



**FAKULTA
ELEKTROTECHNICKÁ
ZÁPADOČESKÉ
UNIVERZITY
V PLZNI**

2013

Pracoviště: Regionální inovační centrum elektrotechniky

Výzkumná zpráva č.: 22190 - 022 - 2013

Simulace vstupního měniče pomocných pohonů a analýza chování při minimálním zatížení

Druh úkolu: Vědecko-výzkumný
Řešitelé: Ing. Vojtěch Blahník, Ph.D.
Vedoucí úkolu: prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
Počet stran: 26
Datum vydání: srpen 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 simulací vstupního měniče pomocných pohonů. Hlavní část práce analyzuje chování vstupního měniče při minimálním nebo nulovém zatížení, kdy nastává problém s přerušovanými proudy. Ve zprávě jsou navrženy tři způsoby potlačení nekontrolovatelného nárůstu napětí na výstupním kondenzátoru měniče. Porovnání vlastností navržených variant řízení je provedeno pomocí simulace, zpráva obsahuje i doporučené hodnoty pro nastavení regulátorů pro následné testy měniče.

Obsah

1	ÚVOD.....	4
2	SIMULAČNÍ MODEL VSTUPNÍHO STABILIZÁTORU NAPĚTÍ	4
3	REGULACE NAPĚTÍ VSTUPNÍHO STABILIZÁTORU	5
3.1	Růst výstupního napětí pro nezatížený měnič	10
3.1.1	Tvrdé nulování sumace.....	11
3.1.2	Omezení modulačního signálu pomocí zpětné vazby s proporčním regulátorem.....	14
3.1.3	Anti-Windup vazba na omezení nárůstu výstupního napětí.....	18
4	ZÁVĚR.....	22

Použité symboly a zkratky

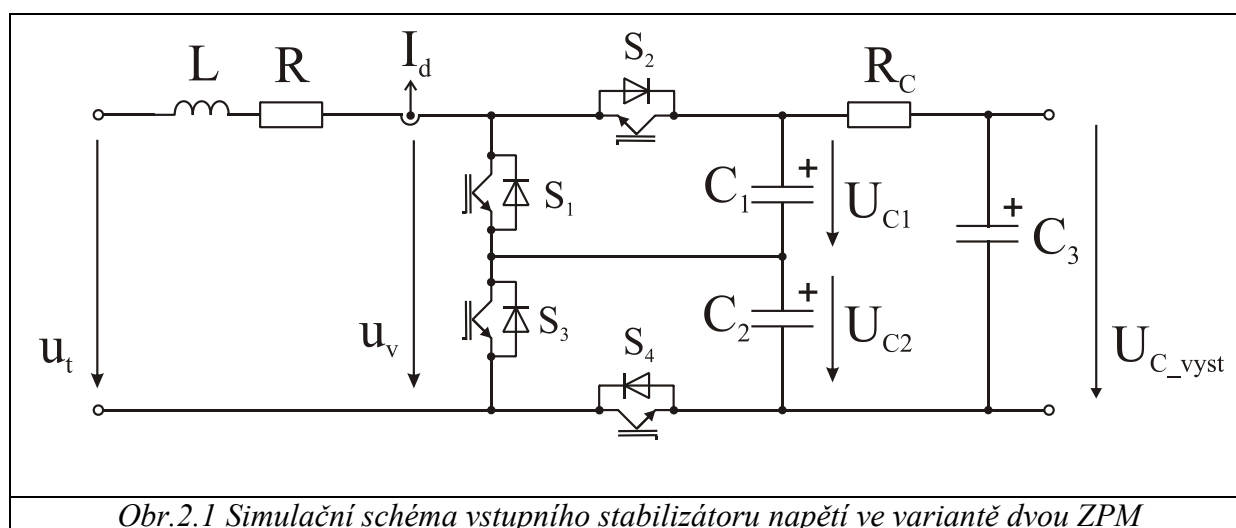
C_1, C_2	Kapacita výstupních kondenzátorů jednotlivých pulzních měničů
C_3	Kapacita výstupního kondenzátoru celého měniče
$d_{\text{sum_RAUC}}$	Přírůstek sumace dorovnávacího regulátoru
e_{mod2}	Korekční modulační signál, pro vyrovnání napětí na kondenzátorech
f_{spin}	Spínací frekvence tranzistorů
I_d	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 minimálním nebo nulovém zatížení, kdy nastává problém s přerušovanými proudy. Vlivem přerušovaných proudů dochází k nepřesnému měření řízeného vstupního proudu I_d a to vede na problém s řízením výstupního napětí U_{C_vyst} . Aby bylo možné nastalý problém vyřešit, jsou navrženy tři různé úpravy řízení, které jsou otestovány pomocí simulačního modelu měniče.

2 Simulační model vstupního stabilizátoru napětí

Pro testování řízení a regulace vstupního stabilizátoru napětí pomocných pohonů ve variantě ZPM (zvyšovací pulzní měnič), je vytvořen laboratorní prototyp měniče, který je blíže popsán v [1]. Pro tento laboratorní prototyp byl vytvořen simulační model vstupního stabilizátoru, tvorbou simulačního modelu se více zabývá [1]. Schematické znázornění simulačního modelu s příslušnými parametry je uvedeno na Obr.2.1 a v tabulce 1. Hodnoty kapacit kondenzátorů C_1 a C_2 jsou v simulaci rozdílné ($C_1=10\mu F$, $C_2=5\mu F$), aby bylo možné otestovat chování měniče při rozvážení napětí na jednotlivých kondenzátorech.



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 μ H
R ... odpor indukčnosti vstupního L filtru	0,01 Ω
C_1 ... kapacita výstupního kondenzátoru horní ZPM	10 μ F
C_2 ... kapacita výstupního kondenzátoru dolní ZPM	5 μ F
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
I_d ... řízený vstupní proud měniče	

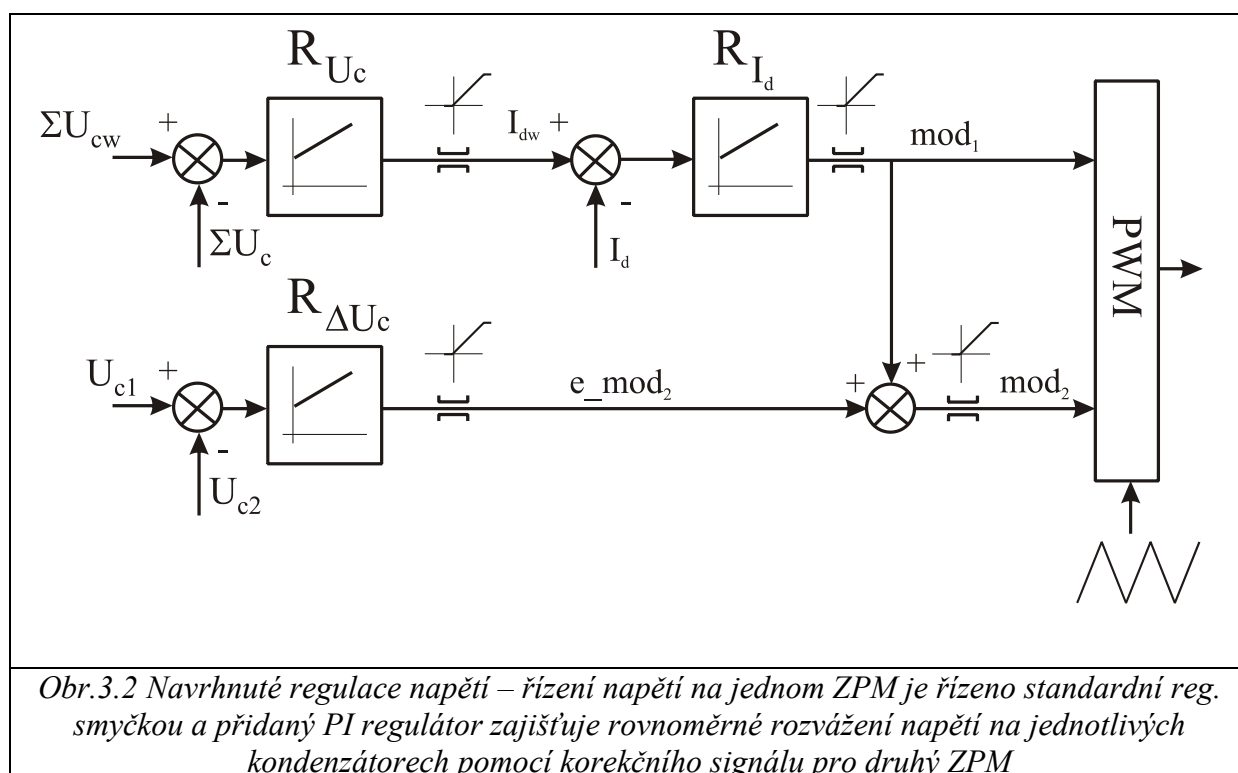
3 Regulace napětí vstupního stabilizátoru

Pro regulaci výstupního napětí je použito řízení navrhnuté v [1], které je zde označeno jako řízení typu III. Regulace je řešena za pomoci nadřazené regulační smyčky napětí a podřazené regulační smyčky proudu a přidané regulace pro vyrovnání napětí na výstupních kondenzátorech dvou sériově spojených ZPM.

Principiální regulační schéma je ukázáno na Obr.3.2 jedná se o totožné řízení, které bylo navrženo a porovnáváno ve [1]. Jedná se o regulaci, kde je za pomoci PI regulátoru R_{Uc} řízena suma napětí na obou kondenzátorech ΣU_c ($\Sigma U_c = U_{c1} + U_{c2}$) na požadovanou hodnotu ΣU_{cw} . Výstupem z regulátoru R_{Uc} je hodnota požadovaného proudu I_{dw} , která vstupuje do

podřazené regulační smyčky proudu. Rozdíl mezi skutečným proudem měniče I_d a požadovaným proudem I_{dw} vstupuje do PI regulátoru R_{Id} , jehož výstupem je již přímo modulační signál (mod_1) pro PWM prvního ZPM. K modulačnímu signálu mod_2 je navíc přičten korekční signál e_mod_2 , který mění spínání horního ZPM oproti spínání spodního ZPM, tak aby došlo k vyrovnaní napětí na jednotlivých kondenzátorech. Signál e_mod_2 je výstupem z regulátoru $R_{\Delta U_c}$, který reguluje rozdíl napětí na jednotlivých kondenzátorech (U_{c1} a U_{c2}) na nulu.

Platí zde, že za pomoci modulačního signálu mod_1 se ovládají prvky S_3 a S_4 tj. prvky spodního ZPM a naopak za pomoci modulačního signálu mod_2 se ovládají prvky S_1 a S_2 tj. prvky horního ZPM (jak je blíže vysvětleno již v [1]). Regulátory R_{Id} a $R_{\Delta U_c}$, je nutné navíc opatřit nulováním sumace (u regulátoru R_{Id}) a zastavením sumace (u regulátoru $R_{\Delta U_c}$) a to pro stav, kdy měnič není zatížen a napětí na výstupním kondenzátoru vystoupí nad stanovenou hodnotu. Tento problém bude řešen dále v této kapitole. Nastavení regulátorů R_{U_c} , R_{Id} a $R_{\Delta U_c}$ (proporční zesílení K a integrační časová konstanta T) je uvedeno v tabulce 2 a to i včetně saturačních mezí pro omezovače.



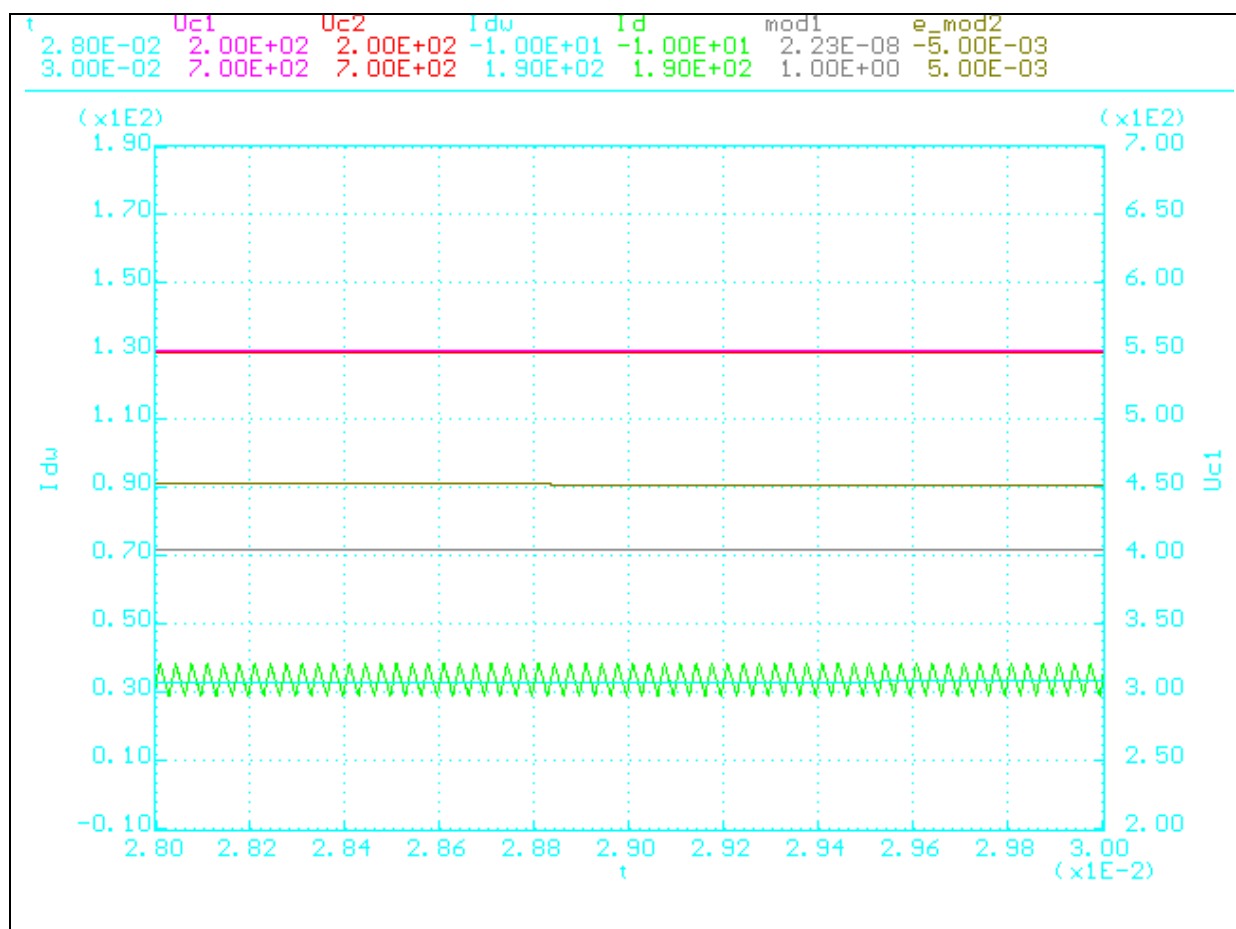
Tabulka 2: Nastavení PI regulátorů pro navržené řízení

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
$R_{\Delta Uc}$	PI	$K_{\Delta Uc} = 0,0001; T_{\Delta Uc} = 0,01 \text{ s}$	0 – 0,95

Základní vlastnosti a chování navržené regulace měniče byli testovány na simulačním modelu a jsou k vidění na Obr.3.3 - **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..**

Na Obr.3.3 je zachycen měnič v ustáleném stavu při jmenovitém zatížení 22 kW, fialový a červený průběh jsou řízená napětí na výstupních kondenzátorech U_{c1} a U_{c2} , napětí jsou stejná i při rozdílných kapacitách kondenzátorů, což zajišťuje regulátor $R_{\Delta Uc}$ jehož výstupem je korekční signál e_{mod2} (žlutý průběh). Vstupní proud I_d (zelený signál) je řízen na požadovanou hodnotu I_{dw} (modrý průběh cca 34 A).

Obr.3.4 zachycuje měnič v ustáleném stavu při nulovém zatížení (0 kW), tomuto stavu měniče je nutné věnovat více pozornosti, protože je zde zablokováno aktuální rozvažování napětí na jednotlivých kondenzátorech (signál e_{mod2} žlutý průběh se nemění) a dále je úplně vynulovaná sumace regulátoru R_{Id} (což vede na nulový výstup z regulátoru - modulační signál mod1 černý průběh). Problematice chodu ZPM a jeho řízení při nulovém zatížení je věnována kapitola 3.1.



Obr.3.3 Ustálený stav měnič zatížen výkonem 22 kW (při rozdílných kapacitách kondenzátorů

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

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

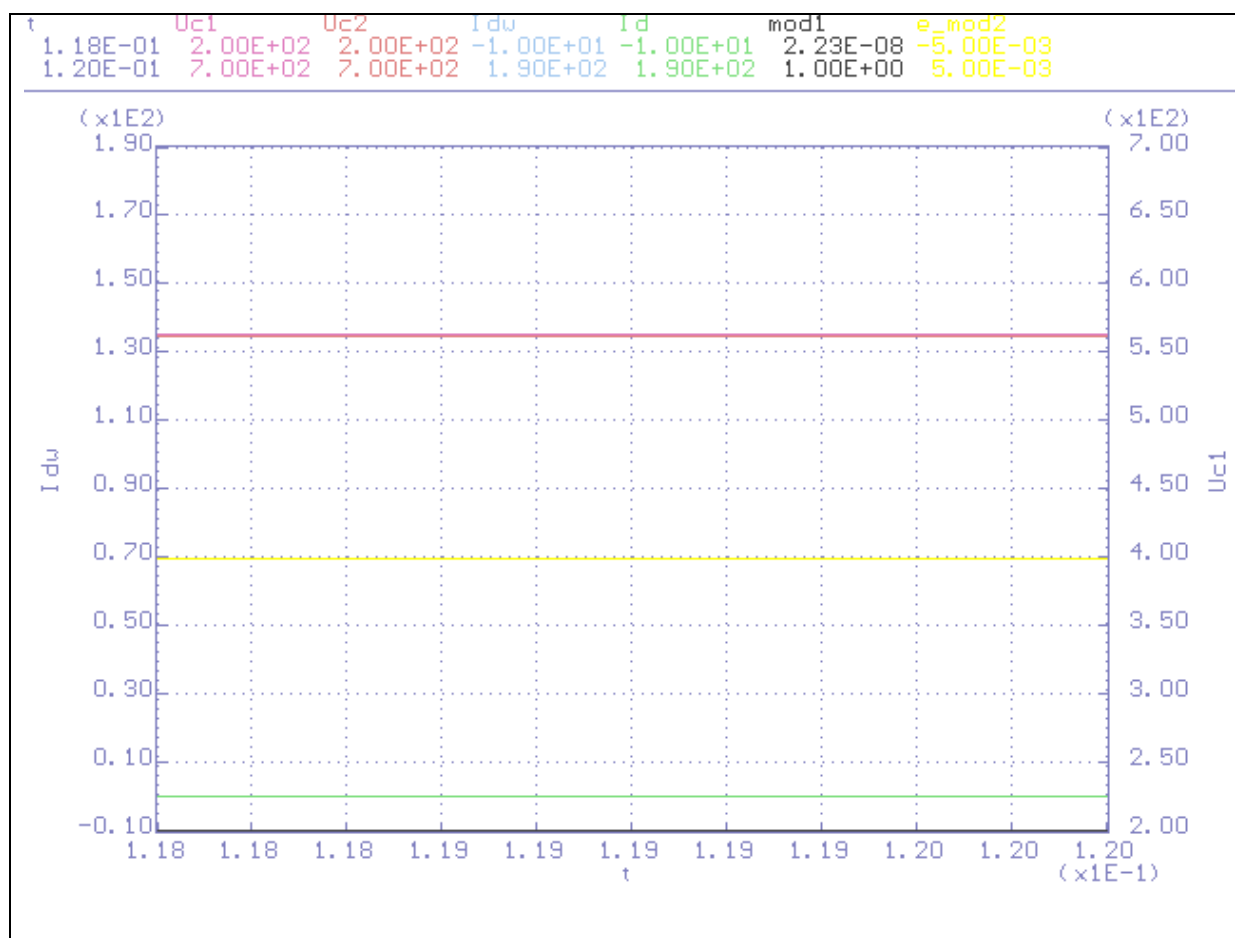
U_{e2} – napětí na kondenzátoru druhého ZPM (50V/dílek),

I_{dw} – požadovaný proud měniče (20A/dílek),

I_d – skutečný proud měniče (20A/dílek),

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

e_{mod2} – kompenzační signál pro vyrovnaní napětí na kondenzátorech (0,001/dílek)



Obr.3.4 Ustálený stav měnič zatížen výkonem 0 kW (při rozdílných kapacitách kondenzátorů $C_1=10\mu F$, $C_2=5\mu F$, $f_{spin}=30kHz$)

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

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

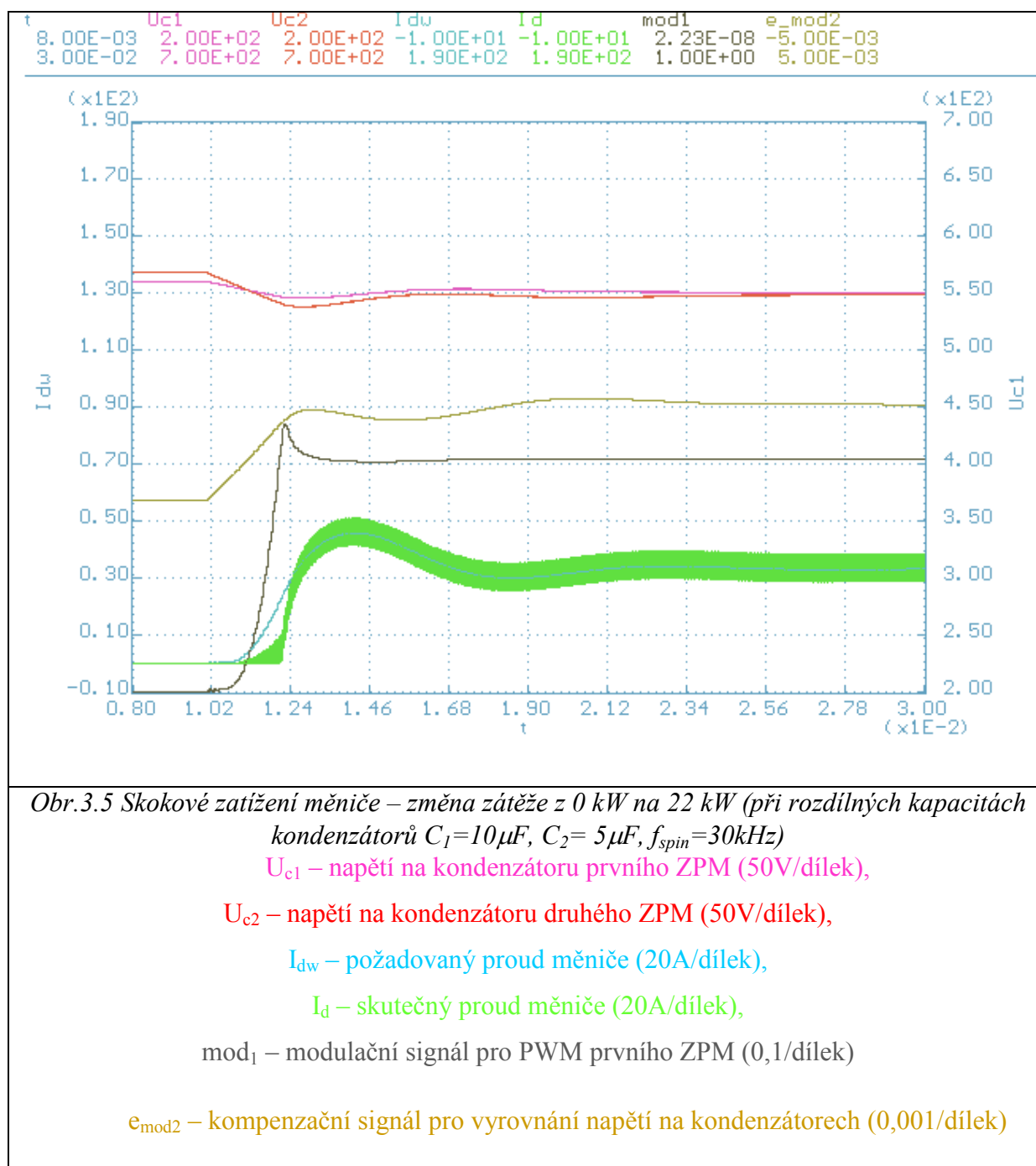
I_{dw} – požadovaný proud měniče (20A/dílek),

I_d – skutečný proud měniče (20A/dílek),

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

e_{mod2} – kompenzační signál pro vyrovnání napětí na kondenzátorech (0,001/dílek)

Skoková změna zatížení měniče z 0 kW na 22 kW je pak zachycena na Obr.3.5, zde je vidět plynulá regulace výstupního napětí (U_{c1} a U_{c2}) na požadovanou velikost ($U_{cw} = 1100$ V) a práce rozvažovacího regulátoru (e_{mod2} žlutý průběh).



Poněkud více problematický je přechodový děj skokové odtížení měniče a následné nulové zatížení, proto je této problematice věnována následující kapitola.

3.1 Růst výstupního napětí pro nezatížený měnič

Při testech měniče se narazilo na problém, kdy při nulovém zatížení měniče dochází k neřiditelnému nárůstu výstupního napětí nad požadovanou hodnotu. To je způsobeno tím, že regulátor R_{Uc} neumožňuje dát požadavek na záporný proud měniče, je tedy požadován

nulový proud měniče ($I_{dw}=0$), avšak skutečný proud (I_d) nenabývá nulovou hodnotu (protože ani modulační signál mod_1 není nulový). Měnič je ve stavu přerušovaných proudů a vlivem vzorkování proudu jednou za vzorkovací periodu ($T_{vz} = 1/f_{spin}$ vzorkování je vždy v nule pily, to je výhodné protože je měřena střední hodnota proudu) dochází ke stavu, kdy je proud měniče I_d považován za nulový. Z uvedených důvodů pak PI regulátor podřazené regulace proudu zůstává stále nasumovaný na stejné hodnotě, která se rovná modulačnímu signálu, který je ve výsledku generován řízením.

3.1.1 ***Tvrde nulování sumace***

Jednou z možností jak zastavit nekontrolovatelný nárůst napětí na výstupních kondenzátorech je vynulování sumace zmíněného proudového regulátoru a to při dosažení povolené hodnoty napětí (phn.).

Dobře srozumitelné to pak je z Obr.3.6, kde je vidět skokové odtížení měniče. Protože regulátor R_{uc} neumožňuje dát požadavek na záporný proud měniče je tedy v čase cca 0,032s požadován nulový proud měniče (modrý průběh $I_{dw}=0$), skutečný proud I_d nenabývá nulovou hodnotu (problém s přerušovanými proudy a jejich vzorkováním). Regulátor R_{id} má nenulovou hodnotu sumace a tím pádem výstupní signál z regulátoru (modulační signál) mod_1 je na hodnotě cca 0,09. To vede na spínání měniče a na malý přerušovaný proud I_d , který způsobuje neustálý nepatrný nárůst napětí na výstupních kondenzátorech (fialový a červený průběh v době od 0,04s do 0,08s). V době 0,08s zareaguje navrhnuté nulování sumace regulátoru R_{id} (signál mod_1 skokově změněn na nulu – černý průběh) a zároveň dojde i k zastavení sumace dorovnávacího regulátoru $R_{\Delta Uc}$ (signál e_{mod2} zůstává na konstantní hodnotě). Obě tyto změny nastaly, protože součet napětí na výstupních kondenzátorech překročil povolenou hodnotu napětí (phn.=26 V) $1100V+26V=1126V$. Tato hodnota byla pro názornost zvolena úmyslně nízko, v reálné aplikaci doporučuji volit povolenou hodnotu s ohledem na napěťovou bezpečnost a bezproblémový chod měniče.

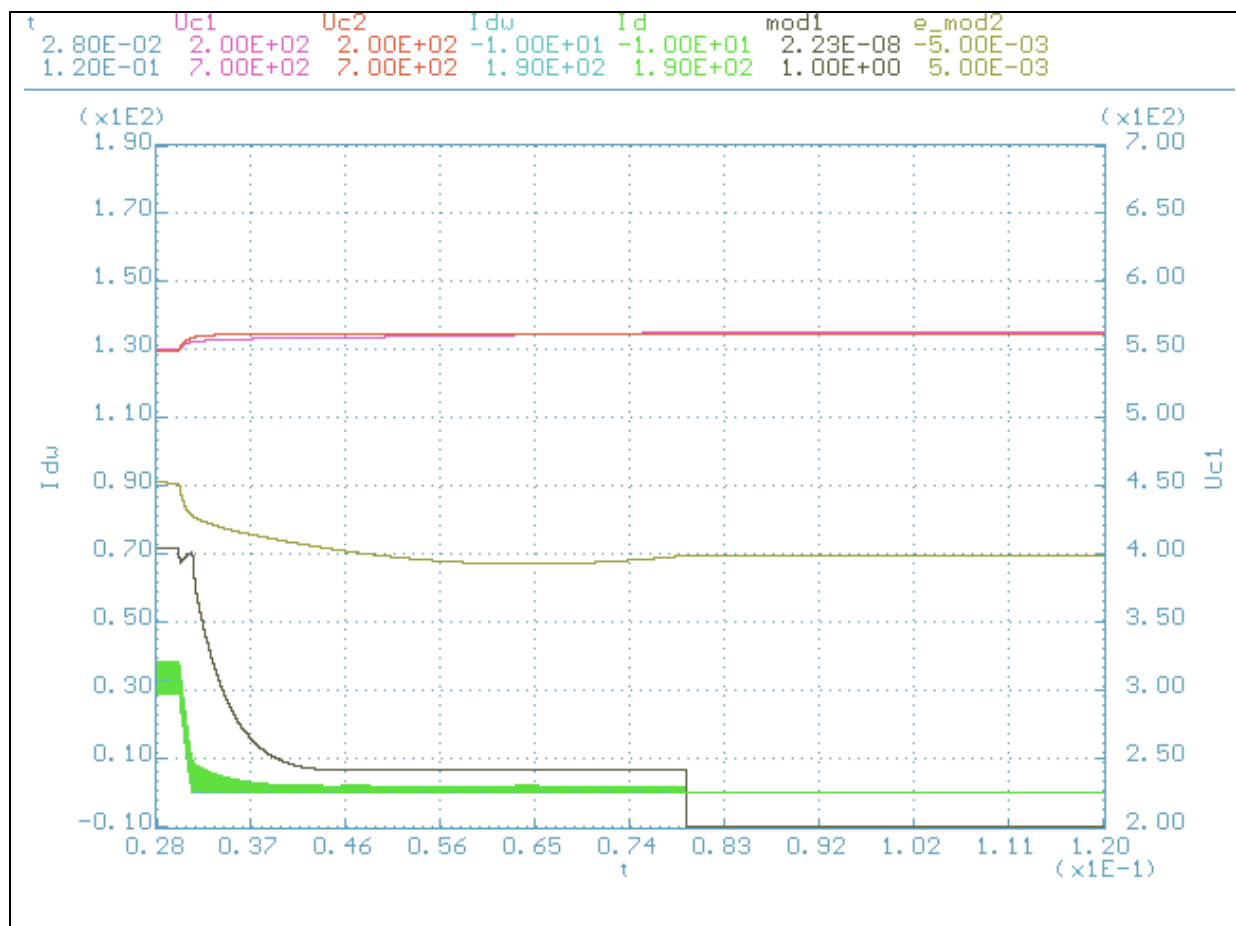
Nulování sumace regulátoru R_{id} lze realizovat velice jednoduše pomocí podmínky:

if $((U_{C1}+U_{C2}) \geq (U_{cw}+26))$ sumace_ R_{id} =0.;

a zastavení sumace dorovnávacího regulátoru $R_{\Delta Uc}$ lze realizovat podmínkou:

if $((U_{C1}+U_{C2}) \geq (U_{cw}+26))$ přírůstek_sumace_ $R_{\Delta Uc}$ =0;

Hlavní důvod zablokování další sumace u regulátoru $R_{\Delta U_c}$ je ten, aby během nulového zatížení měniče (měnič se nespíná a je tudíž nulový vstupní proud) nedocházelo k neustálé integraci regulační odchylky rozvažovacího regulátoru ($R_{\Delta U_c}$).



Obr.3.6 Skokové odtížení měniče – změna zátěže z 22 kW na 0 kW (při rozdílných kapacitách kondenzátorů $C_1=10\mu F$, $C_2=5\mu F$, $f_{spin}=30kHz$) pro variantu řízení s tvrdým nulováním sumace

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

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

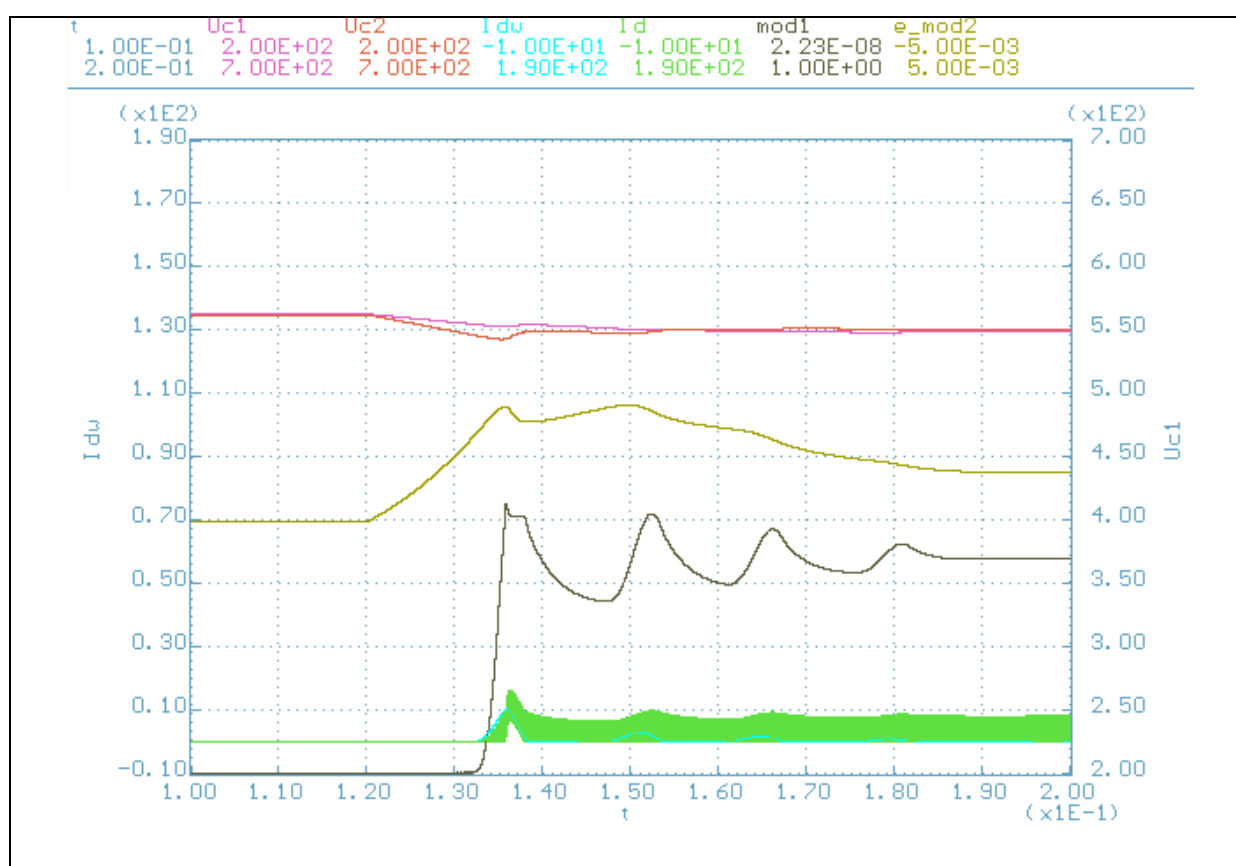
I_{dw} – požadovaný proud měniče (20A/dílek),

I_d – skutečný proud měniče (20A/dílek),

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

e_{mod2} – kompenzační signál pro vyrovnání napětí na kondenzátorech (0,001/dílek)

Při opětovném zatížení měniče **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** pak dochází opět k rozvažování výstupních napětí z poslední hodnoty uložené v sumaci PI regulátoru. Na **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** je také vidět, že dochází ke kmitání řízeného signálu mod_1 , což je způsobeno tím, že měnič je zatížen jen výkonem 2,2 kW a vstupní proud je tedy přerušovaný. To spolu s nepřesným měřením při přerušovaných proudech vede na zatlumené kmitání proudového regulátoru R_{id} . Řešením by mohl být adaptivní regulátor, který by se při přerušovaných proudech přeladil.



Obr.3.7 Malá změna zatížení měniče – změna zátěže z 0 kW na 2,2 kW (při rozdílných kapacitách kondenzátorů $C_1=10\mu\text{F}$, $C_2=5\mu\text{F}$, $f_{\text{spin}}=30\text{kHz}$) pro variantu řízení s tvrdým nulováním sumace

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

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

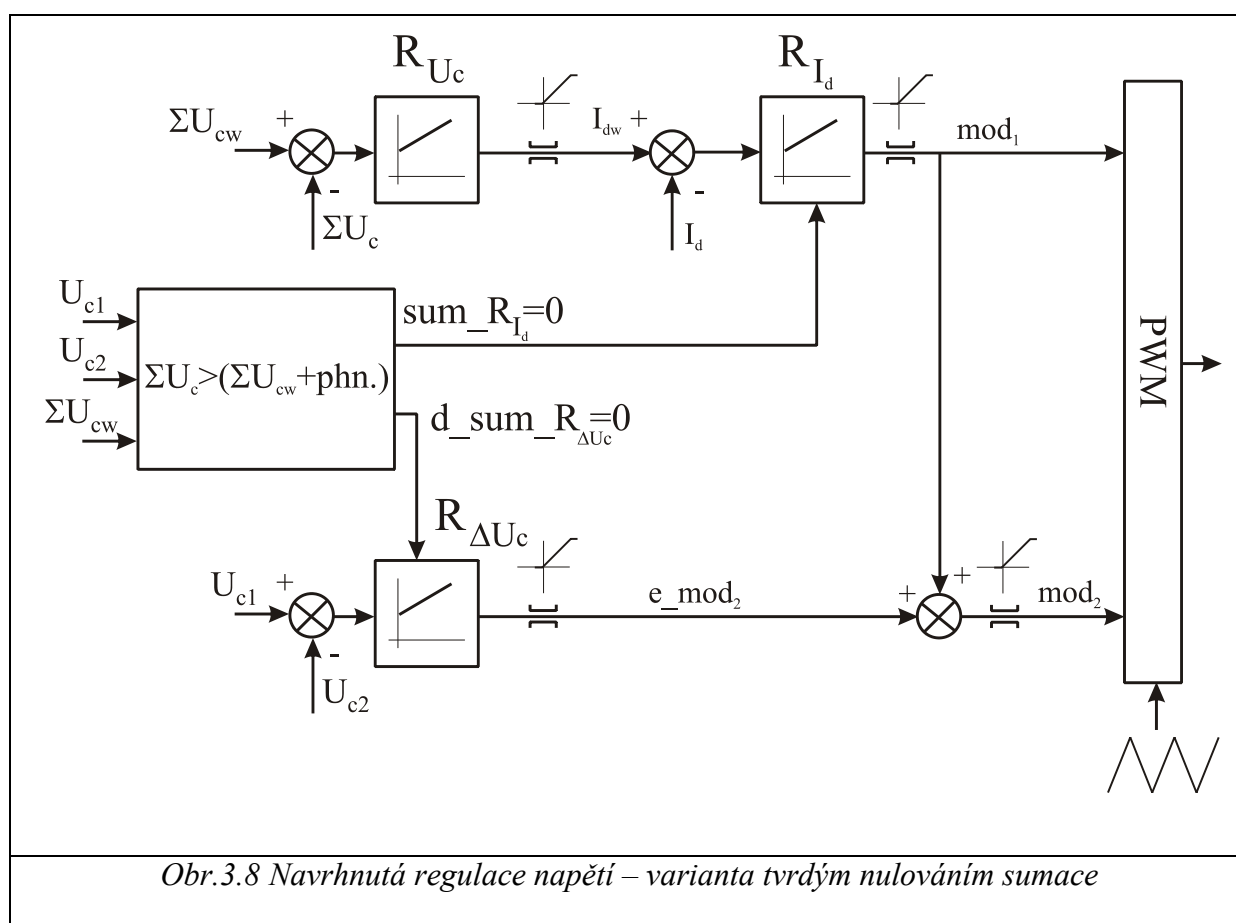
I_{dw} – požadovaný proud měniče (20A/dílek),

I_d – skutečný proud měniče (20A/dílek),

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

$e_{\text{mod}2}$ – kompenzační signál pro vyrovnění napětí na kondenzátorech (0,001/dílek)

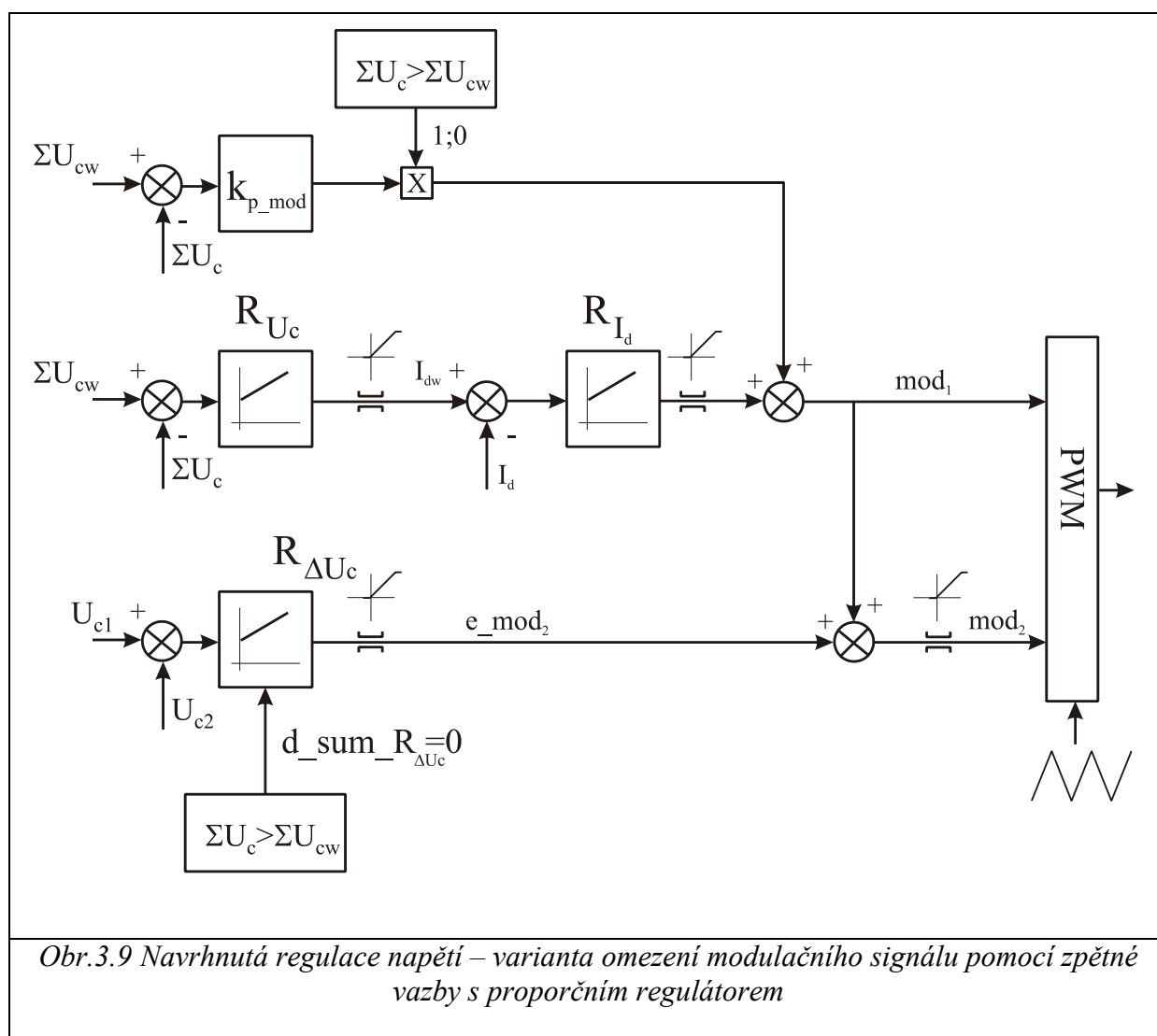
Kompletní regulační schéma včetně navržené úpravy je pak uvedeno na Obr.3.8. Při simulačních testech bylo použito nastavení regulátorů uvedené v tabulce 2.



Obr.3.8 Navrhnutá regulace napětí – varianta tvrdým nulováním sumace

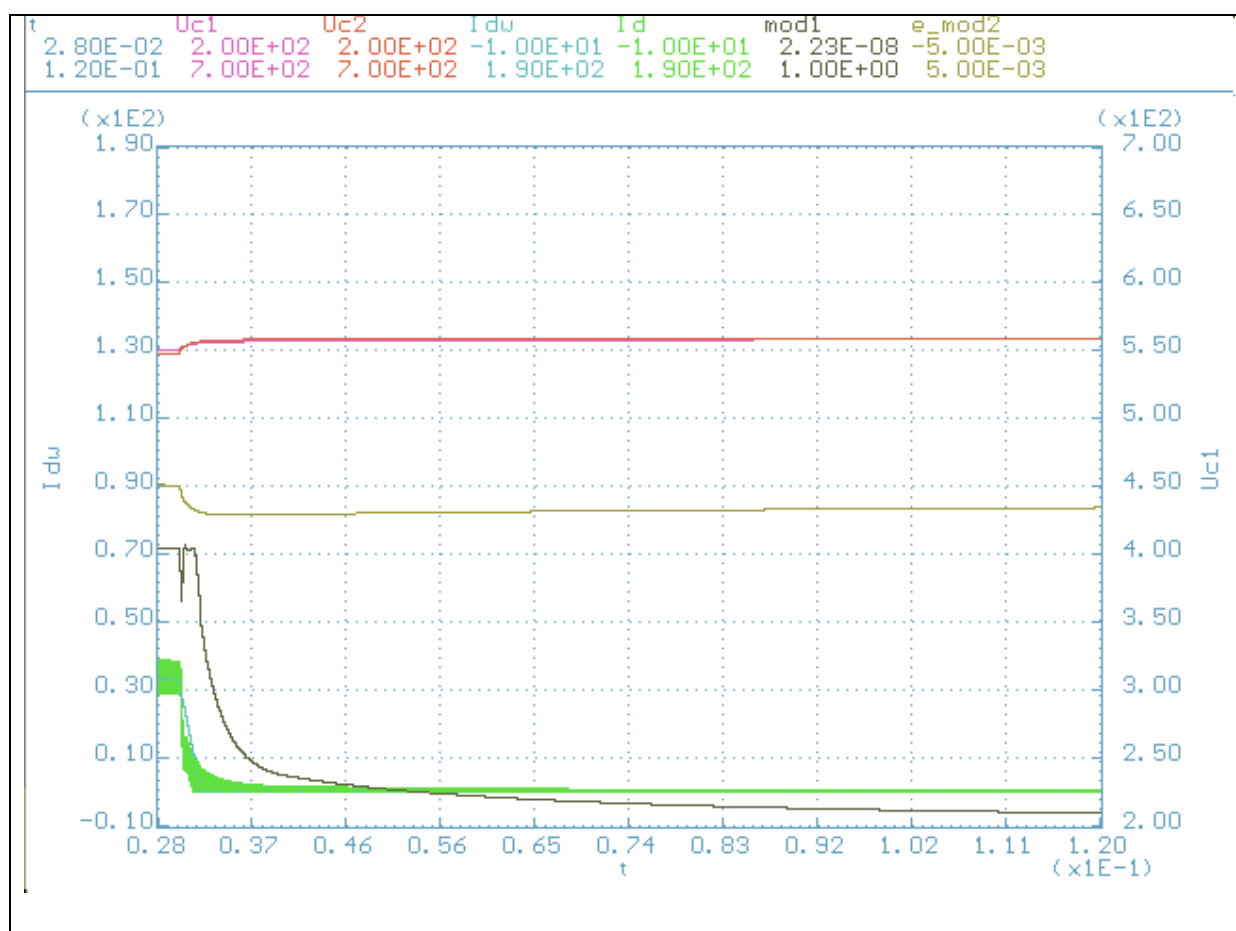
3.1.2 Omezení modulačního signálu pomocí zpětné vazby s proporčním regulátorem

Druhou možností, která byla testována pro zastavení nekontrolovatelného nárůstu napětí na výstupních kondenzátorech, je omezení přímo modulačního signálu pomocí vazby od napětí. Řešení je inspirováno klasickým PI regulátorem, který používá pro omezení sumace anti-windup vazbu. V tomto případě, je při větším než požadovaném napětí odečtena od výsledného modulačního signálu hodnota rozdílu požadovaného a skutečného napětí, která je vynásobena proporčním zesílením této vazby, jak je uvedeno na regulačním schématu Obr.3.9. A opět je zde nutné při větším než požadovaném napětí zablokovat sumaci dorovnávacího regulátoru ($d_sum_R_{\Delta U_c} = 0$).



Obr.3.9 Navrhnutá regulace napětí – varianta omezení modulačního signálu pomocí zpětné vazby s proporčním regulátorem

Uvedené řešení při větším než požadovaném napětí pouze omezí modulační signál, a tak sumace v proudovém PI regulátoru zůstává nezměněná. U rozvažovacího regulátoru $R_{\Delta U_c}$ je opět nutné zablokovat sumaci ($d_sum_R_{\Delta U_c} = 0$), aby při absenci spínání nedocházelo k nežádoucí sumaci na hladinu omezovače. Takto navrhnutý zásah nebude závislý na změně frekvence řízení (takže ani na periodě vzorkování a spínací frekvenci). V reálné aplikaci zde však může dojít k nežádoucímu rušení od převodníků napětí, které se přes proporční regulátor přenesou přímo do modulačního signálu, proto je nutné navrženou variantu otestovat přímo na laboratorním prototypu. Simulační výsledky pro odtížení měniče jsou pak uvedeny na Obr.3.10 a následné lehké zatížení Obr.3.11. Je zde vidět že nárůst výstupního napětí je pozvolně omezen pomocí modulačního signálu. Při opětovném zatížení je pak patrné, že došlo k menším kmitům modulačního signálu (pro stejný případ jako na Obr.3.7 při přerušovaném proudu), protože proudový regulátor je již na sumovaný na hodnotě před odtížením měniče.



Obr.3.10 Skokové odtížení měniče – změna zátěže z 22 kW na 0 kW (při rozdílných kapacitách kondenzátorů $C_1=10\mu\text{F}$, $C_2=5\mu\text{F}$, $f_{\text{spin}}=30\text{kHz}$) pro variantu omezení modulačního signálu pomocí zpětné vazby s proporčním regulátorem

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

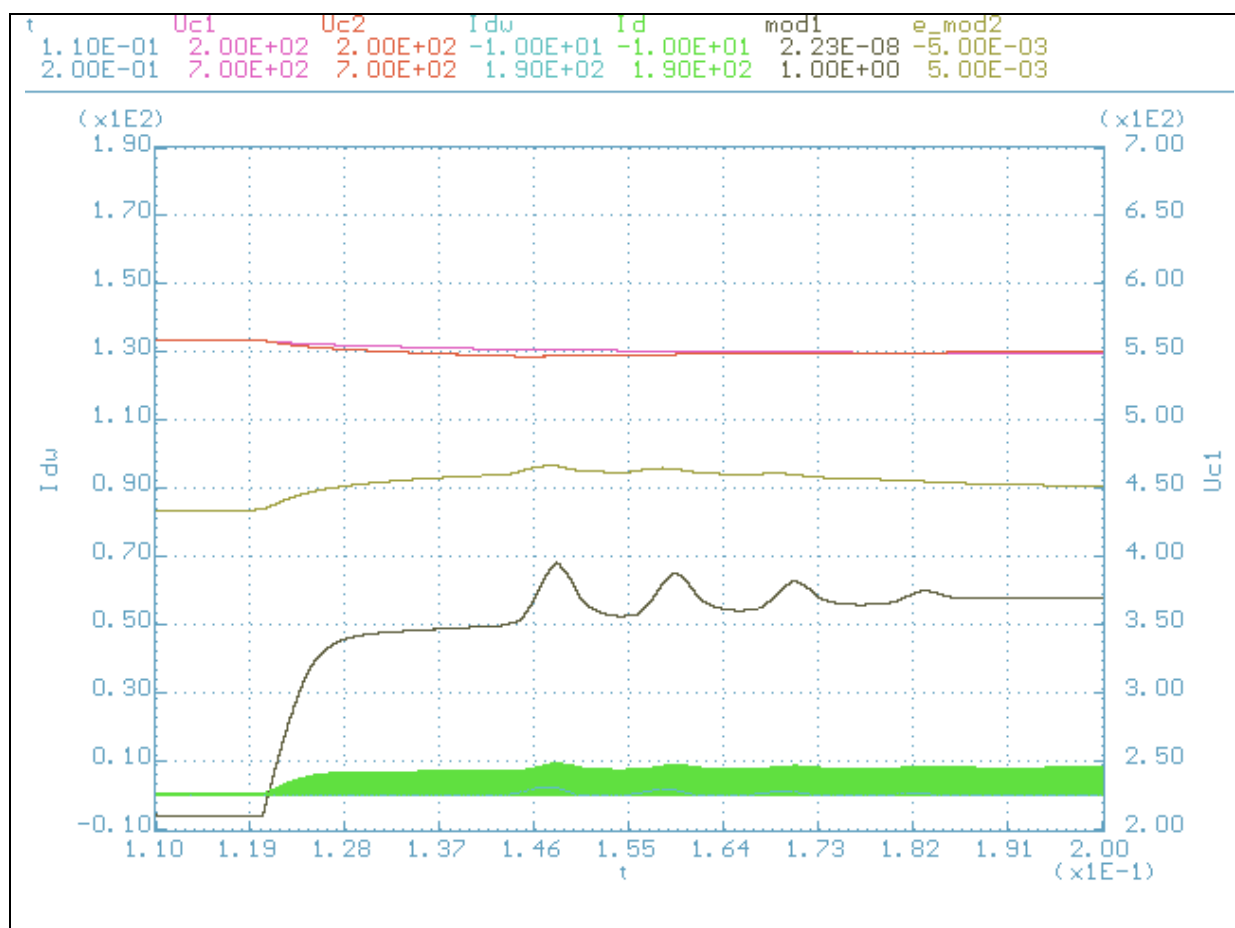
U_{c2} – napětí na kondenzátoru druhého ZPM (50V/dílek),

I_{dw} – požadovaný proud měniče (20A/dílek),

I_d – skutečný proud měniče (20A/dílek),

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

$e_{\text{mod}2}$ – kompenzační signál pro vyrovnění napětí na kondenzátorech (0,001/dílek)



Obr.3.11 Malá změna zatížení měniče – změna zátěže z 0 kW na 2,2 kW (při rozdílných kapacitách kondenzátorů $C_1=10\mu F$, $C_2=5\mu F$, $f_{spin}=30kHz$) pro variantu omezení modulačního signálu pomocí zpětné vazby s proporčním regulátorem

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

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

I_{dw} – požadovaný proud měniče (20A/dílek),

I_d – skutečný proud měniče (20A/dílek),

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

e_{mod2} – kompenzační signál pro vyrovnění napětí na kondenzátorech (0,001/dílek)

Při simulačních testech navrženého řízení (s omezením modulačního signálu pomocí zpětné vazby s proporčním regulátorem) bylo použito nastavení regulátorů uvedené v tabulce 3.

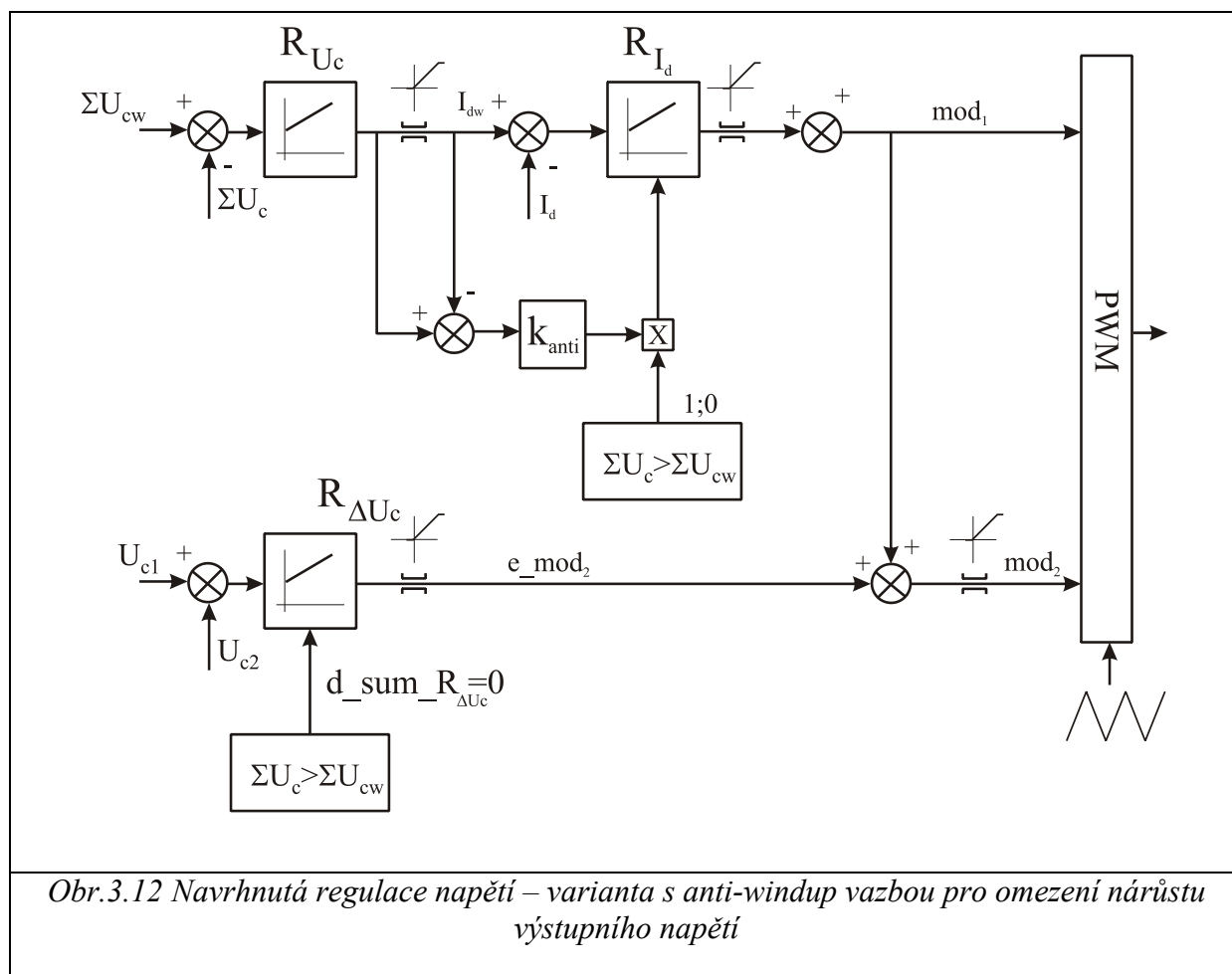
Tabulka 3: Nastavení PI regulátorů pro navrhnuté řízení s omezením modulačního signálu pomocí zpětné vazby s proporčním regulátorem

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
$R_{\Delta Uc}$	PI	$K_{\Delta Uc} = 0,0001$; $T_{\Delta Uc} = 0,01 \text{ s}$	0 – 0,95
	P	$K_{p_mod} = 0,03$	

3.1.3 Anti-Windup vazba na omezení nárůstu výstupního napětí

Třetí testovanou možností, bylo použití anti-windup vazby, která by omezila sumaci přímo regulátoru proudu R_{Id} , který způsobuje nekontrolovatelný nárůst napětí na výstupních kondenzátorech. V tomto případě, je anti-windup vazba zavedena od omezovače napěťového regulátoru (R_{Uc}) přes proporční zesílení (K_{anti}) do sumační části proudového

regulátoru R_{Id} . Navrhnuté regulační schéma je k vidění na Obr.3.12. A opět je zde nutné při větším než požadovaném napětí zablokovat sumaci dorovnávacího regulátoru $R_{\Delta U_c}$ ($d_sum_R_{\Delta U_c} = 0$).

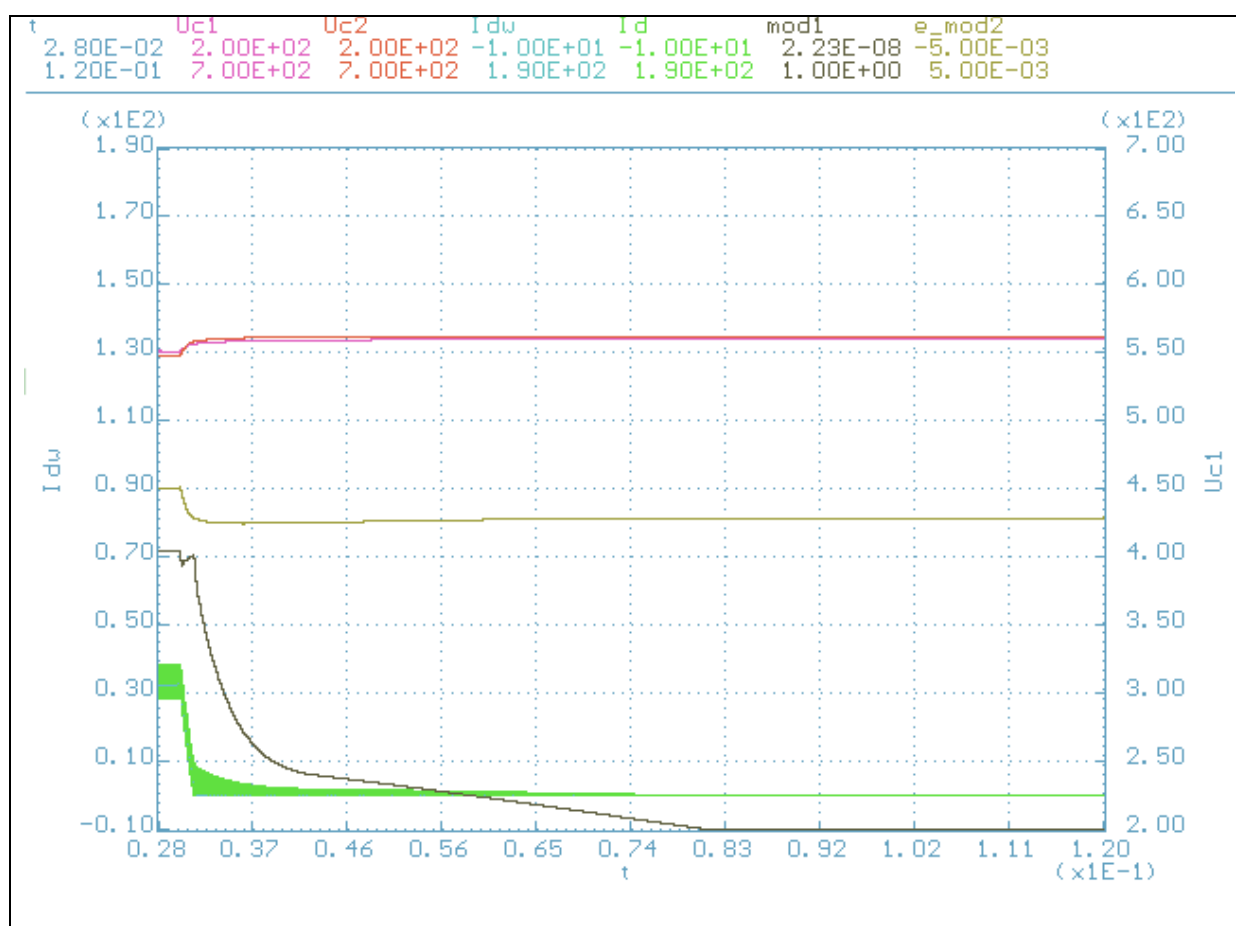


Uvedené řešení vychází o něco složitěji, protože je nutné zasáhnout přímo do sumace proudového regulátoru R_{Id} , a to při dosažení spodní hranice omezovače regulátoru napětí R_{U_c} (při $I_{dw} = 0$). Zásah je pak zesílen pomocí proporčního regulátoru (se zesílením k_{anti}) a odečten přímo od sumace proudového regulátoru ($suma = suma + d_suma - anti$). Tím že zásah projde přes dvě různé sumace (integrace napěťového regulátoru a pak přímo sumace proudového regulátoru), dochází k jeho vyfiltrování a není tak závislý na rušení z převodníků (měřené napětí U_{c1} a U_{c2}), avšak tento předpoklad je také nutné otestovat na laboratorním prototypu. Nastavení proporčního regulátoru uvnitř anti-windup vazby bude závislé na frekvenci řízení (při vyšší frekvenci dojde k rychlejšímu odsumování), proto bude nutné buď při její změně

měnit zesílení tohoto regulátoru, nebo zavést frekvenci řízení jako jeden z parametrů zesílení regulátoru tohoto anti-windup regulátoru.

Chování měniče pro navržené řízení je pak možné vidět na simulačních výsledcích Obr.3.13 (skokové odtížení měniče) a Obr.3.14 (následné lehké zatížení).

Je zde vidět že nárůst výstupního napětí je dostatečně rychle omezen anti-windup vazbou. Při opětovném zatížení je pak vidět, že se měnič chová obdobně jako u první varianty (kapitola 3.1.1, Obr.3.7), protože musí dojít k opětovnému nasumování PI regulátoru proudu což při přerušovaném proudu vede na určité kmity modulačního signálu.



Obr.3.13 Skokové odtížení měniče – změna zátěže z 22 kW na 0 kW (při rozdílných kapacitách kondenzátorů $C_1=10\mu\text{F}$, $C_2=5\mu\text{F}$, $f_{\text{spin}}=30\text{kHz}$) pro variantu s anti-windup vazbou pro omezení nárůstu výstupního napětí

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

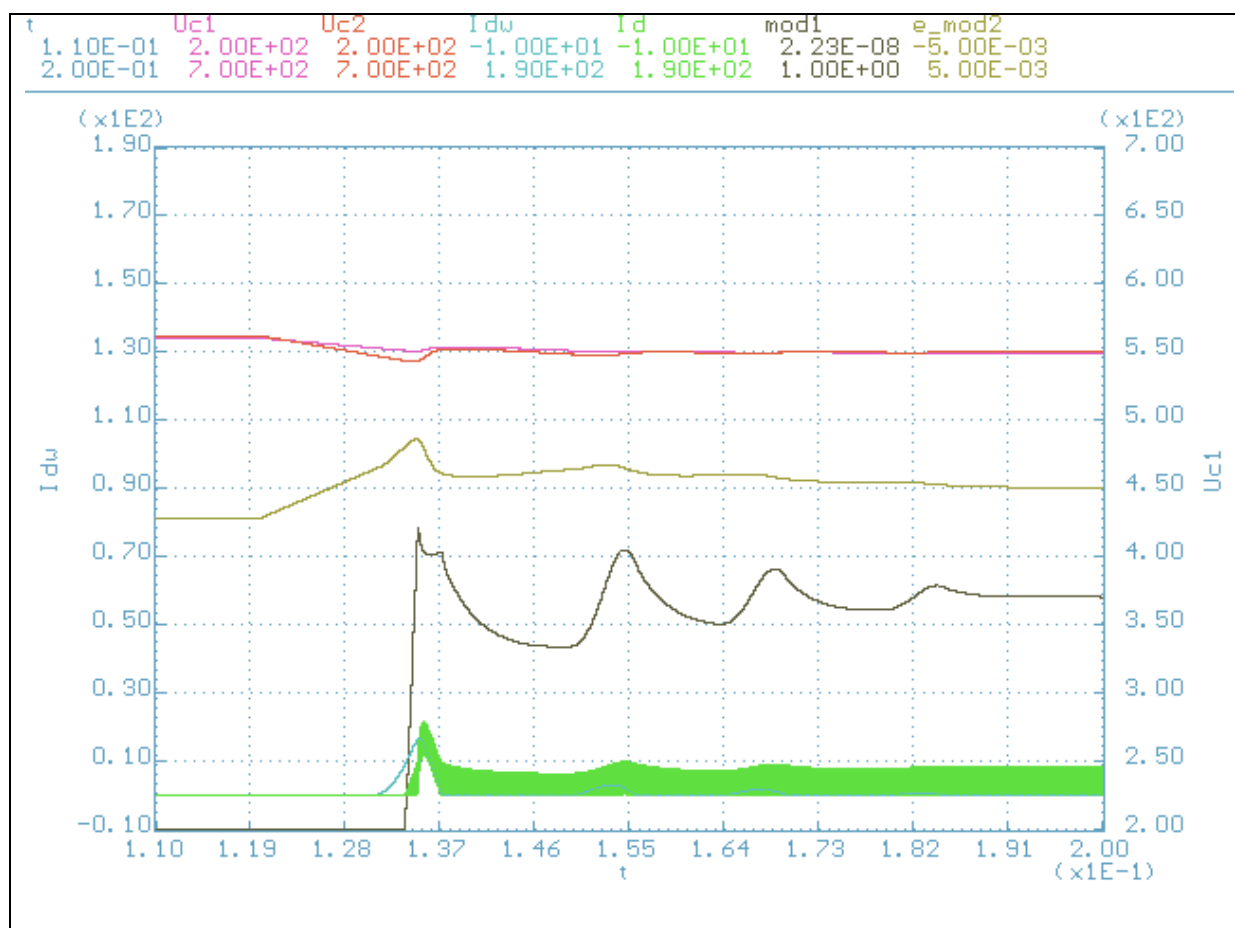
U_{c2} – napětí na kondenzátoru druhého ZPM (50V/dílek),

I_{dw} – požadovaný proud měniče (20A/dílek),

I_d – skutečný proud měniče (20A/dílek),

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

$e_{\text{mod}2}$ – kompenzační signál pro vyrovnění napětí na kondenzátorech (0,001/dílek)



Obr.3.14 Malá změna zatížení měniče – změna zátěže z 0 kW na 2,2 kW (při rozdílných kapacitách kondenzátorů $C_1=10\mu F$, $C_2=5\mu F$, $f_{spin}=30kHz$) pro variantu s anti-windup vazbou pro omezení nárůstu výstupního napětí

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

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

I_{dw} – požadovaný proud měniče (20A/dílek),

I_d – skutečný proud měniče (20A/dílek),

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

e_{mod2} – kompenzační signál pro vyrovnaní napětí na kondenzátorech (0,001/dílek)

Při simulačních testech navrženého řízení (s anti-windup vazbou pro omezení nárůstu výstupního napětí) bylo použito nastavení regulátorů uvedené v tabulce 4.

Tabulka 4: Nastavení PI regulátorů pro navrhnuté řízení s anti-windup vazbou pro omezení nárůstu výstupního napětí

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
$R_{\Delta Uc}$	PI	$K_{\Delta Uc} = 0,0001$; $T_{\Delta Uc} = 0,01 \text{ s}$	0 – 0,95
	P	$K_{anti} = 0,00001$	

4 Závěr

Výzkumná zpráva se zabývala simulací vstupního stabilizátoru napětí pomocných pohonů a bylo zde zkoumáno chování měniče při minimálním nebo nulovém zatížení. Při testech měniče se narazilo na problém, kdy při nulovém zatížení měniče dochází k neřiditelnému nárůstu výstupního napětí nad požadovanou hodnotu, což je způsobeno nepřesným měřením vstupního proudu měniče při přerušovaných proudech. Aby bylo

možné nastalý problém vyřešit, byli navrženy tři různé úpravy řízení, které byly otestovány pomocí simulačního modelu měniče.

- První a nejjednodušší varianta je nazvaná „tvrdé nulování sumace“ a je popsána v kapitole 3.1.1. Dochází zde k vynulování sumace proudového regulátoru a to při dosažení povolené hodnoty napětí. Jedná se o jednoduchou úpravu řízení, které navíc funguje jako ochrana při rychlých přechodových stavech. Upravené regulační schéma je pak zobrazeno na Obr.3.8.
- Další navržená varianta je nazvána „Omezení modulačního signálu pomocí zpětné vazby s proporčním regulátorem“ a je popsána v kapitole 3.1.2. Výhodou je snadná úprava algoritmu řízení a nezávislost na vzorkovací frekvenci řízení. Nevýhodou může být zanesení rušení z čidel přímo do modulačního signálu, regulační schéma je pak na Obr.3.9.
- Poslední varianta používá anti-windup vazbu na omezení nárůstu výstupního napětí jak je popsáno v kapitole 3.1.3. Anti-Windup vazba je zavedena od omezovače regulátoru napětí do sumace regulátoru proudu, upravené regulační schéma je pak znázorněno na Obr.3.12.

Literatura

- [1] 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 ZPM	4
Obr.3.2 Navrhnuté regulace napětí – řízení napětí na jednom ZPM je řízeno standardní reg. smyčkou a přidaný PI regulátor zajišťuje rovnoměrné rozvážení napětí na jednotlivých kondenzátorech pomocí korekčního signálu pro druhý ZPM	6
Obr.3.3 Ustálený stav měnič zatížen výkonem 22 kW (při rozdílných kapacitách kondenzátorů $C_1=10\mu\text{F}$, $C_2=5\mu\text{F}$, $f_{\text{spin}}=30\text{kHz}$)	8
Obr.3.4 Ustálený stav měnič zatížen výkonem 0 kW (při rozdílných kapacitách kondenzátorů $C_1=10\mu\text{F}$, $C_2=5\mu\text{F}$, $f_{\text{spin}}=30\text{kHz}$)	9
Obr.3.5 Skokové zatížení měniče – změna zátěže z 0 kW na 22 kW (při rozdílných kapacitách kondenzátorů $C_1=10\mu\text{F}$, $C_2=5\mu\text{F}$, $f_{\text{spin}}=30\text{kHz}$)	10
Obr.3.6 Skokové odtížení měniče – změna zátěže z 22 kW na 0 kW (při rozdílných kapacitách kondenzátorů $C_1=10\mu\text{F}$, $C_2=5\mu\text{F}$, $f_{\text{spin}}=30\text{kHz}$) pro variantu řízení s tvrdým nulováním sumace	12
Obr.3.7 Malá změna zatížení měniče – změna zátěže z 0 kW na 2,2 kW (při rozdílných kapacitách kondenzátorů $C_1=10\mu\text{F}$, $C_2=5\mu\text{F}$, $f_{\text{spin}}=30\text{kHz}$) pro variantu řízení s tvrdým nulováním sumace	13
Obr.3.8 Navrhnutá regulace napětí – varianta tvrdým nulováním sumace	14
Obr.3.9 Navrhnutá regulace napětí – varianta omezení modulačního signálu pomocí zpětné vazby s proporčním regulátorem	15
Obr.3.10 Skokové odtížení měniče – změna zátěže z 22 kW na 0 kW (při rozdílných kapacitách kondenzátorů $C_1=10\mu\text{F}$, $C_2=5\mu\text{F}$, $f_{\text{spin}}=30\text{kHz}$) pro variantu omezení modulačního signálu pomocí zpětné vazby s proporčním regulátorem	16
Obr.3.11 Malá změna zatížení měniče – změna zátěže z 0 kW na 2,2 kW (při rozdílných kapacitách kondenzátorů $C_1=10\mu\text{F}$, $C_2=5\mu\text{F}$, $f_{\text{spin}}=30\text{kHz}$) pro variantu omezení modulačního signálu pomocí zpětné vazby s proporčním regulátorem	17
Obr.3.12 Navrhnutá regulace napětí – varianta s anti-windup vazbou pro omezení nárůstu výstupního napětí	19

- Obr.3.13 Skokové odtížení měniče – změna zátěže z 22 kW na 0 kW (při rozdílných kapacitách kondenzátorů $C_1=10\mu\text{F}$, $C_2= 5\mu\text{F}$, $f_{\text{spin}}=30\text{kHz}$) pro variantu s anti-windup vazbou pro omezení nárůstu výstupního napětí 20
- Obr.3.14 Malá změna zatížení měniče – změna zátěže z 0 kW na 2,2 kW (při rozdílných kapacitách kondenzátorů $C_1=10\mu\text{F}$, $C_2= 5\mu\text{F}$, $f_{\text{spin}}=30\text{kHz}$) pro variantu s anti-windup vazbou pro omezení nárůstu výstupního napětí 21

Historie revizí

Rev.	Kapitola	Popis změny	Datum Jméno / Odd.