

Radovan Doleček¹

Simulace přechodných stavů při zkratu na trakčním vedení

Klíčová slova: *přívodní vedení 110 kV, trakční napájecí stanice, filtračně kompenzační zařízení, trakční vedení, model, zkrat, vedení.*

1 Úvod

Pro řešení přechodných jevů při zkratu na trakčním vedení u systému AC 25 kV, 50 Hz je vhodné využít počítačových simulací z důvodu nemožnosti sestavení skutečného fyzikálního modelu pro sledované veličiny. Pro simulace byl zvolen program PSpice představující univerzální nástroj pro zkoumání elektrických obvodů. Tento program využívá jako vstupní data modely jednotlivých prvků elektrického obvodu, tj. prvků trakčního obvodu, ze kterých jsou sestavena náhradní schémata zapojení trakčního obvodu.

2 Metoda řešení

Trakční napájecí systém AC 25 kV, 50 Hz tvořící trakční obvod obr.1, který se skládá z:

- přívodního vedení 110 kV
- trakční napájecí stanice (TNS) s filtračně kompenzačním zařízením (FKZ)
- trakčního vedení (TV)
- elektrických hnacích vozidel (HV)



Obr.1 Trakční obvod AC 25 kV, 50 Hz

Pro simulace je nutno vytvořit modely prvků tohoto trakčního obvodu.

2.1 Model přívodního vedení 110 kV

Přívodní vedení 110 kV představuje vzdušné trojfázové vedení s určitým zkratovým výkonem. Ten je obvykle podstatně větší než je trakční výkon TNS a lze tedy v tomto bodě napájení předpokládat, že vstupní impedance rozvodny

¹ Doc. Ing. Radovan DOLEČEK, Ph.D.; narozen 1971; Univerzita Pardubice, DFJP, obor Dopravní prostředky a infrastruktura, specializace elektrotechnika, se sídlem v Pardubicích; současné zaměření: EMC, výkonová elektrotechnika, elektrické pohony; pracoviště: Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě, Studentská 95, 532 10 Pardubice, e-mail: radovan.dolecek@upce.cz

dodavatele elektrické energie, napájející přívodní vedení 110 kV, je pro kmitočty až do 2 kHz zanedbatelná, tj. tvoří pro tyto kmitočty zkrat. Z hlediska harmonických se tedy jedná o vedení jednostranně zkratované. Pro sledované výpočty je výhodné respektovat přívodní vedení pouze s indukčností L_{110} a kapacitu C_{110} , tj. zanedbat jeho svod G_{110} a odpor R_{110} . Tomuto zjednodušení nahrává skutečnost, že uvedené měrné parametry přívodního vedení jsou značně závislé na jeho konstrukci a použitých materiálech [1]. Kapacitu C_{110} je možné při výpočtech zanedbat aniž by došlo k velké chybě. Model přívodního vedení 110 kV je reprezentován jednou podélnou indukčností s hodnotou například $L_{110} \cong 2 \text{ mH}$.

2.2 Model trakčního vedení

TV lze považovat za vedení elektricky dlouhé [2], pro které lze sestavit model ztrátového homogenního vedení s parametry, kterými jsou: podélný odpor R_{TV} , podélná indukčnost L_{TV} , příčná kapacita C_{TV} , příčný svod G_{TV} . V případě TV se vzhledem k jeho velmi dobré izolaci při výpočtech zanedbává měrný svod G_{TV} trolejového vedení a s ním spojených dalších vzdušných vedení vůči zpětnému vedení. Tato možnost je dána vlastnostmi dnes používaných dřívkových izolátorů, takže jejich svodový odpor dosahuje velmi vysokých hodnot a umožňuje uvedené zjednodušení [3]. Pro sledované výpočty se uplatní R_{TV}, L_{TV} , které jsou frekvenčně závislé. Proud procházející vodičem je vytlačován na jeho povrch (tzv. skin efekt) se zvyšující se frekvencí, následkem toho klesá užitečný, tj. efektivní, průřez vodiče a narůstá R_{TV} . Vlivem skin efektu je snižována hloubka vniku proudu do země, tím se zmenšuje plocha smyčky a L_{TV} s frekvencí klesá až po určitou frekvenci, kde potom zůstává konstantní. Příčina je dána tím, že zpětný zemní proud má s rostoucí frekvencí tendenci šířit se těsně při povrchu země, a proto se zmenšuje plocha smyčky. Kapacitu C_{TV} , která je tvořena kapacitou všech vodičů majících trakční napětí, je měřena proti zpětnému vedení tvořenému v tomto případě převážně zemí. Její číselná hodnota bude záviset především na: počtu uvedených vodičů, jejich výšce a na jejich vnějším průměru i na konfiguraci okolí elektrizované trati (tunel, zářez, násep, stanice atd.).

Model TV (S:100Cu + 50Bz) představuje ztrátové vedení s těmito parametry: rozvinutá délka TV $\ell_{TV} = 53,2 \text{ km}$, podélný odpor $R_{TV} = 0,4 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$, podélná indukčnost $L_{TV} = 1,0 \text{ mH} \cdot \text{km}^{-1}$, příčná kapacita $C_{TV} = 15 \text{ nF} \cdot \text{km}^{-1}$ (bez zesilovacího vedení), příčný svod $G_{TV} = 0,1 \text{ S} \cdot \text{km}^{-1}$. Tyto hodnoty představují nejhorší hodnoty, kterých může toto vedení nabývat, tj. získané veličiny (proudy a napětí) budou představovat nejhorší případ pro daný přechodný stav.

2.3 Model trakční napájecí stanice

TNS obsahuje dvě významná zařízení z hlediska sledovaných přechodných stavů: trakční transformátor a filtračně kompenzační zařízení.

2.3.1 Model transformátoru 110 kV / 27 kV

Trakční transformátor 110/27 kV pro oblast energetických harmonických lze nahradit jedinou podélnou indukčností L_{TT} , která je dána především jeho napětím nakrátko, doplněnou rezistorem v sérii R_{TT} představujícím činné ztráty. Vzhledem

k širokému rozsahu regulace výstupního napětí, umožněné pod výkonem přepínačem primárních odboček (2 x 8 odboček), závisí hodnota náhradní podélné indukčnosti na použité odbočce, neboť použitý převod transformátoru může být pro každý transformátor trochu odlišný v závislosti na nastavené odbočce. Proudové harmonické procházejí trakčním transformátorem ovlivněné pouze jeho použitým závitovým převodem. Model trakčního transformátoru 10 MVA například při činných ztrátách nakrátko 53 kW představuje podélná indukčnost $L_{TT} = 24 \text{ mH}$ a náhradní odpor $R_{TT} = 0,39 \Omega$.

2.3.2 Model filtračně kompenzačního zařízení

Každé FKZ je z hlediska hodnot veličin elektrických prvků a nastavení vázáno na lokální podmínky dané TNS. Pro model FKZ bylo zvoleno například zařízení s těmito hodnotami:

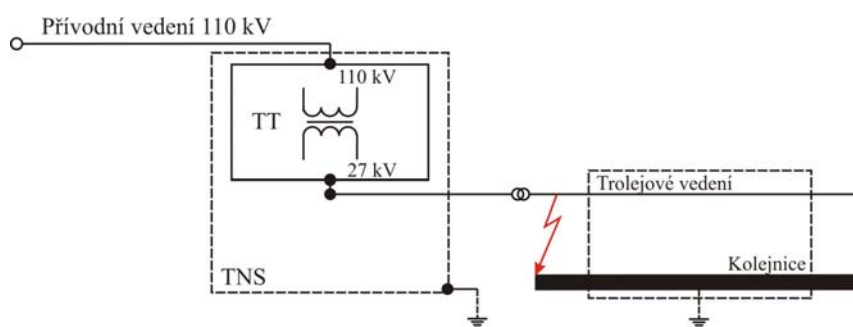
- pro LC větev 3. harmonické (2,3 Mvar): součtová kapacita kondenzátorů $C_3 = 8,5 \mu\text{F}$, indukčnost rezonanční tlumivky $L_3 = 137 \text{ mH}$.
- Pro LC větev 5. harmonické (0,6 Mvar): součtová kapacita kondenzátorů $C_5 = 2,4 \mu\text{F}$, indukčnost rezonanční tlumivky $L_5 = 169 \text{ mH}$.
- Pro dekompenzační větev (4,0 Mvar): snížovací transformátor 27 kV/6 kV, 4200 kVA, který má na svém sekundárním vinutí připojenou vzduchovou dekompenzační tlumivku $L_{DEK} = 0,596 \text{ H}$ a fázový regulátor COMPACT.

Model hnacího vozidla, tj. elektrické lokomotivy s měniči [4], není z hlediska přechodných stavů, tj. zkratů, využíván a proto se autor o tomto modelu nezmiňuje.

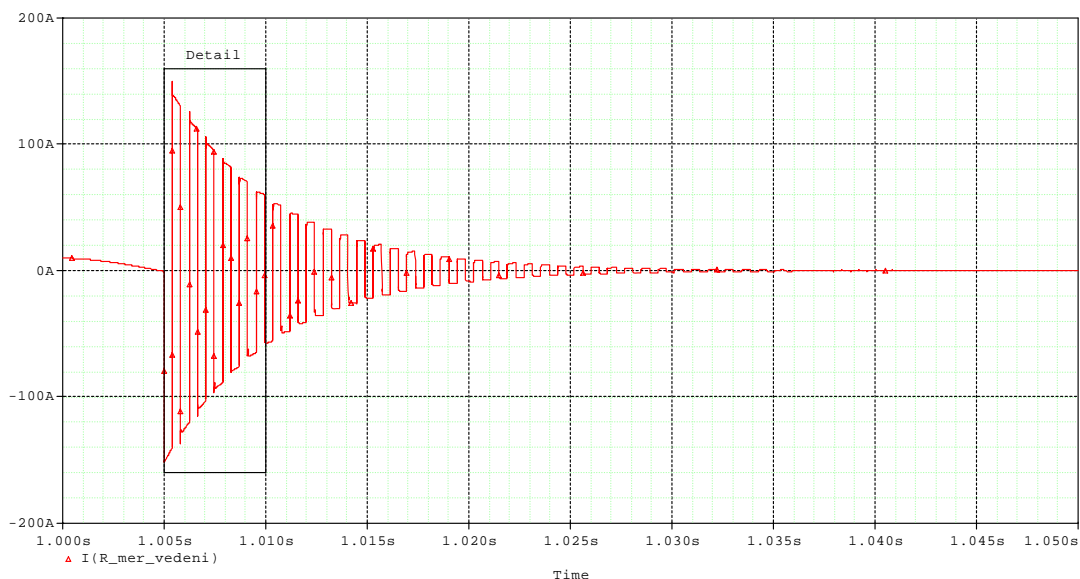
3 Řešení

Z uvedených modelů prvků trakčního obvodu (TO) jsou nyní sestavena náhradní schémata pro jednotlivé sledované přechodné stavy – zkraty. Při simulacích je okamžik zkratu nastaven v maximum trakčního napětí, tj. pro nejhorší případ.

3.1 Zkrat na TV u TNS, v TNS odpojeno FKZ



Obr.2 Schéma TO při zkratu na TV u TNS, v TNS odpojeno FKZ



Obr.3 Proud na výstupu z TNS při zkratu na TV u TNS, v TNS odpojeno FKZ

Proud v TV vychází z počáteční hodnoty cca 10 A a dosáhne první vrcholové hodnoty -145,6 A viz obr.3. Hodnota ustáleného proudu před zkratem je hodnota kapacitního proudu procházejícího TV. Podélné indukčnosti se pro jejich malou indukčnost do tohoto proudu neuplatňují a pak se tedy proud rozprostře mezi příčné kapacity. Celková kapacita TV pro zvolený napájený úsek $\ell_{TV} = 53,2$ km je $C_{TV\ell} = 7,98 \cdot 10^{-7}$ F.

Pro reaktanci platí výraz:

$$X_{TV\ell} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C_{TV\ell}} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 7,98 \cdot 10^{-7}} = 3988,85 \Omega \quad (1)$$

kde f frekvence [Hz],

$C_{TV\ell}$ celková kapacita TV pro napájený úsek [F].

Hodnota ustáleného kapacitního proudu TV je daná výrazem:

$$I_{TV\ell} = \frac{U_M}{X_{TV\ell}} = \frac{27500 \cdot \sqrt{2}}{3988,85} = 9,75 \text{ A} \quad (2)$$

kde U_M amplituda trakčního napětí [V],

$X_{TV\ell}$ reaktance TV pro napájený úsek [Ω].

Hodnota ustáleného kapacitního proudu při simulaci je reprezentovaná hodnotou cca 10 A, což je o trochu vyšší než hodnota získaná výpočtem 9,75 A.

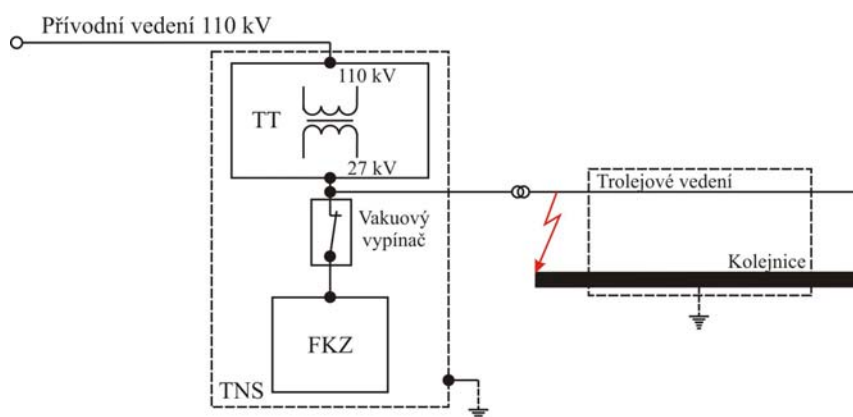
Napětí na vzdáleném konci TV vyšlo z počáteční hodnoty 38,9 kV, i zde je vidět zpoždění. Toto zpoždění je způsobeno dobou průchodu vlny TV. Příchodem vlny na konec vedení, které není nikterak přizpůsobeno a jde tedy o vedení otevřené, dochází k odrazu této vlny. Doba jednoho průchodu vlny (TD) je určena pro zvolenou délku TV $\ell_{TV} = 53,2$ km výrazem:

$$TD \cong \ell_{TV} \cdot \sqrt{L_{TV} \cdot C_{TV}} = 53,2 \cdot \sqrt{1 \cdot 10^{-3} \cdot 15 \cdot 10^{-9}} = 206 \mu\text{s} \quad (3)$$

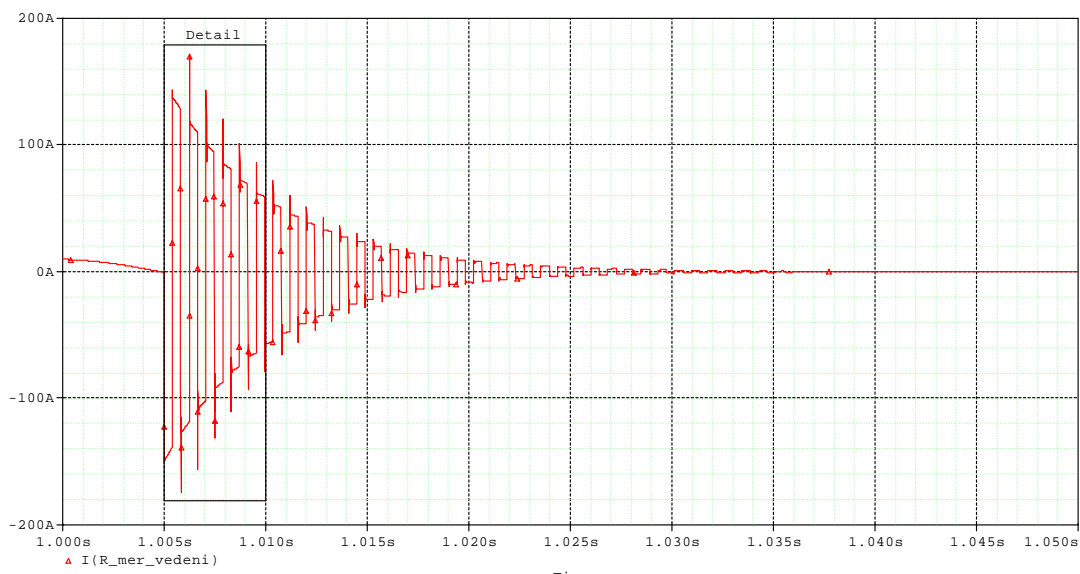
kde l_{TV} zvolená délka TV [km],
 L_{TV} měrná podélná indukčnost TV [H·km⁻¹],
 C_{TV} měrná příčná kapacita TV [F·km⁻¹].

Doba průchodu vlny TV tam a zpět vytváří zpoždění cca 412 μs a celý děj odezní za čas cca 62 ms. Ze vztahu (3) je zřejmé, že doba zpoždění je závislá na délce vedení.

3.2 Zkrat na TV u TNS, v TNS připojeno FKZ

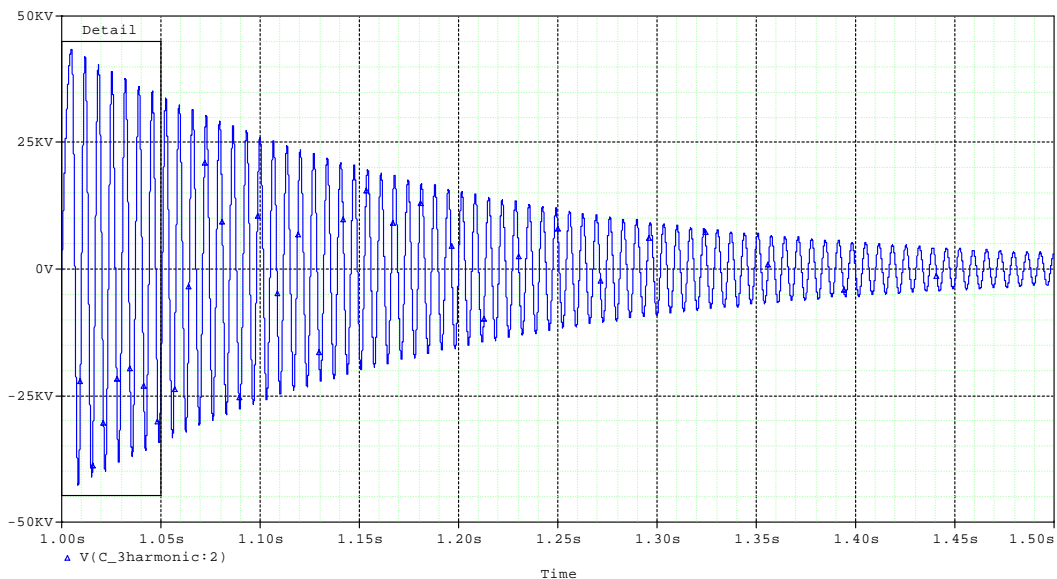


Obr.4 Schéma TO při zkratu na TV u TNS, v TNS připojeno FKZ



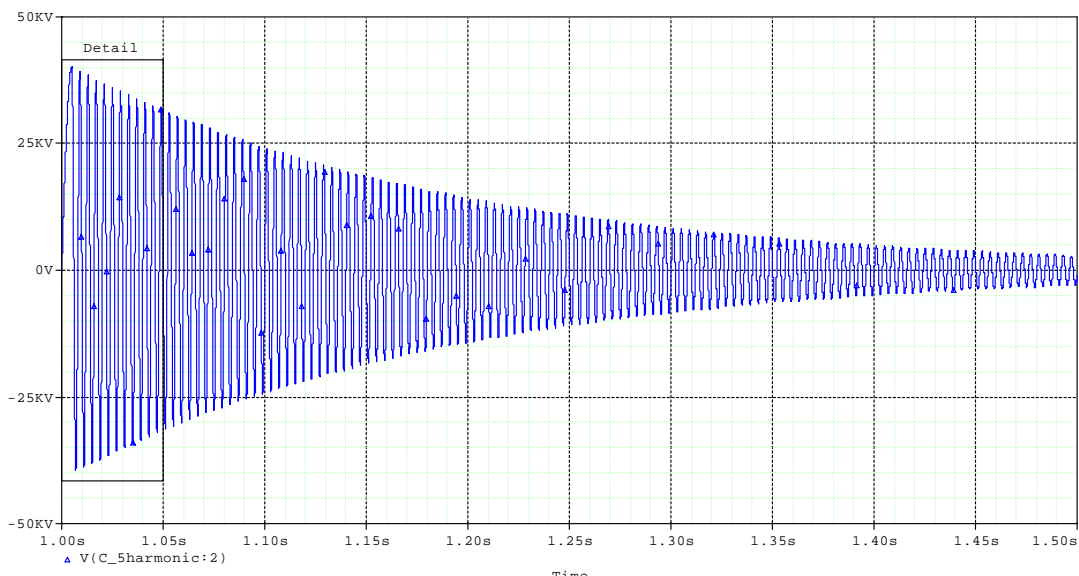
Obr.5 Proud na výstupu TNS při zkratu na TV u TNS, v TNS připojeno FKZ

Proud v TV vychází z počáteční ustálené hodnoty cca 10 A, dosáhne vrcholové hodnoty 168 A a následně klesá viz obr.5. Čas průchodu vlny TV tam a zpět, pro zvolenou délku TV $l_{TV} = 53,2$ km je cca 412 μs. Na uvedeném oscilogramu jsou kmity po strmém nárůstu způsobeny vlivem modelů v programu PSpice. Řešením pro odstranění tohoto nežádoucího vlivu je doplnění schématu zapojení kondenzátorem 10 nF paralelně k TV, který reprezentuje kapacitní svody.



Obr.6 Napětí na kondenzátorové skupině LC větve 3. harmonické při zkratu na TV u TNS, v TNS připojeno FKZ

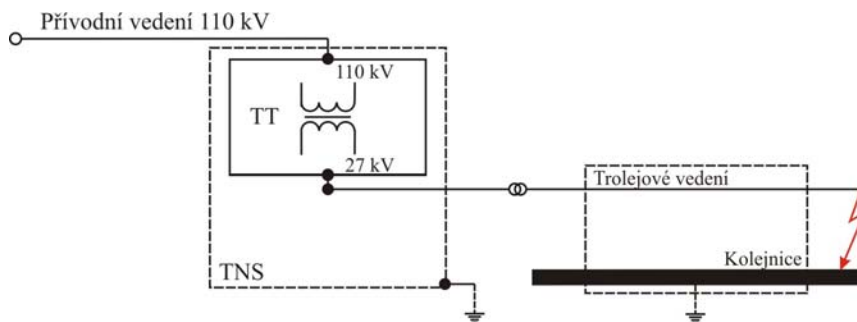
Napětí na kondenzátorové skupině LC větve 3. harmonické (viz obr.6) vychází z počáteční ustálené hodnoty 43,5 kV a dále klesá.



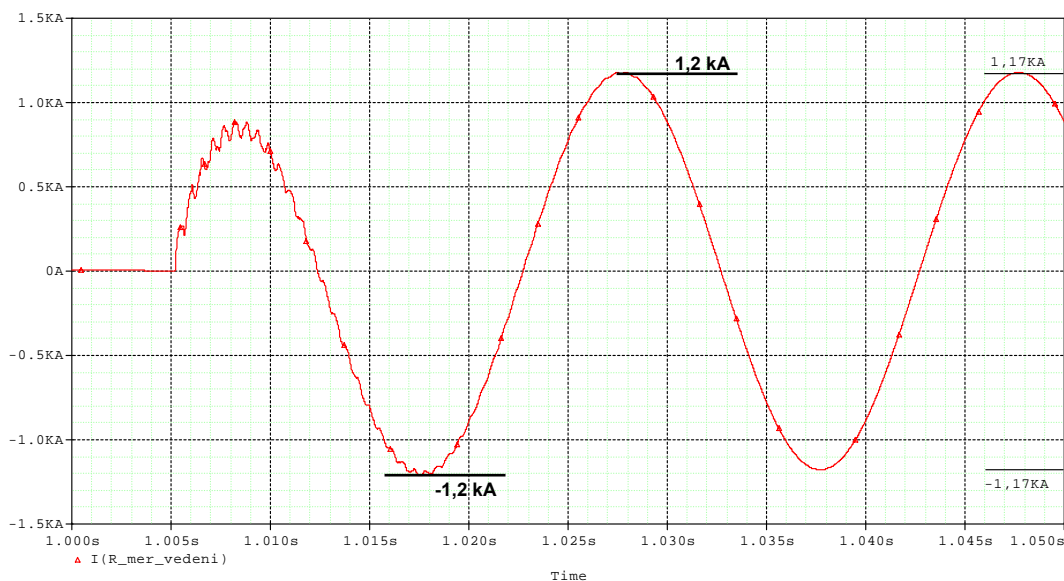
Obr.7 Napětí na kondenzátorové skupině LC větve 5. harmonické při zkratu na TV u TNS, v TNS připojeno FKZ

Napětí na kondenzátorové skupině LC větve 5. harmonické (viz obr.7) vychází z počáteční ustálené hodnoty 40,1 kV a dále klesá.

Zkrat na vzdáleném konci TV, v TNS odpojeno FKZ



Obr.8 Schéma TO při zkratu na vzdáleném konci TV, v TNS odpojeno FKZ



Obr.9 Proud na výstupu TNS při zkratu na vzdáleném konci TV, v TNS odpojeno FKZ

Proud v TV vychází z ustálené hodnoty proudu cca 10 A a dosáhne maximální vrcholové hodnoty 1,2 kA viz obr.9. Následně dochází k ustálení na hodnotu 1,17 kA. TV jako dlouhé vedení je zakončené u TNS indukčností představovanou náhradní indukčností trakčního transformátoru $L_{TT} = 24$ mH. Vnitřní impedance zdroje napětí 38,9 kV pro 50 Hz lze považovat za nulovou. Tato indukčnost se v časovém intervalu řádu zlomků μ s, tj. pro oblast MHz, jeví ve srovnání s vlnovou impedancí TV jako velmi velká impedance [5] a [6]. Vlna dopadající na otevřený konec homogenního vedení se odráží se stejnou polaritou jako má vlna původní. Naopak vlna dopadající na zkratovaný konec homogenního vedení se odráží s opačnou polaritou, než měla vlna původní. U TNS je možno předpokládat v časovém intervalu řádu zlomků ms po vzniku zkratu konstantní hodnotu napájecího napětí rovnou amplitudě trolejového napětí 38,9 kV.

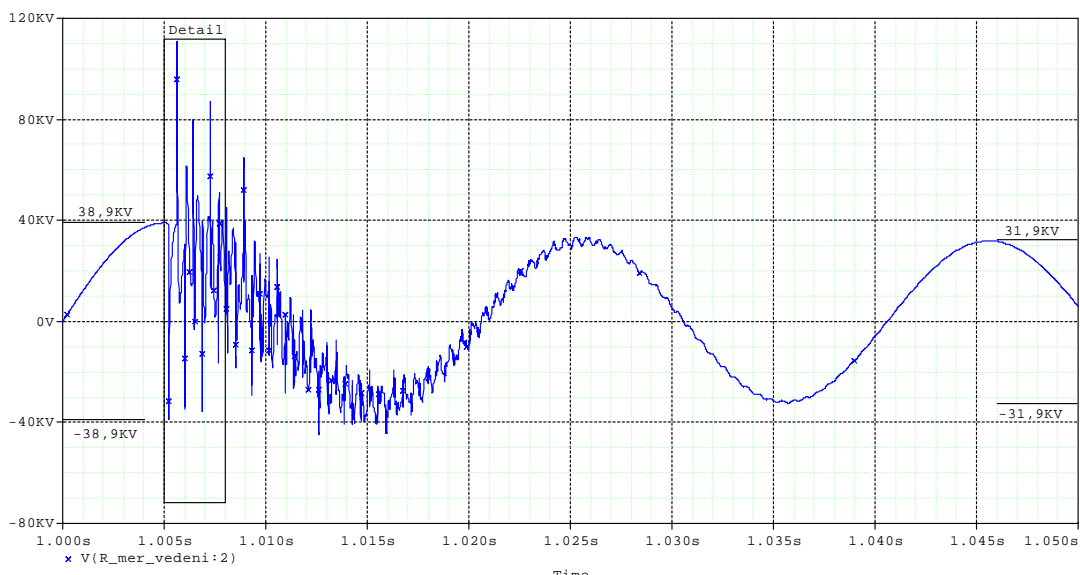
Činitel odrazu vlny podle [7] je definovaný výrazem:

$$k = \frac{Z_{0,2} - Z_{TV1}}{Z_{0,2} + Z_{TV1}} \quad [-], \quad (4)$$

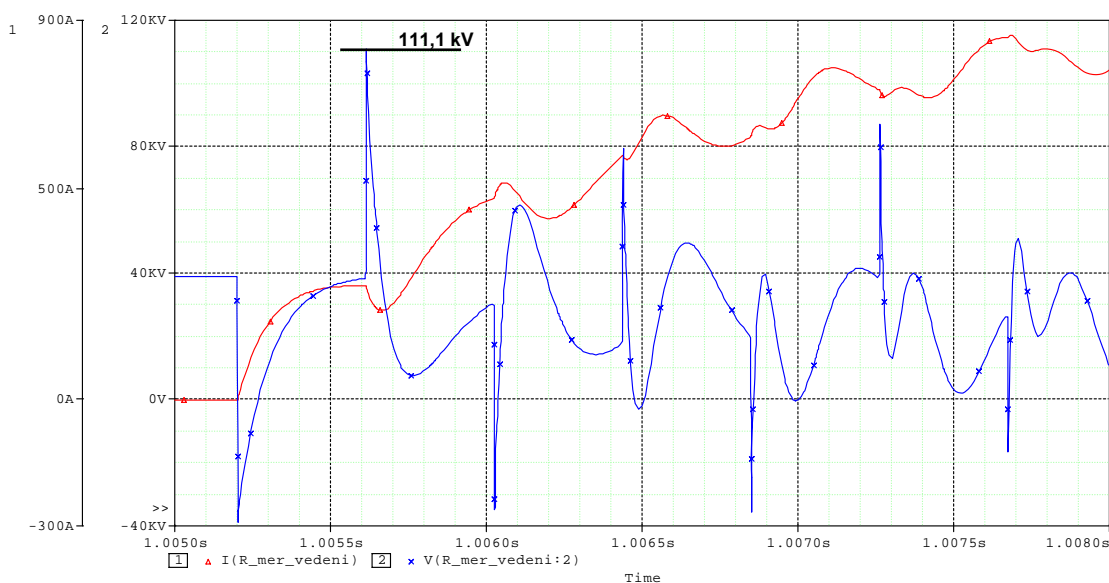
kde Z_{TV1} vlnový odpor vedení $[\Omega]$,

$Z_{0,2}$ impedance zakončovacího prvku $[\Omega]$.

Pro vedení zkratované, tj. $Z_{0,2} = 0$, dostáváme $k = -1$, tedy opačnou polaritu odražené vlny a stejnou velikost. Pro vedení otevřené, tj. $Z_{0,2} \cong \infty$, dostáváme $k = 1$, tedy stejnou polaritu odražené vlny a stejnou velikost.



Obr.10 Napětí na výstupu TNS při zkratu na vzdáleném konci TV, v TNS odpojeno FKZ

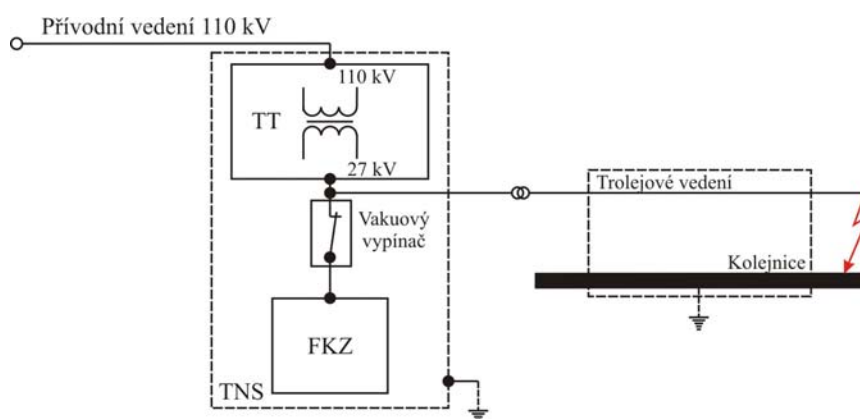


Obr.11 Detail napětí na výstupu TNS při zkratu na vzdáleném konci TV, v TNS odpojeno FKZ

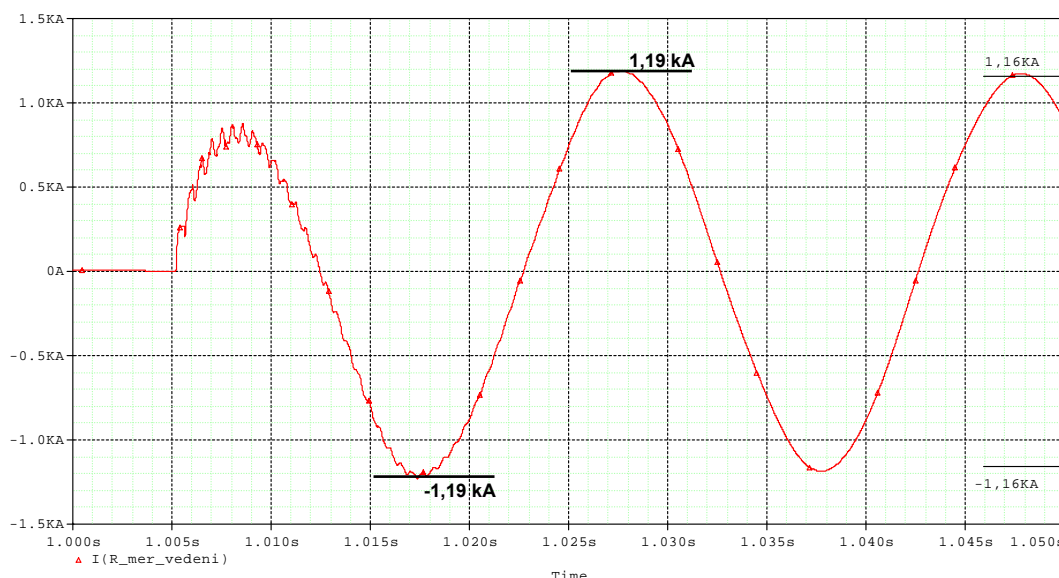
Napětí na začátku TV obr.10 a obr.11 vychází z počáteční ustálené hodnoty 38,9 kV. V čase 1,0050 s dochází ke zkratu na otevřeném konci TV. Zkrat na otevřeném konci TV si lze představit jako vznik (příchod napěťové vlny) záporného napětí cca -38,9 kV se zpožděním cca 206 μ s, tj. v čase 1,0052 s, které je sečteno s napětím TV naprázdno. Na vrcholovou hodnotu rázové vlny napětí nemá podstatný vliv délka TV, ale činné složky odporu TV. Délka TV mění hodnotu parametru TD, tj. zpoždění. Tato napěťová vlna způsobí po svém příchodu k TNS na jejím výstupu pokles napětí k nule, odrazí se však na otevřeném konci TV u TNS

(impedance TNS je pro oblast MHz vysoká) se stejnou polaritou, v daném případě zápornou, vznikne tak napěťová vlna s velikostí skoku napětí v čase cca 1,0052 s. Nyní navazuje exponenciální pokles takto vzniklé napěťové vlny až na úroveň 38,3 kV jejím odchodem od TNS, tj. čas mezi odchodem a příchodem je cca 412 μ s. Pak v čase 1,005614 s přichází napěťová vlna s opačnou polaritou o velikosti menší než 38,9 kV díky útlumu. Toto napětí, napětí od konce TV u TNS a současná hodnota napětí 38,3 kV se sčítají a výsledná hodnota podle (obr.11) dosahuje 111,1 kV, což je cca trojnásobek původní hodnoty napětí. Tento jev nastane v čase cca 620 μ s od vzniku zkratu na otevřeném konci TV.

3.3 Zkrat na vzdáleném konci TV, v TNS připojeno FKZ



Obr.12 Schéma TO při zkratu na vzdáleném konci TV, v TNS připojeno FKZ

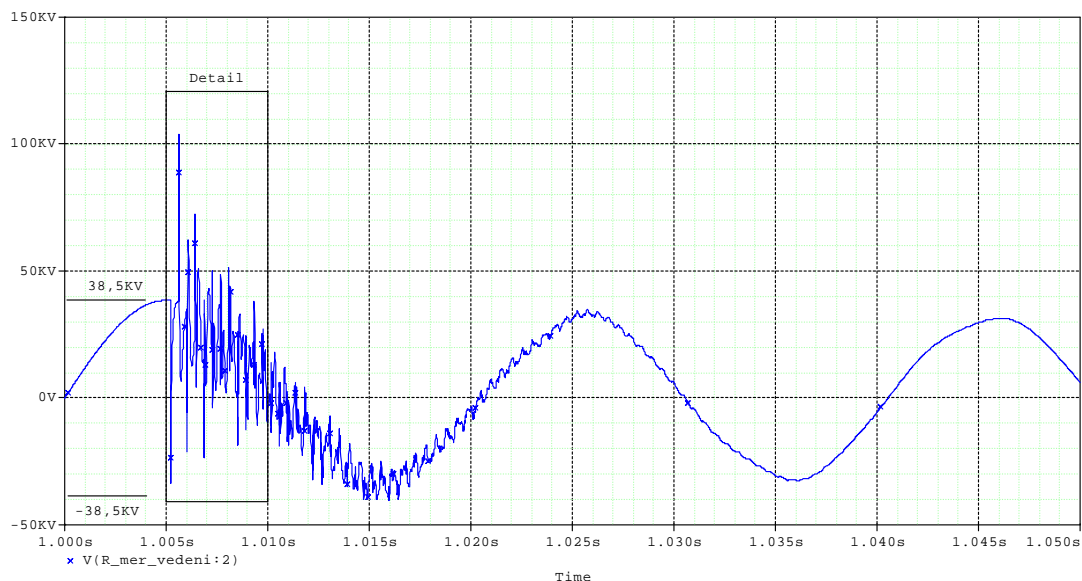


Obr.13 Proud na výstupu TNS při zkratu na vzdáleném konci TV, v TNS připojeno FKZ

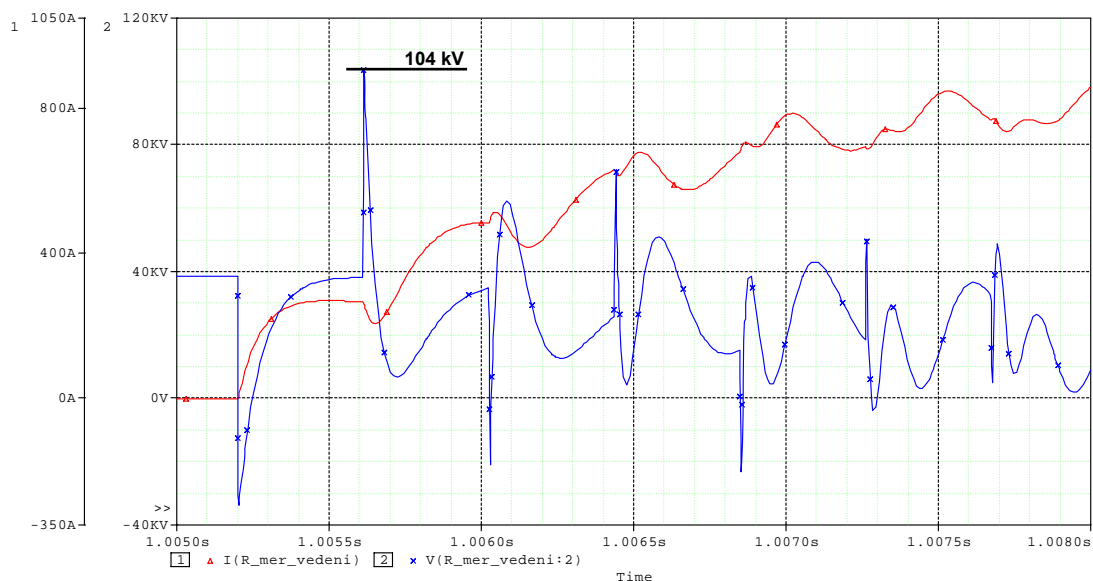
Proud na výstupu TNS vychází z ustálené hodnoty proudu cca 10 A dosáhne vrcholových hodnot -1,19 kA a 1,19 kA viz obr.13. Vliv počtu LC větví FKZ se v odrazu rázové vlny na impedanci TNS neprojeví, neboť TNS se z pohledu TV skládá (pro oblast MHz) z paralelních indukčností, které představují:

- náhradní indukčnost trakčního transformátoru ($L_{TT} = 24$ mH),
- náhradní indukčnosti LC větve 3. harmonické ($L_3 = 137$ mH),

- náhradní indukčnosti LC větve 5. harmonické ($L_5 = 169 \text{ mH}$).



Obr.14 Napětí na výstupu TNS při zkratu na vzdáleném konci TV, v TNS připojeno FKZ



Obr.15 Detail proudu a napětí na výstupu TNS po zkratu na vzdáleném konci TV, v TNS připojeno FKZ

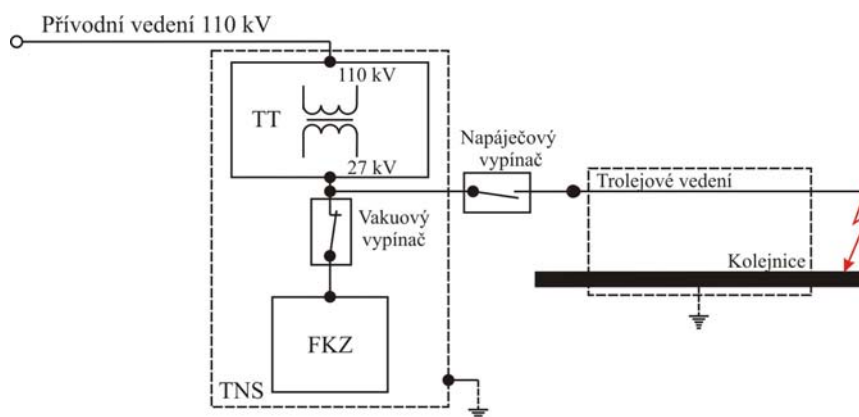
Napětí na začátku TV obr.14 a obr.15 vychází z ustálené hodnoty 38,5 kV a dosáhne maximální vrcholové hodnoty 104 kV. Časový okamžik vzniku teoreticky možného trojnásobku vrcholové hodnoty trakčního napětí (při zanedbání útlumu na TV) je dán trojnásobkem doby průchodu vlny danou délkou TV:

- první průchod vlny od zkratovaného konce TV k TNS,
- druhý průchod vlny od TNS ke konci TV,
- třetí průchod vlny zpět k TNS.

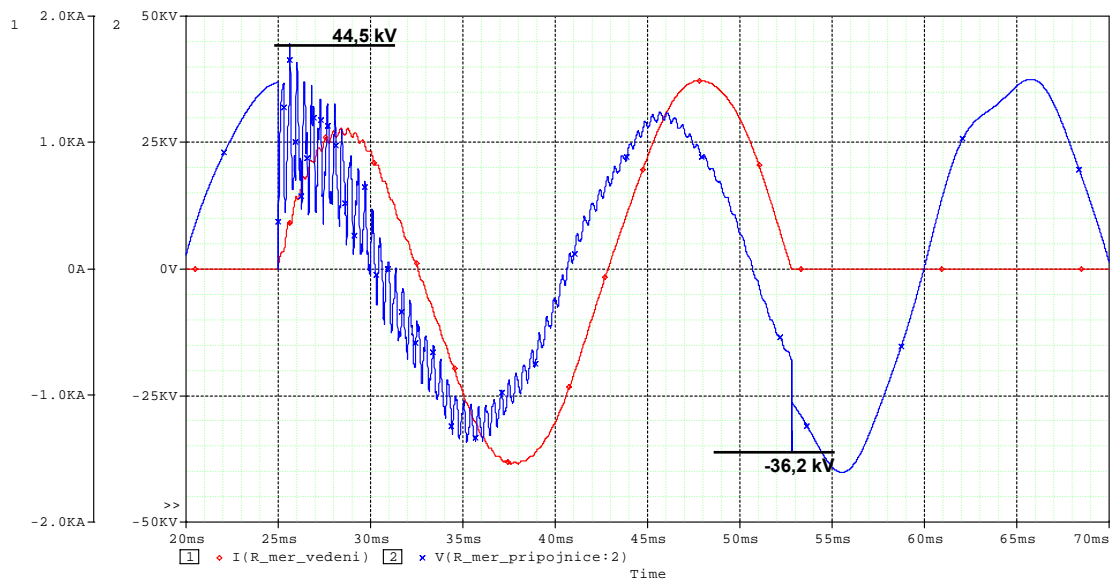
Napětí na indukčnostech LC větve 3. a 5. harmonické dosáhne maximální vrcholové hodnoty 68,3 kV. Maximální hodnota napětí na začátku TV je 104 kV. Jelikož LC větve jsou složeny z indukčnosti a kapacity, které představují pro rychlé

změny zkrat, je celkové napětí na indukčnostech, tj. na L_3 a L_5 . Z uvedeného vyplývá, že nejvíce ohroženy jsou právě zmiňované indukčnosti.

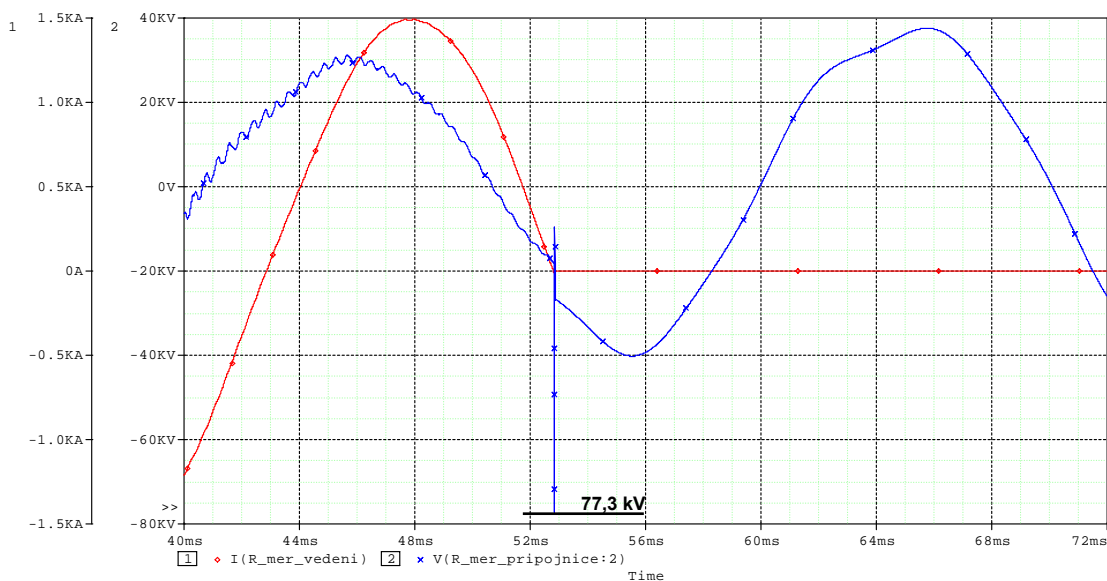
3.4 Zkrat na vzdáleném konci TV, vypnutí napájecího vypínače TNS s FKZ



Obr.16 Schéma TO při zkratu na vzdáleném konci TV, vypnutí napájecího vypínače TNS s FKZ



Obr.17 Napětí na přípojnici 27 kV při vypnutí napájecího vypínače TNS s FKZ od TV v $I = 0$ A při zkratu na vzdáleném konci TV



Obr.18 Napětí na přípojnici 27 kV při vypnutí napáječového vypínače TNS s FKZ od TV v $I = 15$ A při zkratu na vzdáleném konci TV

Model vakuového vypínače, který je používán v předchozích simulacích, je založen na předpokladech uvedených, kde zapnutí představuje napěťový skok s horní hranicí 100 V s velmi strmým nárůstem $t_n < 1 \mu s$. Pro vypínání však nelze tento model použít, neboť strmost nárůstu odporu vakuového vypínače je v rozsahu ms. Tento pokles přímo souvisí s přepětím. Pro uvedený typ vakuového vypínače (3AF 9342-4) firmy Siemens platí, že k přerušení proudu dochází v hodnotách $|I| < 5$ A, což potvrzuje [8]. Vypínač přerušuje střídavý elektrický oblouk při této hodnotě, aby nedocházelo k tzv. utržení proudu, který by v případě indukční zátěže způsobil přepětí. Dále tato literatura uvádí průměrnou dobu hoření oblouku v rozmezí $t_{AV} = 5,55 - 8,90$ ms. Teoretická možná nejdelší doba hoření oblouku ve vakuové komoře je 10 ms při frekvenci 50 Hz. Na základě těchto znalostí byly provedeny simulace obr.17 a obr.18, které dokládají:

- Napětí na přípojnici 27 kV obr.17 po odpojení napáječovým vypínačem při zkratu na vzdáleném konci TV v $I = 0$ A a vlastním času poklesu proudu 1 ms dosáhne hodnoty -36,2 kV. Připojení TV v maximu napětí 38,9 kV a vlastním času nárůstu proudu 1 μs při současném vzniku zkratu na konci TV dosáhne napětí maximální vrcholové hodnoty 44,5 kV.
- Napětí na přípojnici 27 kV obr.18 po odpojení napáječovým vypínačem při zkratu na vzdáleném konci TV v $I = -15$ A a vlastním času poklesu proudu 1 ms dosáhne hodnoty -77,3 kV. V případě proudu $I = -5$ A dosáhne hodnota přepětí 49,9 kV.
- Při dalších simulacích byla zjištěna již zmiňovaná závislost na vlastním čase změny odporu vakuového vypínače, např. pro vlastní čas 1 μs dosahovaly hodnoty cca 40 MV, pro 500 μs 140 kV.
- FKZ na vzniklé spínací přepětí nemá podstatný vliv.

4 Závěry

- Rozdíly mezi simulovanými a vypočítanými hodnotami napětí a proudů jsou zapříčiněny nepřesností modelu vypínače při simulaci a též zvoleným krokem simulace.

Zkratky na TV u TNS, v TNS odpojeno FKZ:

- Proud na začátku TV vychází z ustálené hodnoty před vznikem zkratu cca 10 A a dosáhne po zkratu maximální vrcholové hodnoty cca 146 A a následně klesá. Děj dozní cca po 35 ms.
- Příchodem vlny na konec vedení, které není nikterak přizpůsobeno a jde tedy o vedení otevřené, dochází k odrazu této vlny.
- Doba průchodu vlny TV tam a zpět vytváří zpoždění cca 412 μ s a celý děj odezní za čas cca 62 ms a doba zpoždění je závislá na délce vedení.

Zkratky na TV u TNS, v TNS připojeno FKZ

- Proud v TV vychází z ustálené hodnoty před vznikem zkratu cca 10 A a dosáhne po zkratu maximální vrcholové hodnoty cca 168 A a následně klesá. Děj dozní po cca 35 ms.
- Napětí na vzdáleném konci vychází z počáteční hodnoty před vznikem zkratu cca 40 kV a dosahuje po zkratu maximální vrcholové hodnoty cca 43 kV, a to zásluhou odrazu vlny na otevřeném konci vedení, následně klesá. Dochází k odrazu vlny na konci vedení, neboť není nikterak impedančně přizpůsobeno. Doba průchodu vlny v TV tam a zpět vytváří zpoždění cca 412 μ s.
- Kondenzátorové skupiny jsou dimenzované na trvalé napětí 2 x 40 kV (dva kondenzátory v sérii) a dále je dovoleno krátkodobé přetížení zvláště pro případ přechodného jevu.
- Napětí na kondenzátorové skupině LC větve 3. harmonické vychází z ustálené hodnoty před vznikem zkratu cca 45 kV a následně klesá.
- Napětí na kondenzátorové skupině LC větve 5. harmonické vychází z ustálené hodnoty před vznikem zkratu cca 40 kV a následně klesá.
- Z výše uvedeného vyplývá, že doba průchodu zkratového proudu v TV nezávisí na připojení či odpojení FKZ (cca 35 ms). Hodnota zkratového proudu na začátku TV však na existenci FKZ závisí (bez FKZ 146 A, s FKZ 168 A).

Zkratky na vzdáleném konci na TV, v TNS odpojeno FKZ

- Proud na začátku TV vychází z ustálené hodnoty před vznikem zkratu cca 10 A a dosáhne po zkratu maximální vrcholové hodnoty cca 1,2 kA a následně dochází k ustálení na hodnotu 1,17 kA.
- Napětí na začátku TV vychází z ustálené hodnoty před vznikem zkratu cca 39 kV, díky několikanásobnému odrazu rázové vlny dosáhne krátkodobě hodnoty cca 111 kV, což je cca trojnásobek původní hodnoty napětí. Tento jev nastane v čase cca 620 μ s od vzniku zkratu na otevřeném konci TV, tedy nikoliv v okamžiku vzniku zkratu.

Zkratky na vzdáleném konci TV, v TNS připojeno FKZ

- Proud na začátku TV vychází z ustálené hodnoty před vznikem zkratu cca 10 A a dosáhne po zkratu maximální vrcholové hodnoty cca 1,19 kA.
- Napětí na začátku TV vychází z počáteční hodnoty před vznikem zkratu cca 39 kV a dosahuje po zkratu maximální vrcholové hodnoty cca 104 kV,

- Vrcholová hodnota napětí na výstupu TNS může dosáhnout až trojnásobku vrcholové hodnoty trakčního napětí.

Z výše uvedeného vyplývá, že hodnota zkratového proudu na začátku TV na existenci FKZ prakticky nezávisí (bez FKZ cca 1,2 kA, s FKZ 1,19 kA).

Napětí na začátku TV dosáhne pro případ bez FKZ hodnoty cca 111 kV, v případě s FKZ cca 104 kV.

Zkrat na vzdáleném konci TV, vypnutí napáječového vypínače TNS s FKZ

- Napětí na přípojnicích 27 kV po odpojení napáječovým vypínačem při zkratu na vzdáleném konci TV je závislé na velikosti vypínaného proudu a jeho strmosti poklesu. Při stejné strmosti poklesu proudu $1 \text{ A} \cdot \text{ms}^{-1}$ vznikne přepětí:
 - při vypnutí v $I \approx 0 \text{ A}$ a dosáhne hodnota přepětí 36,2 kV.
 - při vypnutí $I = 5 \text{ A}$ a dosáhne hodnota přepětí 49,9 kV.
 - při vypnutí $I = 15 \text{ A}$ a dosáhne hodnota přepětí 77,3 kV.
- Pro změnu předpokládaného vlastního času poklesu proudu vypínaného vakuovým vypínačem jsou hodnoty velice rozdílné. Při vypínání dochází k přepětím, přičemž hodnoty vzniklého přepětí jsou závislé na přesném postupu zhášení oblouku, tj. strmosti nárůstu odporu a rychlosti hoření tohoto oblouku ve vakuové komoře a na indukčnosti trakčního transformátoru. Podle současných dostupných podkladů uvádějících průměrnou dobu hoření oblouku v rozmezí $t_{AV} = 5,55 - 8,90 \text{ ms}$ pro typ vakuového vypínače (3AF 9342-4) firmy Siemens lze předpokládat, že k významnému přepětí nebude docházet. Toto tvrzení však nemusí platit pro jiný typ vakuového vypínače, kde dochází k větší rasanci přerušování proudu.

Další informace je možné získat z publikací č. [9] a [10].

Literatura

- [1] RAMO, S., WHINNERY, R. J., DUZER, V. T. Fields and Waves in communication electronics, Canada, 1993, ISBN 0-471-58551-3.
- [2] BURTSCHER, H. Laboratory model to examine extension and superposition of high frequency at railway network. Co-operator at Institution for AIE, ETH Zurich, ORE A 122, part 3.2 Work program.
- [3] ČSN 34 93 25 Keramické izolátory - Izolátory pro TV drah (účinnost 1973-10-01).
- [4] LETTL, J., FLÍGL, S. Electromagnetic Compatibility of Matrix Converter System, *Radioengineering*, 2006, Vol. 15, No. 4, ISSN 1210-2512.
- [5] NAHVI, M., EDMINISFER, J Electric circuits, McGraw-Hill print, USA, 2003, ISBN 0-07-139309-2.
- [6] NEJMAN L. R., KALANTAROV P. L. Теоретические основы электротехники Часть вторая: теория цепей переменного тока, Moskva, 1954.
- [7] HAMBLEY, R., A. Electrical engineering - Principles and applications, 4th Edition, Pearson Prentice Hall, Singapore, 2008, ISBN 0-13-206692-0.
- [8] Test Report No.TVS/2689E: Single-pole vacuum circuit-breaker 3AF9342-4 SIEMENS AG (27.5kV-1250A-25kA), April 4th 1985 till June 7th, 1985.
- [9] DOLEČEK, R., ČERNÝ, O. Short-circuits simulation at 25 kV, 50 Hz contact line system, *Proceedings ICREPQ 07*, Sevilla Spain, March 2007, p. 322/5 pages, ISBN 978-84-611-4707-9.
- [10] DOLEČEK, R., ČERNÝ, O. Problems of power-supply system of 25 kV, 50 Hz at presents, *PRACE NAUKOWE-Transport*, z. 63, 2007, Warsaw University of Technology, Warszawa, 18-21 September 2007, pp. 43-49 (7), ISSN 1230-9265.

Praha, duben 2009

Lektorský posudek: Doc. Ing. Karel Hlava, CSc., DF JP
Univerzita Pardubice