

2013

Pracoviště:Regionální inovační centrum elektrotechnikyVýzkumná zpráva č.:22190 - 044 - 2013

Modulární víceúrovňový měnič s půlmůstky: Základní úvahy

Druh úkolu:	Vědecko-výzkumný
Řešitelé:	Ing. V. Blahník, Ph.D.
Vedoucí úkolu:	prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
Počet stran:	27
Datum vydání:	březen 2013
Revize:	1

Práce vznikla s finanční podporou TA ČR v rámci projektu č. TA01010863

a CZ.1.05/2.1.00/03.0094

Anotace

Tato výzkumná zpráva se zabývá zkoumáním vlastností modulárního vysokonapěťového měniče, který je realizován pomocí půl-můstků. Ve zprávě jsou testovány dvě varianty provozu měniče a to měnič provozovaný jako střídač a měnič provozovaný jako pulzní usměrňovač. Na základě simulačních testů jsou vyvozeny závěry pro navržený typ měniče.

Obsah

1 ÚVOD A PARAMETRY SIMULACE MODULÁRNÍHO MĚNIČE
2 VÝSLEDKY SIMULACE MODULÁRNÍHO MĚNIČE - STŘÍDAČ6
2.1 Simulační výsledky pro analogický měnič typu 3f střídač6
2.2 Simulační výsledky modulárního měniče provozovaného při úplném přemodulování (M=100)
2.3 Simulační výsledky modulárního měniče provozovaného při částečném přemodulování (M=2)11
2.4 Simulační výsledky modulárního měniče provozovaného při částečném přemodulování (M=1,5)
2.5 Simulační výsledky modulárního měniče provozovaného při částečném maximálním modulačním indexu (M=1)15
2.6 Simulační výsledky modulárního měniče provozovaného při modulačním indexu M=0,5
3 SIMULACE MODULÁRNÍHO MĚNIČE PROVOZOVANÉHO JAKO PULZNÍ
USMĚRŇOVAČ19
4 ZÁVĚR

Použité symboly a zkratky

С	Kapacita kondenzátoru ve stejnosměrném obvodu (u klasického 3f střídače)
$C_1 - C_8$	Kapacita kondenzátoru ve stejnosměrném obvodu v jednotlivých modulech
	(půl-můstkách) vysokonapěťového měniče
f _{spin}	Spínací frekvence tranzistorů
i _a , i _b , i _c	Fázové proudy napájecího zdroje
L, L _a , L _b , L _c	Indukčnost filtru na střídavé straně
М	Modulační index (hloubka modulace)
NPU	Napěťový pulzní usměrňovač (NPU)
PWM	Pulzně šířková modulace
R _a , R _b , R _c	Parazitní odpor tlumivky filtru na střídavé straně
Rz	Odpor zátěže
STŘ	Střídač
u _a , u _b , u _c	Fázová napětí napájecího zdroje
U _{a_max}	Amplituda fázového napětí zdroje
U _c	Napětí na kondenzátoru stejnosměrného obvodu
$U_{c1} - U_{c8}$	Napětí na kondenzátorech jednotlivých modulů (půl-můstků)
U _{c_celk}	Suma stejnosměrného napětí na všech modulů (půl-můstků)
$U_{v1} - U_{v8}$	Velikost napětí na střídavých svorkách jednotlivých modulů (půl-můstků)
U _{v_a}	Fázové napětí na střídavých svorkách modulárního měniče
$U_{v_{ab}}$	Sdružené napětí na střídavých svorkách modulárního měniče

1 Úvod a parametry simulace modulárního měniče

Tato výzkumná zpráva zkoumá možnost realizace vysokonapěťového měniče pomocí půl-můstků a je tedy návazná na zprávu [1], kde byl vysokonapěťový měnič realizován za pomoci celých H-můstků. Návrh měniče s použitím půl-můstků, jako základních modulů měniče, je inspirován vysokonapěťovým měničem typu HVDCplus, který je deailněji popsán v [2] a v [3].

Schéma zapojení navržené varianty modulárního měniče s půl-můstky (zapojení měniče jako střídače) je uvedené na Obr. 1.1. Za pomoci simulačního modelu měniče Obr. 1.1 byly provedeny simulace pro otestování vlastností a chování měniče, parametry simulace jsou uvedeny v Tabulce 1.



Obr. 1.1 Simulační model modulárního měniče s půl-můstky provozovaného jako střídač s RL zátěží zapojenou do hvězdy

Napětí řídící u _{a_max}	100 V / 50 Hz
Napětí v ss. obvodu jednoho půl-můstku U _{c1}	25 V
Zátěž střídače 3f L	1 mH
R	10 Ω
Spínací frekvence tranzistorů f _{spin}	1000 Hz

Tabulka 1: Parametry simulace modulárního měniče s půl-můstky

2 Výsledky simulace modulárního měniče - střídač

Modulární měnič byl testován pro různé hodnoty modulačního indexu a výsledky je možné porovnat s klasickým třífázovým střídačem provozovaným s PWM (je zde vidět analogie mezi chováním těchto měničů).

2.1 Simulační výsledky pro analogický měnič typu 3f střídač

Princip modulace a chování navrženého modulárního vícehladinového měniče se dá dobře vysvětlit a porovnat s klasickým třífázovým napěťovým střídačem Obr. 2.2. Simulovaný třífázový napěťový střídač má parametry uvedené v Tabulce 2.



Obr. 2.2 Simulační model napěťového 3f střídače s RL zátěží

Tabulka 2: Parametry simulace klasického třífázového střídače

Napětí řídící u _{a_max}	100 V / 50 Hz
Napětí v ss. obvodu U _c	100 V
Zátěž střídače L	1 mH
R	10 Ω
Spínací frekvence tranzistorů f _{spin}	1000 Hz

Výsledky simulace třífázového napěťového střídače jsou zachyceny na Obr. 2.3 až Obr. 2.5. Obr. 2.3 ukazuje průběh napětí na střídavé svorce měniče fáze a proti nule (fázové napětí střídač U_{v_a} – pět úrovní) a Obr. 2.4. ukazuje průběh sdruženého napětí na střídavých svorkách ($U_{v_{ab}}$ – tři úrovně). Průběhy napětí a proudu fáze a jsou pak zachyceny na Obr. 2.5.





Obr. 2.5 Napětí a proudy na střídavých svorkách 3f střídače při PWM (M=1)

2.2 Simulační výsledky modulárního měniče provozovaného při úplném přemodulování (M=100)

Je-li modulární měnič s půl-můstky provozován při úplném přemodulování (M=100, řídící signály na jednotlivé moduly jsou vidět na Obr. 2.6), pak se chová úplně shodně s třífázovým napěťovým střídače provozovaným při obdélníkovém řízení (také úplné přemodulování). Jak je vidět z Obr. 2.7 a Obr. 2.8 tak fázové napětí měniče nabývá 4 hodnot (+2/3.4.U_{c1}; +1/3.4.U_{c1}; -1/3.4.U_{c1}; -2/3.4.U_{c1};) a sdružené napětí nabývá 3 hodnot (+4.U_{c1}; 0; -4. U_{c1}). Je-li měnič provozovaný tímto způsobem, pak je vždy připojena horní nebo dolní větev měniče (tj. všechny čtyři kondenzátory najednou). Průběhy napětí a proudu fáze a jsou pak zachyceny na Obr. 2.9.



Obr. 2.6 Řídící signály na jednotlivé moduly měniče při přemodulování (M=100) – fáze a





Obr. 2.9 Napětí a proudy na střídavých svorkách modulárního měniče při přemodulování (M=100) – fáze a

2.3 Simulační výsledky modulárního měniče provozovaného při částečném přemodulování (M=2)

Chceme-li dosáhnout co nejmenšího zvlnění proudu, je nutné provozovat měnič s půlmůstky tak, aby byla co nejvíce využita vícehladinost měniče a tedy přepínání vždy mezi dvěma hladinami. Tento požadavek splňuje například provoz, při částečném přemodulování, kdy M=2, řídící signály na jednotlivé moduly jsou vidět na Obr. 2.10Obr. 2.6. Na Obr. 2.11 je pak vidět fázové napětí měniče a na Obr. 2.12 je zachyceno sdružené napětí, které nabývá 9 hodnot (+4.U_{c1}; +3.U_{c1}; +2.U_{c1}; +1.U_{c1}; 0; -1. U_{c1}; -2. U_{c1}; -3. U_{c1}; -4. U_{c1}). Průběhy napětí a proudu fáze a jsou pak zachyceny na Obr. 2.13 (je zde vidět, že proud i_a je vlivem přemodulování neharmonický).



Obr. 2.10 Řídící signály na jednotlivé moduly měniče při přemodulování (M=2) – fáze a





Obr. 2.13 Napětí a proudy na střídavých svorkách modulárního měniče při přemodulování (M=2) – fáze a

2.4 Simulační výsledky modulárního měniče provozovaného při částečném přemodulování (M=1,5)

Další série simulací byla provedena pro provoz měniče, při částečném přemodulování, kdy M=1,5. Řídící signály pro jednotlivé moduly jsou vidět na Obr. 2.14Obr. 2.6. Na Obr. 2.15 je pak vidět fázové napětí měniče, které se oproti přemodulování M=2 (Obr. 2.11) mění po větších skocích. Průběh sdruženého napětí, které nabývá opět 9 hodnot (+4.U_{c1}; +3.U_{c1}; +2.U_{c1}; +1.U_{c1}; 0; -1. U_{c1}; -2. U_{c1}; -3. U_{c1}; -4. U_{c1}) je pak k vidění na Obr. 2.16. Průběhy napětí a proudu fáze a jsou pak zachyceny na Obr. 2.17 (deformace proudu i_a vlivem přemodulování je již minimální).



Obr. 2.14 Řídící signály na jednotlivé moduly měniče při přemodulování (M=1,5) – fáze





Obr. 2.17 Napětí a proudy na střídavých svorkách modulárního měniče při přemodulování (M=1,5) – fáze a

2.5 Simulační výsledky modulárního měniče provozovaného při částečném maximálním modulačním indexu (M=1)

Při provozu měniče s půl-můstky při maximálním modulačním indexu (M=1), aby ještě nedošlo k přemodulování, vychází řídící signály na jednotlivé moduly následovně Obr. 2.18 (posun jednotlivých řídících pil je 1/4.T_{PWM}). Na Obr. 2.19 je pak vidět fázové napětí měniče a na Obr. 2.20 je zachyceno sdružené napětí, na kterém je vidět, že již měnič nepřepíná vždy mezi sousedními z 9 hladin, ale skoky při přepnutí jsou větší, což vede na vyšší zvlnění proudu i_a Obr. 2.21 (proud vychází harmonický).



Obr. 2.18 Řídící signály na jednotlivé moduly měniče při přemodulování (M=2) – fáze a





Obr. 2.21 Napětí a proudy na střídavých svorkách modulárního měniče pro maximální modulační index (M=1) – fáze a

2.6 Simulační výsledky modulárního měniče provozovaného při modulačním indexu M=0,5

Poslední série simulací modulárního měniče s půl-můstky provozovaného jako střídač, byla provedena pro provoz kdy M=0,5 a tedy není využit celý rozsah hladin měniče. Řídící signály pro jednotlivé moduly jsou vidět na Obr. 2.22.

Na Obr. 2.23 je pak vidět fázové napětí měniče a na Obr. 2.24 je k vidění sdružené napětí měniče, protože je měnič provozován při modulačním indexu M=0,5, tak je z těchto obrázků vidět nízká úroveň využití vícehladinosti měniče. Průběhy napětí a proudu fáze a jsou pak zachyceny na Obr. 2.25, oproti všem předchozím případů je vidět veliké zvlnění proudu.



Obr. 2.22 Řídící signály na jednotlivé moduly měniče (M=0,5) – fáze a





Obr. 2.25 Napětí a proudy na střídavých svorkách modulárního měniče (M=0,5) – fáze a

3 Simulace modulárního měniče provozovaného jako pulzní usměrňovač

Tato kapitola obsahuje výsledky testů modulárního měniče provozovaného jako třífázový napěťový pulzní usměrňovač s PWM modulací. Schéma simulačního modelu modulárního měniče s půl-můstky (zapojení měniče jako pulzního usměrňovače) je uvedené na Obr. 3.26, parametry simulace jsou uvedeny v Tabulce 3.

Výsledky simulací modulárního měniče s půl-můstky provozovaného jako pulzní usměrňovač jsou provedeny pro ustálený stav pro zatížení 10kW. Řídící signály pro jednotlivé moduly jsou vidět na Obr. 3.27. Na Obr. 3.28 je pak vidět průběh fázové napětí měniče (U_a), průběh fázového proudu (I_a) a průběh fázového napětí měniče proti zemi (U_{va}). Vlivem dobrého využití vícehladinosti měniče vychází i velmi malé zvlnění proudu I_a. Hlavní zjištěná nevýhoda tohoto typu měniče je k vidění na Obr. 3.29, kde jsou zachyceny průběhy napětí na kondenzátorech 1. a 5. modulu měniče fáze a. Usměrněné napětí na jednotlivých modulech měniče (U_{c1} a U_{c5}) vychází zvlněné se základní frekvencí napájecího zdroje (zvlnění s frekvencí 1. harmonické), což vede na potřebu vysokých hodnot kapacit kondenzátorů pro každý modul. Hodnota napětí v celém DC obvodě je pak dána součtem napětí jednotlivých modulů v každé půl větvi měniče (v tomto případě 4 moduly).



Obr. 3.26 Simulační model modulárního měniče s půl-můstky provozovaného jako pulzní usměrňovač

Amplituda napájecího napětí u _{max}	100 V / 50 Hz
Napětí v ss. obvodu jednoho půl-můstku U _{c1}	50 V
Kondenzátor jednoho půl-můstku C	8 mF
Vstupní tlumivka L	0,3 mH
R	0,1 Ω
Zátěž jednotlivých půl-můstků R _z	6 Ω
Spínací frekvence tranzistorů f _{spin}	1000 Hz

Tabulka 3: Parametry simulace modulárního měniče s půl-můstky



Obr. 3.27 Řídící signály na jednotlivé moduly měniče – fáze a



Obr. 3.28 Průběhy napětí a proudu na střídavých svorkách modulárního měniče – fáze a



Obr. 3.29 Napětí na modulech měniče (1. a 5. modul) a celkové napětí ss. obvodu

4 Závěr

Výzkumná zpráva se zabývala testováním vlastností modulárního vysokonapěťového měniče realizovaného pomocí půl-můstků. Za pomoci simulace byl měnič testován jako devítihladinový střídač a také jako napěťový pulzní usměrňovač. Z výsledků simulací měniče jako střídače se jeví jako zajímavé provozování měniče v oblasti malého přemodulování (M=1,5), kdy je maximálně využita vícehladinost měniče. Jako problematické u tohoto typu měniče bude napájení stejnosměrného obvodu, protože po dobu jedné půlperiody vede vždy horní (při opačné polaritě spodní) větev střídače. Uvedený problém se pak hlouběji projevil, při testování měniče v režimu pulzní usměrňovač, kde je napětí na kondenzátorech jednotlivých modulů zvlněno se stejnou frekvencí jako je fundamentální frekvence napájecího zdroje, což vede na požadavek vysokých hodnot kapacit těchto kondenzátorů.

Literatura

Blahník, V.; Glasberger, T.: Základní varianty zapojení vysokonapěťového měniče s H-můstky.
 Oponovaná výzkumná zpráva č. 22190-43-2012, Plzeň 2012.

[2] Siemens: HVDC Plus. [online]. [cit. 2013-02-18]. Dostupné z: www.siemens.com/annual/08/pool/04.../03.../hvdc_plus.pdf

[3] Friedrich, K.; , "Modern HVDC PLUS application of VSC in Modular Multilevel Converter topology,"
 Industrial Electronics (ISIE), 2010 IEEE International Symposium on , vol., no., pp.3807-3810, 4-7 July
 2010

Seznam obrázků

Obr. 1.1 Simulachi model modularniho menice s pul-mustky provozovaneho jako stridac s RL
zátěží zapojenou do hvězdy5
Obr. 2.2 Simulační model napěťového 3f střídače s RL zátěží7
Obr. 2.3 Fázové napětí 3f střídače při PWM (M=1) – fáze a
Obr. 2.4 Sdružené napětí 3f střídače při PWM (M=1)8
Obr. 2.5 Napětí a proudy na střídavých svorkách 3f střídače při PWM (M=1)
Obr. 2.6 Řídící signály na jednotlivé moduly měniče při přemodulování (M=100) – fáze a 9
Obr. 2.7 Fázové napětí modulárního měniče při přemodulování (M=100) – fáze a 10
Obr. 2.8 Sdružené napětí modulárního měniče při přemodulování (M=100) 10
Obr. 2.9 Napětí a proudy na střídavých svorkách modulárního měniče při přemodulování
(M=100) – fáze a10
Obr. 2.10 Řídící signály na jednotlivé moduly měniče při přemodulování (M=2) – fáze a 11
Obr. 2.11 Fázové napětí modulárního měniče při přemodulování (M=2) – fáze a 12
Obr. 2.12 Sdružené napětí modulárního měniče při přemodulování (M=2) 12
Obr. 2.13 Napětí a proudy na střídavých svorkách modulárního měniče při přemodulování
(M=2) – fáze a12
(M=2) – fáze a
(M=2) – fáze a12 Obr. 2.14 Řídící signály na jednotlivé moduly měniče při přemodulování (M=1,5) – fáze a 13 Obr. 2.15 Fázové napětí modulárního měniče při přemodulování (M=1,5) – fáze a
(M=2) – fáze a
(M=2) – fáze a
 (M=2) – fáze a
 (M=2) - fáze a
 (M=2) - fáze a
 (M=2) – fáze a

Obr. 2.25 Napětí a proudy na střídavých svorkách modulárního měniče (M=0,5) – fáze a 18
Obr. 3.26 Simulační model modulárního měniče s půl-můstky provozovaného jako pulzní
usměrňovač 20
Obr. 3.27 Řídící signály na jednotlivé moduly měniče – fáze a
Obr. 3.28 Průběhy napětí a proudu na střídavých svorkách modulárního měniče – fáze a 22
Obr. 3.29 Napětí na modulech měniče (1. a 5. modul) a celkové napětí ss. obvodu

Historie revizí

Rev. Kapito	Kanitala	Popis změny	Datum
	карітоїа		Jméno / Odd.