



Pracoviště: Regionální inovační centrum elektrotechniky

Výzkumná zpráva č.: 22190 - 024 - 2013

Simulační test vstupního měniče pomocných pohonů při rychlých změnách napájecího napětí

Druh úkolu: Vědecko-výzkumný
Řešitelé: Ing. Vojtěch Blahník, Ph.D.
Vedoucí úkolu: prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
Počet stran: 17
Datum vydání: září 2013
Revize: 1

Práce vznikla s podporou projektu FR-TI3/183
a CZ.1.05/2.1.00/03.0094

Anotace

Tato výzkumná zpráva se zabývá testováním vstupního měniče pomocných pohonů při rychlých změnách napájecího napětí. Hlavní část práce analyzuje chování vstupního měniče při skokových změnách v napájecím napětí a tím testuje navrženou regulaci měniče. Testy vstupního měniče jsou provedeny na simulačním modelu měniče, který byl realizován pomocí programovacího jazyka C.

Obsah

1	ÚVOD.....	4
2	SIMULAČNÍ MODEL VSTUPNÍHO STABILIZÁTORU NAPĚTÍ	4
3	VÝSLEDKY SIMULAČNÍCH TESTŮ	7
4	ZÁVĚR.....	14

Použité symboly a zkratky

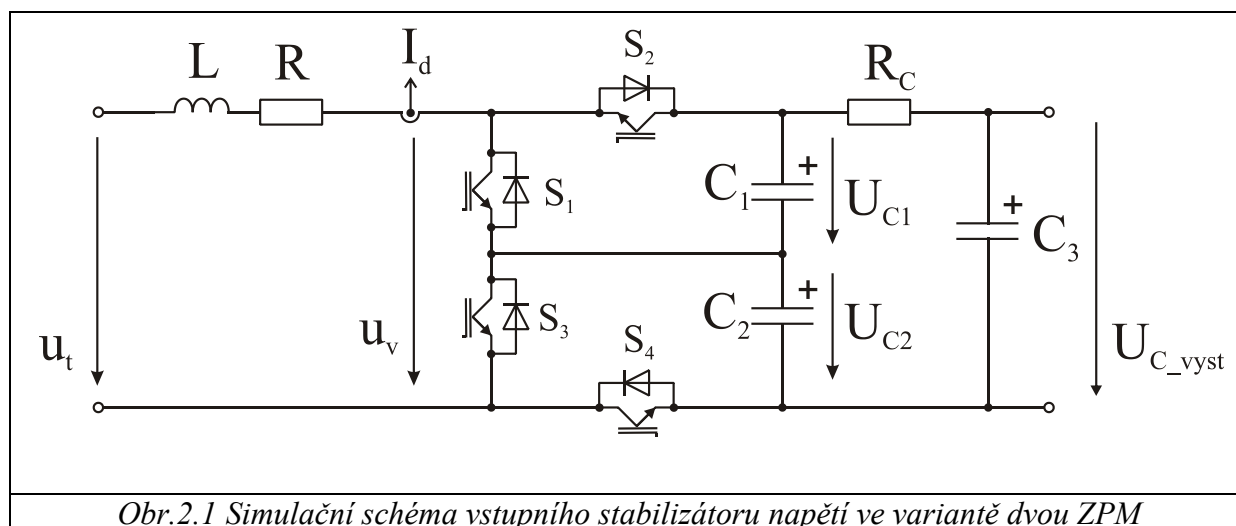
C_1, C_2	Kapacita výstupních kondenzátorů jednotlivých pulzních měničů
C_3	Kapacita výstupního kondenzátoru celého měniče
$d_{\text{sum_RAUC}}$	Přírůstek sumace dorovnávacího regulátoru
e_{mod2}	Korekční modulační signál, pro vyrovnání napětí na kondenzátorech
f_{spin}	Spínací frekvence tranzistorů
I_d	Vstupní proud měniče
I_{dw}	Požadovaná velikost vstupního proudu měniče
i_{z1}, i_{z2}	Konstantní zdroje proudu, použité jako zátěže jednotlivých pulzních měničů
L	Indukčnost vstupního filtru měniče
$\text{mod}_1, \text{mod}_2$	Modulační signály pro pulzně šířkovou modulaci jednotlivých pulzních měničů
phn.	Povolená hodnota napětí
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_{vz}	Vzorkovací doba regulace (obvykle $1/f_{\text{spin}}$)
$U_{\text{c_vyst}}$	Napětí na výstupním kondenzátoru celého měniče
U_{cw}	Velikost požadovaného napětí na výstupním kondenzátoru celého měniče
$U_{\text{c1}}, U_{\text{c2}}$	Napětí na výstupních kondenzátorech jednotlivých pulzních měničů
u_t	Vstupní napájecí napětí měniče
u_v	Napětí na vstupních svorkách měniče
ZPM	Zvyšovací pulzní měnič

1 Úvod

Tato výzkumná zpráva zkoumá chování měniče při rychlých změnách napájecího napětí. Jelikož rychlé změny v širokém rozsahu napětí jsou na troleji běžným stavem je nutné pro tento stav otestovat chování vstupního měniče pomocných pohonů a zejména pak odezvu navržené regulace. Testování je provedeno na sestaveném simulačním modelu vstupního měniče a to pro nejhorší možné stavy tj. pro skokové změny v napájecím napětí v rozsahu 400 V až 1000 V.

2 Simulační model vstupního stabilizátoru napětí

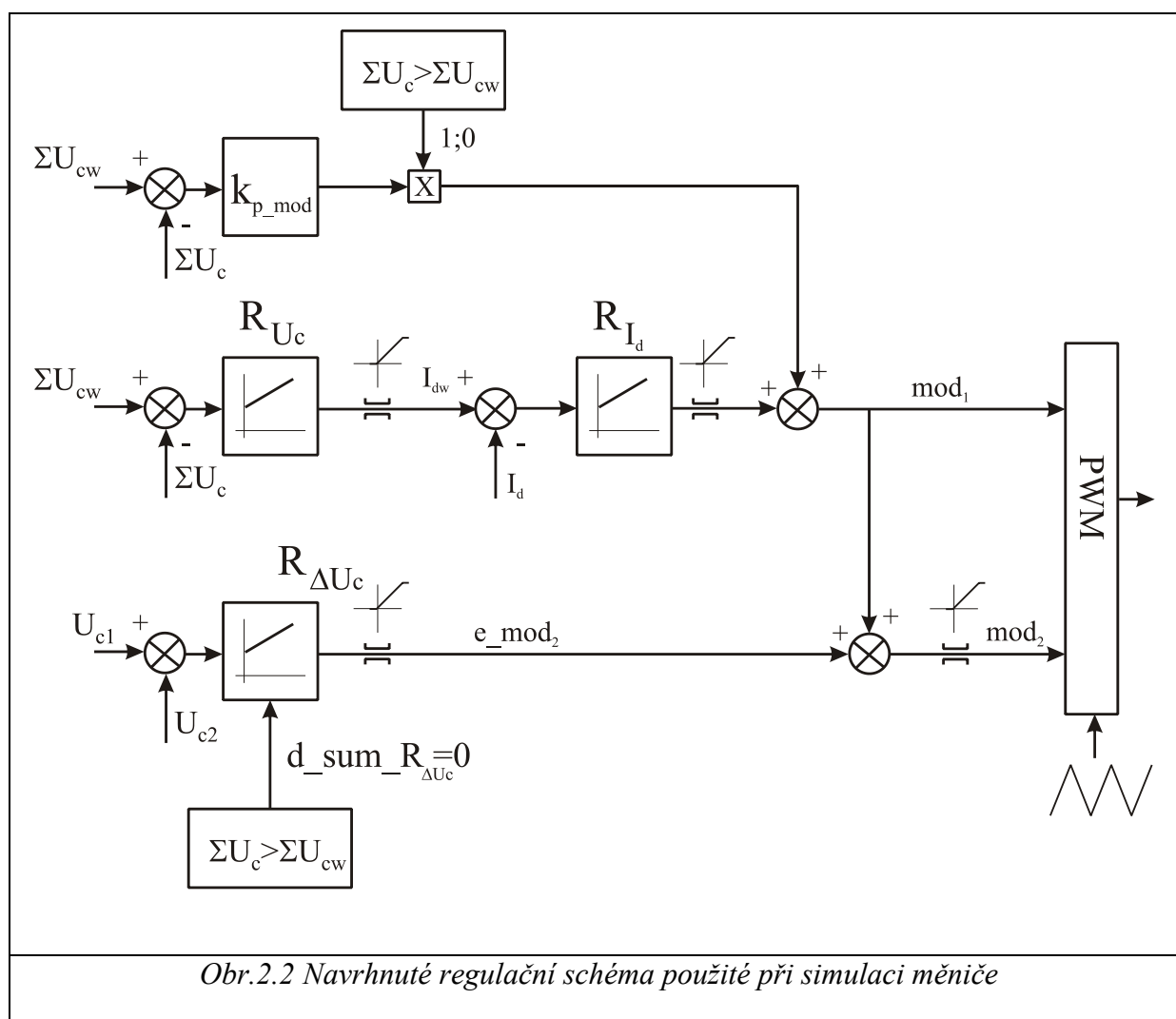
Pro testování chování vstupního stabilizátoru napětí pomocných pohonů při rychlých změnách napájecího napětí, byl vytvořen simulační model, jehož schematické znázornění s příslušnými parametry je uvedeno na Obr.2.1 a v tabulce 1. Tvorbou simulačního modelu a popisem vstupního měniče pomocných pohonů se detailněji zabývá výzkumná zpráva [1].



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

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 $P = 0 \text{ W}$	0 A
i_z ... zátěžný proud $P = 22 \text{ kW}$	20 A
I_d ... řízený vstupní proud měniče	

Pro regulaci výstupního napětí je použito řízení navrhnuté v [1], které je zde označeno jako řízení typu III. Kompletní regulační schéma měniče je pak k vidění na Obr.2.2. Regulace je řešena za pomoci nadřazené regulační smyčky napětí a podřazené regulační smyčky proudu a přidané regulace pro vyrovnaní napětí na výstupních kondenzátorech dvou sériově spojených ZPM. Regulační schéma je doplněno zpětnou vazbou pro omezení modulačního signálu, která řeší problém s přerušovanými proudy (projevuje se nekontrolovatelným nárůstem výstupního napětí při minimálním zatížení měniče) jak je detailně popsáno ve zprávě [2].



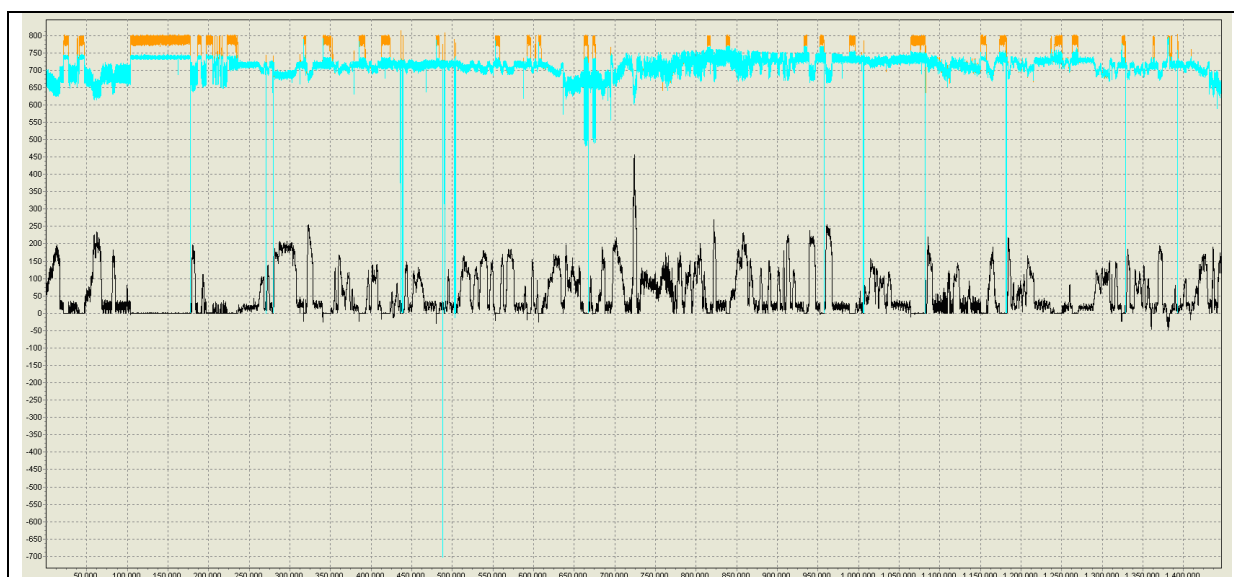
Při simulačních testech měniče bylo použito nastavení regulátorů, které je uvedené v tabulce 3.

Tabulka 3: Nastavení PI regulátorů pro navrhnuté řízení použité při simulaci měniče

Regulátor	Typ	Parametry – zesílení a časová konstanta	Saturační mez omezovače
R_{Uc}	PI	$\Sigma U_{cw} = 1100 \text{ V}$; $K_{Uc} = 1$; $T_{Uc} = 0,001 \text{ s}$	0 – 110 A
R_{Id}	PI	$K_{Id} = 0,01$; $T_{Id} = 0,0004 \text{ s}$	0 – 0,95
$R_{\Delta U_c}$	PI	$K_{\Delta U_c} = 0,0001$; $T_{\Delta U_c} = 0,01 \text{ s}$	0 – 0,95
	P	$K_{p_mod} = 0,03$	

3 Výsledky simulačních testů

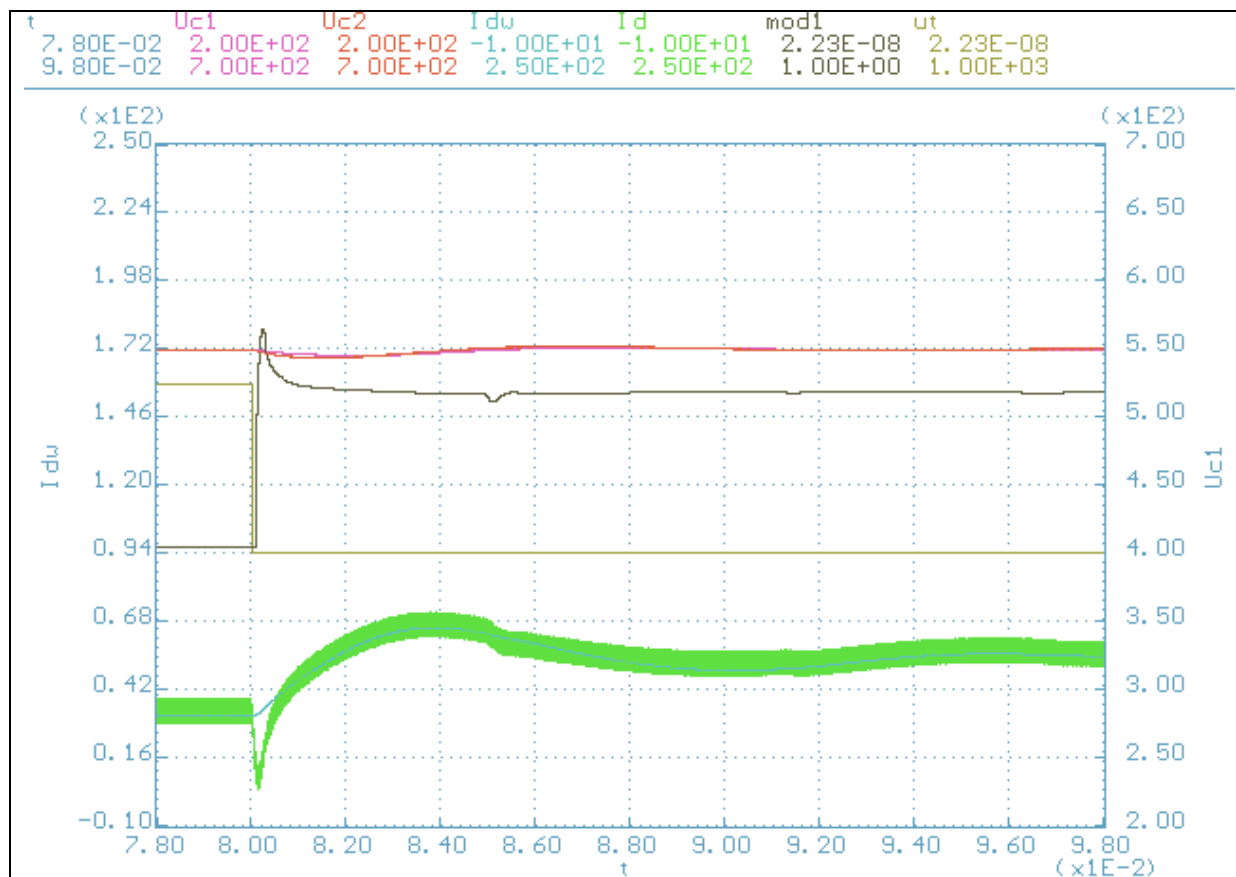
Cílem této kapitoly je otestovat chování měniče a navržené regulace při rychlých změnách napájecího napětí. Ve zprávě [3] je ukázka změřeného napětí troleje, které napájí vstupní LC filtr vozidla, ukázka záznamu je pak k vidění na Obr.3.3. Podle zadání se předpokládá, že napětí na vstupním LC filtru se bude pohybovat v rozmezí od 400 V do 1000 V. Nejnepříznivější stav, který tedy může nastat je skoková změna napětí z minimálního možného napětí ($u_t=400$ V) na maximální možné napětí ($u_t=1000$ V) a opačná skoková změna z maximálního na minimální. Z výše uvedených důvodů byl měnič testován pomocí simulace na uvedené Nejnepříznivější stavy.



Obr.3.3 Trolejové napětí – záznam z běžného provozu, převzato z [3]

První test měniče byl proveden při konstantním zatížení jmenovitým výkonem 22 kW, kdy v čase 0,08 s došlo ke skokovému poklesu napájecího napětí z 650 V na 400 V Obr.3.4. Vlivem poklesu napájecího napětí došlo k poklesu řízeného napětí U_{c1} a U_{c2} z 550 V na 540 V a k následnému rychlému doregulování na požadovanou hodnotu 550 V. Rychlá reakce regulace je vidět na změně požadovaného proudu I_{dw} (modrý signál) a na změně modulačního signálu mod_1 (černý signál). Jak je vidět z obrázku řízený proud I_d je doregulován na požadovanou hodnotu s určitým zpožděním, což je dáno rychlostí regulátorů

proudové smyčky a samozřejmě velikostí vyhlazovací vstupní indukčnosti (časová konstanta RL obvodu).



Obr.3.4 Skoková změna napájecího napětí při konstantním zatížení měniče
($u_i = 650V \rightarrow 400V$, $P_z = 22 kW$, $C_1 = 10\mu F$, $C_2 = 5\mu F$, $f_{spin} = 30kHz$)

U_{c1} – napětí na kondenzátoru prvního ZPM (50V/dílek),

U_{c2} – napětí na kondenzátoru druhého ZPM (50V/dílek),

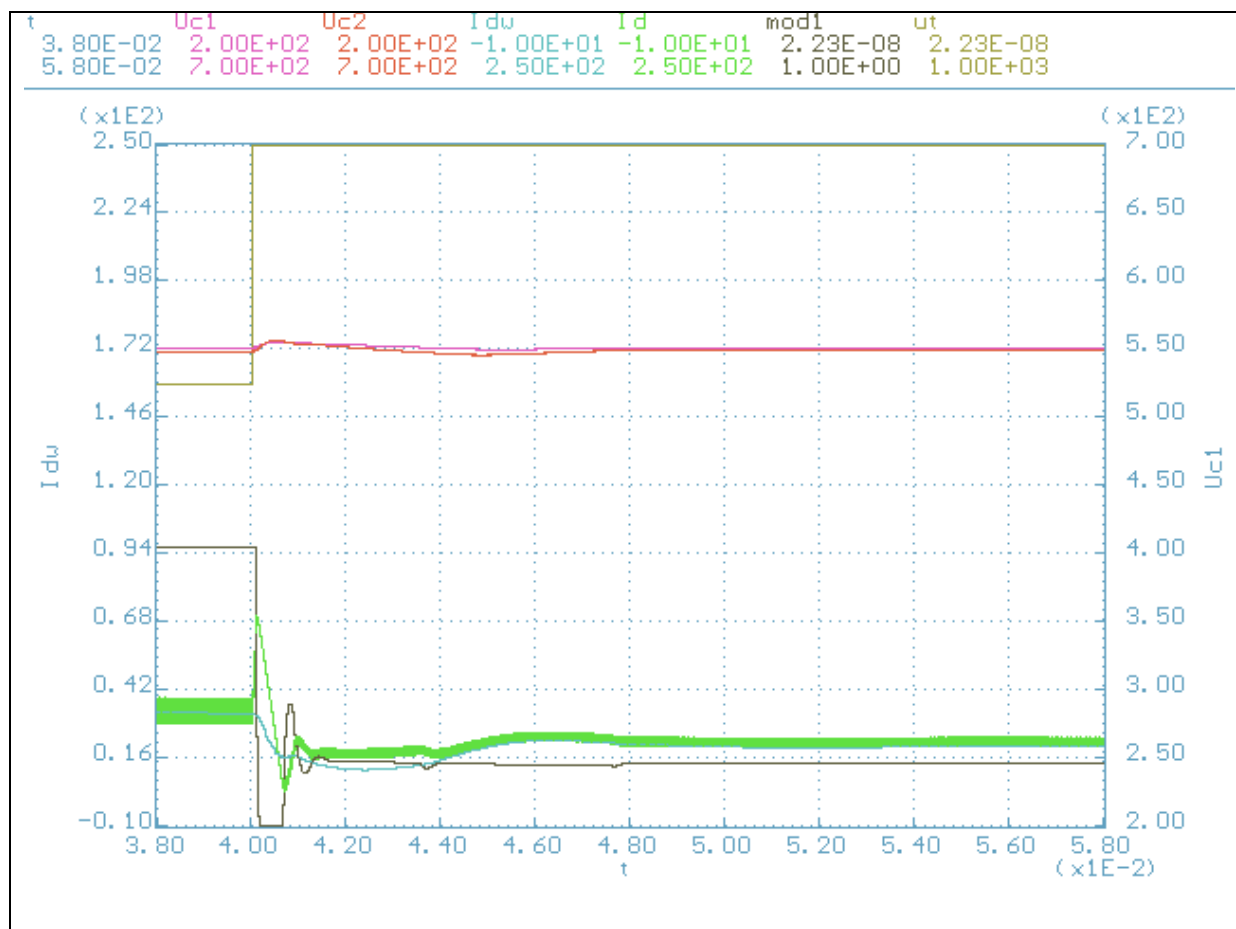
I_{dw} – požadovaný proud měniče (26A/dílek),

I_d – skutečný proud měniče (26A/dílek),

mod_1 – modulační signál pro PWM prvního ZPM (0,1/dílek)

u_t – napájecí napětí měniče (100V/dílek)

Druhý testovaný stav byl proveden opět při konstantním zatížení jmenovitým výkonem 22 kW, kdy v čase 0,04 s došlo ke skokovému nárůstu napájecího napětí z 650 V na 1000 V Obr.3.5. Řízený proud I_d opět reaguje s určitým zpožděním.



Obr.3.5 Skoková změna napájecího napětí při konstantním zatížení měniče
($u_t = 650V \rightarrow 1000V$, $P_z = 22\text{ kW}$, $C_1 = 10\mu F$, $C_2 = 5\mu F$, $f_{spin} = 30\text{ kHz}$)

U_{c1} – napětí na kondenzátoru prvního ZPM (50V/dílek),

U_{c2} – napětí na kondenzátoru druhého ZPM (50V/dílek),

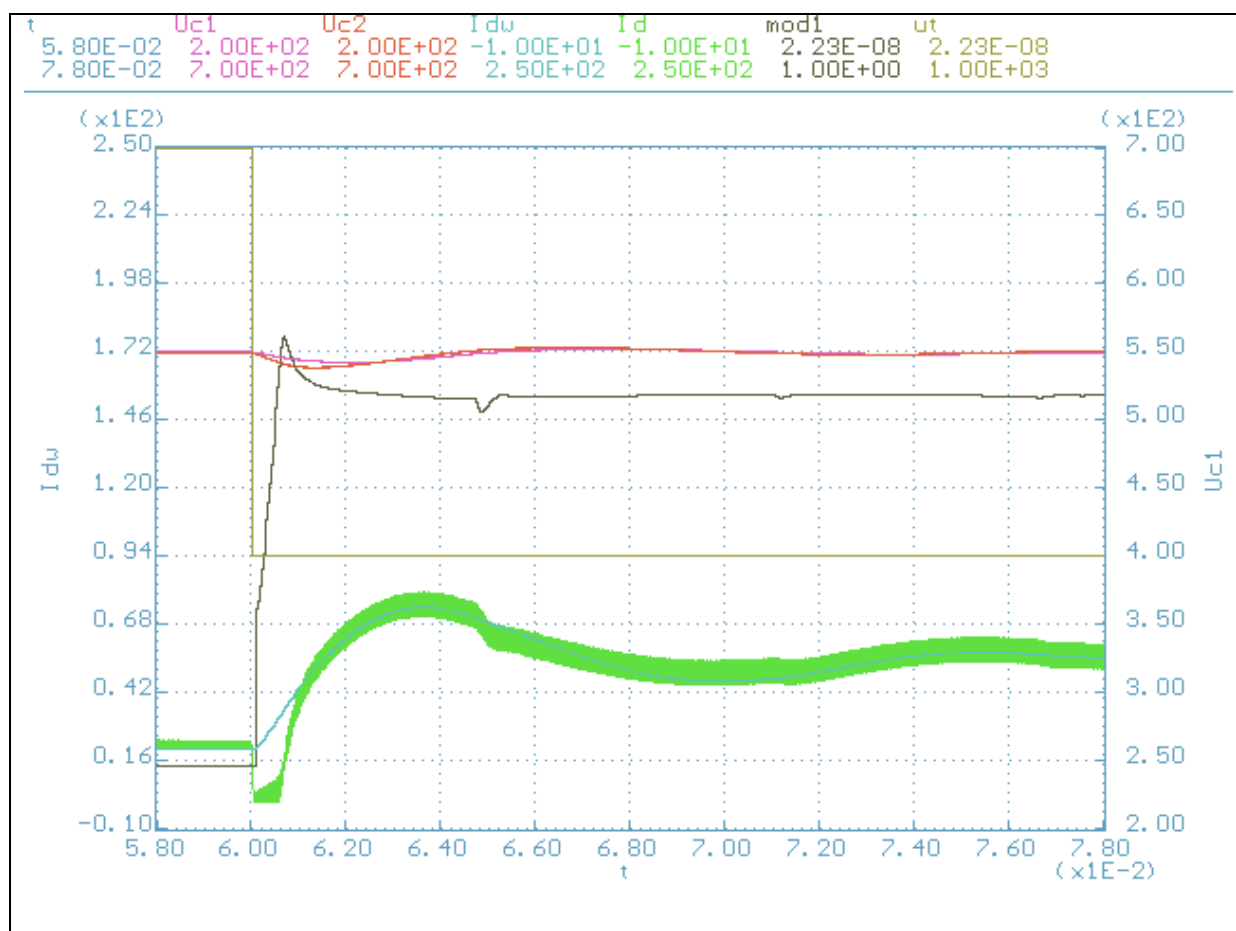
I_{dw} – požadovaný proud měniče (26A/dílek),

I_d – skutečný proud měniče (26A/dílek),

mod_1 – modulační signál pro PWM prvního ZPM (0,1/dílek)

u_t – napájecí napětí měniče (100V/dílek)

Jeden z extrémních testovaných stavů je zachycen na Obr.3.6, kde při konstantním zatížení jmenovitým výkonem 22 kW, dojde v čase 0,06 s ke skokovému poklesu napájecího napětí z 1000 V na 400 V. Reakce regulační struktury je dostatečná protože došlo k poklesu regulovaného napětí pouze na hodnotu 530 V.



Obr.3.6 Skoková změna napájecího napětí při konstantním zatížení měniče

($u_t = 1000V \rightarrow 400V$, $P_z = 22\text{ kW}$, $C_1 = 10\mu F$, $C_2 = 5\mu F$, $f_{spin} = 30\text{ kHz}$)

U_{c1} – napětí na kondenzátoru prvního ZPM (50V/dílek),

U_{c2} – napětí na kondenzátoru druhého ZPM (50V/dílek),

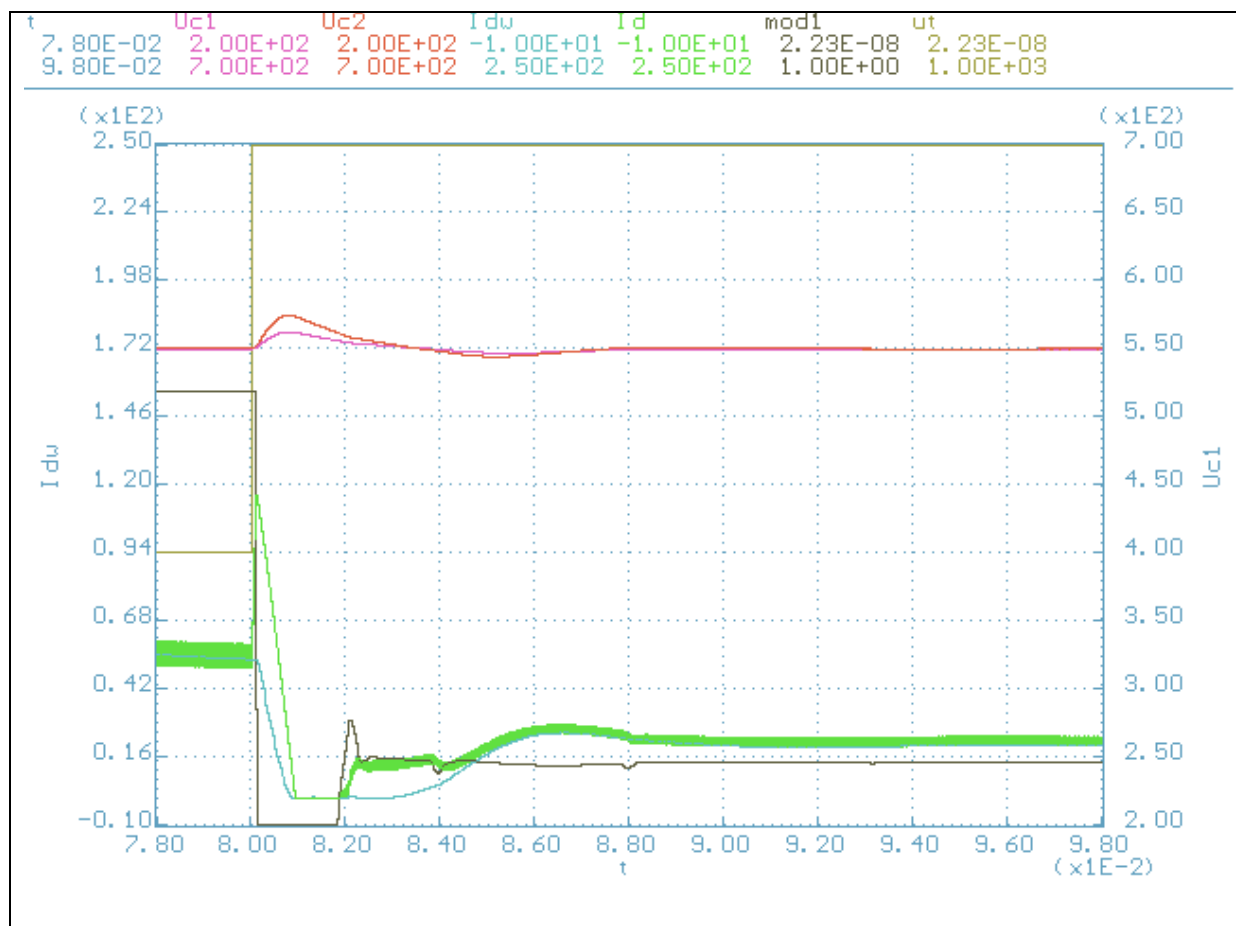
I_{dw} – požadovaný proud měniče (26A/dílek),

I_d – skutečný proud měniče (26A/dílek),

mod_1 – modulační signál pro PWM prvního ZPM (0,1/dílek)

u_t – napájecí napětí měniče (100V/dílek)

Opačný extrémní stav, kde při konstantním zatížení jmenovitým výkonem 22 kW, dojde v čase 0,08 s ke skokovému nárůstu napájecího napětí z 400 V na 1000 V je zachycen na Obr.3.7.



Obr.3.7 Skoková změna napájecího napětí při konstantním zatížení měniče
($u_t = 400V \rightarrow 1000V$, $P_z = 22\text{ kW}$, $C_1 = 10\mu F$, $C_2 = 5\mu F$, $f_{spin} = 30\text{ kHz}$)

U_{c1} – napětí na kondenzátoru prvního ZPM (50V/dílek),

U_{c2} – napětí na kondenzátoru druhého ZPM (50V/dílek),

I_{dw} – požadovaný proud měniče (26A/dílek),

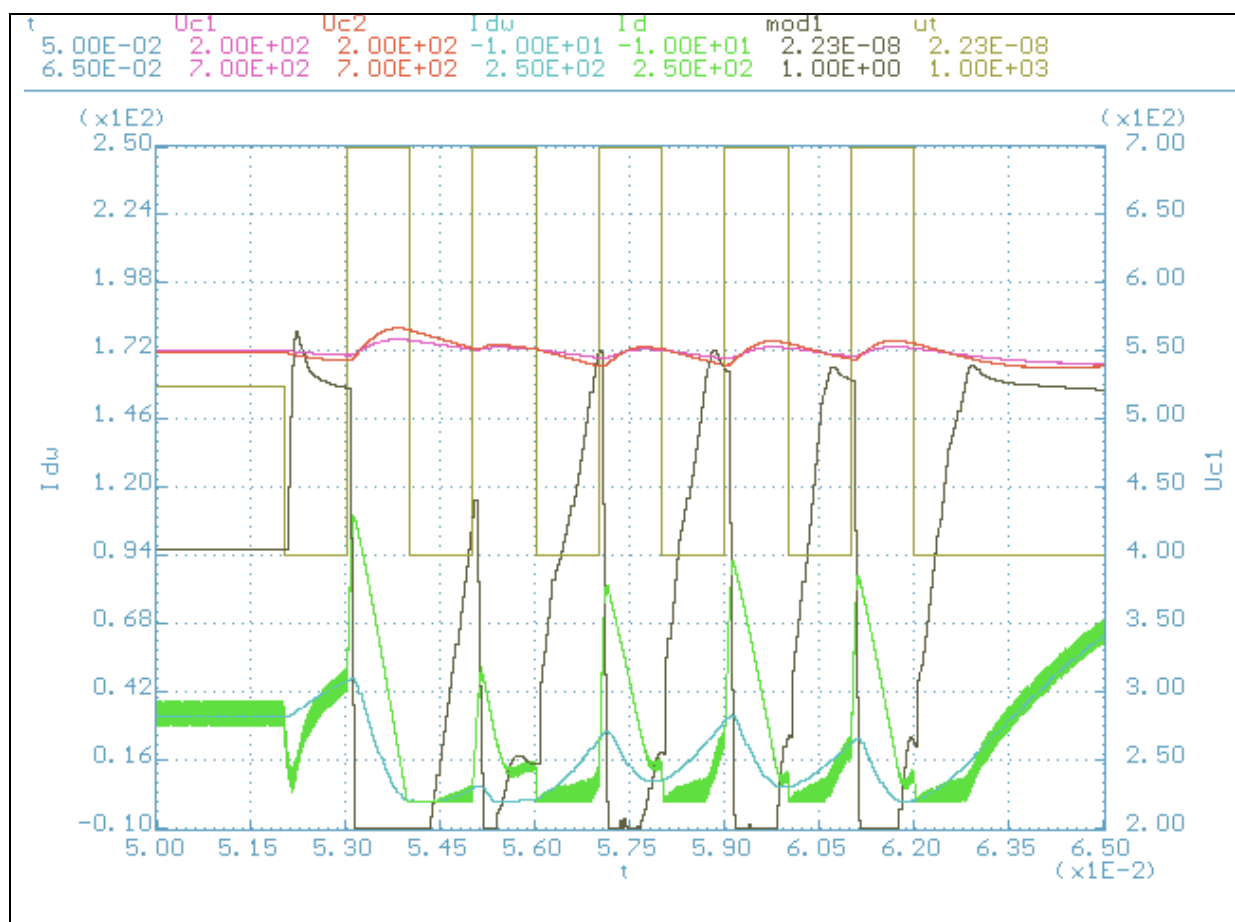
I_d – skutečný proud měniče (26A/dílek),

mod_1 – modulační signál pro PWM prvního ZPM (0,1/dílek)

u_t – napájecí napětí měniče (100V/dílek)

Jako poslední byl testován stav, kdy dochází k rychlým změnám napájecího napětí v relativně krátkém časovém horizontu Obr.3.8. Na uvedeném obrázku je vidět odezva měniče a jeho řízení při skokových změnách napájecího napětí, je-li měnič zatížen konstantním jmenovitým výkonem (22 kW), napěťové skoky jsou vždy v intervalu 0,001 s a střídají se zde napěťové hladiny 400 V a 1000 V. Vlivem změn napájecího napětí (u_t) dochází i ke změnám řízeného napětí (U_{c1} a U_{c2}) a to v rozmezí 535 V až 570 V, u proudu dochází ke změnám až na hranici omezovače (110 A).

Z výše uvedených výsledků je vidět, že testovaný měnič je schopný si poradit i s tak extrémními změnami napájecího napětí, jako jsou skoky z 400 V na 1000 V a naopak z 1000 V na 400 V a to i ve velice krátkém časovém intervalu, jak je dokumentováno na Obr.3.8. Důležitá je v tomto případě dostatečně rychlá regulace a to zejména rychlost proudové smyčky.



Obr.3.8 Chování měniče při rychlých změnách napájecího napětí a při konstantním zatížení (skokové změny $u_t = 650V \rightarrow 400V \rightarrow 1000V \rightarrow 400V \rightarrow 1000V \rightarrow 400V \rightarrow 1000V \rightarrow 650V$

$P_z = 22 kW$, $C_1 = 10\mu F$, $C_2 = 5\mu F$, $f_{spin} = 30kHz$)

U_{e1} – napětí na kondenzátoru prvního ZPM (50V/dílek),

U_{e2} – napětí na kondenzátoru druhého ZPM (50V/dílek),

I_{dw} – požadovaný proud měniče (26A/dílek),

I_d – skutečný proud měniče (26A/dílek),

mod_1 – modulační signál pro PWM prvního ZPM (0,1/dílek)

u_t – napájecí napětí měniče (100V/dílek)

4 Závěr

Výzkumná zpráva se zabývala simulací vstupního stabilizátoru napětí pomocných pohonů a bylo zde zkoumáno chování měniče při rychlých změnách napájecího napětí. Za pomoci simulace bylo testováno chování měniče pro kritické stavy, jako jsou skokové změny v napájecím napětí a následné reakce regulačních obvodů.

Při dostatečně rychlé reakci regulačních obvodů si měnič bez větších problémů poradí se skokovými změnami napájecího napětí v širokém rozsahu (skokové změny mezi 400 V a 1000 V), jak je dokumentováno na Obr.3.6 a Obr.3.7. Obstojné chování měniče a reakce celé navržené regulace je vidět i pro velmi rychlé změny v napájecím napětí v časových úsecích 0,001 s, Obr.3.8. Proto je nutné zajistit optimální nastavení regulátorů celé regulační struktury a zejména pak dostatečnou rychlost proudové regulační smyčky.

Literatura

- [1] Blahník, V.: Regulace stabilizátoru napětí pro pomocné pohony (úvodní studie). Výzkumná zpráva 22190-045-2012. RICE/KEV, ZČU v Plzni, 2012.
- [2] Blahník, V.: Simulace vstupního měniče pomocných pohonů a analýza chování při minimálním zatížení. Výzkumná zpráva 22190-022-2013. RICE/KEV, ZČU v Plzni, 2013.
- [3] Kůstka, J.: Zadání pro měnič pom. pohonů a nabíječe. Technická specifikace EY04278P.03. ŠKODA ELECTRIC 2011.

Seznam obrázků

Obr.2.1 Simulační schéma vstupního stabilizátoru napětí ve variantě dvou ZPM	4
Obr.2.2 Navrhnuté regulační schéma použité při simulaci měniče	6
Obr.3.3 Trolejové napětí – záznam z běžného provozu, převzato z [3]	7
Obr.3.4 Skoková změna napájecího napětí při konstantním zatížení měniče ($u_t = 650V \rightarrow 400V$, $P_z = 22\text{ kW}$, $C_1 = 10\mu F$, $C_2 = 5\mu F$, $f_{spin} = 30\text{ kHz}$)	8
Obr.3.5 Skoková změna napájecího napětí při konstantním zatížení měniče ($u_t = 650V \rightarrow 1000V$, $P_z = 22\text{ kW}$, $C_1 = 10\mu F$, $C_2 = 5\mu F$, $f_{spin} = 30\text{ kHz}$)	9
Obr.3.6 Skoková změna napájecího napětí při konstantním zatížení měniče ($u_t = 1000V \rightarrow 400V$, $P_z = 22\text{ kW}$, $C_1 = 10\mu F$, $C_2 = 5\mu F$, $f_{spin} = 30\text{ kHz}$)	10
Obr.3.7 Skoková změna napájecího napětí při konstantním zatížení měniče ($u_t = 400V \rightarrow 1000V$, $P_z = 22\text{ kW}$, $C_1 = 10\mu F$, $C_2 = 5\mu F$, $f_{spin} = 30\text{ kHz}$)	11
Obr.3.8 Chování měniče při rychlých změnách napájecího napětí a při konstantním zatížení (skokové změny $u_t = 650V \rightarrow 400V \rightarrow 1000V \rightarrow 400V \rightarrow 1000V \rightarrow 400V \rightarrow 1000V \rightarrow 650V$, $P_z = 22\text{ kW}$, $C_1 = 10\mu F$, $C_2 = 5\mu F$, $f_{spin} = 30\text{ kHz}$)	13

Historie revizí

Rev.	Kapitola	Popis změny	Datum Jméno / Odd.