ELEKTRICKÉ POMĚRY NA KABELOVÝCH ROZVODECH

Lumír BAJGAR
Ing. Lumír BAJGAR, ČD TÚDC EMC, Perucká 3, Praha 2

ABSTRAKT

V případě napájení kabelového vedení 6 kV, 50 Hz z přípojnic 22 kV trakční napájecí stanice (TNS) byly zjištěny rezonanční jevy. Článek popisuje řešení použitím L-C členu, který snižuje rezonanční frekvenci pod 550 Hz.

klíčová slova:usměrňovač, L-C obvod, kabel, rezonance,harmonické

1 ÚVOD

Kabelové rozvody 6 kV, 50 (75) Hz v sítích ČD jsou určeny především k napájení zabezpečovacích zařízení a v poslední době také k napájení železničních uzlů. Jsou napájeny z transformátorů 22/6 kV, které jsou připojeny na přípojnici 22 kV. Na tuto přípojnici jsou rovněž připojeny trakční usměrňovače TNS soustavy 3 kV DC (obr.1).

Z tohoto vyplývá, že přípojnice 22 kV bude ovlivněna proudovými harmonickými generovanými trakčními usměrňovači (11., 13. popřip. 23., 25. harmonická) a přes transformátor 22/6 kV se můžou dostat tyto harmonické do kabelového rozvodu 6 kV a způsobit v něm nebezpečné rezonance, které mohou ovlivnit funkčnost zabezpečovacích zařízení (výpadky jistících prvků a přerušení dodávky proudu pro releová zabezpečovací zařízení zkreslením tvaru sinusovky napětí).

2 NÁHRADNÍ SCHÉMA ZÁKLADNÍCH VÝKONOVÝCH PRVKŮ

2.1 TRAKČNÍ USMĚRŇOVAČ TNS

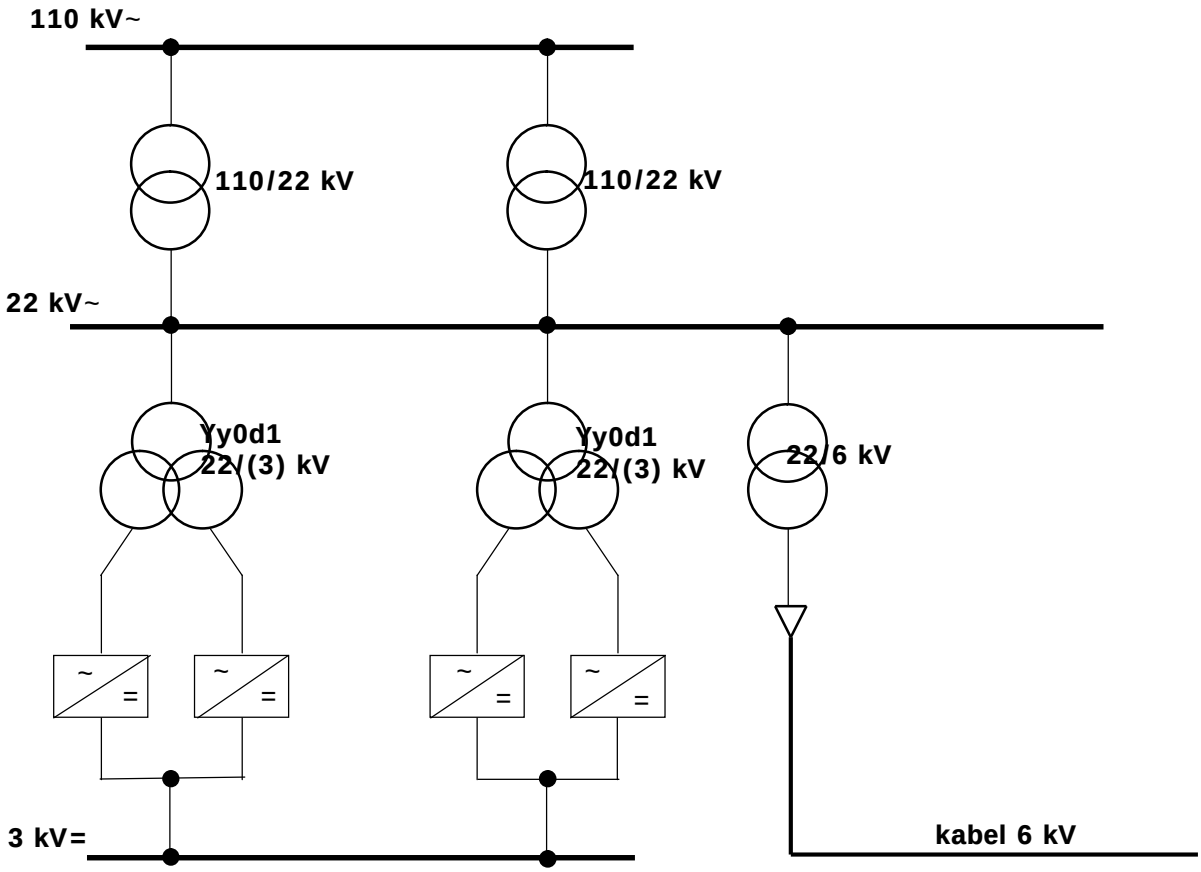
Je u ČD proveden ve dvanáctipulzním zapojení (Yy0d1). Toto zapojení vykazuje pro dnešní poměry neocenitelnou vlastnost, že na primární straně trakčního transformátoru má charakter proudového zdroje harmonických složek, přičemž nejnižší z nich je až řádu 11 (550 Hz). Následující složka pak je řádu 13 (650 Hz) (obr.2). Tím se zapojení trakčního usměrňovače na ČD liší např. od usměrňovačů pro MHD, které mají šestipulzní zapojení s dodatečnou produkcí proudových harmonických složek počínaje řádem 5 (250 Hz) následovaným řádem 7 (350 Hz).

Absolutní velikosti těchto proudových složek rostou s výkonovým zatížením trakčního usměrňovače. Jejich poměrné obsahy I_n vztažené k obsahu základní složky 50 Hz jsou dány velmi přibližně tzv. amplitudovým zákonem

$$I_n = \frac{1}{n} \times 100 \quad [\%] \qquad (A)$$

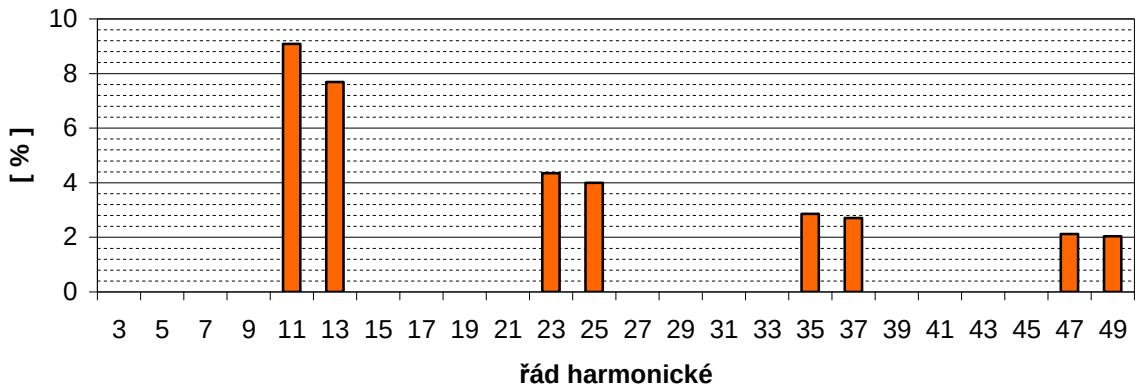
kde n je řád harmonické [-]

To značí další výhodu našeho dvanáctipulzního zapojení trakčního usměrňovače, protože zde složka 11. harmonické dosahuje pouze asi 9 % základní složky 50 Hz, zatím co pro šestipulzní usměrňovač MHD má 5. harmonická obsah asi 20 % základní složky 50 Hz. Zkreslení sinusovky proudu odebíraného trakčním usměrňovačem ČD je tedy podstatně menší než v případě MHD.



obr.1

Obsah proudových harmonických dvanáctipulzního usměrňovače



obr.2

2.2 NAPÁJECÍ SOUSTAVA 110/22 kV

Napájecí soustava 110/22 kV, kterou se přivádí elektrická energie na přípojnice 22 kV TNS, se skládá především z transformátoru 110/22 kV připojeného vzdušným vedením 110 kV do vzdálené rozvodny REASu.

2.3. NÁHRADNÍ SCHÉMA TRANSFORMÁTORU 110 / 22 kV

Je běžnou praxí, že náhradní schéma transformátoru 110 / 22 kV je tvořeno pro tzv. energetické harmonické pouze podélnou indukčností $L_{transf\,110/22}$ $(R = 0)$, jejíž hodnota vztažená na stranu 22 kV je určována především jeho napětím nakrátko podle výrazu

$$L_{trans\,110/22} = \frac{u_K \times U_{jmen}^2}{100 \times p \times 100 \times S} \quad [H] \quad (B)$$

kde u_K **je napětí nakrátko transformátoru [%]**

U_{jmen} **je napětí sítě 22 kV**

S **je typový výkon transformátoru [MVA]**

K této náhradní indukčnosti lze pak připočítat indukčnost vzdušného vedení 110 kV, jejíž hodnota se však po přepočtu na stranu 22 kV již uplatní pouze okrajově. Podobně lze zanedbat v prvním přiblížení i přepočtenou vnitřní impedanci vzdálené rozvodny 110 kV, ze které je vzdušné vedení napájeno. Podobně lze tuto indukčnost odvodit i ze zkratového výkonu na přípojnicích 22 kV, které udá REAS. Zkratový výkon je dán vztahem

$$S_K = \sqrt{3} \times U \times I \quad [VA] \quad (C)$$

kde U **je napětí primární strany transformátoru [V]**

I **je proud [A]**

Úpravou vzorce (C) dostaneme vztah pro proud

$$I = \frac{S_K}{\sqrt{3} \times U} \quad [A] \quad (D)$$

dále podle Ohmova zákona vypočítáme impedanci

$$Z = \frac{U}{I} \quad [\Omega] \quad (E)$$

zanedbáním činného odporu $(X >> R)$ **a využitím vztahu**

$$Z = X = 2 \times p \times f \times L \quad [\Omega] \quad (F)$$

dostaneme vztah pro indukčnost

$$L = \frac{X}{2 \times p \times f} \quad [H] \quad (G)$$

kde f **je frekvence [Hz]**

Podstatné je, že na takto definované náhradní indukčnosti vznikají podle Ohmova zákona na přípojnicích 22 kV napěťové harmonické, jejichž hodnota závisí stejnou měrou:

- **jak na zatížení TNS, které určuje absolutní velikost generovaných proudových harmonických počínaje řádem 11,**
- **tak i na náhradní indukčnosti, určující vnitřní reaktanci napájecí soustavy 22 kV na kmitočtech harmonických generovaných trakčním usměrňovačem TNS, opět počínaje řádem 11.**

Z uvedeného vyplývá poznatek, že napětí přípojnic 22 kV obsahuje mimo základní složku 1. harmonické (50 Hz) ještě složky 11. harmonické (550 Hz), dále pak 13. harmonické (650 Hz), které zkreslují jeho časový průběh.

2.4 NÁHRADNÍ SCHÉMA TRANSFORMÁTORU 22 / 6 kV

Dalším významným prvkem náhradního schématu je v případě napájení kabelu 6 kV, 50 Hz transformátor 22 / 6 kV připojený na přípojnice 22 kV. Také tento transformátor

lze pro energetické harmonické nahradit podélnou indukčností $L_{transf\ 22/6}$, pro kterou platí v podstatě výše uvedený výraz (B). Vzhledem k dalším odvozením však přepočteme čtvercem převodu p^2 tuto hodnotu na stranu 6 kV.

$$L_{trans\,22/6} = \frac{u_K \times U_n^2}{100 \times p \times 100 \times S \times p^2} \qquad [H] \qquad (H)$$

2.5 NÁHRADNÍ SCHÉMA KABELU 6 kV

Kabelové vedení 6 kV, 50 Hz můžeme v prvním přiblížení nahradit jeho provozní kapacitou, protože indukčnost kabelu vn je ve srovnání s jeho provozní kapacitou zanedbatelná. Provozní kapacita C_{prov} je základní vlastností kabelu a udává se vždy na jednotku jeho délky, např. ve mF/km.

Z toho plyne, že celková kapacita konkrétního kabelového rozvodu C_{kab} bude přímo úměrná jeho délce l_{kab}

$$C_{kab} = C_{prov} \times l_{kab} \qquad [mF] \qquad (I)$$

Zde nutno upozornit na skutečnost, že tento kabel je odběrem zabezpečovacího zařízení v trafo-kioscích zatížen velmi málo ve srovnání s jeho přenosovou schopností danou napětím 6 kV.

3 POZNATKY

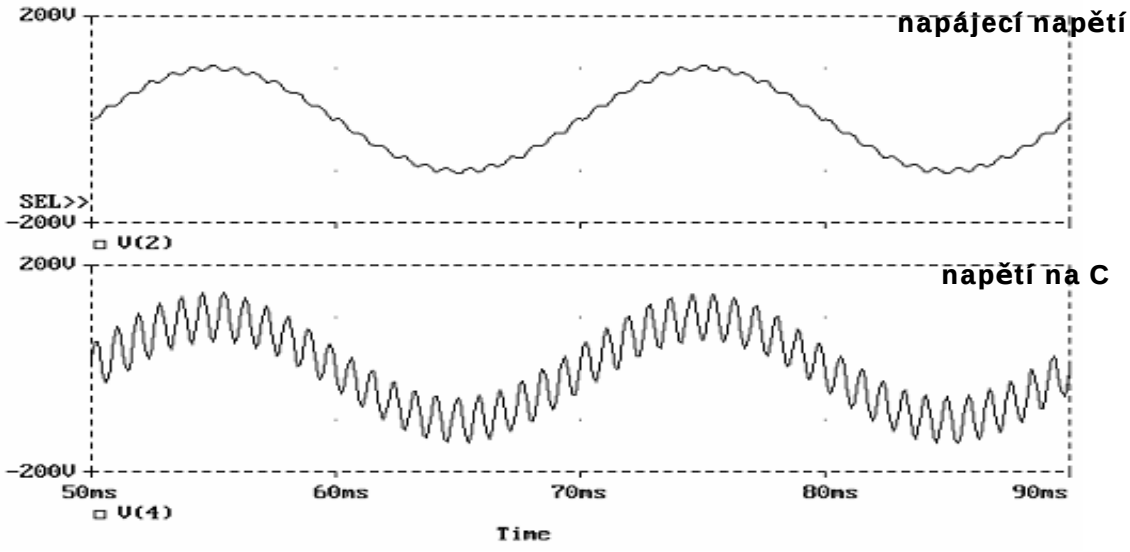
Z náhradního schématu vyplývají následující poznatky:

- existuje systém „transformátor 22/6 kV - kabel 6 kV“, mající charakter sériového obvodu L-C, poměrně málo tlumeného odběrem zabezpečovacími zařízeními,
- tento systém je připojen na nesinusové napětí přípojnic 22 kV, které obsahuje harmonické složky řádu nejníže 11 a 13,
- napětí pro napájení zabezpečovacích zařízení v trafo-kioskách je odebíráno v podstatě z kapacity sériového obvodu L-C.

4 POROVNÁNÍ DEFORMACE NAPĚTÍ NAPÁJECÍHO A NA KONDEZATORU L-C OBVODU

simulace: *L = 0,0815 mH, R = 0,01Ω, C = 235 μF* (obr.3)
horní křivka „napájecí napětí“ superposice 5 % napětí s kmitočtem 1150 Hz
THD=5 %

dolní křivka „napětí na C“ THD(Uc) = 43



%

obr.3

5 REZONANCE

5.1 REZONANČNÍ KMITOČET SYSTÉMU „TRANSFORMÁTOR 22/6 kV – KABEL 6 kV“

Každý elektrický obvod L-C, pokud je málo tlumený činnými složkami (odporem v L a ztrátami v C), vykazuje jistý vlastní kmitočet rezonance f_{rez}, na který je „naladěn“. Tento kmitočet je v prvním přiblížení (při plném zanedbání tlumení) dán výrazem

$$f_{rez} = \frac{1}{2p \times \sqrt{L \times C}} \qquad [Hz] \qquad (J)$$

Podstatné je, že tento kmitočet je dán pouze parametry L a C obvodu a nemá tedy žádnou vazbu na kmitočet sítě 50 Hz či na jeho násobky.

V našem případě jsou jeho prvky dány takto:

- jeho indukčnost L je dána náhradní podélnou indukčností transformátoru 22/6 kV značenou $L_{trans22/6}$,
- jeho kapacita je dána celkovou kapacitou kabelového vedení 6 kV, 50 Hz značenou $C_{kab} = C_{prov} \times l_{kab}$.

Dosadíme-li do výrazu (J), dostaneme

$$f_{rez} = \frac{1}{2p \times \sqrt{L_{trans22/6} \times C_{prov} \times l_{kab}}} \qquad [Hz] \qquad (K)$$

Cílem je stanovit závislost f_{rez} především na délce kabelového rozvodu 6 kV, 50 Hz, značené l_{kab}. Pro tento účel lze ve výrazu (K) považovat prvky $L_{trans22/6}$ a C_{prov} za konstanty.

Protože nezávisle proměnná l_{kab} je ve výrazu (K) pod odmocninou, umocníme výraz (K) na druhou a upravíme na tvar

$$2p \times f_{rez} \times L_{trans22/6} = \frac{1}{2p \times f_{rez} \times C_{prov} \times l_{kab}} \qquad (L)$$

Další úprava spočívá v zavedení reaktance $X_{trans22/6,1}$ a admitance $Y_{prov,1}$ podle vzorců, platících pro základní složku 50 Hz

$$X_{trans\,22/6,1} = 2p \times 50 \times L_{transf\,22/6} = \frac{u_K \times U_{jmen}^2}{100 \times S} \qquad (M)$$

$$Y_{prov,1} = 2p \times 50 \times C_{prov} \qquad (N)$$

Pro názornost dalšího odvození použijeme pro vyjádření rezonančního kmitočtu f_{rez} jeho řádové číslo značené n_r podle vztahu

$$n_r = \frac{f_{rez}}{50} \qquad [-] \qquad (O)$$

a dostaneme po úpravě výraz

$$X_{trans\,22/6,1} \times n_r = \frac{1}{Y_{prov,1} \times l_{kab} \times n_r} \qquad [\Omega] \qquad (P)$$

Hledáme závislost veličiny n_r především na délce kabelového rozvodu l_{kab}. Z výrazu (P) však plyne, že tato hodnota závisí pochopitelně i na vlastnostech napájecího transformátoru 22/6 kV, představovaných jeho náhradní indukčností $L_{trans\,22/6}$ a tedy podle výrazu (M) i na $X_{trans\,22/6,1}$. Jedině veličinu $Y_{prov,1}$ můžeme pokládat podle výrazu (N) za konstantu, protože je dána vlastností kabelu 6 kV. V příkladu byla volena hodnota C_{prov} = 0,39 µF/km.

Pro názornost situace položíme v rovnici (P) obě strany rovny pomocné veličině A a vyneseme do grafu majícím na vodorovné ose hodnoty n_r (s lineárním dělením) a na svislé ose (pro názornost v logaritmickém dělení) hodnoty pomocné veličiny A dvě soustavy křivek, a to:

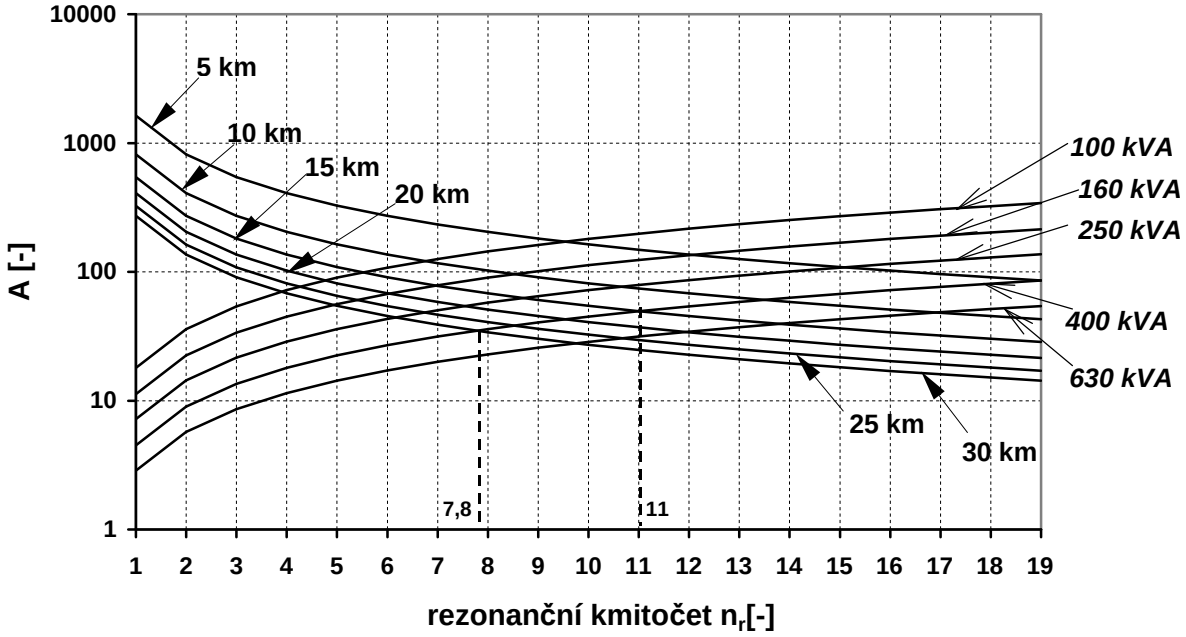
$$A = X_{trans\,22/6,1} \times n_r \qquad \text{pro zvolené hodnoty } X_{trans\,22/6,1} \qquad (Q)$$

$$A = \frac{1}{Y_{prov,1} \times l_{kab} \times n_r} \qquad \text{pro zvolené hodnoty } l_{kab} \qquad (R)$$

První soustava křivek podle definice (Q) platí pro výkonovou řadu transformátorů 22/6 kV danou jmenovitým zdánlivým výkonem (100, 160, 250, 400 a 630 kVA), pro které byla zvolena hodnota napětí nakrátko u_K = 5 %.

Druhá soustava křivek podle definice (R) platí pro délky kabelového rozvodu značené l_{kab} z řady 5, 10, 15, 20, 25 a 30 km. Pro měrnou provozní kapacitu kabelu byla použita hodnota C_{prov} = 0,39 µF/km (obr.4).

Ve smyslu výchozího výrazu (P) pak platí, že vlastní rezonanční kmitočet systému „transformátor 22/6 kV – kabel 6 kV" vyjádřený podle výrazu (O) veličinou n_r bude dán vždy průsečíkem křivky náležející výkonu transformátoru 22/6 kV s křivkou náležející dané délce kabelového rozvodu l_{kab}.



obr.4

6 PŘÍKLADY

Mějme transformátor 22/6 kV s výkonem 400 kVA. Délka kabelového rozvodu 6 kV, 50 Hz budiž 30 km. Z diagramu vyplývá, že vlastní kmitočet tohoto systému daný průsečíkem křivky „30 km“ a křivky „400 kVA“ je přibližně n_r = 7,8 (obr.4) (čemuž odpovídá 390 Hz). Protože tento kmitočet je dosti vzdálený od nejnižšího kmitočtu produkovaného trakčním usměrňovačem ČD (550 Hz), nedojde pravděpodobně z důvodu zkreslení časového průběhu napětí 6 kV v kabelovém rozvodu k obtížím. Hodnota f_{rez} podle výrazu (K) je 389 Hz.

Změňme nyní délku kabelového rozvodu z původní hodnoty 30 km na polovinu, tedy na 15 km. Diagram v tomto případě ukazuje průsečíkem křivek „400 kVA“ a „15 km“ hodnotu n_r = 11 (obr.4) (čemuž odpovídá 550 Hz). Díky zkrácení délky kabelového rozvodu lze oprávněně očekávat, že při zachování ostatních okolností může dojít k zvětšené deformaci časového průběhu napětí 6 kV, a to prakticky v celé délce kabelového rozvodu 6 kV. Hodnota f_{rez} podle výrazu (K) je stejná.

7 ZÁVĚR

Odpomoc lze charakterizovat těmito body:

1. **hodnotu provozní kapacity prvního úseku kabelu 6 kV až po nejbližší místo možného podélného rozpojení tohoto kabelu doplníme trvale připojeným tzv. „rozlaďovacím“ kondenzátorem $C_{\min}$ (tab.1),**
2. **kapacitu tohoto rozlaďovacího kondenzátoru zvolíme tak, aby s provozní kapacitou nejkratšího úseku kabelu 6 kV vytvořila spolu s náhradní reaktancí transformátoru 22/6 kV L_T obvod naladěný pod kmitočet 11. harmonické, tedy pod 550 Hz,**
3. **jakékoliv prodloužení délky kabelu 6 kV v tomto případě sníží rezonanční kmitočet dále pod 550 Hz,**

4. **pro zabránění přechodu TNS jako celku v případě zániku trakčního odběru do kapacitního účiníku je nutno paralelně k rozlaďovacímu kondenzátoru připojit trvale tlumivku, jejíž jalový výkon bude kompenzovat nejen jalový výkon rozlaďovacího kondenzátoru, ale i jalový výkon provozní kapacity nejkratšího úseku kabelu 6 kV,**
5. **platí základní předpoklad, že provozní kapacita dalších úseků kabelu 6 kV bude ve svých odpojitelných délkách kompenzována samostatnými tlumivkami, umístěnými vždy v každém odpojitelném úseku kabelu 6 kV.**

S [kVA]	L_T [mH]	C_{min} [mF]
100	57,3	1,46
160	35,8	2,34
250	22,9	3,65
400	14,3	5,85
630	90,9	9,21

tab.1 transformátor 22/6 kV, u_K = 5 %

ELECTRIC SITUATION ON CABLE DISTRIBUTION

Summary

The resonant effect in the 6 kV AC kabel lines for feeding of the signalling system was found out in the case of feeding from the 22 kV AC busbars of the DC traction substation. The paper describes the solution based on using an L - C circuit that cuts down the resonant frequency below 550 Hz.

Literatura

Verzich V.: Rezonanční jevy v napájecích vedeních 6 kV, 50 Hz pro reléová zabezpečovací zařízení ČD a ŽSR
Nová železniční technika, č.4/1994, str. 109 - 111

Vachoušek J.: Vliv trakčních napájecích stanic 3 kV na napájení zabezpečovacího zařízení ČD (se zaměřením na poměry na koncích kabelového vedení)
Diplomová práce Západočeské univerzity v Plzni, fakulty elektrotechnické, 1998, (vedoucí K. Hlava)

Doleček R.: Vliv trakčních napájecích stanic 3 kV na napájení zabezpečovacího zařízení ČD (se zaměřením na průběh napětí podél kabelového vedení)
Diplomová práce Univerzity Pardubice, Dopravní fakulty Jana Pernera, 1999, (vedoucí K Hlava)

Hlava K.:Problematika napájení odběrů z přípojnic 22 kV TNS stejnosměrné Soustavy
Sborník přednášek Modernizace elektrických zařízení na II. železničním koridoru str. 47 - 53