

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Řízení otáček asynchronních strojů

**vedoucí práce: Doc. Ing. Anna Kotlanová, CSc.
autor: Miroslav Karban**

2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Miroslav KARBAN**
Osobní číslo: **E08B0150P**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Řízení otáček asynchronních strojů**
Zadávací 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. Popište způsoby řízení asynchronních strojů.
2. Odvoďte rovnice, popisující vliv R, L ve vinutí rotoru asynchronního stroje s kroužkovou kotvou.
3. Odvoďte vztahy pro řízení pohonů odstředivých čerpadel, napájených z frekvenčního měniče.


Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

1. Kalousek, M.: Regulácia odstredivých čerpadiel frekvenčným meničom, Časopis EE 4(3):4-6, Bratislava 1998
2. Bartoš, V.: Elektrické stroje, ZČU v Plzni, Plzeň 2004

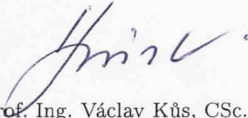
Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Anna Kotlanová, CSc.**
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **18. října 2010**

Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2011**


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 18. října 2010

Anotace

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na možnosti řízení mechanických otáček asynchronního stroje. V první části této práce se zaměříme na definici skluzu, teoretický rozbor a možné způsoby regulace otáček asynchronního stroje. V druhé části se potom zaměříme na změnu velikosti celkové impedance rotorové části stroje, kterou způsobí připojená zátěž. V třetí části zhodnotíme výhody či nevýhody použití měniče frekvence pro regulace otáček odstředivého čerpadla.

Klíčová slova

Asynchronní stroj, odstředivé čerpadlo, měnič frekvence, regulace otáček, mechanické otáčky, charakteristika čerpadla, impedance zátěže, skluz, charakteristika potrubí, regulace čerpadla, měrná energie.

Abstract

The last chapter is focused on the possibility of mechanical speed control of induction machines. In the first part of this work will focus on the definition of slip, theoretical analysis and possible ways to control speed of induction machine. The second part will then focus on scaling the overall impedance of the rotor of the machine, which causes the connected load. In the third part will evaluate the advantages and disadvantages of using frequency converters for variable speed centrifugal pump.

Key words

Asynchronous machine, centrifugal pump, frequency inverter, variable speed, mechanical speed, characteristic of the pump, load impedance, slip, characteristic lines, pump control, specific energy.

Prohlášení

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

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

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 2.6.2011

Miroslav Karban

.....

Poděkování

V první řadě bych tímto velmi rád poděkoval své vedoucí závěrečné bakalářské práce doc. Ing. Anně Kotlanové, CSc. za cenné profesionální rady, poskytnutí vhodných materiálů a metodické vedení práce.

Dále bych rád poděkoval své rodině, která mi umožnila a stále podporovala po celé studium na vysoké škole.

Obsah

OBSAH	7
ÚVOD.....	8
SEZNAM SYMBOLŮ	9
1 POPIS ZPŮSOBŮ ŘÍZENÍ ASYNCHRONNÍCH STROJŮ.....	11
1.1 Přepínání počtu pólů.....	12
1.1.1 Motor s dělenými vinutími statoru.....	13
1.1.2 Motor s oddělenými statorovými vinutími.....	15
1.2 Změna skluzu	15
1.2.1 Regulace otáček sériově ke kotvě připojeným rezistorem	16
1.2.2 Regulace otáček sériově ke kotvě připojeným RLC obvodem	18
1.3 Změna frekvence.....	18
1.3.1 Měníče kmitočtu	19
1.3.2 Nepřímé měniče kmitočtu.....	20
1.3.3 Přímé měniče kmitočtu – cyklokonvertory	22
2 VLIV R, L VE VINUTÍ ROTORU ASYNCHRONNÍHO MOTORU S KROUŽKOVOU KOTVOU.....	24
2.1 Určení parametrů zátěže	24
2.1.1 Určení impedance Z_R	25
2.1.2 Určení impedance Z_C	26
2.2 Příklad vlivu zátěže ve vinutí kotvy.....	26
3 ŘÍZENÍ POHONŮ Odstředivých čerpadel napájených měničem FREKVENCE	29
3.1 Základní vztahy a parametry čerpadel.....	29
3.2 Regulace průtoku.....	32
3.2.1 Regulace škrcením.....	32
3.2.2 Regulace s měničem frekvence.....	33
3.2.3 Příklad regulace čerpadla s měničem frekvence	35
ZÁVĚR	38
POUŽITÁ LITERATURA.....	39

Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na regulaci otáček asynchronních strojů. Asynchronní stroje jsou v dnešní době nejpoužívanějšími elektrickými pohony v průmyslu. Díky své jednoduchosti v konstrukci i velikosti. Motory nevyžadují budící obvod, jako motory synchronní. Řízení asynchronních motorů je velmi často realizováno například u čerpadel, kde je potřeba regulace změny dodávané kapaliny potrubím, nebo u ventilací.

Asynchronní stroje lze řídit mnoha způsoby. Každý způsob regulace má svoje výhody i nevýhody. Cílem této práce je zhodnotit nejvýhodnější metodu tohoto řízení, jak z ekonomického, tak i z technického hlediska. Tuto problematiku budeme řešit v první kapitole této práce.

Asynchronní stroje pracují se skluzem. Druhá kapitola se bude zaměřovat na to, jak skluz ovlivní impedanci rotorového vinutí s připojenou zátěží, kterou přepočítáme na elektrické parametry.

Regulace odstředivých čerpadel se dnes nejčastěji realizuje přes měnič frekvence, oproti typu regulaci škrcením. Třetí kapitola se bude zabývat výhodami, které má měnič frekvence, a jak se změní parametry čerpadla při této regulaci.

Seznam symbolů

$1U, 1V, 1W$	[-]	Značení svorek začátků statorového vinutí motoru
$2U, 2V, 2W$	[-]	Značení svorek konců statorového vinutí motoru
c	[m/s]	Rychlost kapaliny v potrubí
$c_1; c_2$	[m/s]	Rychlosti v sacím a výtlačném hrdle
C	[F]	Kapacita kondenzátoru
d	[m]	Vnitřní průměr potrubí
f	[Hz]	Napájecí frekvence
f_0	[Hz]	Rezonanční frekvence
h_s	[m]	Hydraulické ztráty v potrubí
I'_2	[A]	Proud procházející rotorovým vinutím
$jX'_{2\sigma}$	[Ω]	Reaktance vinutí rotoru
$jX_{1\sigma}$	[Ω]	Reaktance vinutí statoru
jX_C	[Ω]	Celková reaktance rotorové části motoru
jX_R	[Ω]	Reaktance zátěže
jX_μ	[Ω]	Reaktance železa
k_v	[-]	Činitel vinutí
L	[H]	Indukčnost cívky
L_R	[H]	Indukčnost zátěže motoru
m	[-]	Počet fází rotorového vinutí
M_i	[Nm]	Točivý moment stroje
N	[-]	Počet závitů
n	[ot.min ⁻¹]	Mechanické otáčky rotoru
n_{min}	[ot./min.]	Minimální otáčky hřídele čerpadla
n_s	[ot.min ⁻¹]	Synchronní otáčky mag. pole statoru
p	[-]	Počet pólů
P	[W]	Příkon čerpadla
P'	[W]	Příkon čerpadla po přiškrcení
$p_{2v}; p_{1s}$	[Pa]	Tlaky v sacím a výtlačném hrdle
P_{el}	[W]	El. skluzový výkon spotřebovaný v rotorovém obvodu
P_{j2}	[W]	Joulovy ztráty v rotoru
P_δ	[W]	Výkon ve vzduchové mezeře

Q	$[\text{m}^3/\text{s}]$	Průtok čerpadla
Q'	$[\text{m}^3/\text{s}]$	Průtok čerpadla po přiškrcení
ρ	$[\text{kg}/\text{m}^3]$	Hustota kapaliny
R'_2	$[\Omega]$	Činný odpor rotorového vinutí
R_1	$[\Omega]$	Činný odpor ve vinutí statoru
R_C	$[\Omega]$	Celkový činný odpor rotorové části motoru
R_{FE}	$[\Omega]$	Činný odpor železa
R_R	$[\Omega]$	Činný odpor zátěže
s	$[-]$	Skluz asynchronního stroje
S	$[\text{m}^2]$	Vnitřní průřez potrubí
U_i	$[\text{V}]$	Indukované napětí do rotorového vinutí
Y	$[\text{J}/\text{kg}]$	Hmotnostní energie čerpadla
Y'	$[\text{J}/\text{kg}]$	Měrná energie čerpadla po přiškrcení
Y_{min}	$[\text{J}/\text{kg}]$	Minimální měrná energie čerpadla
\bar{Z}_C	$[\Omega]$	Fázor celkové impedance v rotorové části motoru
Z_C	$[\Omega]$	Velikost celkové impedance rotorové části motoru
\bar{Z}_R	$[\Omega]$	Fázor impedance zátěže
Z_R	$[\Omega]$	Velikost impedance zátěže
ΔE_p	$[\text{J}/\text{kg}]$	Charakteristika potrubí
ΔH	$[\text{m}]$	Výškový rozdíl
ΔP	$[\text{W}]$	Ztráty výkonů v potrubí
ΔY	$[\text{J}/\text{kg}]$	Ztráty měrná energie při škrcení
η	$[-]$	Účinnost čerpadla
η'	$[-]$	Účinnost čerpadla po přiškrcení
Φ	$[\text{Wb}]$	Magnetický tok
Ψ	$[\text{Wb}]$	Spřažený magnetický tok
ω	$[\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}]$	Mechanická úhlová rychlost rotoru
ω_1	$[\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}]$	Úhlová rychlost magnetického pole statoru
ω_2	$[\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}]$	Relativní úhlová rychlost statoru

1 Popis způsobů řízení asynchronních strojů

Je-li statorové vinutí připojeno k 3-fázovému zdroji napětí, vytvoří se točivé magnetické pole statoru. Vlivem elektromagnetické indukce, která protíná rotorové vinutí (v případě motoru s vinutým rotorem). Podle Faradayova indukčního zákona se ve vinutí rotoru začne indukovat napětí a začne protékat proud rotorovým vinutím a vytvoří vlastní magnetické pole rotoru. Rotor se udává do pohybu a stoupá jeho úhlová rychlost ω , která je daná vztahem:

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} \quad (1-1)$$

kde n jsou otáčky rotoru [ot.min⁻¹]
 ω úhlová rychlost [rad.s⁻¹]

Pro magnetické točivé pole statoru je úhlová rychlost daná vztahem:

$$\omega_1 = \frac{\pi \cdot n_s}{30} \quad (1-2)$$

kde n_s jsou synchronní otáčky mag. pole statoru [ot.min⁻¹]

Z tohoto plyne, že napětí a proud indukovaný v rotorovém vinutí má jiný kmitočet, než je rychlost točivého pole statoru (tj. mezi rychlostí točivého magnetického pole statoru (rychlost ω_1) a mechanickou rychlostí rotoru (rychlost ω)). Tímto je definovaná relativní rychlost (rychlost ω_2) pole statoru a vodičů v rotoru a platí že:

$$\omega_2 = \omega_1 - \omega \quad (1-3)$$

Kdyby relativní rychlost klesla až na nulu, motor by se točil synchronní rychlostí, do vinutí rotoru by se neindukovalo napětí a proud by byl nulový a tím i točivý moment.

Rozdíl mezi točivým magnetickým polem statoru a otáček rotoru, definován tzv. skluzem, který je dán relativní rychlostí vztáženou na synchronní rychlost otáčení statorového magnetického pole:

$$s = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1} = 1 - \frac{\omega}{\omega_1} = 1 - \frac{f}{f_1} = 1 - \frac{n}{n_s} \quad (1-4)$$

upravíme-li, dostaneme

$$s = 1 - \frac{n}{n_s} \quad (1-5)$$

$$n = (1 - s) \cdot n_s \quad (1-6)$$

dosadíme-li za synchronní otáčky vztah:

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (1-7)$$

pak dostaneme vztah pro otáčky asynchronních strojů:

$$n = \frac{60f}{p} \cdot (1-s) \quad (1-8)$$

kde	n	mech. otáčky asynchronního stroje	[ot./min.]
	f	napájecí frekvence	[Hz]
	p	počet pólů	[-]
	s	skluz stroje	[-]

Rychlost lze tedy řídit změnou frekvence, změnou počtu pólů a změnou skluzu stroje. Se změnou velikosti napájecího 3-fázového napětí, lze také regulovat otáčky. Tato regulace je, ale velice neefektivní. Platí $M \approx U^2$, s kvadrátem velikostí napětí klesá i záběrný moment. Tato metoda se používá spíše u spouštění, jako je například přepínání hvězda-trojúhelník. Omezí se tím záběrné proudy, ale rozběh motoru je delší. [1]

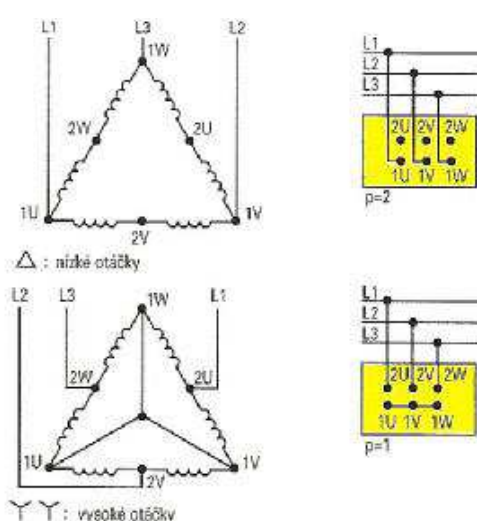
Řízení rychlosti asynchronních strojů je v současné době velmi často vyžadována. Pomocí řízených strojů lze bezztrátově řešit např. množství dodávané kapaliny čerpadlem, vzduchu ventilátorem apod. Použití převodovek způsobuje problémy s jejich obsluhou a údržbou. Proto jsou preferovány pohony s řízenými otáčkami [1].

1.1 Přepínání počtu pólů

Jelikož počet pólových dvojic je celé číslo, proto lze dosáhnout pouze skokové změny rychlosti otáček. Mění-li se počet pólů statoru, mění i synchronní rychlost otáčení točivého magnetického pole a tím i otáčky rotoru. Tento způsob řízení se provádí se pouze u motorů s kotvou nakrátko.

1.1.1 Motor s dělenými vinutími statoru

Každá fáze statorového vinutí se skládá ze dvou částí, v polovině vinutí je odbočka, to se potom zapojuje do série nebo paralelně. Otáčky naprázdno se poté mění skokově v poměru 1:2 tzv. dvoustupňové řízení. Tento způsob dělení se nazývá ‚Dahlanderovo zapojení‘. Pro $n_s = 750 - 1500$ pro vinutí s přepínáním mezi 8 – 4 póly, nebo $n_s = 1500 - 3000$ pro vinutí mezi 4 a 2 póly. Vícetupňové řízení (např. 2 a 6 pólů) se v praxi nevyužívá, vzhledem k vysoké ceně a větším rozměrům stroje. Nejpoužívanější Dahlanderovo zapojení je zapojení trojúhelník – dvojitá hvězda jak je na obr. 1-1.

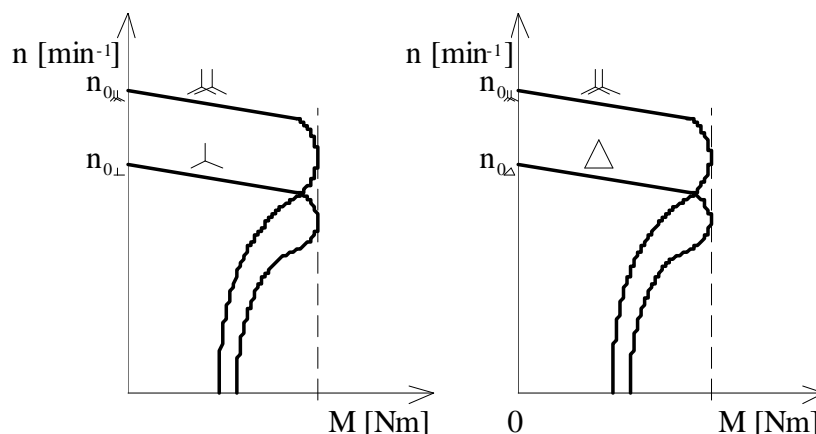


obr. 1-1: Dahlanderovo zapojení (trojúhelník – dvojitá hvězda), obrázek použit z [4]

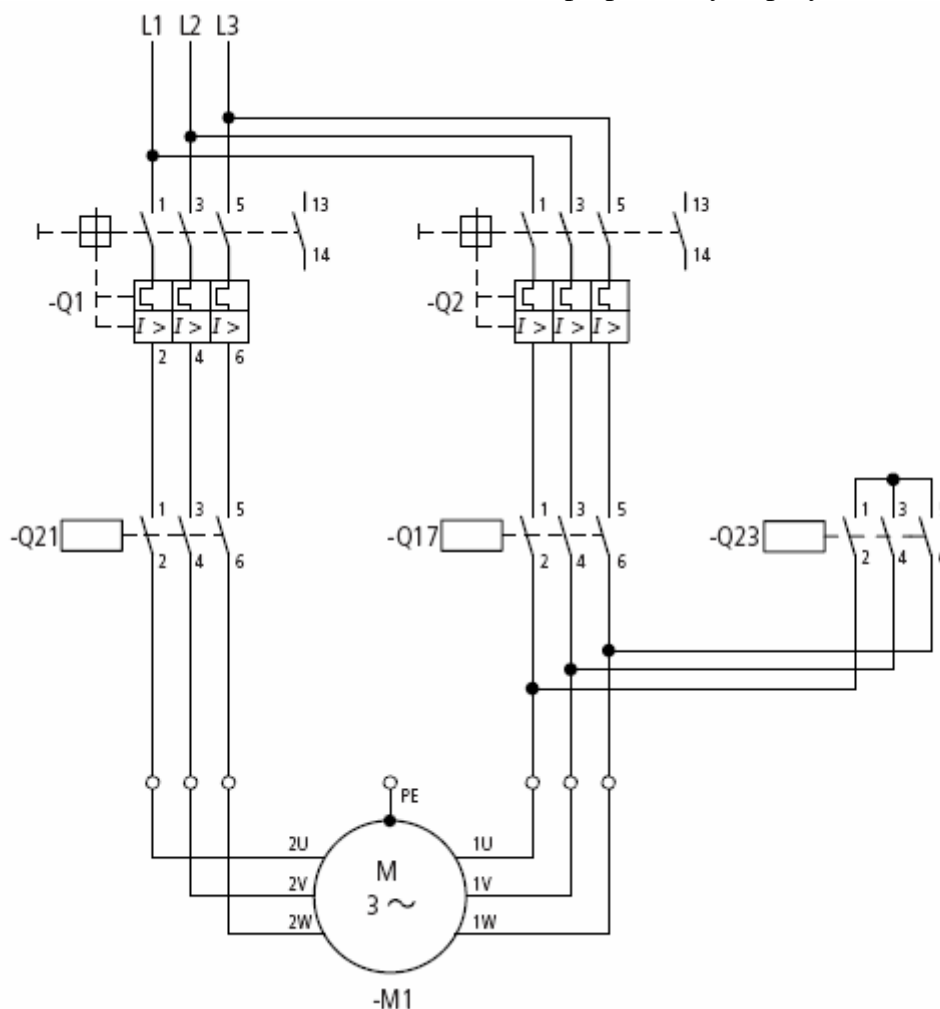
Při sériovém zapojení části vinutí se vinutí sdruží do trojúhelníka, při paralelním zapojení části vinutí se vinutí sdruží do hvězdy. Zapojením vinutí do hvězdy se napájecí napětí zmenší o $\sqrt{3}$, tím je dosaženo snížení indukce v oblasti drážek statoru. Točivý moment je stále stejný v obou možnostech zapojení a proto se tento způsob zapojování hodí pro motory s konstantním točivým momentem, např. obráběcí stroje.

Svorkovnice motoru má 3 svorky pro každý pól. Motor se může používat pouze na jedno napájecí napětí, protože se části vinutí spojují na statoru. Svorky pro nižší otáčky jsou označeny 1U, 1V, 1W a pro vyšší otáčky 2U, 2V, 2W. U motorů s přepínáním dvojitá hvězda – trojúhelník (YY/D), je výkon při obou stupních otáček stejný. U motorů s přepínáním hvězda – dvojitá hvězda (Y/YY), mají při dvojnásobných otáčkách čtyřnásobný točivý moment, to se používá, např. pro motory ventilátorů).

Na obr. 1-2. Je vidět že s přepínáním pólů se budou měnit i otáčky naprázdno, ale nemění se sklon přímkové části a moment zvratu momentové charakteristiky.



Obr. 1-2.: Momentová charakteristika motoru s přepínatelnými póly, obrázek použit z [2]

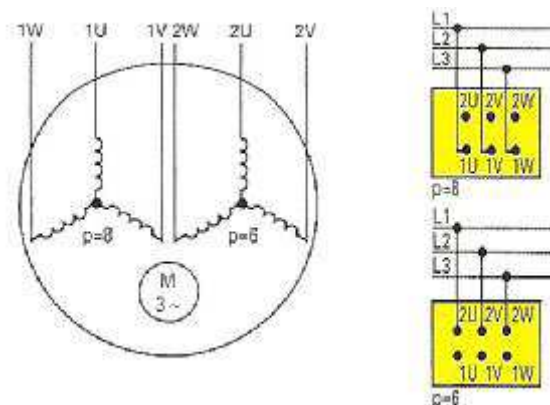


obr. 1-3. Kombinace stykačů UPIL pro spínání vícerychlostních motorů Bez pojistky, bez nadproudového relé, se spouštěčem motorů nebo jističem, obrázek použit z [3]

Q1, Q2 výkonové jističe
 Q21, Q17, Q23 výkonové stykače
 M1 asynchronní motor

Pro nízké otáčky je motor spojen do hvězdy (trojúhelníku) stykačem Q17. Pro větší otáčky se nejdříve spojí stykačem Q23 svorky U1, V1 a W1 nakrátko a poté se spustí motor stykačem Q21. Pomocné kontakty (svorky 13 – 14) u jističů se používají pro ovládání a signalizaci procesů.

1.1.2 Motor s oddělenými satorovými vinutími



obr. 1-4: Motor se oddělenými satorovými vinutími v poměru 3:4, Obrázek použit z [3]

Dvě oddělená satorová vinutí s rozdílnými počty pólů umožňují dvoje otáčky, které mohou být v libovolném celočíselném poměru, např. 3:4 (tj. $n_s = 1000 - 750$ pro stroje s přepínáním mezi 6 – 8 pólů jako je na obr. 1-4. Točivý moment je při obojích otáčkách téměř stejný, výkony motoru jsou přibližně v poměru otáček. Motory s oddělenými vinutími mají zvýšené náklady na vinutí i elektrolechy. Jsou proto používány jen tam, kde není použitelný poměr otáček 1:2. Na svorkovnici jsou zpravidla vyvedeny jen začátky vinutí. [3]

1.2 Změna skluzu

Tato metoda není možná u klece nakrátko, lze použít pouze u kroužkového motoru (s vinutým rotorem). Nevýhodou je, že se jedná o tzv. ztrátové řízení otáček a není možné regulovat otáčky v širokém rozmezí (max. 30%). Skluz bývá běžně od 1% (u velkých strojů) do 15% (u malých strojů) jmenovitých otáček, skluz je tím větší, čím je větší zátěž motoru. Skluzový ztrátový výkon je dán vztahem:

$$P_{el} = P_{\delta} \cdot s \quad (1.2-1)$$

kde	P_{el}	El. skluzový výkon spotřebovaný v rotorovém obvodu	[W]
	P_{δ}	výkon ve vzduchové mezeře	[W]
	s	skluz	[-]

a výkon ve vzduchové mezeře je dán:

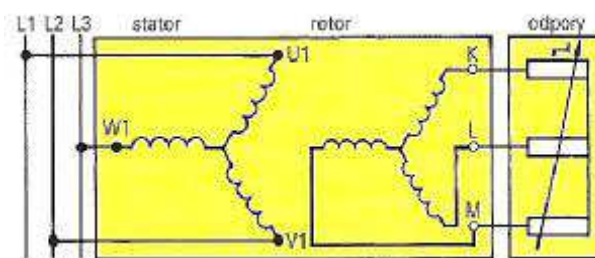
$$P_{\delta} = M_i \cdot \omega_1 \quad (1.2-2)$$

kde M_i točivý moment stroje [Nm]

ω_1 úhlová rychlost točivého mag. pole statoru [rad.s⁻¹]

Za předpokladu, že je konstantní napájecí kmitočet f_1 , počtu pólů p a točivý moment stroje M_i , tím je konstantní i výkon ve vzduchové mezeře P_{δ} . Skluz se potom tedy mění s výkonem P_{el} , Řízení rychlosti otáček se tedy provádí sériovým připojením odporu, nebo kombinace RLC ke kotvě (rotoru) motoru.

1.2.1 Regulace otáček sériově ke kotvě připojeným rezistorem



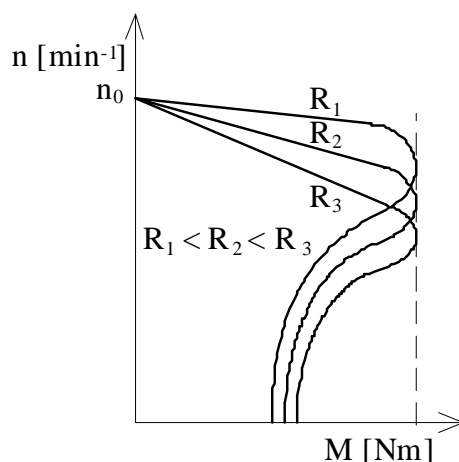
obr. 1-5.: Motor s kroužkovou kotvou s vinutím kotvy a odpory, obrázek použit z [3]

Se zvětšováním činného odporu v rotorovém obvodu klesá sklon přímkové části momentové charakteristiky, přičemž otáčky naprázdno i maximální moment zůstávají stejné.

Momentová charakteristika motoru se naklání a roztahuje se ve směru kladných hodnot skluzu, Při daném zatěžovacím momentu a s rostoucím skluzem a se zmenšuje rychlost otáčení motoru. Platí vztah:

$$\frac{s_2}{s_1} = \frac{R_2}{R_1} \quad (1.2-3)$$

$$s_2 = \frac{R_2}{R_1} \cdot s_1 \quad (1.2-4)$$



Obr. 1-6.: Momentová charakteristika motoru při regulaci otáček skluzem,
obrázek použit z [2]

Z toho tedy vyplývá, že skluz roste lineárně s rostoucím činným odporem. Tento způsob zapojení se ztotožňuje s rotorovým spouštěčem přes rotorové spouštěcí odpory. Za předpokladu, že spouštěcí odpory jsou dimenzovány na trvalý chod, většinou se používají reostaty.

Tento způsob regulace je jednoduchý a spolehlivý, ale nevhodný. Jelikož skluzový výkon P_{el} představuje tzv. Joulovy ztráty, které se přemění na odporech na teplo, lze tento způsob řízení použít pouze u málo výkonných asynchronních strojů. Joulovy ztráty v rotorovém vinutí jsou dány vztahem:

$$P_{j2} = P_{el} = m \cdot R'_2 \cdot I_2'^2 \quad (1.2-5)$$

kde	P_{j2}	Joulovy ztráty v rotoru	[W]
	m	počet fází rotorového vinutí	[-]
	I_2'	proud procházející rotorovým vinutím	[A]
	R'_2	činný odpor rotorového vinutí	[Ω]

V případě řízení přes činné odpory, je R'_2 , součtem činného odporu vinutí a činného odporu regulačních odporů.

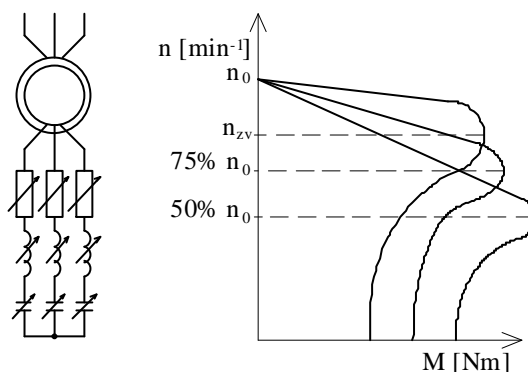
S použitím výkonových polovodičových součástek lze část tohoto ztrátového výkonu vrátit zpět do sítě. Další výhodou polovodičových součástek je, že se výrazně zlepší účinnost stroje při použití této regulace. Jde o hospodárnější způsob regulace skluzem. Musí se použít měnič frekvence, který umožňuje rekuperaci tj. frekvenční měniče s řízenými tyristorovými usměrňovači, protože kmitočet napájecí sítě je odlišný s frekvencí proudu rotoru.

1.2.2 Regulace otáček sériově ke kotvě připojeným RLC obvodem

Ke každé fázi rotorového vinutí se připojí navíc k odporům ještě do série cívka a kondenzátor. Rozdíl oproti řízení otáček pomocí rotorových odporů se bude měnit jak sklon, tak i moment zvratu motoru, otáčky naprázdno se nezmění. Využívá se tzv. sériové rezonanční frekvence, která je dána Thomsonovým vzorcem:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1.2-6)$$

kde	f_0	rezonanční frekvence	[Hz]
	L	indukčnost cívky	[H]
	C	kapacita kondenzátoru	[F]



Obr. 1-7.: Schéma zapojení a momentová charakteristika motoru se sériovým RLC obvodem kotvy, obrázek použit z [2]

1.3 Změna frekvence

Jde o nepoužívanější a nejchopitelnější plynulou regulaci otáček ve velkém rozsahu. Při této metodě se mění kmitočet napájecího napětí. Ke změně napájecí frekvence je tedy nutné měniče frekvence. S rozvojem výkonové elektroniky lze plynule regulovat frekvenci od jednotek Hz až do stovek Hz. Výstupní napětí měniče frekvence, ale není sinusové, obsahuje totiž vyšší harmonické složky ve výstupním napětí. Tento fakt vede k vyšším přídavným ztrátám a namáhání izolace vinutí.

Aby se zachovalo celkové využití stroje, musíme udržovat konstantní spřažený magnetický tok statoru ($\psi = \text{konstanta}$). Z rovnice pro indukované napětí asynchronního stroje, které je dáno vztahem:

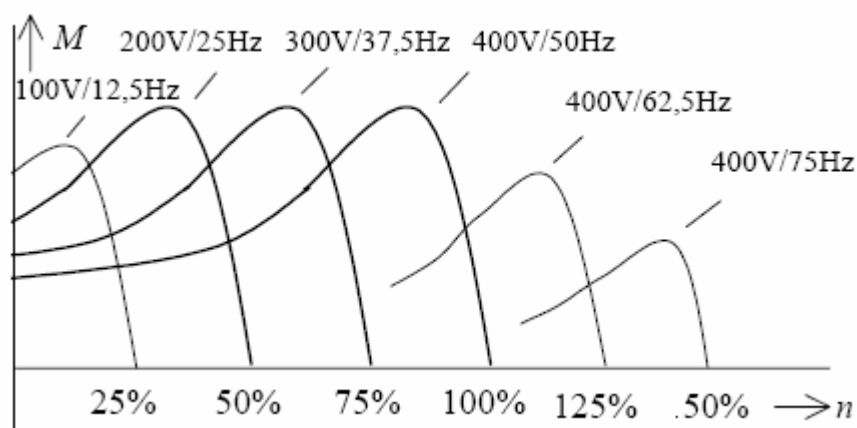
$$U_i = 4,44 \cdot N \cdot f \cdot \phi \cdot k_v = 4,44 \cdot \psi \cdot f \cdot k_v \quad (1.3-1)$$

kde	U_i	indukované napětí do rotorového vinutí	[V]
	N	počet závitů	[-]
	Φ	magnetický tok	[Wb]
	Ψ	spřažený magnetický tok	[Wb]
	k_v	činitel vinutí	[-]

vyjádříme-li Ψ :

$$\Psi = \frac{U_i}{4,44 \cdot f \cdot k_v} \quad (1.3-2)$$

Z tohoto vztahu je vidět, že magnetický tok Ψ , je přímo úměrný napětí a nepřímo úměrný frekvenci. Proto, abychom udrželi konstantní magnetický tok, musíme se snižováním frekvence snižovat i amplitudu napájecího napětí, aby byl zachován maximální moment motoru. Toto platí pouze pro snižování frekvence napájecího napětí, které je u nás $f = 50$ Hz. Pro zvyšování frekvence tj. nad 50 Hz se už napětí nezvyšuje, jelikož stroje jsou dimenzovány na jmenovité napětí. Takže by se zvyšováním napětí mohlo dojít k přeskoku napětí přes izolaci a zkratu. Takže se zvyšováním frekvence nad jmenovitou hodnotu, už nezachováváme konstantní magnetický tok Ψ , a zmenšujeme jej. Tím dochází k odbuzování stroje a klesá tedy i jeho moment.



Obr. 1-8.: Momentová charakteristika při řízení změnou kmitočtu, obrázek použit [7]

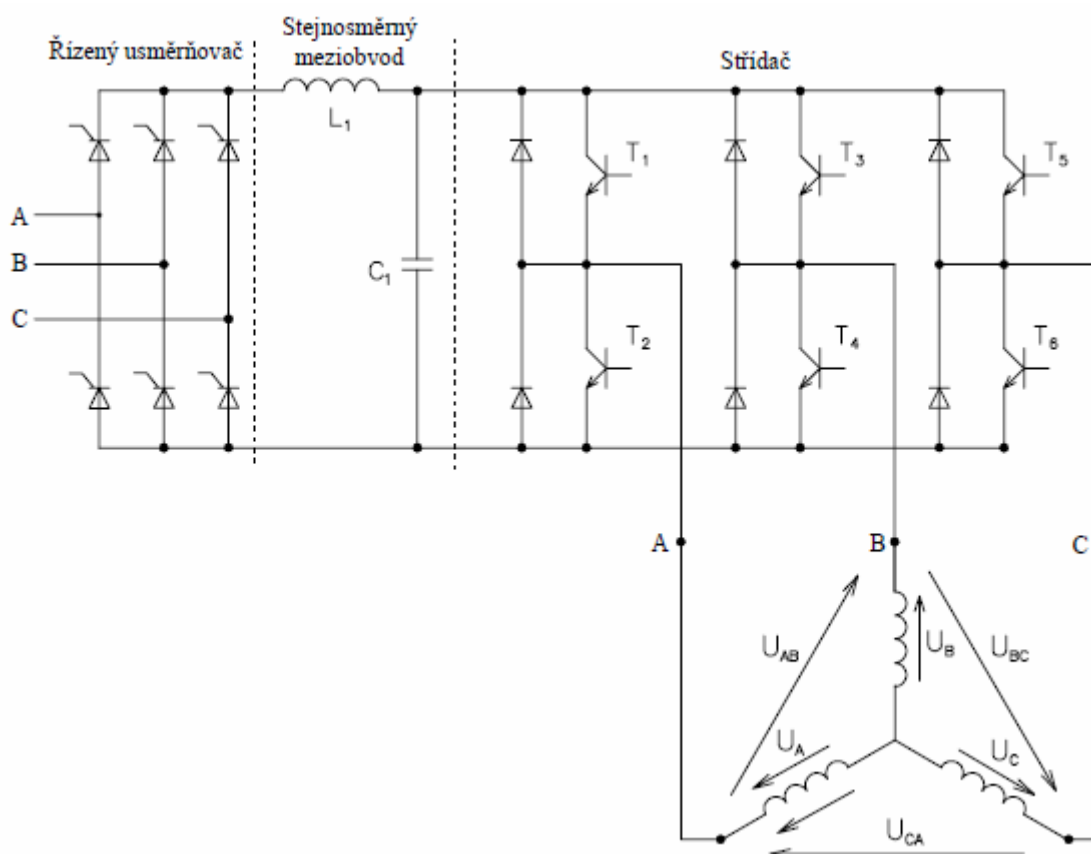
1.3.1 Měníče kmitočtu

Měníče kmitočtu slouží ke změně střídavého napětí či proudu s rozdílným kmitočtem na vstupu a výstupu. Slouží jednak pro plynulou regulaci, tak i pro rozběh motorů velkých výkonů, u kterých v zapojení s měničem nedojde k proudovým nárazům v napájecí síti.

Měníče kmitočtu dělíme podle počtu fází na jednofázové, trojfázové a m-fázové, tak i na přímé či nepřímé měniče kmitočtu.

1.3.2 Nepřímé měniče kmitočtu

Nepřímé měniče kmitočtu se skládají ze tří částí tj. vstupní usměrňovač, stejnosměrný meziobvod a výstupní střídač jak je vidět na (obr. 1-8).

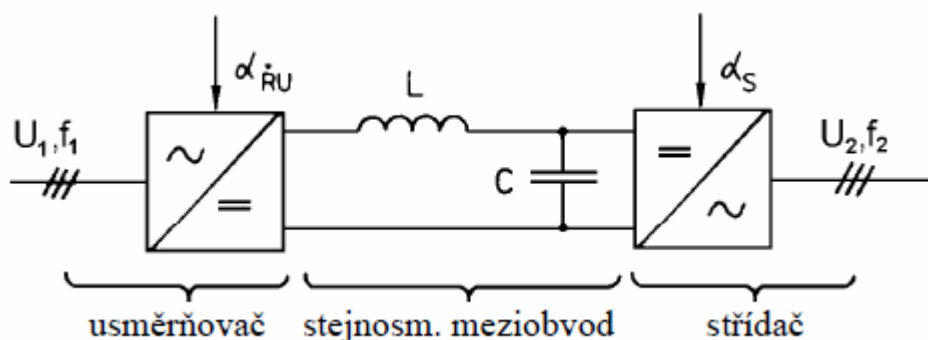


Obr. 1-8.: Nepřímý měnič kmitočtu s řízeným usměrňovačem a napět'ovým meziobvodem, obrázek použit [8]

Usměrňovací část měniče usměrňuje sinusové napětí a proud na stejnosměrnou hodnotu, může být složen z diod jako neřízený usměrňovač, bez možnosti rekuperace u motoru v generátorickém režimu, nebo z tyristorů jako řízený usměrňovač s možností rekuperace, například při brzdění asynchronního stroje.

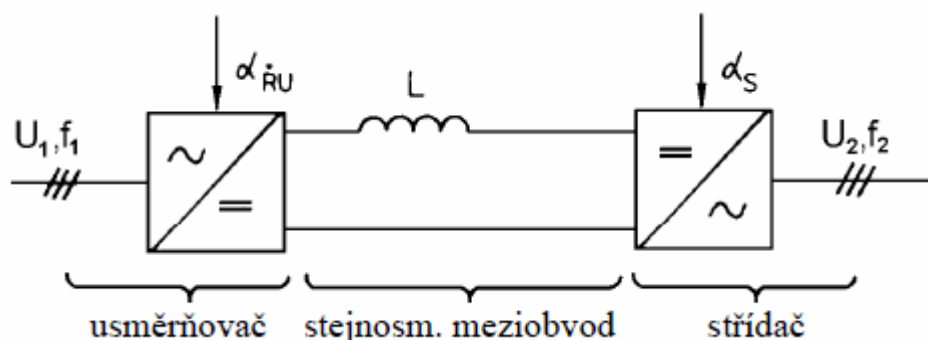
Měníče s napět'ovým meziobvodem jsou v dnešní době nejpoužívanějšími měniči frekvence. Stejnoseměrný meziobvod je tvořen vysokokapacitním filtračním kondenzátorem v příčné větvi a tlumivkou v podélné větvi meziobvodu, jak je vidět na (obr. 1-9.). Kondenzátor slouží k filtraci výstupního napětí usměrňovače a zajišťuje napět'ový charakter

zdroje pro střídač. Tlumivka slouží k omezení proudu při přechodných dějích, dále k oddělení výstupního napětí usměrňovače od vyhlazeného napětí kondenzátorem, neboli zachycuje střídavou složku napětí.



Obr. 1-9.: Blokové schéma měniče frekvence s napěťovým meziobvodem, obrázek použit [8]

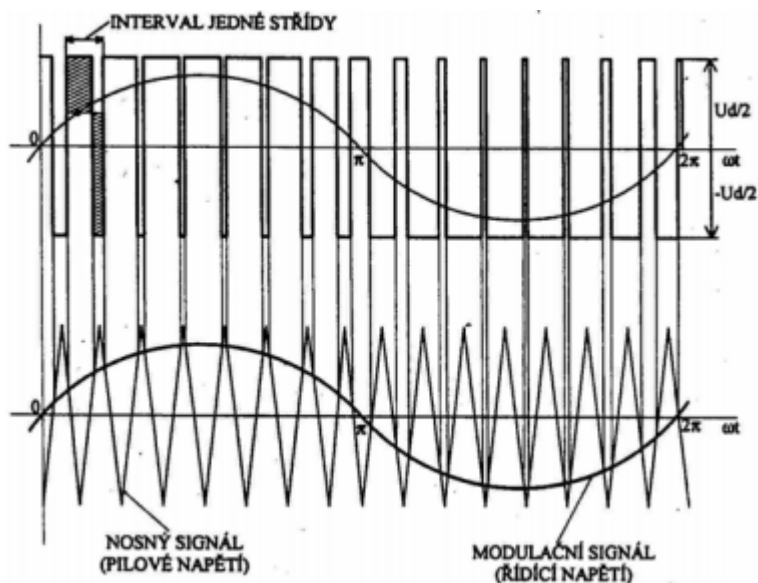
Měniče s proudovým meziobvodem má pouze podélnou větev s vyhlazovací tlumivkou u stejnosměrného meziobvodu, která zajišťuje proudový charakter, tudíž pro střídač pracuje jako proudový zdroj, který není závislý na připojené zátěži motoru. Měniče s proudovým meziobvodem se v dnešní době již moc nepoužívají, spíše dožívají pouze u motorů s velkými výkony, vzhledem k velkým přepětím.



Obr. 1-10.: Blokové schéma měniče frekvence s proudovým meziobvodem, obrázek použit [8]

Výstupní střídač řídí výstupní velikost frekvence a napětí změnou rychlosti spínání a vypínání tzv. vypínatelných součástek. Nejpoužívanější vypínatelné součástky pro střídač jsou bipolární IGBT tranzistory s izolovanou řídicí elektrodou, které spínají a rozpínají pouze napěťovým signálem, díky tomu lze dosáhnout krátkých spínacích časů a tím i vysoké spínací frekvence. Aby se udržel stálý moment zvratu, tím i stálý magnetický tok Φ , musí se tedy měnit nejen frekvence, ale i výstupní napětí střídače jak je vidět u vztahu (1.3-2). Stálý magnetický lze dosáhnout například Pulsně-šířkovou modulací (PWM).

Modulace PWM je vlastně koincidence nosného signálu s modulačním signálem. Nosný signál má vysokou frekvenci a průběh je nejčastěji pilový, modulační signál je střídavý nízkofrekvenční, jak je znázorněno na obrázku.

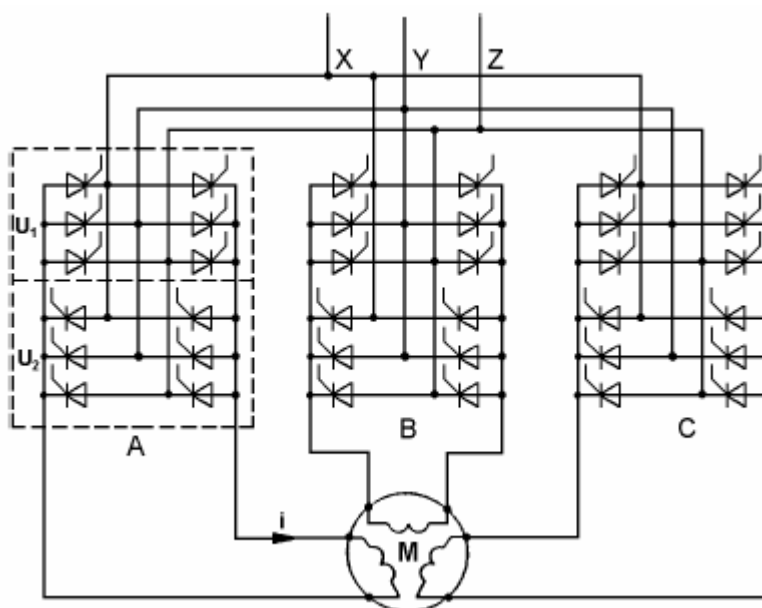


Obr. 1-11.: Princip PWM, obrázek použit [8]

V případě koincidence neboli rovnosti nosného a modulačního signálu, dochází k přepínání zapínacích pulsů mezi součástkami. Měníme-li kmitočet modulačního signálu, tím měníme i kmitočet výstupního napětí a se změnou amplitudy modulačního signálu se mění i velikost výstupního napětí měniče.

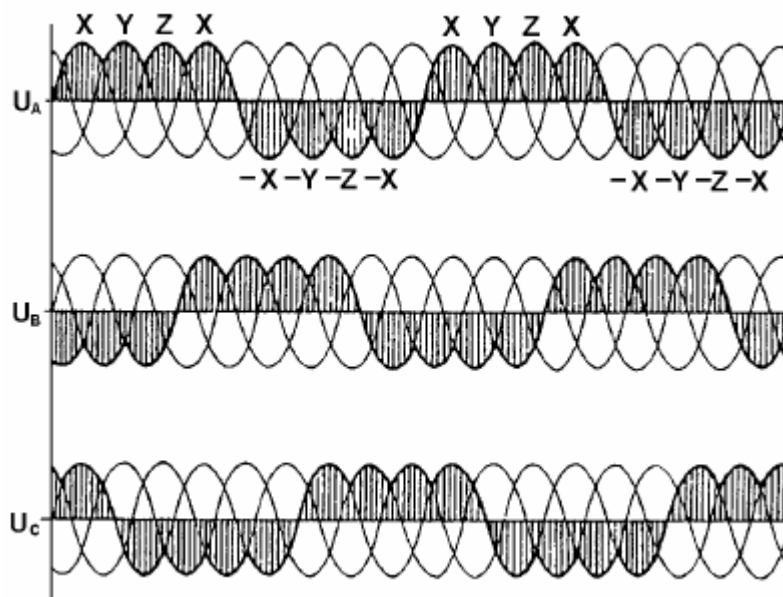
1.3.3 Přímé měniče kmitočtu – cyklokonvertory

Cyklokonvertory oproti nepřímým měničům, jsou měniče s přirozenou komutací, nemají stejnosměrný meziobvod a přepínání tyristorů zajišťuje střídavá napájecí síť. V dnešní době se již moc nevyužívají, jen pro motory s velkými výkony. Vysoce nákladné, na realizaci je zapotřebí 36 tyristorů (na každou fázi připadá 12 tyristorů).



obr. 1-12.: Schéma zapojení cyklokonvertoru, obrázek použit [8]

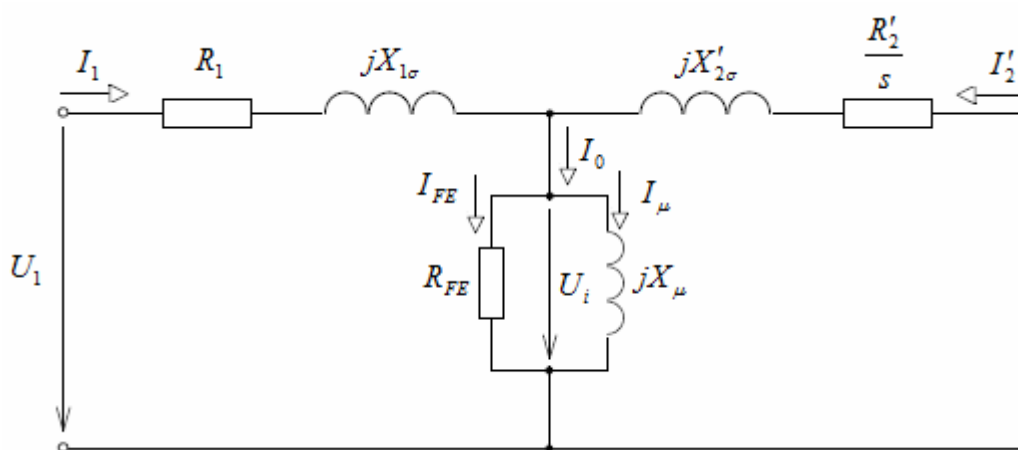
Schéma zapojení se podobá trojfázovému plně řízenému usměrňovači s reverzací (tzv. čtyřkvadrantový usměrňovač). Tím jak se mění řídicí úhel se mění i polarita výstupního napětí měniče. Usměrňovač usměrní pouze pár period napájecího napětí, ale s nižší frekvencí. Výstupní frekvence lze tedy jen snižovat jak je vidět i na průběhu (obr.)



Obr. 1-13.: Výstupní střídavé napětí cyklokonvertoru, obrázek použit [8]

2 Vliv R, L ve vinutí rotoru asynchronního motoru s kroužkovou kotvou

U výpočtu parametrů v rotorovém vinutí vycházíme z náhradního schématu asynchronního stroje (obr. 2-1.), kde odpory R_1 a R'_2 představují Joulovy ztráty ve vinutí statoru a rotoru, reaktance $jX_{1\sigma}$ a $jX'_{2\sigma}$ jsou induktivní reaktance vinutí s indukčnostmi $L_{1\sigma}$ a $L'_{2\sigma}$. Příčné parametry ve schématu představují Joulovy ztráty (R_{FE}) a reaktanci (jX_μ) v magnetickém jádře.

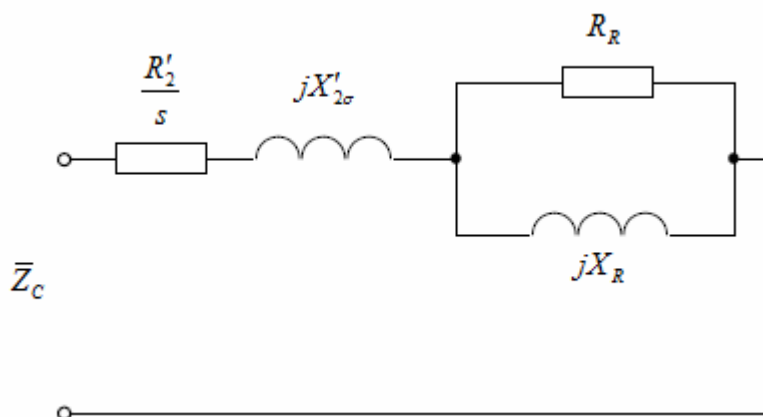


Obr. 2.1.: Náhradní schéma asynchronního stroje ve tvaru „T“ článku

R_1	činný odpor ve vinutí statoru	$[\Omega]$
$jX_{1\sigma}$	reaktance vinutí statoru	$[\Omega]$
R'_2	činný odpor rotorového vinutí	$[\Omega]$
$jX'_{2\sigma}$	reaktance vinutí rotoru	$[\Omega]$
R_{FE}	činný odpor železa	$[\Omega]$
jX_μ	reaktance železa	$[\Omega]$

2.1 Určení parametrů zátěže

Pro jednoduchost výpočtu jsme zanedbali vliv statorového vinutí a magnetizačního proudu I_μ . Tímto zjednodušením vznikají určité nepřesnosti, které ale lze zanedbat. Dále počítáme obvod v ustáleném stavu, neboli nevyšetřujeme přechodné jevy jenž v obvodu mohou nastat. Impedance Z_R ve schématu představuje z elektrického hlediska zátěž s odporem R_R a reaktancí jX_R , zátěž jsme v tomto případě volily paralelní kombinaci R, L . Impedance Z_C je potom součtem parametrů vinutí kotvy se zátěží Z_R jak je na (obr. 2-2.)

obr. 2-2.: Zjednodušené náhradní schéma kotvy s R, L paralelní zátěží.

2.1.1 Určení impedance Z_R

Nejprve si určíme celkovou impedanci zátěže Z_R , která je paralelní kombinací R, L . Pro paralelní sčítání impedancí v ustáleném stavu (pomocí SKM – symbolicko komplexní metoda) platí vztah:

$$\bar{Z} = \frac{\bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_2}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2} \quad (2.1-1)$$

Do vztahu (2.1-1) dosadíme parametry zátěže (R_R a jX_R), potom po dosazení nám vyjde:

$$\bar{Z}_R = \frac{R_R \cdot jX_R}{R_R + jX_R} \quad (2.1-2)$$

Abychom mohli s výrazem dále počítat, musíme si vyjádřit reálnou a imaginární část, po úpravách výrazu (2.1-2) nám vyjde:

$$\begin{aligned} \bar{Z}_R &= \frac{jR_R X_R}{R_R + jX_R} = \frac{jR_R X_R}{R_R + jX_R} \cdot \frac{R_R - jX_R}{R_R - jX_R} = \frac{jR_R^2 X_R + X_R^2 R_R}{R_R^2 + X_R^2} = \frac{R_R X_R^2}{R_R^2 + X_R^2} + j \frac{R_R^2 X_R}{R_R^2 + X_R^2} \\ \bar{Z}_R &= \frac{R_R \cdot X_R^2}{R_R^2 + X_R^2} + j \frac{R_R^2 \cdot X_R}{R_R^2 + X_R^2} \end{aligned} \quad (2.1-3)$$

Abychom počítali s odpory (R) a indukčnostmi (L), dosadíme za induktivní reaktanci vztah (2.1-4), která obsahuje informaci o skluzu, frekvenci a indukčnosti:

$$X_R = s \cdot \omega_1 \cdot L_R \quad (2.1-4)$$

Po dosazení:

$$\bar{Z}_R = \frac{R_R s^2 \omega_1^2 L_R^2}{R_R^2 + s^2 \omega_1^2 L_R^2} + j \frac{R_R^2 s \omega_1 L_R}{R_R^2 + s^2 \omega_1^2 L_R^2} \quad (2.1-5)$$

Impedance u vztahu (2.1-5) obsahuje jak velikost tak i úhel (směr), jenž impedance Z_R svírá s reálnou a imaginární osou. Pro znázornění do grafu potřebujeme znát velikost Z_R , tu vypočítáme pomocí Pythagorovy věty pro pravoúhlý trojúhelník:

$$Z_R = \sqrt{(\operatorname{Re}\{\bar{Z}_R\})^2 + (\operatorname{Im}\{\bar{Z}_R\})^2} \quad (2.1-6)$$

Potom velikost impedance zátěže Z_R je:

$$Z_R = \sqrt{\left(\frac{R_R s^2 \omega_1^2 L_R^2}{R_R^2 + s^2 \omega_1^2 L_R^2}\right)^2 + \left(\frac{R_R^2 s \omega_1 L_R}{R_R^2 + s^2 \omega_1^2 L_R^2}\right)^2} \quad (2.1-7)$$

2.1.2 Určení impedance Z_C

Celková impedance kotvy je součtem parametrů vinutí kotvy s parametry zátěže, tj.:

$$\bar{Z}_C = \frac{R_R X_R^2}{R_R^2 + X_R^2} + j \frac{R_R^2 X_R}{R_R^2 + X_R^2} + \frac{R'_2}{s} + j X'_{2\sigma} = \left[\frac{R_R X_R^2}{R_R^2 + X_R^2} + \frac{R'_2}{s} \right] + j \left[\frac{R_R^2 X_R}{R_R^2 + X_R^2} + X'_{2\sigma} \right]$$

$$\bar{Z}_C = \left(\frac{R_R s^2 \omega_1^2 L_R^2}{R_R^2 + s^2 \omega_1^2 L_R^2} + \frac{R'_2}{s} \right) + j \left(\frac{R_R^2 s \omega_1 L_R}{R_R^2 + s^2 \omega_1^2 L_R^2} + X'_{2\sigma} \right) \quad (2.1-8)$$

Velikost impedance Z_C je potom:

$$Z_C = \sqrt{\left(\frac{R_R s^2 \omega_1^2 L_R^2}{R_R^2 + s^2 \omega_1^2 L_R^2} + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + \left(\frac{R_R^2 s \omega_1 L_R}{R_R^2 + s^2 \omega_1^2 L_R^2} + X'_{2\sigma}\right)^2} \quad (2.1-9)$$

2.2 Příklad vlivu zátěže ve vinutí kotvy

Zadané hodnoty: pro $s = 1$

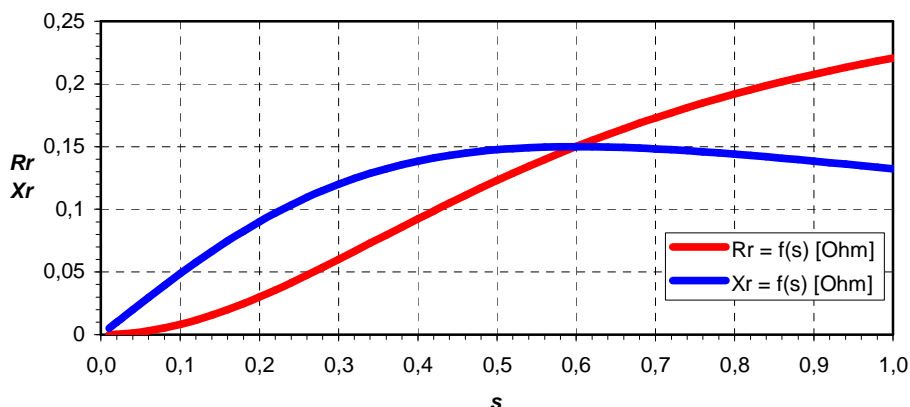
R'_2	[Ω]	0,027
X'_2	[Ω]	0,063
R_R	[Ω]	0,3
X_R	[Ω]	0,5
f_1	[Hz]	50

Indukčnost zátěže je:

$$L_R = \frac{X_R}{\omega_1 \cdot s} = \frac{0,5}{314,15} = 1,6 \text{ [mH]} \quad (3.2-1)$$

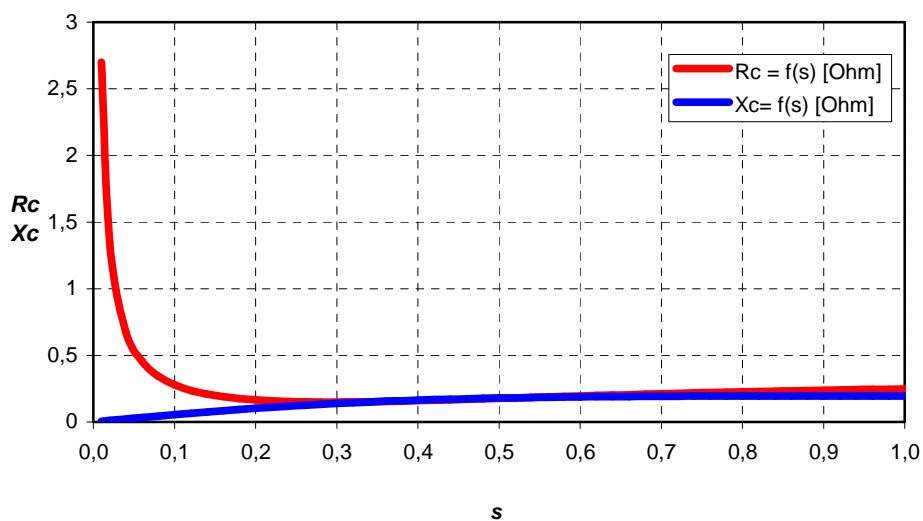
$$\text{kde } \omega_1 = 2\pi \cdot f_1 = 2\pi \cdot 50 = 314,15 \text{ [rad/s]} \quad (3.2-2)$$

Dosadíme-li potom do rovnic pro impedance (2.1-7) a (2.1-9). A vytvoříme grafy v závislosti impedance na skluzu.



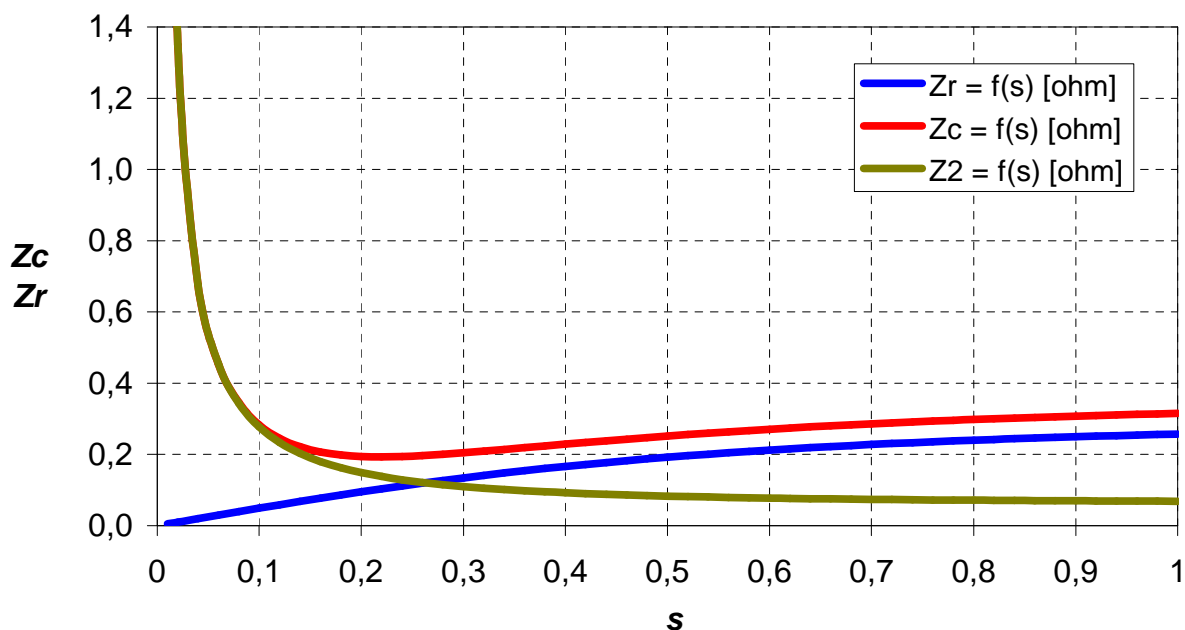
Obr. 2-3.: Graf odporu (R_R) a reaktance (X_R) zátěže v závislosti na skluzu

Na grafu (obr. 2-3.) je vidět závislost odporu a reaktance zátěže na skluzu. Odpor zátěže R_R zprvu nabývá pozvolna a převládá reaktance zátěže X_R , až do hodnoty kdy skluz nabývá hodnoty $s = 0,6$. Od této hodnoty skluzu začne razantně převládat činná složka, která stále roste a naopak reaktance mírně klesá.



Obr. 2-4.: Graf odporu (R_C) a reaktance (X_C) kotvy v závislosti na skluzu

Na grafu (obr. 2-3.) se závislostí celkového odporu a reaktance na skluzu je vidět, že do hodnoty skluzu $s = 0,1$ je reaktance X_C oproti odporu R_R téměř zanedbatelná, od hodnoty skluzu $s = 0,3$ se reaktance s odporem téměř se rovnají.



Obr. 2-5.: Graf impedancí ($Z'_{2\sigma}$, Z_C a Z_R) kotvy v závislosti na skluzu

Graf (obr. 2-5) ukazuje závislost impedancí $Z'_{2\sigma}$, Z_C a Z_R na skluzu. Impedance zátěže Z_R téměř neovlivní celkovou impedanci Z_C do hodnoty skluzu $s = 0,2$. Od hodnoty skluzu $s = 0,25$ začne zátěž převládat nad impedancí vinutí $Z'_{2\sigma}$ a celková impedance je potom součtem impedancí zátěže a vinutí.

Tedy se zvětšením velikosti zátěže se mění i skluz stroje a tím i frekvence proudu, který prochází rotorovým vinutím.

3 Řízení pohonů odstředivých čerpadel napájených měničem frekvence

Regulace odstředivých čerpadel je nejehospodárnější s použitím měniče frekvence, oproti např. regulací škrcením jež přináší vysoké energetické ztráty. Se změnou otáček se mění nejen objem, ale také tlak v čerpadle. Tím je rozsah řízení omezen, aby byli dodrženy minimální tlakové poměry v čerpadle.

3.1 Základní vztahy a parametry čerpadel

Měrná energie – Y [J/kg]

Mezi důležité štitkové hodnoty čerpadla patří hmotnostní energie, tento údaj se zjišťuje měřeními a znázorňuje potřebnou energii pro přečerpání jednoho kilogramu kapaliny při daných podmínkách. Místo hmotnostní energie se také někdy uvádí měrná energie.

$$Y = \frac{p_{2v} - p_{1s}}{\rho} + g\Delta H + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} \quad (3.1-1)$$

kde	Y	hmotnostní energie čerpadla	[J/kg]
	$p_{2v}; p_{1s}$	tlaky v sacím a výtlačném hrdle	[Pa]
	ρ	hustota kapaliny	[kg/m ³]
	ΔH	výškový rozdíl	[m]
	$c_1; c_2$	rychlosti v sacím a výtlačném hrdle	[m/s]
	$g\Delta H$	rozdíly potenciálních energií	
	$\frac{c_2^2 - c_1^2}{2}$	rozdíly kinetických energií	

Mezi sacím a výtlačným hrdlem, lze rozdíly potenciálních a kinetických energií zanedbat, a zjednodušit hmotnostní energii na:

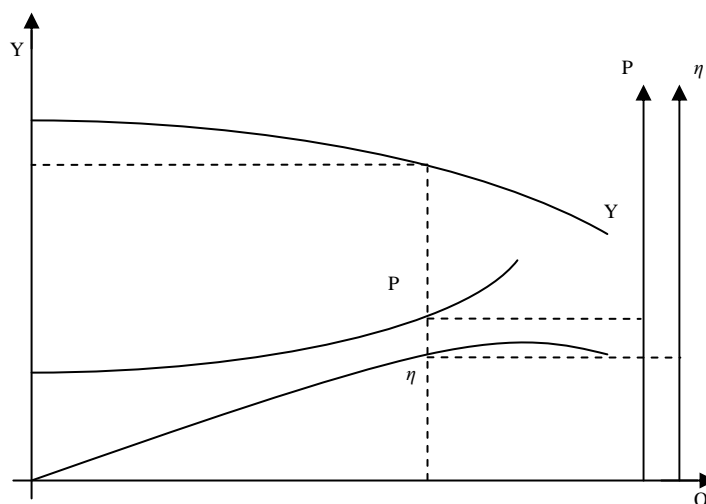
$$Y \approx \frac{p_{2v} - p_{1s}}{\rho} \quad (3.1-2)$$

Průtok – Q [m³/s]

Průtok je množství objemu kapaliny dodávané čerpadlem ze sacího do výtlačného hrdla za jednotku času.

Charakteristika čerpadla

Charakteristika čerpadla je závislost měrné energie Y , účinnosti η , příkonu P na objemovém průtoku Q při konstantních otáčkách. Charakteristika se zjišťuje experimentálním měřením na zkoušeném čerpadle. Na (obr. 3-2.) je vidět, že při nulovém průtoku je i nejmenší příkon čerpadla, proto se čerpadlo spouští s uzavřeným výtlaku.



Obr. 3-2.: Charakteristika čerpadla

Příkon čerpadla – P [W]

Je to mechanický výkon přenesený na hřídel čerpadla z motoru. Zmenšený o mechanické ztráty v převodu.

$$P = \frac{Q \cdot \rho \cdot Y}{\eta} \quad (3.1-3)$$

kde	Q	průtok čerpadla	[m ³ /s]
	ρ	hustota kapaliny	[kg/m ³]
	Y	měrná energie	[J/kg]
	η	účinnost čerpadla	[-]

Hydraulické ztráty v potrubí – h_s [m]

Ztráty vlivem třecí síly v potrubí a na hydraulických odporech. Jsou úměrné kvadrátu rychlosti průtoku. Při konstantním průřezu potrubí, průtok dán vztahem (3.1-5). Tedy hydraulické ztráty rostou s kvadrátem průtoku.

$$h_s = f(c^2) \quad (3.1-4)$$

$$Q = S \cdot c = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot c}{4} \quad (3.1-5)$$

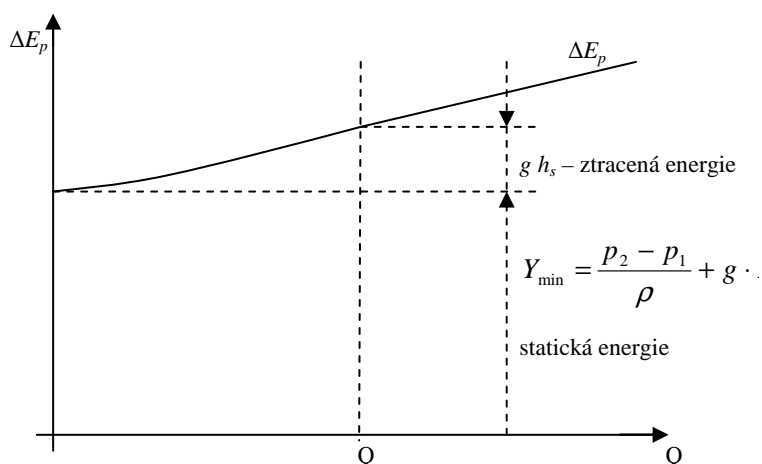
kde	S	vnitřní průřez potrubí	$[\text{m}^2]$
	c	rychlost kapaliny v potrubí	$[\text{m/s}]$
	d	vnitřní průměr potrubí	$[\text{m}]$

Charakteristika potrubí - ΔE_p [J/kg]

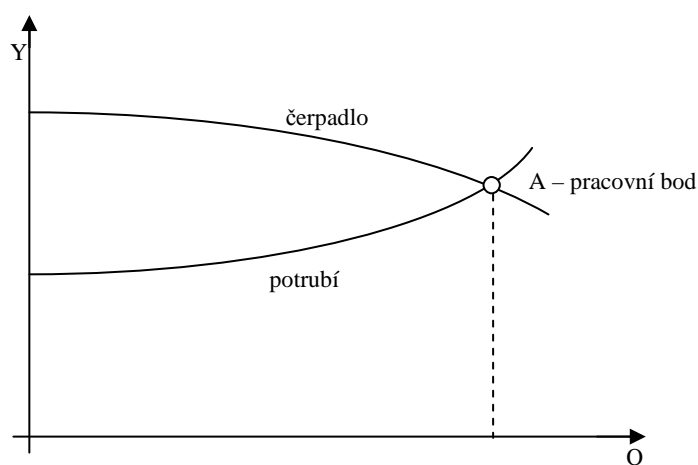
Charakteristika potrubí je závislost hydraulických ztrát h_s na průtoku Q . Mezi sací a výtlačnou stranou je rozdíl potenciálních a tlakových energií, jejich součet se nazývá statická energie, která posouvá svislou osu. Rovnice charakteristiky potrubí je:

$$\Delta E_p = \frac{P_2 - P_1}{\rho} + g(H + h_s) \quad (3.1-6)$$

Z rovnice je vidět, že na průtoku Q je závislé pouze hydraulické ztráty, které rostou s kvadrátem změny průtoku (křivkou charakteristiky je parabola).



Obr. 3-3.: Charakteristika potrubí



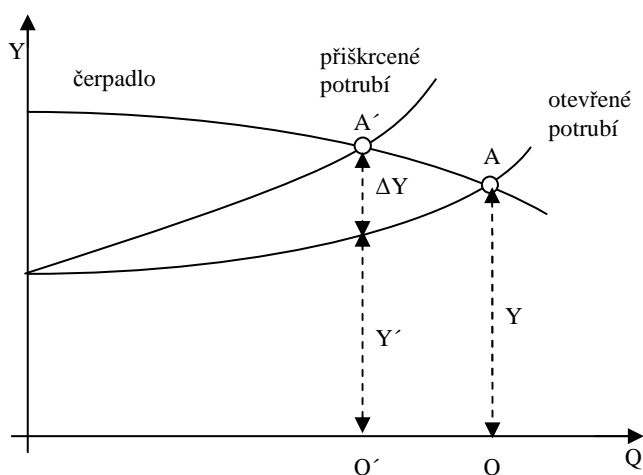
Obr.3-4: Pracovní bod A

3.2 Regulace průtoku

Regulaci můžeme provádět dvěma způsoby, buďto přímo na čerpadle, za pomoci měniče frekvence, nebo natáčením oběžných a rozváděcích lopatek. Změnu průtoku můžeme dále měnit na potrubí, škrcením potrubí, nebo obtokem. Mezi nejpoužívanější regulace patří čerpadlo s měničem frekvence, pro svoji hospodárnost. Oproti regulaci škrcením, u kterého vznikají vysoké energetické ztráty.

3.2.1 Regulace škrcením

Při regulaci průtoku škrcením snížíme průtok z Q na Q' , tím se posune i pracovní bod z A na A' jak je vidět na (obr. 3-3.). Přiškrcení se provádí posouvačem ve výtlačném potrubí, který potom představuje odpor pro proudící kapalinu v potrubí.



obr. 3-5.: Charakteristika potrubí při regulaci škrcením

Pracuje je-li čerpadlo v pracovním bodě A s měrnou energií Y a s příkonem P , který je dán podle vztahu (3.1-3).

$$P = \frac{Q \cdot \rho \cdot Y}{\eta}$$

Potom při stavu přiškrcení platí:

$$P' = \frac{Q' \cdot \rho \cdot (Y' + \Delta Y)}{\eta'} \quad (3.2-1)$$

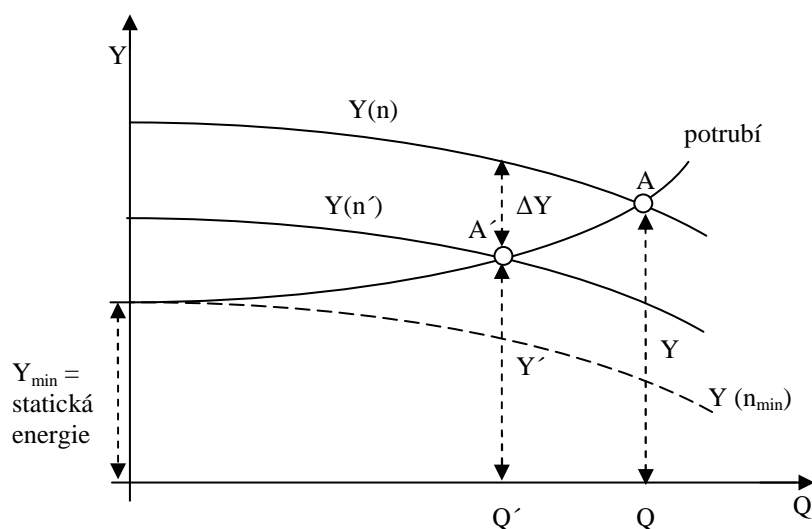
kde	P'	příkon čerpadla po přiškrcení	[W]
	Q'	průtok čerpadla po přiškrcení	[m ³ /s]
	η'	účinnost čerpadla po přiškrcení	[-]
	Y'	měrná energie čerpadla po přiškrcení	[J/kg]
	ΔY	ztráty měrná energie při škrcení	[J/kg]

Čerpadlo ve skutečnosti pracuje pouze s měrnou hmotností Y' , potom pro příkon platí vztah (3.2-2). Měrná hmotnost ΔY představuje ztráty při regulaci škrcením a potom ztrátový výkon je dán vztahem (3.2-3). Nevýhodou této regulace jsou vysoké ztráty výkonu v potrubí.

$$P'_{ef} = \frac{Q' \cdot \rho \cdot Y'}{\eta'} \quad (3.2-2)$$

$$\Delta P = \frac{Q' \cdot \rho \cdot \Delta Y}{\eta'} \quad (3.2-3)$$

3.2.2 Regulace s měničem frekvence



Obr. 3-6.: Charakteristika čerpadla při regulaci měničem frekvence

Pro regulaci průtoku, s použitím měniče frekvence přináší značný ekonomický přínos, oproti regulace škrcením. Při snížení otáček čerpadla z n na n' , klesne charakteristika čerpadla z Y na Y' . Regulace je omezena statickou energií Y_{min} . Na potrubí nemá změna vliv a charakteristika potrubí bude zachována. Pracovní bod přejde z A do A' . Obecně platí vztahy mezi průtoky (3.2-1), mezi měrnými energiemi (3.2-2), mezi výkony (3.2-3).

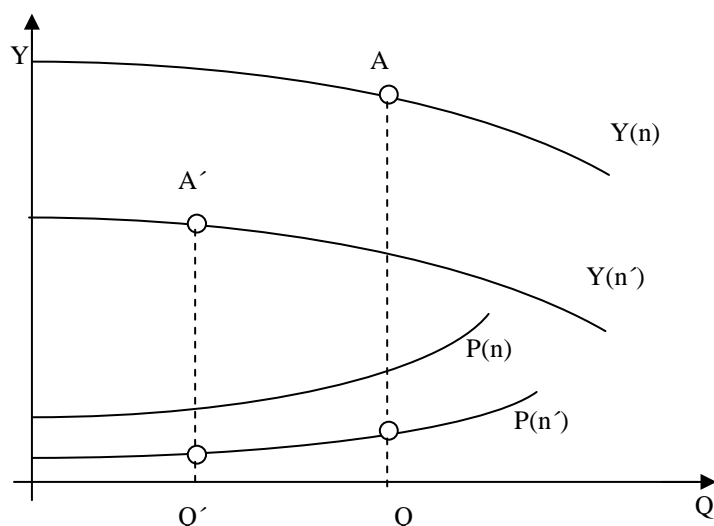
$$\frac{Q}{Q'} = \frac{n}{n'} \quad (3.2-1)$$

$$\frac{Y}{Y'} = \left(\frac{n}{n'}\right)^2 \quad (3.2-2)$$

$$\frac{P}{P'} = \left(\frac{n}{n'}\right)^3 \quad (3.2-3)$$

Tyto vztahy platí pokud je konstantní účinnost, na (obr. 3-2.) je vidět, že tím jak regulujeme průtok, tím se mění i účinnost čerpadla . Pro účinnost čerpadla při změně otáček potom platí vztah (3.2-4).

$$\eta' = 1 - (1 - \eta) \cdot \left(\frac{Y}{Y'}\right)^{0,1} = 1 - (1 - \eta) \cdot \left(\frac{n}{n'}\right)^{0,2} \quad (3.2-4)$$



Obr. 3-7.: Charakteristika čerpadla při změně otáček z n na n'

Při regulaci měničem frekvence je důležité vědět o jaký rozsah můžeme měnit otáčky, jelikož měrná energie nemůže klesnout pod Y_{min} . Tento fakt vyplývá z (obr. 3-6.) a minimální otáčky n_{min} čerpadla se dají určit ze vztahu (3.2-2), potom tedy platí:

$$n_{min} = n \cdot \frac{Y_{min}}{Y} \quad (3.2-4)$$

kde	n_{min}	minimální otáčky hřídele čerpadla	[ot./min.]
	n	jm. otáčky čerpadla	[ot./min.]
	Y_{min}	minimální měrná energie čerpadla (na překonání statické energie)	[J/kg]
	Y	jm. měrná energie čerpadla	[J/kg]

Afinní parabola čerpadla

Je křivka, kdy při různých otáčkách čerpadla má čerpadlo stejnou účinnost.

3.2.3 Příklad regulace čerpadla s měničem frekvence

Čerpadlo pracovalo při otáčkách $n_1 = 24,6$ [ot/s], při těchto otáčkách byla naměřena jeho charakteristika. Určete pravděpodobný průběh charakteristiky na základě hydrodynamické podobnosti pro otáčky $n_2 = 16$ [ot/s] a $n_3 = 30$ [ot/s]. Sestrojte afinní parabolu, aby procházela bodem s parametry $Q = 0,09$ [m³/s] a $Y = 2280$ [J/kg]. Doprovodní kapalinou je voda. Výstupní průměr oběžného kola je $D_2 = 460$ [mm]. [9]

Zadaná data: $n_1 = 24,6$ [ot/s]
 $n_2 = 16$ [ot/s]
 $n_3 = 30$ [ot/s]
 $Q = 0,09$ [m³/s]
 $Y = 2280$ [J/kg]
 $D_2 = 460$ [mm]
 $\nu = 1 \cdot 10^{-6}$ [m²/s]
 $\rho = 1000$ [kg/m³]

řešení:

Q [m ³ /s]	Y [J/kg]	P [kW]	η [%]	ΔY [J/kg]
0,000	2370	230	0	
0,045	2310	285	36	22
0,090	2280	340	60	36
0,135	2180	395	74	52
0,180	1990	447	77	72
0,200	1830	470	76	

tab. 3.1.: Charakteristika čerpadla při otáčkách $n_1 = 24,6$ [ot/s]

Pro různé otáčky čerpadla platí vztahy (3.2-1); (3.2-2); (3.2-3). Dosadíme-li do těchto vztahů tak:

$n_2 = 16$ [ot/s]

$$Q_{16} = Q_{24,6} \cdot \frac{n_2}{n_1} = 0,09 \cdot \frac{16}{24,6} = 0,059 \text{ [m}^3\text{/s]} \quad (3.3-1)$$

$$Y_{16} = Y_{24,6} \cdot \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 = 2280 \cdot \left(\frac{16}{24,6}\right)^2 = 964,5 \text{ [J/kg]} \quad (3.3-2)$$

$$P_{16} = P_{24,6} \cdot \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3 = 340 \cdot \left(\frac{16}{24,6}\right)^3 = 93,5 \text{ [kW]} \quad (3.3-3)$$

$$\Delta Y_{16} = \Delta Y_{24,6} \cdot \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 = 36 \cdot \left(\frac{16}{24,6}\right)^2 = 15 \text{ [J/kg]} \quad (3.3-4)$$

$$n_3 = 30 \text{ [ot/s]}$$

$$Q_{30} = Q_{24,6} \cdot \frac{n_3}{n_1} = 0,09 \cdot \frac{30}{24,6} = 0,11 \text{ [m}^3\text{/s]} \quad (3.3-5)$$

$$Y_{30} = Y_{24,6} \cdot \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 = 2280 \cdot \left(\frac{30}{24,6}\right)^2 = 3390,8 \text{ [J/kg]} \quad (3.3-6)$$

$$P_{30} = P_{24,6} \cdot \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3 = 340 \cdot \left(\frac{30}{24,6}\right)^3 = 616,6 \text{ [kW]} \quad (3.3-7)$$

$$\Delta Y_{30} = \Delta Y_{24,6} \cdot \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 = 36 \cdot \left(\frac{30}{24,6}\right)^2 = 54 \text{ [J/kg]} \quad (3.3-8)$$

Tedy tyto hodnoty platí pro stejnou účinnost, v tomto případě pro $\eta = 60$ [%]. Po přepočtu všech hodnot potom sestavíme charakteristiky čerpadla pro n_2 a n_3 .

Q [m ³ /s]	Y [J/kg]	P [kW]	η [%]	ΔY [J/kg]
0,000	1002,6	63,3	0	
0,029	977,2	78,4	36	9
0,059	964,5	93,5	60	15
0,088	922,2	108,7	74	22
0,117	841,8	123,0	77	30
0,130	774,1	129,3	76	

tab. 3.2.: Charakteristika čerpadla při otáčkách $n_2 = 16$ [ot/s]

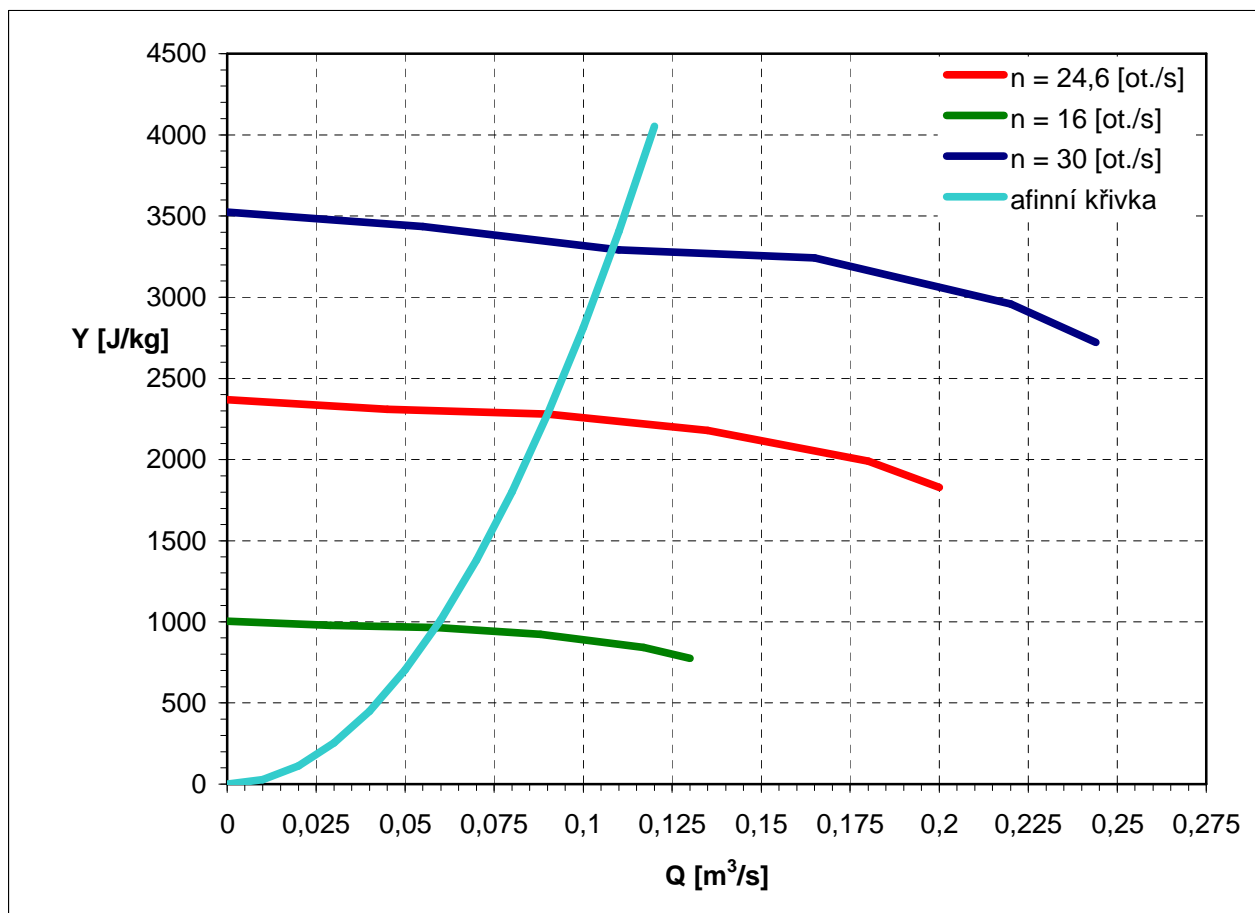
Q [m ³ /s]	Y [J/kg]	P [kW]	η [%]	ΔY [J/kg]
0,000	3524,7	417,1	0	
0,055	3435,5	516,9	36	33
0,110	3290,8	616,6	60	54
0,165	3242,1	716,4	74	77
0,220	2959,5	810,7	77	107
0,244	2721,6	852,4	76	

tab. 3.3.: Charakteristika čerpadla při otáčkách $n_3 = 30$ [ot/s]

Afínní parabolu určíme ze vztahu (3.2-1) a (3.2-2)

$$\frac{Q}{Q'} = \frac{n}{n'} \quad ; \quad \frac{Y}{Y'} = \left(\frac{n}{n'}\right)^2 \quad \Rightarrow \quad \frac{Q^2}{Q'^2} = \frac{Y}{Y'} \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{Y'} = \frac{Q^2}{Q'^2} \cdot \frac{1}{Y} \quad \Rightarrow \quad Y' = \frac{Y}{Q^2} \cdot Q'^2$$

$$Y' = \frac{Y}{Q^2} \cdot Q'^2 = \frac{2280}{0,09} \cdot Q'^2 \quad (3.3-9)$$



Obr. 3-8.: Charakteristika čerpadla při změně otáček n s afinní křivkou pro účinnost $\eta = 60\%$

Závěr

Úkolem této bakalářské práce bylo zhodnotit možnosti regulace asynchronních strojů. V první kapitole této práce jsme si představili možné způsoby regulace. Tímto jsme dospěli celkem ke čtyřem způsobům regulace, na nichž jsou otáčky asynchronních strojů závislé, skluz, frekvence, počet pólových dvojic a velikost napájecího napětí sítě.

Regulace pomocí změny skluzu stroje je sice jednoduchá a levná, ale velmi nevhodná a pouze s malým rozmezím regulace, protože s připojenými odpory ve vinutí rotoru vznikají velké tepelné ztráty.

Regulace pomocí přepínání počtu pólů je sice také jednoduchá a levná, ale regulace se provádí skokově pomocí tzv. Dahlanderova zapojení, dále pro realizaci tohoto způsobu řízení musí statorové vinutí mít několik samostatných vývodů, nebo přepínatelné jedno vinutí.

Změna velikosti napájecího napětí sítě je velice neefektivní, jelikož s kvadrátem velikostí napětí klesá i záběrný moment. Tato metoda se používá spíše u spouštění, jako je například přepínání hvězda-trojúhelník. Omezí se tím záběrné proudy, ale rozběh motoru je delší.

Nejvýhodnější je řízení s pomocí měniče frekvence, který je nejvhodnější a s možností regulace otáček ve velkém rozsahu. Nejpoužívanější jsou nepřímé měniče frekvence s vnější komutací s napět'ovým stejnosměrným meziobvodem.

Ve druhé kapitole jsme došli k závěru, že se změnou velikosti zátěže se mění skluz, a tím i frekvence proudu ve vinutí rotoru. Tento fakt způsobí i změnu otáček motoru.

Ve třetí kapitole jsme se zabývali regulací průtoku, s použitím měniče frekvence, která přináší značný ekonomický přínos, oproti regulaci škrcením. Při změně otáček se mění i charakteristika čerpadla, nikoli však charakteristika potrubí, jak je tomu u regulace škrcením. Se změnou otáček čerpadla se mění i jeho účinnost, se kterou čerpadlo pracuje. Regulace je omezena tzv. statickou energií Y_{min} .

Použitá literatura

- [1] Bartoš, V., Červený, J., Hruška, J., Kotlanová, A., Skala, B.: Elektrické stroje, ZČU v Plzni, Plzeň 2006
- [2] http://www.sse-najizdarne.cz/dokumenty/studijni_materialy/
- [3] <http://www.eatonelektrotechnika.cz/priruckazapojeni/index.html#wp1069167>
- [4] http://www.myinfo.sk/download/SKOLA/002-Motory_TYPY_33str.pdf
- [5] Kalousek, M.: Regulácia odstredivých čerpadiel frekvenčným meničom, Časopis EE 4(3): 4-6, Bratislava 1998
- [6] <http://www.informatorium.cz/data/pdf/23-stavba-a-provoz-stroju-stroje-a-zarizeni-pro-sps-strojni.pdf>
- [7] <http://p.kobrlle.sweb.cz/stroje/as-skriptum.pdf>
- [8] www.mti.tul.cz/files/vke/menice.pdf
- [9] Blechar, T., Drábková, S.: Čerpací technika a potrubí návody do cvičení, VŠB v Ostravě, Ostrava 2010
- [10] Bartoš, V.: Elektrické stroje, ZČU v Plzni, Plzeň 2004
- [11] Postnikov, I. M.: Projektování elektrických strojů, Nakladatelství technické literatury, Kyjev 1960