

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Pulzační momenty asynchronního stroje
vyvolaného časovými harmonickými**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Karel KVARDA**
Osobní číslo: **E11N0070P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Průmyslová elektronika a elektromechanika**
Název tématu: **Pulzační momenty asynchronního stroje vyvolané časovými harmonickými**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Uvedte přehled zdrojů časových harmonických složek.
2. Sestavte matematický model asynchronního stroje s ohledem na zadaný problém.
3. Pomocí vhodného simulačního jazyka řešte vliv harmonických složek na elektromagnetický moment.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:


Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce: **Prof. Ing. Václav Bartoš, CSc.**
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání diplomové práce: **17. října 2011**
Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2012**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Anotace:

Tato diplomová práce se zabývá rozбором časových harmonický asynchronního motoru a vznikem pulzačního momentu. Rozbor vlivu použití frekvenčních měničů na asynchronní motor.

Klíčová slova:

Vyšší harmonické proudy, pulzační moment, rovnice motoru, frekvenční měnič, asynchronní motor

Key words:

current harmonic, impulse torque, machine equations, frequency converter, asynchronous machine

Impulse torque asynchronous machine give rise to current harmonic:

This work describes making of analysis current harmonic voltage asynchronous machine and source impulse torque. Analysis impact use frequency converter on asynchronous machine.

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne:.....

.....

podpis autora

Autorská práva

Podle Zákona o právu autorském. č.35/1965 Sb. (175/1996 Sb. ČR) § 17 a Zákona o vysokých školách č. 111/1998 Sb. je využití a společenské uplatnění výsledků diplomové práce, včetně uváděných vědeckých a výrobně-technických poznatků nebo jakékoliv nakládání s nimi možné pouze na základě autorské smlouvy za souhlasu autora a Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat všem lidem, kteří se svou pomocí podíleli na vývoji této diplomové práce, obzvláště pak vedoucí práce Prof. Ing. **Václav Bartoš**, CSc.

Seznam použitých veličin:

f [Hz] ... kmitočet sítě

u_s [V] ... napětí statoru

u_r [V] ... napětí rotoru

i_s [A] ... proud statoru

i_r [A] ... proud rotoru

M [Nm] ... moment motoru

ψ [Wb] ... spřažený magnetický tok

Obsah

1. Úvod	-9-
2. Přehled zdrojů časových harmonických složek	-9-
2.1. Asynchronní motor a měnič frekvence	-9-
2.2. Rozbor vyšších harmonických	-11-
2.3. Rozbor vyšších harmonických frekvenčního měniče	-12-
3. Matematický model asynchronního motoru	-14-
3.1. Napět'ové rovnice asynchronního stroje	-14-
3.2. Moment asynchronního stroje	-16-
4. Závěr	-16-

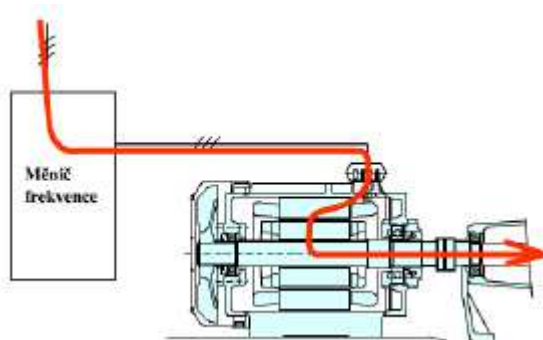
1. Úvod

Tato práce se zabývá matematickým modelem asynchronního motoru, vlivu časových harmonických a pulzační momentu. Asynchronní motor je nejpoužívanější, nejlevnější a přitom nejjednodušší elektrický stroj. Významnou změnou v použití asynchronních motorů bylo použití měničů frekvence pro jejich napájení. Takto koncipované pohony v posledním desetiletí minulého století doznaly značného rozšíření a u některých druhů pohonů (především doprava médií) začaly převažovat nad přímo napájenými pohony.

2. Přehled zdrojů časových harmonických složek

2.1. Asynchronní motor a měnič frekvence

Elektrické stroje obecně jsou technické soustavy, určené k přeměně energie jednoho druhu na energii jiného druhu nebo stejnou s jinými parametry a vlastnostmi. Účinnost této přeměny je limitována reálnými fyzikálními vlastnostmi jednotlivých součástí, obecně největší část z dodané energie se přenesou k dalšímu využití (obr. 1), menší část řadíme mezi parazitní energetické děje. Jejich podrobným rozbořením najdeme řadu vedlejších vlivů, které odčerpávají část energie z jejího hlavního toku strojem na základě několika rozdílných mechanismů (tepelné ztráty, vibrace a hluk, elektromagnetické vyzařování, tření atd.).



Obr. 1

Cesta dominantní přeměny energie v soustavě měnič – motor.

U asynchronního stroje je jednou z tvořených nebo dodávaných energií energie elektrická, druhá mechanická. Na pozadí dominantní obousměrné přeměny těchto energií vznikají v asynchronním stroji dílčí procesy, které tuto přeměnu zčásti podporují, zčásti omezují a zčásti jsou na ní nezávislé. Tyto parazitní procesy ve většině případů snižují energetickou účinnost přenosu energie nebo snižují spolehlivost a životnost stroje, např. urychlením degradace izolačního systému a provozních vlastností dalších použitých materiálů.

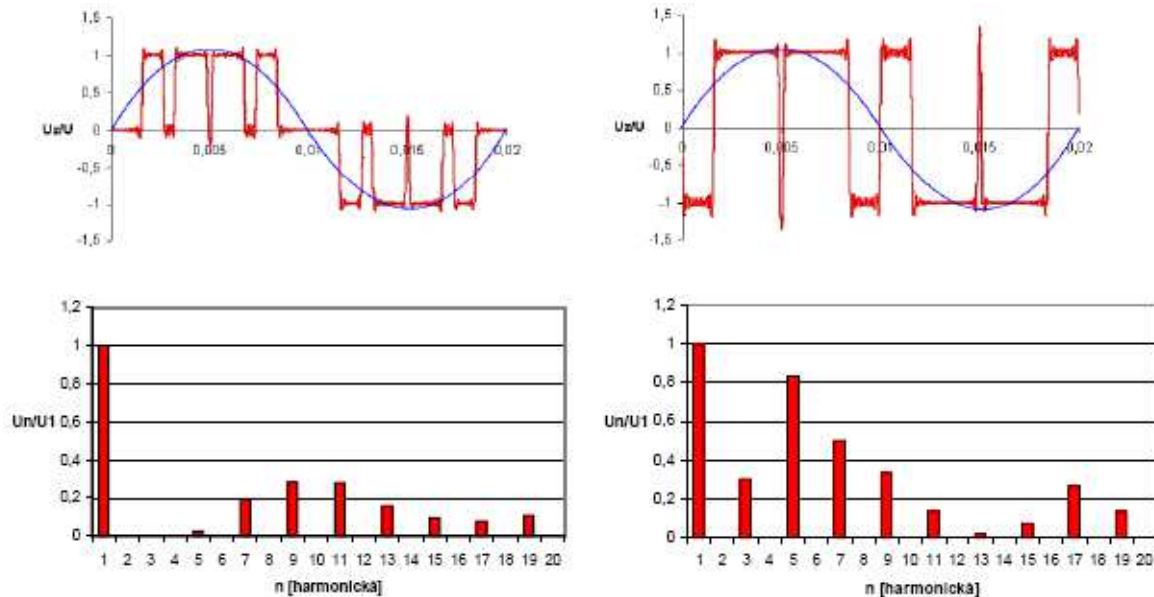
Asynchronní stroje jsou konstruovány pro sinusový průběh elektrických veličin. V okamžiku, kdy je asynchronní stroj napájen z měniče frekvence, se situace ve stroji (pohonu) dramaticky mění. Motor napájený z měniče tedy tvoří s tímto měničem soustavu, ve které se většina fyzikálních dějů odehrává za jiných podmínek než u samotného motoru napájeného ze sítě – především ty, jež jsou úměrně závislé na časových změnách elektrických a magnetických veličin. Poměr závažnosti vlivu parazitních procesů na hlavní proces přeměny energie je jiný, objevují se nové děje svázané s vysokými spínacími frekvencemi a vysokými strmými veličinami, navíc děje, které byly konstrukčními úpravami v průběhu vývoje minimalizovány, jsou často právě těmito frekvencemi opět posíleny a vystupují nad únosnou mez (především elektromagnetické a elektrostatické děje s vlivem na izolační systém a konstrukční části). V současné době pracují všechny moderní napěťové měniče s pulsně šířkovou modulací výstupního napětí. Spínací jev, který je vyvolán při každém spínacím pulsu, je původcem značně strmých impulsů, běžně až 10 kV/μs.

Kromě harmonických, vznikajících přímo ve stroji se v něm vyskytují i harmonické, které jsou mu „vnuceny“ zvnějšku a které označujeme jako časové harmonické. Tyto harmonické jsou výrazné právě v okamžiku napájení stroje z měniče frekvence.

U napěťových měničů má napětí buď tvar obdélníku nebo je ve tvaru pulsů. Tedy u těchto měničů obsahuje značné množství harmonických křivek napětí. U proudového měniče je proud připojeného motoru blízký obdélníku či lichoběžníku a naopak napětí je blízké sinusovce s komutačními špičkami. Cyklokonvertor jako zdroj nízkého kmitočtu generuje sinusové proudy i napětí s relativně menším obsahem harmonických, negativní vlivy jsou u něj menší než u výše uvedených měničů.

2.2. Rozbor vyšších harmonických

Závislost obsahu harmonických na způsobu modulace výstupního napětí lze demonstrovat např. na srovnání obsahu harmonických frekvencí pro unipolární a bipolární pulsně - šířkovou modulaci:



Obr. 2

Srovnání obsahu harmonických u unipolární a bipolární PŠM

Jak je patrné z obrázku 2., obsah harmonických je u různého typu modulace také různý, ve výstupním napětí nalezneme liché harmonické řádu $\mu=2\cdot m-1$ kde m je celé číslo z řady $1,2,3\dots m_n$. Unipolární modulace vykazuje nižší obsah harmonických vyššího řádu než $\mu=1$, zcela pak chybí 3. harmonická. Kromě těchto frekvencí však ve skutečném spektru musíme počítat ještě s harmonickými a především subharmonickými modulační frekvence f_m .

2.3. Rozbor vyšších harmonických frekvenčního měniče

Pro vyšetření časových harmonických z frekvenčního měniče je vhodná Fourierova transformace.

I. Analytická metoda

Fourierova transformace, trigonometrické vyjádření:

Použitelná pouze, známe-li analytické vyjádření měřeného průběhu (popř. analytickou aproximaci)

koeficienty:

$$f(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin(n\omega t) \quad (1)$$

resp.

$$A_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \cos(n\omega t) dt \quad \text{pro } n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

$$B_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \sin(n\omega t) dt \quad \text{pro } n = 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

$$f(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (4)$$

$$C_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \quad (5)$$

$$\varphi_n = \arctg \frac{B_n}{A_n} \quad (6)$$

II. Numerická metoda

Diskrétní Fourierova transformace (DFT)

$$\hat{S}(n\omega) = \sum_{k=0}^{K-1} s(kT) \cdot e^{-jn\omega kT} \quad (7)$$

T doba mezi dvěma vzorky

K počet vzorků za periodu

$s(kT)$ naměřená hodnota v čase kT

komplexní koeficienty

$$\hat{C}_n = \frac{2}{K} \hat{S}(n\omega) \quad (8)$$

$$C_n = \sqrt{[\operatorname{Re}(\hat{C}_n)]^2 + [\operatorname{Im}(\hat{C}_n)]^2} \quad (9)$$

$$\varphi_n = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im}(\hat{C}_n)}{\operatorname{Re}(\hat{C}_n)} \quad (10)$$

$$f(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (11)$$

Přesnost metody závisí na počtu vzorků za periodu, tj. na rychlosti vzorkování (udává se v Sample/sec).

OBECNÝ PERIODICKÝ PRŮBĚH

periodický průběh ve FT vyjádříme jako

$$u(t) = U_0 + \sum_{k=1}^n U_{km} \sin(k\omega t + \varphi_k) \quad (12)$$

$$i(t) = I_0 + \sum_{k=1}^n I_{km} \sin(k\omega t + \varphi_k) \quad (13)$$

efektivní hodnota

definice:

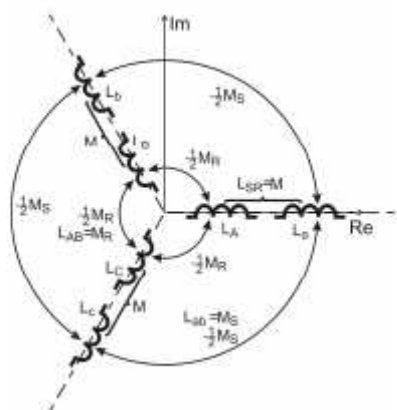
$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} \quad (14)$$

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left[U_0 + \sum_{k=1}^n U_{km} \sin(k\omega t + \varphi_k) \right]^2 dt} = \sqrt{\sum_{k=0}^n U_k^2} \quad (15)$$

3. Matematický model asynchronního motoru

3.1. Napěťové rovnice asynchronního stroje

Pro modelování elektromagnetických jevů ASM uvažujeme motor s vinutou kotvou a jedním pólpárem, který má souměrně rozložené vinutí na statoru $Labc$ i na rotoru $LABC$ a pootočená vinutí jednotlivých fází vůči sobě o $2\pi/3$. viz Obr. 1



Obr. 1:

Schéma ASM vzájemných indukčností

Obecně všechna vinutí v tomto zamýšleném modelu mohou mít vlastní indukčnost rozdílnou, ale v reálných aplikacích s výhodou využíváme symetrie stroje, což nám zjednoduší popisovaný model. Složitější je pak popis vzájemných indukčností mezi statorovými a rotorovými vinutími, protože se s natočením rotoru mění v závislosti na poloze rotoru.

statorový souřadný systém:

$$\mathbf{u}_s = R_s \mathbf{i}_s + \frac{d\boldsymbol{\Psi}_s}{dt} + j\omega_{rf} \boldsymbol{\Psi}_s \quad (16)$$

rotorový souřadný systém:

$$\mathbf{u}_r = R_r \mathbf{i}_r + \frac{d\boldsymbol{\Psi}_r}{dt} + j(\omega_{rf} - \omega) \boldsymbol{\Psi}_r \quad (17)$$

K odvození vztahů pro moment stroje a jeho příkon je vhodné přejít od obvyklých fázových veličin k rotujícím vektorům. Fyzikálně je možno definovat rotující vektor magnetického napětí ve vzduchové mezeře pomocí fázových magnetických napětí.

$$\mathbf{x} = \frac{2}{3} (x_a + \mathbf{a}x_b + \mathbf{a}^2x_c), \quad \mathbf{a} = e^{j2\pi/3}, \quad \mathbf{a}^2 = e^{j4\pi/3} \quad (18)$$

kde je

$$\mathbf{x} = \mathbf{u}_s, \mathbf{u}_r, \mathbf{i}_s, \mathbf{i}_r, \boldsymbol{\Psi}_s, \boldsymbol{\Psi}_r$$

napět'ový model motoru

$$u_a = R_s i_a + \frac{d\psi_a}{dt} + \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_k (\psi_c - \psi_b) \quad (19)$$

$$u_b = R_s i_b + \frac{d\psi_b}{dt} + \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_{rf} (\psi_a - \psi_c) \quad (20)$$

$$u_c = R_s + \frac{d\psi_c}{dt} + \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_{rf} (\psi_b - \psi_a) \quad (21)$$

vztahy pro magnetický tok

$$i_k = \frac{I}{L_{\sigma k}} (\psi_k - \psi_{\mu k}) \quad (22)$$

$$\psi_{\mu k} = \psi_{\mu k} (i_{\mu}) \quad (23)$$

kde

$$i_{\mu} = \sqrt{\frac{2}{3} (i_{\mu a}^2 + i_{\mu b}^2 + i_{\mu c}^2)} \quad (24)$$

magnetizační proud pro libovolnou fázi

$$i_{\mu k} = i_{sk} + i_{rk} \quad (25)$$

při známém statorovém odporu R_s a rozptylové indukčnosti $L_{\sigma s}$ jsou napět'ové rovnice pro

stator

$$u_a = \frac{R_a}{L_{\sigma a}} (\psi_a - \psi_{\mu a}) + \frac{d\psi_a}{dt} + \omega_{rf} \frac{\sqrt{3}}{3} (\psi_b - \psi_c) \quad (26)$$

$$u_b = \frac{R_b}{L_{\sigma b}} (\psi_b - \psi_{\mu b}) + \frac{d\psi_b}{dt} + \omega_{rf} \frac{\sqrt{3}}{3} (\psi_a - \psi_c) \quad (27)$$

$$u_c = \frac{R_c}{L_{\sigma c}} (\psi_c - \psi_{\mu c}) + \frac{d\psi_c}{dt} + \omega_{rf} \frac{\sqrt{3}}{3} (\psi_b - \psi_a) \quad (28)$$

magnetický tok pro příslušnou fázi je definován

$$\psi_{\mu k} = i_{\mu k} \frac{\psi_{\mu} (i_{\mu})}{i_{\mu}}, \quad k=a, b, c$$

Napěťové rovnice pro rotor jsou analogické

$$u_A = \frac{R_A}{L_{\sigma A}}(\psi_A - \psi_{\mu A}) + \frac{d\psi_A}{dt} + (\omega_{rf} - \omega) \frac{\sqrt{3}}{3}(\psi_C - \psi_B) \quad (29)$$

$$u_B = \frac{R_B}{L_{\sigma B}}(\psi_B - \psi_{\mu B}) + \frac{d\psi_B}{dt} + (\omega_{rf} - \omega) \frac{\sqrt{3}}{3}(\psi_A - \psi_C) \quad (30)$$

$$u_C = \frac{R_C}{L_{\sigma C}}(\psi_C - \psi_{\mu C}) + \frac{d\psi_C}{dt} + (\omega_{rf} - \omega) \frac{\sqrt{3}}{3}(\psi_B - \psi_A) \quad (31)$$

3.2. Moment asynchronního stroje

vnitřní moment asynchronního motoru

$$T_i = \frac{p}{\sqrt{3}} [\psi_a (i_b - i_c) + \psi_b (i_c - i_a) + \psi_c (i_a - i_b)] \quad (32)$$

pohybová rovnice

$$T_i - T_l = \frac{J}{p} \frac{d\omega}{dt} \quad (33)$$

5. Závěr

Předložená práce ukazuje, zdroje vyšších harmonických napětí v napájení asynchronního stroje. Jsou to především frekvenční měniče kmitočtu. Tato práce se zabývá matematickým modelem asynchronního motoru a pulzačního momentu.

Seznam použité literatury

[1] Kůs, V.: *Výkonová elektronika [svazek IV]*. Plzeň: ZČU, 1996.

Internetové zdroje

[1] http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=18519

[2] http://homen.vsb.cz/~ber30/texty/diagnostika/Disertacni_prace_autoreferat.pdf

[3] <http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241->

[BOZEK/publikace/2005/2005_095.pdf](http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241-BOZEK/publikace/2005/2005_095.pdf)

[4] <http://homen.vsb.cz/~ber30/texty/diagnostika/diagnostika05.pdf>

Seznam obrázků

Obr. 1:

Cesta dominantní přeměny energie v soustavě měnič – motor.

Obr. 2:

Srovnání obsahu harmonických u unipolární a bipolární PŠM