



Pracoviště: Regionální inovační centrum elektrotechniky

Výzkumná zpráva č.: 22190 - 45 - 2013

Balancování napětí jednotlivých modulů vysokonapětového modulárního měniče složeného z H-můstků

Druh úkolu: Vědecko-výzkumný
Řešitelé: Ing. V. Blahník, Ph.D.
Vedoucí úkolu: doc. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
Počet stran: 20
Datum vydání: listopad 2013
Revize: 1

Práce vznikla s podporou projektu TA ČR TA01010863
a CZ.1.05/2.1.00/03.0094

Anotace

Tato výzkumná zpráva se zabývá návrh parametrů výkonového obvodu laboratorního modelu modulárního měniče složeného z H-můstků a analýzou jeho chování. Součástí zprávy je návrh modulace a řízení modulárního měniče, které je za pomoci simulace testováno. Testy řízení jsou pak zaměřeny na funkčnost balancování napětí na jednotlivých modulech měniče.

Obsah

1	ÚVOD.....	5
2	NÁVRH LABORATORNÍHO PROTOTYPU TŘÍFÁZOVÉHO MODULÁRNÍHO MĚNIČE VE FUNKCI NAPĚŤOVÉHO PULZNÍHO USMĚRŇOVAČE (3F NPU)	7
2.2	Simulační model.....	8
3	REGULACE MODULÁRNÍHO MĚNIČE	8
4	ZÁVĚR.....	17

Použité symboly a zkratky

C	Kapacita jednotlivých kondenzátorů ve stejnosměrném obvodu každého H-můstku.
(d,q)	Rotující souřadný systém svázaný s polohou vektoru napětí zdroje.
$e_{i_a}, e_{i_b}, e_{i_c}$	Regulační odchylky regulátorů proudu jednotlivých fází.
f_{PWM}	Spínací frekvence tranzistorů.
Hb	H-bridge ... H-můstek
i_a, i_b, i_c	Fázové proudy zdroje. Kladný směr proudu definován ve směru od zdroje ke svorkám NPU (tzn. v usměrňovačovém režimu teče kladný proud).
i_{wa}, i_{wb}, i_{wc}	Hodnoty požadovaných proudů proudových regulátorů jednotlivých fází.
K_p, K_r, T_i	Konstanty nastavení regulátorů – proporční zesílení, rezonanční zesílení, integrační časová konstanta.
L	Indukčnost vstupního filtru.
NPU	Napěťový pulzní usměrňovač (NPU).
ω_0	Úhlová frekvence zdroje ($2\pi f$).
R	Odpor tlumivky vstupního filtru.
R_{ia}, R_{ib}, R_{ic}	Regulátory fázových proudů.
$R_{\Delta U_{c_m2_a}}, R_{\Delta U_{c_m3_a}}, R_{\Delta U_{c_m2_b}}, R_{\Delta U_{c_m3_b}}, R_{\Delta U_{c_m2_c}}, R_{\Delta U_{c_m3_c}}$	Regulátory pro balancování napětí na jednotlivých modulech měniče a pro tři fáze.
$R_{U_{c_a}}, R_{U_{c_b}}, R_{U_{c_c}}$	Regulátory celkového napětí stejnosměrných obvodů NPU třech fází.
T_{vz}	Perioda vzorkování regulace.
$\vartheta_a, \vartheta_b, \vartheta_c$	Polohy vektorů fázových napětí zdroje ve stojícím souřadném systému.
u_a, u_b, u_c	Fázová napětí napájecího zdroje.
$U_{c_a}, U_{c_b}, U_{c_c}$	Suma napětí ve stejnosměrných obvodu NPU jednotlivých fází.

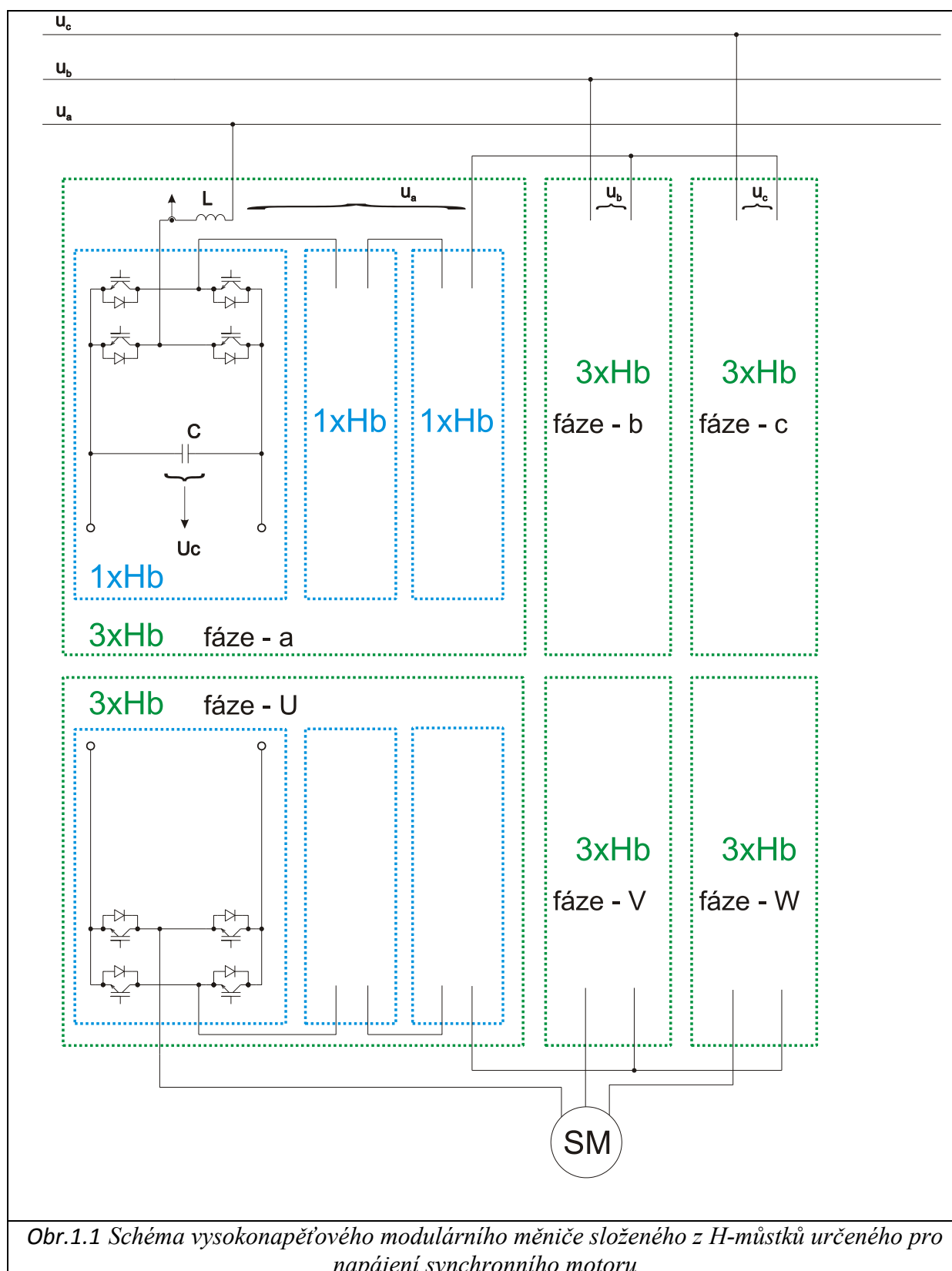
U_{cw}	Suma požadovaného napětí ve stejnosměrném obvodu NPU v jednotlivých fázích měniče.
$U_{c_m1_a}, U_{c_m2_a},$ $U_{c_m3_a}$ $U_{c_m1_b}, U_{c_m2_b},$ $U_{c_m3_b}$ $U_{c_m1_c}, U_{c_m2_c},$ $U_{c_m3_c}$	Napětí na jednotlivých modulech měniče podle fází.
u_{v_estim}	Velikost modulačního napětí vypočtená z modelu.
$u_{v_PR_a}, u_{v_PR_b},$ $u_{v_PR_c},$	Velikost modulačního napětí, která jde z PR regulátoru proudu.
$u_{v_m1_a}, u_{v_m2_a},$ $u_{v_m3_a}, u_{v_m1_b},$ $u_{v_m2_b}, u_{v_m3_b},$ $u_{v_m1_c}, u_{v_m2_c},$ $u_{v_m3_c},$	Finalní velikost modulačního signálu pro jednotlivé moduly a fáze měniče, vstupuje do PWM modulace
$\Delta u_{v_m2_a},$ $\Delta u_{v_m3_a},$ $\Delta u_{v_m2_b},$ $\Delta u_{v_m3_b},$ $\Delta u_{v_m2_c},$ $\Delta u_{v_m3_c}$	Korekční velikost modulačního signálu pro balancování jednotlivých modulů, upravuje výsledný modulační signál
U_m	Velikost vektoru fázového napětí zdroje (amplituda fázového napětí).
$U_{v_a}, U_{v_b}, U_{v_c}$	Napětí na střídavých svorkách jednotlivých fází NPU.

1 Úvod

Tato výzkumná zpráva se zabývá analýzou vysokonapěťového modulárního měniče složeného z H-můstků. Zpráva přímo navazuje na zprávu [1] a to na variantu zapojení jednotlivých fází měniče do hvězdy. Součástí této zprávy je návrh parametrů výkonového obvodu laboratorního modelu modulárního měniče složeného z H-můstků, dále pak návrh modulace a řízení modulárního měniče. Hlavní část zprávy se zabývá simulačním testem navržené regulace zejména pak testováním balancování napětí na jednotlivých modulech měniče.

Navržený frekvenční měnič pro napájení synchronního motoru je realizovaný vstupním napěťovým pulzním usměrňovačem (dále NPU) a výstupním napěťovým střídačem, oba měniče jsou v třífázové variantě. Modularita měniče spočívá v tom, že každá fáze je složena z třech sériově spojených modulů (modul = H-můstek) a každý modul má na svých stejnosměrných svorkách připojený kondenzátor, který napájí modul (H-můstek) druhého měniče. Jedná se tedy o spojení modulárního měniče složeného z H-můstků, který pracuje ve funkci NPU a k němu je připojen stejný měnič (zrcadlově obráceně), který pracuje ve funkci střídače, každý jednotlivý modul NPU je spojen s jedním modulem střídače přes kondenzátor. Celkové schéma navrženého frekvenčního měniče je uvedeno na Obr.1.1.

Vstupní NPU zajišťuje tři základní požadavky – suma DC napětí v každé fázi je stejná a to požadovaná hodnota (U_{cw}), rozložení DC napětí na jednotlivých modulech je shodné a to požadovaná hodnota ($U_{c_mXw} = U_{cw}/3$), odběr sinusového proudu z napájecí sítě. Výstupní napěťový střídač pak zajišťuje pouze napájení synchronního motoru a to podle požadavků na jeho řízení.



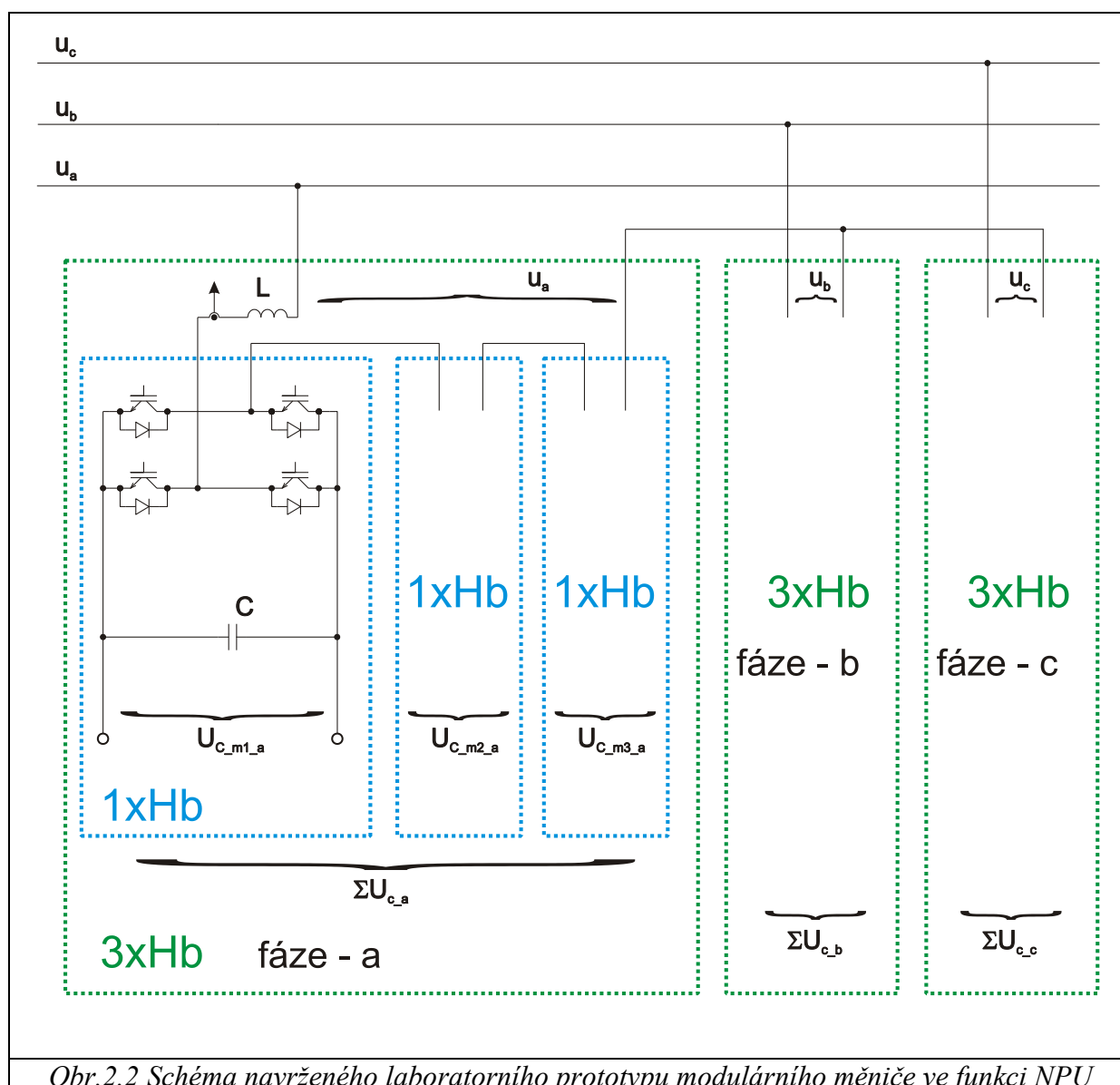
2 Návrh laboratorního prototypu třífázového modulárního měniče ve funkci napětového pulzního usměrňovače (3f NPU)

Návrh parametrů laboratorního prototypu třífázového modulárního měniče ve funkci napětového pulzního usměrňovače jsou navrženy tak, aby byl měnič srovnatelný s již vyvinutými laboratorními prototypy měničů typu NPC, ANPC a FLC [2] a [3].

Testování vlastností měniče a navrženého řízení včetně modulace je provedeno na simulačním modelu laboratorním prototypu jehož parametry jsou uvedeny v tabulce 1, výkonové schéma simulačního modelu měniče je pak uvedeno na Obr.2.2.

Tabulka 1: Parametry navrženého laboratorního prototypu třífázového modulárního měniče ve funkci NPU

Napájecí síť – efektivní hodnota fázového napětí u	230 V / 50 Hz
Indukčnost vstupní tlumivky v každé fázi L	2 mH
Parazitní odpor vstupní tlumivky R	0,1 Ω
Kapacita kondenzátoru jednotlivých modulů (H-můstků) C	4 mF
Požadované napětí v ss obvodu každé fáze U_{cw}	450 V
Požadované napětí v ss obvodu každého modulu U_{c_mXw}	150 V
Jmenovitý výkon laboratorního modelu P_N	10 kW
Spínací frekvence IGBT tranzistorů f_{PWM}	800 Hz
Vzorkovací frekvence navržené regulace T_{vz}	50 μ s



Obr.2.2 Schéma navrženého laboratorního prototypu modulárního měniče ve funkci NPU

2.2 Simulační model

Simulační model modulárního měniče ve funkci napěťového pulzního usměrňovače byl vytvořen pomocí programovacího jazyka C, parametry simulace se shodují s Tabulkou 1. Simulační krok je má délku $h=1e-7$ s a výpočet regulačního algoritmu probíhá v smyčce, která trvá $T_{vz}=50 \mu s$.

3 Regulace modulárního měniče

Navržená regulace NPU je rozdělena na tři nezávislé regulační smyčky, kde jedna regulační smyčka řídí jednu fázi (fáze_a, fáze_b, fáze_c). Každá regulační smyčka pak zajišťuje

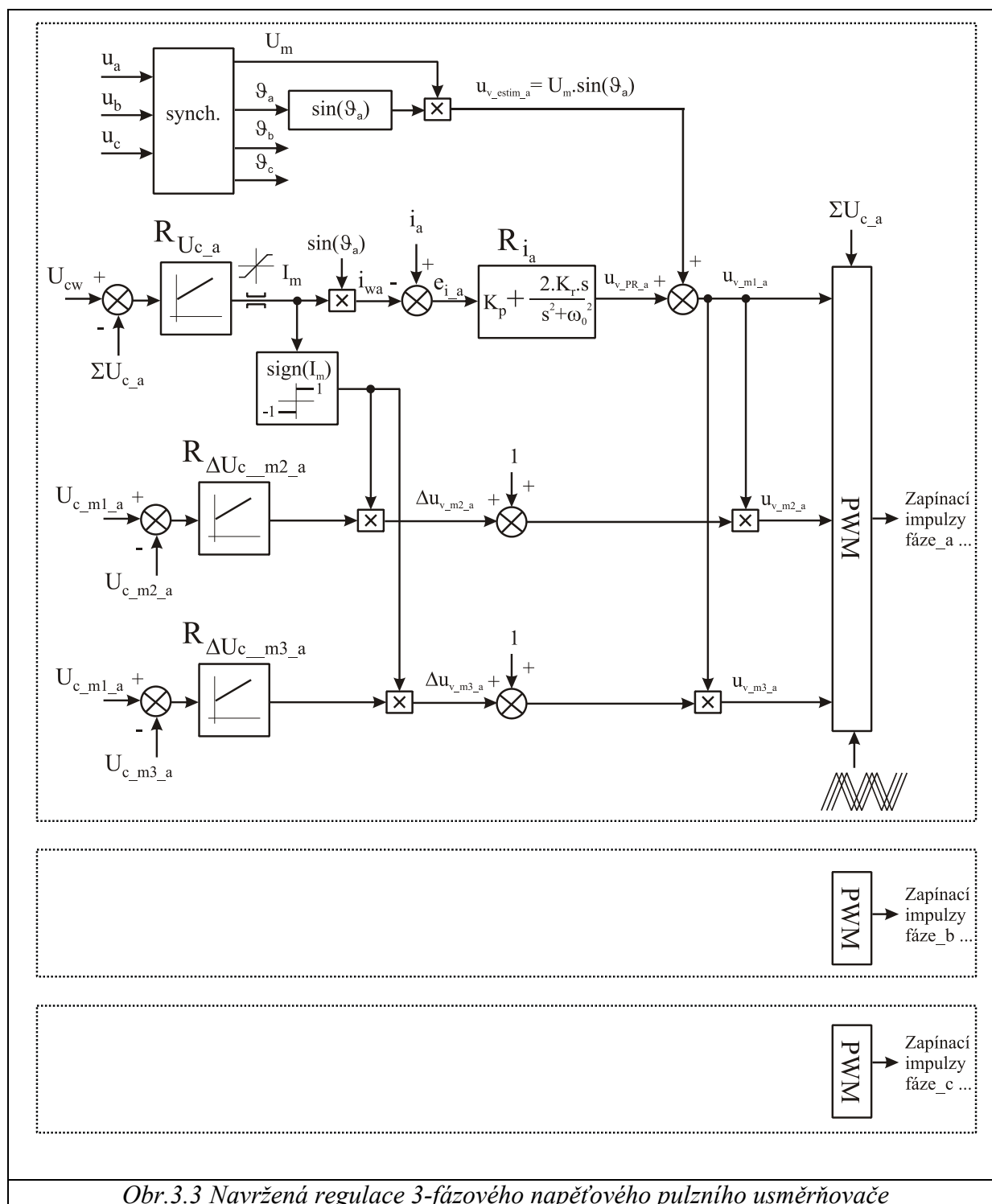
regulaci celkového výstupního stejnosměrného napětí i rovnoměrné rozložení tohoto stejnosměrného napětí na jednotlivých modulech měniče. Dále je zde zajištěna přímá regulace fázových proudů měniče. Celkové schéma navržené regulace měniče je uvedeno na Obr.3.3. Jako modulační technika byla použita přesazená PWM modulace, která je detailněji vysvětlena např. v [4]. Součástí regulace je synchronizační obvod, který vyhodnocuje velikost a polohu vektoru napětí příslušné fáze.

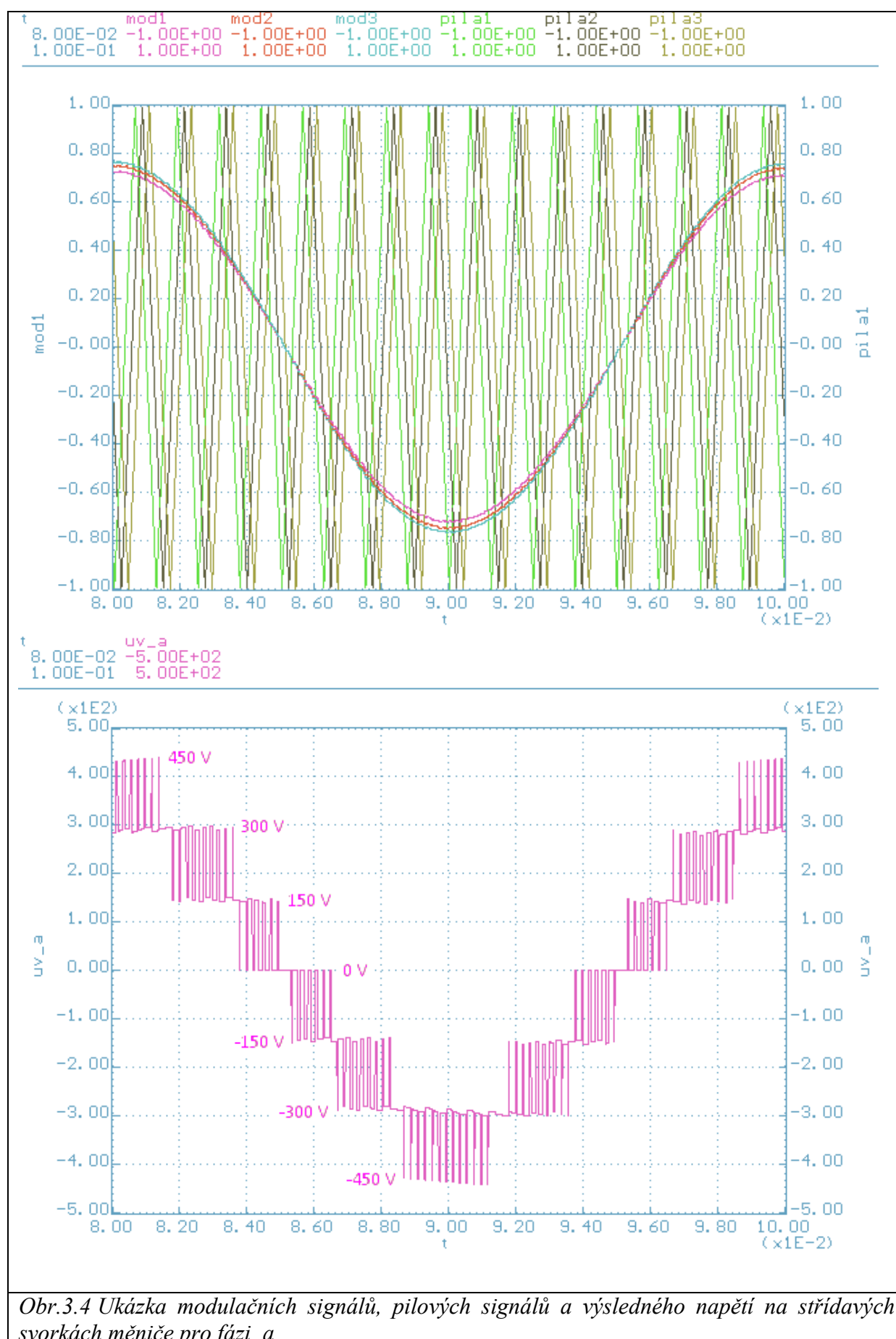
Na Obr.3.3 je v horním okně detailně znázorněno řízení fáze_a, synchronizační obvod vyhodnocuje velikost (U_m) a polohu vektoru napětí fáze a (ϑ_a). Pro regulaci celkového stejnosměrného napětí měniče je zde použit PI regulátor (R_{Uc_a}), jehož výstupem je velikost požadovaného proudu (I_m). Z údaje o poloze vektoru napětí a požadované velikosti proudu je vypočten požadovaný proud i_{wa} , který je porovnán s aktuálním proudem fáze (i_a) a rozdíl vstupuje do PR regulátoru proudu (R_{i_a}). Celkový modulační signál pro první modul měniče fáze_a (signál $u_{v_m1_a}$) je pak suma výstupního signálu z PR regulátoru (u_{v_PR}) a signálu $u_{v_estim_a}$. Signál $u_{v_estim_a}$ představuje maximálně zjednodušený matematický model obvodu a je v tomto případě vypočten zpětnou rekonstrukcí napětí fáze_a. Ve spodní části obrázku jsou pak dva PI regulátory ($R_{\Delta U_{c_m2_a}}$ a $R_{\Delta U_{c_m3_a}}$), které zajišťují balancování napětí na jednotlivých modulech fáze_a. Regulátory v podstatě jen lehce upravují velikost modulačního signálu $u_{v_m2_a}$ a $u_{v_m3_a}$ oproti modulačnímu signálu $u_{v_m1_a}$ tak, aby se vyrovnala stejnosměrná napětí na kondenzátorech modulů fáze_a. Pro správnou funkci balancování napětí na jednotlivých modulech je nutné znát směr přenášeného výkonu měniče (signum I_m). Při popsaném způsobu balancování napětí na jednotlivých kondenzátorech je napětí na prvním modulu ($U_{c_m1_a}$) řízeno v režimu master a napětí na zbylých dvou modulech ($U_{c_m2_a}$ a $U_{c_m3_a}$) je řízeno v režimu slave.

Do bloku PWM vstupují tedy 3 modulační signály ($u_{v_m1_a}$, $u_{v_m2_a}$, $u_{v_m3_a}$), které se normují podle velikosti celkového napětí v stejnosměrném obvodě fáze_a (ΣU_{c_a}). Ukázka modulačních signálů pro fázi_a, pilový signálů a výsledného napětí u_{va} , které je na střídavých svorkách modulů měniče fáze_a je k vidění na Obr.3.4.

Zvolená přímá regulace proudu je v tomto případě za pomoci PR regulátoru, ale jelikož se jedná o třífázový měnič, je možné zde použít mírně modifikované 1f vektorové řízení (regulace proudu v rotujícím souřadném systému (d,q) – regulace činné a jalové složky

proudu v kartézském souřadném systému), vychází ze stejného principu jako řízení použité pro měniče NPC, ANPC a FLC.





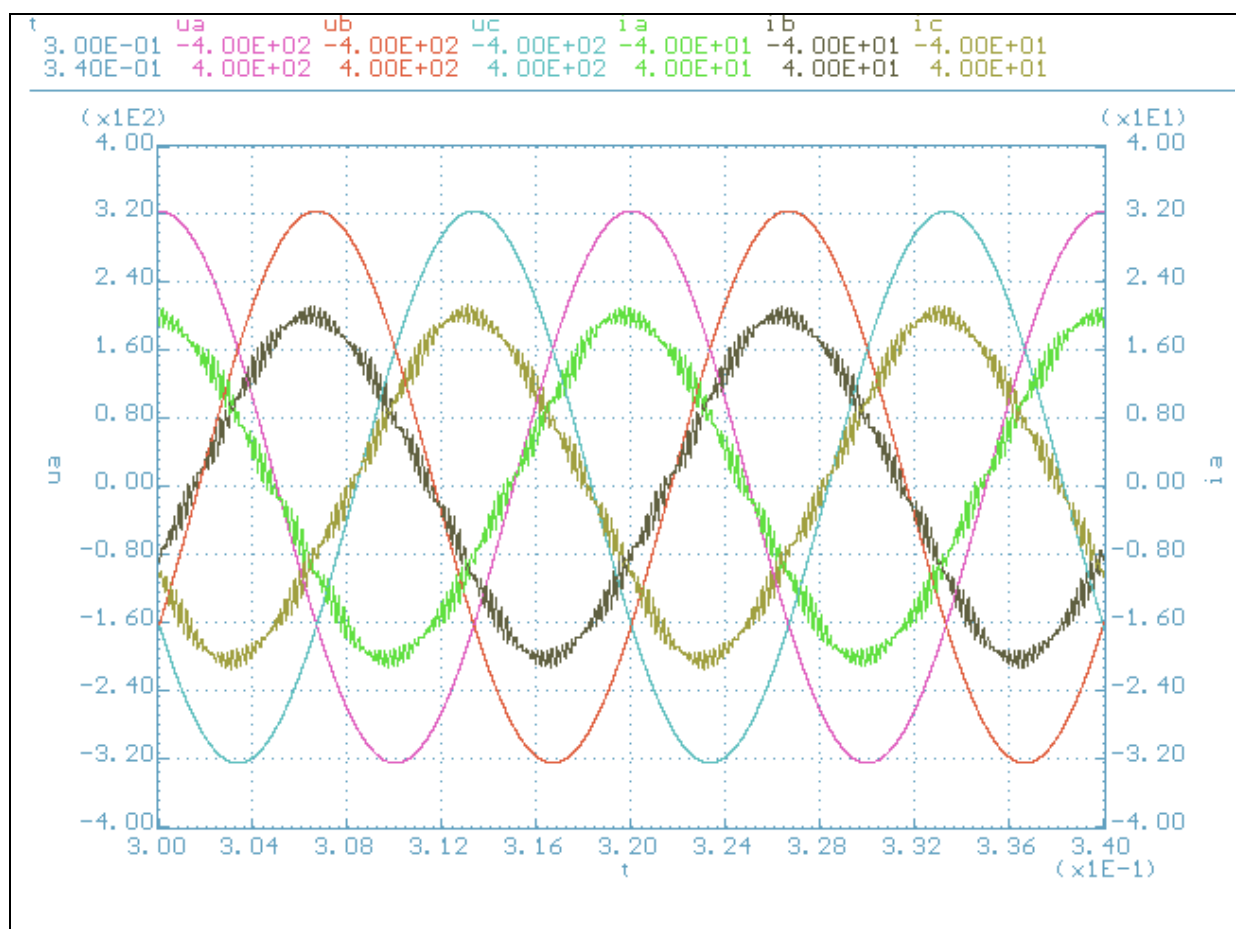
Obr.3.4 Ukázka modulačních signálů, pilových signálů a výsledného napětí na střídavých svorkách měniče pro fázi a

Nastavení všech použitých regulátorů je uvedeno v tabulce 2 (nastavení regulátorů celkového napětí, proudu a dorovnávacích regulátorů je stejné pro všechny tři fáze).

Tabulka 2: Nastavení regulátorů navrženého řízení– zesílení a časové konstanty

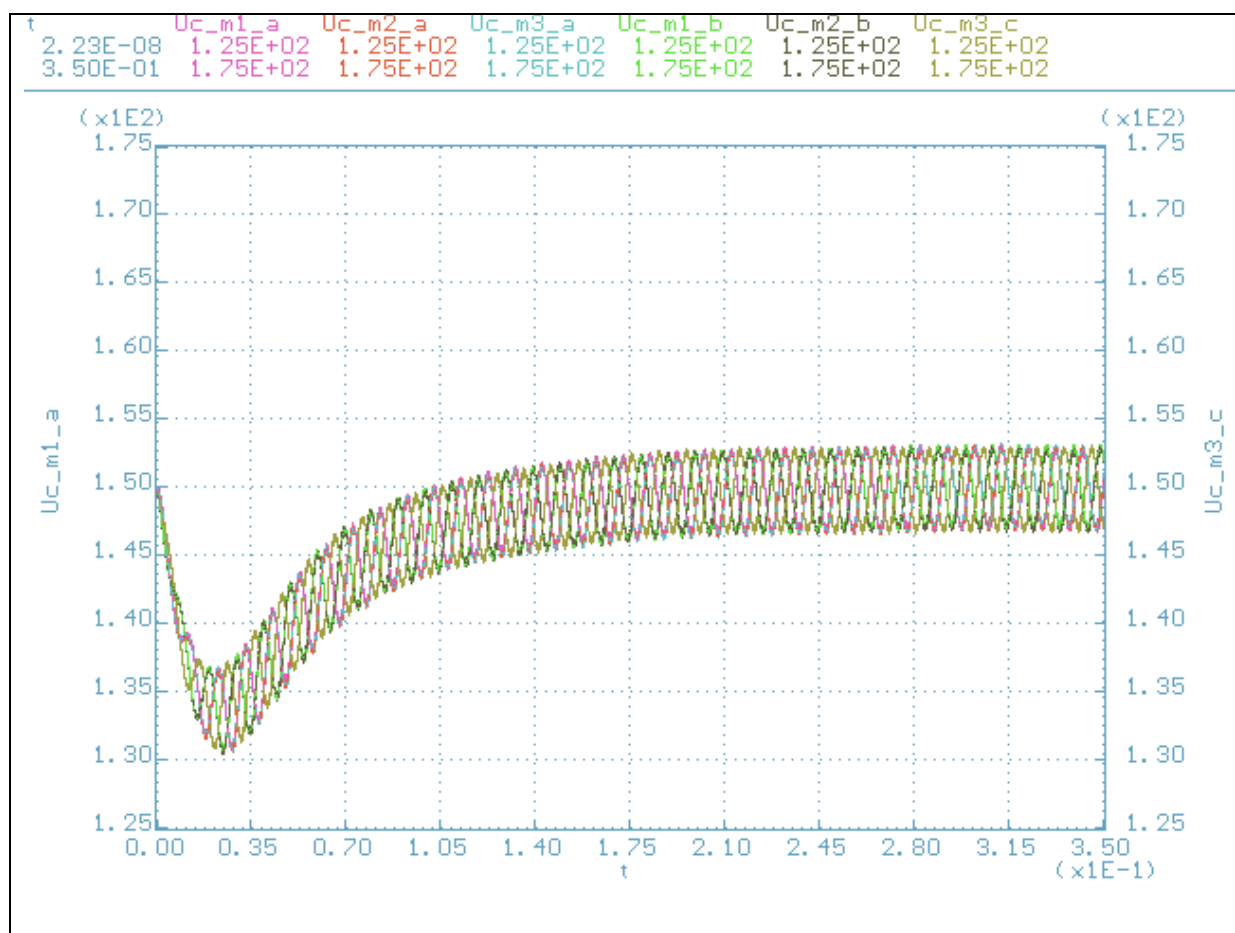
Regulátor	Parametry
R_{Uc_a} R_{Uc_b} R_{Uc_c}	$K_p = 0,3$; $T_i = 0,05$ s, omezovač = ± 30 A
R_{ia} R_{ib} R_{ic}	$K_{p_PR} = 1,1$; $K_{r_PR} = 50$
$R_{\Delta Uc_m2_a}$ $R_{\Delta Uc_m3_a}$ $R_{\Delta Uc_m2_b}$ $R_{\Delta Uc_m3_b}$ $R_{\Delta Uc_m2_c}$ $R_{\Delta Uc_m3_c}$	$K_{p_DU} = 0,005$; $T_{i_DU} = 0,1$ s

Výsledky simulačních testů navržené regulace, která zajišťuje balancování napětí jednotlivých modulů vysokonapěťového modulárního měniče složeného z H-můstek provozovaného ve funkci NPU jsou k vidění na Obr.3.5 až Obr.3.8. Na Obr.3.5 je pak zachyceny průběhy napájecího napětí (u_a , u_b , u_c) a průběhy proudů (i_a , i_b , i_c), které odebírá pulzní usměrňovač z napájecí sítě při konstantním a rovnoměrném zatížení ($P = 9,5$ kW ... každý modul zatížen zdrojem konstantního proudu $i_z=7$ A). Přímá regulace proudu na bázi PR regulátorů zajišťuje odběr sinusového proudu ve fázi s napájecím napětím.



Obr.3.5 Fázová napětí a proudy modulárního NPU v ustáleném stavu a při rovnoměrném zatížení všech můstků,
(celková zátěž měniče $P = 9,5 \text{ kW}$, každý modul zatížen zdrojem konstantního proudu $i_z = 7 \text{ A}$)

Průběh výstupního napětí na vybraných H-můstcích při rovnoměrném skokovém zatížení všech modulů měniče je vidět na Obr.3.6, pulzní usměrňovač byl skokově zatížen z nuly na 9,5 kW. Stejnosměrné napětí každého modulu je zvlněno s dvojnásobnou frekvencí základní harmonické napájecího napětí (zvlnění U_{c_mX} na frekvenci 100 Hz), to vychází z fyzikální podstaty jednofázových měničů, protože maximální výkon je v tomto případě přenášen vždy, když je maximální hodnota napětí.



Obr.3.6 Skoková změna zatížení měniče – průběh řízeného napětí na vybraných H-můstcích při rovnoměrném zatížení všech můstků, (změna zátěže měniče $P = 0 \text{ kW} \rightarrow P = 9,5 \text{ kW}$, každý modul zatížen zdrojem konstantního proudu $i_z = 7 \text{ A}$)

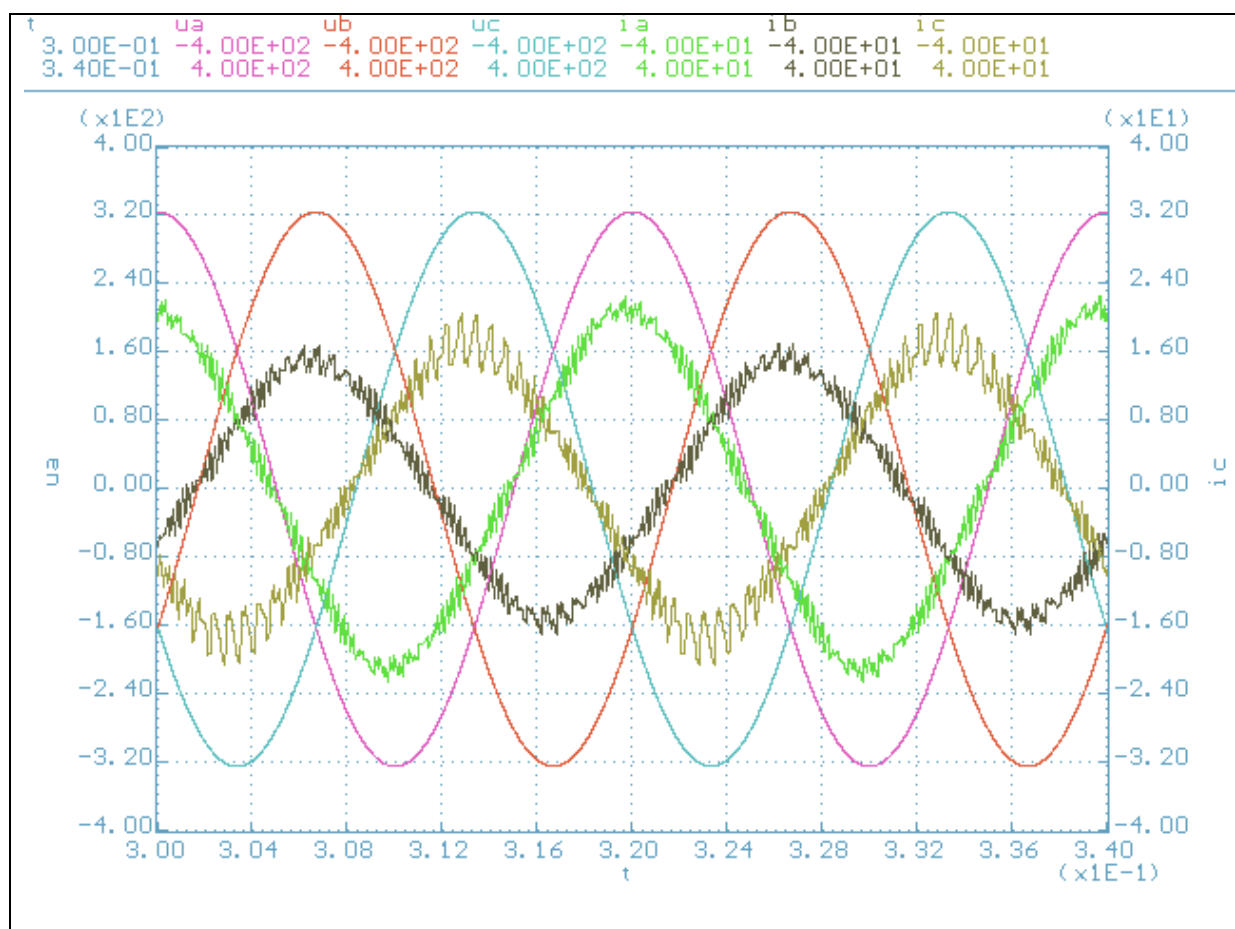
Aby bylo možné otestovat navržené řízení zejména pak funkčnost balancování napětí na jednotlivých modulech měniče, bylo nutné zatížit jednotlivé H-můstky nerovnoměrně. Každý H-můstek byl tedy zatížen konstantním zdrojem proudu o jiné velikosti:

Fáze_a $i_{z_a_M1} = 7 \text{ A}$, $i_{z_a_M2} = 7,3 \text{ A}$, $i_{z_a_M3} = 7,6 \text{ A}$

Fáze_b $i_{z_b_M1} = 5,6 \text{ A}$, $i_{z_b_M2} = 5 \text{ A}$, $i_{z_b_M3} = 5,3 \text{ A}$

Fáze_c $i_{z_c_M1} = 5 \text{ A}$, $i_{z_c_M2} = 6 \text{ A}$, $i_{z_c_M3} = 7 \text{ A}$

Takto testovaná nesymetrie v zatížení se projeví odběrem rozdílných fázových proudů ze sítě a rozdílem v jejich zvlnění jak je vidět na Obr.3.7. Stejný efekt byl pozorován i u měniče typu FLC, při nesymetrickém zatížení kondenzátorů roste zvlnění střídavého proudu.



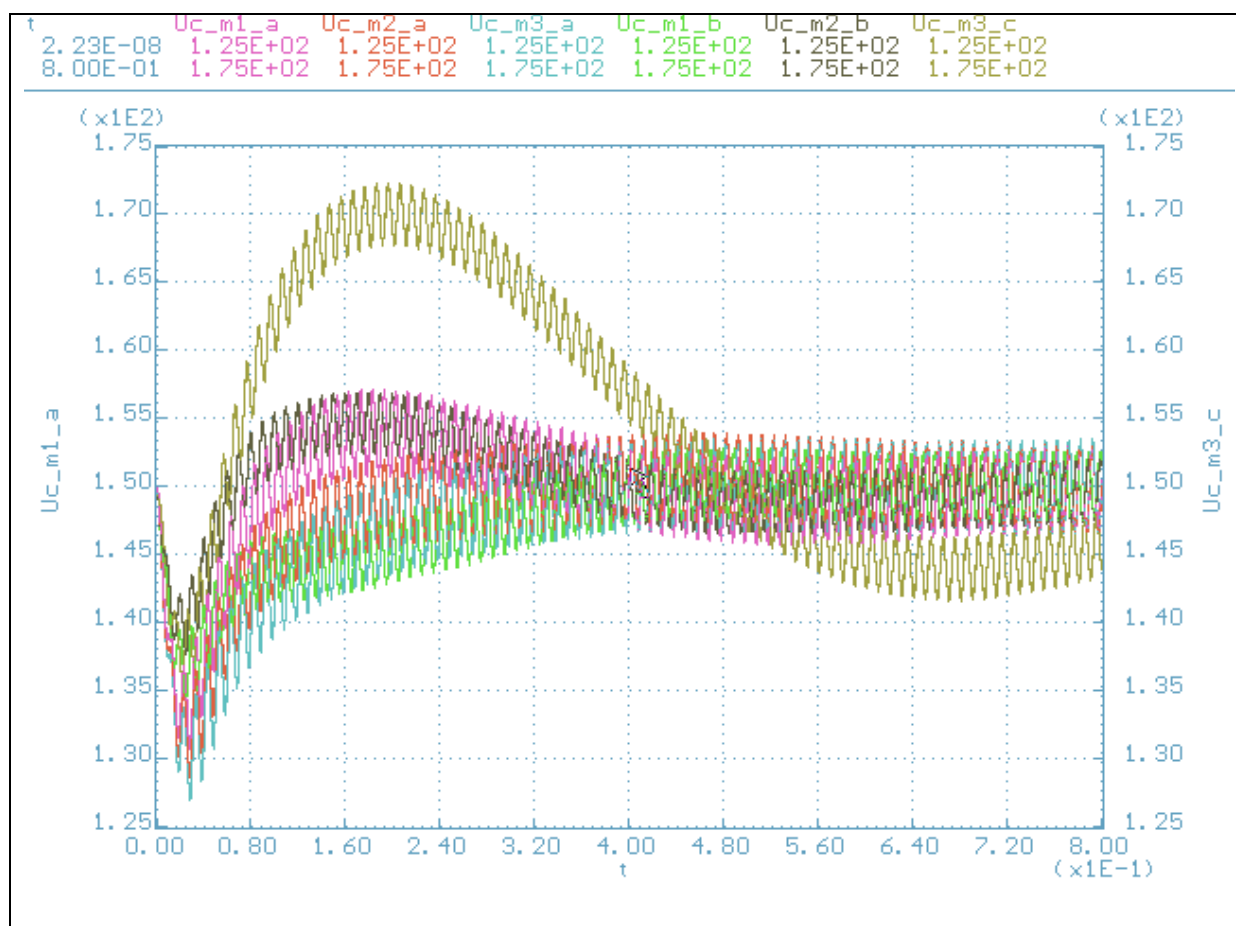
Obr.3.7 Fázová napětí a proudy modulárního NPU v ustáleném stavu a při nerovnoměrném zatížení jednotlivých H-můstků, každý modul zatížen zdrojem konstantního proudu

$$i_{z_a_M1} = 7 \text{ A}, i_{z_a_M2} = 7,3 \text{ A}, i_{z_a_M3} = 7,6 \text{ A}$$

$$i_{z_b_M1} = 5,6 \text{ A}, i_{z_b_M2} = 5 \text{ A}, i_{z_b_M3} = 5,3 \text{ A}$$

$$i_{z_c_M1} = 5 \text{ A}, i_{z_c_M2} = 6 \text{ A}, i_{z_c_M3} = 7 \text{ A}$$

Na Obr.3.8 je pak vidět průběh výstupního napětí na vybraných H-můstcích při nerovnoměrném skokovém zatížení, které je obdobné jako v předchozím případě. Delší doba ustálení cca 1s je dána velikostí nesymetrie zatížení (až 33 % u faze_c). Tento fakt, že navržené řízení je schopné balancovat napětí na jednotlivých modulech měniče, i při tak nesymetrickém zatížení svědčí o ucházejících vlastnostech navrženého řízení modulárního NPU.



Obr.3.8 Skoková změna zatížení měniče – průběh řízeného napětí na vybraných H-můstcích při nerovnoměrném zatížení všech můstků, (každý modul skokově zatížen z nuly pomocí zdroje konstantního proudu)

$$i_{z_a_M1} = 7\text{ A}, i_{z_a_M2} = 7,3\text{ A}, i_{z_a_M3} = 7,6\text{ A}$$

$$i_{z_b_M1} = 5,6\text{ A}, i_{z_b_M2} = 5\text{ A}, i_{z_b_M3} = 5,3\text{ A}$$

$$i_{z_c_M1} = 5\text{ A}, i_{z_c_M2} = 6\text{ A}, i_{z_c_M3} = 7\text{ A}$$

4 Závěr

Výzkumná zpráva se zabývala analýzou modulárního měniče složeného z H-můstků a návrhem parametrů výkonového obvodu laboratorního modelu modulárního měniče složeného z H-můstků, dále pak návrhem modulace a řízení modulárního měniče. Hlavní část zprávy se zabývala simulačním testem navržené regulace zejména pak testováním balancování napětí na jednotlivých modulech měniče provozovaného ve funkci NPU.

- Zkoumané regulace NPU zajišťuje odběr sinusových proudů ze sítě i při nesymetrickém zatížení měniče. Dále pak zajišťuje dostatečně rychlou regulaci výstupního stejnosměrného napětí při skokovém zatížení měniče.
- Navržené řízení prokázalo, že je schopné balancovat napětí na jednotlivých kondenzátorech všech modulů měniče i při nesymetrickém zatížení (testováno 33 % nesymetrické zatížení ve fázi_c).
- Navržené řízení balancuje napětí na jednotlivých modulech přímo na úrovni regulační struktury a jedná se tedy o jednoduchou regulaci na bázi PI a PR regulátorů.

V případě nutnosti je možné řízení proudu upravit na vektorové řízení proudu a při požadavku na co nejnížší THDi použít kompenzátor na harmonické rušení, čímž se budou zabývat navazující výzkumné zprávy.

Literatura

- [1] Blahník, V.; Glasberger, T.: Základní varianty zapojení vysokonapěťového měniče s H-můstky. Oponovaná výzkumná zpráva č. 22190-43-2012, Plzeň 2012.
- [2] Uzel, D.; Peroutka, Z.: Pohon se synchronním motorem s elektrickým buzením: Experimentální studie s tříhadinovými měniči NPC. Oponovaná výzkumná zpráva č. 22190-58-2012, Plzeň 2012.
- [3] Janík, D.; Košan, T.: Test vybrané metody přednabíjení plovoucích kondenzátorů na prototypu FLC měniče. Oponovaná výzkumná zpráva č. 22190-16-2013, Plzeň 2013.
- [4] BLAHNÍK, V. Algoritmy řízení a regulace sestavy trakčního měniče se středofrekvenčním transformátorem. Disertační práce, KEV-FEL-ZČU Plzeň 2011, 111 s.

Seznam obrázků

Obr.1.1 Schéma vysokonapěťového modulárního měniče složeného z H-můstků určeného pro napájení synchronního motoru	6
Obr.2.2 Schéma navrženého laboratorního prototypu modulárního měniče ve funkci NPU	8
Obr.3.3 Navržená regulace 3-fázového napěťového pulzního usměrňovače.....	10
Obr.3.4 Ukázka modulačních signálů, pilových signálů a výsledného napětí na střídavých svorkách měniče pro fázi_a.....	11
Obr.3.5 Fázová napětí a proudy modulárního NPU v ustáleném stavu a při rovnoměrném zatížení všech můstků,	13
(celková zátěž měniče $P = 9,5 \text{ kW}$, každý modul zatížen zdrojem konstantního proudu $i_z = 7 \text{ A}$)	13
Obr.3.6 Skoková změna zatížení měniče – průběh řízeného napětí na vybraných H-můstcích při rovnoměrném zatížení všech můstků,.....	14
(změna zátěže měniče $P = 0 \text{ kW} \rightarrow P = 9,5 \text{ kW}$, každý modul zatížen zdrojem konstantního proudu $i_z = 7 \text{ A}$).....	14
Obr.3.7 Fázová napětí a proudy modulárního NPU v ustáleném stavu a při nerovnoměrném zatížení jednotlivých H-můstků,	15
každý modul zatížen zdrojem konstantního proudu.....	15
$i_{z_a_M1} = 7 \text{ A}$, $i_{z_a_M2} = 7,3 \text{ A}$, $i_{z_a_M3} = 7,6 \text{ A}$	15
$i_{z_b_M1} = 5,6 \text{ A}$, $i_{z_b_M2} = 5 \text{ A}$, $i_{z_b_M3} = 5,3 \text{ A}$	15
$i_{z_c_M1} = 5 \text{ A}$, $i_{z_c_M2} = 6 \text{ A}$, $i_{z_c_M3} = 7 \text{ A}$	15
Obr.3.8 Skoková změna zatížení měniče – průběh řízeného napětí na vybraných H-můstcích při nerovnoměrném zatížení všech můstků,.....	16
(každý modul skokově zatížen z nuly pomocí zdroje konstantního proudu)	16
$i_{z_a_M1} = 7 \text{ A}$, $i_{z_a_M2} = 7,3 \text{ A}$, $i_{z_a_M3} = 7,6 \text{ A}$	16
$i_{z_b_M1} = 5,6 \text{ A}$, $i_{z_b_M2} = 5 \text{ A}$, $i_{z_b_M3} = 5,3 \text{ A}$	16
$i_{z_c_M1} = 5 \text{ A}$, $i_{z_c_M2} = 6 \text{ A}$, $i_{z_c_M3} = 7 \text{ A}$	16

Historie revizí

Rev.	Kapitola	Popis změny	Datum Jméno / Odd.