

Vážení zákazníci,

dovolujeme si Vás upozornit, že na tuto ukázkou knihy se vztahují autorská práva, tzv. copyright.

To znamená, že ukáзка má sloužit výhradně pro osobní potřebu potenciálního kupujícího (aby čtenář viděl, jakým způsobem je titul zpracován a mohl se také podle tohoto, jako jednoho z parametrů, rozhodnout, zda titul koupí či ne).

Z toho vyplývá, že není dovoleno tuto ukázkou jakýmkoliv způsobem dále šířit, veřejně či neveřejně např. umístováním na datová média, na jiné internetové stránky (ani prostřednictvím odkazů) apod.

redakce nakladatelství BEN – technická literatura
redakce@ben.cz



5.2.5 Meziharmonické usměřovačů

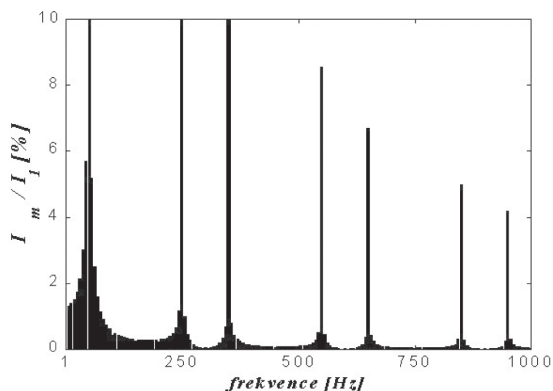
Podmínky nutné pro vznik meziharmonických jsou popsány v kapitole 2.4.2. V případě usměřovačů jsou „podmínkou“ pro vznik meziharmonických nestacionární stavy v průběhu analýzy (měření).¹⁶⁾ Mezi nejčastější příčiny můžeme řadit:

- Změna fázového napětí napájecí soustavy
 - změna ve všech třech fázích
 - změna pouze v jedné fázi
- Změna řídicích impulsů pro jednotlivé spínací prvky (tyristory)
 - změna řídicího úhlu pro všechny spínací prvky
 - změna řídicího úhlu pouze pro jednu skupinu (anodová, katodová)
 - změna řídicího úhlu pouze pro jeden spínací prvek
- Změna zátěže

Na výsledek analýzy má pochopitelně největší vliv dynamika změn, které meziharmonické způsobují. Zde budou ukázány takové vlivy, kde dynamika změn činí 10 % původní hodnoty za dobu sledování $T_w = 0,1$ s. V reálných podmínkách se mohou projevit všechny výše uvedené dynamické změny obvodových veličin současně.

Meziharmonické vzniklé změnou napětí v napájecí soustavě.

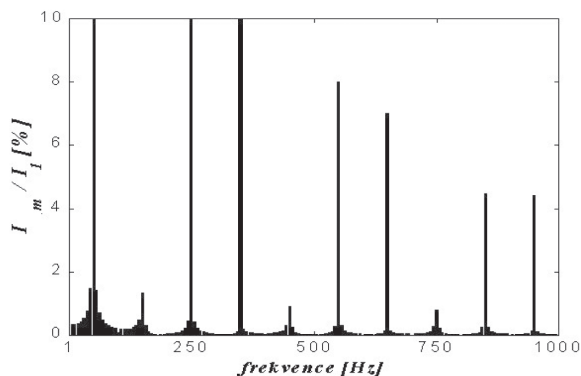
Při změně hodnoty fázového napětí ve všech třech fázích napájecí soustavy dochází ke stejným průběhům veličin v jednotlivých fázích. Třífázová změna napětí vede na vznik meziharmonických složek všech řádů (daných frekvenčním krokem $\Delta f = 10$ Hz). Jejich hodnoty s rostoucí změnou napětí téměř lineárně narůstají. S nárůstem hodnoty indukčnosti ve stejnosměrném obvodu usměřovače amplitudy meziharmonických složek klesají.



Obrázek 5.20 Frekvenční spektrum fázového proudu při třífázové změně napětí ($\Delta U = 10 \%$)

¹⁶⁾ Pro účely analýzy s cílem získat informace o meziharmonických předpokládáme v souladu s ČSN-EN - 61000-4-7 interval T_w o délce trvání 10násobku délky trvání základní harmonické. Analýza je tedy prováděna z doby $T_w = 0,1$ sekundy. Vzdálenost jednotlivých frekvenčních čar je tedy 10 Hz, první meziharmonická má hodnotu 10 Hz, základní harmonická má hodnotu 50 Hz.

Při jednofázové změně napětí dochází k rozdílným průběhům veličin v jednotlivých fázích. Vlivem indukčnosti zátěže L není tento rozdíl velký. Dochází sice k většímu rozkmitu usměrněného napětí u_d , nicméně střední hodnota U_d je vyšší. To vede k menšímu poklesu fázových proudů během jednofázové změny napětí a tím pádem k menším amplitudám meziharmonických proudů.



Obrázek 5.21 Frekvenční spektrum fázového proudu při jednofázové změně napětí ($\Delta U = 10\%$)

Meziharmonické vzniklé změnou řídicích impulsů

Na následujících obrázcích jsou znázorněny detaily meziharmonických pro různé možnosti změn úhlu řízení. Vždy se jedná o změnu úhlu o 10° . První případ je pro stav, kdy dochází ke změně u všech tyristorů. Hodnoty meziharmonických při této velikosti změny úhlu řízení nepřesahují 5%¹⁷⁾. V druhém případě uvažujeme změnu pouze u jedné komutační skupiny, druhá část měniče pracuje beze změny. Zvyšují se hodnoty necharakteristických harmonických, u meziharmonických se projevují změny nepatrně. Nejvyšší změna nastává v třetím případě. Zde předpokládáme, že (například poruchou v řízení) došlo k posunutí úhlu řízení pouze u jednoho prvku. Dochází zejména ke vzniku necharakteristických harmonických. Hodnoty meziharmonických jsou v tomto případě ale nejnižší. Závislost na změně úhlu je u všech meziharmonických opět lineární.

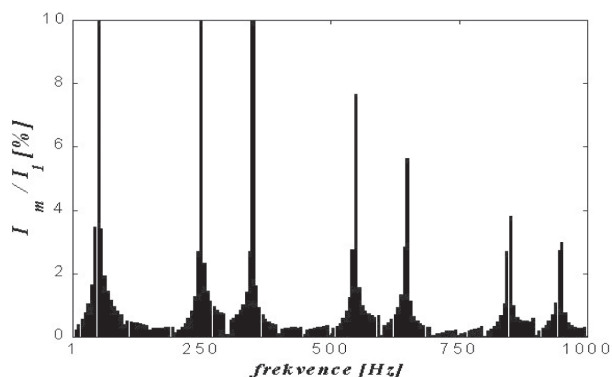
Meziharmonické vzniklé změnou zatížení měniče

Z hlediska praxe je tento způsob nejčastější. Základní otázkou je velikost změny zátěže během doby, po kterou provádíme analýzu¹⁸⁾. Se zvyšováním změny zátěže dochází k nárůstu meziharmonických složek (dosahují téměř hodnoty 10%). Při změně zátěže by měly průběhy obvodových veličin pro jednotlivé fáze vycházet stejně a nemělo by docházet k nesymetriím v obvodu. Podobně jako v případě třífázové změny napětí nebo změny úhlu řízení dochází vlivem časové konstanty

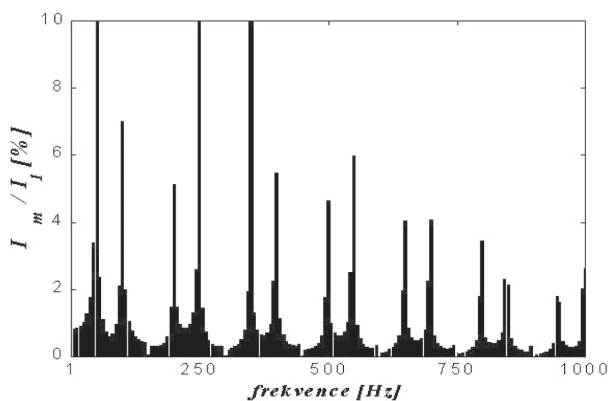
¹⁷⁾ Jiný případ nastane, pokud bude docházet k dynamické změně úhlu řízení během analyzované doby. Pokud bychom vedli usměrňovač až k řízení do nulových otáček motoru, můžeme detekovat meziharmonické až do hodnoty 60%.

¹⁸⁾ Jak již bylo dříve uvedeno, jsou případy, kdy dojde k velkým dynamickým změnám z hlediska analýzy meziharmonických, diskutabilní. Považujeme za mezní stav „běžných změn“ kolísání zátěže v rozsahu 25% během doby $T_w = 0,1$ sekundy, tj. 10násobek trvání půlperiody základní harmonické.

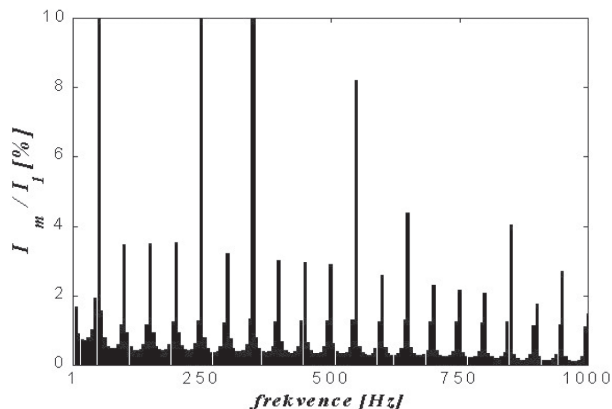
obvodu k setrvačnosti změny průběhu fázového proudu a tím také k malé nesymetrii. Ta vede k výskytu necharakteristických harmonických. Přesto jsou v tomto případě hodnoty meziharmnických opět nízké.



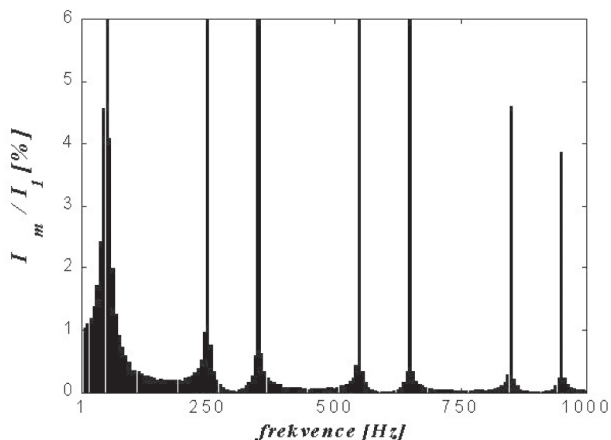
Obrázek 5.22 Frekvenční spektrum fázového proudu při změně řídicího úhlu všech tyristorů ($\Delta\alpha = 10^\circ$)



Obrázek 5.23 Frekvenční spektrum fázového proudu při změně řídicího úhlu jedné komutační skupiny ($\Delta\alpha = 10^\circ$)



Obrázek 5.24 Frekvenční spektrum fázového proudu při změně řídicího úhlu pouze jednoho tyristoru ($\Delta\alpha = 10^\circ$)



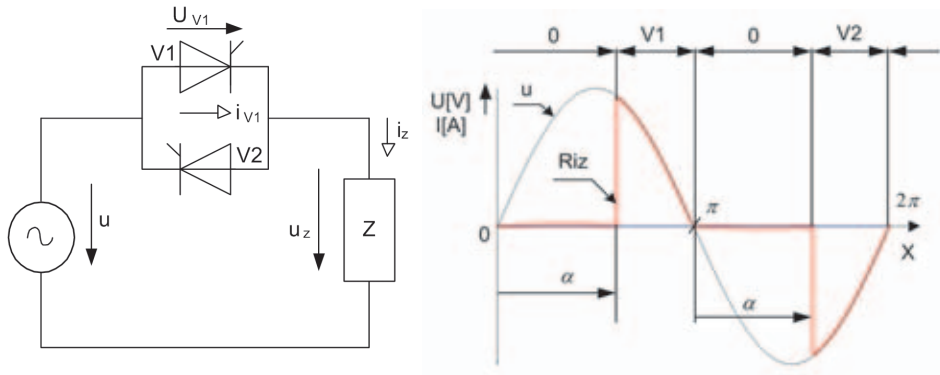
Obrázek 5.25 Frekvenční spektrum fázového proudu při změně zátěže o 25 %

5.3 Harmonické proudy měničů napětí

Střídavé měniče napětí jsou používány k řízení napětí a tím i proudu a výkonu na střídavé straně zátěže. Zastupují v podstatě funkci plynule regulovatelného snižovacího transformátoru. Používají se zejména pro řízení výkonu elektrotepelných spotřebičů (elektrické odporové pece, domácí tepelné spotřebiče), pro řízení svítivosti svítidel, pro měkké spouštění střídavých motorů velkých výkonů a pro řízení rychlosti univerzálních komutátorových motorů. Dále můžeme jmenovat svařování a tavení kovů. Většímu využití v technice elektrických pohonů však zabránila skutečnost, že se snižujícím napětím se kvadraticky snižuje moment motoru.

5.3.1 Jednofázový měnič napětí s odporovou zátěží

Základní schéma měniče a průběhy napětí na zátěži jsou na obrázku 5.26. Pro nejjednodušší zátěž typu R (např. elektrická odporová pec, žárovka) je průběh proudu tvarově totožný s průběhem napětí zátěže. Řiditelnost jednofázového měniče kmitočtu s odporovou zátěží je v rozsahu $0 < \alpha < \pi$. Při $\alpha = 0$ se měnič chová jako bezkontaktní spínač.



Obrázek 5.26 Jednofázový střídavý měnič napětí a průběhy napětí na zátěži pro odporovou zátěž

Pro průběh proudu v rozsahu sepnutí měniče můžeme psát:

$$i_1 = i_z = \frac{U_m}{R} \sin(\omega t) \quad 5.45$$

Fourierovy koeficienty průběhu proudu ze vztahu (5.45) jsou:

$$a_h = \frac{U_m}{\pi R} \left[\frac{1}{(1+h)} (\cos[(1+h)\alpha] - 1) + \frac{1}{(1-h)} (\cos[(1-h)\alpha] - 1) \right] \quad 5.46$$

$$b_h = \frac{U_m}{\pi R} \left[\frac{\sin[(1+h)\alpha]}{(1+h)} + \frac{\sin[(1-h)\alpha]}{(1-h)} \right] \quad 5.47$$

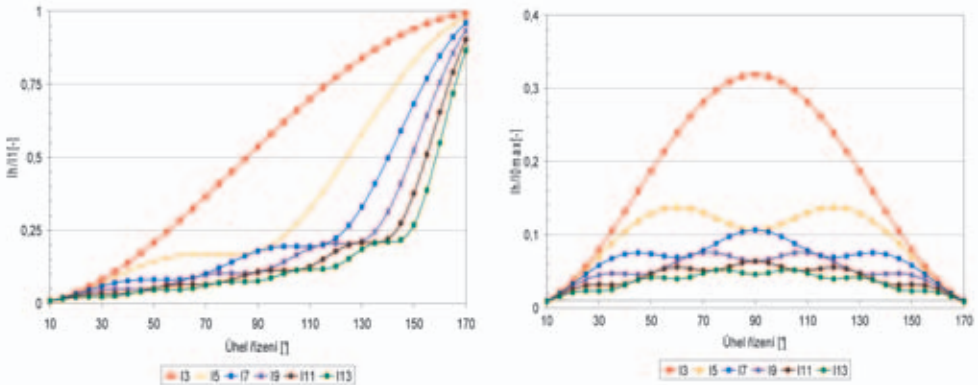
V dalším vyjádříme efektivní hodnotu první harmonické a celkovou efektivní hodnotu (RMS):

$$I_1 = \frac{\sqrt{2}}{2\pi} \frac{U_m}{R} \cdot \sqrt{\left[(\pi - \alpha) + \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right]^2 + \frac{1}{4} (\cos 2\alpha - 1)^2} \quad 5.48$$

$$I_{ef} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{U_m}{R} \sqrt{(\pi - \alpha) + \frac{1}{2} \sin 2\alpha} \quad 5.49$$

Grafické znázornění průběhů pro některé harmonické proudy je na obrázku 5.27a. S úhlem řízení se současně mění i efektivní hodnota proudu dle vztahu (5.49). Pak můžeme graf z obrázku 5.27 (na levé straně) upravit. U obrázku 5.27 (na pravé straně) jsou na svislé ose vyneseny poměrné hodnoty harmonických vztažené k maximální hodnotě první harmonické I_{0max} . V závislosti na úhlu

řízení silně klesá základní harmonická, proto klesají i poměrné hodnoty vyšších harmonických v tomto grafu¹⁹⁾.



Obrázek 5.27 Harmonické jednofázového měniče napětí pro odporovou zátěž

5.3.2 Jednofázový střídavý měnič napětí s induktivní a odporově-induktivní zátěží

U měniče, pracujícího do čistě induktivní zátěže bude rozsah řízení $\pi/2 < \alpha < \pi$. (Průběh proudu je na obrázku 5.28 vlevo). Jako spínač bude měnič pracovat, bude-li úhel řízení pod $\pi/2$. Průběh proudu pro tento případ je:

$$i_z = \frac{U_m}{\omega L} \int_{\alpha}^{\omega t} \sin \omega t \cdot d(\omega t) = \frac{U_m}{\omega L} (\cos \alpha - \cos \omega t) \quad 5.50$$

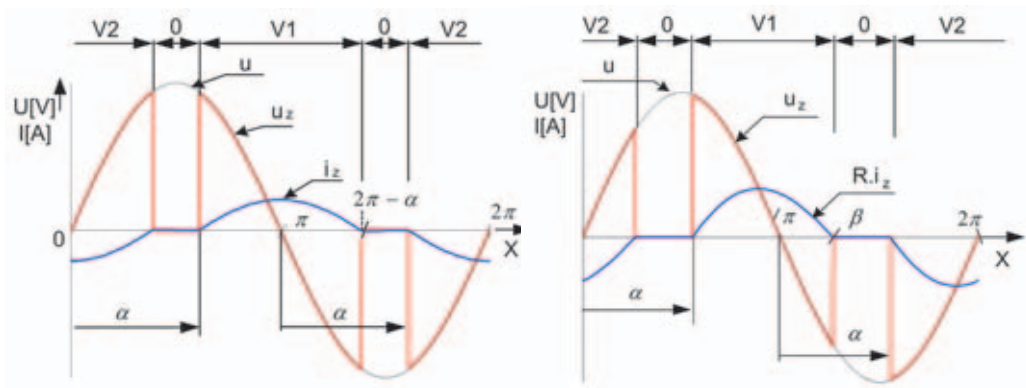
U reálné zátěže (průběh na obrázku 5.28 vpravo), obsahující odpor i indukčnost, je minimální hodnota úhlu řízení dána vztahem:

$$\alpha_{\min} = \arctg \frac{\omega L}{R} \quad 5.51$$

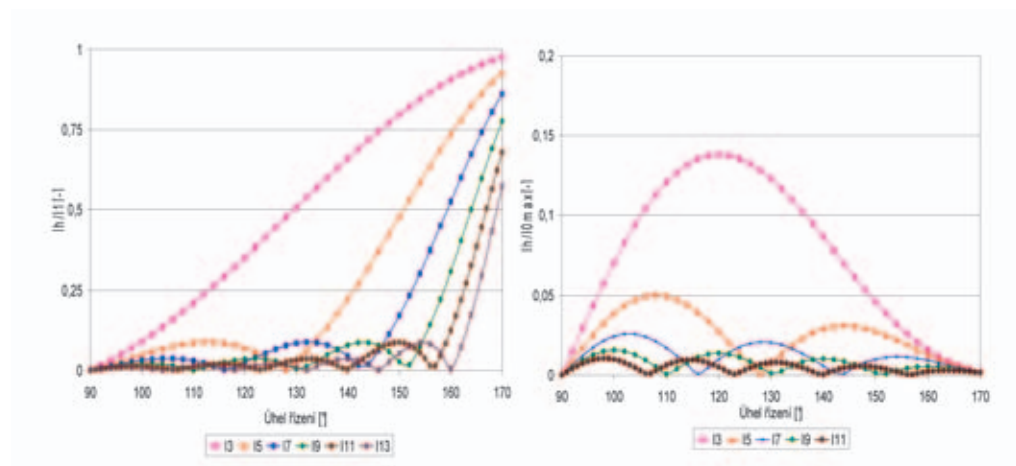
Pro kladnou půlvlnu proudu zátěže (a tím i proudu zdroje) platí:

$$i_1 = i_z = \frac{U_m}{Z} \sin(\omega t - \varphi) - \frac{U_m}{Z} \exp\left(-\frac{R}{\omega L}(\omega t - \alpha)\right) \cdot \sin(\alpha - \varphi) \quad 5.52$$

¹⁹⁾ S ohledem na názornost grafu není hodnota základní harmonické vyjádřena. Graf 5.27 (vpravo) je v literatuře častěji udávány. S ohledem na koncepci knihy je proto uvedeno i vyjádření k základní harmonické na obrázku 5.27 (na levé straně). Toto je dodrženo i v další části kapitoly. (Index 0 je chápán jako minimální úhel řízení pro uvažované zapojení a danou zátěž).



Obrázek 5.28 Průběhy proudu jednofázového měniče napětí se zátěží L (vlevo) a RL (vpravo)



Obrázek 5.29 Harmonické jednofázového měniče napětí pro induktivní zátěž

Harmonickou analýzu lze provést pouze pro případ induktivní zátěže. Pro efektivní hodnotu první harmonické odebraného proudu a celkovou efektivní hodnotu můžeme psát²⁰⁾:

$$I_1 = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{U_m}{\omega L} \left[-\frac{\sin 2\alpha}{2} - (\pi - \alpha) \right] \quad 5.53$$

$$I_{ef} = \frac{U_m}{\omega L} \sqrt{\frac{2}{\pi} \left[(\pi - \alpha) \cos^2 \alpha - 3 \sin 2\alpha + \frac{(\pi - \alpha)}{2} \right]} \quad 5.54$$

Pro případ RL zátěže je nutné postupovat pouze numericky (rovnice 5.52 je transcendentní).

²⁰⁾ S ohledem na složitost matematického zápisu u čistě induktivní zátěže nejsou analytické výpočty uvedeny. V praxi se obvykle použijí opět grafy.

V této rovnici je

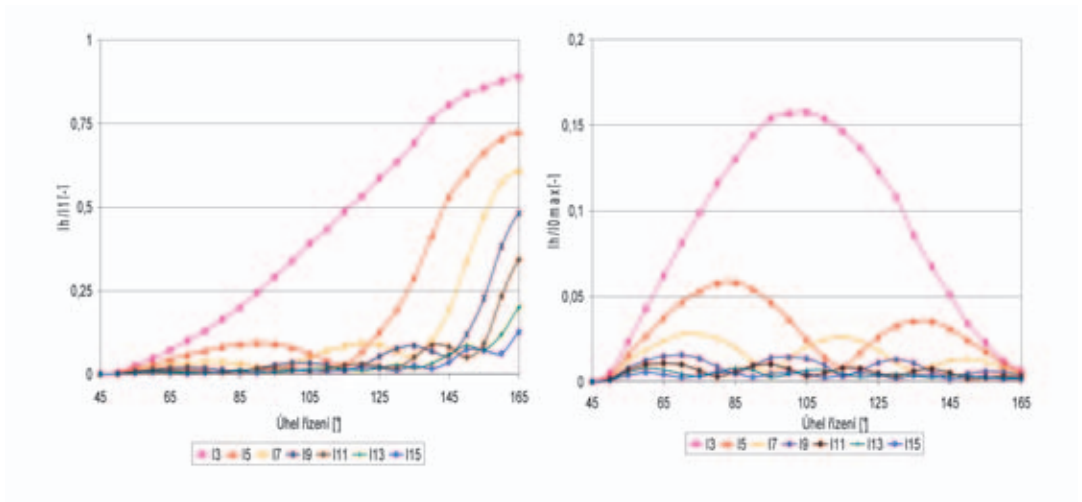
$$x = \omega t, \quad \varphi = \arctg \frac{\omega L}{R} \quad \text{a} \quad Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

Je zřejmé, že všechny výsledky budou záviset nejen na úhlu řízení, ale též na vzájemném poměru činného odporu a induktivní reaktance zátěže.

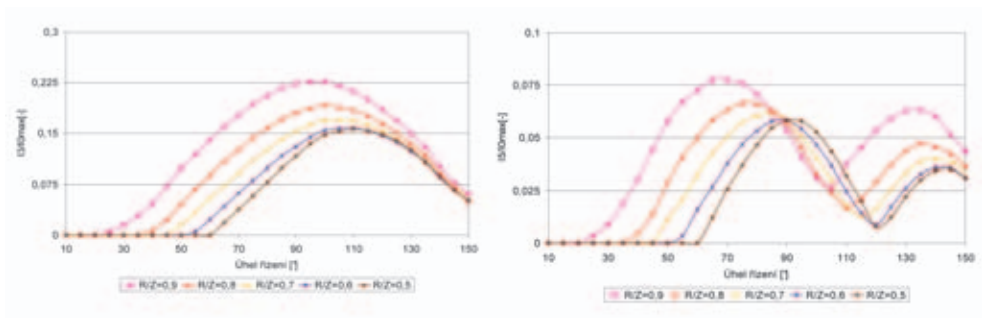
Zavedeme:

$$\frac{R}{Z} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$$

5.55



Obrázek 5.30 Harmonické jednofázového měniče napětí pro odporově-induktivní zátěž, $R/Z = 0,6$

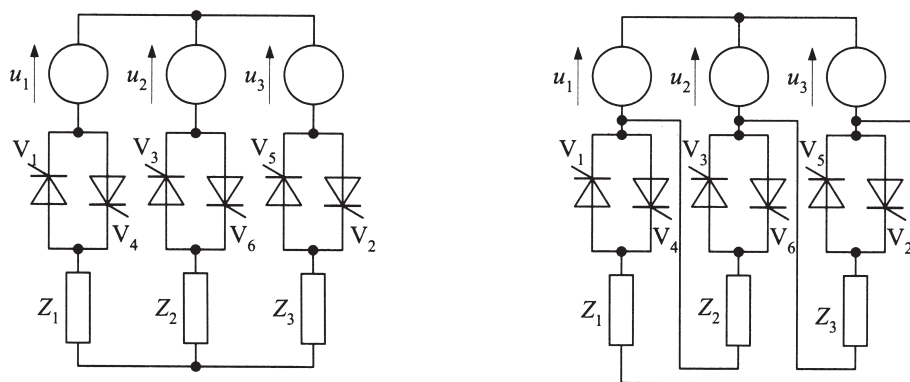


Obrázek 5.31 Průběh třetí a páté harmonické proudu jednofázového střídavého měniče napětí zátěž $-RL$

Se změnou poměru R/Z se budou měnit nejen hodnoty harmonických, včetně hodnoty první harmonické, ale též možný rozsah řízení měniče napětí. Na obrázku 5.30 jsou znázorněny harmonické proudy pro poměr $R/Z = 0,6$. Pro doplnění jsou na obrázku 5.31 uvedeny průběhy 3. a 5. harmonické pro různé poměry $R/Z^{21)}$.

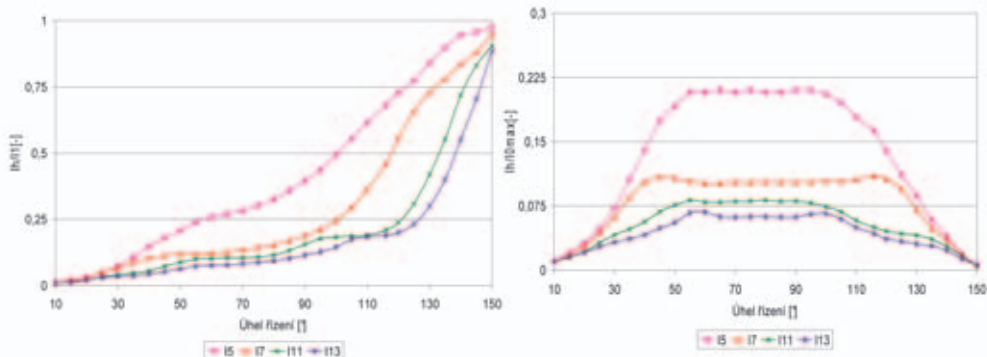
5.3.3 Třífázový střídavý měnič napětí s odporovou zátěží

Harmonické proudy třífázových měničů napětí opět závisí na zapojeních střídavých regulátorů a transformátorů, na úhlu řízení a na poměru R/Z . Třífázové měniče se nejčastěji používají jako tzv. sofstartéry nebo při tzv. dynamické kompenzaci účinníku (viz kapitola 6.5.4). Zátěž trojfázového měniče může být spojena do Y nebo do D. Pokud je uzel zátěže Y vyveden, pracuje třífázový měnič jako tři vedle sebe spojené jednofázové měniče a hodnoty harmonických proudů jsou totožné s hodnotami uvedenými pro jednofázový měnič. Základní zapojení obou měničů je na obrázku 5.32. Pro třífázovou odporovou zátěž můžeme rozdělit činnost na tři intervaly. První interval řízení je pro $0 < \alpha < \pi/3$. V tomto intervalu vypíná tyristor se zánikem napětí příslušné fáze zátěže, která odpovídá proudu v přímém směru tyristoru. V druhém intervalu rozsahu řízení $\pi/3 < \alpha < \pi/2$ již intervaly sepnutí jednotlivých tyristorů nekončí s příslušnými půlvlnami fázových napětí (odpadá takt se třemi sepnutými tyristory a spínají pouze dva). V posledním intervalu $\pi/2 < \alpha < 5\pi/6$ se střídají takty se dvěma sepnutými tyristory s nulou. Proud sítě je přerušovaný.



Obrázek 5.32 Základní zapojení třífázových měničů napětí

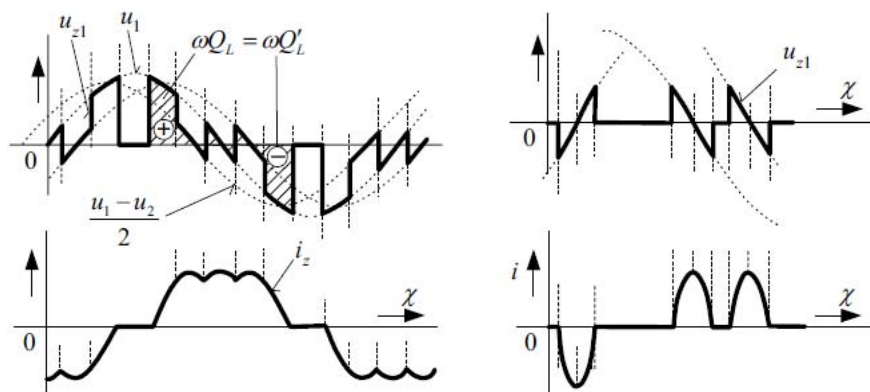
21) Z důvodu lepšího znázornění je v grafech 5.31 znázorněna poměrná hodnota opět vztažená k maximální hodnotě první harmonické.



Obrázek 5.33 Harmonické třífázového měniče napětí pro odporovou zátěž

5.3.4 Třífázový střídavý měnič napětí s induktivní a odporově-induktivní zátěží

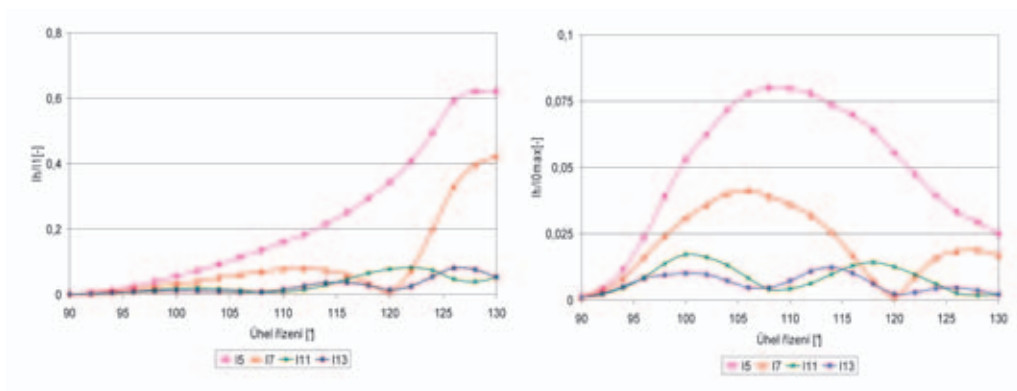
Při třífázové zátěži L je odebraný činný výkon nulový, takže první harmonická proudu je zpožděna o $\pi/2$ za napětím. Podobně jako u jednofázového, pracuje i třífázový měnič pro interval řízení $0 < \alpha < \pi/2$ jako spínač. V intervalu $\pi/2 < \alpha < 2\pi/3$ se postupně střídají takty se dvěma a se třemi sepnutými tyristory. Proud je nepřerušovaný. Při $2\pi/3 < \alpha < 5\pi/6$ odpadají některé takty a proud je přerušovaný. Ukázky obou proudů jsou na obrázku 5.34.



Obrázek 5.34 Průběhy proudů třífázového měniče napětí pro zátěž L a různé úhly řízení

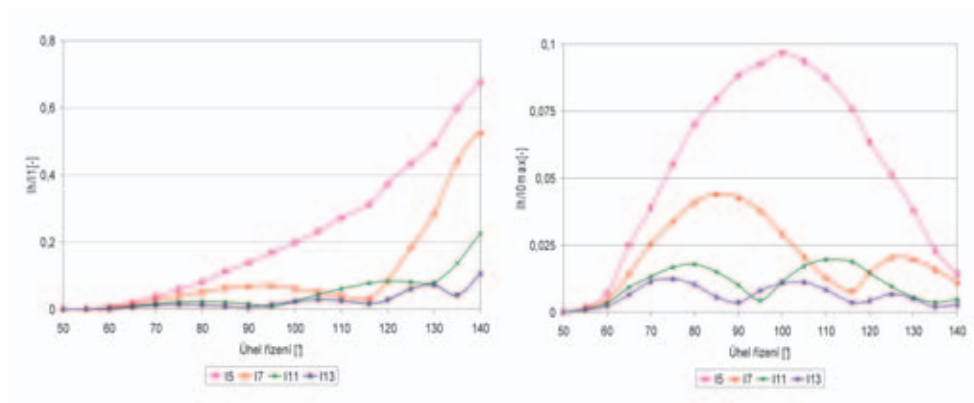
Harmonická analýza průběhů proudů, které odebrává měnič napětí z třífázové soustavy je velmi složitá. Obvykle se použijí grafy, znázorněné pro konkrétní typ zátěže. Pro induktivní zátěž jsou uvedeny průběhy na obrázku 5.35. Obdobně jako u všech předchozích obrázků je patrný nárůst procentních hodnot harmonických, vztahený k základní harmonické. Protože s rostoucím úhlem

řízení velmi klesá hodnota základní harmonické, jsou absolutní hodnoty vyšších harmonických nízké. V těchto případech je vhodné použít grafy vztažené k I_{ef} .



Obrázek 5.35 Harmonické třífázového měniče napětí pro odporovou zátěž

V případě kombinované zátěže opět záleží na poměru činné a induktivní složky. Obdobně jako u jednofázových měničů zavedeme poměr R/Z , definovaný (5.55). Obdobně grafy znázorníme pro poměr $R/Z = 0,6$.



Obrázek 5.36 Harmonické třífázového měniče napětí pro odporově-induktivní zátěž, $R/Z = 0,6$

5.3.5 Zjednodušený způsob výpočtu harmonických proudů měničů napětí

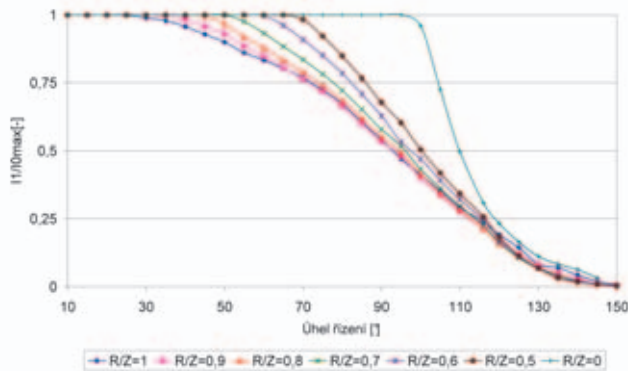
Z dosud uvedených průběhů je zřejmé, že průběh odebíraného proudu u měniče napětí je kromě charakteru zátěže též velmi závislý na úhlu řízení. U třífázových variant pak může být charakter proudu nepřerušovaný (úhel řízení je $0 < \alpha < \pi/3$ pro odporovou zátěž a $\pi/2 < \alpha < 2\pi/3$ pro induktivní zátěž) nebo naopak přerušovaný. Obvykle lze průběh zjednodušit tím, že vybereme alternativu

s průběhy definovanými v kapitole 5.1 – zde je též provedena příslušná harmonická analýza. Zejména u třífázových variant a u induktivních zátěží je náhrada zjednodušeným průběhem snadná.

Pro jednofázovou variantu s induktivní zátěží, obrázek 5.28 lze provést náhradu průběhem dle obrázku 5.3 a pro výpočet harmonických použijeme vztahy (5.17) a (5.18).

Pro třífázovou variantu, s nepřerušovaným průběhem proudu dle obrázku 5.35 vlevo můžeme použít náhradu dle obrázku 5.3 s příslušnými rovnicemi. Pro třífázovou variantu, s přerušovaným průběhem proudu dle obrázku 5.35 vpravo použijeme náhradu dle obrázku 5.4. Pro výpočet harmonických použijeme vztahy (5.25) a (5.26).

Velká závislost průběhu proudu na úhlu řízení vede k silnému poklesu základní harmonické proudu. Znamená to, že procentní hodnoty proudů harmonických vyšších řádů se zvyšují, absolutní hodnoty zůstávají stejné nebo se dokonce snižují. Z těchto důvodů je u těchto typů měničů vhodné udávat harmonické proudy v absolutních hodnotách nebo v hodnotách vztažených k maximální efektivní hodnotě proudu²²⁾. Závislost změny první harmonické proudu vztažené k maximální efektivní hodnotě pro různé úhly řízení je na obrázku 5.37.



Obrázek 5.37 Změna hodnot první harmonické pro různé zátěže

5.3.6 Necharakteristické harmonické a meziharmonické měničů napětí

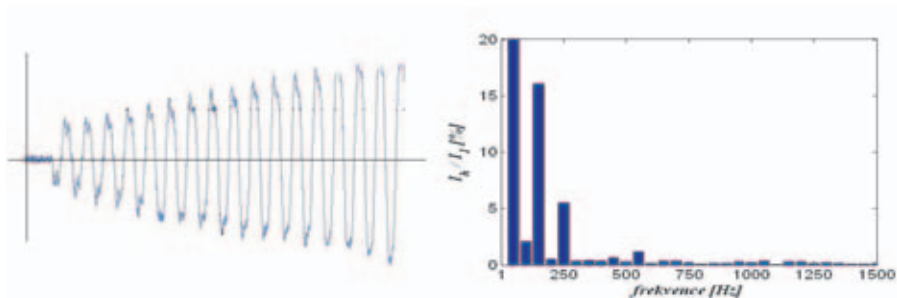
Pro stanovení necharakteristických harmonických a meziharmonických je nutné předpokládat nesymetrie v soustavě síť – měnič – spotřebič nebo proměnný děj po dobu provádění harmonické analýzy. Při ustálených stavech a symetrických podmínkách tedy jiné než charakteristické harmonické nevzniknou.

Typickým představitelem užití měniče napětí je softstartér. Softstartéry jsou elektronická výkonová zařízení, sloužící k plynulým rozběhům a doběhům pohonů s asynchronními motory. Hlavními

²²⁾ Proto jsou v této části udávány proudy v procentních hodnotách vztažených k 1. harmonické (vždy v levé části) i v hodnotách vtažených k celkové efektivní hodnotě (vždy pravý graf).

důvody k jejich použití jsou omezení záběrového proudu při rozběhu pohonu, ochrana a snížení opotřebení mechanismu pohonu a ochrana motoru po dobu jeho chodu.

Řízení softstartéru však nemusí být konstantní, a proto dochází ke vzniku dalších frekvenčních složek²³⁾. Na obrázku 5.38 je průběh proudu odebíraný motorem při spouštění softstartérem.



Obrázek 5.38 Průběh proudu softstartéru a jeho harmonická analýza

Protože analýza naměřených vzorků byla prováděna z doby 0,2 s, objevují se ve spektru různé frekvence. Pro zjednodušení jsou na obrázku vyneseny pouze hodnoty necharakteristických harmonických. Pokud provedeme srovnání s proudem při přímém rozběhu motoru, zjistíme, že softstartér výrazně snižuje rozběhový proud (první harmonická se snižuje z 27 A na 11,8 A), ale současně se zvyšuje zesílení proudu softstartéru – viz tabulka 5.2.

Tabulka 5.2 Srovnání proudu při rozběhu motoru

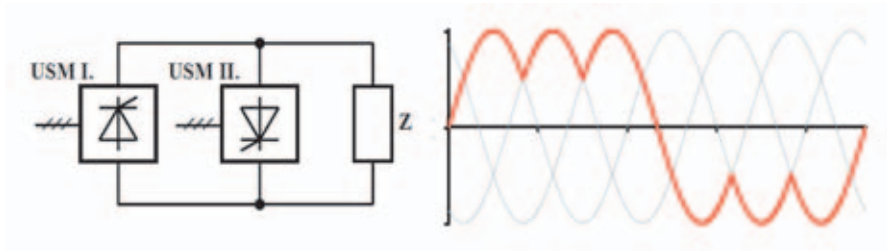
Řád harmonické [h]	Přímé spouštění		Spouštění se softstartérem	
	I_h [A]	I_h/I_1 [%]	I_h [A]	I_h/I_1 [%]
1.	27	100	11,8	100
2.	0,23	0,85	0,24	2,1
3.	0,32	1,2	1,9	16,1
4.	0,12	0,45	0,12	1
5.	0,19	0,72	0,65	5,5

5.4 Harmonické proudy přímých měničů kmitočtu

Přímé měniče kmitočtu umožňují vytvořit přímo (bez stejnosměrného meziobvodu) ze vstupního střídavého napětí v vstupním kmitočtu f_1 výstupní střídavé napětí s řiditelným kmitočtem f_2 . Rozlišujeme přímé měniče kmitočtu s vnější komutací, u kterých maximální výstupní kmitočet měniče je poměrně nízký (asi polovina kmitočtu vstupního) a přímé měniče kmitočtu s vlastní komutací, u nichž je výstupní kmitočet nezávislý na kmitočtu vstupním.

²³⁾ V podstatě se jedná o podobný jev, jako byl popsán u usměrňovačů. Jedná se o změnu úhlu řízení, viz obrázek 5.22 až obrázek 5.24.

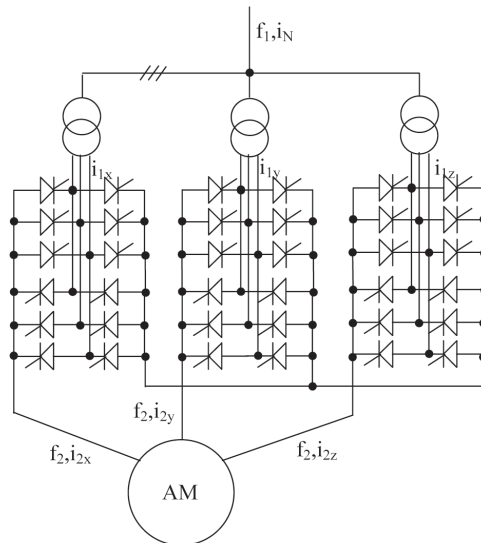
V současné době jsou přímé měniče kmitočtu využívány poměrně málo²⁴⁾. Pokud však jsou použity, tak obvykle pro pohony poměrně vysokých výkonů. Velmi často jsou tyto měniče označovány jako cyklokonvertory.



Obrázek 5.39 Principiální schéma přímého měniče kmitočtu a příklad tvorby výstupního napětí

Základem jednofázového cyklokonvertoru jsou dva plně řízené usměrňovače, které se vzájemně střídají v činnosti. Křivka výstupního napětí se vytváří přímo z částí křivek trojfázového (vícefázového) napětí sítě o kmitočtu zpravidla 50 Hz. Z toho vyplývá, že výstupní frekvence f_2 musí být

vždy menší než frekvence vstupní f_1 . Existuje několik zapojení cyklokonvertorů – symetrická se společným či rozděleným napájením obsahují obvykle pouze říditelné prvky. Naproti tomu nesymetrické zapojení (označovaná též jako úsporná zapojení) mají menší počet tyristorů. O to složitější je pak jejich řízení.



Obrázek 5.40 Základní schéma třífázového přímého měniče kmitočtu

²⁴⁾ Z tohoto důvodu je problematice harmonických síťového proudu přímých měničů kmitočtu věnována malá pozornost. Nejdůležitější je těmto měničům věnována kniha [5.60], z hlediska působení na síť je to současně kniha [5.17]. Ostatní literatura, včetně norem, více méně závěry těchto knih přejímá.