

Karel Hlava

Důsledky nesymetrie fázových reaktancí obou sekcí transformátoru dvanáctipulzního usměrňovače ČD z hlediska jeho EMC vůči napájecí síti a trakčnímu vedení

*Klíčová slova: dvanáctipulzní usměrňovač, harmonické primárního proudu,
harmonické usměrněného napětí, dělení usměrněného proudu.*

1. Úvod

Ve studii [1] bylo analyzováno chování dvanáctipulzního trakčního usměrňovače ČD vůči napájecí síti z hlediska závislosti harmonických jeho primárního proudu na zatížení. Simulační metoda prokázala následující skutečnosti:

- poměrné hodnoty 11., 13., 23. či 25. harmonické primárního proudu jsou podstatně nižší než předpokládá tzv. "amplitudový zákon",
- jejich závislost na trakčním zatížení není lineární,
- složky 5., či 7. harmonické se v celkovém primárním proudu transformátoru dvanáctipulzního usměrňovače neobjevují, protože jejich dílčí složky produkované sekcí Y a D se v celkovém primárním proudu navzájem ruší.

Výsledky této simulační analýzy byly potvrzeny měřením v provozovaných napájecích stanicích ČD [2].

Následující analýza je věnována případu, kdy napětí nakrátko obou sekcí transformátoru dvanáctipulzního usměrňovače není stejné.

2. Výchozí údaje pro simulační analýzu a její metodika

V souladu s [2] budeme předpokládat, že ekvivalentní fázová indukčnost se rovná indukčnosti nakrátko měřené při trojfázovém zkratu a při napájení primární strany jmenovitým proudem. Pro analýzu byla přijata pro ekvivalentní fázovou indukčnost číselná hodnota $L = 250 \mu\text{H}$, stejná pro sekcí Y a sekcí D. Protože cílem analýzy bylo vyšetřit vliv nesymetrie hodnot těchto ekvivalentních fázových indukčností mezi sekcí Y a D, byla

Doc. Ing. Karel Hlava, CSc., nar. 1930, absolvent ČVUT FEI, 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.

uvedená hodnota ekvivalentní fázové indukčnosti u sekce Y postupně zvyšována na hodnoty:

⇒ $L_a = 262,5 \mu\text{H}$, což představuje nárůst o **5 %** (označeno mírou nesymetrie 105 %),

⇒ $L_b = 275,0 \mu\text{H}$, což představuje nárůst o **10 %** (označeno mírou nesymetrie 110 %),

⇒ $L_c = 300,0 \mu\text{H}$, což představuje nárůst o **20 %** (označeno mírou nesymetrie 120 %).

Tyto procentní hodnoty změn ekvivalentní fázové indukčnosti číselně odpovídají současně i procentním změnám napětí nakrátko.

Podobně jako v práci [1] byla zavedena pro amplitudu fázového napětí sekundárního vinutí transformátoru usměrňovače hodnota $U_2 = 2050 \text{ V}$.

Fourierova analýza složek primárního proudu vyžadovala použití režimu "Transient". Aby bylo docíleno spolehlivě ustáleného stavu, byla použita až 5. perioda po zapnutí napětí.

Primární proud transformátoru dvanáctipulzního usměrňovače je tvořen dvěma složkami, a to:

⇒ složkou vytvářenou sekundárním vinutím **Y**, kterou označíme $i(\text{LY})$,

⇒ složkou vytvářenou sekundárním vinutím **D**, kterou stejně jako v [1] vypočítáme vektorově ze dvou proudů značených $i(\text{L4})$ a $i(\text{L5})$ výrazem

$$i(\text{LD}) = \frac{i(\text{L4}) - i(\text{L5})}{\sqrt{3}}$$

Potřebné údaje amplitud i fází uvedených proudových složek byly získány rozšířením frekvenčního oboru Fourierovy analýzy až do 25. harmonické.

Zatěžovací obvod bez nulové tlumivky byl tvořen sériovou kombinací vyhlazovací tlumivky s indukčností **10 mH**, doplněné postupně pěti zvolenými hodnotami rezistoru, a to:

⇒ $R_{Za} = 10 \Omega$, což odpovídá výkonu cca **1,15 MW**,

⇒ $R_{Zb} = 4 \Omega$, což odpovídá výkonu cca **2,81 MW**,

⇒ $R_{Zc} = 3 \Omega$, což odpovídá výkonu cca **3,72 MW**,

⇒ $R_{Zd} = 2,5 \Omega$, což odpovídá výkonu cca **4,44 MW**,

⇒ $R_{Ze} = 2 \Omega$, což odpovídá výkonu cca **5,51 MW**.

Současně Fourierova analýza výstupního usměrněného napětí dala údaje o jeho stejnosměrné složce. Hodnoty stejnosměrné složky usměrněného napětí závisí přesně vzato i na použité míře nesymetrie ekvivalentních fázových indukčností. Pro grafické zpracování výsledků simulace byla použita střední hodnota usměrněného napětí, přičemž tato okolnost zanedbává rozdíl jednotlivých hodnot v řádu promile.

Dále Fourierova analýza výstupního usměrněného napětí dovolila vyšetřit hodnoty dalších spektrálních složek tohoto napětí, jejichž hodnota závisí na míře nesymetrie ekvivalentních fázových indukčností.

3. Výsledky simulační analýzy

Výsledky simulační analýzy lze rozdělit do dvou částí, a to na analýzu vlivu nesymetrie fázových reaktancí na:

- spektrum usměrněného napětí,
- spektrum primárního proudu,
- dělení celkového proudu do proudu dodávaného sekcí Y a D.

3.1 Výsledky analýzy spektra usměrněného napětí

Vůči stejnosměrné straně 3 kV se symetrický usměrňovač jeví jako napěťový zdroj harmonických počínaje řádem 12 (600 Hz). Pak následují harmonické složky 24., 36. atd..

V případě nesymetrie ekvivalentních fázových reaktancí bylo zjištěno, že se vyskytuje nově obsah 6. harmonické (300 Hz). Závislost procentního obsahu této složky v usměrněném napětí na činném výkonu usměrňovače pro zvolené hodnoty míry nesymetrie ekvivalentní fázové reaktance ukazuje **obrázek č. 1**. Z obrázku je patrné, že procentní obsah šesté harmonické:

- ⇒ závisí na míře nesymetrie ekvivalentních fázových reaktancí,
- ⇒ není však podstatně závislý na činném výkonu usměrňovače.

V **obrázku č. 1** jsou mimo vypočtených průběhů zakresleny i jejich regresní přímky spolu s údaji o míře spolehlivosti této náhrady.

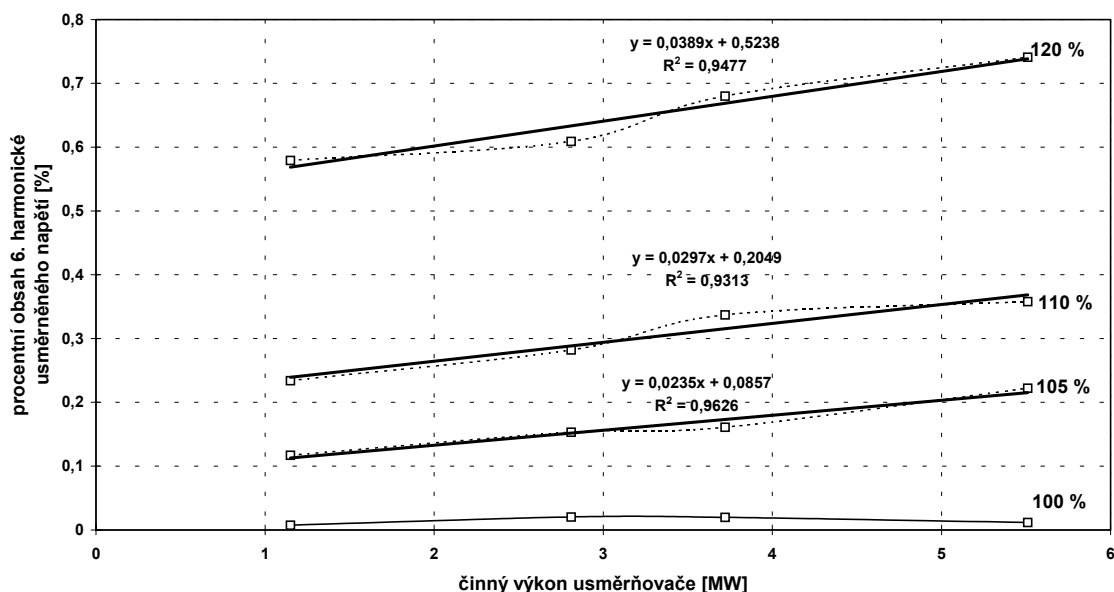
Závislost procentního obsahu 6. harmonické na míře nesymetrie ekvivalentních fázových reaktancí pro zvolené hodnoty činného výkonu usměrňovače znázorňuje **obrázek č. 2**. Tento obrázek potvrzuje výše uvedené závěry, to jest:

- ⇒ přímou závislost obsahu 6. harmonické na míře nesymetrie fázových reaktancí,
- ⇒ poměrně nevýraznou závislost na činném výkonu usměrňovače.

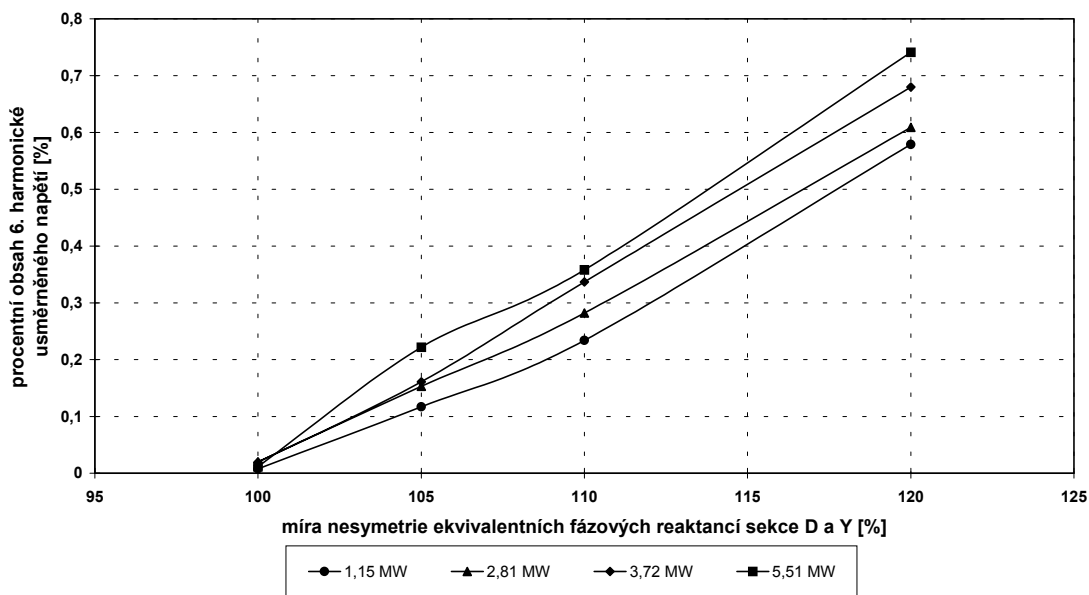
Z uvedeného lze odvodit **dílčí závěr**, že pro daný transformátor usměrňovače, který by vykazoval jistou míru nesymetrie napětí nakrátko obou sekcí Y a D a tedy i jistou míru nesymetrie hodnot ekvivalentních fázových reaktancí těchto sekcí:

- ⇒ dojde ve spektru usměrněného napětí ke vzniku nové spektrální složky 300 Hz,
- ⇒ její hodnota však nebude výrazně závislá na činném výkonu usměrňovače.

Obr. 1 Závislost procentního obsahu 6. harmonické usměrněného napětí na činném výkonu usměrňovače pro zvolené míry nesymetrie fázových reaktancí



Obr. 2 Závislost procentního obsahu 6. harmonické usměrněného napětí na míře nesymetrie ekvivalentních fázových reaktancí sekce D a Y



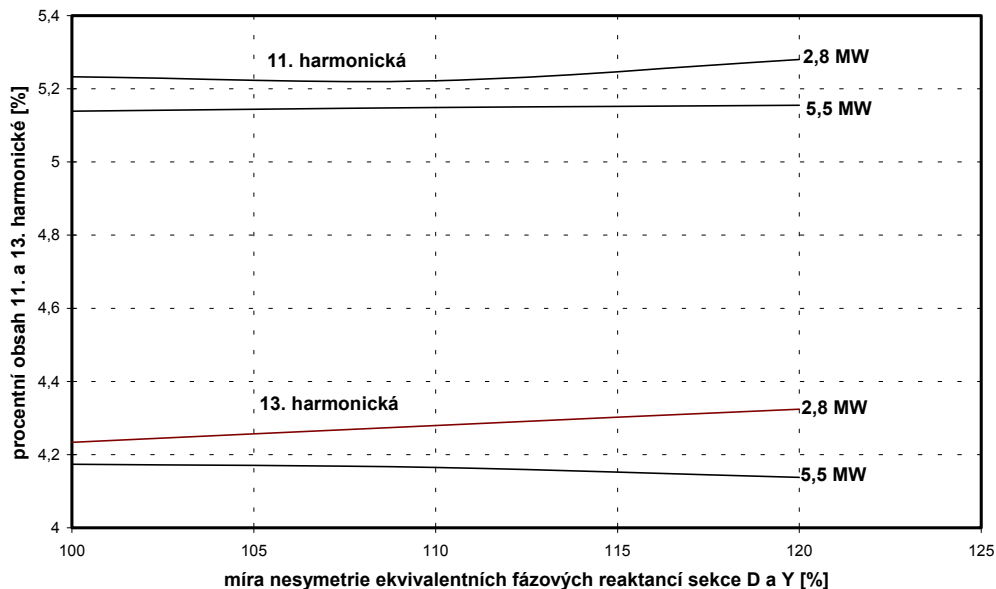
3.2 Výsledky analýzy spektra celkového primárního proudu

Vůči napájecí síti vykazuje symetrický usměrňovač charakter generátoru proudových harmonických, počínaje řádem 11. Pak následují harmonické s řády 13, 23, 25, atd.

Pokud napětí nakrátko obou sekundárních sekcí D a Y transformátoru dvanáctipulzního usměrňovače nejsou stejná, nebudou stejné ani hodnoty ekvivalentních fázových reaktancí. V takovém případě analýza prokázala tyto skutečnosti:

- ⇒ procentní obsah základních harmonických celkového primárního proudu s řády 11, 13, 23, 25, atd. zůstává prakticky nezměněn,
- ⇒ ve spektru tohoto proudu se však objevují nové spektrální složky s řády 5, 7, 17, 19, atd..

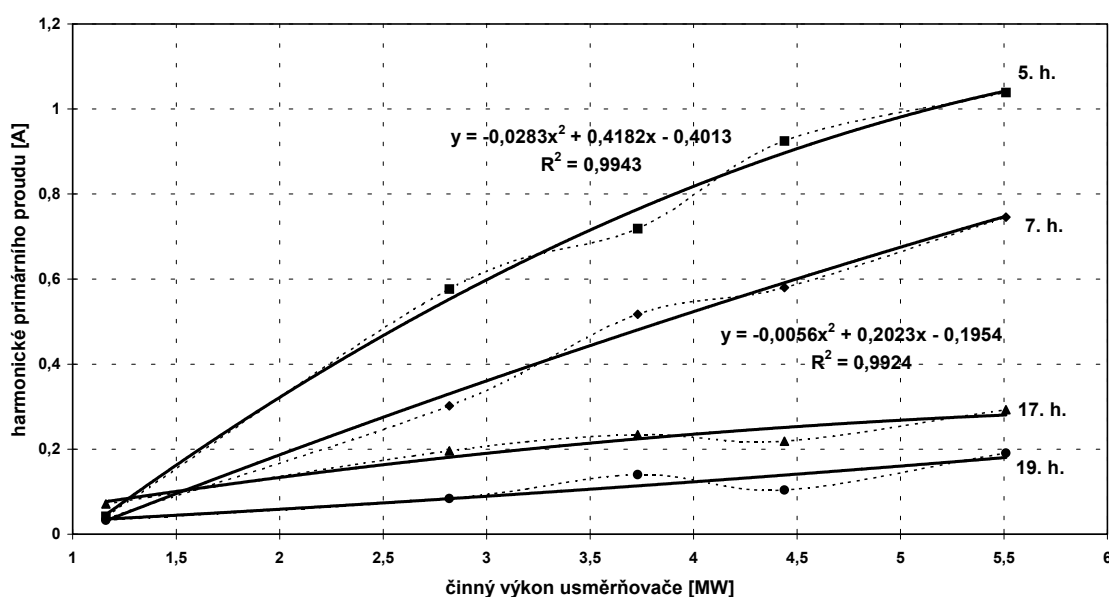
Obr. 3 Závislost procentního obsahu 11. a 13. harmonické primárního proudu na míře nesymetrie ekvivalentních fázových reaktancí sekce D a Y



První poznatek je ilustrován na **obrázku č. 3**, kde je vynesena závislost procentního obsahu 11. a 13. harmonické celkového primárního proudu na míře nesymetrie fázových reaktancí pro dvě zvolené hodnoty činného výkonu (cca 2,8 MW a cca 5,5 MW). Z obrázku je patrné, že závislost obsahu složky 11. ani 13. harmonické na míře nesymetrie fázových reaktancí není nijak výrazná a pásmo činných výkonů je též velmi úzké.

Druhý poznatek prokazují **obrázky č. 4, č. 5 a č. 6**. Zde jsou vyneseny závislosti ampérických hodnot harmonických 5., 7., 17. a 19. v celkovém primárním proudu usměrňovače v závislosti na jeho činném výkonu P , a to pro tři zvolené míry nesymetrie fázových reaktancí sekcí D a Y transformátoru usměrňovače (105 %, 110 % a 120 %). Čárkovaně jsou vyznačeny průběhy odvozené simulací. Plnou čarou jsou vyneseny regresní křivky simulovaných výsledků, přičemž jako typ regresní křivky byla zvolena kvadratická parabola.

Obr. 4 Závislost složek 5., 7., 17. a 19. harmonické primárního proudu na činném výkonu pro míru nesymetrie ekvivalentních fázových reaktancí 5 %



Pro 5. a 7. harmonickou jsou v obrázcích uvedeny i rovnice regresních křivek a jejich hodnoty spolehlivosti R^2 . Regresní koeficienty těchto rovnic byly dále zpracovány v **obrázku č. 7** tak, aby bylo umožněno sestavit rovnici regresní paraboly jako závislosti ampérických hodnot 5. nebo 7. harmonické primárního proudu (I_5 nebo I_7) na činném výkonu usměrňovače (P) i pro jiné hodnoty míry nesymetrie fázových reaktancí obou sekcí D a Y transformátoru usměrňovače, a to ve tvaru

$$\text{pro 5. harmonickou } I_5(P) = 5A \cdot P^2 + 5B \cdot P + 5C$$

$$\text{pro 7. harmonickou } I_7(P) = 7A \cdot P^2 + 7B \cdot P + 7C$$

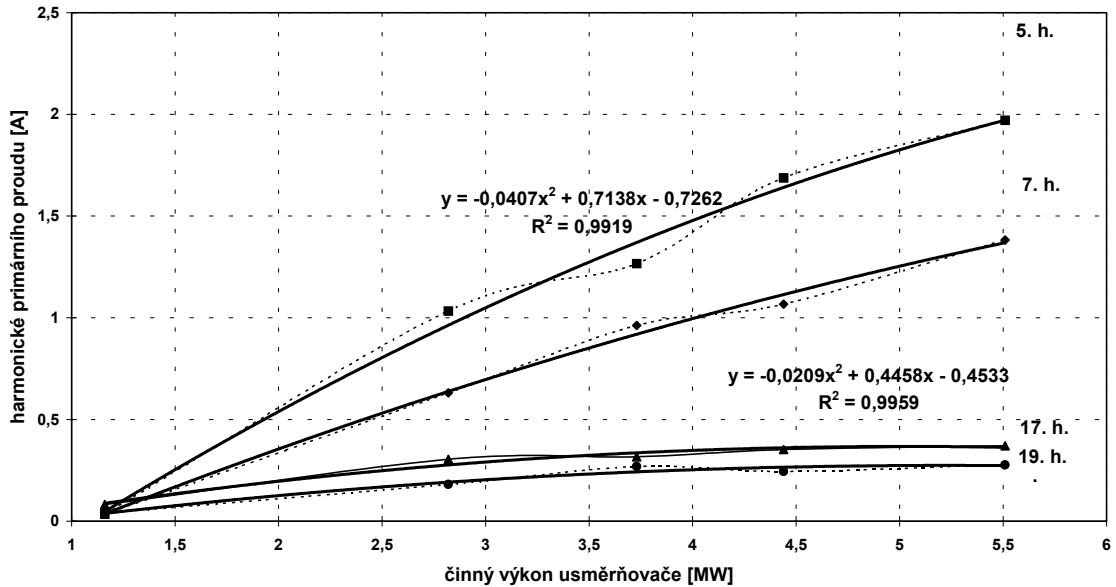
Závěrem **prvního poznatku** je potvrzení, že procentní obsah 11. či 23. harmonické klesá s hodnotou činného výkonu usměrňovače, jak bylo odvozeno ve studii [1].

Z **druhého poznatku** pak vyplývají následující skutečnosti:

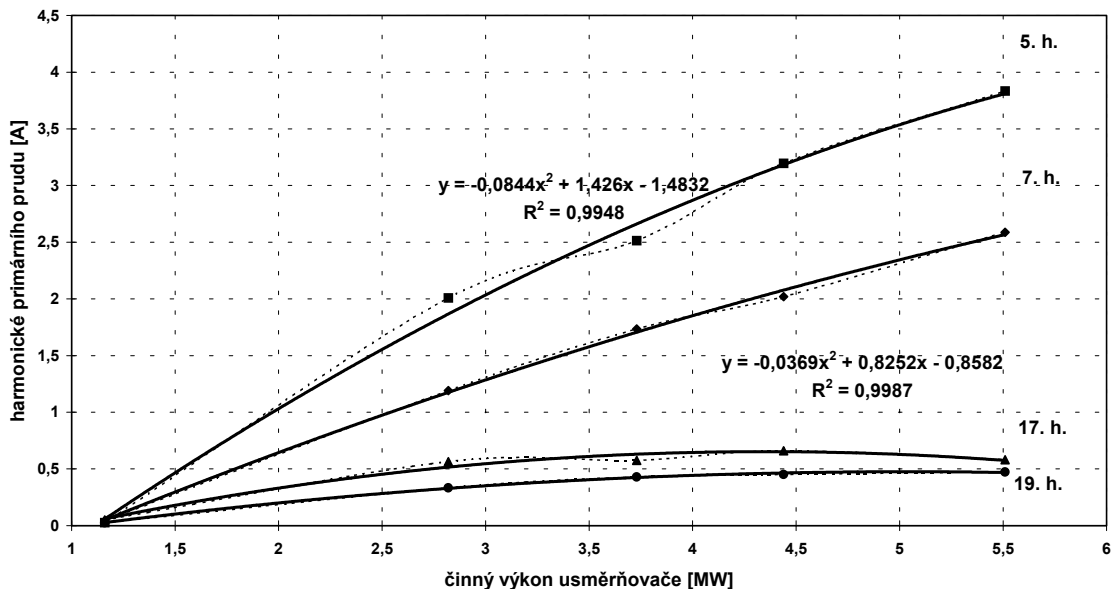
- ⇒ ani ampérické hodnoty 5., 7., 17. i 19. harmonické celkového primárního proudu usměrňovače nejsou lineárně závislé na činném výkonu usměrňovače,
- ⇒ vůči linearizovanému průběhu dosahují tyto složky nižších hodnot,
- ⇒ tyto skutečnosti platí pro všechny tři zvolené míry nesymetrie ekvivalentních fázových reaktancí sekundárních vinutí transformátoru usměrňovače, i když v jiných absolutních hodnotách,

⇒ rovnice regresních křivek (kvadratických parabol) dovolují výpočet ampérických hodnot uvedených spektrálních složek i pro jiné hodnoty činného výkonu usměrňovače a též pro jiné hodnoty míry nesymetrie fázových reaktancí sekce D a Y.

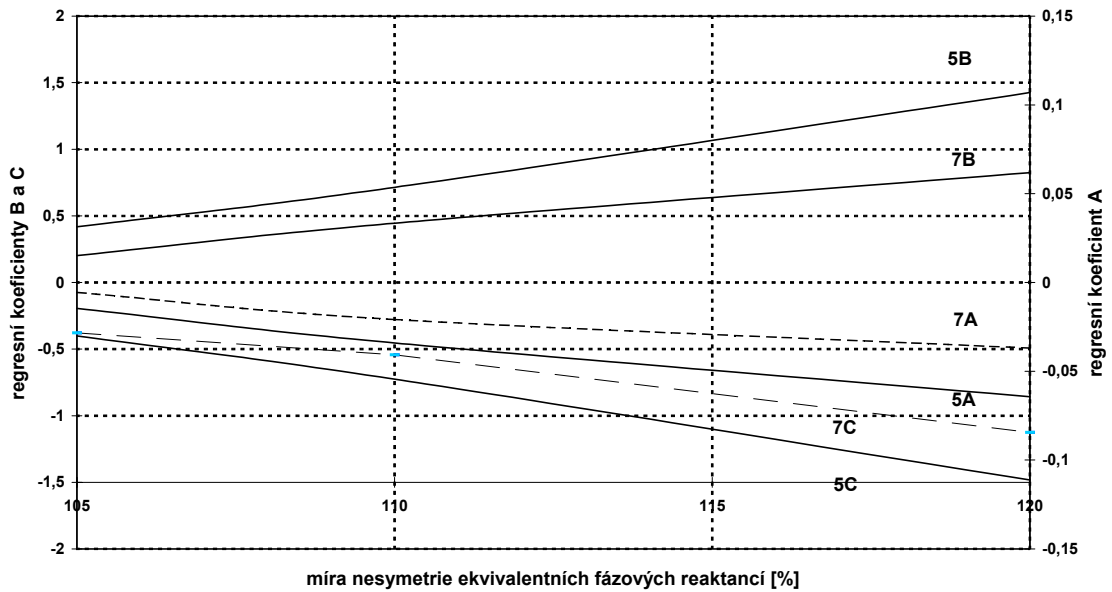
Obr. 5 Závislost složek 5., 7., 17. a 19. harmonické primárního proudu na činném výkonu pro míru nesymetrie ekvivalentních fázových reaktancí 10 %



Obr. 6 Závislost složek 5., 7., 17. a 19. harmonické primárního proudu na činném výkonu pro míru nesymetrie ekvivalentních fázových reaktancí 20 %



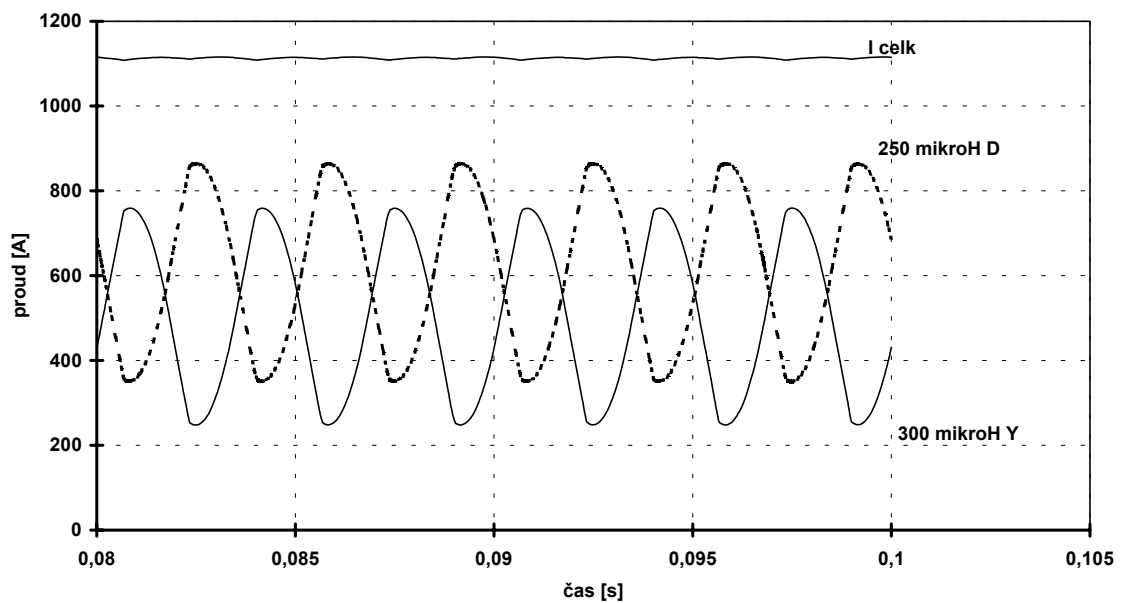
Obr. 7 Regresní koeficienty pro určení závislosti 5. a 7. harmonické primárního proudu na činném výkonu usměrňovače, pro míru nesymetrie ekvivalentních fázových reaktancí v mezích od 105 % do 120 %



3.3 Výsledky analýzy dělení celkového proudu do proudu dodávaného sekcí Y a D

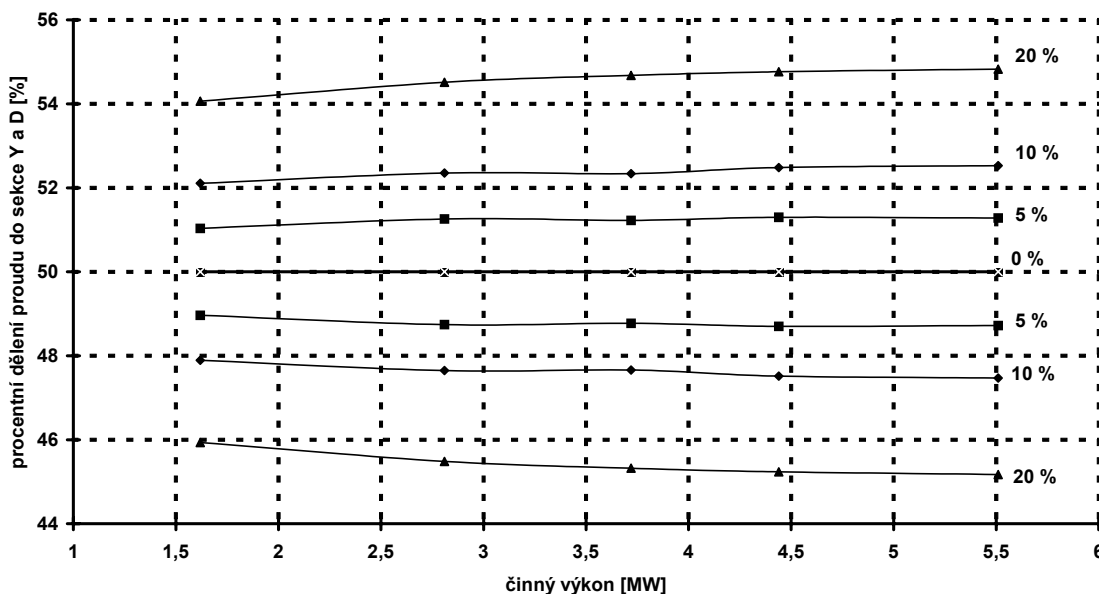
Nesymetrie hodnot ekvivalentních anodových reaktancí sekce Y a D se dále projeví i v dělení celkového proudu dodávaného dvanáctipulzním usměrňovačem. Je pochopitelném, že sekce, jejíž hodnoty ekvivalentní anodové reaktance jsou větší než u sekce druhé, bude dodávat menší procentní díl celkového proudu.

Obr. 8 Časové průběhy proudu sekce Y a D a celkového proudu



Ukázka časového průběhu proudu dodávaného sekcí Y a D a proudu celkového je uvedena na **obrázku č. 8**. Pro tuto simulaci byla vzata hodnota míry nesymetrie ekvivalentních anodových reaktancí 20 % (základní hodnota 250 μH u sekce D a zvýšená hodnota 300 μH u sekce Y), celkový usměrněný proud měl hodnotu 1110,9 A a činný výkon usměrňovače byl 3,7 MW.

Obr. 9 Závislost dělení proudu do sekce Y a D na výkonu pro zvolené míry nesymetrie fázových reaktancí



Simulací dále vznikl **obrázek č. 9**, podávající závislost procentních hodnot dělení proudu do sekce Y a D na výkonu usměrňovače pro zvolené míry nesymetrie hodnot ekvivalentních anodových reaktancí. Při této simulaci bylo nutno nahradit největší zvolenou hodnotu zatěžovacího rezistoru 10 Ω hodnotou 7 Ω .

Z **obrázku č. 9** je patrné, že zjištěné hodnoty procentních podílů obou sekcí usměrňovače na celkovém proudu dodávaném usměrňovačem prakticky nezávisí na jeho odebraném výkonu, jsou však pochopitelně závislé na míře nesymetrie ekvivalentních anodových reaktancí.

4 Číselný příklad

Mějme transformátor dvanáctipulzního usměrňovače o jmenovitém výkonu 5 MW, kde napětí nakrátko a tedy i hodnoty ekvivalentních fázových reaktancí vykazují míru nesymetrie 15 %.

V takovém případě dává obrázek č. 2 pro 6. harmonickou ve spektru výstupního usměrněného napětí při jmenovitém výkonu usměrňovače procentní hodnotu v mezích od 0,4 % do 0,55 %, tedy od 13,2 V do 18,2 V.

V celkovém primárním proudu se budou při jmenovitém výkonu usměrňovače vyskytovat složky:

- 5. harmonické, kde obrázek č. 7 dává rovnici regresní paraboly ve tvaru

$$I_5 \cong -0,07 \cdot 5^2 + 1,1 \cdot 5 - 1,15 = 2,6 \text{ A}$$

- 7. harmonické, kde obrázek č. 7 dává rovnici regresní paraboly ve tvaru

$$I_7 \cong -0,03 \cdot 5^2 + 0,65 \cdot 5 - 0,65 = 1,85 \text{ A}$$

Z á v ě r y

Skutečnosti vyplývající z výsledků této simulace včetně poznatků odvozených v [1] lze shrnout do následujících závěrů:

1. Dvanáctipulzní schéma trakčního usměrňovače může obsahovat ve spektru výstupního napětí mimo známé složky 12. (600 Hz), 24. (1200 Hz) atd. harmonické ještě navíc složku 6. (300 Hz) harmonické pouze v případě, že ekvivalentní fázové reaktance dané napětím nakrátko jsou u sekce D a sekce Y různé.
2. Procentní obsah této nové složky spektra výstupního napětí závisí především na míře nesymetrie ekvivalentních fázových reaktancí sekce D a Y, přičemž jeho závislost na činném výkonu usměrňovače je nevýrazná.
3. V primárním proudu usměrňovače se mimo známé složky 11. (550 Hz), 13. (650 Hz), 23. (1150 Hz) či 25. (1250 Hz) harmonické mohou vyskytnout ještě navíc složky 5. (550 Hz), 7. (350 Hz), 17. (850 Hz) či 19. (950 Hz) harmonické, pokud hodnoty ekvivalentních fázových reaktancí sekce D a Y nejsou stejné.
4. Podobně, jak bylo odvozeno v [1] pro 11., 13., 23. a 25. harmonickou, ani ampérické hodnoty 5., 7., 17. či 19. harmonické nejsou lineárně závislé na činném výkonu usměrňovače a jejich hodnoty leží pod hodnotami, které by udávala linearizovaná závislost.
5. **Obrázek č. 7** poskytuje možnost stanovení závislosti ampérických hodnot 5. a 7. harmonické primárního proudu usměrňovače na jeho činném výkonu pro libovolnou hodnotu činitele nesymetrie ekvivalentních fázových reaktancí pomocí regresní paraboly druhého stupně.
6. **Obrázek č. 9** ukazuje vliv míry nesymetrie ekvivalentních anodových reaktancí na dělení celkového usměrněného proudu do sekcí Y a D usměrňovače. Výsledky simulace prokazují, že činný výkon usměrňovače má na toto dělení celkového proudu zanedbatelný vliv.

Literatura:

- [1] Hlava, K.: Parametry odběru elektrické energie dvanáctipulzním trakčním usměrňovačem v závislosti na jeho zatížení. Vědeckotechnický sborník Českých drah č. 14 (2002), str. 121 - 139
- [2] Krupica, J.: Možnosti splnění dovolených hodnot napěťových harmonických v přípojovacím bodě TNS DC (TÚDC 14/2003)
- [3] Heller, B.: Stanovení rozptylu transformátorů usměrňovačů s ohledem na komutaci anod. Elektrotechnický obzor, svazek č. 43, č. 3 (1954), str. 119 - 123

V Praze, březen 2004

Lektoroval: Ing. Jiří Krupica
vedoucí odd. EMC TÚDC