

Pracoviště:Regionální inovační centrum elektrotechnikyVýzkumná zpráva č.:22190 - 023 - 2013

Citlivostní analýza vstupního měniče pomocných pohonů při změně vstupní indukčnosti a vzorkovací frekvence řízení

Druh úkolu:	Vědecko-výzkumný
Řešitelé:	Ing. Vojtěch Blahník, Ph.D.
Vedoucí úkolu:	prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
Počet stran:	38
Datum vydání:	září 2013
Revize:	1
Р	ráce vznikla s podporou projektu FR-TI3/183

a CZ.1.05/2.1.00/03.0094

Anotace

Tato výzkumná zpráva přímo navazuje na zprávy: Simulace vstupního měniče pomocných pohonů a analýza chování při minimálním zatížení a zprávu Regulace stabilizátoru napětí pro pomocné pohony (úvodní studie). Zpráva se zabývá stabilitou vstupního měniče pomocných pohonů při změně parametru vstupní indukčnosti. Dále je zde analyzována stabilita navržené regulace při změně vzorkovací periody řízení a nutnost přeladění regulátorů. Součástí zprávy jsou i doporučené hodnoty pro nastavení regulátorů u zkoumaných regulačních struktur při daných parametrech, které slouží jako podklady pro následné testy měniče v laboratoři.

Obsah

1	ÚVOD	4
2	SIMULAČNÍ MODEL VSTUPNÍHO STABILIZÁTORU NAPĚTÍ	4
3	VÝSLEDKY TESTŮ REGULACÍ	5
	3.1 Test funkčnosti regulátoru napětí při změně parametrů výkonového obvodu	8
	3.2 Test funkčnosti regulátoru napětí při změně vzorkovací frekvence	16
4	ZÁVĚR	32

Použité symboly a zkratky

C ₁ , C ₂	Kapacita výstupních kondenzátorů jednotlivých pulzních měničů
C ₃	Kapacita výstupního kondenzátoru celého měniče
d_sum_ $_{R\Delta Uc}$	Přírůstek sumace dorovnávacího regulátoru
e_mod2	Korekční modulační signál, pro vyrovnání napětí na kondenzátorech
f _{spin}	Spínací frekvence tranzistorů
l _d	Vstupní proud měniče
l _{dw}	Požadovaná velikost vstupního proudu měniče
i _{z1} , i _{z2}	Konstantní zdroje proudu, použité jako zátěže jednotlivých pulzních měničů
L	Indukčnost vstupního filtru měniče
mod ₁ , mod ₂	Modulační signály pro pulzně šířkovou modulaci jednotlivých pulzních
	měničů
PI	Proporčně-integrační regulátor
PWM	Pulzně šířková modulace
R	Odpor indukčnosti vstupního L filtru
R _c	Parazitní odpor mezi kondenzátory jednotlivých pulzních měničů a
	výstupního kondenzátoru
sum_ _{RId}	Sumace regulátoru proudu
T _{PWM}	Doba periody pulzně šířkové modulace
T _{vz}	Vzorkovací doba regulace (obvykle 1/ _{fspin})
U _{c_vyst}	Napětí na výstupním kondenzátoru celého měniče
U _{cw}	Velikost požadovaného napětí na výstupním kondenzátoru celého měniče
U _{c1} , U _{c2}	Napětí na výstupních kondenzátorech jednotlivých pulzních měničů
Ut	Vstupní napájecí napětí měniče
Uv	Napětí na vstupních svorkách měniče
ZPM	Zvyšovací pulzní měnič

1 Úvod

Hlavním cílem této výzkumné zprávy je otestovat navržené řízení vstupního stabilizátoru napětí při změně parametrů vstupní indukčnosti. Zkoumá se zde stabilita regulace výstupního napětí a řízeného proudu, dojde-li k změně parametrů vstupní indukčnosti při zachování nastavení regulátorů. Výsledek pak poslouží jako podklad pro laboratorní měření, kde se hodnoty vstupní indukčnosti nemusí shodovat se zadanými parametry. Další část zprávy zkoumá kvalitu regulace výstupního napětí, dojde-li ke změně vzorkovací periody řízení. Prodloužení vzorkovací periody řízení je jednou z možných změn, která je nutná pro reálný výpočet algoritmu řízení v DSP. Prodloužením vzorkovací periody řízení a je tedy nutné otestovat řízení pro tento stav a případně najít nové parametry pro nastavení regulátorů.

2 Simulační model vstupního stabilizátoru napětí

Použitý simulační model se shoduje s modelem použitým v [1], tvorbou simulačního modelu se detailněji zabývá zpráva [2]. Schematické znázornění simulačního modelu s příslušnými parametry je uvedeno na Obr.2.1 a v tabulce 1.



u _t napájecí stejnosměrné napětí	650 V
f _{spin} spínací frekvence tranzistorů	30 kHz
L indukčnost vstupního filtru	900 μH
R odpor indukčnosti vstupního L filtru	0,01 Ω
C ₁ kapacita výstupního kondenzátoru horní ZPM	10 μF
C ₂ kapacita výstupního kondenzátoru dolní ZPM	5 μF
C ₃ kapacita výstupního kondenzátoru celého měniče	1 mF
R _c … parazitní odpor mezi kondenzátory jednotlivých ZPM a výstupního kondenzátoru	0,001 Ω
ΣU_{cw} … požadovaná velikost výstupního napětí	1100 V
i _z zátěžný proud P = 0 W	0 A
i _z … zátěžný proud P = 22 kW	20 A
l _d řízený vstupní proud měniče	

Tabulka 1: Parametry simulace vstupního stabilizátoru napětí ve variantě dvou ZPM

3 Výsledky testů regulací

Pro regulaci výstupního napětí je použito řízení navrhnuté ve [2], které je ve zprávě označeno jako řízení typu III, řízení umožňuje regulaci vstupního proudu a nadřazenou regulaci výstupního napětí s rozvážením napětí na jednotlivých kondenzátorech. Ve zprávě [1] je pak řešen nekontrolovatelný nárůst výstupního napětí pro nezatížený měnič a jsou zde navrženy tři různé řešení: tvrdé nulování sumace, omezení modulačního signálu pomocí zpětné vazby s proporčním regulátorem, anti-windup vazba na omezení nárůstu výstupního napětí. Jako nejperspektivnější se jeví varianty - Omezení modulačního signálu pomocí zpětné vazby s proporčním regulátorem (regulační schéma je uvedeno na Obr.3.2 a parametry nastavení regulátorů jsou uvedeny v tabulce 2) a varianta anti-windup vazba na

omezení nárůstu výstupního napětí (regulační schéma je uvedeno na Obr.3.3 a parametry nastavení regulátorů jsou uvedeny v tabulce 3).



Tabulka 2: Nastavení PI regulátorů pro navrhnuté řízení s omezením modulačního signálu pomo	CÍ
zpětné vazby s proporčním regulátorem	

Regulátor	Тур	Parametry – zesílení a časová konstanta	Saturační mez omezovače	
R _{Uc}	PI	ΣU_{cw} = 1100 V; K _{Uc} = 1; T _{Uc} = 0,001 s	0 – 110 A	
R _{Id}	PI	K _{Id} = 0,01; T _{Id} = 0,0004 s	0 – 0,95	
$R_{\Delta Uc}$	PI	$K_{\Delta Uc}$ = 0,0001; $T_{\Delta Uc}$ = 0,01 s	0 – 0,95	
	Р	K _{p_mod} = 0,03		



Tabulka 3: Nastavení PI regulátorů pro navrhnuté řízení s anti-windup vazbou pro omezení nárůstu výstupního napětí

Regulátor	Тур	Parametry – zesílení a časová konstanta	Saturační mez omezovače	
R _{Uc}	PI	ΣU_{cw} = 1100 V; K _{Uc} = 1; T _{Uc} = 0,001 s	0 – 110 A	
R _{Id}	PI	K _{Id} = 0,01; T _{Id} = 0,0004 s	0 – 0,95	
$R_{\Delta Uc}$	PI	$K_{\Delta Uc}$ = 0,0001; $T_{\Delta Uc}$ = 0,01 s	0 – 0,95	
	Р	K _{anti} = 0,00001		

3.1 Test funkčnosti regulátoru napětí při změně parametrů výkonového obvodu

Cílem této kapitoly je otestovat funkčnost navržené regulace a nastavení regulátorů, při změně hodnoty indukčnosti vstupního L filtru. V prvním kroku testů byla indukčnost vstupního L filtru snížena na hodnotu L=500µH (parazitní odpor R=9,2m Ω), jedná se o jednu z uvažovaných variant vstupního filtru.

Na Obr.3.4 je vidět chování měniče při skokovém zatížení, pro variantu řízení s omezení modulačního signálu pomocí zpětné vazby s proporčním regulátorem. Regulace napětí i proudu vykazuje dobré chování bez nutnosti změnit nastavení regulátorů), došlo pouze k předpokládanému zvětšení zvlnění proudu. Na Obr.3.5 je pak vidět chování měniče při opětovném malém zatížení, kde pro malou vstupní indukčnost vychází proudy jen s minimálním přerušením a tudíž není takový problém s měřením jejich velikosti a následnou regulací.





Oba přechodové stavy (skokovém zatížení měniče a opětovné malé zatížení) byli otestovány i pro variantu řízení s anti-windup vazbou na omezení nárůstu výstupního napětí Obr.3.6 a Obr.3.7.





Druhá série testů byla provedena pro vyšší hodnotu vstupního L filtru (L=1,2mH, parazitní odpor R=15m Ω), jedná se o druhou z uvažovaných variant vstupního filtru.

Na Obr.3.8 je vidět chování měniče při skokovém zatížení, pro variantu řízení s omezení modulačního signálu pomocí zpětné vazby s proporčním regulátorem. Regulace napětí i proudu vykazuje opět dobré chování bez nutnosti změnit nastavení regulátorů), došlo pouze k předpokládanému snížení zvlnění proudu. Na Obr.3.9 je pak vidět chování měniče při opětovném malém zatížení, kde pro větší vstupní indukčnost je vidět výrazněji problém s měřením malého proudu při přerušovaných proudech (tento problém je blíže popsán a řešen ve [1]), což vede na zatlumené kmitání modulačního signálu.





Oba přechodové stavy (skokovém zatížení měniče a opětovné malé zatížení) byli otestovány i pro variantu řízení s anti-windup vazbou na omezení nárůstu výstupního napětí Obr.3.10 a Obr.3.11.





3.2 Test funkčnosti regulátoru napětí při změně vzorkovací frekvence

Tato kapitola se zabývá problematikou rychlosti vzorkování napětí a proudu, pro regulaci stabilizátoru napětí s ohledem na stabilitu a robustnost regulace. Aktuálně dochází k vzorkování napětí a proudu jednou za periodu pilového signálu ($T_{vz} = T_{PWM}$) vzorkování je vždy v nule pily, to je výhodné protože je měřena střední hodnota proudu (problém s nepřesností měření nastává pro přerušované proudy). Protože pracujeme s vysokou spínací frekvencí 30 kHz ($T_{PWM} = 1/f_{spin} = 33,3\mu$ s) nastává časový problém s převodem měřených veličin a následným zpracováním v regulaci. Z těchto důvodů je nutné otestovat navržená řízení pro frekvenci řízení (i vzorkování) menší než je stávající. V této kapitole bude testováno chování měniče při $T_{vz} = 1/2 T_{PWM}$, $T_{vz} = 1/5 T_{PWM}$ a $T_{vz} = 1/10 T_{PWM}$.

Výsledky simulace při vzorkování $T_{vz} = T_{PWM}$ jsou k vidění na Obr.3.12 (skokové zatížení měniče) a na Obr.3.13 (skokové odtížení měniče)





Změna doby vzorkování na dvojnásobek ($T_{vz} = 1/2 T_{PWM}$) se projevila mírnými zákmity proudu, jak je vidět na Obr.3.14 a Obr.3.15. Zmíněné zakmitání je způsobné tím, že nedošlo ke změně stávajícího nastavení regulátorů (**Tabulka 2**) a dopravní zpoždění, které vzniklo změnou vzorkovací frekvence je nezanedbatelné.



Pro testované řízení s omezením modulačního signálu pomocí zpětné vazby s proporčním regulátorem je vidět, že při odtížení měniče Obr.3.15 ($T_{vz} = 1/2 T_{PWM}$) trvá snížení sumace proudového regulátoru přibližně stejně dlouhou dobu, jako pro případ $T_{vz} = T_{PWM}$ (Obr.3.13).



Změna doby vzorkování na pětinásobek ($T_{vz} = 1/5 T_{PWM}$) se projevila silnými kmity řízených veličin Obr.3.16 a Obr.3.17 a je tedy nutné přenastavit regulátory.



Vlivem kmitání napětí a proudu došlo k rychlému snížení sumace proudového regulátoru, při odtížení měniče jak je vidět na Obr.3.17.



Při změně vzorkovací doby na desetinásobek ($T_{vz} = 1/10 T_{PWM}$) je měnič neřiditelný pro stávající nastavení regulátorů (**Tabulka 2**), proto bylo nutné změnit nastavení regulátorů na hodnoty uvedené v Tabulce 4. Ale i při tomto nastavení regulátorů je měnič špatně řiditelný jak dokazují Obr.3.18 a Obr.3.19. Test byl proveden pro stejné hodnoty kondenzátorů C₁ a C₂.

Regulátor	Тур	Parametry – zesílení a časová konstanta	Saturační mez omezovače	
R _{Uc}	PI	ΣU_{cw} = 1100 V; K _{Uc} = 0,5; T _{Uc} = 0,005 s	0 – 110 A	
R _{Id}	PI	K _{Id} = 0,001; T _{Id} = 0,003 s	0 – 0,95	
$R_{\Delta Uc}$	PI	$K_{\Delta Uc} = 0,000001; T_{\Delta Uc} = 1 s$	0 – 0,95	
	Р	K _{p_mod} = 0,005		

Tabulka 4: Změna nastavení PI regulátorů pro navrhnuté řízení s omezením modulačního signálu pomocí zpětné vazby s proporčním regulátorem při $T_{vz} = 1/10 T_{PWM}$



Protože celá regulace proudu je velice pomalá a málo stabilní, bylo nutné snížit i zesílení zpětnovazebního proporčního regulátoru, který omezuje modulační signál při minimálním zatížení měniče. To vede na pomalé utlumení proudu při nulovém zatížení měniče, jak je vidět na Obr.3.19.



Další série simulačních testů byla provedena pro navrhnuté řízení s anti-windup vazbou pro omezení nárůstu výstupního napětí. Na Obr.3.20 a Obr.3.21 jsou výsledky chování měniče při dvojnásobném čase vzorkování ($T_{vz} = 1/2 T_{PWM}$), pro původní nastavení regulátorů (Tabulka 3). Regulace je stabilnější, než pro regulaci s omezením modulačního signálu pomocí zpětné vazby s proporčním regulátorem (porovnání Obr.3.14 a Obr.3.20). I v tomto případě je dopravní zpoždění, které vzniklo změnou vzorkovací frekvence nezanedbatelné.



Při návrhu řízení s anti-windup vazbou pro omezení nárůstu výstupního napětí bylo řečeno, že anti-windup vazba omezující nárůst výstupního napětí je závislá na vzorkovací frekvenci řízení (vysvětleno ve [1]).



Změna doby vzorkování na pětinásobek ($T_{vz} = 1/5 T_{PWM}$) se i pro řízení s anti-windup vazbou pro omezení nárůstu výstupního napětí, projevila silnými kmity řízených veličin Obr.3.22 a Obr.3.23, proto je nutné přenastavit regulátory.



Při odtížení měniče Obr.3.23 je vidět, že došlo opět k prodloužení doby kdy je omezován proudu na nulovou hodnotu pomocí anti-windup vazby (způsobeno závislostí na vzorkovací periodě).



Dojde li ke změně vzorkovací doby na desetinásobek ($T_{vz} = 1/10 T_{PWM}$) je měnič neřiditelný pro stávající nastavení regulátorů (**Tabulka 3**), proto je nutné opět změnit nastavení regulátorů a to na hodnoty uvedené v Tabulce 5. Ale i při tomto nastavení regulátorů je měnič velice špatně řiditelný jak dokazují Obr.3.24 a Obr.3.25. Test byl proveden pro stejné hodnoty kondenzátorů C₁ a C₂.

Tabulka 5: Změna nastavení PI regulátorů pro navrhnuté řízení s anti-windup vazbou pro omezení nárůstu výstupního napětí při $T_{vz} = 1/10 T_{PWM}$

Regulátor	Тур	Parametry – zesílení a časová konstanta	Saturační mez omezovače	
R _{Uc}	PI	ΣU_{cw} = 1100 V; K _{Uc} = 0,5; T _{Uc} = 0,005 s	0 – 110 A	
R _{Id}	PI	K _{Id} = 0,001; T _{Id} = 0,003 s	0 – 0,95	
$R_{\Delta Uc}$	ΡI	$K_{\Delta Uc} = 0,000001; T_{\Delta Uc} = 1 s$	0 – 0,95	
	Р	K _{anti} = 0,0002		





Při jakékoliv změně vzorkování regulátorů je vhodné znovu nastavit všechny regulátory. Dostatečná řiditelnost měniče je pak možná maximálně pro vzorkovací dobu, která je kratší než pětinásobek oproti stávající (T_{vz} = 1/5 T_{PWM}).

4 Závěr

První část výzkumné zprávy se zabývala testem a funkčností regulace napětí a proudu vstupního stabilizátoru napětí pro pomocné pohony, při změně parametrů vstupní indukčnosti. Testování vlastností měniče a navržených regulačních struktur bylo realizováno pomocí simulačního modelu měniče. Za pomocí testů se zjistilo, že při malých změnách vstupního filtru v rozmezí od L=500µH až L=1,2mH, není nutné měnit nastavení regulátorů.

V druhé části výzkumné zprávy se řeší robustnost regulace v závislosti na délce vzorkovací periody, která v reálném mikropočítači bude muset být zřejmě vyšší než je standardní $T_{vz}=1/T_{PWM}$. Aby bylo možné měnič uspokojivě řídit, neměla by vzorkovací perioda řízení překročit dobu $T_{vz} = 1/5$ T_{PWM} . Dále při jakékoliv změně vzorkovací periody je žádoucí změnit nastavení všech regulátorů.

Literatura

- Blahník, V.: Simulace vstupního měniče pomocných pohonů a analýza chování při minimálním zatížení. Výzkumná zpráva 22190-022-2013. RICE/KEV, ZČU v Plzni, 2013.
- Blahník, V.: Regulace stabilizátoru napětí pro pomocné pohony (úvodní studie). Výzkumná zpráva
 22190-045-2012. RICE/KEV, ZČU v Plzni, 2012.

Seznam obrázků

Obr.2.1 Simulační schéma vstupního stabilizátoru napětí ve variantě dvou ZPM4
Obr.3.2 Navrhnutá regulace napětí – varianta omezení modulačního signálu pomocí zpětné
vazby s proporčním regulátorem6
Obr.3.3 Navrhnutá regulace napětí – varianta s anti-windup vazbou pro omezení nárůstu
výstupního napětí7
Obr.3.4 Skokové zatížení měniče – změna zátěže z 0 kW na 22 kW pro indukčnost
L=500 μ H/9,2m Ω (při rozdílných kapacitách kondenzátorů C ₁ =10 μ F, C ₂ = 5 μ F,
f _{spin} =30kHz) pro variantu řízení s omezením modulačního signálu pomocí zpětné
vazby s proporčním regulátorem9
Obr.3.5 Malá změna zatížení měniče – změna zátěže z 0 kW na 2,2 kW pro indukčnost
L=500 μ H/9,2m Ω (při rozdílných kapacitách kondenzátorů C ₁ =10 μ F, C ₂ = 5 μ F,
f _{spin} =30kHz) pro variantu řízení s omezením modulačního signálu pomocí zpětné
vazby s proporčním regulátorem10
Obr.3.6 Skokové zatížení měniče – změna zátěže z 0 kW na 22 kW pro indukčnost
L=500 μ H/9,2m Ω (při rozdílných kapacitách kondenzátorů C ₁ =10 μ F, C ₂ = 5 μ F,
f _{spin} =30kHz) pro variantu řízení s anti-windup vazbou pro omezení nárůstu
výstupního napětí11
Obr.3.7 Malá změna zatížení měniče – změna zátěže z 0 kW na 2,2 kW pro indukčnost
L=500 μ H/9,2m Ω (při rozdílných kapacitách kondenzátorů C ₁ =10 μ F, C ₂ = 5 μ F,
f _{spin} =30kHz) pro variantu řízení s anti-windup vazbou pro omezení nárůstu
výstupního napětí12
Obr.3.8 Skokové zatížení měniče – změna zátěže z 0 kW na 22 kW pro indukčnost
L=1,2mH/15m Ω (při rozdílných kapacitách kondenzátorů C ₁ =10µF, C ₂ = 5µF,
f _{spin} =30kHz) pro variantu řízení s omezením modulačního signálu pomocí zpětné
vazby s proporčním regulátorem13
Obr.3.9 Malá změna zatížení měniče – změna zátěže z 0 kW na 2,2 kW pro indukčnost
L=1,2mH/15m Ω (při rozdílných kapacitách kondenzátorů C ₁ =10 μ F, C ₂ = 5 μ F,
f _{spin} =30kHz) pro variantu řízení s omezením modulačního signálu pomocí zpětné
vazby s proporčním regulátorem14

- Obr.3.12 Skokové zatížení měniče změna zátěže z 0 kW na 22 kW (T_{vz} = T_{PWM} =33,3µs, L=0,9mH/10mΩ, C₁=10µF, C₂= 5µF, f_{spin}=30kHz)......17
- Obr.3.13 Skokové odtížení měniče změna zátěže z 22 kW na 0 kW (T_{vz} = T_{PWM} =33,3 μ s, L=0,9mH/10m Ω , C₁=10 μ F, C₂= 5 μ F, f_{spin}=30kHz) pro variantu omezení modulačního signálu pomocí zpětné vazby s proporčním regulátorem......18

- Obr.3.18 Skokové zatížení měniče změna zátěže z 0 kW na 22 kW pro řízení s destinásobnou vzorkovací frekvencí a přenastavením regulátorů (T_{vz}= 1/10 T_{PWM}

- Obr.3.25 Skokové odtížení měniče změna zátěže z 22 kW na 0 kW pro řízení s destinásobnou vzorkovací frekvencí a přenastavením regulátorů (T_{vz}= 1/10 T_{PWM}

Historie revizí

Rev.	Kapitola	Popis změny	Datum
			Jméno / Odd.