

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Simulace proudového modulárního měniče

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

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Kristýna RYBOVÁ**
Osobní číslo: **E14N0042P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Průmyslová elektronika a elektromechanika**
Název tématu: **Simulace proudového modulárního měniče**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Zásady pro vypracování:

Předmětem diplomové práce je simulace jednoduchého proudového měniče sestávajícího z modulárních jednotek tvořených induktorem a výkonovými spínači, které jsou základem pro stavbu víceúrovňových měničů. Cílem práce je tvorba numerického modelu a simulačních výstupů za účelem identifikace vlastností modulárního proudového měniče.

1. Nastudujte doporučenou literaturu.
2. Sestavte matematický model modulární jednotky tvořené induktorem a výkonovými spínači.
3. Proveďte simulační ověření modulární jednotky.
4. Sestavte matematický model jednoduchého proudového měniče spojením modulárních jednotek.
5. Proveďte simulace na mat. modelu jednoduchého proudového modulárního měniče.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Jiaqi Liang; Nami, A.; Dijkhuizen, F.; Tenca, P.; Sastry, J., "Current source modular multilevel converter for HVDC and FACTS," Power Electronics and Applications (EPE), 2013 15th European Conference on, vol., no., pp.1,10, 2-6 Sept. 2013 URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6634735&isnumber=>

Vedoucí diplomové práce: Ing. Martin Janda, Ph.D.

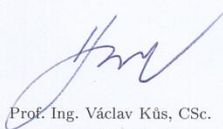
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

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 práce se zabývá problematikou proudového modulárního měniče a jeho využitelnosti v HVDC systémech. Teoretická část se věnuje obecnému popisu proudového modulárního měniče, kde je využito topologické analogie s modulárním měničem napěťového typu, a možností jeho řízení jako tradičního víceúrovňového měniče.

Praktická část je věnována tvorbě simulačních modelů proudového modulárního měniče a jeho částí pro ověření teoretických předpokladů a použitelnosti aplikovaných typů řízení. Tato část navíc obsahuje kapitolu ověřující teoretické předpoklady experimentálními měřeními na sestaveném laboratorním prototypu.

Klíčová slova

proudový modulární měnič, víceúrovňový měnič, proudová buňka, simulace, Simulink, PLECS, HVDC, level-shifted PWM, phase-shifted PWM

Abstract

This thesis deals with problematic of current-source modular multilevel converter and its possibility to be used in HVDC systems. In the theoretical part, the basic proposal of current-source MMC based on topological analogy with voltage source MMC is described and the usability of traditional voltage source MMC modulation techniques is discussed.

The practical part deals with the simulation models of current-source modular multilevel converter and its parts in order to confirm the theoretical supposal and the applied modulation methods suitability. Moreover, there is a chapter confirming the theoretical supposal by measurement after constructing one half-bridge-cell phase of the converter in this part of thesis.

Key words

current-source modular multilevel converter, multilevel converter, inductor cell simulation, Simulink, PLECS, HVDC, level-shifted PWM, phase-shifted PWM

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala 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

Kristýna Rybová

Poděkování

Touto cestou bych chtěla poděkovat vedoucímu Ing. Martinu Jandovi, PhD. za oficiální zaštitění této práce, konzultantovi Ing. Tomáši Komrskovi, PhD. za metodické vedení práce, cenné rady a připomínky a Ing. Martinu Járovi za neméně cennou pomoc při sestavování prototypu pro experimentální měření.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	11
1 PROUDOVÝ MODULÁRNÍ MĚNIČ	12
1.1 PROUDOVÁ BUŇKA	13
1.2 PARALELNÍ SPOJENÍ BUNĚK	14
1.3 TOPOLOGIE MĚNIČE	15
2 ZPŮSOBY PULZNÍ ŠÍŘKOVÉ MODULACE VÍCEÚROVŇOVÝCH MĚNIČŮ	16
2.1 LEVEL-SHIFTED PWM	16
2.1.1 <i>Level-shifted PWM with phase disposition (LSPD)</i>	16
2.1.2 <i>Level-shifted PWM with opposition disposition (LSOD)</i>	17
2.1.3 <i>Level-shifted PWM with alternate opposition disposition (LSAOD)</i>	17
2.2 PHASE-SHIFTED PWM (PSPWM)	18
3 SIMULAČNÍ MODEL Y	19
3.1 PROUDOVÁ BUŇKA	19
3.2 PŮLMŮSTEK	20
3.2.1 <i>PŮlmůstek s jednoduchou buňkou</i>	20
3.2.2 <i>PŮlmůstek s paralelním spojením buněk</i>	21
3.2.3 <i>Protinapětí</i>	23
3.3 DVOUÚROVŇOVÝ TŘÍFÁZOVÝ PROUDOVÝ MODULÁRNÍ MĚNIČ	25
3.3.1 <i>Dvouúrovňový třífázový měnič s jednoduchou buňkou</i>	25
3.3.2 <i>Dvouúrovňový třífázový měnič s paralelním spojením buněk</i>	26
3.3.3 <i>Protinapětí</i>	28
3.4 ČTYŘÚROVŇOVÝ MĚNIČ	28
3.4.1 <i>Čtyřúrovňový půlmůstek s paralelním spojením buněk</i>	28
3.4.2 <i>Třífázový čtyřúrovňový měnič</i>	31
3.4.3 <i>Třífázový čtyřúrovňový proudový modulární měnič jako usměrňovač</i>	34
3.5 REGULACE PROUDU	38
4 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ	41
5 ZÁVĚR	44
6 SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	45

Seznam symbolů a zkratek

$C_A - C_D, C_{A1} - C_{D3}$	kapacita na stejnosměrné části buňky
$D_1, D_2, D_{A1} - D_{D34}$	dioda
f_{pily}	frekvence pily
HVAC	High Voltage, Accurating Current
HVDC	High Voltage, Direct Current
i_C	proud kapacitorem
I_d, I_q	skutečné hodnoty složek vektoru proudu v rotujícím souřadném systému
I_d^*, I_q^*	požadovaná hodnota dané složky proudu v rotujícím souřadném systému
i_{dc}	usměrněný proud
$i_{dcstř}$	usměrněný proud vstupující do střídače
i_{dcusm}	proud na výstupu z usměrňovače
i_L	proud protékající induktorem proudové buňky
i_{LAstr}	proud protékající induktorem buňky v úrovni A střídače
i_{LAusm}	proud protékající induktorem buňky v úrovni A usměrňovače
$i_Z, i_{Z1} - i_{Z3}$	proud protékající zátěží
i_{out}	proud vystupující z proudové buňky
i_B	proud na vstupu paralelního spojení buněk úrovně B
$L_A - L_D, L_{A1} - L_{D32}$	indukčnost proudové buňky
LSAOD	Level-shifted PWM with Alternate Opposition Disposition
LSOD	Level-shifted PWM with Opposition Disposition
LSPD	Level-shifted PWM with Phase Disposition
$L_Z, L_{Z1} - L_{Z3}$	indukčnost zátěže
m	počet proudových buněk v paralelním spojení
n	počet úrovní měniče
PSPWM	Phase-shifted PWM
$R_Z, R_{Z1} - R_{Z3}$	odpor zátěže
$S1 - S4$	spínač
T_{pily}	perioda nosného pilového signálu
U_{dc}, U_{dc1}, U_{dc2}	napětí stejnosměrného zdroje
u_L	napětí na induktoru proudové buňky

u_{out}	výstupní napětí na proudové buňce
u_B	napětí na paralelním spojení buněk úrovně B
u_S	napětí sítě
U_{vdm}, U_{vqm}	složky vektoru napětí v rotujícím souřadném systému vypočtené v matematickém modelu
U_{vd}^*, U_{vq}^*	požadované hodnoty složek vektoru napětí v rotujícím souřadném systému
u_Z	napětí na zátěži
$V_1, V_2, V_{A1} - V_{D34}$	tranzistory
$\varepsilon_d, \varepsilon_q$	regulační odchylky daných složek vektoru
θ_n	fázový posuv nosných při PWM s fázově posunutou nosnou

Úvod

Cílem diplomové práce byla analýza a ověření činnosti nové topologie proudového modulárního měniče, analogické topologie k víceúrovňovým napěťovým modulárním měničům, určené především pro použití v HVDC systémech. Teoretické předpoklady byly ověřeny simulačně na sestavených matematických modelech a dále experimentálním měřením na sestaveném laboratorním prototypu.

První kapitola pojednává o základních principech a topologii proudového modulárního měniče vycházejících především z analogie s modulárním měničem napěťového typu, který již našel využití v různých odvětvích elektrotechniky.

Ve druhé kapitole jsou představeny jednotlivé typy řízení víceúrovňových měničů. Principy vybraných typů řízení, které jsou realizovány v rámci simulačních modelů, jsou popsány detailněji.

Třetí kapitola se věnuje samotným simulačním modelům vytvořeným v prostředí Matlab/Simulink/PLECS. V jednotlivých podkapitolách je postupováno od jednoduché proudové buňky až po třífázový čtyřúrovňový proudový modulární měnič. Následující podkapitoly se věnují třífázovému čtyřúrovňovému modulárnímu usměrňovači a regulaci proudu na střídavé straně měniče.

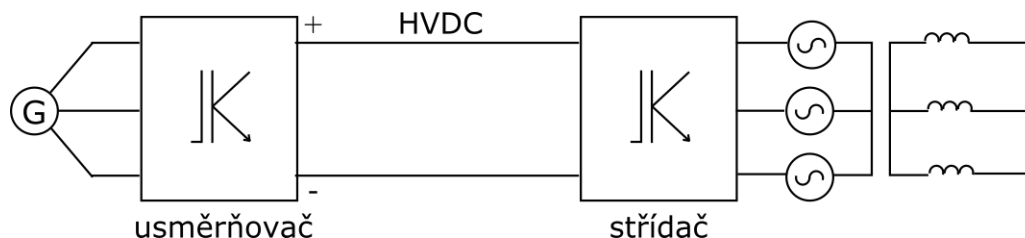
Čtvrtá kapitola popisuje experimentální měření na sestaveném laboratorním prototypu. Jsou prezentovány výsledky měření na odporové zátěži.

1 Proudový modulární měnič

Pojem modulárních a víceúrovňových měničů vchází do povědomí v souvislosti s HVDC systémy. V rámci takovýchto systémů je potřeba zajistit přenos velkého výkonu na velké vzdálenosti. V dnešní době je možné přenášet energii ve formě střídavého napětí a proudu pomocí podvodních kabelů (HVAC), tímto způsobem však nelze přenášet dostatečně velký výkon na dostatečně velké vzdálenosti. Bylo tedy nutné najít alternativu, která daným podmínkám vyhoví. Možnou alternativou je podvodní přenos napětí a proudu usměrněného pomocí modulárního měniče. HVDC přenos je oproti HVAC ekonomičtější, flexibilnější a ekologičtější [1, 2].

Hlavním důvodem zkoumání a použití modulárních měničů v těchto aplikacích je jejich schopnost přeměny střídavé energie bez transformátoru a také nevýhody stávajících způsobů dálkového přenosu například v podobě harmonických složek napětí. Díky tomu se HVDC systémy stávají perspektivními v oblasti přenosu energie na velkou vzdálenost. Příkladem lze uvést např. dodávání elektrické energie zařízením ležícím mimo pevninu. Takovýmto zařízením může být například ropná plošina [3, 4].

Napětové víceúrovňové měniče v HVDC systémech jsou velmi rozšířené, ať už se jedná o tradiční provedení s plovoucími kapacitami či upínacími diodami nebo o napětové modulární měniče, na rozdíl od méně častých měničů proudových. Tato práce se zabývá novou topologií modulárního proudového měniče, navrženého analogicky k modulárním měničům napětového typu. Jeho zásadní výhodou pro použití v energetických sítích je tolerance vůči zkratům. Proudový modulární měnič může být provozován jako usměrňovač i jako střídač a lze jej tedy nasadit na obou terminálech HVDC linky. Zjednodušené schéma takové přenosové soustavy lze vidět na *Obr. 1* [5, 6].



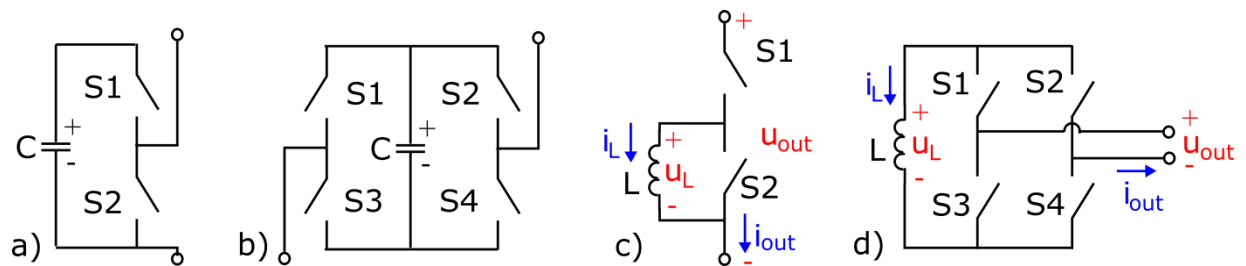
Obr. 1: Schéma HVDC přenosové soustavy [7]

Proudové modulární měniče jsou měniče složené z modulárních jednotek. Těmito jednotkami jsou proudové buňky složené z induktoru a několika spínačů. Paralelním

a sériovým řazením proudových buněk lze získat topologie potřebné proudové a napěťové zatížitelnosti [6].

1.1 Proudová buňka

Analogicky k napěťové buňce modulárních měničů lze navrhnout proudovou buňku, jak bylo představeno v [6], v podobě půlmůstku nebo můstku. Oba typy buněk lze vidět na Obr. 2. Každý spínač, který buňka obsahuje, je schopen v sepnutém stavu nést obě polarity napětí a alespoň jednu polaritu proudu [6, 8].



Obr. 2: Typy buněk – a) napěťová půlmůstková, b) napěťová můstková, c) proudová půlmůstková, d) proudová můstková [6, 8]

Pro správnou funkci proudové buňky je nutné zajistit nepřetržitý tok proudu induktorem. Pro půlmůstkovou buňku tedy platí, že nesmí být současně vypnuty spínače S1 a S2. Když je sepnutý spínač S1 a vypnutý spínač S2, buňka je připojena ke zdroji napětí a proud teče přes spínač S1 a induktor. Napětí na induktoru je tedy zároveň výstupním napětím a proud induktorem je roven výstupnímu proudu. Při sepnutém spínači S2 a vypnutém spínači S1 je buňka odpojena od zdroje napětí a proud se uzavírá přes spínač S2 a induktor. Napětí na induktoru je tudíž nulové a stejně tak je nulový i výstupní proud. Tyto poměry pro přehlednost zobrazuje Tabulka 1 [6].

S1	S2	I_{out}	U_L
1	0	I_L	U_{out}
0	1	0	0

Tabulka 1: Proudové a napěťové poměry půlmůstkové buňky [6]

Pro můstkovou buňku též platí podmínka nepřetržitého toku proudu induktorem, nesmí tedy být současně vypnuty spínače S1 a S2, respektive S3 a S4. Při sepnutí spínačů S1 a S4 a vypnutí spínačů S2 a S3 se proud uzavírá v kladném smyslu a na indukčnosti se objeví výstupní napětí kladné polarity. V případě vypnutí spínačů S1 a S4 a sepnutí spínačů S2 a S3 se proud na výstupu uzavírá v opačném smyslu a na induktoru je napětí odpovídající záporné polaritě výstupního napětí. Při sepnutí spínačů S1 a S3 a současném vypnutí spínačů S2 a S4

se proud induktorem uzavře přes spínače S1 a S3 a výstupní proud i napětí jsou nulové hodnoty. Stejný případ nastane, když dojde k sepnutí S2 a S4 při současném vypnutí spínačů S1 a S3. Tyto poměry pro přehlednost zobrazuje *Tabulka 2* [6].

S1	S2	S3	S4	I_{OUT}	U_L
1	0	0	1	I_L	U_{out}
0	1	1	0	$-I_L$	$-U_{out}$
1	0	1	0	0	0
0	1	0	1	0	0

Tabulka 2: Proudové a napěťové poměry můstkové buňky [6]

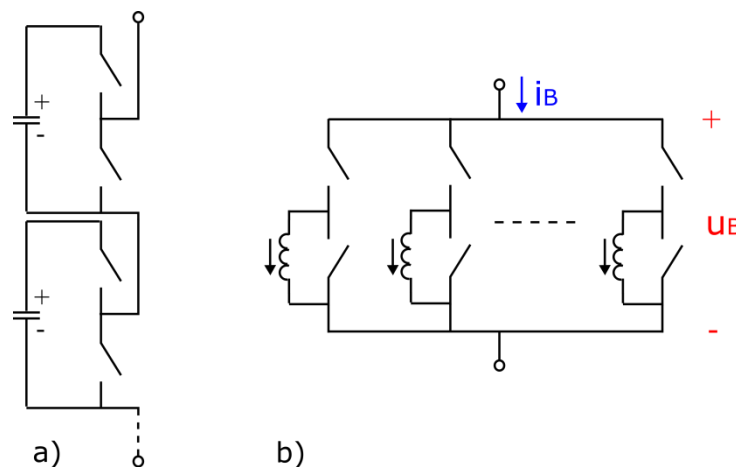
1.2 Paralelní spojení buněk

Pro zvýšení napěťové zatížitelnosti jsou u napěťového modulárního měniče napěťové buňky řazeny sériově, viz *Obr. 3 – a*). Proudové buňky jsou pro zvýšení proudové zatížitelnosti dále vzájemně spojovány paralelně, viz *Obr. 3 – b*). Paralelně lze spojovat buňky stejného nebo různého typu. Při uvažování zjednodušeného bezztrátového stavu sestávají napětí na paralelním spojení a proud do něj vstupující pouze ze stejnosměrné složky a první harmonické střídavé složky:

$$u_B = U_{BDC} + \sqrt{2}U_{BAC} \sin(\omega t) \quad (1.1)$$

$$i_B = I_{BDC} + \sqrt{2}I_{BAC} \sin(\omega t + \varphi) \quad (1.2)$$

kde index B značí příslušnost k úrovni B měniče, ω je úhlová frekvence první harmonické napětí a proudů a φ je fázové zpoždění proudu za napětím [6].



Obr. 3: a) sériové spojení napěťových buněk, b) paralelní spojení proudových buněk [6]

Paralelní spojení m buněk je podle předpokladů možné řídit jedním společným sinusovým modulačním signálem (všechny horní spínače spínají současně, stejně tak všechny spodní) nebo každý zvlášť pomocí vlastního modulačního signálu – pomocí m sinusových modulačních signálů vzájemně posunutých o určitý úhel.

1.3 Topologie měniče

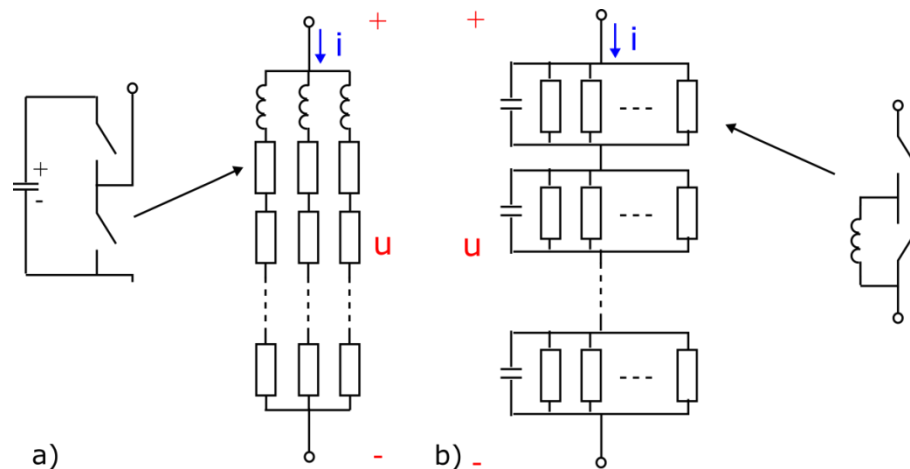
Pro sestavení napěťového modulárního měniče jsou jednotlivá sériová spojení napěťových buněk připojena na společný induktor a následně řazena paralelně, viz *Obr. 4 - a*). U proudového modulárního měniče jsou jednotlivá paralelní spojení následně vzájemně řazena do série, viz *Obr. 4 - b*). Ke každému paralelnímu spojení je navíc paralelně připojen kondenzátor. Ten v případě proudových rozdílů mezi dvěma paralelními spojeními slouží jako proudová cesta a tyto proudové rozdíly absorbuje, slouží též k zajištění rozdělení napětí mezi jednotlivá paralelní spojení a v neposlední řadě může plnit funkci filtru vyšších harmonických proudů [6, 9].

Proudový modulární měnič je realizován spojením jednotlivých ramen. Na *Obr. 5* lze vidět trojfázovou variantu tvořenou půlmůstkovými buňkami. Proudové a napěťové poměry jednoho paralelního spojení, jestliže rameno měniče sestává z n sériově spojených m -bunčkových paralelních spojení, jsou v tomto případě dány vztahy

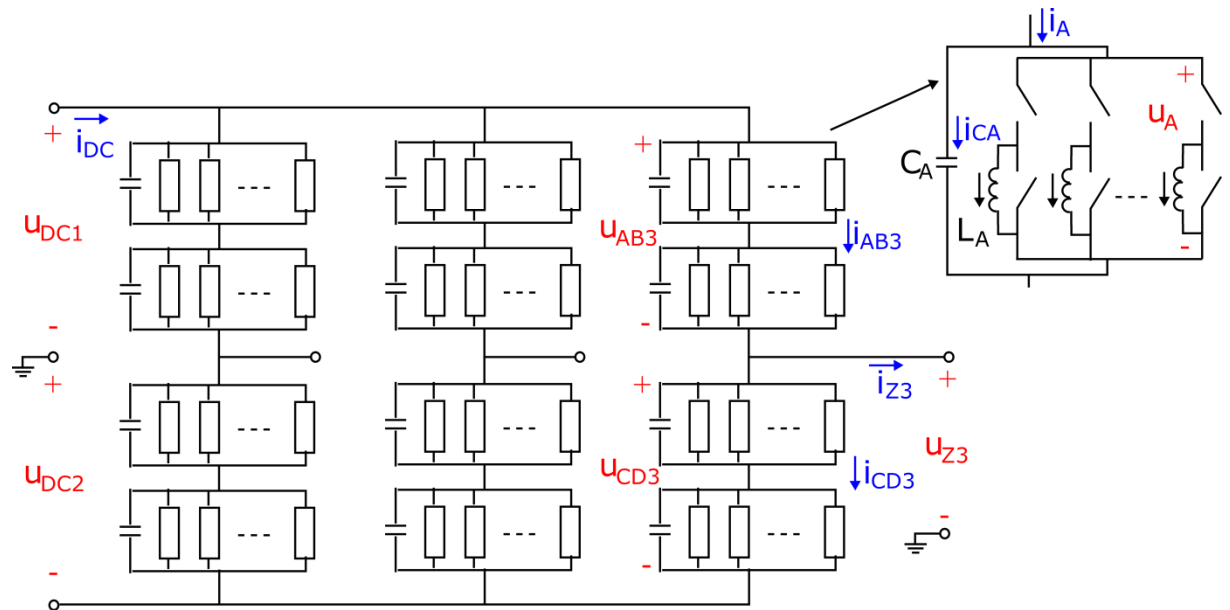
$$u_A = \frac{1}{n} u_{AB3} = \frac{1}{n} (u_{DC1} - u_{Z3}) \quad (1.3)$$

$$i_A = i_{AB3} - i_{CA} = \frac{1}{3} i_{DC} + \frac{1}{2} i_{Z3} - \frac{1}{n} C \frac{du_{AB3}}{dt} \quad (1.4)$$

kde i_{Z3} je proud třetí fází zátěže, u_{A3} je napětí na úrovni A fáze 3 [6].



Obr. 4: a) paralelní spojování sériových kombinací napěťových buněk, b) sériové spojování paralelních kombinací proudových buněk [6]



Obr. 5: Struktura trojfázového proudového modulárního měniče [6]

2 Způsoby pulzní šířkové modulace víceúrovňových měničů

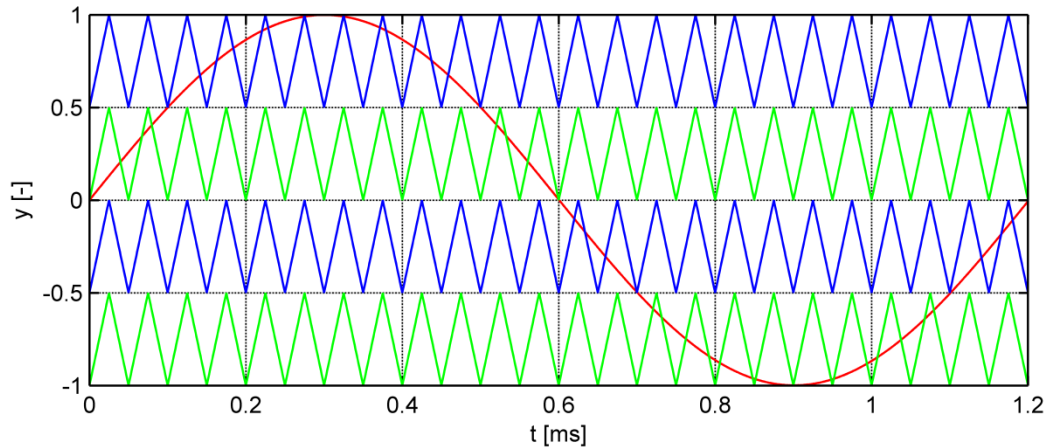
Pro řízení proudových modulárních měničů lze nasadit obdobné techniky pulzně šířkové modulace využívané pro řízení víceúrovňových měničů napětového typu [10].

2.1 Level-shifted PWM

Tento způsob využívá několika nad sebou položených nosných pilových signálů se společným modulačním signálem. Nosné pilové signály mají všechny stejný rozkmit a jejich celkový rozkmit je roven rozkmitu modulačního signálu (při hloubce modulace $m = 1$). Zároveň mají všechny nosné pily stejnou frekvenci. Počet nosných pilových signálů je roven počtu úrovní měniče. Vrchní úrovně měniče spínají s kladnou logikou, spodní úrovně měniče s logikou opačnou. Jednotlivé typy pulzní šířkové modulace s úrovnovým posunem nosných signálů jsou stručně popsány v následujících kapitolách [11, 12].

2.1.1 Level-shifted PWM with phase disposition (LSPD)

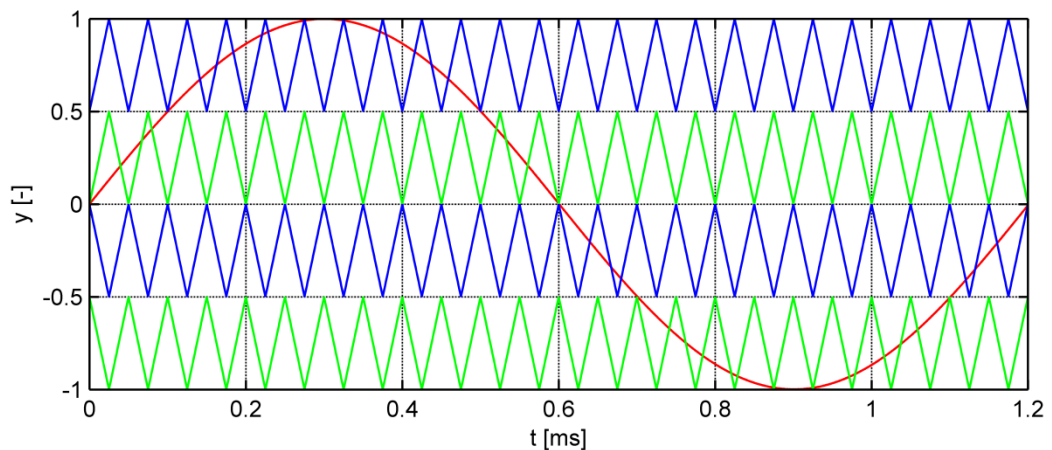
Jak lze vidět na Obr. 6, jednotlivé nosné pilové signály jsou posunuté v úrovni a vzájemně ve fázi. Jejich počet je opět roven počtu úrovní měniče [13].



Obr. 6: Level-shifted PWM with phase disposition (LSPD)

2.1.2 Level-shifted PWM with opposition disposition (LSOD)

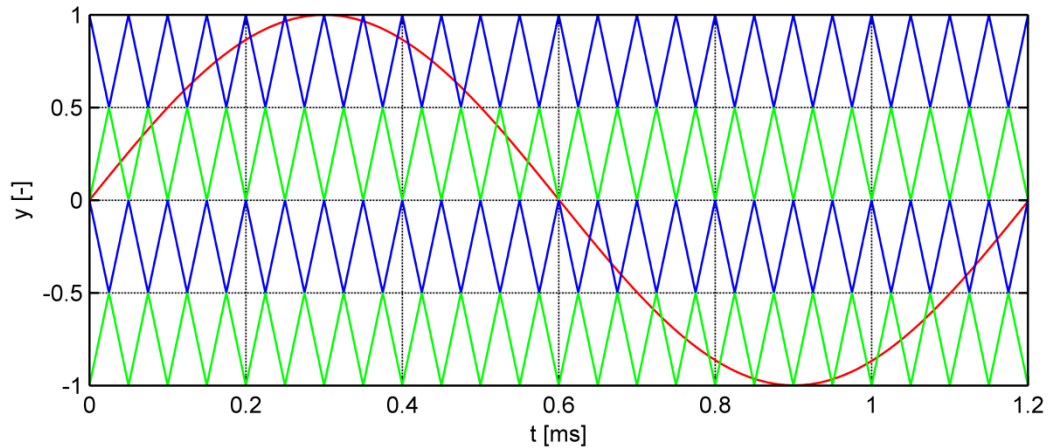
U tohoto typu řízení jsou nosné pilové signály spodních úrovní měniče posunuty o 180° oproti pilovým signálům vrchních úrovní měniče. Princip LSOD lze vidět na Obr. 7 [13].



Obr. 7: Level-shifted PWM with opposition disposition (LSOD)

2.1.3 Level-shifted PWM with alternate opposition disposition (LSAOD)

Jak je znázorněno na Obr. 8, u LSAOD je každý druhý nosný pilový signál posunut oproti prvnímu o 180° [13].



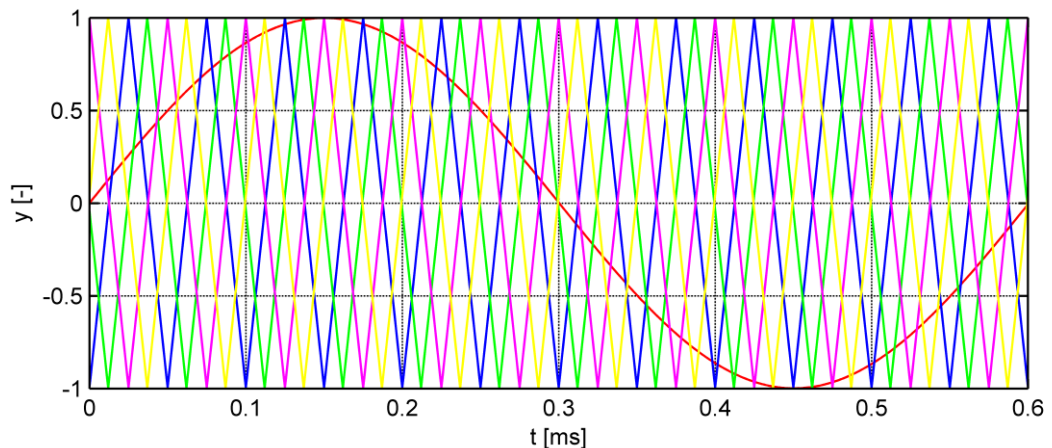
Obr. 8: Level-shifted PWM with alternate opposition disposition (LSAOD)

2.2 Phase-shifted PWM (PSPWM)

Druhým typem modulace pro víceúrovňové měniče je PWM s fázovým posunem nosných signálů. Princip lze vidět na Obr. 9. Všechny nosné pilové signály mají opět stejnou frekvenci, na rozdíl od úrovnňového posunu nosných signálů však u tohoto typu modulace mají všechny nosné pilové signály stejný rozkmit jako modulační signál (při hloubce modulace $m = 1$) a jsou vůči sobě navzájem fázově posunuty. Fázový posuv jednotlivých nosných je dán vzorcem

$$\theta_n = \frac{T_{\text{pily}}}{n} = \frac{360^\circ}{n} \quad (2.1)$$

kde T_{pily} je perioda nosného pilového signálu a n je počet úrovní měniče, tedy počet nosných signálů. V případě čtyřúrovňového proudového modulárního měniče tento posuv tedy odpovídá 90° [12, 14].



Obr. 9: Phase-shifted PWM (PSPWM)

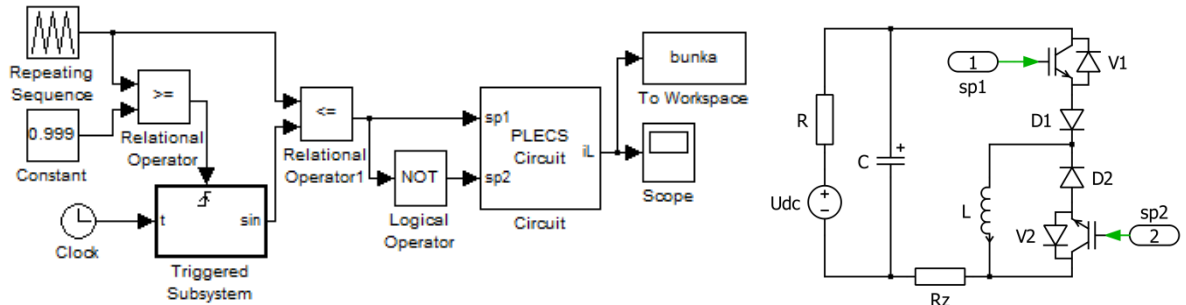
3 Simulační modely

V prostředí Matlab/Simulink/PLECS byly sestaveny simulační modely od proudové buňky přes modely jedné fáze měniče až k samotnému čtyřúrovňovému třífázovému modulárnímu měniči. Prostřednictvím každého modelu byly zkoumány vlastnosti tohoto typu měniče, využitelnost aplikovaných typů řízení a vlivy parametrů obvodu na činnost měniče.

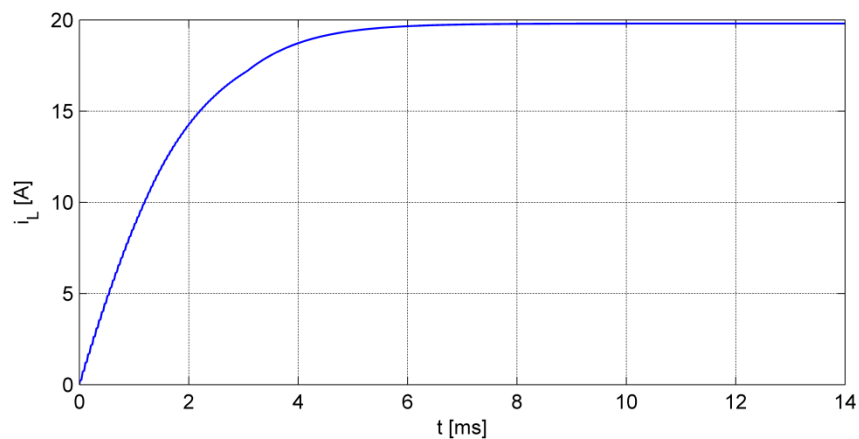
Pro ověření využitelnosti proudového modulárního měniče v HVDC aplikacích byl sestaven model měniče v režimu střídače i usměrňovače s následnou regulací proudu pro získání induktivního či kapacitního charakteru sítě.

3.1 Proudová buňka

Simulační model proudové buňky v podobě půlmůstku byl sestaven podle topologie uvedené v kapitole 1.1. Matematický model buňky a řízení modulací PWM v Simulinku lze vidět na *Obr. 10*. Simulace byla provedena při spínací frekvenci 20 kHz a vzorkovací periodě 1 μ s. Typický průběh proudu induktorem proudové buňky lze vidět na *Obr. 11*. Proud induktorem narůstá, dokud nedojde k jeho ustálení.



Obr. 10: Řídicí obvod a schéma proudové buňky

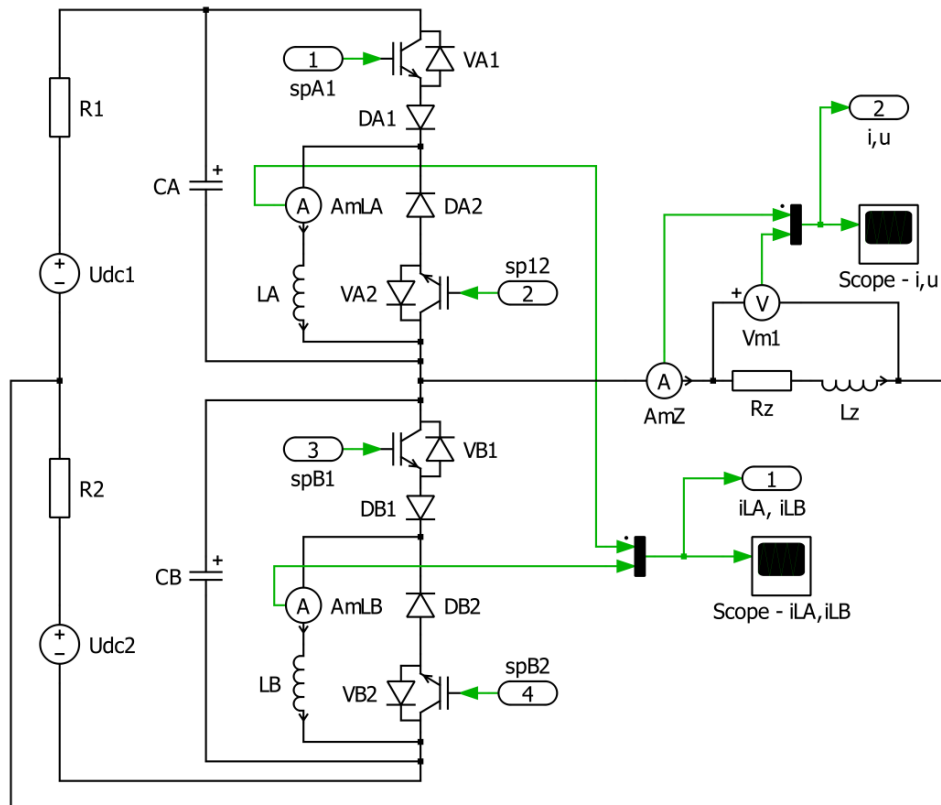


Obr. 11: Průběh proudu induktorem proudové buňky

3.2 Půlmůstek

3.2.1 Půlmůstek s jednoduchou buňkou

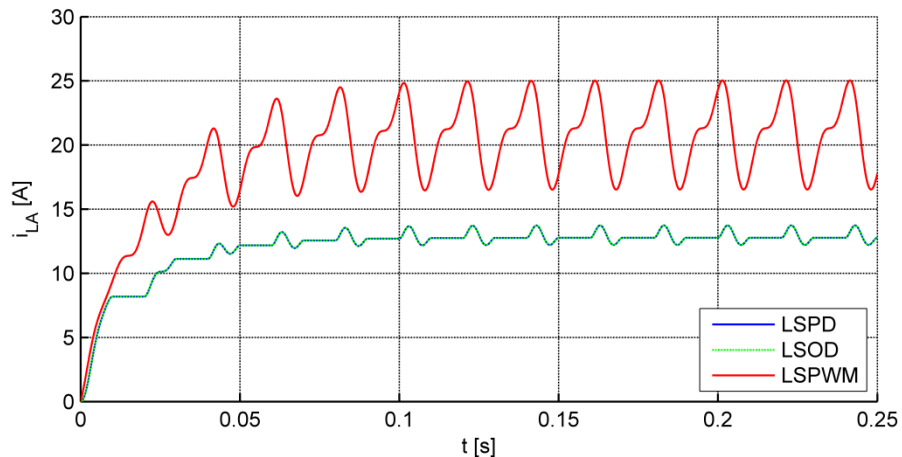
Na Obr. 12 lze vidět schéma půlmůstku složeného z jednoduchých proudových buněk pracujících do RL zátěže. Zátěž byla připojena na jednom konci mezi sériově spojené buňky a na konci druhém na bod nulového potenciálu stejnosměrného zdroje, který byl realizován sériovým spojením dvou zdrojů napětí o hodnotě 20 V.



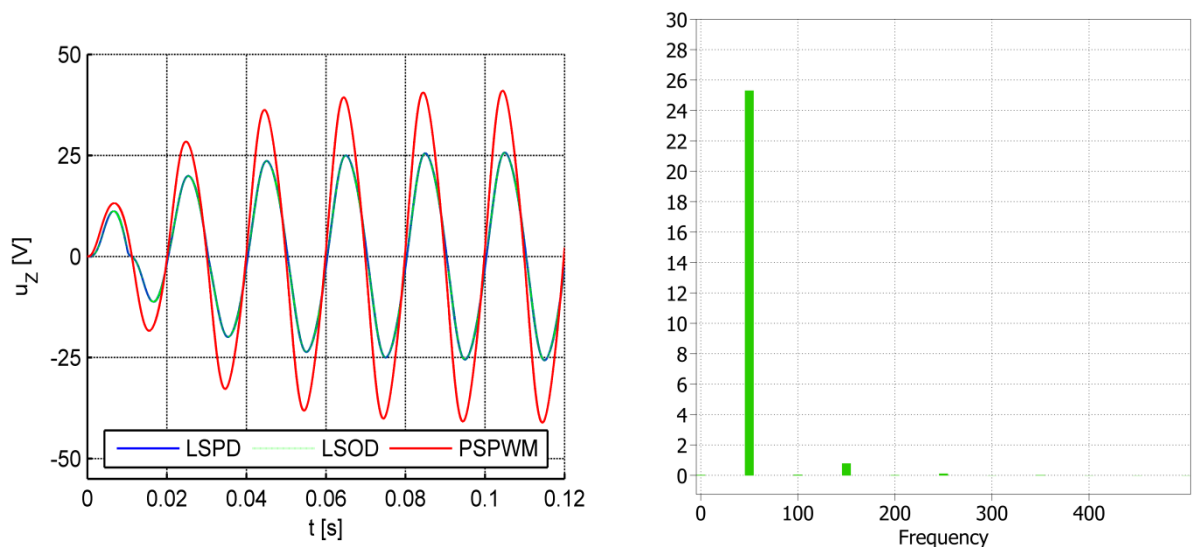
Obr. 12: Schéma půlmůstku s jednoduchou buňkou

Hodnoty kapacity kondenzátoru a indukčnosti buňky byly nastaveny $C = 100 \mu\text{F}$ a $L = 10 \text{ mH}$. Postupnou změnou parametrů zátěže R_Z a L_Z byl sledován vliv jejich hodnoty na průběh proudu induktorem obou buněk a průběhy proudu a napětí na zátěži. Parametry zátěže ovlivňují velikost střední hodnoty proudu indukčností v ustáleném stavu a zároveň velikost nežádoucí kmitavé složky. Vhodného průběhu bylo dosaženo při nastavení hodnot $R_Z = 2 \Omega$ a $L_Z = 100 \mu\text{H}$. V grafu na Obr. 13 jsou vyobrazeny průběhy proudu induktorem pro toto nastavení při jednotlivých typech řízení. Průběh získaný při LSOD se shoduje s průběhem získaným při LSPD, zatímco ustálená střední hodnota i zvlnění proudu induktorem při PSPWM dosahují větších hodnot.

Na *Obr. 14* lze vidět harmonický průběh napětí na zátěži pro jednotlivé typy řízení a Fourierovo spektrum harmonických napětí na zátěži při LSPD. První harmonická dosahuje 25,44 V (100%), třetí harmonická 0,78 V (3%) a celkové harmonické zkreslení činí $THD_U = 0,032$. Z grafů vyplývá, že pro řízení půlmůstku s jednoduchou buňkou lze použít všechny uvedené varianty PWM.



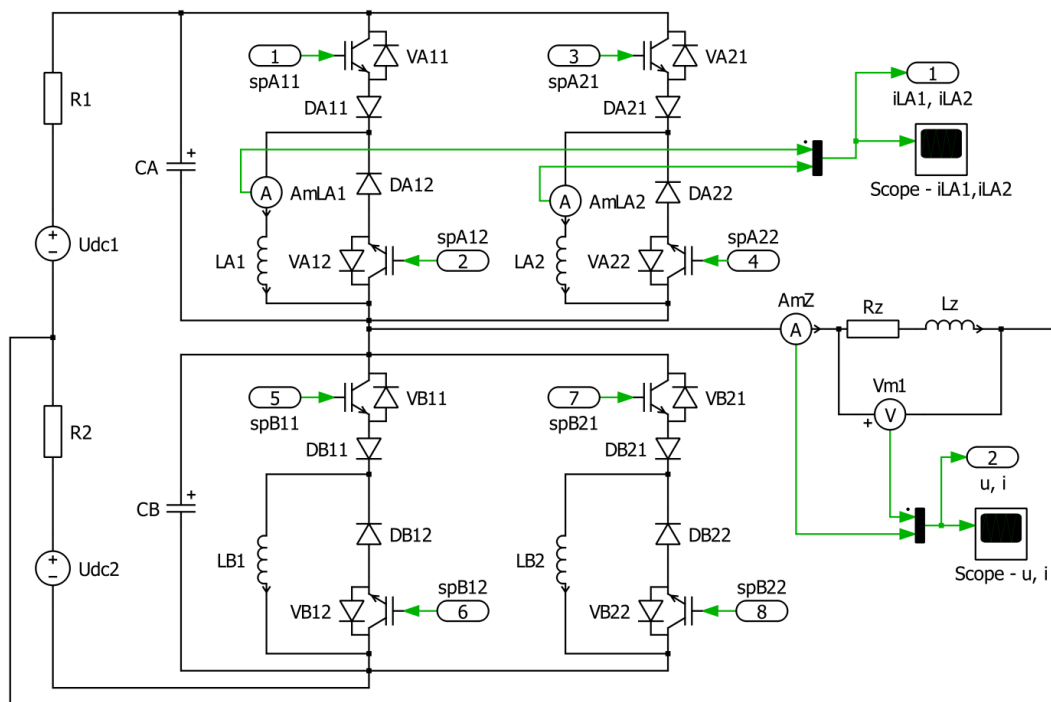
Obr. 13: Průběh proudu induktorem buňky při jednotlivých typech řízení



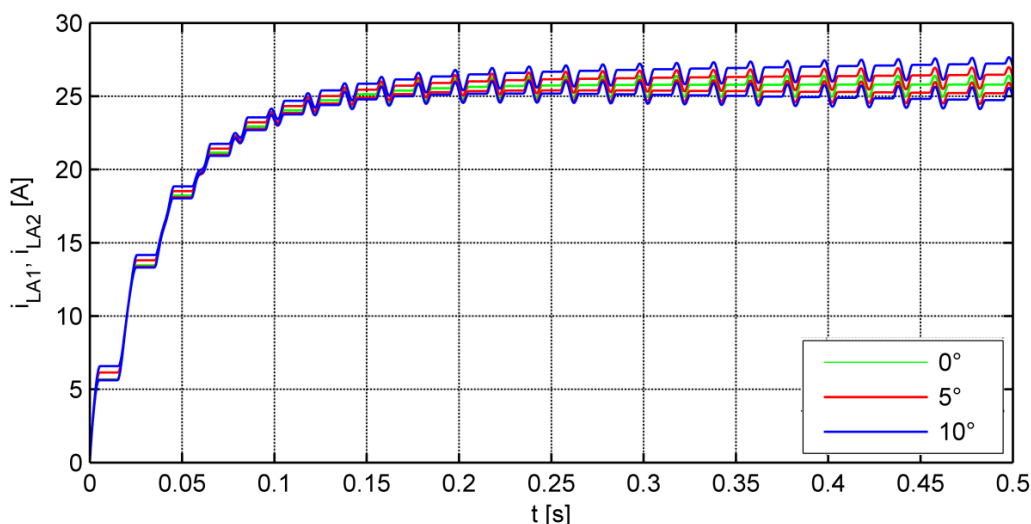
Obr. 14: a) Průběh napětí na zátěži při jednotlivých typech řízení, b) Fourierovo spektrum harmonických napětí na zátěži půlmůstku při LSPD

3.2.2 Půlmůstek s paralelním spojením buněk

Po ověření vlastností půlmůstku s jednoduchou proudovou buňkou byl vytvořen model s paralelním spojením dvou proudových buněk se společným paralelním kondenzátorem, viz *Obr. 15*. Simulace byla provedena pro modulační signály s posunutím 0° , 5° a 10° . Průběhy proudu oběma buňkami paralelního spojení byly vykresleny do grafu na *Obr. 16*. Z těchto průběhů je patrné, že nenulový fázový posun modulačních signálů negativně ovlivňuje rozbalancování střední hodnoty proudu na indukčnostech.



Obr. 15: Schéma pŕlmŕstku s paralelním spojením buněk

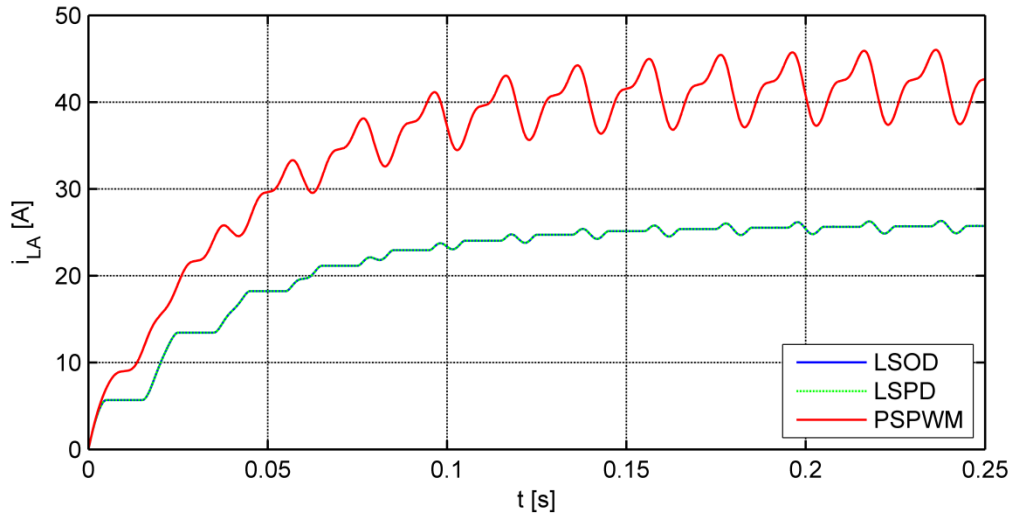


Obr. 16: Prŕbĕhy proudŕ induktory prvnlch bunĕk pŕlmŕstku pŕi posuvu řlzenl druhŕch bunĕk o 0°, 5° a 10°

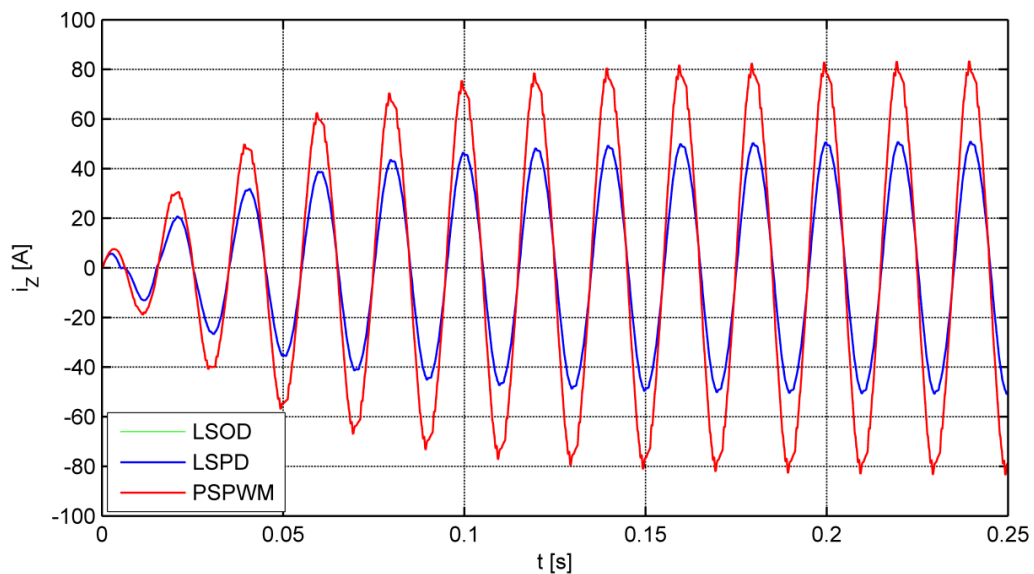
Z grafu vyplŕvŕ, Œe pro řlzenl paralelnlho spojenl bunĕk je ideŕlnl pouŒlt řlzenl bunĕk s posuvem 0°, tedy řldlt vŕechny vrchnl splnaĕe paralelnlho spojenl souĕasnĕ a stejnĕ tak vŕechny spodnl splnaĕe paralelnlho spojenl bunĕk řldlt společnŕm negovanŕm signŕlem.

Prŕbĕhy proudu induktorem vrchnl buňky pŕlmŕstku s paralelnlho spojenl bunĕk pro jednotlivĕ typy řlzenl byly vykresleny do společnĕho grafu na Obr. 17. Simulace probĕhla pŕi nastavenl parametrŕ C = 100 μ F, L = 10 mH, Rz = 0,5 Ω a LZ = 100 μ H. Prŕbĕh proudu induktorem LA pŕi LSOD se shoduje s prŕbĕhem pŕi LSPD, zatlmco prŕbĕh zlskanŕ pŕi

PSPWM odráží odlišnost principů těchto dvou typů víceúrovňových modulací. Tento fakt ukazuje i graf na *Obr. 18* zobrazující průběh proudu zátěží pólů s paralelním spojením buněk pro jednotlivé typy řízení. V případě PSPWM je patrné harmonické zkreslení proudu.



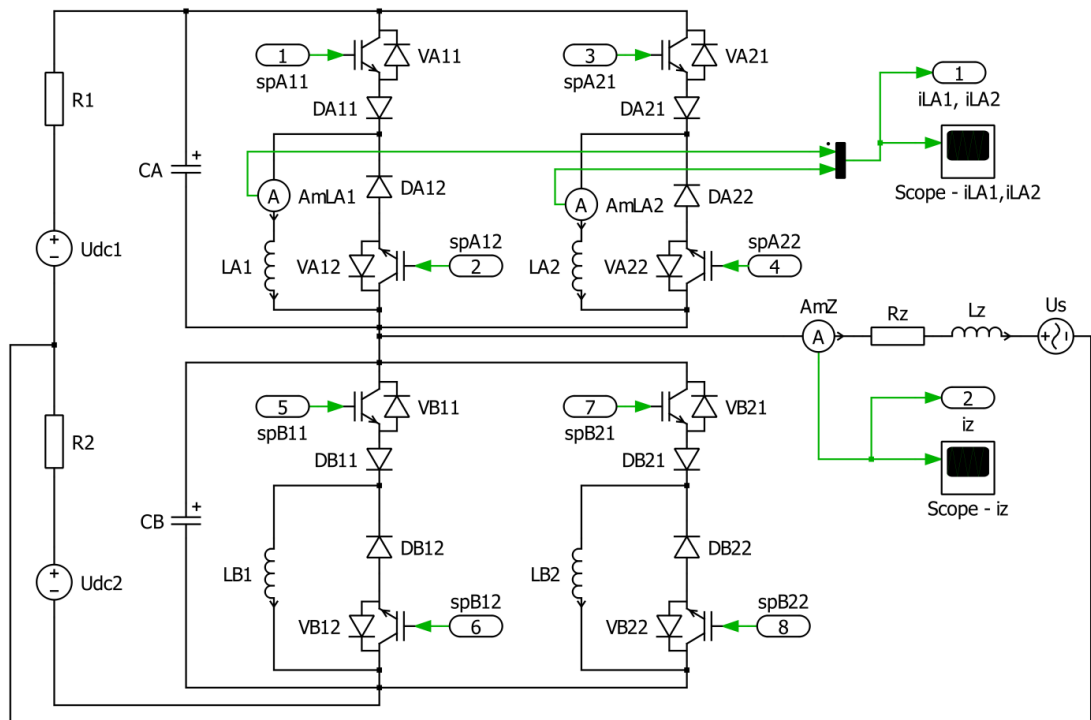
Obr. 17: Průběhy proudu induktorem vrchní buňky pólů s paralelním spojením buněk pro jednotlivé typy řízení



Obr. 18: Proud zátěží pólů s paralelním spojením buněk pro jednotlivé typy řízení

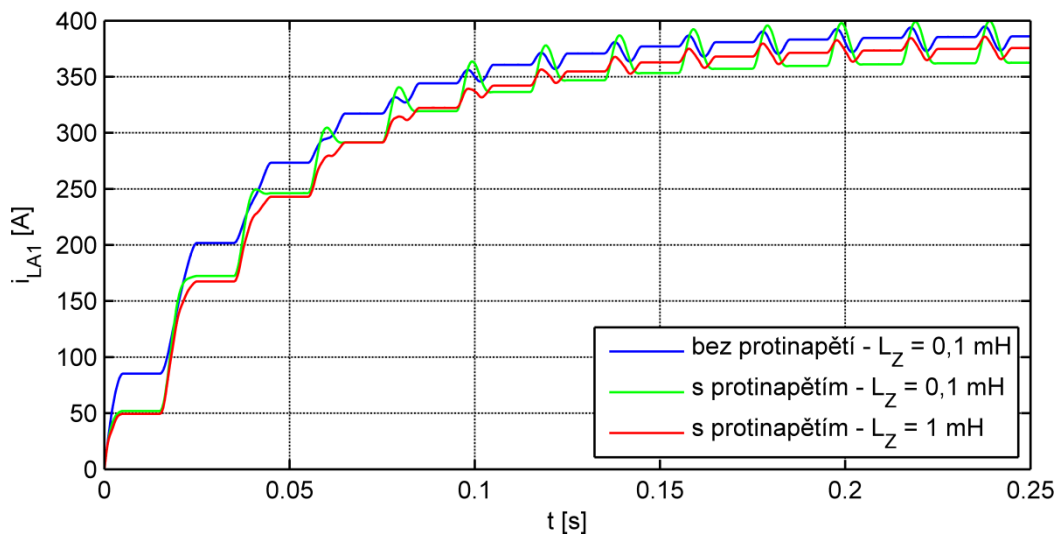
3.2.3 Protinapětí

Následně bylo k zátěži pólů s paralelním spojením buněk připojeno střídavé protinapětí s amplitudou 230 V, frekvencí 50 Hz podle *Obr. 19*. Toto protinapětí lze chápat jako fázi sítě, ke které je měnič připojen.



Obr. 19: Schéma pŕlmŕstku s paralelním spojením buněk s protinapětím

Simulace proběhla při nastavení parametrů $U_{dc1} = U_{dc2} = 300 \text{ V}$, $C = 100 \mu\text{F}$, $L = 10 \text{ mH}$, $R_Z = 0,5 \Omega$ a $L_Z = 0,1 \text{ mH}$. Do grafu na Obr. 20 byly vykresleny průběhy proudu induktorem L_{A1} pŕlmŕstku s paralelním spojením buněk bez protinapětí a s protinapětím při LSOD. Vzhledem ke zvlnění proudu i_{LA1} pŕlmŕstku s protinapětím se hodnota indukčnosti $L_Z = 0,1 \text{ mH}$ se ukázala být nedostatečná, simulace byla proto provedena ještě při nastavení $L_Z = 1 \text{ mH}$ pro získání požadovaného průběhu proudu induktorem.

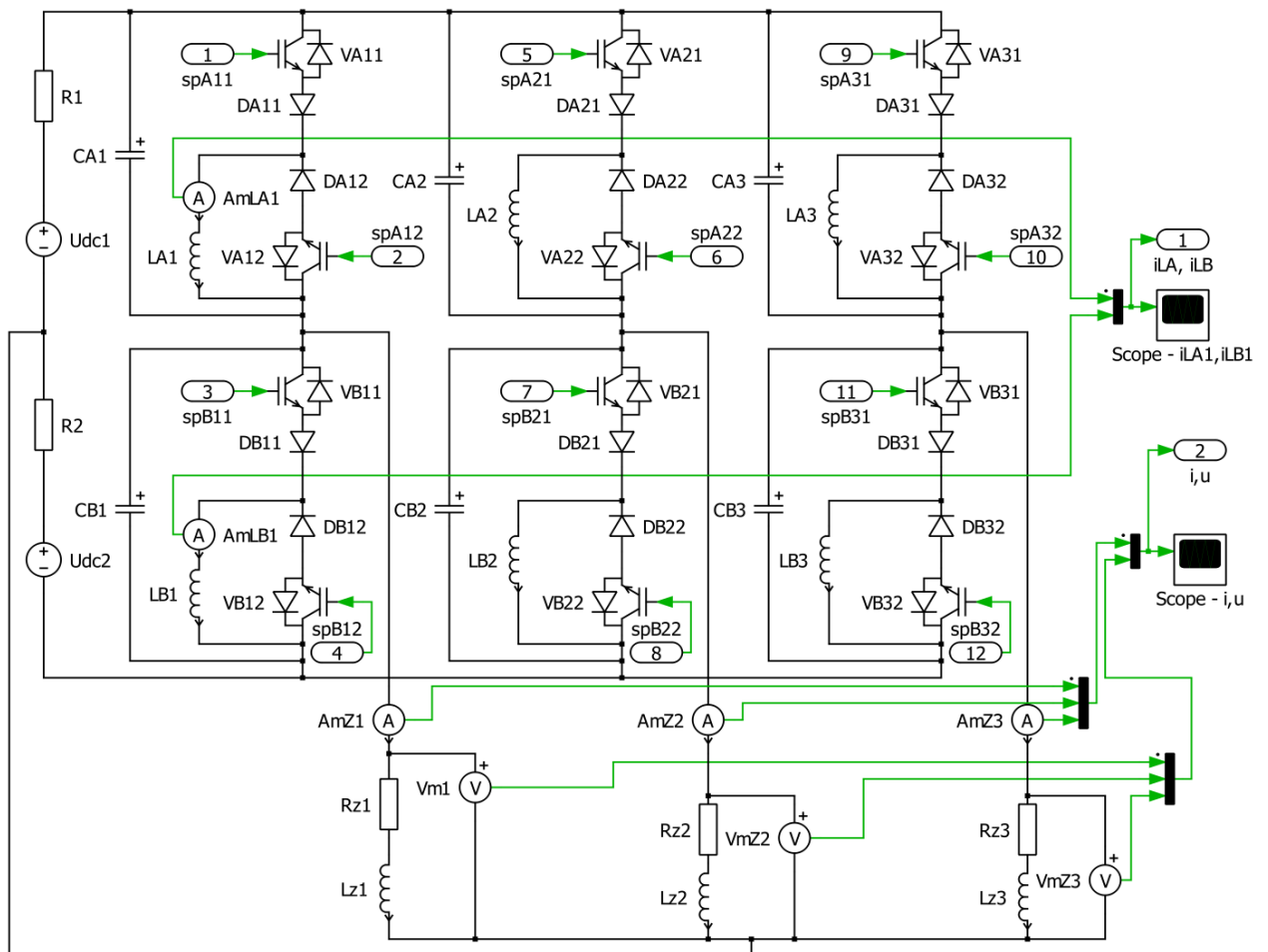


Obr. 20: Průběh proudu induktorem vrchní buňky pŕlmŕstku bez protinapětí a s protinapětím pro LSOD

3.3 Dvouúrovňový třífázový proudový modulární měnič

3.3.1 Dvouúrovňový třífázový měnič s jednoduchou buňkou

Po simulačním ověření modelu jedné fáze měniče byl simulován model třífázového měniče s jednoduchou buňkou. Výkonový obvod lze vidět na *Obr. 21*. Úrovně měniče jsou značeny písmeny A, B a fáze měniče čísly 1, 2, 3. Uzel třífázové RL zátěže je spojen s bodem nulového potenciálu stejnosměrného zdroje.

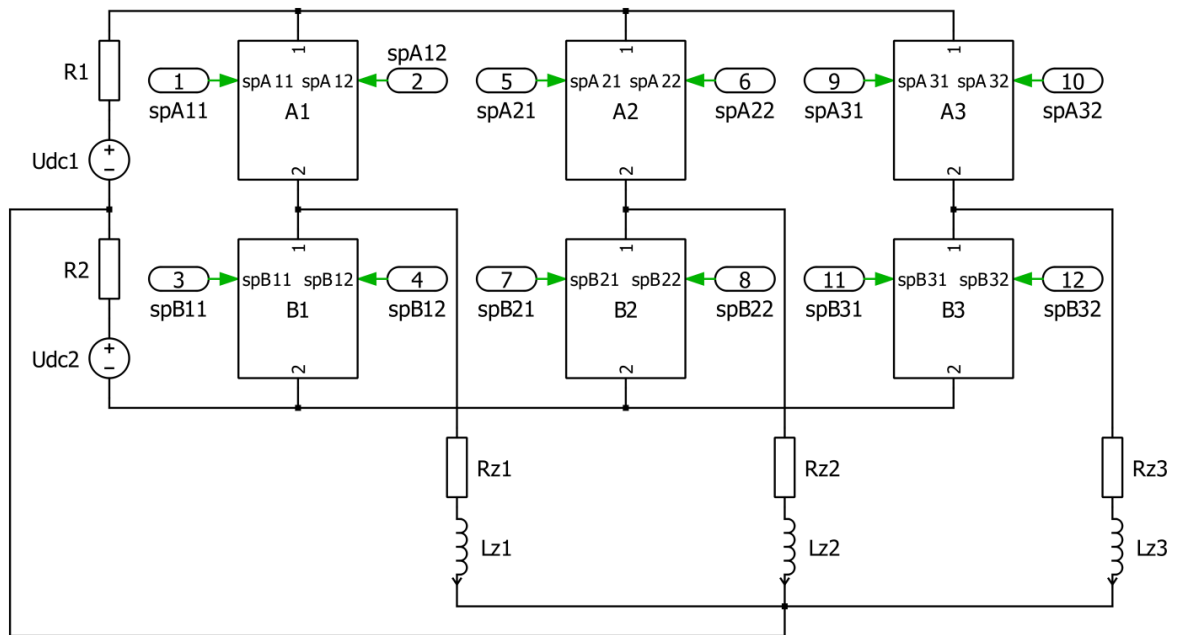


Obr. 21: Schéma dvouúrovňového třífázového měniče s jednoduchou proudovou buňkou

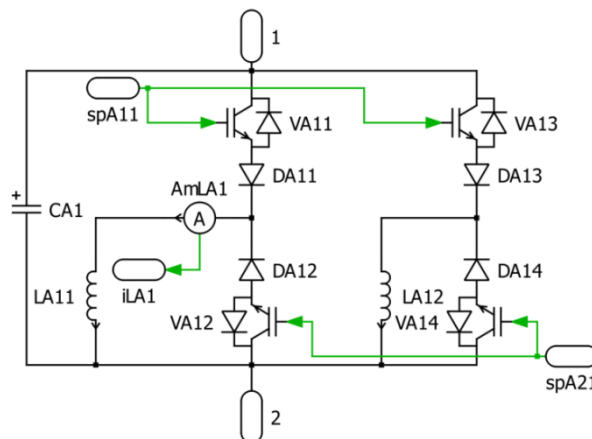
Hodnoty kapacity kondenzátoru a indukčnosti buňky byly zachovány $C = 100 \mu\text{F}$ a $L = 10 \text{ mH}$. K ustálení střední hodnoty proudu induktorem došlo při nastavení parametrů $R_Z = 2 \Omega$ a $L_Z = 0,1 \text{ mH}$. Získané průběhy jsou shodné s výsledky v kapitole 3.2.1, liší se jen v měřítku vlivem rozdílného nastavení zdrojů stejnosměrného napětí.

3.3.2 Dvouúrovňový třífázový měnič s paralelním spojením buněk

Zjednodušený výkonový obvod měniče s paralelním spojením buněk lze vidět na Obr. 22. Jednotlivá paralelní spojení se společným kondenzátorem byla pro přehlednost uzavřena do subsystémů $A_1 - B_3$. Detail obvodu uzavřeného v subsystému lze vidět na Obr. 23. Podle výsledků simulací v kapitole 3.2.2 bylo řízení paralelního spojení buněk realizováno pouze s nulovým posunem.

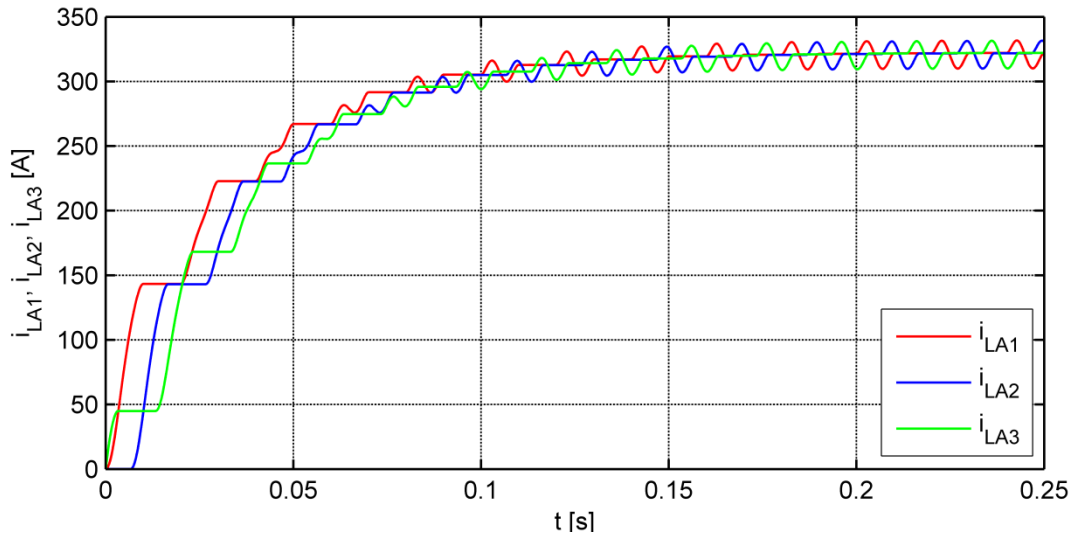


Obr. 22: Schéma dvouúrovňového třífázového měniče s paralelním spojením buněk



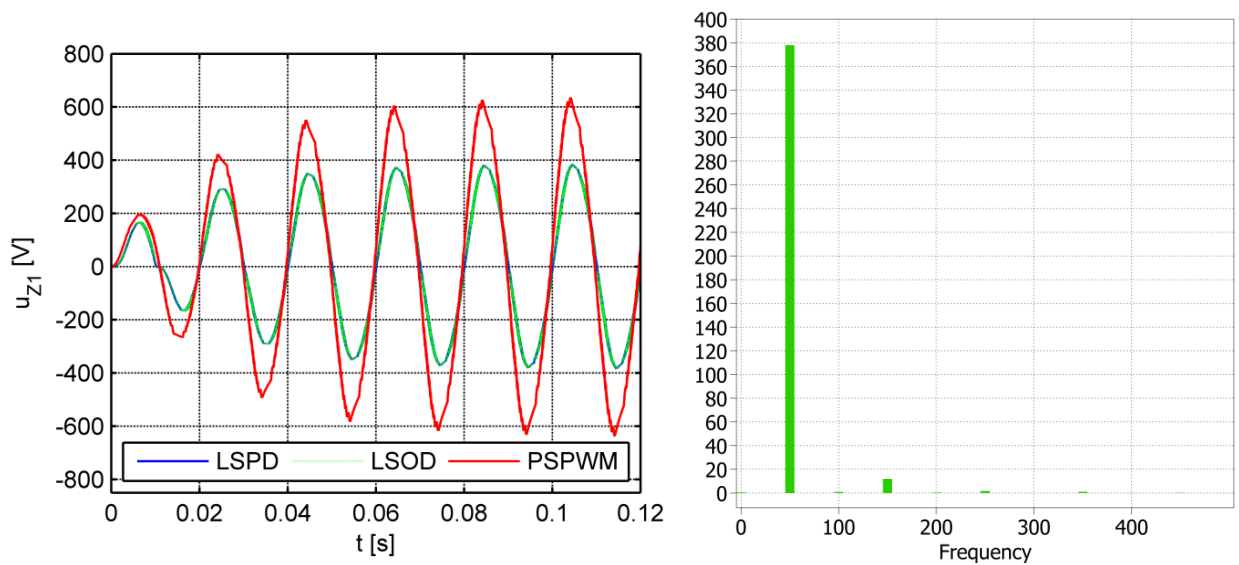
Obr. 23: Detail obvodu uzavřeného v subsystému

K ustálení stejnosměrné složky proudu induktorem došlo při zachování parametrů měniče $C = 100 \mu\text{F}$, $L = 10 \text{ mH}$ a nastavení parametrů zátěže $R_Z = 0,6 \Omega$ a $L_Z = 100 \mu\text{H}$. Průběh proudu induktory vrchních buněk jednotlivých fází při LSOD byl vykreslen do grafu na Obr. 24. Lze si všimnout, že průběh proudu induktory je ve všech fázích shodný, jen s fázovým posunem $\pm 120^\circ$.



Obr. 24: Průběh proudu induktry vrchních buněk jednotlivých fází dvouúrovňového měniče s paralelním spojením buněk při LSOD

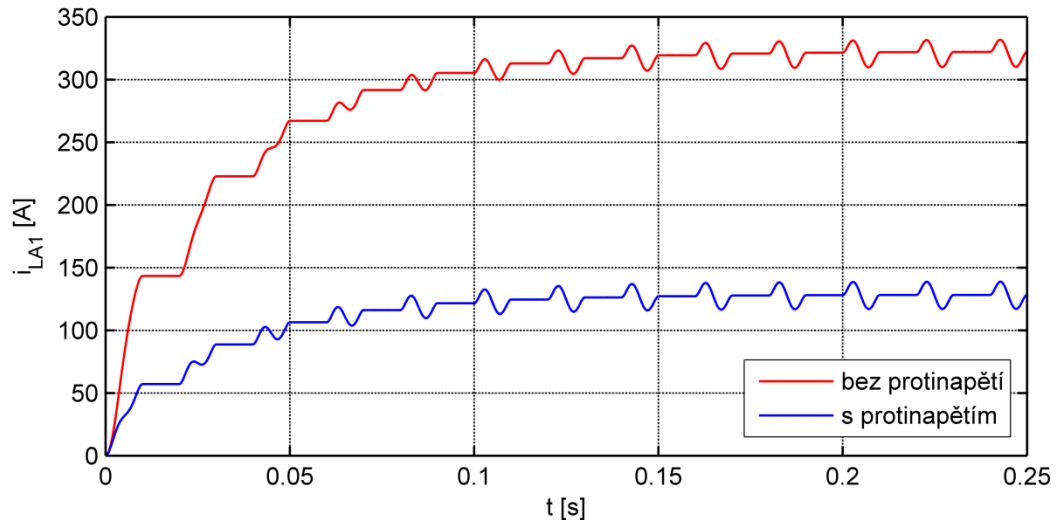
Průběh napětí na první fázi zátěže pro jednotlivé typy řízení a Fourierovo spektrum harmonických napětí na zátěži při LSOD lze vidět na Obr. 25. Hodnota první harmonické dosahuje 377,85 V (100%), třetí harmonické 11,77 V (3,11%) a celkové harmonické zkreslení činí $THD_U = 0,037$.



Obr. 25: a) Průběh napětí na zátěži pro jednotlivé typy řízení, b) Fourierovo spektrum harmonických napětí na zátěži při LSOD

3.3.3 Protinapětí

Všechny parametry simulace byly ponechány na stávajících hodnotách $U_{dc1} = U_{dc2} = 300 \text{ V}$, $C = 100 \text{ } \mu\text{F}$, $L = 10 \text{ mH}$ a k třífázové zátěži $R_Z = 0,6 \text{ } \Omega$ a $L_Z = 100 \text{ } \mu\text{H}$ bylo připojeno symetrické třífázové střídavé protinapětí s amplitudou 230 V a frekvencí 50 Hz . Průběh proudu induktorem L_{A1} měniče bez protinapětí a s protinapětím při LSOD lze vidět na *Obr. 26*.



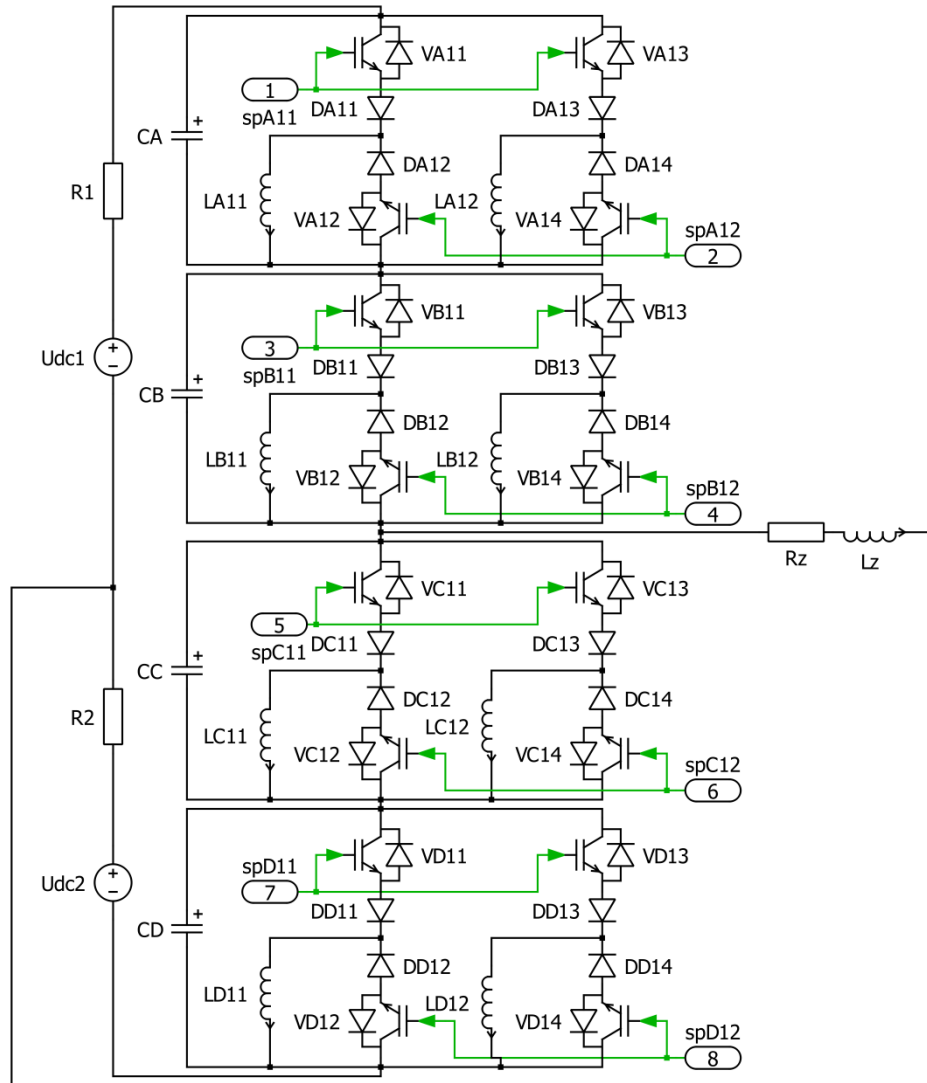
Obr. 26: Průběh proudu induktorem L_{A1} dvouúrovňového třífázového měniče s paralelním spojením buněk bez protinapětí a s protinapětím při LSOD

3.4 Čtyřúrovňový měnič

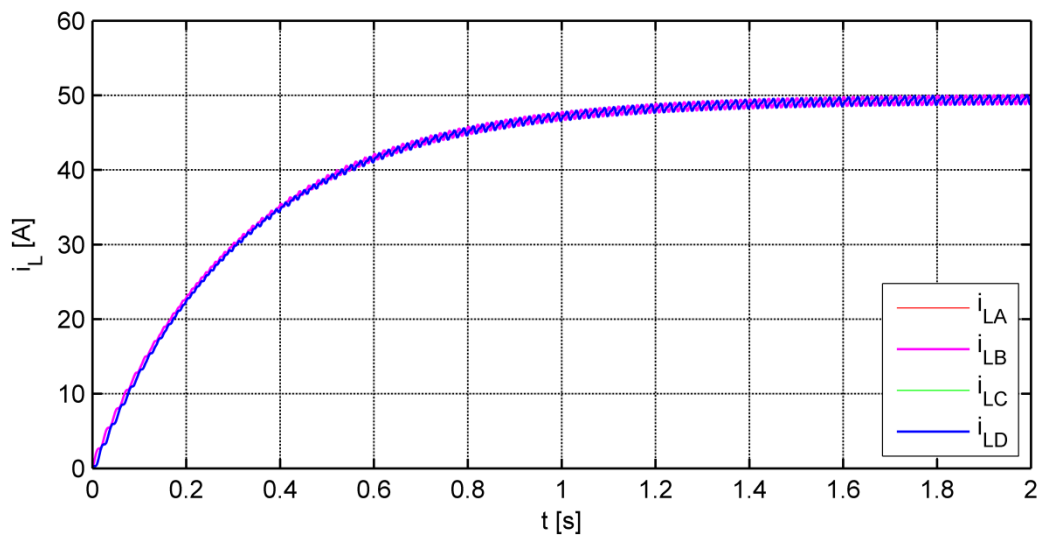
3.4.1 Čtyřúrovňový půlmůstek s paralelním spojením buněk

Před sestavením čtyřúrovňového proudového modulárního měniče byla nejprve simulována pouze jedna jeho fáze, tedy čtyřúrovňový půlmůstek s paralelním spojením buněk. Schéma tohoto půlmůstku lze vidět na *Obr. 27*.

Pro všechny aplikované typy řízení byly laděny parametry tak, aby proudy induktry všech čtyř úrovní v jedné fázi dosahovaly po ustálení stejných hodnot. Průběhy proudů induktry půlmůstku L_{A1} , L_{B1} , L_{C1} a L_{D1} při nastavení parametrů $C = 500 \text{ } \mu\text{F}$, $L = 0,5 \text{ H}$, $R_Z = 3 \text{ } \Omega$ a $L_Z = 10 \text{ mH}$ pro PSPWM lze vidět na *Obr. 28*.

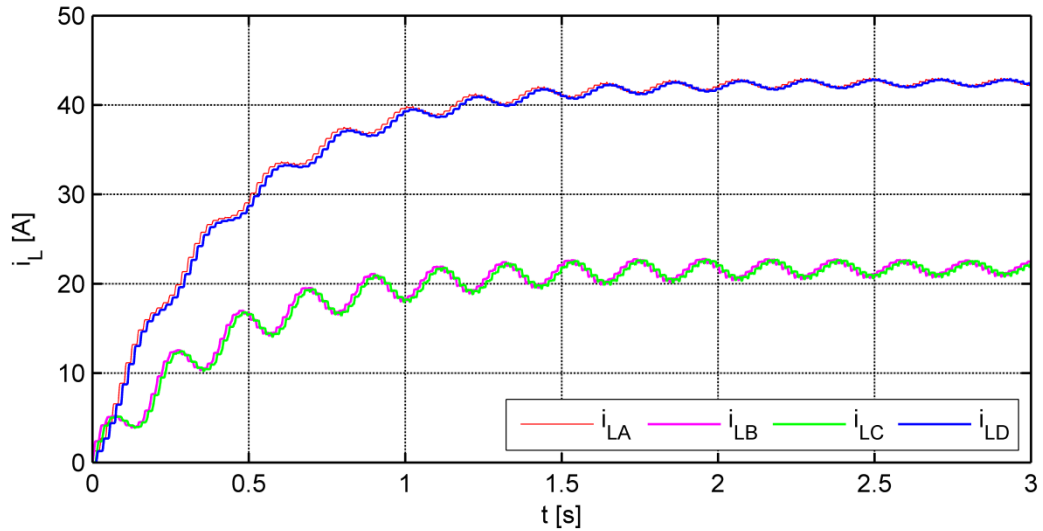


Obr. 27: Schéma čtyřúrovňového půlmůstku s paralelním spojením buněk



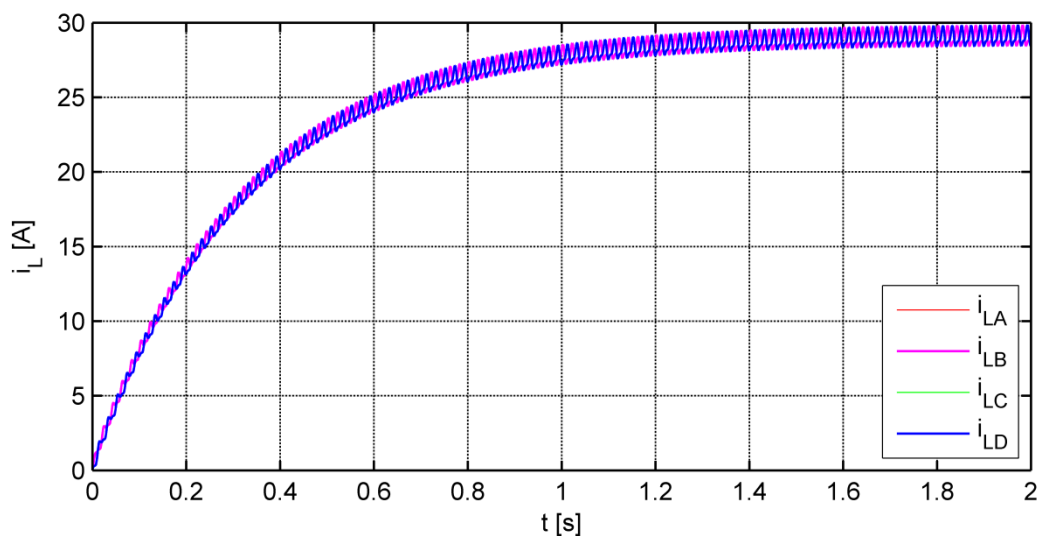
Obr. 28: Průběhy proudů indukčtí L_{A1} , L_{B1} , L_{C1} a L_{D1} čtyřúrovňového půlmůstku s paralelním spojením buněk při PSPWM

Průběhy proudu těmito induktory jsou při řízení všemi typy PWM s úrovnovým posunem nosných signálů shodné, do grafu na *Obr. 29* byly proto vykresleny jen průběhy pro LSAOD. Z grafu je patrné, že tento typ řízení způsobuje rozbalancování středních hodnot proudů jednotlivými induktory. PWM s úrovnovým posunem nosných signálů proto není vhodným způsobem řízení čtyřúrovňového půlmůstku s paralelním spojením buněk.



Obr. 29: Průběhy proudů induktory L_{A1} , L_{B1} , L_{C1} a L_{D1} čtyřúrovňového půlmůstku s paralelním spojením buněk při PWM s úrovnovým posunem nosných signálů

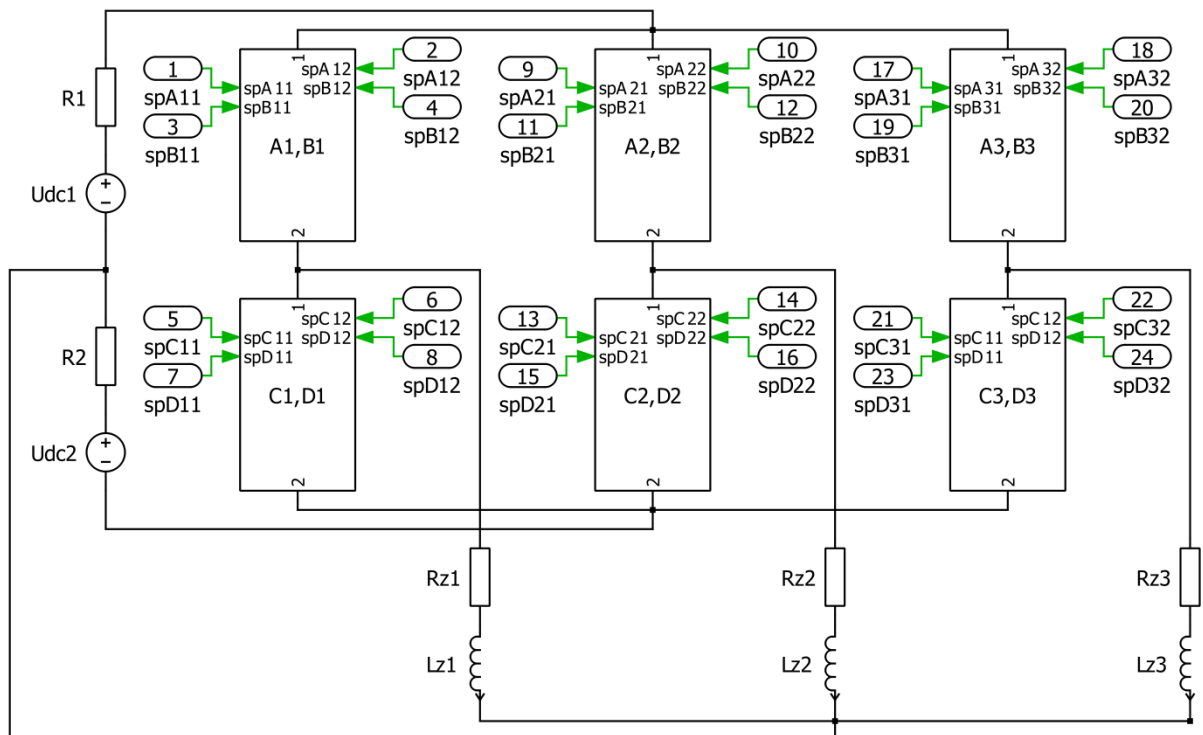
K zátěži čtyřúrovňového půlmůstku s paralelním spojením buněk bylo dále připojeno protinapětí o velikosti 230 V a frekvenci 50 Hz. Průběhy proudu induktorem L_{A1} pro PSPWM zobrazuje graf na *Obr. 30*. Připojením protinapětí nedošlo k rozbalancování proudů induktory, PSPWM je tedy vhodné pro řízení čtyřúrovňového půlmůstku, resp. měniče s protinapětím.



Obr. 30: Průběhy proudů induktory L_{A1} , L_{B1} , L_{C1} a L_{D1} čtyřúrovňového půlmůstku s protinapětím při PSPWM

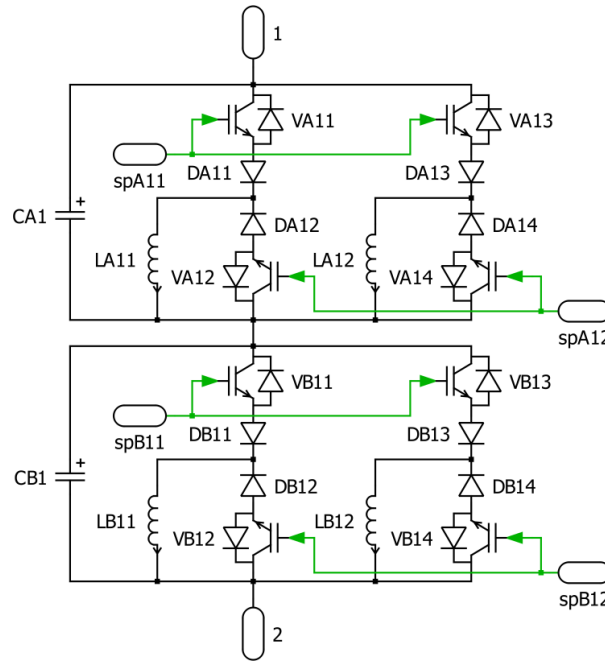
3.4.2 Třífázový čtyřúrovňový měnič

Spojením čtyřúrovňových půlmůstků byl vytvořen model čtyřúrovňového modulárního měniče s paralelním spojením buněk. Uzel třífázové RL zátěže je propojen s bodem nulového potenciálu stejnosměrného zdroje. Zobecněné schéma třífázového čtyřúrovňového proudového modulárního měniče lze vidět na *Obr. 31*, kde jsou pro celkovou přehlednost schématu jednotlivé části měniče reprezentovány bloky Subsystem. Obsahem každého tohoto bloku jsou dvě úrovně půlmůstku s paralelním spojením buněk. Detail obvodu uzavřeného v bloku Subsystem lze vidět na *Obr. 32*.



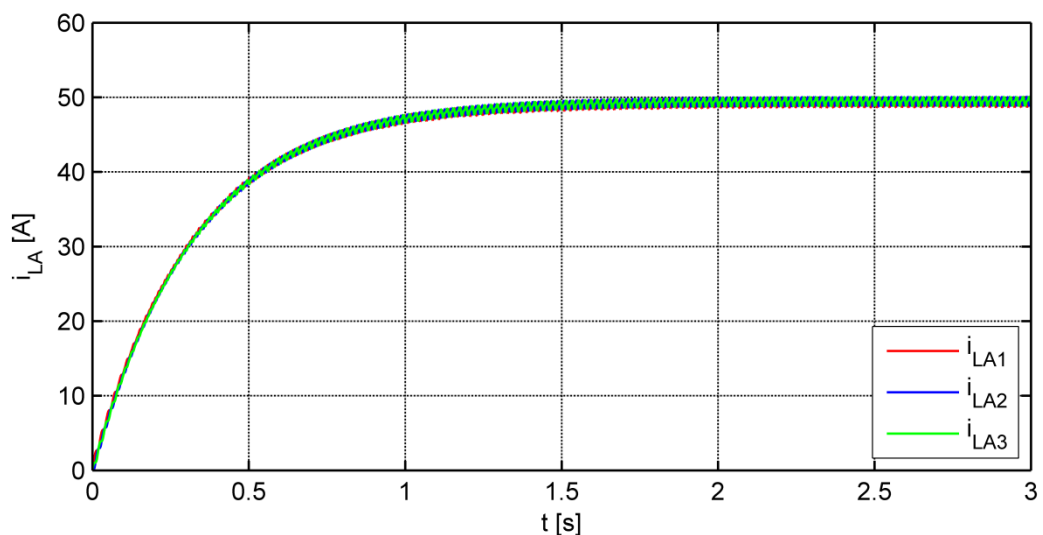
Obr. 31: Zjednodušené schéma třífázového čtyřúrovňového proudového modulárního měniče

Parametry obvodu byly ponechány stejné jako u čtyřúrovňového půlmůstku s paralelním spojením buněk - $C = 500 \mu\text{F}$, $L = 0,5 \text{ H}$, $R_Z = 3 \Omega$ a $L_Z = 10 \text{ mH}$. Vzhledem k poznatkům získaným v předchozí kapitole již bylo aplikováno pouze řízení PSPWM. Proudů induktory jednotlivých úrovní v první fázi měniče mají shodný průběh jako u půlmůstku, viz *Obr. 28*.

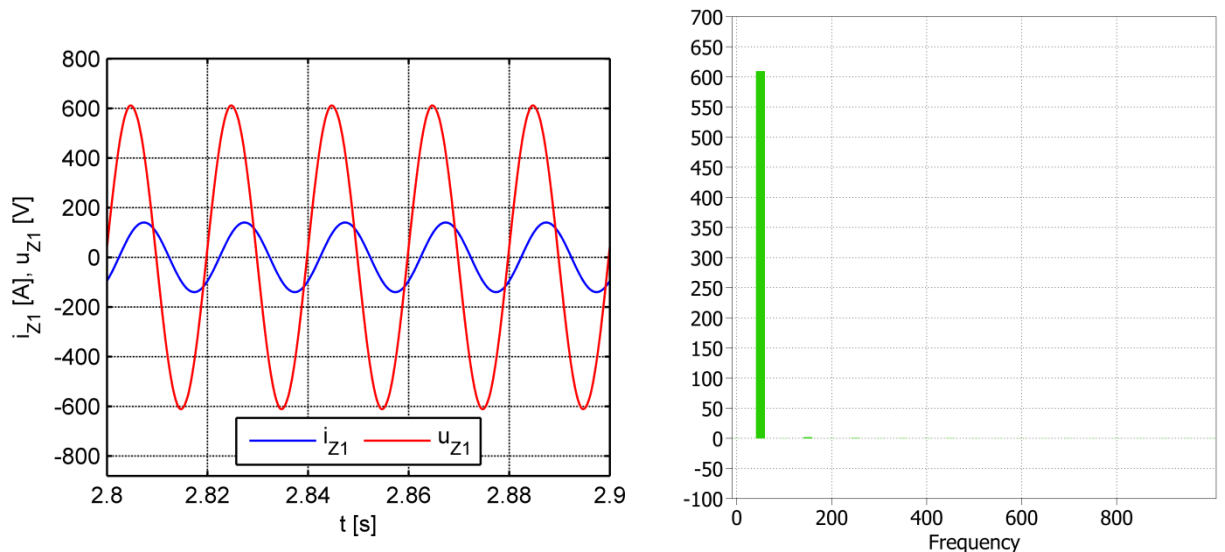


Obr. 32: Detail obvodu uzavřeného v subsystému výkonového obvodu třífázového čtyřúrovňového proudového modulárního měniče

Průběhy proudů induktory v jednotlivých fázích úrovně A byly vykresleny do grafu na Obr. 33. Mají shodný průběh s fázovým posunem $\pm 120^\circ$. Graf na Obr. 34 zobrazuje průběhy proudu a napětí na zátěži třífázového čtyřúrovňového proudového modulárního měniče s paralelním spojením buněk a Fourierovo spektrum harmonických napětí na zátěži. Hodnota první harmonické dosahuje 609,6 V (100%), třetí harmonické 1,79 V (0,29%) a celkové harmonické zkreslení činí $\text{THD}_U = 0,0034$.

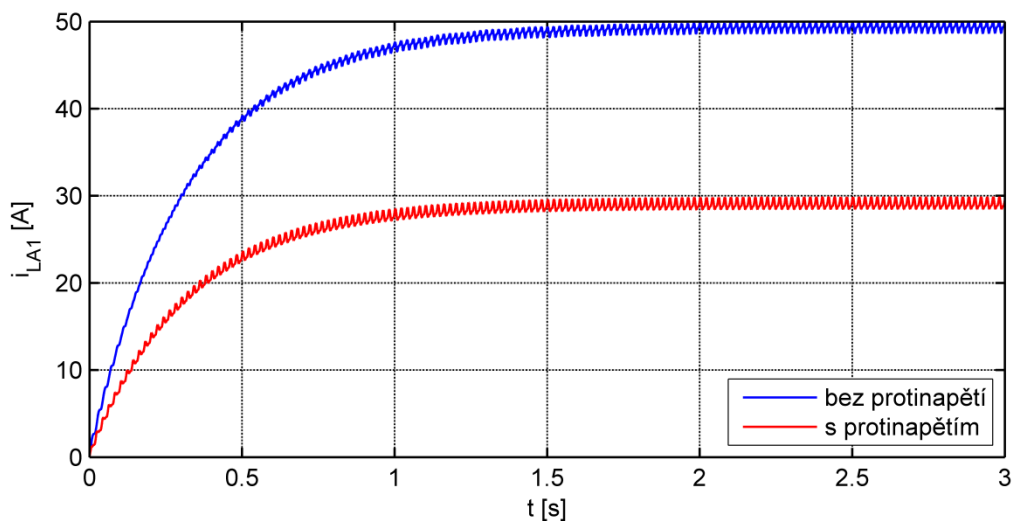


Obr. 33: Průběhy proudů induktory v první úrovni v jednotlivých fázích měniče při PSPWM

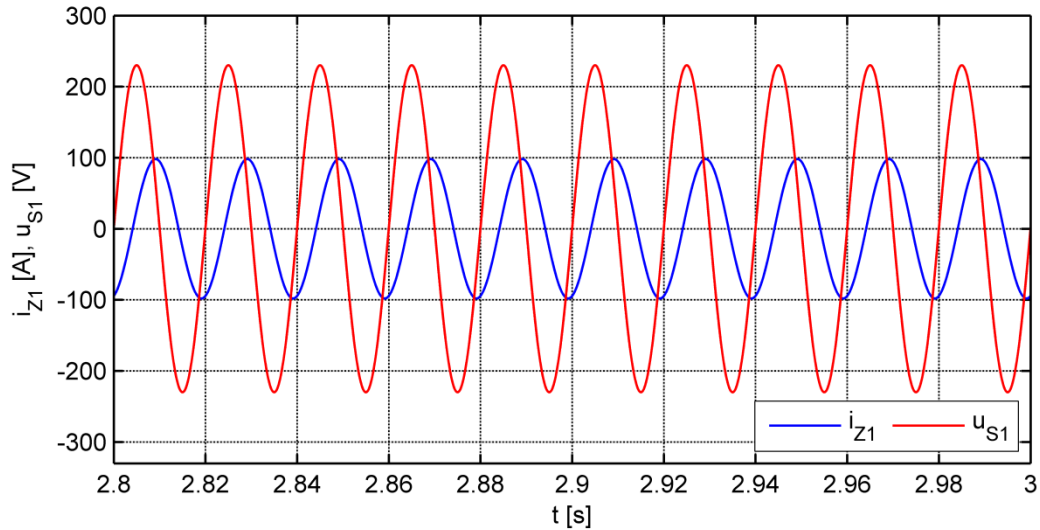


Obr. 34: a) Průběhy proudu a napětí na zátěži měniče s paralelním spojením buněk, b) Fourierovo spektrum harmonických napětí na zátěži

Následně bylo k zátěži měniče připojeno protinapětí s amplitudou 230 V a frekvencí 50 Hz. Parametry obvodu byly zachovány - $C = 500 \mu\text{F}$, $L = 0,5 \text{ H}$, $R_Z = 3 \Omega$, $L_Z = 10 \text{ mH}$. Graf na Obr. 35 zobrazuje průběh proudu induktorem i_{LA1} měniče bez protinapětí a s protinapětím. Do grafu na Obr. 36 byl vykreslen průběhy proudu první fáze zátěže s první fází napětí sítě. Měnič v tomto případě dává síti induktivní charakter.



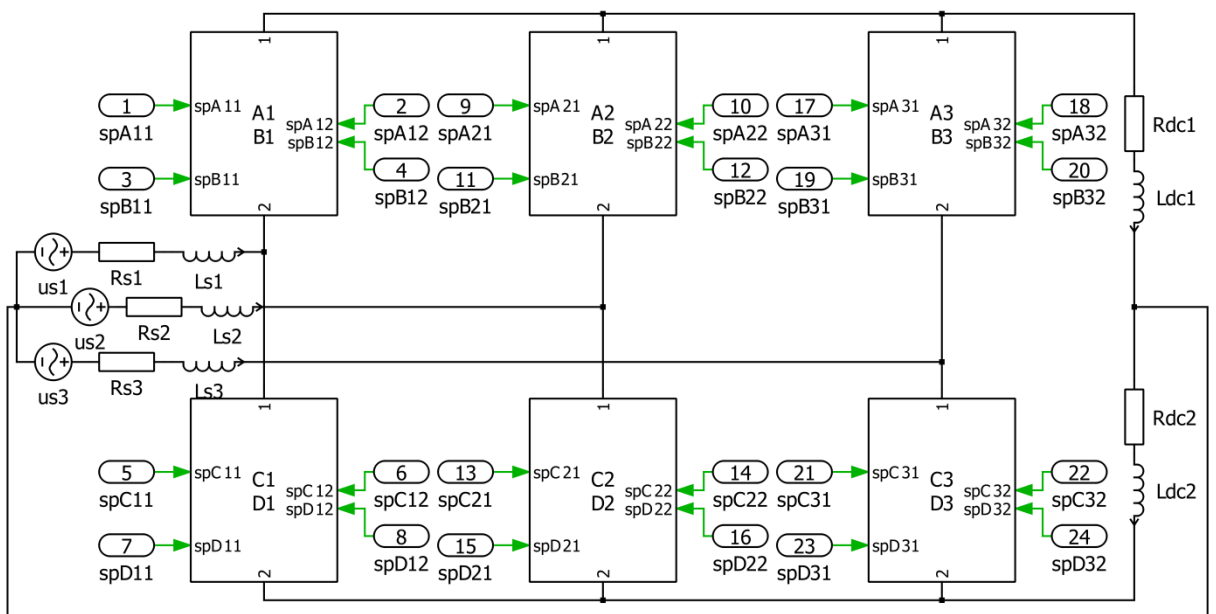
Obr. 35: Průběhy proudu induktorem i_{LA1} měniče bez protinapětí a s protinapětím



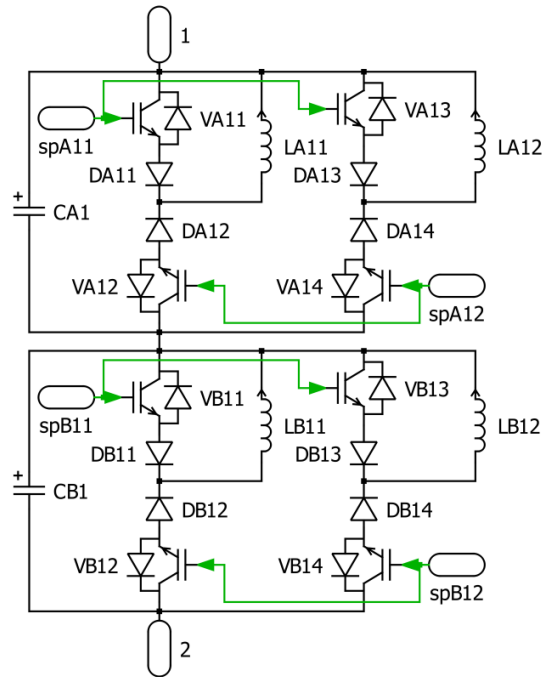
Obr. 36: Průběhy proudu a napětí na zátěži třífázového čtyřúrovňového proudového modulárního měniče s paralelním spojením buněk s protinapětím

3.4.3 Třífázový čtyřúrovňový proudový modulární měnič jako usměrňovač

Třífázový čtyřúrovňový měnič byl simulován jako usměrňovač pracující do RL zátěže. Zjednodušené schéma usměrňovače lze vidět na Obr. 37. Na střídavé straně měniče stojí třífázové napětí sítě s odporem R_S a indukčností L_S . Zátěž na stejnosměrné straně měniče tvoří odporu R_{dc} a indukčnost L_{dc} . Na Obr. 38 ukazujícím detail bloku Subsystem čtyřúrovňového usměrňovače lze vidět, že pro sestavení usměrňovače musely být otočeny proudové buňky.

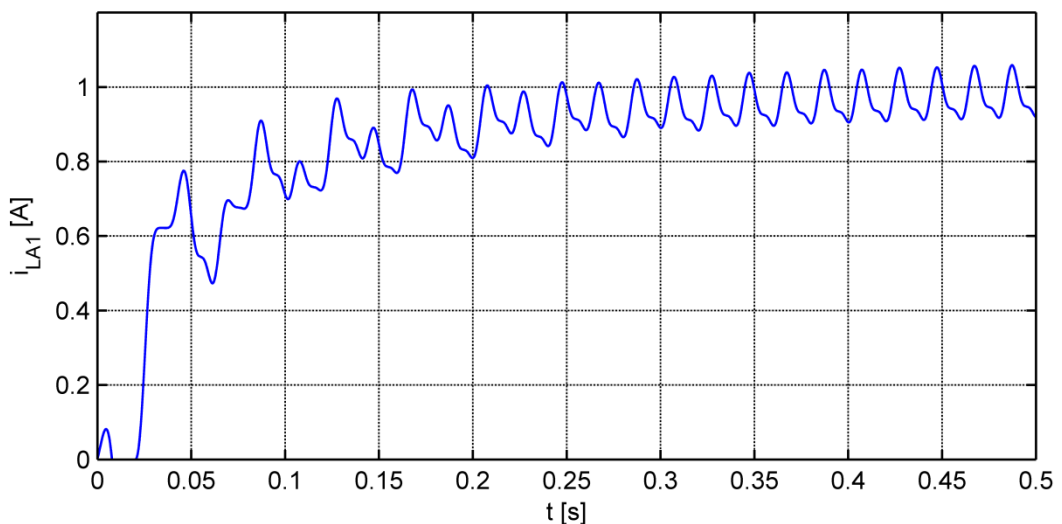


Obr. 37: Zjednodušené schéma čtyřúrovňového proudového modulárního usměrňovače

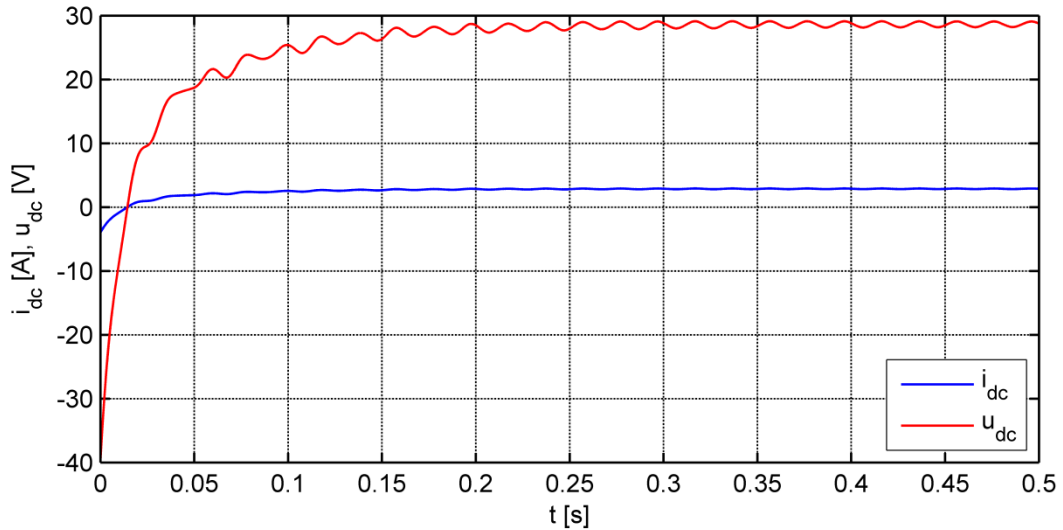


Obr. 38: Detail obvodu uzavřeného v bloku Subsystem

Velikosti kapacitoru a induktoru měniče byly nastaveny $C = 500 \mu\text{F}$ a $L = 500 \text{ mH}$. Hodnoty odporu a indukčnosti na střídavé straně měniče byly zvoleny $R_S = 3 \Omega$, $L_S = 100 \text{ mH}$ a $U_S = 230 \text{ V}$. Velikost zátěže byla nastavena $R_{dc} = 10 \Omega$, $L_{dc} = 100 \mu\text{H}$. Průběh proudu induktorem L_{A1} lze vidět v grafu na Obr. 39, průběhy proudu a napětí na stejnosměrné zátěži byly vykresleny do grafu na Obr. 40.

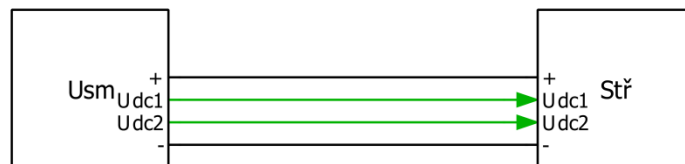


Obr. 39: Průběh proudu induktorem L_{A1} třífázového čtyřúrovňového usměrňovače



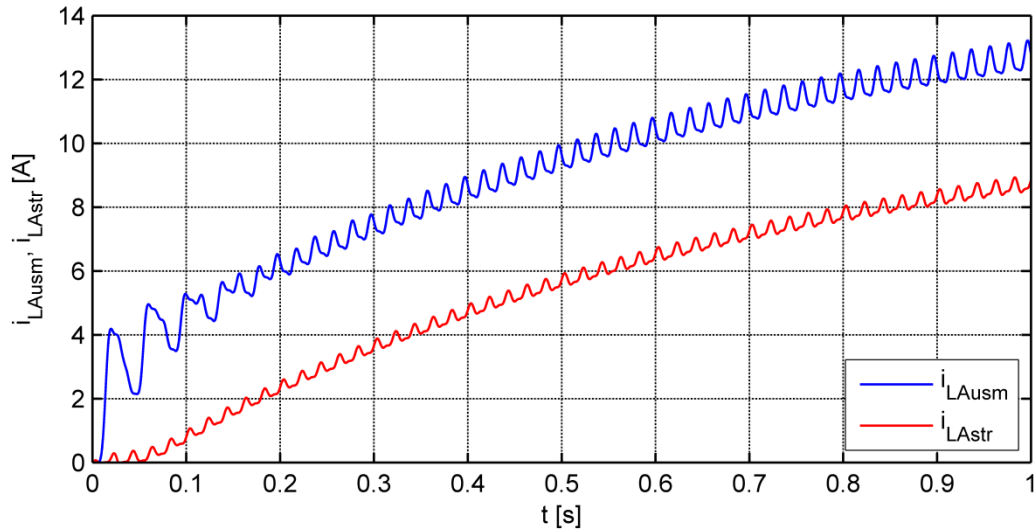
Obr. 40: Průběh usměrněného proudu a napětí na stejnosměrné zátěži

V následujícím modelu je k čtyřúrovňovému usměrňovači připojen čtyřúrovňový střídač pro simulaci HVDC systému, viz zjednodušené schéma na Obr. 41. V blocích Subsystem jsou uzavřena schémata usměrňovače z Obr. 37 a střídače z Obr. 31. Stejnosměrné strany obou měničů jsou vzájemně propojeny. Zdroj stejnosměrného napětí střídače je řízen napětím měřeným na stejnosměrné straně usměrňovače. Parametry usměrňovače byly nastaveny $C = 500 \mu\text{F}$, $L = 500 \text{ mH}$, $U_S = 1 \text{ kV}$, $R_S = 3 \Omega$, $L_S = 100 \text{ mH}$, $L_{dc} = 100 \mu\text{H}$, $R_{dc} = 10 \Omega$. Parametry střídače byly zvoleny $C = 500 \mu\text{F}$, $L = 500 \text{ mH}$, $R_1 = 1 \text{ m}\Omega$, $R_Z = 3 \Omega$ a $L_Z = 1 \text{ mH}$ a $U_S = 230 \text{ V}$.



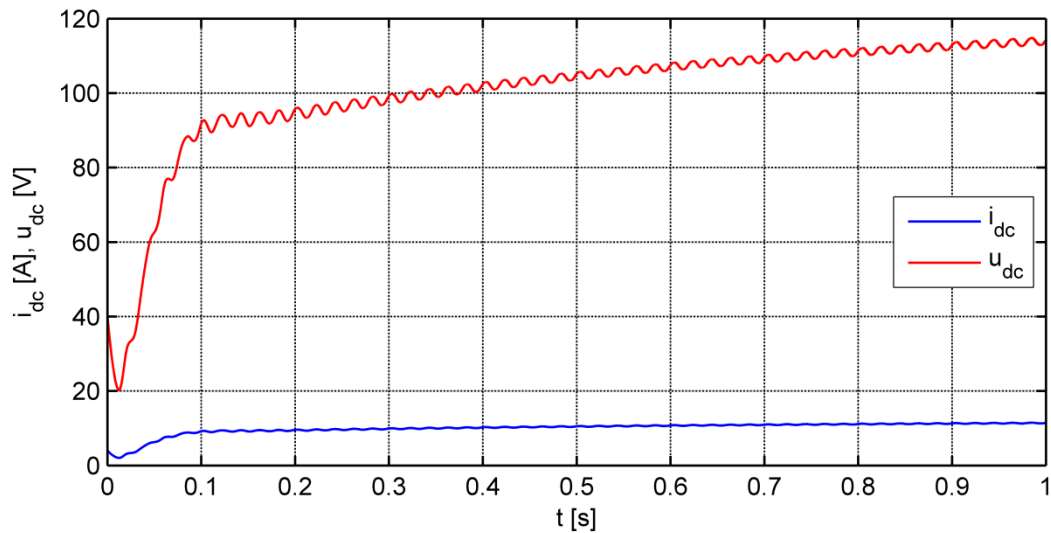
Obr. 41: Model HVDC systému bez řídicích signálů

Průběh proudu induktorem v úrovni A usměrňovače i_{LAusm} byl vykreslen do společného grafu na Obr. 42 spolu s proudem tekoucím induktorem v úrovni A střídače i_{LAstr} . Vzhledem ke složitosti zapojení dochází k ustálení děje až v delším časovém horizontu, z grafu je však vidět, že oba proudy mají požadovaný průběh.

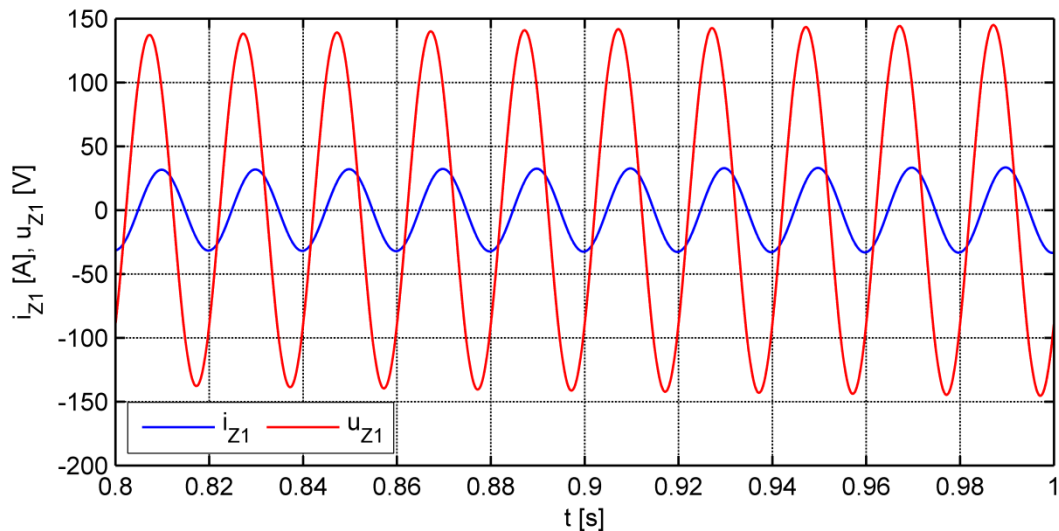


Obr. 42: Průběhy proudů induktory úrovní A usměrňovače a střídače v HVDC systému

Do grafu na Obr. 43 byl vykreslen průběh proudu a napětí na stejnosměrné straně usměrňovače. Průběhy proudu a napětí na prvcích R a L první fáze zátěže střídače ukazuje graf na Obr. 44. Z těchto dvou grafů je patrné, že ačkoliv k ustálení děje dochází až po delší době, průběhy na stejnosměrné straně usměrňovače jsou skutečně usměrněné a průběhy na zátěži střídače mají harmonický charakter.



Obr. 43: Průběhy proudu a napětí na stejnosměrné straně usměrňovače

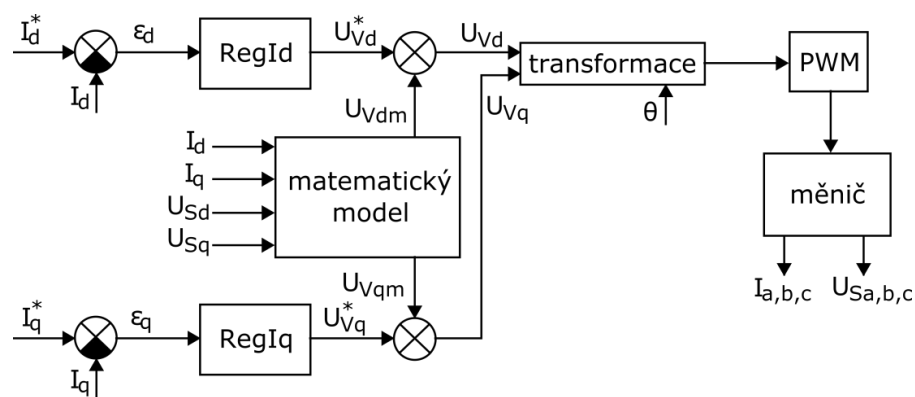


Obr. 44: Průběhy proudu a napětí na zátěži střídače

3.5 Regulace proudu

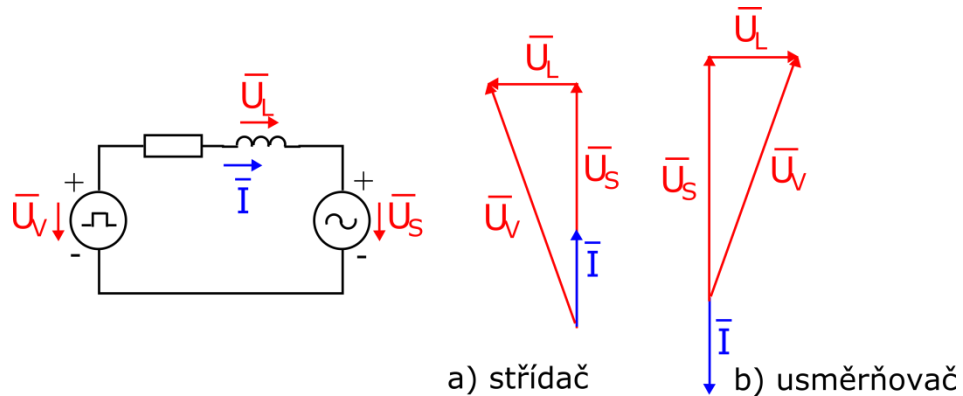
Bylo navrženo vektorové řízení proudového modulárního měniče s oddělenou regulací d , q složek proudu pomocí dvojice proporcionálně integračních regulátorů s navrženými zesíleními, o navržené vektorové řízení byl rozšířen sestavený matematický model tak, aby bylo možné otestovat chování měniče jak v usměrňovačovém, tak střídačovém chodu, a sice s účínkem $\cos\varphi = 1$ a zároveň s účínkem kapacitním i induktivním.

Na Obr. 45 lze vidět blokové schéma vektorové regulace proudu. Proud vystupující z měniče je transformován z třífázové stojící soustavy a, b, c přes stojící soustavu statoru α, β do rotující soustavy rotoru d, q . Skutečné složky proudu I_d, I_q jsou odečteny od požadovaných složek I_d^*, I_q^* , čímž vzniknou regulační odchylky ε_d a ε_q vstupující do regulátorů RegId a RegIq. Na výstupu z regulátorů jsou k požadavkům na napětí U_{vd}^*, U_{vq}^* přičteny vypočtené hodnoty U_{vdm} a U_{vqm} z bloku matematického modelu. Výsledné složky napětí jsou zpětně transformovány a slouží jako třífázový modulační signál pro řízení měniče.



Obr. 45: Blokové schéma vektorové regulace proudu

Podle zjednodušeného náhradního schématu měniče byly zkonstruovány fázorové diagramy pro režim střídače a usměrňovače, viz *Obr. 46*. Při konstrukci fázorových diagramů byl zanedbán odpor zátěže.



Obr. 46: Náhradní schéma a fázorové diagramy pro střídačový a usměrňovačový chod

Podle obrázku byly odvozeny následující rovnice pro výpočet U_{Vdm} a U_{Vqm} v bloku matematického modelu.

$$\bar{U}_V = \bar{U}_S + \bar{U}_R + \bar{U}_L \quad (3.1)$$

$$\bar{U}_V = \bar{U}_S + R\bar{I} + j\omega L\bar{I} \quad (3.2)$$

Převod do systému d-q:

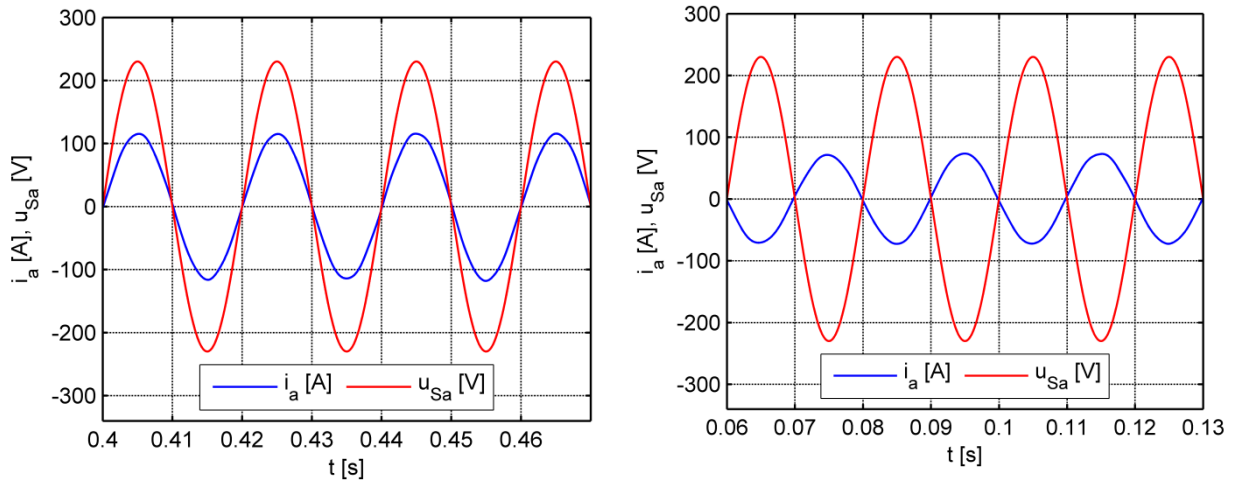
$$U_{Vd} + jU_{Vq} = U_{sd} + jU_{sq} + R(I_d + jI_q) + j\omega L(I_d + jI_q) \quad (3.3)$$

$$U_{Vd} = U_{sd} + RI_d - \omega LI_q \quad (3.4)$$

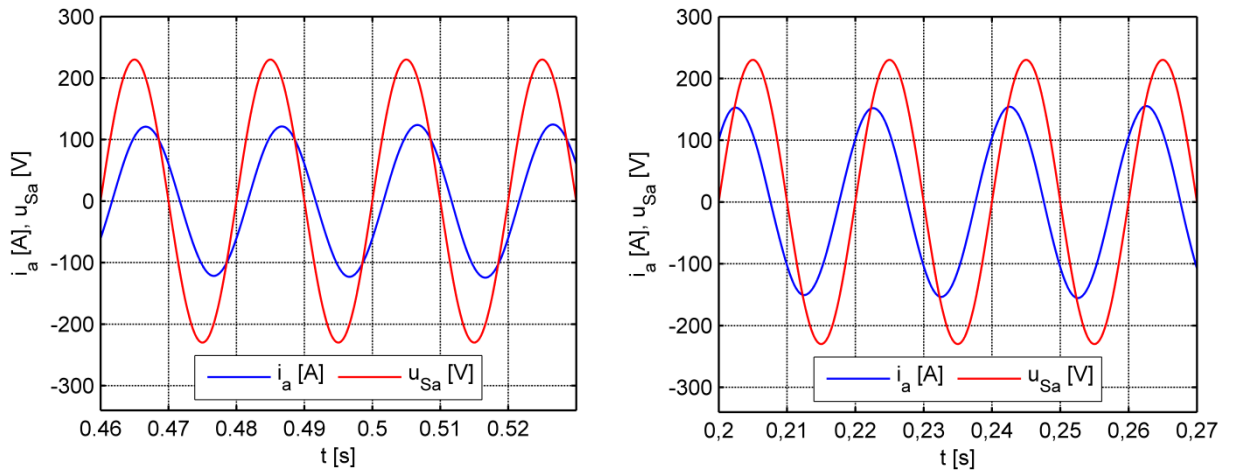
$$U_{Vq} = U_{sq} + RI_q + \omega LI_d \quad (3.5)$$

Jak lze vidět na *Obr. 47*, pomocí regulace proudu lze zajistit, aby proud a napětí sítě byly vzájemně ve fázi nebo v protifázi. Lze tedy docílit střídačového i usměrňovačového chodu.

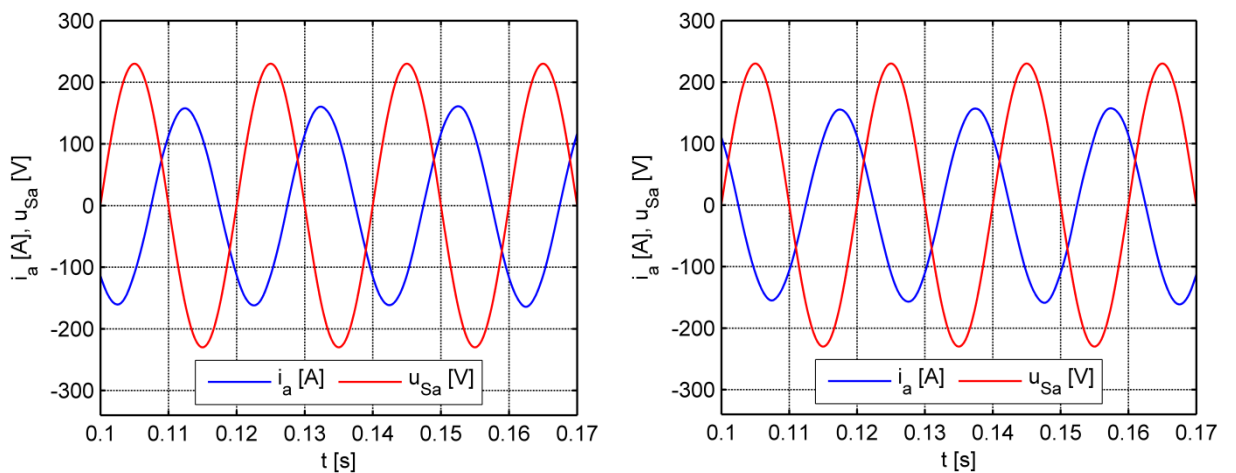
V obou těchto případech lze dosáhnout induktivního i kapacitního charakteru sítě. Grafy na *Obr. 48* zobrazují výsledky simulací pro režim střídače s induktivním a kapacitním charakterem sítě. Totéž lze vidět na *Obr. 49* pro režim usměrňovače.



Obr. 47: a) Průběh napětí a proudu pro účinník $\cos\varphi = 1$ ve střídačovém chodu b) Průběh napětí a proudu pro účinník $\cos\varphi = 1$ usměrňovačovém chodu



Obr. 48: a) Průběh napětí a proudu pro induktivní charakter, b) Průběh napětí a proudu pro kapacitní charakter sítě v režimu střídače

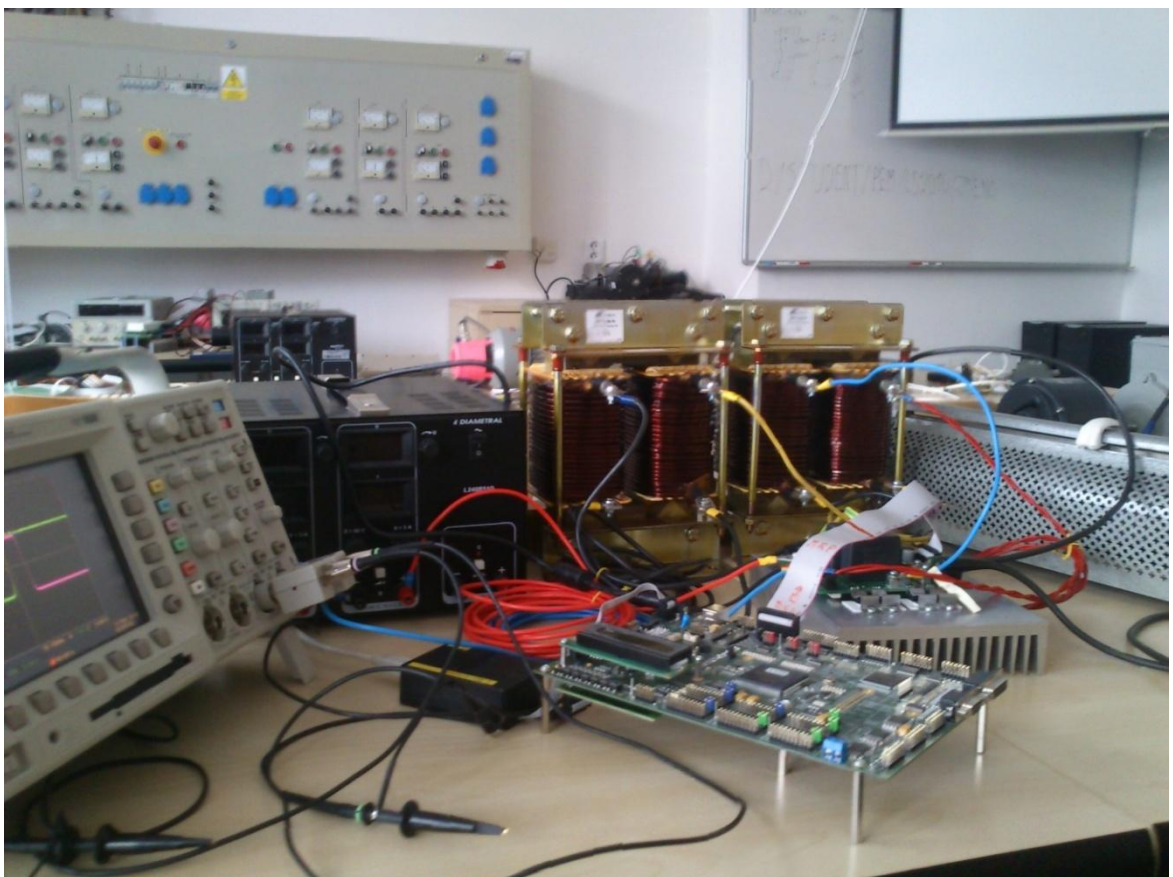


Obr. 49: a) Průběh napětí a proudu pro induktivní charakter, b) Průběh napětí a proudu pro kapacitní charakter sítě v režimu usměrňovače

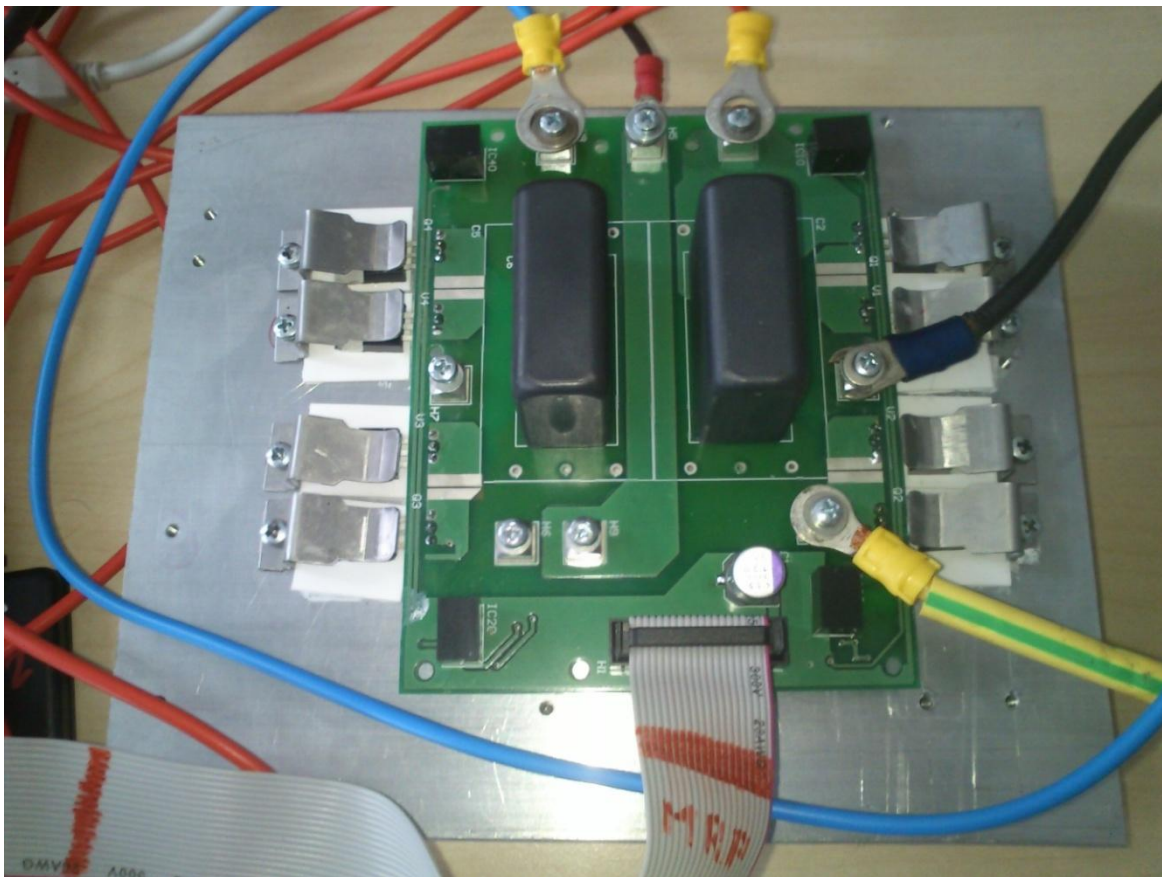
4 Experimentální měření

Pro ověření průběhů získaných simulacemi byl sestaven a laboratorně otestován prototyp půlmůstku s jednoduchou buňkou. Pro sestavení byly použity tranzistory typu MOSFET a Schottkyho diody. Prototyp byl sestaven na desce plošných spojů s výjimkou indukčností o velikosti 10 mH, které bylo kvůli rozměrům nutné ponechat mimo desku. Seznam přístrojů použitých pro měření zobrazuje *Tabulka 3* na konci kapitoly. Na *Obr. 50* lze vidět sestavený laboratorní prototyp a na *Obr. 51* detail laboratorního prototypu proudového modulárního měniče.

Pomocí knihovny Matlab Embedded Coder byl sestaven řídicí obvod s PWM periferií pro procesor F28335. V rámci periferie byl nastaven symetrický pilový signál o frekvenci 20kHz a překryvy sepnutí tranzistorů v jedné buňce 100ns. Realizovaným typem řízení byla LSOD. Symetrické napájení zdroje bylo zvoleno $\pm 16V$ a zátěž byla zvolena čistě odporová $4,5\Omega$.

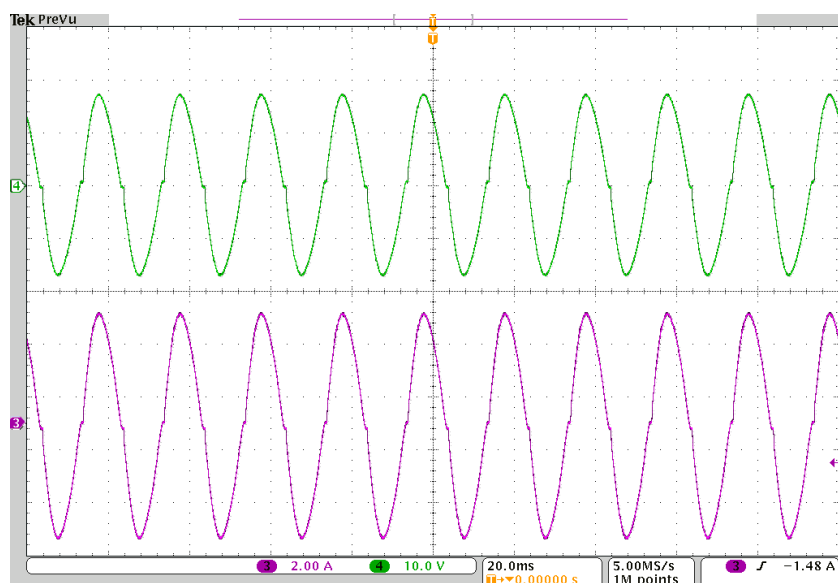


Obr. 50: Sestavený laboratorní prototyp

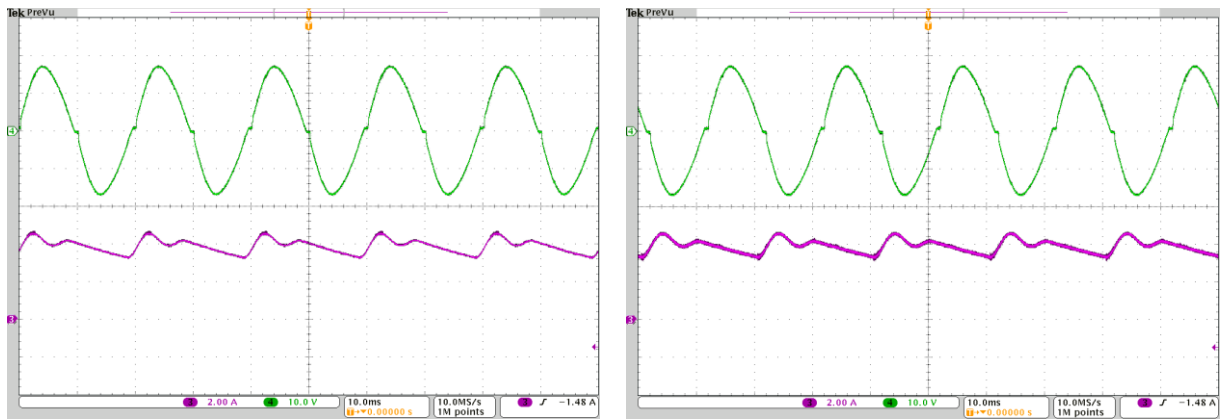


Obr. 51: Laboratorní prototyp proudového modulárního měniče

V grafu na Obr. 52 lze vidět průběh proudu a napětí na zátěži. Vlivem čistě odporového charakteru zátěže jsou průběhy ve fázi. Do společného grafu s napětím na zátěži byly následně vyobrazeny průběhy proudů jednotlivými induktory. Z Obr. 53 je patrné, že induktor L_{A1} propouští kladnou půlvlnu proudu a induktor L_{B1} zápornou.

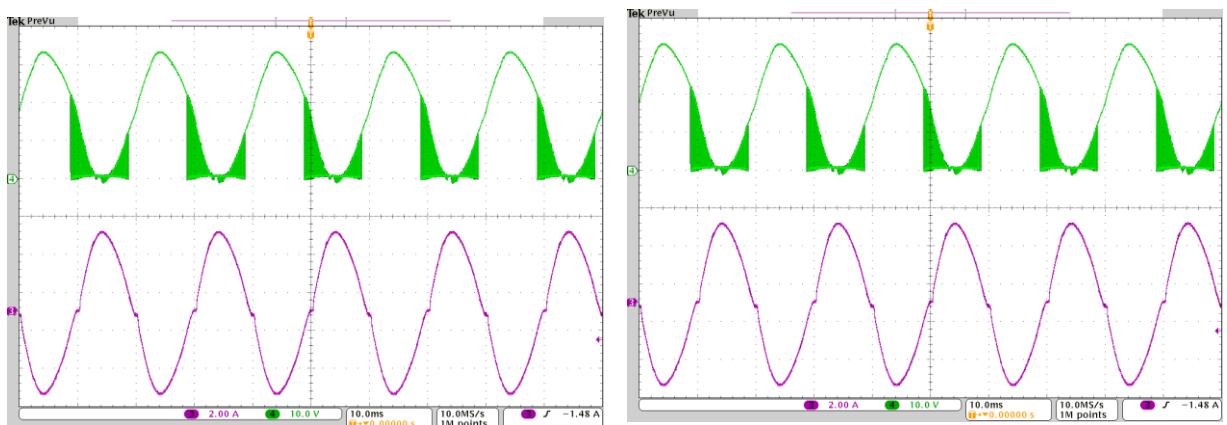


Obr. 52: Průběhy proudu a napětí na zátěži získané měřením



Obr. 53: a) Průběh proudu induktorem L_{A1} s napětím na zátěži, b) Průběh proudu induktorem L_{B1} s napětím na zátěži

Sledováním průběhu napětí na jednotlivých dvojicích tranzistor – dioda bylo ověřeno, že tranzistory V_{A1} a V_{A2} spínají s kladnou půlvlnou proudu protékajícím zátěží a tranzistory V_{B1} a V_{B2} se zápornou půlvlnou. Průběh napětí u_{VA1} a u_{VB1} lze vidět na Obr. 54.



Obr. 54: a) Průběhy napětí u_{VA1} a proudu zátěží, b) Průběhy napětí u_{VB1} a proudu zátěží

PŘÍSTROJ	ZNAČKA, TYP	SÉR./EV. ČÍSLO
MLC interface	ver. 0,2/2012 DSP TMS320 F28335PGFA	K40B
zdroj	Diametral P230R51D	150275
filtrační kondenzátor	ZES SILKO PVAJP 24 – 0,9/500 R45	-
tlumivky	SKYBERGTECH SKYTL30-10	29021605001042, 29021605001050
potenciometr	METRA	38958/4040
osciloskop	Tektronix DPO4034B	501488
napěťová sonda	Tektronix P5205	B017885
proudová sonda	Tektronix A622	-

Tabulka 3: Použité přístroje

5 Závěr

Cílem diplomové práce byla analýza a simulační ověření speciálního typu měniče, jmenovitě víceúrovňového proudového modulárního měniče určeného především pro technologii HVDC.

V teoretické části práce byla diskutována možnost použití modulárních měničů v HVDC systémech. Byly popsány vlastnosti a topologie proudového modulárního měniče v analogii s modulárním měničem napět'ového typu. Dále byly zkoumány možnosti řízení proudového modulárního měniče prostřednictvím vhodných typů pulzně šířkové modulace, užívaných pro víceúrovňové měniče.

V souladu se zadáním práce byly sestaveny matematické modely a pomocí simulací bylo ověřeno chování celé škály topologií měniče, od elementární proudové buňky až po plnohodnotný třífázový čtyřúrovňový modulární měnič pracující v režimu usměrňovače či střídače. Pro ověření použitelnosti v HVDC systémech byl sestaven matematický model jedné linky vedení HVDC s terminály v podobě třífázového čtyřúrovňového proudového modulárního měniče realizujícími propojení se střídavou sítí, kdy jeden měnič pracuje v režimu usměrňovače a druhý v režimu střídače.

Pro řízení terminálů modelu vedení HVDC bylo navrženo vektorové řízení proudu s regulací d , q složek proudu pomocí dvojice PI regulátorů. Pomocí simulací bylo ověřeno, že víceúrovňový proudový modulární měnič lze provozovat jak v režimu usměrňovače, tak v režimu střídače s účinnkem $\cos\varphi = 1$, a to s vysokou kvalitou napětí i proudu. Zároveň je možné tento typ měniče v případě potřeby provozovat s libovolným účinnkem induktivního či kapacitního charakteru.

Nad rámec zadání diplomové práce bylo provedeno ověření experimentálním měřením na sestaveném laboratorním prototypu. Výsledky simulací i měření potvrdily teoretické předpoklady. Všechny stanovené cíle práce byly splněny.

6 Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Z. E. Al-Haiki and A. N. Shaikh-Nasser, "Power Transmission to Distant Offshore Facilities," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 47, no. 3, pp. 1180-1183, May-June 2011.
- [2] M. H. Okba, M. H. Saied, M. Z. Mostafa and T. M. Abdel- Moneim, "High voltage direct current transmission - A review, part I," *Energitech, 2012 IEEE*, Cleveland, OH, 2012, pp. 1-7.
- [3] S. Allebrod, R. Hamerski and R. Marquardt, "New transformerless, scalable Modular Multilevel Converters for HVDC-transmission," *2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Rhodes, 2008, pp. 174-179.
- [4] M. Hagiwara and H. Akagi, "Control and Experiment of Pulsewidth-Modulated Modular Multilevel Converters," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, no. 7, pp. 1737-1746, July 2009.
- [5] S. Madichetty and A. Dasgupta, "Modular Multilevel Converters part-I: A Review on Topologies, Modulation, Modeling and Control Schemes," *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, vol. 4, no. 1, pp. 36-50, March 2014.
- [6] J. Liang, A. Nami, F. Dijkhuizen, P. Tenca and J. Sastry, "Current source modular multilevel converter for HVDC and FACTS," *Power Electronics and Applications (EPE), 2013 15th European Conference on*, Lille, 2013, pp. 1-10.
- [7] Q. Song, W. Liu, X. Li, H. Rao, S. Xu and L. Li, "A Steady-State Analysis Method for a Modular Multilevel Converter," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 8, pp. 3702-3713, Aug. 2013.
- [8] R. Marquardt, "Modular Multilevel Converter: An universal concept for HVDC-Networks and extended DC-Bus-applications," *Power Electronics Conference (IPEC), 2010 International*, Sapporo, 2010, pp. 502-507.
- [9] M. A. Perez, R. Lizana, C. Azocar, J. Rodriguez and B. Wu, "Modular multilevel cascaded converter based on current source H-bridges cells," *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, Montreal, QC, 2012, pp. 3443-3448.
- [10] R. Naderi and A. Rahmati, "Phase-Shifted Carrier PWM Technique for General Cascaded Inverters," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 23, no. 3, pp. 1257-1269, May 2008.
- [11] A. Lesnicar and R. Marquardt, "An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range," *Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna*, vol. 3, 6 pp., June 2003.
- [12] A. Venkatakrishna, R. Somanatham and M. Sandeep Reddy, "Phase Shifted and Level Shifted PWM Based Cascaded Multilevel Inverter Fed Induction Motor Drive," *International Journal of Current Engineering and Technology*, vol. 4, no. 1, pp. 350-354, February 2014.

[13] C. Gomathi, N. Nagath and S. V. Purnima, "Comparison of PWM Methods for Multilevel Inverter" *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, vol. 2, no. 12, pp. 6106-6114, December 2013.

[14] E. Solas, G. Abad, J. A. Barrena, A. Carear and S. Aurtenetxea, "Modulation of Modular Multilevel Converter for HVDC application," *Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), 2010 14th International*, Ohrid, 2010, pp. T2-84-T2-89.