

Necharakteristické harmonické a mezharmónické polovodičových měničů

V. Kus

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky, Fakulta elektrotechnická, ZČU v Plzni,
Univerzitní 26, Plzeň
E-mail : kus@kev.zcu.cz

Anotace:

Provozem polovodičových měničů jsou odebírány ze sítě silně deformované proudy. Harmonickou analýzou těchto proudů zjišťujeme jednak dominantní charakteristické harmonické, ale též necharakteristické harmonické a mezharmónické. Článek se zabývá principem vzniku necharakteristických harmonických a mezharmónických, jejich velikostí a vlivu v rozvodných soustavách. S ohledem na dnes nejpoužívanější měniče kmitočtu jsou příklady uváděny pro tyto měniče.

Článek současně upozorňuje na určité rozpory mezi základní teorií Fourierových řad a používanou terminologií. Zabývá se možnou detekcí necharakteristických harmonických a mezharmónických při měření, aniž by tyto výsledky měly fyzikální opodstatnění.

Abstract:

By the use of semiconductor converters are removed from the network the currents, that are more distorted. After analysis of these currents we find the dominant characteristic harmonics current, but also non-characteristic harmonics and interharmonics. The article deals with the principle of non-characteristic harmonics and interharmonics, their size and influence in the electrical distribution systems. As the frequency converters are today the most used, are examples given for those converters.

It also gives attention to certain contradictions between the basic theory of Fourier analysis and used terminology. The article deals also with possibilities for detection of non-characteristic harmonics and interharmonics during measuring, without these results should the physical significance.

ZÁKLADNÍ POJMY A DEFINICE

Funkce $f(t)$, které splňují tzv. Dirichletovy podmínky lze vyjádřit Fourierovou řadou:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} [a_h \cos(h\omega_1 t) + b_h \sin(h\omega_1 t)] \quad (1)$$

$$\omega_1 = 2\pi/T \quad (2)$$

Koeficienty a_0 , a_h , b_h se nazývají Fourierovy koeficienty funkce $f(t)$ pro interval $\langle 0; T \rangle$.

Funkce (průběh), ze které provádíme analýzu, musí být periodická s periodou T . V souladu s definicí (1) tak vyplývá, že harmonická h je celé číslo (teoreticky od 1 do nekonečna).

Při běžných podmínkách odebírají polovodičové měniče ze sítě proudy s velkým zkreslením. Této problematice je v literatuře věnována velká pozornost [1-4]. Jako příklad uveďme na obrázku 1 typický průběh proudu, který ze sítě odebírá měnič kmitočtu (s napěťovým meziobvodem).

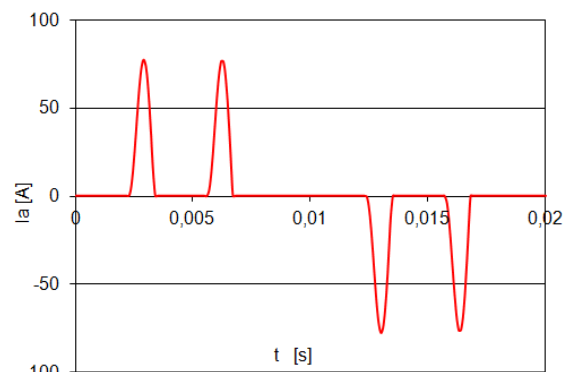
Harmonickou analýzou tohoto průběhu dostaneme dnes známý zobecněný amplitudový zákon [5]:

$$I_h = \frac{1}{h} I_1 \cdot \frac{\sin \frac{hd}{2}}{\sin \frac{d}{2}} \quad (3)$$

V tomto vztahu je I_1 hodnota proudu první harmonické, h je řád harmonické a d je doba, po kterou dioda

vede proud. Uvedená rovnice platí pouze pro harmonické, jejichž hodnota je:

$$h = kp \pm 1 \quad \mathbf{k} \text{ celé číslo} \quad (4)$$



Obr. 1: Typický průběh proudu, odebíraný polovodičovým měničem ze sítě

Důležitý poznatek dostáváme z rovnice (4): ve spektru analyzovaného proudu se harmonické jiných řádů nevyskytují. Harmonické, které vyhovují rovnici (4), pak nazýváme **charakteristické harmonické**. Při splnění idealizovaných podmínek (symetrie, konstantní zátěž, vysoký zkratový výkon sítě, atd.) nemohou jiné, než charakteristické harmonické vzniknout. Vyčíslením vztahu (3) pro typické parametry měničů a sítě pak dostáváme, že hodnoty charakteristických harmonických jsou velmi vysoké (řádově 10-80 procent) základní harmonické. Jsou tedy **domi-**

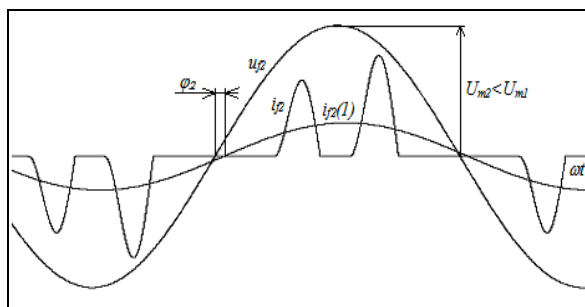
nantní, způsobují největší problémy a je jim v literatuře pochopitelně věnována nejvyšší pozornost.

V případě, že nejsou splněny idealizované podmínky (není obvykle dodržena symetrie sítě, nejsou stejné vlastnosti součástek v měniči), mohou se ve spektru objevit i harmonické, které nevyhovují rovnici (4). Takové harmonické se nazývají **necharakteristické harmonické**. Provedení výpočtu necharakteristických harmonických je vzhledem k proměnnosti a množství parametrů analyticky obtížné a z hlediska přínosu zbytečné. Jak vyplývá v další části článku, nejsou však hodnoty necharakteristických harmonických ve srovnání s charakteristickými harmonickými zanedbatelné. Přesto jim v literatuře není věnován dostatečný prostor.

U analyzátorů kmitočtu však dostáváme i hodnoty tzv. **meziharmonických**. K meziharmonickým se dostaneme tehdy, pokud poměr mezi naměřenou frekvencí a frekvencí základní harmonické uvedené veličiny není celé číslo. To by ale v souladu se vztahy 1,2 nikdy nevzniklo. Pokud ale za základní frekvenci první harmonické budeme považovat $f_1 = 50$ Hz, lze meziharmonickou (i v rozporu s teorií Fourierových řad) takto definovat. Hodnota meziharmonických je (kromě výjimek) nízká.

NECHARAKTERISTICKÉ HARMONICKÉ

V předchozí části bylo uvedeno, že se jedná o harmonické, které nevyhovují rovnici (4). Aby mohly necharakteristické harmonické vzniknout, je třeba nesymetrických poměrů v obvodu síť – měnič. U měničů kmitočtu se jedná jak o nesymetrii v napájecí soustavě (napětíovou i fázovou), tak o nesymetrii součástek v měniči či dalších komponentů (vstupní indukčnosti)¹. Výrazně pojednávají o této problematice práce [6-7]. Jako příklad uveďme průběh odebíraného proudu jedné fáze měniče kmitočtu při napětíové nesymetrii – viz obr 2, převzato z [6].



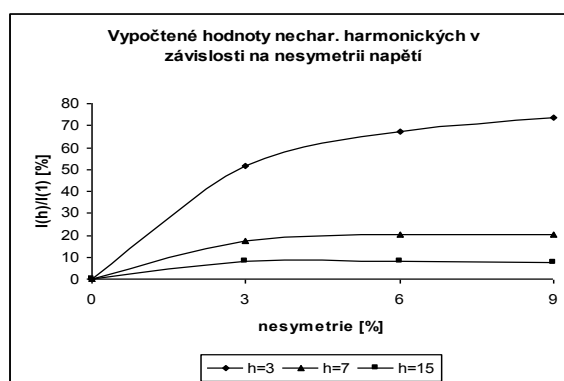
Obr. 2: Proudové a napětíové poměry měniče kmitočtu při napětíové nesymetrii

Z obrázku je patrné, že stačí velmi malá nesymetrie napájecího napětí (řádově %) a průběh proudu je

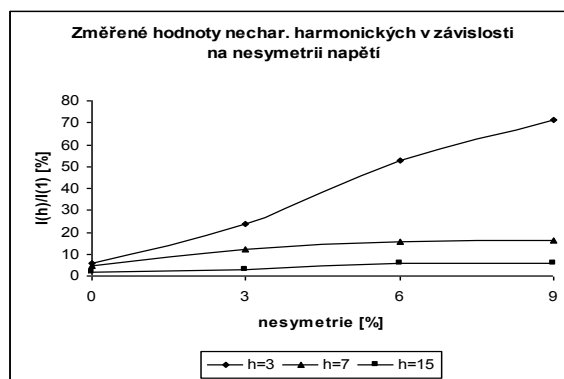
¹ Nesymetrie mají pochopitelně vliv i na charakteristické harmonické. Protože hodnoty proudů charakteristických harmonických jsou vysoké, tak vliv nesymetrií na jejich velikost je zanedbatelný.

nesymetrický. Dalším, doprovodným jevem je zhoršení fázového posunu první harmonické proudu. Pokud budeme zjišťovat závislost harmonických na velikosti nesymetrie napětí, zjistíme:

- ve spektru odebíraného proudu se objevují liché necharakteristické harmonické;
- jejich hodnota může dosáhnout až desítky procent. Protože v běžných provozech je nesymetrie napětí v řádu několika voltů běžná, jsou tím vysvětleny nesymetrické průběhy odebíraných proudů a rovněž vznik nemalé hodnoty 3. harmonické (která by dle základních teorií pro 3. fázový můstek neměla vzniknout). Na obrázku 3 a 4 jsou uvedeny hodnoty některých necharakteristických harmonických proudu v závislosti na velikosti napětíové nesymetrie. Pro úplnost je provedeno srovnání simulací a měření.



Obr. 3: Příklad vypočítaných závislostí necharakteristických harmonických



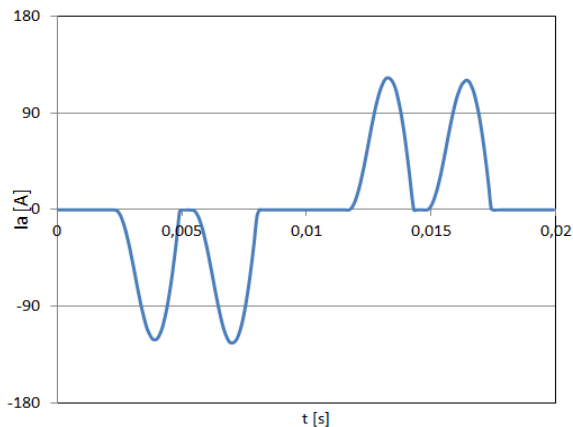
Obr. 4: Příklad naměřených závislostí necharakteristických harmonických

Na obrázcích 5-7 jsou uvedeny průběhy proudů pro různé nesymetrie napětí (0%, 5%, 10%).

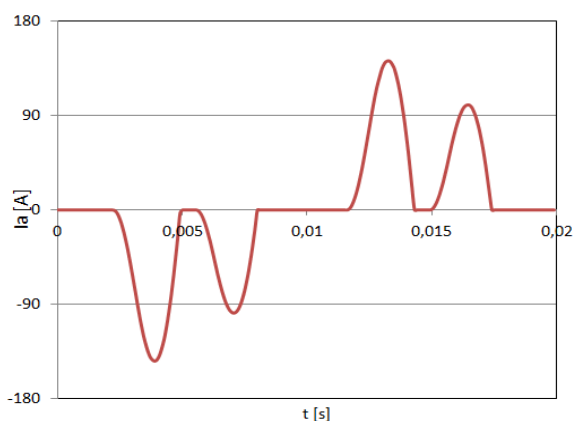
Jestliže při idealizovaných podmínkách je proud symetrický a nedochází ke vzniku necharakteristických harmonických, při nesymetriích jsou pak hodnoty necharakteristických harmonických vysoké. Pro ilustraci vzniku necharakteristických harmonických a jejich velikosti jsou pak v tabulce 1 uvedeny hodnoty 3. harmonické (pro srovnání jsou pak uvedeny i hodnoty 5. harmonické).

Z tabulky pak dostáváme:

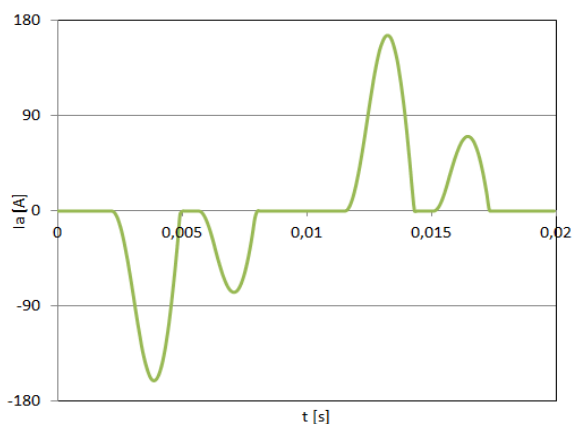
- a) při nesymetriích nad 5 % jsou hodnoty 3. harmonické (= necharakteristické harmonické) vysoké a řádově srovnatelné s hodnotami charakteristických harmonických,
- b) hodnoty necharakteristických harmonických rostou se zvětšující se nesymetrií,
- c) hodnoty charakteristické harmonické jsou vysoké a se změnou nesymetrie se mění jen nepatrně.



Obr. 5: Odebíraný proud při nulové nesymetrii napětí



Obr. 6: Odebíraný proud při nesymetrii napětí 5 %



Obr. 7: Odebíraný proud při nesymetrii napětí 10 %

Tabulka 1: Porovnání hodnot 3. a 5. harmonické pro průběhy z obrázků 5-7

Nesymetrie [%]	I_1 [A]	I_3 [A]	I_3/I_1 [%]	I_5 [A]	I_5/I_1 [%]
0	65,2	0,0	0	45	69,2
5	64,1	13,9	21,7	45,7	71,2
10	64,3	27,3	42,4	45,9	71,4

MEZIHARMONICKÉ

V závěru úvodní kapitoly bylo konstatováno, že není možné, aby vznikala meziharmonická složka. Proto, aby tato složka vznikla, musí být přijat postulát, že frekvence základní harmonické je pevně dána – v souladu s normou [8] to je 50 Hz. Pokud pak analyzátozem nebo výpočtem zjistíme frekvenční složku, která není celočíselným násobkem základní frekvence, mluvíme o tzv. meziharmonické. Meziharmonickým se literatura zabývá omezeně, např. [9-10].

Možnosti vzniku meziharmonických

Podmínky pro vznik pouze charakteristických harmonických byly uvedeny v úvodní kapitole. Zejména je nutné, aby byly dodrženy symetrie v napájecí soustavě i ve vlastním měniči. Jakmile to není splněno, vznikají necharakteristické harmonické. Ke vzniku meziharmonických může dojít až při jiných, následujících důvodech:

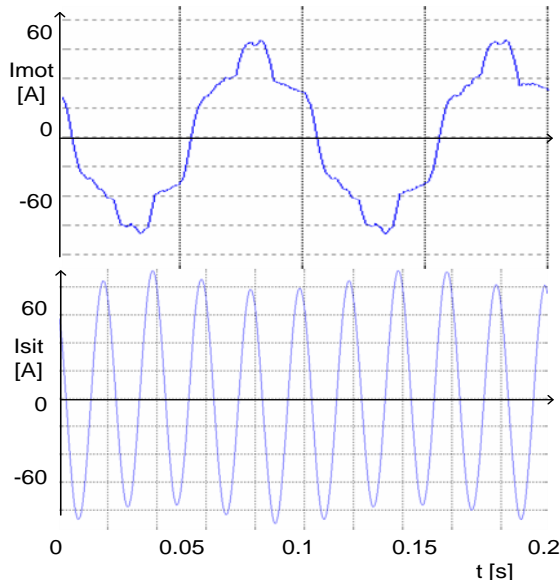
- Provozem zařízení, který odebírá ze sítě proud v ustáleném stavu s meziharmonickou frekvencí (například tzv. cyklokonvertory). V malé míře to též jsou frekvenční složky proudů, přenášené měniči s pulzními modulacemi přes stejnosměrný obvod na napájecí střídavou síť.
- Připojením zařízení, které generuje do soustavy signál s frekvencí meziharmonické (například vysílače HDO) nebo naopak aktivní filtry.
- Změnou hodnot v soustavě či v měniči během měření (analýzy).

Meziharmonické vzniklé provozem měničů

V tomto případě vznikají meziharmonické jako výsledek činnosti měniče v ustáleném stavu. Znamená to použití měniče s vlastní komutací tak, že meziharmonická složka je vytvářena přímo měničem. Mezi nejčastější typy měničů, které produkují meziharmonické vysokých hodnot řadíme cyklokonvertory [11-12]. Princip vzniku meziharmonické je znázorněn na obrázku 8. Výstupní frekvence cyklokonvertoru je 10 Hz. Síťový proud je v každé periodě frekvence f_1 jiný. Otázkou ale je, jak časté je nasazování cyklokonvertorů v současné době. Protože se obvykle jedná o vysoké výkony, je otázka harmonických a meziharmonických řešena současně s projektem.

Mezi další měniče, které způsobují meziharmonické lze řadit například pulzní usměrňovače. S ohledem na

jejich princip řízení jsou hodnoty mezipharmonických těchto měničů velmi nízké. Obdobně je tomu v případě přenosu harmonických ze střídavé strany měniče kmítočtu přes stejnosměrný meziobvod na stranu sítě. Velikost mezipharmonických proudů je nízká.



Obr. 8: Princip vzniku mezipharmonických proudů provozem cyklokonvertoru

Mezipharmonické v síti, způsobené injektováním signálu do soustavy

Mezi nejčastější případ patří použití signálu HDO. Protože systém HDO používá frekvence vyšší než je 50 Hz a odpovídající vlnová délka signálu HDO se přibližuje délkám silnoproudých vedení, je vhodné dívat se na tento systém jako na systém s „rozloženými parametry“. Pro správnou činnost přijímačů je nutné dodržet určitou úroveň signálu HDO v síti. Na druhou stranu ale nesmí být úroveň tohoto signálu příliš vysoká (rušivé vlivy). Nebezpečí vznikne v případě, že frekvence signálu vysílače HDO je blízká rezonanční frekvenci použitých filtrů (či přesněji chráněné kompenzace) nebo v případě, že signál HDO se dostává do blízkosti rezonanční frekvence sítě. Problematikou HDO a interakcí se sítí a kompenzačním zařízením se zabývá práce [13].

Druhou možností, kdy se do sítě mohou dostávat frekvence z vnějších zdrojů je použití aktivních filtrů. V tomto případě se jedná o zařízení, které slouží k eliminaci již existujících harmonických či mezipharmonických. Aktivním filtrem je v literatuře věnována velmi častá pozornost, od výkonových obvodů [14-15] až po regulaci a řízení [16].

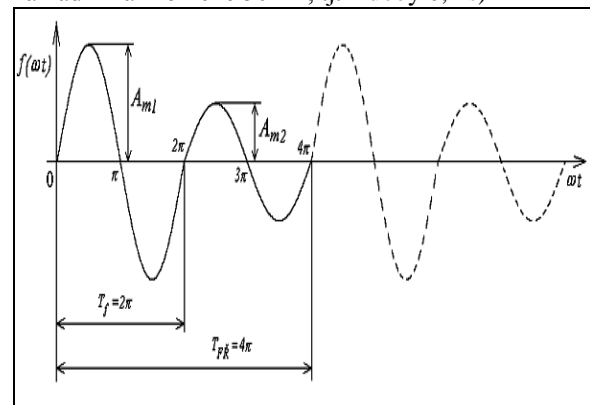
Mezipharmonické, vzniklé změnou hodnot v soustavě či v měniči během měření

Jedná se o nejčastější případ, kdy dochází k indikaci nenulových hodnot mezipharmonických. Při analytických výpočtech nebo simulacích obvykle předpokládáme určité stavy, které jsou ale obvykle konstantní. Obvykle i malé odchylky v napětí, v zátěži atd. neve-

dou k výrazným mezipharmonickým. Provozní podmínky v praxi ale vedou i ke změnám, vedoucím k výraznému nárůstu mezipharmonických. Mezi tyto změny lze řadit poklesy napětí (jednofázové i třífázové), změny zátěže a změny impedance sítě. Ke vzniku mezipharmonických přispívá i proměnná deformace napájecího napětí.

a) Teorie vzniku mezipharmonických při měření

V následujícím předpokládáme průběh proudu dle obrázku 9. Pro zjednodušení budeme analýzu provádět z 2 period (dle normy [18] se provádí z 10 period základní harmonické 50 Hz, tj. z doby 0,2 s)



Obr. 9: Harmonický průběh funkce, určené pro analýzu mezipharmonických složek

Nejprve provedeme analýzu z prvního intervalu, to je z doby (0-0,02) sekundy. Z obrázku 9 je zřejmé, že v tomto intervalu dostaneme jedinou frekvenční čáru 50 Hz s amplitudou A_{m1} . Budeme-li provádět analýzu v intervalu (0,02-0,04) sekundy, dostaneme opět jedinou složku (50 Hz) s amplitudou A_{m2} . Protože ale periodičnost funkce dle obrázku 9 je dána intervalem (0-0,04) sekundy, je třeba provádět i Fourierovu analýzu v tomto intervalu. Nejnižší frekvenční složka bude v tomto případě $f_1 = 25$ Hz. Hodnota amplitudy je $(A_{m1} - A_{m2}) \cdot 4/3\pi$. Pro frekvenci 50 Hz (v našem případě se jedná o druhou harmonickou) je hodnota amplitudy $A_{m1} + A_{m2}/2$. Je patrné, že druhý člen Fourierovy řady má frekvenci totožnou s první harmonickou frekvence sítě. Protože je ale vzhledem k zvyklostem energetických veličin (a v souladu s normou) označován za základní frekvenci hodnotu 50 Hz, je třeba na frekvence, které nejsou celočíselným násobkem 50 pohlížet jako na tzv. mezipharmonické [19].

V souladu s definicí Fourierových řad se předpokládá opakování průběhu. Podle obrázku 9 je to po dvou periodách, dle citované normy pro měření harmonických pak po deseti periodách základní frekvence, tj. po době 0,2 sekundy. Základní harmonická bude 50 Hz, v souladu s normou se ale bude jednat o mezipharmonickou. První charakteristická harmonická (50 Hz) tedy v podstatě bude tvořena 10tou frekvenční čarou.

Z uvedeného vyplývá:

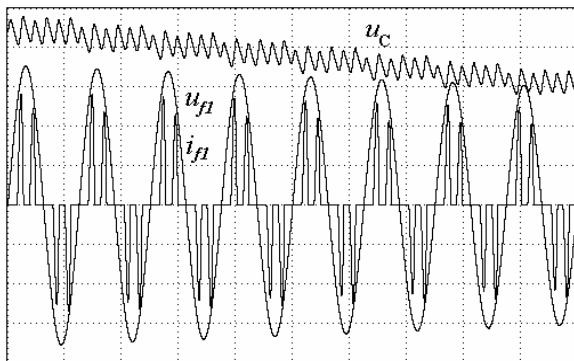
a) V případě přechodového děje delšího, než 0,2 sekundy jsou výsledky analýzy zkresleny. Jsou správné pouze pro časový úsek, pro který byla analýza provedena.

b) V případě kratší doby jsou z pohledu Fourierovy analýzy výsledky správné.

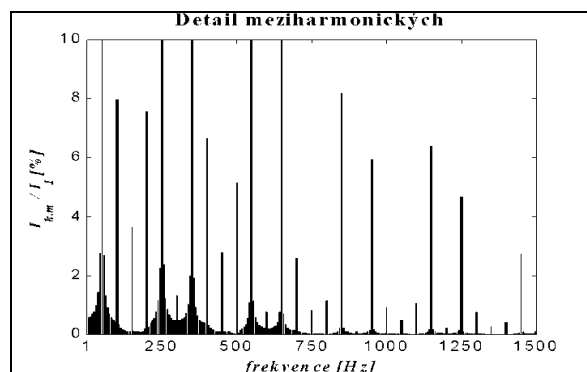
V obou případech však zůstává otázkou význam výsledků tohoto neopakovatelného děje. V dalším se tedy zaměříme na možnosti, vedoucí ke vzniku mezipharmonických a jejich hodnotám. Obdobně jako u charakteristických i necharakteristických harmonických se zaměříme na nepřímé měniče kmitočtu s napěťovým střídačem.

b) Třífázová změna napětí u napájecí soustavy

Předpokládejme, že dojde v síti k postupnému poklesu napětí. Příkladem může být vzdálený rozběh motoru. Vlivem poklesu napájecího napětí dochází ke snížení napětí ve stejnosměrném obvodu měniče. Pokud zůstane konstantní zátěž, dojde pochopitelně ke změnám v průběhu odebíraného proudu a tím i k mezipharmonickým. Ukázka průběhu odebíraného proudu a výsledek harmonické analýzy je uvedena na obrázcích 10-11 (viz [18]).



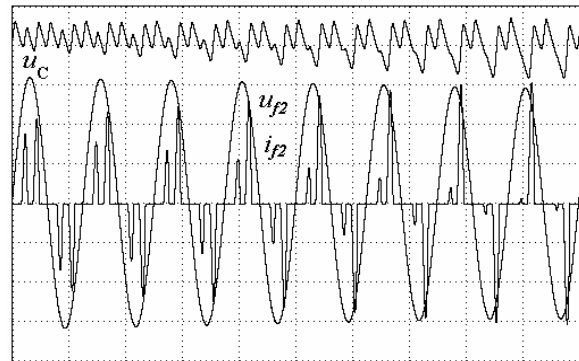
Obr. 10: Průběhy napětí a proudu v měniči kmitočtu při změně napájecího napětí



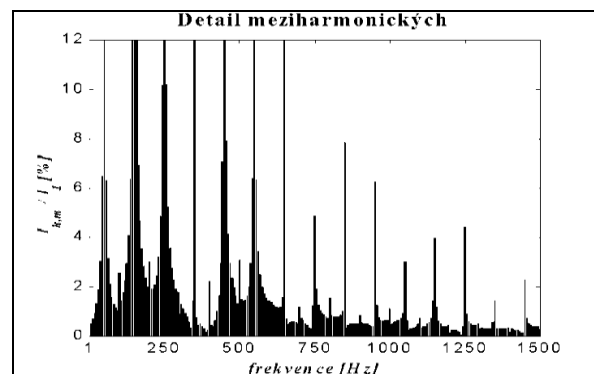
Obr. 11: Detail harmonické analýzy odebíraného proudu i_{f1} , obrázek 10

Z hlediska mezipharmonických nastane horší situace v případě, že se jedná o pokles napětí v jedné fázi. Kromě již zmíněného vlivu na necharakteristické harmonické (ustálený stav, jednofázová nesymetrie)

dochází v přechodovém stavu k nárůstu mezipharmonických. Ukázka je na obrázcích 12-13 (viz [18]).



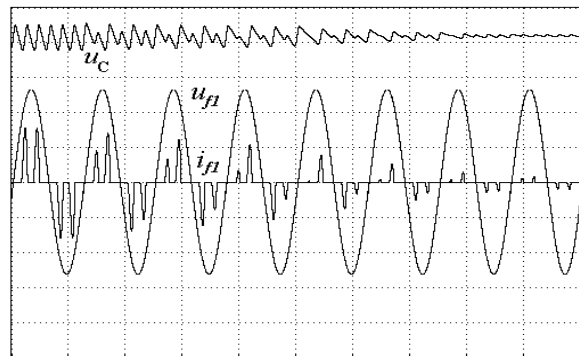
Obr. 12: průběhy napětí a proudu při jednofázové změně napětí ($\Delta U = 10\%$)



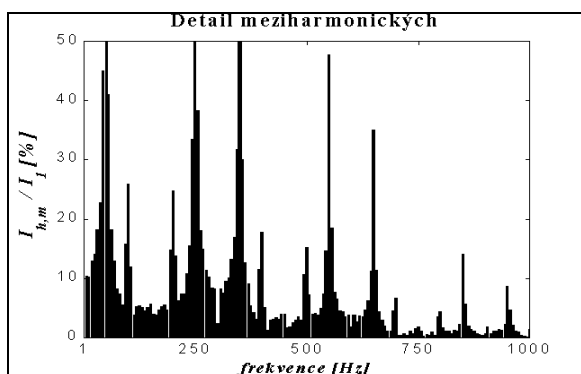
Obr. 13: Detail harmonické analýzy odebíraného proudu i_{f1} , obrázek 12

c) Dynamická změna zátěže

Pokud dochází ke kolísání zátěže v malém rozsahu (cca do 50 %), jsou hodnoty mezipharmonických nízké. Problém nastane při poklesu zátěže k nule a stálému připojení měniče. Pak jsou hodnoty poměrných hodnot mezipharmonických vysoké (vztaženo ke střední hodnotě proudu základní harmonické). Protože hodnota první harmonické klesá, je i hodnota mezipharmonické v absolutní hodnotě nízká. Ukázka průběhu odebíraného proudu a výsledek harmonické analýzy je uvedena na obrázcích 14-15 (viz [19]).



Obr. 14: průběhy napětí a proudu při dynamickém poklesu zátěže

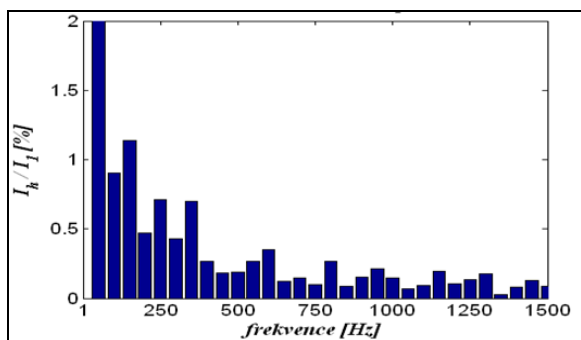


Obr. 15: Detail harmonické analýzy odebraného proudu i_{f1} , obrázek 14

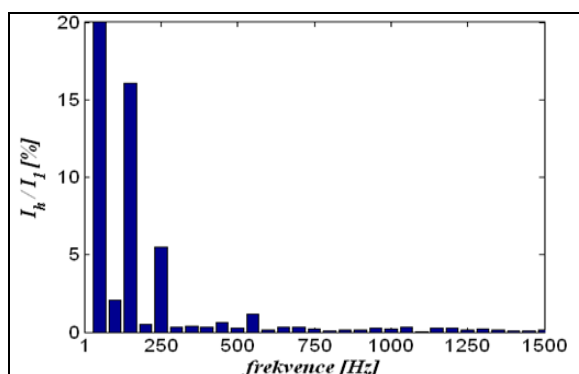
HARMONICKÉ A MEZIHARMONICKÉ SOFTSTARTÉRŮ

Softstartéry jsou elektronická výkonová zařízení, sloužící k plynulým rozběhům a doběhům pohonů s asynchronními motory. Hlavními důvody k jejich použití jsou omezení záběrového proudu při rozběhu pohonu, ochrana a snížení opotřebení mechanismu pohonu a ochrana motoru po dobu jeho chodu. Ve své podstatě se jedná o měniče napětí. Pokud budeme uvažovat rozběh s konstantním proudem (úhlem řízení měniče), budou vznikat pouze charakteristické harmonické v souladu se zobecněným amplitudovým zákonem (rovnice 3). Proud je přerušovaný, ale jiné než charakteristické harmonické nevznikají. Řízení ale nemusí být konstantní, a proto dochází ke vzniku dalších frekvenčních složek. Na obrázku 16 jsou výsledky harmonické analýzy průběhu proudu, naměřeného přímým připojením motoru k síti, na obrázku 17 pak při připojení softstartéru. (Na softstartéru bylo ponecháno výrobní nastavení, řízení nebylo změněno). Porovnáním obrázků dostáváme, že se ve spektru odebraného proudu objevuje výrazná hodnota 3. a 5. harmonické. Velikost ostatních harmonických ani mezharmónických se nemění výrazně [20].

Pokud budeme posuzovat pouze zvýšení 3. (5.) harmonické proudu, bude použití softstartéru jistě nevýhodné. Protože ale vzniká zejména 3. harmonická (kterou lze odstranit) a s ohledem na omezení jinak vysokého rozběhového proudu motoru je negativní vliv softstartérů na síť malý.



Obr. 16: Detail procentních hodnot harmonických proudů odebraných při přímém připojení motoru na síť ($I_{ef1} = 27$ A)



Obr. 17: Detail procentních hodnot harmonických proudů odebraných rozběhu motoru softstartérem ($I_{ef1} = 11,8$ A)

PŮSOBNÍ NECHARAKTERISTICKÝCH HARMONICKÝCH A MEZIHARMONICKÝCH V SÍTI

Vznik a měření charakteristických harmonických, stejně i jejich vlivy v síti jsou mnohokrát popisovány. Protože se jedná o dlouhodobé procesy, jsou snadno zjištělné, jejich vlivy se dají technicky minimalizovat.

U necharakteristických harmonických je situace obtížnější. Nesymetrie, které necharakteristické harmonické způsobují, nejsou obvykle konstantní. Je horší jejich indikace a tím pádem i jejich odstraňování. Nebezpečí představuje zejména 3. harmonická proudu, která může být relativně vysoká. Eliminace třetí harmonické, zejména pokud vzniká trvale provozem jednofázových zařízení, je běžně řešena. Necharakteristické harmonické vyšších řádů mají již menší hodnoty. Pokud nedojde k rezonačním stavům nebo překročení hodnot harmonických, daných normou, není tuto problematiku třeba nijak řešit.

Nejtěžší situace je u mezharmónických. Jak vyplývá z textu, jedná se většinou o mezharmónické indikované měření a "vzniklé" z přechodových stavů. Zde je nutné rozlišit následující stavy:

a) *Mezharmónické od trvalých zdrojů* těchto frekvencí. V tomto případě jsou snadno zjištělné a jejich vliv a minimalizace je obdobná, jako u charakteristických harmonických.

b) *Mezharmónické, které vznikají jako důsledek přechodového děje a nepůsobí problémy.* To je nejčastější stav. Hodnoty mezharmónických jsou nízké nebo nejsou v oblasti rezonance sítě. Analyzátořem jsou indikovány jako krátká přechodná veličina. Není jim věnována pozornost a není nutné přijímat technická opatření.

c) *Mezharmónické, které vznikají jako důsledek přechodového děje a současně vznikají problémy.* Jedná se o nejhorší stav – obtížně zjištělné, časově velmi proměnné hodnoty. V případě rezonancí mohou vznikat nebezpečná přepětí, která mohou negativně ovlivňovat činnost dalších zařízení. Vzhledem k nahodilosti procesu je nutné dlouhodobé měření a pečlivá analýza.

ZÁVĚR

V předloženém článku je popsán mechanismus vzniku necharakteristických harmonických a meziharmonických proudů. Jestliže charakteristickým harmonickým je nepochybně vždy nutné věnovat pozornost, a to jak při projektech rozvodů obsahující polovodičové měniče, tak i při hledání poruch, necharakteristické harmonické i meziharmonické svojí velikostí v normálních stavech mají omezený vliv.

Nepříjemné situace mohou nastat při poruchách v síti. Zde mohou nabývat hodnoty necharakteristických harmonických takových velikostí, že mohou být zdrojem dalších potíží. Zejména u nízkých frekvencí může s ohledem na velikost impedance docházet ke vzniku nepřijatelných hodnot napěťových deformací. Navíc u meziharmonických může v oblasti mezi 150–250 Hz docházet jak k rušení signálů HDO, tak k jejich interakci s instalovanými vysílači. Nejhorší případ nastane, dojde-li ke shodě frekvence meziharmonické a rezonanční frekvence sítě.

Meziharmonické, které jsou v práci popsány, vznikají při nestandardních stavech v síti. Jedná se na jednu stranu o ojedinělé děje, které mají vždy jiné opakování. Na straně druhé jsou u měničů dynamické procesy, vedoucí ke vzniku meziharmonických běžné. K těmto hodnotám je nutné případně připočítat meziharmonické, produkované dalšími typy měničů, zejména pak cyklokonvertory.

PODĚKOVÁNÍ

Práce vznikla v rámci úkolu Grantové Agentury České republiky, číslo projektu GAČR 102/09/1164 – Interakce výkonových polovodičových měničů s okolím. Současně vznikla s podporou Evropského fondu pro regionální rozvoj a Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR v rámci projektu Regionální inovační centrum elektrotechniky (RICE), číslo projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0094.

LITERATURA

- [1] Arrilaga, J.: Power System Harmonics. Wiley - Interscience Publication, 1985.
- [2] Kůs, V.: Vliv polovodičových měničů kmitočtu na napájecí soustavu. BEN, ISBN 80-7300-062-8, vydání 6/02.
- [3] Mačát, J., Vaculíková, P., Záviška, O.: Zpětný vliv výkonových polovodičových měničů na napájecí síť. SNTL Praha, 1979.
- [4] Kloss, A.: Stromrichter-Netzrückwirkungen in Theorie und Praxis. AT-Verlag, Aarau, 1981.
- [5] Kůs, V.: Vliv měniče kmitočtu s napěťovým střídačem na napájecí soustavu. Habilitační práce, FEL ZČU Plzeň, 31. 7. 1995.
- [6] Ruppert, M.: Analýza necharakteristických harmonických proudů polovodičových měničů. Disertační práce, ZČU, FEL, 2002
- [7] Bauta, M., Grötzbach, M.: Noncharacteristic Line Harmonics of AC/DC Converters with High DC Current Ripple, 8th IEEE-ICHQP, Athens, Proc. Vol. II, pp. 755-760, 1998
- [8] ČSN EN 61000-4-7: Elektromagnetická kompatibilita, část 4: Zkušební a měřicí techniky, Díl 7: Všeobecný pokyn o měření a měřících přístrojích harmonických a meziharmonických .
- [9] Kůs, V., Drábek, P., Peroutka, Z.: Noncharacteristic harmonics and interharmonics of power electronics converters. (18th International conference of electricity distribution, CIRED, Turín, 6/2005)
- [10] Kůs, V., Drábek, P.: Unfavorable Effects of Frequency Converters on Power Distribution Network. (International Conference of Power Electronics, PQ, 5/2002, Nürnberg, SRN)
- [11] Pelly, B. R.: Thyristor Phase Controlled Converters and Cycloconverters. Wiley-Interscience Publikation, 1971.
- [12] Kloss, A.: Oberschwingungen. VDE-Verlag, Berlin, 1989.
- [13] Saloň, T.: Interakce kompenzačního zařízení a signálu HDO. Disertační práce, ZČU, FEL, 2006
- [14] Akagi, H.: „Modern active filters and traditional passive filters“, Tokyo Institute of Technology, 2006
- [15] Brandštetter P.: Aktivní výkonové filtry, VŠB – TUO, Ostrava 2005
- [16] Santarius, P; Tlustý, J; Valouch, V.: Dynamic Voltage Mitigation in Power Systems by Using Cooperative Control of Active Power Filters without Mutual Communication. IEEE Conference on industrial technology, Pa: 640-645, 2008
- [17] ČSN EN 61000-4-30: EMC, Díl 30: Metody měření kvality energie
- [18] Kůs, V., Drábek, P., Fořt, J.: Necharakteristické harmonické a meziharmonické proudy, generované polovodičovými měniči. Sborník semináře Power Quality, Vrátná Dolina, 6/2006.
- [19] Drábek, P.: Analýza meziharmonických proudů polovodičových měničů. (Disertační práce ZČU Plzeň, 2003.
- [20] Kůs, V., Drábek, P., Fořt, J., Pittermann, M.: Harmonic Currents of Frequency Converters with Voltage Source Inverters. In: International XV Symposium MiS. Electrotechnical Institute, Warsaw, 2006. Pa: 45-50. ISBN 83-922095-1-6.