

# 2012

Pracoviště:

Regionální inovační centrum elektrotechniky

Výzkumná zpráva č.: 22190 - 046 - 2013

## Simulační studie jednofázového řízeného zdroje napětí (úvodní studie)

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

Práce vznikla s podporou projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0094

#### Anotace

Tato výzkumná zpráva se zabývá vlastnostmi a problematikou řízení jednofázového řízeného zdroje napětí. Tento zkoumaný zdroj napětí musí zvládnout emulovat jednofázovou trakční síť 25kV/50Hz nebo 15kV/16,7Hz a možností odběru výkonu až 1 MW. Vlastnosti řízeného zdroje napětí jsou testovány na vytvořeném simulačním modelu, který slouží i pro testování navrženého řízení. Hlavní sledované vlastnosti zdroje je výsledné THDu a jeho chování v kritických přechodových stavech.

## <mark>Obsah</mark>

1	ÚVOD	4
	1.1 Popis řízeného zdroje napětí	4
2	SIMULAČNÍ STUDIE ŘÍZENÉHO ZDROJE NAPĚTÍ	5
	2.1 Parametry simulace a simulační model řízeného zdroje napětí	5
	2.2 Regulace jednofázového řízeného zdroje napětí	. 8
	2.3 Simulační výsledky	9
3	SIMULAČNÍ STUDIE ŘÍZENÉHO ZDROJE NAPĚTÍ PŘI NAPĚTÍ U <sub>C</sub> =1000V	18
4	ZÁVĚR	22

## Použité symboly a zkratky

С	Kapacita vstupního kondenzátoru výkonového měniče
C <sub>f</sub>	Kapacita kondenzátoru LCL filtru
$f_{spin\_IGBT}$	Spínací frekvence tranzistorů výkonového měniče
f <sub>zvlneni_proudu</sub>	frekvence zvlnění proudu, který je generován výkonovým měničem
I <sub>m(1MW)</sub>	Amplituda proudu generovaného měničem pro výkon 1 MW
i <sub>1</sub> , i <sub>z</sub>	Proud generovaný měničem a proud na výstupu LCL filtru
k <sub>tr</sub>	Převod transformátoru
L <sub>1</sub> , L <sub>2</sub>	Vstupní a výstupní indukčnost LCL filtru
P <sub>N</sub>	Jmenovitý výkon měniče 1 MW
R <sub>1</sub> , R <sub>2</sub>	Parazitní odpor indukčností LCL filtru
Rz	Velikost ekvivalentního zátěžného odporu
THDu	Celkové harmonické zkreslení napětí (Total harmonic distortion)
t <sub>dt</sub>	Délka trvání mrtvého času pro IGBT tranzistory výkonového měniče
U <sub>c</sub>	Napájecí napětí stejnosměrného obvodu
U <sub>cf</sub>	Napětí na kondenzátoru LCL filtru
U <sub>m_prim</sub>	Amplituda napětí na primární straně zvyšovacího transformátoru
U <sub>w</sub>	Požadovaný průběh řízeného napětí
U <sub>wm</sub>	Amplituda požadovaného napětí
U <sub>v</sub>	Napětí generované měničem (napětí na střídavých svorkách měniče)
ω	Úhlová rychlost požadovaného napětí

### 1 Úvod

V rámci vzniku nového regionálního inovačního centra elektrotechniky (RICE) se řeší vybavenost laboratoří nejmodernějšími přístroji a různými druhy programovatelných zdrojů. Tato zpráva se zabývá simulací vysokonapěťového zdroje o jmenovitém výkonu 1MW, který bude schopný emulovat jednofázovou trakční síť 25kV/50Hz nebo 15kV/16.7Hz. Jako první byla provedena simulace jednofázového řízeného zdroje napětí, aby bylo možné otestovat navrženou topologii řízeného zdroje a základní principy řízení. Z této prvotní simulace pak vyplynou dílčí problémy, na které bude nutné se zaměřit při finálním návrhu řešení vysokonapěťového ždroje.

#### 1.1 Popis řízeného zdroje napětí

Řízený zdroj napětí se skládá z tří hlavních částí: jednofázového napěťového střídače, LC filtru a výstupního zvyšovacího transformátoru, jak je k vidění na 1.1. Napájení výkonového měniče je realizováno pomocí stejnosměrného napětí (U<sub>vstupní\_DC</sub>), jako topologie měniče je zvolen klasický H-můstek (čtyři IGBT tranzistory). Výstupní LC filtr společně s transformátorem mají dvě funkce: 1. vyfiltrovat zvlnění proudu vzniklé spínáním 1f střídače, 2. následné zvýšení napětí na požadovanou velikost (U<sub>výstupní AC</sub>).



Obr.1.1 Principiální schéma jednofázového řízeného zdroje napětí

## 2 Simulační studie řízeného zdroje napětí

#### 2.1 Parametry simulace a simulační model řízeného zdroje napětí

Simulace jednofázového řízeného zdroje napětí byla provedena pomocí programovacího jazyka C. Pro výpočet diferenciálních rovnic, byla zvolena klasická Eulerova metoda s velikostí simulačního kroku h = 0,1  $\mu$ s. Parametry simulace jsou uvedeny v tabulce 1.

U <sub>c</sub> … napájecí napětí ss. obvod = konst.	1500 V		
f <sub>spin_IGBT</sub> spínací frekvence IGBT tranzistorů	2 kHz		
f <sub>zvlneni_proudu</sub> frekvence zvlnění proudu	4 kHz		
(2.f <sub>spin_IGBT</sub> - střídání nulových vektorů)			
L <sub>1</sub> =L <sub>2</sub> indukčnost výstupního LCL filtru	1,6 mH		
R <sub>1</sub> =R <sub>2</sub> odpor indukčnosti výstupního LCL filtru	0,01 Ω		
C <sub>f</sub> kapacita kondenzátoru výstupního LCL filtru	100 μF		
R <sub>z</sub> (25kV1MW) velikost zátěžného odporu max. výkon při 25kV	0,4 Ω		
R <sub>z</sub> (25kV15kW) velikost zátěžného odporu min. výkon při 25kV	26 Ω		
R <sub>z</sub> (15kV1MW) velikost zátěžného odporu max. výkon při 15kV	0,14 Ω		
R <sub>z</sub> (15kV10kW) velikost zátěžného odporu min. výkon při 15kV	14 Ω		
k <sub>TR</sub> … uvažovaný převod transformátoru	40		
U <sub>w</sub> … požadovaný průběh řízeného napětí na výstupu			

#### Tabulka 1: Parametry simulace jednofázového řízeného zdroje napětí

Při volbě parametrů výkonového obvodu a návrhu LC filtru pro řízený zdroj napětí o jmenovitém výkonu 1MW (uvedených v tabulce 1) byli použity následující výpočty nadefinované hodnoty použitých komponent:

(převod transformátoru  $k_{TR}$ =40, amplituda požadovaného napětí  $U_{wm}$ =25000. . $\sqrt{2}$ =35355 V, indukčnost výstupního LC filtru L<sub>1</sub>=1,6mH).

Amplituda přepočítaného primárního napětí pak vychází:

$$U_{m prim} = U_{mw} / k_{TR} = 35355 / 40 = 883 V$$
 (1)

Z požadovaného maximálního výkonu měniče P<sub>N</sub>=1MW se pak vypočte amplituda maximálního proudu měniče:

$$I_{m(1MW)} = P_{N.2} / U_{m \text{ prim}} = 1000000.2 / 883 = 2263 \text{ A}$$
 (2)

Z vypočtených hodnot a z hodnot náhradního schématu řízeného zdroje lze pak vypočítat velikost napětí měniče, které je nutné generovat pro maximální výkon zdroje (1MW). Vypočtená hodnota  $U_v$  je vlastně přepona trojúhelníku vektorového diagramu jednofázového zdroje (obdobné jako pro jednofázový pulzní usměrňovač viz. [1] a Obr.3.19)

$$U_{v} = \sqrt{\left[\left(U_{m_{prim}}\right)^{2} + \left(\omega.L_{1}.\ I_{m(1MW)}\right)^{2}\right]} = \sqrt{\left[(883)^{2} + (2.\pi.50.0,0016.2263)^{2}\right]} = 1440 \text{ V}$$
(3)

Výsledné napětí ve stejnosměrném obvodu měniče pak musí být větší, proto bylo zvoleno na hodnotu U<sub>c</sub>=1500V.

Simulační model je schematicky znázorněn na 2.1. V této simulaci došlo k určitým zjednodušením. Měnič je například simulován za pomoci ideálních spínacích prvků, transformátor je v simulaci reprezentován pouze svojí rozptylovou indukčností, která je rovna vyhlazovací indukčnosti filtru (L<sub>1</sub>) a tím vzniká symetrický LCL filtr. Zátěž je pak realizována pomocí zátěžného odporu R<sub>z</sub> (hodnoty zátěžného odporu pro různé výkony a napěťové hladiny jsou pak uvedeny v tabulce 1).



Obr.2.2 Simulační schéma jednofázového řízeného zdroje napětí

Použitý LCL filtr slouží k vyhlazení křivky proudu i<sub>1</sub> a to tak že filtruje frekvence blízké zvlnění tohoto proudu, které je dáno spínací frekvencí IGBT tranzistorů (frekvence zvlnění proudu vychází 4kHz, protože je rovna 2. $f_{spin\_IGBT}$ , což je dáno modulací měniče, která využívá tzv. střídání nulových vektorů, které je detailněji vysvětleno např. v [2]). Tím, že byl použit vhodně zvolený LCL filtr vychází úspora v potřebné velikosti indukčnosti, oproti klasickému L filtru a tím i ke snížení ztrát na vyhlazovacím filtru. Použití LCL filtru zanáší do obvodu kmity na vlastní frekvenci LCL, jak je dále vidět ve výsledcích simulací. Na Obr.2.3 jsou pak vidět frekvenční charakteristiky použitého LCL filtru (hodnoty L<sub>1</sub>, R<sub>1</sub>, C<sub>1</sub>, L<sub>2</sub>, R<sub>2</sub> jsou uvedeny v Tabulce 1), z charakteristik je pak vidět výsledný útlum filtru A=-71,9 dB pro frekvenci zvlnění proudu f<sub>zvlnění</sub>=4kH ( $\omega$ =25133 rad/s).



Obr.2.3 Frekvenční charakteristiky pro navržený LCL filtr použitý při simulaci řízeného zdroje napětí

#### 2.2 Regulace jednofázového řízeného zdroje napětí

Navržené řízení jednofázového řízeného zdroje napětí bylo inspirováno řízením modulárního vysokonapěťového měniče, které je uvedeno v [3], tento typ řízení kombinuje přímou regulaci proudu s dopřednou kompenzací. Přímá regulace proudu je zde realizována tzv. "rezonančním regulátorem" (více o vlastnostech rezonančních regulátorů je uvedeno např. v [4] a [5]).

V navržené regulační struktuře uvedené na Obr.2.4, je pomocí regulátoru Reg<sub>Ucf</sub> řízeno napětí na kondenzátoru LCL filtru (U<sub>Cf</sub>) na požadovanou hodnotu U<sub>w</sub>. Výsledný signál je pak sečten v sumačním bloku se signálem z dopředné kompenzace U<sub>v\_estim</sub>. Jako signál U<sub>v\_estim</sub> je pro jednoduchost použit přímo požadovaný signál U<sub>w</sub>, čímž se v modelu zanedbá LCL filtr. Hodnoty požadovaného napětí U<sub>w</sub> se spočítají z amplitudy U<sub>mw</sub> (25kV. $\sqrt{2}$  nebo 15kV. $\sqrt{2}$ ) a frekvence f<sub>w</sub> (předpokládá se změna rozsahu za chodu 40-60Hz a 14-18Hz).



Obr.2.4 Navržené regulační schéma pro řízený zdroj napětí

#### 2.3 Simulační výsledky

První část simulačních výsledků (Obr.2.5 až Obr.2.10) je provedena pro požadované napětí 25kV/50Hz (U<sub>w</sub> = =25000. $\sqrt{2}/k_{TR}$ .cos(2. $\pi$ .50.t)). Zesílení rezonančního regulátoru bylo zvoleno za pomoci simulace na hodnotu K<sub>r</sub>=50.

Na Obr.2.5 a Obr.2.6je vidět chování zdroje v ustáleném stavu při plném zatížení (Obr.2.5) a při minimálním zatížení (Obr.2.6). Fialový průběh (U<sub>w</sub>) je požadované napětí a zelený (U<sub>cf</sub>) je skutečný průběh napětí, který je měřen na filtračním kondenzátoru C<sub>f</sub>. Červený průběh (i<sub>1</sub>) je pak proud generovaný měničem a modrý průběh (i<sub>2</sub>) je vyhlazený proud za LCL filtrem. Na Obr.2.7 je pak vidět harmonická analýza napětí U<sub>cf</sub> pro případ zatíženého zdroje 1MW a na Obr.2.8 je pak vidět harmonická analýza napětí U<sub>cf</sub> pro případ nezatíženého zdroje 15kW. Chování zdroje při skokovém zatížení a odtížení je pak zachyceno na Obr.2.9 a Obr.2.10, kde je vidět problém s kmitáním LCL filtru (hlavně při odtížení zdroje Obr.2.9), které se částečně přenáší i do řízení přes zpětnou vazbu regulace a to skrze rezonanční regulátor (navzdory jeho ostré frekvenční charakteristice). Do určité míry může pomoci filtrace měřeného signálu U<sub>cf</sub>, aby se odstranila vlastní frekvence LCL filtru. Nebo nasazení prediktivního řízení, které by se snažilo kmitání LCL filtru úplně potlačit, jedná se však o velmi pokročilé typy řízení s nutností dlouhodobějších testů přímo na reálném zařízení.







Obr.2.6 Simulace – ustálený stav 25kV/50Hz zátěž měniče 15kW



*Obr.2.7 Harmonická analýza napětí*  $U_{Cf}$  – ustálený stav 25kV/50Hz zátěž měniče 1MW (pro průběh na Obr.2.5)



Obr.2.8 Harmonická analýza napětí  $U_{Cf}$  – ustálený stav 25kV/50Hz zátěž měniče 15kW (pro průběh na Obr.2.6)



Obr.2.9 Simulace – přechodový děj 25kV/50Hz změna zátěže měniče z 1MW na 15kW



Obr.2.10 Simulace – přechodový děj 25kV/50Hz změna zátěže měniče z 15kW na 1MW

Druhá část simulačních výsledků (Obr.2.11 až Obr.2.14) je provedena pro požadované napětí 15kV/16,7Hz (U<sub>w</sub> = =15000. $\sqrt{2/k_{TR}}$ .cos(2. $\pi$ .16,7.t)). Zesílení rezonančního regulátoru bylo sníženo na hodnotu K<sub>r</sub>=8, protože docházelo k enormně vysokému kmitání na LCL filtru, které byl způsobeno přenosem přes zpětnou vazbu regulace. Na Obr.2.11 a Obr.2.12 je vidět chování zdroje v ustáleném stavu při plném zatížení (Obr.2.11) a při minimálním zatížení (Obr.2.12). Chování zdroje při skokovém zatížení a odtížení je pak zachycena na Obr.2.13 a Obr.2.14, kde je vidět že přechodový děj trvá delší dobu, což je způsobeno nižším zesílením rezonančního regulátoru.



Obr.2.11 Simulace – ustálený stav 15kV/16,7Hz zátěž měniče 1MW



Obr.2.12 Simulace – ustálený stav 15kV/16,7Hz zátěž měniče 10kW



Obr.2.13 Simulace – přechodový děj 15kV/16,7Hz změna zátěže měniče z 1MW na 10kW



*Obr.2.14 Simulace – přechodový děj 15kV/16,7Hz změna zátěže měniče z 10kW na 1MW* 

Třetí část simulačních výsledků (Obr.2.15 až Obr.2.18) je provedena opět pro požadované napětí 25kV/50Hz a při simulaci měniče jsou uvažovány mrtvé časy o délce t<sub>dt</sub>=3,6µs. Jedná se opět o ustálené stavy při plném zatížení (Obr.2.15) a při minimálním zatížení (Obr.2.16). Na Obr.2.17 je pak vidět harmonická analýza napětí U<sub>cf</sub> pro případ zatíženého zdroje 1MW a na Obr.2.18 je pak vidět harmonická analýza napětí U<sub>cf</sub> pro případ nezatíženého zdroje 15kW. Z výsledků simulace je vidět, že mrtvé časy měniče hrají nezanedbatelnou roli a projeví se jako charakteristické harmonické ve frekvenčním spektru, došlo ke zvednutí THDu o více jak 2%.



*Obr.2.15 Simulace – ustálený stav 25kV/50Hz zátěž měniče 1MW s mrtvými časy t<sub>dt</sub>=3,6\mus* 



*Obr.2.16 Simulace – ustálený stav 25kV/50Hz zátěž měniče 15kW s mrtvými časy t<sub>di</sub>=3,6µs* 



*Obr.2.17 Harmonická analýza napětí*  $U_{Cf}$  – ustálený stav 25kV/50Hz zátěž měniče 1MW s mrtvými časy  $t_{dt}$ =3,6µs (pro průběh na Obr.2.15)



*Obr.2.18 Harmonická analýza napětí*  $U_{Cf}$  – ustálený stav 25kV/50Hz zátěž měniče 15kW s mrtvými časy  $t_{dt}$ =3,6 $\mu$ s (pro průběh na Obr.2.16)

## 3 Simulační studie řízeného zdroje napětí při napětí U<sub>c</sub>=1000V

Je-li požadováno nižší napětí ve stejnosměrném obvodě (U<sub>c</sub>=1000V), je nutné zvolit a vypočítat nové parametry výkonového obvodu. Při volbě parametrů byly použity obdobné výpočty jako v kapitole 2.1.

Hodnoty a výpočty použitých komponent výkonového obvodu zdroje napětí:

(převod transformátoru  $k_{TR}$ =40, amplituda požadovaného napětí U<sub>wm</sub>=25000. . $\sqrt{2}$ =35355 V, indukčnost výstupního LC filtru L<sub>1</sub>=0,4mH, ).

Amplituda přepočítaného primárního napětí pak vychází:

$$U_{m prim} = U_{mw} / k_{TR} = 35355 / 40 = 883 V$$
 (4)

Z požadovaného maximálního výkonu měniče  $P_N=1MW$  se pak vypočte amplituda maximálního proudu měniče:

$$I_{m(1MW)} = P_{N.2} / U_{m prim} = 1000000.2 / 883 = 2263 A$$
 (5)

Z vypočtených hodnot a z hodnot náhradního schématu řízeného zdroje lze pak vypočítat velikost napětí měniče, které je nutné generovat pro maximální výkon zdroje (1MW). Aby vypočtená přepona trojúhelníku byla menší než napětí stejnosměrného obvodu (U<sub>c</sub>=1000V), bylo nutné snížit indukčnost LC filtru, což vede na nutnost přepočítat celý LCL filtr.

Při volbě vhodných parametrů je problém že při vyšším převodu transformátoru sice vyjde nižší napětí  $U_{m_prim}$  (první odvěsna trojúhelníku), ale zvýší se proud  $I_{m(1MW)}$  (druhá odvěsna trojúhelníku). Zmiňovaný trojúhelník (fázorový diagram) je spolu se schematickým znázorněním obvodu k vidění na Obr.3.19.



Obr.3.19 Schematické znázornění měniče a LC filtru s příslušným fázorovým diagramem

Vypočtená hodnota  $U_{vm}$  přepona trojúhelníku fázorového diagramu jednofázového zdroje (Obr.3.19) se pak vypočítá podle Pythagorovo věty:

$$U_{\rm vm} = \sqrt{\left[ \left( U_{\rm m \ prim} \right)^2 + \left( \omega. L_1. \ I_{\rm m(1MW)} \right)^2 \right]} = \sqrt{\left[ (883)^2 + (2.\pi.50.0,0004.2263)^2 \right]} = 927 \text{ V} \tag{6}$$

Byl tedy splněn požadavek, aby výsledné napětí  $U_{vm}$  vyšlo menší než napětí ve stejnosměrném obvodu měniče ( $U_c$ =1000V).

Na Obr.3.20 jsou pak vidět frekvenční charakteristiky pro nově navržený LCL filtr ( $L_1=L_2=0,4$ mH,  $R_1=R_1=0,01\Omega$ ,  $C_1=200\mu$ F), z frekvenčních charakteristik je pak vidět výsledný útlum filtru A=-71,9 dB pro frekvenci zvlnění proudu f<sub>zvlnění</sub>=4kH ( $\omega$ =25133 rad/s).

Pro nově navržený LCL filtr a napájecí napětí  $U_c=1000V$  je problém s vlastním kmitáním filtru ještě výraznější což je vidět na výsledcích simulací Obr.3.21 až Obr.3.24.



*Obr.3.20 Frekvenční charakteristiky pro navržený LCL filtr použitý při simulaci řízeného zdroje napětí* 



*Obr.3.21 Simulace – ustálený stav 25kV/50Hz zátěž měniče 1MW s U<sub>C</sub>=1000V* 



*Obr.3.22 Simulace – ustálený stav 25kV/50Hz zátěž měniče 15kW s U<sub>C</sub>=1000V* 



Obr.3.23 Simulace - přechodový děj 25kV/50Hz změna zátěže měniče z 1MW na 15kW s  $U_C$ =1000V



*Obr.3.24 Simulace – přechodový děj 25kV/50Hz změna zátěže měniče z 15kW na 1MW s U<sub>C</sub>=1000V* 

#### 4 Závěr

Ve zprávě jsou prezentovány simulační výsledky vysokonapěťového zdroje o jmenovitém výkonu 1MW, který bude schopný emulovat jednofázovou trakční síť 25kV/50Hz případně 15kV/16.7Hz. Prezentované výsledky slouží jako podklady pro řešení reálného řízeného zdroje napětí určeného pro laboratoře RICE.

Použitím LCL filtru (namísto klasického L filtru) k vyhlazení proudu generovaného z měniče vznikají v obvodu kmity (vlastní frekvenci LCL filtru). Tyto kmity jsou pomocí zpětné vazby (měřená hodnota U<sub>cf</sub>) zavedeny do regulace a projdou i přes rezonanční regulátor (navzdory jeho ostré frekvenční charakteristice) a tím nastane problém s generováním zmíněné frekvence přímo měničem. Kmitání obvodu je nejvíce vidět pro přechodový stav, kdy dojde k odtížení zdroje a je velice problematické hlavně při generování napětí 15kV/16,7Hz (větší proudy pro zátěž 1MW znamenají větší kmity), proto je sníženo zesílení rezonančního regulátoru z 50 na 8. Do určité míry může pomoci filtrace měřeného signálu U<sub>cf</sub>, aby se odstranila vlastní frekvence LCL filtru. Nebo nasazením prediktivního řízení, které

by se snažilo kmitání LCL filtru úplně potlačit, jedná se však o velmi pokročilé typy řízení s nutností dlouhodobějších testů přímo na reálném zařízení.

Protože je na zdroj kladen požadavek na co nejnižší THDu, byl měnič testován i s uvažováním mrtvých časů (t<sub>dt</sub>=3,6µs). Z výsledků simulace je vidět, že mrtvé časy měniče hrají nezanedbatelnou roli a projeví se jako charakteristické harmonické ve frekvenčním spektru, dojde ke zvednutí THDu o více jak 2%.

Závěrečná sada simulací byla provedena pro napájení stejnosměrného obvodu při sníženém napětí na  $U_c$ =1000V. Ve výsledcích těchto testů se opět projevilo, že zvýšení odebíraného proudu (pro výkon 1 MW a nižší napětí  $U_c$  vychází požadavek na generování vyššího proudu z měniče) vede na vyšší kmity LCL filtru.

#### Literatura

[1] Vondrášek, F.: Výkonová elektronika, svazek III. Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň, 2003.

[2] Blahník, V.: Algoritmy řízení a regulace sestavy trakčního měniče se středofrekvenčním transformátorem. Disertační práce KEV-FEL-ZČU Plzeň : 2011, 111 s.

[3] Blahník, V., Žák, J., Peroutka, Z.: Přímá regulace proudu trakčního měniče se stře-dofrekvenčním transformátorem umožňující kompenzaci nízkofrekvenčního rušení. In Elektrické pohony. Praha: Česká elektrotechnická společnost, ÚOS Elektrické pohony, 2011. s. 1-8.

[4] Song, H-S., Keil, R., Mutschler, P., Weem, J., Nam, K.: Advanced Control Scheme for a Single-Phase PWM Rectifier in Trastin Applications. In: EPE 03. Toulouse 2003.

[5] Blahník, V., Žák, J., Komrska, T., Peroutka, Z.: Řízení trakčního pulzního usměrňovače s využitím PR regulátoru. In Elektrické pohony. Praha : Český svaz vědeckotechnických společností, 2009.

## Seznam obrázků

Obr.1.1 Principiální schéma jednofázového řízeného zdroje napětí
Obr.2.2 Simulační schéma jednofázového řízeného zdroje napětí
Obr.2.3 Frekvenční charakteristiky pro navržený LCL filtr použitý při simulaci řízeného zdroje
napětí8
Obr.2.4 Navržené regulační schéma pro řízený zdroj napětí9
Obr.2.5 Simulace – ustálený stav 25kV/50Hz zátěž měniče 1MW10
Obr.2.6 Simulace – ustálený stav 25kV/50Hz zátěž měniče 15kW 10
Obr.2.7 Harmonická analýza napětí U <sub>Cf</sub> – ustálený stav 25kV/50Hz zátěž měniče 1MW (pro
průběh na Obr.2.5)
Obr.2.8 Harmonická analýza napětí U <sub>Cf</sub> – ustálený stav 25kV/50Hz zátěž měniče 15kW (pro
průběh na Obr.2.6)
Obr.2.9 Simulace – přechodový děj 25kV/50Hz změna zátěže měniče z 1MW na 15kW 12
Obr.2.10 Simulace – přechodový děj 25kV/50Hz změna zátěže měniče z 15kW na 1MW 12
Obr.2.11 Simulace – ustálený stav 15kV/16,7Hz zátěž měniče 1MW13
Obr.2.12 Simulace – ustálený stav 15kV/16,7Hz zátěž měniče 10kW 14
Obr.2.13 Simulace – přechodový děj 15kV/16,7Hz změna zátěže měniče z 1MW na 10kW 14
Obr.2.14 Simulace – přechodový děj 15kV/16,7Hz změna zátěže měniče z 10kW na 1MW 15
Obr.2.15 Simulace – ustálený stav 25kV/50Hz zátěž měniče 1MW s mrtvými časy t <sub>dt</sub> =3,6µs 16
Obr.2.16 Simulace – ustálený stav 25kV/50Hz zátěž měniče 15kW s mrtvými časy t <sub>dt</sub> =3,6µs 16
Obr.2.17 Harmonická analýza napětí U <sub>Cf</sub> – ustálený stav 25kV/50Hz zátěž měniče 1MW
s mrtvými časy t <sub>dt</sub> =3,6μs (pro průběh na Obr.2.15)17
Obr.2.18 Harmonická analýza napětí U <sub>cf</sub> – ustálený stav 25kV/50Hz zátěž měniče 15kW
s mrtvými časy t <sub>dt</sub> =3,6μs (pro průběh na Obr.2.16)17
Obr.3.19 Schematické znázornění měniče a LC filtru s příslušným fázorovým diagramem 19
Obr.3.20 Frekvenční charakteristiky pro navržený LCL filtr použitý při simulaci řízeného
zdroje napětí
Obr.3.21 Simulace – ustálený stav 25kV/50Hz zátěž měniče 1MW s U <sub>C</sub> =1000V 20
Obr.3.22 Simulace – ustálený stav 25kV/50Hz zátěž měniče 15kW s U <sub>C</sub> =1000V 21
Obr.3.23 Simulace - přechodový děj 25kV/50Hz změna zátěže měniče z 1MW na 15kW
s U <sub>C</sub> =1000V21

Obr.3.24	Simulace –	přechodový	děj	25kV/50Hz	změna	zátěže	měniče	z 15kW	na	1MW
s U <sub>C</sub> =100	0V VC									22

## Historie revizí

Dev		Popis změny	Datum		
Rev.	Kapitola		Jméno / Odd.		