nasycení proudového transformátoru před dosažením nastavené hodnoty $I_{>>}$, tzn. nastavení zkratové spouště ochrany. Tato podmínka je splněna pokud pro skutečné nadproudové číslo platí

$$n \geq \frac{I_{>>}}{I_{1n}} \quad (4.10)$$

$$n \geq 20 \quad (4.11)$$

Je-li charakteristikou PTP limitní napětí, musí toto odpovídat vztahům

$$E_k \geq \frac{I_{>>}}{1,3 \cdot I_{1n}} \cdot (R_{ct} + R_b) \cdot I_{2n} \quad (4.12)$$

$$E_k \geq \frac{20}{1,3} \cdot (R_{ct} + R_b) \cdot I_{2n} \quad (4.13)$$

Při splnění těchto podmínek je zajištěna stabilita jištění nadproudových ochran 7SJ511, 7SJ512, 7SJ531, 7SJ45, 7SJ46, 7SJ60, 7SJ61, 7SJ62, 7SJ63 a 7SJ64.

4.1.2 Diferenciální ochrany

Tyto ochrany musí být stabilní při vnějších poruchách a při vnitřních naopak vysoce citlivé. Pro dimenzování je potřeba určit maximální vnější zkratový proud $I_{scc,max(ext.fault)}$ a dále je nutný (mimo ochranu 7SD600) činitel pro dimenzování pro přechodové jevy K_{td} .

Diferenciální ochrana vedení s pomocným vodičem 7SD600 vyžaduje splnění těchto podmínek pro nadproudové číslo, resp. limitní napětí

$$n \geq \frac{I_{scc,max(ext.fault)}}{I_{1n}} \quad (4.14)$$

$$E_k \geq \frac{I_{scc,max(ext.fault)}}{1,3 \cdot I_{1n}} \cdot (R_{ct} + R_b) \cdot I_{2n} \quad (4.15)$$

A dále v případě použití jiných proudových transformátorů na začátku a na konci vedení podmínky (4.16), resp. (4.17)

$$\frac{3}{4} \leq \frac{(n \cdot I_{1n})_{end1}}{(n \cdot I_{1n})_{end2}} \leq \frac{4}{3} \quad (4.16)$$

$$\frac{3}{4} \leq \frac{(E_k \cdot (R_{ct} + R_b) \cdot I_{1n} / I_{2n})_{end1}}{(E_k \cdot (R_{ct} + R_b) \cdot I_{1n} / I_{2n})_{end2}} \leq \frac{4}{3} \quad (4.17)$$

Pro další diferenciální ochrany firma Siemens uvádí činitel K_{td} . Přehled pro jednotlivé ochrany a chráněná zařízení je uveden v tab. 4-1.

Tab. 4-1 Činitel K_{td} pro diferenciální ochrany Siemens

Diferenciální ochrany vedení (bez funkce distančního chránění)	Chráněné zařízení		
	Transformátor	Přípojnice/Vedení	Generátor/Motor
7SD52x, 53x, 610	1,2	1,2	1,2
Diferenciální ochrany transformátorů/generátorů	Transformátor	Přípojnice/Vedení	Generátor/Motor
7UT612	4	4	5
7UT613, 633, 635	3	3	5
7UM62	4	-	5

Požadavek na nadproudové číslo, resp. limitní napětí se pak určí dosazením konkrétního činitele do následujících vztahů

$$n \geq K_{td} \cdot \frac{I_{scc,max(ext.fault)}}{I_{1n}} \quad (4.18)$$

$$E_k \geq K_{td} \cdot \frac{I_{scc,max(ext.fault)}}{1,3 \cdot I_{1n}} \cdot (R_{ct} + R_b) \cdot I_{2n} \quad (4.19)$$

Pro ochrany přípojnic 7SS5 a 7SS600 se ve vztazích (4.18) a (4.19) používá činitel $K_{td} = 0,5$. Dále pro tyto ochrany musí být splněno

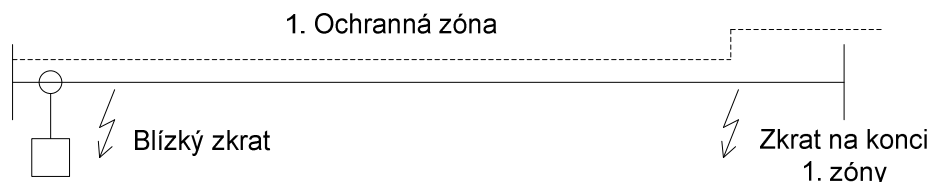
$$n \leq 100 \quad (4.20)$$

$$E_k \leq \frac{100}{1,3} \cdot (R_{ct} + R_b) \cdot I_{2n} \quad (4.21)$$

Splnění podmínek (4.20) a (4.21) je nutné z hlediska měřicího rozsahu.

4.1.3 Distanční ochrany

Distanční ochrany musí bez zpoždění spustit při poruchách v 1. ochranné zóně. Při poruchách mimo 1. zónu pak po nastaveném zpoždění. Nasycení transformátoru proudu při poruše v 1. zóně je tedy přípustné jen pokud je zbytkový proud postačující pro správnou funkci ochrany. K nasycení transformátoru při poruše mimo 1. zónu může dojít až po nastaveném zpoždění pro vybavení ochrany.



Obr. 4.1 Distanční ochrana

Pro správné dimenzování přístrojový transformátorů proudu je potřeba znát maximální zkratový proud na začátku 1. zóny $I_{scc,max(close-in)}$, maximální zkratový proud na konci 1. zóny $I_{scc,max(zone1-end)}$ a primární časovou konstantu zkratového proudu T_p . Primární časové konstantě potom odpovídají činitelé $K_{td(a)}$ a $K_{td(b)}$, které jsou pro distanční ochrany 7SA522, 7SA6 a diferenciální ochrany vedení s distanční funkcí 7SD5xx uvedeny v tab. 4-2.

Tab. 4-2 Činitelé $K_{td(a)}$ a $K_{td(b)}$ pro distanční ochrany Siemens

	Primární časová konstanta T_p [ms]			
	≤ 30	≤ 50	≤ 100	≤ 200
$K_{td(a)}$	1	2	4	4
$K_{td(b)}$	4	5	5	5

Dosažením těchto činitelů do následujících vztahu se pak určí potřebná velikost nadproudového čísla, resp. limitního napětí:

$$n \geq K_{td(a)} \cdot \frac{I_{scc,max(close-in)}}{I_{1n}}, \text{ a zároveň:} \quad (4.22)$$

$$n \geq K_{td(b)} \cdot \frac{I_{scc,max(zone1-end)}}{I_{1n}} \quad (4.23)$$

$$E_k \geq K_{td(a)} \cdot \frac{I_{scc,max(close-in)}}{1,3 \cdot I_{1n}} \cdot (R_{ct} + R_b) \cdot I_{2n}, \text{ a zároveň:} \quad (4.24)$$

$$E_k \geq K_{td(b)} \cdot \frac{I_{scc,max(zone1-end)}}{1,3 \cdot I_{1n}} \cdot (R_{ct} + R_b) \cdot I_{2n} \quad (4.25)$$

Splněním uvedených podmínek se zajistí stabilní funkce daných distančních ochran.

4.2 Požadavky na PTP pro ochrany ABB

Následující informace vycházejí z aplikačních manuálů těchto ochran: nadproudové – REL 505, transformátorové diferenciální – RET 521, diferenciálních pro vedení – REL 551, 561, 356 a distančních ochran – REL 501, 511, 521, 531, 561. Některé tyto ochrany mají více možných ochranných funkcí, a proto jsou v dalších kapitolách uvedeny požadavky pro jednotlivé ochranné funkce. Tyto požadavky jsou totožné pro všechny výše uvedené digitální ochrany, pokud danou ochrannou funkci poskytují. Manuály těchto ochran jsou volně dostupné na stránkách společnosti ABB.

Činnost ochran řady REx 5xx závisí na kvalitě vstupního proudového signálu. Ochrany této řady jsou navrženy tak, aby dodržely správnou funkci i při relativně vysokém sycení transformátoru proudu. Pro dodržení správné funkce je nutné, aby transformátor před nasycením přesně reprodukoval proud aspoň po minimální dobu. Ke splnění tohoto požadavku kladou tyto ochrany nárok na minimální velikost dovolené sekundární elektromotorické síly E_{al} , vztah (2.14). ABB dále uvádí přibližný vztah mezi E_{al} a limitním napětím

$$E_{al} \approx 1,2 \cdot E_k \quad (4.26)$$

Převod transformátorů by měl být zvolen tak, aby proud tekoucí do ochrany byl větší než minimální provozní proud terminálu pro všechny poruchy, které se mají detekovat. Minimální provozní proud je 20 % jmenovitého.

Proudová chyba transformátoru může limitovat použití citlivých reziduálních nadproudových ochran. Pokud bude použito velmi citlivé nastavení těchto ochran je doporučeno, aby chyba transformátoru při jmenovitém primárním proudu byla menší než ± 1 % (např. třída 5P).

Všechny transformátory proudu s vysokým či nízkým remanentním tokem mohou být použity pokud budou splněny nároky na velikost E_{al} . V případě PTP bez remanentního toku (TPZ) se doporučuje kontaktovat ABB pro potvrzení, zda může být pro danou aplikaci použit.

V následujících vztazích se odpor přírodního kabelu jako součet odporu fázového a středního vodiče (hodnota $2R_l$) použije pro uzemněné soustavy. V případě uzemnění přes vysokou impedanci se volí pouze odpor fázového vodiče (R_l).

Pro výpočet vnitřního odporu R_i všech uvedených ochranných terminálů lze použít výkonových ztrát $P_i = 0,25$ W.

4.2.1 Nadproudové ochrany a ochrany při zemních poruchách

Nesměrová okamžitá nebo časově nezávislá fázová a reziduální nadproudová ochrana

$$E_{al} \geq E_{alreq} = 1,5 \cdot I_{op} \cdot \frac{I_{2n}}{I_{1n}} \cdot (R_{ct} + R_l + R_i) \quad (4.27)$$

kde E_{alreq} je požadovaná hodnota sekundární e.m.s. [V],
 I_{op} je hodnota primárního vybavovacího proudu [A].

Primární vybavovací proud I_{op} se volí vyšší než 30 % maximálního primárního zkratového proudu $I_{scc,max}$ pro primární časovou konstantu $T_p \leq 50$ ms. Pro $T_p > 50$ ms pak více než 20 % tohoto proudu.

Nesměrová zpožděná nadproudová ochrana s inverzní charakteristikou

$$E_{al} \geq E_{alreq} = 20 \cdot I_{op} \cdot \frac{I_{2n}}{I_{1n}} \cdot (R_{ct} + R_l + R_i) \quad (4.28)$$

A dále nezávisle na vybavovacím proudu

$$E_{al} \geq E_{alreqmax} = I_{scc,max} \cdot \frac{I_{2n}}{I_{1n}} \cdot (R_{ct} + R_l + R_i) \quad (4.29)$$

Směrová fázová nadproudová ochrana

$$E_{al} \geq E_{alreq} = I_{scc,max} \cdot \frac{I_{2n}}{I_{1n}} \cdot a_1 \cdot (R_{ct} + R_l + R_i) \quad (4.30)$$

kde a_1 je konstanta závislá na primární časové konstantě [-].

$a_1 = 1$ pro $T_p \leq 50$ ms.

$a_1 = 2$ pro $T_p > 50$ ms.

Směrová reziduální nadproudová ochrana pro uzemněné soustavy (funkce TEF)

$$E_{al} \geq E_{alreq} = I_{scc,max} \cdot \frac{I_{2n}}{I_{1n}} \cdot a_2 \cdot (R_{ct} + R_l + R_i) \quad (4.31)$$

kde a_2 je konstanta závislá na primární časové konstantě a frekvenci sítě [-].

$a_2 = 2$ pro $T_p \leq 50$ ms, 50 a 60 Hz.

$a_2 = 3$ pro $T_p > 50$ ms, 50 Hz.

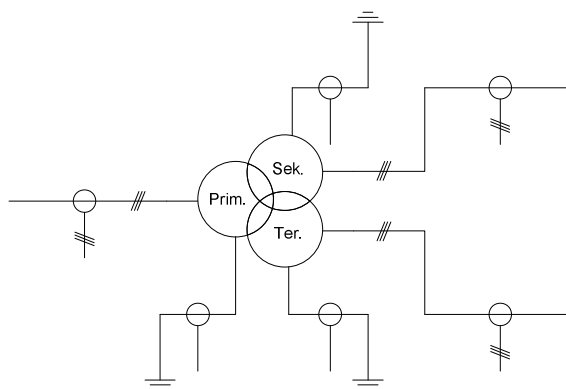
$a_2 = 4$ pro $T_p > 50$ ms, 60 Hz.

4.2.2 Diferenciální ochrany

Požadavky na tyto ochrany se podstatně liší podle typu chráněného zařízení. Dále jsou rozepsány potřeby diferenciálních ochran pro transformátory a pro vedení.

4.2.2.1 Diferenciální ochrany transformátorů

Podle doporučení ABB by hlavní PTP, tj. proudové transformátory určené pro měření fázových proudů na primární, sekundární, případně terciární straně, by vždy měly být zapojeny do hvězdy.



Obr. 4.2 Zapojení PTP pro ochranu transformátoru

Aby se zabránilo nesprávnému působení ochrany po připojení transformátoru do sítě a za jeho provozu při poruchovém proudu tekoucím přes transformátor, je nutno splnit podmínku pro hlavní PTP

$$E_{al} \geq E_{alreq} = 30 \cdot I_{2n} \cdot (R_{ct} + R_l + R_i) \quad (4.32)$$

Aby se zabránilo nesprávnému působení ochrany za provozu transformátoru při poruchovém proudu tekoucím přes transformátor, je nutno splnit podmínku pro hlavní PTP

$$E_{al} \geq E_{alreq} = 2 \cdot I_{scc,tf} \cdot \frac{I_{2n}}{I_{1n}} \cdot (R_{ct} + R_l + R_i) \quad (4.33)$$

kde $I_{scc,tf}$ je maximální poruchový proud, který prochází dvěma hlavními PTP a výkonovým transformátorem [A].

Požadavek (4.33) je nutný v případě, že převody PTP nejsou stejné nebo nemají stejné magnetizační charakteristiky.

V rozvodnách, kde může poruchový proud procházet dvěma hlavními PTP aniž by procházel výkonovým transformátorem, musí PTP splňovat podmínku (4.32) a následující (4.34)

$$E_{al} \geq E_{alreq} = I_{scc,f} \cdot \frac{I_{2n}}{I_{1n}} \cdot (R_{ct} + R_l + R_i) \quad (4.34)$$

kde $I_{scc,f}$ je maximální poruchový proud, který prochází dvěma hlavními PTP a neprochází výkonovým transformátorem [A].

Požadavek (4.34) platí pro případ, že převody obou hlavních PTP jsou stejné a mají stejné magnetizační charakteristiky.

4.2.2.2 Diferenciální ochrany vedení

Minimální provozní proud pro diferenciální ochranu REL 551 je asi 20 % jmenovitého proudu vynásobeného koeficientem $CTFactor$.

Převod PTP v obou ochranných terminálech musí být stejný. Při použití jiného převodu v prvním terminálu než ve druhém se použije koeficient $CTFactor$ nastavitelný v terminálu ochrany v rozsahu 0,40 – 1,00. Výsledný převod bude potom odpovídat převodu PTP

vynásobeném tímto koeficientem. Koeficient $CTFactor$ se tedy použije pro srovnání odlišných převodů PTP ve dvou terminálech nebo ke snížení výsledného převodu se kterým souvisí minimální provozní proud.

Proudové transformátory musí vyhovovat dále uvedeným požadavkům na velikost E_{al} . Dané vztahy platí pro poruchové proudy s primární časovou konstantou menší než 120 ms

$$E_{al} > E_{alreq} = \frac{I_{scc,max(close-in)} \cdot I_{2n}}{I_{1n}} \cdot 0,5 \cdot (R_{ct} + R_l + R_i) \quad (4.35)$$

$$E_{al} > E_{alreq} = \frac{I_{scc,max(ext.fault)} \cdot I_{2n}}{I_{1n}} \cdot 2 \cdot (R_{ct} + R_l + R_i) \quad (4.36)$$

kde $I_{scc,max(close-in)}$ je maximální zkratový proud pro poruchy uvnitř chráněné zóny [A],

$I_{scc,max(ext.fault)}$ je maximální zkratový proud pro poruchy mimo chráněnou zónu a procházející touto zónou [A].

Součinitel 0,5 ve vzorci (4.35) se nahradí hodnotou 0,53 při $T_p \approx 200$ ms, případně hodnotou 0,54 pro $T_p \approx 300$ ms.

Součinitel 2 ve vzorci (4.36) se nahradí hodnotou 2,32 při $T_p \approx 200$ ms, případně hodnotou 2,5 pro $T_p \approx 300$ ms.

Dále musí být splněny podmínky nezávislé na primární časové konstantě

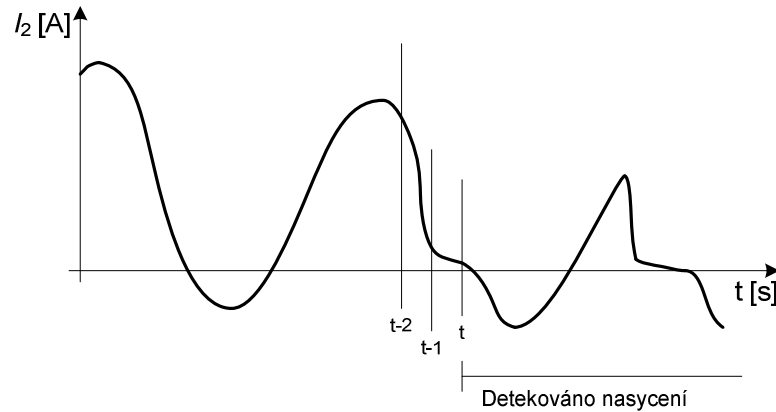
$$E_{al} > E_{alreq} = 0,12 \cdot f \cdot I_{2n} \cdot (R_{ct} + R_l + R_i) \quad (4.37)$$

$$E_{al} > E_{alreq} = \frac{I_{minSat}}{100} \cdot CTFactor \cdot I_{2n} \cdot (R_{ct} + R_l + R_i) \quad (4.38)$$

kde f je síťová frekvence [Hz],

I_{minSat} je nastavená hodnota minimálního saturačního proudu pro detektor nasycení (100-1000 % I_{2n}) [A].

Detektor nasycení vyhodnocuje každý fázový proud zvlášť. Využívá nefiltrovaného vzorkování změřeného každou ms. Detekce nasycení závisí na chování sekundárního proudu. V případě nasycení proud náhle klesne a následně se pomalu mění. Pokud amplituda proudu překročí nastavenou hodnotu I_{minSat} , potom ze tří následujících vzorků může detektor tento stav určit.



Obr. 4.3 Detektor nasycení

Použití detektorů nasycení umožňuje minimální požadavky na proudové transformátory ve spojení s vysokou citlivostí.

4.2.3 Distanční ochrany

Transformátory proudu pro tyto ochrany musí splňovat následující požadavky

$$E_{al} \geq E_{alreq} = \frac{I_{scc,max(close-in)} \cdot I_{2n}}{I_{1n}} \cdot a \cdot (R_{ct} + R_l + R_i) \quad (4.39)$$

$$E_{al} \geq E_{alreq} = \frac{I_{scc,max(zone1-end)} \cdot I_{2n}}{I_{1n}} \cdot k \cdot (R_{ct} + R_l + R_i) \quad (4.40)$$

- kde $I_{scc,max(close-in)}$ je maximální zkratový proud na začátku 1. zóny [A],
 $I_{scc,max(zone1-end)}$ je maximální zkratový proud na konci 1. zóny [A],
 a je součinitel závislý na frekvenci sítě a primární časové konstantě [-],
 k je součinitel závislý na frekvenci sítě a primární časové konstantě [-].

$a = 2$ pro $T_p \leq 50$ ms, 50 a 60 Hz.

$a = 3$ pro $T_p > 50$ ms, 50 Hz.

$a = 4$ pro $T_p > 50$ ms, 60 Hz.

$k = 4$ pro $T_p \leq 30$ ms, 50 a 60 Hz.

$k = 6$ pro $T_p > 30$ ms, 50 Hz.

$k = 7$ pro $T_p > 30$ ms, 60 Hz.

4.3 Požadavky na PTP pro ochrany AREVA

Následující informace vycházejí z dokumentu [21] - Zátěže a požadavky na transformátory proudu ochran MiCOM (Burdens & Current Transformer Requirements of MiCOM Relays), dostupného na stránkách společnosti AREVA.

Primární jmenovitý proud transformátoru proudu se obvykle volí stejný nebo větší než je normální proud chráněného obvodu při plném zatížení, aby se zabránilo tepelnému přetížení nebo přehřátí PTP. Maximální převod proudového transformátoru je obvykle limitován na 3000/1 A kvůli omezené velikosti PTP a především skutečnosti, že napětí naprázdno by bylo nebezpečně

vysoké při velkém jmenovitém proudu PTP, například u velkých turboalternátorů (např. 5000 A). Prakticky se v těchto aplikacích používá kaskádní uspořádání (5000/20 A společně s 20/1 A).

Typická hodnota sekundárního proudu je 5 A za předpokladu, že délka vedení mezi PTP a připojeným zařízením nepřekročí 25 metrů. Do této délky jsou ztráty na vedení přijatelně malé. Při delším vedení je vhodné použít 1 A výstup transformátoru pro udržení ztrát na vedení v přijatelných mezích.

4.3.1 Nadproudové ochrany a terminály pro řízení napáječů

4.3.1.1 Ochrana MiCOM P111

Nadproudová a zemní ochrana pro všechny aplikace v sítích NN a VN do 35 kV. Může být zapojena pro přímé měření primárního proudu (pokud je jmenovité napětí menší než 1 kV) procházejícího primárním vodičem přes vodičí kanál krytu ochrany. Pokud jsou použity vnější PTP je doporučena třída P se jmenovitým nadproudovým číslem rovným nebo větším než 10, např. 5VA 5P10 nebo 30VA 10P10. V případě, že je nutný větší rozsah než $10I_{2n}$, je potřeba určit zda odpovídá skutečné nadproudové číslo předpokládanému vypínacímu proudu.

Tab. 4-3 Proudové obvody ochrany P111

Vstup	Jmenovitý proud I_{2n}	Ztráty při jmenovitém proudu
Fáze	1A	< 0,2 VA
	5A	
Zem	1A	< 0,2 VA
	5A	

4.3.1.2 Ochrany MiCOM P120 – P123, P125 – P127

Terminály P120 – P123 jsou určeny pro nesměrovou nadproudovou a zemní ochranu od jednofázové P120 po multifunkční trojfázovou ochranu P123. Terminály P125 – P127 jsou určeny pro směrovou nadproudovou a zemní ochranu od jednofázové P125 po multifunkční trojfázovou ochranu P127. Požadavky jsou založeny na maximálním předpokládaném sekundárním poruchovém proudu $50I_{2n}$ při nastavení okamžité spouště ochrany na $25I_{2n}$. Tyto požadavky zajišťují funkčnost všech ochranných prvků.

Tab. 4-4 Proudové obvody ochran P120 – P123, P125 – P127

Vstup	Jmenovitý proud I_{2n}	Ztráty
Fáze	1A	< 0,025 VA při I_{2n}
	5A	< 0,3 VA při I_{2n}
Zem	1A	< 0,008 VA při $0,1I_{2n}$
	5A	< 0,01 VA při $0,1I_{2n}$

Tab. 4-5 Specifikace PTP pro ochrany P120 – P123, P125 – P127, P130C, P132, P138, P139, P141 – P145

Jmenovitý proud	Jmenovitá zátěž	Třída přesnosti	Nadproudové číslo	Limitní odpor přívodu
1 A	2,5 VA	10P	20	1,30 Ω
5 A	7,5 VA	10P	20	0,11 Ω

Pokud kritéria pro konkrétní aplikaci jsou vyšší než výše uvedená nebo je skutečný odpor přívodu větší než limitní, musí se PTP dimenzovat podle požadavků na limitní napětí pro danou ochrannou funkci podle kapitoly Požadavky na limitní napětí.

Terminály P120 – P123, P125 – P127 mají tyto ochranné funkce:

- Nesměrová resp. směrová časově nezávislá (DT) resp. inverzní časově nezávislá (IDMT) nadproudová a zemní ochrana,
- Nesměrová mžiková nadproudová a zemní ochrana,
- Směrová mžiková nadproudová a zemní ochrana,
- Nesměrová resp. směrová časově nezávislá (DT) resp. inverzní časově nezávislá (IDMT) citlivá zemní ochrana SEF (Sensitive Earth Fault),
- Vysokoimpedanční proudová zemní rozdílová ochrana (též zemní ochrana s vymezenou zónou) REF (Restricted Earth Fault),
- Vysokoimpedanční diferenciální ochrana.

4.3.1.3 Ochrana MiCOM P124

Tato digitální ochrana je navržena pro kompletní nadproudové chránění, přičemž nevyžaduje vnější zdroj energie. Poskytuje trojfázovou a zemní ochranu. Ochrana je napájena pomocí přístrojových transformátorů. Za předpokladu, že PTP nenapájí jiné obvody než P124 se v praxi doporučují tyto specifikace: 5VA 5P10 nebo 5VA 10P10.

Tab. 4-6 Proudové obvody ochrany P124

Vstup	Jmenovitý proud I_{2n}	Ztráty
Fáze	1A	2,5 VA
	5A	
Zem	1A	2,5 VA
	5A	

4.3.1.4 Ochrany MiCOM P130C, P132, P138, P139

Ochrany této řady jsou navrženy pro řízení napáječů. Poskytují ochranu proti zkratům, zemním poruchám a přetížením v sítích VN. Pokud kritéria pro konkrétní aplikaci jsou vyšší než uvedená v tab. 4-5 nebo je skutečný odpor přívodu větší než limitní, musí se PTP dimenzovat podle požadavků na limitní napětí, viz kapitola Požadavky na limitní napětí odstavec: Časově

nezávislá ochrana (DT) resp. inverzní časově nezávislá (IDMT) nadproudová a zemní ochrana. Vnitřní ztráty proudových vstupů těchto ochranných jsou $P_i < 0,1$ VA.

4.3.1.5 Ochrany MiCOM P141 – P145

Tyto terminály pro řízení napáječů poskytují kompletní ochranu, kontrolu a monitoring venkovních vedení a kabelů, a to pro distribuční a přenosové napěťové úrovně. Požadavky jsou založeny na maximálním předpokládaném sekundárním poruchovém proudu $50I_{2n}$ při nastavení okamžité spouště ochrany na $25I_{2n}$. Tyto požadavky zajišťují funkčnost všech ochranných prvků.

Tab. 4-7 Proudové obvody ochranných P141 – P145

	Jmenovitý proud I_{2n}	Břemeno
Vnitřní ztráty	1A	< 0,04 VA při I_{2n}
	5A	< 0,01 VA při I_{2n}
Impedance	1A	< 40 mΩ při 0-30 I_{2n}
	5A	< 8 mΩ při 0-30 I_{2n}

Specifikace PTP jsou uvedeny v tab. 4-5. Pokud kritéria pro konkrétní aplikaci jsou vyšší než uvedená nebo je skutečný odpor přívodu větší než limitní, musí se PTP dimenzovat podle požadavků na limitní napětí pro danou ochrannou funkci viz kapitola Požadavky na limitní napětí.

Terminály P141 – P145 mají tyto ochranné funkce:

- Nesměrová resp. směrová časově nezávislá (DT) resp. inverzní časově nezávislá (IDMT) nadproudová a zemní ochrana,
- Nesměrová mžiková nadproudová a zemní ochrana,
- Směrová mžiková nadproudová a zemní ochrana,
- Nesměrová resp. směrová časově nezávislá (DT) resp. inverzní časově nezávislá (IDMT) ochrana SEF,
- Nízkoimpedanční ochrana REF,
- Vysokoimpedanční ochrana REF,
- Vysokoimpedanční diferenciální ochrana.

4.3.1.6 Požadavky na limitní napětí

Nesměrová resp. směrová časově nezávislá (DT) resp. inverzní časově nezávislá (IDMT) nadproudová a zemní ochrana

Fázová časově zpožděná nadproudová ochrana

$$E_k \geq \frac{I_{fp}}{2} \cdot (R_{ct} + R_l + R_{ip}) \quad (4.41)$$

kde I_{fp} je maximální předpokládaný sekundární fázový poruchový proud nebo 31 krát nastavení $I_>$ (menší z těchto hodnot) [A],

R_{ip} je odpor fázového vstupu ochrany při $30I_{2n}$ [Ω].

Zemní časově zpožděná nadproudová ochrana

$$E_k \geq \frac{I_{fn}}{2} \cdot (R_{ct} + 2R_l + R_{ip} + R_{in}) \quad (4.42)$$

kde I_{fn} je maximální předpokládaný sekundární zemní poruchový proud nebo 31 krát nastavení $I_{>}$ (menší z těchto hodnot) [A],

R_{in} je odpor zemního vstupu ochrany při $30I_{2n}$ [Ω].

Nesměrová mžiková nadproudová a zemní ochrana

Fázová mžiková nadproudová ochrana

$$E_k \geq I_{sp} \cdot (R_{ct} + R_l + R_{ip}) \quad (4.43)$$

kde I_{sp} je nastavení stupně 2 a 3 pro fázové poruchy [A].

Zemní mžiková nadproudová ochrana

$$E_k \geq I_{sn} \cdot (R_{ct} + 2R_l + R_{ip} + R_{in}) \quad (4.44)$$

kde I_{sn} je nastavení stupně 2 a 3 pro zemní poruchy [A].

Směrová mžiková nadproudová a zemní ochrana

Fázová časově zpožděná nadproudová ochrana

$$E_k \geq \frac{I_{fp}}{2} \cdot (R_{ct} + R_l + R_{ip}) \quad (4.45)$$

Zemní časově zpožděná nadproudová ochrana

$$E_k \geq \frac{I_{fn}}{2} \cdot (R_{ct} + 2R_l + R_{ip} + R_{in}) \quad (4.46)$$

Časově nezávislá ochrana (DT) resp. inverzní časově nezávislá (IDMT) nadproudová a zemní ochrana

Fázová časově zpožděná nadproudová ochrana

$$E_k \geq k \cdot I_{fp} \cdot (R_{ct} + R_l + R_{ip}) \quad (4.47)$$

kde k je koeficient závislý na frekvenci sítě a primární časové konstantě [-].

Zemní časově zpožděná nadproudová ochrana

$$E_k \geq k \cdot I_{fn} \cdot (R_{ct} + 2R_l + R_{ip} + R_{in}) \quad (4.48)$$

Koeficient k se může určit křivek ve [21]. Teoreticky se PTP mohou dimenzovat pomocí maximální hodnoty tohoto koeficientu, určené jako

$$k \approx 1 + \omega T_p \quad (4.49)$$

Nesměrová resp. směrová časově nezávislá (DT) resp. inverzní časově nezávislá (IDMT) ochrana SEF – reziduální zapojení PTP

Nesměrová resp. směrová časově zpožděná ochrana SEF

$$E_k \geq \frac{I_{fn}}{2} \cdot (R_{ct} + 2R_l + R_{ip} + R_{in}) \quad (4.50)$$

Nesměrová mžiková ochrana SEF

$$E_k \geq I_{sn} \cdot (R_{ct} + 2R_l + R_{ip} + R_{in}) \quad (4.51)$$

Směrová mžiková ochrana SEF

$$E_k \geq \frac{I_{fn}}{2} \cdot (R_{ct} + 2R_l + R_{ip} + R_{in}) \quad (4.52)$$

Nesměrová resp. směrová časově nezávislá (DT) resp. inverzní časově nezávislá (IDMT) ochrana SEF – zapojení PTP s vyváženým jádrem (CBCT)

Nesměrová resp. směrová časově zpožděná ochrana SEF

$$E_k \geq \frac{I_{fn}}{2} \cdot (R_{ct} + 2R_l + R_{in}) \quad (4.53)$$

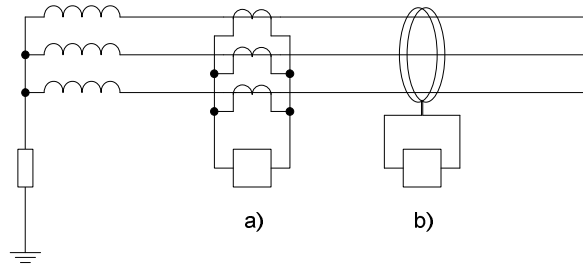
Nesměrová mžiková ochrana SEF

$$E_k \geq I_{sn} \cdot (R_{ct} + 2R_l + R_{in}) \quad (4.54)$$

Směrová mžiková ochrana SEF

$$E_k \geq \frac{I_{fn}}{2} \cdot (R_{ct} + 2R_l + R_{in}) \quad (4.55)$$

Fázová chyba použitého PTP s vyváženým jádrem by měla být menší než 90 minut při 10 % jmenovitého proudu a menší než 150 minut při 1 % jmenovitého proudu.



Obr. 4.4 Zemní ochrana pro neuzemněné sítě nebo pro sítě uzemněné přes vysokou impedanci – funkce SEF;

a) Reziduální zapojení PTP

b) Zapojení PTP s vyváženým jádrem

Nízkoimpedanční ochrana REF

Pokud $\omega T_p \leq 40$ a maximální sekundární průchozí poruchový proud $I_f \leq 15I_{2n}$

$$E_k \geq 24 \cdot I_{2n} \cdot (R_{ct} + 2R_l) \quad (4.56)$$

Pokud $\omega T_p \leq 40$ a $15I_{2n} < I_f \leq 40I_{2n}$ nebo $40 < \omega T_p \leq 120$ a $I_f \leq 15I_{2n}$

$$E_k \geq 48 \cdot I_{2n} \cdot (R_{ct} + 2R_l) \quad (4.57)$$

Pro aplikace nízkoimpedanční ochrany REF jsou doporučeny transformátory třídy 5P nebo lepší.

Vysokoimpedanční ochrana REF

Prvek REF musí zůstat stabilní při průchozích poruchách a reagovat za méně než 40 ms při vnitřních poruchách za předpokladu, že jsou splněny následující požadavky na PTP a připojený stabilizační odpor R_S .

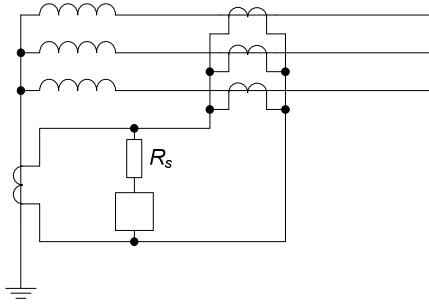
$$E_k \geq 4 \cdot I_S \cdot R_S \quad (4.58)$$

$$R_S = \frac{I_f}{I_S} (R_{ct} + 2R_l) \quad (4.59)$$

kde I_S je proudové nastavení vysokoimpedančního prvku REF [A],

I_f je maximální sekundární průchozí poruchový proud [A].

Pro aplikace vysokoimpedanční REF jsou doporučeny transformátory třídy 5P nebo PX.



Obr. 4.5 Zemní ochrana při vnitřních poruchách v uzemněných soustavách – vysokoimpedanční REF

Vysokoimpedanční diferenciální ochrana

Například pro třífázové aplikace jako ochrana přípojnic, generátorů a motorů atd. Vysokoimpedanční diferenciální ochrana musí zůstat stabilní při průchozích poruchách a reagovat za méně než 40 ms při vnitřních poruchách za předpokladu, že jsou splněny následující požadavky na PTP a připojený stabilizační odpor R_S .

$$E_k \geq 4 \cdot I_S \cdot R_S \quad (4.60)$$

$$R_S = 1,4 \frac{I_f}{I_S} (R_{ct} + 2R_l) \quad (4.61)$$

kde I_S je proudové nastavení vysokoimpedančního prvku REF [A],
 I_f je maximální sekundární průchozí poruchový proud [A].

Pokud $\omega T_p \leq 40$ a je potřeba uvážit stabilitu při průchozím poruchovém proudu s přechodnou stejnosměrnou složkou, může se pro stanovení stabilizačního napětí U_s použít vztah

$$U_s = (0,007 \cdot \omega T_p + 1,05) \cdot I_f \cdot (R_{ct} + 2R_l) \quad (4.62)$$

Jestliže je vypočítané napětí menší než $(I_S \cdot R_S)$ vypočtené výše, pak by mělo být použito toto napětí.

Pro aplikace s vysokoimpedanční diferenciální ochranou jsou doporučeny transformátory třídy 5P nebo PX.

4.3.2 Ochrany motorů

4.3.2.1 Ochrany MiCOM P210, P211

Terminály pro monitoring, ochranu a řízení motorů pro napětíové úrovně NN a VN do 35 kV. Terminál může přímo měřit primární proud (tam, kde je jmenovité napětí menší než 1 kV) procházející primárním vodičem přes vodící kanál krytu ochrany. Pokud jsou použity vnější PTP, doporučuje se třída P s nadproudovým číslem 10 nebo větším (např. 5VA 5P10 nebo 30VA 10P10). Pro rozsah větší než $10I_{2n}$ je potřeba určit zda vyhovuje skutečné nadproudové číslo.

4.3.2.2 Ochrany MiCOM P220, P225

Terminály pro kompletní ochranu motorů založenou na měření proudů, napětí a teploty.

Netočivá složka proudu (charakteristika zemních poruch) se může měřit buď reziduálním zapojením trojfázových PTP nebo pomocí PTP s vyváženým jádrem (CBCT). Pokud je motor uzemněn přes impedanci nebo je izolovaný od země v případě izolované sítě preferuje se PTP s vyváženým jádrem, protože předchází špatné detekci nulového proudu při asymetrickém sycení fázových PTP při rozběhu motoru. Rozběhové proudy mohou být několikrát vyšší (typicky 5 až 6-krát) než jmenovité. Tento jev se může ještě zvýšit magnetizací PTP, jestliže v nich dochází k protisměrnému reziduálnímu toku. Tyto problémy mohou být překonány vhodným nastavením zemní ochrany a správnou volbou PTP, nicméně se doporučují PTP s vyváženým jádrem.

Tab. 4-8 Proudové obvody ochran P220, P225

Vstup	Jmenovitý proud I_{2n}	Ztráty
Fáze	1A	< 0,025 VA při I_{2n}
	5A	< 0,3 VA při I_{2n}
Zem	1A	< 0,004 VA při $0,1I_{2n}$
	5A	< 0,01 VA při $0,1I_{2n}$

Tab. 4-9 Doporučení pro zapojení PTP

Uzemnění motoru	Doporučení	Alternativa
Uzemněný	3 fázové PTP a stabilizační odpor	3 fázové PTP a PTP s vyváženým jádrem
Uzemněný přes impedanci	3 fázové PTP a PTP s vyváženým jádrem	3 fázové PTP a stabilizační odpor nebo 2 fázové PTP a PTP s vyváženým jádrem
Izolovaný	3 fázové PTP a PTP s vyváženým jádrem	2 fázové PTP a PTP s vyváženým jádrem

Stabilizační odpor se může určit jako:

$$R_S = \frac{I_{st}}{I_o} \cdot (R_{ct} + n_{ct} R_l + R_{in}) \quad (4.63)$$

kde I_{st} je rozběhový proud motoru přepočítaný na sekundární stranu PTP [A],

I_o je nastavení zemního poruchového proudu [A],

n_{ct} je koeficient podle zapojení PTP [-].

$n_{ct} = 1$ pro 4-vodičové zapojení PTP (společný střední vodič),

$n_{ct} = 2$ pro 6-vodičové zapojení PTP.

Nastavení zkratové spouště $I_{>>}$ by mělo být nižší než 90 % nadproudového čísla PTP. Za těchto podmínek je garantována funkce ochrany pro poruchové proudy až do 50-ti násobku saturačního proudu pro symetrický výstup PTP.

Tab. 4-10 Doporučení pro dimenzování PTP

I_{2n}	Jmenovitá zátěž (VA)	Třída	Nadproudové číslo
1A	$\geq 0,025 + (2R_l + R_r) \cdot I_{2n}^2$	5P	$\geq \frac{I_{fp}}{50 \cdot I_{2n}}$
5A	$\geq 0,3 + (2R_l + R_r) \cdot I_{2n}^2$	5P	$\geq \frac{I_{fp}}{50 \cdot I_{2n}}$

Odpor R_r [Ω] je jakákoliv přídavná zátěž v sekundárním obvodu PTP.

Mohou se použít i PTP s třídou 10P, nicméně ochrany proti tepelnému přetížení a nesymetrii budou méně přesné. Toto je přípustné v případě, že je motor pro svůj účel předimenzován.

4.3.2.3 Ochrany MiCOM P241 – P243

Tyto terminály poskytují moderní ochranu, řízení a monitoring pro synchronní i asynchronní motory. Požadavky jsou založeny na maximálním předpokládaném poruchovém proudu $50I_{2n}$ při nastavení okamžité spouště ochrany na $25I_{2n}$. Tyto požadavky zajišťují funkčnost všech ochranných prvků.

Tab. 4-11 Proudové obvody ochran P241 – P243, P341 – P344

	Jmenovitý proud I_{2n}	Břemeno
Vnitřní ztráty	1A	< 0,04 VA při I_{2n}
	5A	< 0,01 VA při I_{2n}
Impedance	1A	< 40 m Ω při 0-30 I_{2n}
	5A	< 8 m Ω při 0-30 I_{2n}

Tab. 4-12 Specifikace PTP pro ochrany P241 – P243, P341

Jmenovitý proud	Jmenovitá zátěž	Třída přesnosti	Nadproudové číslo	Limitní odpor přívodu
1 A	2,5 VA	10P	20	1,30 Ω
5 A	7,5 VA	10P	20	0,11 Ω

Pro diferenciální ochranu motoru se doporučuje použít PTP třídy 5P.

4.3.3 Ochrany generátorů

4.3.3.1 Ochrana MiCOM P341

Tato ochrana nabízí funkce potřebné pro provoz generátorů paralelně s tvrdou sítí. Vnitřní ztráty terminálu a specifikace PTP odpovídají motorovým ochranám P241 – P243 a jsou uvedeny v tab. 4-11 a tab. 4-12. Pokud kritéria pro konkrétní aplikaci jsou vyšší v tab. 4-12 nebo je skutečný odpor přívodu větší než limitní, musí se PTP dimenzovat podle požadavků na limitní napětí pro danou ochrannou funkci podle kapitoly 4.3.1, podkapitola Požadavky na limitní napětí, případně podle následující kapitoly (pro ochranu REF a při zpětnému toku výkonu).

Terminál P341 má tyto ochranné funkce:

- Nesměrová resp. směrová časově nezávislá (DT) resp. inverzní časově nezávislá (IDMT) nadproudová a zemní ochrana,
- Nesměrová mžiková nadproudová a zemní ochrana,
- Směrová mžiková nadproudová a zemní ochrana,
- Nesměrová resp. směrová časově nezávislá (DT) resp. inverzní časově nezávislá (IDMT) ochrana SEF,
- Vysokoimpedanční ochrana REF,
- Ochrana proti zpětnému nebo nízkému toku výkonu.

Požadavky na PTP pro vysokoimpedanční ochranu REF a ochrana proti zpětnému nebo nízkému toku výkonu odpovídají terminálům P342 - P344, viz následující kapitola.

4.3.3.2 Ochrany MiCOM P342 – P344

Tyto ochrany generátorů poskytující ochranné, monitorovací a měřicí funkce. Vnitřní ztráty terminálu jsou uvedeny v tab. 4-11. Požadavky na PTP závisí na použité ochranné funkci a na tom zda je k proudovému transformátoru připojeno více proudových vstupů (nutno přičíst přídatnou zátěž R_r). Pokud je PTP připojeno na více proudových vstupů mělo by se potřebné limitní napětí určit pro každý vstup a použít nejvyšší hodnotu.

Terminály P34x jsou schopny zajistit ochranné funkce na širokém rozsahu provozní frekvence (5-70 Hz). Pokud jsou požadovány ochranné funkce při nízkých frekvencích je nutné použít PTP s velkým jádrem. Požadavky na PTP se pak musí vynásobit hodnotou f_n / f_{min} .

Diferenciální ochrana generátoru – poměrová diferenciální ochrana

Následující požadavky na PTP použité pro proudové vstupy diferenciální funkce ochrany platí pro standardní nastavení ochranného terminálu.

$$E_k \geq 50I_{2n} (R_{ct} + 2R_l + R_r) \text{ pro } \omega T_p < 120, I_f < 10I_{2n} \quad (4.64)$$

$$E_k \geq 30I_{2n} (R_{ct} + 2R_l + R_r) \text{ pro } \omega T_p < 40, I_f < 10I_{2n} \quad (4.65)$$

$$E_k \geq \frac{60}{I_{2n}} \text{ (minimum nezávislé na } T_p) \quad (4.66)$$

Pokud je generátor uzemněn přes impedanci a maximální sekundární zemní poruchový proud je menší než I_{2n} , pak platí následující podmínky s minimem podle vztahu (4.66).

$$E_k \geq 25I_{2n}(R_{ct} + R_l + R_r) \text{ pro } \omega T_p < 60, I_f < 10I_{2n} \quad (4.67)$$

$$E_k \geq 30I_{2n}(R_{ct} + R_l + R_r) \text{ pro } \omega T_p < 100, I_f < 10I_{2n}; \omega T_p < 120, I_f < 5I_{2n} \quad (4.68)$$

$$E_k \geq 40I_{2n}(R_{ct} + R_l + R_r) \text{ pro } \omega T_p < 120, I_f < 10I_{2n} \quad (4.69)$$

Doporučuje se použít PTP třídy 5P.

Diferenciální ochrana generátoru – vysokoimpedanční diferenciální ochrana

Pro PTP a stabilizační odpor platí

$$E_k \geq 2I_{s1} \cdot R_S \quad (4.70)$$

$$R_S = 1,5 \frac{I_f}{I_{s1}} (R_{ct} + 2R_l) \quad (4.71)$$

kde I_{s1} je nastavená hodnota rozdílového vybavovacího proudu (standardně $0,05I_{2n}$) [A].

Ochrana při napětově závislém nadproudu, při ztrátě buzení a při nesymetrii zatížení

Pokud je na schopnostech PTP závislých několik ochranných funkcí, je nutné aby byly splněny ty největší nároky. Toto splňuje následující vztah. Podmínka je použitelná jak pro PTP na středním vývodu, tak pro PTP na výstupu generátoru.

$$E_k \geq 20I_{2n}(R_{ct} + 2R_l + R_r) \quad (4.72)$$

Doporučuje se třída přesnosti 5P.

Směrová citlivá zemní ochrana - SEF

Reziduální zapojení PTP

Směrová ochrana SEF by se může použít pouze v případě, že proud při satorové zemní poruše je limitován jmenovitým satorovým proudem nebo je nižší. Také hodnota ωT_p (tedy poměr reaktance a odporu) pro impedanci přípojnicové zemní poruchy nesmí být větší než 10.

$$E_k \geq 6I_{2n}(R_{ct} + 2R_l + R_r) \quad (4.73)$$

Doporučuje se třída přesnosti 5P.

Zapojení s PTP s vyváženým jádrem

Primární jmenovitý proud PTP s vyváženým jádrem by neměl být stejný jako jmenovitý proud statorového vinutí. Toto bere v úvahu následující vztah.

$$E_k > 6 \cdot N \cdot I_{2n} (R_{ct} + 2R_l + R_r) \quad (4.74)$$

kde N je poměr maximálního zemního poruchového proudu a jmenovitého primárního proudu PTP s vyváženým jádrem nebo převod PTP [-].

Maximální zemní poruchový proud by neměl být větší než $2I_{2n}$, tzn. $N \leq 2$. Výběr PTP s vyváženým jádrem tomu musí odpovídat.

Statorová zemní ochrana

Tato funkce využívá proudový vstup pro zemní poruchové proudy.

Nesměrová časově nezávislá, resp. časově nezávislá inverzní zemní ochrana

Časově zpožděná zemní nadproudová ochrana

$$E_k \geq \frac{I_{jn}}{2} (R_{ct} + 2R_l + R_{in}) \quad (4.75)$$

Nesměrová okamžitá zemní ochrana

Mžiková zemní nadproudová ochrana

$$E_k \geq I_{sn} (R_{ct} + 2R_l + R_{in}) \quad (4.76)$$

Nízkoimpedanční ochrana REF

Požadavky odpovídají vztahům (4.56) a (4.57).

Vysokoimpedanční ochrana REF

Požadavky odpovídají vztahům (4.58) a (4.59).

Ochrana proti zpětnému nebo nízkému toku výkonu

Pro obě tyto funkce, pokud je nastavení větší 3% P_n , chyba vhodného jistícího transformátoru nezpůsobí žádné selhání. Nicméně pro citlivou ochranu, pokud je nastavení nižší než 3% P_n , se doporučuje, aby byl proudový vstup napájen správně zatíženým měřícím transformátorem.

Jistící transformátory

Pro méně citlivá nastavení ($>3\% P_n$), by měl být fázový proudový vstup terminálu P34x napájen správně zatíženým transformátorem třídy 5P. Jmenovitá zátěž by měla odpovídat skutečné zátěži (při jmenovitém proudu) připojené na sekundární stranu PTP.

Měřicí transformátory

Pro méně citlivá nastavení ($>3\% P_n$), by měl být proudový vstup terminálu P34x napájen správně zatíženým měřicím transformátorem. Třída přesnosti závisí na požadované citlivosti: 0,5-0,6% P_n – třída 0,1; 0,8-1,4% P_n – třída 0,2; 1,6-2,8% P_n – třída 0,5; 3% P_n – třída 1,0. Jmenovitá zátěž by měla odpovídat skutečné zátěži (při jmenovitém proudu) připojené na sekundární stranu PTP. Využití funkce kompenzace fázového posunu terminálů P34x je v této situaci vhodné.

4.3.4 Diferenciální ochrany transformátorů**4.3.4.1 Ochrany MiCOM P630C, P631 – P634, P638**

Tato série diferenciálních ochran je určena pro rychlou, selektivní ochranu nejen transformátorů, ale i motorů, generátorů a pro další aplikace. Ztráty všech proudových obvodů těchto ochran jsou $P_i < 0,1$ VA. Doporučuje se použít PTP třídy přesnosti 5P.

Diferenciální ochrana

Potřebné limitní napětí se musí určit pro fázové i zemní poruchové proudy. Použije se větší z těchto dvou napětí. Požadavky na PTP jsou založeny na standardních nastavení ochrany pro diferenciální ochranu transformátorů a přípojnic viz. [21].

Fázová diferenciální ochrana

$$E_k \geq K_p \cdot (R_{ct} + R_l) \quad (4.77)$$

kde K_p je součinitel závislý na maximálním průchozím proudu (jako násobek I_{2n}) a primární časové konstantě [A].

Zemní diferenciální ochrana

$$E_k \geq K_e \cdot (R_{ct} + 2R_l) \quad (4.78)$$

kde K_e je součinitel závislý na maximálním zemním průchozím proudu a primární časové konstantě [A].

$$\text{Pro } (I_f \cdot \omega T_p) \leq 500I_{2n} : \quad \text{Pro } 500I_{2n} < (I_f \cdot \omega T_p) < 1200I_{2n} :$$

$$K_p = 0,14 \cdot (I_f \cdot \omega T_p) \quad K_p = 70$$

Pro K_e platí obdobné vztahy, jen místo I_f se dosadí I_{fe} .

Nízkoimpedanční ochrana REF

Požadavky na PTP pro tuto ochranu jsou většinou nižší než pro diferenciální ochranu. Jelikož PTP pro nízkoimpedanční ochranu REF jsou použity i pro diferenciální ochranu, požadavky pro diferenciální ochranu kryjí i požadavky pro nízkoimpedanční ochranu REF.

Vysokoimpedanční ochrana REF

Vysokoimpedanční ochrana REF musí zůstat stabilní při vnějších poruchách a působit za méně než 40 ms při vnitřních poruchách, to zaručují následující požadavky na E_k a stabilizační odpor.

$$E_k > 2I_{diff>} \cdot R_s \quad (4.79)$$

$$R_s = 1,1 \frac{I_f}{I_{diff>}} (R_{ct} + 2R_l) \quad (4.80)$$

kde $I_{diff>}$ je proudové nastavení reziduální diferenciální ochrany nebo vysokoimpedanční ochrany REF [A].

Pro zvýšení rychlosti působení je možné použít PTP s vyšším limitním napětím.

4.3.5 Ochrany přípojnic

4.3.5.1 Ochrany MiCOM P741 – P743

Diferenciální ochrana

$$E_k \geq 0,5I_{f \max} \cdot (R_{ct} + 2R_l) \quad (4.81)$$

kde $I_{f \max}$ je maximální sekundární poruchový proud (stejný pro všechny napáječe) [A].

Dále pro každý PTP

$$E_k \geq I_{f \max \text{ int}} \cdot (R_{ct} + 2R_l) \quad (4.82)$$

kde $I_{f \max \text{ int}}$ je maximální sekundární příspěvek napáječe do vnitřní poruchy [A].

Doporučené specifikace umožňují garantovat čas do nasycení větší než 1,4 ms s remanentním tokem asi 80 % maximálního (třída TPX). Toto zajišťuje dostatečnou rezervu pro detekci nasycení PTP.

Tab. 4-13 Proudové obvody ochran P741 – P743

	Jmenovitý proud I_{2n}	Břemeno
Vnitřní ztráty	1A	< 0,04 VA při I_{2n}
	5A	< 0,01 VA při I_{2n}
Impedance	1A	< 40 mΩ při 0-30 I_{2n}
	5A	< 8 mΩ při 0-30 I_{2n}

Mohou se použít tyto třídy PTP: 5P, PX, TPX, TPY, TPZ.

4.3.6 Diferenciální a srovnávací ochrany vedení

Primární časová konstanta a zkratový výkon jsou u každé soustavy jiné, ale výběr správné hodnoty limitního napětí pro dimenzování PTP je nezbytný. V případě napájení z jedné strany by se měl určit průchozí zkratový výkon a primární časová konstanta pro vzdálenější PTP. V soustavách kde může proud protékat v obou směrech přes chráněné napáječe, např. paralelní napáječe nebo okružní napájecí vedení, je potřeba dalšího uvážení. V těchto případech by se měl určit zkratový výkon a časová konstanta pro PTP na obou stranách chráněné oblasti. Takto se budou uvažovat zkratové poměry pro oba směry. Požadavky na PTP by se měly založit na zkratových poměrech, ze kterých vychází vyšší hodnota limitního napětí.

4.3.6.1 Ochrana MiCOM P521

Vysokorychlostní, dvoubodová diferenciální proudová ochrana pro venkovní vedení a kabely vhodná pro aplikace jako je okružní vedení nebo paralelní napáječe. Může být použita pro široký rozsah sítí. Pro PTP se doporučuje třída přesnosti PX nebo 5P.

Tab. 4-14 Proudové obvody ochrany P521

Vstup	Jmenovitý proud I_{2n}	Ztráty
Fáze	1A	< 0,025 VA při I_{2n}
	5A	< 0,3 VA při I_{2n}
Zem	1A	< 0,008 VA při $0,1I_{2n}$
	5A	< 0,01 VA při $0,1I_{2n}$

Proudová diferenciální ochrana

$$E_k \geq K_s \cdot K_t \cdot I_{2n} \cdot (R_{ct} + 2R_l) \quad (4.83)$$

kde K_s je činitel závislý na průchozím poruchovém proudu [-],
 K_t je činitel závislý na čase působení [-].

Činitel K_s se pro $\omega T_p < 40$ určí jako

$$K_s = [0,023I_f \cdot (\omega T_p + 55)] + [0,9 \cdot (\omega T_p + 26)] \quad (4.84)$$

A pro $\omega T_p \geq 40$ jako

$$K_s = [0,024I_f \cdot (\omega T_p + 44)] + [0,06 \cdot (\omega T_p + 725)] \quad (4.85)$$

Činitel K_t závisí na operačním čase diferenciální proudové ochrany t_{IDiff} a primární časové konstantě. Pro aplikace kde je limitní napětí předem stanoveno (PTP jsou již nainstalována), je možné nároky na PTP snížit přidáním malého zpoždění působení ochrany. Nastavení t_{IDiff} umožňuje zvýšit operační čas ochrany čímž vzroste stabilita. Časové nastavení 50 ms může

v některých aplikacích snížit požadavky na limitní napětí PTP až o 30%. Další snížení je možné dosáhnout větším zpožděním.

V případě, že je terminál nastaven na mžikové působení ($t_{IDiff} = 0$ s), činitel $K_t = 1$. Pokud se zpoždění použije platí následující vztahy.

Pro $\omega T_p < 40$ platí

$$K_t = 1 - (6,2t_{IDiff}) \quad \text{pro } t_{IDiff} \leq 0,15\text{s} \quad (4.86)$$

$$K_t = 0,07 \quad \text{pro } t_{IDiff} > 0,15\text{s} \quad (4.87)$$

A pro $\omega T_p \geq 40$ a $t_{IDiff} \leq 0,25\text{s}$ pak

$$K_t = 1 - (2,5t_{IDiff}) \quad (4.88)$$

Ochrana SEF

Jsou nutné měřící PTP s vyváženým jádrem s limitním napětím odpovídajícím vztahu

$$E_k = I_{fn} (R_{ct} + 2R_l + R_{in}) \quad (4.89)$$

4.3.6.2 Ochrany MiCOM P541 – P546

Vysokorychlostní proudové diferenciální ochrany. Jednotky P54x jsou určeny pro všechna venkovní vedení a kabely. Pro PTP se doporučuje třída přesnosti PX nebo 5P.

Tab. 4-15 Proudové obvody ochran P541 – P546, P547

	Jmenovitý proud I_{2n}	Břemeno
Vnitřní ztráty	1A	< 0,04 VA při I_{2n}
	5A	< 0,01 VA při I_{2n}
Impedance	1A	< 40 mΩ při 0-30 I_{2n}
	5A	< 8 mΩ při 0-30 I_{2n}

Proudová diferenciální ochrana

$$E_k \geq K \cdot I_{2n} \cdot (R_{ct} + 2R_l) \quad (4.90)$$

kde K je činitel závislý na průchozím poruchovém proudu a primární časové konstantě [-].

Pro dvoubodovou ochranu při typickém nastavení platí pro K následující vztahy.

$$\text{Pokud } (I_f \cdot \omega T_p) \leq 1000I_{2n}$$

$$K \geq 40 + 0,07I_f \cdot \omega T_p \quad (4.91)$$

$$K \geq 65 \quad (4.92)$$

Pokud $1000I_{2n} < (I_f \cdot \omega T_p) \leq 1600I_{2n}$

$$K = 107 \quad (4.93)$$

Pro trojbodovou ochranu při typickém nastavení platí pro K následující vztahy.

Pokud $(I_f \cdot \omega T_p) \leq 600I_{2n}$

$$K \geq 40 + 0,35I_f \cdot \omega T_p \quad (4.94)$$

$$K \geq 65 \quad (4.95)$$

Pokud $600I_{2n} < (I_f \cdot \omega T_p) \leq 1600I_{2n}$

$$K = 256 \quad (4.96)$$

Zemní ochrana

Zapojení s PTP s vyváženým jádrem

$$E_k \geq 6N \cdot I_{2n} \cdot (R_{ct} + 2R_l) \quad (4.97)$$

Platí při $\omega T_p \leq 5$ a maximálním zemním poruchovém proudu $2I_{2n}$, tzn. $N \leq 2$.

4.3.6.3 Ochrana MiCOM P547

Srovnávací fázová ochrana pro vedení VN, VVN i ZVN. Ztráty proudových vstupů odpovídají tab. 4-15. Pro PTP se doporučuje třída přesnosti PX nebo 5P.

Limitní napětí musí splňovat

$$E_k \geq I_f \cdot (1 + 0,15\omega T_p) \cdot (R_{ct} + 2R_l) \quad (4.98)$$

4.3.7 Distanční ochrany

4.3.7.1 Ochrany MiCOM P430C, P432, P435, P436, P437, P438, P439

Ochrany řady P43x navrženy pro 3 typy chránění: selektivní zkratová ochrana, ochrana proti zemním poruchám a ochrana proti přetížení. Mohou se použít pro všechny druhy VN, VVN, ZVN sítí. Použité proudové transformátory by měly vyhovovat limitním chybám třídy 5P. Pokud

je použito opětovné zapnutí je výhodné použít třídu TPY. Vnitřní ztráty proudových vstupů těchto ochran jsou $< 0,1$ VA.

Limitní napětí PTP pro tyto distanční ochrany musí vyhovovat následujícím požadavkům.

Distanční ochrana při fázových poruchách

$$E_k \geq k \cdot I_{fp} \cdot (R_{ct} + R_l + R_{ip}) \quad (4.99)$$

Distanční ochrana při zemních poruchách

$$E_k \geq k \cdot I_{fn} \cdot (R_{ct} + 2R_l + R_{ip} + R_{in}) \quad (4.100)$$

Koeficient k se může v případě, že není použito opětné zapnutí, určit z empiricky zjištěných křivek v [21], případně pomocí vztahu

$$k \approx 1 + \omega T_p \quad (4.101)$$

V případě opětného zapnutí se koeficient k takto navýší

$$k + \left[1 + \omega T_p \left(1 - e^{-\frac{t'}{T_p}} \right) \right] \cdot e^{-\frac{t_{fr}}{T_s}} \quad (4.102)$$

kde t' je čas prvního průchodu proudu [s].

Požadavky na PTP zajišťují vybavení distančního členu do 120 ms na 95 % nastavené ochranné zóny.

4.3.7.2 Ochrany MiCOM P441, P442, P444

Tyto digitální ochrany poskytují extrémně rychlou distanční ochranu a monitoring přenosových vedení. Mohou se použít v sítích VN, VVN a ZVN. Doporučují se transformátory třídy PX nebo 5P.

Tab. 4-16 Proudové obvody ochran P441, P442, P444, P443, P445 (MiCOMho)

	Jmenovitý proud I_{2n}	Břemeno
Vnitřní ztráty	1A	$< 0,04$ VA při I_{2n}
	5A	$< 0,01$ VA při I_{2n}
Impedance	1A	< 40 m Ω při $0-30I_{2n}$
	5A	< 8 m Ω při $0-30I_{2n}$

Distanční ochrana při fázových poruchách

$$E_k \geq 0,6 \cdot I_{f,Z1} \cdot (1 + \omega T_p) \cdot (R_{ct} + R_l) \quad (4.103)$$

kde $I_{f,Z1}$ je maximální sekundární fázový poruchový proud na konci 1.zóny [A].

Distanční ochrana při zemních poruchách

$$E_k \geq 0,6 \cdot I_{fe,Z1} \cdot (1 + \omega T_{pe}) \cdot (R_{ct} + 2R_l) \quad (4.104)$$

kde $I_{fe,Z1}$ je maximální sekundární zemní poruchový proud na konci 1.zóny [A],
 T_{pe} je primární časová konstanta zemní smyčky [s].

Potřebné limitní napětí se musí určit pro trojfázový zkrat na konci 1.zóny a také pro zemní zkrat na konci 1.zóny. Vyšší z těchto dvou se použije.

4.3.7.3 Ochrany MiCOMHO P443, P445

Ochrany MICOMho jsou určeny pro rychlou, vysoce selektivní distanční ochranu venkovních vedení. Dokáží odpojit a izolovat jakýkoliv poruchový obvod. Doporučují se transformátory třídy PX nebo 5P. Vnitřní ztráty a impedance těchto ochran jsou uvedeny v tab. 4-16.

Limitní napětí musí vyhovovat následujícím požadavkům.

Konec 1. ochranné zóny

$$E_k \geq 0,6 \cdot I_{f,Z1} \cdot (1 + \omega T_p) \cdot (R_{ct} + R_l) \quad (4.105)$$

Začátek 1. ochranné zóny

$$E_k \geq 1,4 \cdot I_{f,max} \cdot (R_{ct} + R_l) \quad (4.106)$$

kde $I_{f,max}$ je maximální sekundární poruchový proud [A].

Použije se vyšší z těchto dvou hodnot. Není potřeba opakovat výpočet pro zemní poruchy, protože trojfázový výpočet je nejhorší případ pro dimenzování PTP.

5 PROGRAM PRO DIMENZOVÁNÍ PTP

Součástí projektu je počítačový program *Dimenzování PTP pro digitální ochrany* vytvořený v programu Microsoft Excel ve formě makra. Programovacím jazykem je VBA (Visual Basic for Applications).

Program lze použít pro kontrolu, zda určitý přístrojový transformátor proudu vyhovuje požadavkům ochrany výše uvedených výrobců. Jsou v něm tedy použity vztahy z předchozí kapitoly. V případě firmy Siemens kontrola probíhá přímo pro konkrétní ochranu, u firem ABB a AREVA pak pro danou ochrannou funkci. Jsou zde použita určitá níže uvedená zjednodušující opatření. Toto platí pouze pro firmy ABB a AREVA, a to v případě, že jsou pro různé ochranné funkce použity stejné či obdobné požadavky. V případě firmy Siemens jsou požadavky uvedené v předchozí kapitole již dostatečně zjednodušeny pro jednoduchý a přehledný výpočet.

Obr. 5.1 Program Dimenzování PTP pro digitální ochrany

Po otevření souboru v Excelu, případně po spuštění programu pomocí tlačítka na prvním listu, se objeví okno podle obr. 5.1. Hlavní obrazovka je rozdělena do tří částí – okno pro nastavení parametrů ochrany rozdělené do tří záložek pro jednotlivé výrobce, prostřední okno pro zadání parametrů PTP a přívodu a okno pro kontrolu dimenzování. Jednotlivé části jsou popsány v následujících podkapitolách.

5.1 Okno parametrů ochran, ochranných funkcí a zkratových poměrů

5.1.1 Okno ochran Siemens

V levém horním rohu záložky se nacházejí dvě rolovací menu viz obr. 5.2. V menu s popisem *Typ ochrany* se nacházejí tři položky – Nadproudová, Diferenciální a Distanční. V závislosti na volbě z této nabídky se mění položky ve vedlejším menu s popisem *Ochrana*. Tyto položky odpovídají jednotlivým ochranám a jsou načítány z listu *Ochrany Siemens*. Po změně položky z druhého menu se načtou parametry zvoleného terminálu z listu *Ochrany Siemens*.

Obr. 5.2 Okno ochran Siemens

Ochrany a jejich parametry z tohoto listu se nahrávají automaticky po změně některého z rolovacích menu. V případě potřeby je možné připsat další typy ochran a jejich parametry do příslušného sloupce viz příklad pro diferenciální ochrany na obr. 5.3.

	F	G	H	I	J	K	L
1	Diferenciální						
2	Typ	Příkon P_i [VA]		Činitel K_{td} [-]			Dim
3		Vstup 1A	Vstup 5A	Transformátor	Připojnice/Vedení	Generátor/Motor	
4							
5	SIPROTEC 7SD60	2,2	3,5	-	1	-	2
6	SIPROTEC 4 7SD61	0,05	0,3	1,2	1,2	1,2	3
7	SIPROTEC 4 7SD52/53	0,05	0,3	1,2	1,2	1,2	3
8	SIPROTEC 4 7UT612	0,02	0,2	4	4	5	3
9	SIPROTEC 4 7UT613	0,05	0,3	3	3	5	3
10	SIPROTEC 4 7UT633	0,05	0,3	3	3	5	3
11	SIPROTEC 4 7UT635	0,05	0,3	3	3	5	3
12	SIPROTEC 4 7UM62	0,05	0,3	4	-	5	3
13	SIPROTEC 7SS5	0,1	0,2	-	0,5	-	4
14							
15							

Obr. 5.3 Zápis parametrů pro diferenciální ochrany v listu *Ochrany Siemens*

Potřebnými parametry jsou:

- název ochrany,
- příkon P_i pro jednoampérový a pětiampérový vstup,
- pro nadproudové ochrany minimální skutečné nadproudové číslo,
- pro diferenciální ochrany činitel K_{td} podle chráněného zařízení,

- pro distanční ochrany činitel K_{td} podle primární časové konstanty,
- parametr Dim .

Tyto parametry jsou uvedeny v kapitole 4.1, s výjimkou příkonu P_i , který lze najít v katalogu [8] a parametru Dim . Parametr Dim je pomocná veličina, která stanovuje podle jakých vztahů bude probíhat kontrola dimenzování, odpovídá tedy požadavkům uvedeným v kapitole 4.1. Hodnotě 1 odpovídají vztahy (4.10) až (4.13), hodnotě 2 vztahy (4.14) až (4.17), hodnotě 3 vztahy (4.18) a (4.19), hodnotě 4 vztahy (4.18) až (4.21) a konečně hodnotě 5 vztahy (4.22) a (4.25).

V levém dolním rohu záložky je okno *Chráněné zařízení*, které se zpřístupní pokud jsou zvoleny diferenční ochrany. Po volbě se načte příslušný činitel K_{td} .

Na pravé straně záložky je okno *Zkratové poměry*. Toto okno obsahuje rámečky pro vklad zkratových poměrů. Jednotlivé rámečky se zpřístupní podle toho jaké požadavky má daný typ ochrany.

5.1.2 Okno ochran ABB

V případě firmy ABB se kontrola dimenzování neprovádí pro konkrétní ochranu, ale pro danou ochrannou funkci. Ta se zvolí pomocí rolovacího menu nahoře na záložce podle obr. 5.4.

Obr. 5.4 Okno ochran ABB

Podle kapitoly 4.2 můžeme pro všechny terminály firmy ABB považovat $P_i = 0,25$ W. Firma ABB dále nepoužívá žádné činitele pro dimenzování. Vstupními hodnotami jsou tedy jen zkratové parametry. Tyto se zapisují do rámečků, které se zpřístupní podle zvolené ochranné funkce.

Při výpočtech se pro jednoduchost vždy používá hodnota odporu přívodu $2R_l$ a frekvence sítě 50 Hz. Využívají se vztahy uvedené v kapitole 4.2. Kontrola pro diferenciální ochranu transformátorů je zjednodušena tak, že je potřeba zadat pouze hodnota I_{ft} – zde maximální průchozí proud přes přístrojové transformátory proudu a využijí se pouze vztahy (4.32) a (4.33).

5.1.3 Okno ochran AREVA

Stejně jako u firmy ABB se i zde kontrola dimenzování provádí pro danou ochrannou funkci, která se volí pomocí rolovacího menu nahoře na záložce podle obr. 5.5.

Rolovací menu v okně proudové vstupy slouží pro volbu použité ochrany a načtení odporu jejích proudových vstupů. Jelikož jsou tyto odpory poměrně nízké a velice podobné pro většinu terminálů, není tato volba příliš podstatná pro kontrolu dimenzování.

Obr. 5.5 Okno ochran AREVA

Po volbě ochranné funkce se zpřístupní rámečky pro zadání potřebných hodnot. Proudové hodnoty (mimo I_{diff}) se zadávají jako primární s jednotkou kA a v programu jsou potom přepočteny na sekundární stranu. Některé ochranné funkce jsou pro jednoduchost sloučeny do jedné a v tomto případě se používají vztahy, které kladou nejvyšší nároky na limitní napětí. Vždy se používá hodnota odporu přívodu $2R_l$ a frekvence sítě 50 Hz. V některých případech proto může dojít k menšímu předdimenzování PTP, pokud by byla potřeba přesnější dimenzování je vhodné použít příslušné vztahy uvedené v kapitole 4.3.

Nadproudová ochrana nebo funkce SEF

Slučuje tyto ochranné funkce:

- Nesměrová resp. směrová časově nezávislá (DT) resp. inverzní časově nezávislá (IDMT) nadproudová a zemní ochrana
- Nesměrová mžiková nadproudová a zemní ochrana
- Směrová mžiková nadproudová a zemní ochrana
- Nesměrová resp. směrová časově nezávislá (DT) resp. inverzní časově nezávislá (IDMT) ochrana SEF – reziduální zapojení PTP
- Nesměrová resp. směrová časově nezávislá (DT) resp. inverzní časově nezávislá (IDMT) ochrana SEF – zapojení PTP s vyváženým jádrem (CBCT)
- Nesměrová časově nezávislá, resp. časově nezávislá inverzní zemní ochrana
- Nesměrová okamžitá zemní ochrana

Vysokoimpedanční REF nebo vysokoimpedanční diferenciální ochrana

Slučuje tyto ochranné funkce:

- Vysokoimpedanční ochrana REF
- Vysokoimpedanční diferenciální ochrana
- Diferenciální ochrana generátoru – vysokoimpedanční diferenciální ochrana

Ostatní volitelné funkce odpovídají kapitole 4.3 s výše uvedenými zjednodušeními.

5.2 Okno parametrů PTP, přívodu a přídatné zátěže

Toto okno slouží pro zadání jmenovitých hodnot přístrojového transformátoru proudu, přívodu k ochraně a případně další sériové zátěže na výstupu PTP. Hodnoty se zapisují do jednotlivých políček viz obr. 5.6.

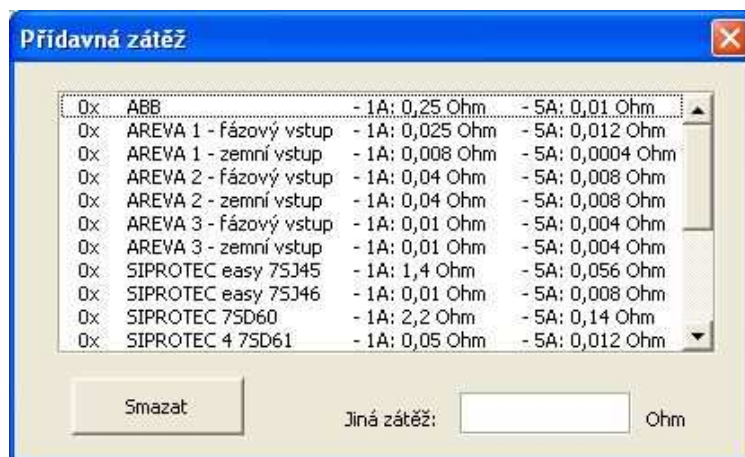
Obr. 5.6 Okno parametrů PTP, přívodu a přídatné zátěže

Program je standardně nastaven pro zápis nadproudového čísla. Pokud je charakteristikou PTP limitní napětí je potřeba změnit nastavení. Při klepnutí na tlačítko *Nastavení* se objeví okno podle obr. 5.7, v němž je možno tuto volbu změnit. V tomtéž okně je možné přepnout přepočítání nadproudového čísla na limitní napětí a naopak, buď podle vztahů uvedených firmou Siemens nebo podle vztahu firmy AREVA, viz kapitola 4.

Obr. 5.7 Okno nastavení

Podle nastavení je zpřístupněno buď políčko pro nadproudové číslo nebo pro limitní napětí. Hodnota, která nejde zadat, se automaticky doplní po zadání hodnot jmenovité zátěže a vnitřního odporu PTP.

Tlačítko *Přídavná zátěž* slouží pro případ, že je v sekundárním obvodu PTP zapojeno více ochranných v sérii nebo případně jiná další zátěž. Po stisknutí tohoto tlačítka se objeví okno podle obr. 5.8. Při klepnutí pomocí levého tlačítka myši na konkrétní položku se tato přičte do zátěže PTP. Je možné zvolit více položek a dále například některé položky vícenásobně, což značí údaj nalevo v dialogu (obr. 5.8). Tlačítko *Smazat* slouží k vynulování položek, které jsou právě označeny. Pokud se v obvodu nachází zátěž která není v nabídce uvedena, je možné dopsat konkrétní hodnotu odporu do políčka vpravo dole.



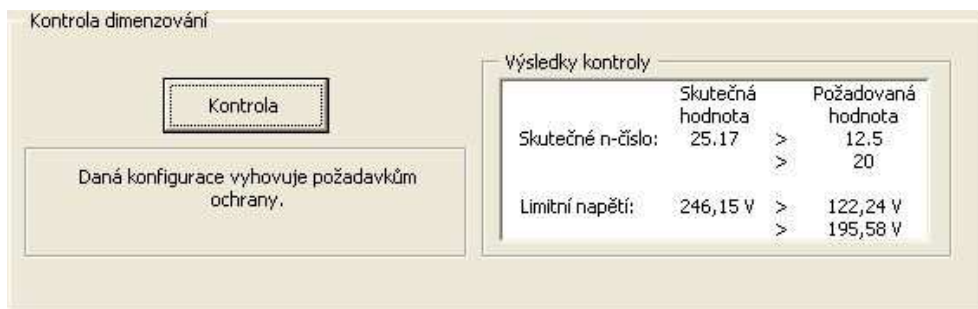
Obr. 5.8 Okno přídavné zátěže

Po zadání hodnot do rámečku *Parametry přívodu* se pak automaticky doplní hodnota skutečného nadproudového čísla. Při jakékoliv změně v parametrech ochrany, přístrojového transformátoru, přídavné zátěže nebo přívodu se toto pole aktualizuje.

Rámeček vpravo dole se zpřístupní pouze v případě, že je zvolena ochrana Siemens v listě *Ochrany Siemens* s parametrem $Dim = 2$, nyní tedy pouze ochrana SIPROTEC 75D60. Tento způsob kontroly dimenzování vyžaduje poměr určitých parametrů PTP na začátku a konci vedení viz kapitola 4.1.2 vztahy (4.16) a (4.17). V tomto případě se může postupovat následovně: Vyplní se parametry PTP na začátku vedení a jeho sekundární zátěž nyní, po stisku tlačítka *Uložit*, se zapsané a vypočtené parametry vyplní do levého okénka vedle tohoto tlačítka a parametry PTP 1 jsou tímto uloženy. Pro PTP na konci vedení se přepne horní tlačítko a dále se pokračuje stejně, přičemž hodnoty se uloží do pravého okénka. Obě PTP se mohou libovolně přepisovat. Po uložení obou PTP se může přejít ke kontrole dimenzování.

5.3 Okno pro kontrolu dimenzování

Po zadání ochrany, případně ochranné funkce, zkratových poměrů, parametrů PTP a jeho sekundární zátěže, se může přikročit ke kontrole dimenzování. Po stisku tlačítka *Kontrola* se v případě, že jsou vyplněny všechny potřebné hodnoty, pod tlačítkem objeví informační text zda daná konfigurace vyhovuje požadavkům a napravo se vypíše výsledky kontroly viz obr. 5.9. V případě, že některé hodnoty nejsou zadány, vypíše se o tom informace v okénku pod tlačítkem.



Obr. 5.9 Okno pro kontrolu dimenzování – příklad pro nadproudové ochrany Siemens

Okno *Výsledky kontroly* slouží pro přehled vypočtených hodnot. V levém sloupci se zobrazí vypočtená hodnota skutečného nadproudového čísla, případně limitního napětí a v pravém pak požadovaná hodnota, která odpovídá vztahům z kapitoly 4. Pokud je skutečná hodnota nižší než požadovaná, pak konfigurace nevyhovuje a je potřeba změnit parametry PTP.

6 ZÁVĚR

V úvodních kapitolách diplomové práce jsou zahrnuty základní pojmy, matematické vztahy a podklady nezbytné pro dimenzování přístrojových transformátorů. Dále jsou uvedena schémata zapojení transformátorů vhodná pro konkrétní typy sítí a poruch, které chceme jejich pomocí identifikovat. Tato schémata jsou doplněna matematickými vztahy, případně fázorovými diagramy pro daný typ poruchy. Uvedené informace odpovídají současným normám, které se přístrojovým transformátorům věnují.

Podle zadání byla provedena analýza požadavků jednotlivých výrobců digitálních ochran na dimenzování přístrojových transformátorů. Jak bylo uvedeno, je takřka nemožné stanovit pro dimenzování jednotný přístup, protože doporučované postupy daných výrobců se podstatně liší a je bezpochyby nutné je respektovat. Rozdílný je i přístup firem k poskytování informací ohledně jejich ochranných terminálů a také požadavků na přístrojové transformátory. Někteří výrobci poskytují poměrně podrobné informace o požadavcích ochran, případně jednotlivých ochranných funkcí. Další výrobci poskytují informace poměrně strohé a nekompletní.

Dále byl vytvořen program pro dimenzování přístrojových transformátorů proudu, který využívají poznatky sepsané v textu práce. Jako programovací jazyk byl použit Visual Basic for Applications (VBA) v programu Microsoft Excel 2003. Vytvořený program nabízí možnost kontroly dimenzování přístrojových transformátorů pro konkrétní ochranu či ochrannou funkci.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] JANÍČEK, F., CHLADNÝ, V., BELÁŇ, A., ELESCHOVÁ, Ž. *Digitálne ochrany v elektrizačnej sústave*. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2004, 360 stran. ISBN 80-227-2135-2
- [2] ČSN EN 60044-1:2001. *Přístrojové transformátory – Část 1: Transformátory proudu*
- [3] ČSN EN 60044-2:2001. *Přístrojové transformátory – Část 2: Induktivní transformátory napětí*
- [4] ČSN EN 60044-6:2001. *Přístrojové transformátory – Část 6: Požadavky na jistící transformátory proudu pro přechodné jevy*
- [5] ČSN EN 60044-7:2001. *Přístrojové transformátory – Část 7: Elektronické transformátory napětí*
- [6] ČSN EN 60044-8:2004. *Přístrojové transformátory – Část 8: Elektronické transformátory proudu*
- [7] CT Dimensioning [on line]. 2007, [cit. 2009-05-18], 41 p.
https://www.energy.siemens.com/cms/00000013/aune/Documents/EA/08_CT%20Dimensi oning.pdf
- [8] SIPROTEC Numerical Protection Relays, Catalogue SIP – 2008 [on line]. [cit. 2009-05-18], 1020 p. http://siemens.siprotec.de/download_neu/devices/1_General/Catalog_SIP-2008/SIPROTEC_Catalog_2008_A6_en.pdf
- [9] Application manual, Transformer protection terminal RET 521*2.5 [on line]. 2003, [cit. 2009-05-18], 263 p. <http://www.abb.com/substationautomation>
- [10] Application manual, Line differential protection terminal REL 551*2.5 [on line]. 2006, [cit. 2009-05-18], 320 p. <http://www.abb.com/substationautomation>
- [11] Application manual, Line distance protection terminal REL 501*2.5 [on line]. 2006, [cit. 2009-05-18], 590 p. <http://www.abb.com/substationautomation>
- [12] Application manual, Line distance protection terminal REL 511*2.5 [on line]. 2006, [cit. 2009-05-18], 618 p. <http://www.abb.com/substationautomation>
- [13] Application manual, Line distance protection terminal REL 521*2.5 [on line]. 2006, [cit. 2009-05-18], 622 p. <http://www.abb.com/substationautomation>
- [14] Application manual, Line high speed distance protection terminal REL 531*2.5 [on line]. 2006, [cit. 2009-05-18], 650 p. <http://www.abb.com/substationautomation>

- [15] Application manual, Line differential and distance protection terminal REL 561*2.5 [on line]. 2006, [cit. 2009-05-18], 656 p. <http://www.abb.com/substationautomation>
- [16] Application manual, Overcurrent and earth fault protection terminal REL 505-C1*2.5 [on line]. 2006, [cit. 2009-05-18], 206 p. <http://www.abb.com/substationautomation>
- [17] Application manual, Line distance protection terminal for solidly earthed systems REL 511-C1*2.5 [on line]. 2006, [cit. 2009-05-18], 318 p. <http://www.abb.com/substationautomation>
- [18] Application manual, Line distance protection terminal for impedance earthed systems REL 511-C2*2.5 [on line]. 2006, [cit. 2009-05-18], 296 p. <http://www.abb.com/substationautomation>
- [19] Application manual, Line differential protection terminal REL 551-C1*2.5 [on line]. 2006, [cit. 2009-05-18], 198 p. <http://www.abb.com/substationautomation>
- [20] Application manual, Overcurrent and earth fault protection terminal REL 505*2.5 [on line]. 2006, [cit. 2009-05-18], 452 p. <http://www.abb.com/substationautomation>
- [21] Burdens & Current Transformer Requirements of MiCOM Relays, B&CT/EN AP/B11 [on line]. 2007, [cit. 2009-05-18], 50 p. ftp://ftp.aveva-td.com/B&CT_EN_AP_B11.pdf
- [22] Microsoft Office Excel 2003, Microsoft Corporation [počítačový program]