

## Algoritmy řízení a regulace výstupního napět'ového střídače diesel-elektrické napájecí jednotky

<sup>1</sup>Z. Peroutka, <sup>1</sup>T. Glasberger, <sup>1</sup>J. Molnár

<sup>1</sup>Regionální inovační centrum elektrotechniky (RICE), ZČU v Plzni,  
Univerzitní 26, Plzeň

E-mail : pero@rice.zcu.cz, tglasber@rice.zcu.cz, jmolnar@rice.zcu.cz

### Anotace:

Tento článek popisuje algoritmy řízení a regulace výstupní části diesel-elektrické napájecí jednotky, která je tvořena třífázovým čtyřvět'ovým napět'ovým střídačem se sinusovým filtrem na výstupu. Hlavní pozornost je věnována vývoji PWM uvedeného střídače. V příspěvku jsou popsány dvě modulační techniky a srovnány jejich vlastnosti z hlediska možností využití a funkce v celém regulačním systému jednotky: (i) modifikovaná sinusová PWM a (ii) vektorová PWM v souřadném systému abc. Dále je navržen regulační systém, který umožňuje jednotce napájet libovolnou symetrickou i nesymetrickou zátěž nebo jejich kombinace při zachování symetrie soustavy výstupního napětí a nízkého THD<sub>u</sub>. Funkce navržených PWM algoritmů a regulačního systému byla ověřena jak na simulačním modelu, tak na postaveném laboratorním modelu měniče o jmenovitém výkonu 18kVA.

### Annotation:

This paper describes control algorithms for the output part of a diesel-electric power supply unit which is composed of a three-phase four-leg voltage source inverter with a sinusoidal filter. The paper is focused on the development of PWM strategies for the mentioned inverter. The first part of this paper describes two modulation strategies and compares their properties and utilization possibilities in the supply unit: (i) modified carrier based PWM, and (ii) space vector PWM in abc coordinate system. The second part of this paper introduces the proposed control system of the power supply unit. The proposed control secures generation of symmetrical output voltages with low THD<sub>u</sub> under arbitrary load conditions. The unit is able to supply either symmetrical or unsymmetrical load or their combinations. The proper function of the designed PWM algorithms and overall control system has been verified by simulations as well as by experiments made on the developed laboratory model with rated power of 18kVA.

### ÚVOD

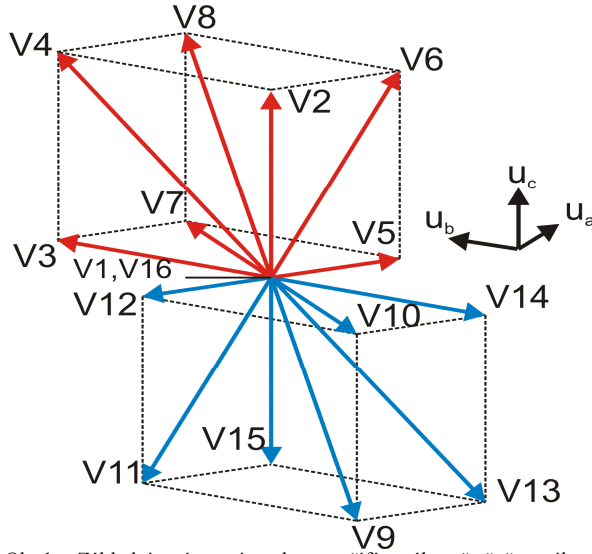
Jak již bylo řečeno, tento článek se zabývá návrhem algoritmů řízení výstupní části napájecí jednotky. Hlavním požadavkem na napájecí jednotku byl její maximálně spolehlivý provoz, symetrické výstupní napětí a nízké THD<sub>u</sub> při napájení libovolného typu zátěže (symetrická, nesymetrická, lineární, nelineární a jejich kombinace). Výstupní část měniče je koncipována jako třífázový čtyřvět'ový napět'ový střídač, což přináší určitá úskalí při návrhu jeho algoritmů řízení. Byly navrženy dva řídicí systémy, které se liší modulátorem. Jeden z nich využívá vektorovou PWM v souřadném systému abc (SVPWM – space vector pulse width modulation) a druhý využívá modifikovanou PWM s nosnou (CBPWM – carrier based pulse width modulation). Vlastnosti obou jsou následně porovnány na navrženém laboratorním modelu jednotky. Hlavním požadavkem na navrhovaný řídicí systém bylo, jak je naznačeno výše, aby tento byl schopen vytvořit na výstupu jednotky symetrické napájecí napětí při připojení libovolného typu zátěže a zajistit správnou funkci i při provozu bez zátěže. Je důležité poznamenat, že výstupní část jednotky je tvořena sinusovým LC filtrem, takže regulační systém zde má

velmi náročnou úlohu potlačit možné oscilace napětí při změnách připojené zátěže.

Článek je organizován následovně. V první části je popsána použitá vektorová PWM v souřadném systému abc. Následně je představena druhá aplikovaná modulační technika – modifikovaná sinusová PWM. Ve třetí části jsou uvedeny navržené algoritmy řízení a regulace popisované diesel-elektrické jednotky. V poslední části příspěvku jsou prezentovány výsledky simulací a experimentů realizovaných na vyvinutém laboratorním funkčním modelu výstupního měniče jednotky o jmenovitém výkonu 18 kVA.

### TROJROZMĚRNÁ VEKTOROVÁ PWM

V literatuře lze najít několik existujících algoritmů pro řízení tohoto typu měniče, jeden z nich například využívá známou transformaci fázových veličin do trojrozměrného souřadného systému dq0 [1], [2]. Tento algoritmus je velmi náročný pro implementaci a využití v systému reálného času, je však u něj poměrně snadné sledovat trajektorii požadovaného vektoru napětí.



Obr.1. Základní výstupní vektory třířázevého čtyřvřtvového napěťového střídače v souřadném systému abc.

Další algoritmus vektorové PWM využívá zobrazení vektorů v souřadném systému abc. V tomto případě nedochází k žádné matematicky náročné transformaci, souřadnice vektoru tvoří přímo okamžité hodnoty fázových napětí [3].

Zde je vhodné poznamenat, že čtyřvřtvový střídač má více spínacích kombinací než klasický třířázevý, což vede na složitější algoritmy řízení. Na druhou stranu je zde více stupňů volnosti pro vytvoření vhodného regulačního zásahu.

Tab. 1: Souřadnice výstupních vektorů střídače a odpovídající spínací kombinace.

V	S <sub>f</sub>	S <sub>a</sub>	S <sub>b</sub>	S <sub>c</sub>	U <sub>af</sub>	U <sub>bf</sub>	U <sub>cf</sub>
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	1	0	0	1
3	0	0	1	0	0	1	0
4	0	0	1	1	0	1	1
5	0	1	0	0	1	0	0
6	0	1	0	1	1	0	1
7	0	1	1	0	1	1	0
8	0	1	1	1	1	1	1
9	1	0	0	0	-1	-1	-1
10	1	0	0	1	-1	-1	0
11	1	0	1	0	-1	0	-1
12	1	0	1	1	-1	0	0
13	1	1	0	0	0	-1	-1
14	1	1	0	1	0	-1	0
15	1	1	1	0	0	0	-1
16	1	1	1	1	0	0	0

Vektory použitého algoritmu, který principiálně vychází z [3], tvoří v trojrozměrném prostoru dvanáctistěn tak, jak je znázorněno na obr. 1.

V zásadě si lze uspořádání vektorů představit jako dvě krychle spojené v jednom vrcholu.

Souřadnice každého vektoru je tvořena hodnotou výstupního fázového napětí střídače, není zde využita žádná transformace. Souřadnice jednotlivých vektorů odpovídající příslušné spínací kombinaci tranzistorů měniče jsou uvedeny v Tab. 1. Zde veličiny  $s_a, s_b, s_c, s_f$  představují spínací kombinace (1=sepnut horní tranzistor v příslušné větvi měniče, 0=sepnut spodní tranzistor v příslušné větvi měniče),  $u_{af}, u_{bf}, u_{cf}$  jsou fázová napětí zátěže (vůči neutrální fázi N) vztažená k napětí ve stejnosměrném meziobvodu  $U_{dc}$ .

Dvanáctistěn může být rozdělen do 24 různých tzv. regionů tvořených vždy trojicí základních lineárně nezávislých vektorů měniče. Požadovaný výstupní vektor lze potom vytvořit kombinací sepnutí těchto tří vektorů v regionu a vektoru nulového. Volbu vhodného regionu lze provést pomocí následujících vztahů (1) a (2):

$$\begin{aligned}
 C_1 &= \text{sgn} \left[ \text{INT}(u_{af}^* + 1) \right] \\
 C_2 &= \text{sgn} \left[ \text{INT}(u_{bf}^* + 1) \right] \\
 C_3 &= \text{sgn} \left[ \text{INT}(u_{cf}^* + 1) \right] \\
 C_4 &= \text{sgn} \left[ \text{INT}(u_{af}^* - u_{bf}^* + 1) \right], \\
 C_5 &= \text{sgn} \left[ \text{INT}(u_{bf}^* - u_{cf}^* + 1) \right] \\
 C_6 &= \text{sgn} \left[ \text{INT}(u_{af}^* - u_{cf}^* + 1) \right]
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$RP = 1 + \sum_{i=1}^6 C_i \cdot 2^{(i-1)}, \tag{2}$$

kde  $C_1$ - $C_6$  jsou koeficienty pro rovnici (2),  $u_{af}^*, u_{bf}^*, u_{cf}^*$  jsou požadovaná napětí (normované hodnoty), INT je celočíselná část příslušného argumentu a funkce sgn určuje znaménko, resp. nenulovost jejího argumentu. Činitel RP může nabývat hodnot 1-64, ale ne všechny regiony lze zahrnout do výběru – některé regiony mohou být tvořeny lineárně závislými vektory, což je nežádoucí. Jakmile je vybrán správný region, lze spočítat časy sepnutí jednotlivých vektorů řešením rovnic (3) - (5):

$$\mathbf{V}^* = \mathbf{M} \cdot \mathbf{d}, \mathbf{d} = \mathbf{M}^{-1} \cdot \mathbf{V}^*, \mathbf{d} = [d_1 \ d_2 \ d_3]^T \tag{3}$$

$$\mathbf{V}^* = \begin{bmatrix} u_{af}^* \\ u_{bf}^* \\ u_{cf}^* \end{bmatrix}, \mathbf{M} = \begin{bmatrix} u_{af}^{V1*} & u_{af}^{V2*} & u_{af}^{V3*} \\ u_{bf}^{V1*} & u_{bf}^{V2*} & u_{bf}^{V3*} \\ u_{cf}^{V1*} & u_{cf}^{V2*} & u_{cf}^{V3*} \end{bmatrix}, \tag{4}$$

$$d_0 = 1 - d_1 - d_2 - d_3, \tag{5}$$

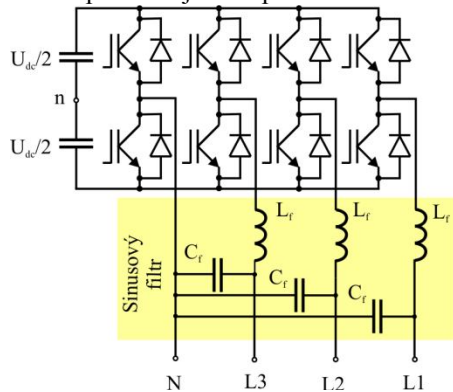
kde  $\mathbf{V}^*$  je požadovaný vektor napětí,  $\mathbf{d}$  je vektor poměrných časů sepnutí,  $\mathbf{M}$  je matice určená pomocí souřadnic tří vektorů (indexy  $V_1^*$ - $V_3^*$ ), ze kterých je tvořen příslušný region.

## MODIFIKOVANÁ SINUSOVÁ PWM S NOSNOU

Tato metoda řízení střídače vychází z principu publikovaného v [4]. Základní rovnice fázových napětí lze s pomocí obr. 2 psát jako (6):

$$\begin{aligned} u_{af} &= u_{an} - u_{nf} \\ u_{bf} &= u_{bn} - u_{nf}, \\ u_{cf} &= u_{cn} - u_{nf} \end{aligned} \quad (6)$$

kde  $u_{af}$ ,  $u_{bf}$ ,  $u_{cf}$  jsou fázová napětí zátěže vzhledem k neutrální fázi,  $u_{an}$ ,  $u_{bn}$ ,  $u_{cn}$  jsou fázová napětí střídače a  $u_{nf}$  je offset napětí, který může být řízen a modifikován podobně jako napětí v ostatních fázích.



Obr. 2: Výkonový obvod navrženého čtyřvětvového třífázového napěťového střídače.

Rovnice (7) a (8) představují maximální dosažitelné napětí a maximální offset v napětí v neutrální větvi v závislosti na požadovaném fázovém napětí:

$$\begin{aligned} -U_{dc}/2 \leq u_{af}, u_{bf}, u_{cf} \leq U_{dc}/2 \\ -U_{dc}/2 \leq u_{nf} \leq U_{dc}/2 \end{aligned}, \quad (7)$$

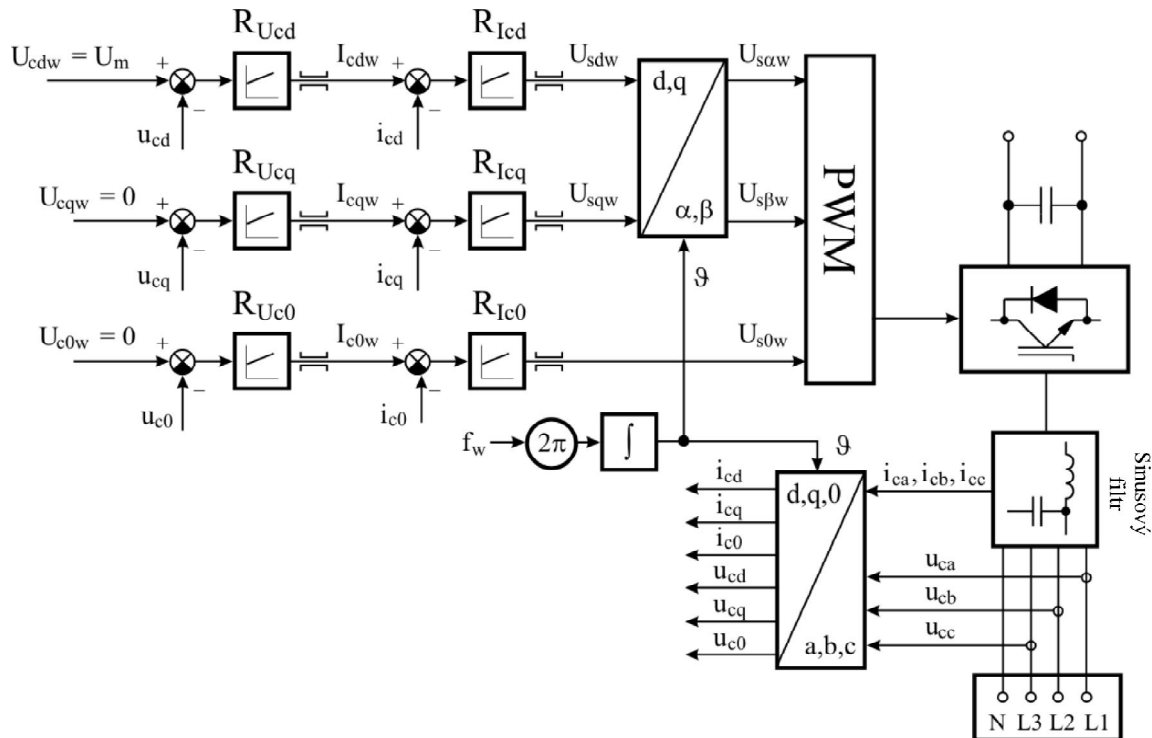
$$-U_{dc}/2 - U_{\min} \leq u_{nf} \leq U_{dc}/2 - U_{\max}, \quad (8)$$

kde  $U_{\min} = \min(u_{af}, u_{bf}, u_{cf})$ ,  $U_{\max} = \max(u_{af}, u_{bf}, u_{cf})$ . Časy sepnutí lze následně určit z (9), výpočet je podobný výpočtům časů sepnutí u sinusové PWM pro klasický třífázový střídač, kde  $T_s$  je spínací perioda.

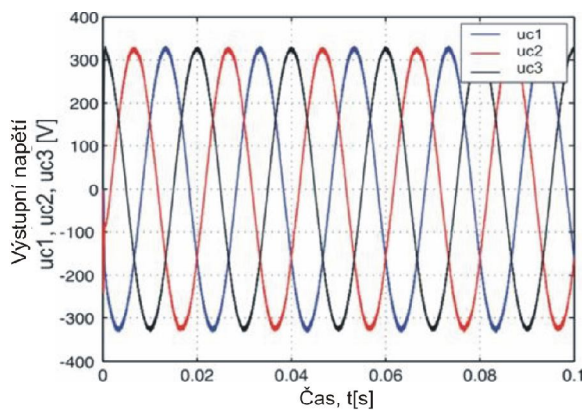
$$\begin{aligned} T_a &= \frac{T_s}{2} + \frac{u_{an}}{U_{dc}} \cdot T_s \\ T_b &= \frac{T_s}{2} + \frac{u_{bn}}{U_{dc}} \cdot T_s \\ T_c &= \frac{T_s}{2} + \frac{u_{cn}}{U_{dc}} \cdot T_s \\ T_f &= \frac{T_s}{2} + \frac{u_{fn}}{U_{dc}} \cdot T_s \end{aligned} \quad (9)$$

## NAVŘEŽENÉ ALGORITMY ŘÍZENÍ VÝSTUPNÍHO STŘÍDAČE

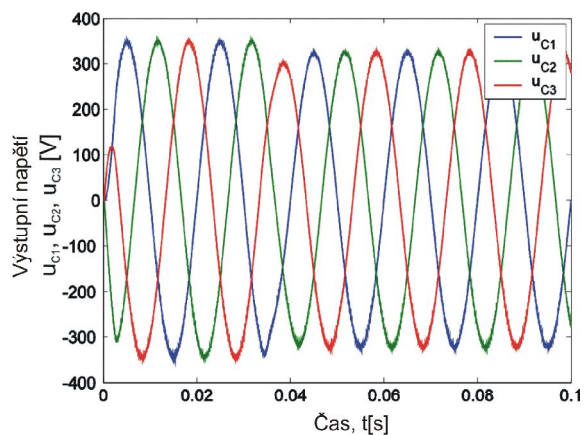
Struktura navrženého regulačního systému je blokově znázorněna na obr. 3. Výkonová část měniče je sestavena z třífázového čtyřvětvového napěťového střídače se sinusovým filtrem na výstupu měniče. Základními regulovanými veličinami v tomto případě jsou napětí na kondenzátorech filtru, ta jsou tedy



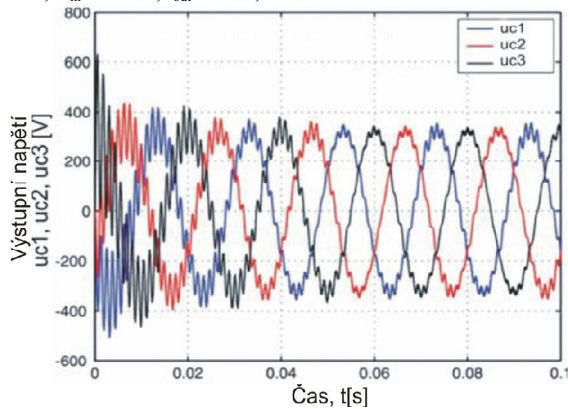
Obr. 3: Navržený řídicí systém výstupní části centrální napájecí jednotky.



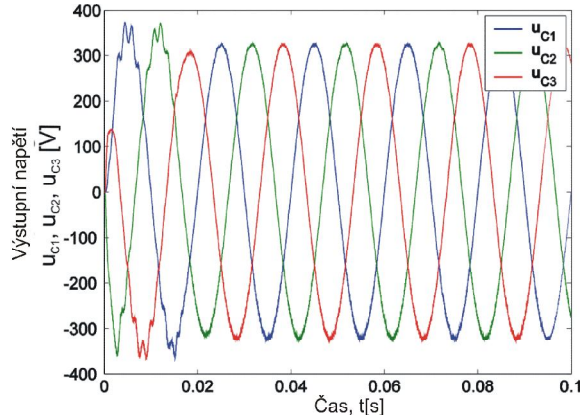
Obr. 4: Napětí na kondenzátorech filtru při třífázové symetrické zátěži,  $U_m^*=325$  V,  $f_{out}=50$  Hz, CBPWM.



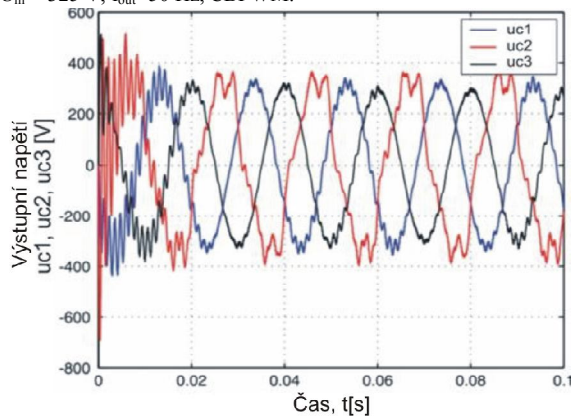
Obr. 7: Napětí na kondenzátorech filtru při třífázové symetrické zátěži,  $U_m^*=325$  V,  $f_{out}=50$  Hz, SVPWM.



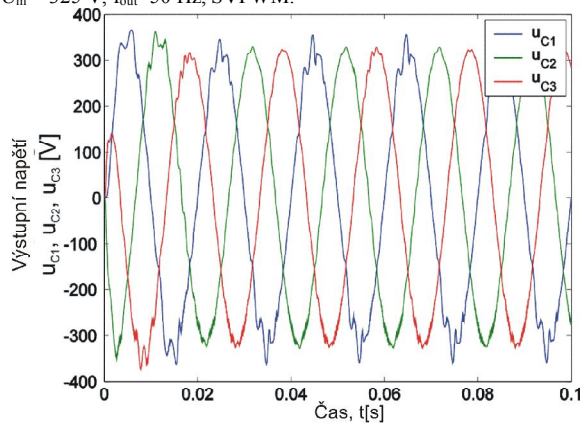
Obr. 5: Napětí na kondenzátorech bez připojené zátěže,  $U_m^*=325$  V,  $f_{out}=50$  Hz, CBPWM.



Obr. 8: Napětí na kondenzátorech bez připojené zátěže,  $U_m^*=325$  V,  $f_{out}=50$  Hz, SVPWM.



Obr. 6: Napětí na kondenzátorech při nesymetrické nelineární zátěži,  $U_m^*=325$  V,  $f_{out}=50$  Hz, CBPWM.



Obr. 9: Napětí na kondenzátorech při nesymetrické nelineární zátěži,  $U_m^*=325$  V,  $f_{out}=50$  Hz, SVPWM.

zavedena jako zpětné vazby do regulační struktury. Dalšími měřenými veličinami jsou proudy kondenzátory filtru, které slouží ke zvýšení dynamiky regulačního zásahu. Všechny měřené veličiny jsou transformovány do rotujícího souřadného systému dq0 svázaného s výstupním napětím měniče a zavedeny do soustavy PI regulátorů napětí a proudů. Každá ze složek je řízena odděleně, nezávisle na ostatních, což je hlavním rozdílem oproti systémům popisovaných např. v [5].

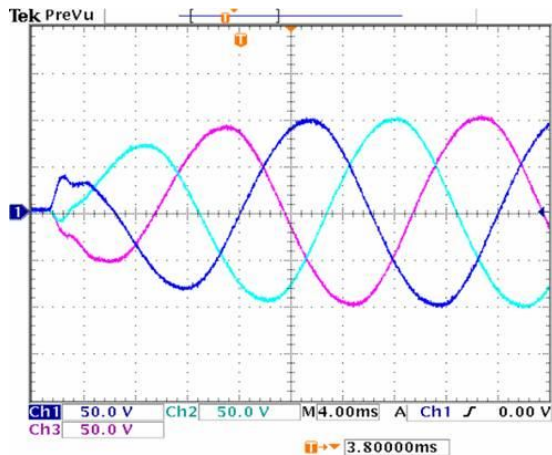
Vstupem do řídicího systému jsou požadovaná napětí  $u_{cdw}$ ,  $u_{cwq}$ ,  $u_{c0w}$ , jak je znázorněno na obr. 3. Výstupní

signály soustavy PI regulátorů představují následně příkazy pro PWM modulátor. Pozice rotujícího souřadného systému  $\vartheta$ , která je nezbytná pro transformaci veličin do složek dq0, je vypočtena ze známé (požadované) frekvence výstupního napětí  $f_w$  (typicky 50 nebo 60 Hz).

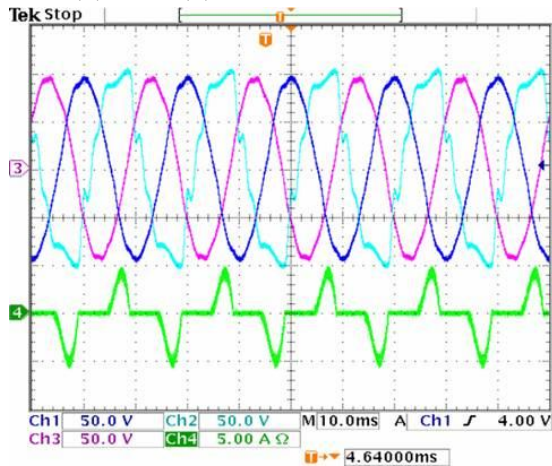
## SIMULAČNÍ VÝSLEDKY

Následující obrázky prezentují simulační výsledky chování výstupní části jednotky s navrženými algoritmy řízení a regulace a s oběma metodami

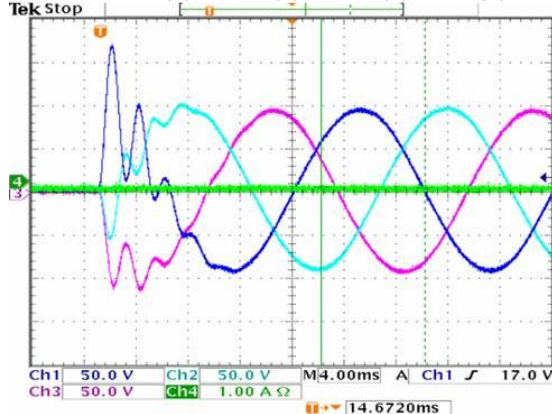
PWM: SVPWM a CBPWM. Simulační výsledky byly získány při různých typech zátěží, např. tří- nebo jednofázová, lineární nebo nelineární, symetrická nebo nesymetrická. Obr. 4-6 znázorňují chování systému s CBPWM, parametry simulace byly následující: napětí ve stejnosměrném meziobvodu  $U_{dc}=700$  V, amplituda požadovaného napětí  $U_m^*=325$  V, a výstupní frekvence  $f_w=50$  Hz. Na obr. 4 je znázorněno chování systému se symetrickou třífázovou zátěží, obr. 5 znázorňuje chování systému



Obr. 10: Start měniče: Napětí na kondenzátorech při symetrické třífázové zátěži,  $U_m^*=100$  V,  $f_{out}=50$  Hz, CBPWM, ch1:  $u_{ca}$  (V), ch2:  $u_{cb}$  (V), ch3:  $u_{cc}$  (V).

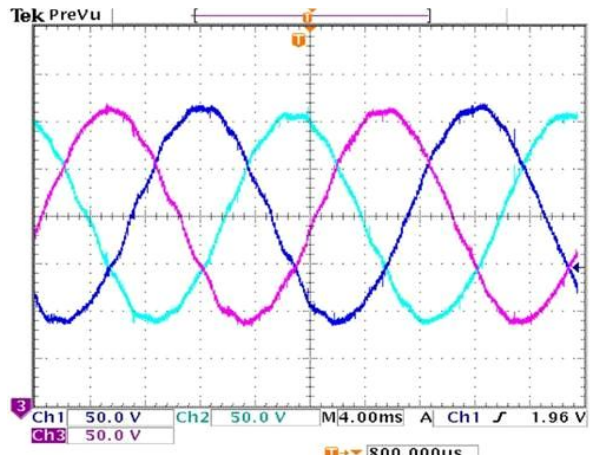


Obr. 11: Ustálený stav: Napětí na kondenzátorech při nesymetrické nelineární zátěži,  $U_m^*=100$  V,  $f_{out}=50$  Hz, CBPWM, ch1:  $u_{ca}$  (V), ch2:  $u_{cb}$  (V), ch3:  $u_{cc}$  (V), ch4:  $i_a$  (A).

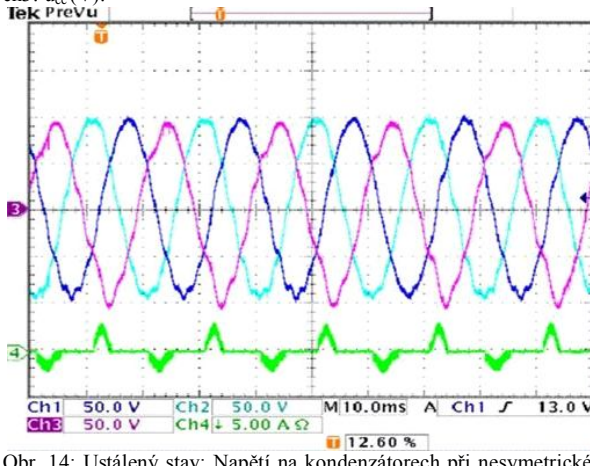


Obr. 12: Start měniče: Napětí na kondenzátorech bez připojené zátěže,  $U_m^*=100$  V,  $f_{out}=50$  Hz, CBPWM, ch1:  $u_{ca}$  (V), ch2:  $u_{cb}$  (V), ch3:  $u_{cc}$  (V), ch4:  $i_a$  (A).

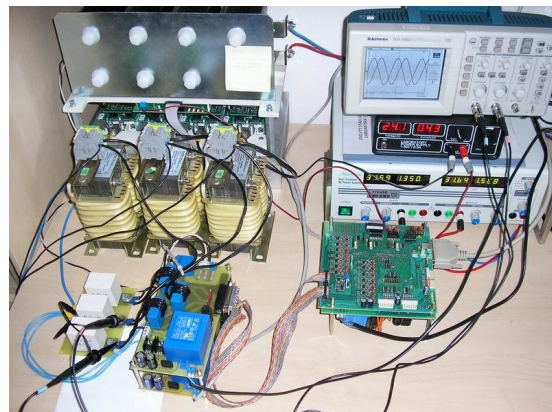
bez připojené zátěže, zde kvůli LC filtru vznikají oscilace napětí při startu měniče. Překmitý napětí lze na úkor dynamiky celého systému snížit prostřednictvím zesílení PI regulátorů [5]. Chování systému s nelineární nesymetrickou zátěží je znázorněno na obr. 6. Zde je vidět zkreslení výstupního napětí, které lze opět zmenšit pomocí snížení zesílení PI regulátorů, opět na úkor dynamiky systému v přechodových stavech. Tento stav je vidět z obr. 7-9, kde zesílení PI regulátorů bylo nižší. Tyto



Obr. 13: Ustálený stav: Napětí na kondenzátorech při provozu bez zátěže,  $U_m^*=100$  V,  $f_{out}=50$  Hz, SVPWM, ch1:  $u_{ca}$  (V), ch2:  $u_{cb}$  (V), ch3:  $u_{cc}$  (V).



Obr. 14: Ustálený stav: Napětí na kondenzátorech při nesymetrické nelineární zátěži,  $U_m^*=100$  V,  $f_{out}=50$  Hz, SVPWM, ch1:  $u_{ca}$  (V), ch2:  $u_{cb}$  (V), ch3:  $u_{cc}$  (V), ch4:  $i_a$  (A).



Obr. 15: Laboratorní model napájecí jednotky: výkonový měnič, filtr, měřící moduly, mikroprocesorový regulátor s TMS320F2812.

obrázky také znázorňují chování systému s druhým, vektorovým způsobem modulace.

## EXPERIMENTY NA VYVINUTÉM LABORATORNÍM MODELU

Správná funkce navržených algoritmů řízení měniče byla ověřena experimentálně na postaveném laboratorním modelu napájecí jednotky o výkonu 18 kVA. Napětí ve stejnosměrném meziobvodu bylo při testech nastaveno na  $U_{dc}=210$  V. Amplituda požadovaného výstupního napětí byla  $U_m^*=100$  V a požadovaná výstupní frekvence  $f_w=50$  Hz. Experimenty byly provedeny pro různé typy zátěží: symetrická třífázová, bez zátěže a jednofázová nelineární zátěž. Parametry sinusového filtru jsou  $L=2$  mH a  $C=20$   $\mu$ F v každé fázi. Spínací frekvence měniče byla nastavena na  $f_{pwm}=8$  kHz.

Na obr. 10-12 jsou znázorněny výsledky experimentů chování výstupní části napájecí jednotky s CBPWM. Obr. 10 znázorňuje chování systému při symetrické třífázové zátěži typu RL, obr. 11 chování s připojenou nelineární jednofázovou zátěží. Tuto zátěž představuje diodový můstkový usměrňovač, na jehož stejnosměrné straně je připojen kondenzátor s paralelním rezistorem. Obr. 12 znázorňuje start měniče bez vlivu řídicího systému (v otevřené regulační smyčce) a bez připojené zátěže s použitím CBPWM.

Obr. 13 dále znázorňuje chování systému při provozu bez zátěže při SVPWM, chování systému s nelineární jednofázovou zátěží a SVPWM je na obr. 14.

Na obr. 15 je vyobrazeno pracoviště s vyvinutým laboratorním modelem.

## ZÁVĚR

V tomto článku jsou popsány navržené algoritmy řízení a regulace pro výstupní část vyvinuté diesel-elektrické napájecí jednotky. V rámci projektu byl postaven laboratorní model výkonového polovodičového měniče pro tuto jednotku o výkonu 18 kVA. Správná funkce navrženého měniče a jeho řídicího systému byla ověřena jak na simulačním modelu, tak i experimentálně na uvedeném laboratorním modelu jednotky.

Hlavní důraz prezentovaného výzkumu byl zaměřen na PWM modulace čtyřvětvového třífázového měniče. Byly vyvinuty, implementovány a srovnány dva různé algoritmy – PWM s nosnou (CBPWM) a trojrozměrná vektorová PWM (SVPWM). Získány byly následující poznatky:

- 1) Navržený řídicí systém splňuje zadané požadavky, tj. umožňuje řídit výstupní napětí ve složkách  $dq0$ , v každé z nich nezávisle, a proto je možné tento systém použít pro napájení libovolných typů zátěží.
- 2) Oba PWM algoritmy, CBPWM i SVPWM, mohou být použity pro modulátor v navrženém řídicím systému. Použitá

regulace v rotujícím souřadném systému svázaném s vektorem požadovaného napětí však plně nevyužívá potenciálu SVPWM v souřadném systému abc, u které není principiálně nutno aplikovat žádnou transformaci fázových veličin do jiného souřadného systému.

- 3) SVPWM dosahuje výsledků, které jsou srovnatelné s CBPWM. V tomto případě je SVPWM komplikovanější a její výpočetní čas je delší než u popisované CBPWM. To přináší určitá úskalí při implementaci 3D SVPWM v systému reálného času.

Na základě výsledků simulací a rozsáhlých laboratorních experimentů bylo rozhodnuto, že ve finální verzi prototypu bude použit algoritmus PWM s nosnou, neboť je výpočetně nenáročný a vykazuje lepší chování v řadě přechodových dějů. V tomto článku prezentovaná regulace v rotujícím souřadném systému navíc nemůže naplno využít všech výhod daných 3D SVPWM, které by částečně mohly kompenzovat uvedené nevýhody tohoto algoritmu.

## LITERATURA

- [1] Ryan, M.J. - De Doncker, R.W. - Lorenz, R.D.: Decoupled Control of a Four-Leg Inverter Via a New 4 x 4 Transformation Matrix. IEEE Trans. on Power Electronics. Vol. 16, No. 5, September 2001, pp. 694 – 701.
- [2] Zhang, R. - Prasad, W. H. - Boroyewich, D.: Three-Dimensional Space Vector Modulation for Four-Leg Voltage Source Converters. IEEE Trans. on Power Electronics. Vol. 17, No. 3, pp. 314-326, May 2002.
- [3] Perales, M. A. - Prats, M. M. - Portillo, Ramón - Mora, José L. - León, José I. - Franquelo, Leopoldo G.: Three-Dimensional Space Vector Modulation in abc Coordinates for Four-Leg Voltage Source Converters. IEEE Power Electronics Letters. Vol.1, No.4, pp. 104-109, December 2003.
- [4] Kim, J.H. - Sul, S.K.: A Carrier-Based PWM Method for Three-Phase Four-Leg Voltage Source Inverters. IEEE Trans. on Power Electronics. Vol.19. No.1.pp. 66-75. January 2004.
- [5] Zhang, R.: High Performance Power Converter Systems for Nonlinear and Unbalanced Load/Source. [Dissertation] Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, Virginia, USA, 1998.

Tento článek vznikl s podporou projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0094: Regionální inovační centrum elektrotechniky (RICE) a grantového projektu GA ČR 102/09/1164.