

Provozování distribučních soustav

**Sítě vysokého napětí s kompenzací
kapacitních proudů**

—
Ivan Cimbolinec

Sítě vysokého napětí s kompenzací kapacitních proudů

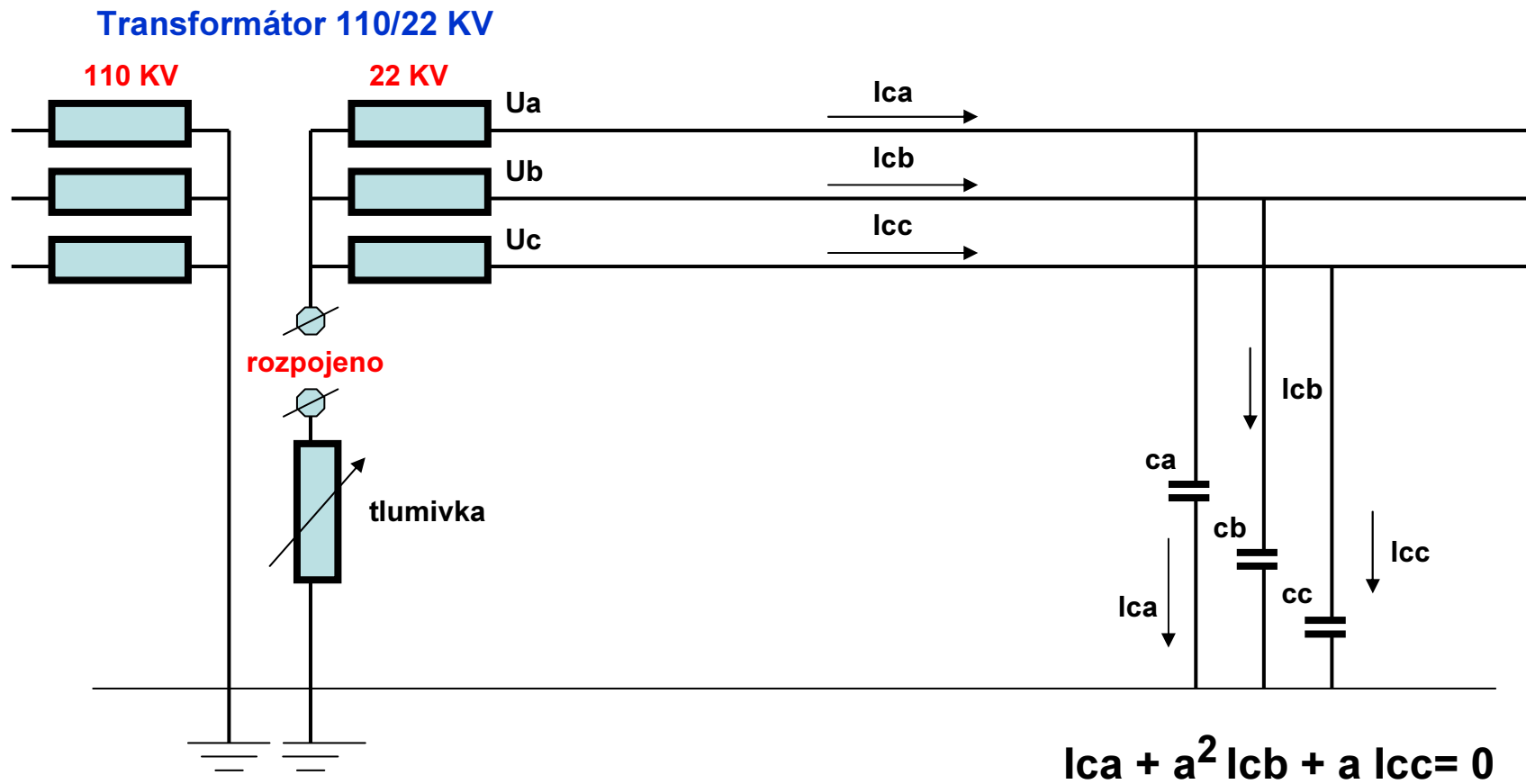
Úvodem:

Distribuční sítě vysokého napětí **10, 22 a 35 KV** se na území České republiky provozují v souladu s platnými technickými normami, zejména pak s normami **ČSN 33 2000-4-41, 33 2000-4-442, 33 3201, 33 3070** a dalšími, jako systém, který se standardně označuje zkratkou **IT**, resp. **IT(r)**. V případě IT není toto označení jednoznačné a pokud označíme systém jako **IT**, resp. **IT(r)**, znamená to, že můžeme sítě vysokého napětí provozovat těmito způsoby:

- **Sítě izolované (IT)**, kde celková velikost kapacitních proudů obvykle nepřesahuje hodnotu **10 A**. Uzel vinutí vn napájecího transformátoru je proti zemi izolován. (obrázek 1)
- **Sítě kompenzované (IT)**, kde se ke kompenzaci kapacitních proudů používá laditelná tlumivka, která je zapojená mezi uzel vinutí vn napájecího transformátoru a zem. **Pokud kapacitní proudy dosahují hodnoty větší než 15 A, je nutné tyto proudy vždy kompenzovat.** (obrázek 8)
- **Sítě odporníkové (ITr)**, kde místo tlumivky je mezi uzel napájecího transformátoru a zem vřazen odporník. Odporník nekompenzuje kapacitní proudy systému, pouze omezuje celkovou velikost poruchových zemních proudů na přijatelnou mez. **(Odporníkové sítě nejsou předmětem této prezentace)**

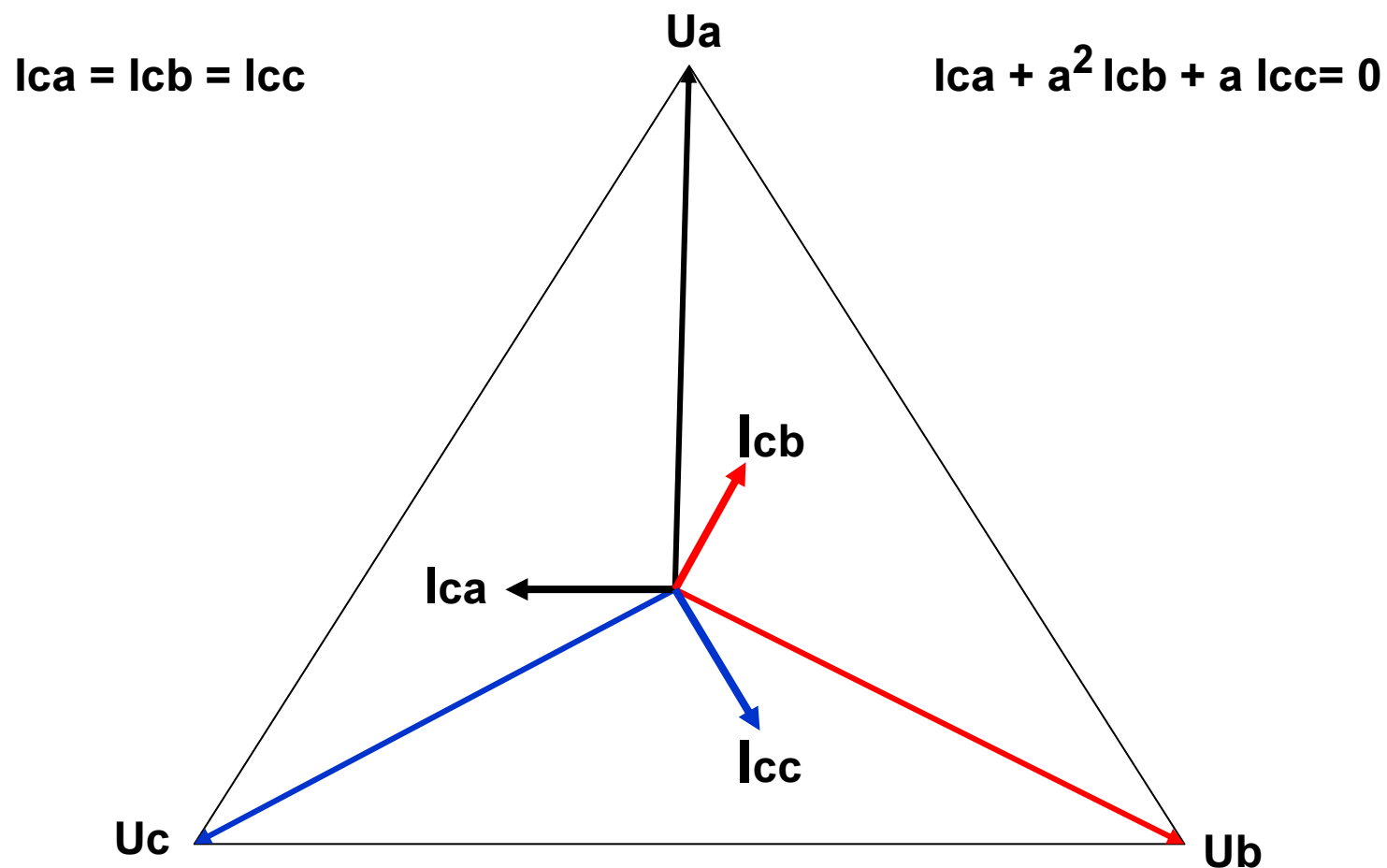
Sítě vysokého napětí s kompenzací kapacitních proudů

A) Síť malého rozsahu bez kompenzace kapacitních proudů



Obrázek 1: Symetrická síť vn bez izolační poruchy

Sítě vysokého napětí s kompenzací kapacitních proudů



Obrázek 2: Fázorový diagram U , I_c v symetrické síti vn

Sítě vysokého napětí s kompenzací kapacitních proudů

Zemní spojení:

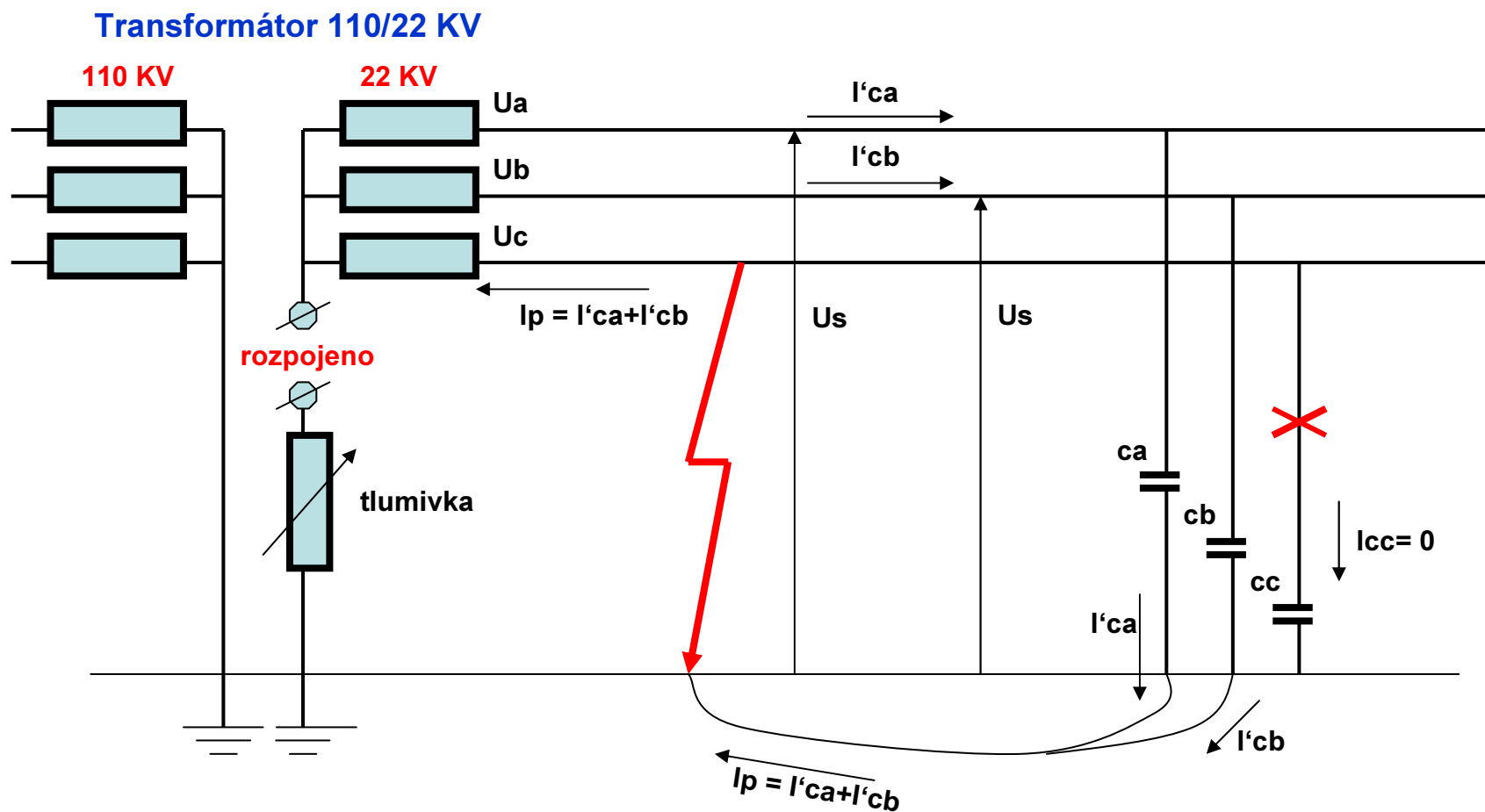
Dojde-li v soustavě s izolovaným uzlem transformátoru k poruše izolace na jedné z fází systému vysokého napětí a tím k vodivému spojení této fáze se zemí, může být celý systém i nadále za určitých podmínek provozován. Zatímco sdružené napětí systému se nemění, dochází k deformaci hvězdy fázových napětí, přičemž mezi dvěma zbylými zdravými fázemi a zemí je nyní napětí sdružené. Toto zvýšené napětí vyvolává i zvýšené toky kapacitních proudů přes fázové kapacity těchto fází. Výsledný kapacitní proud se pak podle obrázku 3 vrací místem poruchy a postiženou fází zpět do transformátoru.

Jeho velikost je dána vektorovým součtem kapacitních proudů I'_{ca} a I'_{cb} .

Průchod kapacitních proudů místem poruchy může z titulu požáru způsobit značné škody na zemědělských a lesních porostech a pokud se v blízkosti poruchy nacházejí lidé nebo zvířata, může s ohledem na zvýšené dotykové a krokové napětí dojít také k úrazu elektrickým proudem.

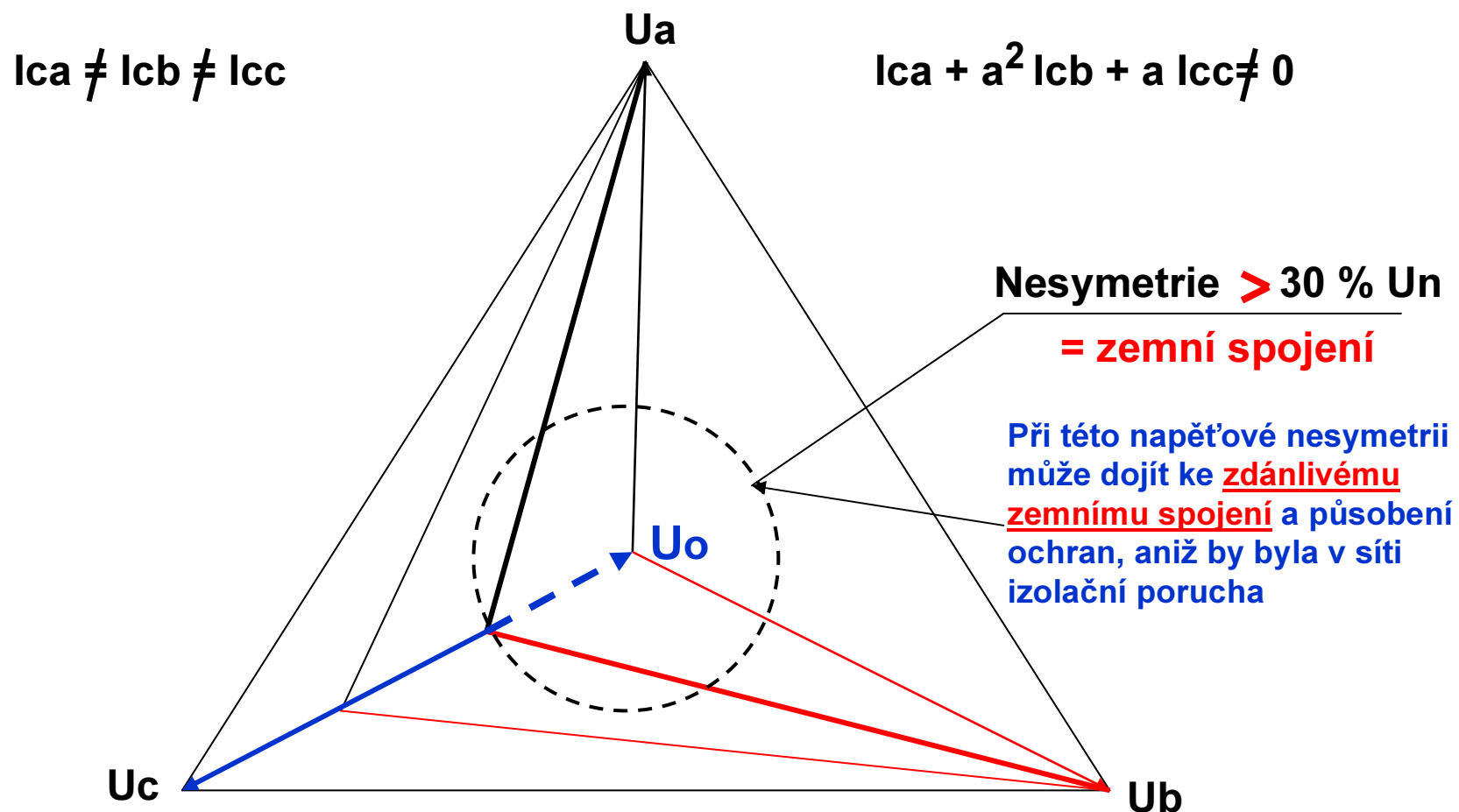
Sítě vysokého napětí s kompenzací kapacitních proudů

A) Síť malého rozsahu bez kompenzace kapacitních proudů



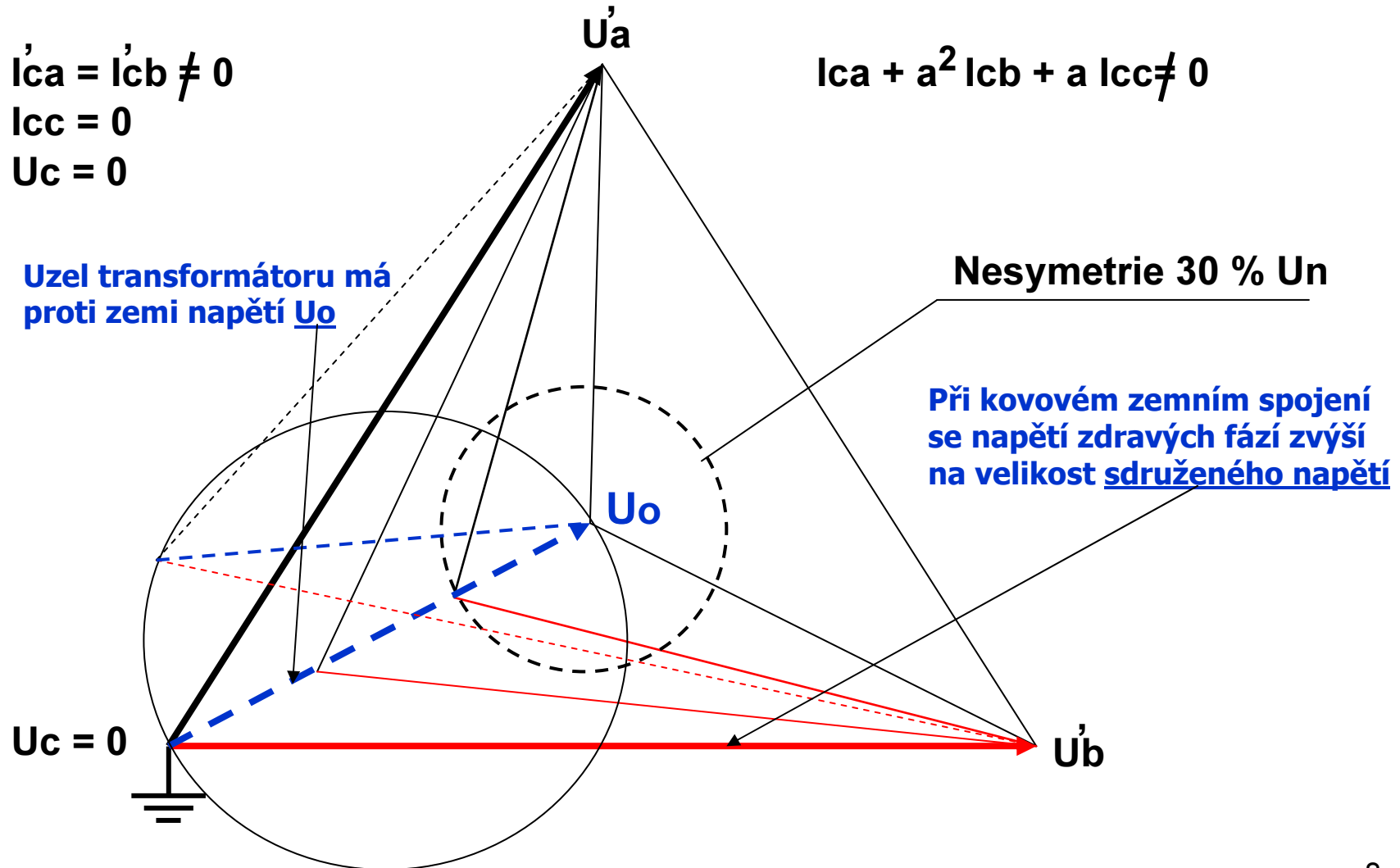
Obrázek 3: Zemní spojení ve fázi „c“ a toky kapacitních proudů

Sítě vysokého napětí s kompenzací kapacitních proudů



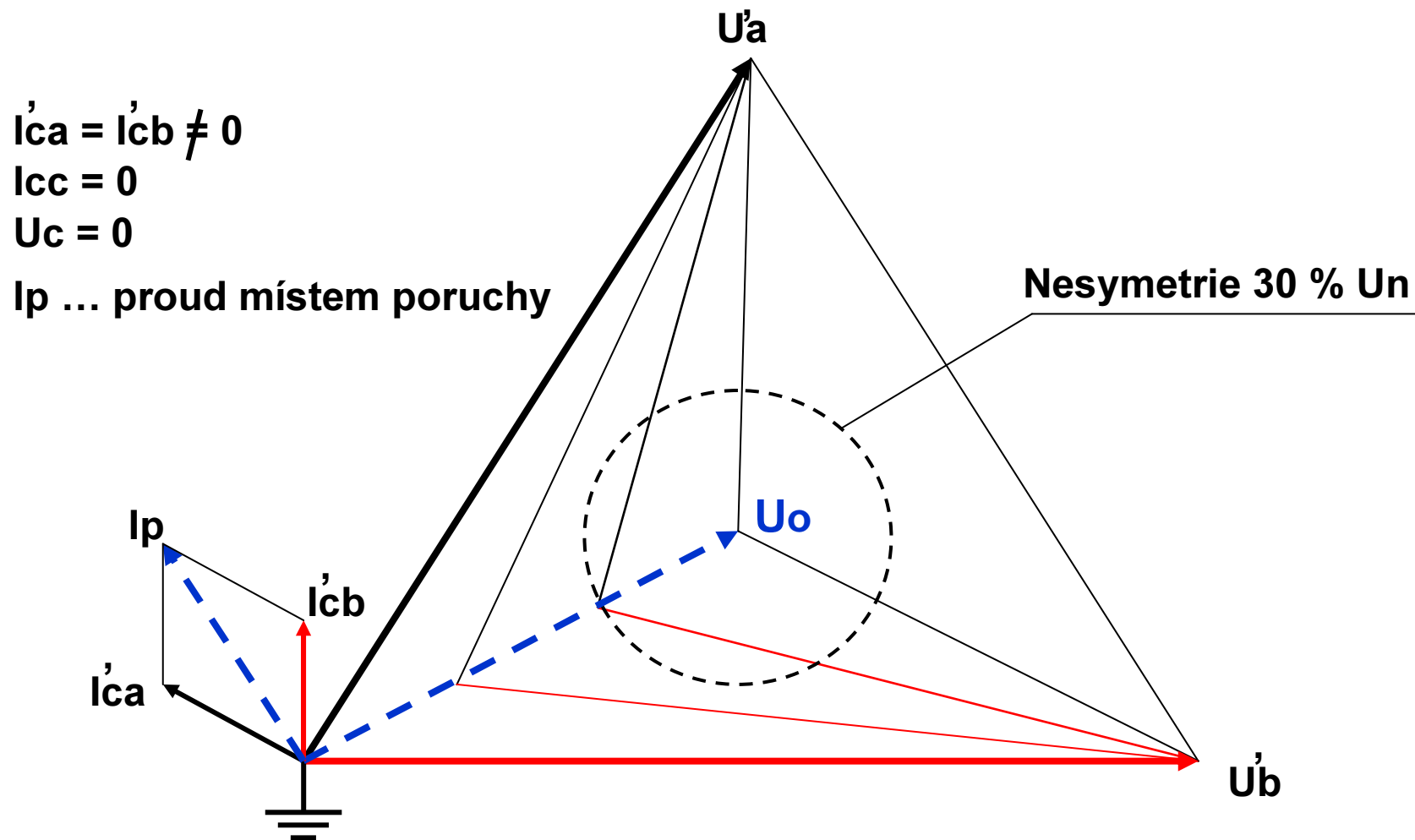
Obrázek 4: Fázorový diagram \mathbf{U} v nesymetrické síti vn

Sítě vysokého napětí s kompenzací kapacitních proudů



Obrázek 5: Fázorový diagram U , při „kovovém“ zemním spojení

Sítě vysokého napětí s kompenzací kapacitních proudů



Obrázek 6: Fázorový diagram U , $I'c$ při „kovovém“ zemním spojení

Sítě vysokého napětí s kompenzací kapacitních proudů

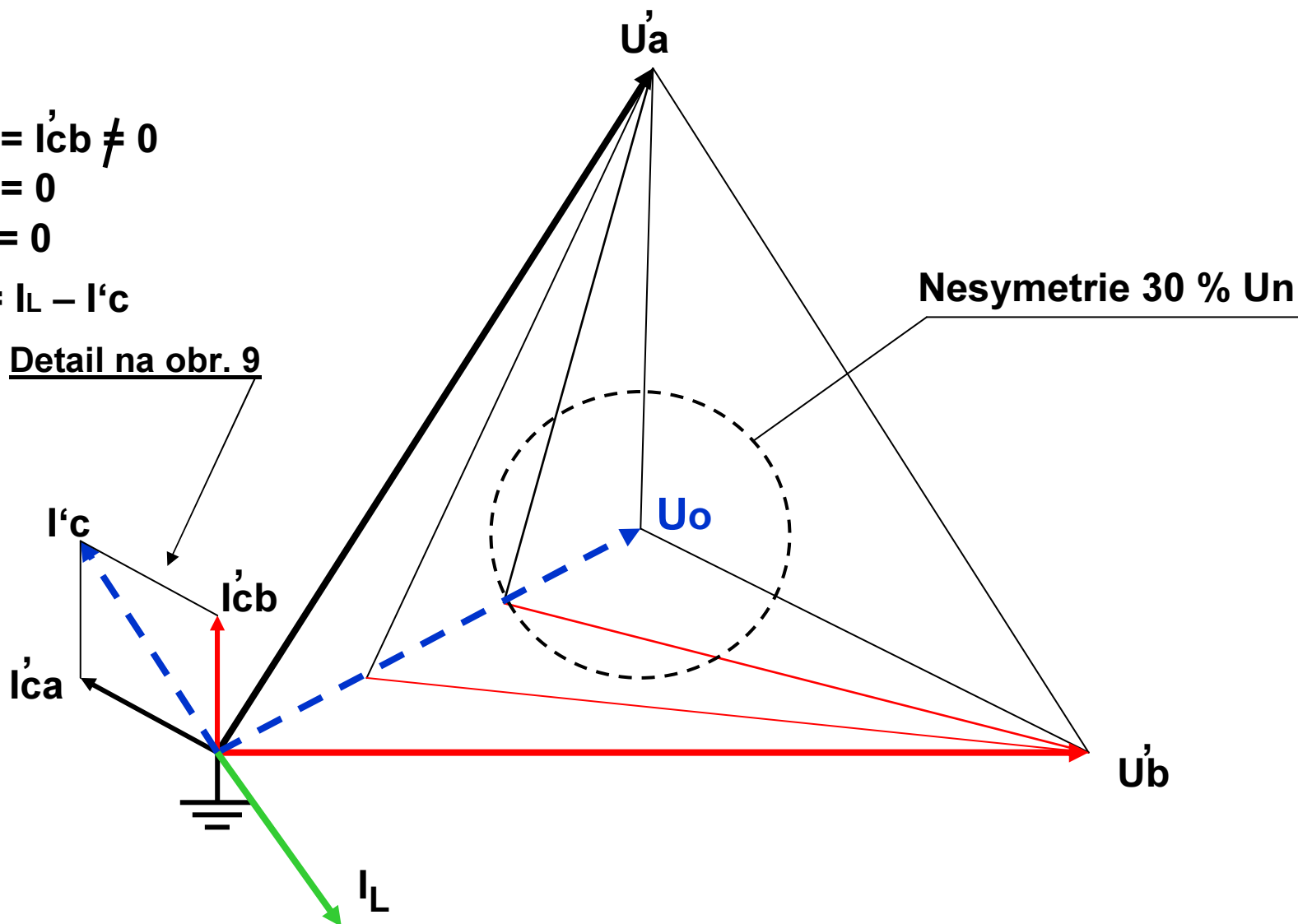
$$I'_{ca} = I'_{cb} \neq 0$$

$$I_{cc} = 0$$

$$U_c = 0$$

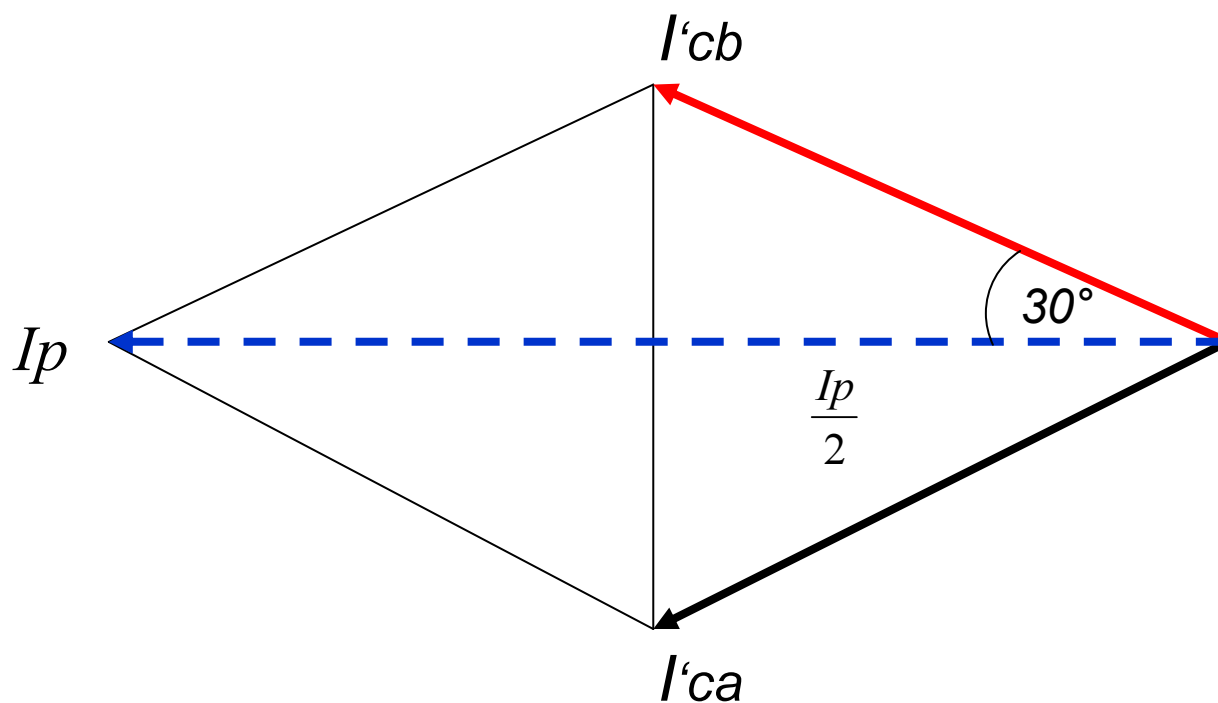
$$I_p = I_L - I'_{c}$$

Detail na obr. 9



Obrázek 8: Fázorový diagram U , I a kompenzace proudu I'_{c} zemního spojení

Sítě vysokého napětí s kompenzací kapacitních proudů



$$I_p = \sqrt{3} \cdot I'_c = \sqrt{3} \cdot \sqrt{3} \cdot I_c = 3I_c$$

Obrázek 9: Odvození velikosti poruchového proudu I_p

Sítě vysokého napětí s kompenzací kapacitních proudů

Před poruchou...

$$I_c = \frac{U_f}{X_c} = \frac{U_f}{\frac{1}{\omega \cdot C}} = U_f \cdot \omega \cdot C \quad \text{kde} \quad C = C_k \cdot l \quad [F, F / km, km]$$

Při poruše...

$$I'_c = \sqrt{3} \cdot U_f \cdot \omega \cdot C = \sqrt{3} \cdot I_c$$

$$\frac{I_p}{2} = I'_c \cdot \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I'_c \Rightarrow I_p = \sqrt{3} \cdot I'_c = \sqrt{3} \cdot \sqrt{3} \cdot I_c = 3 I_c$$

Kde: I_pporuchový proud místem zemního spojení

I'_czvýšený kapacitní proud, vyvolaný zvýšeným napětím U'

Sítě vysokého napětí s kompenzací kapacitních proudů

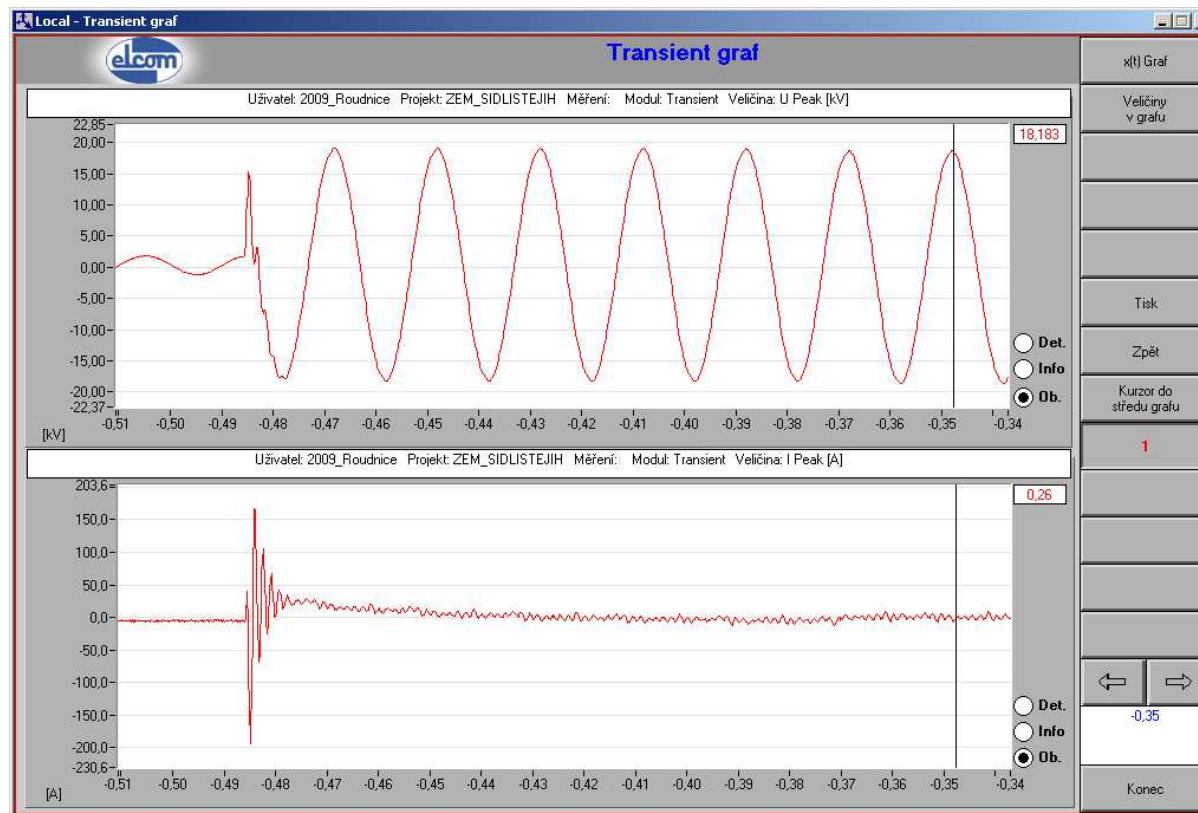


Zhášecí tlumivka – typ ZTC

Sítě vysokého napětí s kompenzací kapacitních proudů

Průběh U_0 a I_0 ve 12:51 – zapnutí do zemního spojení
(měřeno v transformovně 110/22 kV Roudnice nad Labem)

Přestože je soustava vykompenzována, nelze přehlédnout velký poruchový proud v okamžiku vzniku ZS



Sítě vysokého napětí s kompenzací kapacitních proudů



Průnik proudu zemního spojení mezi ocel. výztuží stožáru a konstrukcí

Sítě vysokého napětí s kompenzací kapacitních proudů



Zemní spojení – pohled infراكamerou

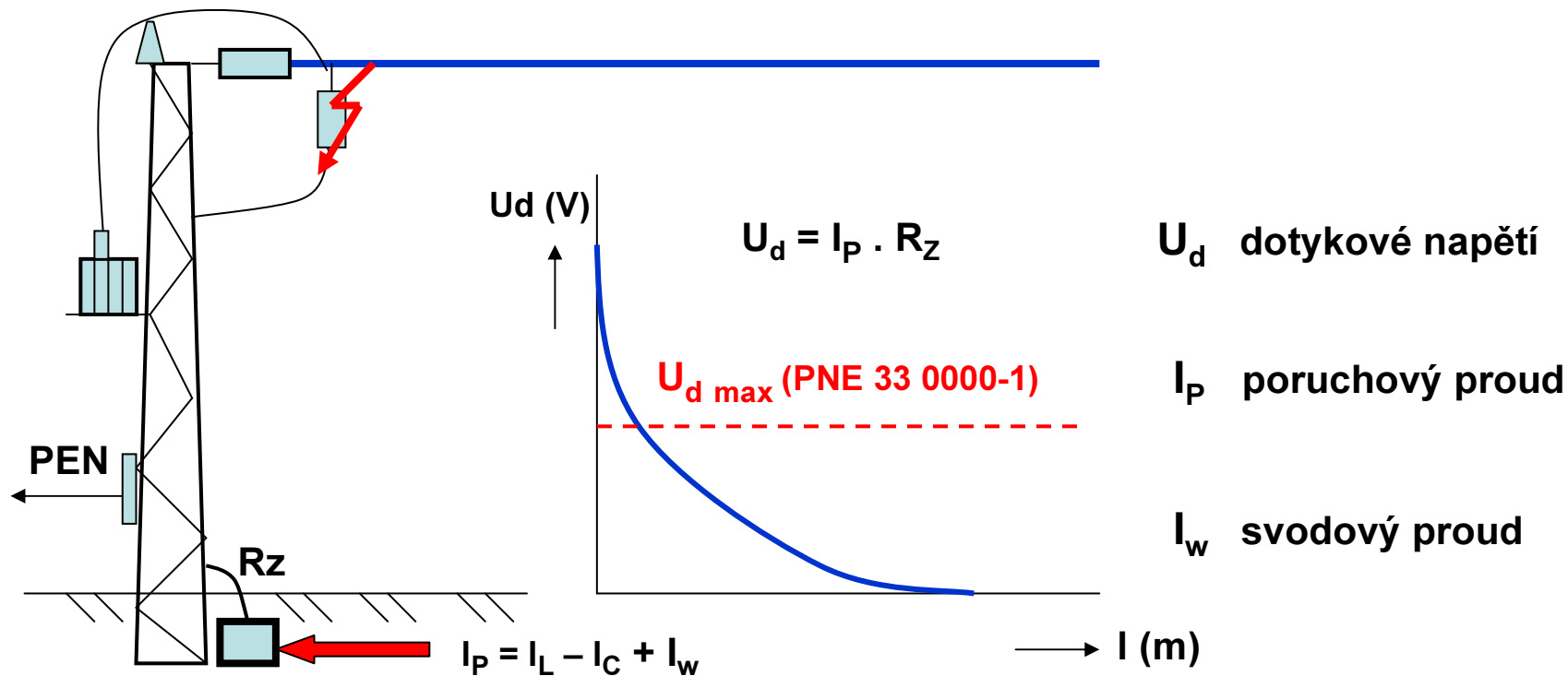
Sítě vysokého napětí s kompenzací kapacitních proudů

Negativa kompenzovaných sítí:

Současné sítě vn se v České republice provozují většinou jako smíšené a pokud tedy máme na napájecí transformovnu připojeny sítě vn, kde jsou sítě tvořeny vrchním vedením a vedením kabelovým, **roste významně i celková hodnota kapacitních proudů**, které pak musíme kompenzovat. V některých případech **dosahují kapacitní proudy hodnoty přes 350 A**, což přináší problémy i při přesném vyladění tlumivky. Musíme vždy zajistit, aby kompenzace kapacitních proudů a tedy naladění tlumivky, bylo co nejpřesnější. **To je možné pouze s vyloučením lidského faktoru za použití kvalitní automatiky ladění.** V ČR se standardně využívá automatiky ladění řady AI, kterou dodává výrobce tlumivek spolu s automatikou pro připínání rezistoru k pomocnému vinutí tlumivky. Lze použít i jiných automatik, které pracují na shodném principu (Eberle). Přes použití automatiky ladění **je nutné reálně počítat s tím, že 10 % zemního poruchového proudu, který prochází místem „zemního spojení“, nebude z důvodu nepřesnosti naladění tlumivky kompenzováno.** Zemní poruchový proud rovněž obsahuje činnou složku svodového proudu I_w izolace vedení, který není tlumivkou kompenzován.

Sítě vysokého napětí s kompenzací kapacitních proudů

Zemní poruchový proud způsobuje při průchodu odporem poruchy svými tepelnými účinky zapalování travních a lesních porostů podél vedení, zejména v suchých letních obdobích, a dále způsobuje vzrůst dotykového a krokového napětí na podpěrných bodech s poruchou. Kritická je situace v případě, že místem poruch je distribuční trafostanice se společným uzemněním vn a nn.



Obrázek 10: Zemní spojení na stožárové trafostanici

Sítě vysokého napětí s kompenzací kapacitních proudů

Druh zařízení: 1. Elektrické stanice		
Doba trvání s	$t \geq 5$	$t < 5$
<p>a) Rozvodná zařízení dodavatele elektřiny, se kterými mohou přijít do styku laici a pracovníci seznámení včetně distribučních transformoven vn/nn se společným uzemněním vn a nn</p> <p style="text-align: right;">Dovolené dotykové napětí UTP V 75 Krokové napětí* V -</p>		<p>viz obrázek 1, 2 a příloha C Dodatku 1</p>
<p>b) Zařízení elektrických stanic vn, vvn a zvn v prostorách vnitřních i venkovních mimo distribuční transformovny vn/nn</p> <p style="text-align: right;">Dovolené dotykové napětí UTP V 150 Krokové napětí* V -</p>		<p>dvojnásobek UTp podle Dodatku1**</p>

Sítě vysokého napětí s kompenzací kapacitních proudů

KAPACITNÍ PROUDY 3 FÁZOVÉ SÍTĚ TVOŘENÉ JEDNOŽILOVÝMI KABELY S IZOLACÍ XLPE

UN = 10 kV

Průřez (mm²)	70	95	120	150	185	240	300
I_z (A/km)	1,53	1,71	1,89	2,04	2,22	2,49	2,70

UN = 22 kV

Průřez (mm²)	70	95	120	150	185	240	300
I_z (A/km)	2,13	2,34	2,55	2,76	2,97	3,30	3,57

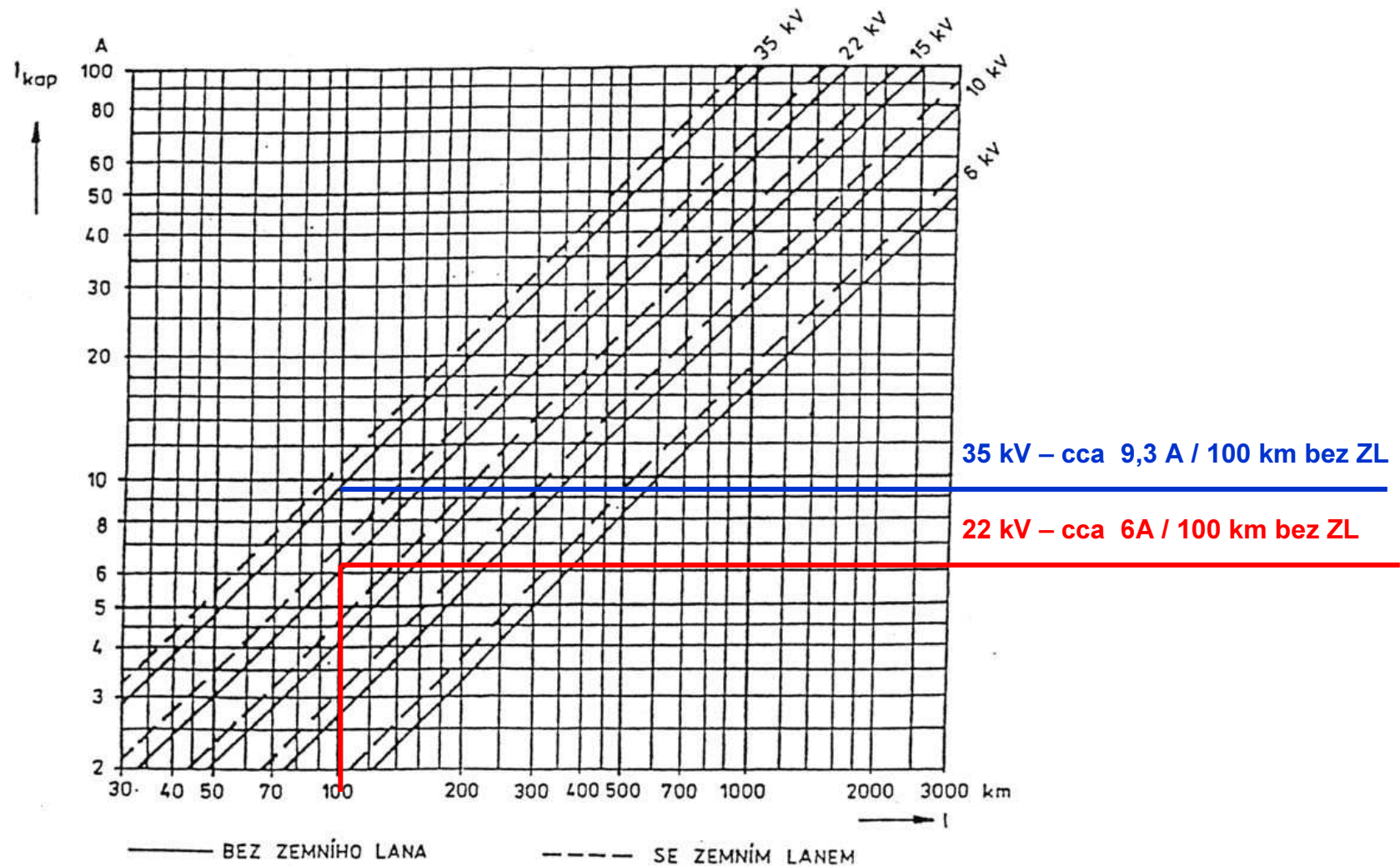
UN = 35 kV

Průřez (mm²)	70	95	120	150	185	240	300
I_z (A/km)	2,46	2,70	2,91	3,12	3,36	3,72	3,99

Sítě vysokého napětí s kompenzací kapacitních proudů

KAPACITNÍ PROUDY 3 FÁZOVÉ SÍTĚ TVOŘENÉ KLASICKÝMI TROJŽILOVÝMI KABELY TYPU ANKTOYPV							
UN = 10 kV							
Průřez (mm²)	70	95	120	150	185	240	300
I_z (A/km)	1,9	2,1	2,4	2,55	2,70	2,90	-
UN = 22 kV							
Průřez (mm²)	70	95	120	150	185	240	300
I_z (A/km)	2,3	3,3	3,6	3,9	4,3	4,6	-
UN = 35 kV							
Průřez (mm²)	70	95	120	150	185	240	300
I_z (A/km)	3,8	4,2	4,6	5,0	5,3	5,9	-

Sítě vysokého napětí s kompenzací kapacitních proudů



Obrázek 11: Kapacitní proudy vrchních vedení vn

Sítě vysokého napětí s kompenzací kapacitních proudů

Maximální doby odpojení (s)								
sít'	50 V < U _o ≤ 120 V		120V < U _o ≤ 230 V		230 V < U _o ≤ 400 V		U _o > 400 V	
	AC	DC	AC	DC	AC	DC	AC	DC
TN	0,8		0,4	5	0,2	0,4	0,1	0,1
TT	0,3		0,2	0,4	0,07	0,2	0,04	0,1
Distribuční sítě TN - C			5		5			

Tabulka 1: Maximální doby odpojení při poruše

Sítě vysokého napětí s kompenzací kapacitních proudů

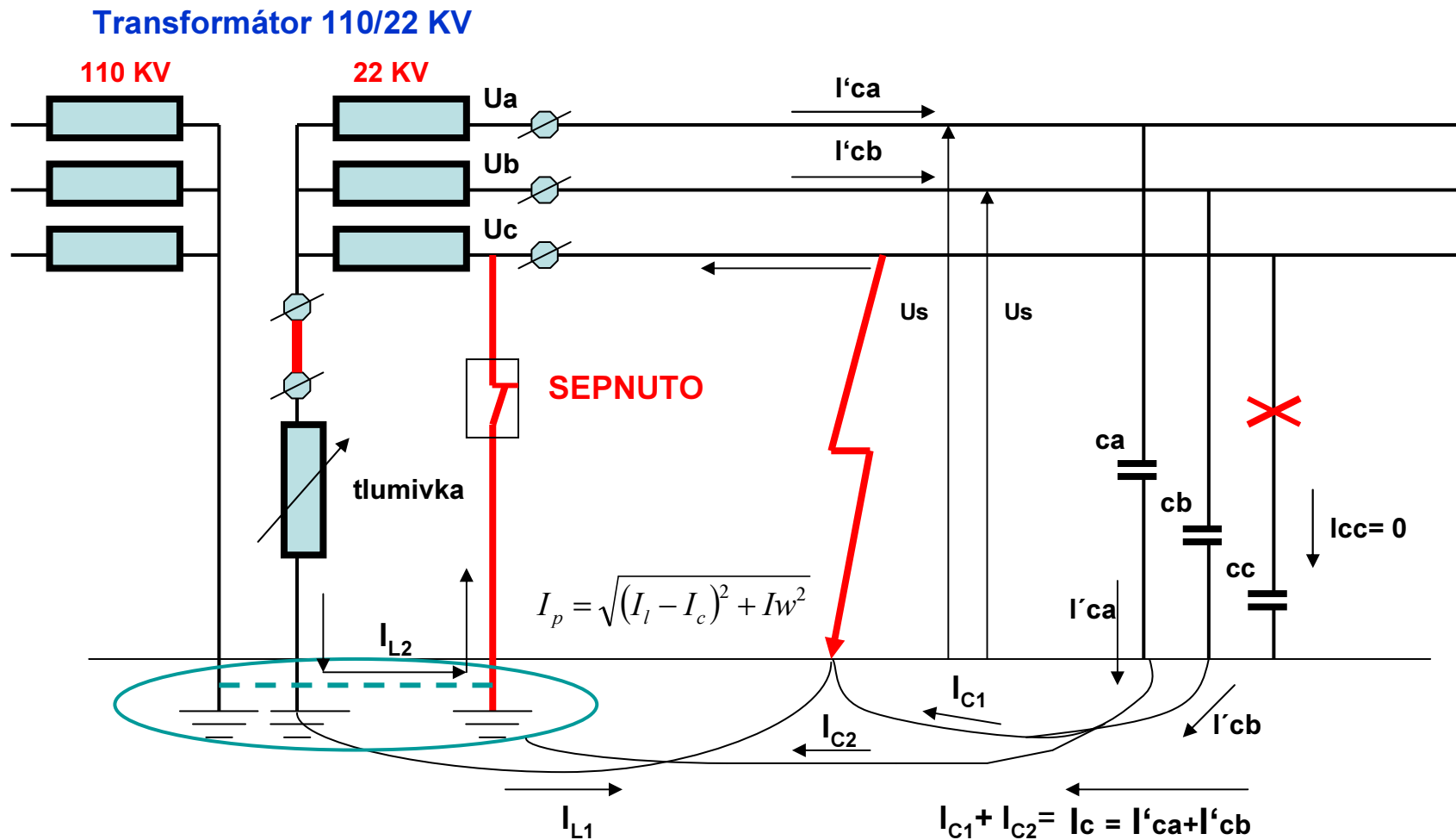
Omezení negativních vlivů zemního poruchového proudu

Negativní vlivy, které jsou způsobeny průchodem zemního poruchového proudu místem zemního spojení, lze snížit těmito používanými způsoby:

1. Rozdělením společného uzemnění distribuční trafostanice na část vn a část nn. Důležité je, aby takto rozdělená uzemnění byla od sebe vzdálena **minimálně 20 m**. Uzel transformátoru a vodič PEN, vycházející z trafostanice, jsou spojeny s uzemněním **nn**, vše ostatní (svodiče přepětí vn, kostra trafostanice a kostra distribučního transformátoru) je spojeno s uzemněním **vn**. Uzemnění vn je obvykle provedeno formou ekvipotenciálních kruhů nebo prahů. Povolená hodnota Odporu uzemnění vn je **do 15 Ohm**.
2. Převedením části poruchového proudu do nově vytvořeného místa zemního spojení v napájecí transformovně 110 kV/vn. Tento způsob je v praxi nazýván „**shuntováním**“.
3. Eliminací činné (wattové) složky poruchového proudu systémem „**Swedish neutral**“.

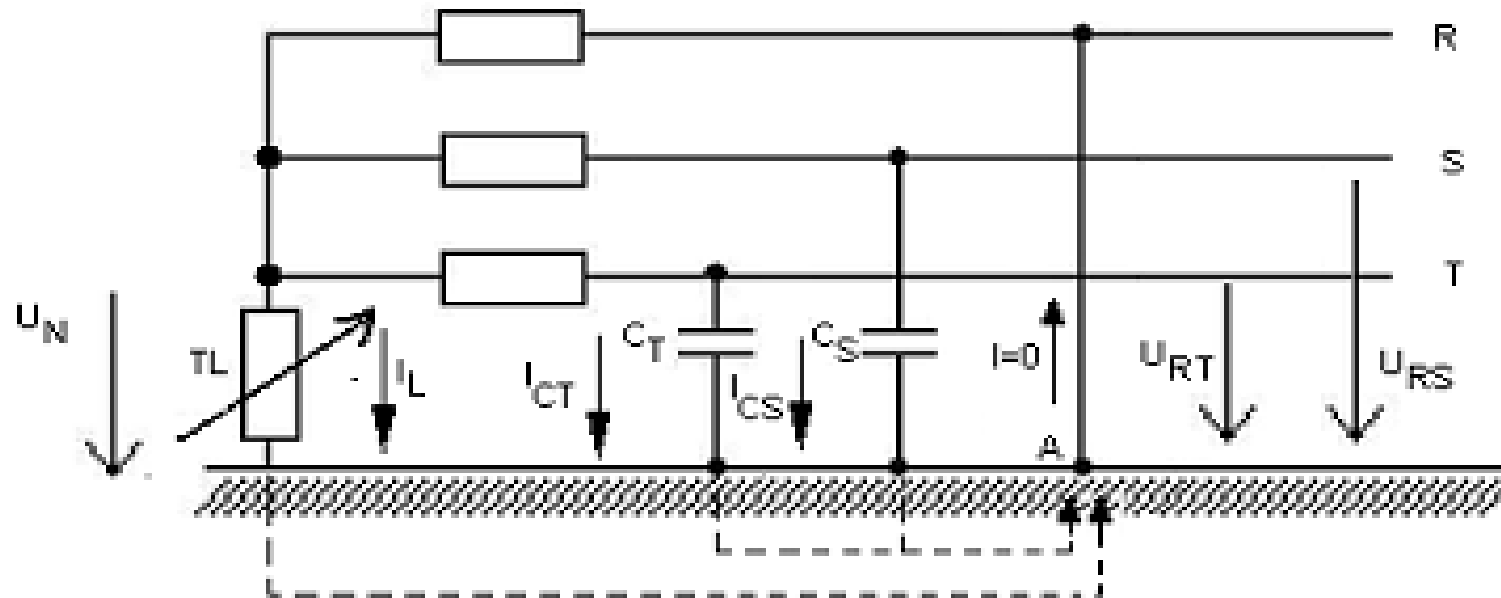
Sítě vysokého napětí s kompenzací kapacitních proudů

2.2 SHUNTOVÁNÍ - STAV PO PŘIPOJENÍ SHUNTU v napájecí transformovně 110/22 kV



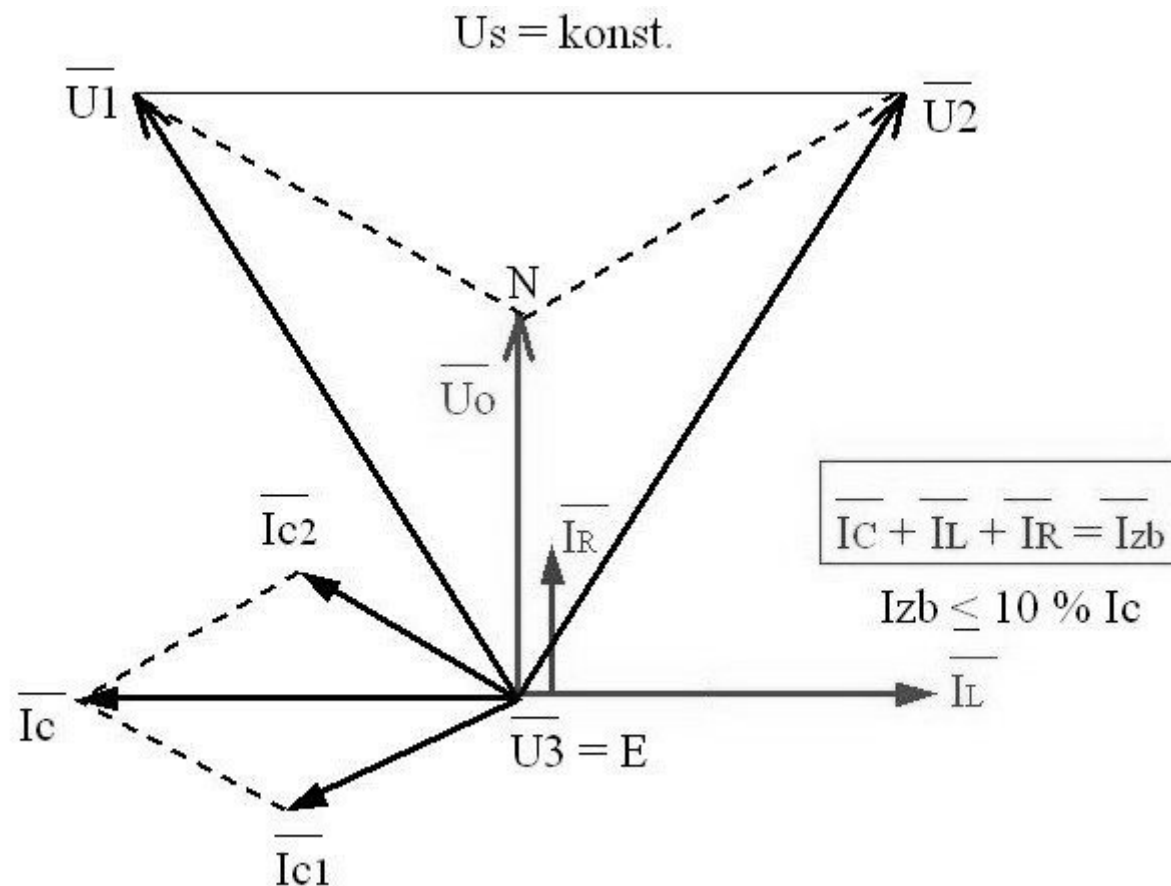
Sítě vysokého napětí s kompenzací kapacitních proudů

3. SWEDISH NEUTRAL



Obrázek 10: Aplikace Swedish neutral – stejný princip kompenzace

Sítě vysokého napětí s kompenzací kapacitních proudů



Obrázek 11: Kompenzace kovového zemního spojení – viz obr. 8

Sítě vysokého napětí s kompenzací kapacitních proudů

Pozitiva:

Rychlé ladění v jednotkách sekund

Kompenzace činné složky poruchového proudu

Stejně jako tlumivka ZTC ladí na maximum U_0

Negativa:

Vysoká cena

Swedish neutral

Sítě vysokého napětí s kompenzací kapacitních proudů

Každá metoda, která se používá pro kompenzaci kapacitních proudů v systému vysokého napětí má své přednosti a slabiny. Nejde jen o vlastní kompenzaci ale jde také o nezbytnou identifikaci postiženého vývodu se zemním spojením. Abychom nemuseli vypínat v napájecí rozvodně postupně všechny vývody vn a zdlouhavě hledat vývod se zemním spojením, osazujeme v každém vývodu tzv. zemní relé, která indikují velikost a směr poruchového proudu vývodu. **Pouze postiženým vývodem se vrací zbytkový poruchový proud vodičem zpět do rozvodny**, u ostatních vývodů je tomu naopak. Pokud použijeme vhodné zapojení přístrojových transformátoru proudu a napětí (součtové zapojení a otevřený trojúhelník), pak jsou ochrany schopny naměřené hodnoty zpracovat a jednoznačně vyhodnotit. Dle patentu Ing. Richtera z roku 1952 byl již v té době zvyšován pomocí přídavného odporu zapojeného na pomocné vinutí zhášecí tlumivky zbytkový poruchový proud zemního spojení. Funkce zemních ochran tak byla jednoznačná a bezchybná.

Přestože jsou i po téměř 60-ti letech nasazovány stále kvalitnější digitální ochrany vývodů, nedaří se ve všech případech nalézt vývody se zemním spojením. Lze to přičíst na vrub technologické nekázni při montáži kompenzačních zařízení a příslušných ochran.

Sítě vysokého napětí s kompenzací kapacitních proudů

Provoz systému vn se zemním spojením:

O tom, jak dlouho můžeme systém vn provozovat se zemním spojením, rozhodují kromě již uvedených důvodů také technické parametry napájecích transformátorů a tlumivek a jejich vzájemné přizpůsobení.

Výkonové transformátory 110 kV/vn, které napájejí danou oblast, musí tuto oblast pokrýt výkonově a musí umožnit připojení kompenzační tlumivky (nebo systému Swedish neutral) s požadovaným výkonem. V distribučních transformovnách 110 kV/vn se obvykle používají transformátory z výkonové řady **10, 16, 25, 40 a 63 MVA** ve skupině zapojení **Yn / yn0 / d1**. Časové omezení provozu systému vn se zemním spojením, zejména u transformátorů menších výkonů a transformátorů „převodových“ (například 35 kV / 22 kV) **způsobuje chybějící terciální vinutí d 1**, které jednak symetrizuje výkonové zatížení transformátoru a dále vytváří zkrat pro 3. harmonickou poruchového proudu.

U transformátorů bez terciálního vinutí můžeme uzel hvězdy vn trvale výkonově zatížit pouze **do 10 % Sn** transformátoru, u transformátorů s terciálním vinutím je to **do 30 % Sn**.

Sítě vysokého napětí s kompenzací kapacitních proudů

Zhášecí tlumivky řady ZTC se obvykle dodávají ve výkonové řadě od 125 kVA do 5000 kVA. **Doba trvalého provozu je závislá na konstrukci vlastní tlumivky**, resp. na způsobu chlazení transformátorového oleje. Tlumivky na trvalý 24 hodinový provoz musí mít navíc na válcové nádobě tlumivky přidány chladicí radiátory. Chlazení je tedy zajištěno prouděním venkovního vzduchu přes žebra radiátorů.

Tlumivka nesmí být za provozu nikdy odpojována, přičemž jedinou ochranou proti tepelnému přetížení je kontaktní teploměr a proti zkratům ve vinutí tlumivky Bucholzovo relé. V případě přehřátí nebo poruchy vinutí tlumivky je vypnut celý transformátor a s ním i celá napájená oblast.

Dosahují kapacitní proudy systému vn, napájeného z jediného transformátoru, vysokých hodnot (300 – 400 A), je nutné provést kontrolu zatížení uzlu hvězdy vn vinutí, aby nebyl překročen maximální povolený proud – 10 %, resp. 30 % I_n u transformátorů s terciálním vinutím. **Pokud se stane, že transformátor pokryje s rezervou malé výkonové požadavky odběru, ale není splněna podmínka maximálního proudu uzlem transformátoru, musíme použít transformátor většího výkonu nebo oblast napájet ze dvou transformátorů.**

Sítě vysokého napětí s kompenzací kapacitních proudů

Použitá literatura:

- (1) ČSN 33 2000-4-41, 33 2000-4-442, 33 2000-5-54, 33 3201, 33 3070
- (2) Technické katalogy výrobců kompenzačních prostředků
- (3) Technické informace z odborných konferencí