



Fakulta elektrotechnická
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Bakalářská práce

Přehled vysokonapěťových víceúrovňových měničů

Autor: Tomáš Bláha

Vedoucí: Ing. Vojtěch Blahník, Ph.D.

Plzeň 2014

Abstrakt

Bakalářská práce je zaměřena na vysokonapěťové víceúrovňové měniče a jejich použití v praxi. Tato práce pojednává pouze o topologiích víceúrovňových měničů a neobsahuje jejich řízení a modulace. Jako příklad použití v praxi je uveden trakční měnič firmy ABB, který je již v provozu na Švýcarských spolkových drahách a obecně popsáno použití měniče v důlním průmyslu.

Klíčová slova

víceúrovňový měnič, plovoucí kondenzátor, upínací dioda, H-můstek, P2, důlní průmysl, trakční měnič

Abstract

The bachelor thesis is focused on high-voltage multilevel converters and their application in practice. This work discusses only about the topologies of multilevel converters and does not about their management and modulation. As an example of practical application is given traction converter from ABB, which is already used at Swiss railway lines and generally described using converters in the minig industry.

Key words

multilevel converter, floating capacitor, clamping diode, H-bridge, P2, minig industry, traction converter

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 270 trestního zákona č. 40/2009 Sb. Také prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 1. června 2014

Tomáš Bláha

.....

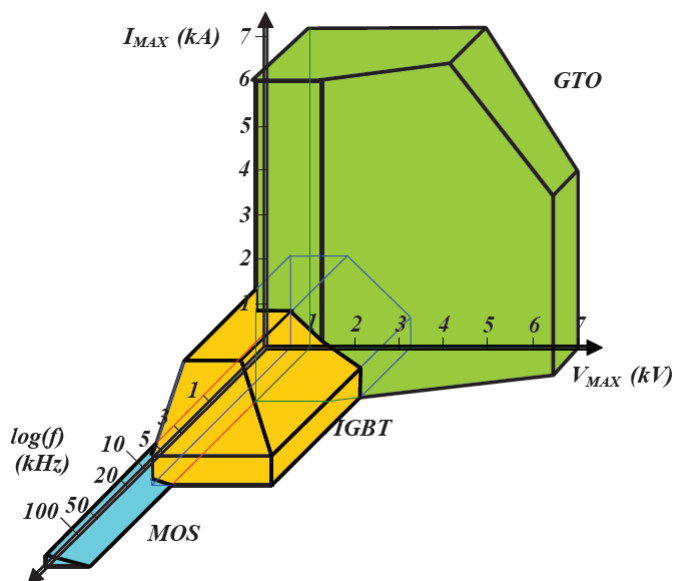
podpis

Obsah

1	Úvod	5
1.1	Funkční rozdělení měničů	6
2	Topologie víceúrovňových měničů	11
2.1	Střídač s upínacími diodami	12
2.2	Střídač s plovoucími kondenzátory	16
2.3	Kaskádní střídač H-můstek	18
2.4	P2 víceúrovňový střídač	20
3	Příklad nasazení víceúrovňových měničů	22
3.1	Důlní průmysl	22
3.2	Trankční měnič firmy ABB	24
3.2.1	Konfigurace topologie PETT	26
4	Závěr	29
5	Použitá literatura	30

1 Úvod

Víceúrovňové měniče se začaly vyrábět a používat z důvody potřeby napájení stále výkonnějších motorů. K přenosu elektrické energie je známo, že čím větší výkon chceme přenést, tím musíme použít větší napětí. Toto platí i u elektrických měničů. Se zvyšujícím se výkonem zátěže (nejčastěji motoru) je potřeba mít součástky na spínání co nejvyššího napětí. V součastnosti se nejvíce využívají výkonové součástky typu IGBT, MOS a GTO.



Obr. 1-1: Výkonové součástky max. napětí, proud, frekvence - převzato z [101]

Kvůli limitu zatížitelnosti je u aplikací vyžadujících spínání vyššího napětí nutné použití různých metod zapojení součástek. Například sériově, paralelně nebo sérioparalelně. Pro diody a tyristory se nejčastěji používá zapojení sériové, ovšem pro spínací součástky je problematické dosáhnout správného rozložení napětí a v praxi je využíván zřídka.

Z těchto důvodů omezujeme napětí na součástkách tím, že je upneme ke zdroji stejnosměrného napětí. Výhoda těchto víceúrovňových měničů je v tom, že umožňují složit výstupní napětí z několika napěťových úrovní. Tím je možné dosáhnout menšího rušení, nižší spínací frekvence součástek a je možné použít součástky s nižším maximálním blokovacím napětím.

V další části této práce jsou podrobně popsány topologie střídačů s upínacími diodami, s plovoucími kondenzátory, H-můstek a P2 střídač.

1.1 Funkční rozdělení měničů

Z funkčního hlediska můžeme měniče napětí rozdělit na základní typy:

1. Měníče frekvence(AC/AC)

Měníče frekvence nám převádí vstupní střídavé napětí na výstupní střídavé napětí s jinou frekvencí.

2. Usměrňovače (AC/DC)

Usměrňovače nám převádí vstupní střídavé napětí na výstupní napětí stejnosměrné.

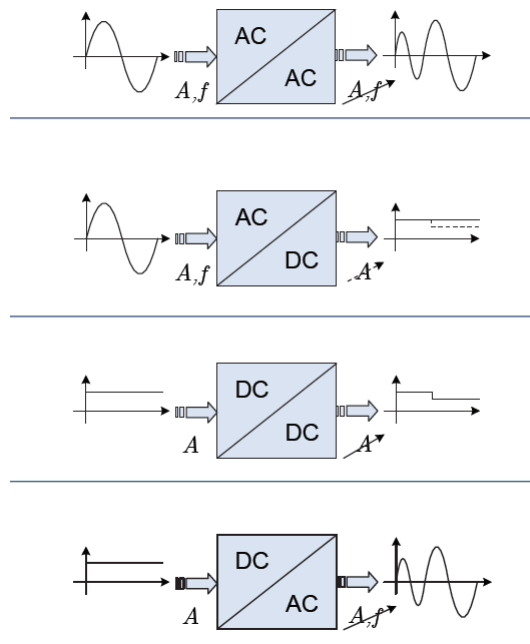
3. Střídače (DC/AC)

Střídače nám převádí vstupní stejnosměrné napětí na výstupní napětí střídavé.

4. Měníče napětí DC/DC

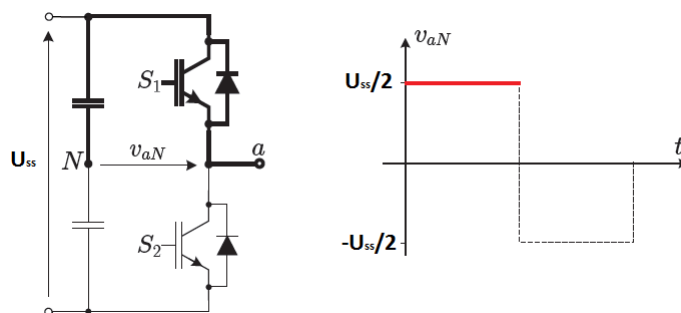
Měníče napětí nám převádí vstupní stejnosměrné napětí na výstupní stejnosměrné napětí o jiné velikosti.

Grafické znázornění je uvedeno na obrázku 1-2.

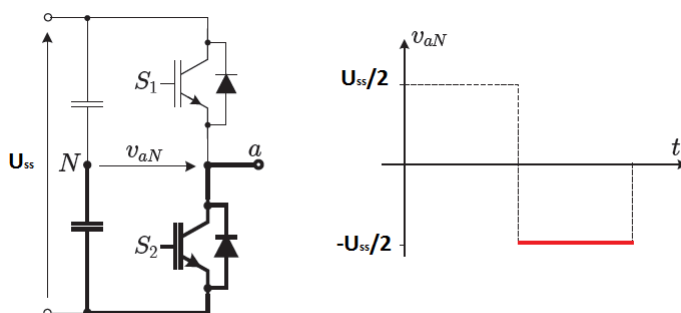


Obr. 1-2: grafické rozdělení měničů - převzato z [101]

Základní měnič je dvouúrovňový, který nám na výstupu dává pouze dvě úrovně. Výstupní fázové napětí je buď kladné nebo záporné napětí stejnosměrného mezi-obvodu.



Obr. 1-3: Dvouúrovňový měnič napětí kladné výstupní U - převzato z [101]

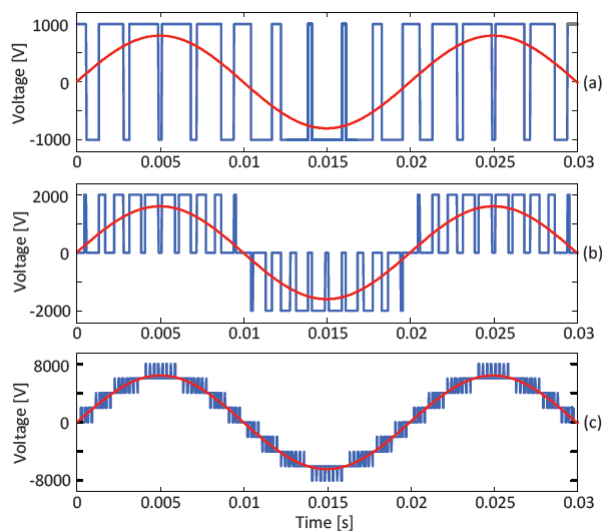


Obr. 1-4: Dvouúrovňový měnič napětí záporné výstupní U - převzato z [101]

Na obrázcích 1-3 a 1-4 vidíme základní zapojení dvouúrovňového měniče s jeho principem činnosti, který je vyznačen tučnou barvou a jeho výstupem, který je označen červenou barvou. Je principiálně zaručeno, že při správném chodu nemůžeme dostat jiné úrovně než základní dvě, které jsou $+\frac{U}{2}$ a $-\frac{U}{2}$, pokud nebudeme uvažovat ztráty obvodu.

Z obvodu je jasně dané, že nesmíme sepnout oba tranzistory společně, jelikož by došlo ke zkratu a následného zničení spínacích prvků a tím i ke zničení celého měniče.

Podle šířky výstupních napěťových pulzů pak lze modulovat velikost a frekvenci výstupního napětí. Víceúrovňové měniče mají oproti klasickým měničům větší počet spínacích prvků.[102] Ty jsou zapojeny tak, že můžeme na výstupu získat více napěťových úrovní. Nově získané napěťové úrovně slouží k čistšímu napěťovému výstupu. Například při použití víceúrovňového měniče, můžeme dostat průběh, který se bude daleko více přibližovat sinusovému průběhu než u klasických měničů. Tento průběh můžeme ještě vylepšit použitím PWM (pulzně šířková modulace). [102]



Obr. 1-5: Porovnání výstupu - převzato z [101]

Na obrázku 1-5 je znázorněno porovnání mezi a) dvouúrovňovým střídačem, b) tříúrovňovým střídačem, c) devítiúrovňovým střídačem.

Víceúrovňový měnič zvyšuje počet výstupních napětí a tím má nižší derivaci napětí podle času $\frac{dU}{dt}$ a zároveň větší kvalitu signálu.

2 Topologie víceúrovňových měničů

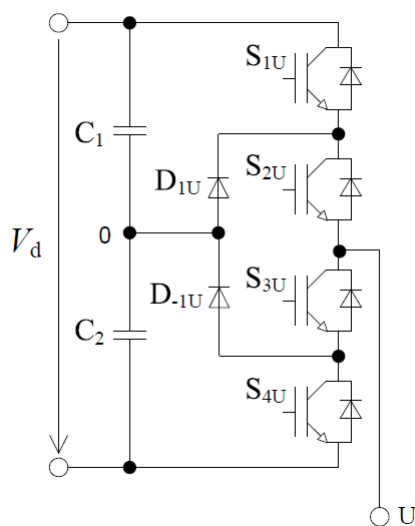
Měniče jsou určeny pro aplikace, ve kterých je potřeba spínat velké napětí nebo proudy jako jsou pohony s vysokonapěťovými motory. Jako označení se používá n-úrovňové měniče, kde n znamená číslo, které je definováno jako počet různých kroků napětí výstupu.

Jedno z možných dělení víceúrovňových střídačů:

- Modulární víceúrovňový střídač
- Střídač s upínacími diodami
- Střídač s plovoucími kondenzátory
- P2 střídač

2.1 Střídač s upínacími diodami

Střídač s upínacími diodami byl vyroben v roce 1980. Z důvodu, že žádné dvě součástky nejsou stejné a jedna z nich by mohla spínat rychleji než ostatní, se stane, že na této součástce bude plné napětí po dobu než sepne druhá součástka, tím dojde k jejímu proražení a následně i ke zničení měniče. Proto se k součástkám zařazovaly kapacitní a odporové děliče, aby tomuto jevu zabránily a součástky se otevíraly současně. Na těchto děličích nám ale vznikaly ztráty a jejich návrh byl problematický. Místo děličů se tedy začalo používat takzvané upnutí bodu mezi dvěma spínacími prvky pomocí diod, které nám omezí maximální napětí na spínacích prvcích na polovinu vstupního napětí.



Obr. 2-1: Trojúrovňový střídač napětí s upínacími diodami - převzato z [101]

Na obrázku 2-1 vidíme základní zapojení trojúrovňového střídače napětí s upínacími diodami. Nezbytnou součástí pro funkci jsou dva kondenzátory (C_1 a C_2) umístěné na stejnosměrné straně, které dělí vstupní napětí na polovinu a diody D_{1U} , D_{1-U} , které "upínají" místa mezi sériově spojenými prvky k takzvanému nulovému bodu 0. Tyto diody nám omezují maximální napětí na každém tranzistoru na polovinu vstupního napětí. Výstupní úrovně jsou $U_{max}/2$, 0, $-U_{max}/2$.

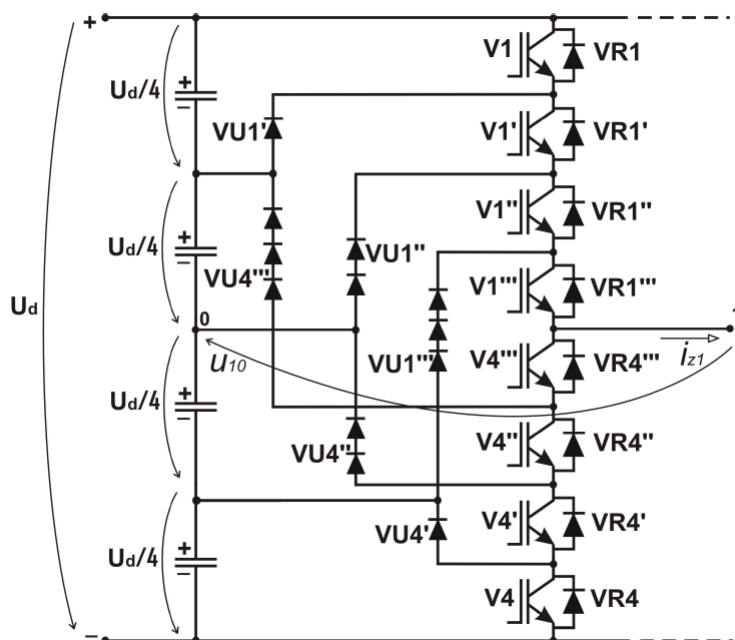
Princip činnosti je znázorněn na tabulce 2-1:

S_1	S_2	S_3	S_4	U
1	1	0	0	$+U/2$
0	1	1	0	0
0	0	1	1	$-U/2$

Tabulka 2-1: Trojúrovňový střídač napětí s upínacími diodami - Princip

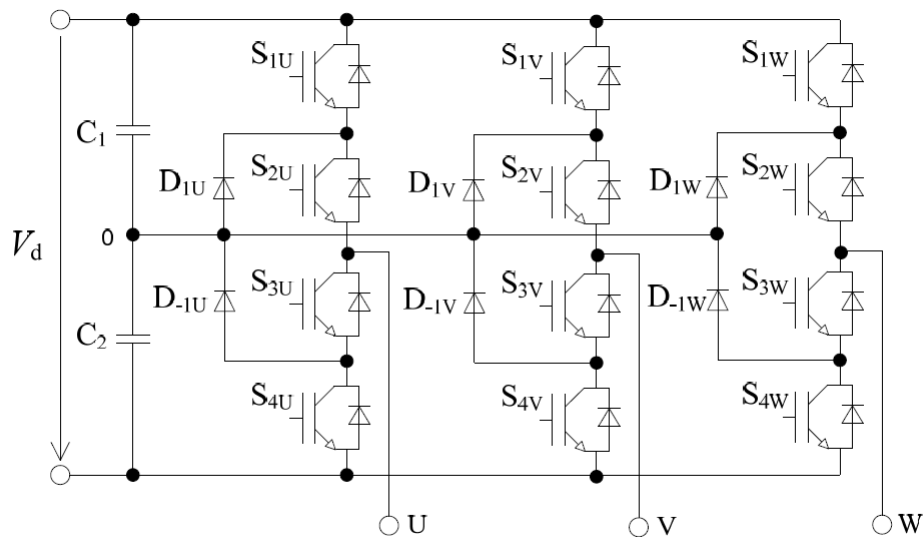
Pokud bychom chtěli víceúrovňový střídač s upínacími diodami, musíme vstupní napětí rozložit na n -kondenzátorů a dostane $n+1$ úrovňový střídač s upínacími diodami.

Například při použití čtyř kondenzátorů dostaneme pětiúrovňový střídač s upínacími diodami, při použití šesti kondenzátorů dostaneme sedmiúrovňový střídač s upínacími diodami atd.



Obr. 2-2: Ukázka pětiúrovňové střídač napětí s upínacími diodami -
převzato z [102]

Nevýhody střídače s upínacími diodami je kolísání napětí na kapacitním děliči meziobvodu. Ve třífázovém zapojení poměry v jedné fázi ovlivňují dění ve zbývajících fázích z důvodu propojení nulového bodu, jak můžeme vidět na obrázku 2-3.



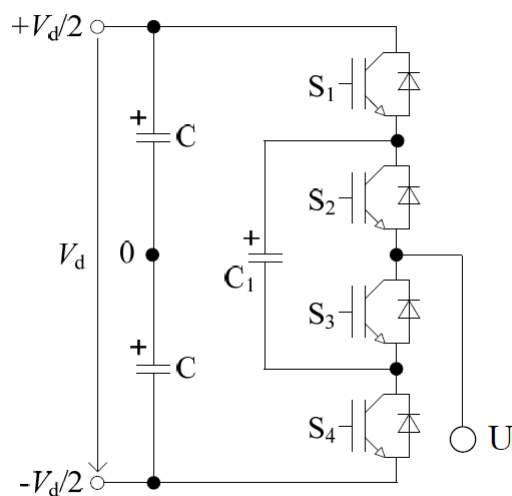
Obr. 2-3: Trojúrovňový střídač napětí s upínacími diodami - propojení

Další nevýhoda střídače s upínacími diodami je, že s rostoucím počtem úrovní se nám zvyšuje počet kondenzátorů podle vzorce $k = n + 1$, kde n je počet kondenzátorů a k je počet úrovní a je složitější zajistit správné rozložení napětí na kondenzátorovém děliči. [102]

2.2 Střídač s plovoucími kondenzátory

Střídač s plovoucími kondenzátory je topologicky téměř stejný jako střídač s upínacími diodami pouze se záměnou kapacitorů s diodami. Byl vyroben v roce 1992.

Tato technologie je vhodnější pro více než tři úrovně výstupního napětí oproti střídači s upínacími diodami, díky lepšímu vyvažování napětí na kondenzátorech vstupního obvodu. Maximální napětí tranzistorů jsou omezoována plovoucími kondenzátory.[102]

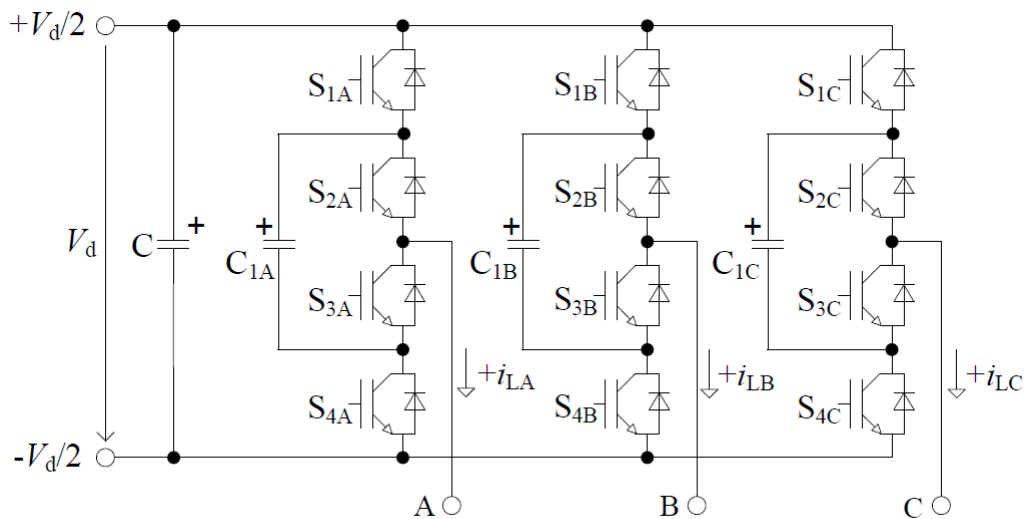


Obr. 3-1: Trojúrovňový střídač napětí s plovoucími kondenzátory

V jednofázovém provedení je nutné mít vytvořený střed meziobvodu pomocí kapacitního děliče. Napětí na jednotlivých kondenzátorech pak kolísá. Ve třífázovém provedení však střed meziobvodu není potřeba, čímž

tato nevýhoda odpadá.

Dále je nutno dodržovat stejná pravidla jako je zakázané současné spínání tranzistorů S_1 a S_4 , jak je již popsáno v úvodu. Princip činnosti je stejný jako u předchozího měniče s upínacími diodami.



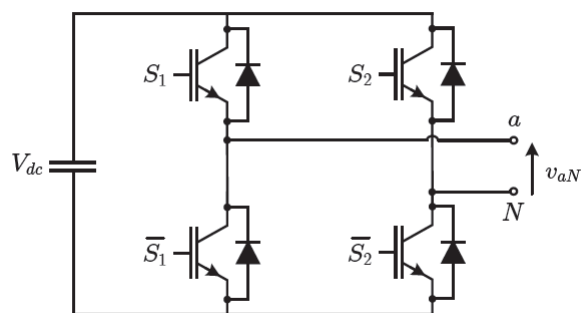
Obr. 3-2: Třífázový trojúrovňový střídač napětí s plovoucími kondenzátory

Velkou výhodou je, že všechny tři fáze je možné řídit nezávisle na ostatních.

Jmenovité napětí na všech plovoucích kondenzátorech je možné udržovat řídicí strategií, z toho nám vyplývá velká výhoda vypuštění pomocných silových obvodů.

2.3 Kaskádní střídač H-můstek

Topologie kaskádního střídače H-můstek využívá k dosažení vysokého výstupního napětí sériové spojení H-můstek. [102] Základní zapojení jedné buňky H-můstek je zobrazeno na obrázku 4-1.



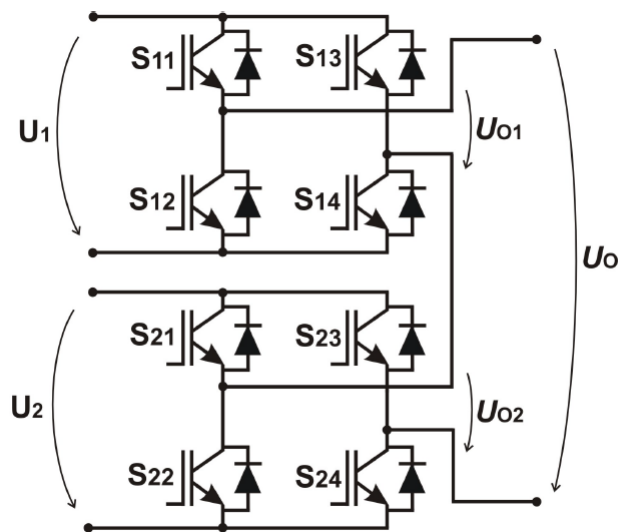
Obr. 4-1: H-můstek - převzato z [101]

Princip činnosti H-můstek je vyznačen tabulkou 4-1:

S_1	S_2	\bar{S}_1	\bar{S}_2	V_{aN}
1	0	0	1	V_{aN}
1	1	0	0	0
0	0	1	1	0
0	1	1	0	$-V_{aN}$

Tabulka 4-1: Trojúrovňový střídač napětí H-můstek - Princip

V základním zapojení H-můstku dostáváme tříúrovňový střídač napětí, který je připojen na zdroj stejnosměrného napětí. Spínače jsou rozděleny do dvojic $S_1 + \bar{S}_1$ a $S_2 + \bar{S}_2$. V každé dvojici musí být jeden spínač sepnutý a druhý ne, aby nedošlo ke zkratu zdroje stejnosměrného napětí.



Obr. 4-2: Pětiúrovňový modulární střídač napětí - převzato z [101]

Jedna fáze pětiúrovňového modulárního střídače napětí obsahuje dva sériově spojené H-můstky, které jsou napájeny každý samostatným zdrojem stejnosměrného napětí. Počet úrovní výstupního napětí je dán vztahem:

$$n = 2h + 1$$

kde h je počet H-můstek ve fázi a n bude vždy liché číslo.[102].

V tomto zapojení tedy platí:

$$n = 2 \cdot 2 + 1$$

$$n = 5$$

Počet úrovní v modulárním střídači lze navýšit i způsobem, ve kterém nemusíme zvyšovat počet součástek. Lze toho dosáhnout použitím různých vstupních napětí jednotlivých H-můstek.[102]

1. Použijeme-li vstupní napětí dle vztahu: $U_i = 2^{(i-1)}U_d$, pro $i = 1, 2, \dots, h$, pak je počet úrovní výstupního napětí dán vztahem:

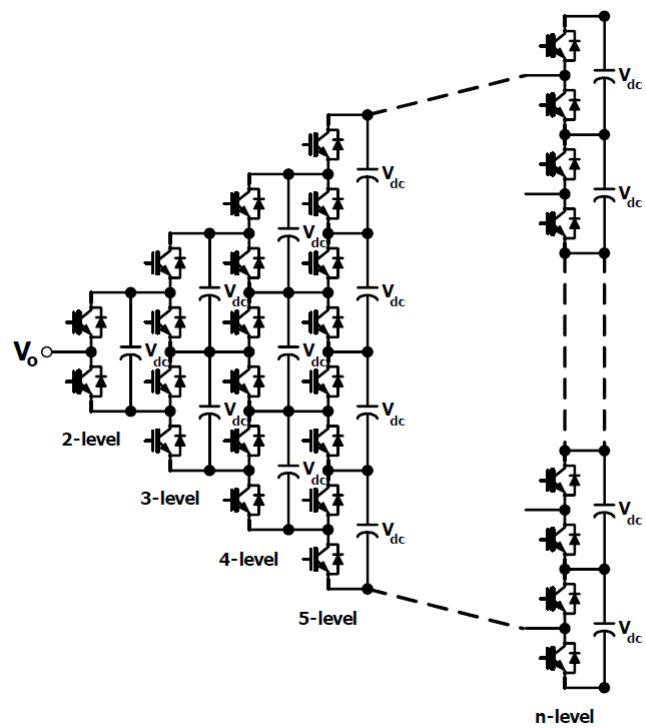
$$n = 2^{(h+1)} - 1$$

2. Použijeme-li vstupní napětí dle vztahu: $U_i = 3^{(i-1)}U_d$, pro $i = 1, 2, \dots, h$, pak je počet úrovní výstupního napětí dán vztahem:

$$n = 3^h$$

2.4 P2 víceúrovňový střídač

Schéma jedné fáze tohoto měniče je zobrazeno na obrázku 5-1. Základem je dvouúrovňový střídač, který je pyramidovitě složen za sebe. Toto zapojení je schopno udržovat správné napětí na použitých kondenzátorech. Z této topologie jsme schopni vytvořit střídače s libovolným počtem výstupních úrovní. Jednotlivé úrovně jsou popsány na obrázku, pokud bychom chtěli vytvořit čtyřúrovňový střídač napětí použijeme zapojení, které je na obrázku 5-1 vlevo od hranice "4. úrovně". Stejně bychom postupovali, pokud bychom chtěli střídač jiné úrovně.



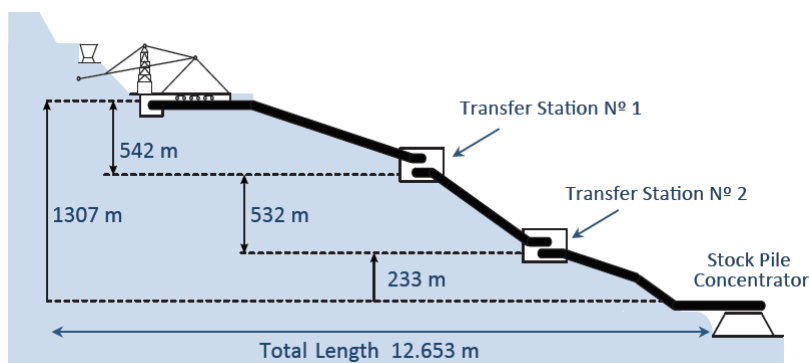
Obr. 5-1: P2 střídač napětí - převzato z [101]

3 Příklad nasazení víceúrovňových měničů

3.1 Důlní průmysl

V důlním průmyslu se používají víceúrovňové měniče jak k ovládní velkých strojů, tak k řízení motorů pásových dopravníků.

Na obrázku 6-1 je znázorněn obrázek popisující princip pásových dopravníků.



Obr. 6-1: Pásově dopravníky - převzato z [101]

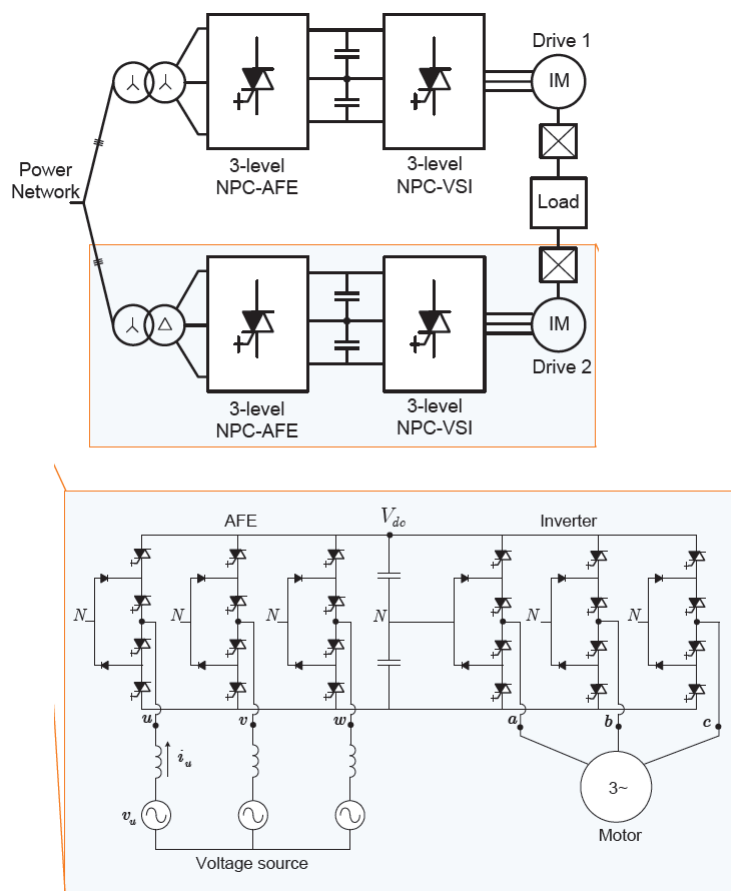
Charakteristika:

1. Pásový dopravník je rozdělen na tři sekce různé délky.
2. Důl je hluboký 1307m.
3. Transportní kapacita je cca 5800tun/hod horniny.
4. K přenosu se využívají 2 motory na jednom válci na každém dopravníkovém pásu o výkonu 2500kW.

Na obrázku 6-2 je zjednodušené schéma práce měniče na pásovém dopravníku. V tomto případě je použit měnič s upínacími diodami. Máme přiveden třífázový zdroj střídavého napětí, který je následně usměrněn AFE jednotkou, česky pulzní usměrňovač, který umožňuje pracovat v usměrňovačovém i střídačovém chodu a dovoluje rekuperovat energii zpět do zdroje. Výkon je přenesen do střídače, který nám ze stejnosměrného napětí vrátí zpět napětí střídavé a tím "rozběhne" motor.

Hlavní důvody k usměrnění a následnému rozstřídání jsou následující:

- 1. Jednodušší řízení motoru.**
- 2. Odfiltrování vyšších harmonických.**
- 3. Lepší přenosové vlastnosti.**



Obr. 6-2: Pásové dopravníky - použitý měnič - převzato z [101]

3.2 Trankční měnič firmy ABB

V trakčních systémech se dnes již standardně používají měniče jak pro rozběh a řízení elektromotorů, tak i pro energii získanou z brzdění, kterou se snažíme vrátit zpět do sítě a tím výrazně snížit náklady na provoz jednotlivých strojů z hlediska elektrické energie.

Výzkum a vývoj firmy ABB používá zkušební lokomotivu, která je provozována na Švýcarských spolkových drahách - Obr. 7-1.

Parametry lokomotivy:

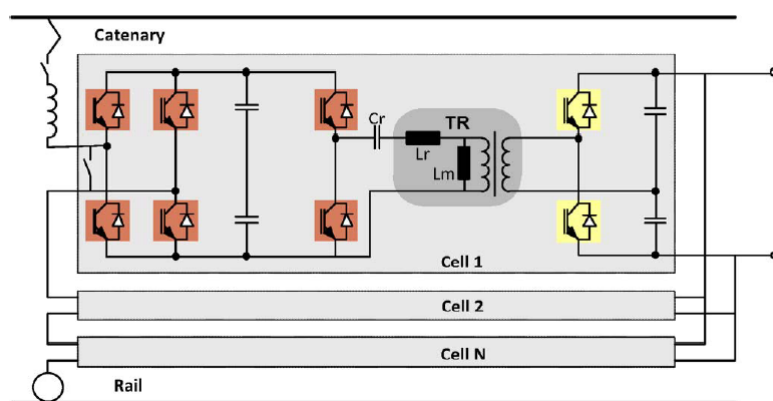
1. **Jmenovitý výkon: 450kVA, špičkový výkon 900kVA**
2. **Napájecí síť 15kV s frekvencí 16,66Hz**
3. **Topologie měniče - PETT**



Obr. 7-1: Lokomotiva firmy ABB poskytnuta od Švýcarských spolkových drah - převzato z [103]

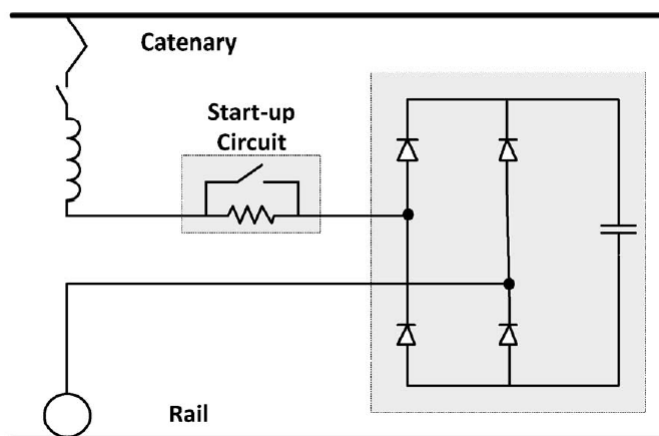
3.2.1 Konfigurace topologie PETT

Vysokonapěťový PETT střídač je modulární a skládá se z několika základních částí. Na vstupní straně mezi ně patří jističe, tlumivka a startovací obvod, který je zapojen na každém modulu, které jsou řazeny kaskádně, jak je znázorněno na obrázku 7-2.



Obr. 7-2: Topologie PETT - převzato z [103]

Startovací obvod obr. 7-3 je používán k přenesení energie ze sítě do stejnosměrného zdroje pro moduly během startovací fáze a také jako "bypass" v normálním provozu.



Obr. 8-3: Startovací obvod - převzato z [103]

Při základním zapojení se používá 8+1 měničových modulů s tím, že jeden se využívá pouze v případě, že na jednom ze zbývajících osmi modulech nastane chyba a tím ho nahradí. Vysokonapěťový prototyp má tedy celkem devět modulů, každý o jmenovitém výkonu 150kVA a špičkovém výkonu 225kVA.

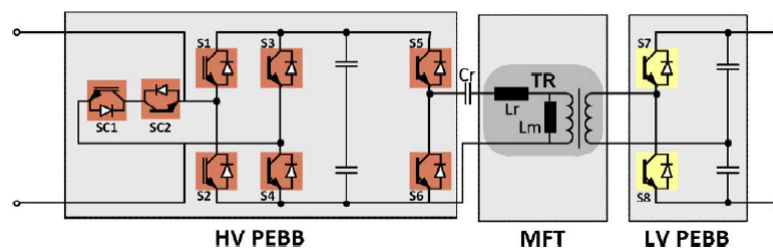
Topologie jednoho modulu je znázorněna na obrázku 7-4.

Na obrázku vidíme základní tři díly modulu, kterými jsou MFT a dva měniče topologie kaskádních H-můstek, kde vstupní je jeden H-můstek a výstupní je půl H-můstku. Vstupní zařízení je realizováno jako kombinace AFE jednotky a vysokonapěťové strany, který v našem případě pracuje s 3.6kV jmenovitého napětí. Na AFE jednotce jsou připojeny další dva IGBT tranzistory 6.5kV za jediným účelem a to, že v případě poruchy modulu ho je schopen odstavit. Celkově má modul v sobě zakomponováno osm 6.5kV IGBT tranzistorů (čtyři na vstupním H-můstku, dva jako spínače "bypassu" a dva na výstupu). MFT, česky středofrekvenční transformátor, v

tomto případě pracuje s frekvencí 400Hz, nám zajišťuje galvanické oddělení mezi vstupem a výstupem.

Výstupní AFE jednotka je tvořen opět jen půl-můstkem, kde jmenovité napětí je 1.5kV a je realizován z 3.3kV IGBT tranzistorů se stejnosměrným jmenovitým proudem 800A.

MFT jednotka má tři důležité úkoly. Z počátku poskytuje galvanickou izolaci mezi vysokým střídavým síťovým napětím a nízkonapětovou zátěží na výstupní straně. Druhá funkce je poskytnout vhodnou adaptaci napětí mezi 1.5kV na výstupu a 3.6kV na vstupu vstupního měniče. Třetí funkce je umožnění práce IGBT modulů v tzv. softswitching režimu, a tím, pozitivně ovlivňuje a zvyšuje účinnost celého systému. Na obrázku můžeme vidět, že celý měnič umožňuje obousměrný tok energie. Regenerativní energie na brzdění vozidla může být snadno realizována, tím zlepšíme energetickou účinnost a podporu železničního síťového napětí.



Obr. 7-4: Topologie jednoho modulu - převzato z [103]

4 Závěr

Tato práce je zaměřena pouze na vysokonapěťové víceúrovňové měniče, kde jako první jsem se věnoval teoretické části a čtyřem topologiím. V další části jsou zavedeny principy a praktické aplikace jejich použití. Kde jsem si vybral důlní průmysl a trakční systém, který je přímo nasazen firmou ABB a plně funkční.

Jako hlavní přínos víceúrovňových měničů je ten, že při jeho použití získáme lepší kvalitu signálu a tím i snižujeme nároky na přesné modulace. Nejčastěji jsou využívány v těchto odvětvích:

1. **Trakční systémy**
2. **Důlní průmysl**
3. **Elektroautomobily**
4. **Solární panely**
5. **Větrné elektrárny**
6. **Přepavní lodní průmysl**
7. **HVDC přenosy**

5 Použitá literatura

- [101] Perez, A.P.: *Tutorial on Multilevel Converters – Part4*. IECON, 2012
- [102] Kamenický, P.: *Víceúrovňovéměniče*. Diplomová práce, Plzeň, ZČU, 2010
- [103] Zhao, Ch., Dujic, D., Mester, A., Steinke, J. K., Weiss, M., Schmid, S., Chaudhuri, T., Stefanutti, P.: *Power Electronic Traction Transformer*. IEEE Trans. Ind. Electronics, vol.61, no.7, July 2014
- [104] Poljak, L.: *Vektorová PWM pro tříúrovňový měnič s upínacími diodami*. Diplomová práce, Plzeň, ZČU, 2013