

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Víceúrovňové měniče

**Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Drábek, Ph.D.
Autor: Bc. Ondřej Pilný**

2014

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej PILNÝ**
Osobní číslo: **E12N0066P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Průmyslová elektronika a elektromechanika**
Název tématu: **Víceúrovňové měniče**
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. Rešerže topologií víceúrovňových měničů.
2. Sestavení simulačního modelu vybrané konfigurace měniče.
3. Návrh algoritmů řízení a regulace.
4. Simulace vybraných jevů.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:


1. Určí vedoucí práce.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Pavel Drábek, Ph.D.**
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání diplomové práce: **14. října 2013**
Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2014**


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Anotace

Cílem této diplomové práce je seznámení čtenáře se základními topologiemi víceúrovňových měničů a následnou simulací dvou vybraných. Popisovanými topologiemi jsou kaskádní víceúrovňové měniče, víceúrovňové měniče s upínacími diodami, víceúrovňové měniče s plovoucími kondenzátory a v neposlední řadě modulární víceúrovňové měniče (M^2LC). Dále diplomová práce obsahuje výsledky simulací provedených s tříúrovňovým měničem s upínacími diodami a tříúrovňovým měničem s plovoucími kapacitami. U simulace tříúrovňového měniče s upínacími diodami byla provedena analýza obsahu vyšších harmonických ve výstupním fázovém napětí zátěže v závislosti na použité pulzně šířkové modulaci. Pomocí vytvořených simulací v programu Matlab/Simulink a nadstavbové knihovny PLECS byly simulovány vybrané dynamické jevy jako například rozběh, skoková změna zátěže, skoková změna napájecího napětí a náhlý výpadek napájecího napětí.

Klíčová slova

Víceúrovňový měnič, Víceúrovňový měnič s upínacími diodami, Víceúrovňový měnič s plovoucími kapacitami, Pulzně šířková modulace, PWM

Abstract

The aim of this thesis is to introduce readers to basic topologies of multilevel converters and simulation of two selected converters. The described topologies are cascade multilevel converters, diode clamped multilevel converters, flying capacitor multilevel converter and at last a modular multilevel converter (M^2LC). This work introduces the results of simulations performed with the three-level diode clamped converters and three-level flying capacitor converters. In three-level diode clamped converters simulation is analyzed content of harmonics in the load output phase voltage depending on the pulse width modulation. Using the generated simulation in Matlab/Simulink and extension library PLECS are simulated selected events such as acceleration, dynamic load change, dynamic change of voltage supply and the sudden failure of voltage supply.

Key words

Multilevel Converter, Diode Clamped Multilevel Converter, Flying Capacitor Multilevel Converter, Pulse width modulation, PWM

Prohlášení

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

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

.....

V Plzni dne 11.5.2014

Ondřej Pilný

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Pavlu Drábkovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a metodické vedení během celého vypracování mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za finanční, ale i duševní podporu po celou dobu mého studia.

Obsah

ÚVOD.....	9
SEZNAM SYMBOLŮ.....	10
1 REŠERŠE TOPOLOGIÍ VÍCEÚROVŇOVÝCH MĚNIČŮ.....	11
1.1 KASKÁDNÍ VÍCEÚROVŇOVÉ MĚNIČE	12
1.2 VÍCEÚROVŇOVÉ MĚNIČE S UPÍNACÍMI DIODAMI	15
1.3 VÍCEÚROVŇOVÉ MĚNIČE S PLOVOUCÍMI KONDENZÁTORY	17
1.4 MODULÁRNÍ VÍCEÚROVŇOVÉ MĚNIČE (M^2LC).....	19
2 SESTAVENÍ SIMULAČNÍHO MODELU	21
2.1 PULZNĚ ŠÍRKOVÁ MODULACE.....	22
2.2 SIMULACE TŘÍUROVŇOVÉHO MĚNIČE S UPÍNACÍMI DIODAMI	25
2.2.1 <i>Závislost vyšších harmonických na použité PWM modulaci</i>	28
2.3 SIMULACE TŘÍUROVŇOVÉHO MĚNIČE S PLOVOUCÍMI KAPACITAMI	32
3 SIMULACE VYBRANÝCH JEVŮ.....	34
3.1 ROZBĚH	34
3.2 SKOKOVÁ ZMĚNA ZÁTĚŽE.....	36
3.3 SKOKOVÁ ZMĚNA NAPÁJECÍHO NAPĚTÍ	38
3.4 NÁHLÝ VÝPADEK NAPÁJECÍHO NAPĚTÍ	40
ZÁVĚR.....	42
POUŽITÁ LITERATURA	43

Úvod

V dnešní době, kdy výkonové součástky jsou na hranici možností z hlediska použití pro vysoká napětí a současně jsou stále vyšší výkonové požadavky, proto bylo zapotřebí obejít toto omezení součástek a najít způsob, kterým spínat i velké výkony.

Jednou z možností jak toho dosáhnout je využití sériového spojení spínacích součástek, což však skýtá mnoho nevýhod v podobě složitého řízení a obtížnosti rovnoměrně rozložit napětí na jednotlivých spínacích součástkách.

Další možností je využití topologií víceúrovňových měničů, u kterých se využívá více zdrojů stejnosměrného napětí a vhodným spínáním součástek můžeme vytvořit výstupní napětí složené z úrovní zmíněných vstupních zdrojů. Výhoda víceúrovňových měničů spočívá v nižších spínacích frekvencích součástek, což má za následek nižší obsah vyšších harmonických složek a následně menšího rušení.

Předkládaná diplomová práce je zaměřena v první části na rešerši základních topologií víceúrovňových měničů, kde jsou podrobně popsány jejich principy, vlastnosti, spínací kombinace, výhody a nevýhody.

V druhé části této práce je popsána simulace dvou vybraných topologií tříúrovňových měničů a to s upínacími diodami a s plovoucími kapacitami. Simulace jsou vytvořeny v programu Matlab/Simulink s použitím nadstavbové knihovny pro výkonovou elektroniku PLECS. První část této kapitoly je zaměřena na vytvoření PWM, která je využívána při simulacích v bloku řízení. Následně jsou rozebrány způsoby vytvoření PWM použitých pro řízení tříúrovňového měniče s upínacími diodami, s vyhodnocením vyšších harmonických složek ve výstupním fázovém napětí zátěže.

Ve třetí části jsou popsány simulace dynamických jevů, jimiž jsou rozběh, skoková změna zátěže, skoková změna napájecího napětí a náhlé vypnutí napájecího napětí, které byly provedeny na vytvořených simulačních modelech tříúrovňových měničů.

Seznam symbolů

U_d - stejnosměrné napájecí napětí

u_{10}, u_{20}, u_{30} - fázové napětí měniče

u_{z1}, u_{z2}, u_{z3} - fázové napětí zátěže

i_{z1}, i_{z2}, i_{z3} - fázový proud zátěže

S1, S2, S3, S4 - spínací součástky

DS1, DS2, DS3, DS4 - zpětné diody spínacích součástek

PWM - Pulse Wide Modulation (pulzně šířková modulace)

SM - Submodul

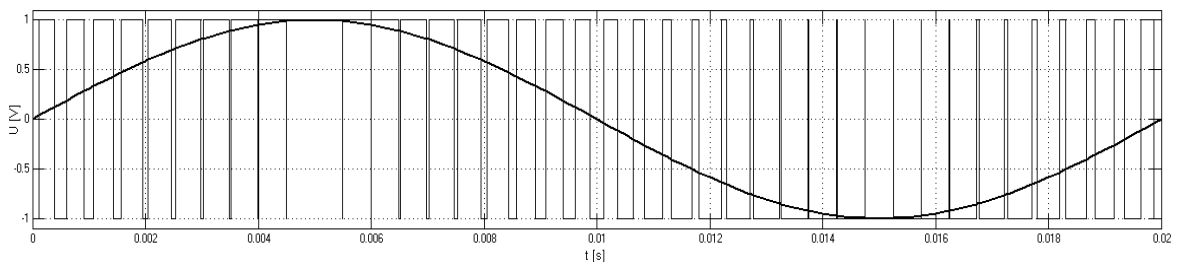
M^2LC - Modular Multilevel Converter (modulární víceúrovňový měnič)

THD - Total Harmonic Distortion (celkové harmonické zkreslení)

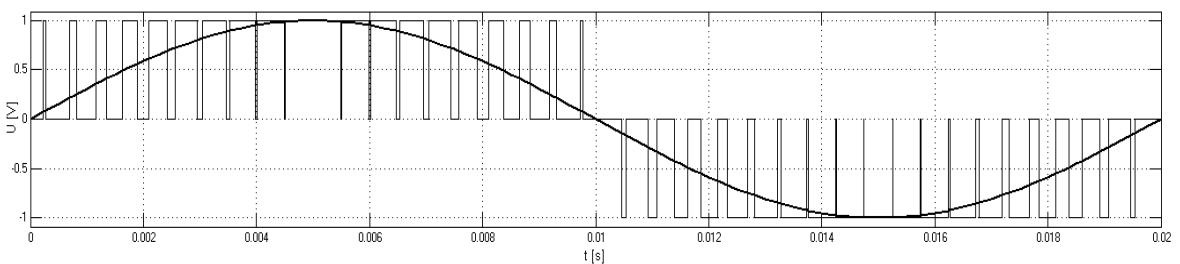
1 Rešerše topologií víceúrovňových měničů

V dnešní době zatím nejsou k dispozici součástky, kterými bychom mohli přímo spínat vysoká napětí. Lze toho však docílit sériovým řazením součástek, což skýtá mnoho technických problémů, nebo využít jinou topologii, u níž není využito sériového řazení, a to víceúrovňových měničů. Víceúrovňovými měniči lze dosáhnout snížení obsahu vyšších harmonických bez zvýšení spínací frekvence. Další výhodou je možnost jimi zaměnit stávající střídače díky velmi podobným vlastnostem.

Klasické nebo také dvouúrovňové napěťové střídače využívají pouze dvě úrovně fázového napětí viz *Obr. 1.1*, kdežto u víceúrovňových jak je patrné z názvu má fázové napětí střídače více úrovní viz *Obr 1.2*.



Obr. 1.1 Fázového napětí klasického dvouúrovňového střídače



Obr. 1.2 Fázové napětí tříúrovňového střídače

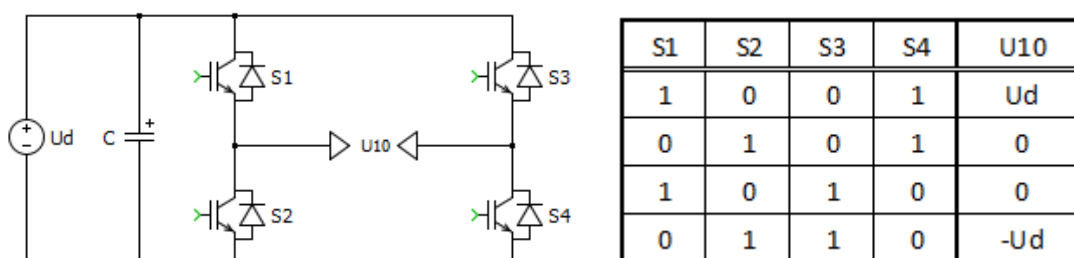
Dle topologie lze rozdělit víceúrovňové měniče na několik druhů:

- Kaskádní víceúrovňové měniče
- Víceúrovňové měniče s upínacími diodami
- Víceúrovňové měniče s plovoucími kondenzátory
- Modulární víceúrovňové měniče (M^2LC)

1.1 Kaskádní víceúrovňové měniče

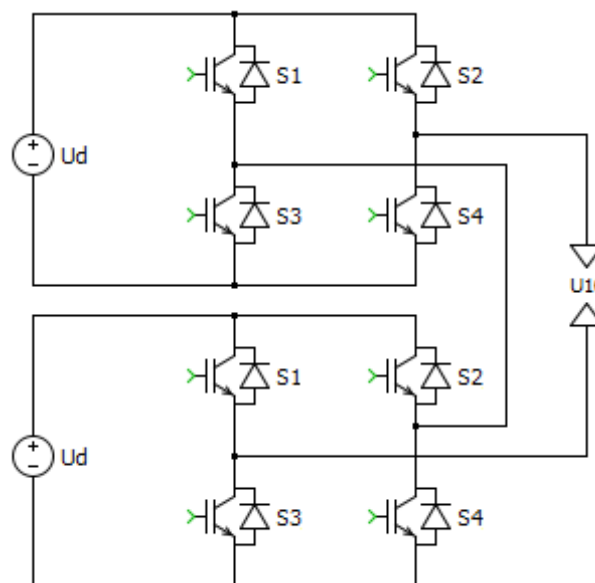
Kaskádní víceúrovňové měniče, nebo také kaskádní spojení H-můstek se začalo používat již v roce 1975. Tento víceúrovňový měnič se skládá z H-můstek. Každý H-můstek má svůj vlastní zdroj stejnosměrného napětí, což je hlavní nevýhodou u těchto měničů. Výhody však spočívají ve snadné modularitě a rozšíření struktury, to vše za použití poměrně malého počtu součástek.

Pro snazší pochopení kaskádního spojení si nejdříve vysvětlíme základní strukturu jednofázového H-můstku. Tuto strukturu můžeme vidět na *Obr. 1.1.1* společně s jeho spínacími kombinacemi, kde 1 představuje sepnutý výkonový prvek a 0 rozepnutý. Z důvodu zkratování vstupního zdroje nesmí být zároveň sepnuty spínače S_1 a S_2 nebo S_3 a S_4 . Z tabulky spínacích kombinací je patrné, že H-můstek má tři výstupní úrovně U_d , 0 a $-U_d$. Chceme-li získat na výstupu $+U_d$, spínače S_1 a S_4 jsou sepnuty, zatímco $-U_d$ lze docílit sepnutím S_2 a S_3 . Sepnutím S_1 a S_3 nebo S_2 a S_4 je na výstupu napětí 0 V.

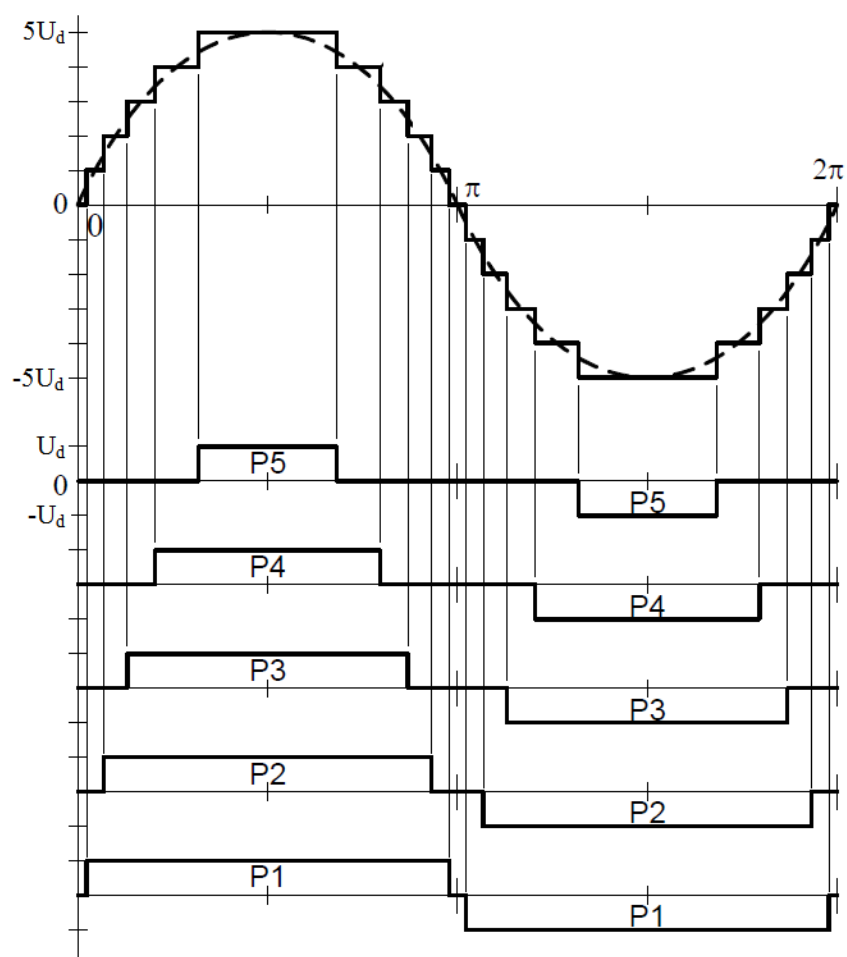


Obr. 1.1.1 Jednofázový H-můstek se spínacími kombinacemi

Kaskádní víceúrovňový měnič lze vytvořit sériovým spojením jednotlivých H-můstek, čímž získáme více úrovní výstupního napětí. Výstupní napětí je pak součtem výstupních napětí jednotlivých H-můstek viz *Obr. 1.1.3*. Počet výstupních úrovní m je roven $2n+1$, kde n je počet zdrojů nebo také H-můstek. Na *Obr. 1.1.2* je zobrazeno zjednodušené schéma jednofázového pětiúrovňového kaskádního měniče, tvořeného ze dvou H-můstek. Jelikož každý z H-můstek může využít čtyři povolené kombinace sepnutí, v případě dvou H-můstek máme šestnáct možností sepnutí. Všechny tyto kombinace můžeme vidět v *Tab. 1.1.1*.



Obr. 1.1.2 Jednofázový pětiúrovňový kaskádní měnič



Obr. 1.1.3 Výstupní napětí pětiúrovňového kaskádního měniče

		Horní můstek			
		S2+S3	S1+S4	S1+S2	S3+S4
Dolní můstek	S2+S3	+U _d	0	+U _d	+U _d
	S1+S4	0	-2U _d	-U _d	-U _d
	S1+S2	+U _d	-U _d	0	0
	S3+S4	+U _d	-U _d	0	0

Tab. 1.1.1 Spínací kombinace pětiúrovňového kaskádního měniče

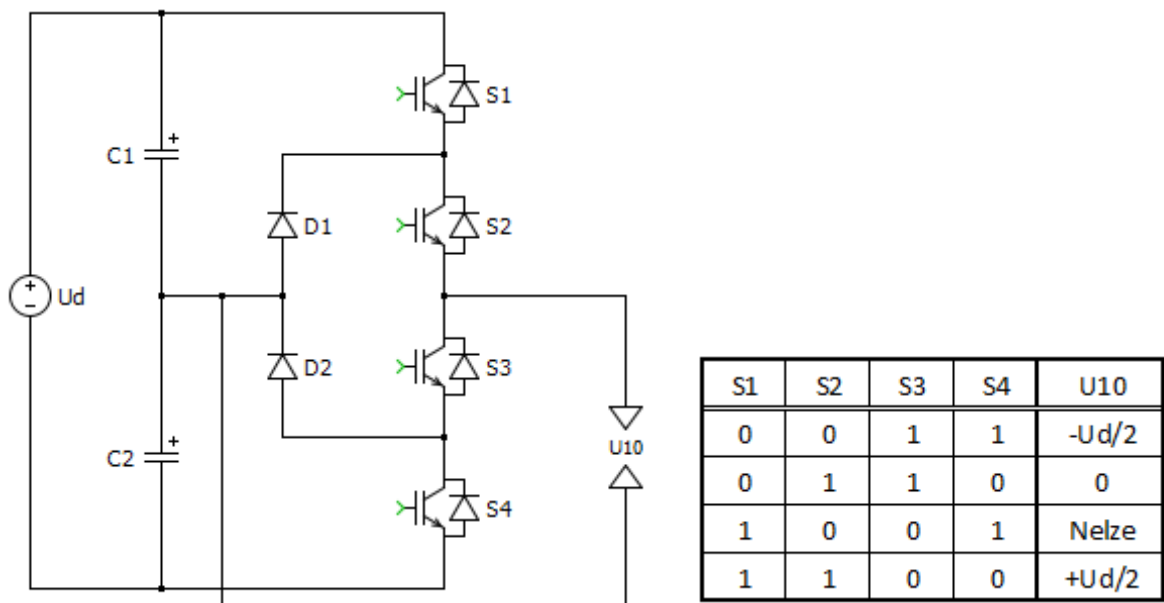
Jak je z Tab. 1.1.1 patrné, některých výstupních napětí lze dosáhnout více kombinacemi, toho lze v praxi s výhodou využít.

Kaskádní víceúrovňové měniče byly navrženy především pro aplikace využívající obnovitelných zdrojů energie nebo např. pro aplikace napájené bateriemi.

1.2 Víceúrovňové měniče s upínacími diodami

První tříúrovňový měnič s upínacími diodami byl publikován v roce 1981. Později v roce 1990 několik výzkumníků zveřejnilo články s experimentálními výsledky pro čtyř, pěti a šesti úrovňové měniče s upínacími diodami, které se používají do dnešní doby.

Princip spínání si vysvětlíme na základním zapojení jednofázového tříúrovňového měniče viz *Obr. 1.2.1*. Tato topologie využívá dvou kondenzátorů, které nám zajišťují rozložení stejnosměrného napájení. Na každém z kondenzátorů je nutné udržovat napětí $U_d/2$. Dále schéma obsahuje dvě diody, které jsou spojeny v takzvaném nulovém bodu, a čtyři spínací součástky se zpětnými diodami. Měnič využívá komplementárního spínání, kdy se vypne S_1 a sepne S_3 a naopak nebo vypne S_2 a sepne S_4 a naopak. Stav kdy je sepnutý S_1 a zároveň S_4 je zakázaný neboť by mohlo dojít ke zničení spínacích prvků vlivem vyrovnávacích proudů. Ostatní spínací kombinace můžeme vidět na *Obr. 1.2.1*.

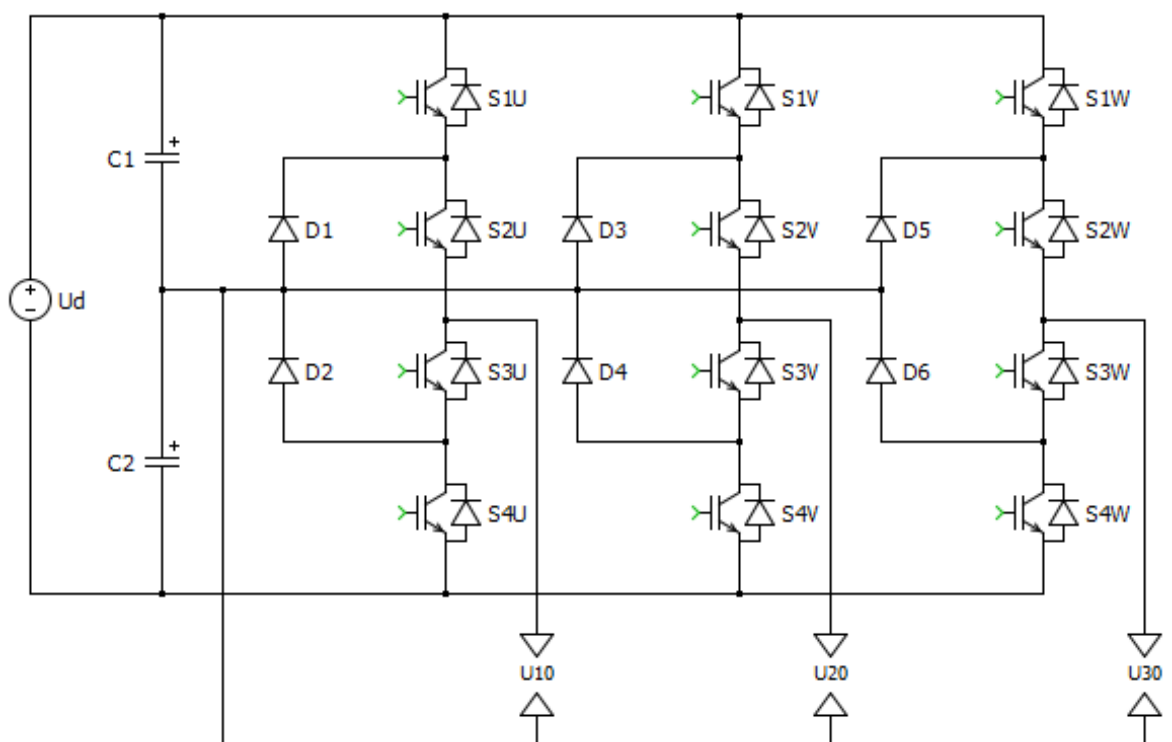


Obr. 1.2.1 Jednofázový tříúrovňový měnič s upínacími diodami se spínacími kombinacemi

Ve třífázovém zapojení tříúrovňového měniče s upínacími diodami viz *Obr. 1.2.2* ovlivňují poměry v jedné fázi i fáze ostatní, což je zapříčiněno společným nulovým bodem. Princip spínání střídače je patrný z *Tab. 1.2.1*, vztahující se *Obr. 1.2.2*. Vedení zpětné diody spínacího prvku S1U je v tabulce označeno DS1U a podobné značení je i v ostatních fázích.

u_{10}, u_{20}, u_{30}		$-U_d/2$	0	$U_d/2$
i_{z1}	> 0	DS3U, DS4U	D1, S2U	S1U, S2U
i_{z2}		DS3V, DS4V	D3, S2V	S1V, S2V
i_{z3}		DS3W, DS4W	D5, S2W	S1W, S2W
i_{z1}	< 0	S3U, S4U	D2, S3U	DS1U, DS2U
i_{z2}		S3V, S4V	D4, S3V	DS1V, DS2V
i_{z3}		S3W, S4W	D6, S3W	DS1W, DS2W

Tab. 1.2.1 Spínací kombinace třífázového tříúrovňového měniče s upínacími diodami



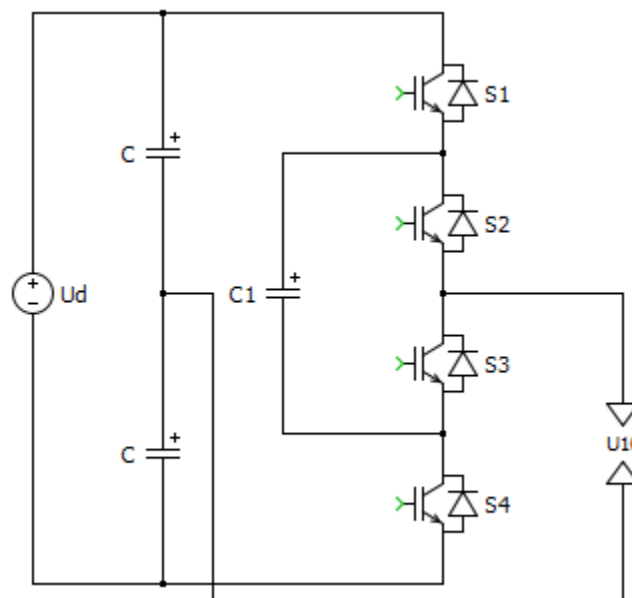
Obr. 1.2.2 Třífázový tříúrovňový měnič s upínacími diodami

Velkou nevýhodou víceúrovňových měničů s upínacími diodami je kolísání napětí na kapacitním děliči. V případě více než čtyř úrovní výstupního fázového napětí nelze stabilizaci napětí na kondenzátorech zajistit řízením a je proto nutné použití dodatečných silových obvodů. Další nevýhodou je poměrně velké množství použitých součástek.

1.3 Víceúrovňové měniče s plovoucími kondenzátory

Víceúrovňový měnič s plovoucími kondenzátory byl představen v roce 1992 a vychází z předchozí topologie s upínacími diodami s cílem zjednodušit nároky na symetrizaci napětí na kondenzátorech.

U tohoto měniče odpadají upínací diody a v třífázovém provedení i vstupní kondenzátory, ale naopak na místě upínacích diod přibývají plovoucí kondenzátory. Jmenovité napětí na těchto kondenzátorech je možné udržovat řízením a nejsou tedy potřebné pomocné silové obvody. Další výhodou měniče je možnost získání výstupního napětí více kombinacemi sepnutí.



Obr. 1.3.1 Jednofázový tříúrovňový měnič s plovoucími kondenzátory

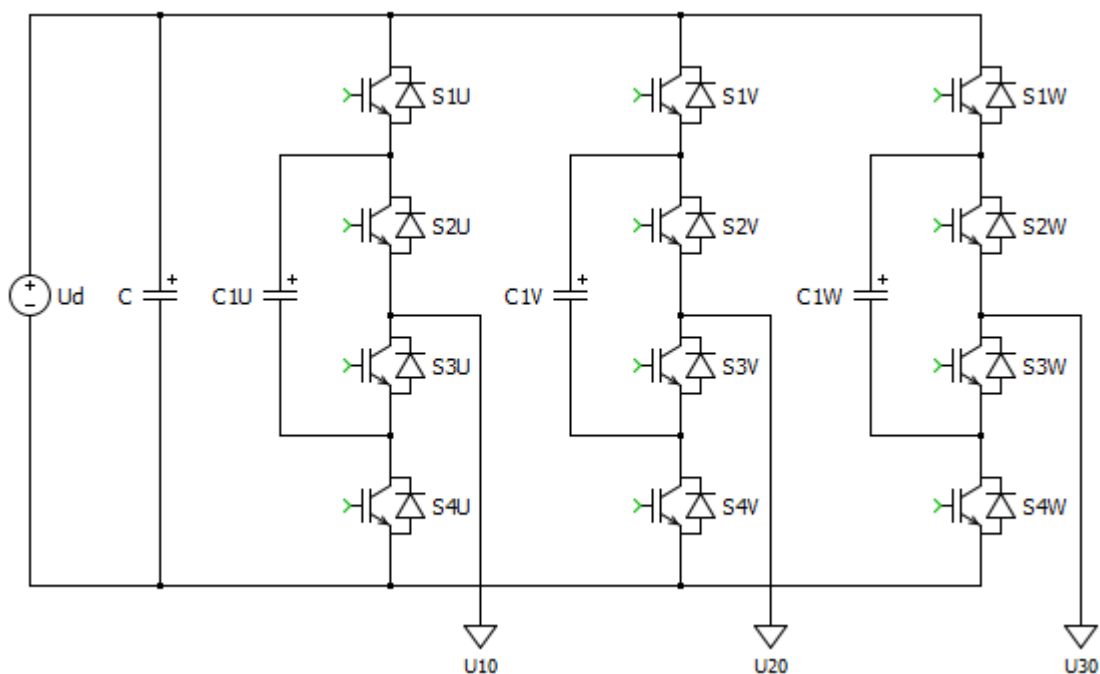
Jak je patrné z Obr. 1.3.1 v případě jednofázového měniče je nutné mít vytvořen střed meziobvodu kapacitním děličem. To však sebou nese nevýhodu v podobě kolísání napětí na jednotlivých kondenzátorech jako v případě upínacích diod. Ve třífázovém měniči odpadá nevýhoda vytváření středu meziobvodu, jak je vidět zapojení měniče na Obr. 1.3.2.

Spínací kombinace měniče jsou zobrazeny v Tab. 1.3.1 a je nutné se opět v řídicí logice vyhnout zakázanému stavu, kdy jsou zároveň sepnuty spínače S_1 a S_4 jako tomu bylo u měniče s upínacími diodami, při kterém by docházelo ke zkratu napájecího zdroje a následnému zničení spínacích prvků.

S1	S2	S3	S4	U10
0	0	1	1	$-U_d/2$
0	1	0	1	0
1	0	1	0	0
1	1	0	0	$+U_d/2$

Tab. 1.3.1 Spínací kombinace tříúrovňového měniče s plovoucími kondenzátory

Spínání zde opět probíhá komplementárně, kdy se vypne S_1 a sepne S_4 a naopak nebo vypne S_2 a sepne S_3 a naopak.

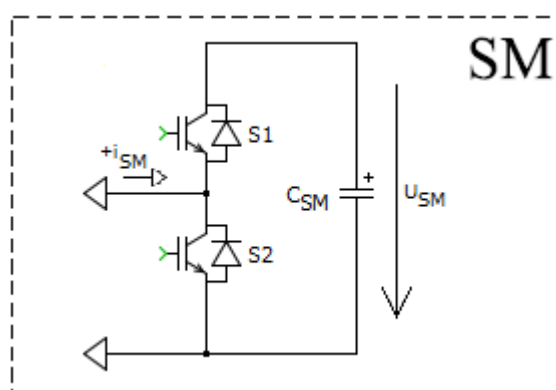


Obr. 1.3.2 Třífázový tříúrovňový měnič s plovoucími kondenzátory

Díky velkému počtu kondenzátorů je možné využít měničů s plovoucími kapacitami i tam kde dochází ke krátkým výpadkům nebo hlubokým poklesům napájecího napětí. Nevýhodou však je poměrně složité řízení z důvodu nutnosti sledování napětí na všech kondenzátorech, ale také špatná účinnost pro skutečný přenos energie. Oproti upínacím diodám je velké množství plovoucích kondenzátorů finančně nákladnější a také rozměrově náročnější.

1.4 Modulární víceúrovňové měniče (M^2LC)

První testy modulárního víceúrovňového měniče byly provedeny v roce 2003. V dnešní době patří tato topologie k těm nejoblíbenějším a to především díky své snadné modularitě a přizpůsobivosti. Měnič se skládá ze dvou ramen pro každou fázi výstupního napětí a každé rameno obsahuje takzvané submoduly. Vnitřní schéma submodulu je zobrazeno na *Obr. 1.4.1* a jak můžeme vidět, skládá se ze dvou spínacích součástek se zpětnými diodami a z jednoho kondenzátoru. Výstupní napětí submodulu může nabývat hodnot 0 a $+U_{SM}$. Možné spínací kombinace jsou zobrazeny v *Tab. 1.4.1*.



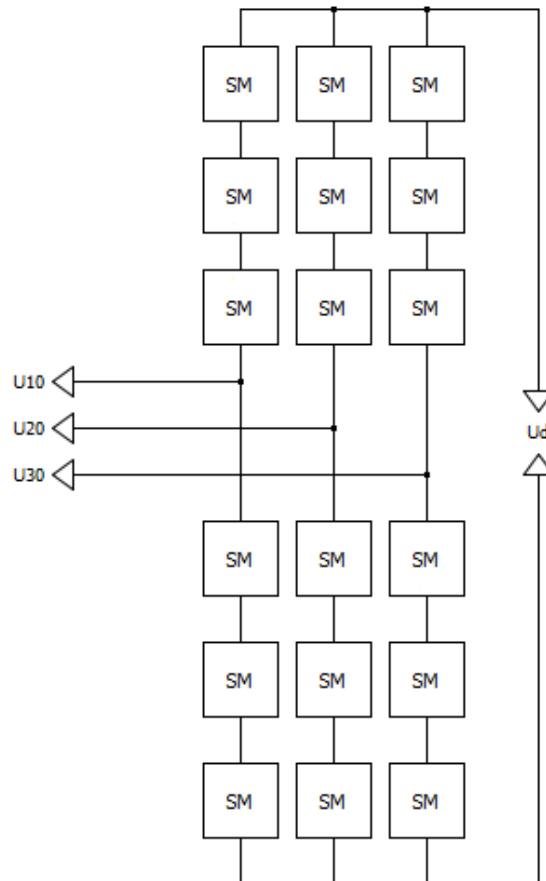
Obr. 1.4.1 Vnitřní schéma submodulu

Jako spínací součástky S1 a S2 se používají IGBT tranzistory, i_{SM} je proud procházející submodulem a U_{SM} je napětí na svorkách submodulu.

S1	S2	i_{SM}	U_{SM}	C
1	0	+	U_{SM}	+
1	0	-	U_{SM}	-
0	1	+	0	0
0	1	-	0	0

Tab. 1.4.1 Spínací kombinace submodulu

Na *Obr. 1.4.2* je zobrazen třífázový modulární víceúrovňový měnič. Uspořádání je takové, že i v případě poruchy jednotlivého submodulu, je měnič stále schopen spolehlivě pracovat. V případě výměny vadného submodulu není nutné měnič vypínat a lze opravu provést i za chodu.



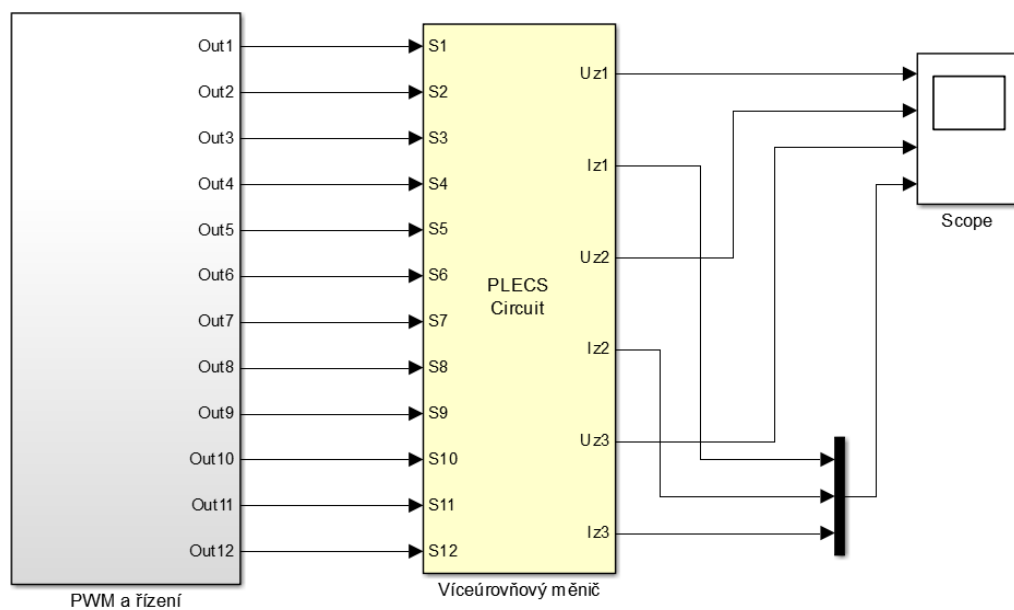
Obr. 1.4.2 Modulární víceúrovňový měnič

Další výhodou modulárních měničů je schopnost pracovat ve slabých sítích. To umožňuje připojení například větrných elektráren přímo na veřejnou síť bez nutnosti transformátorů nebo složitějších síťových odrušovacích filtrů. Měniče mívají často až několik set hladin, výstupní fázová napětí jsou proto velmi kvalitní.

2 Sestavení simulačního modelu

Tato diplomová práce se dále zabývá simulací dvou topologií tříúrovňových měničů a to s upínacími diodami a plovoucími kapacitami. Simulační modely byly vytvořeny za pomoci programu Matlab/Simulink a knihovny PLECS, která je určena pro simulace elektrických pohonů a výkonové elektroniky. Všechny provedené simulace a detailní zapojení, jsou uloženy na CD, které je nedílnou součástí této diplomové práce. Modely se vždy skládají z jednotlivých bloků, jimiž jsou:

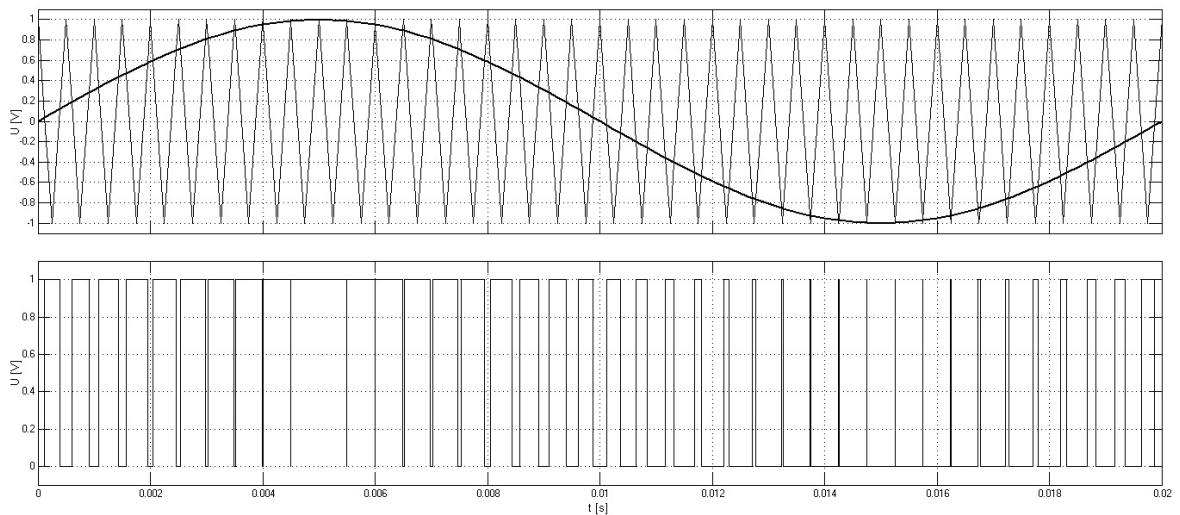
- pulzně šířková modulace (PWM) s řízením spínacích součástek
- vlastní obvod víceúrovňového měniče včetně zátěže, vytvořený v knihovně PLECS
- zobrazení výstupních signálů



Obr. 2.1 Blokové schéma simulačního modelu třífázového víceúrovňového měniče

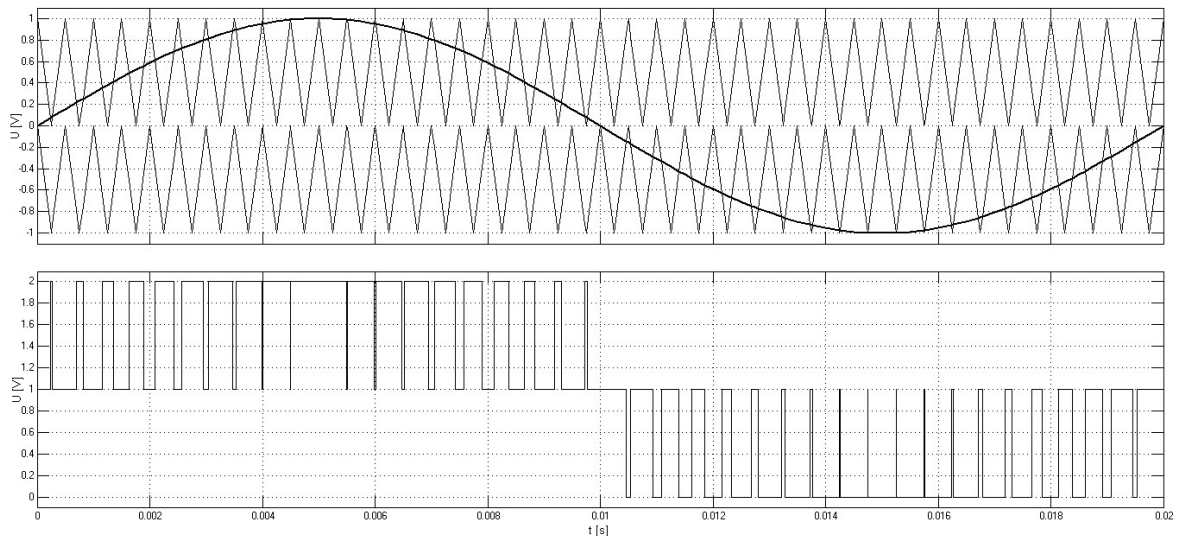
2.1 Pulzně šířková modulace

Pulzně šířková modulace je vytvořena porovnáním signálu nosného a řídicího. Jako nosný signál je nejčastěji používán pilový průběh, který má vyšší frekvenci oproti sinusovému řídicímu signálu. V případě, že dojde k protnutí těchto dvou signálů, vzniká takzvaná koincidence, která zapříčiní změnu stavu výstupního signálu. Na *Obr. 2.1.1* je zobrazena tvorba PWM, kde v horní části je možné vidět řídicí signál zároveň s nosnou a v dolní části výstupní signál pulzně šířkové modulace.



Obr. 2.1.1 Dvouúrovňová pulzně šířková modulace

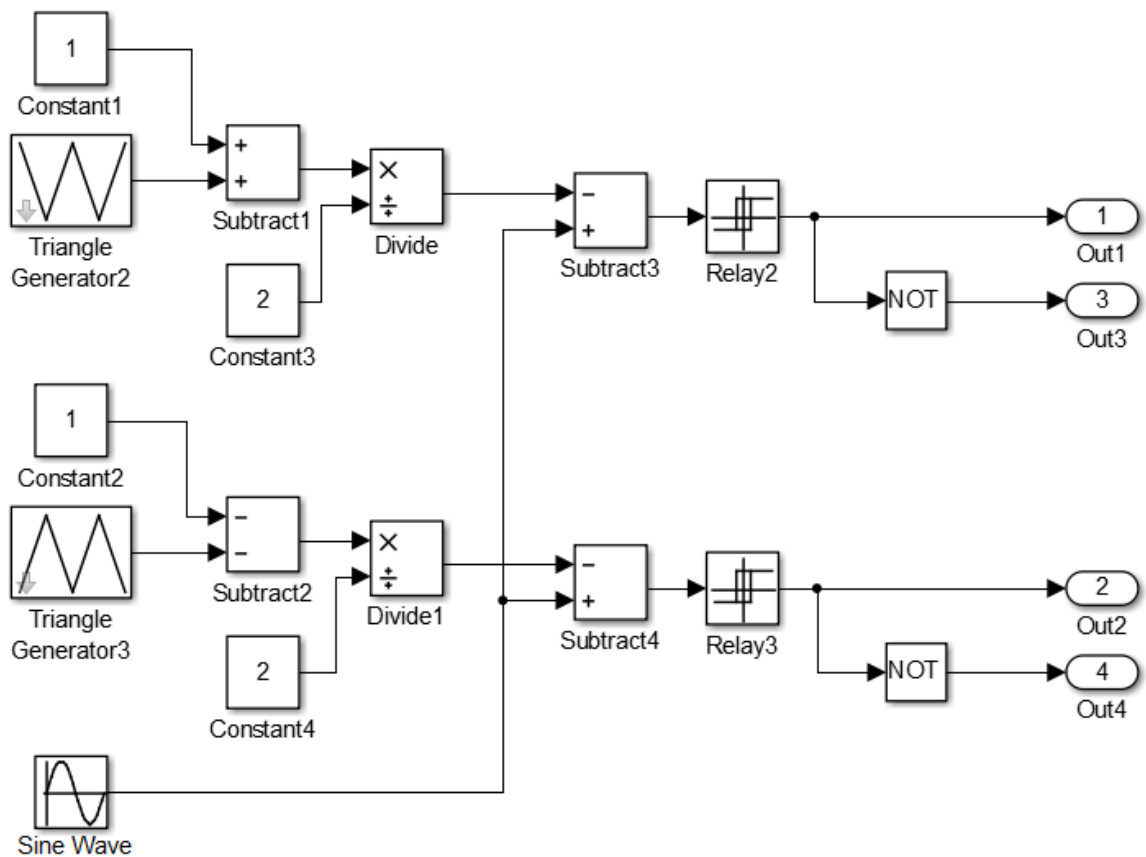
Takto vytvořeným signálem však můžeme ovládat pouze dvouúrovňový měnič. V případě použití PWM k řízení víceúrovňových měničů je zapotřebí větší počet nosných signálů. Tento počet lze vyjádřit pomocí vzorce $n = m - 1$, kde n je počet nosných a m počet úrovní měniče. Z tohoto vzorce vyplývá, že pro naše simulované tříúrovňové topologie budeme potřebovat dva nosné pilové signály dle *Obr. 2.1.2*.



Obr. 2.1.2 Tříúrovňová pulzně šířková modulace

Vytvořený model PWM v Matlab/Simulink je možné vidět na *Obr. 2.1.3*. Řídicí signál je v našem případě řešen pomocí bloku *Sine Wave*, který generuje sinusový signál se zadanou amplitudou 1 V a frekvencí 50 Hz. Nosné pilové signály jsou vytvořeny pomocí *Triangle Generator* s frekvencí 2 kHz a za použití konstant a matematických operátorů posunuty do správné polohy vůči řídicímu signálu viz horní část *Obr. 2.1.2*. Takto vytvořené signály jsou odečteny v bloku *Subtract* od řídicího signálu a následně porovnány s nulovou hodnotou. Výstupem jsou následně průběhy nabývající hodnot 0 nebo 1 v závislosti na řídicím signálu. V případě sečtení těchto dvou výstupních signálů, je výsledný průběh zobrazen na dolní části *Obr. 2.1.2*. Pro naše účely řízení tříúrovňového měniče však signály jsou přivedeny přímo nebo pomocí negace *NOT* na ovládací vstupy spínacích součástek.

Nosné signály je možné uspořádat vůči řídicímu signálu několika způsoby, čímž lze docílit, že výstupní napětí víceúrovňového měniče obsahuje menší počet vyšších harmonických. Podrobněji viz simulace v *kapitole 2.2.1*.

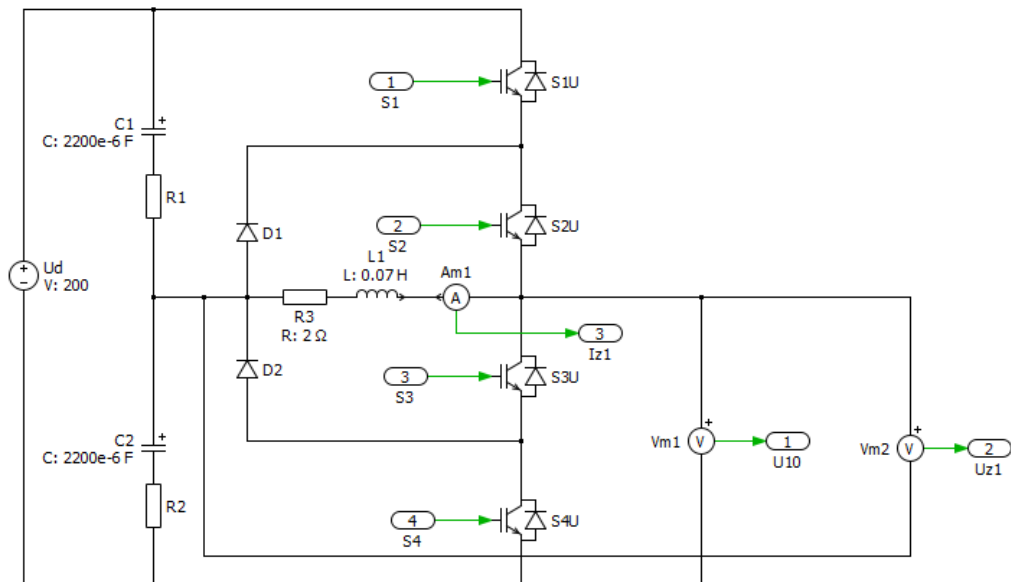


Obr. 2.1.3 Pulzně šířková modulace s řídicí částí

Takto vytvořená pulzně šířková modulace je v simulacích vždy zobrazena jako jeden blok, z něhož vedou výstupní řídicí signály a vstupují do simulovaného měniče.

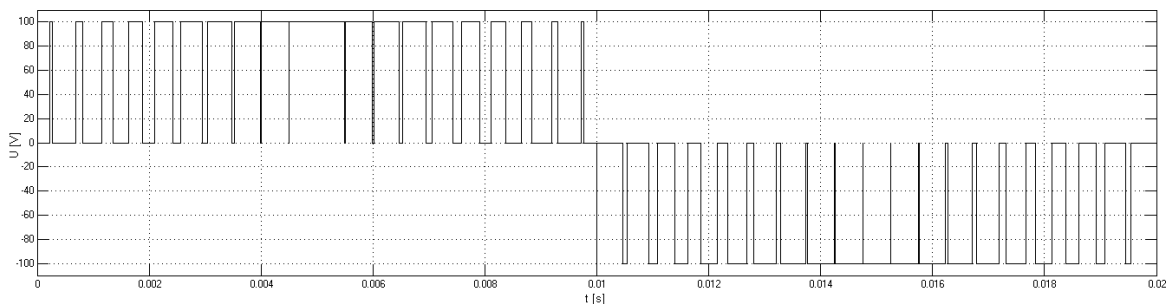
2.2 Simulace tříúrovňového měniče s upínacími diodami

Simulační model byl vytvořen v knihovně PLECS podle schématu jednofázového tříúrovňového měniče s upínacími diodami dle *Obr. 2.2.1* a následně ve třífázovém zapojení viz *Obr. 2.2.4*.



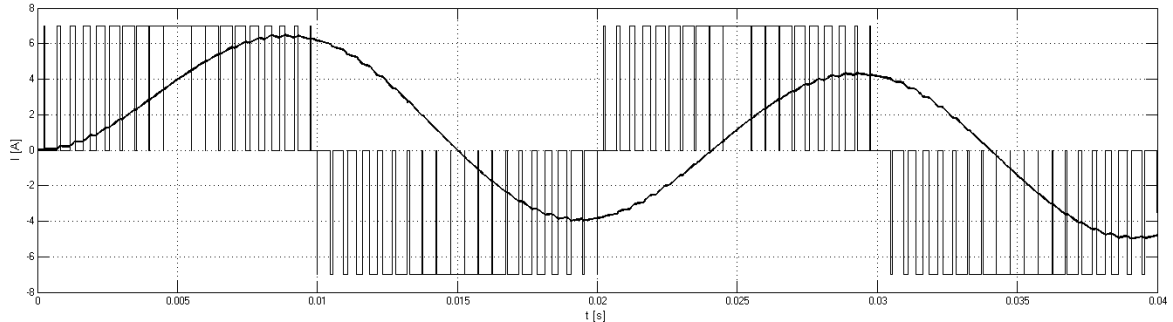
Obr. 2.2.1 Simulační schéma jednofázového tříúrovňového měniče s upínacími diodami

V případě jednofázového zapojení bylo zvoleno napájení tříúrovňového měniče napětím $U_d = 200$ V a simulovaná zátěž měniče formou odporu $R = 2 \Omega$ a indukčnosti $L = 0,07$ H. Nejprve bylo zaznamenáno výstupní fázové napětí, měřené mezi výstupem víceúrovňového měniče a takzvaným nulovým bodem, při nezatíženém měniči. Průběh napětí je zobrazen na *Obr. 2.2.2* a podle teoretických předpokladů nabývá hodnot $U_d/2$, v našem případě 100 V, 0 V a $-U_d/2$ (-100 V).



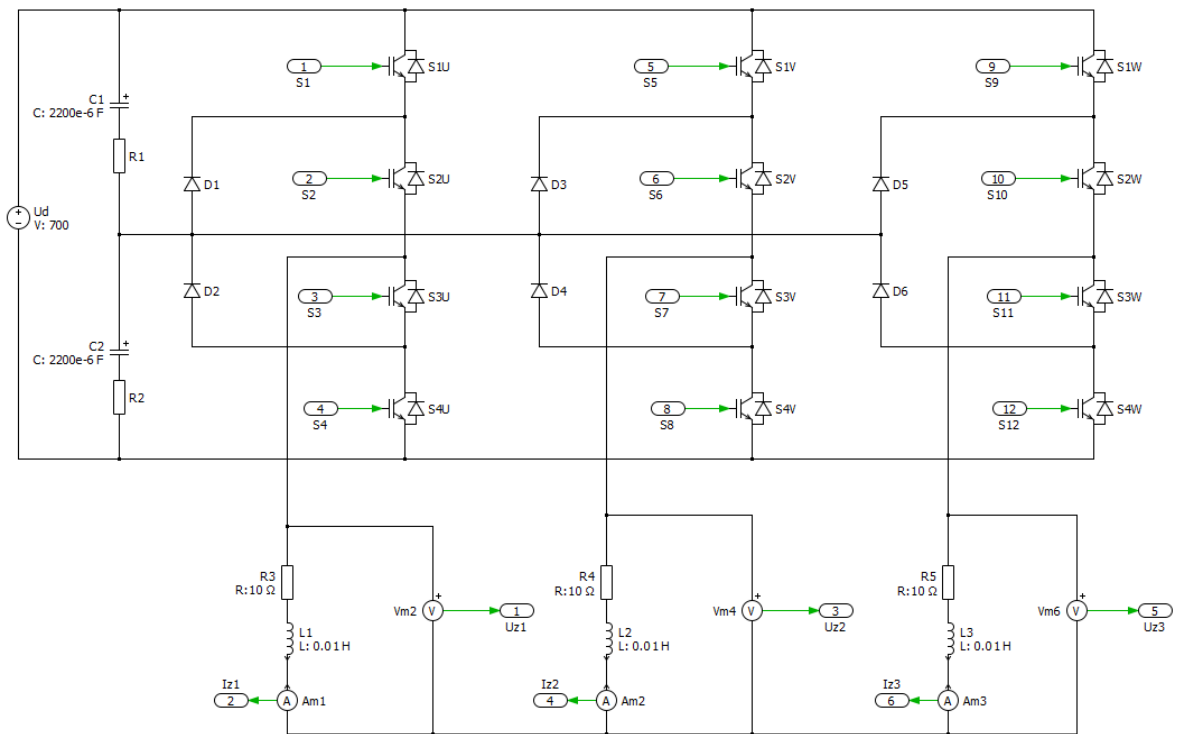
Obr. 2.2.2 Fázové napětí tříúrovňového měniče s upínacími diodami

Po připojení výše zmiňované zátěže, je možné měřit jí protékající proud. Tento proud je společně s fázovým napětím měniče zobrazen na *Obr. 2.2.3*.

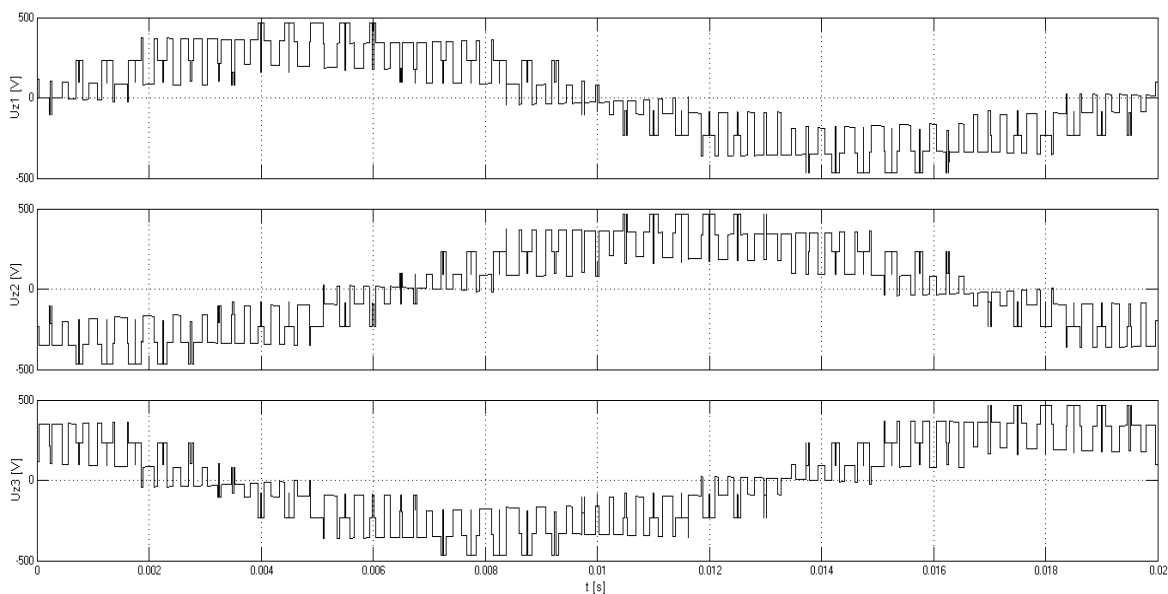


Obr. 2.2.3 Proud jedné fáze protékající zátěží tříúrovňového měniče s upínacími diodami

Třífázové zapojení tříúrovňového měniče bylo simulováno s napájecím napětím $U_d = 700$ V a zátěží zapojenou do hvězdy. Parametry simulované zátěže byly nastaveny $R = 10 \Omega$ a $L = 0,01$ H.

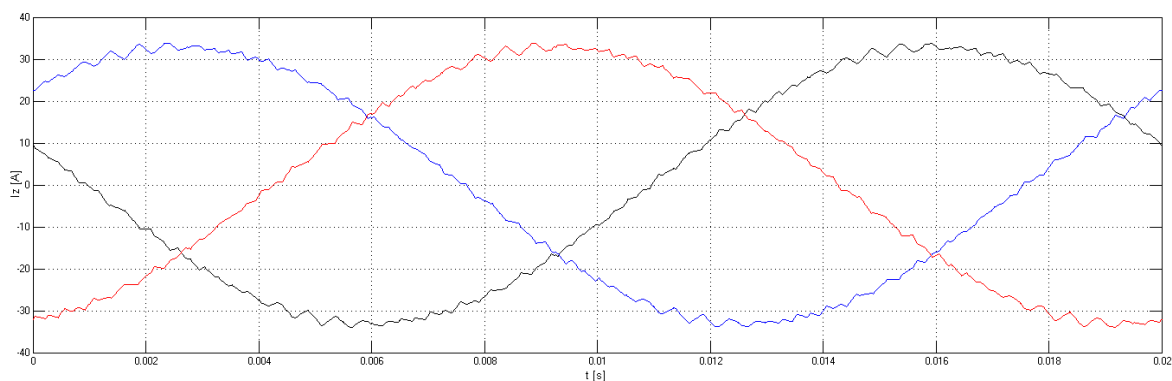


Obr. 2.2.4 Simulační schéma třífázového tříúrovňového měniče s upínacími diodami



Obr. 2.2.5 Fázové napětí zátěže tříúrovňového měniče s upínacími diodami

Fázové napětí zátěže se přibližuje k 500 V, přičemž protékající proud viz Obr. 2.2.6 je přibližně 32 A, což odpovídá výstupnímu výkonu měniče cca 24 kW.

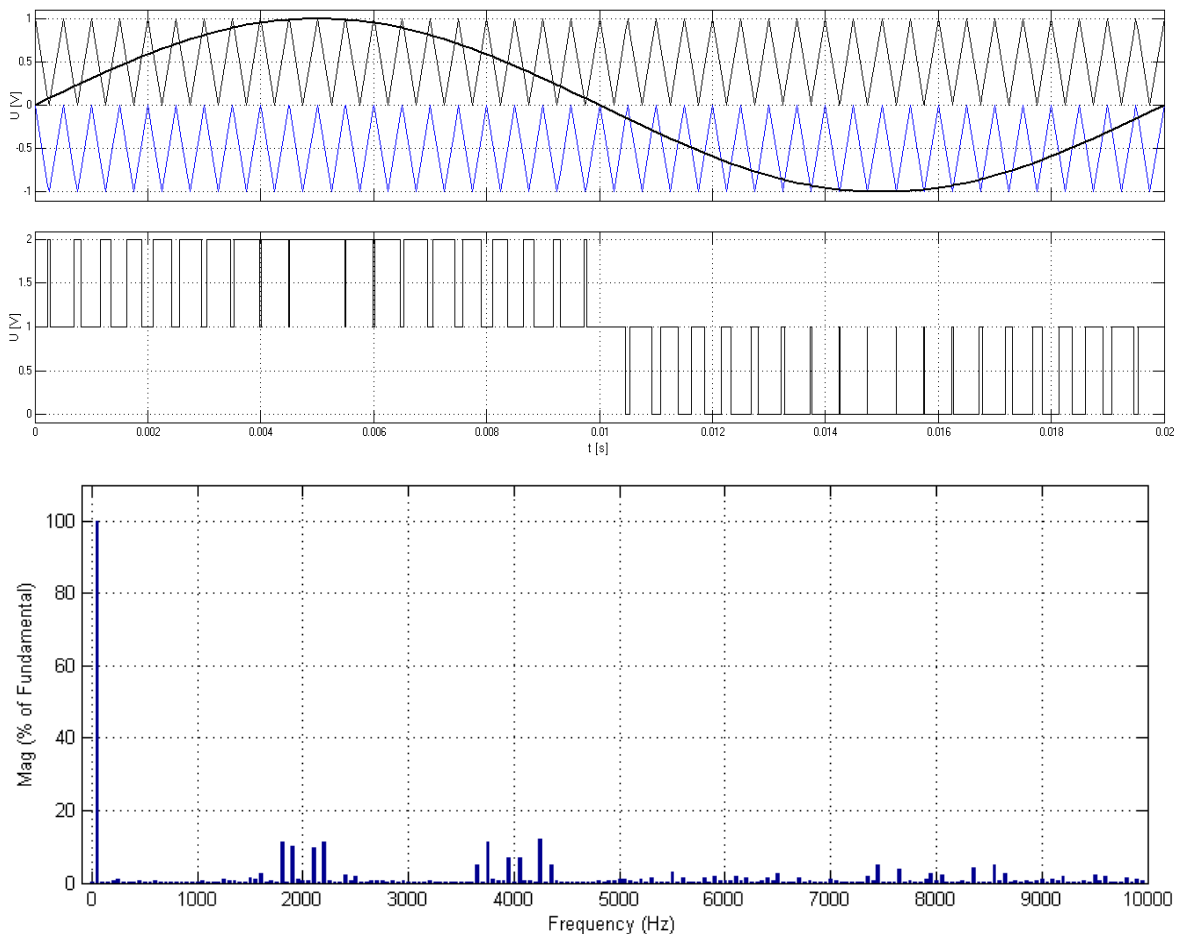


Obr. 2.2.6 Fázové proudy zátěže tříúrovňového měniče s upínacími diodami

2.2.1 Závislost vyšších harmonických na použité PWM modulaci

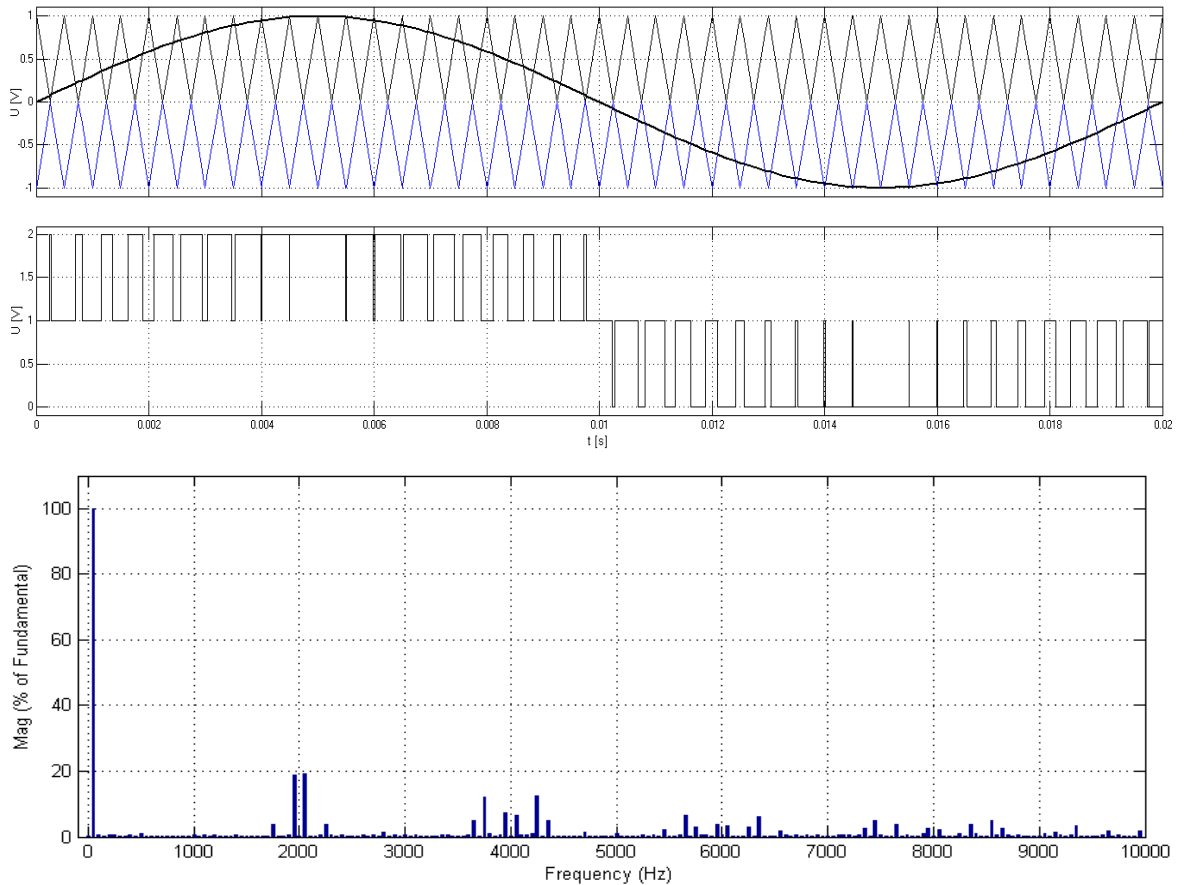
Jak již bylo naznačeno v *Kapitole 2.1*, PWM signál pro spínání víceúrovňového měniče lze vytvořit několika způsoby, kdy nosné signály jsou v různých polohách vůči řídicímu signálu nebo jsou vzájemně posunuty. V této práci si přiblížíme tři způsoby vytvoření PWM, které jsou pro jednoduché rozlišení pojmenovány PWM1, PWM2 a PWM3. Nosné pilové signály mají vždy frekvenci 2 kHz a řídicí sinusový signál 50 Hz.

První možnost modulace signálu (PWM1) byla již použita v předchozí simulaci viz *Obr. 2.2.1.1 nahoře*, kde nosné signály jsou ve fázi a každý kmitá v jedné polovině řídicího signálu. Ze spektra výstupního napětí dle dolní části *Obr. 2.2.1.1* je patrné, že vyšší harmonické složky jsou seskupeny okolo frekvencí odpovídající násobkům spínací frekvence nosných signálů.

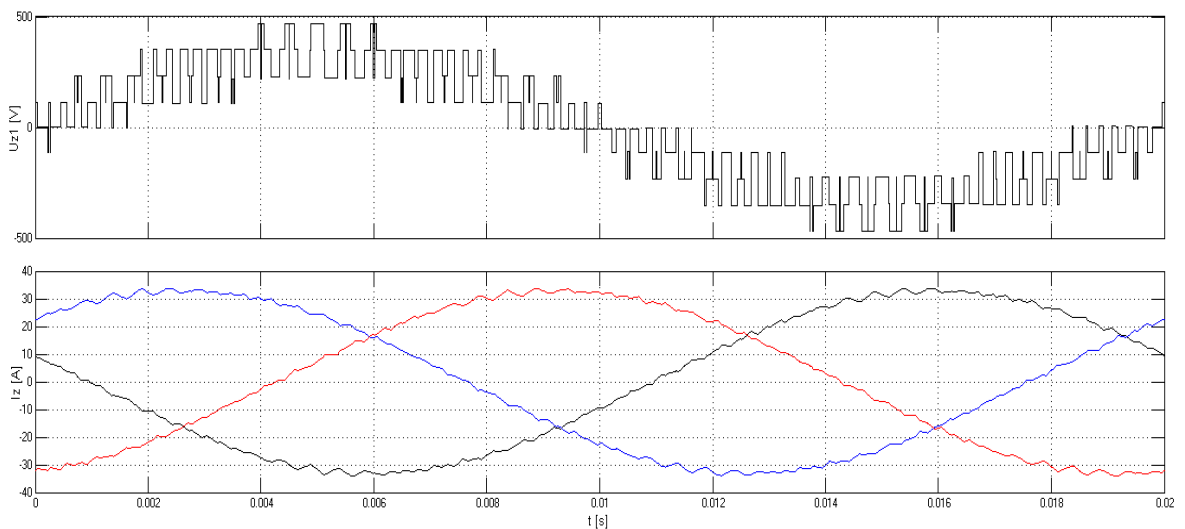


Obr. 2.2.1.1 Modulace PWM1 a spektrum výstupního napětí tříúrovňového měniče

Druhou možností (PWM2) je využití opět dvou pilových signálů kdy jeden je fázově posunut o 180° viz horní část *Obr. 2.2.1.2*. Amplituda nosných signálů je opět poloviční vůči amplitudě řídicího signálu. Spektrum při použití PWM2 modulace je zobrazené na spodní části *Obr. 2.2.1.2*.

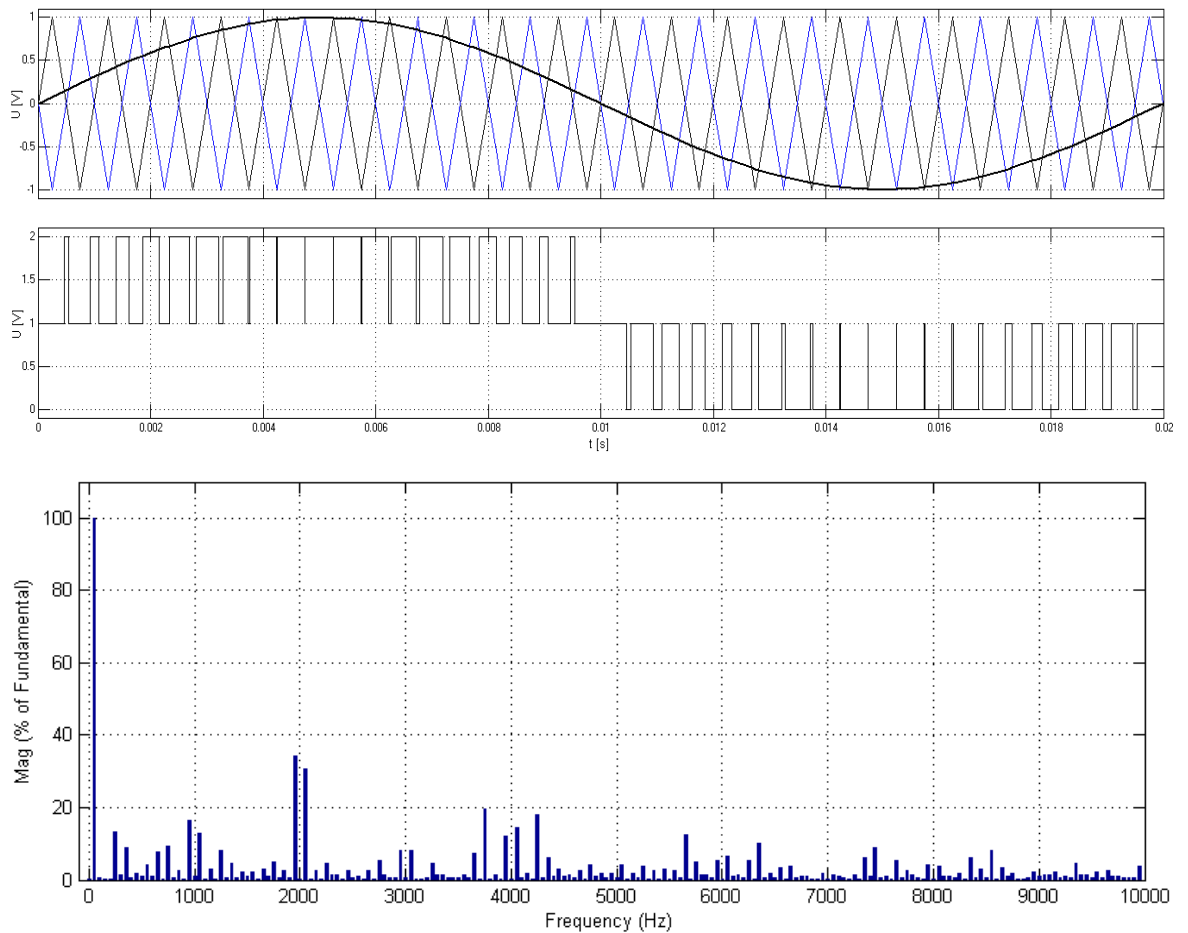


Obr. 2.2.1.2 Modulace PWM2 a spektrum výstupního napětí tříúrovňového měniče

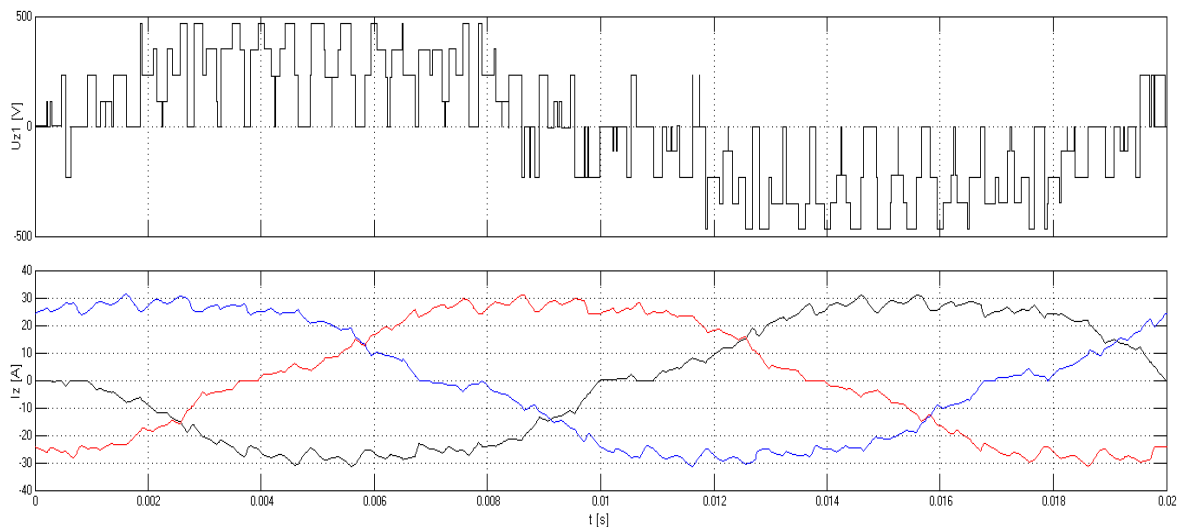


Obr. 2.2.1.3 Fázové napětí zátěže a výstupní proudy při použití modulace PWM2

Ve třetím způsobu modulace (PWM3) jsou použity dva pilové signály avšak jejich amplituda je rovna amplitudě řídicího signálu a vzájemně jsou posunuty o 180° viz horní část *Obr. 2.2.1.4*.



Obr. 2.2.1.4 Modulace PWM3 a spektrum výstupního napětí tříúrovňového měniče



Obr. 2.2.1.5 Fázové napětí zátěže a výstupní proudy při použití modulace PWM3

Celkové zhodnocení počtu vyšších harmonických složek výstupního fázového napětí lze vyjádřit takzvaným THD, což je celkové harmonické zkreslení signálu. THD je definováno, jako poměr součtu všech harmonických složek k základní frekvenci a je vyjádřeno v procentech. Požadavek je, aby signál obsahoval co nejméně vyšších harmonických složek a v důsledku toho, aby byla hodnota THD co nejnižší. Zároveň s měřením spektra jednotlivých modulací bylo provedeno měření THD a výsledky jsou zaznamenány v *Tab. 2.2.1.1.*

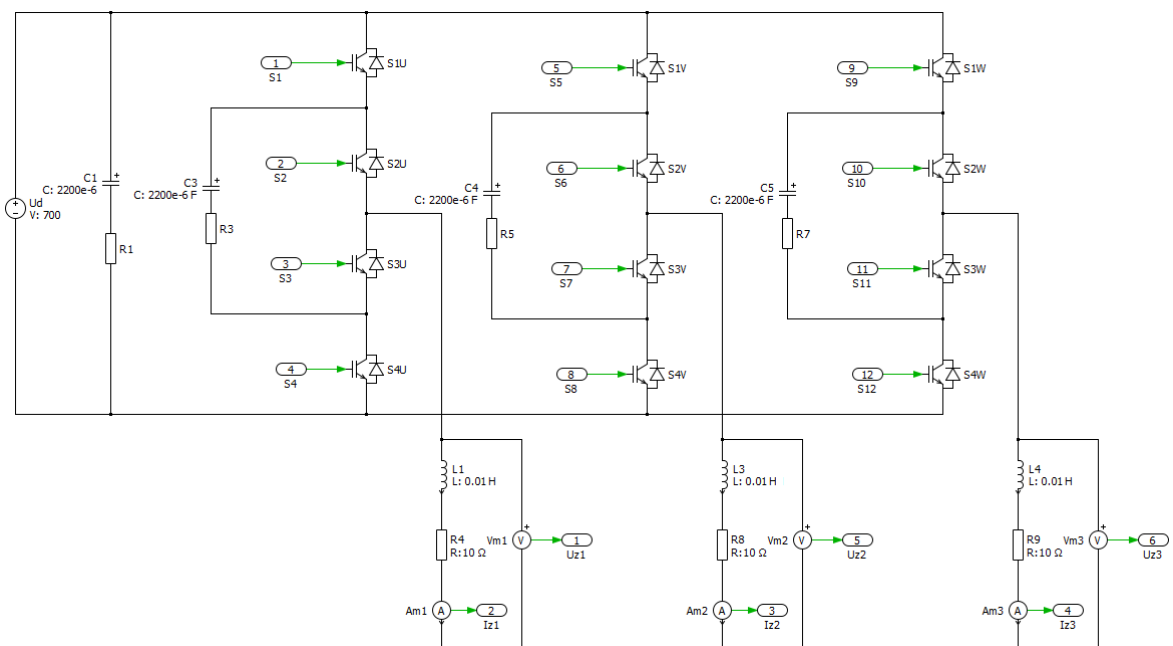
Modulace	THD
PWM1	32,85%
PWM2	38,22%
PWM3	73,74%

Tab. 2.2.1.1 Porovnání THD při použití různých modulací

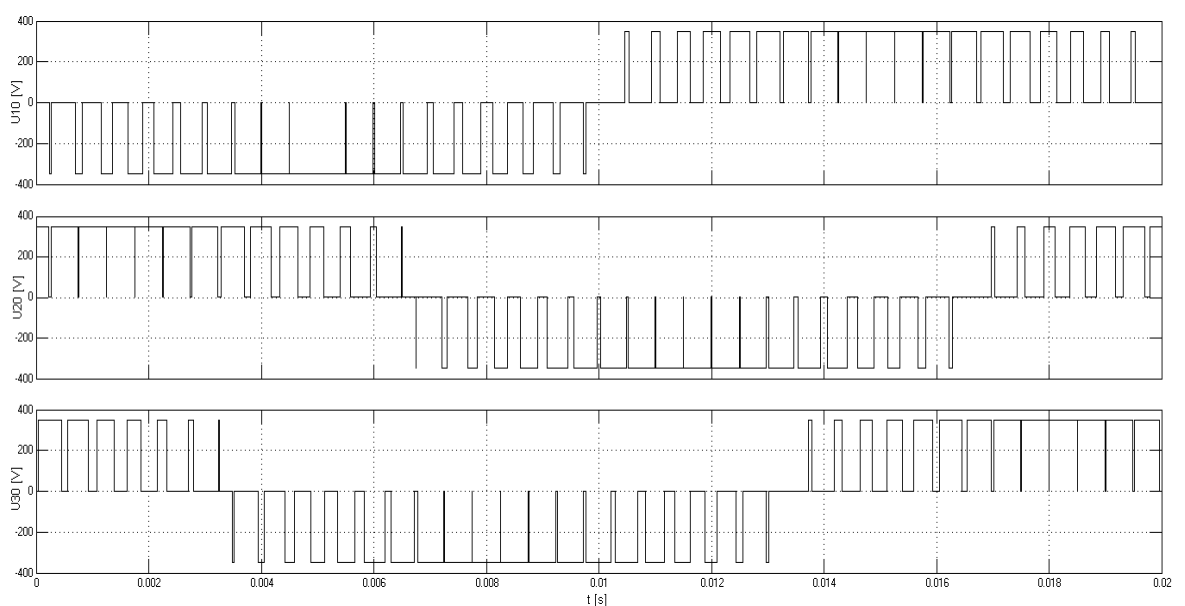
Z tabulky je patrné, že nejméně vyšších harmonických ve výstupním napětí tříúrovňového měniče s upínacími diodami je obsaženo při použití modulace PWM1. Naopak nejvíce vyšších harmonických bylo obsaženo při modulaci PWM3.

2.3 Simulace tříúrovňového měniče s plovoucími kapacitami

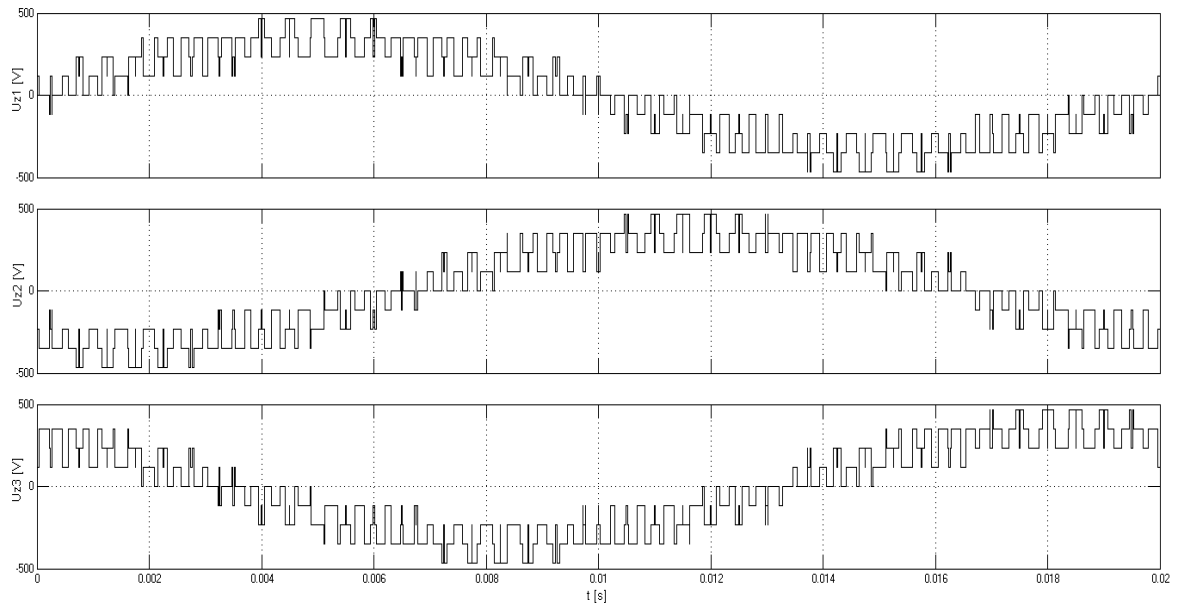
Simulace tříúrovňového měniče s plovoucími kapacitami byla provedena stejným způsobem jako s upínacími diodami. Simulační schéma je zobrazeno na *Obr. 2.3.1*. Jako zátěž byl opět použit odpor $R = 10 \Omega$ a indukčnost $L = 0.01 \text{ H}$. Hodnota plovoucích kapacit byla použita $2200 \mu\text{F}$.



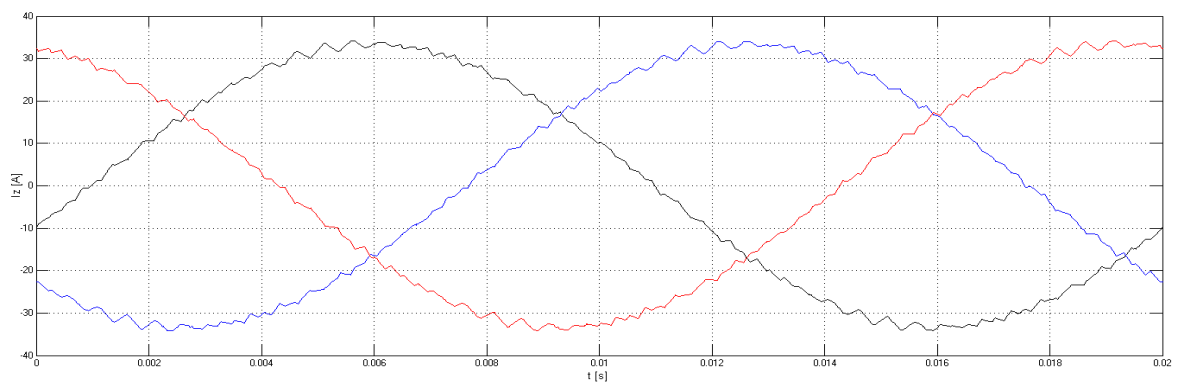
Obr. 2.3.1 Simulační schéma třífázového tříúrovňového měniče s plovoucími kapacitami



Obr. 2.3.2 Fázové napětí tříúrovňového měniče s plovoucími kapacitami



Obr. 2.3.2 Fázové napětí zátěže tříúrovňového měniče s plovoucími kapacitami



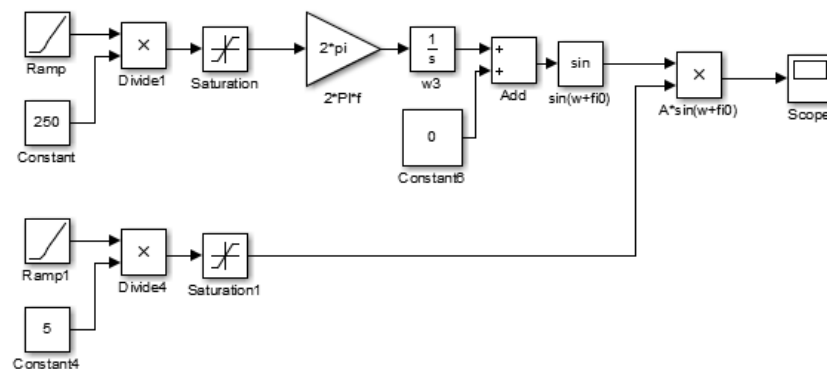
Obr. 2.3.3 Fázové proudy zátěže tříúrovňového měniče s plovoucími kapacitami

Zaznamenaná simulace tříúrovňového měniče s plovoucími kapacitami vykazuje prakticky stejné výsledky jako simulace zapojení tříúrovňového měniče s upínacími diodami.

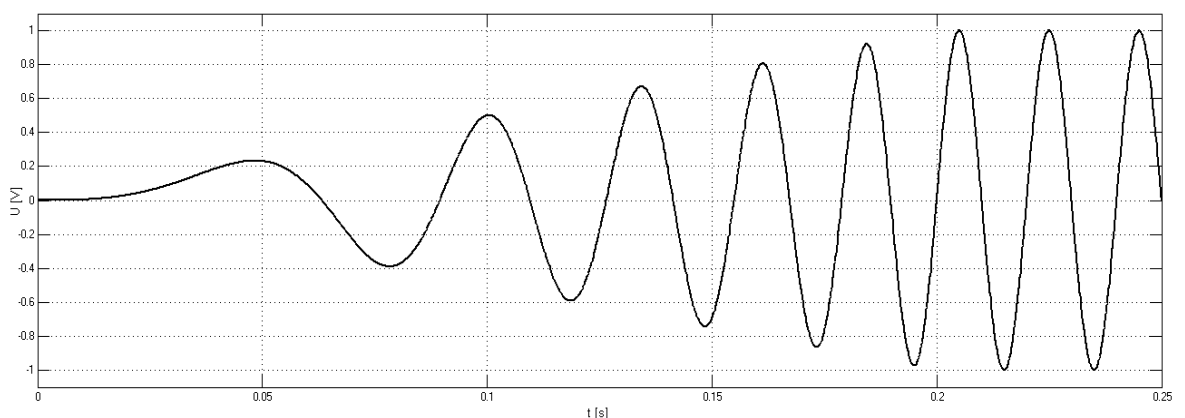
3 Simulace vybraných jevů

3.1 Rozběh

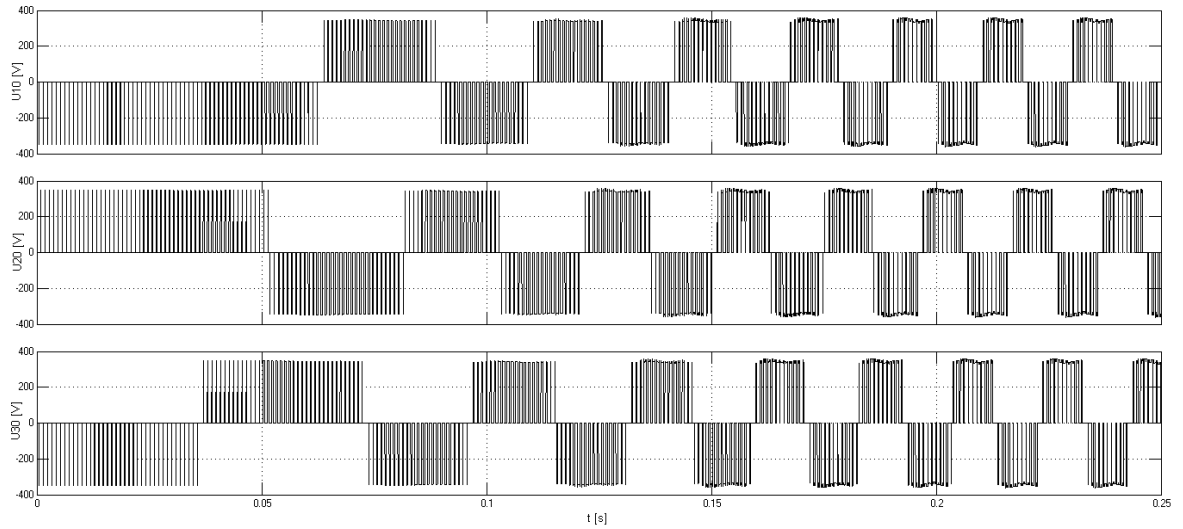
Simulace rozběhu byla realizována rovnoměrným zvyšováním frekvence od 0 Hz do 50 Hz a napětí od 0 V do 1 V po dobu 0,2 s. Blokové schéma realizace rozběhové řídicí křivky je zaznamenáno na *Obr. 3.1.1* a jeho výstupní signál pak na *Obr. 3.1.2*. Na *Obr. 3.1.3* je zobrazeno fázové napětí měniče při rozběhu a *Obr. 3.1.4* ukazuje fázové napětí zátěže při rozběhu. Proudy protékající zátěží při rozběhu jsou zobrazeny na *Obr. 3.1.5*. Tímto způsobem může být například rozběhnut asynchronní motor při konstantním toku, kdy je nutné zachovat poměr napětí a frekvence.



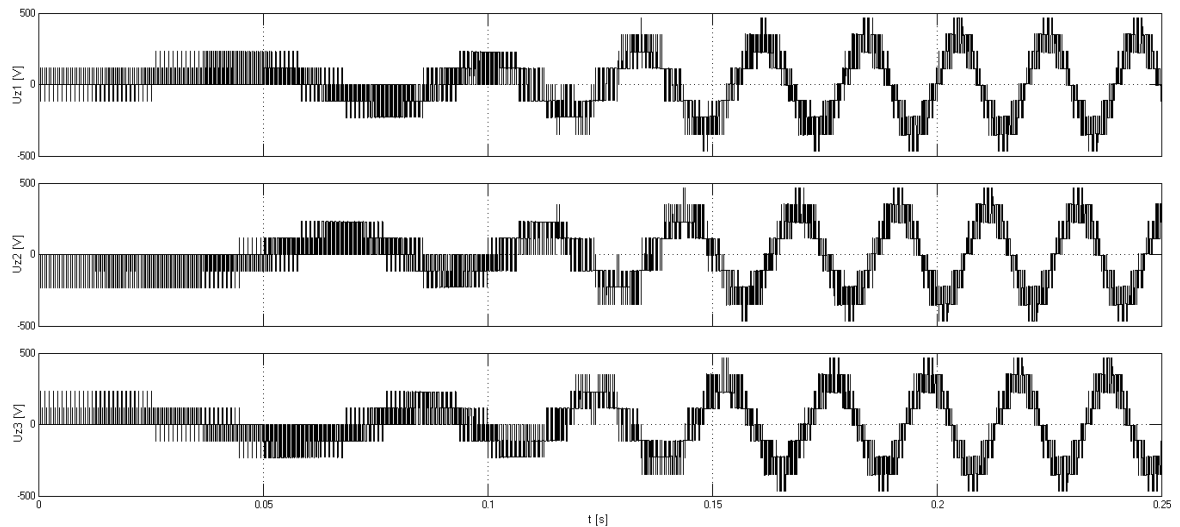
Obr. 3.1.1 Blokové schéma realizace rozběhu



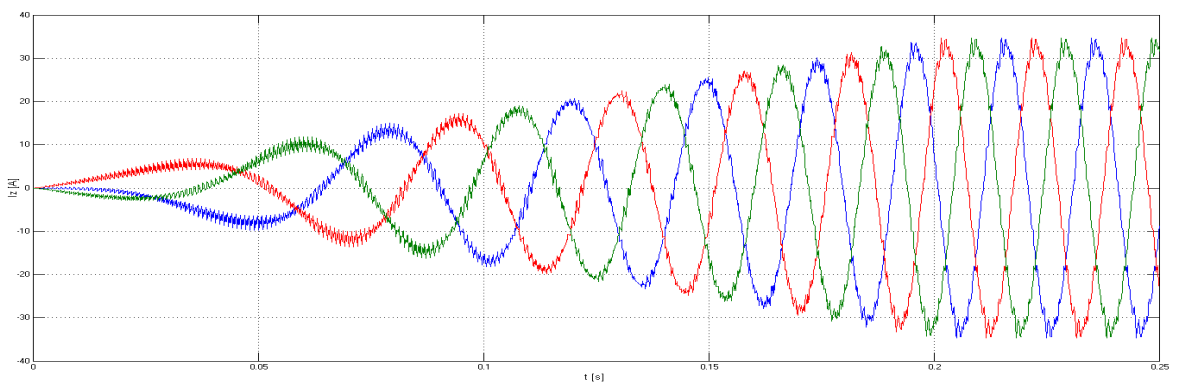
Obr. 3.1.2 Řídicí napětí použité pro rozběh tříúrovňového měniče



Obr. 3.1.3 Fázové napětí tříúrovňového měniče při rozběhu



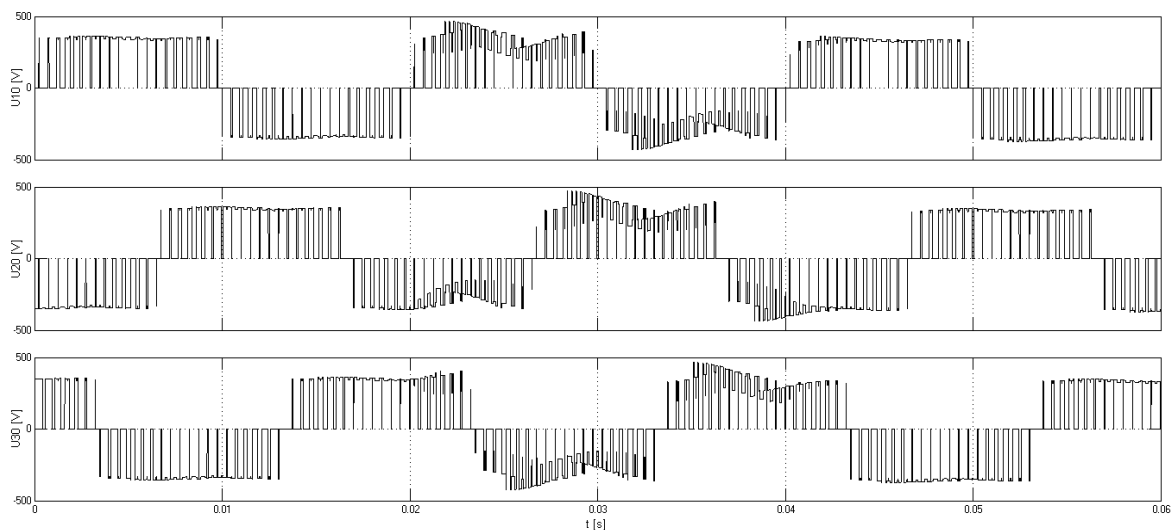
Obr. 3.1.4 Fázové napětí zátěže tříúrovňového měniče při rozběhu



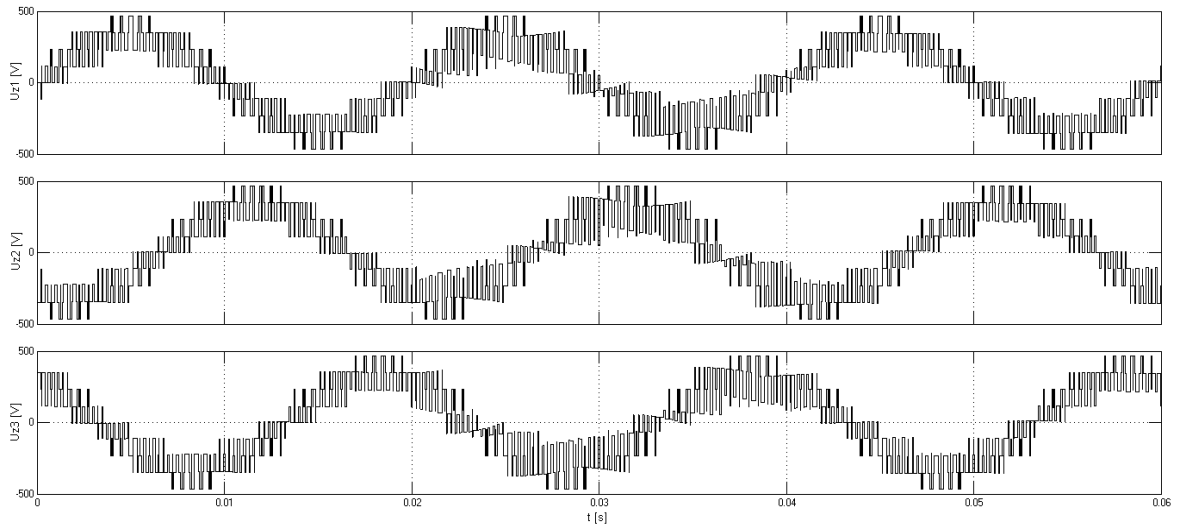
Obr. 3.1.5 Fázové proudy zátěže tříúrovňového měniče při rozběhu

3.2 Skoková změna zátěže

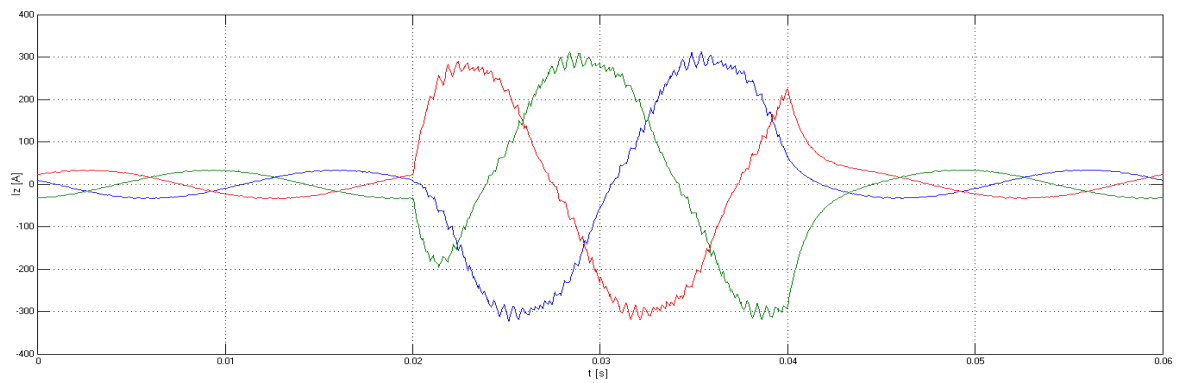
Skoková změna zátěže byla simulována se zátěží, která odpovídá výstupnímu výkonu 24 kW (při ideálním $\cos\varphi = 1$) a v čase $t = 0,02$ s bylo zvětšeno zatížení výstupu měniče na desetinásobek, kdy výkon tříúrovňového měniče stoupl na 240 kW. V čase $t = 0,04$ s byla nastavena zátěž opět na původní hodnotu. Fázové napětí tříúrovňového měniče je zobrazeno na *Obr. 3.2.1*, zde jsou patrné zákmity v době skokového zvýšení zatížení výstupu měniče. Fázová napětí na zátěži je možné vidět na *Obr. 3.2.2*. Z průběhu fázových proudů viz *Obr. 3.2.3* je patrný nárůst proudů až k hodnotě 300 A po dobu zvýšeného zatížení. Tato simulace může být přirovnána ke skokové změně zatížení motoru například rázovým připojením velké zátěže na nezatížený běžící motor.



Obr. 3.2.1 Fázové napětí tříúrovňového měniče při skokové změně zátěže



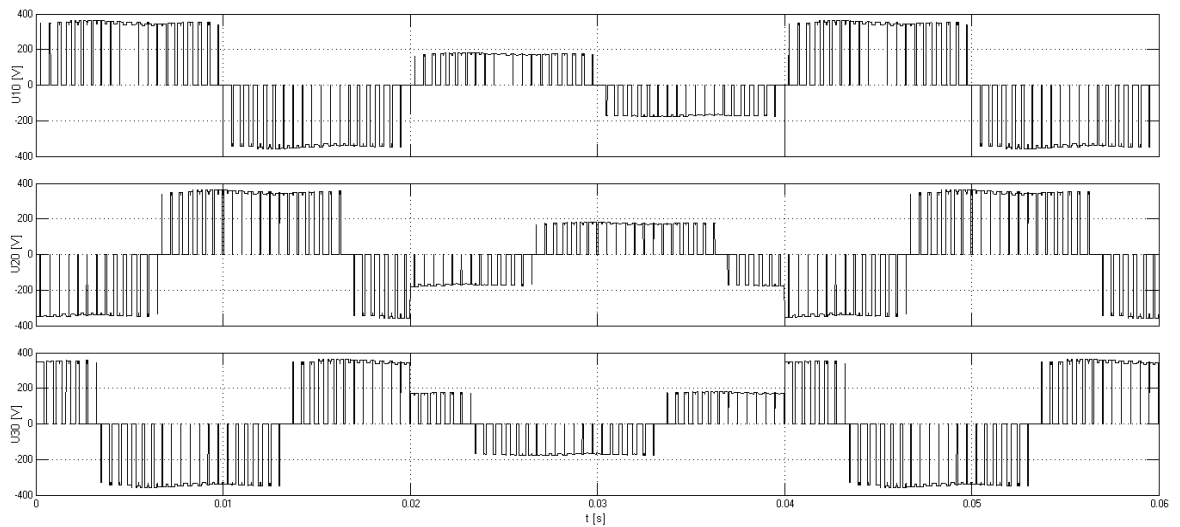
Obr. 3.2.2 Fázové napětí zátěže tříúrovňového měniče při skokové změně zátěže



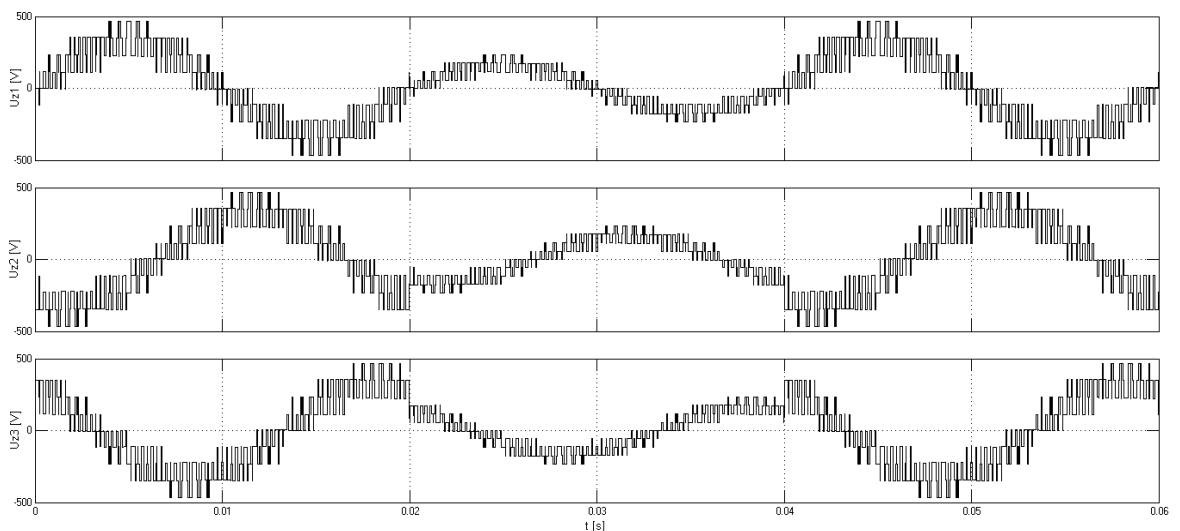
Obr. 3.2.3 Fázové proudy zátěže tříúrovňového měniče při skokové změně zátěže

3.3 Skoková změna napájecího napětí

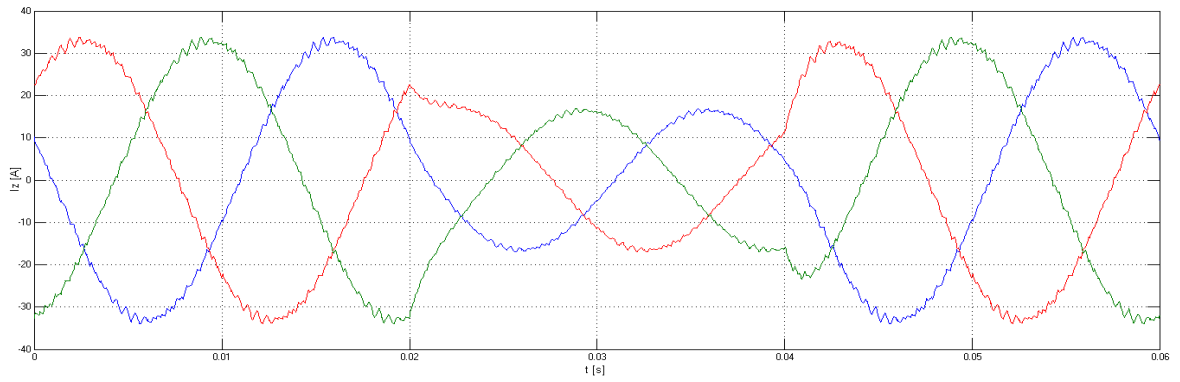
Skoková změna napájecího napětí byla simulována s poklesem na 50 % v čase $t = 0,02$ s po dobu jedné periody. Napájecí napětí bylo tedy skokově zmenšeno z původních 700 V na 350 V, což zapříčinilo zmenšení fázového napětí měniče viz *Obr. 3.3.1*. Zmenšená amplituda je patrná i z fázového napětí zátěže viz *Obr. 3.3.2* a fázových proudů zátěže na *Obr. 3.3.3*.



Obr. 3.3.1 Fázové napětí tříúrovňového měniče při skokové změně napájecího napětí



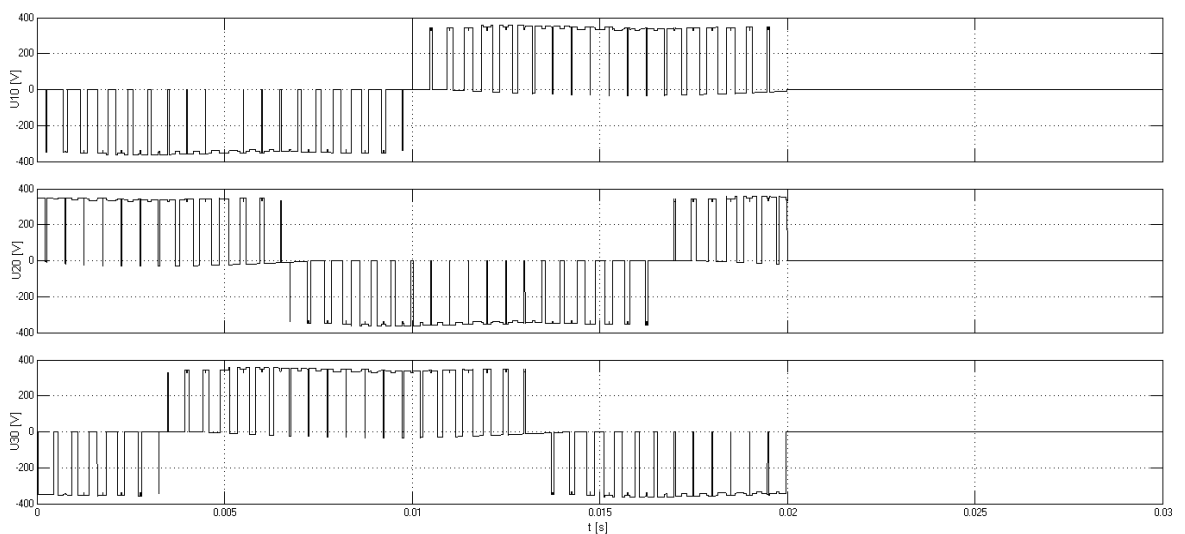
Obr. 3.3.2 Fázové napětí zátěže tříúrovňového měniče při skokové změně napájecího napětí



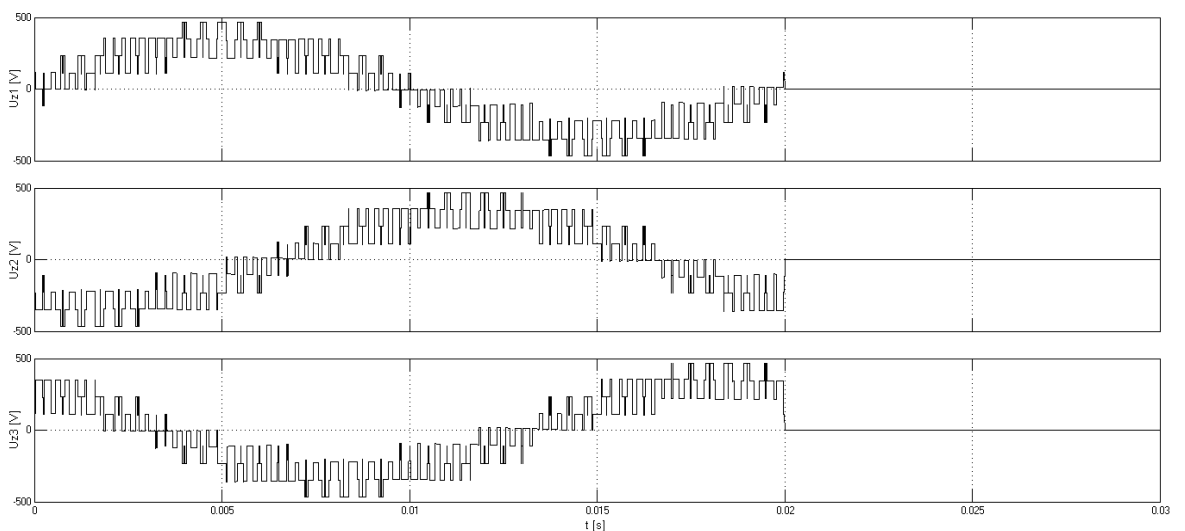
Obr. 3.3.3 Fázové proudy zátěže tříúrovňového měniče při skokové změně napájecího napětí

3.4 Náhlý výpadek napájecího napětí

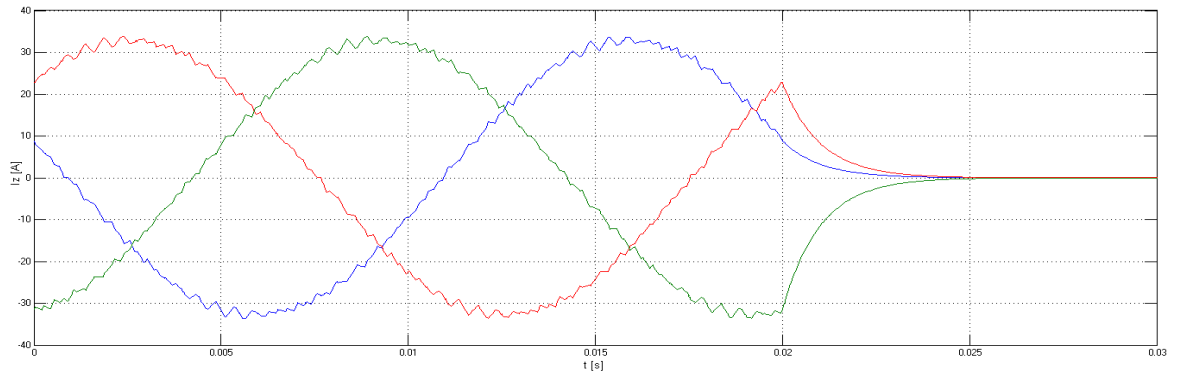
Náhlý výpadek napájecího napětí byl proveden v čase $t = 0,02$ s. Fázové napětí tříúrovňového měniče je zobrazeno na *Obr. 3.4.1* a fázové napětí zátěže na *Obr. 3.4.2* v obou případech je vidět strmý pokles napětí na 0 V. U fázových proudů zátěži zaznamenaných na *Obr. 3.4.3* je patrný pokles proudů po parabolické trajektorii.



Obr. 3.4.1 Fázové napětí tříúrovňového měniče při náhlém výpadku napájecího napětí



Obr. 3.4.2 Fázové napětí zátěže tříúrovňového měniče při náhlém výpadku napájecího napětí



Obr. 3.4.3 Fázové proudy zátěže tříúrovňového měniče při náhlém výpadku napájecího napětí

Závěr

Diplomová práce se zabývá problematikou víceúrovňových měničů a v první části popisuje základní topologie víceúrovňových měničů a dává tak čtenáři přehled o principech zapojení a spínacích kombinacích měničů.

V druhé části práce byly provedeny simulace dvou topologií a to tříúrovňového měniče s upínacími diodami a tříúrovňového měniče s plovoucími kapacitami, v obou případech ve třífázovém zapojení a se simulovanou RL zátěží. Tříúrovňový měnič s upínacími diodami je z pohledu řízení jednodušší oproti tříúrovňovému měniči s plovoucími kapacitami, kde je nutné zajistit vyváženost napětí na plovoucích kapacitách při spínání spínacích prvků, což je samozřejmě složitější se vzrůstajícím počtem úrovní měniče. Tato nevýhoda u víceúrovňového měniče s upínacími diodami odpadá, avšak je vykoupena větším počtem součástí, to může realizaci měniče prodražovat. V případě simulace tříúrovňového měniče s upínacími diodami byla také provedena spektrální analýza výstupního napětí zátěže v závislosti na způsobu vytvoření pulzně šířkové modulace. Výsledkem těchto simulací je porovnání variant PWM a jejich obsahu vyšších harmonických složek ve výstupním napětí.

Závěrečná část práce popisuje projevy tříúrovňového měniče na různé dynamické stavy, kterými jsou rozběh, skoková změna zátěže, skoková změna napájecího napětí a náhlý výpadek napájecího napětí. U všech dynamických jevů tříúrovňového měniče jsou graficky znázorněna výstupní napětí a proudy zátěže.

Mezi největší výhodu víceúrovňových měničů patří bezesporu nízké napěťové zatížení spínacích součástí i při vysokých napěťových hladinách výstupního napětí. Další výhodou je využití nižších spínacích frekvencí a v důsledku toho nízký obsah vyšších harmonických složek ve výstupním napětí.

V současné době jsou na českém trhu víceúrovňové měniče firmy Siemens, které využívají modulární koncepcí M^2LC .

Použitá literatura

- [1] Vondrášek, F. (2003). Výkonová elektronika svazek III, *Měniče s vlastní komutací a bez komutace*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni.
- [2] Zeman, K., Peroutka, Z., & Janda, M. (2004). *Automatická regulace pohonů s asynchronními motory*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni.
- [3] Du, Z. , Tolbert, L. M. , Chiasson, J. N. , Özpineci, B. (2006) *A Cascade Multilevel Inverter Using a Single DC Source*, Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC '06. Twenty-First Annual IEEE, pp. 426-430.
- [4] Lesnicar, A. , Marquardt, R. (2003). *An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range*. Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna, vol. 3.
- [5] Rodriguez, J. , Lai, J. S. , Peng, F. Z. (2002). *Multilevel Inverters: Survey of Topologies, Controls, and Applications*. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 49, no. 4, pp. 724-738.
- [7] Peng, J. S. (1996). *Multilevel converters - A new breed of power converters*. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 32, pp. 509–517.
- [8] Balamurugan C. R. , Natarajan S. P. , Bensraj R. (2012). *Investigations on Three Phase Five Level Diode Clamped Multilevel Inverter*. International Journal of Modern Engineering Research, vol. 2, issue. 3, pp. 1273-1279.
- [9] Yasmeena , Ram Das T. (2013). *Simulation Study of the Three-Phase Flying Capacitor Inverters: Modulation Strategies and Applications*. International Journal of Electrical, Electronics and Telecommunication Engineering , ISSN:2051-3240, vol.44, issue. 2.