

Diagnostika vlivu napájecí soustavy jednofázové trakce ČD na signál hromadného dálkového ovládání

Klíčová slova: *jednofázová trakce ČD, diagnostika napájecí stanice ČD, filtračně-kompenzační zařízení, řídicí signál hromadného dálkového ovládání.*

Úvod

České dráhy provozují na jednofázové trakční proudové soustavě 25 kV, 50 Hz elektrické lokomotivy, jejichž koncepce trakčního obvodu odpovídá stavu techniky v době jejich vzniku, to jest šedesátým létům. Vstupní schéma jejich trakčního obvodu je tvořeno jednofázovým diodovým (neřízeným) můstkem, jak bylo v oné době obvyklé. Dvoupulzně usměrněným napětím jsou pak přes vyhlazovací tlumivky napájeny stejnosměrné sériové trakční motory.

Tato hnací vozidla vykazují vůči napájecí soustavě 25 kV, 50 Hz dvě nevýhodné vlastnosti, jejichž význam se s časem a s vývojem požadavků dodavatele elektrické energie stává stále závažnější. Jedná se o tyto vlastnosti:

- Účinník odebíraného výkonu vykazuje v průměru hodnotu kolem 0,84 (induktivní), což odporuje požadavku dodavatele elektrické energie, vyjádřenému v "energetickém zákoně" [1], podle kterého je odběratel povinen odebírat elektřinu s hodnotou induktivního účinníku 0,95 - 1,00, pokud se dodavatel s odběratelem nedohodnou jinak, s výjimkou odběrů pro domácnost.
- Časový průběh proudu odebíraného z napájecí soustavy ČD je značně deformován harmonickými. Hnací vozidlo se zde jeví jako generátor proudových harmonických všech lichých řádů, jejichž amplituda je v trakčně ustáleném stavu nepřímo úměrná řádu harmonické (např. obsah 3. harmonické odebíraného proudu dosahuje až 33 %).

Tyto skutečnosti byly dodavateli elektrické energie při zavádění jednofázové trakční soustavy známy, po dobu několika desetiletí byly tolerovány a tato trakční soustava byla

provozována bez jakýchkoliv doplňujících zařízení. S hromadným zaváděním nelineárních výkonových elektronických prvků však došlo postupně k řadě legislativních změn, které nutí provozovatele těchto zařízení dodatečně instalovat prvky, které negativní vlivy významně omezí.

Aby ČD mohly vyhovět požadavkům dodavatele elektrické energie, jsou nuceny doplnit trakční napájecí stanice jednofázové soustavy přídatnými výkonovými prvky, tvořícími tak zvané "filtračně - kompenzační zařízení", pro něž je zavedena zkratka "FKZ".

V poslední době, po vybudování již řady FKZ navržených podle požadavků platných v době jejich projektování a výstavby, dodavatel elektrické energie kvantifikoval ještě další požadavek, aby napájecí stanice jako celek vykazovala na řídicím kmitočtu 216,67 Hz soustavy hromadného dálkového ovládání rozvodného závodu ("HDO") jistou minimální hodnotu impedance. Účelem tohoto požadavku je v daném případě zabránit útlumu signálu HDO vlivem FKZ použitého v trakční napájecí stanici ČD. Na této skutečnosti je podstatné, že taková dodatečná opatření jsou požadována pouze na provozovateli a dodavatel elektrické energie jako provozovatel soustavy HDO se na nich nijak finančně nepodílí, protože vyplývají ze zákona.

Souhrnem lze konstatovat, že FKZ za daných podmínek musí současně a za všech provozních podmínek splňovat následující konkrétní požadavky:

- zajistit kompenzační výkon kapacitního charakteru pro 50 Hz, kterým se upraví nevyhovující induktivní účinník hnacích vozidel tak, aby účinník trakční napájecí stanice jako celku ležel v mezích 0,95 až 1,00 požadovaných rozvodným závodem, a to bez nevyžádané dodávky kapacitní jalové práce do sítě dodavatele
- omezit průnik 3. harmonické proudu, produkované hnacími vozidly, přes trakční transformátor 110/27 kV do napájecí sítě 110 kV, kde by následně v přípojovacím bodě vznikla na impedanci této sítě 3. harmonická napětí převyšující hodnoty předepsané rozvodným závodem,
- omezit obdobně průnik 5. případně i 7. harmonické proudu do přípojovacího bodu trakční napájecí stanice,
- omezit průnik řídicího kmitočtu 216,67 Hz HDO ze sítě 110 kV do FKZ, aby nedošlo vlivem FKZ k jeho nežádoucímu odsávání ze sítě rozvodného závodu.

Dnešní koncepce FKZ [2] obsahuje dvě paralelně řazené sériové LC rezonanční větve (laděné do blízkosti 3. a 5. harmonické) doplněné paralelně připojenou větví dekompenzační, obsahující snižovací transformátor, dekompenzační tlumivku a tyristorový

regulátor. Pro řešení problému zajištění požadované nejmenší hodnoty impedance vůči signálu HDO se nabízí možnost využití skutečnosti, že mezi rezonančními frekvencemi obou sériových LC větví leží vždy jedna frekvence paralelní rezonance vytvářená oběma těmito LC větvemi. Na kmitočtu paralelní rezonance může impedance FKZ dosáhnout velmi vysokých hodnot. Tato skutečnost dovoluje tedy nastavit kmitočet paralelní rezonance obou LC větví FKZ vhodnou volbou jejich výkonových prvků (kapacity kondenzátorových skupin a indukčnosti rezonančních tlumivek) tak, aby ležel v blízkosti řídicího kmitočtu 216,67 Hz HDO.

Předmětem diagnostiky jednofázové napájecí soustavy ČD je v daném případě prověření volby hodnot výkonových prvků FKZ. U již provozovaných zařízení je vhodné použít výpočetní postup uvedený dále v tomto příspěvku a doplněný výsledky měření s následnou analýzou. Pro nově budovaná zařízení je v dalším uveden postup pro optimalizaci hodnot výkonových prvků FKZ během projektu.

Analýza poměrů při odpojeném trakčním vedení

Zadané 4 podmínky uvedené v úvodu jsou postačující pro definování elektrických parametrů čtyř základních výkonových prvků FKZ, tj. prvků obou dvojic LC větví tvořících celé FKZ dnešní koncepce. Reálné složky všech prvků lze zanedbat.

Nejprve stanovíme obecný výraz pro reaktanci $X(\omega)$ obou paralelně spojených větví LC, platný pro libovolnou hodnotu kruhové frekvence ω . Dostaneme výraz

$$X(\omega) = \frac{(1 - \omega^2 L_3 C_3)(1 - \omega^2 L_5 C_5)}{\omega [\omega^2 C_3 C_5 (L_3 + L_5) - (C_3 + C_5)]} \quad [\Omega, s^{-1}, H, F] \quad (1)$$

kde L_3 a C_3 jsou hodnoty obou výkonových prvků LC větve pro 3.harmonickou,

L_5 a C_5 jsou analogické prvky LC větve pro 5.harmonickou

Z tohoto výrazu jsou již patrné výpočetní podmínky pro jednotlivé prvky obou LC větví FKZ:

- hodnota $X(\omega)$ pro $\omega_1 = 2 * \pi * 50$ určuje na základním kmitočtu reaktanci sítě, která je pochopitelně kapacitního charakteru; tato reaktance tedy určuje kompenzační výkon celého FKZ (společně pro obě větve LC) Q_{komp} podle vzorce

$$Q_{komp} = \frac{U_{TV}^2}{X(\omega_1)} \quad [Mvar, kV, \Omega] \quad (2)$$

kde U_{TV} je napětí trakčního vedení

- čitatel obsahuje dva členy, které jej nezávisle na sobě anulují a definují tak kruhové rezonanční frekvence obou LC větví, tedy ω_3 a ω_5 , pro které pak platí

$$L_3 C_3 = \frac{1}{\omega_3^2} \quad L_5 C_5 = \frac{1}{\omega_5^2} \quad [\text{H, F, s}^{-1}] \quad (3)$$

kde ω_3 a ω_5 jsou kruhové frekvence, na které jsou naladěny LC větve pro 3. a 5. harmonickou, aby tyto složky byly zkratovány před vstupem do trakčního transformátoru 110/27 kV

- jmenovatel svým anulováním pro $\omega_H = 2 * \pi * 216,67$ definuje podmínku pro zabránění průniku řídicího kmitočtu 216,67 Hz HDO do FKZ, protože na této frekvenci dosahuje $X(\omega_H)$ neomezené hodnoty.

Po formálních úpravách dostaneme následující výraz, určený pro stanovení kapacity kondenzátoru C_3 v závislosti na požadovaném součtovém kompenzačním výkonu obou LC větví Q_{komp} při zadaném napětí trakčního vedení U_{TV}

$$C_3 = \frac{\left[1 - \left(\frac{\omega_1}{\omega_3} \right)^2 \right] \left[1 - \left(\frac{\omega_1}{\omega_5} \right)^2 \right] \left[\left(\frac{\omega_H}{\omega_3} \right)^2 - 1 \right]}{\omega_1 \left[1 - \left(\frac{\omega_1}{\omega_H} \right)^2 \right] \left[\left(\frac{\omega_H}{\omega_3} \right)^2 - \left(\frac{\omega_H}{\omega_5} \right)^2 \right]} \frac{Q_{\text{komp}}}{U_{\text{TV}}^2} \quad [\text{F, Mvar, kV}] \quad (4)$$

Pro kapacitu kondenzátoru druhé LC větve C_5 dostaneme obdobným způsobem, opět v závislosti na Q_{komp} a U_{TV} , výraz

$$C_5 = \frac{\left[1 - \left(\frac{\omega_H}{\omega_5} \right)^2 \right] \left[1 - \left(\frac{\omega_1}{\omega_3} \right)^2 \right] \left[1 - \left(\frac{\omega_1}{\omega_5} \right)^2 \right]}{\omega_1 \left[1 - \left(\frac{\omega_1}{\omega_H} \right)^2 \right] \left[1 - \left(\frac{\omega_3}{\omega_5} \right)^2 \right] \left(\frac{\omega_H}{\omega_3} \right)^2} \frac{Q_{\text{komp}}}{U_{\text{TV}}^2} \quad [\text{F, Mvar, kV}] \quad (5)$$

Porovnáme-li výrazy (4) a (5), dostaneme jednoduchý vztah, který musíme při kladených výchozích podmínkách dodržet při volbě kapacit obou kondenzátorů, a to

$$C_5 = C_3 \frac{1 - \left(\frac{\omega_H}{\omega_5} \right)^2}{\left(\frac{\omega_H}{\omega_3} \right)^2 - 1} \quad [\text{F, F}] \quad (6)$$

Pro indukčnosti obou tlumivek platí podle výše uvedených výrazů

$$L_3 = \frac{1}{\omega_3^2 C_3} \quad L_5 = \frac{1}{\omega_5^2 C_5} \quad [\text{H, s}^{-1}, \text{F}] \quad (7)$$

Požadujeme-li "ostré" ladění obou LC větví (tj. ladění na 150, příp. 250 Hz), pak

$$\omega_3 = 2 \cdot \pi \cdot 150 = 300 \cdot \pi \qquad \omega_5 = 2 \cdot \pi \cdot 250 = 500 \cdot \pi \qquad (8)$$

Dosazením uvedených číselných hodnot do výše uvedených výrazů dostaneme pro $U_{TV} = 27,5$ kV postupně

$$C_3 = 3,08662 Q_{komp} \qquad [\mu F, Mvar] \qquad (9)$$

$$C_5 = 0,70712 Q_{komp} \qquad [\mu F, Mvar] \qquad (10)$$

pro vztah obou kapacit dostaneme

$$C_5 = 0,22909 C_3 \qquad [\mu F, \mu F] \qquad (11)$$

a pro indukčnosti obou tlumivek dostaneme obdobně

$$L_3 = 0,36473 / Q_{komp} \qquad [H, Mvar] \qquad (12)$$

$$L_5 = 0,57315 / Q_{komp} \qquad [H, Mvar] \qquad (13)$$

Analýza poměrů při připojeném trakčním vedení

Zatím co frekvence sériové rezonance obou větví LC nejsou vzhledem k trolejovému vedení ovlivněny jeho kapacitou a závisí pouze na hodnotách jejich prvků, kapacita trakčního vedení značená C_{TV} je připojena paralelně k FKZ a pochopitelně ovlivňuje frekvenci jeho paralelní rezonance. Zde nutno podotknout, že tato hodnota se může provozními podmínkami (např. spínáním trakčního vedení) měnit v širokých mezích.

Odvodíme proto nový výraz pro celkovou reaktanci FKZ včetně C_{TV} , kterou označíme X_{CELK} , bez respektování reaktance trakčního transformátoru. Nutno zde upozornit, že do hodnoty C_{TV} se v případě napájení ve schématu "T" započítává celá délka napájeného úseku, tj. např. od spínací stanice na jedné straně po spínací stanici na straně druhé.

$$\text{Pro } X_{CELK} \text{ dostaneme výraz} \qquad [\Omega, s^{-1}, F, H] \qquad (14)$$

$$X_{CELK}(\omega) = \frac{(1 - \omega^2 C_3 L_3)(1 - \omega^2 C_5 L_5)}{\omega \left[\omega^2 C_3 C_5 (L_3 + L_5) - (C_3 + C_5) - C_{TV} (1 - \omega^2 C_3 L_3)(1 - \omega^2 C_5 L_5) \right]}$$

Z tohoto výrazu jsou patrné následující závěry:

- X_{CELK} zachovává nulovou hodnotu pro oba výrazy v čitateli, představující naladění obou LC větví FKZ,
- $X_{CELK}(\omega_H)$ však dává pro blokování průchodu řídicího kmitočtu 216,67 Hz HDO do FKZ [anulování jmenovatele výrazu (14)] jinou podmínku, než byla odvozena pro stav

při odepnutém trakčním vedení [anulování jmenovatele výrazu (1)], což je dáno novým členem "C_{TV}(..)(..)" ve jmenovateli výrazu (14).

Bude tedy pro podmínky hrazení řídicího kmitočtu HDO platit pro stav po připojení trakčního vedení jiný výraz, než byl odvozen pro odepnuté trakčního vedení (6), a to

$$C_5 = \frac{C_3 \left[1 - \left(\frac{\omega_H}{\omega_5} \right)^2 \right] - C_{TV} \left[\left(\frac{\omega_H}{\omega_3} \right)^2 + \left(\frac{\omega_H}{\omega_5} \right)^2 - \left(\frac{\omega_H}{\omega_3} \right)^2 \left(\frac{\omega_H}{\omega_5} \right)^2 - 1 \right]}{\left(\frac{\omega_H}{\omega_3} \right)^2 - 1} [\mu F] \quad (15)$$

Z tohoto výrazu je patrné, že se kapacita trakčního vedení C_{TV} projeví snížením kapacity C₅ kondenzátoru LC větve pro 5. harmonickou tím výrazněji, čím bude kapacita kondenzátoru LC větve pro 3. harmonickou C₃ mít menší hodnotu. Pro C_{TV} = 0 přechází výraz (15) ve výše uvedený vztah mezi C₃ a C₅ daný výrazem (6).

Spolu s poklesem kapacity C₅ vlivem kapacity trakčního vedení C_{TV} je nutno pochopitelně zvětšit i indukčnost L₅ větve pro 5. harmonickou, aby byla dodržena podmínka ladění této větve podle (7).

Pro ilustraci vlivu kapacity trakčního vedení C_{TV} použijeme číselné hodnoty (8) a vyčíslením výrazu (15) dostaneme jednoduchý výpočetní výraz

$$C_5 = 0,22909 C_3 - 0,24889 C_{TV} \quad [\mu F] \quad (16)$$

Vzhledem ke složitosti výrazů neuvádím vzorce pro přímý výpočet hodnot parametrů obou LC větví FKZ analogické výrazům (9), (10), (12) a (13). Lze doporučit následující postup:

- a) použít výraz (9) pro předběžný návrh kapacity kondenzátoru C₃ podle požadovaného kompenzačního výkonu Q_{komp}, protože tato kapacita svojí hodnotou ve srovnání s kapacitou C₅ v podstatě určuje za daných podmínek celkový kompenzační výkon celého FKZ,
- b) pomocí výrazu (16) stanovit hodnotu kapacity C₅, která bude respektovat vliv kapacity trakčního vedení C_{TV} na hrazení řídicího kmitočtu HDO,
- c) k takto předběžně určeným kapacitám C₃ a C₅ pomocí výrazů (7) a (8) vypočítat hodnoty indukčností L₃ a L₅,
- d) výsledný kompenzační výkon pak stanovit pomocí známých přibližných výrazů (při zanedbání vlivu R₃ a R₅) pro kompenzační výkon jednotlivých LC větví:

$$Q_{\text{komp},3} = 100 * \pi * U_{\text{TV}}^2 * C_3 \frac{\left(\frac{\omega_3}{\omega_1}\right)^2}{\left(\frac{\omega_3}{\omega_1}\right)^2 - 1} = 353,43 * U_{\text{TV}}^2 * C_3 \text{ [Mvar,kV,F]} \quad (17)$$

$$Q_{\text{komp},5} = 100 * \pi * U_{\text{TV}}^2 * C_5 \frac{\left(\frac{\omega_5}{\omega_1}\right)^2}{\left(\frac{\omega_5}{\omega_1}\right)^2 - 1} = 327,25 * U_{\text{TV}}^2 * C_5 \text{ [Mvar,kV,F]} \quad (18)$$

Může se stát, že takto odvozené hodnoty parametrů obou LC větví, které platí pro optimální (teoreticky neomezenou) impedanci FKZ na řídicím kmitočtu HDO 216,67 Hz, budou mít výrobně nevýhodné parametry. Proto byl vyvinut v oddělení EMC S24 TÚDC výpočetní program, kterým lze nalézt kompromis mezi parametry prvků obou LC větví a požadavkem dodavatele elektrické energie na dodržení jisté minimální hodnoty impedance trakční napájecí stanice jako celku pro řídicí kmitočet HDO. Tento výpočetní program již obsahuje i činné složky parametrů FKZ a náhradní reaktanci trakčního transformátoru 110/27 kV. Dovoluje též analyzovat vliv kapacity proměnné délky napájeného trakčního vedení.

Výrazy (1) a (14) ukazují cestu k diagnostice stávající trakční napájecí stanice z hlediska jejího vlivu na řídicí signál HDO. Při diagnostikování postačí vyšetřit současným měřením napěťovou i proudovou složku s kmitočtem HDO na vstupu trakční napájecí stanice. Podělením takto získaných hodnot dostáváme absolutní hodnotu hledané impedance. Tyto práce vyžadují vyjmout a vyhodnotit speciálním měřicím počítačem z kmitočtových spekter obou signálů hledanou složku pro HDO, což je úloha řešitelná např. rychlou Fourierovou transformací (FFT s filtrem).

Analýza poměrů při použití dekompenzační větve FKZ

Dekompenzační větev sestává ze snižovacího transformátoru, připojeného svým primárním vinutím paralelně k větvím FKZ. Na jeho sekundárním vinutí je připojena tlumivka, jejíž dekompenzační výkon je řízen tyristorovým regulátorem. Pro sledovaný účel je možné si dekompenzační větev jako celek představit v prvním přiblížení jako tlumivku o indukčnosti L_D připojenou paralelně k celému FKZ a poskytující při napětí přípojnic U_{TV} dekompenzační výkon Q_{dekomp} podle vzorce

$$Q_{\text{dekomp}} = \frac{U_{\text{TV}}^2}{100\pi L_D} \quad [\text{var}, \text{V}, \text{H}] \quad (19)$$

Stejným postupem jako v případě předchozím odvodíme vztah mezi kapacitou LC větve pro 5. harmonickou C_5 a kapacitou LC větve pro 3. harmonickou C_3 , kterou navrhne podle požadovaného kompenzačního výkonu celého FKZ.

Dostaneme hledaný vztah ve tvaru $[\text{F}, \text{H}, \text{s}^{-1}]$ (20)

$$C_5 = \frac{C_3 \left[1 - \left(\frac{\omega_H}{\omega_5} \right)^2 \right] - \left(C_{\text{TV}} - \frac{1}{\omega_H^2 L_D} \right) \left[\left(\frac{\omega_H}{\omega_3} \right)^2 + \left(\frac{\omega_H}{\omega_5} \right)^2 - \left(\frac{\omega_H}{\omega_3} \right)^2 \left(\frac{\omega_H}{\omega_5} \right)^2 - 1 \right]}{\left(\frac{\omega_H}{\omega_3} \right)^2 - 1}$$

Do výrazu (20) dosadíme pro ilustraci výsledku číselné hodnoty (8) a po vyčíslení dostaneme

$$C_5 = 0,22909 C_3 - 0,24889 (C_{\text{TV}} - 0,22415 Q_{\text{dekomp}}) [\mu\text{F}, \text{Mvar}] \quad (21)$$

Nutno podotknout, že hodnota dekompenzačního výkonu Q_{dekomp} závisí na charakteru trakčního odběru hnacími vozidly, konkrétně na odebíraném jalovém výkonu. Číselná hodnota dekompenzačního výkonu Q_{dekomp} bude největší, bude-li nejmenší jalová složka trakčního odběru trati. V tomto případě bude mít současně indukčnost L_D nejmenší hodnotu (realizováno funkcí statického regulátoru dekompenzační větve). Jalový (induktivní) výkon dekompenzační větve musí tedy vyrovnávat instalovaný (kapacitní) kompenzační výkon obou LC větví FKZ při daném účinníku odebíraného trakčního výkonu hnacími vozidly tak, aby celkový účinník napájecí stanice ležel až do jisté hodnoty trakčního zatížení trvale v požadovaných mezích 0,95 až 1,00.

Příklad ideálního průběhu frekvenční závislosti impedance trakční napájecí stanice (TNS) ze strany napájecí sítě 110 kV je uveden na **obrázku 1**, příklad reálného stavu je uveden na **obrázku 2**.

Analýza poměrů při použití LC větví pro 3., 5. a 7. harmonickou s dekompenzací

Větev pro 7. harmonickou by vykazovala na řídicím kmitočtu 216,67 Hz signálu HDO kapacitní charakter. Protože by byla připojena paralelně ke kapacitě trakčního vedení C_{TV} , projevila by se opět ve velikosti kapacity LC větve jak 5. tak i 7. harmonické.

Na rozdíl od předchozích případů lze odvodit pro napájecí stanici obsahující FKZ s LC větvemi pro 3., 5. a 7. harmonickou a větev dekompenzační včetně obou provozních stavů s připojeným či odpojeným trakčním vedením obecně platný výraz pro kapacity kondenzátorů všech tří LC větví (C_3 , C_5 a C_7) pouze v implicitním tvaru

$$\begin{aligned}
& C_3 \left[1 - \left(\frac{\omega_H}{\omega_5} \right)^2 - \left(\frac{\omega_H}{\omega_7} \right)^2 + \left(\frac{\omega_H}{\omega_5} \right)^2 \left(\frac{\omega_H}{\omega_7} \right)^2 \right] + C_5 \left[1 - \left(\frac{\omega_H}{\omega_3} \right)^2 - \left(\frac{\omega_H}{\omega_7} \right)^2 + \left(\frac{\omega_H}{\omega_3} \right)^2 \left(\frac{\omega_H}{\omega_7} \right)^2 \right] + \\
& + C_7 \left[1 - \left(\frac{\omega_H}{\omega_3} \right)^2 - \left(\frac{\omega_H}{\omega_5} \right)^2 + \left(\frac{\omega_H}{\omega_3} \right)^2 \left(\frac{\omega_H}{\omega_5} \right)^2 \right] = \\
& = \left[\left(\frac{\omega_H}{\omega_3} \right)^2 - 1 \right] \left[1 - \left(\frac{\omega_H}{\omega_5} \right)^2 \right] \left[1 - \left(\frac{\omega_H}{\omega_7} \right)^2 \right] \left(C_{TV} - \frac{1}{\omega_H^2 L_D} \right) \quad [F, H, s^{-1}] \quad (22)
\end{aligned}$$

Tento výraz můžeme upravit použitím předpokladu, že z konstrukčních důvodů navrhne kapacitu kondenzátorů $C_5=C_7$. Za této podmínky dostaneme pro vztah mezi C_3 a C_5 , případně

C_3 a C_7 výraz [F, H, s⁻¹] (23)

$$C_5 = C_7 = \frac{\left[1 - \left(\frac{\omega_H}{\omega_5} \right)^2 \right] \left[1 - \left(\frac{\omega_H}{\omega_7} \right)^2 \right] \left\{ C_3 - \left(C_{TV} - \frac{1}{\omega_H^2 L_D} \right) \left[\left(\frac{\omega_H}{\omega_3} \right)^2 - 1 \right] \right\}}{\left[\left(\frac{\omega_H}{\omega_3} \right)^2 - 1 \right] \left[2 - \left(\frac{\omega_H}{\omega_5} \right)^2 - \left(\frac{\omega_H}{\omega_7} \right)^2 \right]}$$

Do výrazu (23) dosadíme pro ilustraci výsledku číselné hodnoty (8) doplněné o hodnotu

$$\omega_7 = 2 * \pi * 350 = 700 * \pi \quad (24)$$

platící pro "ostré" naladění všech tří LC větví FKZ a dále z výrazu (19). Po vyčíslení dostaneme výraz analogický výrazu (21)

$$C_5 = C_7 = 0,16322 C_3 - 0,17733 (C_{TV} - 0,22415 Q_{dekomp}) [\mu F, Mvar] \quad (25)$$

Závěry

1. Filtračně - kompenzační zařízení v trakční napájecí stanici jednofázové soustavy ČD navržené podle odvozených výrazů může vhodnou volbou parametrů zajistit nejenom dosažení hodnoty účinníku a útlum složky 3. a 5. harmonické napětí připojovacího bodu trakční napájecí stanice k síti 110 kV, ale současně i omezit odsávání signálu hromadného dálkového ovládání s řídicím kmitočtem 216,67 Hz zajištěním jisté hodnoty impedance trakční napájecí stanice ČD jako celku požadované dodavatelem elektrické energie.
2. Pro dvouvětвовé FKZ je uveden postup pro určení elektrických parametrů obou LC větví FKZ s tím, že základním údajem je hodnota kompenzačního výkonu celého FKZ, který bude realizován v převážné míře LC větví pro 3. harmonickou. Pomocí této

hodnoty se pak stanoví přibližné hodnoty elektrických parametrů ostatních, v praxi pro předpoklad "ostrého" ladění obou větví. V příspěvku jsou však uvedeny výrazy platné obecně, tj. i pro ladění pod touto hranicí. Při výstavbě FKZ je tedy konstrukčně možné vyhovět požadavkům dodavatele elektrické energie.

3. Zvláštní pozornost je nutno věnovat vlivu kapacity připojeného trakčního vedení a indukčnosti regulovatelné dekompenzační větve. Obě tyto veličiny ovlivňují především hodnotu kapacity LC větve pro 5. harmonickou, aby byla dodržena podmínka hradičného účinku pro řídicí kmitočet 216,67 Hz HDO do trakční napájecí stanice ČD. Také v těchto případech jsou uvedeny výrazy jak pro "ostré" ladění obou LC větví, tak i výrazy platící obecně.
4. Z rozboru vyplývá, že pro omezení průniku řídicího kmitočtu HDO do trakční napájecí stanice by měla být kapacita kondenzátorové skupiny LC větve 5. harmonické asi 25 % kapacity kondenzátorové skupiny LC větve pro 3. harmonickou. Indukčnosti tlumivek obou LC větví jsou pak dány podmínkou sériové rezonance těchto větví na kmitočtu blízkému 3., příp. 5. harmonické.
5. Odvozené výrazy popisují zákonitosti platící pro předběžný návrh FKZ. Pro podrobný návrh a pro umožnění operativního vyšetření vlivu provozně možných délek napájeného trakčního vedení byl v oddělení EMC S24 TÚDC sestaven výpočetní program, který respektuje i činné složky všech obvodových prvků včetně náhradní reaktance trakčního transformátoru.
6. Odvozené výrazy dále ukazují, že do již vybudovaného FKZ nelze bez celkové rekonstrukce stávajícího FKZ připojit dodatečně další LC větve, která by omezila 7. harmonickou napětí v připojovacím bodě. Důvodem je, že by pak nebyla dodržena další podmínka, to jest, došlo by k poklesu impedance pro řídicí kmitočet HDO.
7. Podobně by si změna hodnoty řídicího kmitočtu HDO vyžádala rekonstrukci celého FKZ i v případě, že by řídicí kmitočet stále ještě ležel mezi oběma rezonančními kmitočty LC větví FKZ. Příspěvek neřeší případ, kdy by řídicí kmitočet HDO ležel vně rezonančních kmitočtů obou LC větví (150 Hz a 250 Hz), protože kmitočet paralelní rezonance leží vždy mezi kmitočty sériových rezonancí.
8. Pro nově navrhovaná FKZ v trakční napájecí stanici, která by musela být podle požadavku dodavatele elektrické energie vybavena třemi LC větvemi (pro 3., 5. a 7. harmonickou), je však možno použít provozně výhodný speciální případ ($C_5=C_7$), pro který jsou v závěru uvedeny potřebné výpočetní výrazy.

9. Odvozené výrazy dovolují současně diagnostikovat chování již provozované trakční napájecí stanice vybavené regulovaným FKZ vůči signálu HDO měření na vstupu trakční napájecí stanice a následným vyhodnocením za použití výpočetního postupu založeného na rychlé Fourierově transformaci naměřených hodnot s navazující filtrací.

Literatura:

- [1] Zákon č. 222/1994 Sb. ze dne 2. 11. 1994 o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o státní energetické inspekci ("energetický zákon")
- [2] Topinka J.: Kompenzace, filtrace a symetrizace v podmínkách trakčního provozu.
ELEKTRO, (1998), č. 5, str. 9 až 10

V Praze, únor 2000

Lektoroval: Ing. Jan Matějka
ČD DDC O14