

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vývoj komutace v elektrických strojích

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2012/2013

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

Jméno a příjmení: **Jiří VANĚK**
Osobní číslo: **E09B0338P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**
Název tématu: **Vývoj komutace v elektrických strojích**
Zadávající katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

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

1. Popište historický vývoj komutace.
2. Popište princip komutace v elektrických strojích.
3. Popište současné dělení komutátorových strojů.
4. Popište princip elektronicky komutovaných strojů a možnosti jejich řízení.
5. Diskutujte předpokládaný vývoj.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**

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

Seznam odborné literatury:

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

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Michaela Vachtlová**
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky


Konzultant bakalářské práce: **Ing. Michaela Vachtlová**
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky


Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2012**

Termín odevzdání bakalářské práce: **7. června 2013**



L.S.


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


Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Abstrakt

Práce se zabývá problémem komutace v elektrických točivých strojích a polovodičových měničích. Práce je rozdělena na dvě části, které se vzájemně prolínají.

V první části, jako zástupce stroje s mechanickou komutací, zde popisují stejnosměrný stroj. Stejnosměrné motory byly v minulosti velice rozšířeny zejména pro možnosti relativně snadné a plynulé regulace a díky rozvoji elektronických měničů umožňující snadnější změnu napětí použitím polovodičových součástek, se regulace stejnosměrného motoru dále zefektivňuje.

V další části se zaměřují na elektronickou komutaci elektrických zařízení jako jsou usměrňovače, střídače, elektronické měniče a na elektricky komutovaný motor.

Klíčová slova

Stejnosměrný stroj, komutátor, polovodičový měnič, střídač, usměrňovač, nepřímý měnič kmitočtu, elektronicky komutovaný stroj, čtyřkvadrantový pulzní měnič, aktuátor

Abstract

The work deals with the problem of commutation in electrical rotating machines and semiconductor converters. The work is divided into two parts, which are interconnected.

In the first part, as a representative of machines with mechanical commutation, I describe a DC machine. DC motors were previously widespread, especially for the possibility of relatively easy and smooth control and with the development of electronic converters making it easier to change the voltage using semiconductor devices to control a DC motor further improves.

The next section focuses on the electronic commutation of electrical equipment such as rectifiers, inverters, electronic inverter and electrically commutated motor.

Key words

DC machine, Commutator, Semiconductor converter, Inverter, Rectifier, Indirect frequency converter, Brushless DC machine, Four-quadrant pulse converter, actuator

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr 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 30.5.2013

Jméno příjmení

.....

Obsah

OBSAH.....	7
ÚVOD.....	8
SEZNAM SYMBOLŮ.....	9
1 PŘEHLED VÝVOJE KOMUTACE.....	11
1.1 STEJNOSMĚRNÉ STROJE	11
1.2 ELEKTRONICKÉ MĚNIČE	12
2 PRINCIP KOMUTACE V ELEKTRICKÝCH STROJÍCH.....	13
2.1 STEJNOSMĚRNÉ STROJE	13
2.1.1 Komutátor.....	13
2.1.2 Princip komutace	14
2.1.3 Důsledky reakce kotvy.....	14
2.1.4 Problém komutace.....	16
2.1.5 Komutace motoru na střídavý proud.....	18
2.2 ELEKTRONICKÉ MĚNIČE	19
2.2.1 Dělení měničů	19
2.2.2 Usměrňovače	20
2.2.3 Střídače.....	22
3 MOŽNOSTI ŘÍZENÍ KOMUTOVANÝCH STROJŮ.....	23
3.1 ELEKTRICKÉ USMĚRŇOVAČE	23
3.1.1 Úhlové řízení usměrňovačů.....	23
3.1.2 Režimy práce usměrňovače.....	24
3.1.3 Řídící obvody usměrňovačů.....	25
3.2 ELEKTRONICKÉ STŘÍDAČE	25
3.2.1 Řízení elektronických střídačů	27
3.2.2 Střídače s měkkou komutací.....	28
3.2.3 Nepřímé měniče kmitočtu	29
3.2.4 Čtyřkvadrantové pulzní měniče.....	30
3.3 ELEKTRONICKY KOMUTOVANÉ STROJE	30
4 SOUČASNÉ POUŽITÍ.....	31
4.1 STEJNOSMĚRNÝ STROJ JAKO AKTUÁTOR.....	31
4.2 HYBRIDNÍ MĚNIČ	33
ZÁVĚR.....	35
POUŽITÁ LITERATURA	36

Úvod

Historie komutace se zásadně opírá o historii a vývoj stejnosměrného stroje. Na začátku devatenáctého století neexistoval jiný zdroj elektrické energie než voltův článek, proto se tehdejší vynálezci soustředili na pokusy se stejnosměrnými „motory“. Tehdejší vynálezci byli voltovým článkem natolik ovlivněni, že si nedovedli představit praktické využití proudu jiného než stejnosměrného, proto své motory a dynamy opatřovali mechanickým přepínačem, předchůdcem komutátoru. [1] Později se však zjistilo, že pokud je žárovka napájena střídavým proudem, funguje stejně dobře jako při napájení stejnosměrným proudem. Asi nejznámějším zastáncem stejnosměrné energie byl T. A. Edison, který se pokoušel svými generátory elektrifikovat významná města ve spojených státech.

Tato práce se mimo jiné zabývá problémem komutace ve stejnosměrných strojích. Komutace stroje s sebou nese spoustu problémů. Například rekcí kotvy se posouvá neutrální osa a to je třeba kompenzovat.

Na začátku dvacátého století začal vývoj elektronických měničů a pokračuje dodnes. Nejdříve to byly měniče s vnější komutací a to především usměrňovače, pro průmysl velmi výhodné jelikož se nemuseli spoléhat na rozvod stejnosměrné energie, pokud byla zapotřebí. Poté měniče s vlastní komutací, které jsou konstrukčně složitější a vyžadují řídicí obvody, což je také předmětem této práce.

Dále stojí za zmínku stroj s elektronickou komutací, který je vlastně strojem stejnosměrným i s jeho vlastnostmi, ale bez negativních účinků komutátoru.

Seznam symbolů

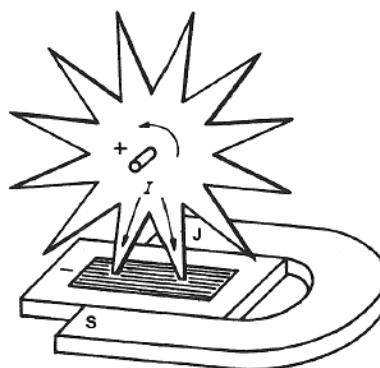
$AM [-]$	Asynchronní motor
$B_r [T]$	Magnetická indukce reakce kotvy
$B_{\delta 0} [T]$	Celková magnetická indukce ve vzduchové mezeře
$B_{\delta} [T]$	Ideální magnetická indukce ve vzduchové mezeře
$b_k [m]$	Délka kartáčů komutátoru
$C_{SS} [F]$	Kondenzátor
$D_{1-4} [-], V_{1-4} [-]$	Polovodičová dioda
$f_{1-2} [Hz]$	Frekvence
$L_a [H]$	Indukčnost vinutí kotvy
$L_C [H]$	Vlastní indukčnost cívky vinutí
$L_s [H]$	Indukčnost vinutí budicího vinutí
$M [-], G [-]$	Motorický režim, Generátorický režim stroje
$PP [-]$	Pomocné póly stroje
$R_a [\Omega]$	Odpor vinutí kotvy
$R_i [\Omega]$	Vnitřní odpor zdroje
$R_s [\Omega]$	Odpor vinutí budicího vinutí
$R_p [\Omega]$	Regulační odpor
$Sp_{1-4} [-], S_{1-4} [-]$	Spínací tranzistor
$S [-], J [-]$	Severní a jižní pól magnetu
$T_{1-2} [s]$	Perioda
$t_k [s]$	Doba komutace
$U_{c1x} [V], U_{c2x} [V]$	Napětí na „ultra kapacitorech“
$U_d [V], U_i [V]$	Indukované napětí kotvy stejnosměrného motoru
$U_m [V]$	Amplituda sinusového průběhu napětí
$U_s [V]$	Střední hodnota napětí
$U_z [V]$	Napětí stejnosměrného zdroje

u_x [V]	Reaktanční napětí
v_K [rad/s]	Úhlová rychlost rotoru
α [rad]	Úhel řízení usměrňovače
γ [°]	Úhel pootočení neutrální osy
n_σ [-]	Označení neutrální osy

1 Přehled vývoje komutace

1.1 Stejnosměrné stroje

První pokusy sestavit stejnosměrný stroj sahají až do období kolem roku 1820. Ve skutečnosti se nedá hovořit o stejnosměrném stroji jako takovém, byly to pouze laboratorní pokusy, mnohdy pro stejnosměrný stroj s neobvyklými materiály jako je například rtuť. Jeden takový pokus uskutečnil v roce 1821 Peter Barlow jehož vynález je na obr. 1.1. Jeho základ tvoří vanička se rtutí, jenž protíná magnetické pole permanentního magnetu. Na kolečko působí síla, a to se otáčí vyznačeným směrem, jelikož proud protéká paprsky kolečka v magnetickém poli podobně, jako protéká proud cívkou rotoru moderního stroje.



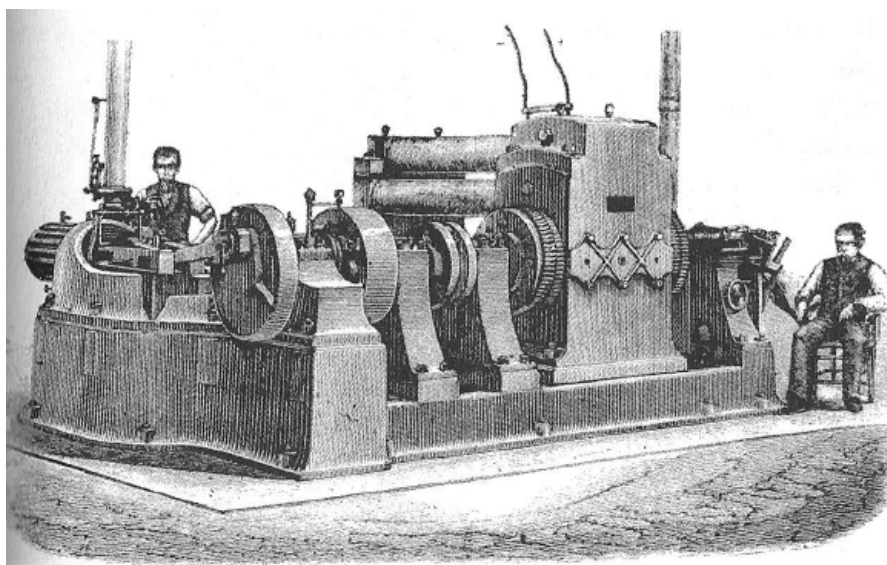
Obr. 1.1 Barlowo kolečko [1]

Brzy poté, již roku 1830, představil Michael Faraday první stejnosměrný stroj a odstartoval tak další vývoj elektrických strojů, jelikož byl jeho stroj stále zdokonalován. Dalšími objeviteli v této době byli například Pixii, Saxon, Clark nebo Petřina, kteří vynalezli své vlastní konstrukce stroje. Objevila se spousta konstrukcí strojů, jejichž účinnost zdaleka nedosahovala použitelné úrovně. Z toho vyplývá zřejmý nedostatek vědomostí o teorii elektromagnetického pole, důležité při konstrukci magnetického obvodu.

Problému s řešením magnetického obvodu si všiml Werner von Siemens (1816-1892), který navinul cívkou na železné jádro a tím soustředil magnetické pole magnetu do obvodu rotoru, čímž zmenšil vzduchovou mezeru a rozptylový tok. Dále také objevil tzv. dynamoelektrický jev, který se uplatňuje při použití elektromagnetu ve statoru stroje buzeného stejnosměrným proudem. Doposud byly stejnosměrné stroje řešeny s permanentními magnety, které se nedaly použít pro velké výkony. Siemens si také uvědomil, že nemusí používat cizího buzení, jelikož vlivem zbytkové magnetizace

(remanence) se v kotvě indukují slabé napětí, které se dále zesiluje, a protože je budící cívka zapojena sériově, respektive paralelně, protéká jí proud a to vyvolává větší magnetické pole a větší indukované napětí, dokud se magnetický obvod zcela nenasytí.

Dalším významným objevitelem a vynálezcem je bezpochyby Thomas Alva Edison, který osvětlil svými žárovkami město New York a také ho vybavil vlastní elektrárnou. Na obr. 1.2 je jedno z Edisonových dvou dynam newyorské elektrárny, každé mělo výkon 100kW a bylo poháněno parním strojem. [1]



Obr. 1.2 Edisonovo dynamo „Jumbo“ z roku 1881 [1]

1.2 Elektronické měniče

Možnosti výkonových měničů jsou silně závislé na možnostech součástek. Historie elektrických měničů sahá až ke konci devatenáctého století, kdy se začíná rozvíjet polovodičová technologie. Výkonové usměrňovače byly vyvíjeny poměrně brzo na rozdíl od střídačů. Na konci devatenáctého století se používali jako usměrňovače diody s vrstvou kovu a selenu, které ale neměli velkou proudovou zatížitelnost.

Kolem roku 1910 se objevila technologie využívající tekutou rtuť jako katodu, která byla uzavřena ve skleněné, nebo později kovové baňce. Průchodem proudu se vytvořil elektrický oblouk mezi anodou a katodou. Tato technologie byla velice výkonná, její proudová zatížitelnost byla kolem 10 kA při napětí 10 kV. Nevýhodou bylo nadměrné ohřátí baňky usměrňovače, která se musela chladit mnohdy i vodou a také se před plným zatížením musela zahřát na provozní teplotu. Později se objevily i řízené rtuťové usměrňovače, které

umožňovaly regulaci stejnosměrného motoru malých i středních výkonů a používaly se až do poloviny dvacátého století.

Tehdy už začal vývoj polovodičových tranzistorů. První tranzistory byl vytvořeny z germania, později z křemíku a umožnili například výrobu menších rádiových přijímačů. Ovšem k výkonovým aplikacím měly stále daleko.

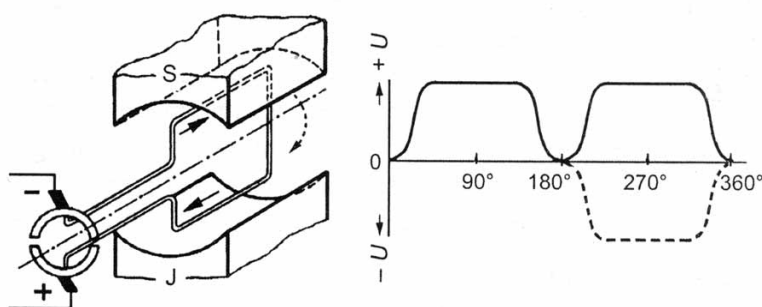
Polovodičové střídače se začali široce využívat v relativně blízké minulosti a stále se rozvíjejí. Jejich proudové zatížitelnosti se stále zvětšují a pronikají tak do širokého odvětví průmyslu a dopravy. [2]

2 Princip komutace v elektrických strojích

2.1 Stejnosměrné stroje

2.1.1 Komutátor

Komutátor má za úkol měnit stejnosměrné napětí a proud na střídavé. Ve stejnosměrném stroji je to mechanická záležitost, vodiče vedoucí od zdroje k cívkám kotvy musí být prohozeny, jinak by se stroj zastavil. Na obr. 2.1 vlevo je zjednodušený model stroje pracující jako dynamo. Vpravo je naznačen průběh indukovaného napětí na výstupních svorkách, tlustá čára značí (zvlněný) průběh stejnosměrného napětí na výstupních svorkách, čerchovaná čára pak průběh napětí na vodiči kotvy, tedy před komutátorem.



Obr. 2.1 Zjednodušený model stejnosměrného stroje [8]

Z předchozího obrázku je také vidět ideální místo pro provedení komutace. Napětí a proud, při pootočení závitu o 180° , zívít je ve vodorovné poloze, klesne k nule a vytváří tak podmínky pro komutování bez jiskření.

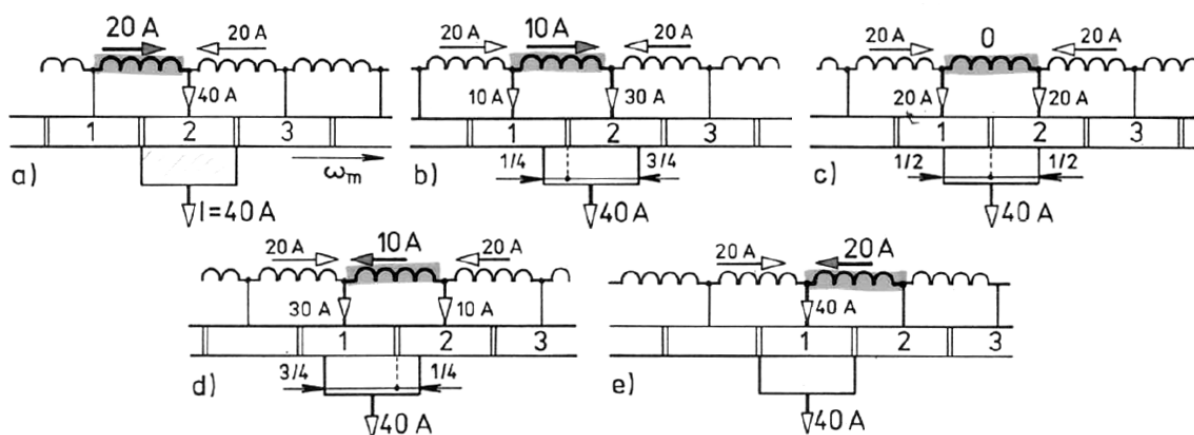
Pro vyhlazení průběhu napětí se kotva sestavuje z mnoha takovýchto závitů navzájem pootočených. Z toho plyne nutná úprava komutátoru, ten se musí skládat z více lamel podle použitého počtu vodičů v závitech. [9]

2.1.2 Princip komutace

Na obrázku obr. 2.2 probíhá komutace cívky vinutí. Na obrázku vlevo nahoře kartáč dosedá na jednu lamelu a proud je rozložen po celé ploše lamely. Jak se rotor pohybuje, kartáč přechází na sousední lamelu a proud se rozkládá podle plochy kartáče dosedajícího na lamely. Komutace probíhá při vodorovné poloze lamel (obr. 2.1), proto proud tekoucí cívkou na obr. 2.2 (c) zaniká. Na obr. 2.2 (d) mění proud svůj směr a na posledním obrázku 2.2 je komutace dokončena. Doba komutace t_K je dána vztahem (2.1), kde b_K je šířka kartáče a v_K úhlová rychlost.

$$t_K = \frac{b_K}{v_K} \quad (2.1)$$

Toto však platí pouze pro ideální vinutí, kdy mají cívky nulovou indukčnost a nulový odpor. [8], [9]

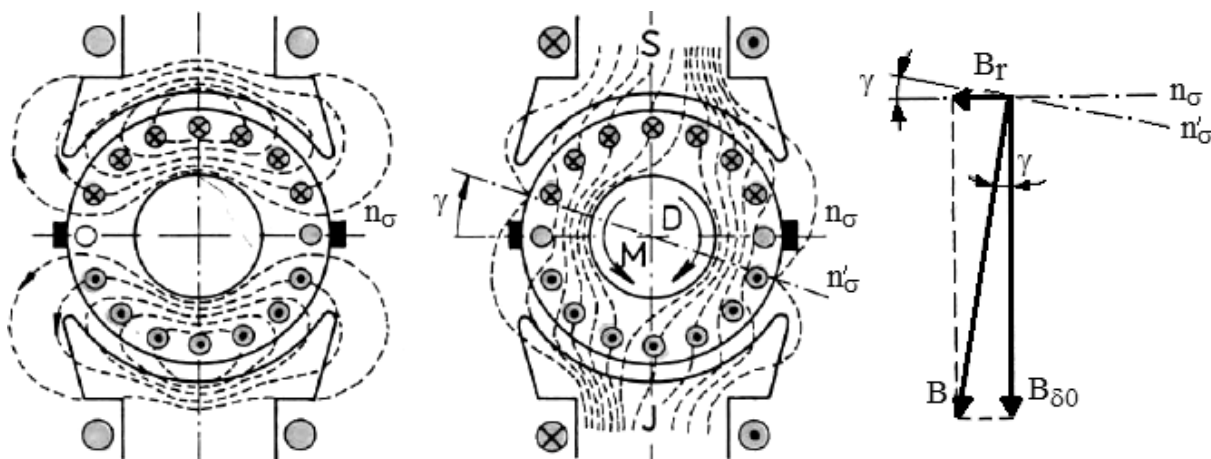


Obr. 2.2 Průběh komutace mezi dvěma cívkami rotoru [11]

2.1.3 Důsledky reakce kotvy

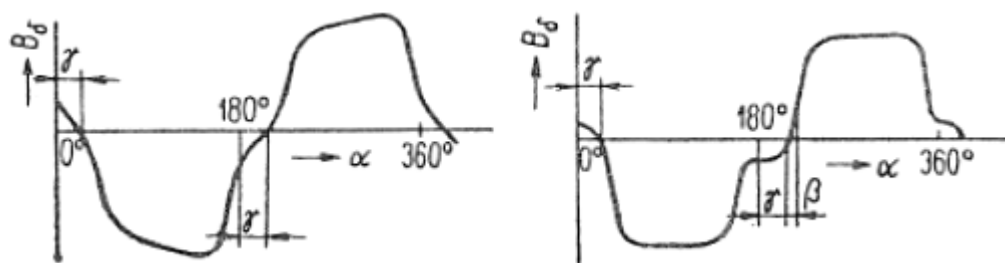
Pokud přejdeme z ideálního modelu stroje ke skutečnému musíme respektovat další aspekty, které ovlivňují možnosti komutace. Jelikož je rotor tvořen magnetickým obvodem a v něm jsou uloženy vodiče vinutí, kterými protéká proud, tvoří tak vlastní magnetické pole, které magnetizuje magnetický obvod rotoru příčně a skládá se s podélným magnetickým

tokem a tím ho deformuje. Obr. 2.3 vlevo znázorňuje magnetické pole reakce kotvy, na obr. 2.3 uprostřed je znázorněn celkový průběh magnetického toku strojem. Také je zde zakreslen úhel γ , o který musí být posunuty kartáče komutátoru, aby zůstali v neutrální poloze a nedocházelo tak k jejich jiskření a poškození. Pro dynamo se kartáče posunují ve směru otáčení a u motoru v protisměru. Na obr. 2.3 vpravo je graf skládání magnetické indukce reakce kotvy B_r a celkový průběh magnetické indukce $B_{\delta 0}$.



Obr. 2.3 zleva Průběh mag. indukce reakce kotvy, Celkový průběh mag. indukce [11], Graf skládání mag. indukce ve stroji. [9]

Důsledek reakce kotvy můžeme odstranit přidáním kompenzačního vinutí, které vytváří magnetické pole opačně orientované než je pole vzniklé reakcí kotvy. Tím dosáhneme lepšího průběhu magnetické indukce ve vzduchové mezeře a plynulejšího točení stroje. Na obr. 2.4 vlevo je zobrazen průběh magnetické indukce bez kompenzace, vpravo s kompenzací.



Obr. 2.4 Průběhy magnetické indukce ve vzduchové mezeře. [9]

To se ovšem používá jen u strojů větších výkonů, jelikož přidání kompenzačního vinutí znamená více mědi, více izolace a v poslední řadě i snížení účinnosti. Menší stroje se proto takto nekompensují. [9], [10]

2.1.4 Problém komutace

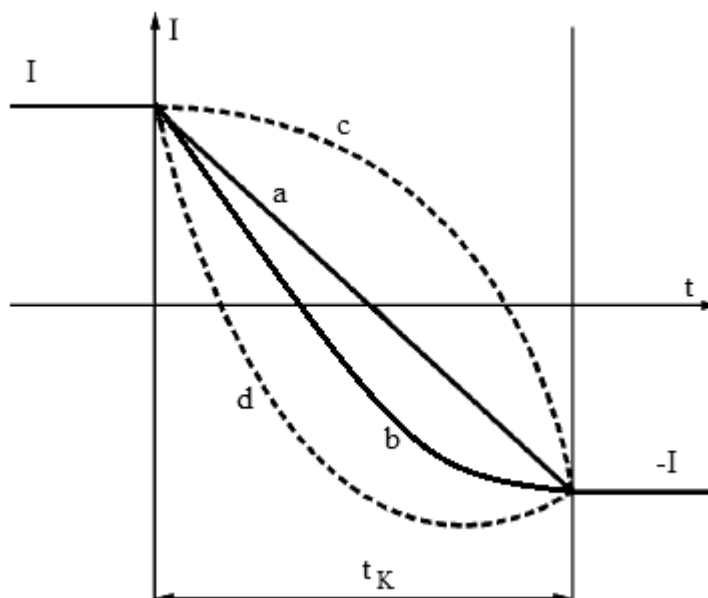
V předchozím textu jsme předpokládali ideální vinutí, tedy bez indukčnosti a odporu. To samozřejmě ve skutečnosti neplatí, proto musíme uvažovat další aspekt spojený s komutováním, a to je reaktanční napětí, které se indukuje ve zkratované cívce vlivem časové změny proudu a vlastní indukčnosti cívky L_C . Reaktanční napětí je definováno podle vztahu (2.2).

$$u_x = L_C \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (2.2)$$

Pokud uvažujeme stav, kdy se proud cívkami mění z I na $-I$, tedy ΔI bude $2I$ za dobu t_K bude pro reaktanční napětí platit následující vztah.

$$u_x = L_C \cdot \frac{2I}{t_K} = L_C \cdot \frac{b_K}{v_K} \cdot 2I \quad (2.3)$$

Za těchto předpokladů bychom získali lineární průběh komutace, který je naznačen na obrázku 2.5 jako křivka (a). Jde o přímkovou, nebo také odporovou komutaci. Toto ovšem opět ve skutečnosti neplatí jelikož průběh reaktančního napětí není lineární a zakřivuje tak průběh komutace podle křivky (c) na obr. 2.5. To má za následek jiskření a opotřebování kartáče komutátoru, jelikož kartáč opouští lamelu ještě v době kdy je protékána proudem.



Obr. 2.5 Průběhy komutace

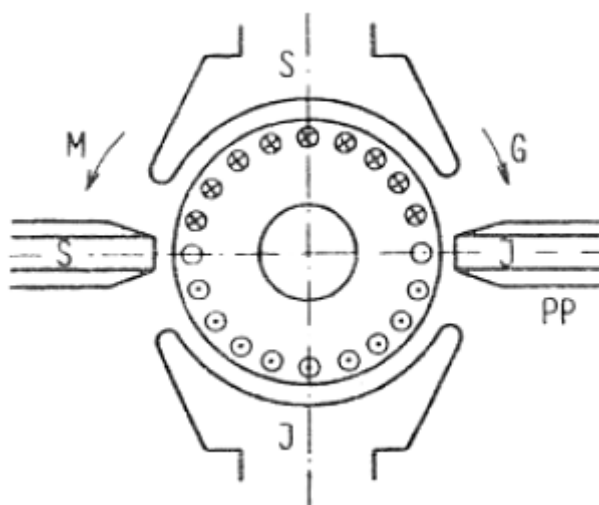
Tento problém se dá řešit vytvořením tzv. „komutačního napětí“, které působí proti reaktančnímu napětí a tím omezuje jeho účinky. Toho se dá docílit buď posunutím kartáčů vůči vodorovné ose nebo přidáním pomocných pólů. [9], [10]

2.1.4.1 Posunutí kartáčů

Při běhu naprázdno probíhá komutace dokonale, pokud stroj připojíme k zátěži neutrální osa se posune a je třeba posunout kartáče o úhel γ tak jak je to naznačeno na obrázku 2.3 uprostřed. Tímto posunem ale dostaneme jen tzv. induktivní komutaci podle křivky (c) na obrázku 2.5, která, jak už bylo řečeno, není ideální. Abychom odstranili účinky reaktančního napětí musíme kartáče posunout ještě o úhel β z obrázku 2.4 vpravo a tím dosáhneme přijatelného průběhu proudu kartáči podle křivky (b) z obrázku 2.5. Jelikož při každé změně zátěže bychom museli pootočit kartáče je tento způsob kompenzace nevhodný a používá se jen u strojů malých výkonů do jednoho kilo wattu a v případě kdy nedochází k častým změnám zátěže. [9]

2.1.4.2 Pomocné póly

Pomocnými póly dosáhneme takového stavu, kdy se vlivem magnetické indukce pomocných pólů indukuje napětí v komutující cínce působící proti reaktančnímu napětí a tím snižuje jeho vliv na cívku. Dále vytvářejí magnetický tok, který působí proti toku vzniklém reakcí kotvy a tím ho též kompenzuje.



Obr. 2.6 Pomocné póly [9]

Z obr. 2.6 je patrné, že pomocné póly se vkládají ve vodorovné, tzv. neutrální ose stroje. V případě zapojení jako motor po hlavním severním pólu následuje severní pomocný pól a v zapojení jako dynamo po severním následuje jižní pól. Vinutí pomocných pólů se zapojuje do série s vinutím kotvy. U tohoto způsobu zapojení není třeba posouvat kartáče z neutrální osy stroje a také nezáleží na změně zátěže stroje, přičemž se průběh komutace pořád blíží křivce (b) na obr. 2.5. Ovšem je třeba pomocné póly správně navrhnout, jinak by mohlo dojít k situaci, kdy je stroj překomutován (průběh na obr. 2.5 (d)). Průběh komutace lze dodatečně nastavit vložím plechů mezi jeho statoru a pomocný pól stroje a tím docílit nejvhodnějšího průběhu komutování bez jiskření. [9]

2.1.5 Komutace motoru na střídavý proud

Komutovaný stroj na střídavý proud v sobě kombinuje výhody stejnosměrných motorů a střídavých motorů, jedná se o spojení výhod regulace stejnosměrného motoru a výhod použití střídavé rozvodné sítě. Prakticky se jedná o stejnosměrný stroj, ale kvůli použití střídavého napájení musí být magnetické obvody buzení i kotvy složeny z plechů, aby tak mohlo docházet ke střídavé magnetizaci. Buzení a kotva se k sobě zapojují sériově a vzhledem k tomu, že je napájecí proud střídavý, střídá se i magnetický tok vzduchovou mezerou, ale současně se střídá i smysl proudu tekoucí kotvou, proto se stroj chová jako stejnosměrný a ke své funkci potřebuje komutátor. Existuje i možnost zapojení buzení a kotvy derivačně, to sebou ovšem nese problémy, jelikož nemůžeme zaručit stejné parametry buzení a kotvy. Kvůli rozdílným odporům a indukčností dochází k fázovému posunu proudu kotvy a buzení a tím i k nerovnoměrnému chodu stroje. Dalším problémem je samotná komutace, jelikož k ní dochází ve vodorovné neutrální ose stroje a doba mezi komutacemi závisí na otáčkách stroje, ale proud cívkou je střídavý s kmitočtem sítě, proto proud tekoucí komutovanou cívkou není vždy nulový.

Velké komutátorové stroje mají vždy pomocné póly pro potlačení transformačního napětí, které je maximální v komutující cívkě a mají kompenzační vinutí pro potlačení reakce kotvy.

To už dnes neplatí, díky rozvoji výkonných střídačů, pracujících se střídavými stroji. Tyto motory se dnes používají jen u malých domácích spotřebičů jako jsou například vrtačky, vysavače atd. [9]

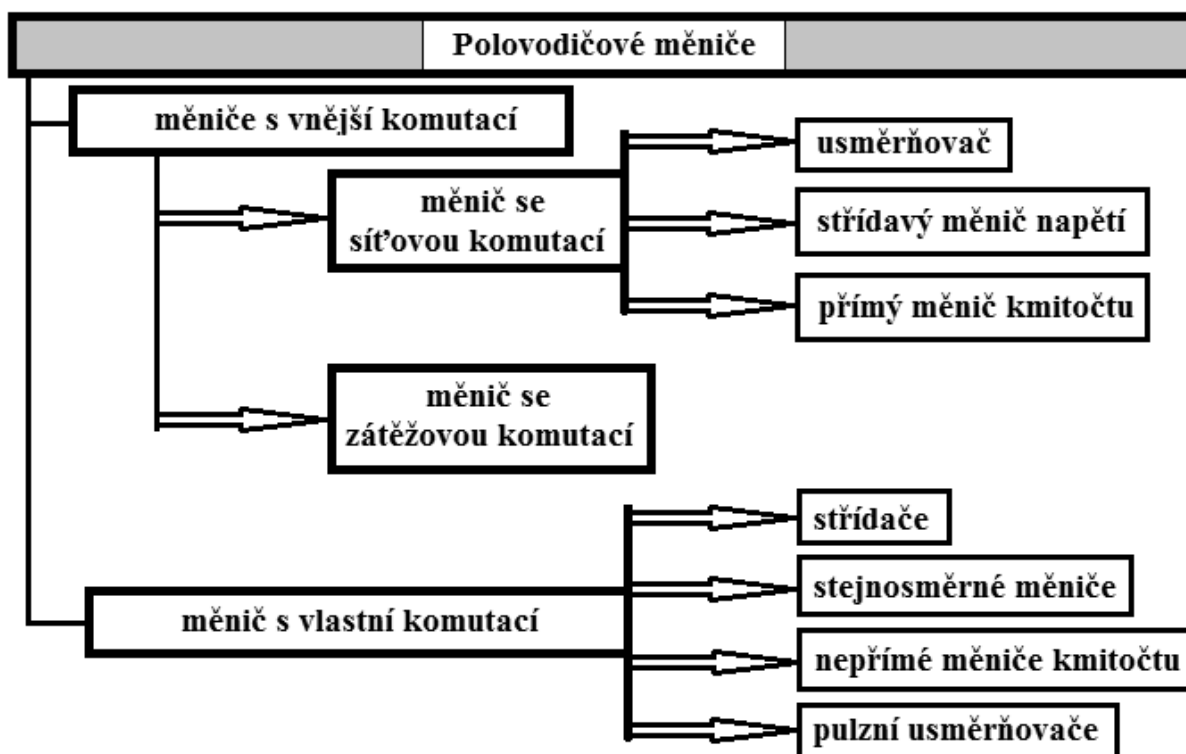
2.2 Elektronické měniče

Komutace v elektrických měničích je poněkud odlišná než u stejnosměrných strojů, U motorů a dynam, probíhá-li komutace, musí proud klesnout v komutující cívice k nule. Zatímco u měničů, probíhá-li komutace z jedné větve na druhou, proud odtékající větví zůstává spojitý. [3]

2.2.1 Dělení měničů

Na obr. 2.7 je znázorněno dělení měničů podle druhu komutace. Měnič s vnější komutací využívá vnější zdroj komutovaného napětí a proudu, typicky se jedná o usměrňovač připojený k rozvodné síti anebo transformátor, působící jako střídavý měnič napětí. A naopak měnič s vlastní komutací, komutuje napětí uvnitř obvodu samotného měniče, například střídač přeměňuje stejnosměrné a nebo usměrněné napětí na střídavé napětí. Stejnosměrný měnič zas například pulzně šířkovou modulací přeměňuje stejnosměrné napětí na pulzní napětí atd.

Dále se komutace může dělit na přímou, což znamená průběh v jednom komutačním taktu z jedné komutační větve na druhou a nepřímou. Nepřímá komutace je vícestupňová jelikož se z první hlavní větve nejprve komutuje proud na vedlejší větev a pak v dalším taktu z vedlejší větve na druhou hlavní větev, přičemž takt komutace je doba při které se mění vodivost po sobě následujících větví měniče. [3], [6]



Obr. 2.7 Dělení polovodičových měničů

2.2.2 Usměrňovače

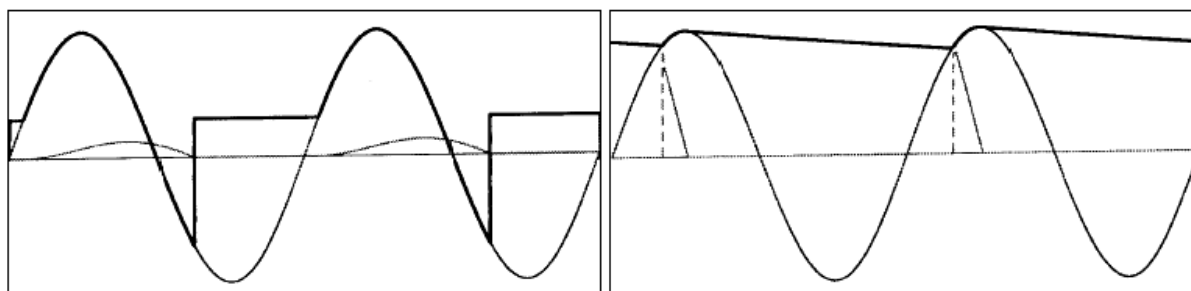
Jak už bylo nastíněno v první kapitole, usměrňovač je nejstarším měničem. Je to měnič, ve většině případů s vnější komutací, který často mění střídavé síťové napětí na stejnosměrné napětí. Bývá také součástí nepřímých měničů kmitočtu. Můžeme ho dělit na jednofázový, vícefázový, uzlový a můstkový, nebo na řízený či neřízený a v neposlední řadě na energeticky jednosměrný nebo obousměrný.

2.2.2.1 Neřízený usměrňovač

Neřízený, uzlový usměrňovač je nejjednodušším usměrňovačem, skládá se z jedné diody v každé fázi. Je vhodné ho doplnit filtračním kondenzátorem pro vyhlazení průběhu napětí, ale není to nutností. Obecně u usměrňovačů musíme respektovat charakter zátěže, pokud pracuje jako zdroj pro stejnosměrný motor, musíme jej uvažovat jako tzv. zátěž RLU_i , kde U_i je indukované napětí v motoru, které působí protinapětí zdroje.

Na obr. 2.8 vpravo je tlustou plnou čarou zobrazen průběh napětí na kapacitní zátěži. Tento druh zátěže se běžně používá u zdrojů pro domácí spotřebiče. Na obr. 2.8 vpravo si všimněme vysokých špiček, jsou zobrazeny přerušovanou čarou, které vytváří proud při

dobíjení kondenzátoru. Naopak vlevo na stejném obrázku vidíme průběh na zátěži, kterou tvoří stejnosměrný motor, což je odporově induktivní zátěž doplněna indukovaným protinapětím. Tlustá plná čára zobrazuje průběh napětí, které vlivem indukčnosti zasahuje do záporné části charakteristiky, jelikož dioda přes kterou prochází proud nemůže být zavřena dříve než proud na indukčnosti klesne k nule, poněvadž se proud nesmí změnit skokem. Všimněme si také, že vlivem indukovaného napětí U_i se celý průběh napětí posouvá směrem do kladných hodnot právě o toto napětí.



Obr. 2.8 Průběhy napětí a proudu na zátěži [6]

Dalším z možných zapojení usměrňovače je můstkový usměrňovač. Jeho schéma zapojení je na obr. 2.9. Dnes je toto zapojení široce používáno a to platí jak pro jednofázový tak i vícefázový můstkový usměrňovač. Jeho výhodou je menší zvlnění výstupního napětí. Střední hodnota usměrněného napětí je dána následujícím vztahem.

$$U_S = \frac{1}{T} \int_0^T U_m \cdot \sin \omega t \cdot dt \quad (2.4)$$

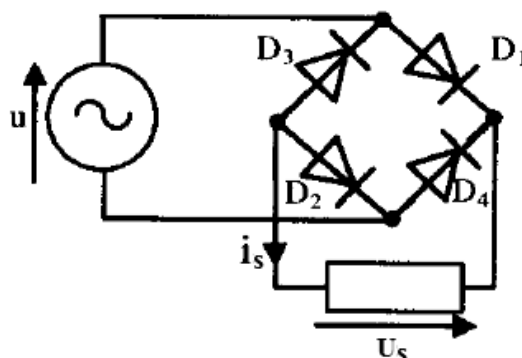
Pokud bychom do vzorce (2.4) dosadily hodnoty pro jednocestný usměrňovač, bez filtrovacího kondenzátoru, dostáváme následující vztah.

$$U_S = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi U_m \cdot \sin \omega t \cdot dt = \frac{U_m}{2\pi} \cdot (-\cos \pi + \cos 0) = \frac{U_m}{\pi} \cong 0,318 \cdot U_m \quad (2.5)$$

Obdobně bychom dosadili do vzorce (2.4) pro dvoucestný usměrňovač a dostali bychom hodnotu středního napětí danou vztahem.

$$U_S = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi U_m \cdot \sin \omega t \cdot dt = \frac{U_m}{\pi} \cdot (-\cos \pi + \cos 0) = \frac{2 \cdot U_m}{\pi} \cong 0,637 \cdot U_m \quad (2.6)$$

Pokud porovnáme vztahy (2.5) a (2.6) vidíme že můstkový usměrňovač dosahuje dvakrát větší střední hodnoty napětí na vstupu než jednocestný usměrňovač. [6]



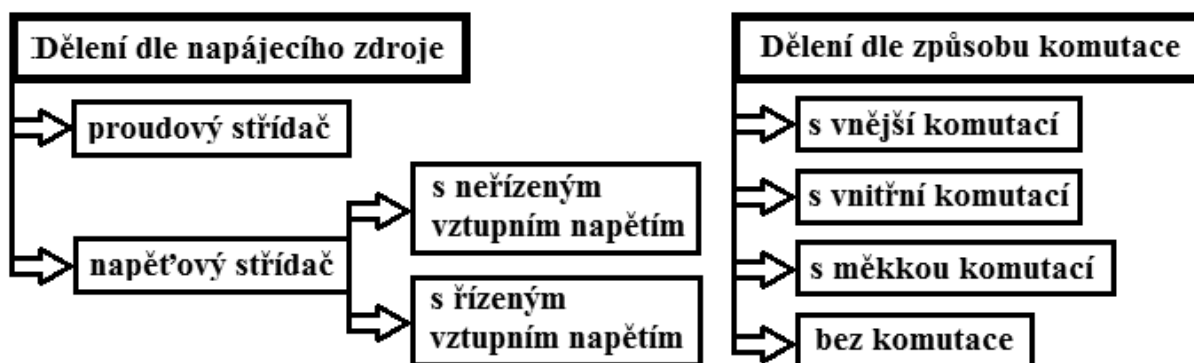
Obr. 2.9 Usměrňovač v můstkovém zapojení [6]

2.2.2.2 Řízený usměrňovač

Jak už název napovídá jedná se o usměrňovače, u kterých lze řídit výstupní veličinu. Zapojení je v podstatě totožné, diody jsou nahrazeny tyristory a ty jsou řízeny řídicími obvody. Řízení se provádí změnou úhlu, tedy změnou okamžiku zapnutí tyristoru, tím dosáhneme změny střední hodnoty výstupního napětí. [6]

2.2.3 Střídače

Funkce střídače je vlastně pravým opakem funkce usměrňovače, střídač tedy přeměňuje stejnosměrné napětí na střídavé. Používá se například jako záložní zdroj pro spotřebiče napájený z baterie nebo jako střídač napětí v solárních elektrárnách a ve spoustách dalších aplikací. Na následujícím obrázku 2.10 je zobrazeno dělení střídačů.



Obr. 2.10 Dělení střídačů

2.2.3.1 Střídače s vnější komutací

Komutace je zařízena z vnějšího zdroje, jako například síť nebo alternátor. Konstrukčně jde v podstatě o usměrňovač ve střídačovém režimu, kdy je přenos energie opačný, tedy ze stejnosměrné na střídavou. [6]

2.2.3.2 Střídače s vlastní komutací

Jedná se o střídač obvykle s tranzistory, které zajišťují obrácení polarity stejnosměrného zdroje, proto vnitřní komutace. [6]

2.2.3.3 Střídače s měkkou komutací

Je to střídač s vlastní komutací, ale s tím rozdílem, že ke komutaci dochází tehdy kdy je na součástce nulové napětí nebo nulový proud. [3], [6]

3 Možnosti řízení komutovaných strojů

3.1 Elektrické usměrňovače

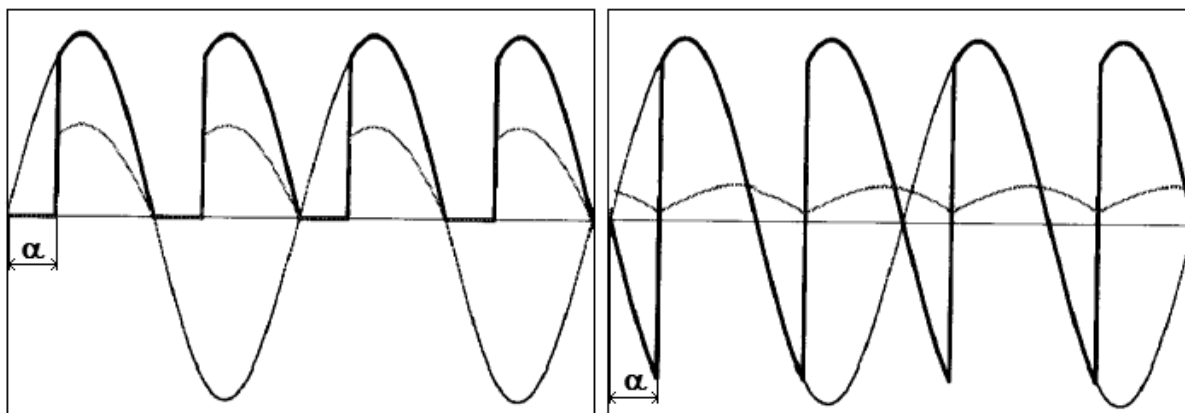
3.1.1 Úhlové řízení usměrňovačů

Podstata úhlového řízení spočívá v sepnutí tyristoru usměrňovače v moment daný úhlem sepnutí α . Tyristor je říditelná součástka podobná diodě, která je na základě spínacího proudového impulsu schopná vést proud. Není ale schopna se vypnout, vypíná se tehdy když proud jí tekoucí klesne k nule. Na obrázku 3.1 vlevo vidíme, tlustou plnou čarou, průběh napětí a tenkou čarou proud na řízeném usměrňovači v můstkovém zapojení. Tyristor sepne v bodě posunutém o úhel α a tím sníží střední hodnotu výstupního napětí. Jelikož se jedná o odporovou zátěž, tyristor se vypíná tehdy, kdy napětí na tyristoru klesá k nule. Výsledné napětí bychom dostali upravením vzorce (2.6).

$$U_S = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_m \cdot \sin \omega t \cdot dt = \frac{U_m}{\pi} \cdot (-\cos \pi + \cos \alpha) \quad (3.1)$$

Na obrázku 3.1 vpravo je případ induktivní zátěže u které se proud vlivem indukčnosti mění s napětím jen nepatrně a zabraňuje tak v uzavření tyristoru. Pro tento případ musíme vzorec (3.1) ještě drobně upravit. [6]

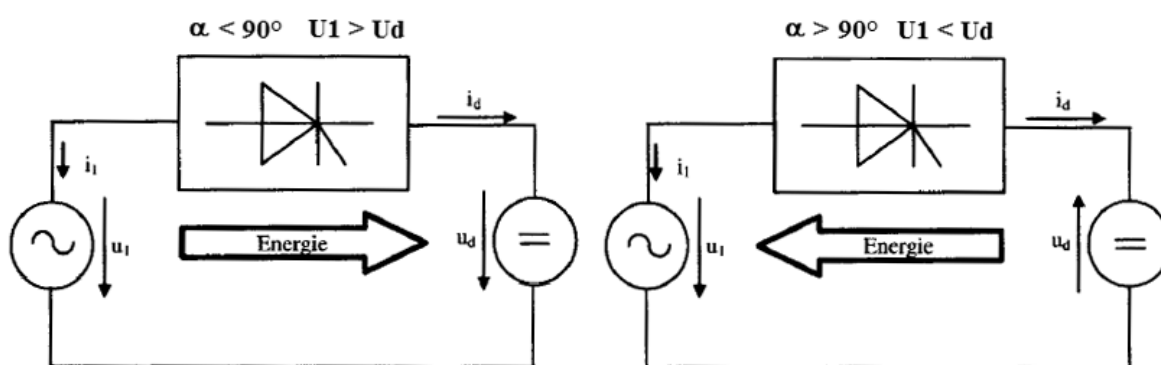
$$U_s = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} U_m \cdot \sin \omega t \cdot dt = \frac{U_m}{\pi} \cdot [-\cos(\pi + \alpha) + \cos \alpha] \quad (3.2)$$



Obr. 3.1 Průběhy napětí a proudu na zátěži [6]

3.1.2 Režimy práce usměrňovače

Na obrázku 3.2 je blokové schéma režimů práce usměrňovače. Předpokládáme stav, kdy je na zátěži indukčnost blízká nekonečnu a protinapětí U_d , což odpovídá stejnosměrnému motoru. V případě, obr. 3.2 vlevo, kdy je indukované napětí motoru U_d menší než napětí napájecího zdroje a úhel řízení je menší než 90° směr energie je tedy do zátěže, jedná se o usměrňovací režim.

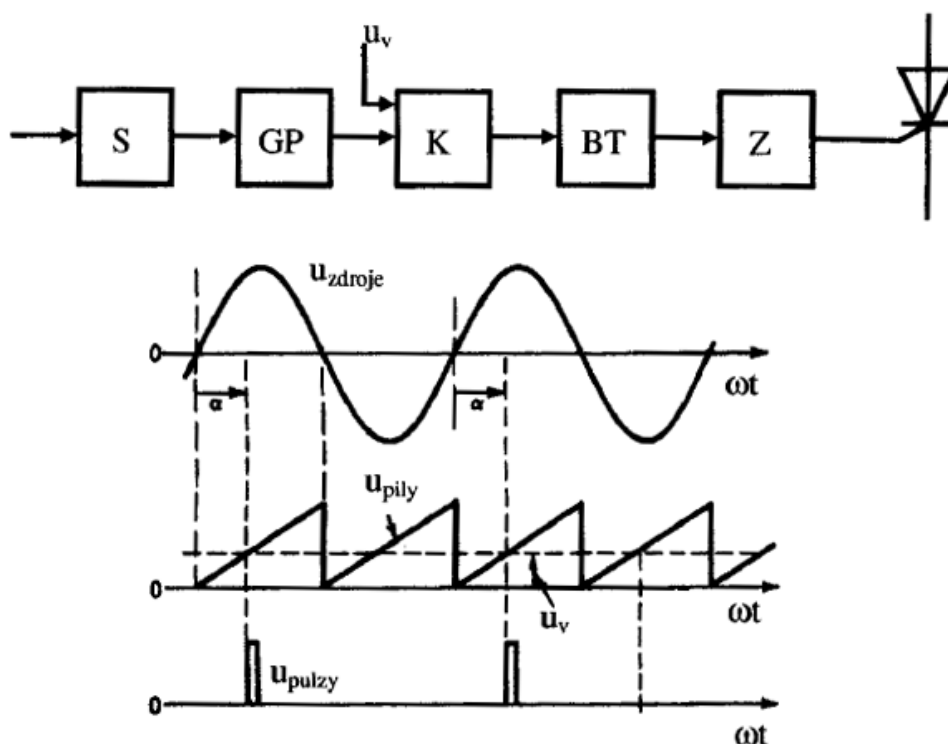


Obr. 3.2 Režimy práce usměrňovače [6]

Druhý případ na obr. 3.2 vpravo je střídačový režim. Jde o případ rekuperace energie z brzdícího motoru, kdy indukované napětí zátěže přesahuje napětí zdroje a při úhlu řízení větším než 90° dodává motor energii do zdroje. [6]

3.1.3 Řídící obvody usměrňovačů

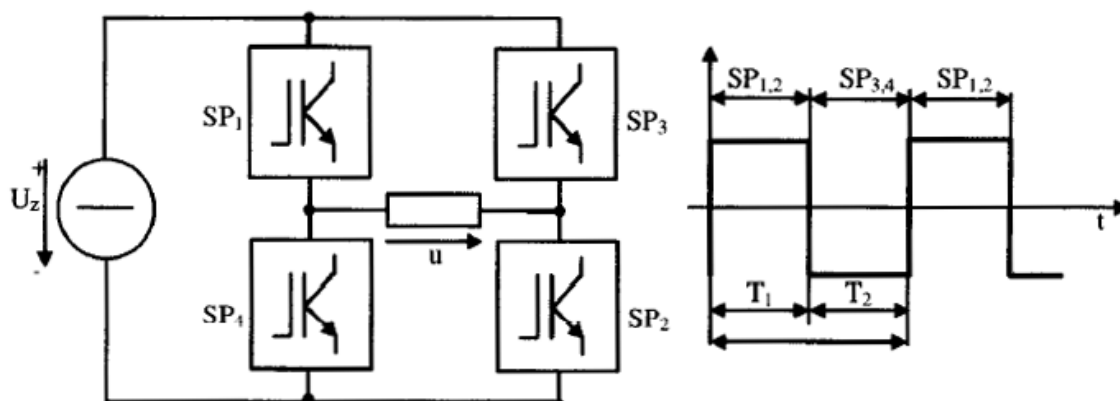
Na obr. 3.3 nahoře je blokové schéma řídicího obvodu usměrňovače. Blok synchronizace (S) zajišťuje nebo určuje počátek úhlu α typicky při průchodu průběhu nulou, tedy definuje funkci sinus. Tento obvod často bývá doplněn filtrem, který propouští pouze první harmonickou, kvůli správné detekci počátku. Blok generátor pily (GP) vytváří pilový průběh, který je synchronizován společně se sinusovým vstupem. Komparátor (K) porovnává okamžitou hodnotu napětí pily s řídicím napětím U_v a určuje tak okamžik vytvoření pulzu pro tvarovací blok (BT), který upraví pulz podle požadavků použitých součástek. Blok zesilovače (Z) posiluje pulz opět podle požadavků použitých součástek. Na obr. 3.3 dole vidíme průběh tvorby řídicího pulzu pro usměrňovač. [3], [6]



Obr. 3.3 Blokové schéma řídicího obvodu usměrňovače [6]

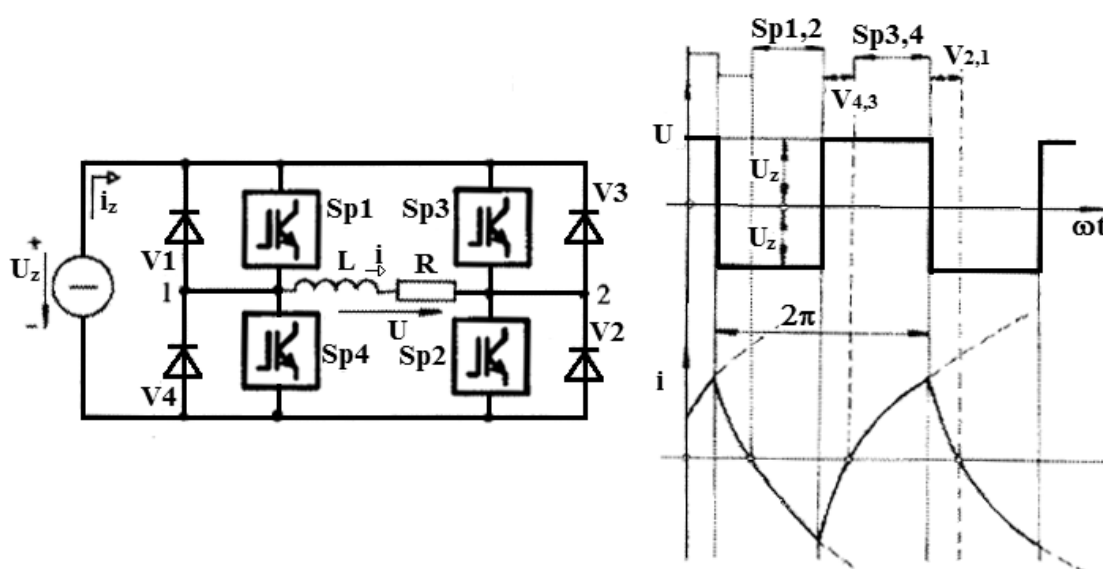
3.2 Elektronické střídače

Typickým zapojením střídače je tzv. H můstek. Na obr. 3.4 je blokové schéma spolu s průběhem výstupního napětí na odporové zátěži. Střídání stejnosměrného napětí probíhá křížovým spínáním tranzistorů, tedy jsou najednou sepnuty vždy jen dva tranzistory a to v pořadí SP1, SP2 a SP3, SP4.



Obr. 3.4 Blokové schéma střídače [6]

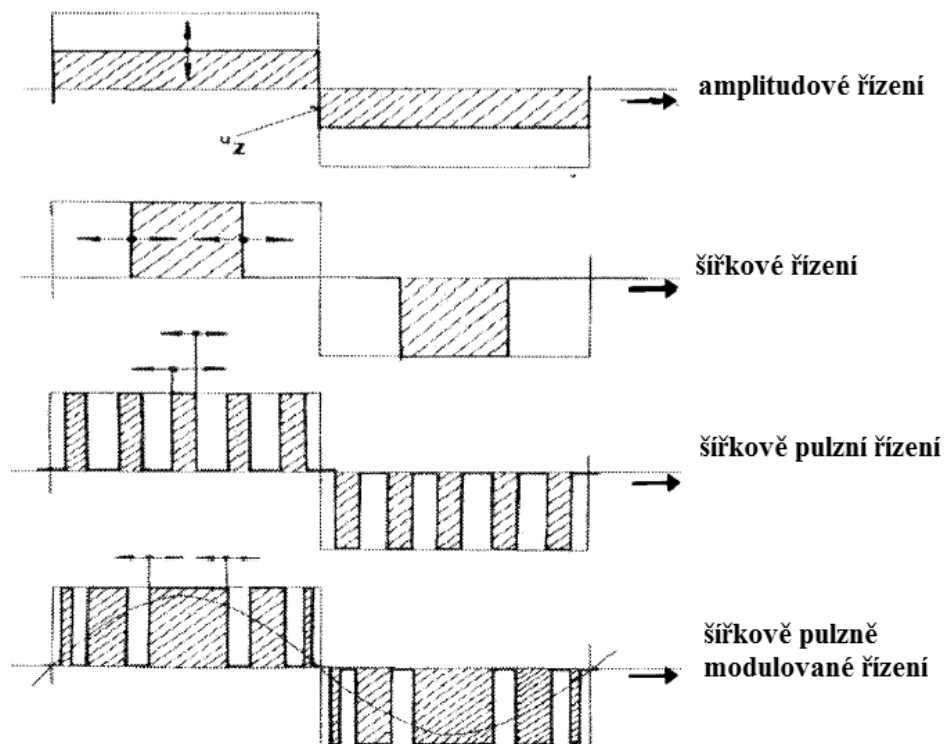
V praxi se prakticky nikdy nesetkáme pouze s odporovou zátěží, proto musí být každý tranzistor chráněn proti přepětí na indukčnosti zátěže. Každý tranzistor má k sobě paralelně zapojenou diodu v závěrném směru, která při rozpojení obvodu, tedy při vypnutí tranzistoru, vybijí nabitou indukčnost směrem do zdroje. Bez těchto ochranných diod by došlo k nárůstu napětí na tranzistorech a mohlo by dojít k jejich zničení. Na obr. 3.5 vlevo je nakresleno blokové schéma takového střídače, na stejném obrázku vpravo, průběhy napětí a proudu na zátěži. Všimněme si, že k dobám sepnutí tranzistorů $Sp_{1,2}$ a $Sp_{3,4}$ přibyla ještě doba mezi nimi $V_{4,3}$ a $V_{2,1}$. V případě že tranzistory $Sp_{1,2}$ vypínají, nemohou se sepnout tranzistory $Sp_{3,4}$ jelikož na indukčnosti nemůže dojít k náhlému obratu směru proudu a proto se musí komutace pozdržet než dojde, za dobu $V_{2,1}$ respektive $V_{4,3}$, k poklesu proudu na zátěži. [6]



Obr. 3.5 Blokové schéma střídače pracující do RL zátěže [6]

3.2.1 Řízení elektronických střídačů

Na obr. 3.6 jsou naznačeny způsoby řízení výstupního napětí střídačů.



Obr. 3.6 Průběhy řízení střídačů [6]

3.2.1.1 Amplitudové řízení

Tímto způsobem řízení se prakticky neřídí obvod střídače, nýbrž střídač jen komutuje stejnosměrné napětí, které je již regulováno. Z toho vyplývá potřeba použití regulovaného zdroje napětí a nebo jeho realizování řízeným usměrňovačem. Vzhledem k těmto skutečnostem se toto řízení příliš nepoužívá. [6]

3.2.1.2 Šířkové řízení

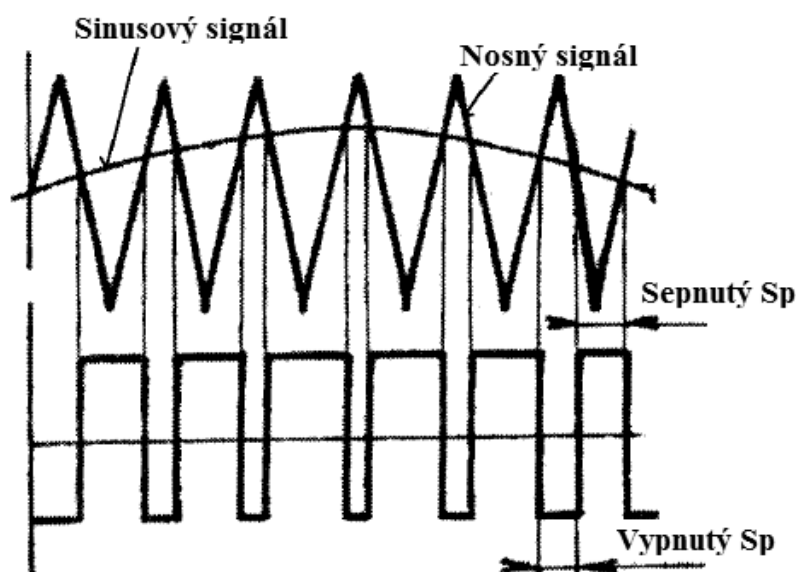
Tranzistory střídače se zapnou a vypnou vždy jen jednou za půlperiodu, jak je patrné z obrázku 3.6, přičemž pomyslný střed půlperiody je vždy stejný. Šířka pulzu se rozvíjí od středu do krajů, kde je napětí na výstupu maximální. Tento způsob řízení není příliš vhodný, jelikož charakter průběhu vytváří poměrně vysoký obsah vyšších harmonických oproti jiným možnostem řízení. [6]

3.2.1.3 Šířkově pulzní řízení

Jedná se prakticky o vylepšení průběhu napětí šířkového řízení. Místo jednoho pulzu je vytvářena série krátkých pulzů, jejichž šířka je dána požadovaným napětím na výstupu střídače. Je patrné že jde o snahu omezit obsah vyšších harmonických v průběhu napětí. [6]

3.2.1.4 Šířkově pulzně modulované řízení

Vytváření pulzů výstupního napětí není dán pouze řídicím napětím jako tomu bylo u šířkově pulzního řízení, ale je dán modulačním signálem, který má tvar požadovaného napětí na výstupu, obvykle sinusový průběh. Sinusový modulační signál, s kmitočtem výstupního napětí, je vytvářen číslicovými obvody a je porovnáván s nosným pilovým signálem o několikanásobném kmitočtu než signál modulační. V okamžiku, kdy je modulační signál vyšší než nosný spínač je sepnutý a v opačném případě je spínač vypnutý, jak je nakresleno na obr. 3.7. [6]

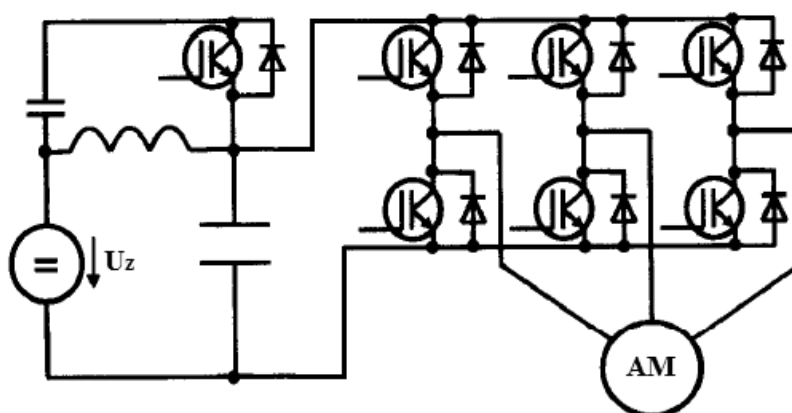


Obr. 3.7 Princip pulzně šířkové modulace [6]

3.2.2 Střídače s měkkou komutací

Ke stejnosměrnému napájecímu zdroji je připojen rezonanční obvod jehož kmitočet je násobně vyšší než kmitočet výstupního napětí, řádově 100 kHz. Rezonanční obvod periodicky kmitá a vytváří tak na kolektorech tranzistorů okamžik, kdy napětí nebo proud tekoucí přes

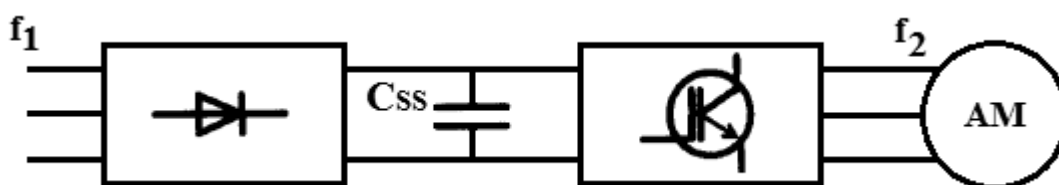
tranzistory klesne k nule, což je ideální stav pro přepnutí větve střídače. Tímto řešením se sníží spínací ztráty měniče a omezí přepětí na induktivních zátěžích a motorech. [6], [7]



Obr. 3.8 Střídač doplněný rezonančním meziobvodem [6]

3.2.3 Nepřímé měniče kmitočtu

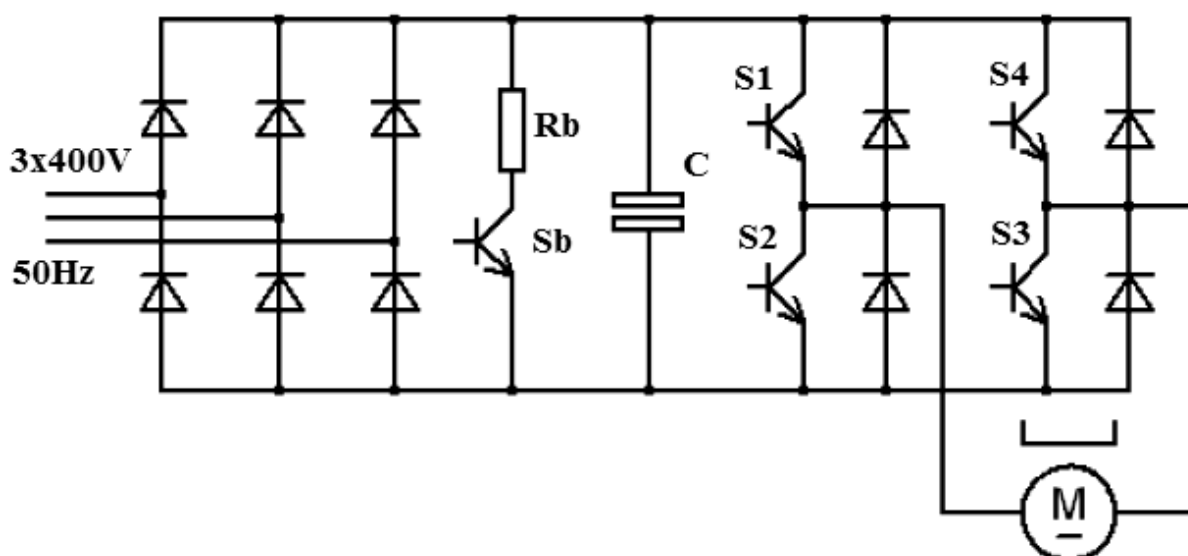
Jedná se o spojení usměrňovače se střídačem. Vstupním článkem je neřízený usměrňovač, který usměrní střídavé vstupní napětí, většinou síťové, o daném kmitočtu na stejnosměrné napětí, nebo proud pokud se jedná o proudový měnič. Výstupním článkem je střídač, který ze stejnosměrného napětí vytvoří střídavé napětí o zvoleném kmitočtu a velikosti. Pokud bude na výstupu střídač napětí, mluvíme o nepřímém měniči kmitočtu se stejnosměrným napěťovým meziobvodem (obr. 3.9). Měnič využívá velkého kondenzátoru k vyhlazení stejnosměrného napětí na vstupu střídače a proto se meziobvod, z pohledu střídače, chová jako zdroj napětí. Tento měnič se dnes velmi často používá pro regulaci střídavých motorů. [6]



Obr. 3.9 Blokové schéma nepřímého měniče kmitočtu [6]

3.2.4 Čtyřkvadrantové pulzní měniče

Měnič je vhodný zejména pro napájení a regulaci stejnosměrného motoru. Jedná se o měnič s napěťovým meziobvodem. Konstrukce je prakticky totožná s nepřímým měničem kmitočtu s tím rozdílem, že koncový stupeň, tedy tranzistorový „H můstek“, neplní funkci střídače, ale funkci regulátoru napětí, jež je řízený pulzně šířkovým modulátorem a také umožňuje reverzaci stejnosměrného motoru.



Obr. 3.10 Čtyřkvadrantový stejnosměrný pulzní měnič [7]

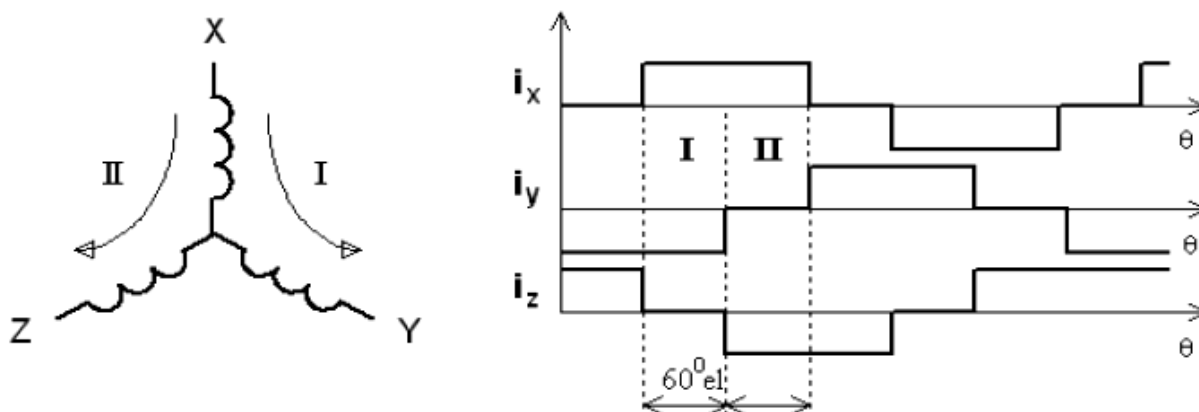
Měnič na obr. 3.10 je napájen neřízeným můstkovým usměrňovačem ze třífázové rozvodné sítě. Stejnosměrný meziobvod tvoří kondenzátor spolu s brzdícím odporem (R_b) a k němu náležícím spínačem (S_b). Pokud motor přechází do stavu brzdění, sepne se tranzistor (S_b) a tím se uzavře obvod mezi motorem, nulovacími diodami a brzdícím odporem (R_b). Pro zvýšení účinnosti měniče ho lze opatřit řízeným usměrňovačem, který zajistí přesun energie z motoru do zdroje a umožní její rekuperaci při brzdění. [7]

3.3 Elektronicky komutované stroje

Elektronicky komutovaný motor nebo také bezkartáčový motor je výsledkem řešení pohonu se stejnosměrným motorem, ale bez nutnosti použití mechanického komutátoru, který má řadu nevýhod a komplikací. Aby odpadla nutnost mechanické komutace „přesunulo se“

vinutí kotvy do statoru a permanentní magnety statoru do rotoru a jelikož komutátor zajišťoval střídání stejnosměrného napájení kotvy, musel tuto funkci převzít elektrický měnič.

Na obr. 3.11 jsou nakresleny průběhy proudu vinutím statoru elektricky komutovaného motoru. Podle údajů čidla otáček je přepínán proud vinutím statoru tranzistory měniče. Proud teče vždy jen dvěma cívkami statoru jak je naznačeno na obr. 3.11 vlevo.



Obr. 3.11 Průběhy proudu vinutím statoru [7]

Konstrukcí statoru se motor podobá asynchronnímu nebo synchronnímu motoru, rotor se pak skládá z permanentních magnetů, většinou z tvrdých feritů nebo vzácných zemin, které jsou umístěny buďto na povrchu rotoru nebo uvnitř rotoru opatřeným pólovými nástavci.

Jelikož pro řízení měniče je potřeba údaj o poloze a otáčkách rotoru musí být tedy opatřen čidlem polohy, což může být realizováno Hallovou sondou nebo optickým snímačem a tachodynamem, který je rovněž bezkomutátorový. [7]

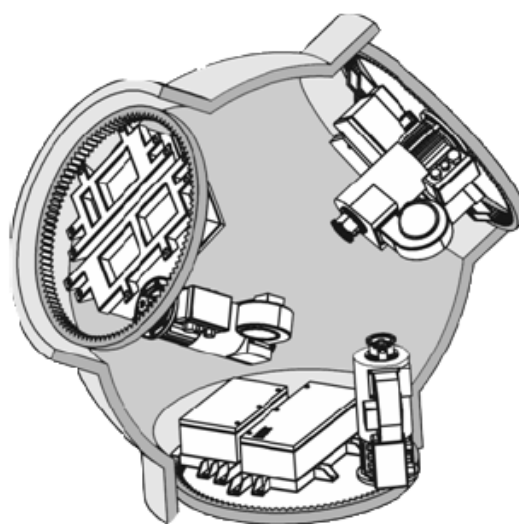
4 Současné použití

4.1 Stejnosměrný stroj jako aktuátor

Jak už bylo řečeno v předchozím textu, stejnosměrný stroj je bezesporu vhodný pro aplikace vyžadující nenáročnou nebo levnou regulaci. Další výhodou je fakt, že dokáže pracovat s nízkým a tudíž bezpečným napětím. Ale na druhou stranu se již nehodí pro výkonové aplikace, vlivem jeho náročné údržby.

Jedním z možností použití stejnosměrného motoru je použití jako aktuátor. Příkladem takového použití je větrná elektrárna. Na obr. 4.1 je načrtnuta soustava aktuátorů pro větrnou elektrárnu, která zajišťuje naklápění lopatek a tím řídí vztlak na listech vrtule a tím i záběrný

moment vrtule v závislosti na síle větru. Aktuátory také zajišťují funkci aerodynamické brzdy v případě potřeby nouzového zastavení vlivem silného větru, nebo poruchy. Součástí každého ze tří stejnosměrných aktuátorů je i soustava měničů, které zajišťují napájení aktuátoru ze třífázové sítě a k nimž náleží řídicí logika. Dalšími součástmi aktuátorů jsou jednotky s relé, pojistkami a záložními bateriemi pro případ výpadku hlavního zdroje.

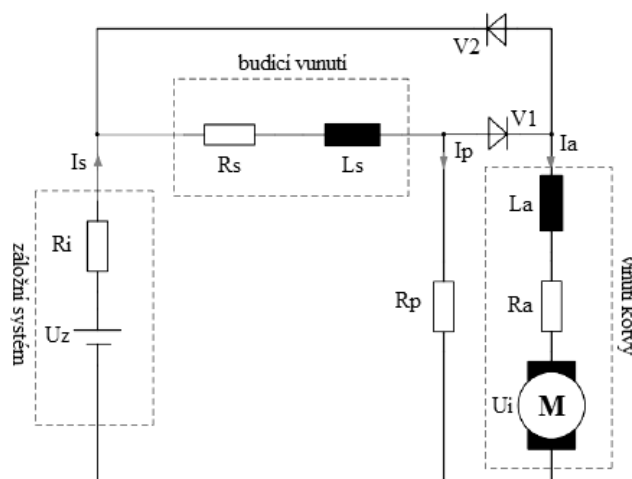


Obr. 4.1 Soustava aktuátorů pro třílistou vrtuli [12]

V případě poruchy, odstávky nebo výpadku elektrické rozvodné sítě je potřeba nouzově natočit lopatky vrtule tak, aby se rotor bez odporu alternátoru nekontrolovatelně neroztočil a nezničil. To zajišťuje záložní systém, který se během provozu průběžně dobíjí, a který při výpadku hlavního zdroje napájí stejnosměrné motory uvnitř vrtule. Doba potřebná k natočení listu vrtule je cca 10s. I tyto motory mohou využívat rekuperace energie a šetřit tak životnost baterie, případně ušetřit energii, která by posléze byla odčerpána baterií z hlavního zdroje.

Obrázek 4.2 ukazuje náhradní zapojení obvodu napájení stejnosměrného motoru ze záložního zdroje. V motorickém režimu je otevřena dioda V_1 a naopak dioda V_2 uzavřena. Proud tak teče z napájecího zdroje přes budící vinutí a přes paralelní kombinaci odporu R_p a vinutí kotvy. Buzení motoru je zapojeno sériově k obvodu kotvy, což je patrné ze stejného obrázku. Momentová charakteristika sériově buzeného motoru je velmi nelineární a při zatížení a nízkých otáčkách je moment takto zapojeného motoru velmi vysoký. Pro snížení záběrného momentu a linearizaci jeho průběhu je použit paralelní odpor R_p . Odpor R_p také snižuje moment motoru bez zátěže a tím zabraňuje jeho přetočení. Pokud dojde k situaci, ať už vlivem gravitace nebo jiných vnějších podmínek, že se list vrtule naklápí rychleji než by se

točil motor, přejde motor do generátorického režimu. V generátorickém režimu se v obvodu kotvy indukuje protinapětí U_i , které je větší než napětí zdroje, dojde k uzavření diody V_1 a otevření diody V_2 a energie se přesouvá směrem do zdroje. Jelikož při rekuperaci není odpojen R_p , protéká jím proud, což má za následek udržení magnetizace obvodu buzení a omezení nabíjecího proudu. [12]



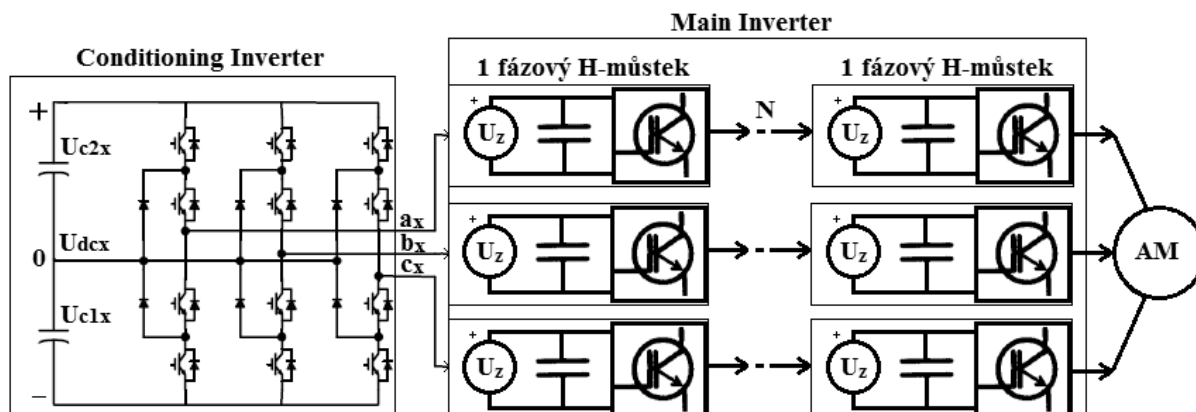
Obr. 4.2 připojení motoru na záložní systém [12]

4.2 Hybridní měnič

V dnešní době jsou stále atraktivnější víceúrovňové měniče. Oblíbenými variantami pro víceúrovňové měniče jsou topologie NPC (neutral-point clamped) a kaskádní spojení jednofázových H-můstků. Měnič NPC má poměrně jednoduchou strukturu a používá se ve středních a nízkých napěťových hladinách. Pro lepší průběh výstupního napětí je pro NPC měnič zapotřebí těžkého a drahého LC filtru, což je zřejmá nevýhoda. Naopak druhý uvedený měnič, složený z kaskády dílčích jednofázových měničů, se běžně používá i pro vysokonapěťové aplikace či pohony v průmyslu. Tyto měniče mají obvykle pět nebo více stupňů v kaskádě a mají celkem dobré vlastnosti co se týče vstupního proudu a výstupního napětí. Zřejmé nevýhody těchto měničů jsou vysoký počet použitých součástek, včetně jejich řízení a poměrně složitý vstupní transformátor.

Hybridní měnič (obr. 4.3) je takovým kompromisem mezi dvěma topologiemi a sdružuje v sobě výhody obou měničů. Skládá se ze dvou částí, s tzv. „Conditioning Inverter“ a tzv. „Main Inverter“ neboli z „přípravného“ měniče a hlavního měniče. Každý jednofázový H-můstek je opatřen svým zdrojem stejnosměrného napětí jak je naznačeno na obr. 4.3.

Třístupňový NPC měnič (obr.4.3 vlevo) používá jako zdroj stejnosměrného napětí tzv. „ultra kapacitory“. V případě rekuperačního brzdění může být přebytečná energie přečerpána do těchto kapacitorů a tím se samozřejmě zvýší celková účinnost pohonu.



Obr. 4.3 Hybridní kaskádní měnič

Oba měniče jsou zapojeny do série a tudíž se jejich výstupní napětí sčítá. Pokud bychom uvažovali $N = 1$, tedy jednostupňový hlavní měnič, dostali bychom na výstupu v každé fázi napětí buď U_z , nebo $-U_z$ a nebo 0 . Stejnosměrné napětí měniče vlevo na obr. 4.3 je dáno vztahem (4.1) [13].

$$\frac{U_{dcx}}{2} = U_{c1x} = -U_{c2x} \quad (4.1)$$

Pokud bychom sečetli obě napětí dostali bychom na výstupu měniče devět napěťových hladin a to je pouze pro jednostupňový hlavní měnič, běžně se používají tři stupně. Celkové výstupní napětí U je dáno vztahy (4.2 – 4.5) [13].

$$U = \pm(U_z + \frac{U_{dcx}}{2}) \quad (4.2)$$

$$U = \pm(U_z - \frac{U_{dcx}}{2}) \quad (4.3)$$

$$U = \pm U_z \quad (4.4)$$

$$U = \pm \frac{U_{dcx}}{2} \quad (4.5)$$

To je velice vhodné pro napájení a regulaci asynchronního motoru, jelikož při změně otáček je třeba měnit jak výstupní kmitočet tak i napětí.

Závěr

Výhody a nevýhody stejnosměrného stroje jsou jasné. Vždy je třeba zvážit kompromis aby výhody, při použití stejnosměrného motoru v nějaké aplikaci, převažovali nad nevýhodami tohoto stroje včetně použití měniče k jeho řízení. Stejnosměrné stroje se dnes ještě používají i v aplikacích, v kterých by bylo vhodnější použít střídavý stroj, jako například v železniční dopravě a těžkém průmyslu, ale z různých důvodů tam stále přetrvávají. Na druhou stranu jsou stejnosměrné stroje pro některé aplikace naopak velice vhodné, jako například zde popisovaný aktuátor ve větrné elektrárně. Zřejmá výhoda použití stejnosměrného motoru spočívá v jednoduchosti záložního systému, jelikož je kapacita záložního zdroje omezená a proto je vhodné napájet motor přímo bez dalších ztrát v případném měniči. V budoucnu lze očekávat úbytek použití stejnosměrného stroje a ten se nejspíš bude uplatňovat jen u malých výkonů, protože ho nahradí stejnosměrný stroj s elektronickou komutací. Stroje s elektronickou komutací zatím omezují polovodičové měniče, které jsou pro řízení stroje nezbytné a které mají zvláště při velkém výkonu stroje velké tepelné ztráty. Pro tyto stroje je tudíž nezbytné výkonné chlazení pro měnič a pro permanentní magnety, které se při vysokých teplotách odmagnetují.

Tepelné ztráty polovodičových měničů se dají částečně odstranit spojením dílčích měničů do kaskády, které tak mohou pracovat s nižším napětím a tepelné ztráty nejsou rozloženy jen na jednom měniči. Spojováním tak vzniknou zajímavá zapojení jako je například zde popisovaný hybridní měnič, který je pro napájení asynchronních motorů velice výhodný.

Použitá literatura

- [1] MAYER, Daniel. *Pohledy do minulosti elektrotechniky: objevy, myšlenky, vynálezy, osobnosti*. 2., dopl. vyd. České Budějovice: Kopp, 2004. 427 s. ISBN 80-7232-219-2.
- [2] VONDRÁŠEK, František. *Výkonová elektronika svazek I*, ZČU Plzeň 1994. ISBN 80-7082-136-1
- [3] VONDRÁŠEK, František. *Výkonová elektronika svazek II*, ZČU Plzeň 1994. ISBN 80-7082-137-X
- [4] VONDRÁŠEK, František. *Výkonová elektronika svazek III*, ZČU Plzeň 1998. ISBN 80-7082-485-9
- [5] STENGL, Jens Peer a TIHANYI, Jenö. *Výkonové tranzistory MOSFET*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 1999. 191 s. ISBN 80-86056-54-6.
- [6] KŮS, Václav. *Elektrické pohony a výkonová elektronika*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005. 180 s. ISBN 80-7043-422-8.
- [7] SKALICKÝ, Jiří. *Elektrické regulované pohony* [online] VUT Brno 2007. [cit. 25.4.2013]. Dostupné z: www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=18964
- [8] KREJČÍ, František. *Stejnoseměrné stroje jak se o nich psalo kdysi...* [online] [cit. 19.4.2013]. Dostupné z: <http://elektrika.cz/data/clanky/stejnosemerne-stroje>
- [9] *Stejnoseměrné stroje* [online] [cit. 2.4.2013] Dostupné z: <http://www.uloz.to/x1VytMz/stejnosemerne-stroje-pdf>
- [10] SOKOL, Zdeněk. *Stejnoseměrné stroje* [online] [cit. 19.4.2013] Dostupné z: <http://www.spse.dobruska.cz/download/sokol/ss.pdf>

- [11] MĚŘIČKA, J.; HAMATA, V.; VOŽENÍLEK, P.: *Elektrické stroje*. Praha: ČVUT, 1994. 311 s. ISBN 80-01-01020-1
- [12] ROSMANN, T.; SOTER, S., "Regenerative Operation of DC-Series Machines in Pitchsystems for Multimegawatt Windturbines," *Industry Applications Society Annual Meeting, 2008. IAS '08. IEEE* , vol., no., pp.1,7, 5-9 Oct. 2008 [online] [cit. 12.5.2013]
Dostupné z: [http://ieeexplore.ieee.org/stamp/
stamp.jsp?tp=&arnumber=4658992&isnumber=4658788](http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4658992&isnumber=4658788)
- [13] JIANYE Rao; YONGDONG Li, "Power flow management of a new hybrid cascaded multilevel inverter," *Electrical Machines and Systems, 2007. ICEMS. International Conference on* , vol., no., pp.58,63, 8-11 Oct. 2007 [online] [cit. 12.5.2013]
Dostupné z: [http://ieeexplore.ieee.org/stamp/
stamp.jsp?tp=&arnumber=4412140&isnumber=4411938](http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4412140&isnumber=4411938)
- [14] KUSIC, G.L.; FARR, C.; FINK, M., "VSC-fed inside-out permanent magnet DC machines for wind generators," *Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE* , vol., no., pp.1,6, 22-26 July 2012 [online] [cit. 22.5.2013]
Dostupné z: [http://ieeexplore.ieee.org/stamp/
stamp.jsp?tp=&arnumber=6345399&isnumber=6343905](http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6345399&isnumber=6343905)