

Karel Hlava, Radovan Doleček, Ondřej Černý¹

Poměry při zkratu na trakčním vedení jednofázové soustavy 25 kV, 50 Hz

Klíčová slova: *trakční napájecí soustava 25 kV, 50 Hz, zkraty na trakčním vedení, přepětí při zkratu na trakčním vedení.*

1. - Úvod

Z další analýzy vyplyne, že elektrické poměry v trakční napájecí soustavě jednofázové trakce 25 kV, 50 Hz na ČD jako celku je nutno sledovat v kmitočtové oblasti zlomků milisekund, jinak řečeno v oblasti desítek až stovek kHz.

Je tedy vhodné posoudit jednotlivé prvky trakční napájecí soustavy nikoliv z hlediska tak zvaných energetických harmonických (obvykle do 13. harmonické, tedy do 650 Hz), ale z hlediska jejich chování pro podstatně vyšší kmitočty.

Trakční transformátor 110/27 kV lze ve sledované kmitočtové oblasti ještě nahradit pouhou podélnou indukčností, protože vliv mezivinuťové kapacity není u tohoto prvku vůči rozptylovým reaktancím obou vinutí dominantní a případná změna napěťového (závitového) převodu v tomto případě nehraje roli. Podobný postup je využíván i pro analýzu šíření rázových vln atmosférického původu [1] [2] a [3].

Dalšími prvky jsou **rezonanční LC větve FKZ**. Zde je možno stanovit náhradní reaktanci těchto větví $Z_{LC}(\omega)$ pro frekvenci f pomocí výrazu

$$Z_{LC}(f) = j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{REZ} \cdot \frac{f^2 - f_{REZ}^2}{f^2}$$

kde f leží v oblasti desítek až stovek kHz

f_{REZ} je kmitočet, na který je daná LC větev naladěna (147 Hz, 250 Hz)

L_{REZ} je indukčnost rezonanční tlumivky LC větve (L_3, L_5)

Uvedený výraz lze posoudit s použitím podmínky, že

$$f \gg f_{REZ}$$

a dostaneme tak

$$Z_{LC}(f) \cong j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{REZ}$$

¹ **Doc. Ing. Karel Hlava**, CSc., 1930, absolvent ČVUT FEL obor elektrická trakce, r. 1953, vědecký pracovník (ČD VÚŽ, TÚDC, SŽE), nyní docent katedry elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky Dopravní fakulty Jana Pernera Univerzity Pardubice.

Ing. Radovan Doleček, 1971, absolvent Dopravní fakulty Jana Pernera Univerzity Pardubice, obor Dopravní infrastruktura- elektrotechnika, specializace Elektrická trakční zařízení, r. 1999, nyní interní postgraduální doktorské studium na DFJP UPa KEEZ v tématicke Pevná trakční zařízení.

Ing. Ondřej Černý, 1980, absolvent Dopravní fakulty Jana Pernera Univerzity Pardubice, obor Elektrická zařízení železniční infrastruktury, r. 2004, nyní postgraduální doktorské studium na DFJP UPa KEEZ v tématicke Regulace synchronních strojů.

Tento výraz prokazuje, že pro sledovanou oblast desítek až stovek kHz lze spolehlivě zanedbat vliv kondenzátorových skupin obou LC větví, které se pak „tváří“ jako prosté indukčnosti doprovázené v sérii odpovídajícím činným odporem.

Také *dekompenzační větve* se podobně projevuje i pro sledovanou oblast frekvencí jako indukčnost v prvním přiblížení nezávisle na momentálním nastavení regulátoru COMPAKT. Tato větev FKZ totiž vykazuje vždy téměř čistě induktivní charakter připojený paralelně k celkové indukčnosti TNS a který šíření rázové vlny neovlivní.

V dalším vždy předpokládáme *vznik zkratu na TV bez trakčního odběru*. Pokud by bylo nutno trakční odběr v okamžiku vzniku zkratu respektovat, lze použít poznatek, že hnací vozidlo jednofázové soustavy vykazuje vždy převážně indukčně-odporový charakter, což nijak neovlivní pohyb rázové vlny podél TV.

Zvláštní pozornost nutno věnovat náhradě *trakčního vedení*. Pro zmíněné energetické harmonické postačilo je nahradit kapacitou jako soustředěným prvkem, jejíž hodnota je odvozena z měrné kapacity a rozvinuté délky TV. Pro provozní délky TV a očekávané kmítočty není vhodná ani náhrada dvojbrany vzhledem k frekvenčnímu omezení danému nezbytným počtem kaskádně řazených dvojbranů a délkou sledovaného TV pro dosažení požadované přesnosti náhrady [4], [5].

Dnešní výpočetní technika a především simulační metody dávají přednost přechodu na homogenní ztrátové vedení dovolující snazší analýzu nejenom na obou koncích TV, ale i v libovolném mezilehlém bodě TV. Zde lze použít běžné zjednodušení zanedbáním rozvětvení TV v železničních stanicích vzhledem k tomu, že délka jejich TV je zanedbatelná ve srovnání s délkou TV širé trati. Pokud by bylo nutno rozvětvení TV v žst respektovat, projeví se tato skutečnost pouze změnou hodnoty jeho celkové vlnové impedance [6], [7].

2. - Zásady simulační analýzy poměrů při zkratu na TV

Při této analýze je nutno zásadně rozlišovat okolnosti, za kterých ke zkratu došlo. Vezměme například analýzu poměrů při zkratu na TV. Zde nutno analyzovat odděleně dva výchozí stavy, a to:

- zkrat byl vytvořen uměle na TV v beznapěťovém stavu a do takto vytvořeného obvodu bylo napaječovým vypínačem připojeno trakční napětí,
- zkrat vznikl na TV připojeném na trakční napětí, což představuje běžné provozní podmínky předcházející vzniku zkratu,

Simulační analýza si vyžádala použití zatím nejdokonalejšího z dostupných SW (SPice verze 9.1), který dovoluje simulovat TV jako ztrátové homogenní („elektricky dlouhé“) vedení. Jako výchozí parametry byly pro simulaci použity následující měrné hodnoty:

- | | |
|---------------------|---|
| • měrná kapacita | $C_{TV} = 15 \text{ nF / km}$ |
| • měrná indukčnost | $L_{TV} = 1 \text{ mH / km}$ |
| • měrný činný odpor | $R_{TV} = 0,4 \text{ } \Omega / \text{ km}$ |
| • měrný svod | $G_{TV} = 0 \text{ S / km}$ |

Pro délku TV byla zvolena hodnota $\ell_{TV} = 38,73 \text{ km}$. Důvodem pro tuto volbu bylo zvýšení názornosti poloh jednotlivých napěťových vln během jejich postupu podél TV. Z výše uvedených zvolených měrných parametrů TV totiž vychází doba běhu (či zpoždění) napěťové vlny v celé délce TV daná výrazem

$$TD = \ell_{TV} \cdot \sqrt{L_{TV} \cdot C_{TV}} \quad [s, km, H / km, F / km]$$

odkud pro zvolené $TD = 150 \mu s$ dostaneme $\ell_{TV} = 38,73 km$, což se jeví jako provozně realizovatelná délka TV.

Parametry obou LC větví FKZ byly zvoleny pro simulaci takto:

- součtová kapacita kondenzátorové skupiny 3. h. je $C_3 = 8,5 \mu F$,
- indukčnost vzduchové rezonanční tlumivky 3. h. je $L_3 = 137 mH$,
- součtová kapacita kondenzátorové skupiny 5. h. je $C_5 = 2,4 \mu F$,
- indukčnost vzduchové rezonanční tlumivky 5. h. je $L_5 = 169 mH$.

Dekompenzační větev byla nahrazena indukčností $L_{DEK} = 0,587 H$

Náhradní indukčnost trakčního transformátoru byla zvolena s respektováním zkratového výkonu napájecí sítě 110 kV hodnotou

$$L_{TT} = 26 mH$$

2.1 – Připnutí trakčního napětí do předem zkratovaného TV

Obvod pro simulaci poměrů po připnutí trakčního napětí do předem zkratovaného TV byl sestaven takto (podrobnosti viz Příloha A, obrázek PA-1):

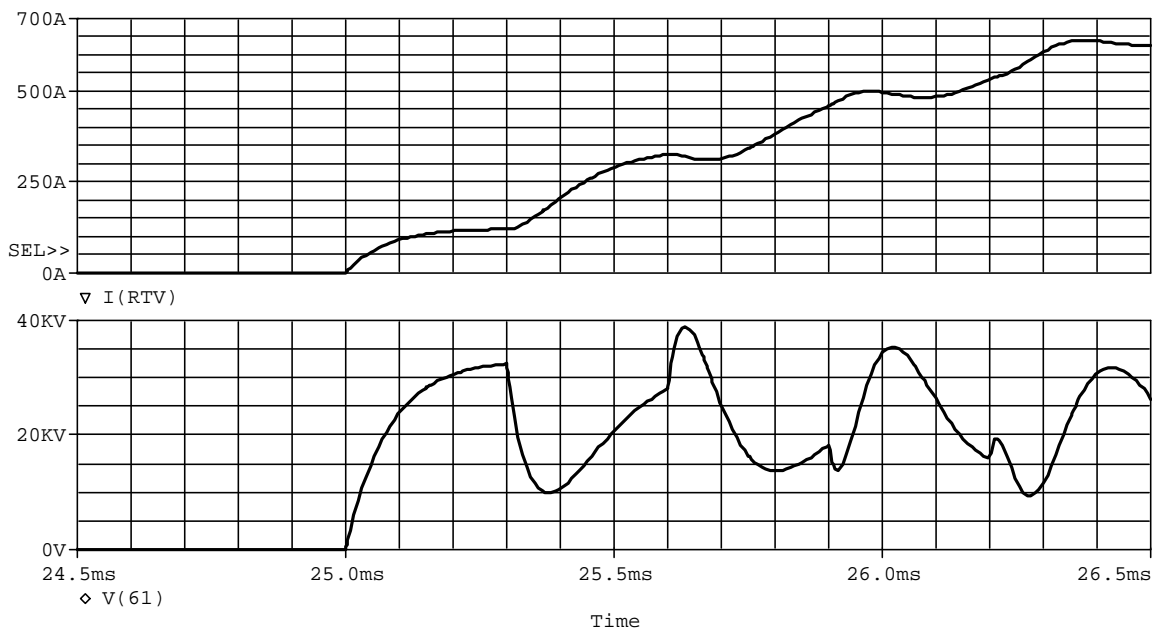
- A) TV bylo simulováno modelem „TLOSSY“,
- B) zdroj trakčního napětí byl simulován modelem „VTV“ poskytujícím sinusové napětí s nastavenou amplitudou **38891 V**,
- C) pro simulaci napaječového vypínače byl použit model „Sbreak“,
- D) pro jeho ovládání byl použit model „VOVL“, který dovolil nastavit okamžik připnutí trakčního napětí v době, kdy toto napětí dosáhlo svého maxima **38891 V**,
- E) TV bylo zakončeno rezistorem **1 $\mu\Omega$** ,
- F) FKZ s oběma LC větvemi a větví dekompenzační bylo připojeno trvale.

Poznámka: Okamžik připojení trakčního napětí k TV v době jeho maxima (**38891V**) považujeme za nejpravděpodobnější, protože bude dán okamžikem vzniku průrazu mezi přibližujícími se kontakty zapínacího vypínače [2], [3] a [6].

Na následujícím obrázku 1 jsou vyneseny časové průběhy:

- proudu vtékajícího po zapnutí napaječového vypínače do zkratovaného TV, který je značen **I(RTV)**,
- napětí na vstupu do TV, které je značeno **V(4)**.

Obrázek 1



Z tohoto obrázku jsou patrné následující skutečnosti:

A) V prvním okamžiku po zapnutí napaječového vypínače lze sledovaný obvod považovat za obvod sestavený ze:

- zdroje stejnosměrného napětí s hodnotou **38891 V**,
- připínaného k přes náhradní indukčnost trakčního transformátoru $L_{TNS} = 26 \text{ mH}$ ke vstupnímu odporu TV představovanému v souladu s [1] i [2] jeho vlnovým odporem $Z_{0,TV} = 258 \Omega$

V takovém případě je napětí na výstupu z TNS (tedy na vlnovém odporu TV) dáno výrazem

$$u_{TV} = U_{TNS} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

kde $U_{TNS} = 38891 \text{ V}$

$$\tau = \frac{L_{TNS}}{Z_{0,TV}} = \frac{0,026}{258} \cong 0,10 \text{ ms}$$

- B) Tento výraz ukazuje, že těsně po zapnutí napaječového vypínače v TNS je napětí na vstupu do TV nulové a narůstá od zapnutí napaječového vypínače (v okamžiku 25,0 ms) s časem podle exponenciály. Jako obvykle platí, že ustálenou hodnotu dosáhne toto napětí po cca třech časových konstantách, tedy za cca **0,3 ms**, kdy je ještě možno trakční napětí považovat za stejnosměrné s jeho amplitudovou hodnotou.
- C) Takto vzniklá napěťová vlna se po **150 μs** , tedy v okamžiku **25,15 ms** dostane na zkratovaný konec TV, kde se odrazí s opačnou polaritou.

- D) Po následujících $150 \mu\text{s}$, tedy v okamžiku $25,30 \text{ ms}$, dostihne tato napěťová vlna (zmenšená o útlum na TV) vstup do TNS, kde se opět odrazí se stejnou polaritou a postupuje ke zkratovanému konci TV,
- E) Za dalších $2 \cdot 150 \mu\text{s} = 300 \mu\text{s}$ se opět vrátí po odrazu na zkratovaném konci TV k začátku TV, kde dosáhne v okamžiku $25,63 \text{ ms}$ (tedy po $630 \mu\text{s}$ po zapnutí napájecího vypínače) své největší hodnoty (odečteno z křivky) 38830 kV .
- F) Simulace prokázala, že v dalších periodách nikde napětí na vstupu TV tuto hodnotu při zvolených parametrech napájecí soustavy nepřesáhne.

2.2 - Zkrat vznikl na TV připojeném na trakční napětí

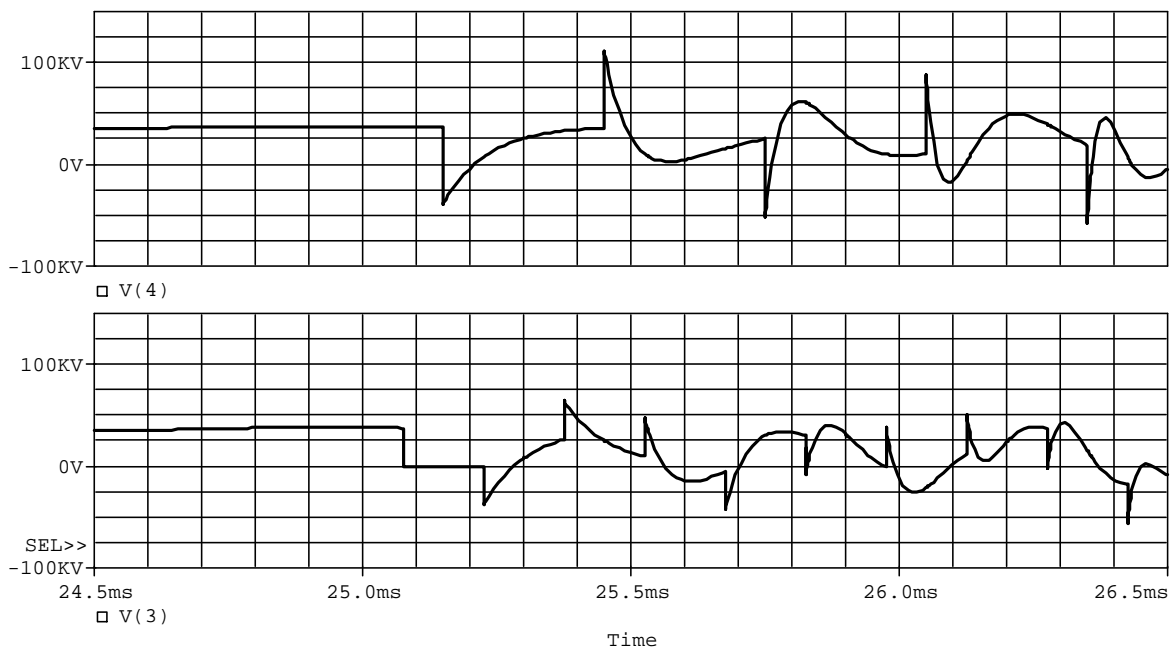
Obvod pro simulaci zkratu na TV, které bylo před vznikem zkratu pod trakčním napětím, byl sestaven takto (podrobnosti viz Příloha A, obrázek PA-2):

- A) TV bylo simulováno modelem „TLOSSY“,
- B) zdroj trakčního napětí byl simulován modelem „VTV“ poskytujícím sinusové napětí s nastavenou amplitudou 38891 V ,
- C) pro simulaci zkratu byl použit model „Sbreak“,
- D) pro jeho ovládání byl použit model „VOVL“, který dovolil nastavit okamžik vzniku zkratu v době, kdy trakční napětí dosáhlo svého maxima 38891 V ,
- E) TV bylo zakončeno rezistorem $1 \text{ M}\Omega$,
- F) zkrat nastal v okamžiku značeném $25,0 \text{ ms}$.

Na následujícím obrázku 2 jsou vyneseny časové průběhy:

- napětí na výstupu z TNS, tedy na vstupu do TV, které je značeno **V(4)**,
- napětí v polovině délky TV, tedy v kilometru **19,37**, které je značeno **V(3)**.

Obrázek 2



Z tohoto obrázku jsou patrné následující skutečnosti:

- A) TV nebylo před vznikem zkratu, tedy před okamžikem **25,0 ms**, zatíženo odběrem a proto napětí na jeho konci se tedy prakticky rovnalo napětí na jeho vstupu (**38891 V**).
- B) Začátek průběhu napětí na TV v jeho polovině značeného **V(3)** prokazuje anulování tohoto napětí po okamžiku **25,075 ms**, tedy v okamžiku zpožděném proti okamžiku vzniku zkratu o **0,075 ms**, což je polovina výše uvedené doby průchodu vlny celou zvolenou délkou TV.
- C) Příčinu tohoto jevu lze vysvětlit tím, že v okamžiku zkratu na konci TV (**25,0 ms**) dojde v místě zkratu (na konci TV) ke vzniku rázové vlny s amplitudou rovnou záporně vzaté amplitudě tamního trakčního napětí, tedy s hodnotou (**- 38891 V**), čímž skutečně dojde podle předpokladu k anulování napětí na konci TV.
- D) Takto vzniklá rázová vlna se šíří směrem k TNS a po uběhnutí poloviny délky TV je zachycena v okamžiku **25,075 ms** jako **V(3)**.
- E) Tato vlna však pokračuje dále směrem k TNS a za dalších **0,075 ms** (tedy po uplynutí **0,15 ms** od vzniku zkratu) dojde na její vstup, kde anuluje napětí na TV a je zachycena jako **V(4)**.
- F) V tomto bodě však vlna narazí na paralelní kombinaci indukčností (trakční transformátor, LC větev, dekompenzační větev), protože vnitřní odpor zdroje napětí značeného **VTV** je nulový.
- G) Podle výše uvedeného zdůvodnění lze přijmout, že tedy tato vlna narazí na prakticky otevřené homogenní vedení a podle zásad odrazu vln na homogenním vedení se v tomto bodě vlna odráží se stejnou amplitudou i polaritou (amplituda bude **- 38891 V**).
- H) Od vstupu do TNS se tedy odráží zpět ke zkratovanému konci TV již nová vlna se zdvojenou amplitudou (při zanedbání útlumu na TV **77782 V**).
- I) Po uplynutí doby (**0,075 + 0,15 = 0,225**) ms tato záporná vlna přichází do prostředka délky TV, jak je patrné z průběhu **V(3)** a pokračuje dále ke zkratovanému konci TV.

- J)** Zde opět dojde o jejímu odrazu, ovšem s opačnou polaritou (odraz na zkratovaném konci homogenního vedení), v daném případě s polaritou již kladnou.
- K)** Tato vlna pak přijde po době **(0,075 + 0,15 + 0,15)ms**, tedy v okamžiku **0,375 ms** po vzniku zkratu, opět ke středu celkové délky TV, jak patrně z průběhu **V(3)** a pokračuje dále směrem k TNS.
- L)** Zde je nutno ještě vysvětlit exponenciální pokles napěťové vlny z průběhu **V(4)** po jejím prvním odrazu u TNS. Tato vlna se vzdalovala od TNS a lze dokázat, že časový průběh napětí na výstupu z TNS je dán výrazem

$$\mathbf{u}_{\text{ODRAŽ}} = \left(-1 + \varepsilon^{-\frac{Z_{0,TV}}{L_{TNS}} \cdot t} \right) \cdot \mathbf{u}_{\text{DOŠLÁ}}$$

- M)** Časová konstanta tohoto poklesu je dána opět výrazem

$$\tau = \frac{L_{TNS}}{Z_{0,TV}} \cong \frac{0,026}{258} = 0,10 \text{ ms}$$

kde $L_{TNS} \cong 26 \text{ mH}$ jako přibližná hodnota celkové náhradní indukčnosti celé TNS,

$$Z_{TV} = \sqrt{\frac{L_{TV}}{C_{TV}}} = \sqrt{\frac{1e^{-3}}{15e^{-9}}} = 258 \Omega \text{ je vlnový odpor TV}$$

- N)** Obecně platí, že exponenciální křivka poklesne ke své ustálené hodnotě za cca 3 časové konstanty, v daném případě za cca **0,3 ms**, což dobře odpovídá průběhu **V(4)**.
- O)** Z průběhu **V(4)** je patrné, že tato vlna (s vrcholovou hodnotou **77782 V**) v okamžiku **0,3 ms** po prvním odrazu (tedy v čase **25,45 ms**) opět dostihne začátek TV, kde se odrazí (jako na otevřeném konci vedení) se stejnou velikostí i stejnou polaritou její vrcholová hodnota se však připočítá po doznění exponenciální křivky napětí k trakčnímu napětí dodávanému zdrojem **VTV**, takže celková vrcholová hodnota v bodě připojení TV k TNS bude cca **116,7 kV**. Reálná hodnota však bude nižší o útlum na délce TV. Za podmínek simulace dosáhla vrcholová hodnota **111,3 kV**.
- P)** Simulační studie prokázala, že v dalších periodách po zkratu již vrcholové hodnoty jsou o útlum na TV nižší.
- Q)** Lze tedy závěrem ke zkratu na otevřeném konci TV, bylo-li TV před zkratem pod napětím, konstatovat, že:
- teoreticky největší napětí na výstupu z TNS při zkratu na konci TV může dosáhnout vrcholové hodnoty trojnásobku amplitudy trakčního napětí, tedy hodnoty

$$3 \cdot 27,5 \cdot \sqrt{2} = 116,7 \text{ kV},$$
 - tato vrcholová hodnota se pak objeví na výstupu z TNS při délce TV cca **40 km** po cca **0,45 ms** od okamžiku vzniku zkratu na konci TV,
 - při kratší délce TV se vrcholová hodnota napětí na výstupu z TNS zmenší jen v malé míře díky tomu, že při stejné hodnotě časové konstantě nebude ještě exponenciální průběh napětí **V(4)** dostatečně utlumen,
 - při větší délce TV je reálná naděje na zvýšený útlum napěťové vlny jejím průběhem podél TV a tím i na jisté omezení výsledné vrcholové hodnoty,

- uvedená vrcholová hodnota napětí na výstupu TNS nezávisí podstatně na existenci jedné či obou LC větví FKZ, protože projev odrazu napěťové vlny na impedanci TNS jako celku je směrodatná hodnota $L_{TT} = 26 \text{ mH}$, vůči které mají ostatní náhradní indukčnosti k ní paralelně připojené (obou LC větví a větve dekompenzační) podstatně větší hodnoty.

V případě vzniku zkratu v bodě TV ležícím v libovolném místě délky napájeného úseku je situace dána pouze vzdáleností místa zkratu od TNS. Délka TV od místa zkratu směrem k otevřenému konci TV se v napětí na výstupu z TNS z pochopitelných důvodů neuplatní, protože je oddělena zkratem.

2.3 – Vliv dalších úseků TV současně napájených z téhož trakčního transformátoru

Předchozí odstavec tohoto příspěvku předpokládal, že z daného trakčního transformátoru je napájen pouze elektricky vzato jeden úsek TV, na kterém došlo ke zkratu, a to při stavu, kdy před zkratem bylo k němu připojeno trakční napětí.

Tento stav se týká těchto dvou provozně možných případů:

- z trakčního transformátoru je napájen úsek TV jednokolejné trati,
- z tohoto transformátoru jsou napájeny úseky TV dvoukolejné trati, které ale jsou v některém bodě své délky **příčně propojeny**, takže při vzniklém zkratu na této soustavě TV dojde k současnému vypnutí obou napáječových vypínačů; jediný rozdíl proti případu jednokolejné trati je ve změně časové konstanty z původní hodnoty $\tau = 0,10 \text{ ms}$ platící pro hodnotu vlnového odporu TV jednokolejné trati 258Ω na její dvojnásobek, tj. na hodnotu

$$\tau = \frac{0,026}{129} = 0,20 \text{ ms}$$

odpovídající vlnovému odporu 129Ω dvou paralelně napájených TV dvoukolejného úseku.

V provozním stavu napájení se však častěji používá **oddělené napájení TV dvoukolejné trati**, tedy bez příčného propojení obou stop TV. V takovém případě vzniká otázka, jak se při zkratu na jedné stopě TV (v dalším značené jako **TV1**) projeví vliv druhé stopy TV (v dalším značené **TV2**), jsou-li obě stopy TV napájeny ze stejného trakčního transformátoru. Délky obou úseků TV předpokládáme stejné.

Z hlediska šíření rázové napěťové vlny v této napájecí soustavě lze konstatovat:

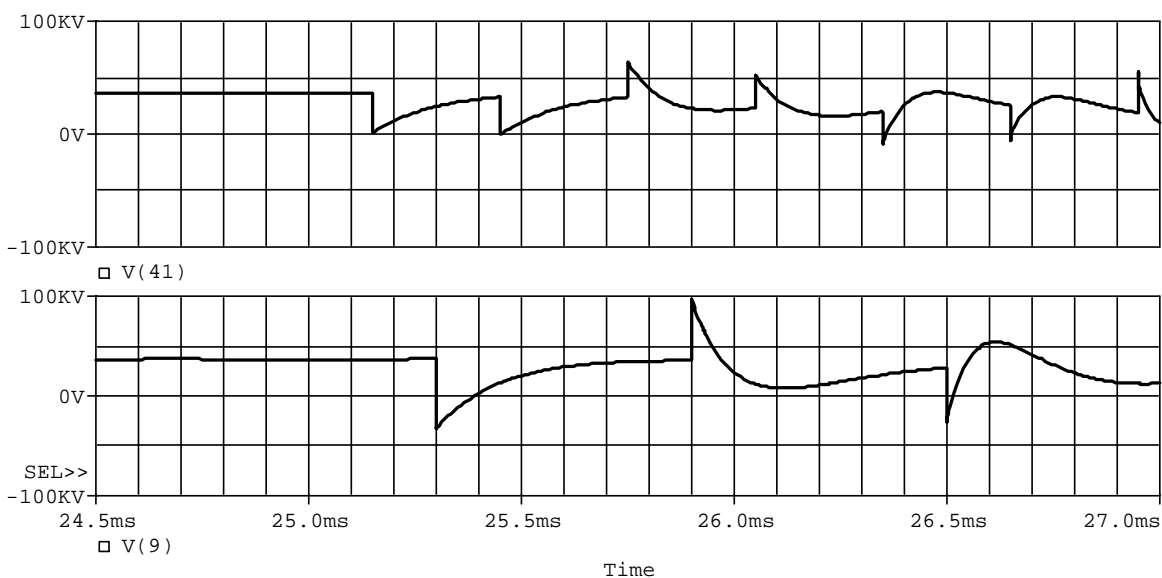
- od okamžiku zkratu na **TV1** se tento úsek TV jeví jako zkratovaný,
- úsek **TV2** zůstává po celou sledovanou dobu jako otevřený,
- místem styku obou těchto úseků TV je TNS, která se zde projeví jako velká příčná induktivní reaktance představovaná náhradní indukčností trakčního transformátoru a k ní paralelně připojenými náhradními indukčnostmi obou LC větví FKZ a větve dekompenzační, podobně jako v případě minulém,
- toto místo styku obou TV má však pro rázovou napěťovou vlnu impedanci značně převyšující vlnový odpor TV, který činí 258Ω a nevytvoří tedy místo s podstatným lomem vlnového odporu a neuplatní se vytvořením závažného odrazu této vlny,
- jedinými místy s možností vytvoření podstatného odrazu rázové vlny zůstává tedy

zkratovaný konec úseku **TV1** a otevřený konec úseku **TV2**.

Na **obrázku 3** je vynesena časový průběh dvou napětí, a to:

- napětí značené (**V41**), sejmuté na vývodu z TNS, tedy na vstupu do zkratovaného úseku **TV1** i úseku **TV2**,
- napětí značené (**V9**), sejmuté na otevřeném konci úseku **TV2**.

Obrázek 3



Z **obrázku 3** vyplývají následující poznatky:

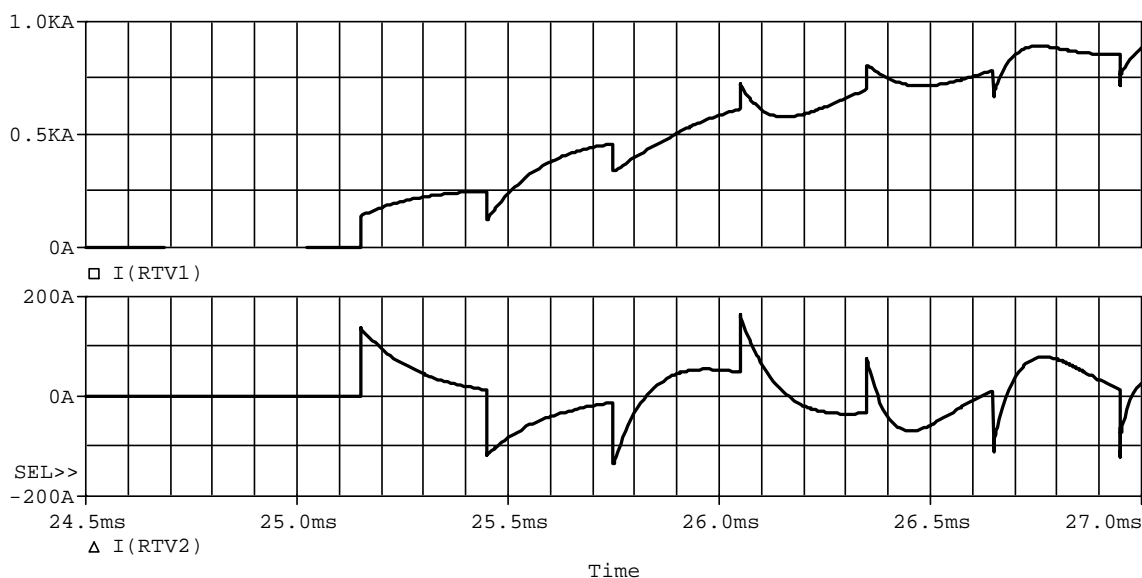
- z průběhu veličiny (**V41**) je patrné, že rázová vlna (s hodnotou **-38891 V**) způsobená zkratem na konci úseku **TV1** dospěje do TNS poprvé za **150 μs** od okamžiku zkratu (vzniklého v čase **25,0 ms**),
- v TNS se však neodrazí, jak je patrné ve srovnání s **obrázkem 2**, a projde dále do úseku **TV2**, kde za dalších **150 μs** (tedy v době **25,30 ms** od vzniku zkratu) narazí na jeho otevřený konec, kde se odrazí se stejnou polaritou i velikostí, čímž vznikne odražená vlna s vrcholovou hodnotou **-77782 V**,
- tato vlna dosáhne TNS za dalších **150 μs** v době **25,45 ms**, kde se však připočítá k vrcholové hodnotě trakčního napětí **38891 V**, a po tomto okamžiku se směrem ke zkratovanému konci úseku **TV1** již šíří vlna s vrcholovou hodnotou **-38891 V**,
- tato vlna po dalších **150 μs** dosáhne zkratovaný konec úseku **TV1**, kde se odrazí s opačnou polaritou a vznikne tak vlna s vrcholovou hodnotou **38891 V**,
- v okamžiku **25,75 ms** tato nová vlna dojde k TNS, kde se připočte k okamžité hodnotě trakčního napětí a výsledkem je vrcholová hodnota teoreticky (bez respektování útlumu na TV) **77782 V**, tedy dvojnásobek amplitudy trakčního napětí (odečet ze simulace dává cca **64 kV**),
- v okamžiku **25,90 ms** dorazí tato vlna na otevřený konec úseku **TV2**, kde se odrazí se stejnou velikostí i polaritou, avšak připočte se k okamžité hodnotě trakčního napětí, takže

výsledná vrcholová hodnota na otevřeném konci úseku **TV2** bude činit (při zanedbání útlumu na TV) **116,7 kV**, tedy trojnásobek amplitudy trakčního napětí,

- v dalších časových úsecích se postup vln opakuje, zde však již je nutno respektovat útlum rázové vlny, a proto již nelze očekávat překročení výše uvedených vrcholových hodnot napětí.

Nyní se ještě podíváme na časové průběhy proudů v obou úsecích TV. Jsou vyneseny na **obrázku 4**.

Obrázek 4



Z **obrázku 4** jsou patrné následující poznatky:

- časové průběhy proudů vtékajících do obou úseků TV začínají v okamžiku **25,15 ms**, tedy v okamžiku, kdy rázová napěťová vlna došla úsekem **TV1** k TNS,
- okamžité hodnoty obou proudů jsou v tomto okamžiku prakticky stejné a činí:
 - u úseku **TV1** **141 A**,
 - u úseku **TV2** **136 A**,
- zatím co proud ve zkratovaném úseku **TV1** s časem narůstá, jak bylo ověřeno výše, proud ve druhém úseku **TV2** vykazuje nepodstatné špičkové hodnoty (v čase **26,05 ms** vznikla vrcholová hodnota **163 A**).

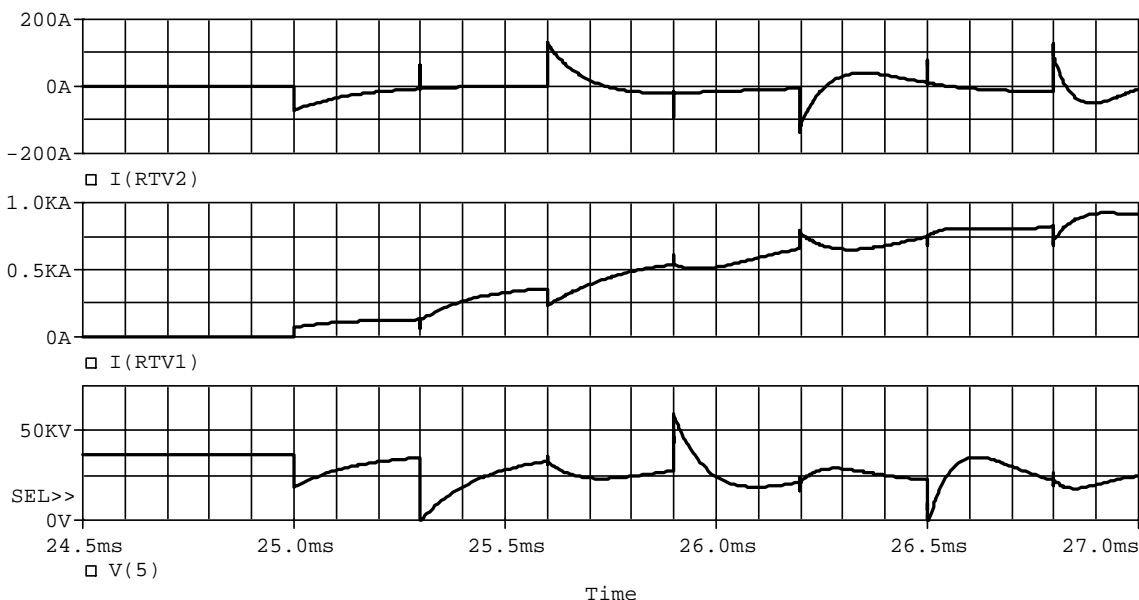
Závěrem ještě posoudíme stejný stav, kdy jsou z trakčního transformátoru napájeny dva úseky TV, značené **TV1** a **TV2**. Avšak na rozdíl od předchozí části této kapitoly, kde se analyzoval stav při vzniku zkratu na TV původně pod trakčním napětím, budeme předpokládat, že:

- úsek **TV1** byl původně bez trakčního napětí a má na svém konci připraven zkrat a v daném okamžiku je k němu připojeno trakční napětí,
- úsek **TV2** má stále připojeno trakční napětí, není pochopitelně trakčně zatížen.

Elektrické poměry v soustavě ilustruje **obrázek 5**, kde jsou uvedeny časové průběhy:

- proudu, který vchází do **TV2**, tedy do TV zůstávajícího stále v provozním stavu,

- proudu, který začne procházet do **TV1** k jeho zkratovanému konci,
- napětí na výstupu z TNS, značené **V(5)**.

Obrázek 5


K tomuto obrázku lze konstatovat, že napětí na výstupu TNS nedosahuje nebezpečné hodnoty. Zajímavé je, že do úseku **TV2**, který je v provozním stavu, protéká těsně po zapnutí trakčního napětí do předem zkratovaného úseku **TV1** proud, jehož časový průběh je značně ovlivněn deformací časového průběhu výstupního napětí TNS. Ve všech třech průbězích se opět uplatňuje časový úsek **300 μs** potřebný pro dva průchody rázové napěťové vlny délkou obou úseků TV.

2.4 – Poměry při vypínání zkratu napaječovým vypínačem

Předpokládejme, že elektrické poměry po vzniku zkratu v napájeném úseku, popsané v předchozích kapitolách, dosáhly ustáleného stavu.

Pak je závažné, jak ovlivní funkce napaječového vypínače, který má vypnout vzniklý zkratový proud, napěťové poměry na přípojnicí 27 kV TNS a tedy i na vstupní svorce snížovacího transformátoru a na vstupu LC větví FKZ.

V dalším rozboru budeme předpokládat, že mezi hlavními kontakty napaječového vypínače dojde během jeho funkce ke zvýšení hodnoty odporu obloukové dráhy, a to v případě použitého SW z hodnoty $0,01 \Omega$ na hodnotu $1 M\Omega$. Časový interval této změny lze v použitém SW libovolně nastavit.

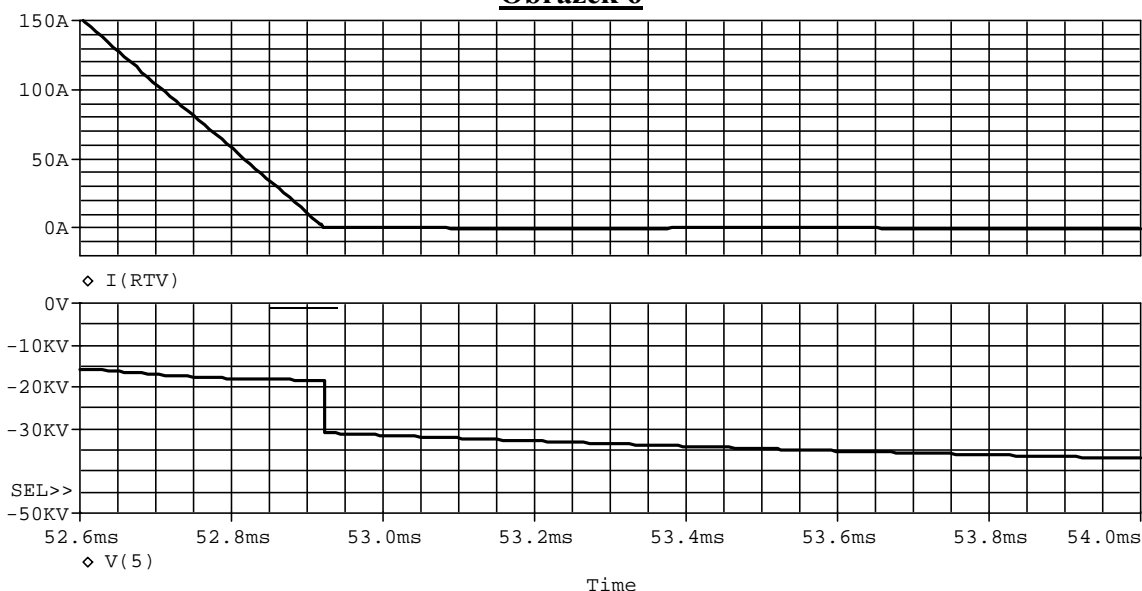
Délka tohoto intervalu bude pochopitelně záviset na konstrukci a na proudovém dimenzování napaječového vypínače a především jeho zhášedla. Podle získaných poznatků závisí délka tohoto intervalu na schopnosti zhášedla rekombinovat ionty vzniklé elektrickým obloukem a tím obnovit elektrickou pevnost prostoru mezi kontakty zhášedla. Pro ilustraci poměrů byly nastaveny dva intervaly, a to **0,5 ms** a **1 ms**, protože podrobnější údaje nemá zpracovatel k dispozici. Jedna ze zatím nedoložených informací ukazuje, že délka tohoto intervalu neklesne u obvyklých zhášedel pod 3 ms. Pro náhradní indukčnost trakčního transformátoru vezmeme obvyklou hodnotu 26 mH.

Dalším údajem, který má bezprostřední vliv na hodnotu vzniklého přepětí, je okamžitá hodnota proudu, který je zhášedlem „přetržen“. Čím větší je hodnota tohoto proudu, tím větší je i hodnota vznikajícího přepětí. Prospekt firmy Siemens garantuje, že zhášedlo nepřeruší proud s okamžitou hodnotou větší než 5 A. Pro zhášedla jiných výrobců tento údaj zpracovatel k dispozici nemá. Srovnávací měření TÚČD však ukázala, že reálná hodnota „trhaného“ proudu je v některých případech vyšší.

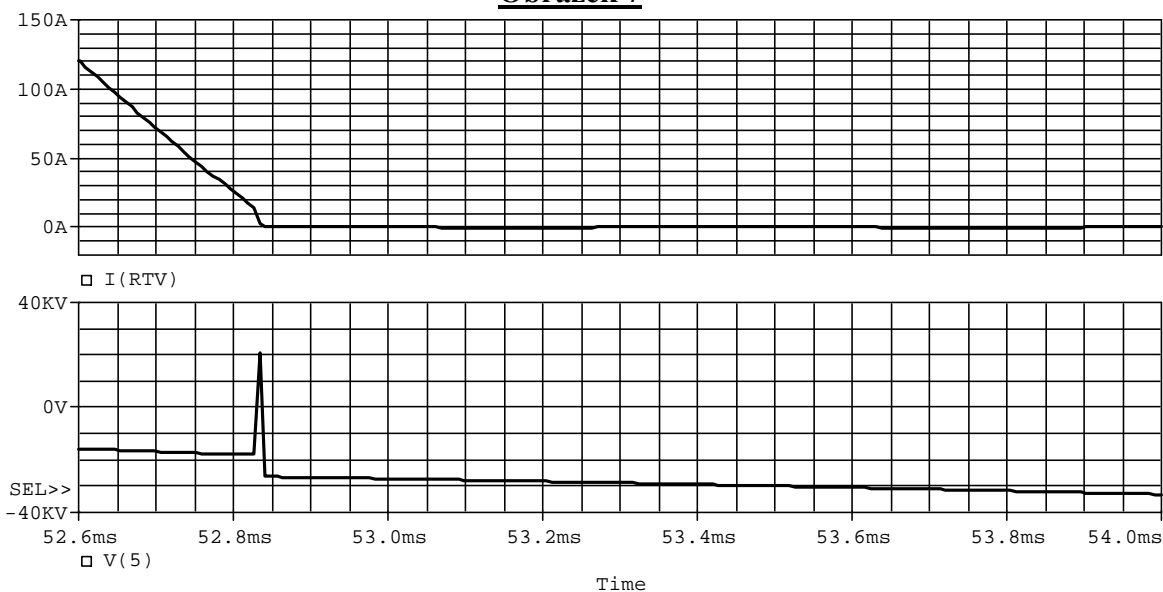
V dalším rozboru ukážeme časové průběhy vzniklé při přerušení vypínaného proudu v jeho **přirozené nule** a přerušování proudu v přibližně trojnásobné okamžité hodnotě firmou Siemens garantované hodnoty 5 A, tedy cca **15 A**.

Obrázek 6 ilustruje optimální stav, kdy je přerušován proud **ve své přirozené nule**. Zde je volena extrémně malá hodnota časového intervalu změny odporu vypínače **1 μs**, která by za jiných hodnot přerušovaného proudu způsobila přepětí několika stovek kV. V horní části obrázku je závěrečná část časového průběhu vypínaného proudu značeného jako **I(RTV)**, ve spodní části obrázku je část časového průběhu napětí na přípojnici 27 kV, značeného **V(5)**. Z obrázku je patrné, že v tomto optimálním stavu se v napětí přípojnice 27 kV neobjeví žádné superponované přepětí.

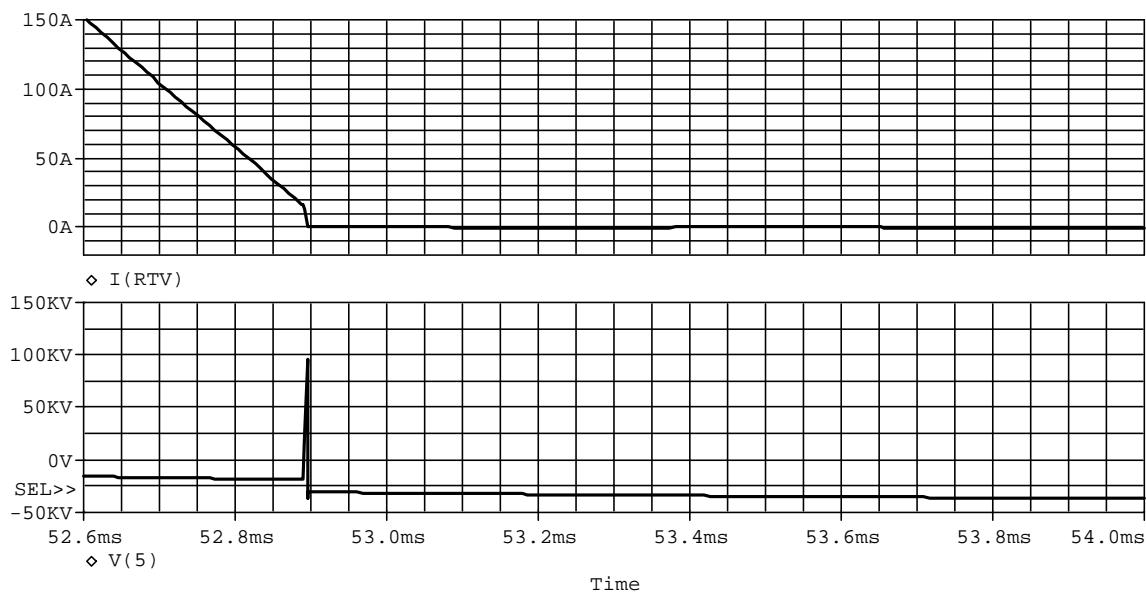
Obrázek 6



Obrázek 7 ilustruje reálnější poměry, kdy je přerušován zkratový proud s vrcholovou hodnotou cca 1,5 kA v okamžiku, kdy jeho časový průběh klesne na **15 A**. Pro časový interval přerušování vypínaného proudu byla vzata hodnota **1 ms**. Časové průběhy jsou značeny stejně jako na prvním obrázku. Z průběhu napětí **V(5)** je patrné, že okamžitá hodnota napětí na přípojnici dosahuje cca **20 kV**.

Obrázek 7


Obrázek 8 doplňuje předchozí obrázek tím, že za jinak stejných podmínek, to jest při „trhaném“ proudu 15 A, je zkrácen časový interval funkce vypínače na polovinu, tj. na 0,5 ms. Z časového průběhu napětí $V(5)$ je patrné, že okamžitá hodnota napětí na přípojnici 27 kV dosahuje přibližně 100 kV.

Obrázek 8


Z uvedených ilustračních časových průběhů vyplývá, že na hodnotu přepětí vznikajícího během vypínání zkratového proudu na přípojnici 27 kV má bezprostřední vliv:

- časový interval zhášení elektrického oblouku ve zhášedle s tím, že s nárůstem délky tohoto intervalu klesá hodnota vznikajícího přepětí,
- okamžitá hodnota proudu, který dané zhášedlo „trhá“, když velikost vznikajícího přepětí narůstá za jinak stejných podmínek s hodnotou „trhaného“ proudu.

Bylo by vhodné uvedené parametry dále sledovat měřením za reálných podmínek, nebo je získat od výrobce zhášedla.

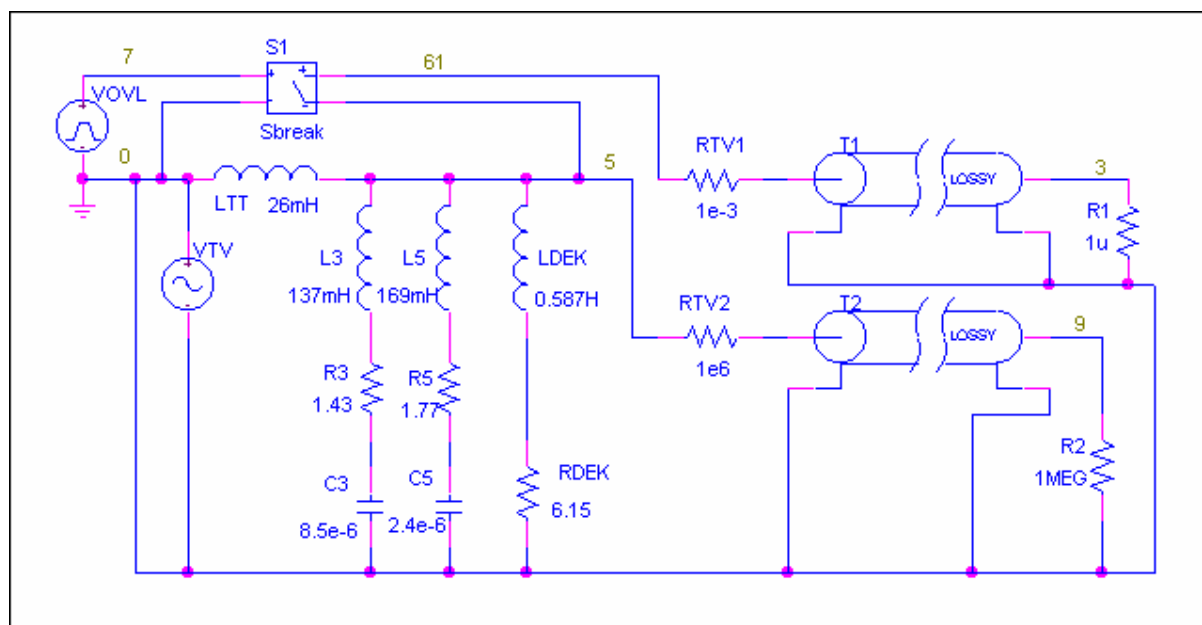
Závislost napětí přípojnice 27 kV na přítomnosti či odpojení FKZ se podle poznatků získaných simulací nepotvrdila.

Příloha A

V této příloze jsou uvedena dvě schémata pro simulace zkratů na konci TV.

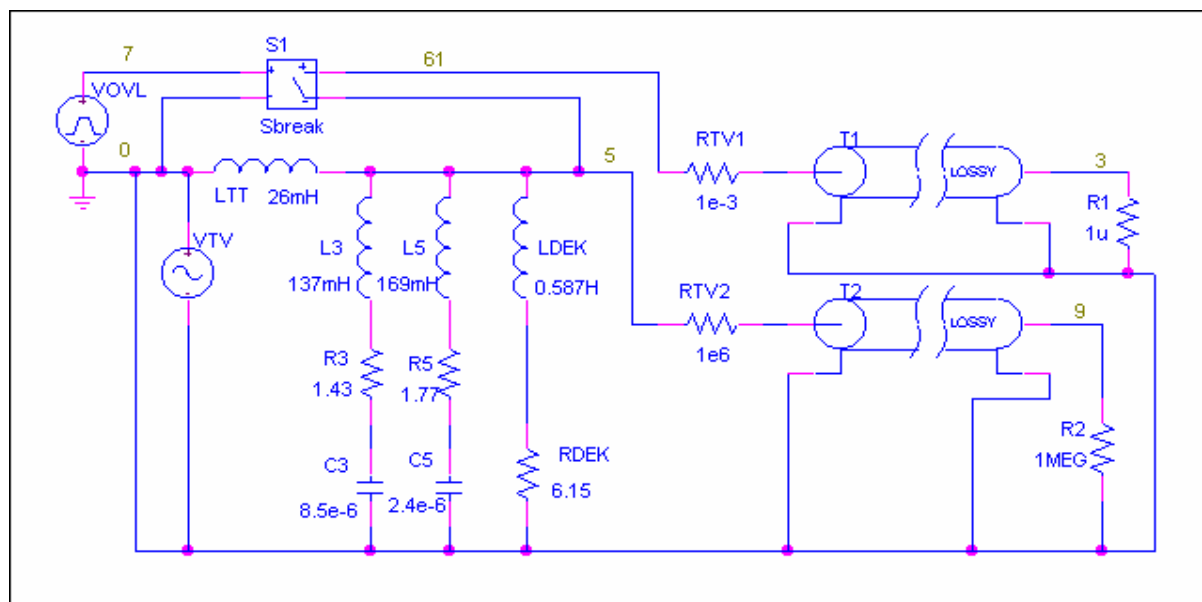
Na **obrázku PA-1** je schéma, popisující simulační obvod pro kapitolu týkající se připnutí trakčního napětí k TV s předem připraveným zkratem. Schéma je společné jak pro respektování jedné stopy TV, tak i dvou stop TV. Varianta s pouze jednou stopou TV předpokládá rezistor $RTV2 = 1\text{ M}\Omega$, varianta s oběma stopami TV pak vyžaduje nastavení tohoto rezistoru na $RVT2 = 1\text{ m}\Omega$.

Obrázek PA-1



Podobně na **obrázku PA-2** je znázorněno schéma pro simulaci zkratu na konci TV, ke kterému bylo před zkratem připojeno trakční napětí. Přepnutí mezi stavem s jedním TV či se dvěma TV lze realizovat podobně jako na **obrázku PA-1** změnou nastavení rezistoru **RTV2**.

Obrázek PA-2



Příloha B

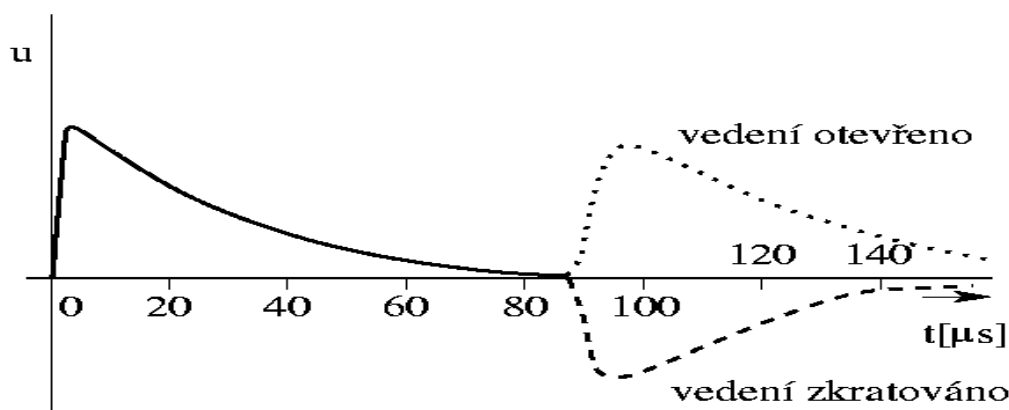
Jev odrazu rázové napěťové vlny je vázán následujícími zákony:

- Homogenní „elektricky dlouhé“ vedení, které je na svém konci zkratováno, odráží na svém konci došlou rázovou napěťovou vlnu se stejnou vrcholovou hodnotou, avšak s opačnou polaritou.
- Totéž vedení, které je na svém konci otevřeno, odráží na svém konci došlou rázovou napěťovou vlnu se stejnou vrcholovou hodnotou a se stejnou polaritou.
- Hodnotu odporu v místě zkratu na konci homogenního „elektricky dlouhého“ vedení je nutno hodnotit vzhledem k hodnotě vlnového odporu tohoto vedení $Z_{TV,0}$.

V případě jedné stopy TV jednofázové soustavy přichází v úvahu porovnání s hodnotou $Z_{TV,AC,0} = 258 \Omega$, pro TV jedné stopy stejnosměrné soustavy (se zesilovacím vedením) s hodnotou $Z_{TV,DC,0} = 190 \Omega$.

Obrázek PB-1 je kopií obrázku 2.21 na straně 29 [6] a uvádí překreslený oscilogram běhu rázové napěťové vlny po TV ŽZO, byl-li jeho konec otevřen či zkratován.

Obrázek PB-1



Závěry

Výsledky simulační analýzy důsledků zkratu trakčního vedení jednofázové soustavy 25 kV, 50 Hz na napětí na výstupu z trakční napájecí stanice umožňují vyslovit následující závěry:

1. Elektrické hodnoty, především napětí na výstupu z trakční napájecí stanice, závisí na podmínkách vzniku zkratu na trakčním vedení. Vznik sledovaného zkratu se předpokládá vždy v maximu sinusovky trakčního napětí. Trakční odběr se nepředpokládá.
2. Bylo zjištěno, že z hlediska napětí na výstupu z trakční napájecí stanice existuje zásadní rozdíl, zda zkrat vznikl na trakčním vedení předem zkratovaném, které bylo připojeno napaječovým vypínačem k trakčnímu napětí, nebo na trakčním vedení, které bylo již před zkratem připojeno na trakční napětí (což je stav vyskytující se v provozních podmínkách) a zkrat byl vytvořen na vzdáleném bodě napájeného úseku TV.
3. Z hlediska napětíových poměrů na výstupu z trakční napájecí stanice způsobí první případ vzniku zkratu objevení se rázové napětíové vlny s vrcholovou hodnotou nejvýše dvojnásobku amplitudy trakčního napětí (až 77,8 kV). Toto zvýšení vrcholové hodnoty je dáno odrazem rázové napětíové vlny na zkratovaném konci trakčního vedení.
4. Druhý případ vzniku zkratu způsobí na výstupu z trakční napájecí stanice objevení se rázové napětíové vlny s vrcholovou hodnotou, která může teoreticky dosáhnout trojnásobku amplitudy trakčního napětí (až 116,7 kV). Vrcholová hodnota rázové napětíové vlny se zvětšuje až na trojnásobek vícenásobnými odrazy jak na zkratovaném konci trakčního vedení, tak i na vstupní impedanci trakční napájecí stanice, a nastává s jistým zpožděním od okamžiku vzniku zkratu. Po dalších odrazech však již vrcholová hodnota opakované rázové vlny klesá útlumem na ohmickém odporu trakčního vedení. Rázová napětíová vlna má tvar krátkého napětíového impulsu s dobou trvání řádu desítek mikrosekund.
5. Z obrázků je patrné, že vznik uvedené vrcholové hodnoty rázové napětíové vlny je v případě, že ke zkratu došlo na trakčním vedení připojeném předem na trakční napětí, způsoben též odrazem této vlny na impedanci trakční napájecí stanice, mající indukční charakter. Porovnávací simulace prokázaly, že připojení či rozsah FKZ nemá podstatný vliv na hodnotu impedance trakční napájecí stanice a tedy ani na vrcholovou hodnotu

rázové napět'ové vlny. V každém případě však indukční charakter impedance trakční napájecí stanice pro časový obor desítek mikrosekund působí při odrazu rázové vlny napětí jako vedení otevřené.

6. Podstatný vliv na vrcholovou hodnotu rázové napět'ové vlny vzniklé zkratem na trakčním vedení připojeném předem na trakční napětí má však způsob napájení dalších stop trakčního vedení připojených na daný trakční transformátor. Uvedený trojnásobek amplitudy trakčního napětí se může objevit na výstupu trakční napájecí stanice v případě napájení z daného trakčního transformátoru jen jedné stopy trakčního vedení (napájení „L“, například jednokolejné trati), nebo dvou stop trakčního vedení příčně propojených v některém bodě své délky, kdy při zkratu na takto propojených stopách trakčního vedení vypnou oba napaječové vypínače.
7. Podstatně příznivější situace z hlediska napětí na výstupu z trakční napájecí stanice nastane, vznikne-li zkrat na jedné stopě trakčního vedení připojeného předem na trakční napětí, která je však připojena na trakční transformátor, který současně napájí ještě druhou nebo další stopy trakčního vedení, na které však ke zkratu nedojde. V tomto případě je paralelně k impedanci trakční napájecí stanice připojena vstupní impedance další stopy trakčního vedení, daná jeho vlnovým odporem s hodnotou značně menší než je hodnota náhradní reaktance celé trakční napájecí stanice pro daný časový obor řádu desítek mikrosekund. V tomto případě nevytváří náhradní reaktance TNS bod s výraznou změnou vlnového odporu a k odrazu rázové napět'ové vlny proto nedojde.
8. Uvedené body závěru nijak neovlivňují konvenční postup výpočtu poměrů při zkratu na trakčním vedení, například výpočty zkratových proudů, z hlediska jejich složky základní harmonické 50 Hz a pro nastavení příslušných nadproudových ochran napaječových vypínačů.
9. Předložená analýza má za cíl obecně osvětlit napět'ové poměry na výstupu trakční napájecí stanice při zkratu na trakčním vedení v závislosti na konfiguraci celé napájecí soustavy. Získané poznatky jsou ilustrovány pomocí parametrů trakčního vedení zvolených především z hlediska názornosti výkladu (názorná hodnota činitele **TD**). Mohou se tedy lišit od parametrů konkrétního trakčního vedení, které bylo napájeno v případech havárií. Odvozené závěry mají však obecnou platnost.
10. Pokud se týče poměrů při vypínání zkratu na TV napaječovým vypínačem bylo zjištěno, že zvýšení napětí na přípojnicí 27 kV závisí jak na rychlosti rekombinace iontů ve zhášené, tedy na délce hoření oblouku mezi kontakty zhášená dané jeho konstrukcí, tak i na okamžité hodnotě proudu přerušovaného zhášením. Pokud se zkratový proud přerušuje v blízkém okolí jeho přirozené nuly, pak k nárůstu napětí na přípojnicí 27 kV nedojde.

Literatura

- [1] Gert R.: Provozní přepětí v elektrizačních soustavách, SNTL, 1964
- [2] Bewley L.V.: Traveling waves on transmission systems, Second edition, 1988, General Electric Company
- [3] Greenwood A.. Electrical transients in power systems, New York, 1971
- [4] Burtscher H., Lekkas G.: Labormodel zur Untersuchung der Ausbreitung und Supperposition von Oberschwingungen im Bahnnetz, ORE A 122, 1977
- [5] Nejman L.R., Kalantarov P.L.: Teoretičeskíe osnovy elektrotechniki, II., Moskva 1954
- [6] Hlava K.: Elektromagnetická kompatibilita (EMC) drážních zařízení, skriptum Univerzity Pardubice, Dopravní fakulty Jana Pernera, 2004
- [7] Trnka Zd.: Teoretická elektrotechnika, Praha 1972

V Praze, červen 2006

Lektoroval: Prof. Ing. Vladimír Schejbal, CSc.,
vedoucí KEEZ DFJP UPa