



**FAKULTA
ELEKTROTECHNICKÁ
ZÁPADOČESKÉ
UNIVERZITY
V PLZNI**

2011

Pracoviště: Regionální inovační centrum elektrotechniky

Výzkumná zpráva č.: 22190 -047 - 2011

ZVÝŠENÍ MOMENTU SYNCHRONNÍHO MOTORU – SIMULAČNÍ STUDIE

Druh úkolu:	Vědecko- výzkumný
Řešitelé:	K. Zeman
Vedoucí úkolu:	Doc. Ing. Z. Peroutka, Ph.D.
Počet stran:	11
Datum vydání:	prosinec 2011
Revize:	1

Tato práce vznikla s podporou projektu TA01010863.

Anotace

Předkládaná zpráva rozebírá možnosti zvýšení momentu pohonu se synchronním motorem, při omezeném maximálním proudu střídače.

Obsah

1 ÚVOD.....	3
2 VÝPOČET MAXIMÁLNÍHO MOMENTU MOTORU	3
2.1 Motor ČKD 4 MW	3
2.1.1 Parametry motoru	3
2.1.2 Výpočet maximálního momentu při jmenovitém proudu statoru.....	4
2.2 Idealizovaný motor umožňující dvojnásobné nabuzení	5
2.3 Motor ČKD zapojený do trojúhelníka	6
2.3.1 Problematika spolupráce vektorového řízení s motorem zapojeným do trojúhelníka.....	6
2.3.2 Výpočet maximálního momentu při jmenovitém proudu statoru.....	8
2.3.3 Problematika 3. harmonické napětí střídače.....	9
3 ZÁVĚRY	9

1 Úvod

Výkon a moment regulovaného pohonu se synchronním motorem je omezen pouze polovodičovými prvky střídače, neboť realizovatelný výkon synchronního stroje je prakticky neomezený..

Předkládaná zpráva rozebírá možnosti, jak při daném střídači zvýšit (alespoň v oblasti malých otáček) moment motoru.

2 Výpočet maximálního momentu motoru

2.1 Motor ČKD 4 MW

2.1.1 Parametry motoru

P_n	4000	kW
U_s	6000	V
$2p$	40	
f	50	Hz
I_n	448	A
$\cos \varphi$	0,9	(-)
I_{bn}	180	A
U_{bn}	270	V

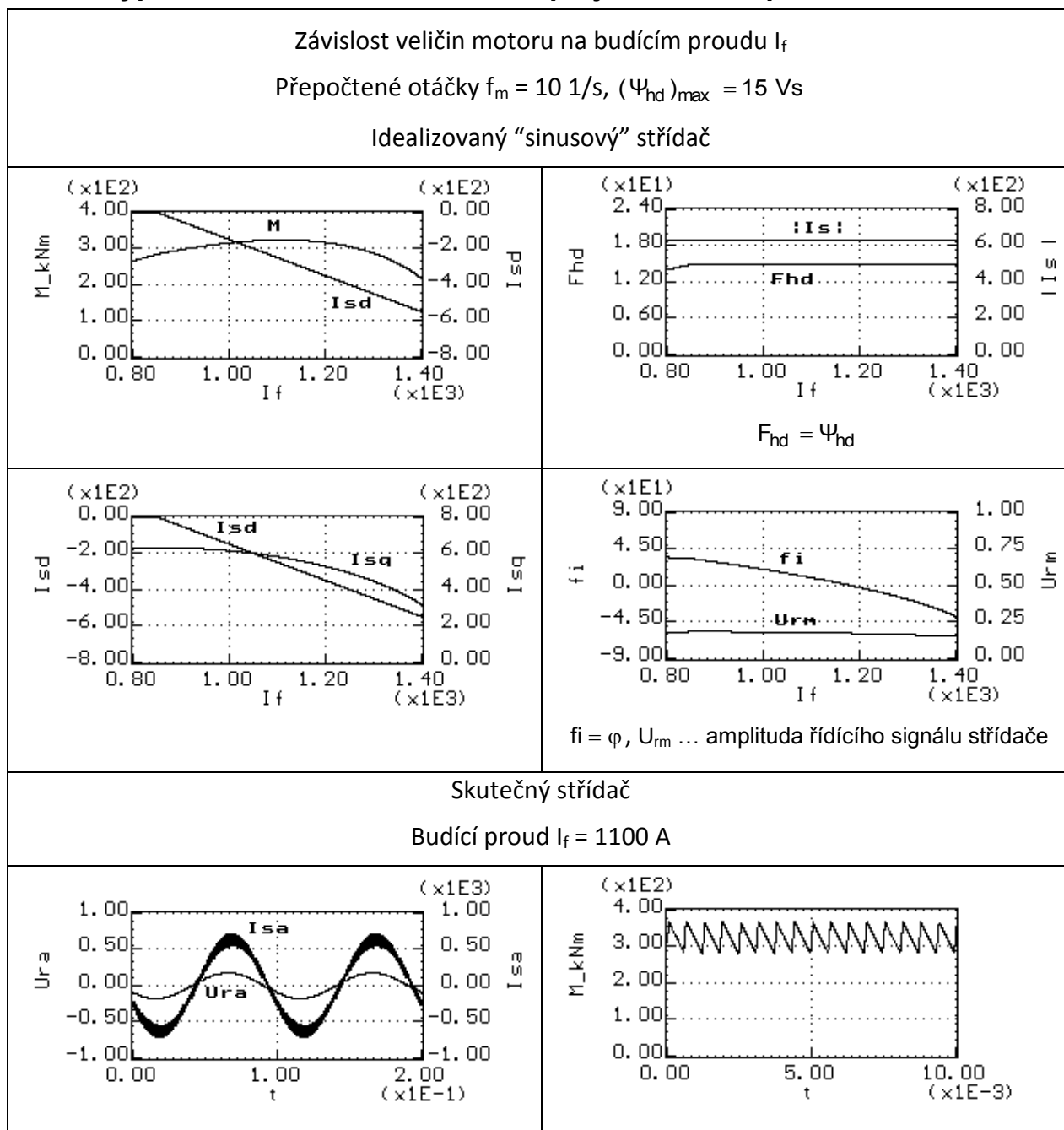
X''_d	1,15	Ω
X''_q	1,10	Ω
J	20440	kgm^2

R_a	0,0603	Ω
R_f	0,0070	Ω
R_D	0,2928	Ω
R_Q	0,2704	Ω
L_{hd}	0,0176	H
L_{hq}	0,0104	H
$L_{a\sigma}$	0,0019	H
$L_{f\sigma}$	0,0048	H
$L_{D\sigma}$	0,0032	H
$L_{Q\sigma}$	0,0019	H
Přepočet budicího proudu		
k_{If}	14,721	(-)

Přepočtené veličiny	
Jmenovitý moment	$M_N = \frac{P_m}{\omega_{mN}} = \frac{4000000}{2 \cdot \pi \cdot 50 / 20} = 254647 \text{ Nm} \cong 254 \text{ kNm}$
Jmenovitý výsledný magnetický tok	$(\Psi_{hd})_N \cong \frac{U_{sN} \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{sN}} \cong 15 \text{ Vs}$ $\Psi_{hd} = L_{hd} \cdot (I_f - I_{sd})$

Magnetizační proud	$I_{mg} = I_f - I_{sd} $
Jmenovitý magnetizační proud	$(I_{mg})_N = \frac{(\Psi_{hd})_N}{L_{hd}} \cong 850 \text{ A}$

2.1.2 Výpočet maximálního momentu při jmenovitém proudu statoru

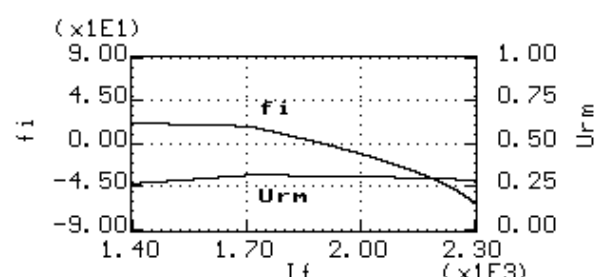
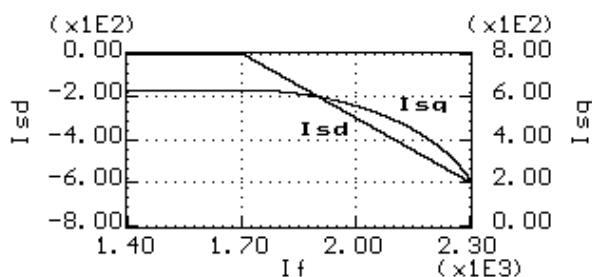
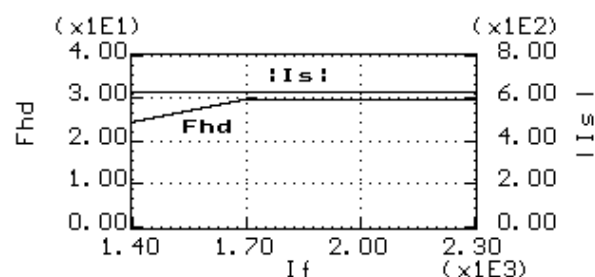
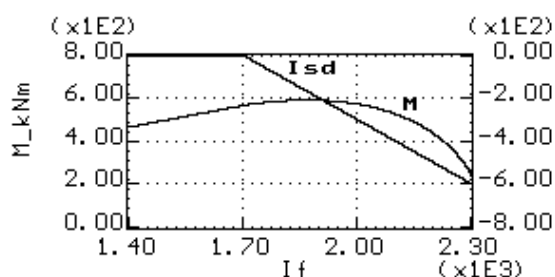


2.2 Idealizovaný motor umožňující dvojnásobné nabuzení

Závislost veličin motoru na budícím proudu I_f

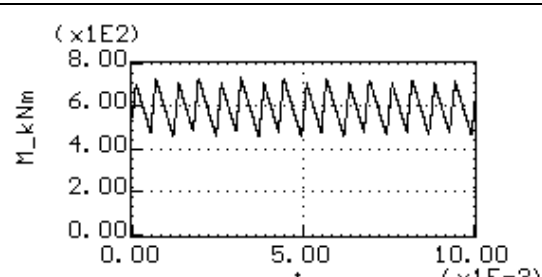
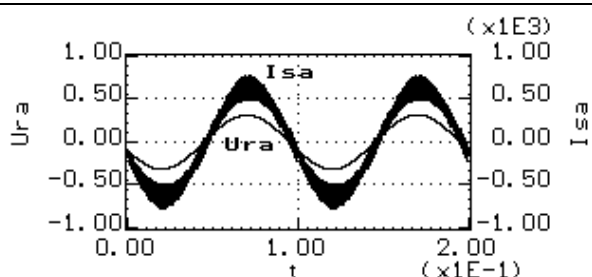
Přepočtené otáčky $f_m = 10 \text{ 1/s}$, $(\Psi_{hd})_{\max} = 30 \text{ Vs}$

Idealizovaný "sinusový" střídač



Skutečný střídač

Budící proud $I_f = 1850 \text{ A}$



Závěry:

- Zvětšením výsledného magnetického toku na dvojnásobek vzroste moment přibližně také na dvojnásobek.
- Zvětšení momentu lze využít pouze v oblasti nízkých otáček. V oblasti vyšších otáček je nutno motor odbudit.

2.3 Motor ČKD zapojený do trojúhelníka

Na základě teoretických úvah lze dokázat, že při daném proudu střídače nelze přepojením vinutí z hvězdy do trojúhelníka zvýšit moment motoru.

Spolupráce vektorového řízení s motorem zapojeným do trojúhelníka je však zajímavý problém.

2.3.1 Problematika spolupráce vektorového řízení s motorem zapojeným do trojúhelníka

- Podstata vektorového řízení ... oddělená regulace složek vektoru proudu I_d , I_q . Tento vektor je určen proudy ve fázích statorového vinutí bez ohledu na způsob zapojení.
- Při zapojení vinutí do trojúhelníka se měří sdružené proudy (proudy dodávané střídačem) I_a, I_b, I_c . Pro výpočet vektoru proudu je nutno vypočítat proudy ve fázích statoru

$$I_{ab} = \frac{1}{3} \cdot (I_a - I_b), I_{bc} = \frac{1}{3} \cdot (I_b - I_c), I_{ca} = \frac{1}{3} \cdot (I_c - I_a)$$

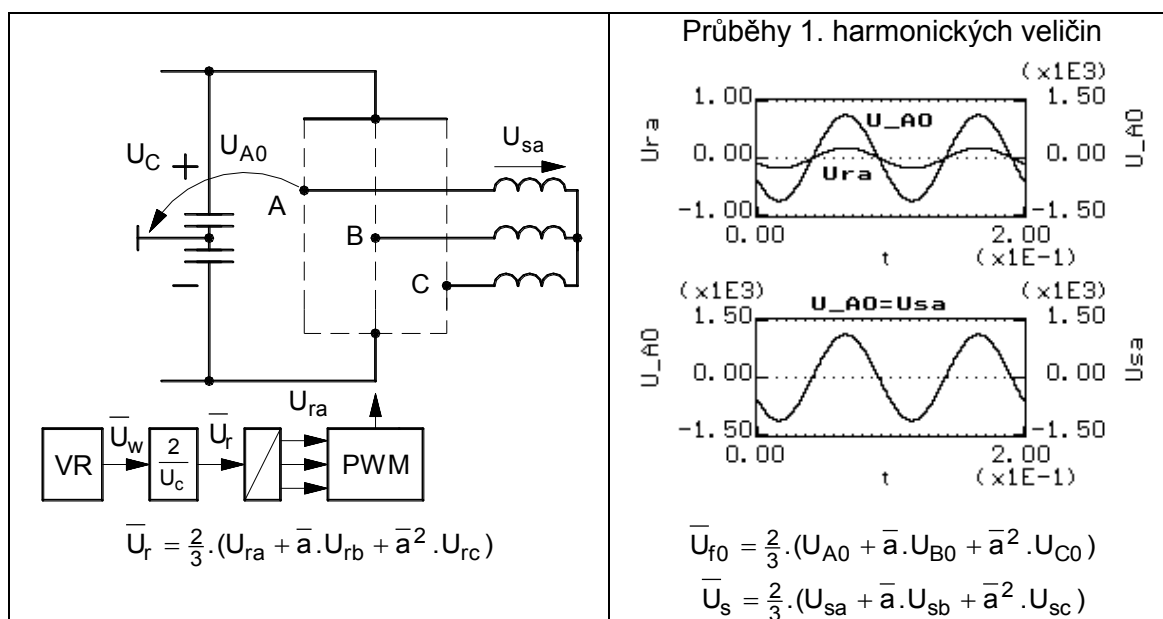
Pozn.: Ve vinutí, zapojeném do trojúhelníka může protékat 3. harmonická proudu I_0 .

$$I_{ab_skut} = I_{ab} + I_0, I_{bc_skut} = I_{bc} + I_0, I_{ca_skut} = I_{ca} + I_0$$

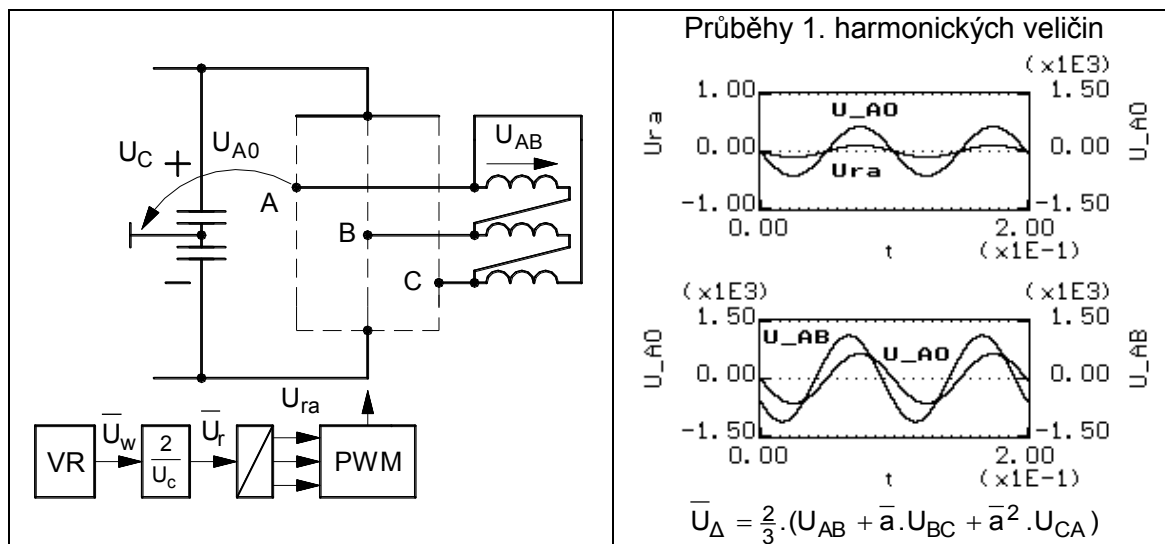
- Vektor proudu lze vypočítávat z proudů I_{ab} , I_{bc} , I_{ca} , neboť vektory skutečné a odpovídající vyvážené trojfázové soustavy jsou shodné.

$$\bar{I} = \frac{2}{3} \cdot (I_{ab_skut} + \bar{a} \cdot I_{bc_skut} + \bar{a}^2 \cdot I_{ca_skut}) = \frac{2}{3} \cdot (I_{ab} + \bar{a} \cdot I_{bc} + \bar{a}^2 \cdot I_{ca}) = I_\alpha + j \cdot I_\beta$$

- Vektor napětí, vyhodnocený vektorovým řízením $\bar{U}_w$ určuje řídicí signály střídače (řídicí signál PWM modulační pro fázi a ... $U_{ra} = \text{Re} \left\{ \bar{U}_w \right\} \cdot \frac{2}{U_c}$).
- Při zapojení do hvězdy mají vektory řídicího signálu střídače a vektor 1. harmonické napětí statoru shodnou polohu.



- Při zapojení do hvězdy generují algoritmy vektorového řízení vektor $\bar{U}_w$, který odpovídá vektoru 1. harmonické fázového napětí motoru.
- Při zapojení do trojúhelníka mají vektory řídicího signálu střídače a vektor 1. harmonické napětí statoru rozdílnou polohu.

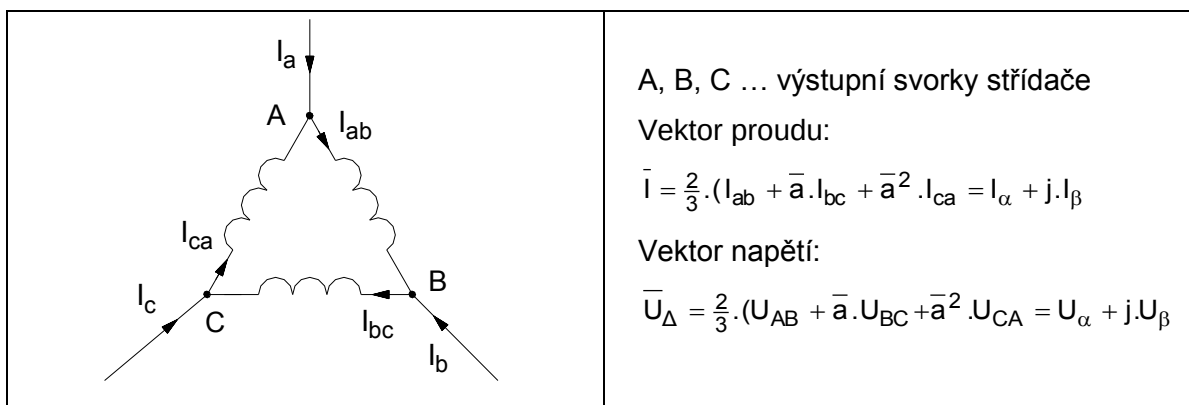


- Při zapojení do trojúhelníka musí algoritmy vektorového řízení vyhodnocovat vektor fázového napětí $\bar{U}_w$, který odpovídá požadovanému vektoru 1. harmonické sdruženého napětí motoru.

Pozn.: Práce regulátorů složek proudů je při zapojení do trojúhelníka obtížnější. Při výpočtu dále uvedených grafů bylo nutno zkrátit periodu vzorkování výpočtů (simulace výpočtů, probíhající v reálném čase).

- Vektorové řízení omezuje velikost vektoru proudu $\Rightarrow$ je omezována amplituda proudů I_{ab} , I_{bc} , I_{ca} .

Proudy dodávané střídačem... $I_a = I_{ab} - I_{ca}$, $I_b = I_{bc} - I_{ab}$, $I_c = I_{ca} - I_{bc}$ jsou $\sqrt{3}$ krát větší.

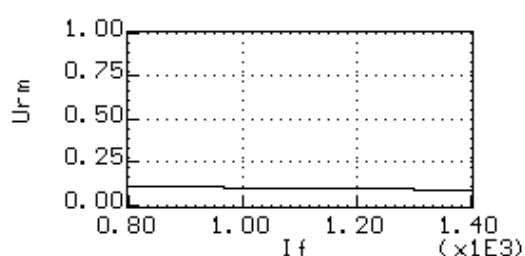
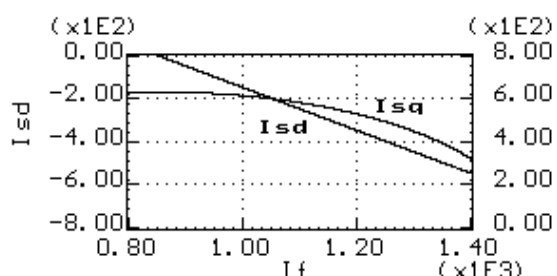
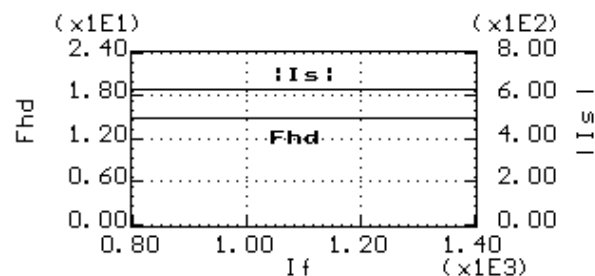
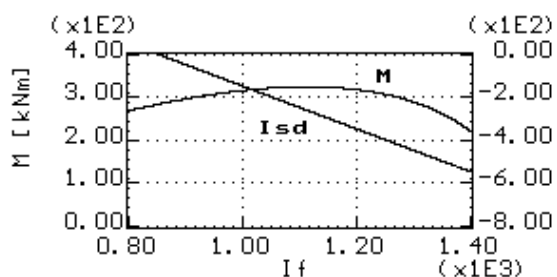


2.3.2 Výpočet maximálního momentu při jmenovitém proudu statoru

Závislost veličin motoru na budícím proudu I_f

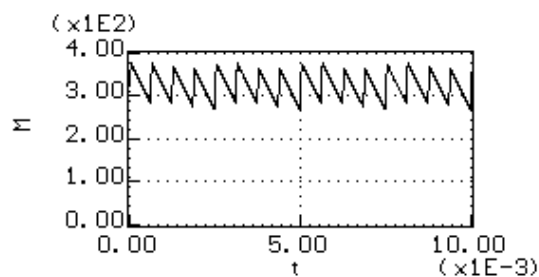
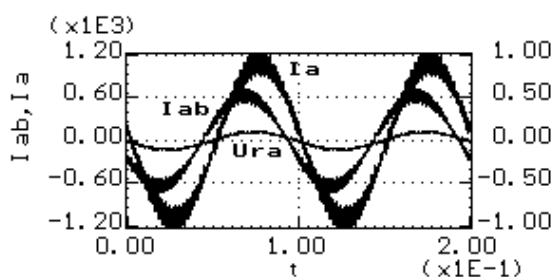
Přepočtené otáčky $f_m = 10 \text{ 1/s}$, $(\Psi_{hd})_{\max} = 15 \text{ Vs}$

Idealizovaný "sinusový" střídač



Skutečný střídač

Budící proud $I_f = 1100 \text{ A}$



$I_{ab} \dots$ proud ve fázi
 $I_a \dots$ sdružený proud dodávaný střídačem

Závěry:

- Při daném výsledném magnetickém toku a daném proudu ve vinutí statoru je moment motoru nezávislý na zapojení statorového vinutí (hvězda, nebo trojúhelník).
- Při zapojení do trojúhelníka je proud střídače $\sqrt{3}$ krát větší, než při zapojení do hvězdy.

2.3.3 Problematika 3. harmonické napětí střídače.

Při zapojení vinutí motoru do trojúhelníka může vinutím statoru protékat 3. harmonická proudů I_{ab}, I_{bc}, I_{ca} .

$$I_0 = \frac{1}{3} \cdot (I_{ab} + I_{bc} + I_{ca})$$

$$U_0 = \frac{1}{3} \cdot (U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}) = R_s \cdot I_0 + \frac{d\Psi_0}{dt} = R_s \cdot I_0 + L_{s\sigma} \cdot \frac{dI_0}{dt}$$

$L_{s\sigma}$... rozptylová indukčnost

Pokud by bylo $U_0 \neq 0$, protékal by vinutím velký proud, neboť rozptylová indukčnost je malá ($L_{s\sigma} = 0.0019 \text{ H}$).

Při napájení motoru střídačem však $U_0 \neq 0$ nemůže nastat ...

$$U_0 = \frac{1}{3} \cdot (U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}) = \frac{1}{3} \cdot (U_{A0} - U_{B0} + U_{B0} - U_{C0} + U_{C0} - U_{A0}) = 0$$

Závěr:

- 3. harmonická složka fázových napětí U_{A0}, U_{B0}, U_{C0} nemůže způsobit vznik proudu I_0 .
- Proud I_0 může vzniknout pouze z důvodu nesymetrie vinutí motoru.

3 Závěry

- Optimálně nabuzený motor poskytuje při daném proudu maximální moment. V optimálním pracovním režimu je shodná poloha vektorů proudu a indukovaného napětí (viz uvedené grafy ... veličina φ).

$$M = \frac{P}{\omega_m} \cong \frac{3 \cdot |\bar{U}_{ind}| \cdot |\bar{I}|}{2 \cdot \omega_m} = \frac{3 \cdot p_p \cdot \omega_m \cdot |\bar{\Psi}| \cdot |\bar{I}|}{2 \cdot \omega_m} = k \cdot |\bar{\Psi}| \cdot |\bar{I}|$$

- Dle tohoto zjednodušeného vztahu existuje jediná možnost, jak při daném proudu zvýšit moment:

Zvětšit výsledný magnetický tok motoru $\bar{\Psi}$.

- Motor s magnetickým obvodem, umožňujícím větší nabuzení, by mohl poskytovat velký moment pouze v oblasti menších otáček. V oblasti vyšších otáček by se motor musel odbuzovat, neboť se zvýšeným tokem roste indukované napětí.
- Optimálně nabuzený motor poskytuje při zapojení do hvězdy i do trojúhelníka stejný moment (při stejném fázovém proudu). Střídač dodává při zapojení do hvězdy fázový proud, při zapojení do trojúhelníka sdružený proud ($\sqrt{3}$ krát větší).

Historie revizí

Rev.	Kapitola	Popis změny	Datum Jméno / Odd.