

# Použitelnost metody „přizemnění postižené fáze (shuntingu)“ při zemních spojeních v kompenzovaných sítích vysokého napětí

Ivan Cimbolínek, Tomáš Sýkora, Jan Švec, Zdeněk Müller – ČVUT v Praze, FEL

*Tento příspěvek v úvodu stručně porovnává známé principy provozování kompenzovaných sítí vn, v dalším se pak podrobně zabývá využitím metody přizemnění postižené fáze - **shuntingu**, kdy na základě teoretického rozboru a následného praktického měření v kompenzované síti vysokého napětí definuje oblast bezpečné aplikace této metody.*

---

## 1. ÚVODEM

Ohlédneme-li se do nedávné historie a zaměříme-li se na problematiku, která souvisí s provozováním izolovaných a kompenzovaných sítí vysokého napětí, pak vidíme významný technický pokrok zejména v oblasti eliminace zemních poruchových proudů a především lokalizace míst s jednopólovou izolační poruchou. Kromě čistě kabelových sítí vn ve velkých městech se v současné době provozují převážně sítě smíšené s neustále rostoucím podílem kabelových vedení. Kapacitní proudy rozsáhlých smíšených systémů pak dosahují nebezpečně vysokých hodnot, které ohrožují jejich bezpečný provoz. Postupem času byly nalezeny a postupně zdokonalovány metody, principy a systémy, které dokázaly více či méně eliminovat především kapacitní proudy v místě zemní poruchy.

Je potěšující, že některé starší a osvědčené metody pro kompenzaci kapacitních proudů jsou stále využívány. Připomeňme ty nejpoužívanější z nich, jejich odlišnosti, výhody a nevýhody.

- **Bauchův zhášecí transformátor**, který byl používán především v období před rokem 1939. Nicméně jej lze spatřit v provozuschopném stavu ve starších transformovnách ještě v dnešní době. Bauchův zhášecí transformátor je zapojen na hlavní sběrnice rozvodny vn a není tedy potřeba aby vinutí vn napájecího transformátoru mělo vyvedenu nulu. Proto se tento způsob kompenzace kapacitních proudů používal zejména u transformoven s převodovými transformátory 35/10 kV, kde na straně nižšího napětí 10 kV nebyl vyveden uzel hvězdy. Silové převodové transformátory a samozřejmě i Bauchův zhášecí transformátor byly standardně umístovány na krytá stanoviště do budovy transformovny. Je poučné, že již v tomto období byla stanoviště transformátorů a vypínačů s olejovou náplní vybavena záchytnou vanou proti případnému úniku transformátorového oleje, s odtokem do sběrné jímky.
- **Petersenova zhášecí cívka** a u nás s oblibou používané tlumivky řady ZTA, ZTB, ZTC z produkce dřívějšího EGV České Budějovice a současné nástupnické firmy EGE, které pracují na shodném principu. Plynulá změna indukčnosti se u těchto typů tlumivek dociluje změnou vzduchové mezery děleného jádra. Tlumivka je zapojena do uzlu hvězdy vn napájecího

transformátoru. Tlumivky této řady mají pomocná měřicí a výkonová vinutí, která umožňují jednak měřit napětí  $U_0$  mezi uzlem hvězdy vinutí vn a zemním potenciálem transformovny při připojené tlumivce a dále umožňují krátkodobá připojení stavebnicových odporníků pro zvyšování činné složky poruchového proudu a tím i následné selektivní působení zemních relé na postižených vývodech vn. Ladění tlumivek a připínání odporníku k pomocnému výkonovému vinutí tlumivky je řízeno pomocí automatik. Tlumivky lze umístit na venkovní i vnitřní stanoviště. Současně nabízená výkonová i napěťová řada tlumivek plně pokrývá požadavky distributorů na kompenzaci kapacitních proudů ve smíšených sítích vn pro dvouhodinový i nepřetržitý provoz. Limitujícím faktorem je zde pouze velikost zbytkového poruchového proudu v místě zemního spojení. Při ladění tlumivky do rezonance se sleduje nalezení lokálního maxima průběhu 1. harm.  $U_0$ .

- **Swedish neutral** je systém, který je rovněž zapojen do uzlu hvězdy vn napájecího transformátoru ale na rozdíl od předchozích principů dokáže eliminovat i činnou složku poruchového zemního proudu. Významnou předností tohoto systému je však rychlost odezvy na změnu kapacity systému vn při změnách konfigurace napájené oblasti. Zatímco v případě tlumivky ZTC se jedná o desítky sekund, popřípadě jednotek minut, dokáže systém Swedish neutral pomocí jednotlivě spínaných sekcí vinutí tlumivky a přidavných kondenzátorů, předkompenzovat a pomocí výkonového polovodičového invertoru pak dokompenzovat soustavu vn za několik málo sekund. Hlavním „nedostatkem“ systému, kromě seriózně neprokázaného zpětného vlivu na napájecí síť, je patrně jeho vysoká pořizovací cena.
- **Shunt – Shunting**, je poměrně jednoduchá metoda, kdy se snažíme vytvořit v napájecí transformovně „bočník“ k místu zemního spojení ( shunt ), přičemž oprávněně předpokládáme, že většina poruchového proudu bude procházet tímto bočníkem a místo zemního spojení tak bude proudově odlehčeno. **Při srovnání s předchozími metodami je evidentní, že metodou shuntingu nekompensujeme kapacitní proud systému vn.** Při případných aplikacích této metody v transformovných s jedním systémem přípojníc vn postačuje pro montáž zařízení jedno rezervní pole pro instalaci tří jednopólových spínacích jednotek a vhodný prostor pro umístění řídicí automatiky. Ve větších transformovných s více napájecími transformátory a více systémy přípojníc vn pak musíme vše podle potřeby zmnožit. Významným kritériem při připojení shuntu do postižené fáze pomocí automatiky, je schopnost automatiky bezpečně nalézt postiženou fázi a to i v případech, kdy se nejedná o kovové zemní spojení, ale jen o deformaci fázových napětí při poruše s velkým přechodovým odporem. Zařízení musí být vždy dimenzováno na dvoupólový zemní zkrat. Protože metoda shuntingu není při provozování kompenzovaných sítí vn na území České republiky využívána ve větším rozsahu a nejsou tedy k dispozici podrobnější údaje, popřípadě nejsou k dispozici relevantní zkušenosti s touto metodou, je další část tohoto příspěvku zaměřena na použitelnost této metody při praktických aplikacích, s cílem definovat oblast, kdy je použití této metody, z pohledu provozování systému vn, bezpečné.

## 2. ODLEHČENÍ MÍSTA ZEMNÍHO SPOJENÍ POMOCÍ SHUNTU, PŘIPOJENÉHO NA POSTIŽENOU FÁZI V NAPÁJECÍ TRANSFORMOVNĚ 110 KV/VN

Při vzniku jednopólové izolační poruchy v kompenzované soustavě vysokého napětí, teče místem poruchy pouze zbytkový proud, jehož velikost je dána především stupněm vyladění zhášecí tlumivky před poruchou a v menší míře svodovým proudem izolace vedení. V praktických aplikacích se předpokládá, že maximální velikost poruchového proudu místem zemního spojení nepřevyšuje hodnotu  $0,1 I_c$  (10 % kapacitního proudu sítě vn). Ve smíšených sítích vysokého napětí dosahují kapacitní proudy nezdědky hodnot i přes 300 A a z toho důvodu musíme často provozovat systém rozdělený do dvou či více oblastí, napájených dvěma či více transformátory, a to i v případě, že by nám výkonově postačoval jediný stroj. Velikost poruchového proudu, byť by byla pouze 10 %  $I_c$ , nám způsobuje problémy především u stožárových distribučních trafostanic, kde jsou společná uzemnění vn a nn. Při zemním spojení, ke kterému dojde na této trafostanici, protéká poruchový proud společným uzemněním trafostanice a způsobuje zvýšené krokové a dotykové napětí. Dotykové napětí se přenáší i na nulovací vodič PEN, který je spojen s potenciálem distribuční trafostanice. Obdobný problém pocítujeme i při poruchách na úsekových odpojovačích v linkách venkovních vedení vn. Pokud se nám tedy podaří „přesměrovat“ větší či menší část poruchového proudu  $I_p$  do nově připojeného shuntu v napájecí transformovně, pak bychom měli mít vyhráno.

### 2.1. Poměry po vzniku zemního spojení bez připojeného shuntu

Po vzniku zemního spojení je v místě poruchy kompenzován plný kapacitní proud sítě  $I_c$  induktivním proudem tlumivky  $I_l$ . Při optimálním vyladění je poruchový proud  $I_p$  minimální a je dán vztahem

$$I_p = \sqrt{(I_l - I_c)^2 + I_w^2} \quad (1)$$

kde  $I_w$  je nekompensovaná složka činného svodového proudu vedení.

Je třeba mít na paměti, že kapacita vedení je rozprostřený parametr celého systému vn a velikost kapacitního proudu  $I_c$  není proto ovlivněna konkrétním místem izolační poruchy. Velikost kapacitního proudu  $I_{ca}$  jedné fáze je omezena kapacitou fáze proti zemi, resp. její reaktancí  $X_{ca}$  a fázovým napětím  $U_f$ , které tok proudu vyvolává. Celkový kapacitní proud při jednofázové izolační poruše je dán vztahem

$$I_c = 3I_{ca} \quad (2)$$

kapacitní reaktanci systému lze pak vyjádřit vztahem

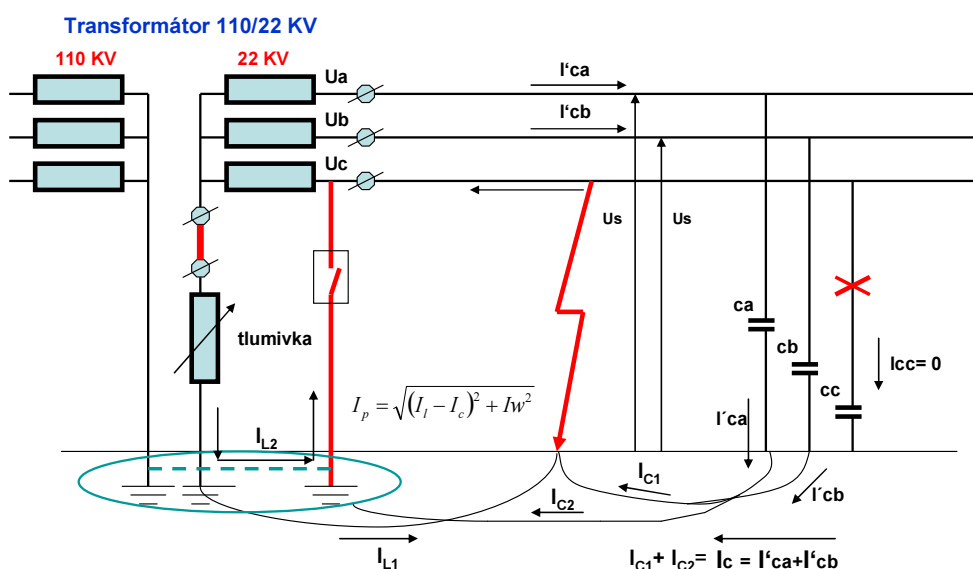
$$X_c = \frac{3U_s}{\sqrt{3}I_c} \quad (3)$$

Znalost velikosti  $X_c$  nám pomůže přesněji odvodit vliv přechodového odporu poruchy na celkovou velikost poruchového proudu.

## 2.2. Poměry po vzniku zemního spojení s následně připojeným shuntem

Po připojení paralelního shuntu může dojít k symetrickému či asymetrickému přerozdělení kapacitního proudu sítě  $I_c$  mezi místo poruchy a shunt, vždy ale musí dojít k asymetrickému rozdělení kompenzačního proudu tlumivky  $I_l$ . Je to způsobeno tím, že kapacitní proud systému vn je rozprostřeným parametrem a vyvěrá z každého „metru“ délky vedení, zatímco proud tlumivky vyvěrá z „bodového zdroje“, kterým je konkrétní napájecí transformovna 110 kV/vn, resp. kompenzační tlumivka a společná zemnicí soustava této transformovny.

Připojení shuntu v napájecí transformovně 110/22 KV



Obrázek 1: Toky proudů při zemním spojení s připojeným shuntem

Rozdělení kapacitního proudu soustavy  $I_c$  mezi místo zemního spojení a přidaný shunt je dáno vztahem

$$I_{c1} = I_c \frac{R_{ztr} + R_{sh}}{\sqrt{(R_{ztr} + R_{sh} + R_{zds} + R_p)^2 + X_v^2}} \quad (4)$$

Kde:  $I_{c1}$  je kapacitní proud místem zemního spojení  
 $R_{ztr}$  je odpor zemnicí soustavy transformovny 110 kV/vn  
 $R_{sh}$  je odpor obvodu shuntu

$R_{zdtS}$  je odpor společného uzemnění distribuční trafostanice  
 $R_p$  je přechodový odpor poruchy  
 $X_v$  je reaktance vedení vn od místa ZS k transformovně 110 kV/vn  
 $I'_{ca}$  jsou zvýšené kapacitní proudy fází při zemním spojení

Pokud dojde k zemnímu spojení dále od transformovny, je třeba při kontrole rozdělení toků kapacitních proudů, místem zemního spojení a shuntem, počítat i s reaktancí vedení  $X_v$  mezi místem zemního spojení a napájecí transformovnou 110 kV/vn.

Analogicky lze odvodit velikost proudu  $I_{c2}$  tekoucím shuntem, nicméně musí platit

$$I_{c2} = I_c - I_{c1} \quad (5)$$

Pokud tedy nastane stav kdy bude platit, že

$$R_{ztr} + R_{sh} = \sqrt{(R_{zdtS} + R_p)^2 + X_v^2} \quad (6)$$

pak bude rozdělení celkového kapacitního proudu systému  $I_c$  symetrické a bude platit, že

$$I_{c1} = I_{c2} \quad (7)$$

Rozdělení kompenzačního proudu tlumivky  $I_l$  mezi místo zemního spojení a přidaný shunt je dáno vztahem

$$I_{l1} = I_l \frac{R_{sh}}{\sqrt{(R_{ztr} + R_{sh} + R_{zdtS} + R_p)^2 + X_v^2}} \quad (8)$$

a stejně analogicky jako ve vztahu (5) platí, že

$$I_{l2} = I_l - I_{l1} \quad (9)$$

V předchozích úvahách jsme předpokládali, že před začátkem zemního spojení byla síť vn vykompenzována a dále jsme pro zjednodušení zanedbávali činnou složku svodového proudu sítě  $I_w$ . Rozdělení tohoto svodového proudu mezi místo zemního spojení a shunt je stejné, jako je rozdělení kapacitního proudu sítě  $I_c$  podle vztahu (4) a (5).

### 3. PORUCHOVÝ PROUD $I_p$ V MÍSTĚ PORUCHY

Pokud platilo, že síť vn byla před začátkem zemního spojení a před připojením shuntu vykompenzována a tedy platí, že  $I_l = I_c$ , místem poruchy tekli pouze zanedbatelný svodový proud  $I_w$ . Po připojení shuntu se podle očekávání odvede

z místa poruchy většina induktivní, činné i kapacitní složky poruchového proudu  $I_p$ . Při porovnání vztahů (4) a (5) je ale evidentní, že vždy dochází k nerovnoměrnému odlehčení místa poruchy a k většímu přerozdělení induktivního proudu do obvodu shuntu a tím k následnému vzrůstu poruchového proudu  $I_p$  v intencích se vztahem (1).

$$I_l - I_c < I_{l1} - I_{c1} \quad \text{a za určitých podmínek bude } I_p < I_{p1} \quad (10)$$

kde:  $I_p$  je poruchový proud místem poruchy bez připojeného shuntu  
 $I_{p1}$  je poruchový proud místem poruchy s připojeným shuntem.

### 3.1. Metody vedoucí ke snížení hodnoty poruchového proudu

Je zřejmé, že k asymetrickému přerozdělení kapacitních a induktivních proudů dochází v důsledku nestejných přechodových odporů zemních soustav napájecí transformovny a distribučních trafostanic. Dominantním kritériem je ale poměr odporu v obvodu shuntu a přechodového odporu uzemnění transformovny 110 kV/vn, podle kterého se větví proud tlumivky  $I_l$  na proud  $I_{l1}$ , tekoucím do místa poruchy a proud  $I_{l2}$ , tekoucím do obvodu shuntu.

#### 3.1.1. Korekce proudů $I_{l1}$ , $I_{l2}$ a současně proudů $I_{c1}$ , $I_{c2}$ přidavným rezistorem

Je teoreticky proveditelná vložení rezistoru do obvodu shuntu. Volba velikosti rezistoru, a to i v případě, že se jedná o izolační poruchu typu „kovové zemní spojení“, je určitým kompromisem, protože řešení je dáno vztahem (4) a současně vztahem (8). Navíc neznáme ani místo zemního spojení a tedy ani hodnoty přechodových zemních odporů distribučních trafostanic, které se mohou výrazně odlišovat. Pokud však budeme pro zjednodušení předpokládat, že přechodové odpory uzemnění s připojenými nulovacími vodiči PEN se u běžných distribučních stanic pohybují na hodnotách blízkých  $2 \Omega$  a přechodové odpory zemních soustav rozveden na hodnotách blízkých  $0,4 \Omega$ , lze na základě těchto předpokladů odvodit i požadovanou velikost rezistoru vloženého do obvodu shuntu. Přechodové odpory v obvodu shuntu budeme předpokládat ve výši  $0,1 \Omega$ . Pro symetrické rozdělení kapacitních proudů mezi shunt a místo zemního spojení bude při zanedbání  $X_v$  platit

$$R_{psh} + R_{sh} + R_{ztr} = R_{zdis} \quad \text{a tedy} \quad R_{psh} = 2 - 0,4 - 0,1 = 1,5 \Omega$$

Kde:  $R_{psh}$  je přidavný odpor v obvodu shuntu

Pro symetrické rozdělení induktivních proudů by muselo analogicky platit

$$R_{psh} + R_{sh} = R_{ztr} + R_{zdis} \quad \text{a tedy} \quad R_{psh} = 0,4 + 2 - 0,1 = 2,3 \Omega$$

#### Příklad:

Dojde-li ke kovovému zemnímu spojení v těsné blízkosti napájecí transformovny ( $X_v = 0$ ,  $R_p = 0$ ) a bude-li celkový kapacitní proud  $I_c$  v systému vn 300 A, získáme po dosazení do předchozích vztahů (4) až (10) a použitím obvyklých hodnot z předchozího odstavce s kompromisní volbou  $R_{psh} = 2 \Omega$  tyto výsledky.

$$I_{c1} = 166,7 \text{ A}, \quad I_{l1} = 140 \text{ A}, \quad I_{l1} - I_{c1} = -26,7 \text{ A} \quad (\text{nedokompenzováno})$$

Pak bude celkový poruchový proud s použitím vztahu ( 1) a za předpokladu, že  $I_w = 0,1 I_c$

$$I_p = \sqrt{(I_l - I_c)^2 + I_w^2} = 31,48 \text{ A} \quad (\text{za } I_w \text{ dosazeno } 0,1 I_{c1})$$

Volba  $R_{psh}$  je kritická a to zejména s ohledem na hodnotu  $X_v$ , která souvisí se vzdáleností poruchy od transformovny. Pokusme se porovnat předchozí výpočet se stavem kdy k poruše dojde za jinak stejných podmínek cca 10 km od transformovny.

$$X_v = 10 \text{ km} \cdot 0,35 \text{ } \Omega/\text{km} = 3,5 \text{ } \Omega$$

$$I_{c1} = 131,57 \text{ A}, \quad I_{l1} = 110,53 \text{ A}. \quad I_{l1} - I_{c1} = -21,04 \text{ A} \quad (\text{nedekompenzováno})$$

$$I_p = \sqrt{(I_l - I_c)^2 + I_w^2} = 24,82 \text{ A}$$

Abychom získali přehled o tom jak se bude chovat systém při zemním spojení a při změně velikosti  $R_{psh}$  a  $R_{ztr}$ , vložili jsme požadované hodnoty spolu s uvedenými matematickými vzorci do tabulek EXCEL. Především nás zajímala skutečná velikost poruchového proudu  $I_p$  v místě zemního spojení, resp. jeho závislost na postupných změnách  $R_{psh}$  a  $R_{ztr}$

Ve výpočtech je uvažováno stejně jako v předchozím odstavci, že k poruše došlo na stožárové DTS ve vzdálenosti 10 km od napájecí transformovny a do vzorců je proto zapracována podélná reaktance vrchního vedení  $X_v = 0,35 \text{ } \Omega/\text{km}$ .

Poruchový proud v místě poruchy po připojení zkratového bočnicku ( shuntu )									
Rztr	Rpsh	Ic	I <sub>l</sub>	I <sub>c1</sub>	I <sub>c2</sub>	I <sub>l1</sub>	I <sub>l2</sub>	I <sub>p</sub>	U <sub>d</sub>
0,2	0	300,00	300,00	21,49	278,51	7,16	292,84	14,49	28,97
	1	300,00	300,00	81,07	218,93	68,60	231,40	14,88	29,75
	2	300,00	300,00	124,45	175,55	113,63	186,37	16,49	32,98
	3	300,00	300,00	155,87	144,13	146,42	153,58	18,23	36,45
	4	300,00	300,00	178,99	121,01	170,67	129,33	19,74	39,48
	5	300,00	300,00	196,40	103,60	188,99	111,01	20,99	41,98
	10	300,00	300,00	241,63	58,37	236,94	63,06	24,61	49,23
	15	300,00	300,00	260,05	39,95	256,65	43,35	26,23	52,45
	20	300,00	300,00	269,79	30,21	267,13	32,87	27,11	54,22
	30	300,00	300,00	279,79	20,21	277,94	22,06	28,04	56,08
	40	300,00	300,00	284,84	15,16	283,43	16,57	28,52	57,04
	50	300,00	300,00	287,88	12,12	286,74	13,26	28,81	57,62
	100	300,00	300,00	293,96	6,04	293,38	6,62	29,40	58,80

Tabulka 1: Poruchový proud  $I_p$  při odporu uzemnění transformovny  $R_{ztr} = 0,2 \text{ } \Omega$

Poruchový proud v místě poruchy po připojení zkratového bočnicku ( shuntu )									
Rztr	Rpsh	Ic	I <sub>tl</sub>	Ic1	Ic2	I <sub>tl1</sub>	I <sub>tl2</sub>	I <sub>p</sub>	U <sub>d</sub>
0,4	0	300,00	300,00	34,87	265,13	6,97	293,03	28,12	56,23
	1	300,00	300,00	90,91	209,09	66,67	233,33	25,89	51,78
	2	300,00	300,00	131,56	168,44	110,51	189,49	24,82	49,64
	3	300,00	300,00	161,06	138,94	142,66	157,34	24,46	48,92
	4	300,00	300,00	182,87	117,13	166,61	133,39	24,47	48,93
	5	300,00	300,00	199,36	100,64	184,86	115,14	24,65	49,30
	10	300,00	300,00	242,67	57,33	233,42	66,58	25,97	51,94
	15	300,00	300,00	260,55	39,45	253,83	46,17	26,91	53,82
	20	300,00	300,00	270,09	29,91	264,82	35,18	27,52	55,04
	30	300,00	300,00	279,92	20,08	276,25	23,75	28,23	56,46
	40	300,00	300,00	284,92	15,08	282,10	17,90	28,63	57,26
	50	300,00	300,00	287,93	12,07	285,65	14,35	28,88	57,77
100	300,00	300,00	293,98	6,02	292,80	7,20	29,42	58,84	

Tabulka 2: Poruchový proud  $I_p$  při odporu uzemnění transformovny  $R_{ztr} = 0,4 \Omega$

Poruchový proud v místě poruchy po připojení zkratového bočnicku ( shuntu )									
Rztr	Rpsh	Ic	I <sub>tl</sub>	Ic1	Ic2	I <sub>tl1</sub>	I <sub>tl2</sub>	I <sub>p</sub>	U <sub>d</sub>
0,6	0	300,00	300,00	47,51	252,49	6,79	293,21	41,00	81,99
	1	300,00	300,00	100,13	199,87	64,79	235,21	36,73	73,47
	2	300,00	300,00	138,22	161,78	107,51	192,49	33,68	67,37
	3	300,00	300,00	165,95	134,05	139,04	160,96	31,62	63,23
	4	300,00	300,00	186,53	113,47	162,72	137,28	30,25	60,50
	5	300,00	300,00	202,17	97,83	180,89	119,11	29,35	58,71
	10	300,00	300,00	243,67	56,33	230,01	69,99	27,94	55,87
	15	300,00	300,00	261,05	38,95	251,07	48,93	27,95	55,89
	20	300,00	300,00	270,37	29,63	262,54	37,46	28,15	56,30
	30	300,00	300,00	280,05	19,95	274,58	25,42	28,54	57,07
	40	300,00	300,00	284,99	15,01	280,79	19,21	28,81	57,61
	50	300,00	300,00	287,98	12,02	284,57	15,43	29,00	58,00
100	300,00	300,00	293,99	6,01	292,24	7,76	29,45	58,90	

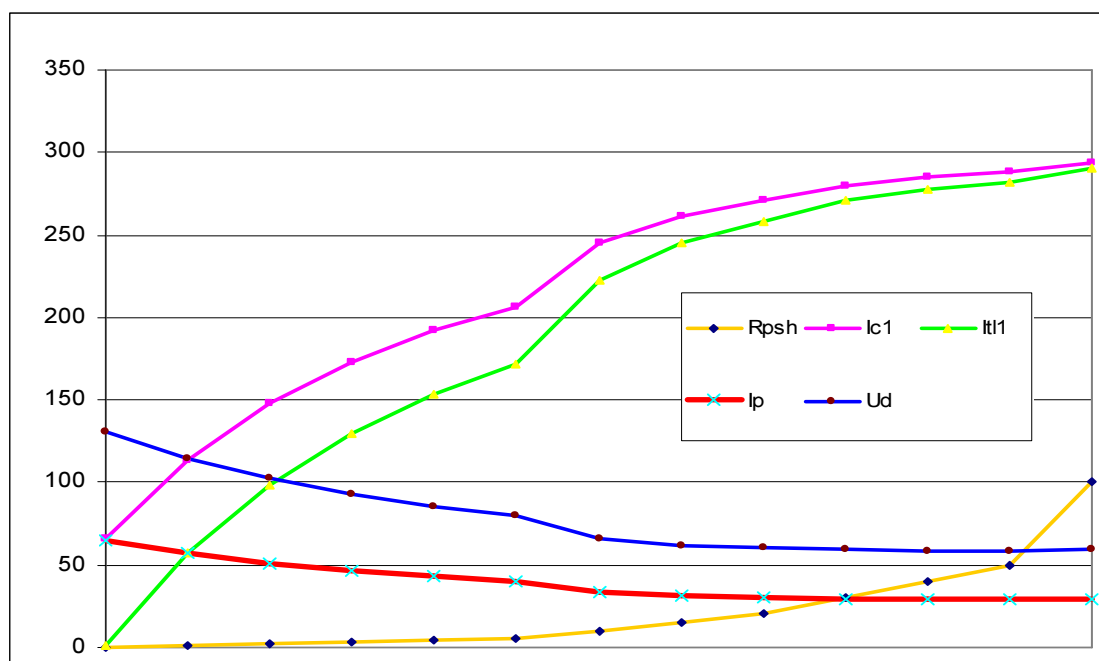
Tabulka 3: Poruchový proud  $I_p$  při odporu uzemnění transformovny  $R_{ztr} = 0,6 \Omega$



Poruchový proud v místě poruchy po připojení zkratového bočnicku ( shuntu )									
Rztr	Rpsh	Ic	I <sub>tl</sub>	I <sub>c1</sub>	I <sub>c2</sub>	I <sub>tl1</sub>	I <sub>tl2</sub>	I <sub>p</sub>	U <sub>d</sub>
1	0	300,00	300,00	70,58	229,42	6,42	293,58	64,55	129,10
	1	300,00	300,00	116,87	183,13	61,22	238,78	56,86	113,73
	2	300,00	300,00	150,35	149,65	101,85	198,15	50,78	101,56
	3	300,00	300,00	174,90	125,10	132,24	167,76	46,10	92,21
	4	300,00	300,00	193,28	106,72	155,39	144,61	42,54	85,09
	5	300,00	300,00	207,39	92,61	173,39	126,61	39,83	79,65
	10	300,00	300,00	245,58	54,42	223,46	76,54	33,05	66,11
	15	300,00	300,00	262,00	38,00	245,72	54,28	30,84	61,68
	20	300,00	300,00	270,93	29,07	258,09	41,91	29,98	59,96
	30	300,00	300,00	280,31	19,69	271,30	28,70	29,44	58,89
	40	300,00	300,00	285,14	14,86	278,20	21,80	29,35	58,69
	50	300,00	300,00	288,08	11,92	282,44	17,56	29,35	58,71
	100	300,00	300,00	294,01	5,99	291,10	8,90	29,54	59,09

Tabulka 4: Poruchový proud  $I_p$  při odporu uzemnění transformovny  $R_{ztr} = 1 \Omega$

Porovnáním předchozích tabulek 1 až 4 , které jsou postupně sestaveny pro celkové přechodové zemní odpory napájecí transformovny v řadě  $0,2 - 0,4 - 0,6 - 1 \Omega$ , bylo zjištěno, že dominantní vliv na růst poruchového proudu  $I_{psk}$  v místě zemního spojení má právě přechodový odpor zemnicí soustavy napájecí transformovny. Pokud chceme tedy aplikovat bez dalších dodatečných opatření metodu shuntingu, musíme mít na paměti, že při kovových zemních spojeních a poruchách s nízkým přechodovým odporem **dojde vždy k růstu poruchového proudu v místě poruchy**. Vzájemné ovlivňování poruchového proudu  $I_p$  za předpokladu, že celkový přechodový odpor zemnicí soustavy transformovny  $R_{ztr} = 1 \Omega$ , rostoucím přídavným odporem  $R_{psh}$  v obvodu shuntu, ukazuje následující graf 1.



Graf 1: Závislost  $I_p$ ,  $U_d$ ,  $I_{c1}$ ,  $I_{tl1}$  v místě poruchy na změnu  $R_{psh}$  podle tabulky 4

### 3.1.2. Korekce proudů $I_{I1}$ , $I_{I2}$ a současně proudů $I_{c1}$ , $I_{c2}$ překompenzováním

Tato možnost spadá bez dalších opatření, s ohledem na předchozí matematické vztahy, spíše do teoretické roviny. Pokud bychom chtěli do místa poruchy dodat chybějící kompenzační proud  $I_l$ , znamenalo by to mít k dispozici další kompenzační proud o velikosti dané vztahem

$$I_l = I_{I1} \frac{\sqrt{(R_{ztr} + R_{sh} + R_{zds} + R_p)^2 + X_v^2}}{R_{psh}} \quad (11)$$

Nebude-li přidán do obvodu shuntu přídatný rezistor a budeme dále předpokládat tak jako v odstavci 3.1.1., že přechodový odpor uzemnění transformovny 110 kV bude  $R_{ztr} = 0,4 \Omega$ , pak budeme potřebovat podle vztahu (11) další kompenzační proud o velikosti

$$I_l = 1200 \text{ A}$$

Po přidání rezistoru do obvodu shuntu se však situace výrazně mění. Přidáním rezistoru o velikosti  $R_{psh} = 2 \Omega$  a výpočtem podle předchozího vztahu dostaneme tento výsledek

$$I_l = 57,14 \text{ A}$$

Výsledek ukazuje, že kombinací přídatného rezistoru do obvodu shuntu a následným překompenzováním systému lze problém uspokojivě řešit. Místem zemního spojení by pak tekla poruchový proud o velikosti

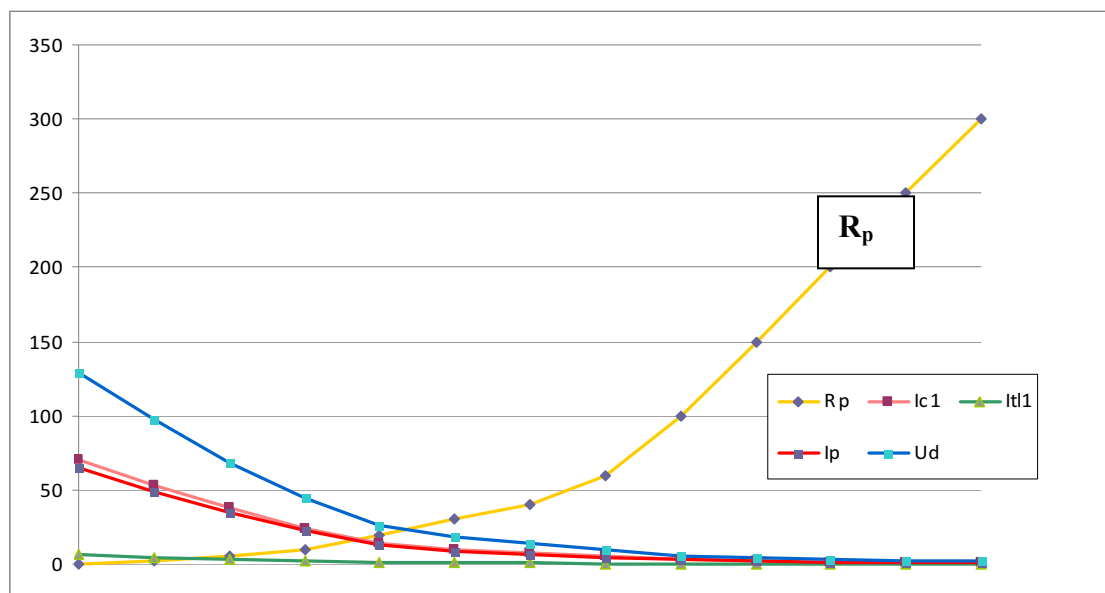
$$I_p = 13 \text{ A} \quad , \text{ což by bylo méně než } 0,05 I_c.$$

## 4. VLIV PŘECHODOVÉHO ODPORU PORUCHY

V případech kdy nedojde k ideálnímu kovovému zemnímu spojení a v místě poruchy je tedy přídatný přechodový odpor poruchy  $R_p \neq 0$ , dochází při jeho růstu k poklesu poruchového proudu  $I_p$ . Z tabulky a grafu je vidět, že téměř celý poruchový proud je tvořen nevykompenzovaným proudem kapacitním.

Poruchový proud v místě poruchy po připojení zkratového shuntu s $R_p \neq 0$ , $R_{psh}=0$									
Rztr	$R_p$	$I_{c=II}$	$X_c$	$I_{c1}$	$I_{c2}$	$I_{tl1}$	$I_{tl2}$	$I_p$	$U_d$
1	0	300,00	133,00	70,58	229,42	6,42	126,58	<b>64,55</b>	<b>129,10</b>
	2	300,00	133,00	53,35	246,65	4,85	128,15	<b>48,79</b>	<b>97,59</b>
	5	300,00	133,00	37,40	262,60	3,40	129,60	<b>34,20</b>	<b>68,41</b>
	10	300,00	133,00	24,34	275,66	2,21	130,79	<b>22,26</b>	<b>44,52</b>
	20	300,00	133,00	14,12	285,88	1,28	131,72	<b>12,92</b>	<b>25,84</b>
	30	300,00	133,00	9,91	290,09	0,90	132,10	<b>9,07</b>	<b>18,14</b>
	40	300,00	133,00	7,63	292,37	0,69	132,31	<b>6,98</b>	<b>13,96</b>
	60	300,00	133,00	5,22	294,78	0,47	132,53	<b>4,78</b>	<b>9,55</b>
	100	300,00	133,00	3,20	296,80	0,29	132,71	<b>2,93</b>	<b>5,85</b>
	150	300,00	133,00	2,15	297,85	0,20	132,80	<b>1,97</b>	<b>3,94</b>
	200	300,00	133,00	1,62	298,38	0,15	132,85	<b>1,49</b>	<b>2,97</b>
	250	300,00	133,00	1,30	298,70	0,12	132,88	<b>1,19</b>	<b>2,38</b>
	300	300,00	133,00	1,09	298,91	0,10	132,90	<b>1,00</b>	<b>1,99</b>

Tabulka 5: Poruchový proud  $I_p$  při přechodovém odporu poruchy  $R_p \neq 0$



Graf 2: Závislost  $I_p$ ,  $U_d$ ,  $I_{c1}$ ,  $I_{tl1}$  v místě poruchy na změnu  $R_p$  podle tabulky 5

## 5. MĚŘENÍ V KOMPENZOVANÉ SÍTI 22 kV

Na základě předchozího teoretického rozboru bylo provedeno praktické měření v systému 22 kV. Po dohodě s distributorem (ČEZ Distribuce a.s.) byla jednopólová izolační porucha v kompenzované síti vysokého napětí 22 kV situována na stožárovou trafostanici 1 x 400 kVA Roudnice - vodárna, kde byla jedna fáze připojena na neživou část (příhradovou konstrukci) této TS. Cílem měření bylo prokázat negativní vliv přizemnění postižené fáze v transformovně 110/22 kV Roudnice na růst poruchového proudu v místě poruchy.

Tato negativní vlastnost metody přizemnění postižené fáze byla nazvána podle autora tohoto článku „CI paradoxem“. Negativní vlastnost metody se projeví vždy při poruchách s nízkým přechodovým odporem poruchy, jak je zřejmé podle průběhů poruchového proudu na obrázku 2. Ohroženy jsou zejména stožárové trafostanice a úsekové odpojovače venkovních vedení. Naopak při zvětšení přechodového odporu poruchy, jak je zřejmé z obrázku 3, k negativním jevům nedochází a metoda snižuje velikost poruchového proudu v místě poruchy.

**12:51:40 – zapnuto do ZS**

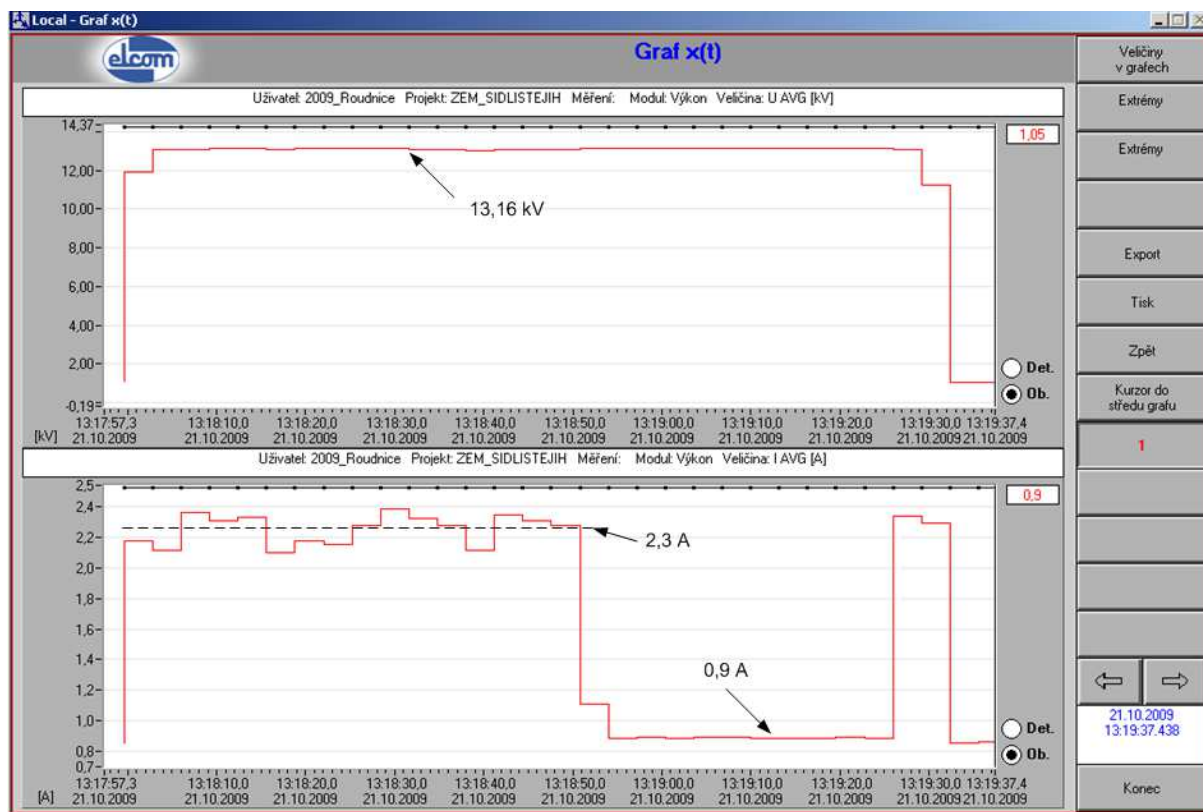
**13:06:30 – zapnutý shunt (kovové zemní spojení)**

**13:09:42 – vypnutí ZS se shuntem**



**Obrázek 2:** Přizemnění postižené fáze při „kovovém“ zemním spojení

13:17:57 – zapnuté ZS s odporem poruchy 40 W  
 13:18:50 – zapnutý shunt  
 13:19:30 – vypnutí ZS



Obrázek 3: Přizemnění postižené fáze při odporu poruchy 40 Ω

## 6. ZÁVĚREM

Teoretickým rozborem i vlastním měřením v kompenzované síti 22 kV při zemním spojení bylo prokázáno, že uvedená metoda shuntingu není účinná tam, kde dochází ke kovovým zemním spojení při současném nízkém přechodovém odporu uzemnění postižené části zařízení v síti 22 kV. Ohroženy jsou zejména stožárové distribuční trafostanice, úsekové odpojovače ve vedeních 22 kV a další části s nízkým přechodovým odporem uzemnění.

Je evidentní, že se zvyšujícím se přechodovým odporem zemnicích soustav napájecích transformoven 110 kV/vn dochází k významnému růstu poruchového proudu v místě poruchy. V těchto případech dochází při připojení shuntu ke zhoršení stavu ve srovnání s kompenzovanou sítí bez přídavného shuntu.

Naopak příznivý vliv shuntu lze pozorovat při nekovových zemních spojení při přetržených vodičích vn a jejich dotyku se zemí, kdy půda v okolí poruchy vykazuje velkou rezistivitu. S rostoucím odporem poruchy významně klesá velikost

poruchového proudu. Z tabulek 1 - 4 lze odvodit, že při odporu poruchy nad cca 50  $\Omega$  poteče místem poruchy pouze zanedbatelný proud.

## 7. LITERATURA

- [1] Poznámka k metodě přizemňování zemních spojení v sítích vysokého napětí. Ladislav Pospíchal, Jaromír Dvořák, Miloš Kaláb, Elektroenergetika č. 2/2007
- [2] Ošetření místa zemního spojení a lokalizace poruchy v síti 22 kV systémem přizemňování fáze. Petr Starý, Ivan Černý, Energie s.r.o., CIRED 2008
- [3] ČSN 33 2000-5-54