



**FAKULTA
ELEKTROTECHNICKÁ
ZÁPADOČESKÉ
UNIVERZITY
V PLZNI**

2012

Pracoviště: Regionální inovační centrum elektrotechniky,
Fakulta elektrotechnická

Výzkumná zpráva č.: 22190 - 059 - 2012

Implementace algoritmů řízení tříúrovňového měniče s upínacími diodami

Druh úkolu: Výzkumný

Řešitelé: Ing. Petr Kamenický, Ing. Tomáš Glasberger, Ph.D.

Vedoucí úkolu: prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.

Počet stran: 21

Datum: srpen 2012

Revize: 1

Tato výzkumná zpráva vznikla s podporou projektu TA01010863

Anotace

Tato výzkumná zpráva se zabývá popisem algoritmů vektorové modulace pro tříúrovňový měnič s upínacími diodami, a jejich implementací do digitálního signálového procesoru. Pro implementaci byl zvolen DSP firmy Texas Instruments TMS320F28335. Zpráva navazuje na výzkumnou zprávu [1].

Seznam symbolů a zkratek

NPC	tříúrovňový měnič s upínacími diodami
PWM	pulzně šířková modulace
SVPWM	vektorová pulzně šířková modulace
DSP	digitální signálový procesor
C1, C2	"horní" a "dolní" kondenzátor ss. obvodu měniče NPC
U_{C1}, U_{C2}	napětí kondenzátorů ss. obvodu měniče NPC
U_d	celkové napětí ss. obvodu měniče NPC
m	velikost referenčního vektoru
T_S	perioda modulace

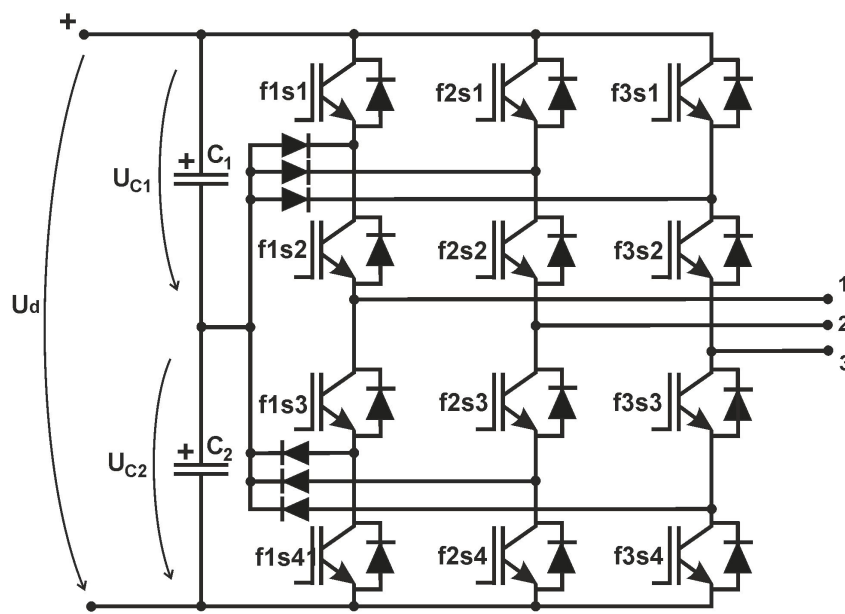
Obsah

1 Popis obvodu měniče NPC	4
2 Popis a implementace modulátoru pro měnič NPC	5
2.0.1 Hlavní funkce modulátoru v jazyce C	6
2.1 Určení sektoru a oblasti	6
2.1.1 Funkce určení sektoru a oblasti v jazyce C	8
2.2 Výpočet časů	9
2.2.1 Funkce výpočtu časů v jazyce C	9
2.2.2 Výpočet časů v oblasti 1	9
2.2.3 Výpočet časů v oblasti 2	10
2.2.4 Výpočet časů v oblasti 3	10
2.2.5 Výpočet časů v oblasti 4	10
2.3 Rekonstrukce referenčního vektoru	10
2.3.1 Funkce výpočtu komparačních časů pro tranzistory v jazyce C	10
2.3.2 Rekonstrukce referenčního vektoru v oblasti 1	11
2.3.3 Rekonstrukce referenčního vektoru v oblasti 2	14
2.3.4 Rekonstrukce referenčního vektoru v oblasti 3	15
2.3.5 Rekonstrukce referenčního vektoru v oblasti 4	16
3 Experimentální ověření algoritmu	17
4 Závěr	18
Literatura	19

1 Popis obvodu měniče NPC

Topologie tříúrovňového střídače s upínacími diodami vznikla úpravou topologie klasického střídače, ve které je použitím tzv. upínacích diod umožněno sériové spojení vypínatelných součástek, ve kterém je omezeno maximální napětí na jednotlivých součástkách.

Na obrázku 1 je schéma třífázového tříúrovňového měniče s upínacími diodami. Pro funkci

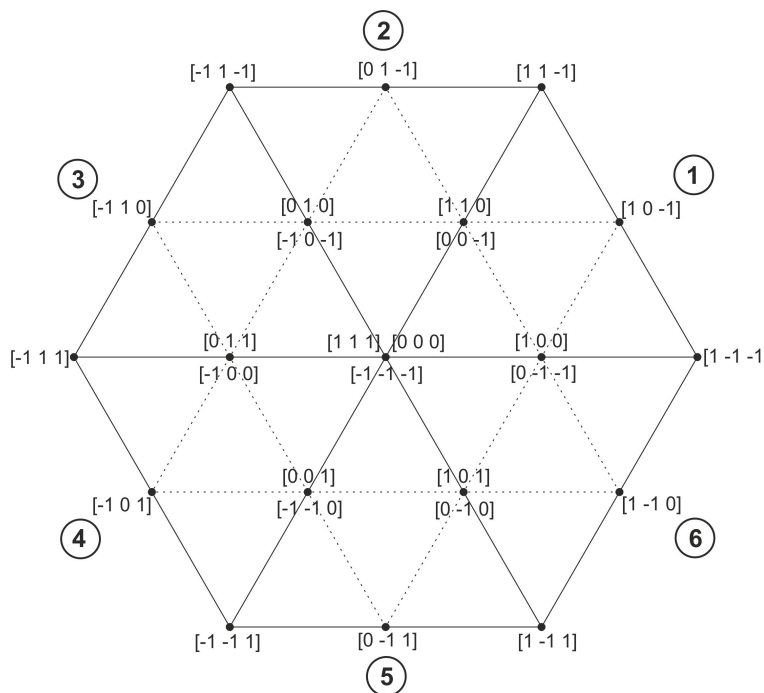


Obr. 1: Tříúrovňový měnič s upínacími diodami

měníče jsou nezbytné dva kondenzátory (C_1 , C_2), které dělí napětí na ss. straně měniče na polovinu. Dále jsou nezbytné diody, které *upínají* místa mezi sériově spojenými prvky v každé větvi k tzv. nulovému bodu mezi vstupními kondenzátory. Tím omezují maximální napětí na každém spínači právě na polovinu vstupního napětí.

2 Popis a implementace modulátoru pro měnič NPC

Navrhovaný modulátor je variantou SVPWM. Při SVPWM je požadovaný prostorový vektor napětí rekonstruován pomocí dostupných napěťových vektorů, které jsou dané spínacími kombinacemi všech fází měniče. U měniče NPC máme k dispozici 27 spínacích kombinací. 24 kombinací reprezentuje nenulový prostorový vektor a tři reprezentují nulový vektor. Všechny dostupné spínací kombinace a jim odpovídající vektory napětí jsou na obrázku 2.



Obr. 2: Realizovatelné napěťové vektory a spínací kombinace

Obrázek je rozdělen na šest sektorů (zakroužkovaná čísla) a každý sektor dále na čtyři oblasti, v nichž se může požadovaný prostorový vektor napětí nacházet. Velikost napěťových vektorů na vrcholech vnějšího šestiúhelníku je $\frac{2}{3}U_d$. Spínací kombinace jsou vyjádřeny vždy trojicí čísel, např. kombinace $[1 -1 0]$ znamená, že v první fázi měniče jsou sepnuty součástky $f1s1$ a $f1s2$ (fázové napětí měniče rovno U_{C1}), ve druhé fázi jsou sepnuty součástky $f2s3$ a $f2s4$ (fázové napětí měniče rovno $-U_{C2}$) a ve třetí fázi jsou sepnuty součástky $f3s2$ a $f3s3$ (fázové napětí měniče rovno 0).

Z obrázku je zřejmé, že požadovaný napěťový vektor se vždy nachází v oblasti ohraničené třemi realizovatelnými napěťovými vektory. Z požadovaného vektoru se vypočítá doba, po kterou má každý z realizovatelných vektorů v průběhu periody modulace působit, aby byl požadovaný vektor zrekonstruován. V průběhu periody modulace se pak realizovatelné napěťové vektory postupně vystřídají.

Z obrázku je dále patrné, že některé realizovatelné vektory lze vytvořit více spínacími kombinacemi. Dvojic spínacích kombinací vektorů na vrcholech vnitřního šestiúhelníku lze využít

k balancování napětí na vstupních kondenzátorech. Jedna z dvojice kombinací vždy dobíjí kondenzátor C1 na úkor kondenzátoru C2 proudem jedné z fází zátěže a druhá naopak. Je tedy nutné znát napětí na kondenzátorech a proudy fází měniče.

Modulátor je navržen tak, že referenční napěťový vektor je rekonstruován pomocí všech realizovatelných vektorů a spínacích kombinací, které vymezují oblast, ve které se referenční vektor nachází. Modulátor díky tomu umožňuje rovnoměrnější rozložení ztrát na výkonových součástkách. Modulátor se také stará o balancování napětí na kondenzátorech C1 a C2.

2.0.1 Hlavní funkce modulátoru v jazyce C

Modulátor je implementován do DSP TMS320F28335, který pracuje ve formátu plovoucí řádové čárky. Odpadá tedy nutnost normování veličin. Definice funkce, která provádí modulaci je:

```
void npc_svpwm(float vel, float beta);
```

Parametry funkce jsou velikost a úhel referenčního vektoru napětí.

- vel - v intervalu $\langle 0; 1 \rangle$. Pokud je zadaná velikost větší než 1, je změněna na 1. Obdobně když je velikost menší než 0, je změněna na 0.
- beta - v radiánech v intervalu $\langle -2\pi; 2\pi \rangle$. Není ošetřen proti hodnotám mimo interval (nutno ošetřit při volání funkce).

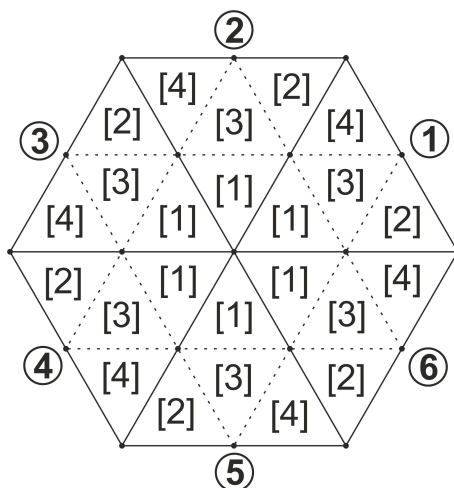
Uvnitř funkce je dále využíván pointer na adresu prvního prvku globálního pětiprvkového pole změřených proudů jednotlivých fází měniče a napětí na kondenzátorech C1 a C2. Poslední využívanou globální proměnnou je poměrná hodnota, která udává jaká část času, určeného pro spínací kombinace na vrcholech vnitřního šestiúhelníku z obr. 2, připadne na vyvažování napětí na kondenzátorech měniče.

- mereni[5] - pole naměřených hodnot $[i_a, i_b, i_c, U_{c1}, U_{c2}]$.
Pointer `p_mereni = &mereni[0];`
- delsi - v intervalu $\langle 0, 5; 1 \rangle$.

Uvnitř hlavní funkce modulátoru jsou volány tři funkce, které odpovídají jednotlivým krokům algoritmu. Ty budou popsány v následujících odstavcích. Dále je v hlavní funkci modulátoru prováděn pouze zápis do komparačních registrů DSP.

2.1 Určení sektoru a oblasti

Algoritmus modulátoru je prováděn ve třech krocích. V prvním kroku je vypočítán sektor a konkrétní oblast sektoru, ve které se nachází referenční napěťový vektor. Označení sektorů a oblastí v nich je na obrázku 3.



Obr. 3: Sektory a oblasti

Sektory jsou označeny čísly v kroužku a oblasti v sektorech jsou označeny čísly v hranatých závorkách.

Referenční vektor vstupuje do modulátoru ve tvaru velikost a úhel. Z úhlu referenčního vektoru je vypočten sektor. Je-li $0 \leq \text{úhel} < \pi/3$, nachází se vektor v sektoru 1, je-li $\pi/3 \leq \text{úhel} < 2\pi/3$, nachází se vektor v sektoru 2, atd.

Určení sektoru a úhlu uvnitř sektoru v jazyce C:

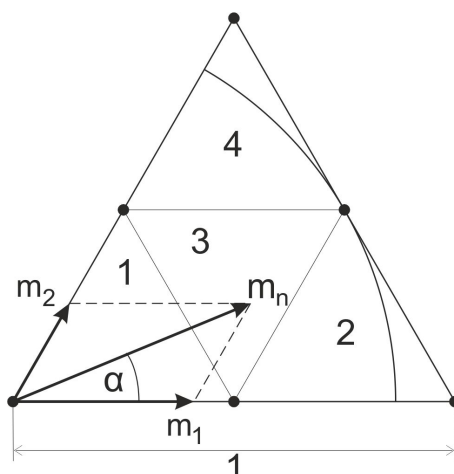
```
for (i = 0; i <= 4; i++)    // urceni sektoru 1 az 5
{
    if ((uhel >= ALFA_60*i) && (uhel < ALFA_60*(i+1)))
        sektor = i + 1;
}
if (uhel >= ALFA_60*5)      // urceni sektoru 6 je zvlast
    sektor = 6;

alfa = (uhel - ((sektor)-1) * ALFA_60); // uhel uvnitr sektoru
```

ALFA_60 je symbolická konstanta, jejíž hodnota je 60° v radiánech.

Dále už se budeme zabývat pouze sektorem 1, ve všech ostatních sektorech je postup obdobný.

Velikost referenčního vektoru (m) může nabývat hodnot $0 \leq m \leq 1$. Pokud je $m = 1$, odpovídá to maximálnímu možnému sinusovému výstupnímu napětí měniče. To je na obrázku 4 naznačeno částí kružnice, jejímž poloměrem je právě m , ovšem po normování. Z obrázku 4 je patrné, že pro potřeby určení oblasti, ve které se referenční vektor nachází, je potřeba velikost vektoru normovat. Je zřejmé, že pokud má strana rovnostranného trojúhelníku velikost 1, pak



Obr. 4: Určení oblasti v sektoru

má poloměr naznačené kružnice velikost $\sqrt{3}/2$. Normování je tedy provedeno podle následujícího vztahu.

$$m_n = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot m$$

Výpočet velikostí vektorů m_1 a m_2 je proveden tak jak je uvedeno v [2].

$$m_1 = m_n \cdot \left(\cos \alpha - \frac{\sin \alpha}{\sqrt{3}} \right) \quad (1)$$

$$m_2 = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot m_n \cdot \sin \alpha \quad (2)$$

Normování a výpočet velikostí vektorů m_1 a m_2 v jazyce C:

```
mn = ODM03_2 * velikost;    // normovani velikosti pro urceni oblasti
m1 = mn * ((cos_alfa) - (sin_alfa) * INVODM03);
m2 = 2 * INVODM03 * mn * (sin_alfa);
```

Oblast, ve které se referenční vektor nachází, je určena následovně. Vektor je v:

1. oblasti, pokud je $m_1 \leq 0,5$, $m_2 \leq 0,5$ a zároveň $m_1 + m_2 \leq 0,5$.

```
if ((m1 <= 0.5) && (m2 <= 0.5) && (m1+m2 <= 0.5))
    oblast = 1;
```

2. oblasti, pokud je $m_1 > 0,5$.

3. oblasti, pokud je $m_1 \leq 0,5$, $m_2 \leq 0,5$ a zároveň $m_1 + m_2 > 0,5$.

4. oblasti, pokud je $m_2 > 0,5$.

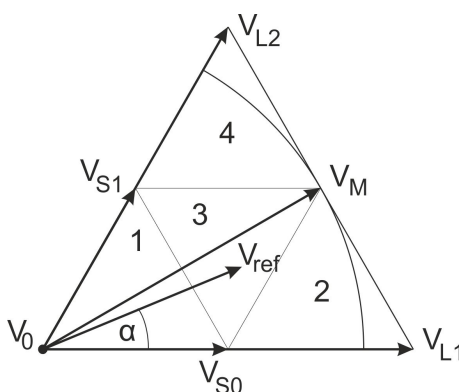
2.1.1 Funkce určení sektoru a oblasti v jazyce C

```
void sektor_oblast(float velikost, float uhel);
```

Parametry funkce jsou velikost a úhel referenčního vektoru napětí, viz odstavec 2.0.1.

2.2 Výpočet časů

Z obrázků je zřejmé, že referenční vektor je vždy v oblasti ohraničené třemi realizovatelnými vektory a těmi bude rekonstruován. Nyní, když známe oblast ve které se referenční vektor nachází, můžeme přistoupit k výpočtu časů, po které budou jednotlivé vektory aplikovány (viz. [3]). Vysvětlení pomůže obrázek 5, na kterém je náhodně vybraný referenční vektor v oblasti 3, ale můžeme si ho představit i jinde.



Obr. 5: Vektory ohraničující jednotlivé oblasti

2.2.1 Funkce výpočtu časů v jazyce C

```
void casovani(float velikost, float t[]);
```

Parametry funkce jsou velikost referenčního vektoru napětí a adresa pole o třech prvcích, do kterého jsou ve funkci uloženy části periody modulace ve formě poměrných hodnot, vypočtené pro jednotlivé realizovatelné vektory.

2.2.2 Výpočet časů v oblasti 1

Pokud se referenční vektor nachází v oblasti 1, je rekonstruován pomocí vektorů V_{S0} , V_{S1} a V_0 . Mezi tyto tři vektory se rozdělí čas jedné periody modulace (T_S) následovně.

$$T_{S0} = T_S \cdot m \cdot (\sqrt{3} \cdot \cos \alpha - \sin \alpha) \quad (3)$$

$$T_{S1} = T_S \cdot 2 \cdot m \cdot \sin \alpha \quad (4)$$

$$T_0 = T_S - (T_{S0} + T_{S1}) \quad (5)$$

V jazyce C (obdobně i pro zbylé oblasti.):

```

t[0] = velikost * (ODM03 * cos_alfa - sin_alfa);           // Ts0
t[1] = 2 * velikost * sin_alfa;                             // Ts1
t[2] = 1 - t[0] - t[1];                                     // T0

```

2.2.3 Výpočet časů v oblasti 2

Pokud se referenční vektor nachází v oblasti 2, je rekonstruován pomocí vektorů V_{S0} , V_{L1} a V_M . Mezi tyto tři vektory se rozdělí čas T_S následovně.

$$T_{S0} = T_S \cdot (2 - m \cdot (\sqrt{3} \cdot \cos \alpha + \sin \alpha)) \quad (6)$$

$$T_{L1} = T_S \cdot (-1 + m \cdot (\sqrt{3} \cdot \cos \alpha - \sin \alpha)) \quad (7)$$

$$T_M = T_S \cdot 2 \cdot m \cdot \sin \alpha \quad (8)$$

2.2.4 Výpočet časů v oblasti 3

Pokud se referenční vektor nachází v oblasti 3, je rekonstruován pomocí vektorů V_{S0} , V_M a V_{S1} . Mezi tyto tři vektory se rozdělí čas T_S následovně.

$$T_{S0} = T_S \cdot (1 - 2 \cdot m \cdot \sin \alpha) \quad (9)$$

$$T_M = T_S \cdot (-1 + m \cdot (\sqrt{3} \cdot \cos \alpha + \sin \alpha)) \quad (10)$$

$$T_{S1} = T_S \cdot (1 + m \cdot (-\sqrt{3} \cdot \cos \alpha + \sin \alpha)) \quad (11)$$

2.2.5 Výpočet časů v oblasti 4

Pokud se referenční vektor nachází v oblasti 4, je rekonstruován pomocí vektorů V_{S0} , V_{L1} a V_M . Mezi tyto tři vektory se rozdělí čas T_S následovně.

$$T_{S1} = T_S \cdot (2 - m \cdot (\sqrt{3} \cdot \cos \alpha + \sin \alpha)) \quad (12)$$

$$T_M = T_S \cdot (m \cdot (\sqrt{3} \cdot \cos \alpha - \sin \alpha)) \quad (13)$$

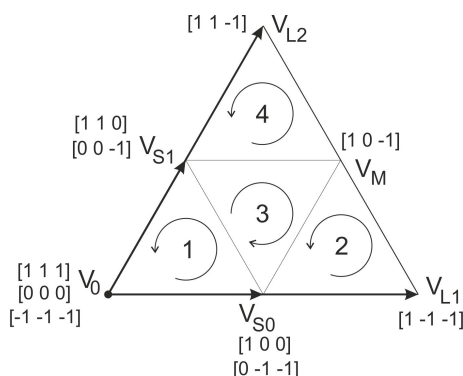
$$T_{L2} = T_S \cdot (-1 + 2 \cdot m \cdot \sin \alpha) \quad (14)$$

2.3 Rekonstrukce referenčního vektoru

Jak je rekonstruován referenční vektor v jednotlivých oblastech pomůže vysvětlit obrázek 6, na kterém jsou zobrazeny všechny spínací kombinace v prvním sektoru. Dále je na obrázku pro každou oblast směr, ve kterém se střídají spínací kombinace v první polovině periody modulace.

2.3.1 Funkce výpočtu komparačních časů pro tranzistory v jazyce C

```
void spinani(float t[], float i[], float Uc[], float delsi, float cmp[]);
```



Obr. 6: Spínací kombinace užívané v jednotlivých oblastech

Parametry funkce jsou: adresa pole o třech prvcích - výsledek funkce "casovani", adresa pole změřených proudů jednotlivých fází měniče, adresa pole napětí změřených na kondenzátorech měniče, poměrná hodnota ovlivňující balancování (viz odstavec 2.0.1) a adresa pole o šesti prvcích, do kterého jsou ve funkci uloženy komparační hodnoty pro jednotlivé tranzistory ve formě poměrných hodnot.

Na začátku funkce jsou nejprve zpracovány některé z parametrů:

```
kratsi = 1.0 - delsi;
if (i[0] >= 0)
    ia = 1;
else
    ia = 0;
if (Uc[0] >= Uc[1])
    uc = 1;
else
    uc = 0;
```

Obdobně jsou zpracovány i zbylé proudy měniče.

2.3.2 Rekonstrukce referenčního vektoru v oblasti 1

Z obrázku 6 je patrné, že pro rekonstrukci referenčního vektoru v oblasti 1 je k dispozici sedm spínacích kombinací. Tři spínací kombinace pro vektor V_0 a po dvou spínacích kombinacích pro vektory V_{S0} a V_{S1} .

Spínací kombinace náležící vektoru V_0 neovlivňují rozložení napětí na kondenzátorech ss. obvodu, takže se mezi ně čas určený pro tento vektor (T_0) rozdělí rovným dílem, na třetiny.

Spínací kombinace náležící vektoru V_{S0} však rozložení napětí na kondenzátorech ss. obvodu ovlivňují, a to proudem první fáze zátěže (i_a). Pokud je například aktivní kombinace $[1 \ 0 \ 0]$ a

proud i_a je kladný, napětí U_{C1} se zmenšuje a napětí U_{C2} se zvětšuje. Pro kombinaci $[0 -1 -1]$ jsou napětí kondenzátorů ovlivňována naopak. Je tedy zřejmé, že jedna spínací kombinace přispívá k vyvažování napětí na kondenzátorech a druhá naopak k rozvažování. Z toho důvodu se čas určený pro tento vektor (T_{S0}) rozdělí mezi tyto dvě spínací kombinace nerovnoměrně. Poměr rozdělení času může být různý. Osvědčilo se například rozdělení: dvě třetiny času případnou na kombinaci přispívající k vyvažování napětí a zbylá třetina na kombinaci druhou. (tomuto rozdělení odpovídá obrázek 7) Tím pádem se ve výsledku přispívá k vyvažování napětí na kondenzátorech C1 a C2. Výhodou využití obou spínacích kombinací je také skutečnost, že jsou díky tomu napětí na kondenzátorech udržována ve větší blízkosti rovnovážné polohy. Například když začneme vyvažovat z velké blízkosti rovnovážné polohy napětí kondenzátorů, tak díky tomu, že využíváme obě kombinace, rovnovážnou polohu "nepřestřelíme" tolik, jako kdybychom využívali pouze vyvažovací kombinaci.

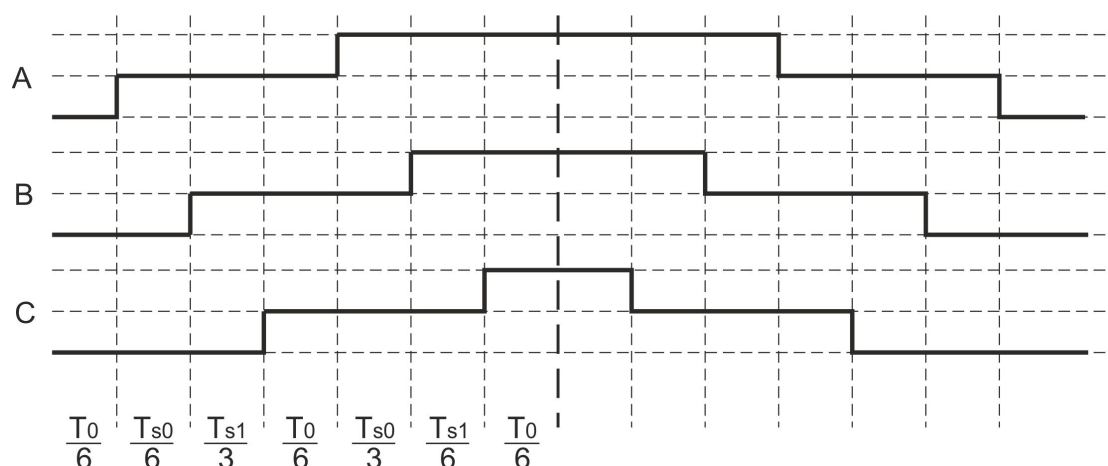
Spínací kombinace náležící vektoru V_{S1} rozložení napětí na kondenzátorech ss. obvodu také ovlivňují, a to proudem třetí fáze zátěže (i_c). Pokud je například aktivní kombinace $[1 1 0]$ a proud i_c je kladný, napětí U_{C1} se zvětšuje a napětí U_{C2} se zmenšuje. Pro kombinaci $[0 0 -1]$ jsou napětí kondenzátorů ovlivňována naopak. I mezi tyto kombinace se tedy čas určený pro tento vektor rozdělí nerovnoměrně. V tabulce 1 jsou uvedeny všechny možné kombinace poměrů napětí na kondenzátorech C1, C2 a velikostí proudů i_a a i_c . Spínací kombinace uvedené v tabulce jsou ty, kterým připadne větší část času určeného pro daný vektor.

	$U_{C1} > U_{C2}$	$U_{C1} < U_{C2}$
$i_a > 0$	$[1 0 0]$	$[0 -1 -1]$
$i_a < 0$	$[0 -1 -1]$	$[1 0 0]$
$i_c > 0$	$[0 0 -1]$	$[1 1 0]$
$i_c < 0$	$[1 1 0]$	$[0 0 -1]$

Tabulka 1: Spínací kombinace přispívající k vyvažování napětí - oblast 1

Rekonstrukce referenčního vektoru v oblasti 1 začíná spínací kombinací $[-1 -1 -1]$. Poté následuje kombinace $[0 -1 -1]$ atd. směrem, který je na obrázku 6. V polovině periody modulace se směr obrátí a kombinace se mění zpět až do stavu $[-1 -1 -1]$. Pokaždé se v kombinaci mění pouze jedna číslice. To je dodrženo i v ostatních oblastech. Na obrázku 7 jsou tyto změny zobrazeny v čase do poloviny periody modulace, a to pro situaci, kdy platí: $U_{C1} > U_{C2}$, $i_a > 0$ a $i_c > 0$. Druhá polovina periody může být zrcadlovým obrazem první poloviny, nebo se může změnit časování kombinací, které ovlivňují balancování napětí na kondenzátorech, pokud máme novou informaci o změně polarity některého z proudů, nebo napětí na kondenzátorech. To by odpovídalo vzorkování napětí na kondenzátorech a proudů měniče dvakrát za periodu modulace. I toto platí i pro všechny ostatní oblasti.

Výpočet komparačních hodnot pro jednotlivé tranzistory pro sektor 1 a oblast 1 vypadá násled-



Obr. 7: Spínací kombinace a jejich časování - oblast 1

dovně:

Nejprve jsou provedeny výpočty, které zajistí, že spínací kombinace, které přispívají k vyvažování napětí na kondenzátorech, budou aktivní "delsi" část času určeného daným realizovatelným vektorům. Spínací kombinace, které přispívají k rozvažování napětí pak budou aktivní "kratsi" část času.

```
if (ia == uc)                                // pro upravu casovani vyvazovacich vek.
    uprav0 = delsi;
else
    uprav0 = kratysi;
if (ic != uc)                                // pro upravu casovani vyvazovacich vek.
    uprav1 = delsi;
else
    uprav1 = kratysi;
```

Do proměnné $\text{cmp}[0]$ je uložena komparační hodnota pro tranzistor $f1s1$, do $\text{cmp}[1]$ komparační hodnota pro tranzistor $f1s2$. ($\text{cmp}[2]$ - tranzistor $f2s1$, $\text{cmp}[3]$ - tranzistor $f2s2$, atd.) Komparační hodnoty jsou ukládány do pole cmp ve formě "1 - část periody, po kterou má být daný tranzistor sepnut".

Když vezmeme v úvahu změřené hodnoty: $U_{C1} > U_{C2}$, $i_a > 0$ a $i_c > 0$, pak by měl být tranzistor $f1s1$ sepnut tu část periody, po kterou má signál odpovídající fázi A z obrázku 7 hodnotu 1. Tedy:

- třetinu času připadajícího na nulový vektor (v první i ve druhé polovině periody šestina času připadajícího na nulový vektor, spínací kombinace $[1 \ 1 \ 1]$)
- třetinu času připadajícího na vektor V_{S1} (spínací kombinace $[1 \ 1 \ 0]$, přispívá k rozvažování napětí na kondenzátorech)

- dvě třetiny času připadajícího na vektor V_{S0} (spínací kombinace $[1\ 0\ 0]$, přispívá k vyvažování napětí na kondenzátorech)

Tranzistor f1s2 by měl být sepnut tu část periody, po kterou má signál odpovídající fázi A hodnotu 0 nebo 1. Tedy:

- dvě třetiny času připadajícího na nulový vektor
- celý čas připadající na vektor V_{S1}
- celý čas připadající na vektor V_{S0}

```
cmp[0] = 1.0 - (t[2]*LOM3 + t[0]*uprav0 + t[1]*uprav1);
cmp[1] = 1.0 - (2*t[2]*LOM3 + t[0] + t[1]);
```

Generování spínacího signálu tranzistorů je v DSP nastaveno tak, že pokud má komparační signál větší hodnotu než pila (čítač), pak je tranzistor vypnutý, pokud má komparační signál menší hodnotu než pila, pak je tranzistor sepnutý. Z tohoto důvodu jsou komparační signály ukládány ve tvaru "1 - část periody, po kterou má být daný tranzistor sepnut".

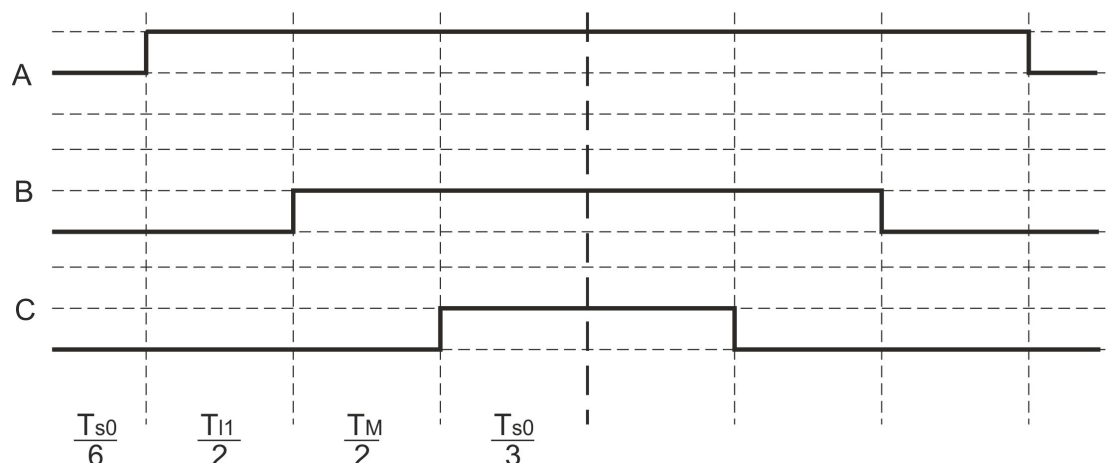
V každé fázi jsou počítány komparační hodnoty pouze pro tranzistory s1 a s2 každé fáze měniče. Spínací signál tranzistoru s3 by měl být negací spínacího signálu tranzistoru s1 (doplňen o mrtvé časy). Podobně to platí pro spínací signály tranzistorů s4 a s2. Na laboratorním prototypu tuto funkci provádí budiče umístěné na měniči.

2.3.3 Rekonstrukce referenčního vektoru v oblasti 2

Z obrázku 6 je patrné, že pro rekonstrukci referenčního vektoru v oblasti 2 jsou k dispozici čtyři spínací kombinace. Dvě spínací kombinace pro vektor V_{S0} a po jedné spínací kombinaci pro vektory V_{L1} a V_M .

Spínací kombinace náležící vektoru V_{L1} neovlivňuje rozložení napětí na kondenzátorech ss. obvodu. Spínací kombinace $[1\ 0\ -1]$ náležící vektoru V_M rozložení napětí na kondenzátorech ss. obvodu ovlivňuje, ale pro tento vektor neexistuje spínací kombinace, která by rozložení napětí ovlivňovala opačným způsobem, takže musíme tuto vlastnost této kombinace strpět. Spínací kombinace náležící vektoru V_{S0} rozložení napětí na kondenzátorech ss. obvodu ovlivňují. Platí pro ně stejná pravidla, která byla popsána v kapitole 2.3.2.

Rekonstrukce referenčního vektoru v oblasti 2 začíná spínací kombinací $[0\ -1\ -1]$. Poté následuje kombinace $[1\ -1\ -1]$ atd. směrem, který je na obrázku 6. V polovině periody modulace se směr obrátí a kombinace se mění zpět až do stavu $[0\ -1\ -1]$. Na obrázku 8 jsou tyto změny zobrazeny v čase do poloviny periody modulace, a to pro situaci, kdy platí: $U_{C1} > U_{C2}$, $i_a > 0$.

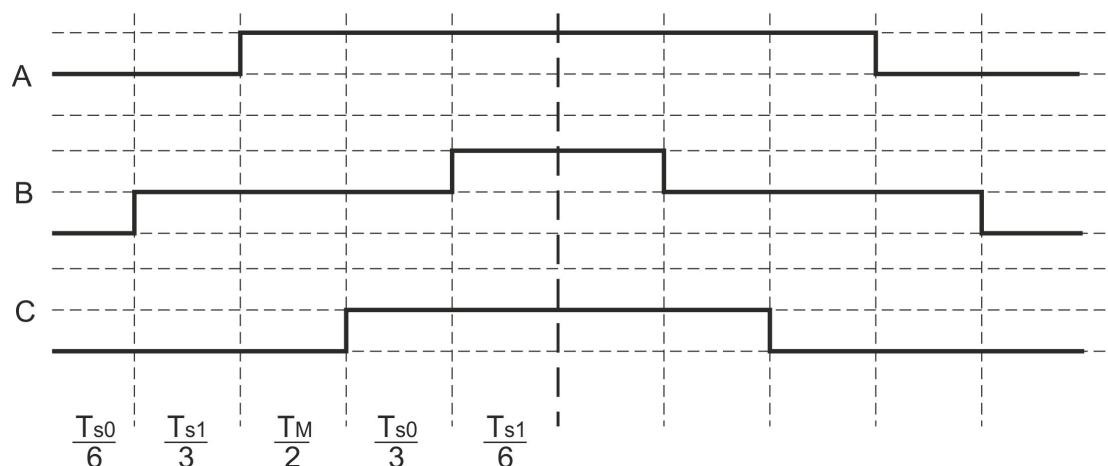


Obr. 8: Spínací kombinace a jejich časování - oblast 2

2.3.4 Rekonstrukce referenčního vektoru v oblasti 3

Z obrázku 6 je patrné, že pro rekonstrukci referenčního vektoru v oblasti 3 je k dispozici pět spínacích kombinací. Jedna spínací kombinace pro vektor V_M a po dvou spínacích kombinacích pro vektory V_{S0} a V_{S1} . Všechny tyto vektory i jejich spínací kombinace jsou obsaženy i v oblastech 1 a 2. Platí pro ně stejná pravidla, která už byla popsána v kapitolách 2.3.2 a 2.3.3, a proto je zde nebudeme znovu uvádět.

Rekonstrukce referenčního vektoru v oblasti 3 začíná spínací kombinací $[0 -1 -1]$. Poté následuje kombinace $[0 0 -1]$ atd. směrem, který je na obrázku 6. V polovině periody modulae se směr obrátí a kombinace se mění zpět až do stavu $[0 -1 -1]$. Na obrázku 9 jsou tyto změny zobrazeny v čase do poloviny periody modulae, a to pro situaci, kdy platí: $U_{C1} > U_{C2}$, $i_a > 0$ a $i_c > 0$.



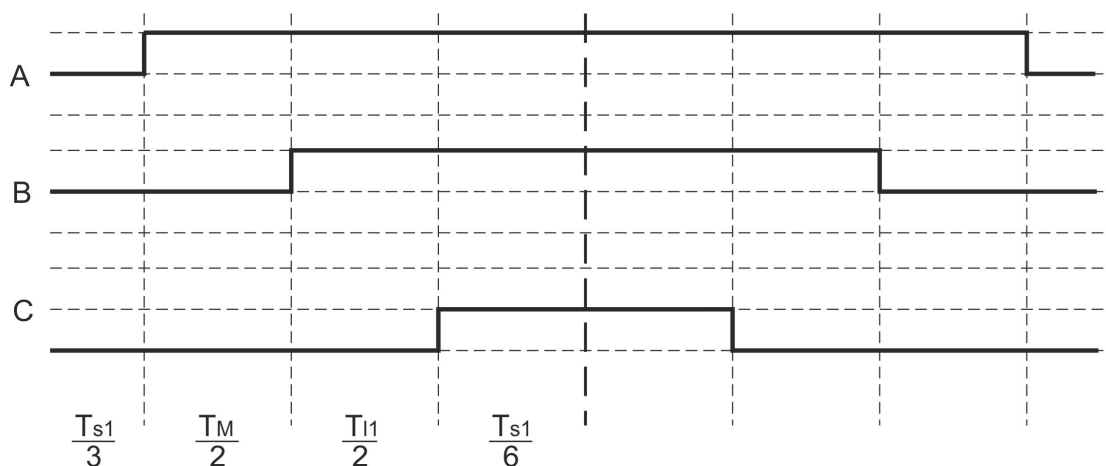
Obr. 9: Spínací kombinace a jejich časování - oblast 3

2.3.5 Rekonstrukce referenčního vektoru v oblasti 4

Z obrázku 6 je patrné, že pro rekonstrukci referenčního vektoru v oblasti 4 jsou k dispozici čtyři spínací kombinace. Dvě spínací kombinace pro vektor V_{S1} a po jedné spínací kombinaci pro vektory V_{L2} a V_M .

Spínací kombinace náležící vektoru V_{L2} neovlivňuje rozložení napětí na kondenzátorech ss. obvodu. Vlastnosti spínací kombinace $[1\ 0\ -1]$ náležící vektoru V_M už jsou uvedeny v kapitole 2.3.3. Spínací kombinace náležící vektoru V_{S1} rozložení napětí na kondenzátorech ss. obvodu ovlivňují. Platí pro ně stejná pravidla, která byla popsána v kapitole 2.3.2.

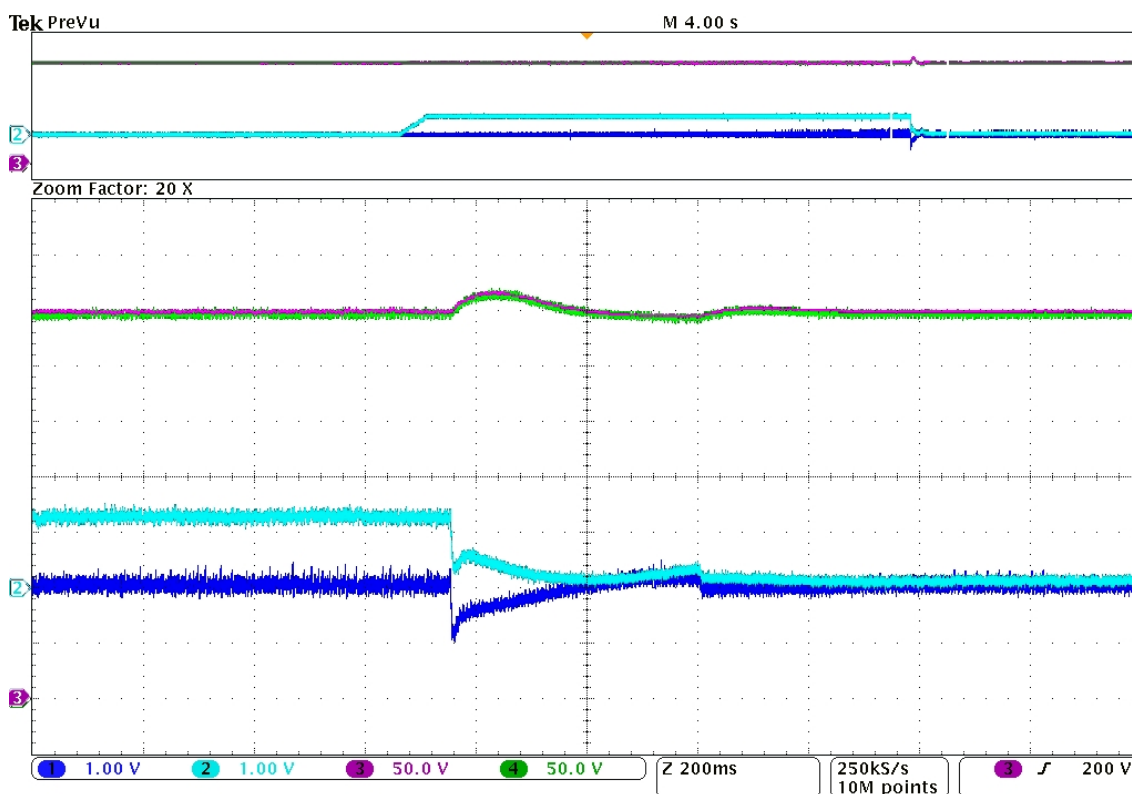
Rekonstrukce referenčního vektoru v oblasti 4 začíná spínací kombinací $[0\ 0\ -1]$. Poté následuje kombinace $[1\ 0\ -1]$ atd. směrem, který je na obrázku 6. V polovině periody modulae se směr obrátí a kombinace se mění zpět až do stavu $[0\ 0\ -1]$. Na obrázku 10 jsou tyto změny zobrazeny v čase do poloviny periody modulae, a to pro situaci, kdy platí: $U_{C1} > U_{C2}$, $i_c > 0$.



Obr. 10: Spínací kombinace a jejich časování - oblast 4

3 Experimentální ověření algoritmu

Na obrázku 11 je zaznamenán průběh přechodového děje na konci rozběhu synchronního motoru. Z obrázku je zřejmé, že modulátor zajišťuje balancování napětí na kondenzátorech C1 a C2 i v průběhu přechodového děje.



Obr. 11: Rozjezd pohonu 0 - 1500 ot./min. – SM - K1: tokotvorná složka proudu [19A/d], K2: momentotvorná složka proudu [19A/d], K3: napětí na kondenzátoru C1 [50V/d], K4: napětí na kondenzátoru C2 [50V/d]

4 Závěr

Výzkumná zpráva se zabývala implementací algoritmů modulátoru pro měnič NPC. Navrhovaný modulátor je variantou SVPWM a je navržen tak, že referenční napěťový vektor je rekonstruován pomocí všech realizovatelných vektorů a spínacích kombinací, které vymezují oblast, ve které se referenční vektor nachází.

Modulátor zajišťuje balancování napětí na kondenzátorech C1 a C2. Balancování napětí na kondenzátorech ss. obvodu měniče je zajišťováno pomocí vhodného rozdělení času mezi "vyvažovací" a "rozvažovací" spínací kombinaci téhož realizovatelného napěťového vektoru. Poměr rozdělení času na "vyvažovací" a "rozvažovací" lze měnit i v průběhu fungování měniče. Pokud by bylo napětí na kondenzátorech z nějakého důvodu dlouhodobě nevyvážené, je možné upravit rozdělení časů tak, aby napomáhalo vyvážení.

Funkčnost algoritmu byla ověřena experimentálně na laboratorním pohonu se synchronním motorem o výkonu 10 kW.

Literatura

- [1] P. Kamenický and Z. Peroutka, "Simulační model tříúrovňového měniče s upínacími diodami," ZČU v Plzni, Tech. Rep. 22190 - 036 - 2011, listopad 2011.
- [2] A. Kocalmis and S. Sunter, "Simulation of a space vector pwm controller for a three-level voltage-fed inverter motor drive," in *IEEE Industrial Electronics, IECON 2006 - 32nd Annual Conference on*, nov. 2006, pp. 1915–1920.
- [3] N. Celanovic and D. Boroyevich, "A comprehensive study of neutral-point voltage balancing problem in three-level neutral-point-clamped voltage source pwm inverters," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 15, no. 2, pp. 242–249, mar. 2000.

Seznam obrázků

1	Tříúrovňový měnič s upínacími diodami	4
2	Realizovatelné napěťové vektory a spínací kombinace	5
3	Sektory a oblasti	7
4	Určení oblasti v sektoru	8
5	Vektory ohraničující jednotlivé oblasti	9
6	Spínací kombinace užívané v jednotlivých oblastech	11
7	Spínací kombinace a jejich časování - oblast 1	13
8	Spínací kombinace a jejich časování - oblast 2	15
9	Spínací kombinace a jejich časování - oblast 3	15
10	Spínací kombinace a jejich časování - oblast 4	16
11	Rozjezd pohonu 0 - 1500 ot./min. – SM - K1: tokotvorná složka proudu [19A/d], K2: momentotvorná složka proudu [19A/d], K3: napětí na kondenzátoru C1 [50V/d], K4: napětí na kondenzátoru C2 [50V/d]	17

Historie revizí

Rev.	Kapitola	Popis změny	Datum, Jméno/Odd.
1	všechny	Publikování dokumentu	24. 8. 2012, PK / RICE