

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Topologie měničů napětí pro trakční pohony

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2015/2016

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

Jméno a příjmení: **Simona FRIEDLOVÁ**
Osobní číslo: **E13B0243P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Topologie měničů napětí pro trakční pohony**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte rešerši současně používaných topologií.
2. Vytvořte simulační model vybraného měniče.
3. Návrhněte algoritmy řízení a regulace.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 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. Ladislav Poljak
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2015
Termín odevzdání bakalářské práce: 2. června 2016


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
Vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na varianty trakčních měničů napětí. Teoretická část se věnuje rozdílům v zapojeních podle napájecího napětí a typu použitého motoru. Zmíněny jsou i vícesystémová vozidla, která jsou schopna fungovat na více hladinách napájecího napětí, a také hybridní vozidla. V praktické části se zabývám simulací řízení asynchronního stroje pomocí nepřímého měniče kmitočtu s napěťovým pulzním usměrňovačem a napěťovým střídačem. K simulaci bylo použito prostředí Matlab - Simulink s toolboxem Plecs, kde nalezneme polovodičové součástky.

Klíčová slova

třífázový napěťový střídač, jednofázový pulzní usměrňovač, asynchronní motor, střídavá trolej, stejnosměrná trolej, frekvence, úhel řízení, PI regulátor

Abstract

The bachelor thesis is focused on variants of traction inverters. The theoretical part deals with the differences in the wiring in accordance with the supply voltage and the type of drive. Mentioned are also multi-system vehicles that are able to operate on multiple levels of the supply voltage, and hybrid vehicles. The practical part deals with the controlling of induction motor powered from AC trolley. For the simulation was used Matlab - Simulink with a library Plecs, where you can find semiconductor components.

Key words

three-phase voltage inverter, single-phase pulse rectifier, induction motor, AC trolley, DC trolley, Frequency, control angle, PI controller

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala 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.

.....
podpis

V Plzni dne 1.6.2016

Simona Friedlová

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu bakalářské práce Ing. Ladislavu Poljakovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 STEJNOSMĚRNÝ NAPÁJECÍ SYSTÉM	12
1.1 VOZIDLA SE STEJNOSMĚRNÝMI MOTORY.....	12
1.1.1 Snižovací pulzní měnič napětí.....	13
1.1.2 Zvyšovací pulzní měnič napětí.....	14
1.2 VOZIDLA S ASYNCHRONNÍMI A SYNCHRONNÍMI MOTORY.....	15
1.2.1 Napěťový střídač - třífázové můstkové spojení.....	17
2 STŘÍDAVÝ NAPÁJECÍ SYSTÉM	20
2.1 VOZY S ASYNCHRONNÍMI A SYNCHRONNÍMI MOTORY.....	21
2.1.1 Jednofázový napěťový pulzní usměrňovač.....	22
2.2 VOZY SE STEJNOSMĚRNÝMI MOTORY.....	22
2.2.1 Čtyřkvadrantový usměrňovač.....	23
Řízení s okružovým proudem.....	24
Bez okružového proudu.....	25
3 VÍCESYSTÉMOVÁ TRAKČNÍ VOZIDLA	26
4 HYBRIDNÍ VOZIDLA	27
5 SIMULAČNÍ MODEL TRAKČNÍHO MĚNIČE	28
6 NÁVRH ŘÍZENÍ	30
7 VÝSLEDKY SIMULACE	33
ZÁVĚR	36

Úvod

Způsobů zapojení trakčních měničů je mnoho. Celkové zapojení záleží na typu a hladině napájecí sítě, druhu a počtu použitých měničů, typu motoru, použitému řízení, nárocích, ceně, výrobci atd. Jelikož je tolik možností a toto téma je široké, tak jsem se snažila tuto práci pojmout stručně a obecně.

V teoretické části jsem rozebrala základní zapojení měničů, jak na střídavé troleji, tak na stejnosměrné, se stejnosměrnými i střídavými motory. Každá z těchto možností, má své specifika a způsob, jak dostat napětí z troleje až k motoru, což je náplní této práce. V kapitolách také popisují principy jednotlivých měničů. Dále jsem udělala malý náhled do problematiky vícesystémových a hybridních vozů.

V praktické části jsem nasimulovala trakční měnič a navrhla mu řízení. Používaných pohonů je velké množství. Já jsem si vybrala pohon, který se hojně využívá pro drážní vozidla napájených ze střídavé sítě. U tohoto pohonu se napětí dále transformuje transformátorem na nižší napětí, dále usměrněné pulzním usměrňovačem a nakonec je asynchronní motor napájený třífázovým napěťovým střídačem. Jednofázový napěťový pulzní usměrňovač jsem volila, protože umožňuje rekuperaci a odebíraný proud je ve fázi s napájecím napětím. Řídila jsem ho pomocí regulace úhlu ϵ . Třífázový napěťový střídač je řízen skalárním řízením. Asynchronní motor v kombinaci s nepřímým měničem kmitočtu jsem vybrala z důvodu jejich rozšířenosti. Simulace byla prováděna v programu Matlab - Simulink za pomoci speciálního toolboxu Plecs.

Seznam symbolů a zkratek

α	řídící úhel [°]
α_I	řídící úhel usměrňovače I [°]
α_{II}	řídící úhel usměrňovače II [°]
α_{\min}	minimální řídící úhel [°]
α_{\max}	maximální řídící úhel [°]
C	kondenzátor [F]
C_f	kondenzátor kapacitního filtru [F]
D_1, D_2	diody 1, 2
D_b	dioda brzdného odporu
f	frekvence [Hz]
k_p	proporcionální konstanta regulátoru
k_i	integrační konstanta regulátoru
L	indukčnost, tlumivka [H]
p	činný výkon, okamžitá hodnota [W]
PWM	pulzně šířková modulace
R	činný odpor zátěže [Ω]
R_b	brzdný odpor [Ω]
R_e	ekvivalentní odpor obvodu [Ω]
R_{ei}	ideální ekvivalentní odpor [Ω]
R_p	odpor překlenutý tyristorovým spínačem [Ω]
T	perioda střídavého napětí a proudu, perioda spínání měniče [s]
T_1, T_2	časový interval, ve kterém je spínač zapnut a rozepnut [s]
T_{r1}, T_{r2}	tranzistory 1, 2
τ_i	časová konstanta regulátoru [s]
U	napětí zdroje [V]
u_1, u_2, u_3	okamžité hodnoty fázových napětí zdroje [V]
u_{10}, u_{20}, u_{30}	fázová napětí třífázového střídače [V]
U_c	napětí na kondenzátoru [V]
U_d	střední hodnota usměrněného napětí nebo napětí na zátěži měniče [V]
u_d	okamžitá hodnota usměrněného napětí nebo napětí na zátěži měniče [V]
U_{dI}	usměrněné napětí usměrňovače I [V]
U_{dII}	usměrněné napětí usměrňovače II [V]

u_{dA}, u_{dK}	..... usměrněné napětí anodové a katodové skupiny [V]
U_{di}	..... U_d idealizovaného usměrňovače při nepřerušovaném proudu [V]
U_{dio}	..... hodnota U_{di} při $\alpha = 0$ [V]
U_i	..... zdroj napětí, který je obsažen v zátěži [V]
U_m	..... napětí motoru [V]
U_{cw}	..... požadované napětí na kondenzátoru [V]
u_p	..... napětí pily [V]
u_{ref}	..... řídicí napětí [V]
u_{z1}, u_{z2}, u_{z3}	..... okamžité hodnoty fázového napětí na zátěži třífázového střídače [V]
$u_{z12}, u_{z13}, u_{z23}$	..... okamžité hodnoty sdruženého napětí na zátěži třífázového střídače [V]
V	..... polovodičová, spínací součástka
V0	..... nulová dioda
VR	..... zpětná dioda
x	..... regulační odchylka
z	..... poměrná doba sepnutí
Z	..... zátěž [Ω]
Ψ	..... úhel sepnutí polovodičové součástky [$^\circ$]
γ	..... bezpečnostní úhel [$^\circ$]
ε	..... zatěžovací úhel [$^\circ$]
ϑ	..... úhel sítě [$^\circ$]
ω	..... úhlová frekvence [rad/s]

1 Stejnoseměrný napájecí systém

Tento typ trolejí byl použit v historii jako první. Protože se zvyšovali požadavky na výkon a vzdálenost přenášeného výkonu, muselo se zvyšovat i napětí. Nejpoužívanějšími hladinami napětí jsou 600 V nebo 750 V pro vozidla MHD, 1500 V pro městské rychlodráhy a železnice a 3000 V pro hlavní dráhy. [3]

Měničy jsou zdrojem napětí. Napájené jsou z třífázové sítě, měničy MHD jsou většinou napájené z 22 kV sítě přes diodové šestipulzní můstkové usměrňovače a dráhy ze 110 kV sítě přes speciální měničové transformátory a diodové dvanáctipulzní můstkové usměrňovače. [3]

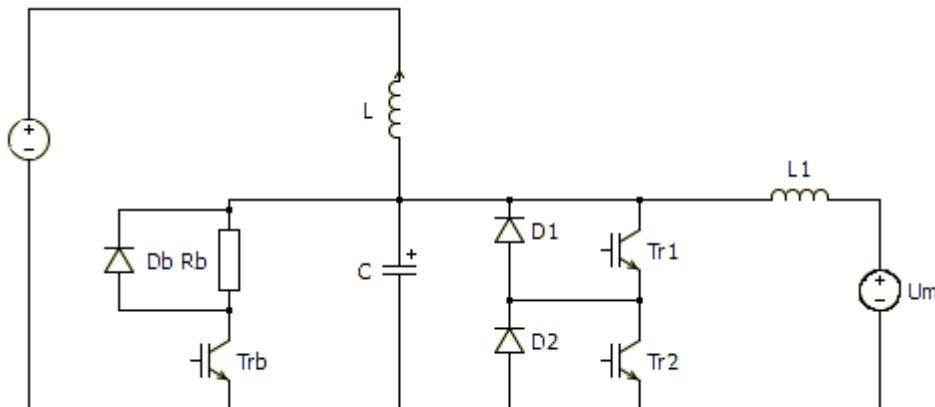
Díky polovodičové technice jsme se v první řadě mohli odpoutat od používání ztrátové odporové stupňové regulace (spouštění stejnosměrných motorů) a později jsme mohli přejít na bezkomutátorové 3f trakční motory s elektronickými střídači. [3] [4]

V dnešní době můžeme u systému 3 kV pomocí polovodičových součástek a jejich řízení napájet vozidla přímo z trakčního vedení. Výbava vozidel tohoto systému je vcelku jednoduchá, zabírá málo místa a je i levná. Pro stejnosměrné napájecí systémy umožňujeme vozidlům rekuperaci. Rekuperace je velice výhodná pro MHD a pro hustou příměstskou dopravu. Tam, kde je provoz nižší, může dojít k tomu, že energie nemusí mít odběr. Síť je přetížitelná jen po určitou dobu při určitém zvýšeném napětí. Pro tyto případy jsou vozidla vybaveny ještě záskokovým systémem brzdění do brzdového odporníku. [4]

1.1 Vozidla se stejnosměrnými motory

Vozidlo je napájeno ze stejnosměrné troleje. Na vstupu máme vyhlazovací cívku a kondenzátor, ke kterému je paralelně připojen snižovací a zvyšovací pulzní měnič a také měnič (brzděného) odporu. Pokud se nacházíme v režimu jízda, je ve funkci snižovací pulzní měnič (T_{r1} a D_2). S jeho pomocí dodáváme potřebné snížené napětí. Když chceme brzdit použijeme zvyšovací pulzní měnič (T_{r2} a D_1). Odebíraná energie se akumuluje v kondenzátoru. Pokud máme na síti jiný odběr, energie se přesune tam. V případě, že není jiné vozidlo, které by odebíralo energii ze sítě a napětí na kondenzátoru se zvýší, spouštíme

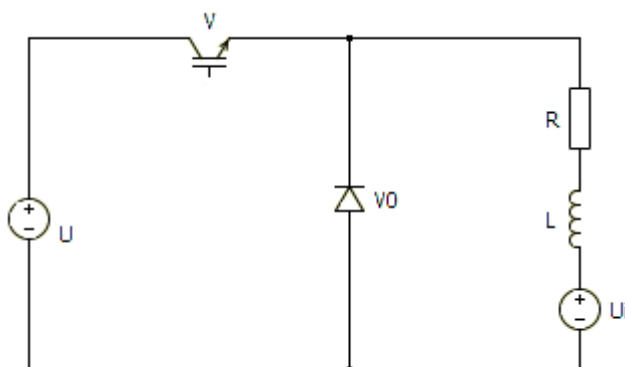
T_{rb} (pulzní měnič odporu) a v brzdném odporu maříme přebytečnou energii. Po vypnutí T_{rb} odporem stále prochází proud za což může parazitní indukčnost a proto k němu máme paralelně připojenou diodu D_b a zbytkový proud procházející odporem se uzavře přes ni. [9]



Obr. 1.1.1 Zjednodušené zapojení stejnosměrného motoru

1.1.1 Snižovací pulzní měnič napětí

Využívají se jako periodicky spínaný polovodičový měnič. Perioda spínání je T . Doba T_1 je pro sepnutý spínač a doba T_2 pro rozepnutý spínač. Měnič se skládá ze spínače V a nulové diody V_0 . Tento typ měniče nám umožňuje řídit napětí na zátěži na hodnotu menší než je napětí zdroje. Ve schématu na obr.1.2.1.1 je zátěž tvořena z R , L , U_i přičemž U_i je menší než napětí zdroje U . [6]



Obr. 1.1.1.1 Snižovací pulzní měnič napětí

Princip:

Při sepnutém spínači V, tedy v době T_1 máme na zátěži napětí zdroje $U = ud$. Proud se uzavírá přes spínač a zátěž. Tento proud má tvar exponenciály narůstající k hodnotě:

$$\frac{U - U_i}{R} \quad (1.1.1.1)$$

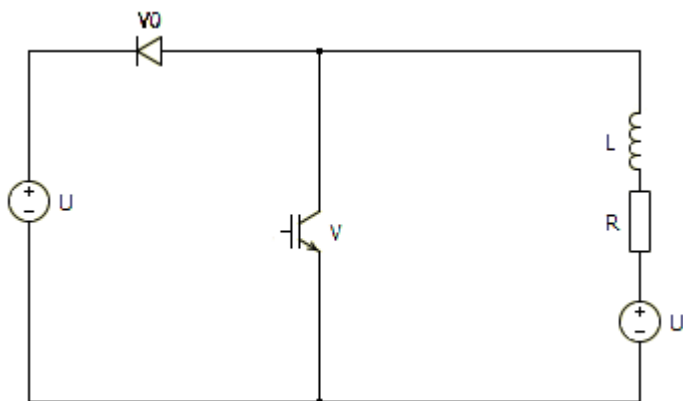
V době T_2 je vypínač vypnut a proud zátěže se uzavírá přes nulovou diodu V0. Pokud v tomto čase stačí proud klesnout k nule, je přerušovaný. Při nepřerušovaném proudu je střední hodnota napětí na zátěži:

$$U_d = \frac{T_1}{T} \cdot U = zU \quad (1.1.1.2)$$

z je poměrná doba zapnutí může být v rozmezí od 0 do 1 a její velikost určuje střední hodnotu napětí tedy od 0 do U zdroje (teoreticky). Řízení je prováděno řídicím signálem u_r . [6]

1.1.2 Zvyšovací pulzní měnič napětí

Toto zapojení se používá pro generátorické brždění stejnosměrného motoru (tj. převádění energie ze zdroje nižšího napětí do zdroje vyššího napětí). Měnič se skládá ze spínače V a oddělovací diody V0 a R, L, U_i zátěže.



Obr. 1.1.2.1 Zvyšovací pulzní měnič napětí

Princip:

V době T_1 je sepnut spínač V a dioda V0 znemožňuje zkrat zdroje, ale zátěž je ve zkratu. Napětí na zátěži $ud = 0$. Proud má tvar exponenciály rostoucí k hodnotě V v čase T_2 je spínač V vypnut, ale proud se nepřerušuje kvůli L, která akumulovala energii po U_i / R čas T_1 , a uzavírá se přes V0 do zdroje. Nyní má proud tvar exponenciály klesající k hodnotě:

$$\frac{U_i - U}{R} \quad (1.1.2.1)$$

V čase T_2 je energie odváděna z U_i a L. Část této energie se ztrácí na R a zbytek je dodáván zdroji. Střední hodnota napětí na zátěži je:

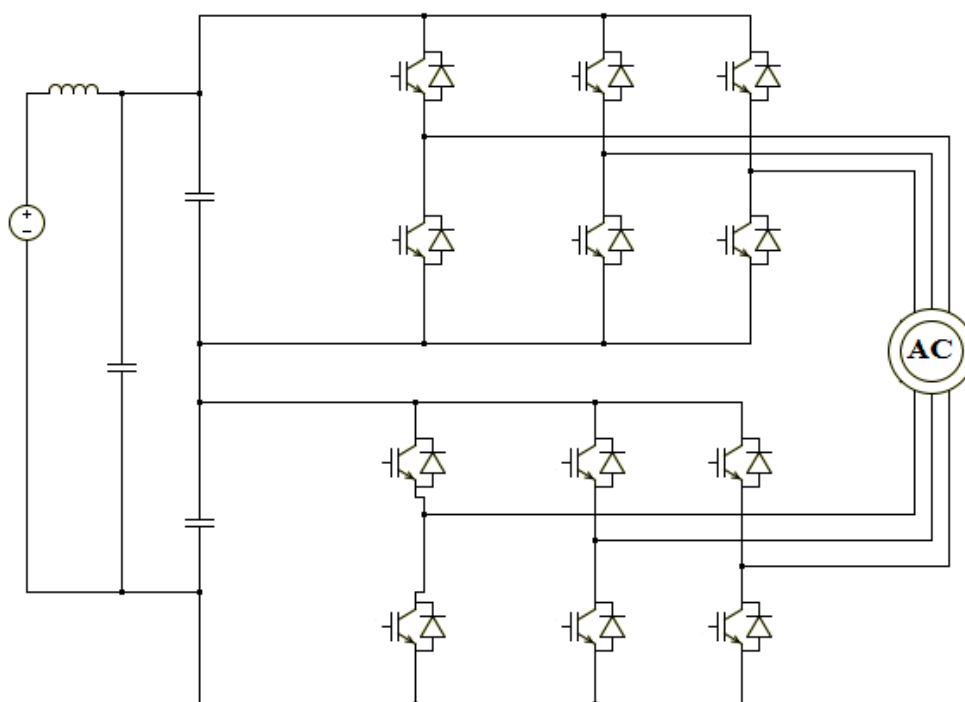
$$U_a = \frac{T - T_1}{T} U = (1 - z) U \quad (1.1.2.2)$$

1.2 Vozidla s asynchronními a synchronními motory

Asynchronní motor je jednoduchý a odolný, proto byla snaha o jeho využití ve velkém. Před objevem polovodičových součástek byla hospodárná a plynulá regulace nemyslitelná. To je možné pouze se změnou napájecího kmitočtu společně se změnou napětí a nyní je to, díky polovodičovým součástkám snadné a efektivní a asynchronní motory se dostali do popředí. I když má své výhody, stále se používají (sice v menší míře) synchronní motory. Synchronní motory mají stejné zapojení měničů, ale musíme každý motor zvlášť napájet a řídit, což u asynchronního motoru není zapotřebí, protože mohou pracovat paralelně. Jsou velice účinné a mají dobrou momentovou charakteristiku. Synchronní motory s rotorem osázeným permanentními magnety se používají hlavně u lehké kolejové dopravy (tramvaje, příměstské vlaky). [3][4][8]

V trakci se používají výhradně asynchronní motory s kotvou nakrátko a jsou napájené z měničů proměnným napětím a kmitočtem. Je spolehlivý, protože všechny části, které vedou proud jsou plně izolované. V dnešní době se v měničích využívají IGBT tranzistory a při spínání dosahují vysoké napěťové strmosti. [10]

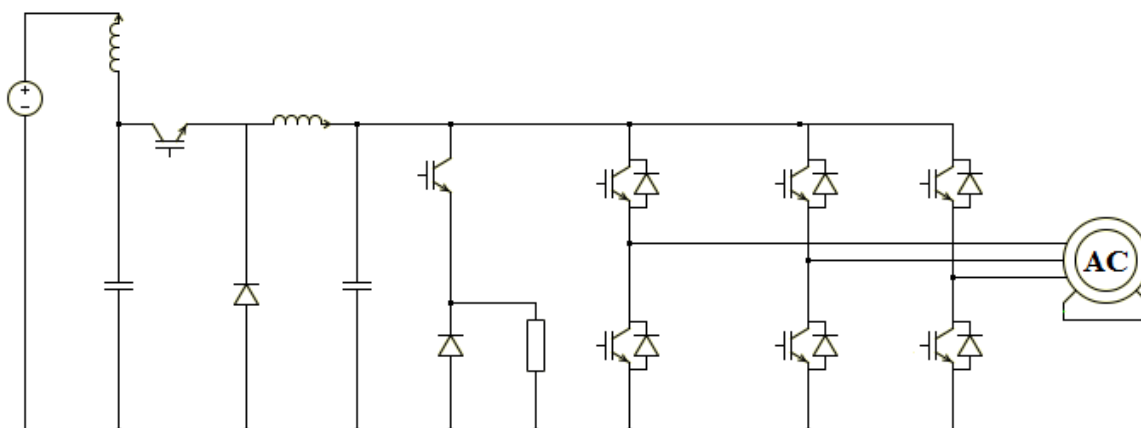
Co se týče měničů, mohou se použít oba typy, proudový i napět'ový. Dříve se užíval více proudový s mezifázovou komutací, protože obsahují obyčejné tyristory. Používaly se hlavně u vozidel MHD. S vývojem vypínatelných polovodičových součástek, se začaly používat jen napět'ové střídače, a to od tramvají po lokomotivy. V dnešní době jsou motory napájeny z čtařkvadrantových napět'ových měničů pracujících v motorickém i generátorickém chodu. [10]



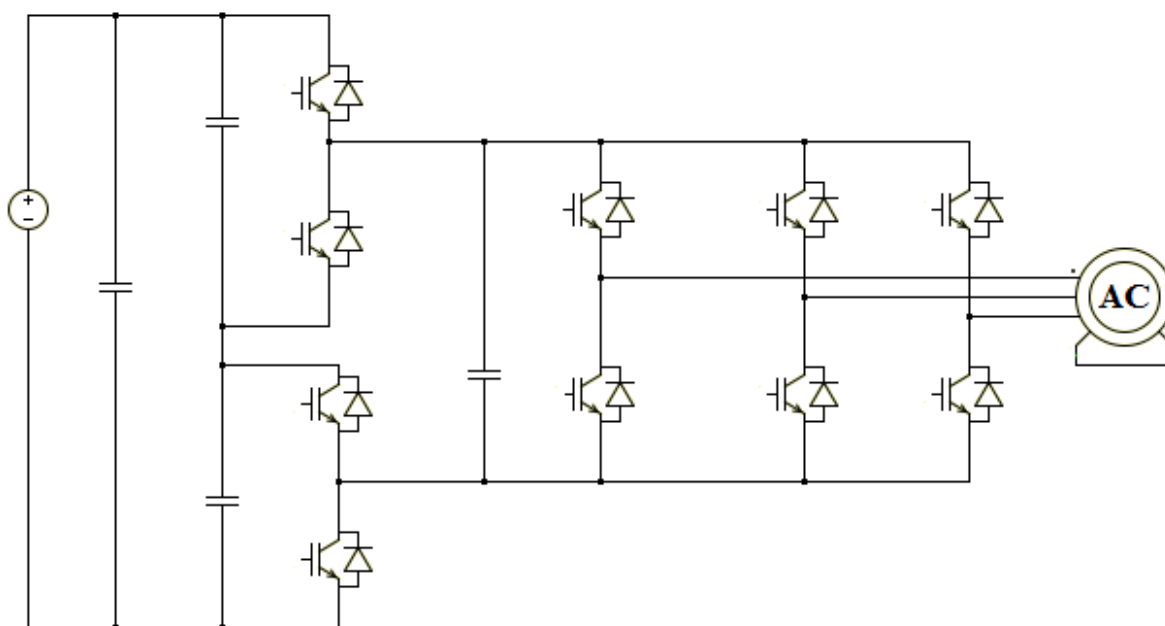
Obr. 1.2.1 Zjednodušené schéma zapojení asynchronního motoru s dvojitou hvězdou

Z troleje odebíráme proud, který je filtrován odrušovacími filtry a přenášen do stejnosměrného meziobvodu, který se skládá z tlumivky a kapacitního filtru a kondenzátoru C_f . Napět'ový meziobvod je při napájení 600, 750 V napájen přes vstupní filtr přímo ze sítě a u napájecího systému 3 kV je napájen přes snižovací pulzní měnič regulující požadovanou hladinu napětí. Dále se dělí do dvou stejných částí, což zaručuje rozdělení trolejového napětí napůl. V tomto případě střídač napájí paralelní vinutí dvou trakčních motorů v podvozku. Vinutí motorů jsou rozdělená do dvou symetrických oddělených třífázových vinutí zapojených do hvězdy. Napájíme je synchronně ze střídačů. Měniče a odporníky pro elektrodynamickou brzdu jsou také symetricky rozděleny. Toto je pohon, který využívá speciálního asynchronního trakčního motoru s dvojitou hvězdou. Pokud bychom chtěli rekuperovat opět použijeme zvyšovací pulzní měnič a pro případ potřeby se v obvodu vyskytuje i brzdový odpor. [4]

Při napájení ze 3 kV máme několik variant zapojení. První způsob napájení je přes kapacitní dělič a pulzní měniče, dále přes tříhadinový střídač nebo zdvojený měnič napájený z kapacitního děliče s motorem se dvěma vinutími spojenými do hvězdy atd. [4]



Obr. 1.2.2 Zjednodušené schéma zapojení s asynchronním motorem



Obr. 1.2.3 Varianta řešení napájení napěťového meziobvodu pro síť 3kV

1.2.1 Napěťový střídač - třífázové můstkové spojení

Vstupní strana je tvořena stejnosměrným napětím jako např. akumulátorová baterie, usměrňovač s velkou kapacitou na výstupu nebo stejnosměrná trolej. Stejnosměrné vstupní napětí je neměnné, pokud je střední hodnota stejnosměrného proudu I_d kladná jedná se o střídačový chod a pokud je záporný, jedná se o usměrňovačový chod. Vypínatelné součástky umožňují průchod kladného proudu a průchod záporného proudu umožňují zpětné diody, které jsou antiparalelně připojené ke každé vypínatelné součástce. Diody

tedy tvoří zpětný usměrňovač, který umožňuje usměrňovačový chod a tedy odběr jalového výkonu zátěží. Se znaménkem proud se mění i znaménko činného výkonu neboli směr. Střídač je sestaven z šesti vypínatelných součástek V1 až V6, šesti zpětných diod VR1 až VR6 a zátěž je zapojena buď do hvězdy nebo do trojúhelníka. Podle stavu sepnutí součástek můžeme snadno určit napětí výstupních střídavých vývodů střídače 1, 2, 3 vzhledem k pomyslnému střednímu vývodu zdroje, tj. napětí u_{10} , u_{20} a u_{30} , říkáme jim fázová napětí střídače. Pokud je třeba například vývod 1 připojen sepnutým V1 nebo VR1 ke kladnému pólu zdroje, pak napětí u_{10} se rovná polovičnímu U_d . Pokud by tento vývod byl připojen sepnutou součástkou V4 nebo VR4 k zápornému pólu bylo by toto napětí záporné. Sdružená napětí střídače jsou u_{z12} , u_{z23} a u_{z31} a platí:

$$u_{z12} = u_{10} - u_{20} \quad (1.2.1.1)$$

$$u_{z23} = u_{20} - u_{30} \quad (1.2.1.2)$$

$$u_{z31} = u_{30} - u_{10} \quad (1.2.1.3)$$

Pokud je zátěž zapojená do trojúhelníka, sdružená napětí střídače jsou rovna fázovým napětím zátěže (u_{z1} , u_{z2} , u_{z3}). Pokud je ale zátěž zapojena do hvězdy:

$$u_{z12} = u_{z1} - u_{z2} \quad (1.2.1.4)$$

$$u_{z23} = u_{z2} - u_{z3} \quad (1.2.1.5)$$

$$u_{z31} = u_{z3} - u_{z1} \quad (1.2.1.6)$$

Pro symetrickou zátěž platí:

$$u_{z1} + u_{z2} + u_{z3} = 0 \quad (1.2.1.7)$$

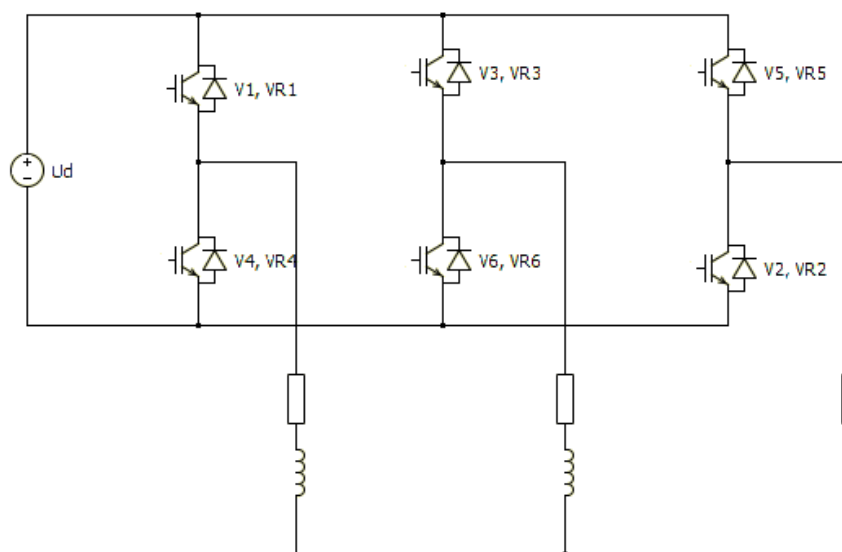
S využitím předchozích rovnic dostáváme fázové napětí pro zátěž:

$$u_{z1} = \frac{1}{3}(u_{z12} - u_{z31}) \quad (1.2.1.8)$$

$$u_{z2} = \frac{1}{3}(u_{z23} - u_{z12}) \quad (1.2.1.9)$$

$$u_{z3} = \frac{1}{3}(u_{z31} - u_{z23}) \quad (1.2.1.10)$$

Takto se střídač chová pro obdélníkové řízení. Úhel Ψ je programovatelný úhel sepnutí vypínatelných součástek, nazýváme ho úhel sepnutí. Tento interval mezi začátkem a koncem zapínacího impulsu vysílaného na součástku. Skutečné sepnutí součástky se děje o něco déle. Když jsme ve střídačovém chodu a na součástku je přiváděn spínací impuls a ona ještě nevede, vedou příslušné zpětné diody. Začátky impulsů na po sobě číslovaných součástek jsou posunuty o $\frac{1}{3}\pi$. Pro uzavřený obvod je nutné, aby byla současně sepnuta jedna součástka z anodové skupiny (V1, V3, V5) a jedna z katodové skupiny (V2, V4, V6). Z toho je patrné že $\Psi > \frac{1}{3}\pi$. Nesmíme dopustit aby byly sepnuty najednou součástky jedné fáze (V1 a V4, V3 a V6 nebo V2 a V5), protože by došlo ke zkratu zdroje. Proto vkládáme tzv. mrtvý čas mezi sepnutími těchto součástek. Řídícím úhlem řídíme výstupní napětí. [6]



Obr. 1.2.1.1 Napěťový střídač - třífázové můstkové spojení

Pulzně šířková modulace (PWM) je velice často používaná metoda pro řízení spínání polovodičových součástek měniče. Jedná se o porovnávání vysokofrekvenčního pilového signálu s nízkofrekvenčním řídicím signálem. V okamžiku, kdy se tyto dva signály protnou, dochází k přepínání zapínacích impulsů součástek. Výstupní signál může nebývat dvou hodnot, zapnuto/vypnuto. Pokud je napětí řídicího signálu větší než napětí pilového signálu, je sepnuta horní součástka a napětí dané fáze je $U_d/2$. Pokud je menší, je sepnuta spodní součástka a napětí je $-U_d/2$. Pro třífázový střídač máme pro každou fázi jeden signál a ty jsou vůči sobě navzájem posunuty o 120° . [9]

2 Střídavý napájecí systém

Díky střídavému napětí můžeme přenášet vyšší napětí a výkony s menšími proudy a ztrátami na větší vzdálenosti. Setkáváme se s ním na železnicích. Pokud máme střídavou trolej musíme použít ve vozidle transformátor, to mu přidává na hmotnosti, ale zase poskytuje vhodnou volbu napětí motoru. Nejčastěji se můžeme setkat se soustavami 25 kV, 50 Hz nebo 15 kV a $16 \frac{2}{3}$ Hz. [3]

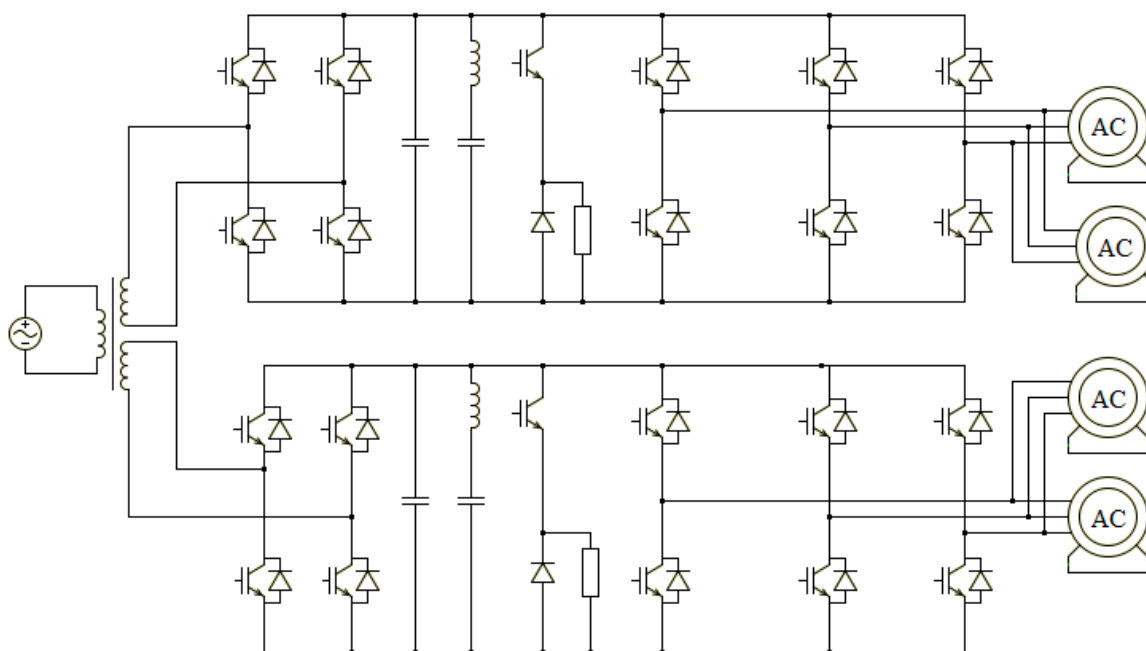
Síť 15 kV a $16 \frac{2}{3}$ Hz byla zavedena na začátku 20. století pro první větší rozvoj v Německu, Švýcarsku, Rakousku a ve Skandinávii a dodnes se tam s ní můžeme setkat. Tato nižší frekvence byla zavedena z několika důvodů. Jedním z nich bylo zlepšení komutace trakčních motorů a dále univerzálnost pro napájení trakčních vozidel. Tuto frekvenci lze použít přímo pro napájení sériových stejnosměrných elektrických motorů bez potřeby usměrňovače. Nutností pro tento systém je, existence speciálních jednofázových elektráren přímo pro trakci nebo instalování polovodičových měničů (dříve rotační). Podél trati potom vede vlastní přenosné vedení vyššího napětí izolované od třífázové rozvodné sítě 50 Hz. Díky tomu můžeme i rekuperovat. Záslouhou polovodičové techniky se hodnota kmitočtu lehce změnila z $16 \frac{2}{3}$ Hz na nesoudělný poměr 16,7 Hz a to proto, aby se zamezily nežádoucí rezonanční jevy v rozvodné síti. [1] [3]

Síť 25 kV, 50 Hz má výhodu v tom, že není potřeba budovat speciální napájecí síť či měnirny. Tato soustava se pyšní nejmenšími ztrátami způsobené přenosem, velkou vzdáleností mezi napájecími stanicemi, jednoduššími stanicemi a dá se snadno napájet z běžné veřejné soustavy. Problémem této soustavy je nutnost rovnoměrného zatížení veřejné sítě, proto po úsecích fáze střídají. Návrat energie zpět do veřejné sítě není moc

vhodný kvůli nečekaným výkyvům dodávky, nízkému účinníku a deformaci napětí a proudu. Na území české republiky je rekuperace zakázána ČEZem. [1] [3]

2.1 Vozy s asynchronními a synchronními motory

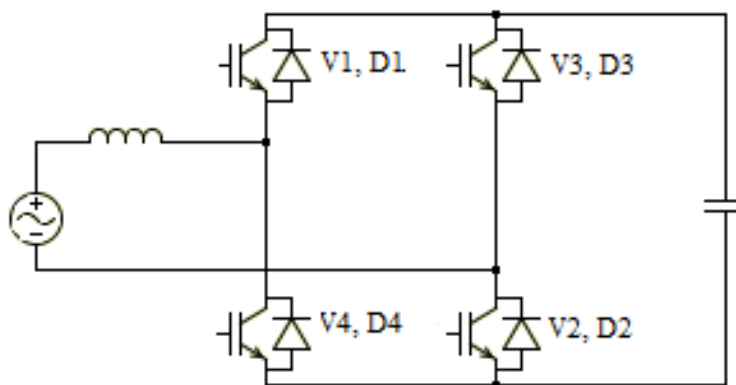
Výkonová část trakčního pohonu je složena z asynchronního motoru s kotvou nakrátko a frekvenčního měniče. Vlastní obvod je tvořen stejnosměrným meziobvodem, který obsahuje kondenzátor C_f . Při napájení ze střídavé sítě (15 kV, 16 $\frac{2}{3}$ Hz resp. 25 kV, 50 Hz) musíme pro napájení stejnosměrného obvodu použít usměrňovač. Pokud chceme rekuperovat, volíme takový usměrňovač který umožňuje rekuperační brzdění a umí usměrňovač přepnout do střídačového chodu. Energie usměrněná paralelními diodami je dodávána do stejnosměrného meziobvodu, která je buď zmařena v brzděném odporu nebo je vrácena zpět do sítě. Pokud ji dodáváme zpět do sítě, musíme ji přes vstupní střídač přizpůsobit hodnotám napájecí sítě. Tyto měniče nazýváme čtyřkvadrantové. Synchronní motory jsou opět velice podobné. Jsou velice účinné a mají dobrou momentovou charakteristiku. Tyto pohony se používají hlavně u lehké kolejové dopravy (tramvaje, příměstské vlaky). [3][4][8]



Obr. 2.1.1 Zjednodušené zapojení lokomotivy s asynchronními motory a pulzními měniči

2.1.1 Jednofázový napěťový pulzní usměrňovač

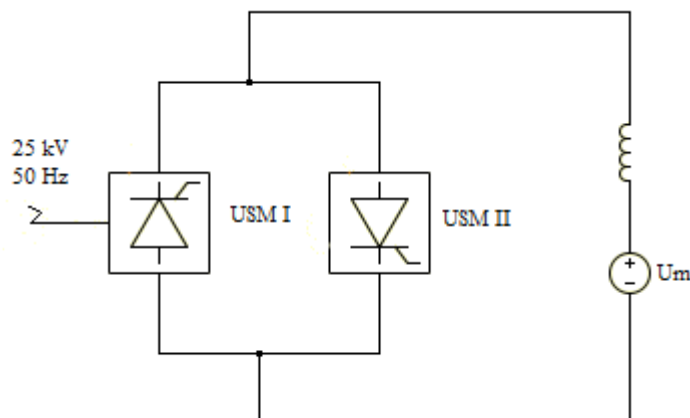
Skládá se z čtyř tyristorů V1 až V4 a čtyř diod V01 až V04 k nim antiparalelně připojených. Během každé půlvlny se objevují dva stavy. Jeden stav vede proud ze střídače do zátěže a jsou sepnuty např. součástky V1 a V2 nebo diody V01 a V02. Druhému stavu říkáme nulové vedení, kdy vede jeden tyristor a jedna dioda (např. V3 a V01), při čemž je zkratován napěťový zdroj a zátěž odebírá energii z kondenzátoru a na něm klesá napětí. Sepnuta je vždy jedna dioda a jeden tyristor. Velikou výhodou tohoto usměrňovače je schopnost odebírat ze sítě sinusový proud ve fázi s napětím sítě a udržovat stálé napětí na kondenzátoru v meziobvodu a také možnost rekuperace. Hojně se v trakci používají jako vstupní měniče pro nepřímé měniče kmitočtu ve spojení s třífázovým střídačem pro asynchronní či synchronní pohony a ve spojení s snižovacím pulzním měničem pro stejnosměrné pohony. [6]



Obr. 2.1.1.1 Jednofázový pulzní usměrňovač

2.2 Vozy se stejnosměrnými motory

Napájíme-li stejnosměrný motor ze střídavé sítě, musíme přiváděné napětí usměrnit říditelným usměrňovačem, kterým motor řídíme. K tomuto usměrňovači je antiparalelně zapojen ještě jeden usměrňovač z důvodu rekuperace a brzdění. Řídicími úhly obou usměrňovačů pak řídíme celý motor. [9]

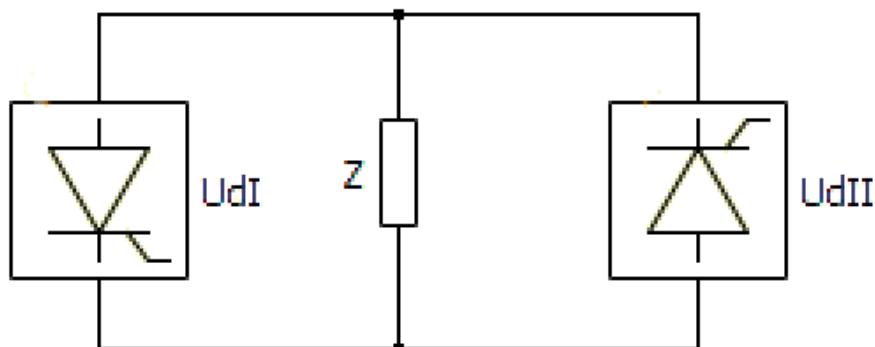


Obr.2.2.1 Zjednodušené blokové schéma vozidel se stejnosměrnými motory

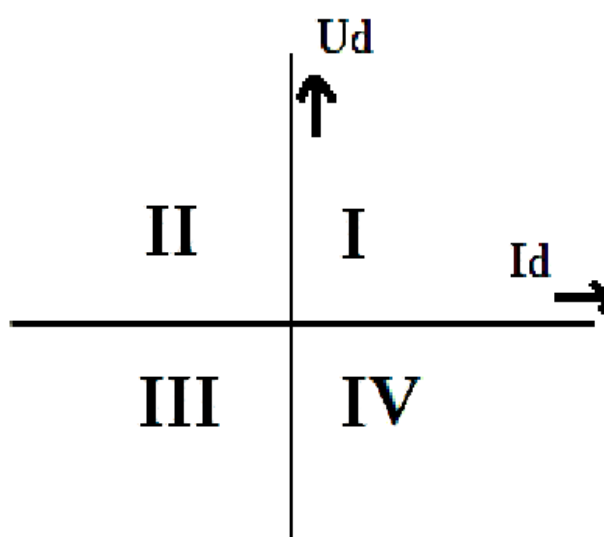
Dále máme ve vozech ještě pomocné pohony, které jsou galvanicky oddělené transformátorem. Jeho primární strana je napájena z jednofázového střídače. Na sekundární straně je výstupní proud usměrňován a odveden do stejnosměrného obvodu s napětím 550V. Tento obvod napájí střídače kompresoru, ventilátoru brzdového odporníku a střídač pro napájení palubní sítě. Všechny měniče jsou sestaveny z IGBT tranzistorů. [4]

2.2.1 Čtyřkvadrantový usměrňovač

Usměrňovače mohou pracovat se dvěma polaritami napětí, ale jen s jedním směrem proudu, tedy mohou pracovat ve dvou kvadrantech. Když spojíme dva dvoukvadrantové usměrňovače, proud může procházet oběma směry. Toto spojení se pak nazývá čtyřkvadrantový (reverzační) usměrňovač. Máme několik druhů zapojení. Do zátěže může pracovat vždy jen jeden, tím určujeme směr proudu. Každý usměrňovač může pracovat v usměrňovačovém nebo střídačovém chodu. Na obr. 2.2.1.2 vidíme provozní oblasti. V prvním kvadrantu zátěž přijímá výkon přes usměrňovač I, v druhém zátěž vydává výkon přes usměrňovač II, v třetím zátěž přijímá výkon přes usměrňovač II a ve čtvrtém zátěž vydává výkon přes usměrňovač I. [5]



Obr. 2.2.1.1 Zjednodušené schéma čtyřkvadrantového usměrňovače



Obr. 2.2.1.2 Provozní oblasti

Řízení s okružovým proudem

Proudem přivádíme impulzy na oba usměrňovače zároveň. Řídící úhly obou usměrňovačů jsou v určitém vztahu. Podmínka řízení:

(2.2.1.1)

$$U_{dI} + U_{dII} \leq 0$$

Pokud by toto neplatilo nastal by zkrat. Také platí:

(2.2.1.2)

$$U_{dI} = U_{dIC} \cos \alpha_I$$

(2.2.1.3)

$$U_{dII} = U_{dIo} \cos \alpha_{II}$$

a potom:

(2.2.1.4)

$$\cos \alpha_I + \cos \alpha_{II} \leq 0$$

(2.2.1.5)

$$\alpha_I + \alpha_{II} \geq \pi$$

Uvážíme-li bezpečnostní úhel, pak úhel řízení je $\alpha_{min} \geq \pi - \alpha_{max}$.

Řízení je pak symetrické či nesymetrické. V obou případech řídicí úhel usměrňovače pracujícího do zátěže je řízen podle potřeby zátěže a druhý je takový, aby plnil podmínky řízení. Při symetrickém řízení musí být splněna tato podmínka:

$$\alpha_I + \alpha_{II} = \pi \quad (2.2.1.6)$$

Při nesymetrickém řízení je úhel druhého usměrňovače α_{max} , tedy pak:

$$\alpha_I + \alpha_{II} > \pi \quad (2.2.1.7)$$

Okruhové proudy omezujeme tlumivkami. [5]

Bez okruhového proudu

Při tomto řízení je odběr jalového výkonu ze menší. Výhodou také je, že vyloučíme ztráty okruhovým proudem a nejsou zapotřebí nákladné tlumivky. Nevýhodou však jsou horší dynamické vlastnosti. Podmínku řízení je, že nesmí být nikdy otevřena cesta pro okruhový proud. To znamená že vždy pracuje jen jeden usměrňovač a druhý je blokován. Mezi změnou vedení usměrňovačů musí být krátká pauza, aby se obnovila blokovací schopnost tyristorů. Zde platí:

(2.2.1.8)

$$U_{dio} \cos \alpha_{min} \leq -U_{dio} \cos \alpha_{\gamma}$$

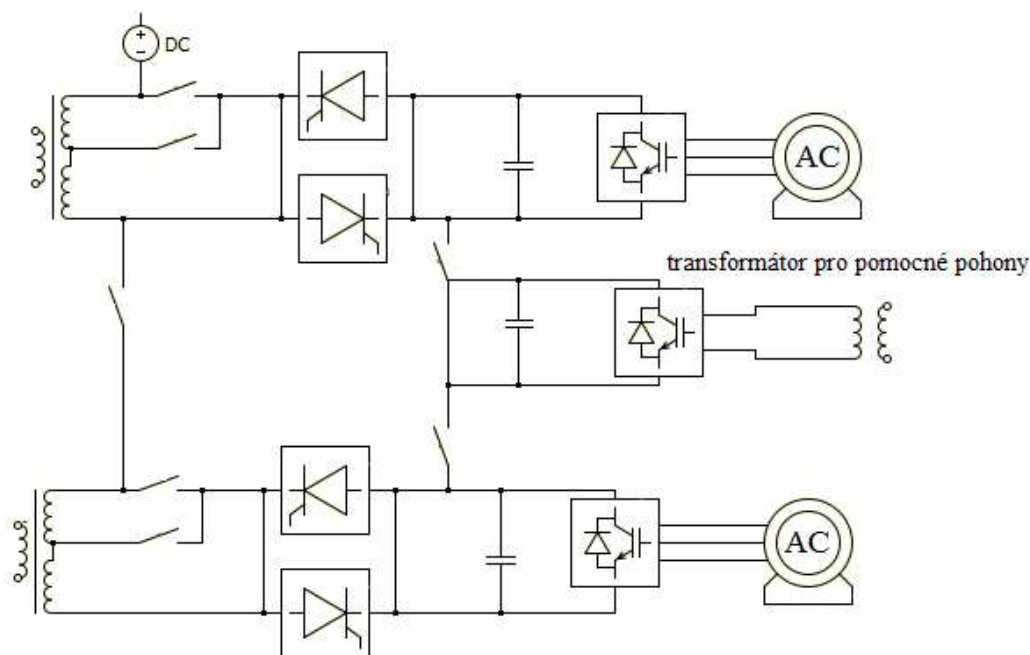
[5]

3 Vícesystémová trakční vozidla

Protože vývoj tratí se v různých oblastech lišil, tak máme i různé typy napájecích soustav a lokomotivy jsou nuceny přejíždět z jedné soustavy do druhé. Proto máme vícesystémové lokomotivy, které jsou toho schopny. Můžeme je dělit na dvouproudé, tříproudé i čtyřproudé a také na dvounapěťové atd. [11]

Jednou z částí je obvod pro stejnosměrný napájecí systém. Pokud má lokomotiva fungovat i na střídavé síti, tak se napětí troleje mění v transformátoru a dále napájí usměrňovač (řízený, neřízený, pulzní), který napájí meziobvod. Jeho napětí se pak odvíjí od hladiny stejnosměrné soustavy. [11]

Jeden z příkladů je na obr. 3.1. Toto zapojení je použito pro lokomotivu Siemens ES 6404 s asynchronními motory. Tato lokomotiva je více systémová, tedy čtyřsystémová a je schopna provozu na těchto soustavách: 1,5 kV, 3 kV, 15 kV; 16,7Hz, 25kV 50Hz. Možné trvalé výkony se trochu liší podle soustavy, na které se zrovna lokomotiva ocitá. Střídavé napětí jde nejdříve přes vypínač na transformátor, jehož sekundární strana má 4 vinutí pro trakci. Každé vinutí má několik odboček, které zaručují stejnou úroveň výstupního napětí při různém napájení. K sekundární straně je též připojen čtyřkvadrantový měnič (umožňuje sinusový odběr) pro pomocné pohony atd. Dvě sekundární vinutí napájí dva čtyřkvadrantové usměrňovače a ty zase napájí dva paralelní stejnosměrné obvody. K nim je ještě paralelně připojen filtr a napájí přes střídač síť pro další pomocné pohony. Každý trakční střídač napájí jeden motor. Stejnosměrné napětí můžeme vést rovnou přes tlumivku do meziobvodu trakčního měniče, dále už je obvod stejný. [11]

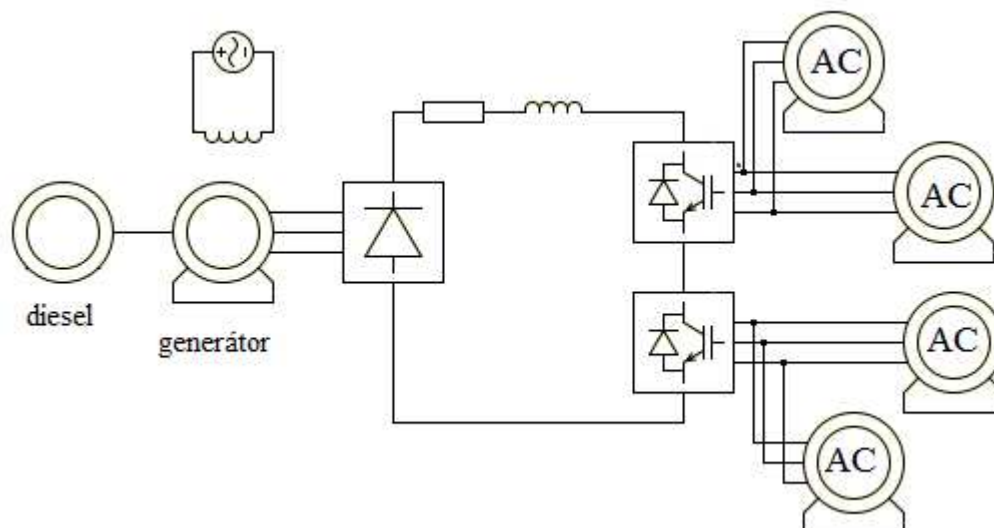


Obr. 3.1 Zjednodušené schéma zapojení vícesystémové lokomotivy

4 Hybridní vozidla

V nezávislých trakčních vozidlech je zdrojem generátor např. dynamo nebo alternátor s usměrňovačem, poháněný spalovacím motorem. Malá vozidla mohou být napájena z trakčních baterií. Soustavy s nezávislými zdroji mají omezený výkon dojezd a např. baterie nemají dlouhou životnost. Hybridní vozidla jsou právě často tvořena z elektricky závislého vozidla doplněného o nezávislý zdroj, který je používán například na nezatrolejovaných oblastech např. elektricky závislé vozidlo se spalovacím motorem jako je vůz Škoda 24 Tr Irisbus. [3]

Pro příklad tu máme dvouzdrojovou lokomotivu, která může být napájena ze sítě 15kV 16,7 Hz nebo 25 kV 50 Hz. Pulzní měnič napájí přes kondenzátor střídač řídicí motor. Meziobvodem je buď usměrňovač napájený transformátorem nebo diesलगрегát o stejném napětí. Napětí z diesलगрегátu je usměrněné. Výkon při použití diesलगрегátu je podstatně nižší než výkon při odběru energie z troleje. [7]



Obr. 4.1. Zjednodušené schéma zapojení dvouzdrojové lokomotivy

5 Simulační model trakčního měniče

Pro simulaci a návrh řízení jsem si vybrala Matlab - Simulink s rozšiřujícím toolboxem Plecs.

MATLAB (MATrix LABoratory) je výkonný, interaktivní výpočetní software. Programovací jazyk Matlab má ty výhody, že základní matematické funkce (mocnina, odmocnina a další) a některé složitější funkce (řešení soustav lineárních či diferenciálních rovnic atd.) jsou již součástí a tím nám usnadňují práci. Pracuje s vektory, maticemi, vykresluje 2D a 3D grafy funkcí, vytváří počítačové simulace, analyzuje data, provádí různé výpočty a mnoho dalšího. Využitelnost Matlabu se dá rozšířit přidáním toolboxů, což je sada příkazů, funkcí a knihoven pro danou oblast zájmu.

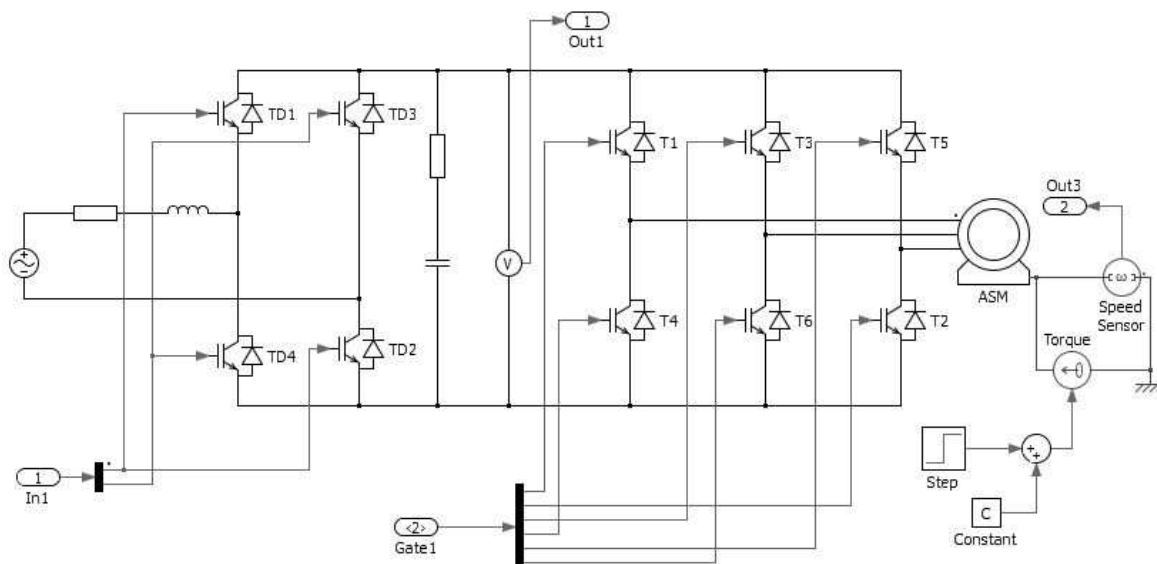
Simulink je podprogramem Matlabu a slouží k simulaci různých fyzikálních problémů. Pracuje se zde pomocí bloků s různými funkcemi (matematické operace, práce se signály atd.). Simulink lze opět rozšířit o různé speciální knihovny a toolboxy, jakým je například Plecs.

Plecs umožňuje modelování a simulace složitých elektrických systémů i jejich řízení například v oboru výkonové elektroniky a elektrických pohonů. Také můžeme řešit oteplení, spínací ztráty nebo chlazení součástek. Toolbox opět obsahuje přednastavené bloky, součástky a komponenty (pasivní prvky, zdroje, motory, polovodičové součástky

a další). Obvod vytvořený v Plecsu se v Simulniku tváří jako jeden blok zvaný subsystem, který může mít své vstupy i výstupy. Potom můžeme využít všechny prvky Simulinku a jeho toolboxů. [12] [14]

Pro můj model trakčního měniče jsem si vybrala spojení pulzního usměrňovače a třífázového střídače, který napájí asynchronní motor. Pulzní usměrňovač jsem zvolila pro jeho účinek roven jedné a napěťový střídač jsem volila podle četnosti v praxi.

Pro řešení diferenciálních rovnic jsem volila metodu ode45 s relativní tolerancí 10^{-3} s maximálním krokem 10^{-5} . Detekce průchodu nulou a funkce uchování tvaru je vypnuta. Další parametry jsou nastaveny automaticky.



Obr. 5.1 Silový obvod trakčního měniče

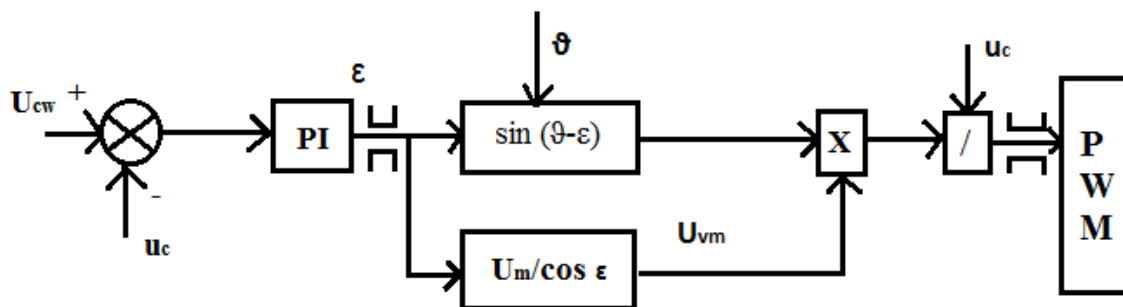
Tab. 5.1 Parametry obvodu:

Transformované napájecí napětí:	2200 V
Frekvence napájecího napětí:	50 Hz
Požadované napětí na kondenzátoru:	3000 V
Počáteční napětí na kondenzátoru:	1560 V
Kapacita kondenzátoru:	4 mF
Indukčnost vedení:	0,018 H
Parazitní odpor vedení:	0,2 Ω
Parazitní odpor kondenzátoru:	0,02 Ω

Pro simulační model byl použit dvoupólový asynchronní motor s jmenovitým napětím 2200 V a jmenovitou frekvencí 92 Hz. V čase $t = 2,5$ s jsme začali rekuperovat.

6 Návrh řízení

Základní blokové schéma řídicího obvodu pulzního usměrňovače pomocí regulace úhlu ε je na obr. 6.1.



Obr. 6.1 Blokové schéma řídicího obvodu pulzního usměrňovače

Regulační odchylku získáme rozdílem požadované a skutečné hodnoty napětí na kondenzátoru ve stejnosměrném obvodu. PI regulátor potom vypočte z regulační odchylky velikost úhlu ε . Regulační odchylka se vypočte:

$$x = U_{cw} - U_c \quad (6.1.1)$$

Pro výpočet úhlu platí:

$$\varepsilon = k_p \cdot x + \frac{k_p}{\tau_i} \int x \, dt \quad (6.1.2)$$

Pro velikost amplitudy napětí platí:

$$U_{vm} = \frac{U_m}{\cos \varepsilon} \quad (6.1.3)$$

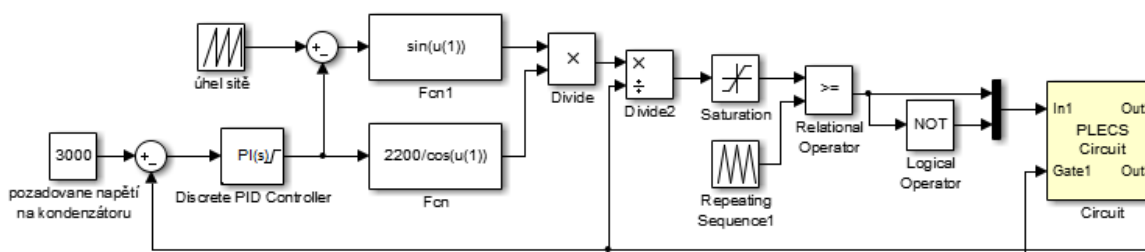
Napětí, musíme synchronizovat s napětím sítě:

$$u_{vw} = U_{vm} \cdot \sin(\vartheta - \varepsilon) \quad (6.1.4)$$

Součinem těchto dvou signálů získáváme výsledné napětí, které je ale potřeba znormovat, protože na porovnávání s pilou je moc velké. To znamená, že toto napětí podělíme napětím na kondenzátoru a získáme u_{ref} :

$$u_{ref} = \frac{u_{UM}}{u_c} \quad (6.1.5)$$

Porovnáním signálů u_{ref} a u_p , dostaneme zapínací impulzy pro jednotlivé součástky. Pokud je řídicí signál větší než pila, vedou tranzistory TD3 a TD4, v druhém případě vedou tranzistory TD1 a TD2. [13]

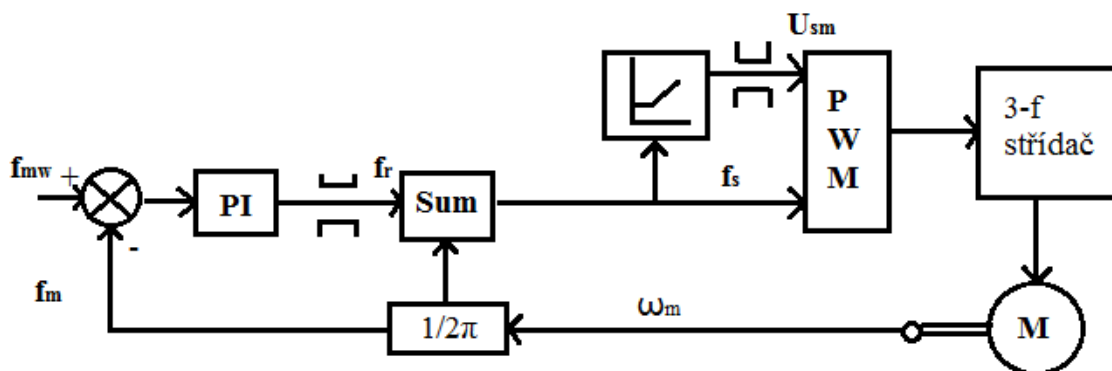


Obr. 6.2 Blokové schéma řídicího obvodu pulzního usměřovače v Simuliku

Tab. 6. 1 Hodnoty PI regulátoru:

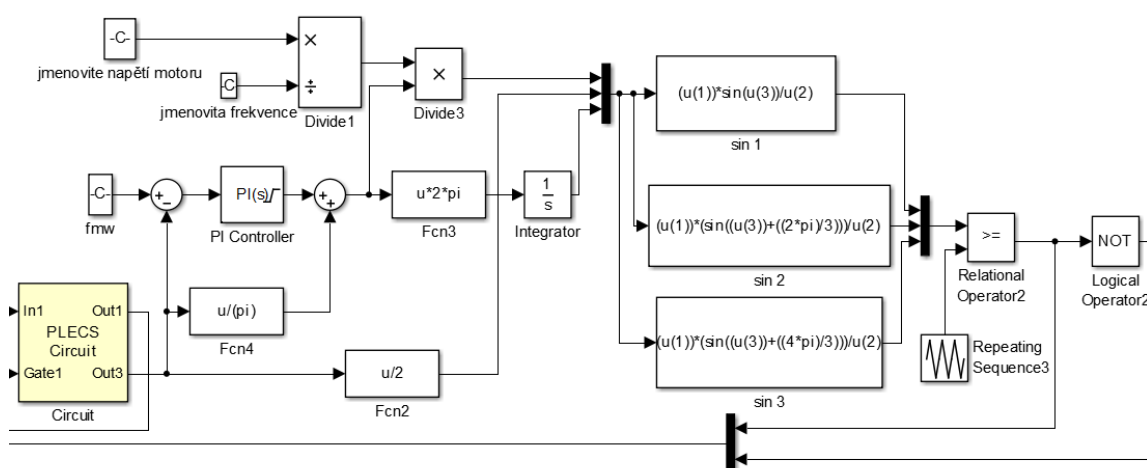
Proporcionální konstanta regulátoru:	0,00022
Integrační konstanta regulátoru:	12
Omezení úhlu ϵ :	$\pm 31,5^\circ$

Pro regulaci otáček asynchronního motoru jsem pro jeho jednoduchost vybrala skalární řízení. Předpokládáme, že motor je popsán rovnicemi v ustáleném stavu a magnetický tok statoru je konstantní. Nevýhodou je zhoršená dynamika regulace rychlosti. Na obr. 6.3 je blokové schéma skalárního řízení.



Obr. 6.3 Blokové schéma skalárního řízení

Pro udržení konstantního magnetického toku, je nutné udržovat napájecí napětí a frekvenci v konstantním poměru. f_{mw} je požadovaná frekvence, od které se odečítá skutečná frekvence, kterou dostáváme přepočtem na frekvenci z čidla otáček a dostáváme regulační odchylku, která je vstupní veličinou PI regulátoru. Úbytky na vinutí statoru zanedbáváme, až na hodně nízké frekvence, kdy jsou úbytky srovnatelné s indukovaným napětím, a proto napětí zvyšujeme. Regulátor musí být nastaven, tak aby frekvence nestoupala moc rychle a pracovní bod ležel stále v lineární části momentové charakteristiky. K regulační odchylce se přičítá skutečná frekvence motoru. Výsledná frekvence je frekvence signálu napětí porovnávacího se s pilou. Amplitudu tohoto signálu získáme přenásobením výsledné frekvence a poměru jmenovitého napětí a jmenovité frekvence motoru. Tento signál ještě musíme omezit, aby se mohl porovnávat s pilou. [9]



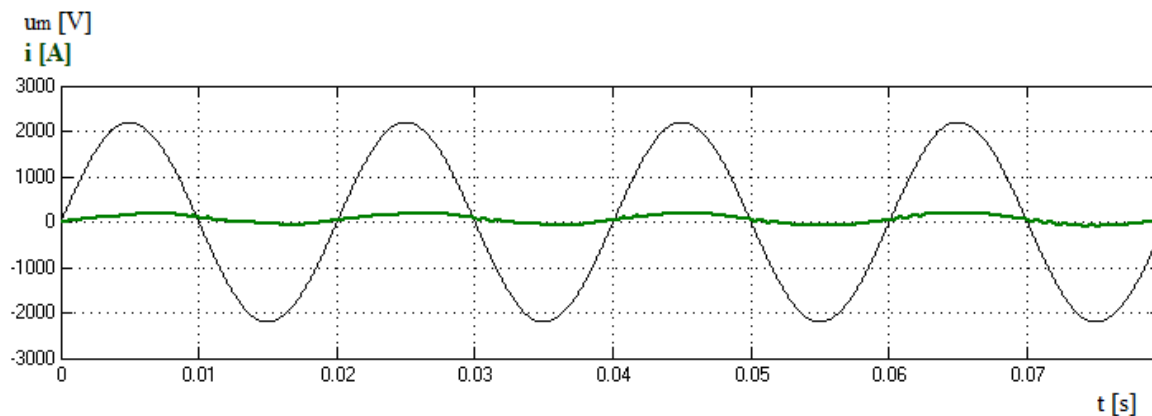
Obr. 6.4 Blokové schéma řídicího obvodu střídače v Simuliku

Tab.6.2 Hodnoty PI regulátoru:

Proporcionální konstanta regulátoru:	0,2
Integrační konstanta regulátoru:	0,04

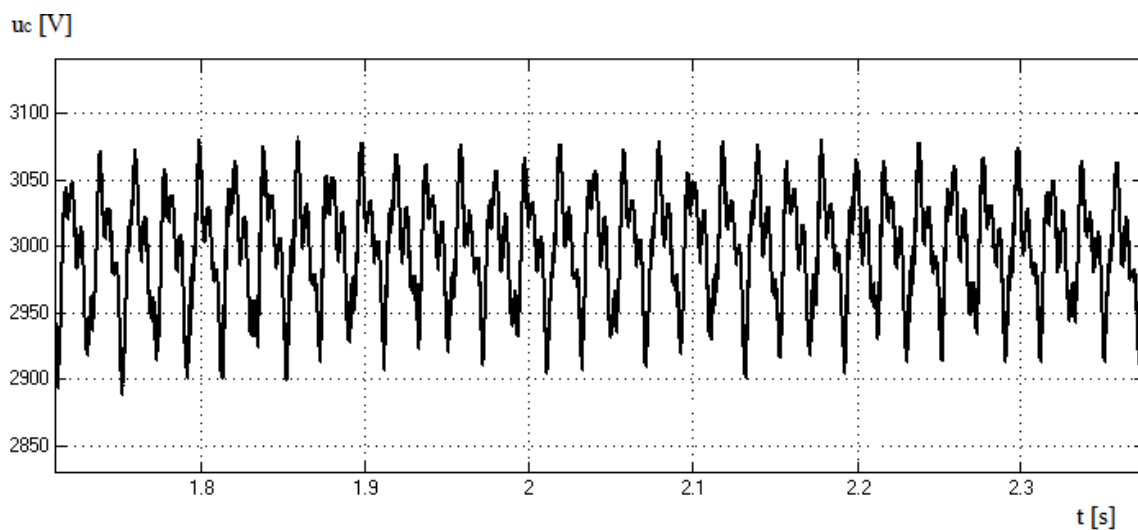
7 Výsledky simulace

Na obrázcích 7.1 - 7. 4 jsou vidět výsledky simulace řízení asynchronního motoru pomocí pulzního usměrňovače a třífázového napěťového střídače.



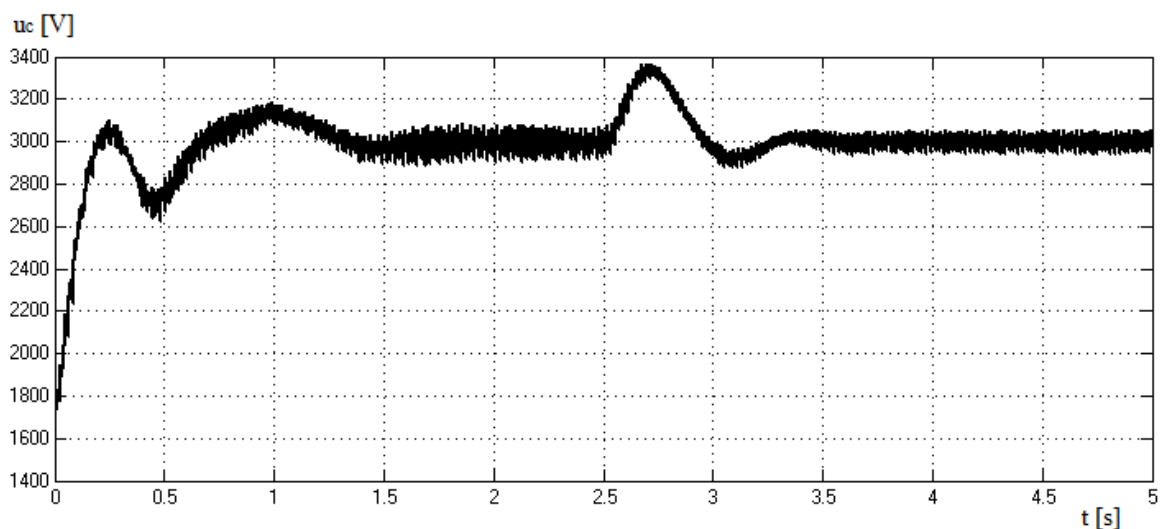
Obr. 7.1 Napětí sítě a odebíraný proud

Na obr. 7.1 je zobrazeno napětí sítě s amplitudou 2200 V a odebíraný proud, který je ve fázi s napětím.



Obr. 7.2 Napětí na kondenzátoru v ustáleném stavu

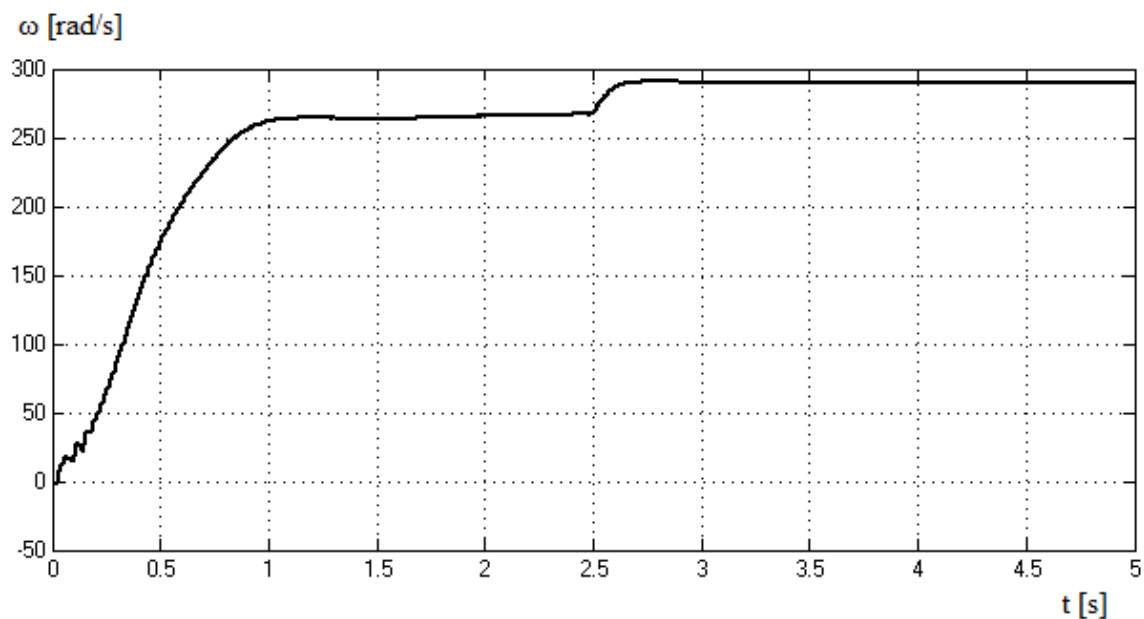
Na obr. 7.2 je napětí na kondenzátoru v meziobvodu v ustáleném stavu. Můžeme si všimnout malého zvlnění. Kapacita kondenzátoru je 4 mF a povolujeme zvlnění napětí 3,5 % U_c . Menšího rozkmitu bychom dosáhli použitím větší kapacity, ale to by se projevilo na ceně a rozměrech kondenzátoru.



Obr. 7.3 Napětí na kondenzátoru

Při rozběhu motoru v čase od 0 do 1,5 s vidíme, že napětí na kondenzátoru kolísá. To je způsobeno tím, že se při rozběhu mění odběr energie ze stejnosměrné strany měniče. Když je motor rozběhnut a s konstantní zátěží, napětí na kondenzátoru je ustálené. Pomocí regulátoru ovlivňujeme strmost náběhu a velikost překmitu. Pro omezení proudu odebíraného usměrňovačem při rozběhu jsme využili omezení zátěžného úhlu ε .

V čase $t = 2,5$ s vidíme překmit napětí na kondenzátoru. V tomto čase nastává změna zátěže a změna směru proudu. Regulátor na to reaguje s časovou prodlevou a tím vzniká překmit.



Obr. 7.4 Průběh úhlové rychlosti rotoru

Zde je vidět průběh úhlové rychlosti rotoru. Od počátku simulace je motor zatížen, což se projevuje zvlněním v úplných začátcích, kdy regulátor reaguje s časovou prodlevou a nastává pokles otáček. Dále se úhlová rychlost plynule zvyšuje až do ustáleného stavu.

V čase $t = 2,5$ začínáme rekuperovat. Nastává plynulá změna úhlové rychlosti rotoru a kladný skluz se mění v záporný a motor dodává energii zpět do sítě.

Závěr

Práci jsem provedla podle zadání. V rešeršní části jsem se zabývala zvláště stejnosměrným a střídavým napájecím systémem. Nejdříve jsem je charakterizovala a poté jsem se zabývala možnými topologiemi pro stejnosměrné i střídavé motory. V kapitolách byly vysvětleny principy jednotlivých měničů. Jelikož je běžným požadavkem, aby jednotlivé lokomotivy byly schopny pracovat nejprve na jednom typu soustavy a vzápětí na druhém nebo na jiné hladině napětí, udělala jsem malou exkurzi mezi vícesystémové lokomotivy. Dále jsem zmínila i hybridní vozy, které jsou hojně využívány.

V praktické části jsem nasimulovala jednoduché zapojení trakčního měniče skládajícího se z jednofázového napěťového pulzního usměrňovače a třífázového napěťového střídače napájecího asynchronní motor. Jednofázový napěťový pulzní usměrňovač jsem řídila pomocí regulace úhlu ϵ . Pro řízení třífázového napěťového střídače, bylo zvoleno skalární řízení. Z výsledků simulace je vidět, že odebíraný proud je opravdu ve fázi s napájecím napětím. Při rozběhu motoru napětí na kondenzátoru kolísalo, což způsobily změny odběru energie ze stejnosměrné strany kondenzátoru. V ustáleném stavu udržujeme na kondenzátoru požadované napětí 3000 V se zvlněním které dosahovalo až 3,5 % U_c . Z průběhu úhlové rychlosti rotoru vidíme, že v počátcích rozběhu motoru došlo ke zvlnění, kde regulátory reagovali s prodlevou a došlo k poklesu otáček. Dále se otáčky zvyšují plynule až do ustáleného stavu. V čase $t = 2,5$ s jsme začali rekuperovat. Tehdy nastala skoková změna zátěže a změna směru proudu. Tyto změny se projevíly, zákmitem napětí na kondenzátoru a plynulou změnou úhlové rychlosti rotoru.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] K-REPORT: STRÍDAVÁ TRAKČNÍ SOUSTAVA [online]. [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: <http://www.k-report.net/clanky/stahovacky-prezitek-nebo-nutnost/?kapitola=1>
- [2] PŘÍSPĚVATELÉ WIKIPEDIE, ŽELEZNIČNÍ NAPÁJECÍ SOUSTAVA [online], Wikipedie: Otevřená encyklopedie, c2016, Datum poslední revize 15. 01. 2016, 07:36 UTC, [citováno 27. 04. 2016] <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=%C5%BDelezni%C4%8Dn%C3%AD_nap%C3%A1jec%C3%AD_soustava&oldid=13229446>
- [3] DANZER, JIŘÍ. ELEKTRICKÁ TRAKCE. 1, PŘEHLED PROBLEMATIKY. Vyd. 1. Plzeň: Západočeská univerzita, 2009. 77 s. ISBN 978-80-7043-769-8.
- [4] KONCEPCE VOZIDEL ELEKTRICKÉ VOZBY. [online]. [cit. 5. 5. 2016]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~s1i95/phv/Koncepce%20vozidel%20elektrick%C3%A9%20vozby.pdf>
- [5] VONDRÁŠEK, FRANTIŠEK. VÝKONOVÁ ELEKTRONIKA: SVAZEK 2. 2. VYD. V Plzni: Západočeská univerzita, Elektrotechnická fakulta, 2003. ISBN 80-7082-695-9.
- [6] VONDRÁŠEK, FRANTIŠEK. VÝKONOVÁ ELEKTRONIKA: SVAZEK 3. 2. rozš. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2003. ISBN 80-7082-980-X.
- [7] DANZER, JIŘÍ. ELEKTRICKÁ TRAKCE. II., VOZIDLA S VÍCE ZPŮSOBY NAPÁJENÍ, VYD. 1. PLZEŇ: ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA, 2001. ISBN 80-7082-814-5
- [8] JIŘÍ PAVLÍČEK. EDUCON: Elektrická trakce - Úvod do elektrické trakce [online]. [cit. 2016-04-27]. Dostupné z: <http://educon.zcu.cz/view.php?cislomodulu=2015013101>
- [9] ELEKTRICKÉ POHONY: Přednášky. Fakulta elektrotechnická ZČU, Univerzitní 26, 306 14 Plzeň. 2016
- [10] DANZER, JIŘÍ. ELEKTRICKÁ TRAKCE. II., VOZIDLA S ASYNCHRONNÍM TRAKČNÍM MOTOREM. Vyd. 2. Plzeň: Západočeská univerzita, 2009. 113 s. ISBN 978-80-7043-813-8.
- [11] ES64U4 VYSOCE VÝKONNÁ VÍCESYSTÉMOVÁ LOKOMOTIVA. [online]. [cit. 5. 5. 2016]. Dostupné z: <http://www.kves.uniza.sk/kvesnew/dokumenty/et/DB-ES64U4-CZ-03.pdf>
- [12] WIKIPEDIE: OTEVŘENÁ ENCYKLOPEDIJE: MATLAB [online]. c2015 [citováno 27. 05. 2016]. Dostupný z WWW: <<https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=MATLAB&oldid=13094096>>
- [13] BLAHNÍK, VOJTĚCH. ALGORITMY ŘÍZENÍ A REGULACE SESTAVY TRAKČNÍHO MĚNIČE SE STŘEDOFREKVENČNÍM TRANSFORMÁTOREM. Plzeň, 2011. Disertační práce. ZČU v Plzni. Vedoucí práce Zdeněk Peroutka.

- [14] WIKIPEDIE: OTEVŘENÁ ENCYKLOPEDIE: PLECS [online]. c2015 [citováno 27. 05. 2016]. Dostupný z WWW: <https://en.wikipedia.org/wiki/PLECS>