

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Třífázový vysokonapět'ový měnič typu CHB**

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Michal KREJČÍ**  
Osobní číslo: **E14N0039P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Průmyslová elektronika a elektromechanika**  
Název tématu: **Třífázový vysokonapěťový měnič typu CHB**  
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Provedte analýzu chování třífázového vysokonapěťového měniče typu CHB.
2. Sestavte simulační model třífázového vysokonapěťového měniče typu CHB.
3. Navrhněte algoritmus řízení vysokonapěťového měniče typu CHB.
4. Ověřte vlastnosti navrženého algoritmu řízení.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 stran**

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

Seznam odborné literatury:

1. Zeman, K., Peroutka, Z., Janda, M.: Automatická regulace pohonů s asynchronními motory. ZČU v Plzni, Plzeň, 2004.
2. Vondrášek, F.: Výkonová elektronika, svazek III. Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň, 2003.
3. Odborné články, které dodá vedoucí práce.


Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Vojtěch Blahník, Ph.D.**

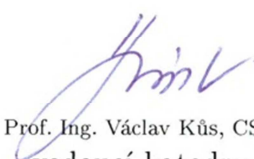
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2015**

Termín odevzdání diplomové práce: **16. května 2016**

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



  
Prof. Ing. Václav Kús, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce je zaměřena na popis třífázového vysokonapěťového měniče typu CHB, který je zde použitý jako napěťový pulzní usměrňovač. V první části práce je popsán princip činnosti tohoto měniče. Další část popisuje navržený řídicí algoritmus pro CHB měnič. Poslední část je věnována simulačnímu modelu, který obsahuje třífázový sedmiúrovňový CHB měnič, včetně navržených regulačních obvodů. Simulační model je sestaven v programu Matlab – Simulink s využitím knihovny Plecs. Výsledky simulace jsou ve formě grafů, které zobrazují průběhy základních obvodových veličin.

## **Klíčová slova**

CHB měnič, napěťový pulzní usměrňovač, víceúrovňový měnič, Matlab, Simulink



**Abstract**

This diploma thesis deals with the description of three-phase medium-voltage CHB converter, which is used as a voltage-source active rectifier. The first part of the thesis describes the function of this converter. The next part describes proposed control algorithm for this converter. The last part is focused on the simulation model. Model includes three-phase seven-level CHB converter with proposed control circuits. Model of this converter is designed in Matlab – Simulink with Plecs library. Simulation results are in the form of graphs, which shows waveforms of the basic circuit variables.

**Key words**

CHB converter, voltage-source active rectifier, multilevel converter, Matlab, Simulink

## Prohlášení

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

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

.....  
podpis

V Plzni dne 16.5.2016

Michal Krejčí

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval všem, kteří mě podpořili při tvorbě této diplomové práce.

# Obsah

<b>ÚVOD</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>10</b>
<b>1 NAPĚŤOVÝ PULZNÍ USMĚRŇOVAČ</b> .....	<b>12</b>
1.1 JEDNOFÁZOVÝ NPU .....	12
1.2 TŘÍFÁZOVÝ NPU .....	17
<b>2 MĚNIČ TYPU CHB</b> .....	<b>21</b>
2.1 TŘÍFÁZOVÝ MĚNIČ TYPU CHB .....	21
<b>3 NÁVRH REGULACE NPU</b> .....	<b>23</b>
3.1 VEKTOROVÉ ŘÍZENÍ .....	23
<b>4 SIMULACE</b> .....	<b>25</b>
4.1 SIMULAČNÍ MODEL CHB MĚNIČE .....	25
4.2 VÝSLEDKY SIMULACE – START MĚNIČE .....	29
4.3 VÝSLEDKY SIMULACE – ZMĚNA ZÁTĚŽE .....	37
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>39</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>40</b>

## Úvod

Měnič typu CHB (z anglického Cascaded H-Bridge) je moderní polovodičový měnič. Jedná se o víceúrovňový měnič, který využívá kaskádního spojení H-můstek (jednofázových můstek) pro vytvoření víceúrovňového napětí na střídavých svorkách měniče. Tento měnič lze použít jako napěťový pulzní usměrňovač (dále jen NPU) nebo jako napěťový střídač. Tato práce se zabývá použitím měniče typu CHB jako NPU.

Víceúrovňové měniče najdou uplatnění především ve vysokonapěťových aplikacích, kde pro klasické měniče nejsou dostupné spínací prvky s tak velkou napěťovou zatížitelností. Tu lze zvýšit zapojením více součástek do série, ale toto řešení s sebou přináší komplikace při spínání, respektive vypínání. Lepší způsob zvýšení napěťové odolnosti je řazení celých měničů do série. Tohoto způsobu využívá právě topologie CHB měniče. Jako základní prvek topologie je použit H-můstek, který má výkonový obvod totožný s jednofázovým NPU. Spojením těchto můstek do série vzniká CHB topologie. Každý můstek má vlastní izolovaný výstup, který se chová jako zdroj stejnosměrného napětí a slouží k napájení zátěže. Postupným spínáním jednotlivých můstek vzniká na střídavých svorkách víceúrovňové napětí. Při vhodném řízení je toto napětí schodovité a jeho průběh se mění vždy jen o velikost jednoho výstupního napětí můstku v sérii. Díky tomu je sníženo zvlnění proudu odebíraného z napájecí sítě.

Tato diplomová práce vznikla za účelem analýzy chování třífázového vysokonapěťového měniče typu CHB. V první části je popsán princip fungování jednofázového a třífázového NPU. Na těchto topologiích lze princip fungování lépe vysvětlit. Topologie CHB měniče je kombinací těchto dvou variant NPU, proto jsou principy fungování podobné a lze je na jednodušších topologiích lépe pochopit. Následně je popsán samotný CHB měnič. V další části práce je popsán navržený řídicí algoritmus, který zajišťuje regulaci napětí na výstupu měniče na požadovanou hodnotu a také odběr proudu s minimálním negativním vlivem na napájecí síť. Dále je v práci popsán sestavený simulační model v prostředí Matlab – Simulink s využitím knihovny Plecs, včetně použitých parametrů modelu. Vlastnosti navržených regulačních obvodů jsou zde ověřeny simulacemi dvou přechodných dějů. Prvním je start měniče, před kterým je předpokládáno částečné nabití jednotlivých výstupních kondenzátorů. Měnič při tomto ději pracuje se jmenovitým výstupním proudem. Druhým přechodným dějem je změna zatížení měniče.

Měnič pracuje v ustáleném stavu při zátěži odpovídající polovině jmenovitého proudu a skokově je zatížen jmenovitým proudem. Na základě těchto simulací je zhodnoceno navržené regulační schéma CHB měniče, včetně použitelnosti v praxi a jeho nedostatků.

## Seznam symbolů a zkratek

$avg$	průměrná hodnota
$C$	kapacita kondenzátoru na stejnosměrné straně NPU
$f_{pwm}$	frekvence pilového signálu
$i_a, i_b, i_c$	proudy odebírané z napájecí sítě proud do zátěže
$i_{cap}$	proud do kondenzátoru
$i_{dc}$	výstupní proud měniče
$i_z$	proud do zátěže
$i_{zn}$	jmenovitý proud do zátěže
$I_d$	jalová složka proudu
$I_{dw}$	požadovaná hodnota jalové složky proudu
$I_{min}$	dolní mez omezovače proudu
$I_{max}$	horní mez omezovače proudu
$I_q$	činná složka proudu
$I_{qw}$	požadovaná hodnota činné složky proudu
$K_p$	proporcionální zesílení regulátoru
$L_a, L_b, L_c$	indukčnost napájecí sítě
$R_a, R_b, R_c$	odpor napájecí sítě
$t$	čas
$T_i$	integrační časová konstanta regulátoru
$T_{vz}$	vzorkovací perioda regulační smyčky
$T_{pwm}$	perioda pilového signálu
$u_a, u_b, u_c$	napětí sítě
$u_{af}, u_{bf}, u_{cf}$	fázová napětí NPU
$U_c$	napětí na výstupu NPU
$U_{c(0)}$	počáteční napětí na výstupu NPU
$U_{cw}$	požadovaná hodnota na výstupu NPU
$U_m$	amplituda napájecího napětí
$U_{min}$	dolní mez omezovače napětí
$U_{max}$	horní mez omezovače napětí
$u_p$	napětí pilového signálu
$u_r$	napětí řídicího signálu
$u_{va}, u_{vb}, u_{vc}$	napětí na vstupu NPU

$U_d$	jalová složka napětí
$U_{dw}$	požadovaná hodnota jalové složky napětí
$U_q$	činná složka napětí
$U_{qw}$	požadavek na hodnotu činné složky napětí
$sum$	celková hodnota
$\omega$	úhlová rychlost
$\theta$	úhel natočení vektoru napětí
CHB	cascaded H-Bridge
IGBT	bipolární tranzistor s izolovaným hradlem
NPU	napěťový pulzní usměrňovač
PI	proporčně-integrační regulátor
PWM	pulzně šířková modulace
V1 ÷ V6	vypínatelné součástky

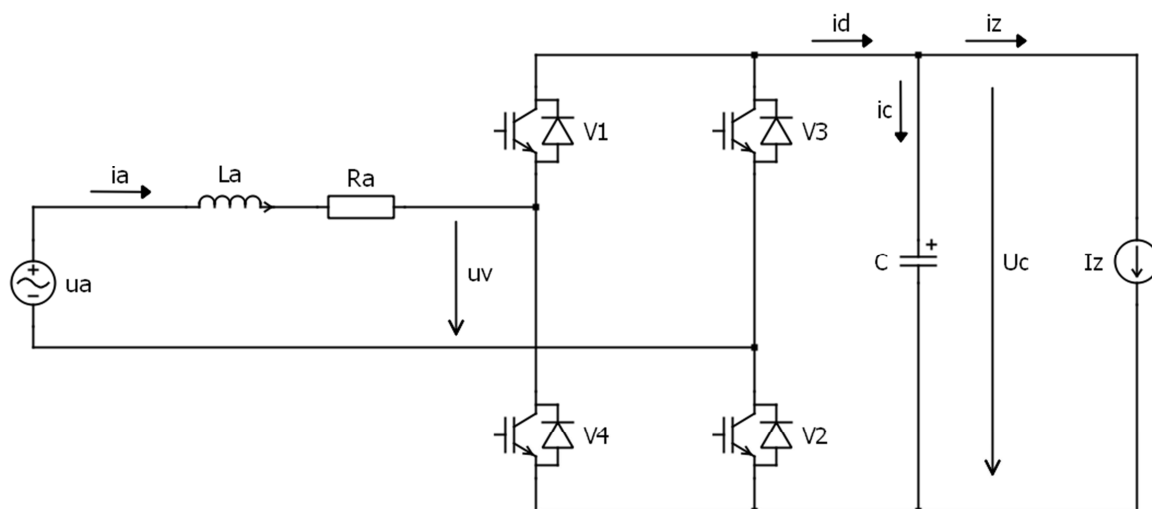


# 1 Napěťový pulzní usměrňovač

Napěťový pulzní usměrňovač je měnič s vlastní komutací, který slouží k přeměně střídavého napětí na napětí stejnosměrné. Na stejnosměrnou stranu měniče je připojen kondenzátor, na kterém je pomocí regulačních obvodů udržováno v ideálním případě konstantní napětí. Výhodné je použití NPU v nepřímých měničích kmitočtu, kde může nahradit běžně používaný diodový usměrňovač. Výhodou tohoto řešení je příznivější proud odebíraný ze sítě. Další výhodou je možnost rekuperace proudu zpět do sítě, jelikož tento měnič umožňuje tok výkonu v obou směrech. Měnič lze také použít k napájení stejnosměrného motoru. Zde by ale bylo vhodné zapojit ještě snižovací pulzní měnič, aby byla zajištěna říditelnost pohonu. [2]

## 1.1 Jednofázový NPU

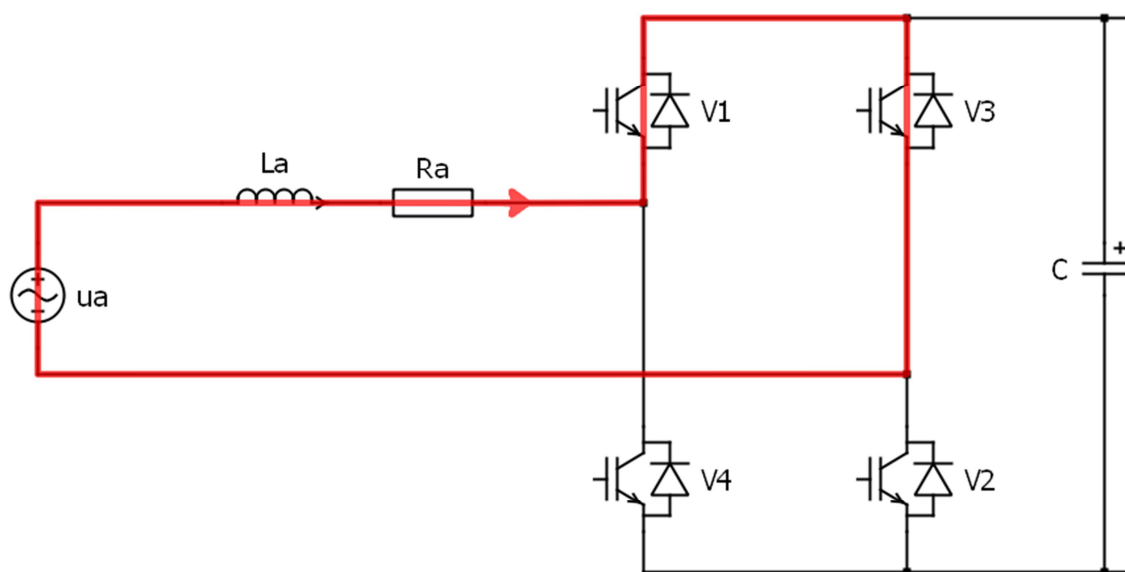
Výkonový obvod jednofázového NPU (obr. 1) je tvořen čtyřmi vypínatelnými součástkami, které jsou zapojeny do můstku. Jako vypínatelné součástky se nejčastěji používají tranzistory IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), které mají výhodné vlastnosti pro použití v měničích s vlastní komutací. Výkonový obvod jednofázového NPU je shodný s výkonovým obvodem jednofázového napěťového střídače. Rozdílné je především zapojení střídavé strany měniče. Pro NPU jsou tyto svorky vstupní stranou a jsou připojeny ke střídavému zdroji napětí. Většinou jsou připojeny na sekundární vinutí měničového transformátoru nebo na jednu fázi napájecí soustavy. Při připojení k napájecí síti je potřeba před měnič ještě zapojit vyhlazovací tlumivku. Indukčnost  $L_a$  ve fázi je



Obr. 1 Schéma výkonového obvodu jednofázového NPU

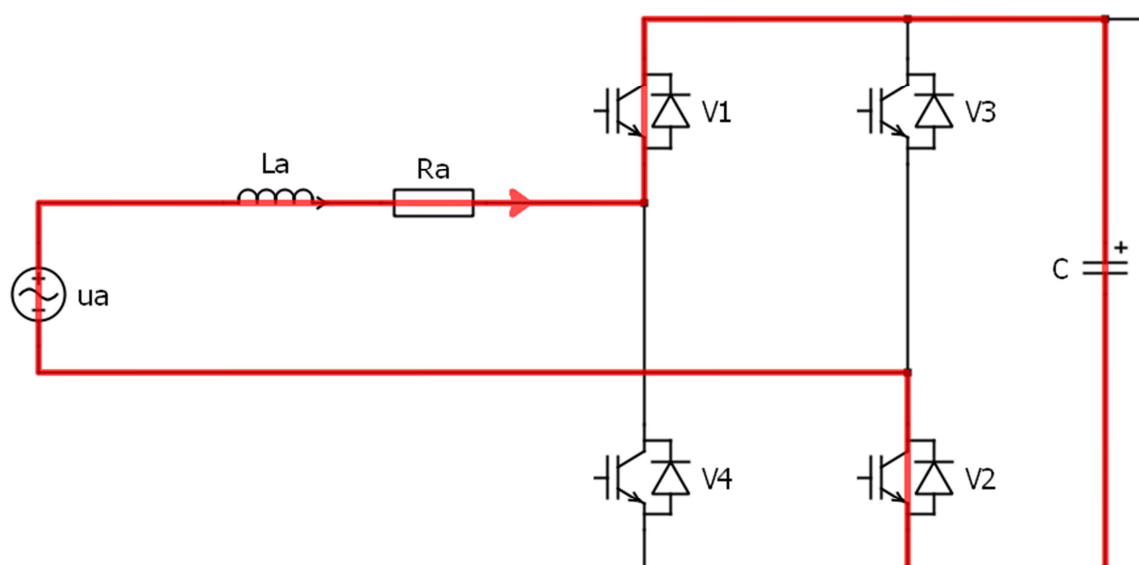
nezbytná pro správné fungování měniče. Slouží k akumulaci energie, kterou následně předává kondenzátoru na výstupu. Využívá se zde stejného principu jako u zvyšovacích pulzních měničů. Díky tomu lze při vhodném řízení dosáhnout na výstupu vyššího napětí, než je na vstupu. Snižovat napětí nelze, neboť při použití IGBT tranzistorů s antiparalelními diodami se tyto diody chovají jako neřízený usměrňovač. V případě připojení k měničovému transformátoru reprezentuje indukčnost  $L_a$  jeho rozptyl. Pro napěťový střídač jsou střídavé svorky výstupní a je na ně připojena zátěž. Stejnosemnná strana NPU je připojena ke kondenzátoru, na kterém je udržováno konstantní napětí. Stejnosemnná strana střídače je připojena ke zdroji stejnosměrného napětí. [2]

Princip činnosti jednofázového NPU lze rozdělit na dva základní takty. Při prvním jsou spínače sepnuty tak, že jsou vstupní svorky měniče zkratovány ( $u_v = 0$ ). Tohoto stavu lze dosáhnout současným sepnutím spínačů V1 a V3 nebo sepnutím V4 a V2. První kombinace sepnutí je znázorněna na obr. 2, kde je vyznačeno kudy prochází proud odebíraný z napájecí sítě. Ze schématu je patrné, že svorky  $u_v$  jsou zkratovány a tudíž je zkratován i střídavý zdroj. Proud  $i_a$  odebíraný ze sítě tedy narůstá a je limitován indukčností  $L_a$  a odporem  $R_a$  dané fáze. Indukčnost  $L_a$  ve fázi v náhradním schématu zastupuje rozptyl měničového transformátoru nebo indukčnost tlumivky zapojené před měnič. Indukčnost v tomto taktu akumuluje energii. Proud do zátěže je v tomto taktu dodáván kondenzátorem na výstupu, který je tímto proudem vybíjen. V druhém taktu jsou



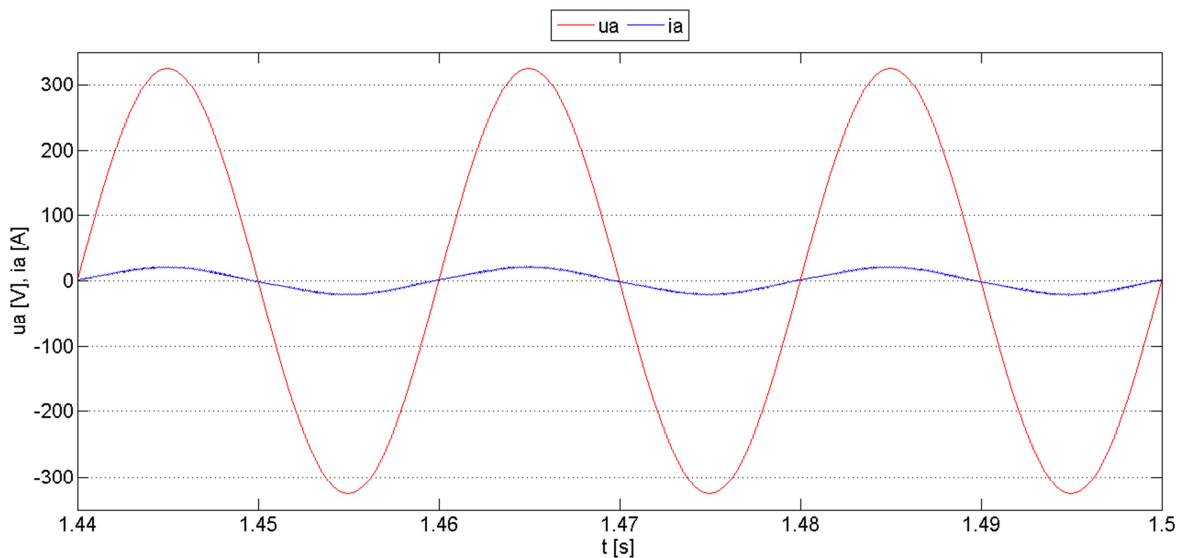
Obr. 2 Princip spínání - nulové vedení

spínače sepnuty tak, aby došlo k opětovnému dobití kondenzátoru na výstupu. Zvlnění napětí na výstupním kondenzátoru je u jednofázového NPU zejména na frekvenci odpovídající dvojnásobku frekvence napájecí sítě. Velikost tohoto zvlnění ovlivňuje především kapacita výstupního kondenzátoru a frekvence spínání použitých součástek. V kladné půlčlenné napájecího napětí je tohoto režimu dosaženo sepnutím spínačů V1 a V2. Tato spínací kombinace je zobrazena na obr. 3. Ve schématu je vyznačen průchod proudu  $i_a$  odebíraného ze sítě. V záporné půlčlenné je pak potřeba sepnout spínače V3 a V4. Proud do zátěže je v tomto taktu dodáván střídavým zdrojem. Část proudu prochází výstupním kondenzátorem, který se tím dobíjí. Proud odebíraný ze sítě v tomto taktu klesá, neboť je energie naakumulovaná v indukčnosti  $L_a$  předávána kondenzátoru na výstupu. Vhodným střídáním těchto dvou režimů lze dosáhnout proudu odebíraného ze sítě ve fázi s napětím sítě. K tomu se nejčastěji používá PWM řízení. [2]

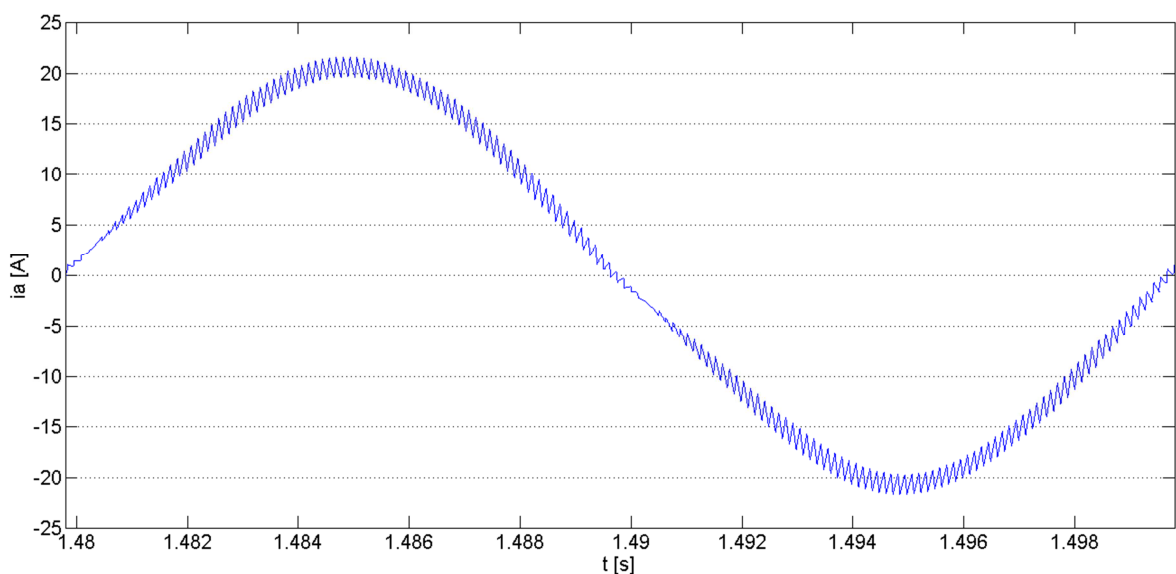


Obr. 3 Princip spínání - vedení do zátěže

Na obr. 4 jsou zobrazeny průběhy síťového napětí  $u_a$  a proudu  $i_a$  odebíraného ze sítě jednofázovým NPU v ustáleném stavu. Z průběhů je patrné, že odebíraný proud je ve fázi s napětím sítě. Průběh proudu je pro přehlednost zobrazen ještě samostatně na obr. 5. Na tomto obrázku je vidět, že průběh proudu se blíží sinusovému průběhu, což je výhodné z hlediska vlivu na napájecí síť. Zvlnění proudu je závislé především na spínací frekvenci a velikosti indukčnosti  $L_a$  ve fázi. Při vyšších spínacích frekvencích je zvlnění proudu malé, ale narůstají spínací ztráty. Spínací frekvence je většinou volena jako kompromis mezi velikostí zvlnění proudu a velikostí spínacích ztrát.

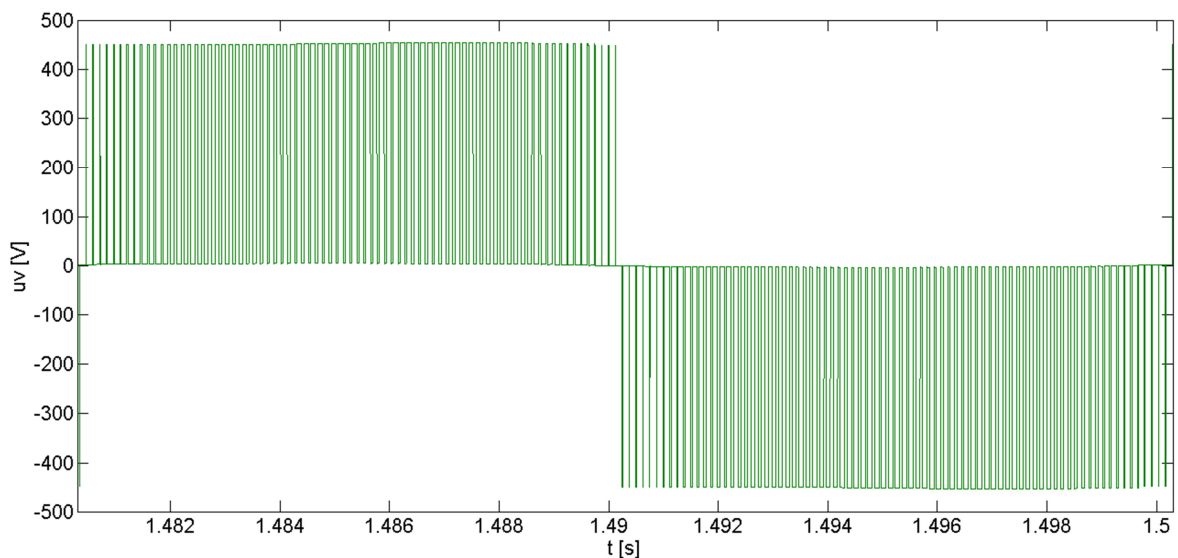


Obr. 4 Průběh napětí sítě  $u_a$  a proudu odebíraného ze sítě  $i_a$



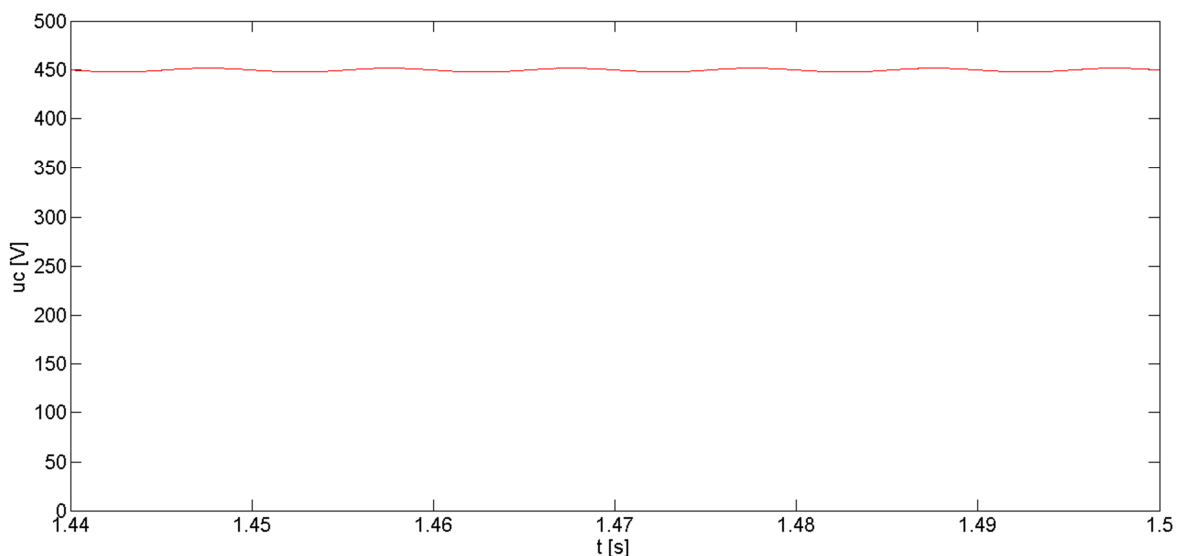
Obr. 5 Průběh proudu  $i_a$  odebíraného ze sítě

Na obr. 6 je zobrazen průběh napětí  $u_v$  na střídavé straně měniče při frekvenci pilového signálu 4kHz. U jednofázového NPU nabývá toto napětí v ideálním případě hodnot  $0$ ,  $+U_c$  a  $-U_c$ . Nulové hodnoty nabývá napětí  $u_v$  při nulovém vedení, kdy je zkratován zdroj střídavého napětí. Tento režim se střídá s vedením do zátěže, kdy je napětí  $u_v$  v kladné půlčlenně napájecího napětí  $+U_c$  a v záporné půlčlenně  $-U_c$ . V tomto případě je výstupní napětí  $U_c$  regulováno na hodnotu 450V. Napětí  $u_v$  tedy střídavě nabývá přibližně hodnot 0V, 450V a -450V.



Obr. 6 Průběh napětí  $u_v$  na střídavé straně měniče

Obr. 7 zobrazuje průběh napětí  $U_c$  na výstupní straně NPU v ustáleném stavu. Výstupní napětí je v tomto případě regulováno na 450V. Zvlnění výstupního napětí

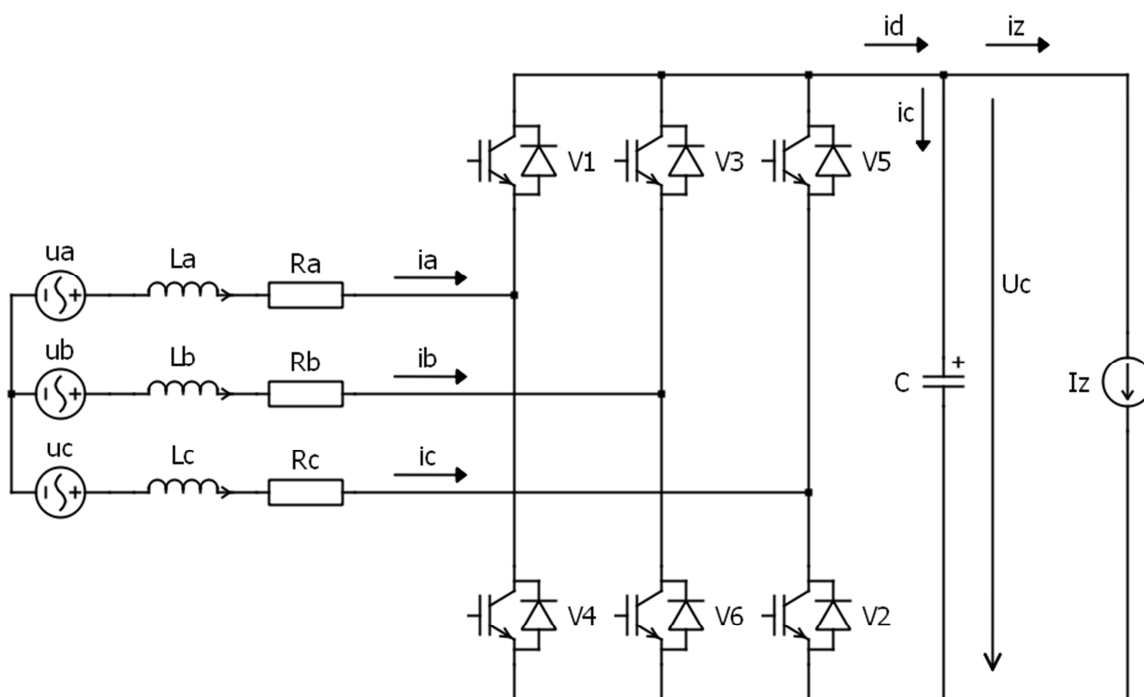


Obr. 7 Průběh napětí  $U_c$  na výstupním kondenzátoru

je ovlivněno především kapacitou použitého kondenzátoru a zatížením měniče. Menšího zvlnění dosáhneme použitím kondenzátoru s větší kapacitou.

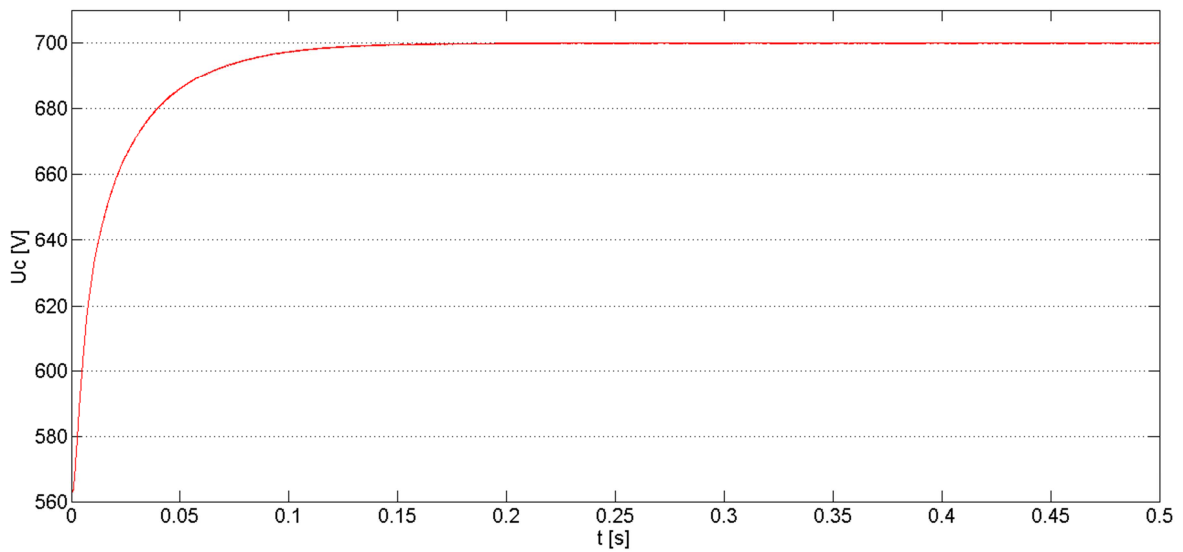
## 1.2 Třífázový NPU

Výkonový obvod třífázového NPU, zobrazený na obr. 8, se shoduje s výkonovým obvodem třífázového střídače. Každá fáze napájecí sítě je připojena k jedné větvi měniče, která obsahuje dva spínače. Celkem se tedy výkonový obvod skládá ze šesti vypínatelných součástek. [2]



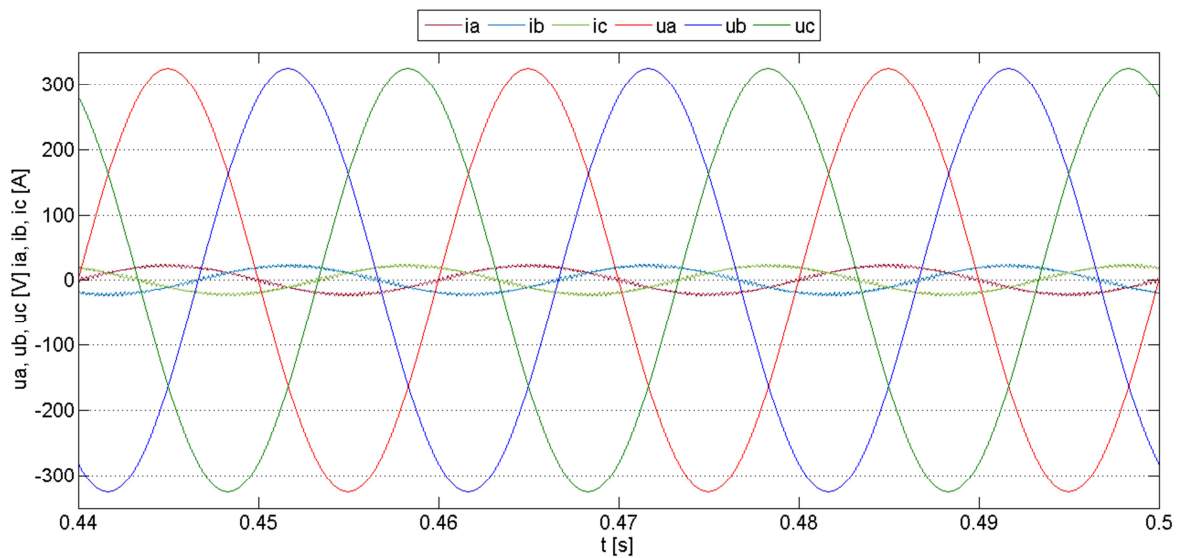
Obr. 8 Schéma výkonového obvodu třífázového NPU

Na obr. 9 je zobrazen přechodný děj nabíjení kondenzátoru na výstupu po zapnutí měniče. V čase startu měniče je výstupní napětí na kondenzátoru téměř rovno amplitudě napájecího napětí. Antiparalelní diody ve výkonovém obvodu se chovají jako diodový usměrňovač pracující do kapacitní zátěže. Díky tomu lze zajistit částečné nabití výstupního kondenzátoru před samotným startem měniče. Regulační obvody po startu měniče zajistí, aby bylo výstupní napětí na požadované úrovni. V tomto případě byl uvažován kondenzátor nabitý na amplitudu sdruženého napětí ( $\sqrt{2} \cdot 400V \cong 565V$ ). Požadavek na výstupní napětí byl zvolen 700V.



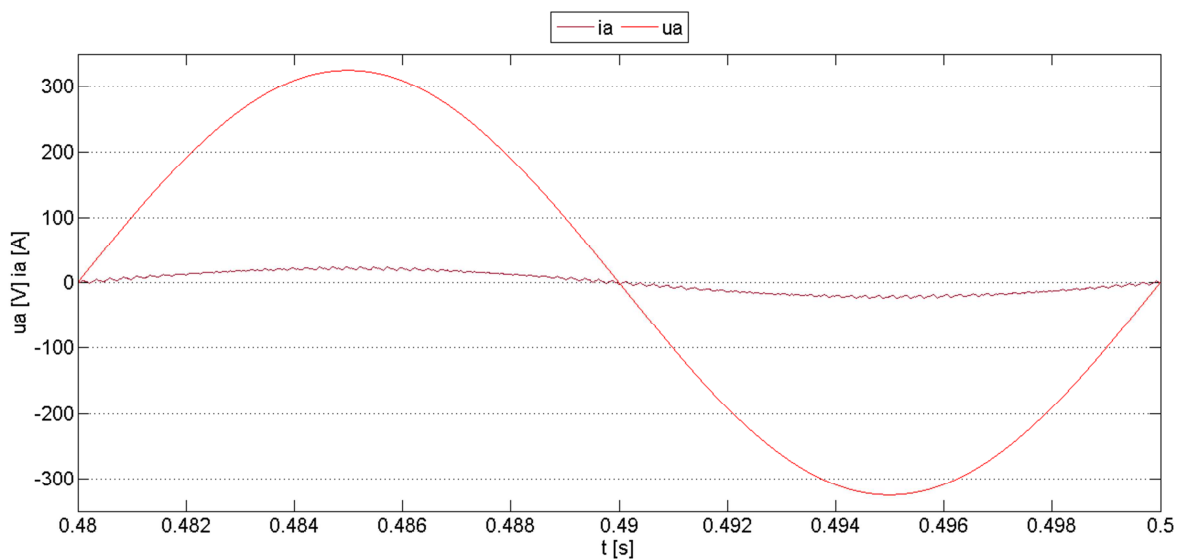
Obr. 9 Průběh výstupního napětí na kondenzátoru po zapnutí měniče

Obr. 10 zobrazuje průběhy jednotlivých napětí napájecí sítě a proudů odebíraných z jednotlivých fází sítě. Průběhy jsou zobrazeny v ustáleném stavu, kdy napětí na výstupu je již na požadované hodnotě a měnič pracuje při jmenovitém zatížení. Všechny proudy jsou odebírány ve fázi s napětím příslušné fáze.



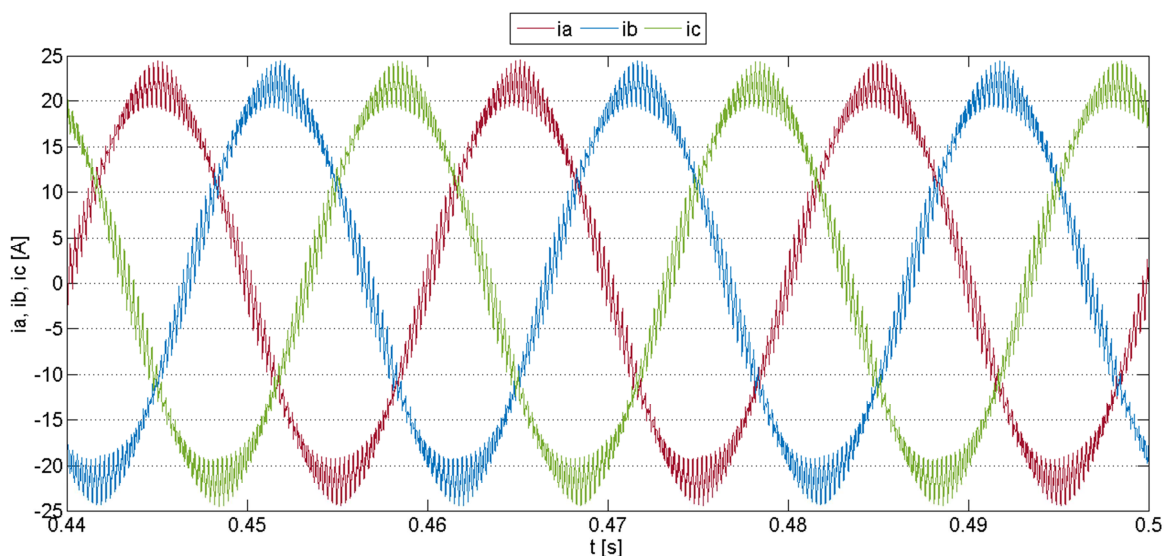
Obr. 10 Napětí sítě a proudy odebírané ze sítě

Na obr. 11 jsou pro přehlednost zobrazeny samostatně průběhy pro fázi  $a$ . Na tomto obrázku je lépe vidět, že proud odebíraný ze sítě je ve fázi s napětím sítě.



Obr. 11 Průběh napětí sítě  $u_a$  a odebíraný proud  $i_a$  z fáze  $a$

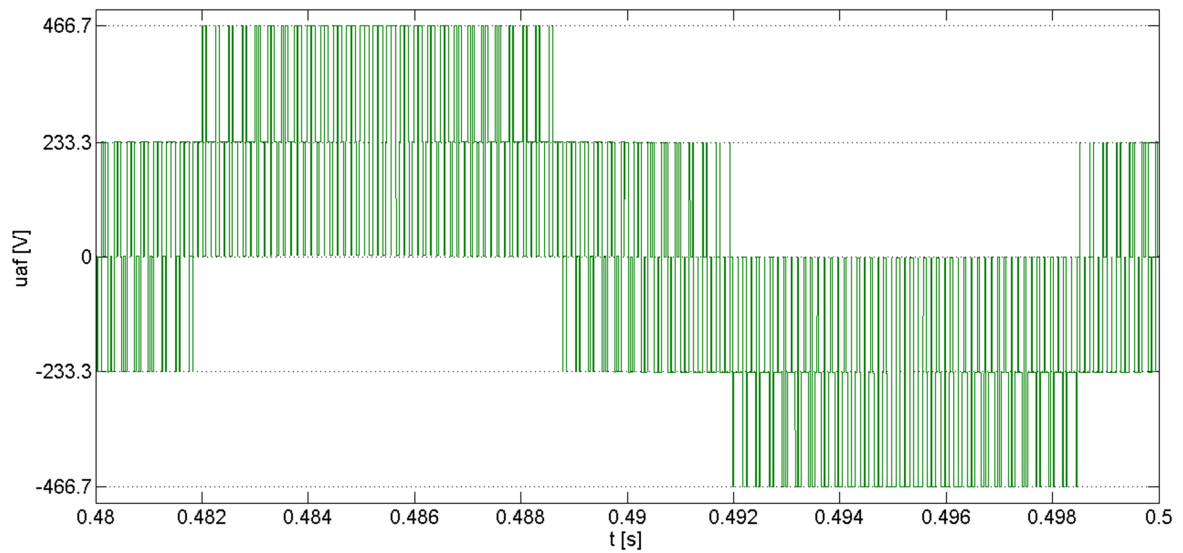
Obr. 12 zobrazuje průběhy proudů odebíraných z jednotlivých fází napájecí sítě. Průběhy se svým tvarem blíží sinusovému průběhu. Podíl 1. harmonické složky v tomto průběhu bude velký. Větší zvlnění proudu je způsobeno uvažováním vyhlazovací tlumivky s menší indukčností. Při použití tlumivky s větší indukčností by bylo možné dosáhnout průběhu s menším zvlněním.



Obr. 12 Průběhy proudů odebíraných z napájecí sítě



Na obr. 13 je průběh fázového napětí sítě  $u_{af}$ . Průběh tohoto napětí může postupně nabývat hodnot  $0, \pm \frac{U_c}{3}, \pm \frac{2U_c}{3}$ , v závislosti na aktuálním sepnutí spínačů měniče. V tomto případě se konkrétně jedná o hodnoty  $0, \pm \frac{700}{3}, \pm \frac{1400}{3}$ .



Obr. 13 Průběh fázového napětí  $u_{af}$

## 2 Měnič typu CHB

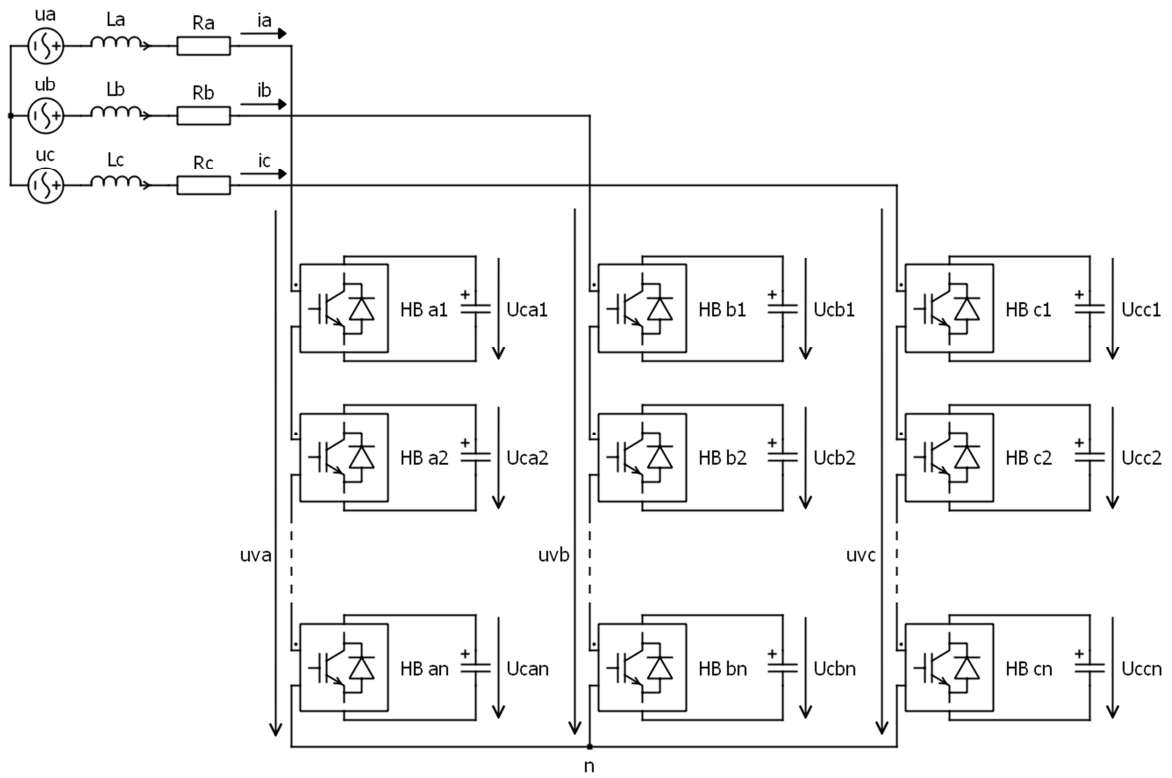
Měnič typu CHB je modulární víceúrovňový měnič. Výkonový obvod měniče je složený ze sériově spojených H-můstků, které tvoří čtyři vypínatelné součástky zapojené do můstku. Výkonový obvod H-můstku je stejný jako u jednofázového NPU. Tato topologie víceúrovňového měniče je oblíbená především pro svoji modulárnost a jednoduché zapojení. [4] Víceúrovňovost měniče je zajištěna vhodným připojováním jednotlivých H-můstků. Každý můstek je schopný vytvořit na své střídavé straně tři napěťové hladiny:  $+U_c$ ,  $0$ ,  $-U_c$ . Při sériovém zapojení H-můstků je celkový počet hladin roven  $2n+1$ , kde  $n$  je počet můstků v sérii. [3]

Na stejnosměrné straně každého H-můstku je připojen kondenzátor, na kterém je regulačními obvody udržováno konstantní napětí. Kondenzátory jednotlivých H-můstků jsou od sebe navzájem izolovány. Počet H-můstků v sérii je volen podle potřebného napětí na výstupu. [3]

### 2.1 Třífázový měnič typu CHB

Třífázový CHB měnič je kombinací jednofázové a třífázové varianty NPU, které jsou popsány výše. Na obr. 14 je zobrazen výkonový obvod třífázového měniče typu CHB. V tomto případě je v každé fázi použito sériové spojení tří H-můstků. Obecně lze předpokládat spojení  $n$  H-můstků. Počet úrovní na střídavé straně měniče je tedy  $2n+1 = 7$ , při spojení tří H-můstků v sérii. Na stejnosměrné straně měniče je v každé fázi  $n$  výstupních kondenzátorů. Jelikož jsou tyto kondenzátory od sebe navzájem izolovány, je možné každý výstup použít k napájení jiné zátěže. V tomto případě je třeba počítat s nesymetrickým zatížením měniče a použít vhodné metody v regulačních obvodech, které zaručí balancování napětí na jednotlivých výstupních kondenzátorech. V této práci je uvažováno symetrické zatížení jednotlivých výstupů, kde tyto problémy nevznikají.

Mezi výhody CHB měničů patří je jejich vysoká účinnost při nízké spínací frekvenci a také nižší elektromagnetické rušení. Naopak hlavní nevýhodou této topologie je nutnost izolovaných stejnosměrných zdrojů, což platí především pro použití CHB měniče jako napěťového střídače. Při použití jako NPU to lze považovat spíše jako výhodu, protože lze napájet oddělené stejnosměrné zátěže rozdílným napětím a přitom odebírat ze sítě sinusový proud ve fázi s napětím sítě. [4]



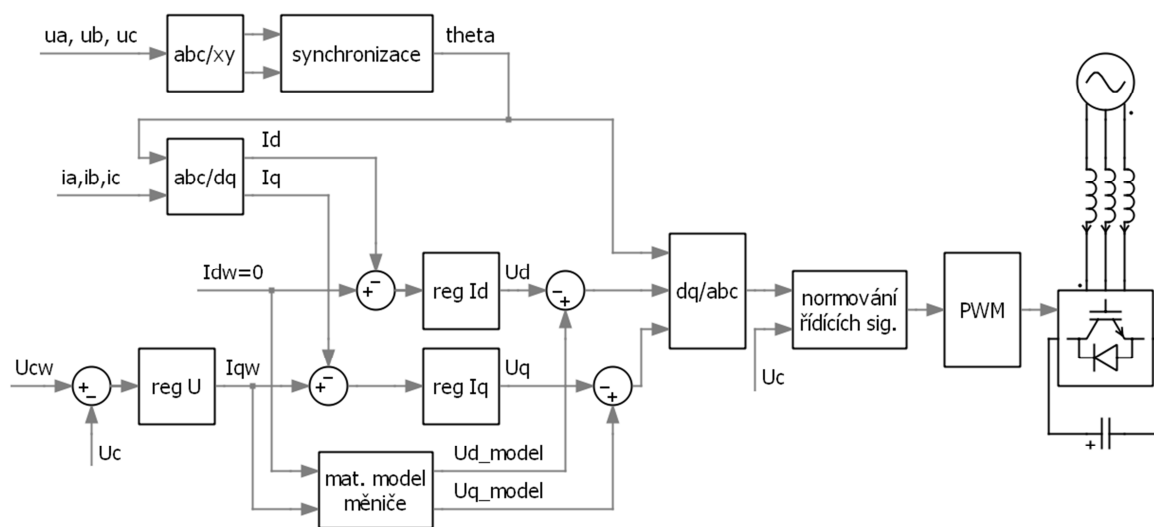
Obr. 14 Výkonový obvod třífázového CHB měniče s  $n$  H-můstky v sérii

### 3 Návrh regulace NPU

Regulační obvody slouží k udržování výstupního napětí měniče na požadované úrovni. Dále také zajišťují odběr proudu ze sítě ve fázi s napětím sítě a tím výrazně omezují podíl harmonických složek ve výsledném průběhu proudu. Regulační obvody by také měly být schopné dynamicky reagovat na změny zatížení měniče. V této práci je použito vektorové řízení NPU. U třífázové varianty CHB měniče zajišťuje toto řízení při vhodném nastavení i odběr sinusového proudu.

#### 3.1 Vektorové řízení

Zjednodušené schéma vektorového řízení NPU je zobrazeno na obr. 15. Výhodou vektorového řízení je možnost řídit zvlášť činnou a jalovou složku proudu. V praxi se snažíme o co největší podíl činné složky na úkor jalové. Toho lze dosáhnout maximalizováním podílu 1. harmonické v průběhu proudu odebíraného ze sítě. Při regulaci NPU tedy hodnotu jalové složky regulujeme na nulu, abychom ji eliminovali.



Obr. 15 Principiální schéma vektorového řízení NPU

Na začátku regulační smyčky je hodnota požadovaného napětí na výstupu měniče  $U_{cw}$ . Tato hodnota je porovnána s aktuální naměřenou hodnotou na výstupu  $U_c$  a rozdíl těchto hodnot vstupuje do regulátoru napětí, který na svém výstupu zadává velikost požadované složky proudu  $I_{qw}$ . Velikost požadavku na velikost složky proudu  $I_{dw}$  je nastavena na nulu, protože požadujeme pouze činnou složku proudu. Hodnoty požadavků složek proudu  $I_{dw}$  a  $I_{qw}$  jsou porovnány s aktuální hodnotou těchto složek a jejich rozdíly vstupují do příslušných regulátorů proudu. Aktuální velikost složek  $I_d$  a  $I_q$  je získána

transformacemi měřených fázových proudů do rotujícího souřadného systému  $dq$ . Proudů jsou nejprve transformovány do souřadného systému  $xy$  pomocí rovnic (3.1).

$$\begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ 0 & \frac{2}{\sqrt{3}} & -\frac{2}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

V dalším kroku jsou transformovány do rotujícího souřadného systému  $dq$  pomocí rovnic (3.2).

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Pro lepší dynamiku a fungování celého řízení je použit matematický model pro odhad požadovaných složek napětí  $U_{dw}$  a  $U_{qw}$ . Tato napětí jsou vypočítána s využitím zjednodušených rovnic (3.3) a (3.4) z hodnot požadovaných složek proudu  $I_{dw}$  a  $I_{qw}$ .

$$U_q = U_m - \omega L \cdot I_{dw} \quad (3.3)$$

$$U_d = \omega L \cdot I_{qw} \quad (3.4)$$

Tento výpočet napětí je pouze přibližný. Přesný výpočet není nutný, neboť regulátory proudu zajistí korekci vypočtených napětí. Tím je zvýšena dynamika celého řízení, neboť regulátory proudu nemusí zajišťovat regulaci celých napětí  $U_{dw}$  a  $U_{qw}$ , ale pouze doregulují odchylku modelem vypočtených hodnot od požadovaných hodnot. Napětí  $U_d$  a  $U_q$  jsou dále zpětně transformována do souřadného systému  $abc$ . Transformací vzniknou požadovaná harmonická napětí, která je nutné ještě v dalším kroku vhodně znormovat. V tomto případě je použito normování pomocí celkového výstupního napětí. Po znormování jsou tato napětí použita jako řídicí signály, které vstupují do bloku PWM řízení. Zde se pomocí porovnání s referenčním pilovým signálem generují spínací impulzy pro jednotlivé spínače měniče. Pro správnou funkci použitých transformací a celého řízení je nutná synchronizace s napájecím napětím sítě. [1]

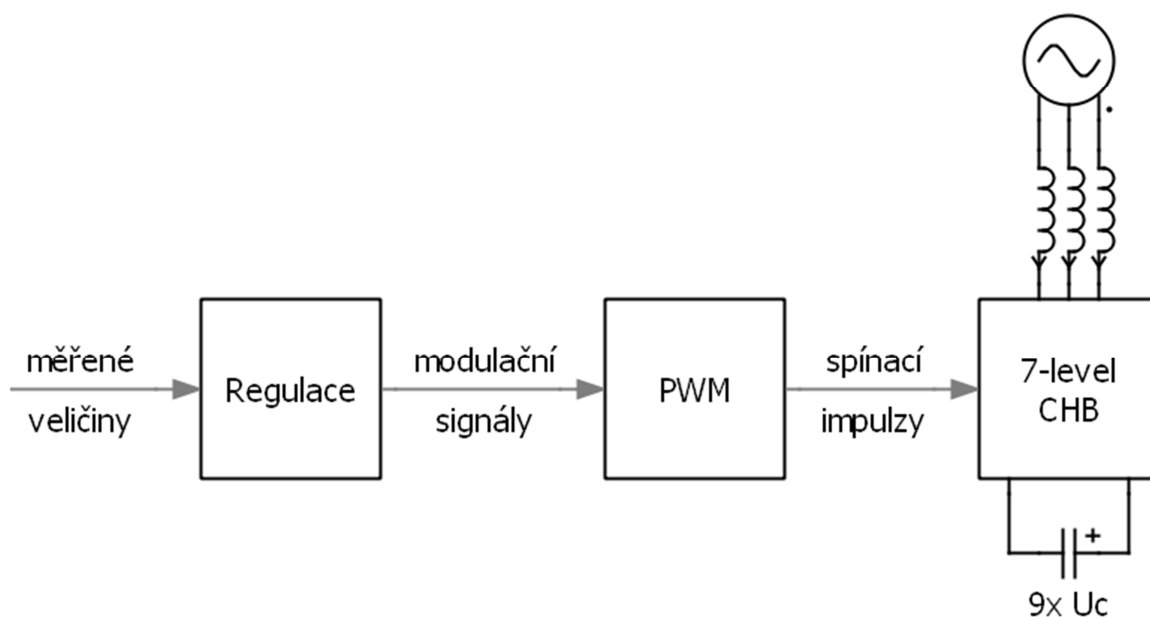
## 4 Simulace

Simulační model byl sestaven v programu Matlab – Simulink s využitím knihovny Plecs. Toto řešení bylo zvoleno kvůli snadnému a přehlednému realizování modelu. Simulink využívá k tvorbě simulačních modelů bloková schémata, což umožňuje snadnou orientaci v modelu. Výsledky simulací lze jednoduše graficky zobrazit a díky tomu rychleji odladit simulační model. Výsledná data lze exportovat do prostředí programu Matlab, kde je možné je dále zpracovávat.

### 4.1 Simulační model CHB měniče

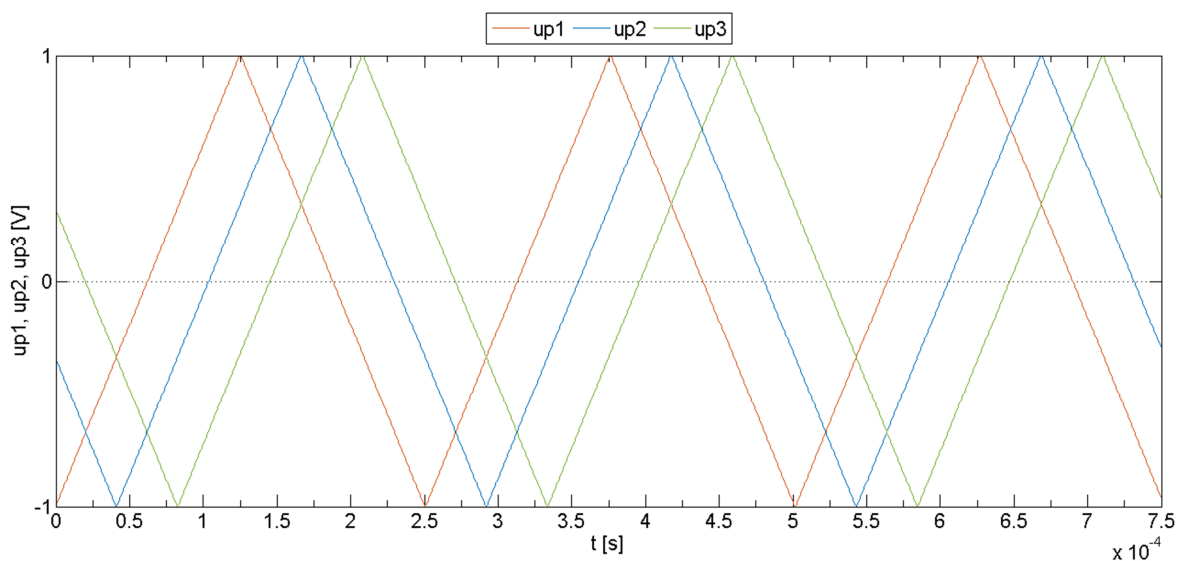
Simulace je počítána s pevným krokem o délce  $10^{-7}$  s. Vzorkovací perioda regulační smyčky je nastavena na  $5 \cdot 10^{-6}$  s.

Sestavený simulační model se skládá ze tří základních částí: blok regulace, blok PWM a výkonový obvod. Zjednodušené schéma simulačního modelu je zobrazeno na obr. 16. V bloku regulace je sestaveno vektorové řízení NPU. Vstupem do bloku regulace je požadavek na velikost celkového výstupního napětí  $U_{cw}$ . Dále do tohoto bloku vstupují hodnoty veličin měřených ve výkonovém obvodu. Konkrétně se jedná o proudy odebírané ze sítě ( $i_a, i_b, i_c$ ), napětí sítě ( $u_a, u_b, u_c$ ) a celková napětí na výstupech jednotlivých fází ( $U_{ca}, U_{cb}, U_{cc}$ ). Výstupem z tohoto bloku jsou řídicí signály, které vstupují do bloku PWM.



Obr. 16 Zjednodušené schéma simulačního modelu 3f CHB měniče s řídicími obvody

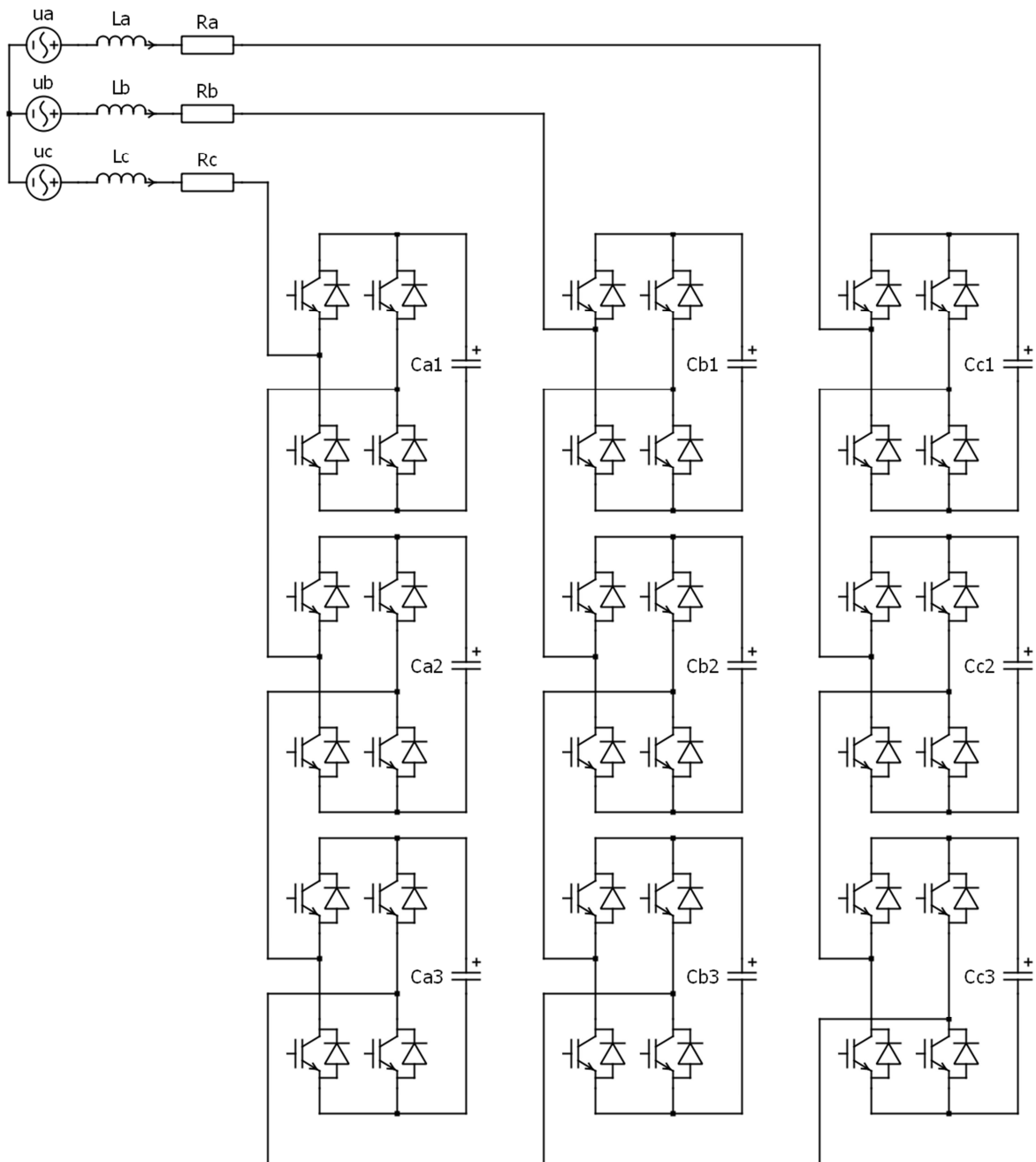
Zde je realizována pulzně šířková modulace a spínací logika měniče. Řídící signál pro příslušnou fázi je společný pro řízení všech H-můstků v sérii. Použitá spínací logika využívá dvou řídicích signálů, přičemž druhý signál je generován jako signál první s opačným znaménkem. První řídicí signál je použit pro řízení jedné větve H-můstku a pro druhou větev je použit negovaný řídicí signál. Tento princip spínání zajišťuje rovnoměrné zatížení spínačů v H-můstku, díky pravidelnému střídání nulových vedení. Pro řízení jednotlivých H-můstků ve fázích měniče je použito přesazeného řízení. Tím je dosaženo příznivějšího průběhu napětí  $u_v$  na střídavé straně měniče a také menšího zvlnění proudu odebíraného ze sítě. Přesazené řízení je realizováno generováním posunutých referenčních pilových signálů pro každý H-můstek v sérii. V tomto případě je zvoleno přesazení o  $\frac{T_{pwm}}{6}$ , což je zobrazeno na obr. 17. Frekvence pilového signálu je zde 4kHz, což odpovídá periodě  $2,5 \cdot 10^{-4}$ . Při přesazeném řízení jsou modulační signály pro danou fázi porovnávány v tomto případě se třemi různými pilovými signály. Pro každý H-můstek jsou tedy generovány spínací impulzy zvlášť. Výstupem z tohoto bloku jsou vygenerované



Obr. 17 Průběh referenčních pilových signálů  $u_p$  při přesazeném řízení

spínací impulzy na jednotlivé tranzistory měniče. Výkonový obvod je tvořen sedmiúrovňovým měničem typu CHB, použitým jako napěťový pulzní usměrňovač. Zjednodušené schéma použitého výkonového obvodu je zobrazeno na obr. 18. Střídavá strana měniče je připojena na třífázovou napájecí síť. V každé fázi je zapojena vyhlazovací tlumivka, která je ve schématu zastoupena indukčností a odporem. Ke každé fázi jsou připojeny tři sériově řazené H-můstky. Na stejnosměrné straně jednotlivých H-můstků,

ze kterých je měnič tvořen, jsou zapojeny výstupní kondenzátory. K těm je připojena zátěž realizovaná ekvivalentním zdrojem stejnosměrného proudu. V tomto případě je uvažováno symetrické zatížení měniče. To znamená, že z každého výstupního kondenzátoru je ekvivalentním zdrojem proudu odebírán stejný proud. [5]



Obr. 18 Model výkonového obvodu třífázového sedmiúrovňového měniče typu CHB



**Parametry simulačního modelu:**

Výkonový obvod:

$$f = 50\text{Hz}$$

$$U_m = 325\text{V}$$

$$R_a = R_b = R_c = 0.1\Omega$$

$$L_a = L_b = L_c = 2\text{mH}$$

$$C = 4\text{mF}$$

$$U_c(0) = 108\text{V}$$

$$U_{cw} = 150\text{V}$$

$$U_{cw\_sum} = 450\text{V}$$

$$I_{zN} = 7.4\text{A}$$

$$F_{pwm} = 4\text{kHz}$$

Regulační obvody:

$$T_{vz} = 50\mu\text{s}$$

$$T_{pwm} = 1/4000\text{s}$$

PI regulátor napětí  $U_c$ :

$$K_p = 0.4$$

$$T_i = 0.01\text{s}$$

$$I_{max} = 800\text{A}$$

$$I_{min} = -800\text{A}$$

PI regulátor proudu  $I_d$ :

$$K_p = 7$$

$$T_i = 0.003\text{s}$$

$$U_{max} = 500\text{V}$$

$$U_{min} = -500\text{V}$$

PI regulátor proudu  $I_q$ :

$$K_p = 7$$

$$T_i = 0.003\text{s}$$

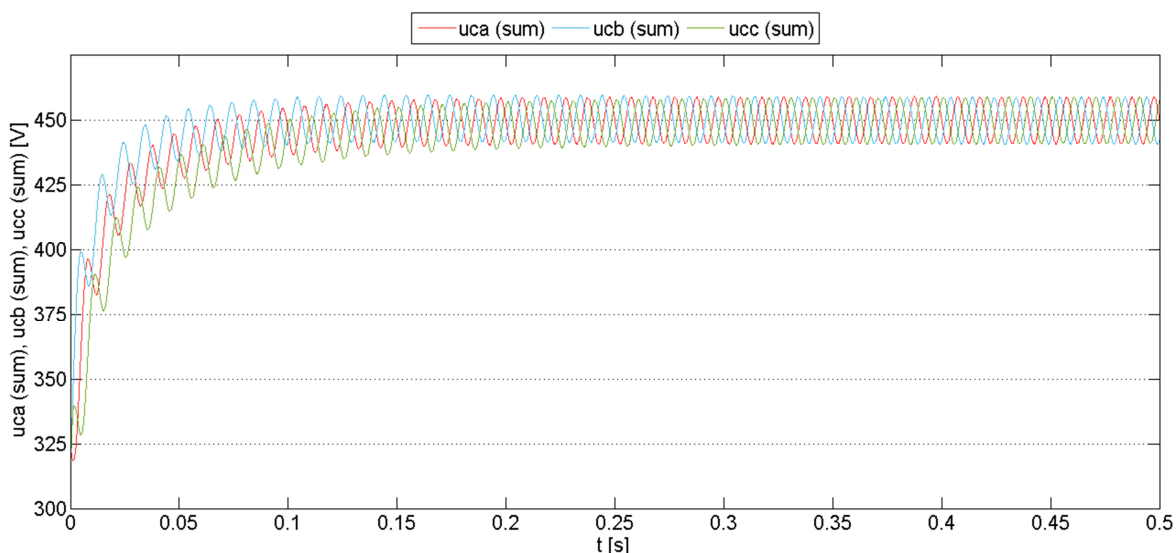
$$U_{max} = 500\text{V}$$

$$U_{min} = -500\text{V}$$

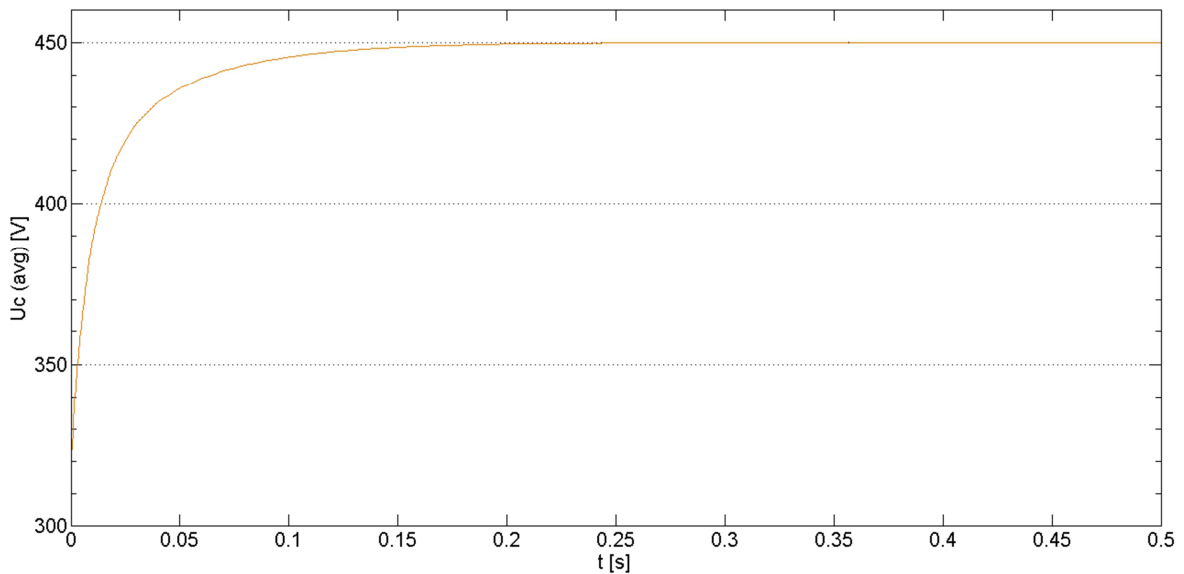
## 4.2 Výsledky simulace – start měniče

Pro zhodnocení navržených regulačních obvodů byly vybrány dva přechodné děje. V této kapitole je simulováno zapnutí měniče při zatížení jmenovitým proudem do zátěže  $i_z = 7,4\text{A}$ . Počáteční napětí na výstupních kondenzátorech jednotlivých můstků je při zapnutí měniče rovno 108V. Celkové počáteční výstupní napětí ve fázi je tedy rovno 324V. Toto napětí je zvoleno z důvodu uvažování počátečního nabíjení výstupních kondenzátorů pomocí antiparalelních diod, které se chovají jako diodový usměrňovač pracující do kapacitní zátěže. Po startu měniče se regulační obvody snaží zajistit požadované napětí na výstupu.

Na obr. 19 jsou zobrazeny průběhy celkových napětí na výstupu jednotlivých fází  $U_{c\_sum}$ . Tato napětí vzniknou součtem napětí na výstupech jednotlivých H-můstků. Výstupní napětí jednotlivých můstků je regulováno na 150V. Celkové napětí na výstupu každé fáze je tedy regulováno na 450V. Jako zpětná vazba pro regulační obvody je použita průměrná hodnota výstupního napětí ze všech fází  $U_{c\_avg}$ . Průběh průměrné hodnoty výstupního napětí je zobrazen na obr. 20. K vyrovnání výstupního napětí v jednotlivých fázích dochází díky normování řídicích signálů pomocí celkového výstupního napětí příslušné fáze. Tím je ovlivněna velikost modulačních signálů pro každou fázi zvlášť.

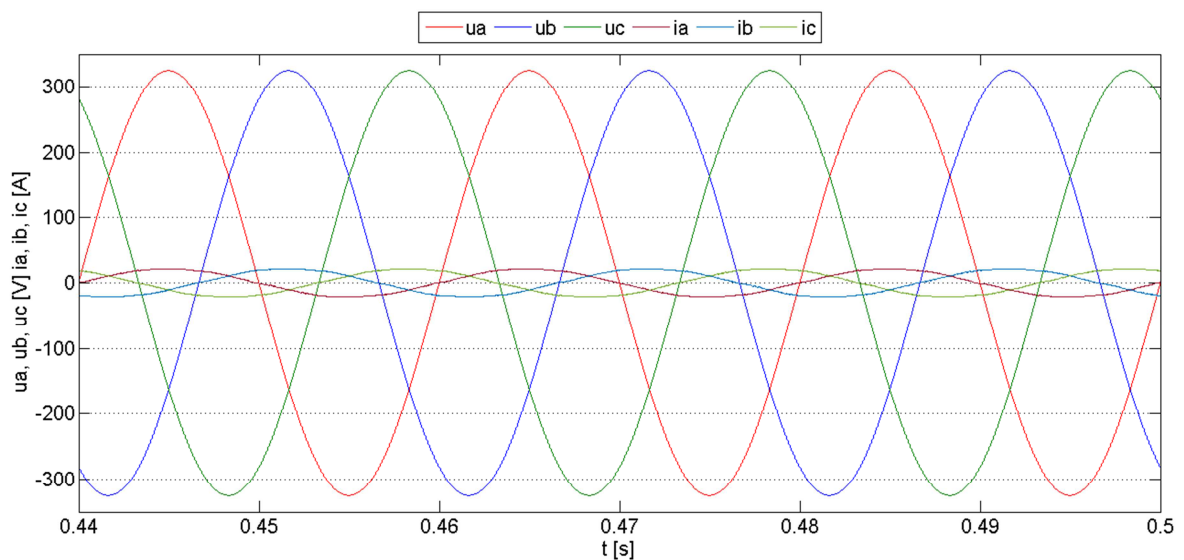


Obr. 19 Průběhy celkových výstupních napětí fází po zapnutí měniče

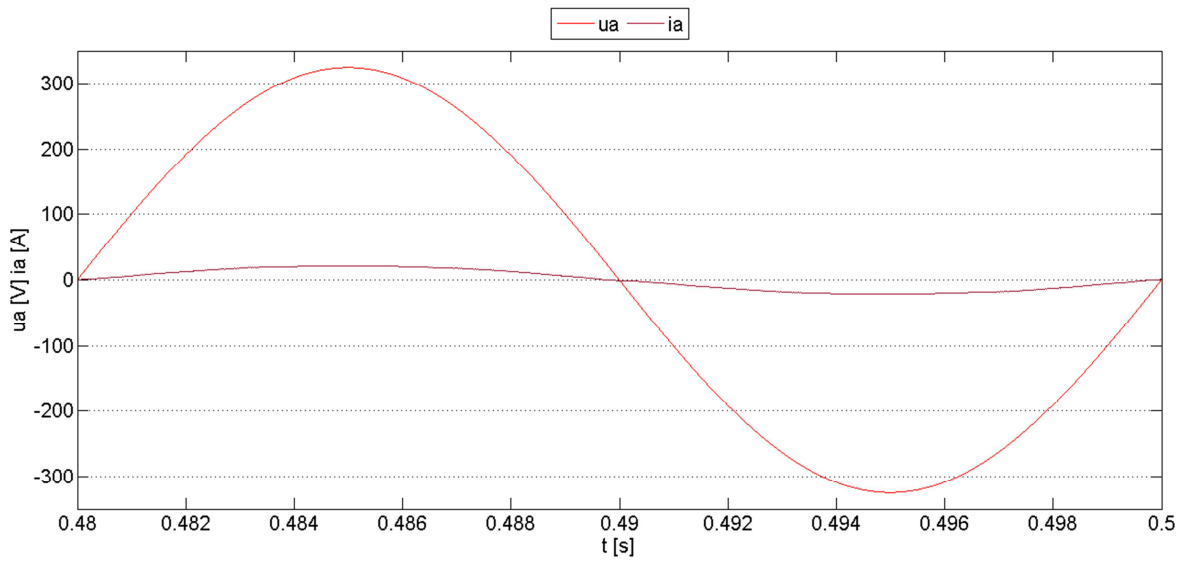


Obr. 20 Průběh průměrné hodnoty celkového napětí na výstupu fází měniče

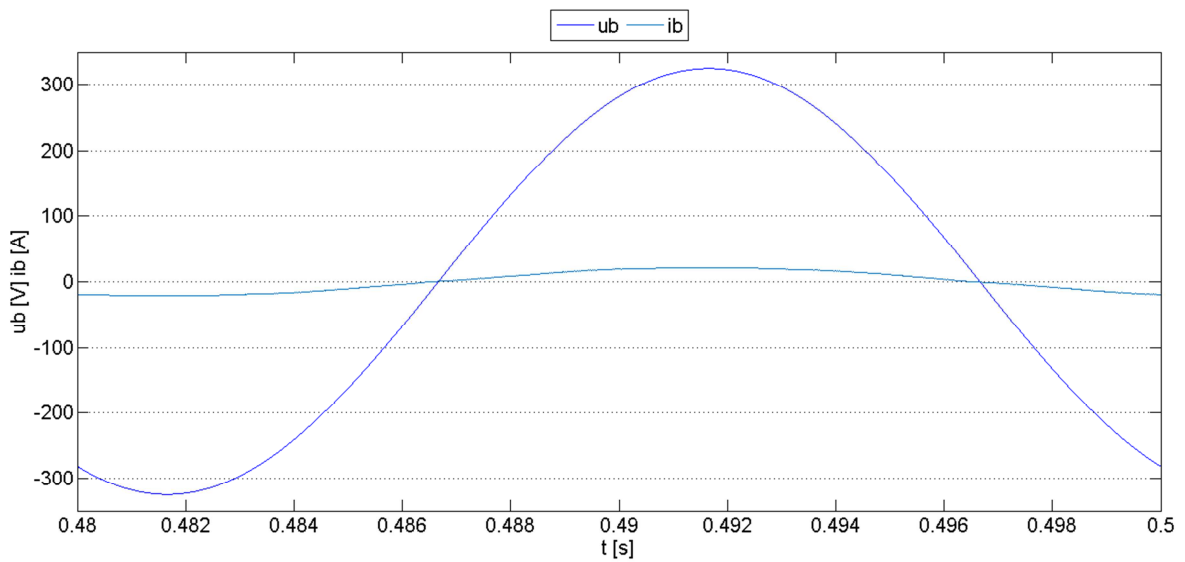
Na obr. 21 jsou zobrazeny průběhy síťových napětí a proudů odebíraných z jednotlivých fází sítě po odeznění přechodného jevu při zapnutí. Z obrázku je patrné, že všechny proudy jsou ve fázi s příslušným napětím sítě. Podrobněji jsou průběhy těchto veličin v jednotlivých fázích zobrazeny na obr. 22, obr. 23 a obr. 24.



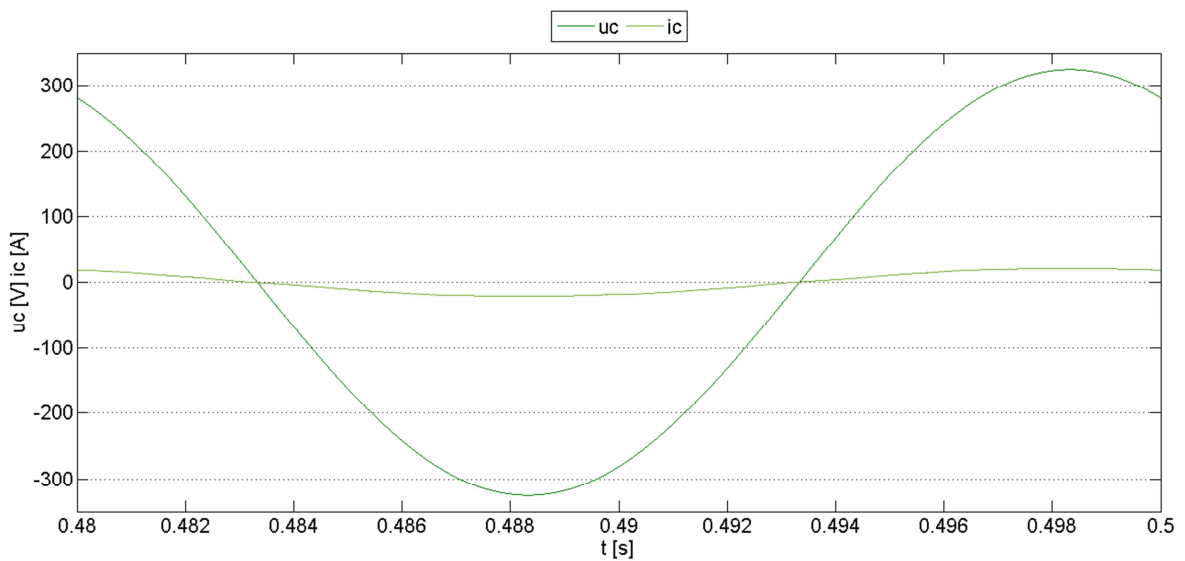
Obr. 21 Průběhy síťových napětí a proudů odebíraných ze sítě



Obr. 22 Průběh napětí a odebíraného proudu fáze a

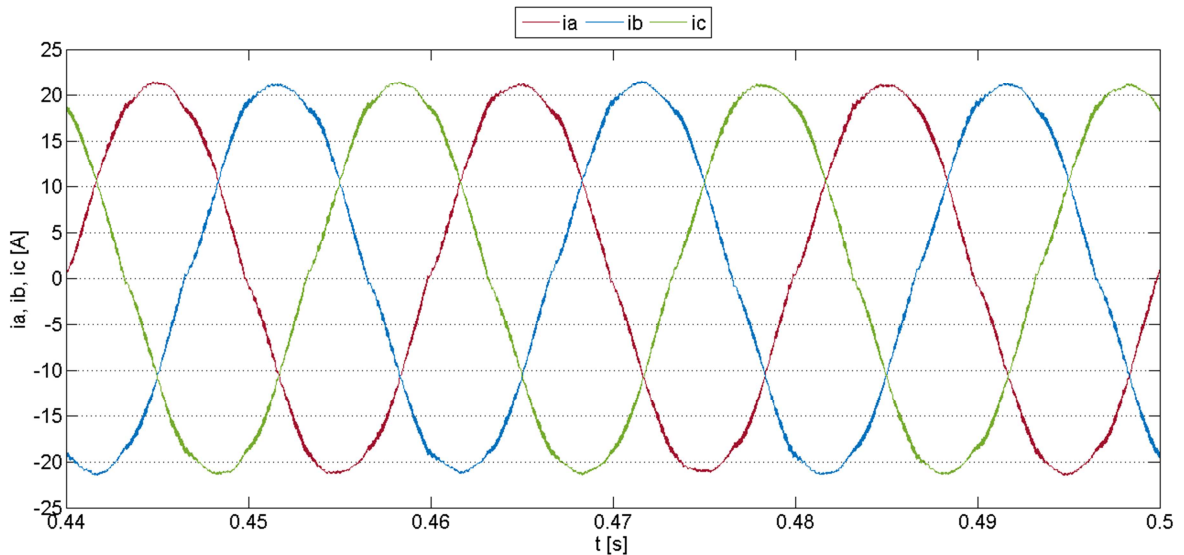


Obr. 23 Průběh napětí a odebíraného proudu fáze b



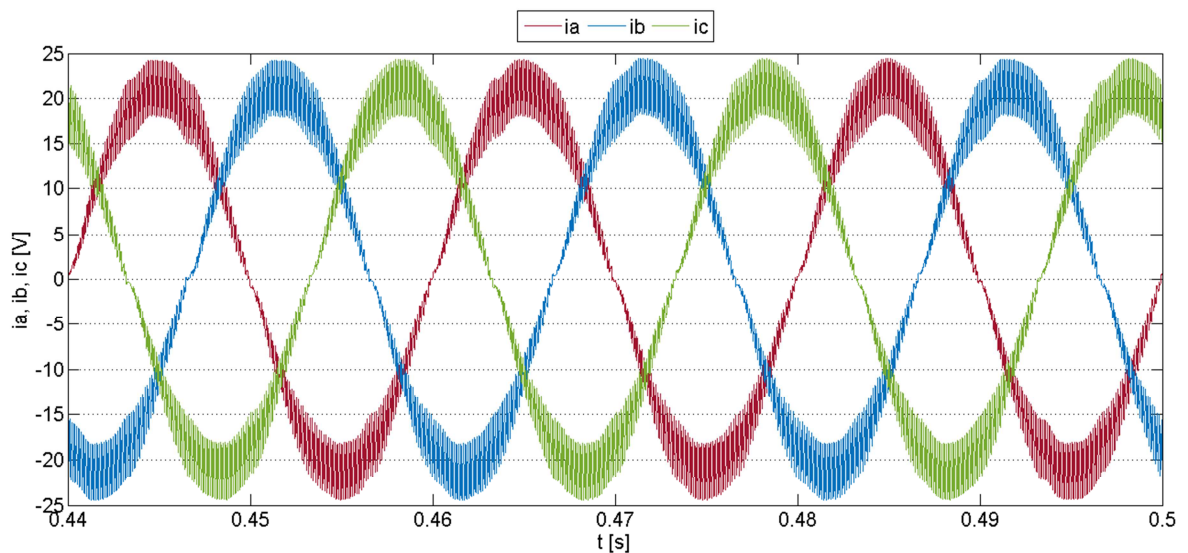
Obr. 24 Průběh napětí a odebíraného proudu fáze c

Obr. 25 zobrazuje průběhy proudů odebíraných z jednotlivých fází napájecí sítě. Průběhy jsou zobrazeny v okamžiku, kdy je napětí na výstupních kondenzátorech již ustáleno na požadované hodnotě. Zatížení měniče odpovídá jmenovitému chodu.



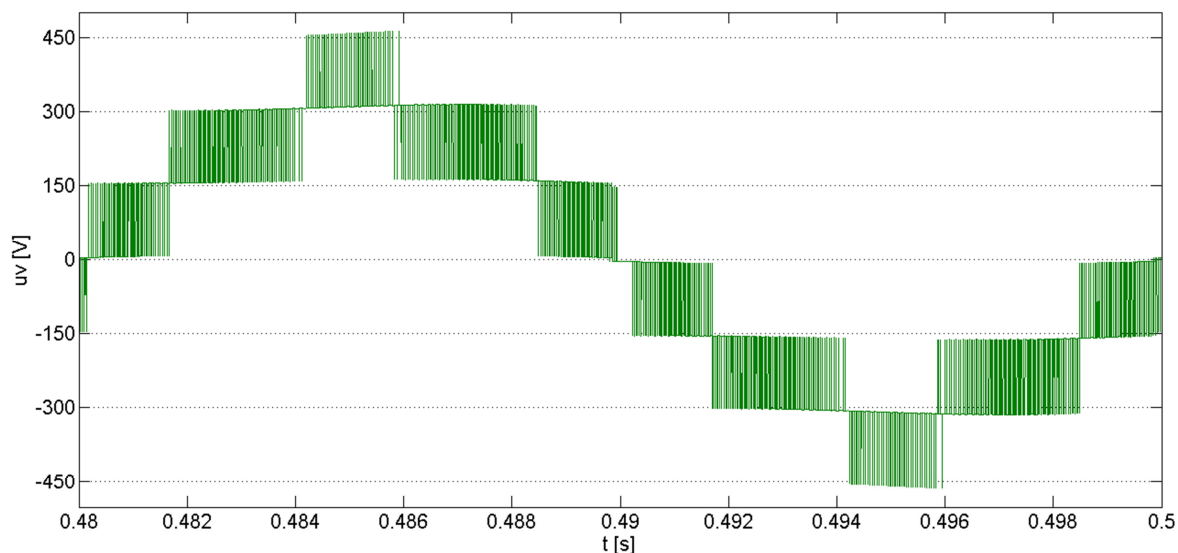
Obr. 25 Průběhy proudů  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$  odebíraných ze sítě

Na obr. 26 jsou stejné průběhy jako na obr. 25, jen za předpokladu, že nebylo použito přesazeného řízení. Při porovnání obou obrázků je rozdíl ve zvlnění proudu dobře patrný.



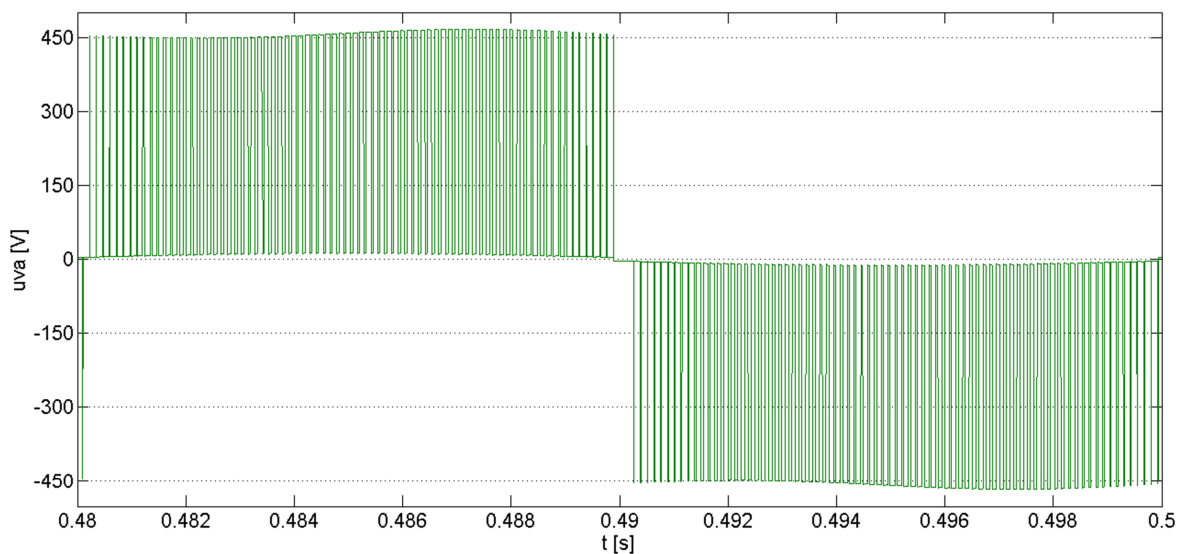
Obr. 26 Průběhy proudů  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$  odebíraných ze sítě bez přesazeného řízení

Na obr. 27 je zobrazen průběh napětí na střídavé straně měniče při využití přesazeného řízení. Napětí postupně nabývá hodnot -450V, -300V, -150V, 0, 150V, 300V a 450V. Tento víceúrovňový průběh napětí  $u_v$  zajišťuje menší zvlnění proudu odebíraného z napájecí sítě.



Obr. 27 Průběh napětí  $u_{va}$  na střídavé straně měniče

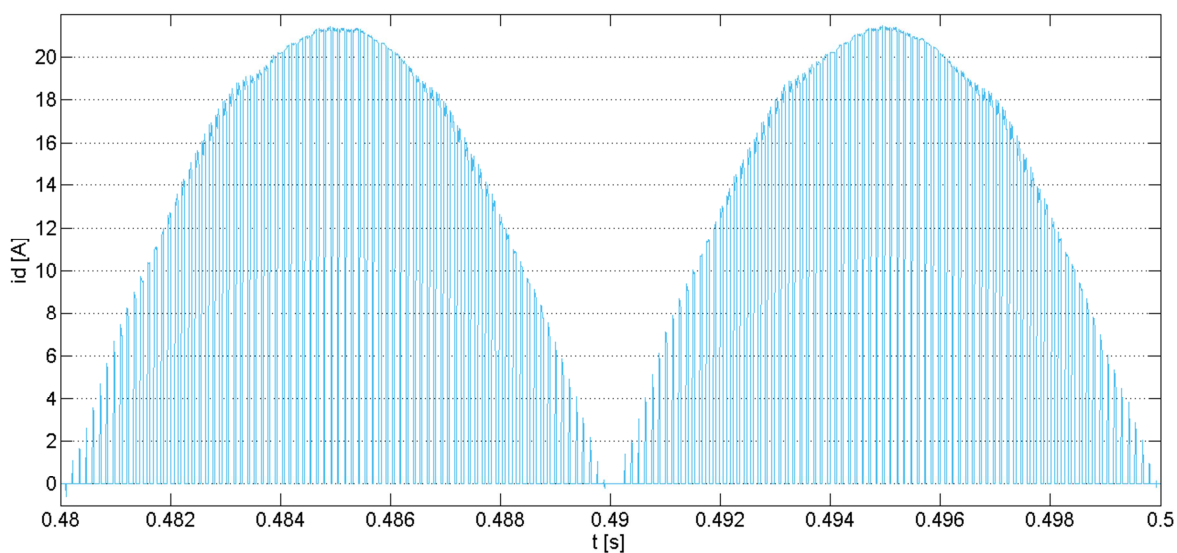
Pro srovnání je na obr. 28 zobrazen stejný průběh bez přesazeného řízení. V tomto případě se místo třech posunutých pilových signálů použije pouze jeden a spínací impulzy pro jednotlivé H-můstky v sérii jsou shodné. Jak je z obrázku vidět, při spínání dochází



Obr. 28 Průběh napětí  $u_{va}$  na střídavé straně měniče bez přesazeného řízení

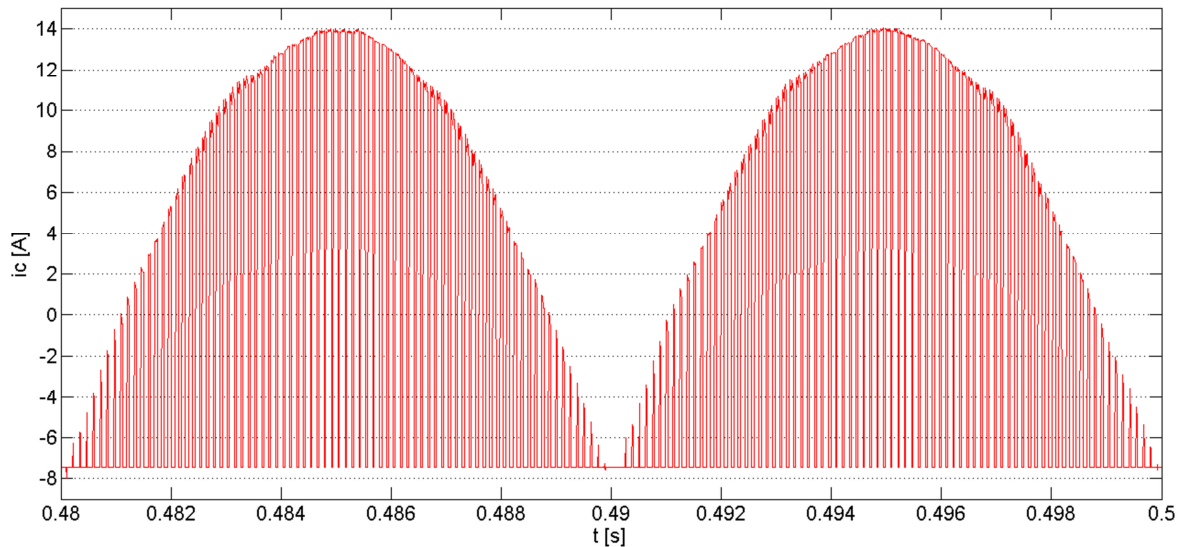
k velkým změnám napětí, což vede k většímu zvlnění proudu. Při přesazeném řízení je spínání jednotlivých H-můstků posunutě, tudíž se napětí mění postupně po menších krocích.

Na obr. 29 je zobrazen průběh proudu  $i_{dc}$  na stejnosměrné straně jednoho H-můstku. Z průběhu je patrné, že se v něm střídají dva režimy. V jednom je výstupní proud nulový, což odpovídá spínací kombinaci nulového vedení. Proud do zátěže je v tomto stavu dodáván výstupním kondenzátorem. Druhý režim nastává při spínací kombinaci odpovídající vedení do zátěže. Při tomto stavu sepnutí je proud do zátěže dodáván z napájecí sítě.



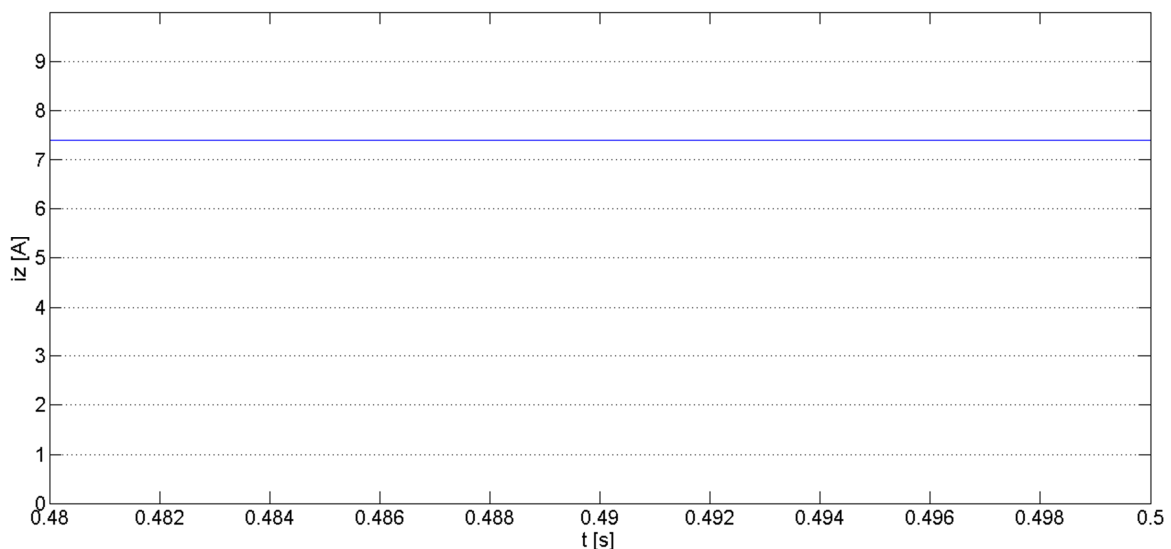
Obr. 29 Průběh proudu  $i_{dc}$

Na obr. 30 je zobrazen průběh proudu  $i_{cap}$ , procházejícího výstupním kondenzátorem. Opět je zde vidět střídání dvou režimů měniče. V tomto případě je při nulovém vedení proud kondenzátorem záporný a je roven  $-i_z$ . V druhém režimu je proud do zátěže dodáván napájecí sítí a zároveň je i dobíjen kondenzátor na výstupu.



Obr. 30 Průběh proudu  $i_{cap}$

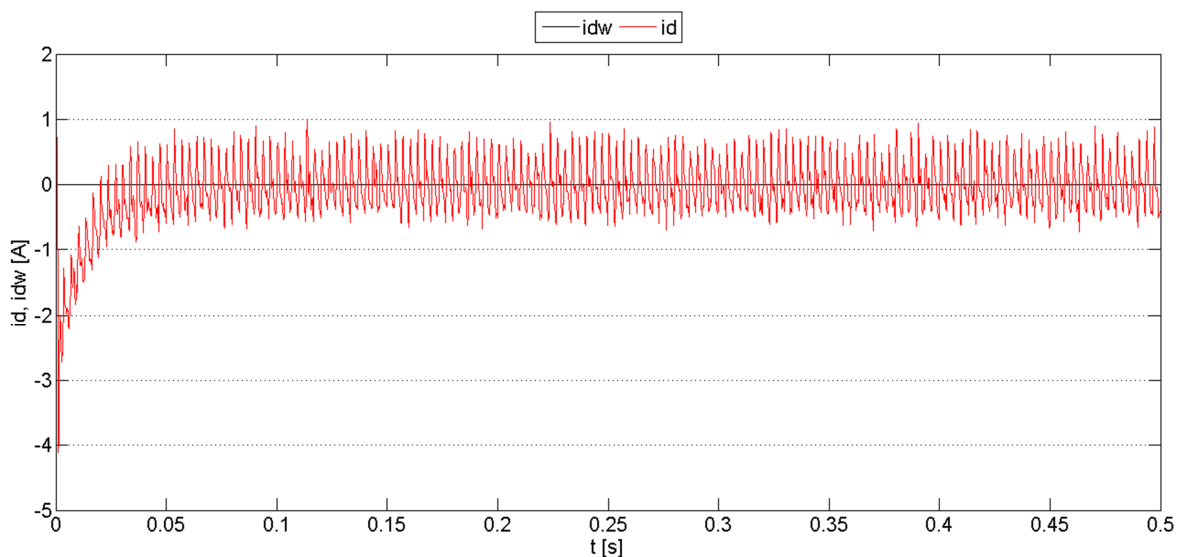
Na obr. 31 je zobrazen průběh proudu do zátěže  $i_z$ , pro který platí  $i_z = i_{dc} - i_{cap}$ . Zátěž je v tomto případě realizována pomocí proudového zdroje, který je použit jako zdroj ekvivalentního proudu zátěží.



Obr. 31 Průběh proudu  $i_z$

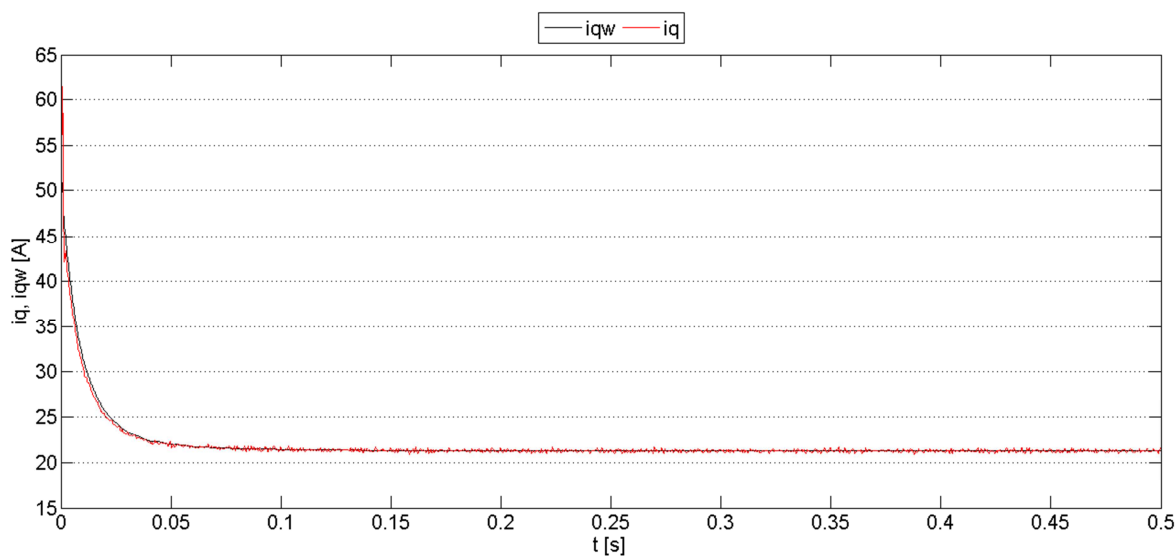


Obr. 32 zobrazuje průběh složky proudu  $I_d$  a požadavku na tento proud. Obrázek zobrazuje přechodný děj při startu měniče. Požadavek  $I_{dw}$  je nastaven na nulovou hodnotu z důvodu požadované eliminace této složky proudu. Touto eliminací je minimalizován odběr jalové složky proudu ze sítě.



Obr. 32 Průběh proudů  $I_d$  a  $I_{dw}$

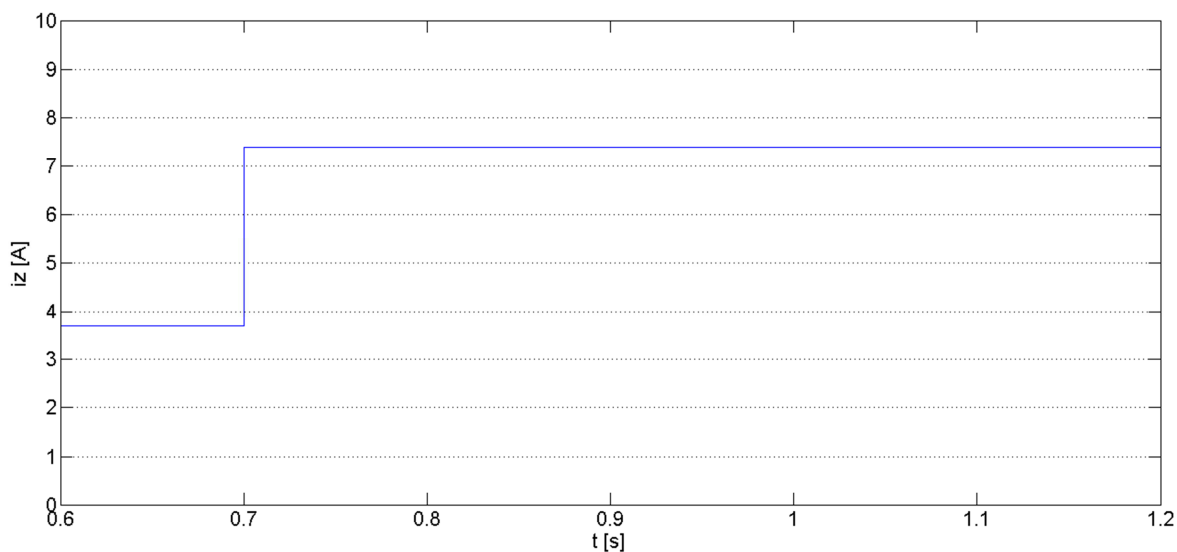
Na obr. 33 je zobrazen průběh činné složky proudu  $I_q$  a požadavku  $I_{qw}$  během přechodného děje při startu měniče. Tento proud určuje velikost činné složky v proudu odebíraném z napájecí sítě.



Obr. 33 Průběh proudu  $I_q$  a  $I_{qw}$

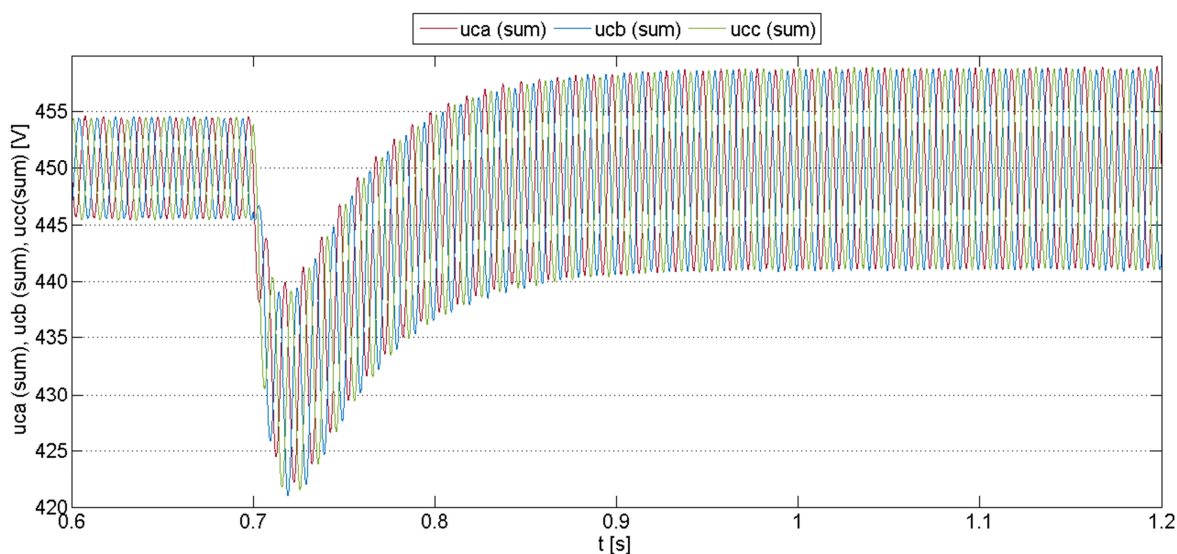
### 4.3 Výsledky simulace – změna zátěže

Jako druhý simulovaný děj byla zvolena skoková změna v zatížení měniče. Změna zatížení je realizována skokovou změnou proudu odebíraného zátěží  $i_z$ . Průběh tohoto proudu je zobrazen na obr. 34, ze kterého je patrná změna proudu v čase 0,7s. Před změnou zatížení pracuje měnič v ustáleném stavu. Proud  $i_z$  je změněn z hodnoty 3,7A na hodnotu 7,4A, což odpovídá změně z  $0,5 \cdot I_{zN}$  na  $I_{zN}$ .



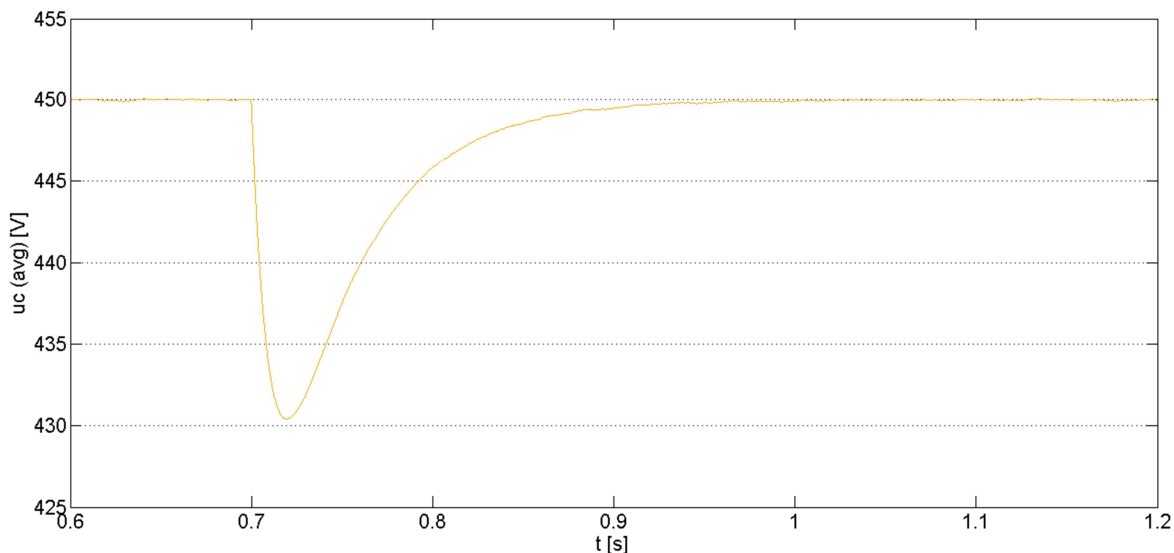
Obr. 34 Průběh proudu  $i_z$  při změně zatížení měniče

Na obr. 35 jsou zobrazeny průběhy celkových napětí na výstupech jednotlivých fází  $U_{c\_sum}$ . V čase 0,7s dochází k poklesu napětí z důvodu zvýšení odběru proudu zátěží.



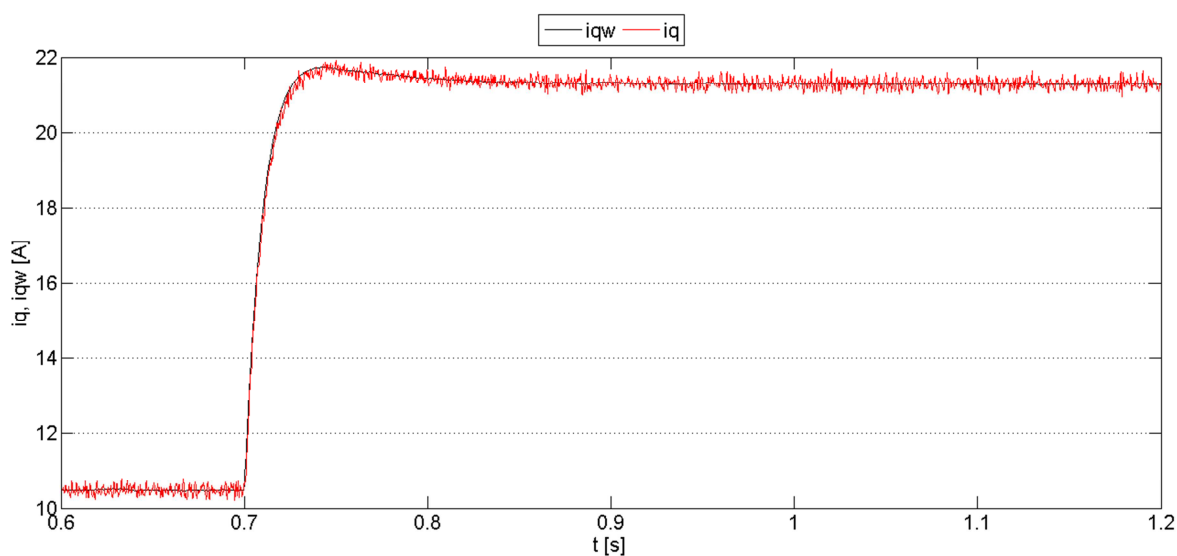
Obr. 35 Průběh celkových napětí  $U_c$  během změny zatížení měniče

Na tuto změnu reagují regulační obvody a během přechodného děje je napětí na výstupu opět doregulováno na požadovanou úroveň. Na obr. 36 je zobrazen průběh napětí  $U_{c\_avg}$ , který je použit jako zpětná vazba pro regulační obvody.



Obr. 36 Průběh napětí  $U_{c\_avg}$  během změny zatížení měniče

Obr. 37 zobrazuje průběh činné proudu  $i_q$  a požadovanou hodnotu tohoto proudu  $i_{qw}$ . Na obrázku je vidět, že v čase 0,7s je požadováno zvýšení činné složky proudu. To je reakce regulátoru napětí na náhlý pokles napětí na výstupu. Regulátor proudu  $I_q$  na tento požadavek reaguje a díky jeho zásahu je zvýšen proud odebíraný ze sítě. Díky tomu jsou kondenzátory na jednotlivých výstupech opět dobity na požadovanou hodnotu.



Obr. 37 Průběh proudů  $I_q$  a  $I_{qw}$  při změně zatížení

## Závěr

Tato diplomová práce se zabývala třífázovým vysokonapěťovým měničem typu CHB, který byl použit jako napěťový pulzní usměrňovač. Jedním z cílů práce bylo analyzovat chování CHB měniče. Z důvodu složitější topologie tohoto měniče bylo nejprve popsáno chování jednodušších zapojení měničů, ze kterých topologie CHB vychází. Následně byl vysvětlen rozdíl mezi těmito topologiemi.

Pro CHB měnič byl navržen řídicí algoritmus. Bylo zvoleno vektorové řízení s pulzně šířkovou modulací. Navržený řídicí algoritmus zajišťuje regulaci výstupního napětí na požadovanou hodnotu. Dále se stará o minimalizaci jalové složky proudu odebíraného z napájecí sítě. Toho je dosaženo odběrem proudu ve fázi s napětím sítě a průběhem proudu blížícího se sinusovému průběhu.

V další části práce byl sestaven simulační model zkoumaného měniče. Skládá se z výkonového obvodu samotného měniče a z navržených řídicích obvodů. Model je sestaven v programu Matlab – Simulink s využitím knihovny Plecs. Ve výkonovém obvodu simulace je použit třífázový sedmiúrovňový CHB měnič.

Z provedených simulací byla exportována data s průběhy základních obvodových veličin měniče a vynesena do přehledných grafů. Simulacemi byly ověřeny vlastnosti CHB měniče a fungování navržených regulačních obvodů. Navržené obvody dokáží regulovat výstupní napětí měniče na požadovanou hodnotu a zároveň minimalizovat negativní vlivy na napájecí soustavu. Navržená regulace je vhodná pouze pro symetrické zatížení měniče pomocí ekvivalentních zdrojů proudu. Při nesymetrickém zatížení jednotlivých výstupů nedokáže tato regulace zajistit stejné napětí na výstupech jednotlivých H-můstků. V praxi je potřeba počítat s určitou mírou nesouměrnosti v zatížení měniče. Proto by bylo vhodné navrženou regulaci modifikovat doplněním algoritmu, který zajistí vyrovnaní napětí na jednotlivých výstupech.

Přínosem této práce je sestavený simulační model třífázového sedmiúrovňového měniče typu CHB, který pracuje jako napěťový pulzní usměrňovač. Podle sledovaných parametrů pracuje simulační model při idealizovaných podmínkách správně.

Všechny cíle definované v zadání této diplomové práce byly splněny.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] ZEMAN, Karel, Zdeněk PEROUTKA a Martin JANDA. *Automatická regulace pohonů s asynchronními motory*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2004. ISBN 80-7043-350-7.
- [2] VONDRÁŠEK, František. *Výkonová elektronika. svazek III, Měniče s vlastní komutací a bez komutace*. 2. rozš. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2003. 267 s. ISBN 80-7082-980-X.
- [3] BLAHNÍK, Vojtěch, Z. Peroutka and J. Talla, "Control of cascaded H-bridge active rectifier providing active voltage balancing," *IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Dallas, TX, 2014, pp. 4589-4594. doi: 10.1109 / IECON.2014.7049194
- [4] M. A. REZAEI, S. FARHANGI and H. IMAN-EINI, "Extending the operating range of cascaded H-bridge based multilevel rectifier under unbalanced load conditions," *Power and Energy (PECon), 2010 IEEE International Conference on*, Kuala Lumpur, 2010, pp. 780-785. doi: 10.1109 / PECON.2010.5697685
- [5] BLAHNÍK, Vojtěch. *Algoritmy řízení a regulace sestavy trakčního měniče se středofrekvenčním transformátorem*. Plzeň, 2011. Disertační práce. ZČU, FEL.