



ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239

2 Harmonické proudy usměrňovačů

Harmonické proudy usměrňovače při zjednodušených podmínkách činnosti

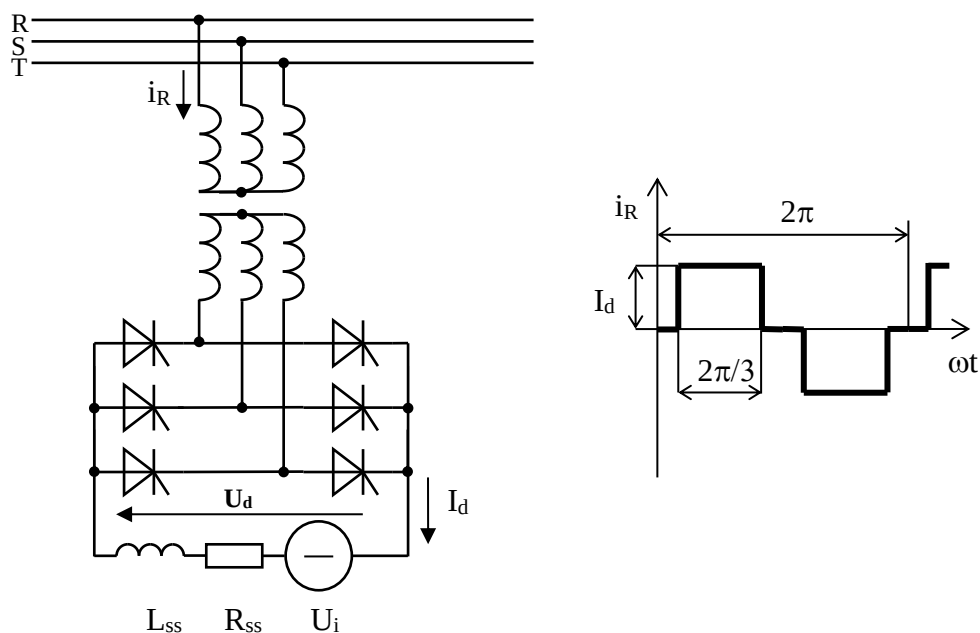
Usměrňovač, ať již neřízený nebo řízený, který připojíme na napájecí síť, představuje nelineární zátěž. Znamená to, že i při sinusovém napájecím napětí obsahuje proud na střídavé straně usměrňovače kromě základní harmonické též složky řádů vyšších harmonických. Základní otázkou při provozu takového usměrňovače obvykle bývá, jakého řádu tyto harmonické jsou a jaká je jejich velikost.

Idealizované podmínky činnosti, amplitudový zákon

Při zkoumání usměrňovačů jako zdroje harmonických proudů vyšších řádů, které jsou měničem odebírány ze sítě, zavedeme nejprve některé zjednodušující předpoklady:

- a) napájecí soustava je symetrická, řízení měniče je ve všech fázích symetrické,
- b) na vstupu usměrňovače je napětí sinusové ,
- c) indukčnost ve stejnosměrném obvodu $L_{ss} \rightarrow \infty$,
- d) zkratový výkon napájecí soustavy $S_k \rightarrow \infty$, tj. vstupní indukčnost $L_{vs} \rightarrow 0$,
- e) zanedbáme ztráty usměrňovače.

Pro odvození velikosti proudů vyšších harmonických předpokládejme dále 3 fázový usměrňovač v můstkovém zapojení, měničový transformátor ve spojení Y/y.



obr. 1 – Řízený trojfázový usměrňovač, idealizovaný průběh odebíraného proudu.

Provedením Fourierovy analýzy odebíraného proudu i_R dostaneme :

$$i_R(t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left(\frac{1}{1} \sin \omega_1 t - \frac{1}{5} \sin 5\omega_1 t + \frac{1}{7} \sin 7\omega_1 t + \frac{1}{11} \sin 11\omega_1 t + \dots \right)$$

Rozborem vztahu zjistíme, že se zde objevují pouze harmonické určitých řádů h :

$$h = kp \pm 1$$

kde k je celé číslo a p je pulznost usměrňovače. Harmonické, které splňují podmínky rovnice se nazývají *charakteristické harmonické*. Pro velikost proudu h – té harmonické lze psát vztah

$$I_h = \frac{1}{h} \cdot I_1$$

Tento vztah bývá označován jako *amplitudový zákon*. Protože se však jedná o jednovlnné harmonické průběhy, platí i pro efektivní hodnoty harmonických proudů. Uvedené výsledky platí dle obr.1 pouze pro zapojení měničového transformátoru Yy0. Při odvozování průběhu proudu primáru byl zanedbán magnetizační proud. Převod transformátoru uvažujeme 1:1. V praxi jsou používána další zapojení měničových transformátorů. Jedná se o transformátory s vinutím do

trojúhelníka nebo o tzv. 12 – ti pulzní spojení. Na obr.2 jsou uvedeny průběhy proudů, odebíraných primárním vinutím různých kombinací usměrňovačových transformátorů.

Hodnoty amplitudy první harmonické síťového proudu pro jednotlivá zapojení dle obr.2 jsou:

$$I_{1\max} = \frac{\sqrt{3}}{\pi} I_d \quad \text{pro trojpulzní spojení}$$

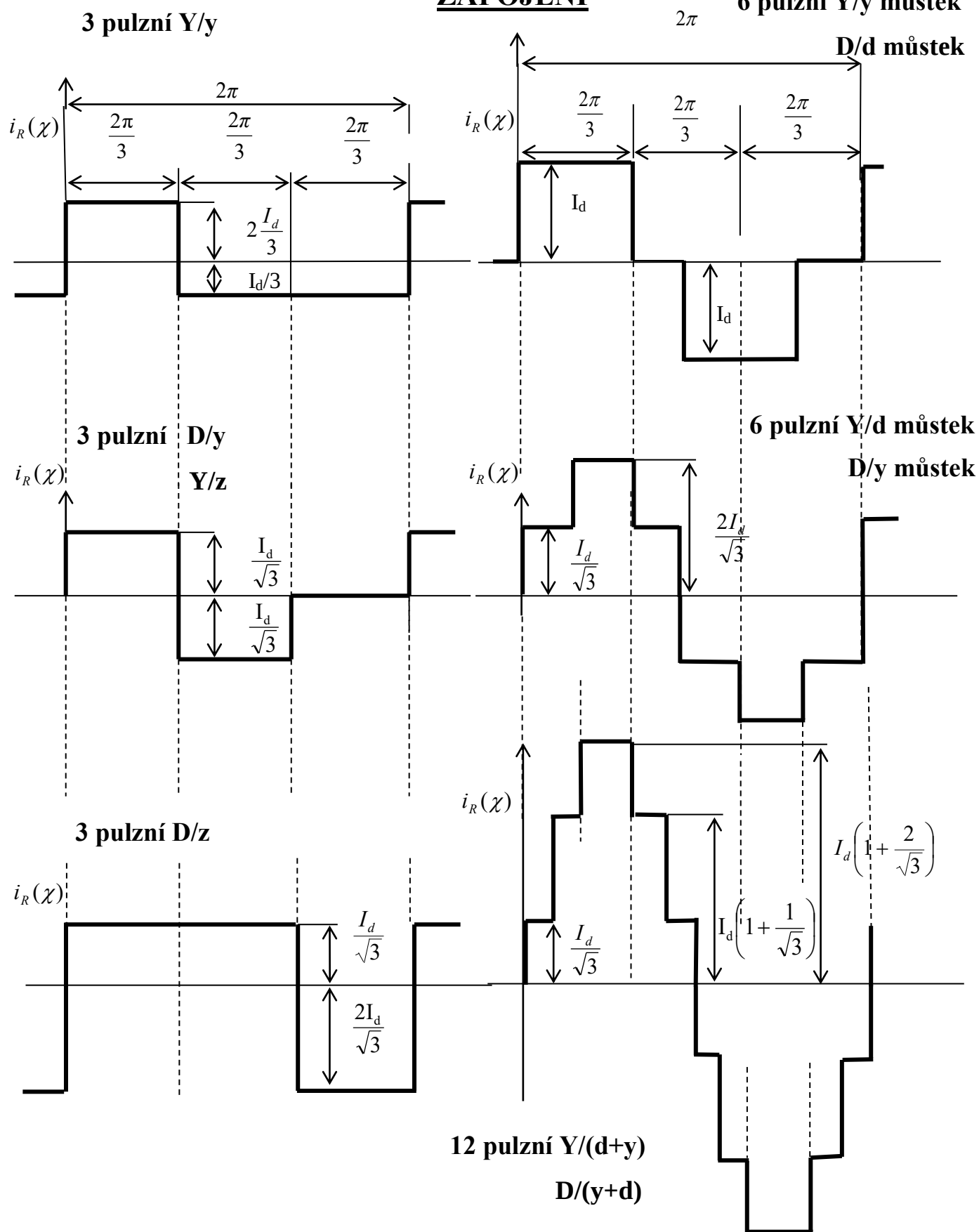
$$I_{1\max} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \quad \text{pro šestipulzní spojení}$$

$$I_{1\max} = \frac{4\sqrt{3}}{\pi} I_d \quad \text{pro dvanáctipulzní spojení}$$

U dvanáctipulzního spojení se jedná o sériové spojení dvou můstků. Napájecí transformátor je řešen tak, že jedna skupina pracuje v zapojení např. Yy0 a druhá skupina pak pracuje v zapojení Yd5. Tím dojde k fázovému posunu proudů od jednotlivých skupin a následně k dvanácti-pulznímu vlivu na napájecí síť.

Pro úplnost je třeba uvést, že s běžnými 3 fázovými transformátory, jejichž úhly spojení jsou celými násobky 30^0 el., můžeme docílit maximálně 12-ti pulzní spojení síťového proudu. Pro dosažení vícepulzních průběhů je třeba použít speciální transformátory se vzájemným úhlem natočení menším než 30^0 .

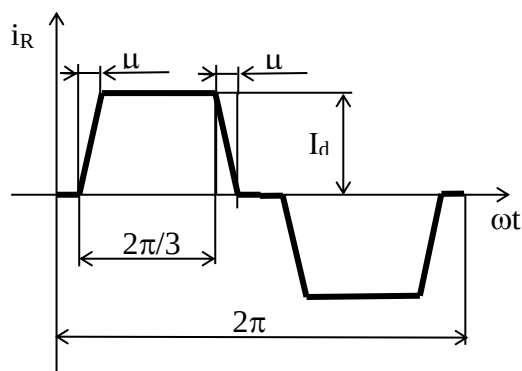
ZAPOJENÍ



obr. 2 – Průběhy proudů různých zapojení usměrňovačových transformátorů

Vliv úhlu komutace na harmonické proudy

Vlivem reálné indukčnosti v obvodu zdroje střídavého napětí (tj. zkratový výkon sítě $S_K \neq \infty$) nemá proud odebíraný měničem ze sítě obdélníkový průběh, jak je znázorněno na obr. 1. Po dobu komutace, kdy jsou dva polovodiče připojené na různé fáze současně vodivé, nastává přechod proudu z jednoho polovodiče na druhý. Elektrický úhel, během něhož komutace probíhá nazýváme úhlem komutace μ .

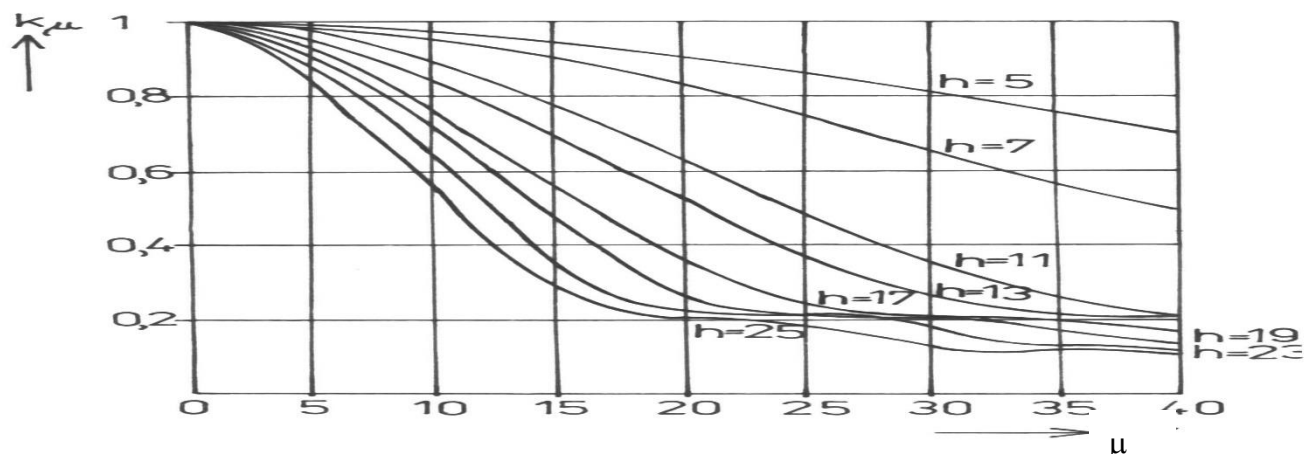


obr. 3 – Průběh proudu měniče při respektování úhlu komutace

Amplitudový zákon se pak upraví na vztah:

$$I_h = \frac{1}{h} I_1 \cdot k_\mu$$

Grafické vyjádření koeficientu k_μ je na obr.4



obr. 4 - Grafické vyjádření koeficientu k_μ - vyjádření komutačního proudu dle IEC

Harmonické proudy usměrňovačů při nesymetrických podmínkách činnosti

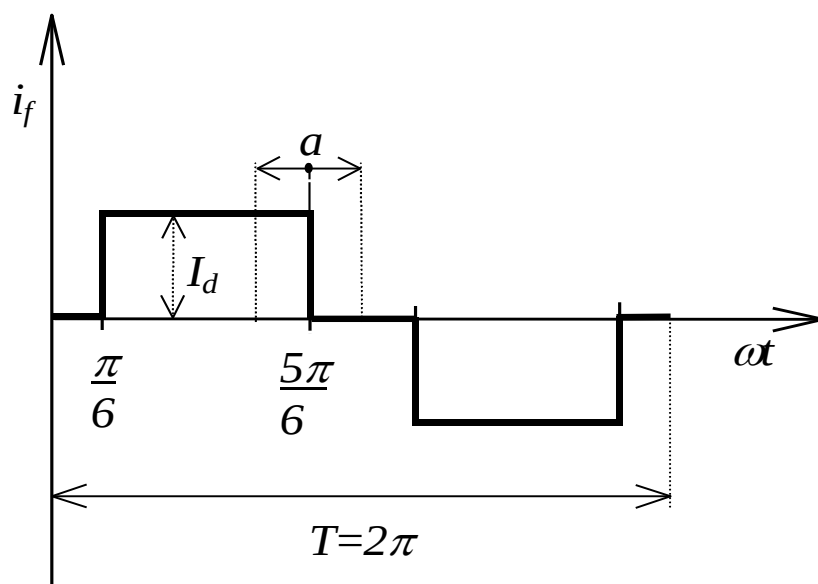
V úvodu byly stanoveny zjednodušující předpoklady pro činnost měniče. Všechna dosud uvedená odvození byla prováděna za zjednodušujícího předpokladu symetrického chování všech součástí systému. Řád harmonických proudů pak odpovídá vztahu $h = kp \pm 1$, tj. jedná se o charakteristické harmonické. V praxi však nejsou obvykle splněny ani podmínky symetrií.

Rozlišují se následující druhy nesymetrií :

- a) amplitudová nesymetrie napájecí soustavy
- b) fázová nesymetrie napájecí soustavy
- c) nesymetrie řízení měniče.

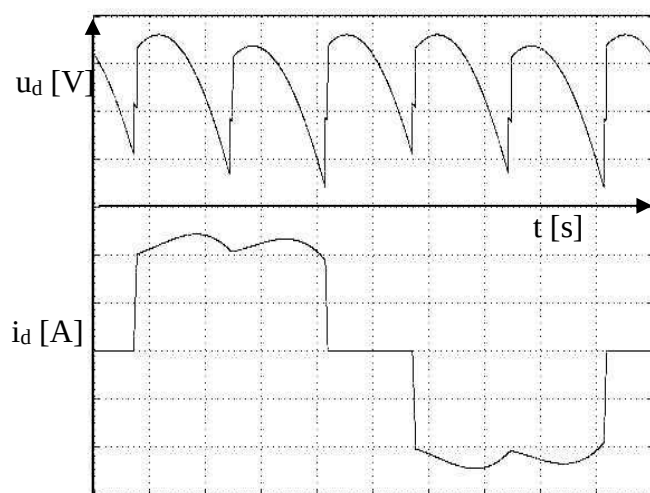
Vznik a velikost všech nesymetrií je naprosto nahodilý a proto je určení vlivu těchto nesymetrií velmi obtížné. Jakmile nejsou splněny podmínky symetrií, objevují se ve spektru proudu i frekvence, kde řád harmonické nevyhovuje podmínce $h = kp \pm 1$, nebo dokonce h není celé číslo. V prvním případě hovoříme o tzv. necharakteristických harmonických, v druhé případě o tzv. meziharmonických.

Základní vysvětlení působení nesymetrií na průběh proudu odebíraného měničem ze sítě je patrné z obr.5. Zvětšováním odchylky α se ve spektru proudů objevují i necharakteristické harmonické. Současně dochází i ke změnám charakteristických harmonických

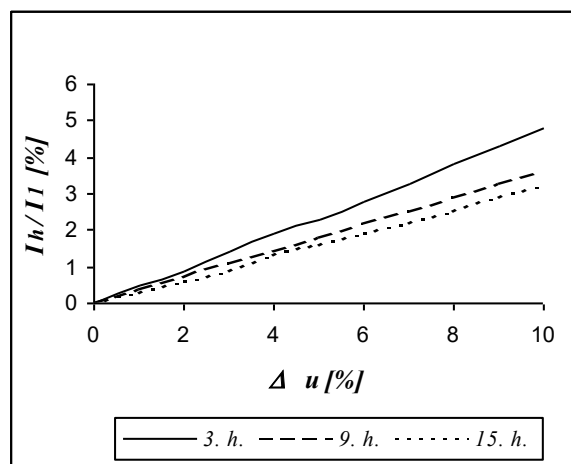


obr. 5 – Průběh vyhlazeného proudu i_d zatíženého nesymetrií

Vzhledem k principu synchronizace pilového napětí s napětím napájecím je zřejmé, že kromě nepravidelného zvlnění usměrněného napětí se projeví také nesymetrie řídicích impulzů na jednotlivé tyristory. Průběhy napětí a proudů pro trojfázový můstek jsou na obrázku 6



obr. 6 – Ukázka průběhů napětí a proudů při napěťové nesymetrii napájecí sítě



obr. 7 – Necharakteristické harmonické způsobené amplitudovou nesymetrií