

2013

Pracoviště: Regionální inovační centrum elektrotechniky

Výzkumná zpráva č.: 22190 - 040 - 2013

Studie metod vektorové modulace vhodné pro obvody FPGA

Druh úkolu:	Vědecko-výzkumný			
Řešitelé:	Ing. Dušan Janík, Ing. Tomáš Glasberger, Ing. Petr Kamenický			
Vedoucí úkolu:	Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.			
Počet stran:	28			
Datum vydání:	listopad 2013			
Revize:	1			
Práce vznik	da s podporou projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0094 a s podporou TAČR v rámci projektu TA01010863.			

Anotace

Tato výzkumná zpráva se zabývá ověřením funkčnosti dvou vybraných metod vektorové modulace představující alternativu ke klasickým modulačním technikám založených na pulsně šířkové modulaci (PWM), které jsou použitelné pro implementaci v programovatelných logických obvodech (FPGA).

Seznam symbolů a zkratek

PWM

CORDIC

Pulse Wide Modulation

COordinate Rotation DIgital Computer

Obsah

1	ÚVOD	4
2	OBECNÝ PRINCIP VEKTOROVÉHO MODULÁTORU	5
3	KLASICKÁ VARIANTA VEKTOROVÉHO MODULÁTORU	6
4	VÝPOČETNĚ NENÁROČNÁ VARIANTA VEKTOROVÉHO MODULÁTORU	. 10
5	SIMULACE	. 14
	5.1 Klasická varianta	. 14
	5.2 Výpočetně nenáročná varianta	. 19
6	ZÁVĚR	. 25

1 Úvod

Algoritmy pro řízení vícehladinových měničů v současnosti využívají převážně modulace založené na pulsně šířkové modulaci (PWM). Cílem této zprávy je ověřit simulací funkčnost alternativních modulátorů založených na teorii prostorového vektoru. Pro simulace byly vybrány dvě varianty modulátorů. První varianta pro svou správnou činnost vyžaduje identifikaci polohy vstupního modulačního vektoru. Identifikace polohy vektoru sebou nese určitou výpočetně náročnou část a to v podobě výpočtu hodnot goniometrických funkcí sinus a cosinus v obvodu FPGA. Výpočet goniometrických funkcí vyžaduje implementaci některé z aproximačních metod v pevné řádové čárce. Příkladem těchto metod jsou tabulkové metody nebo algoritmus CORDIC. Druhá varianta oproti tomu identifikaci polohy nevyžaduje. Druhá varianta tedy vede na velmi nízké výpočetní nároky a to je velice výhodné pro samotnou implementaci v obvodu FPGA. Druhým cílem této zprávy je ověřit univerzálnost vektorového modulátoru pro řízení vícehladinových měničů různých topologií.

2 Obecný princip vektorového modulátoru

Vstupem modulátoru je velikost a úhel natočení požadovaného vektoru generovaného řídícím algoritmem. Pro výběr vhodné spínací kombinace je potřeba určit pozici tohoto vektoru v oblasti šestiúhelníku vepsaného do normované jednotkové kružnice. Šestiúhelník svojí strukturou vytváří 6 sektorů a kružnice pak 4 kvadranty, jak je uvedeno na ilustračním Obr. 1.



Obr. 1 Rozdělení sektorů a kvadrantů

V závislosti na počtu úrovní měniče se mění počet vnitřních trojúhelníkových oblastí v jednotlivých sektorech. Pro 2-úrovňový měnič je 6 trojúhelníkových oblastí shodných se sektory. Pro 3-úrovňový měnič je 24 trojúhelníkových oblastí, jeden sektor tedy tvoří 4 oblasti. Pro 4-úrovňový měnič je 54 trojúhelníkových oblastí, jeden sektor je tedy tvořen 9 oblastmi. Jak je ukázáno na Obr. 2. Každé z těchto trojúhelníkových oblastí přísluší tři vektory (spínací kombinace měniče), volbou času sepnutí těchto vektorů vznikne výsledný vektor spadající do této oblasti. Používané metody pro vektorové modulátory se liší pouze v algoritmech určujícím trojúhelníkovou oblast a ve výpočtu času sepnutí jednotlivých vektorů.



Obr. 2: Struktura trojúhelníkových oblastí pro 2,3 a 4-úrovňové měniče

3 Klasická varianta vektorového modulátoru

Varianta popsaná v knize [1] slouží k ovládání 2-úrovňového měniče. Struktura pro tento měnič má tedy 6 trojúhelníkových oblastí, jak bylo uvedeno výše. Oblasti jsou ohraničeny šesti vektory *V1* až *V6*, které odpovídají šesti kombinacím sepnutí měniče. Kromě vektorů *V1* až *V6* se využívají i zbylé dva vektory *V0* a *V7*, které vytváří nulový vektor. Rozmístění sektorů a spínacích vektorů je uvedeno na Obr. 3.



Obr. 3: Spínací vektory pro 2-úrovnový měnič

Spínací kombinace jednotlivých vektorů jsou uvedeny v následující tabulce Tab. 1.

Tab. 1: Spínací kombinace vektorů V0 až V7

	<i>V0</i>	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7
U	0	1	1	0	0	0	1	1
V	0	0	1	1	1	0	0	1
W	0	0	0	0	1	1	1	1

Jak už bylo zmíněno výše, velikost a pozice výsledného vektoru V_s v dané trojúhelníkové oblasti je dána dobou sepnutí dvou vektorů ohraničující tuto oblast. Pokud budeme uvažovat oblast *S1* pak výsledný vektor V_s je určen nulovými vektory (*V0,V7*) a vektory V_r a V_l , respektive nulovými vektory (*V0,V7*), vektory *V1* a *V2* a odpovídající dobou sepnutí T_r a T_l . Jak je přiblíženo vztahem (1) a na Obr. 4, které jsou uvedeny níže.

$$V_{s} = V_{r} + V_{l} + V_{0}(nebo V_{7}) = \frac{T_{r}}{T}V_{1} + \frac{T_{l}}{T}V_{2} + \frac{T - (T_{r} + T_{l})}{T}V_{0}(nebo V_{7})$$
(1)



Obr. 4: Tvorba výsledného vektoru V_s v sektoru S1

Vztahy pro výpočet velikosti vektorů V_r a V_l v jednotlivých sektorech a kvadrantech jsou uvedeny v tabulce Tab. 2.

		$ V_r $	$ V_l $
S1	Q1	$ V_{s\alpha} - \frac{1}{\sqrt{3}} V_{s\beta} $	$\frac{2}{\sqrt{3}} V_{s\beta} $
52	Q1	$ V_{s\alpha} + \frac{1}{\sqrt{3}} V_{s\beta} $	$- V_{s\alpha} + \frac{1}{\sqrt{3}} V_{s\beta} $
52	Q2	$- V_{s\alpha} +\frac{1}{\sqrt{3}} V_{s\beta} $	$ V_{s\alpha} + \frac{1}{\sqrt{3}} V_{s\beta} $
S 3	Q2	$\frac{2}{\sqrt{3}} V_{s\beta} $	$ V_{s\alpha} - \frac{1}{\sqrt{3}} V_{s\beta} $
S4	Q3	$ V_{s\alpha} - \frac{1}{\sqrt{3}} V_{s\beta} $	$\frac{2}{\sqrt{3}} V_{s\beta} $
C.L.	Q3	$ V_{s\alpha} + \frac{1}{\sqrt{3}} V_{s\beta} $	$- V_{s\alpha} + \frac{1}{\sqrt{3}} V_{s\beta} $
35	Q4	$- V_{s\alpha} + \frac{1}{\sqrt{3}} V_{s\beta} $	$ V_{s\alpha} + \frac{1}{\sqrt{3}} V_{s\beta} $
S6	Q4	$\frac{2}{\sqrt{3}} V_{s\beta} $	$ V_{s\alpha} - \frac{1}{\sqrt{3}} V_{s\beta} $

Tab. 2: Vztahy pro výpočet velikost vektorů Vr a V1

Kde hodnoty $V_{S\alpha}$ a $V_{S\beta}$ jsou dány vztahy (2) a (3):

$$|V_{s\alpha}| = |V_s| \cos \theta$$

$$|V_{s\beta}| = |V_s| \sin \theta$$
(2)
(3)

Výpočet doby sepnutí T_r a T_l je dán vztahy (4) a (5), doba sepnutí nulového vektoru je dána vztahem (6):

$$T_r = T \frac{|V_r|}{|V_s|_{max}} \tag{4}$$

$$T_l = T \frac{|V_l|}{|V_s|_{max}} \tag{5}$$

$$T_n = T - (T_r + T_l) \tag{6}$$

kde *T* je perioda spínání a hodnota $|V_s|_{max}$ je dána vztahem (7):

$$|V_s|_{max} = |V_1| = |V_2| = \dots = |V_6| = \frac{2}{3} U_{DC}$$
⁽⁷⁾

kde U_{DC} je stejnosměrné napětí v meziobvodu 2-úrovňového měniče.

Strategie spínání jednotlivých vektorů je přiblížena na Obr. 5.

000	100	110	111	110	100	000	100
	V1	V2	V7	V2	V1	VO	
	T, /2	T ₁ /2	¯ Τ _□ /2 〔	T, /2	T, /2	¯¯ Γ _□ /2 〔	
		T/2	,		T/2	,	

Obr. 5: Spínací sekvence pro sektor S1

Obdobným způsobem jsou definovány i zbylé sektory *S2* až *S6,* jak je podrobně uvedeno v knize [1].

4 Výpočetně nenáročná varianta vektorového modulátoru

Varianta vektorového modulátoru popsaná v článku [2] má velice malé nároky na výpočetní zdroje a je velice snadno implementovatelná. Lze ji použít pro libovolnou topologii víceúrovňového třífázového měniče. Na Obr. 6 je uveden příklad struktury trojúhelníkových oblastí pro 2, 3 a 4 hladinovou variantu vektorového modulátoru.



Obr. 6: Struktura trojúhelníkových oblastí pro 2, 3 a 4 hladinový vektorový modulátor

Obecný prostorový vektor $v_0(x_0, y_0)$ lze složit kombinací tří vektorů $v_1(x_1, y_1)$, $v_2(x_2, y_2)$ a $v_3(x_3, y_3)$. Jak je podrobněji popsáno na Obr. 7 a rovnicemi (8) a (9). Samotné odvození rovnic je podrobněji popsáno v [2].



Obr. 7: *Složení prostorového vektoru* v₀

$$v_0 = d_{0-23}v_1 + d_{0-31}v_2 + d_{0-12}v_3 \tag{8}$$

$$d_{0-23} + d_{0-31} + d_{0-12} = 1 \tag{9}$$

Čas sepnutí $(d_{0-23}, d_{0-31}, d_{0-12})$ jednotlivých vektorů (v_1, v_2, v_3) odpovídá poměru vnitřních trojúhelníků vytvořených vektorem v_0 a vnějšího trojúhelníku vytvořeného vektory v_1 , v_2 a v_3 .

Vstupem algoritmu jsou tři prostorové vektory v_{UV} , v_{VW} a v_{WU} , které definující vektor $v_0(x_0, y_0)$ v nerotujícím souřadnicovém tří-fázovém (U, V, W) systému UV - VW - WU, viz. Obr. 8.



Obr. 8: Souřadnicový systém UV – VW – WU

$$v_{UV} = x_0 \tag{10}$$

$$v_{VW} = -0.5x_0 + \frac{\sqrt{3}}{2}y_0 \tag{11}$$

$$v_{WU} = -0.5x_0 - \frac{\sqrt{3}}{2}y_0 \tag{12}$$

 $v_{UV} + v_{VW} + v_{WU} = 0 \tag{13}$

Identifikace trojúhelníkové oblasti, do které se promítne vektor v_0 , spočívá ve výpočtu dvou funkcí *floor* a *ceil*. Funkce *floor(x)* najde nebližší nižší celé číslo od čísla *x*. Funkce *ceil(x)* najde nebližší vyšší celé číslo od čísla *x*.

$$f_{UV} = floor(V_{UV}), c_{UV} = ceil(V_{UV})$$
(14)

$$f_{VW} = floor(V_{VW}), c_{VW} = ceil(V_{VW})$$
(15)

$$f_{WU} = floor(V_{WU}), c_{WU} = ceil(V_{WU})$$
(16)

V závislosti na výsledku součtu tří funkcí *floor* se vybere jedna ze dvou možných trojúhelníkových oblastí, která je ohraničená třemi vektory. Tyto vektory jsou pojmenovány jako v_{p1p2p3} , kde indexy p_1 , p_2 a p_3 jsou tvořeny přímo výsledkem příslušných funkcí *floor* a *ceil*. Doba sepnutí d_{p1p2p3} , kde indexy p_1 , p_2 a p_3 jsou rovněž tvořeny přímo výsledkem příslušných funkcí *floor* a *ceil*, je dána rozdílem dvou hodnot. Výběr oblastí a výpočet časů sepnutí je uveden v Tab. 3 a na ilustračním Obr. 9.

$f_{UV} + f_{VW} + f_{WU} = -1$	$f_{UV} + f_{VW} + f_{WU} \neq -1$
$v_{f_{UV}f_{VW}c_{WU}}, d_{f_{UV}f_{VW}c_{WU}} = v_{WU} - f_{WU}$	$v_{f_{UV}c_{VW}c_{WU}}, d_{f_{UV}c_{VW}c_{WU}} = c_{UV} - v_{UV}$
$v_{c_{UV}fc_{VW}f_{WU}}, d_{c_{UV}f_{VW}f_{WU}} = v_{UV} - f_{UV}$	$v_{c_{UV}c_{VW}f_{WU}}, d_{c_{UV}c_{VW}f_{WU}} = c_{WU} - v_{WU}$
$v_{f_{UV}c_{VW}f_{WU}}, d_{f_{UV}c_{VW}f_{WU}} = v_{VW} - f_{VW}$	$v_{c_{UV}f_{VW}c_{WU}}, d_{c_{UV}f_{VW}c_{WU}} = c_{VW} - v_{VW}$

Tab. 3: Výběr trojúhelníkových oblastí a výpočet časů sepnutí vektorů



Obr. 9: Výběr trojúhelníkových oblastí a výpočet časů sepnutí vektorů

Posledním krokem algoritmu modulátoru je ztotožnění vybraných vektorů definujících trojúhelníkovou oblast s reálnou spínací kombinací měniče. Ztotožnění pro dvouúrovňový měnič je uveden v následující tabulce Tab. 4.

Označení vektorů v modulátoru	Reálná spínací kombinace měniče
000	000
1 0 -1	100
0 1 -1	1 1 0
-1 1 0	0 1 0
-1 0 1	011
0 -1 1	001
1 -1 0	101

Tab. 4: Ztotožnění vybraných vektorů s reálnou spínací kombinací pro dvouúrovňový modulátor

5 Simulace

Simulace byly vytvořeny v programu Plecs a Matlab Simulink. Bylo simulováno chování jak klasické varianty tak výpočetně nenáročná varianty vektorového modulátoru pro řízení dvouúrovňového modulátoru a tří úrovňového modulátoru s upínacími diodami včetně balancování napětí v stejnosměrném meziobvodu.

5.1 Klasická varianta

Výsledky simulace pro dvouúrovňový měnič, průběh fázových proudů Obr. 10, průběh fázových napění Obr. 11 a průběh sdruženého napětí měniče Obr. 12.



Obr. 10: Průběh fázových proudů dvouúrovňového měniče, klasická metoda



Obr. 11: Průběh fázových napětí dvouúrovňového měniče, klasická metoda



Obr. 12: Průběh sdruženého napětí dvouúrovňového měniče, klasická metoda

Výsledky simulace pro tříúrovňový měnič s upínacími diodami bez balancování napětí na kondenzátorech v stejnosměrném obvodu, průběh fázových proudů Obr. 13, průběh fázových napění měniče Obr. 14 a průběh fázových napětí zátěže Obr. 15.



Obr. 13: Průběh fázových proudů tříúrovňového měniče s upínacími diodami bez balancování napětí na kondenzátorech, klasická metoda



Obr. 14: Průběh fázových napětí tříúrovňového měniče s upínacími diodami bez balancování napětí na kondenzátorech, klasická metoda



Obr. 15: Průběh fázových napětí zátěže u tříúrovňového měniče s upínacími diodami bez balancování napětí na kondenzátorech, klasická metoda

Výsledky simulace pro tříúrovňový měnič s balancováním napětí na kondenzátorech, průběh fázových proudů Obr. 16, průběh fázových napění Obr. 17, průběh fázových napětí zátěže Obr. 18 a průběh zvlnění napětí na kondenzátorech Obr. 19.



Obr. 16: Průběh fázových proudů tříúrovňového měniče s upínacími diodami s balancováním napětí na kondenzátorech, klasická metoda



Obr. 17: Průběh fázových napětí tříúrovňového měniče s upínacími diodami s balancováním napětí na kondenzátorech, klasická metoda



Obr. 18: Průběh fázových napětí zátěže u tříúrovňového měniče s upínacími diodami s balancováním napětí na kondenzátorech, klasická metoda



Obr. 19: Průběh zvlnění napětí na kondenzátorech, klasická metoda

5.2 Výpočetně nenáročná varianta

Výsledky simulace pro dvouúrovňový měnič, průběh fázových proudů Obr. 20, průběh fázových napění Obr. 21 a průběh sdruženého napětí měniče Obr. 22.



Obr. 20: Průběh fázových proudů dvouúrovňového měniče, výpočetně nenáročná metoda



Obr. 21: Průběh fázových napětí dvouúrovňového měniče, výpočetně nenáročná metoda



Obr. 22: Průběh sdruženého napětí dvouúrovňového měniče, výpočetně nenáročná metoda

Výsledky simulace pro tříúrovňový měnič, průběh fázových proudů Obr. 23, průběh fázových napění Obr. 24 a průběh sdruženého napětí měniče Obr. 25.



Obr. 23: Průběh fázových proudů tříúrovňového měniče s upínacími diodami bez balancování napětí na kondenzátorech, výpočetně nenáročná metoda



Obr. 24: Průběh fázových napětí tříúrovňového měniče s upínacími diodami bez balancování napětí na kondenzátorech, výpočetně nenáročná metoda



Obr. 25: Průběh fázových napětí zátěže u tříúrovňového měniče s upínacími diodami bez balancování napětí na kondenzátorech, výpočetně nenáročná metoda

Výsledky simulace pro tříúrovňový měnič s balancováním napětí na kondenzátorech, průběh fázových proudů Obr. 26, průběh fázových napění střídače Obr. 27, průběh fázového napětí zátěže Obr. 28 a rozvážení kondenzátorů Obr. 29.



Obr. 26: Průběh fázových proudů tříúrovňového měniče s upínacími diodami s balancováním napětí na kondenzátorech, výpočetně nenáročná metoda



Obr. 27: Průběh fázových napětí tříúrovňového měniče s upínacími diodami s balancováním napětí na kondenzátorech, výpočetně nenáročná metoda



Obr. 28: Průběh fázových napětí zátěže u tříúrovňového měniče s upínacími diodami s balancováním napětí na kondenzátorech, výpočetně nenáročná metoda



Obr. 29: Průběh zvlnění napětí na kondenzátorech, výpočetně nenáročná metoda

6 Závěr

Jak klasická varianta tak výpočetně nenáročná varianta vektorového modulátoru byla odsimulována v součinnosti s totožnými modely měniče. Obě varianty jsou funkční a použitelné pro řízení vícehladinových měničů různých topologií. Hlavním přínosem výpočetně nenáročné varianty, že podstatně snižuje náročnost identifikace trojúhelníkové oblasti, ve které se nachází požadovaný výsledný vektor, výpočtu času sepnutí a samotné implementace do jednotky FPGA (odpadá nutnost implementace výpočtu goniometrických funkcí sinus a cosinus). Tento přínos se projeví v okamžiku návrhu řízení s vektorovým modulátorem pro 4 a více hladinové měniče.

Literatura

- [1] N. Quang a J. Dittrich, Vector Control of Three-Phase AC Machines, Berlin: Springer, 2008.
- [2] D. Peng, F. Lee a D. Boroyevich, "A novel SVM algorithm for multilevel three-phase converters," v *Power Electronics Specialists Conference*, Annual, 2002.

Seznam obrázků

Obr. 1 Rozdělení sektorů a kvadrantů5
Obr. 2: Struktura trojúhelníkových oblastí pro 2,3 a 4-úrovňové měniče6
Obr. 3: Spínací vektory pro 2-úrovnový měnič7
Obr. 4: Tvorba výsledného vektoru V _s v sektoru S18
Obr. 5: Spínací sekvence pro sektor S19
Obr. 6: Struktura trojúhelníkových oblastí pro 2, 3 a 4 hladinový vektorový modulátor 10
Obr. 7: Složení prostorového vektoru v $_0$ 11
Obr. 8: Souřadnicový systém UV – VW – WU11
Obr. 9: Výběr trojúhelníkových oblastí a výpočet časů sepnutí vektorů
Obr. 10: Průběh fázových proudů dvouúrovňového měniče, klasická metoda
Obr. 11: Průběh fázových napětí dvouúrovňového měniče, klasická metoda
Obr. 12: Průběh sdruženého napětí dvouúrovňového měniče, klasická metoda
Obr. 13: Průběh fázových proudů tříúrovňového měniče s upínacími diodami bez balancování
napětí na kondenzátorech, klasická metoda16
Obr. 14: Průběh fázových napětí tříúrovňového měniče s upínacími diodami bez balancování
napětí na kondenzátorech, klasická metoda16
Obr. 15: Průběh fázových napětí zátěže u tříúrovňového měniče s upínacími diodami bez
balancování napětí na kondenzátorech, klasická metoda
Obr. 16: Průběh fázových proudů tříúrovňového měniče s upínacími diodami s balancováním
napětí na kondenzátorech, klasická metoda17
Obr. 17: Průběh fázových napětí tříúrovňového měniče s upínacími diodami s balancováním
napětí na kondenzátorech, klasická metoda18
Obr. 18: Průběh fázových napětí zátěže u tříúrovňového měniče s upínacími diodami s
balancováním napětí na kondenzátorech, klasická metoda
Obr. 19: Průběh zvlnění napětí na kondenzátorech, klasická metoda 19
Obr. 20: Průběh fázových proudů dvouúrovňového měniče, výpočetně nenáročná metoda 19
Obr. 21: Průběh fázových napětí dvouúrovňového měniče, výpočetně nenáročná metoda 20
Obr. 22: Průběh sdruženého napětí dvouúrovňového měniče, výpočetně nenáročná metoda

Obr. 23: Průběh fázových proudů tříúrovňového měniče s upínacími diodami bez balancování
napětí na kondenzátorech, výpočetně nenáročná metoda
Obr. 24: Průběh fázových napětí tříúrovňového měniče s upínacími diodami bez balancování
napětí na kondenzátorech, výpočetně nenáročná metoda
Obr. 25: Průběh fázových napětí zátěže u tříúrovňového měniče s upínacími diodami bez
balancování napětí na kondenzátorech, výpočetně nenáročná metoda
Obr. 26: Průběh fázových proudů tříúrovňového měniče s upínacími diodami s balancováním
napětí na kondenzátorech, výpočetně nenáročná metoda
Obr. 27: Průběh fázových napětí tříúrovňového měniče s upínacími diodami s balancováním
napětí na kondenzátorech, výpočetně nenáročná metoda
Obr. 28: Průběh fázových napětí zátěže u tříúrovňového měniče s upínacími diodami s
balancováním napětí na kondenzátorech, výpočetně nenáročná metoda
Obr. 29: Průběh zvlnění napětí na kondenzátorech, výpočetně nenáročná metoda

Seznam tabulek

Tab. 1: 9	Spínací komb	inace vektoi	rů V0 až V	7			•••••	7
Tab. 2: \	Γab. 2: Vztahy pro výpočet velikost vektorů V _r a V _I 8							
Tab. 3: \	/ýběr trojúhe	elníkových o	blastí a vý	/počet časů	ů sepnutí	vektorů		12
Tab. 4:	Ztotožnění	vybraných	vektorů	s reálnou	spínací	kombinací	pro	dvouúrovňový
	modulátor							13

Historie revizí

Pov	Kanitola	Ponic změny	Datum
Rev.	карісоїа	Popis zmeny	Jméno / Odd.
1	Všechny	Publikování dokumentu	13.11.2013
			Janík / KEV