

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Řízení napět'ového pulzního usměrňovače

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

Jméno a příjmení: **Michal KREJČÍ**
Osobní číslo: **E10B0380P**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Řízení napěťového pulzního usměrňovače**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Popište princip napěťového pulzního usměrňovače.
2. Navrhněte jednoduché regulační schéma s pulzně šířkovou modulací.
3. Provedte simulaci napěťového pulzního usměrňovače v prostředí Matlab-Simulink.

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


1. VONDRÁŠEK, František. Výkonová elektronika. Sv. 3, Měniče s vlastní komutací a bez komutace. Část 1, Pulsní měniče. 3., rozš. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2012. 118 s. ISBN 978-80-261-0143-7.
2. KARBAN, Pavel. Výpočty a simulace v programech Matlab a Simulink. Vyd. 1. Brno: Computer Press, 2006. 220 s. ISBN 80-251-1448-3.
3. JOSEFOVÁ, Tereza. Harmonické pulsních usměrňovačů. Plzeň, 2012. Diplomová práce (Ing.). Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Václav Kůs.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Tereza Josefová
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: 14. října 2013
Termín odevzdání bakalářské práce: 9. června 2014


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Abstrakt

Tato bakalářská práce je zaměřena na popis činnosti napětového pulzního usměrňovače (dále jen NPU). V první části práce je popsán princip činnosti NPU a je proveden jeho matematický popis. Další část se zabývá regulací výstupního napětí NPU s pulzně šířkově modulovaným řízením. Zde je také proveden návrh regulačního obvodu pro třífázový NPU založený na regulaci úhlu ε . Poslední část práce je zaměřena na simulaci modelu třífázového NPU s navrženou regulací. Model měniče je sestaven v programu Matlab – Simulink. Tento model umožňuje simulaci činnosti měniče se zobrazením průběhů základních obvodových veličin.

Klíčová slova

Napětový pulzní usměrňovač, PWM řízení, regulace napětí, Matlab, Simulink

Abstract

This Bachelor thesis deals with the description of active voltage-source active rectifier. In the first row describes the function of voltage-source active rectifier and its mathematical description. The next part of the thesis focuses on the control of converter output voltage with pulse width modulation. The design of the control circuit of the three-phase voltage-source active rectifier is described in this part. The control circuit is based on the control of angle ε . The last part of the thesis contains simulation of model three-phase voltage-source active rectifier, included control circuit designed in this thesis. Model of converter is designed and calculated in Matlab – Simulink. This model enables simulation of active voltage-source active rectifier and display the waveform of the basic circuit variables.

Keywords

Voltage-source active rectifier, voltage control, pulse width modulation, Matlab, Simulink

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou 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 bakalářské práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 5.6.2014

Michal Krejčí

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí mé bakalářské práce Ing. Tereze Josefové za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	11
1 NAPĚŤOVÝ PULZNÍ USMĚRŇOVAČ	12
1.1 JEDNOFÁZOVÝ NPU	12
1.2 TŘÍFÁZOVÝ NPU	13
1.3 PRINCIP NPU	13
1.4 VÝKONOVÉ SOUČÁSTKY V NPU	14
1.5 FÁZOROVÝ DIAGRAM	15
1.6 MATEMATICKÝ POPIS	15
2 REGULACE NPU	18
2.1 VLASTNOSTI REGULACE S PULZNĚ ŠÍŘKOVOU MODULACÍ	18
2.2 SPÍNACÍ LOGIKA NPU	19
2.3 NÁVRH REGULAČNÍHO OBVODU	24
2.4 PULZNĚ ŠÍŘKOVĚ MODULOVANÉ ŘÍZENÍ	25
3 SIMULACE	27
3.1 MATLAB	27
3.2 SIMULINK	27
3.3 SIMULACE 3F NPU	27
3.4 VÝSLEDNÉ PRŮBĚHY ZÁKLADNÍCH VELIČIN	32
ZÁVĚR	38
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	39

Seznam symbolů a zkratek

C	Kapacita kondenzátoru na stejnosměrné straně NPU
$D1 \div D6$	Antiparalelní diody
f_p	Frekvence nosného pilového signálu
IGBT	Bipolární tranzistor s izolovaným hradlem
$I_{m(1)}$	Maximální hodnota 1. harmonické proudu odebíraného z napájecí sítě
$I_{(1)}$	Fázor 1. harmonické proudu i odebíraného z napájecí sítě
i_a, i_b, i_c	Okamžitá hodnota proudu odebíraného z napájecí sítě
i_{cap}	Proud do kondenzátoru
i_d	Výstupní proud NPU
i_z	Proud do zátěže
L	Indukčnost
NPU	Napěťový pulzní usměrňovač
PWM	Pulzně šířková modulace
R_a, R_b, R_c	Odpor fáze
t	Čas
$T1 \div T6$	Tranzistory
U_{am}, U_{bm}, U_{cm}	Maximální hodnoty napětí sítě
$U_{am(1)}$	Maximální hodnota 1.harmonické napětí sítě
$U_{afm(1)}$	Maximální hodnota 1.harmonické fázového napětí sítě
U_c	Napětí na kondenzátoru
U_{cw}	Požadovaná hodnota napětí na kondenzátoru
U_m	Maximální hodnota napětí
U_{rm}	Maximální hodnota řídicího signálu

U	Fázor napájecího napětí
u_a, u_b, u_c	Okamžitá hodnota napětí sítě
u_{af}, u_{bf}, u_{cf}	Okamžitá hodnota fázového napětí sítě
u_{A0}, u_{B0}, u_{C0}	Okamžitá hodnota fázového napětí NPU
u_{AB}, u_{BC}, u_{CA}	Okamžitá hodnota sdruženého napětí
u_p	Nosný pilový signál
u_{ra}, u_{rb}, u_{rc}	Řídící napětí
$V1 \div V6$	Spínače NPU
X_{La}, X_{Lb}, X_{Lc}	Reaktance indukčnosti ve fázi
ε	Řídící úhel
ω	Úhlová frekvence
3f NPU	Třífázový napětový pulzní usměrňovač

Úvod

Napětový pulzní usměrňovač (dále jen NPU) je moderní polovodičový měnič, který mění střídavé napětí na stejnosměrné. Lze ho uplatnit například ve stejnosměrných, ale i střídavých pohonech. Pro pohon se stejnosměrným motorem lze použít NPU k usměrnění napětí a následně pulzní měnič k řízení motoru. Další uplatnění nalezne NPU například v nepřímých měničích kmitočtu, které jsou hojně využívány v pohonech s asynchronními motory. Zde je na výstup usměrňovače připojen napětový střídač, který umožňuje řízení asynchronního motoru změnou velikosti a frekvence napájecího napětí.

Velkou výhodou NPU je minimální negativní vliv na napájecí síť. Při vhodném řízení lze odebírat proud z napájecí sítě ve fázi s napájecím napětím, tudíž s účínkem rovným jedné. Používané diodové a tyristorové usměrňovače jsou při aplikaci na větších výkonech nevýhodné svými negativními účinky na napájecí síť. Proudy odebírané těmito usměrňovači z napájecí sítě mají většinou vysoký obsah harmonických, a proto je nutné používat různé prostředky pro minimalizaci těchto negativních účinků. K minimalizaci negativních vlivů jsou využívány různé filtry a kompenzátory účínku, což jsou další náklady navíc. Využitím NPU je negativní vliv na síť omezen, jelikož se účínek blíží jedné a odebíraný proud obsahuje minimální množství harmonických. Ty mají při jmenovitém zatížení NPU nízkou amplitudu a objevují se v okolí spínací frekvence. Při využití NPU jsou sníženy náklady na minimalizaci negativních vlivů na síť, nevýhodou samotného měniče je vyšší pořizovací cena.

Tématem mé bakalářské práce je řízení napětového pulzního usměrňovače. Téma jsem si vybral, protože mě zaujalo a chtěl jsem se o této problematice dozvědět více. Cílem práce je vysvětlení principu činnosti NPU. Dále návrh regulačního obvodu a následná simulace NPU s těmito obvody.

V první části je popsán princip činnosti NPU a pro potřeby této práce je zde také proveden jeho matematický popis. Další část se zabývá řízením NPU a návrhem regulačního obvodu s PWM řízením (z anglického Pulse Width Modulation). Třetí část je zaměřena na simulaci třífázového NPU s navrženým regulačním obvodem. Jako simulační program byl použit Simulink, rozšíření aplikace Matlab. Výhodou tohoto programu je velmi intuitivní tvorba modelů různých systémů. Model se skládá z bloků, které po propojení tvoří blokové schéma. Výstupem této práce je simulační model třífázového NPU, ze kterého jsou vygenerovány průběhy základních obvodových veličin NPU.

1 Napěťový pulzní usměrňovač

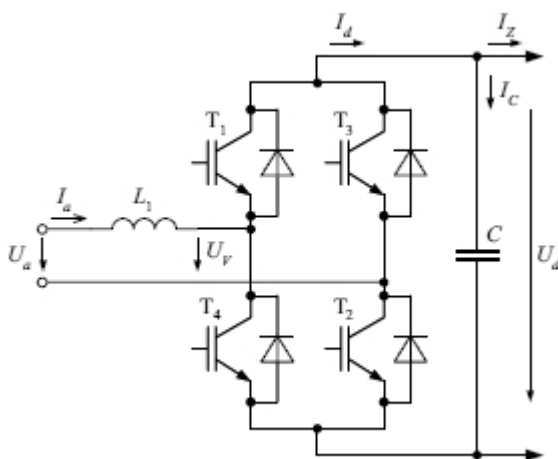
Napěťový pulzní usměrňovač se skládá z říditelných polovodičových součástek, většinou z tranzistorů IGBT. [3] Ke každému spínači je připojena antiparalelně dioda. [2] Zapojením výkonového obvodu se podobá napěťovému střídači. NPU je na stejnosměrné straně spojen s kondenzátorem, na kterém je udržováno přibližně stejné napětí. Tím je umožněno spojení s napěťovým střídačem, kterým lze následně napájet např. asynchronní motor. Jestliže je potřeba napájet např. stejnosměrný motor, je třeba ho připojit přes pulzní měnič. Ten umožní řídit velikost napětí na stejnosměrném motoru. NPU má zajistit odběr přibližně harmonického proudu ve fázi s napětím ze střídavé napájecí sítě a také umožnit přenos výkonu v obou směrech. [1]

1.1 Jednofázový NPU

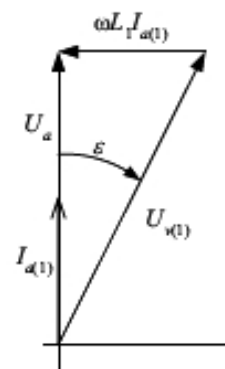
Výkonový obvod jednofázového NPU tvoří čtyři spínače zapojené do můstku (Obr. 1). Zapojením se shoduje s jednofázovým napěťovým střídačem. Indukčnost L_a ve schématu zastupuje indukčnost napájecího zdroje, především rozptyl měničového transformátoru. Pro fázor 1. harmonické napětí u_v platí podle schématu vztah: [1]

$$\mathbf{U}_{v(1)} = \mathbf{U}_a - j\omega L_a \mathbf{I}_{a(1)} \quad (1.1)$$

Na Obr. 2 je nakreslen fázorový diagram střídavé strany NPU za předpokladu, že napětí a proud napájecího zdroje jsou ve fázi a NPU pracuje v usměrňovačovém chodu. [1]



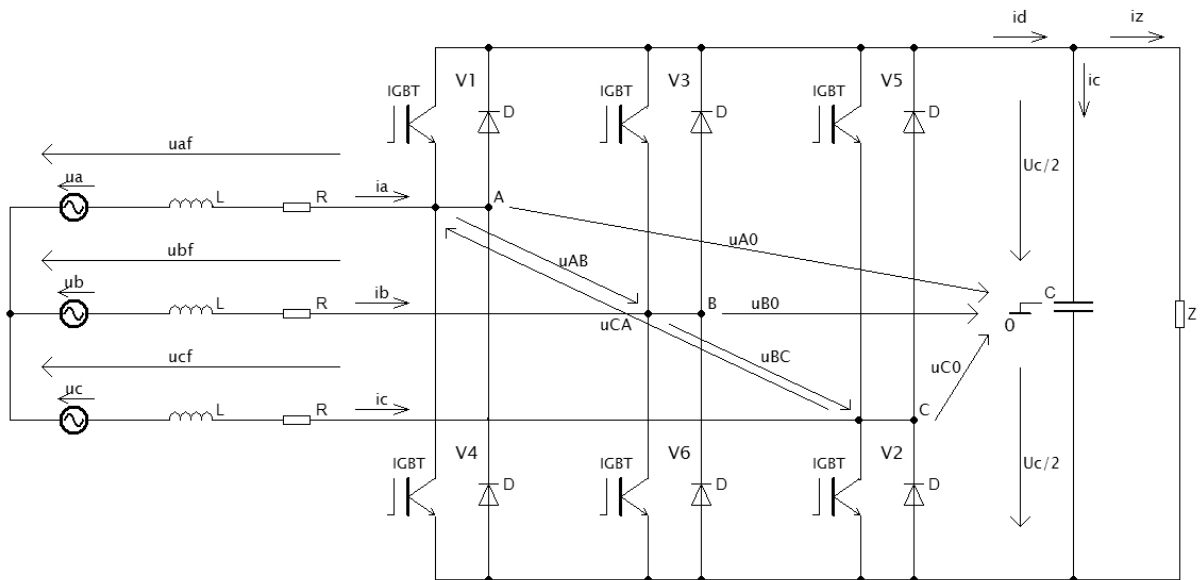
Obr. 1 Výkonový obvod jednofázového NPU (převzato z [6])



Obr. 2 Fázorový diagram jednofázového NPU (převzato z [6])

1.2 Třífázový NPU

Schéma výkonového obvodu třífázového NPU je uvedeno na Obr. 3. Fázorový diagram pro jednotlivé fáze je obdobný jako u jednofázové varianty (Obr. 2). Třífázový NPU se skládá ze šesti spínačů. Ke každé fázi jsou připojeny dva spínače. Výkonový obvod je shodný s výkonovým obvodem třífázového napěťového střídače. Spínací logika součástek může být založena na podobných principech, jaké jsou využívány u třífázových napěťových střídačů. Stejně jako u jednofázové varianty musí být spínání tranzistorů synchronizováno s napájecím napětím NPU. [1] Při řízení NPU je, na rozdíl od napěťového střídače, možné sepnout oba spínače v jedné větvi. Zkratování kondenzátoru zabraňuje indukčnost na střídavé straně NPU. [4]



Obr. 3 Výkonový obvod třífázového NPU (převzato z [4])

1.3 Princip NPU

NPU umožňuje přeměnu střídavého napětí na stejnosměrné napětí. Vstupní strana NPU je připojena na střídavý zdroj, většinou na napájecí síť. Přeměnu napětí zajišťuje vhodné spínání tranzistorů. Regulační obvody je spínají tak, aby bylo na kondenzátoru na výstupní straně měniče stále stejné napětí. Minimální hodnota výstupního napětí nastane, pokud nebudou spínány tranzistory a proud poteče pouze diodami. Poté se NPU chová jako neřízený třífázový usměrňovač s kapacitní zátěží. Nelze tedy snižovat výstupní napětí pod tuto mez. NPU je schopen napětí pouze zvyšovat. Dalším požadavkem, který ovlivňuje způsob spínání, je odběr proudu ze střídavého zdroje ve fázi s jeho napětím. Toho je docíleno posunutím fázového napětí sítě o úhel ε za napětím sítě. Vhodný úhel fázového posuvu zajišťuje regulační obvod a tím je docíleno i vhodného účinku proudu odebíraného z napájecí sítě.

Každá větev NPU je schopná vést proud v obou směrech díky tranzistorům a zablokovat napětí jedné polaridy díky antiparalelním diodám. Výsledné usměrněné napětí je tedy jedné polaridy, ale výstupní proud může téci oběma směry. K realizaci těchto spínačů se využívá převážně výkonových tranzistorů IGBT a antiparalelních diod. [7]

Součástky jsou spínány tak, že v každé půlplně řídicího signálu se střídají dva stavy. Při prvním stavu jsou sepnuty ty spínače, které zajistí průchod proudu ze střídavé strany na stejnosměrnou. Indukčnost na střídavé straně NPU předává akumulovanou energii na výstup. Díky indukčnosti lze dodávat proud na výstup, který má větší napětí než vstup. Proud odebíraný z napájecí sítě při tomto stavu klesá. Proud tedy teče z výstupu NPU a rozděluje se na proud do kondenzátoru a na proud do zátěže. Při druhém stavu jsou sepnuty spínače tak, aby z výstupu NPU žádný proud nevytékal. Při tomto stavu je střídavý zdroj zkratován spínači, indukčnost akumuluje energii a odebíraný proud ze sítě narůstá. Proud do zátěže je dodáván kondenzátorem. [1]

Spínání zpětných diod nastává při vypnutí spínače ve větvi NPU. Po vypnutí spínače musí být smysl proudu indukčností zachován, a proto se bude uzavírat přes zpětnou diodu. Po poklesu proudu k nule je možné sepnout další spínač, přes který se bude uzavírat proud opačného smyslu. [1]

1.4 Výkonové součástky v NPU

K realizaci NPU je zapotřebí vypínatelných součástek jako spínačů. Dříve se jako spínací součástka používal GTO tyristor (Gate Turn Off Thyristor), který má čtyřvrstvou polovodičovou strukturu. Kladným impulzem lze tyristor zapnout a záporným impulzem je možné jej vypnout. Díky tomu má výhody jak klasických tyristorů, tak bipolárních tranzistorů. Zapínání probíhá stejně jako u klasického tyristoru. K zapnutí je ale zapotřebí impulz s větší strmostí. Vypínání je závislé na amplitudě záporného impulzu a také na jeho strmosti. Při vypínání se zvětšuje blokovací napětí a proud klesá. Díky tomu ale vznikají velké vypínací ztráty. [7]

S rozvojem výkonové elektroniky se začaly používat převážně bipolární tranzistory s izolovaným hradlem (IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistor). Tento tranzistor je složen z výkonového bipolárního tranzistoru a vstupního tranzistoru typu MOSFET. Díky tomu mají IGBT tranzistory velmi vysoký vstupní odpor, malé ztráty v sepnutém stavu a dobré dynamické vlastnosti. Výhodou je také možnost konstrukce na poměrně vysoká napětí. [7]

Pro správnou funkci NPU je nutné připojení antiparalelní diody ke každému spínači. Je to nejjednodušší polovodičová součástka. Má jen jeden PN přechod. Dioda je neřízená součástka, spíná se přiložením kladného napětí na anodu. Je v tzv. propustném stavu a propouští proud. Při opačném napětí je dioda v závěrném stavu a blokuje proud. [7]

1.5 Fázorový diagram

Fázorový diagram (Obr. 2) střídavé strany NPU lze odvodit z rovnice 2. Kirchhoffova zákona napsané pro příslušnou fázi. Pro fázi a: [4]

$$u_a - u_{af} - jX_{La} i_a = 0 \quad (1.2)$$

Rovnici (1.2) lze upravit dosazením fázorů maximálních hodnot 1. harmonických proudu a napětí: [4]

$$\overline{U_{am(1)}} - \overline{U_{afm(1)}} - jX_L \overline{I_{am(1)}} = 0 \quad (1.3)$$

Z rovnice (1.3) již lze kreslit fázorový diagram pro usměrňovačový chod. Jelikož uvažujeme symetrickou soustavu, platí rovnice i fázorový diagram pro všechny tři fáze.

Pomocí fázorového diagramu lze dále napsat následující vztahy: [1]

$$U_{af(1)m} = \frac{U_{am(1)}}{\cos \varepsilon} \quad (1.4)$$

$$\varepsilon = \arctg \frac{\omega L_a I_{(1)m}}{U_{afm(1)}} \quad (1.5)$$

Tyto vztahy jsou využívány v regulačních obvodech NPU. [1]

1.6 Matematický popis

Matematický popis je využíván pro návrh regulace NPU. [2] Pro účely matematického popisu je uvažován ideální symetrický třífázový zdroj napětí. Indukčnosti v jednotlivých fázích mají stejnou velikost a jsou také ideální (mají nulový odpor). Síťová napětí zdrojů jsou popsána vztahy:

$$u_a = U_m \sin(\omega t) \quad (1.6)$$

$$u_b = U_m \sin(\omega t - 120^\circ) \quad (1.7)$$

$$u_c = U_m \sin(\omega t + 120^\circ) \quad (1.8)$$

Výkonový obvod třífázového NPU se skládá ze šesti spínačů, každý je tvořen tranzistorem IGBT a antiparalelně připojenou diodou. Spínače jsou uvažovány jako ideální, takže na nich nevznikají úbytky napětí. Na kondenzátoru pomyslně uvažujeme střední nulový vývod, ke kterému jsou vztažena fázová napětí NPU. Jsou to napětí mezi střídavým vývodem fáze a pomyslnou nulou na kondenzátoru. Sepnutím horního či dolního spínače příslušné fáze je připojeno kladné či záporné napětí kondenzátoru. Jelikož jsou spínače uvažovány jako ideální, budou fázová napětí nabývat hodnot $\pm \frac{U_c}{2}$. Pro fázová napětí NPU tedy platí:

$$u_{A0} = \pm \frac{U_c}{2} \quad (1.9)$$

$$u_{B0} = \pm \frac{U_c}{2} \quad (1.10)$$

$$u_{C0} = \pm \frac{U_c}{2} \quad (1.11)$$

Z fázových napětí NPU lze následně vyjádřit sdružená napětí NPU: [1]

$$u_{AB} = u_{A0} - u_{B0} \quad (1.12)$$

$$u_{BC} = u_{B0} - u_{C0} \quad (1.13)$$

$$u_{CA} = u_{C0} - u_{A0} \quad (1.14)$$

Napájecí síť je zastoupena zdroji zapojenými do hvězdy, proto platí mezi sdruženými a fázovými napětími sítě následující vztahy: [1]

$$u_{AB} = u_{af} - u_{bf} \quad (1.15)$$

$$u_{BC} = u_{bf} - u_{cf} \quad (1.16)$$

$$u_{CA} = u_{cf} - u_{af} \quad (1.17)$$

Pokud je uvažována symetrická napájecí síť, lze psát následující rovnice: [1]

$$u_{af} + u_{bf} + u_{cf} = 0 \quad (1.18)$$

$$u_a + u_b + u_c = 0 \quad (1.19)$$

Z výše uvedených rovnic vyplývá, že musí rovnice platit i pro síťové proudy: [1]

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (1.20)$$

Dále lze s využitím rovnice (1.18) vyjádřit fázová napětí sítě pomocí vztahů pro sdružená napětí: [1]

$$u_{af} = \frac{1}{3}(u_{AB} - u_{CA}) \quad (1.21)$$

$$u_{bf} = \frac{1}{3}(u_{BC} - u_{AB}) \quad (1.22)$$

$$u_{cf} = \frac{1}{3}(u_{CA} - u_{BC}) \quad (1.23)$$

Další úpravu vztahů pro fázová napětí sítě lze provést dosazením vztahů pro sdružená napětí: [1]

$$u_{af} = \frac{1}{3}(2u_{A0} - u_{B0} - u_{C0}) \quad (1.24)$$

$$u_{bf} = \frac{1}{3}(2u_{B0} - u_{C0} - u_{A0}) \quad (1.25)$$

$$u_{cf} = \frac{1}{3}(2u_{C0} - u_{A0} - u_{B0}) \quad (1.26)$$

Následně je třeba stanovit vztahy pro proudy odebírané z napájecí sítě. Využitím 2. Kirchhoffova zákona lze pro fázi *a* psát následující rovnice:

$$u_{af} - u_a + L \frac{di_a}{dt} = 0 \quad (1.27)$$

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{u_a - u_{af}}{L} \quad (1.28)$$

Stejně rovnice platí i pro ostatní fáze.

2 Regulace NPU

Napětový pulzní usměrňovač lze řídit několika způsoby, ale vždy je cílem regulovat napětí na kondenzátoru na konstantní hodnotu. Používaná je nejčastěji buď dvouhodnotová regulace, nebo řízení pulzně šířkově modulované - PWM (Pulse Width Modulation). Dvouhodnotová regulace spočívá ve stanovení hystereze kolem požadovaného průběhu a následném udržování ve stanovených mezích. Tato metoda regulace je výhodná svou jednoduchostí, ale dnes se nejčastěji používá složitější PWM řízení. To umožňuje z napájecí sítě odebírat proud požadovaného průběhu. Pro minimalizaci negativních účinků na síť je to sinusový průběh. Vhodným řízením spínačů je odebírán proud ve fázi s napětím sítě, tedy s účinníkem rovným jedné. S tímto účinníkem je poté vliv NPU na napájecí soustavu minimální. [3]

2.1 Vlastnosti regulace s pulzně šířkovou modulací

Při návrhu řízení NPU se vychází z fázorového diagramu. Fázový posuv mezi 1. harmonickou sítě a 1. harmonickou fázového napětí sítě je úhel řízení ε . Zatížením NPU na stejnosměrné straně roste úhel řízení ε , a proto řízení zvyšuje odběr proudu z napájecí sítě. Amplituda 1. harmonické fázového napětí sítě roste a s ní i napětí na indukčnosti. [2]

Spínáním spínačů ve větvi příslušné fáze se k jejímu vývodu připojuje kladné nebo záporné napětí pulzního usměrňovače (u_{A0} , u_{B0} , u_{C0}). Díky tomu dochází ke změně polarit fázového napětí (u_{af} , u_{bf} , u_{cf}) a k nárůstu nebo poklesu fázového proudu (i_a , i_b , i_c). Vhodným připojováním kladného a záporného napětí lze dosáhnout odběru proudu z napájecí sítě, který se bude blížit požadovanému sinusovému průběhu. Řízení s pulzně šířkovou modulací s vyšší spínací frekvencí zajistí kratší intervaly přepínání napětí, a tím se průběh proudu více blíží sinusovému průběhu. Přiblížení odběru proudu k sinusovému průběhu je příznivější z hlediska obsahu harmonických. [2]

Regulace NPU s PWM zajišťuje:

- Odběr proudu z napájecí sítě ve fázi s napětím sítě (účinník přibližně roven jedné)
- Konstantní napětí U_c na kondenzátoru na stejnosměrné straně NPU při změnách napájecího napětí a proudu zátěže I_z [2]

2.2 Spínací logika NPU

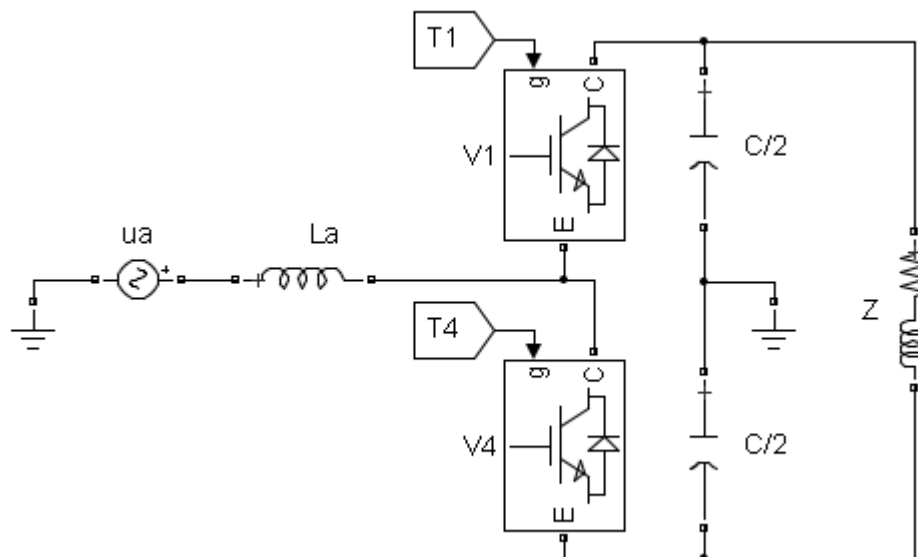
Blok PWM v regulačním schématu zajišťuje porovnání pilového napětí u_p s řídicími napětími u_{ra} , u_{rb} , u_{rc} . Řídicí napětí jsou vůči napětí sítě posunuta o úhel ε . Při koincidenci pilovitého napětí u_p a jednotlivých řídicích napětí dochází ke spínání horních či spodních spínačů dané větve NPU. Fázová napětí NPU (u_{AO} , u_{BO} , u_{CO}) mohou podle sepnutí spínačů nabývat hodnot $+\frac{U_c}{2}$ nebo $-\frac{U_c}{2}$. [2]

Vstupní proud z napájecí sítě se může uzavírat přes horní větev můstku po vypnutí sudého spínače a sepnutí lichého, nebo se může uzavírat přes dolní větev po vypnutí lichého spínače a sepnutí sudého. Vstup NPU je tak připojován střídavě ke kladnému a zápornému pólu výstupního kondenzátoru. Sdružené napětí tedy může nabývat hodnot $+U_c$, $-U_c$ a 0 . Nulové hodnoty nabývá, pokud jsou vstupy NPU připojeny ke stejnému pólu kondenzátoru a zároveň je zkratován střídavý zdroj.

Pro napětí na indukčnosti u_L ve fázi a na střídavé straně NPU platí vztah:

$$u_L = u_a - u_{af} \quad (2.1)$$

Výpočet napětí na indukčnosti je shodný pro všechny tři fáze. Výsledný průběh proudu odebíraného z napájecí soustavy je určený velikostí napětí u_L a velikostí indukčnosti L . [2]



Obr. 4 Zjednodušené schéma NPU pro fázi a , bez vlivů ostatních fází

Spínací logiku lze nejlépe vysvětlit na zjednodušeném obvodu pro jednu fázi (Obr. 4), při zanedbání vlivů ostatních fází. Uvažovaná fáze a se skládá z napětí sítě u_a , indukčnosti L_a a dvojice spínačů $V1$ a $V4$, které jsou připojeny na kondenzátor C . Pokud zanedbáváme ztráty

na spínačích, lze prohlásit, že fázové napětí sítě u_{af} je rovno fázovému napětí NPU u_{A0} . Průběh proudu poté lze popsat dosazením u_{A0} za u_{af} do rovnice (1.28): [8]

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{u_a - u_{A0}}{L} \quad (2.2)$$

$$a) \ u_a > 0, \ u_{ra} \leq u_p$$

Při kladné půlvalné síťové napětí u_a je proud i_a také kladný, protože drží fázi s napětím. Proud teče z napájecí sítě přes indukčnost L_a a narůstá. Indukčnost v tomto stavu akumuluje energii. Pokud je řídicí napětí u_{ra} menší než nosný pilový signál u_p teče proud i_a přes aktivovaný spínač $V4$ (tranzistor $T4$). Napětí u_{A0} v tomto stavu obvodu nabývá hodnoty $-\frac{U_c}{2}$, protože tranzistor $T4$ připojí k výstupu fáze záporný pól kondenzátoru. Průběh proudu je definován dle rovnice (2.2): [2]

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{u_a + \frac{U_c}{2}}{L} \quad (2.3)$$

$$b) \ u_a > 0, \ u_{ra} > u_p$$

Při další koincidenci signálů vzroste řídicí napětí u_{ra} nad napětí u_p . Smysl proudu i_a zůstává zachován, protože síťové napětí je stále kladné. Proud se proto bude uzavírat přes spínač $V1$ (diodu $D1$), ale kondenzátor má značně vyšší napětí než je napětí sítě. Proud překoná toto protinapětí díky naakumulované energii v indukčnosti, která se snaží udržet stejný smysl tohoto proudu. Indukčnost předává energii kondenzátoru, a proto velikost proudu klesá. Napětí u_{ra} nabude hodnoty $+\frac{U_c}{2}$, jelikož dioda $D1$ připojí k výstupu fáze kladný pól kondenzátoru. Průběh proudu lze popsat dosazením do rovnice (2.2): [2]

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{u_a - \frac{U_c}{2}}{L} \quad (2.4)$$

c) $u_a < 0, u_{ra} > u_p$

Při záporné půlčlenně síťového napětí se otočí smysl proudu a bude také záporný. Pokud je řídicí napětí větší než napětí u_p , sepne spínač $V1$ (tranzistor $T1$). Proud teče přes sepnutý tranzistor a indukčnost do sítě. Proud narůstá a indukčnost akumuluje energii. Tranzistor $T4$ připojí k vývodu fáze kladný pól kondenzátoru, takže napětí u_{A0} nabude hodnoty $+\frac{U_c}{2}$.

Opětovným dosazením do rovnice (2.2) dostaneme průběh proudu: [2]

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{-u_a - \frac{U_c}{2}}{L} \quad (2.5)$$

d) $u_a < 0, u_{ra} \leq u_p$

Napětí sítě je záporné, proto i proud je stále záporný. Klesne-li hodnota řídicího napětí pod hodnotu napětí u_p , vypne tranzistor $T1$ a aktivuje se spínač $V4$ (dioda $D4$). Indukčnost předává akumulovanou energii kondenzátoru a proud klesá. Proud teče skrz diodu $D4$, která připojí k vývodu fáze záporný pól kondenzátoru. Napětí u_{A0} tak nabude hodnoty $-\frac{U_c}{2}$. Průběh

proudu lze opět získat dosazením do rovnice (2.2): [2]

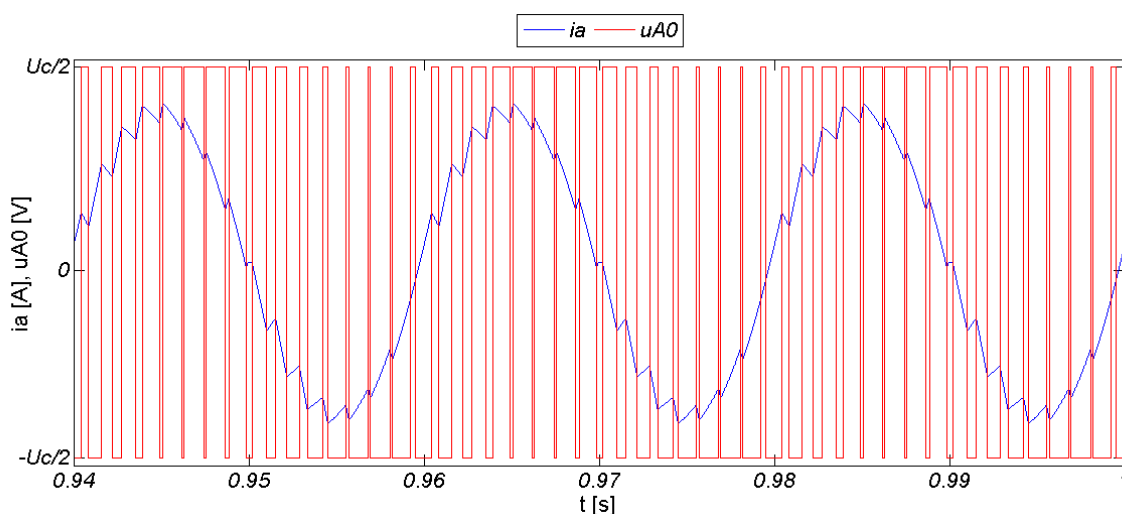
$$\frac{di_a}{dt} = \frac{-u_a - \frac{U_c}{2}}{L} \quad (2.6)$$

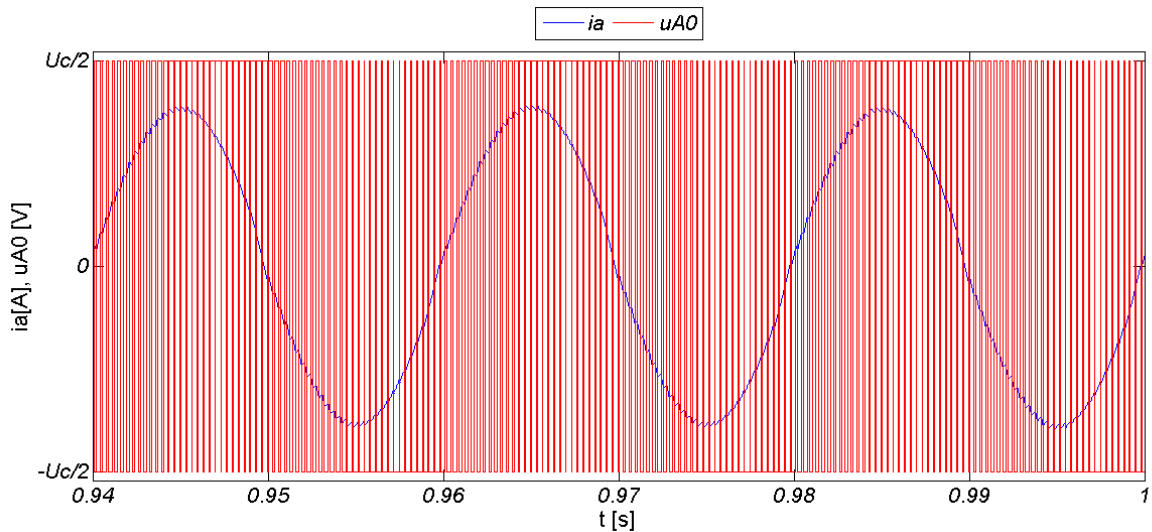
Výše popsané stavy lze pro přehlednost zapsat do tabulky (Tab. 1), která je psána pouze pro fázi a . [2] Uvedené principy platí při uvažovaných zjednodušeníh i pro zbylé fáze. Napětí u_{A0} je za těchto zjednodušujících podmínek rovno fázovému napětí sítě u_{af} . Z tabulky je patrné, že při řízení NPU se střídají v každé větvi dva stavy. Při prvním je sepnut tranzistor, proud narůstá a energie se akumuluje v indukčnosti. V druhém je tranzistor vypnut a proud teče skrz zpětnou diodu do kondenzátoru, který nabíjí.

		$u_a > 0$		$u_a \leq 0$	
		$u_{ra} \leq u_p$	$u_{ra} > u_p$	$u_{ra} > u_p$	$u_{ra} \leq u_p$
V1	T1	0	0	1	0
	D1	0	1	0	0
V4	T4	1	0	0	0
	D4	0	0	0	1
u_{A0}		$-U_c/2$	$+U_c/2$	$+U_c/2$	$-U_c/2$

Tab. 1 Spínací logika fáze a

Obr. 5 znázorňuje průběhy napětí u_{A0} a proudu i_a při uvedených zjednodušeníh. Tyto průběhy jsou v souladu s výše uvedenými předpoklady. Jelikož se napětí u_{af} rovná napětí u_{A0} , tak střídavě nabývá hodnot $+\frac{U_c}{2}$ a $-\frac{U_c}{2}$. [2] Na průběhu proudu jsou dobře patrné nárůsty a poklesy způsobené spínáním tranzistorů. Vliv na velikost rozkmitu proudu má především spínací frekvence tranzistorů určená frekvencí f_p nosného pilového signálu. S vyšší spínací frekvencí se průběh proudu více blíží ideálnímu sinusovému průběhu. Vliv spínací frekvence na průběh proudu je dobře patrný z Obr. 5 a Obr. 6. Na Obr. 5 jsou znázorněny průběhy u_{A0} a i_a při frekvenci pilového signálu 800Hz. Z obrázku je zřejmé, že proud se svým průběhem již blíží sinusovému, ale stále je patrný určitý rozkmit. Zvýšením frekvence pilového signálu je docíleno častějšího spínání tranzistorů, a tím i snížení rozkmitu kolem ideálního sinusového průběhu. Průběh veličin u_{A0} a i_a při vyšší spínací frekvenci je zobrazen na Obr. 6. Frekvence pilového signálu je v tomto případě 2000Hz a na průběhu proudu je patrné jeho vyhlazení.

Obr. 5 Průběh napětí $u_{A0}(u_{af})$ a proudu i_a za zjednodušených podmínek ($f_p=800\text{Hz}$)



Obr. 6 Průběh napětí $u_{A0}(u_{af})$ a proudu i_a za zjednodušených podmínek ($f_p=2000\text{Hz}$)

Při zohlednění vlivu ostatních fází je již třeba použít pro výpočet fázových napětí sítě u_{af} , u_{bf} a u_{cf} dříve uvedené rovnice (1.24), (1.25) a (1.26). [2] Spínací logika ovšem platí obdobně pro všechny fáze a je založena na podobných principech jako u třífázového napětového střídače. Pro správnou funkci NPU je třeba, aby byl v každý okamžik aktivní alespoň jeden spínač z horní větve NPU a zároveň alespoň jeden spínač ze spodní větve NPU.[1]

Sepnutí tranzistorů je závislé na porovnávání řídicích signálů s nosným pilovým signálem a na polaritě napájecího napětí dané fáze. V každé větvi se střídá ve vedení proudu jeden tranzistor a antiparalelní dioda druhého spínače dané větve obvodu. Při spínání tranzistorů lze také sepnout najednou oba tranzistory v jedné větvi, protože zkratování kondenzátoru brání vstupní tlumivka. Tohoto stavu sepnutí se však využívá u jednofázového NPU.

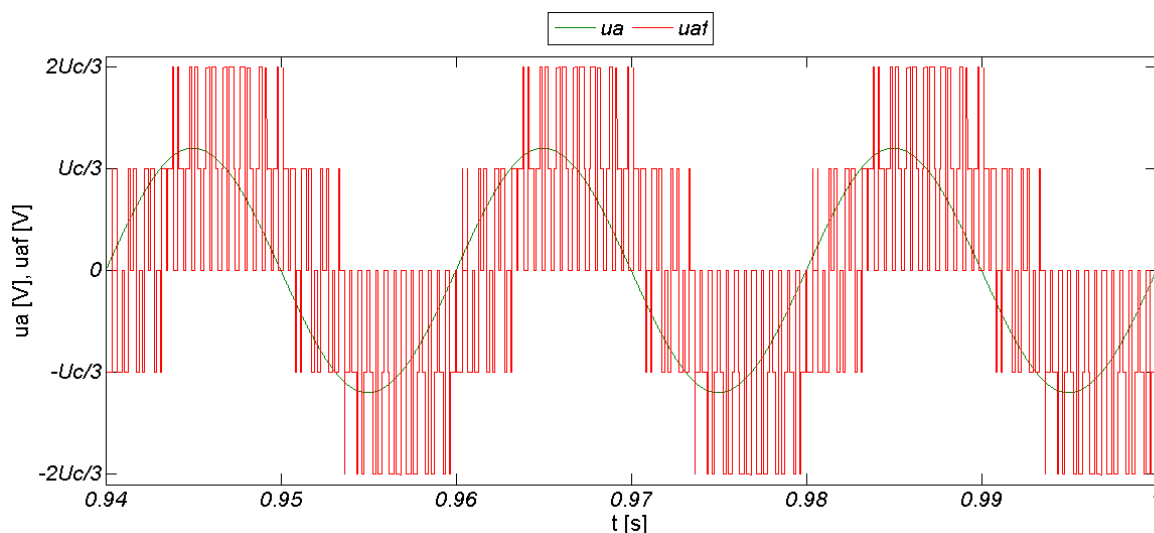
Na Obr. 5 a Obr. 6 si lze všimnout, že spínání tranzistorů každé větve je zvoleno tak, aby bylo pulzně řízeno dané fázové napětí NPU. Díky tomu je zároveň ovlivňováno i fázové napětí sítě příslušné větve NPU. [1] Spínáním tranzistorů dochází ke změnám fázových napětí sítě mezi hodnotami 0 , $\pm \frac{U_c}{3}$ a $\pm \frac{2U_c}{3}$. [2] Tyto hodnoty lze odvodit dosazením jednotlivých fázových napětí NPU do vztahů pro fázová napětí sítě. Například pro fázi a tedy obecně platí:

$$u_{af} = \frac{1}{3}(2u_{A0} - u_{B0} - u_{C0}) = \frac{1}{3} \left(2 \cdot \left(\pm \frac{U_c}{2} \right) - \left(\pm \frac{U_c}{2} \right) - \left(\pm \frac{U_c}{2} \right) \right) \quad (2.7)$$

Znaménka u jednotlivých hodnot fázových napětí NPU závisí na aktuálním sepnutí jednotlivých prvků. Výpočtem hodnot pro jednotlivé stavy sepnutí bychom dostali průběh

fázových napětí sítě. Na Obr. 7 je vykreslen graf průběhu fázového napětí u_{af} pro simulovaný model NPU. Pro porovnání je v grafu vykreslen průběh fázového napětí u_a . Na grafu tedy lze ověřit, že se opravdu hodnoty fázových napětí sítě mění skokem mezi hodnotami $0, \pm \frac{U_c}{3}$

$$\text{a } \pm \frac{2U_c}{3}.$$



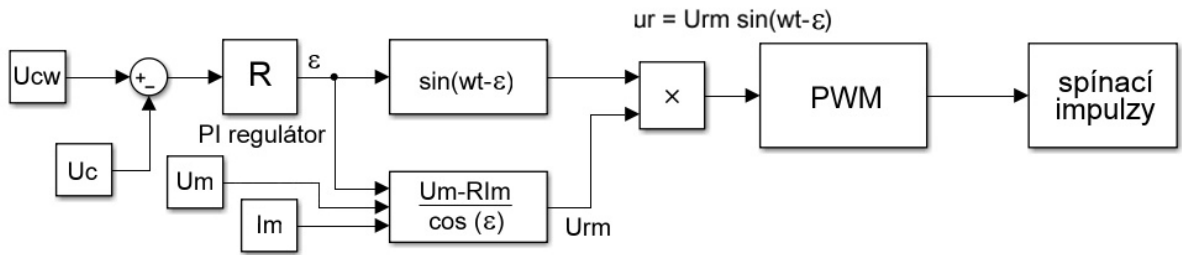
Obr. 7 Průběh síťového napětí u_a a fázového napětí u_{af} ($u_p=1000\text{Hz}$)

2.3 Návrh regulačního obvodu

Úkolem regulační smyčky je udržení konstantního napětí na kondenzátoru na stejnosměrné straně NPU. Velikost napětí na kondenzátoru je možné řídit amplitudou řídicích signálů (u_{ra}, u_{rb}, u_{rc}). Dále je třeba zajistit, aby byl proud z napájecí sítě odebírán s dobrým účínkem. To lze zajistit vhodným fázovým posuvem mezi napětími napájecí sítě a fázovými napětími. Tento posuv je ve fázorovém diagramu (Obr. 2) zakreslen jako úhel ε . Při regulaci jsou řídicí signály posunuty vůči napájecímu napětí právě o úhel ε . Z toho vyplývá, že je nezbytné provádět při regulaci synchronizaci s napájecím napětím.

Regulační schéma pro NPU s PWM řízením je zobrazeno na Obr. 8. Vstupem do regulační smyčky je požadovaná hodnota napětí na výstupu NPU. Od této hodnoty je odečtena aktuální hodnota napětí na kondenzátoru. Tato regulační odchylka je přivedena do PI regulátoru, který ji zpracuje a na jeho výstupu se objeví úhel řízení ε . Ten je poté využit k fázovému posuvu řídicího signálu a k výpočtu amplitudy řídicího signálu. Výsledný signál je v bloku PWM porovnán s pilovým průběhem a při koincidenci signálů jsou generovány spínací impulzy na spínací prvky NPU. Řídicí napětí vstupující do bloku PWM musí být

v intervalu $\langle -1,1 \rangle$, ve kterém je generován nosný pilový signál. Toho je docíleno tzv. normováním, které je realizováno dělením amplitudy řídicího signálu vhodnou hodnotou. [2]



Obr. 8 Regulační schéma NPU s PWM řízením

2.4 Pulzně šířkově modulované řízení

Při pulzně šířkově modulovaném řízení je během jedné půlvlny řídicího signálu proměnná šířka jednotlivých napěťových impulzů. Šířka impulzů je určena porovnáním pilového signálu s řídicím sinusovým průběhem. Při amplitudě řídicího signálu jsou tedy impulzy nejširší. PWM řízení lze rozdělit podle principu na: [1]

- 1) Analogová PWM (referenční řízení)
- 2) Digitální PWM
 - a) Digitální napodobení analogové PWM (referenční řízení)
 - b) PWM založená na metodě vylučování vyšších harmonických
 - c) PWM vycházející z vektorového zobrazení veličin (polární řízení)

Dříve byla používána analogová PWM. Po rozvoji mikroprocesorové techniky se však z analogového řešení přechází na digitální. Neefektivněji dosáhneme požadovaného výsledku při polárním řízení, ale všechny způsoby řešení PWM vedou ke stejnému výsledku. Kvalita modulace je posuzována podle četnosti sepnutí při stejné řídicí frekvenci a to kvůli obsahu harmonických. Uvedené principy PWM lze použít u jednofázové i třífázové varianty NPU. [1]

Referenční řízení (analogové nebo digitální) funguje na principu koincidence vysokofrekvenčního nosného signálu (pilový průběh) a nízkofrekvenčního modulačního signálu (řídicího napětí). Princip tohoto řízení je zobrazen na Obr. 21, kde jsou vykresleny v grafu jednotlivé průběhy potřebné k tomuto řízení. Každá fáze třífázového NPU je připojena na dva spínače. Pro fázi *a* jsou to spínače *V1* a *V4*. Při koincidenci (rovnosti nosného signálu

u_p a příslušného modulačního signálu u_r) jsou spínací signály přepnuty na druhý spínač větve. Podle smyslu proudu může vést ve spínači buď tranzistor nebo antiparalelní dioda. Tímto přepínáním je dosaženo toho, že fázové napětí NPU u_{A0} dosahuje střídavě hodnot $+\frac{U_c}{2}$ a $-\frac{U_c}{2}$. Tímto způsobem jsou řízeny všechny fáze. Při změně amplitudy modulačního signálu U_{rm} je ovlivňováno výstupní napětí NPU. Velikost amplitudy modulačního signálu je využita ve vztahu pro modulační poměr (hloubku modulace):

$$m = \frac{U_{rm}}{U_{pm}} \quad (2.8)$$

Při zadání požadavku na maximální výstupní napětí ($m = 1$) je amplituda modulačního signálu zvětšena na velikost amplitudy nosného signálu. [1]

Při PWM řízení jsou řídicí napětí obrazem fiktivní křivky, která je ve výsledku tvořena spojnicemi středních hodnot fázového napětí NPU v každé periodě pilového signálu. Pokud je modulační signál harmonický, pak je fiktivní křivka prakticky 1. harmonickou požadovaného průběhu. Při zvyšování poměru frekvence pilového signálu k frekvenci řídicího napětí narůstá obsah 1. harmonické v žádaném průběhu. [1]

Kmitočet pilového signálu může být synchronizován s kmitočtem modulačního signálu nebo může být nesynchronizovaný. Dle kvality modulace je lepší synchronizovaný pilový signál. Kmitočet pilového signálu je násobkem kmitočtu modulačního signálu, pokud se jedná o synchronizovanou variantu. Se zvyšujícím se násobkem se také zvyšuje kvalita modulace. [1]

3 Simulace

3.1 Matlab

Matlab (MATrix LABoratory = maticová laboratoř) je aplikace pro vědecké výpočty vyvíjená firmou MathWorks. V jednom prostředí spojuje technické výpočty, vizualizaci dat a programovací jazyk. Matlab je používán lidmi z celého světa, existuje proto široká komunita uživatelů. Na stránkách firmy MathWorks lze najít mnoho dokumentací a ukázkových příkladů. Díky velkému množství vestavěných funkcí je řešení technických problémů jednodušší než v jiných vývojových prostředích nebo programových jazycích. Matlab lze rozšířit pomocí modulů – aplikačních knihoven (tzv. toolboxů). Mezi nejznámější a také největší z nich patří Simulink. [5]

3.2 Simulink

Simulink (SIMUlation and LINK – simulace a spojení) slouží k simulaci a modelování dynamických systémů. Modely lze vytvářet interaktivně pomocí blokových schémat. V knihovně Simulinku je velké množství předdefinovaných bloků pro rychlou a snadnou tvorbu modelů. Simulink je součástí Matlabu, takže lze při řešení problému přecházet mezi těmito prostředími. [5]

3.3 Simulace 3f NPU

Simulace byla provedena v programu Matlab – Simulink. V tomto programu byl sestaven model výkonového obvodu třífázového napětového pulzního usměrňovače. Dále byly sestaveny bloky obsahující regulační obvod a řízení PWM. Po nastavení parametrů všech bloků byla provedena simulace celého systému. Výsledná data byla odeslána do programu Matlab, kde proběhla vizualizace dat.

Model výkonového obvodu sestaveného v programu Simulink je na Obr. 9. Napájecí síť byla sestavena ze tří zdrojů střídavého napětí zapojených do hvězdy. Amplituda síťového napětí byla nastavena na 400V a frekvence na 50Hz. Dále model obsahuje vstupní indukčnost s odporem 0,2Ω a indukčností 0,006H. Spínací prvky jsou zastoupeny modely IGBT tranzistorů s integrovanými antiparalelními diodami. Na výstupní straně NPU je připojen kondenzátor o kapacitě 0,025F, který je na začátku simulace nabit na napětí 600V. Dále je na výstup NPU připojena RL zátěž s odporem 12,5Ω a indukčností 0,01H.

Parametry modelu výkonového obvodu 3f NPU:

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

$$u_a = 400 \sin(\omega t)$$

$$u_b = 400 \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$u_c = 400 \sin(\omega t + 120^\circ)$$

$$R_a = R_b = R_c = 0.2\text{H}$$

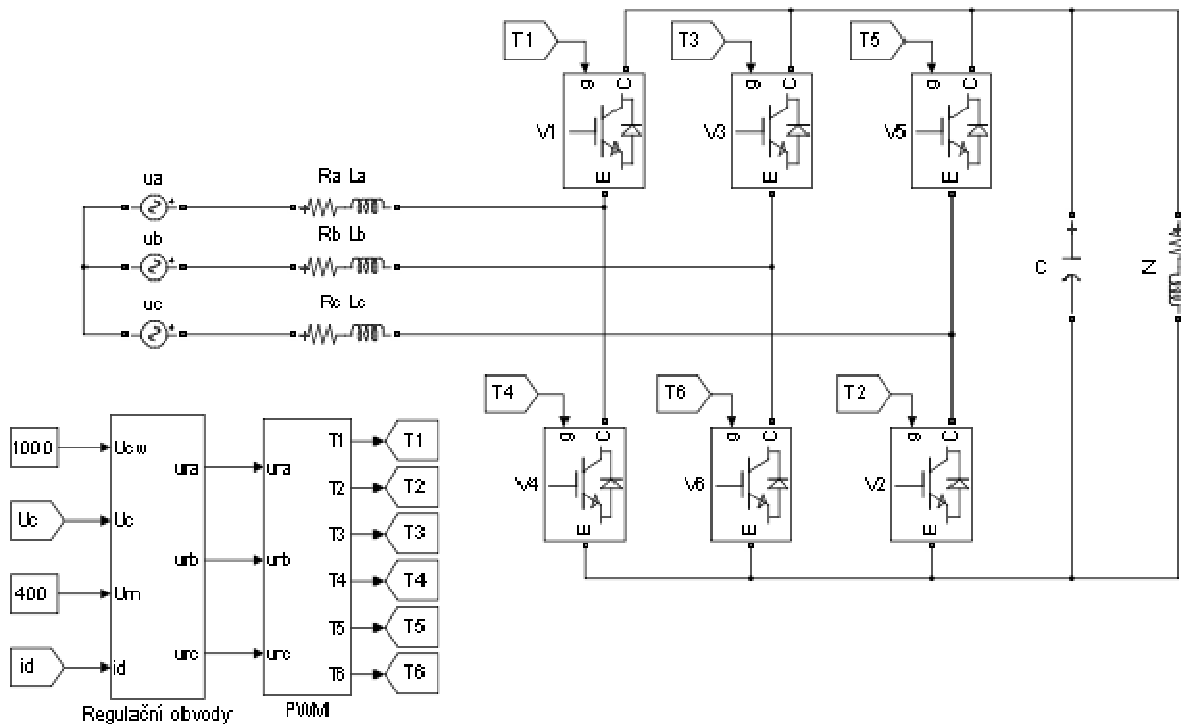
$$L_a = L_b = L_c = 0.006\text{H}$$

$$C = 0.025\text{F}$$

$$R_z = 12,5\Omega$$

$$L_z = 0.01\text{H}$$

$$U_c(0) = 600\text{V}$$



Obr. 9 Blokové schéma třífázového NPU s PWM řízením v prostředí Matlab - Simulink

Regulační obvod byl sestaven jako „subsystém“ a je zobrazen na Obr. 10. Vstupními parametry tohoto bloku jsou: požadované napětí na kondenzátoru, aktuální hodnota napětí na kondenzátoru, maximální hodnota síťového napětí a aktuální hodnota proudu z výstupu měniče. Požadovaná hodnota na výstupu NPU byla zvolena 1000V. Hodnota napětí na kondenzátoru je neustále měřena a zpětnou vazbou přiváděna na vstup regulačního obvodu. Dalším vstupním parametrem je maximální hodnota napětí v síti a ta byla zvolena 400V.

Posledním parametrem vstupujícím do bloku regulátoru je hodnota proudu, která je měřena na výstupu NPU a přiváděna zpětnou vazbou. Na počátku regulačního obvodu je stanovena regulační odchylka odečtením okamžité hodnoty napětí U_c od požadované hodnoty napětí U_{cw} . Stanovená regulační odchylka je přivedena do bloku PI regulátoru, který má nastavené proporcionální zesílení 0.00315 a integrační časovou konstantu 0,0198s. Výstupem z regulátoru je hodnota řídicího úhlu ε , která musí být následně omezena do stanovených mezí. V tomto případě jsou meze pro řídicí úhel $\left\langle -\frac{\pi}{2}, +\frac{\pi}{2} \right\rangle$. Dalším prvkem regulačního obvodu je výpočet průběhu řídicího napětí. Jako řídicí napětí je použit sinusový signál o frekvenci 50Hz a amplitudě rovné jedné. Tento průběh je dále fázově posunut o řídicí úhel ε . Řídicí napětí je generováno pro každou fázi zvlášť s tím rozdílem, že jsou vzájemně fázově posunuta o 120° . Řídicí napětí jsou na závěr vynásobeny amplitudou řídicího napětí U_{rm} , která je v tomto případě vypočtena ze vstupních parametrů bloku regulátoru a z vypočteného úhlu posunutí ε . Výpočet amplitudy řídicího napětí probíhá dle vzorce:

$$U_{rm} = \frac{U_{m(1)} - RI_{m(1)}}{\cos \varepsilon} \quad (3.1)$$

Ve vzorci je použita hodnota amplitudy 1. harmonické proudu odebíraného z napájecí sítě $I_{m(1)}$, tu lze vypočítat podle vzorce:

$$I_{m(1)} = \frac{2U_c i_d}{3U_m} \quad (3.2)$$

Po výpočtu amplitudy U_{rm} musí být provedeno tzv. normování řídicích napětí. V tomto případě probíhá normování jako dělení amplitudy hodnotou $\frac{U_c}{2}$. Následuje blok, který zajistí omezení amplitudy na interval $\langle 0, 1 \rangle$, aby nepřesáhla hodnotu amplitudy pilového napětí. Další blok omezuje strmost změny amplitudy řídicích napětí. Tím je zajištěno, aby nedocházelo ke skokovým změnám amplitudy sinusových průběhů řídicích napětí. Výstupními parametry bloku regulačního obvodu jsou řídicí napětí pro všechny fáze.

Parametry modelu regulačního obvodu:

$$U_{cw} = 1000V$$

$$U_{rm} = 400V$$

$$K_r = 0.00315$$

$$T_r = 0.0198s$$

$$\varepsilon_{+sat} = \pi/2$$

$$\varepsilon_{-sat} = -\pi/2$$

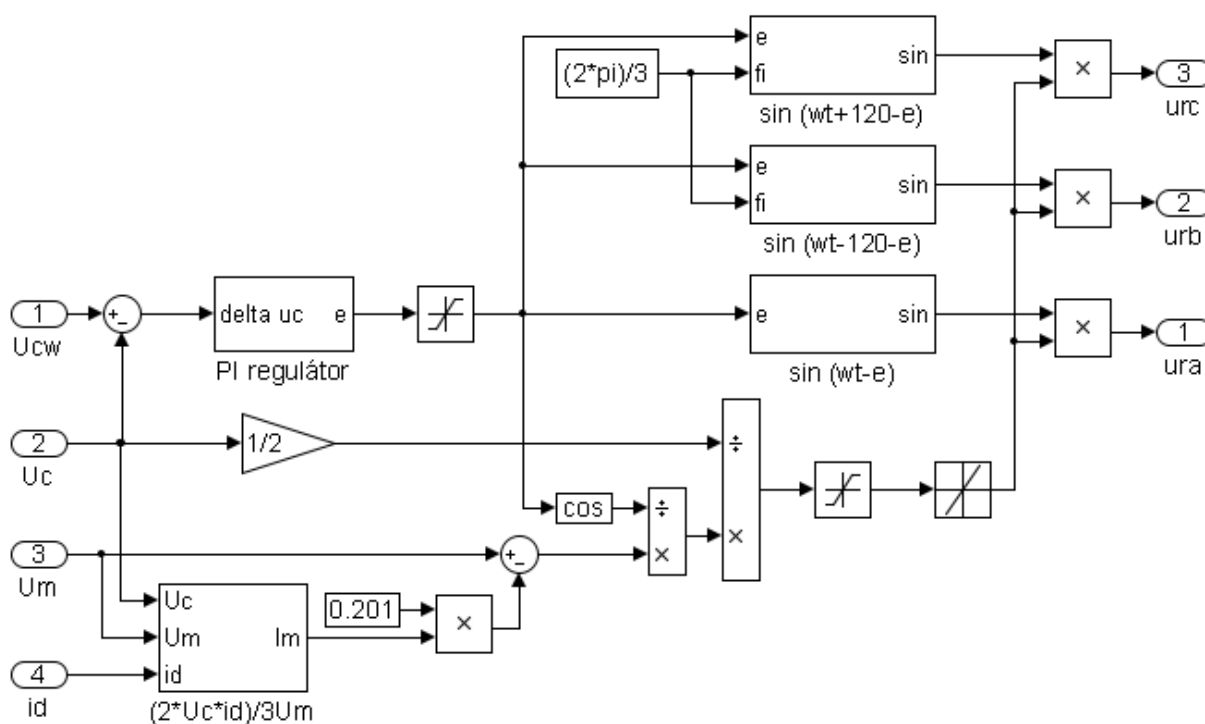
$$U_{rm+sat} = 1$$

$$U_{rm-sat} = 0$$

$$u_{ra} = U_{rm} \sin(\omega t - \varepsilon)$$

$$u_{rb} = U_{rm} \sin(\omega t - 120 - \varepsilon)$$

$$u_{rc} = U_{rm} \sin(\omega t + 120 - \varepsilon)$$



Obr. 10 Blokové schéma regulačního obvodu NPU v prostředí Matlab - Simulink

Posledním blokem modelu je „subsystém“ obsahující PWM řízení, který je zobrazený na Obr. 11. Vstupními parametry tohoto bloku jsou řídicí napětí generovaná blokem regulačního obvodu. Dále je zde generován symetrický pilový signál o frekvenci 1000Hz a rozsahem hodnot $\langle -1, 1 \rangle$. Jednotlivá řídicí napětí jsou porovnávána s tímto pilovým signálem v bloku komparátoru. Z komparátoru je již signál veden jako logický se stavy „0“ ($u_r \leq u_p$) a „1“

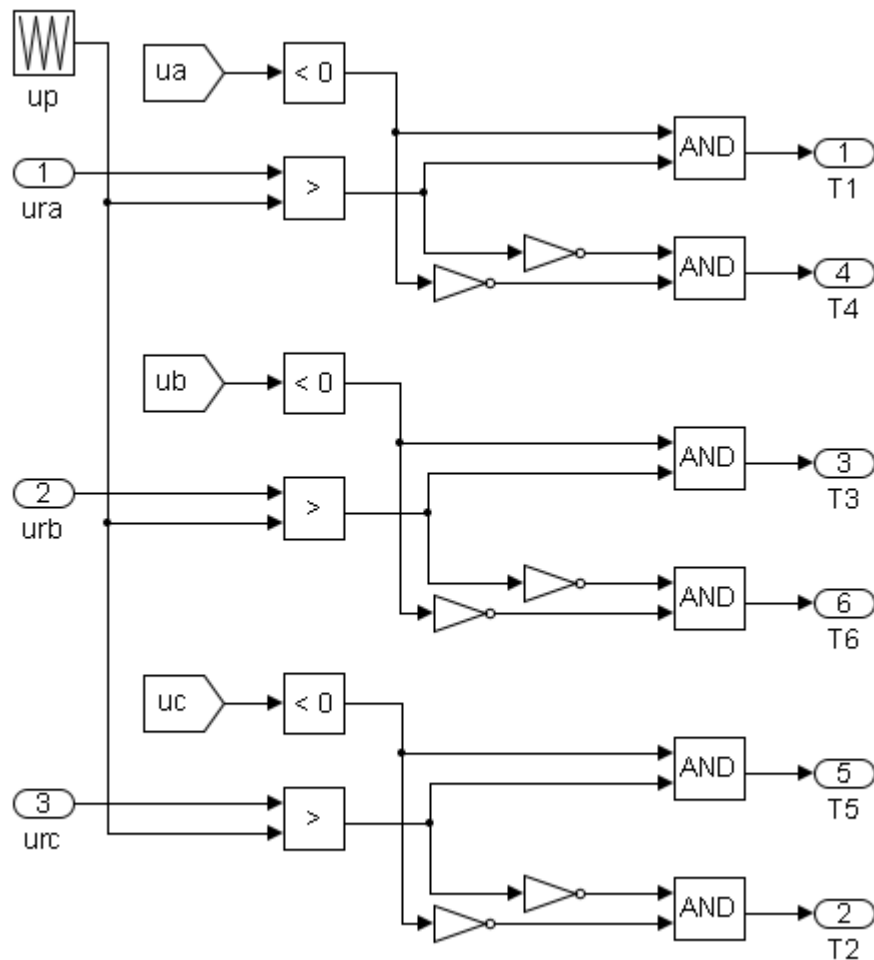
($u_r > u_p$). Další komparátor porovnává průběh síťového napětí s konstantou rovnou nule. Pokud platí $u < 0$, je na výstupu komparátoru „1“. Naopak pokud $u \geq 0$, je na výstupu komparátoru „0“. Tyto logické stavy jsou dále přivedeny na vstupy bloků logických součtů, které vyhodnocují dané stavy. Výstupní logický signál je přiváděn na spínače s lichým indexem. Signály pro spínače se sudým indexem jsou generované stejným způsobem, jen logické stavy z komparátorů jsou před vyhodnocením negovány. Tato vyhodnocení logických stavů jsou navržena dle spínací logiky NPU. Výstupními parametry bloku PWM jsou spínací impulzy na jednotlivé tranzistory.

Parametry modelu PWM řízení:

$$u_p = 1000\text{Hz}$$

$$u_{p\max} = 1$$

$$u_{p\min} = -1$$

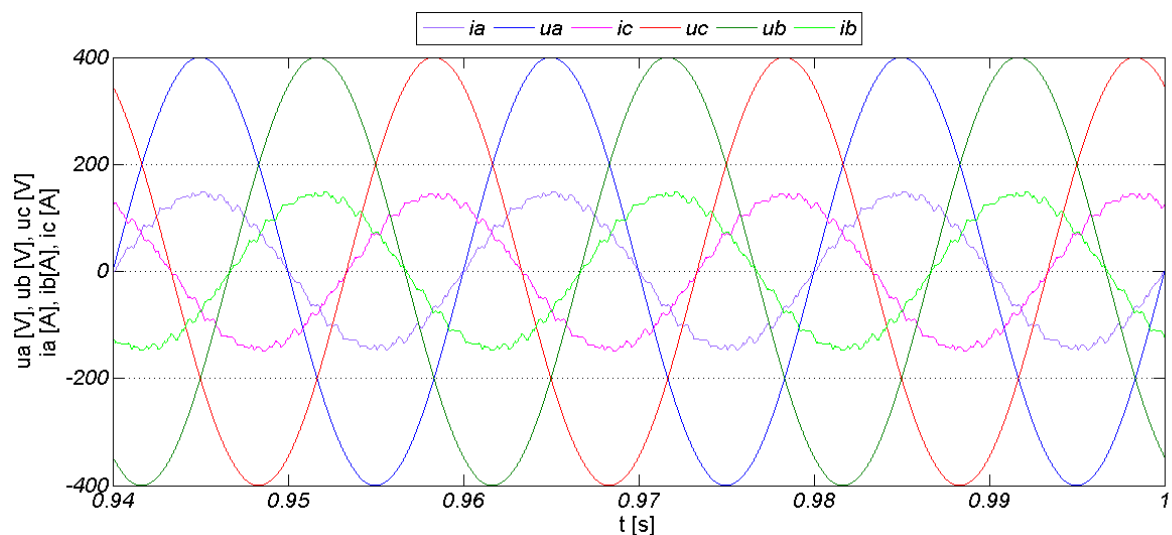


Obr. 11 Blokové schéma PWM řízení NPU v prostředí Matlab - Simulink

3.4 Výsledné průběhy základních veličin

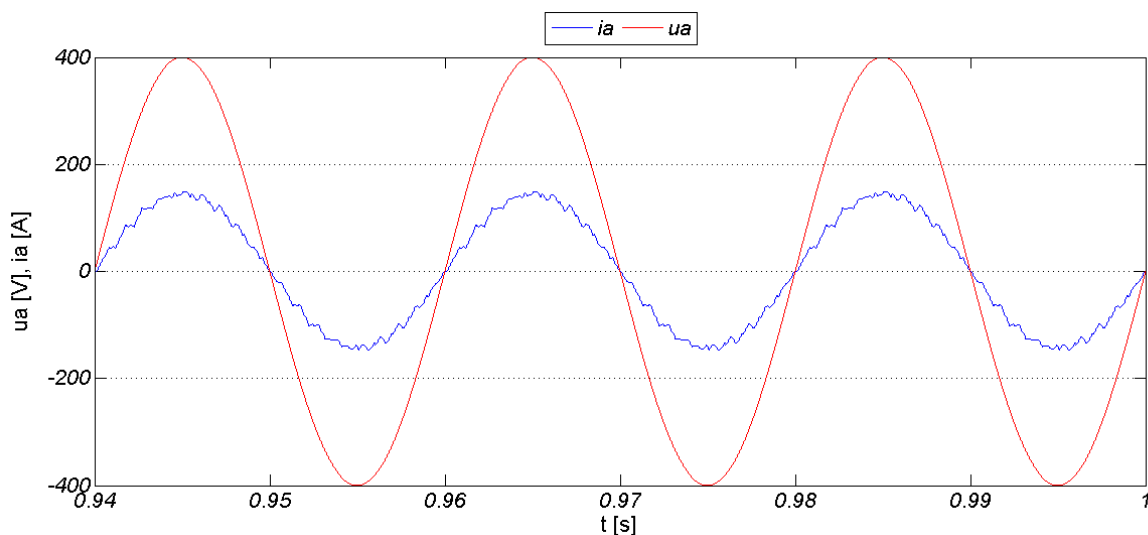
Simulace byla provedena v čase od 0 do 1 sekundy. Délka intervalu byla zvolena tak, aby stihl odeznít přechodový děj a obvodové veličiny se dostaly do ustáleného stavu. Simulace byla spuštěna s diskretním krokem $5 \cdot 10^{-7}$ s. Výsledná data byla exportována do prostředí programu Matlab, kde byla vizualizovaná v příslušných grafech. Jednotlivé grafy byly vykresleny v časovém intervalu od 0.94s do 1s, což jsou tři periody síťového napětí.

Graf na Obr. 12 znázorňuje průběhy síťových napětí a proudů, ze kterých lze usoudit, že simulovaný model třífázového NPU pracuje správně. Všechny proudy odebírané z napájecí sítě jsou přibližně ve fázi se síťovými napětími. Model NPU tedy pracuje s účínkem blízkým jedné.

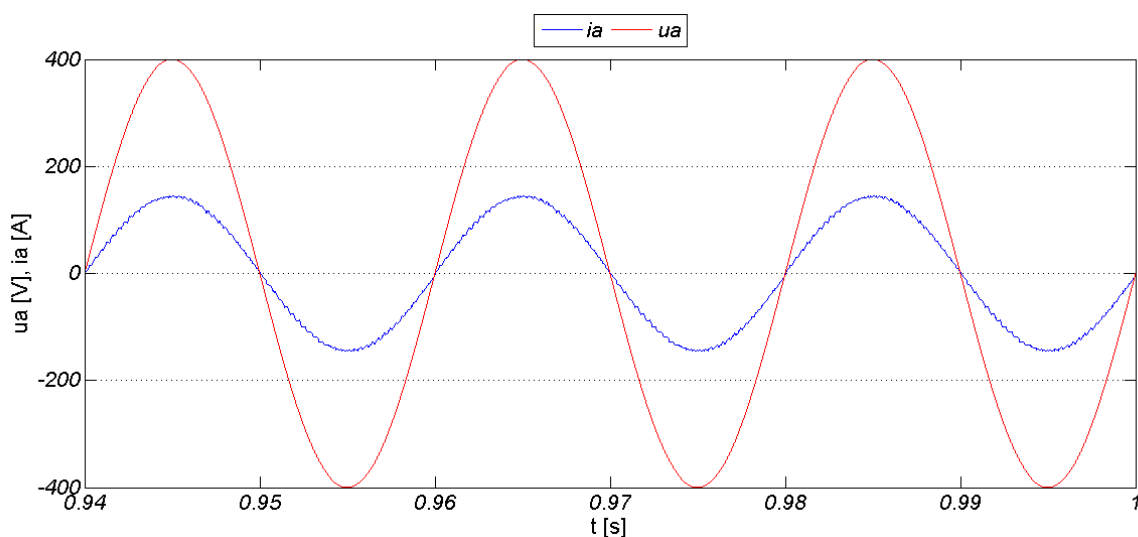


Obr. 12 Průběhy síťových napětí a proudů odebraných ze sítě ($f_p=1000\text{Hz}$)

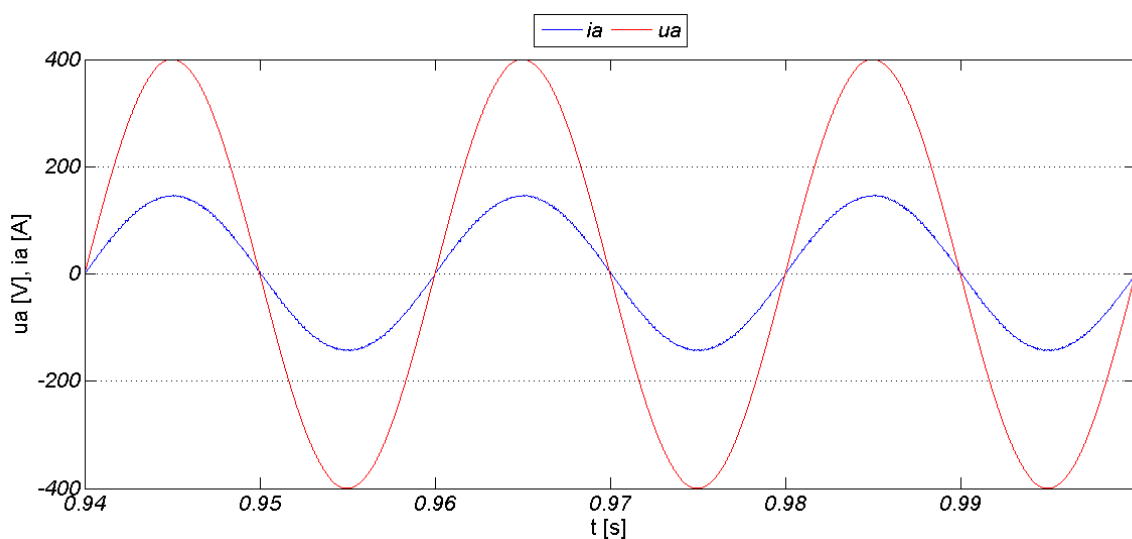
Na Obr. 13 jsou pro přehlednost vykresleny průběhy napětí a proudu pouze pro fázi a . Je zde také lépe patrné, že napětí i proud jsou ve fázi. Napětí má amplitudu 400V a frekvenci 50Hz. Proud i_a je proud odebíraný fází a z napájecí sítě. Frekvence pilového signálu byla nastavena na 1000Hz. Na obrázcích Obr. 14 a Obr. 15 jsou také vykresleny průběhy napětí u_a a proudu i_a , ale se zvýšenou frekvencí pilového signálu. Na Obr. 14 je frekvence $f_p = 3000\text{Hz}$. Z křivky proudu je patrné, že došlo k jeho vyhlazení a velmi se blíží sinusovému průběhu. Na Obr. 15 jsou zobrazeny průběhy při frekvenci $f_p = 5000\text{Hz}$, kdy má proud téměř sinusový průběh. Tyto grafy znázorňují vliv frekvence f_p na průběh proudu odebraného ze sítě. Při vyšších frekvencích již nedochází ke znatelnému vylepšení průběhu proudu, ale naproti tomu rostou spínací ztráty tranzistorů.



Obr. 13 Průběh fázového napětí u_a a proudu odebíraného ze sítě i_a ($f_p=1000\text{Hz}$)

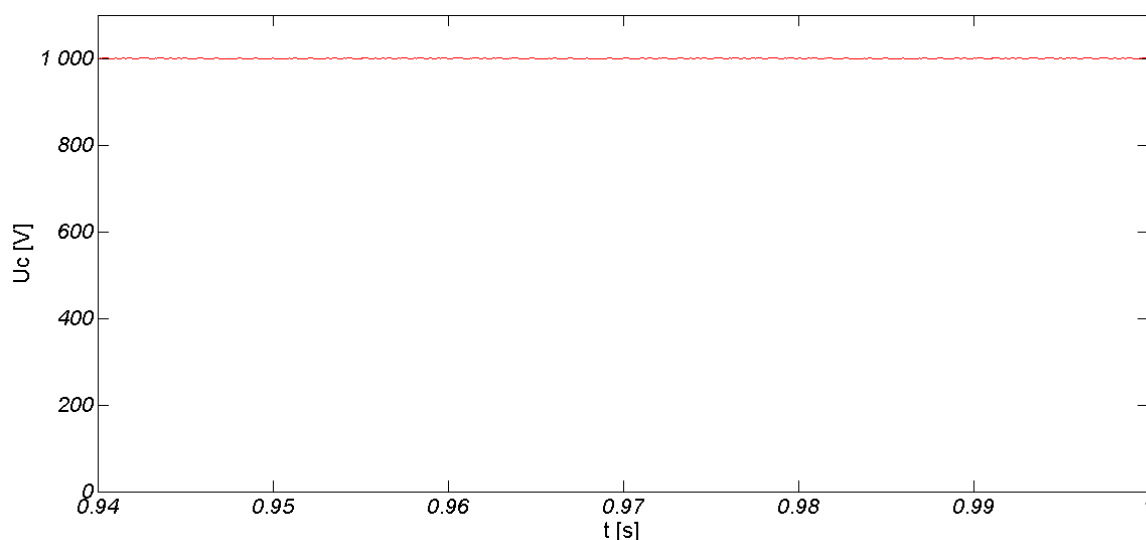


Obr. 14 Průběh fázového napětí u_a a proudu odebíraného ze sítě i_a ($f_p=3000\text{Hz}$)



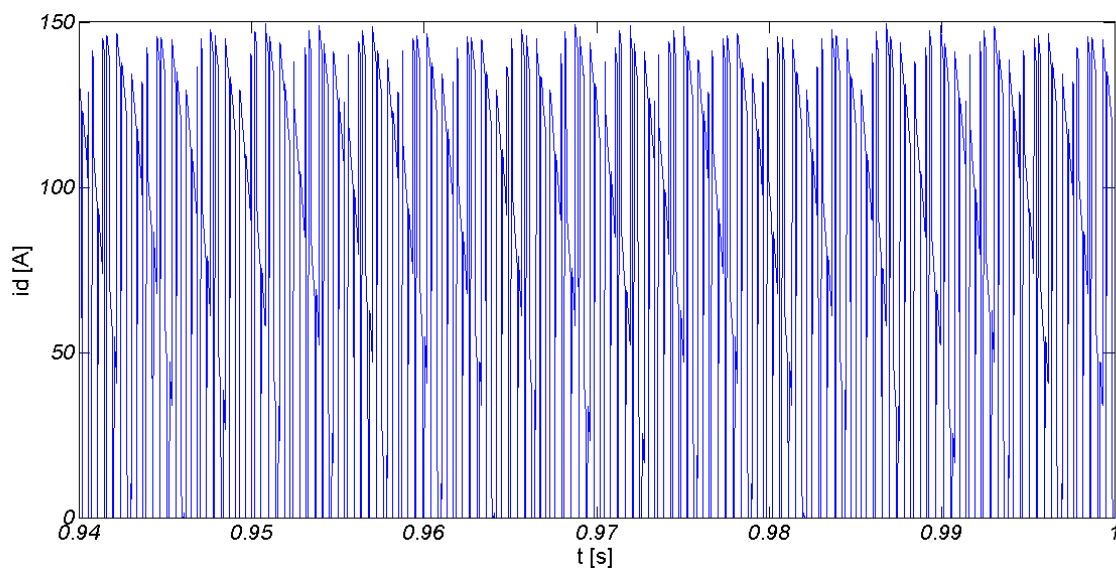
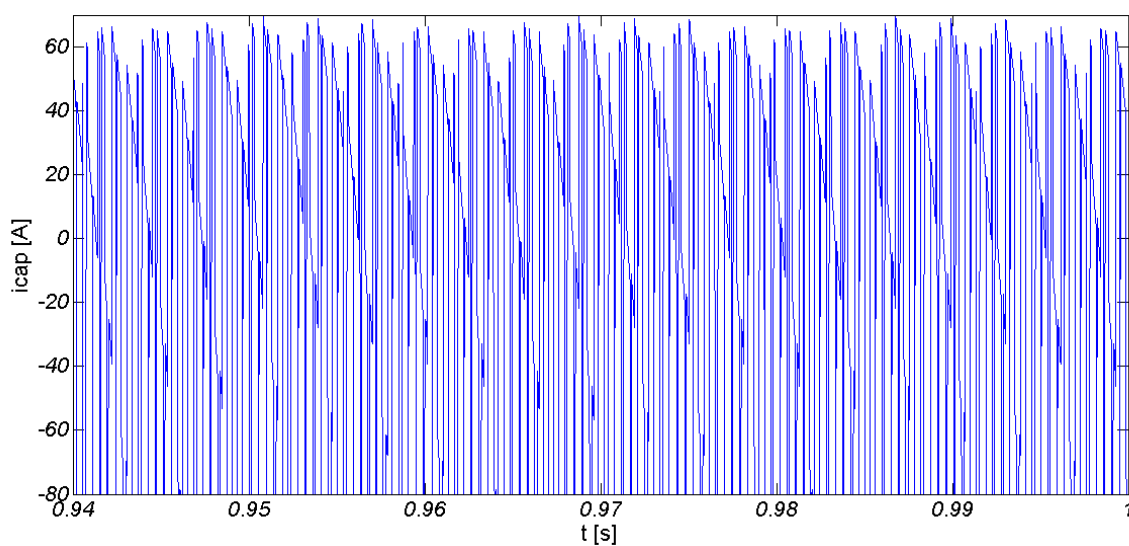
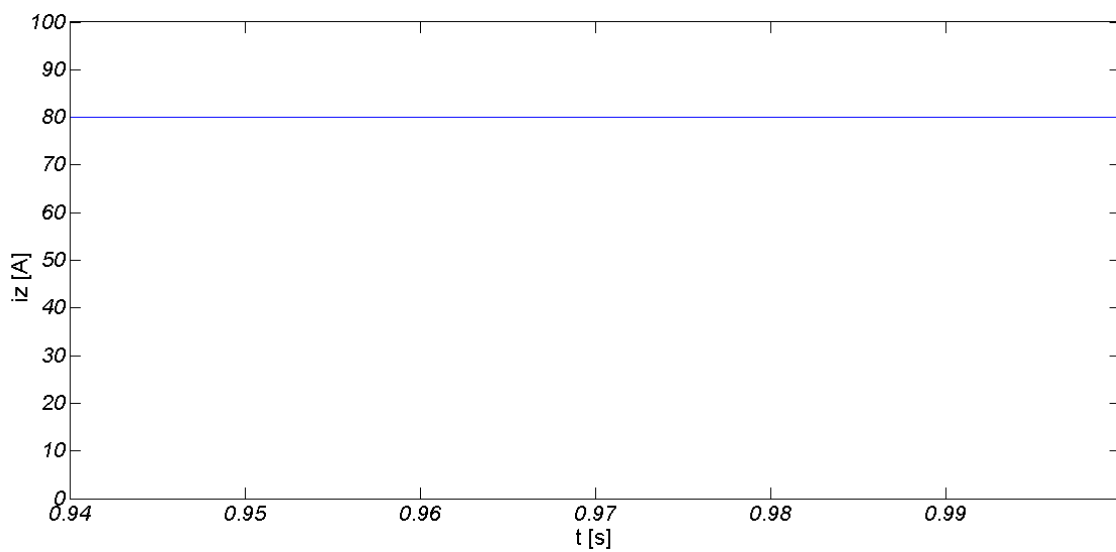
Obr. 15 Průběh fázového napětí u_a a proudu odebíraného ze sítě i_a ($f_p=5000\text{Hz}$)

Na Obr. 16 je vykreslen graf průběhu výstupního napětí NPU, které je zároveň napětím na kondenzátoru stejnosměrné strany NPU a také napětím na připojené zátěži. Průběh znázorňuje napětí v ustáleném stavu na požadované hodnotě 1000V, což potvrzuje správnou funkci regulačního obvodu.

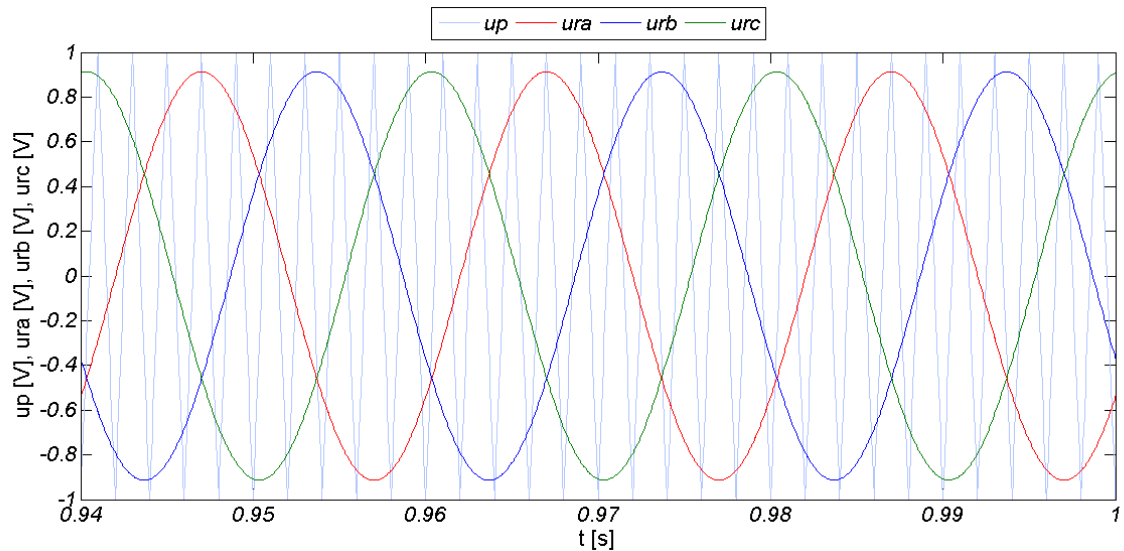


Obr. 16 Výstupní napětí NPU

Další grafy ukazují průběhy proudů na výstupu z NPU. Na Obr. 17 je vykreslen graf průběhu celkového proudu i_d z výstupu NPU. Dále se proud i_d rozděljuje na proud nabíjející kondenzátor i_{cap} (Obr. 18) a proud do zátěže i_z (Obr. 19). Zátěž tvoří sériové spojení odporu a indukčnosti, která zajišťuje vyhlazení proudu zátěží. Proud zátěží je tedy v ustáleném stavu téměř konstantní. Pro uzel na výstupu platí 1. Kirchhoffův zákon, proto $i_d = i_{cap} + i_z$.

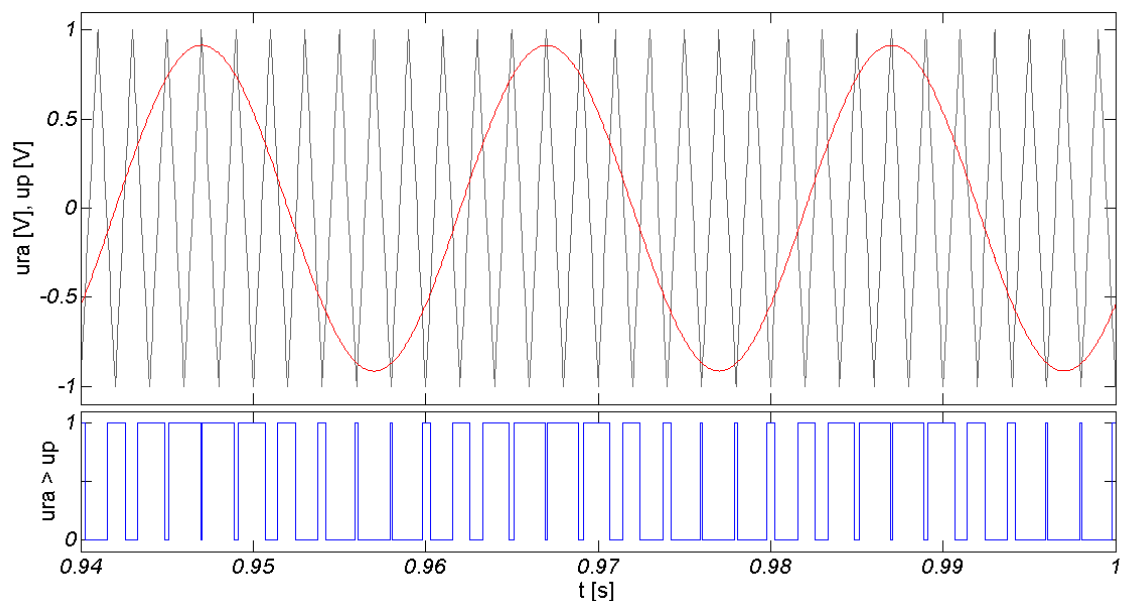
*Obr. 17 Výstupní proud NPU**Obr. 18 Proud do kondenzátoru**Obr. 19 Proud do RL zátěže NPU*

Průběhy řídicích napětí jsou znázorněny na Obr. 20 spolu s průběhem nosného pilového signálu o frekvenci 1000Hz. Nosný signál je generován jako symetrický pilový průběh v mezích od $\langle -1,1 \rangle$. Řídicí napětí musela být normována (dělena hodnotou $\frac{U_c}{2}$), aby byla v rámci mezí pilového signálu.



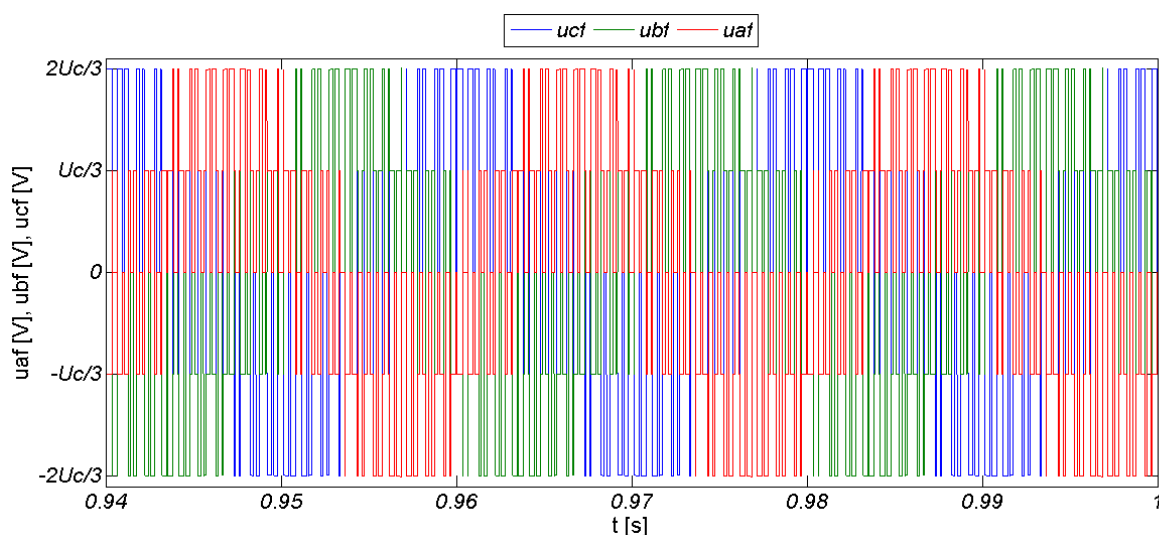
Obr. 20 PWM - průběhy řídicích signálů a nosného pilového signálu

Princip PWM je lépe patrný z grafu na Obr. 21. Pro přehlednost jsou v horní části zobrazeny pouze průběhy řídicího signálu u_{ra} a nosného signálu. Tyto dva průběhy jsou přivedeny do komparátoru. Zde jsou porovnány a při koincidenci signálů překlopí logický stav na výstupu, ten je zobrazen ve spodní části grafu na Obr. 21. Pokud je $u_{ra} > u_p$ je na výstupu komparátoru logická jedna, naopak pokud je $u_{ra} \leq u_p$ je na výstupu logická nula. Signál z komparátoru je dále zpracován spínací logikou NPU.

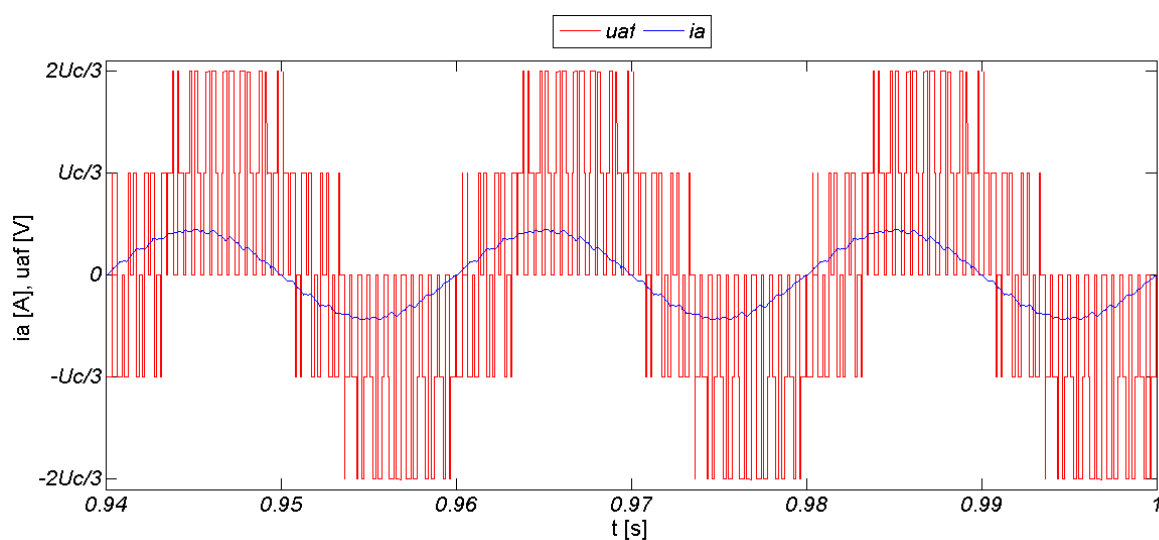


Obr. 21 PWM –princip komparace řídicího signálu u_{ra} s nosným signálem u_p

Spínací logika vyhodnocuje signály z komparátorů a vysílá spínací impulzy na jednotlivé spínače. Podle kombinace sepnutí jednotlivých spínačů mohou fázová napětí sítě nabývat hodnot 0 , $\pm \frac{U_c}{3}$ a $\pm \frac{2U_c}{3}$. Průběhy všech fázových napětí jsou vykresleny na Obr. 22. Na Obr. 23 je vykreslen průběh fázového napětí u_{af} a proudu i_a odebíraného z napájecí sítě.



Obr. 22 Fázová napětí NPU

Obr. 23 Průběh fázového napětí u_{af} a síťového proudu i_a

Závěr

Bakalářská práce byla zaměřena na řízení napětového pulzního usměrňovače. Jejím cílem byl popis jeho činnosti, návrh regulačních obvodů s PWM řízením a následná simulace celého systému.

V první části byl popsán výkonový obvod NPU v jednofázovém i třífázovém zapojení. Dále byl odvozen fázorový diagram a sepsán matematický popis NPU, který byl použit při návrhu regulačního obvodu a následné simulaci.

Druhá část je zaměřena na řízení NPU. Jsou zde popsány vlastnosti PWM řízení, díky kterým je patrná výhodnost použití této metody, a to zejména kvůli možnosti odebírat ze sítě sinusový proud ve fázi s napájecím napětím. Dále zde byla rozebrána spínací logika NPU pro jednu fázi při uvažovaných zjednodušeních. Na tomto zjednodušeném případě lze logiku spínání tranzistorů nejlépe pochopit. Poté byla spínací logika aplikována na reálný třífázový systém. Následně byl navržen regulační obvod zahrnující PWM řízení, které je zde také popsáno.

S využitím všech poznatků o NPU byl navržen jeho model v programu Matlab – Simulink. Model byl sestaven pro jeho třífázovou variantu včetně regulačního obvodu. Lze jej rozdělit na dvě základní části, výkonovou část a řídicí obvody. Model tvoří bloky, které zastupují jednotlivé prvky obvodu NPU.

Prínosem této práce je funkční model třífázového NPU s PWM řízením, který je spustitelný v programu Simulink. Na modelu byla provedena simulace jeho činnosti a zaznamenány průběhy základních obvodových veličin. Výstupní data ze simulace byla exportována do prostředí Matlab, ve kterém byla zakreslena do grafů. Průběhy základních veličin v obvodu NPU jsou v souladu s matematickým popisem systému.

Vytvořil jsem model třífázového NPU, který dle sledovaných parametrů pracuje správně. Výstupní napětí je regulačním obvodem udržováno na konstantní hodnotě. Proud odebíraný z napájecí sítě se svým průběhem blíží sinusovému a jsou ve fázi s napětím sítě. Účinník simulovaného modelu NPU se tedy blíží jedné. To jsou požadavky, které by měl NPU při správném řízení splňovat, aby nepůsobil negativním způsobem na napájecí soustavu.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] VONDRÁŠEK, F. *Výkonová elektronika*. 2., rozš. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2003, 267 s. ISBN 80-708-2980-X.
- [2] JOSEFOVÁ, T. *Harmonické pulsních usměrňovačů*. Plzeň 2012. Diplomová práce. ZČU.
- [3] LETTL, J.; DOLEČEK, R. *EMC Increasing of PWM Rectifier in Comparison with Classical Rectifier*. Radioengineering, vol. 17, no. 4, 2008.
- [4] KŮS, V.; JOSEFOVÁ, T.; BILÍK, P., "Harmonic currents generated by the voltage-source active rectifier," In *IV. IEEE International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*. Istanbul: Gazi University Istanbul, 2013. s. 373-378. ISBN: 978-1-4673-6392-1 , ISSN: 2155-5516.
- [5] KARBAN, P. *Výpočty a simulace v programech Matlab a Simulink*. Vyd. 1. Brno: Computer Press, 2006, 220 s. ISBN 80-251-1301-9.
- [6] KŮS, V. *Vliv polovodičových měničů na napájecí soustavu*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002. 183 s. ISBN 80-7300-062-8.
- [7] PAVELKA, J.; ČEŘOVSKÝ, Z.; LETTL, J. *Výkonová elektronika*. 3. přeprac. vyd. Praha: ČVUT, 2007, 227 s. ISBN 978-80-01-03626-6.
- [8] JOSEFOVÁ, T.; KŮS, V. "Analysis of current drawn by the voltage-source active rectifier from the electricity network," In *4th International Youth Conference on Energy*. [S.l.]: IEEE, 2013. s. 1-7. ISBN: 978-1-4673-5554-4.