

7 Chránění kabelových vedení (1)

Hlavní zásady pro volbu chránění:

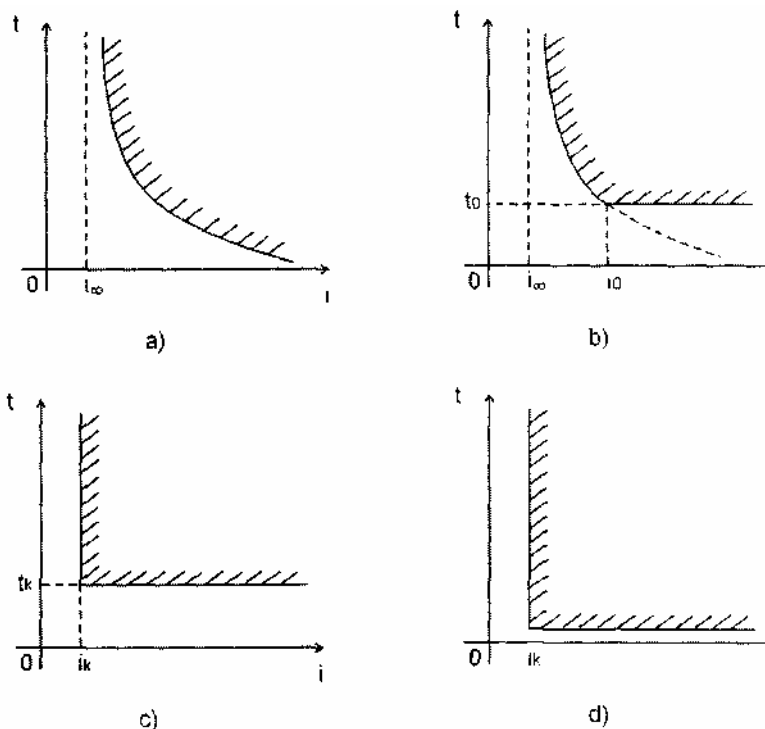
- a) jádro jištěného kabelu při nadproudech způsobených přetížením nemá překročit teplotu podle tabulky 43-NA 1 ČSN 33 2000-4-43 (1994)
- b) jádro jištěného kabelu při nadproudech způsobených zkratem nesmí překročit teplotu podle tabulky 43-NA 1 ČSN 33 2000-4-43 (1994), v nové normě ČSN 33 2000-4-43 (2003) jsou tytéž teploty uvedeny v tabulce 43A, kde jsou uvedeny pod pojmem - počáteční a konečná teplota
- c) v prostředích, kde je stanovena nejvyšší dovolená teplota povrchu, povrch jištěného kabelu při nadproudech způsobených přetížením nebo pokud je to výslovně stanoveno v příslušných ČSN i zkratovými proudy, nesmí překročit nejvyšší dovolenou teplotu povrchu
- d) při normálním provozu nesmí nastat nežádoucí působení jisticích prvků
- e) jisticí prvky mají odpojit při svém působení, pokud je možné, jen postiženou část vedení
- f) každý jisticí prvek při svém selhání musí být nahrazen jiným jisticím prvkem (místní a vzdálené zálohování), který poškozenou část bezpečně vypne
- g) pro celkový návrh chránění je podstatné zda má chráněné zařízení trvalou obsluhu, jestli jsou signály ochrany zavedeny do řídicího systému, nebo se jedná o rozvodnu bez obsluhy. V prvních dvou případech lze využít funkci signalizace přetížení a tím ochranu vypínat jen tehdy, pokud nedošlo po upozornění signálem o přetížení k odlehčení (ideální se zde jeví závislá proudová charakteristika), zatím co v místě bez obsluhy signalizace nemá žádný význam a zde je nutné vypínat bez upozornění (více se zde využívá nezávislých charakteristik)
- h) ochrany pro vedení vn předepsané ČSN 33 3051 (1992) najdeme v tabulce č.10. Výčet uvedených ochran platí v plném rozsahu až na ochranu distanční, která je v průmyslových podnicích používaná velmi zřídka.

Poruchy na vedeních vn - poruchy, které mohou vzniknout na příslušném vedení, závisí na způsobu uzemnění uzlu soustavy. V soustavách s přímo uzemněným uzlem mohou vzniknout tyto poruchy: přetížení, zkraty, přerušení vodiče a přepětí. V soustavách s izolovaným nebo kompenzovaným uzlem může vzniknout, kromě výše zmíněných poruch, také zemní spojení.

Ochrany vedení vn se dělí na dvě základní skupiny:

- a) *stupňové* - jsou to takové ochrany, které ke svému selektivnímu působení potřebují časové zpoždění vhodně odstupňované. Do této skupiny patří nadproudové ochrany závislé, nezávislé, směrové a ochrany distanční.
- b) *srovnávací* - jsou to ochrany, které pracují na principu porovnání stavové veličiny na vstupu a výstupu chráněného objektu a pokud jsou tyto hodnoty různé, vypínají okamžitě bez časového zpoždění.

Nadproudové ochrany - princip těchto ochran je dán tím, že při přetížení nebo zkratu se zvětšuje proud procházející chráněným objektem. Tento proud ochrana měří a pokud dojde k překročení nastavené hodnoty dává povel k vypnutí. Podle doby působení rozeznáváme tyto typy nadproudových ochran:



a) závislá, b) polozávislá, c) nezávislá - časová, d) nezávislá - mžiková
7.1 Závislé ochrany ve většině případů používají charakteristiky IDMT.

Při volbě závislé charakteristiky IDMT je vypínací čas stupně funkcí proudu. Čím vyšší je proud, tím kratší je vypínací čas. K dispozici jsou čtyři normalizované křivky označené jako extrémně závislá, velmi závislá, normálně závislá a dlouhodobě závislá charakteristika. Vztah mezi proudem a časem v souladu s normami BS 142.1966 a IEC 255-4 je vyjádřen vztahem:

$$t = \frac{k \cdot \beta}{\left(\frac{I}{I >}\right)^\alpha - 1} \quad (\text{s, s, -, A, A, -}) \quad (7.1)$$

kde

- t vypínací čas
- k násobící časový faktor
- I měřená hodnota proudu
- $I >$ nastavená popudová hodnota proudu
- α, β konstanty určující průběh IDMT charakteristiky

Hodnoty konstant α a β

Skupina závislosti čas/proud	křivek	α	β
Normálně závislá		0,02	0.14
Velmi závislá		1,0	13,5
Extrémně závislá		2,0	80,0
Dlouhodobě závislá		1,0	120

Norma BS 142.1996 definuje normální proudový rozsah jako 2 až 20-ti násobek nastavené hodnoty. Kromě toho musí u ochrany dojít k popudu nejdéle v okamžiku, kdy proud překročí 1,3 násobek nastavené hodnoty proudu, pokud je použita normálně závislá, velmi závislá nebo extrémně závislá charakteristika. U dlouhodobě závislé charakteristiky je normální proudový rozsah specifikován jako 2 až 7-násobek nastavené hodnoty a u ochrany musí dojít k popudu v okamžiku, kdy proud překročí 1,1 násobek nastavené hodnoty.

Speciální charakteristiky

Charakteristika typu RI - je speciální charakteristika, která je používána hlavně pro časové odstupňování v systémech s elektromechanickými ochranami. Tuto charakteristiku je možné matematicky vyjádřit následujícím vztahem

$$t = \frac{k}{0,339 - 0,236 \cdot \left(\frac{I >}{I}\right)} \quad (\text{s}) \quad (7.2)$$

kde t vypínací čas v sekundách
 k násobící časový faktor
 I fázový proud
 $I >$ nastavený popudový proud

Charakteristika typu RD - je speciální charakteristika, která je používána hlavně pro chránění při zemních poruchách v systémech, kde je vyžadován vysoký stupeň selektivity i pro poruchy s vysokou odporovou složkou S touto charakteristikou může být ochrana selektivní i v případě, že se nejedná o ochranu směrovou. Matematicky je možné charakteristiku závislosti čas / proud vyjádřit následujícím vztahem:

$$t = 5,8 - 1,35 \cdot \log\left(\frac{I}{k \cdot I_N}\right) \text{ (s)} \quad (7.3)$$

Srovnávací ochrany - srovnávací ochrany nepřenáší veličinu úměrnou proudu, ale signál, který určuje pouze fázi proudu. Přenosové vedení musí věrně přenášet jen fázi bez ohledu na amplitudu. Měří fázový úhel φ mezi vstupním a výstupním proudem objektu.

Rovnice srovnávací ochrany je:

$$|\varphi| = |\arg i_a - \arg i_b| = \alpha \quad (7.4)$$

Srovnávací ochrana je kompromis mezi použitím ochrany distanční a rozdílové. Je vhodná tam, kde pro krátkou vzdálenost vedení není možné použít ochranu distanční.

Distanční ochrany - ochrana využívá principu měření impedance zkratové smyčky. Ochrana měří napětí u_k a proud i_k v místě připojení ochrany. Veličiny u_k , i_k určují jednoznačně impedanci z zkratové smyčky a tím i vzdálenost l zkratu od ochrany.

$$z = \frac{u_k}{i_k} \approx 1 \text{ (}\Omega, \text{ V, A, m)} \quad (7.5)$$

Ochrana působí pokud je změřená impedance menší než nastavená.

7.1 Chránění proti proudovým přetížením

Chránění musí zajistit dostatečnou životnost vodičů a jejich izolací vystavených tepelným účinkům proudů, působících dlouhodobě (jedná se o proudy, které vzniknou při nestandardním provozu, nejedná se o zkrat).

Při chránění proti proudovému přetížení vycházíme z dovoleného proudového zatížení I_z ve smyslu čl. 523.ON5 ČSN 33 2000-5-523 z roku 1994. *(Tato norma byla nahrazena v dubnu 2003 novou normou ČSN 33 2000-5-523, která platí jen pro kabely do 1 kV - původní ČSN 33 2000 -5-523 ; února 1994 platila pro dimenzování holých i izolovaných vodičů a kabelů všech napětí - proto nám nezbyvá nic jiného, než se držet normy z roku 1994.*

$$I_z = k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_i \cdot I_N \text{ (A)} \quad (7.6)$$

Jmenovitý proud I_N pro daný typ kabelu převezmeme z údajů výrobce kabelu, u starších kabelů jej najdeme v **Národní příloze NK ČSN 33 2000 - 5-523 (1994) - Technické parametry vodičů a kabelů** - nebo příslušných normách z doby výroby kabelů. Pro nastavení ochrany použijeme hodnotu **dovoleného proudového zatížení** I_z , kterou vypočteme podle výše citované normy.

Pro použití vypínací charakteristiky ochrany (některé ze závislých charakteristik nebo nezávislé charakteristiky) je podstatné, jaká je celková filosofie chránění. Záleží také na tom, ve kterém místě sítě vn se chráněný prvek nachází.

Protože každé nastavení musí být selektivní oproti „okolnímu“ nastavení ochran, je nutné zvážit, zda je možné použít kombinaci závislých a nezávislých charakteristik v jednom systému chránění.

U chránění kabelových vedení proti proudovým přetížením dávám přednost závislým charakteristikám. Je to velmi dobře proveditelné tam, kde jsou digitální ochrany provozovány ve spolupráci s řídicím systémem. Popud závislé proudové ochrany je možné použít pro signalizaci, že zařízení je přetíženo, a že došlo k rozběhu závislé proudové ochrany. Při použití vhodného typu závislé charakteristiky můžeme dosáhnout toho, že obsluha má čas na úpravu provozu.

Případy kdy lze vynechat ochranu proti přetížení jsou uvedeny v čí. 473.1.2. ČSN 33 2000 - 4 - 473 (1994). Případy, ve kterých se z bezpečnostních důvodů doporučuje vynechání ochrany proti přetížení jsou uvedeny v čí. 473.1.4 ČSN 33 2000 - 4 - 473 (1994). Umístění ochrany proti přetížení je možné na začátku kabelového vedení nebo na konci kabelového vedení, proud procházející kabelem je stejný. Je ale také možné použít nadproudovou ochranu na obou koncích kabelového vedení (ochrany musí být oproti sobě selektivní), podle mého názoru je to nadbytečné. Pokud tato ochranná funkce slouží současně pro vypínání zkratů (například při použití jediné ochrany - AT31X apod.), je nutné k umístění ochrany přistupovat jako k ochraně proti zkratovým proudům.

7.2 Výpočet nastavení nadproudových ochran

Výpočet nastavení nadproudových ochran vychází z dovoleného zatížení kabelu I_z , které určíme podle uvedené ČSN 33 2000 - 5 - 523(1994).

Podle PNE 38 4065 (2004) platí:

$$I_{r-\text{přetížení}} \geq \frac{k_b \cdot I_z}{k_p \cdot p_p} \quad (\text{A}) \quad (7.7)$$

kde	I_z	dovolené zatížení kabelů
	I_r	nastavení na ochraně
	k_p	přídržný poměr - udává výrobce ochran k_b koeficient bezpečnosti - volí se 1,05 až 2 (1,05 pro signalizaci přetížení)
	p_p	převod měřících transformátorů proudu

U nadproudových ochran vedení, nebo úseků řazených za sebou nemá být ochrana blíže ke zdroji citlivější než ochrana dalších úseků. Nastavení proudu na ochranách musí vyhovovat podmínce:

$$I_m = (1,1 \div 1,3) \cdot I_{r(n-1)} \quad (\text{A}) \quad (7.8)$$

Jde o případ proudové selektivity. Tuto selektivitu můžeme zajistit použitím obou typů charakteristik - závislých i nezávislých. Pro časovou selektivitu platí:

$$\Delta t = t_n - t_{n-1} \quad (\text{s}) \quad (7.9)$$

Časová selektivita je mnohem důležitější, protože ta je funkční i při stavech, kdy poruchové proudy jsou vyšší než jsou nastavené nadproudové ochrany (kdy se rozběhnou všechny nadproudové ochrany a tím proudová selektivita neplatí, toto pravidlo neplatí pro ochrany se závislou charakteristikou)

Příklad výpočtu:

a) Vedení je realizováno kabelem, který je v rozvodně uchycen na zdi kabelovými háky, dále je veden zemí, na konci je vyveden na stožár a dále vedení pokračuje jako volné vedení. Nadproudová ochrana - PTP 400/1.

kabel: **22ANKTOPV 3x240mm²**

$I_{NV} = 329\text{A}$ - pro uložení ve vzduchu

$I_{NZ} = 353\text{A}$ - pro uložení v zemi

Počet kabelů - 1

$k=1$ (uložení E-L podle Tab. 52-NF29 v normě ČSN 33 2000-5-523)

volné vedení: **AIFe - 6 - 120mm²**, $I_N = 357\text{A}$

$$I_Z = k \cdot I_n = 1 \cdot 329 = 329 \text{ (A)} \text{ (použijeme nejnižší } I_n \text{ vedení)}$$

nastavení nadproudové ochrany:

$$I_r \geq \frac{k_b \cdot I_Z}{k_p \cdot p_p} = \frac{1,2 \cdot 329}{0,95 \cdot 400} = 1,038 \text{ (A)} \quad (I_n \text{ ochrany})$$

kde k_b přídržný poměr (1,2)
 k_p koeficient bezpečnosti (0,95)
 p_i převod měřicího transformátorů proudu
 I_Z dovolené zatížení vedení

b) Vedení je kabelové, kabely v rozvodně jsou vedeny na zdi v neperforované lávce, volně seskupené, dále pak uloženy v zemi. Nadproudová ochrana – PTP 800/1.

kabel: 6ANKOPV 3x240mm²

$I_{NV} = 363A$ - pro uložení ve vzduchu

$I_{NZ} = 406A$ - pro uložení v zemi

Počet kabelů - 2

$k = 0,95$ (uložení E-H podle Tab. 52-NF29 v normě ČSN 33 2000-5-523)

$I_z = k \cdot I_n = 2 \cdot 0,95 \cdot 363 = 689,7$ (A)

nastavení nadproudové ochrany:

$$I_r \geq \frac{k_b \cdot I_z}{k_p \cdot p_p} = \frac{1,2 \cdot 689,7}{0,95 \cdot 800} = 1,089 \text{ (A)}$$

kde k_b přídržný poměr (0,95)
 k_p koeficient bezpečnosti (1,2)
 p_i převod měřicího transformátorů proudu
 I_z dovolené zatížení vedení

7.3 Chránění proti zkratovým proudům (při dvou a třípólovém zkratu)

Zkratová ochrana musí být schopna přerušit každý zkratový proud ve vodičích obvodu dříve, než by se takový proud mohl stát nebezpečným důsledku tepelných účinků vznikajících ve vodičích kabelu. Vypínací čas každého zkratového proudu v kterémkoliv místě obvodu nesmí být větší než čas ve kterém vodiče dosáhnou přípustnou teplotní mez. Do vypínacího času je nutné zahrnout vypínací čas ochrany a vypínací čas vypínače.

Při výpočtu vypínacího času lze postupovat podle odstavce **434.3 ČSN 33 2000 - 4 - 43** (2003). U tohoto výpočtu je nutné dávat pozor na různý výklad zkratového proudu v místě zkratu. Podle **ČSN 33 2000-4-43** (2003) je označen jako **ekvivalentní oteplovací proud I**, ale tento proud je totožný s **ekvivalentním oteplovacím proudem I_{ke}** podle **ČSN 33 3022** (1992) a současně s **ekvivalentním oteplovacím proudem I_{th}** podle **ČSN 33 3040** (1990). Ve všech případech se jedná o stejnou výslednou proudovou hodnotu.

Pro výpočet nastavení ochrany proti zkratovým proudům je vhodné si nakreslit všechny možné varianty zapojení pro chráněný prvek, a pro všechny provést výpočet zkratů. V každém případě počítáme s tou nejvyšší hodnotou zkratu, která vyjde pro různá zapojení. Chránění proti zkratovým proudům (dřívější termín byl kontrola vedení na oteplení při zkratu) je nejdůležitější část chránění zařízení proti nadproudům.

Pro chránění proti zkratovým proudům používáme u kabelů vn zásadně proudovou ochranu s nezávislou charakteristikou (i když použití některé ze závislých charakteristik u digitálních proudových ochrany by bylo taktéž možné, nastal by zde velký problém s dodržením selektivity). Případy, ve kterých se může vynechat ochrana proti zkratovým proudům, jsou uvedeny v člancích 473.2.3 ČSN 33 2000 - 4 - 473 (1994).

Umístění ochrany proti zkratovým proudům z pohledu začátku a konce kabelového vedení není stejné jako u ochrany proti proudovému přetížení. V tomto případě je vhodné, aby byla ochrana proti zkratovým proudům na obou koncích kabelového vedení. V horším případě na straně napájení, ale to jen v případě, že není uvažováno napájení oběma směry (v tomto případě je nutná zkratová ochrana na obou stranách).

7.4 Výpočet nastavení ochrany při oteplení při zkratu

Podstata tohoto výpočtu je výpočet času za kterou se musí odepnout zkrat. Tento čas je součet vypínacího času vypínače a nastaveného vypínacího času ochrany. To znamená, že tento vypočtený čas po odečtení času vypínače je nejvyšší čas, který smíme na ochraně nastavit. V současné době tento výpočet uvádí dvě ČSN a každá ho uvádí v jiném tvaru, ale obsah vzorců je stejný a výsledek totožný.

ČSN 33 2000 - 4 - 43 (2003) uvádí:

$$\sqrt{t} = k \cdot \frac{S}{I} \quad \text{jinak} \quad t = \left(k \cdot \frac{S}{I} \right)^2 \quad (\text{s}) \quad (7.10)$$

Kde

t	doba trvání zkratu (s)
S	průřez vedení (mm)
$I = I_{ke}$	ekvivalentní oteplovací proud (A)
k	koeficient pro výpočet oteplení při zkratu v $As^{0,5}/mm^2$

kde koeficient k :

115 platí pro Cu vodiče s izolací PVC, pro průřezy menší než 300 mm², při počáteční teplotě 70°C

100 platí pro Cu vodiče s izolací PVC, pro průřezy menší než 300 mm², při počáteční teplotě 90°C

103 platí pro Cu vodiče s izolací PVC, pro průřezy větší než 300 mm², při počáteční teplotě 70°C

86 platí pro Cu vodiče s izolací PVC, pro průřezy větší než 300 mm², při počáteční teplotě 90°C

76 platí pro Al vodiče s izolací PVC, pro průřezy menší než 300 mm², při počáteční teplotě 70°C

66 platí pro Al vodiče s izolací PVC, pro průřezy menší než 300 mm², při počáteční teplotě 90°C

68 platí pro Al vodiče s izolací PVC, pro průřezy větší než 300 mm², při počáteční teplotě 70°C

57 platí pro Al vodiče s izolací PVC, pro průřezy větší než 300 mm², při počáteční teplotě 90°C

143 platí pro Cu vodiče s izolací se síťovaného polyetylenu

94 platí pro Al vodiče s izolací se síťovaného polyetylenu ČSN33 3040 (1990) uvádí:

$$T_k = \left(\frac{K \cdot A}{I_{th}} \right)^2 \quad (\text{s}) \quad (7.11)$$

kde

T_K doba trvání zkratu v sec

A průřez vedení v mm²

I_{th} ekvivalentní oteplovací proud v A

K koeficient pro výpočet oteplení při zkratu v As^{0,5}/mm²

Zvláštní pozornost musíme věnovat výpočtu nastavení ochran na oteplení při zkratu u paralelních kabelů. Zde musíme provést navíc kontrolu maximálního vypínacího času pro zkrat na konci jednoho z kabelů. V případě, kdy zkrat vznikne na konci jednoho z kabelů (místo zkratu je tím napájeno ze dvou stran), dojde ke značnému zkrácení maximálního vypínacího času (kontrolovaný průřez již není součet průřezů všech paralelních kabelů, ale musíme počítat jen průřezem poškozeného kabelu). Tento výpočet je závislý na délce kabelů, protože musíme počítat se zkratovým proudem na konci kabelů (řešíme jako dvě paralelní vedení). Tento problém řeší článek 473.2.4 ČSN 33 2000-4-473 (1994).

Časové nastavení ochrany potom bude (platí pro kontrolu na oteplení):

$$t_{ochrany} \leq t_{doba \cdot trvání \cdot zkratu} - t_{vypínače} \quad (\text{s}) \quad (7.12)$$

Příklad výpočtu je uveden u výpočtu zkratů.

7.5 Výpočet nastavení ochran pro selektivní vypínání zkratů

Hodnota nastaveného zkratového proudu musí odepnout každý zkrat, který může nastat v chráněném úseku. To znamená, že se jedná o tzv. minimální zkrat, který je nutné vypočítat. Normy ve své definici minimálního zkratu povolují jisté procento točivých strojů v soustavě, kde počítáme zkrat. Ale z praktického hlediska musíme na minimální zkrat hledět tak, že

zapínáme soustavu pod napětí, jediný zkratový příspěvek soustavy je z nadřazené soustavy, a to taktéž jako minimální zkratový příspěvek. Z této hodnoty I''_k musíme vycházet v dalším výpočtu. Protože ne všechny zkraty jsou 3pólové, musíme zkrat přepočítat na dvoupólový, který je menší.

$$I''_{k\text{-min-2f}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I''_{k\text{-min-3f}} \approx 0,86 \cdot I''_{k\text{-min-3f}} \quad (\text{A}) \quad (7.13)$$

Potom výsledný výpočet bude:

$$I_{r\text{-zkraty}} \leq \frac{I''_{k\text{-min-2f}}}{k_c \cdot p_p} = \frac{I''_{k\text{-min-2f}}}{1,5 \cdot p_p} \quad (\text{A}) \quad (7.14)$$

kde I_r nastavení na ochraně
 k_c koeficient citlivosti - pro zkraty volíme 1,5-2
 p_p převod měřících transformátorů proudu
 $I''_{k\text{min2f}}$ minimální 2dvoufázový zkratový proud

Při výpočtu musíme dát pozor, aby platil vztah:

$$I_{r\text{-zkraty}} \geq \frac{k_b \cdot I_Z}{k_p \cdot p_p} \quad (\text{A}) \quad (7.15)$$

kde I_r nastavení na ochraně
 k_p přídržný poměr
 k_b koeficient bezpečnosti
 p_p převod měřících transformátorů proudu
 I_Z nastavení nadproudové ochrany na přetížení

U dlouhých vedení může dojít k tomu, že dvoufázový minimální zkratový proud se může blížit nastavení nadproudové ochrany, která respektuje zatížení na konci vedení. Jedná se o to, aby běžné provozní přetížení nezasahovalo do nastavení zkratové ochrany.

Druhý předpoklad, který musí nastavení zkratové ochrany splnit, je zkratové nastavení ochrany vyšší než je rozběhový proud motorů.

$$I_{r\text{-zkraty}} \geq \frac{k_b \cdot I_S}{k_p \cdot p_p} \quad (\text{A}) \quad (7.16)$$

kde I_r nastavení na ochraně
 k_p přídržný poměr

k_b	koeficient bezpečnosti
p_p	převod měřících transformátorů proudu
I_s	rozběhový proud motorů

Pokud nelze tuto podmínku splnit, je ji možné vyřešit použitím směrové proudové ochrany. Časové nastavení těchto zkratových ochran musí respektovat selektivní časové nastavení jednotlivých ochran. Při použití digitálních ochran je dnes snaha časovou selektivitu mezi ochranami snížit na co nejnižší mez - cca až na 50 ms. Je třeba uvážit, že i digitální ochrany mají svůj odpad. Proto je třeba velmi zvážit, jaké nejnižší časové nastavení použijeme a jakou použijeme nejnižší časovou selektivitu. Není vhodné nastavovat kratší časy zkratů než 100 ms, a to jak u motorů, tak u transformátorů. Kratší nastavené časy nic nevyřeší, naopak mohou pouze přinést problémy. Na časovou selektivitu má vliv kvalita vypínače (jeho rychlost vypínání), ale i u nejmodernějších vypínačů se snažíme dodržet selektivitu 100 ms. Já se snažím dodržet 200 ms, je-li to je možné.

Příklad výpočtu:

$I''_{kmin2f} = 6108,1 \text{ A}$, převod 400/1

$$I_r \leq \frac{I''_{kmin2f}}{k_C \cdot p_p} = \frac{6108,1}{1,5 \cdot 400} = 10,18 \text{ (A)} \quad (I_n \text{ ochrany})$$

kde k_C koeficient citlivosti (1,5)
 p_p převod měřícího transformátorů proudu
 I''_{kmin2f} minimální zkratový proud

7.6 Teoretický rozbor výpočtů proudů při zemních poruchách

Sít' s izolovaným uzlem (sítě IT):

Pro proud procházející místem poruchy, v tomto případě současně kapacitní proud sítě platí:

$$I_p = I_c = j3\omega \cdot C \cdot U_f \text{ (A)} \quad (7.17)$$

Pro tzv. součtový proud, vyhodnocovaný zemní ochranou platí u postiženého vedení:

$$I_{\Sigma 1} = j3\omega \cdot (C - C_1) \cdot U_f = I_c - I_{c1} \text{ (A)} \quad (7.18)$$

a u zdravého vedení:

$$I_{\Sigma_2} = -j3\omega \cdot C_2 \cdot U_f = -I_{C_2} \text{ (A)} \quad (7.19)$$

Protože se proudy I_{Σ_1} a I_{Σ_2} liší především svým směrem, užívají se pro zjišťování zemních poruch v sítích s izolovaným uzlem zemní jalové relé.

Sít' s nepřímo uzemněným uzlem pomocí zhášecí tlumivky (sítě IT(r):

Proud procházející místem poruchy, označovaný obvykle jako zbytkový, je dán rozdílem kapacitního proudu sítě a proudu zhášecí tlumivky, která jej kompenzuje. U těchto sítí je třeba uvažovat i svodové odpory síťových kapacit proti zemi a činný odpor zhášecí tlumivky. Pro stav před poruchou platí, že zbytkový proud:

$$I_{zb} = \left[\frac{3}{R} + \frac{1}{R_L} + j \left(3\omega C - \frac{1}{\omega L} \right) \right] \cdot U_f \text{ (A)} \quad (7.20)$$

Pro proud vyhodnocovaný zemní ochranou platí:

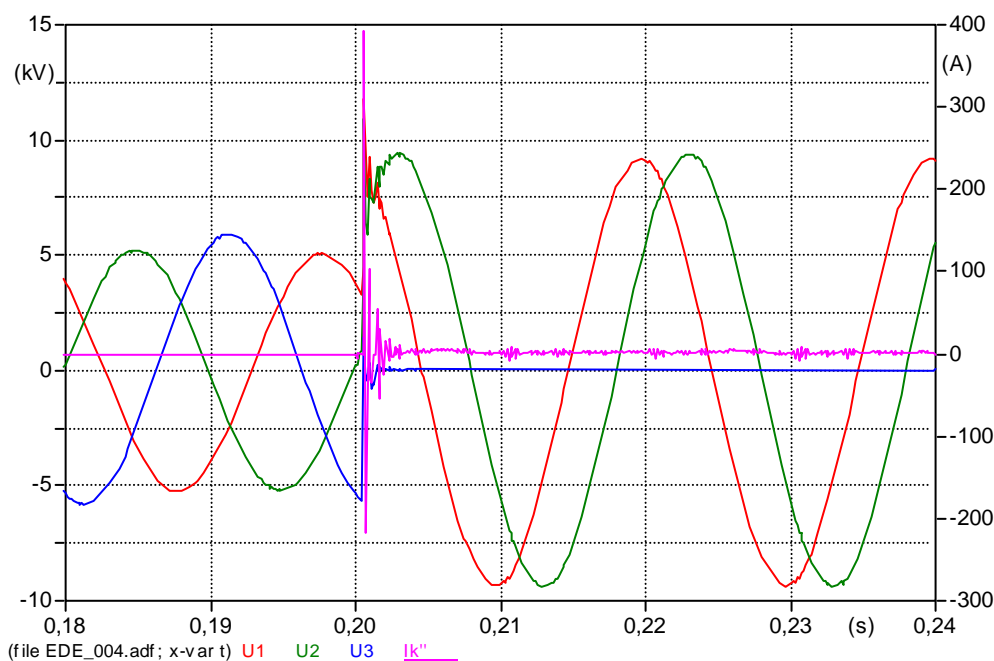
$$I_{\Sigma_1} = \left[\frac{3}{R} - \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_L} + j \left(3\omega C - 3\omega C_1 - \frac{1}{\omega L} \right) \right] \cdot U_f \text{ (A)} \quad (7.21)$$

a u zdravého vedení:

$$I_{\Sigma_2} = - \left(\frac{3}{R_2} + j3\omega C_2 \right) \cdot U_f \text{ (A)} \quad (7.22)$$

Zemní wattová relé využívají pro svou činnost rozdílů ve směru činné složky postiženého a zdravého vedení.

Tzv. zvyšování činné složky proudu zemního spojení zatěžováním pomocného vinutí zhášecí tlumivky připojením odporníku, se projeví jak ve zvýšení zbytkového proudu, tak i jeho činné složky, pouze u vedení s poruchou. U dobře vykompenzovaných sítí je zbytkový proud 5 % (norma říká do 10% I_c 1.harmonické u automaticky laděných sítí) z kapacitního proudu sítě. Přídavné zvyšování činné složky má za následek krátkodobé (do 1 s) zvýšení činné složky proudu závisí na použitém odporu.



7.2 Průběh napětí a proudu při zemním spojení v kompenzované síti.

Sít' s nepřímou uzemněným uzlem pomocí rezistoru (sítě IT(r)):

Proud procházející místem poruchy lze psát jako

$$I_p = \left(\frac{1}{R_N} + j3\omega C \right) \cdot U_f \quad (\text{A}) \quad (7.23)$$

Proud zemní ochranou postiženého vývodu

$$I_{\Sigma I} = \left(\frac{1}{R_N} + j3\omega(C - C_1) \right) \cdot U_f \quad (\text{A}) \quad (7.24)$$

Pro rozlišení mezi zdravým a postiženým vedením u těchto sítí obvykle postačuje rozdíl ve velikosti proudů (pokud proud procházející uzlovým odporem dostatečně převyšuje vlastní kapacitní proudy jednotlivých vývodů), tj. použít nadproudové relé.

7.7 Chránění proti zkratovým proudům při zemních zkratech**(Soustava nepřímou uzemněná pomocí rezistoru)**

Soustava nepřímou uzemněná pomocí odporu se používá především u kabelových sítí. Velikosti této sítě odpovídá zvolena velikost odporu. Většina sítí vn (hlavně se jedná o síť 6 kV) je zapojena do trojúhelníka, v tomto případě je nutno použít pomocnou nulovou

tlumivku, na kterou se připojí odporník V případě vyvedené nuly u strany vn se připojí odporník přímo na nulu transformátoru Tento způsob provozování sítě je velmi vhodný pro průmyslové sítě, ale jsou takto připojeny i některé elektrárny Zemní zkraty jsou odpojovány rychle a bezpečně Způsob připojení odporníku na síť (přímo na nulu transformátoru nebo přes pomocný transformátor) nemá vliv na způsob provozování a nastavení ochran Poruchový proud můžeme popsat takto

$$I_p = \frac{U_f \sqrt{1 + (R_N \cdot 3 \cdot \omega \cdot C_0)^2}}{\sqrt{(R_f + R_N)^2 + (R_f \cdot R_N \cdot 3 \cdot \omega \cdot C_0)^2}} \quad (\text{A}) \quad (7.25)$$

kde I_p poruchový proud
 U_f fázové napětí
 C_0 celková kapacita kabelů
 R_n odpor odporníku
 R_f odpor poruchy

po zjednodušení je možno napsat:

$$I_p = \frac{U_f}{R_N + R_f} \quad (\text{A}) \quad (7.26)$$

7.8 Chránění proti proudům při zemním spojení (izolovaná soustava)

Soustavy vn provozované jako izolovaná soustava jsou omezeny podmínkou **celkového kapacitního proudu I_c** , který nesmí přesáhnout 20 A (ČSN 33 3070 z roku 1981, Kompenzace kapacitních zemních proudů v sítích vysokého napětí.). Přesto se často setkáváme z izolovanou sítí o celkovém kapacitním proudu 60 A i více. U těchto soustav se většinou zemní spojení jen signalizuje na přípojnicí, protože panuje obecné povědomí, že tyto poruchové proudy jsou malé a často samy zhasínají při průchodu nulou. Mnoho lidí si také myslí, že daleko větším nebezpečím jsou přepětí, která nejsou ničím tlumená a proto jsou velká. Místem poruchy však teče celkový kapacitní proud soustavy. Pokud si vypočteme, jak velký tepelný výkon nám prochází místem zemního spojení, zjistíme, že tento poruchový stav nesmíme zanedbávat. Toto zemní spojení ohřívá okolní izolaci tak dlouho, až dojde k dvoufázovému zkratu a vedení je odepnuto zkratovou ochranou. Proto je vhodné tato zemní spojení co nejdříve lokalizovat a poruchové místo odepnout. Pro signalizaci nebo vypínání zemních spojení používáme většinou „zemní“ proudové ochrany s nezávislou charakteristikou, i když použití závislých charakteristik u „zemních“ proudových ochran je v jiných zemích běžné. V případě zemního spojení v izolované soustavě teče místem zemního spojení tento poruchový proud:

$$I_p = \frac{I_c}{\sqrt{1 + \left(\frac{I_c}{U_f} \cdot R_f\right)^2}} \quad (\text{A}) \quad (7.27)$$

kde I_p poruchový proud
 I_c celkový kapacitní proud
 U_f fázové napětí
 R_f odpor poruchy

V neuzemněných soustavách velikost poruchového proudu nezávisí na místě poruchy. Nulová složka proudu vývodu s poruchou, měřená ochranou, zahrnuje pouze tu část proudu, která se uzavírá přes kapacity zdravých fází.

Velikost kapacitního proudu je dána typem kabelů, jejich průřezem, uložením, délkou a napětím soustavy, na které jsou provozovány.

$$I_c = 3 \cdot \omega \cdot C_0 \cdot U_f \quad (\text{A}) \quad (7.28)$$

kde I_c celkový kapacitní proud
 U_f fázové napětí
 C_0 celková kapacita kabelů

Kapacitní proudy jednotlivých kabelů je možné zjistit z katalogů jednotlivých výrobců nebo přibližně odvodit z příloh NN ČSN 33 2000 - 4 -41(1996), ČSN 33 3070 (1981) nebo ze starších norem ČSN 34 1010 apod., neboť velikosti kapacitních proudů se harmonizace norem netýká, kapacitní proudy jednotlivých typů kabelů se vždy měřily.

7.9 Chránění proti proudům při zemním spojení (soustava nepřímo uzemněná pomocí zhášecí tlumivky)

Soustava vn provozovaná jako nepřímo uzemněná pomocí zhášecí tlumivky se používá především u smíšených sítí, ale tento způsob provozu je možný i u sítě čistě kabelové. Používá se hlavně u sítí s vyvedenou nulou napájecího transformátoru, kde se zhášecí tlumivka připojí na nulu transformátoru.

Pokud je síť bez vyvedené nuly u napájecího transformátoru, můžeme zhášecí tlumivku připojit na některou vyvedenou nulu transformátoru vn/nn na primární straně transformátoru, pokud se v síti takový transformátor nachází.

Pokud je sekundární strana napájecího transformátoru zapojena do trojúhelníka, připojí se zhášecí tlumivka na uzel uměle vytvořený troj fázovou nulovou tlumivkou. Vinutí nulové

tlumivky je zapojeno do lomené hvězdy. jmenovité napětí nulové tlumivky musí odpovídat jmenovitému napětí sítě. Jako náhradní řešení lze použít připojení zhášecí tlumivky k uzlu nezatíženého pomocného transformátoru v zapojení YN/dl.

Velikost zhášecí tlumivky je dána velikostí kapacitního proudu sítě I_c , to znamená rozlehlostí sítě. Obvod je paralelním rezonančním obvodem a pokud je zhášecí tlumivka naladěna na kapacitu systému, má poruchový proud pouze odporovou složku. Velikost poruchového proudu je podmíněna ohmickým odporem zhášecí tlumivky a vedení vn spolu se svodovými odpory R_0 . Výhodou tohoto způsobu provozu je, že většina oblouků (zemních spojení) se samovolně uhasí (platí jen pro volná vedení, kde převážnou část zemních spojení tvoří dorůstající stromy). Navíc je zde možnost provozování soustavy se zemním spojením po dobu, která je omezená pouze dobou oteplení zhášecí tlumivky. Zhášecí tlumivka bývá doplněna paralelně připínaným odporem, který se připíná v době zemního spojení na dobu cca 1 sec za účelem zvětšení činného proudu, a tím lepšího působení ochran. Poruchový proud můžeme popsat takto:

$$I_p = \frac{U_f \sqrt{1 + R_0^2 \left(3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L}\right)^2}}{\sqrt{(R_f + R_0)^2 + R_f^2 R_0^2 \left(3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L}\right)^2}} \quad (\text{A}) \quad (7.29)$$

Kompenzaci kapacitních zemních proudů v sítích vysokého napětí se věnuje **ČSN 33 3070 (1981)**.

7.10 Výpočet nastavení ochran pro zemní poruchy

Problém nastavení ochran pro signalizaci nebo vypínání zemních poruch můžeme rozdělit do tří skupin, a to podle provozovaných systémů.

a) soustava nepřímo uzemněná pomocí rezistoru

b) soustava izolovaná

c) soustava nepřímo uzemněná pomocí zhášecí tlumivky

U každé s těchto soustav je zcela odlišný způsob měření zemní poruchy, navíc je velmi podstatné, zda budeme potřebovat měření nesměrové nebo směrové. V případě nesměrového měření můžeme použít nadproudové relé. Jiná situace je pokud potřebujeme zemní směrovou ochranu. Potom musíme využívat měřicí články, které měří činnou nebo jalovou složku proudu. Uvedené výpočty nerespektují odpor poruchy, který se případ od případu velmi liší.

Způsob měření zemních poruch pomocí měřících transformátorů proudu je možné rozdělit do tří skupin. První způsob měření I_0 je možný pomocí tzv. Holmgrénova zapojení měřících transformátorů proudu, druhý pomocí průvlekového měřícího transformátoru a třetí způsob je v zapojení měřícího článku zemní ochrany mezi výstup z jednotlivých proudových obvodů ochrany a zem. Zatím co první dva způsoby lze doporučit, třetí způsob je nejméně přesný.

Předtím než provedeme rozhodnutí, že budeme měřit I_0 musíme provést rozvahu, zda bude toto měření vůbec možné z pohledu převodu měřících transformátorů a z pohledu citlivosti jednotlivých typů ochran.

ad a) soustava nepřímo uzemněná pomocí rezistoru se používá v průmyslových rozvodech i městských sítích. Pro síť vn v byly přijaty následující podmínky volby velikosti uzlových odporů:

$$R_N \leq \frac{1}{3j\omega C} = \frac{U_f}{I_c} \quad (\Omega) \quad (7.30)$$

kde R_n je odpor odporníku
 I_c kapacitní proud soustavy

$$R_0 \geq 2X_0 \quad (\Omega) \quad (7.31)$$

První podmínka vyjadřuje požadavek, aby jmenovitý proud uzlového odporu byl větší, než je kapacitní proud sítě. Druhá podmínka vyžaduje, aby nulový složkový odpor včetně uzlu byl alespoň dvojnásobek nulové složky reaktance (včetně reaktance uzlu sítě). Obě tyto podmínky zajišťují tlumení přepětí při zemních poruchách. Nastavení ochrany musí splňovat tyto podmínky.

$$I_r \leq \frac{I_{pmin}}{p_p \cdot k_c} \quad (A) \quad (7.32)$$

kde I_p minimální poruchový proud
 k_c koeficient citlivosti = 1,5
 p_p převod měřících transformátorů proudu

Při zanedbání odporu poruchy R_p můžeme napsat:

$$I_{pmin} = \frac{0,7 \cdot U_f}{R_N + \frac{2 \cdot R_{1ved} + R_{0ved}}{3}} \quad (A) \quad (7.33)$$

kde R_{1ved} R_1 nejdelšího připojeného vedení na odporník
 R_{0ved} R_0 nejdelšího připojeného vedení na odporník
 R_n je odpor odporníku

Aby ochrana nepůsobila při zkratu mimo vlastní vedení, je zapotřebí splnit podmínku, aby nastavení na ochraně bylo větší než kapacitní proud vlastního vedení (aby nedocházelo k falešnému působení při poruše na jiném vedení).

$$I_r \geq \frac{k_b I_{Cvlastni}}{p_p} \quad (\text{A}) \quad (7.33)$$

kde I_c vlastní kapacitní proud vlastního vedení
 k_b koeficient bezpečnosti = 1,3
 p_p převod měřících transformátorů proudu

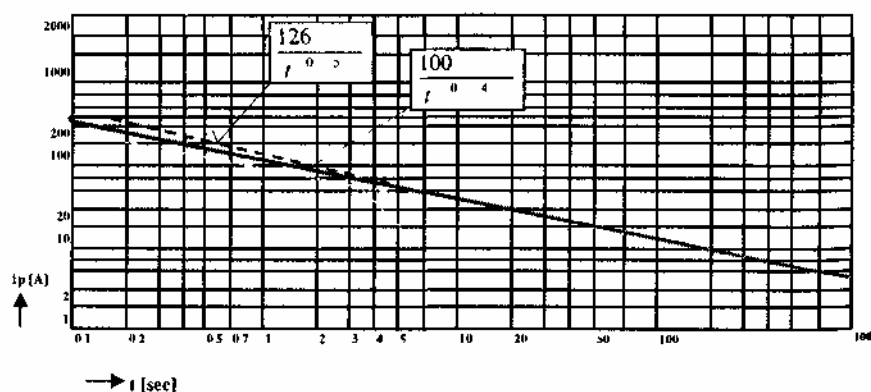
K proudové a časové selektivitě ochran přistupujeme stejně jako k nastavení zkratových ochran. Pro průmyslové rozvody s točivými stroji vn se doporučuje, aby jmenovitý proud uzlového odporu byl alespoň desetinásobek rozběhové primární citlivosti ochran, což prakticky odpovídá požadavku chránit 90 % vinutí strojů spojených do hvězdy. Primární nastavení pro motory musí odpovídat podmínce

$$I_r \geq \frac{I_{RNjm}}{10 p_p \cdot k_c} \quad (\text{A}) \quad (7.34)$$

kde I_{RNjm} jmenovitý proud odporníku
 k_c koeficient citlivosti = 1,5
 p_p převod měřících transformátorů proudu

$$I_{P-MAX} = \sqrt{I_{RNjm}^2 + I_{V-celkem}^2} \quad (\text{A}) \quad (7.35)$$

kde I_{Pmax} poruchový proud
 $I_{c celkem}$ celkový kapacitní proud



7.3 Přípustné trvání proudů zemních poruch v sítích s připojenými motory.

Z grafu vyplývá, že při I_{pmax} 100 A nesmí doba odepnutí zemní poruchy delší než 1 sec, jinak může dojít k neopravitelné poruše (vypálena díra ve statoru).

Příklad výpočtu:

celkový kapacitní proud sítě $I_{C_{\text{celk}}} = 200\text{A}$ použity odporník typ $I_{RN} = 200\text{A}$ $R_N = 20\Omega$.

$$I_{C-VN001} = I_{C-\text{kabelu}} \cdot l_{\text{kabelu}} = 3,19 \cdot 2,5 = 7,97(\text{A}) \quad R_{VN001} = r \cdot l = 0,149 \cdot 2,5 = 0,372(\Omega)$$

$$I_{\text{pmin}} = \frac{0,7 \cdot U_f}{R_N + R_{C-VN001}} = \frac{0,7 \cdot 5780}{20 + 0,372} = 198,6 \text{ (A)}$$

Pro nastavení ochrany musí platit tyto dvě podmínky:

$$I_r \leq \frac{I_{\text{pmin}}}{p_p \cdot k_C} = \frac{198,6}{100 \cdot 1,2} = 1,65 \text{ (A)}$$

$$I_r \geq \frac{k_b \cdot I_{C-\text{vlastni}}}{p_p} = \frac{1,3 \cdot 7,97}{100} = 0,1 \text{ (A)}$$

$$1,65 > I_r > 0,1 \text{ (A)}$$

$$I_{\text{n ochrany}} = 1\text{A}$$

$$\text{Nastavení ochrany: } I_r = 1,2 \quad I_{N \text{ ochrany}} = 1,2 \text{ A,} \quad t = 0,2\text{s}$$

ad b) soustava izolovaná se používá především v průmyslových rozvodech, ale jedná se i o případy, kdy jsou venkovní nebo smíšené sítě provozovány bez zhášecí tlumivky (nebo je z nějakého důvodu zhášecí tlumivka vypnuta). Podle ČSN 33 3070 je nutné použít kompenzaci při proudech nad 20 A. Velikost kapacitních proudů je dána délkou a typem kabelů (kapacitní proudy byly v minulosti udávány výrobcí kabelů a normami ČSN udávány v A/km, dnes je kapacita kabelů udávána v $\mu\text{F/km}$).

U lžilových kabelů záleží na jejich uložení (vedle sebe, nebo do trojúhelníka). Při zemním spojení nezáleží na místě poruchy. Například do místa poruchy ve fázi R tečou kapacitní proudy zdravých fází. Z tohoto předpokladu je nutné vycházet při výpočtu nastavení ochran. Je třeba vypočítat jaký I_0 můžeme předpokládat v místě poruchy a podle toho zvolit způsob měření.

Pokud bychom chtěli zvolit směrové měření musíme použít některou metodu s využitím měření $I_{\text{sin}\phi}$ a rozhodli se pro nesměrové měření - můžeme použít nadproudový článek. U izolované sítě je předpoklad, že kapacitní proudy budou malé, proto použití směrového měření může být nepřesné. V těchto případech použijeme proudového kritéria. Základem celého nastavení je výpočet toků kapacitních proudů v jednotlivých vedeních při všech poruchových stavech a určení logiky působení. U izolovaných sítí zemní spojení většinou

nevypínáme. jen signalizujeme. Návrh signalizace zemního spojení je nutné provést tak, aby bylo jasné na kterém vývodu je zemní spojení.

Velmi důležité je, jaké měřicí transformátory použijeme. Čím bude kvalitnější měření, tím bude lepší výsledek. V těchto případech je vhodné použít menší měřicí převody PTP (menší než 100/1). Pro vlastní nastavení ochrany potom platí stejný vzorec jako pro sítě nepřímo uzemněné rezistorem:

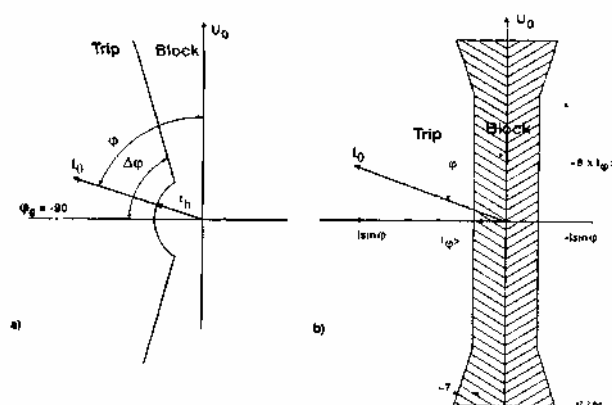
$$I_r \geq \frac{k_b \cdot I_{C\text{-vlastni}}}{p_p} \quad (\text{A})$$

$$I_r \leq \frac{I_{p\text{min}}}{p_p \cdot k_c} \quad (\text{A})$$

kde $I_{C\text{ vlastni}}$ kapacitní proud vlastního vedení
 k_b koeficient bezpečnosti = 1,3
 p_p převod měřících transformátorů proudu
 k_c koeficient citlivosti = 1,5

Směrové nastavení ochran přináší ještě jeden problém. Směrnost se dá prokázat jen umělým zemním spojením v soustavě, což u starších kabelů s papírovou izolací není zrovna to nejlepší řešení. Druhá možnost je počkat do první poruchy a potom vyhodnotit působení všech směrových zemních ochran. Ty, které reagovaly opačně, je třeba přesměrovat.

Další možný způsob směřování zemních ochran je pomocí vnuceného kapacitního proudu pomocí kapacity, která se jednou připojí před průvlekový transformátor, podruhé za průvlekový transformátor. Způsob zkoušky zemních ochran závisí na rozhodnutí provozovatele a je ho nutné konzultovat už při návrhu ochran.



a) fázový úhel měření, b) měření $I_{\sin\varphi}$

7.4 Charakteristika ochrany pro směrovou ochranu pro zemní poruchy v systémech s izolovaným uzlem.

Příklad výpočtu:

Celkový kapacitní proud sítě: $I_{KAP_{celk}} = 60A$

Převod použitého PTP: 100/1

Nastavení: $I_0 \sin\varphi$ (izolovaná soustava)

Kapacitní proud vedení VN 003: $I_{C-VN003} = I_{c \text{ kabelu}} \cdot l = 2,56 \cdot 1 = 1,56 [A]$

$I_N \text{ ochrany} = 1A$

$$I_{\Sigma 1} = I_{KAP_{celkové}} - I_{KAP-VN003} = 60 - 1,56 = 58,46 (A)$$

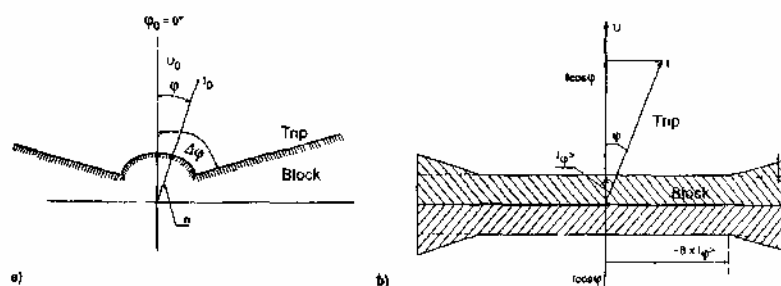
Na ochraně nastavíme:

$$I_r \leq \frac{I_{\Sigma 1}}{p_p \cdot k_c} = \frac{58,46}{1,2 \cdot 100} = 0,47 (A)$$

$$I_r \geq \frac{k_b \cdot I_{KAP-VN003}}{p_p} = \frac{1,3 \cdot 2,56}{100} = 0,033 (A)$$

nastavíme $I_r = 0,36 I_N \text{ Ochrany} = 0,36 A$ $t = 0,5s$

ad c) soustava nepřímo uzemněná pomocí zhášecí tlumivky je nejvíce používaný systém v energetice, ale v průmyslových rozvodech. Výpočet nastavení ochrany není uveden v žádné literatuře, neexistuje tzv. „zaručený způsob výpočtu“. Závisí na zkušenosti výpočtáře. Proud vypočítáme nebo pro hrubý odhad odečteme z naladění zhášecí tlumivky. Je tady opět problém minimálního kapacitního proudu, který určíme ze zapojení soustavy. Musíme počítat s tím, že wattová složka kapacitního proudu je cca 5 % celkového proudu, který teče zhášecí tlumivkou. Tento proud se zvyšuje pomocí odporu připínanému k sekundárnímu vinutí zhášecí tlumivky. Tento odpor nám sice podstatně zvýší wattovou složku poruchového proudu, ale naopak nám klesne napětí U_0 . Problém je, že směrové zemní ochrany se směřují pomocí napětí U_0 .



a) měření fázového úhlu , b) měření $I \cos\varphi$

7.5 Charakteristika ochrany pro směrové chránění pro zemní poruchy v systémech kompenzovaným uzlem.

Příklad výpočtu:

Celkový kapacitní proud sítě: $I_{KAPcelk} = 90A$

Je použita zhášecí tlumivka typ ZTC 1250, která je laditelná od 9A do 94A.

Převod použitého PTP: 100/1

Nastavení $I_0 \cos \varphi$ (soustava nepřímo uzemněná přes tlumivku) $I_0 \cos \varphi = 5\%$ z $I_{KAPcelk}$ tj 5% z $90A = 4,5 A$

$I_{n \text{ ochrany}} = 0,2A$

Na ochraně nastavíme

$$I_r \leq \frac{I_0 \cdot \cos \varphi}{p_p \cdot k_C} = \frac{4,5}{100 \cdot 1,2} = 0,037(A) \cong 18\% \cdot I_{n \text{ ochrany}}$$

$$I_r = 0,18 \cdot I_{n \text{ ochrany}}$$

$$t = 0,5(s)$$

Literatura

(1) Grym, R., Hochman, P., Machon, J. Bermann, J., Dohoň, B.: Chránění II, IRIS 2004