

## POTENTIALITY OF AC SERVODRIVES MOTION IRREGULARITY ELIMINATION BY COMPENSATION OF INVERTER NONLINEARITIES

**B. Klíma\*, R. Stupka\***

**Summary:** *The Pulse Width Modulation is always accompanied by an output voltage distortion. This is caused by voltage drops on real switching elements and also by using of the necessary dead time between switch-over of both transistors in a branch circuit. This paper deals with the mathematical description of this problem, branch and phase voltage drops are evaluated and presented as vectors in  $\alpha - \beta$  coordinates and in rotating  $d - q$  system. In the vector diagram is also a method of the output voltage correcting demonstrated. The correction of these effects can cause better motion regularity and also better efficiency of electric drive. The article is supported by project MSM 262200010*

### 1. Zkreslení větrového napětí vlivem ochranných dob

Nenulové zapínací a vypínací doby tranzistorů s sebou přinášejí nutnost opozdit sepnutí tranzistoru oproti vypnutí druhého tranzistoru v jedné větvi o tzv. ochrannou dobu. Tato doba je potřebná k úplnému zániku proudu tranzistorem do té doby sepnutým. Pokud by jsme spínali tranzistory bez této ochranné doby, bude docházet ke stavu, kdy budou sepnuty oba tranzistory ve větvi a znamenalo by to zkrat stejnosměrného meziobvodu. Spínací sekvence se zahrnutým dopravním zpožděním je uvedena na Obr.1. Z obrázku vyplývá, že zkreslení větrového napětí závisí na směru fázového proudu. Zkreslení větrových napětí  $\Delta u_{Va}$ ,  $\Delta u_{Vb}$ ,  $\Delta u_{Vc}$  vlivem ochranných dob je dáno:

$$\Delta u_{Va} = U_{DC} \cdot \frac{T_d}{T_s} \cdot \text{sgn}(i_a) \quad (1)$$

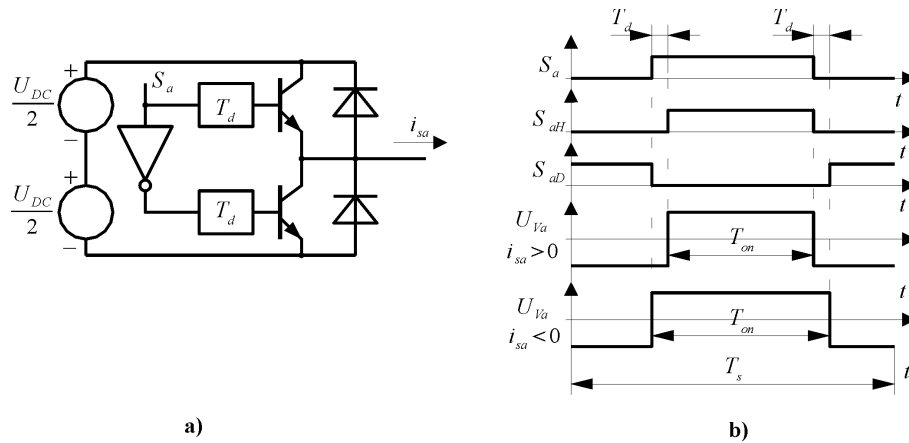
$$\Delta u_{Vb} = U_{DC} \cdot \frac{T_d}{T_s} \cdot \text{sgn}(i_b) \quad (2)$$

$$\Delta u_{Vc} = U_{DC} \cdot \frac{T_d}{T_s} \cdot \text{sgn}(i_c) \quad (3)$$

---

\* Ing. Bohumil Klíma, Ph.D., Ing. Radek Stupka: Ústav Výkonové elektrotechniky a elektroniky, FEKT – VUT v Brně, Technická 8, 616 00 BRNO; tel.: +420 541 142 382, fax: +420 541 142 464; e-mail: [klima@feec.vutbr.cz](mailto:klima@feec.vutbr.cz), [stupka@feec.vutbr.cz](mailto:stupka@feec.vutbr.cz)

kde  $T_d$  je ochranná doba mezi sepnutím horního a dolního tranzistoru ve větvi  
 $T_s$  je perioda modulačního cyklu

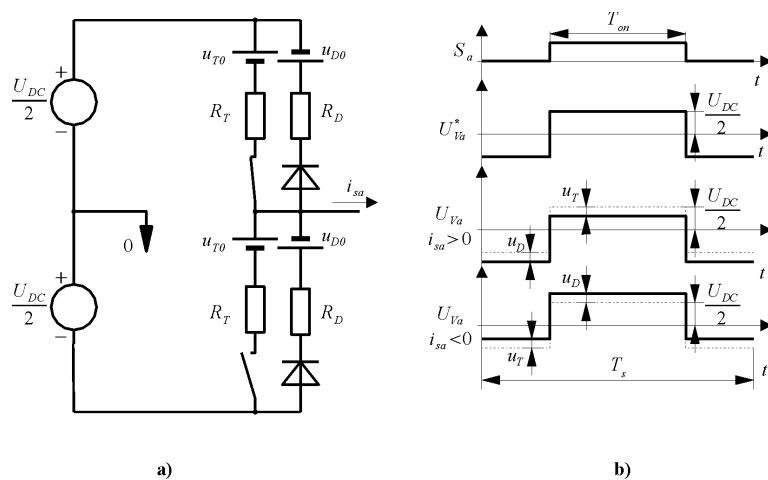


Obrázek 1 a) vznik zkreslení vlivem ochranných dob b) průběhy spínacích sekvencí a větrového napětí během modulační periody

Je zřejmé, že míra zkreslení vlivem ochranných dob závisí na poměru  $T_d / T_s$ . Ochranné doby jsou zvoleny s ohledem na dynamické parametry spínacích prvků. Čím nižší je pak nosný kmitočet PWM, zkreslení ochrannými dobami je také nižší.

## 2. Zkreslení větrového napětí vlivem úbytků na spínacích prvcích

Zatímco zkreslení napětí vlivem ochranných dob je přesně dáno velikostí napětí ve stejnosměrném meziobvodu a poměrem ochranné doby a periody nosného kmitočtu PWM, zkreslení vlivem úbytků napětí je funkcí středy šířkové modulace v jednotlivých fázích a velikosti a znaménka fázových proudů. Situaci v tomto případě zobrazuje Obr.2.



Obrázek 2 a) náhradní obvod pro analýzu zkreslení vlivem úbytků na spínacích prvcích  
b) výstupní napětí zkreslené úbytkem na spínacích prvcích

Pro zkreslení jednotlivých větrových napětí  $\Delta u_{Va}$ ,  $\Delta u_{Vb}$ ,  $\Delta u_{Vc}$  je možné psát vztahy:

$$\Delta u_{Va} = \begin{cases} u_D(i_a) + s_a [u_T(i_a)] - u_D(i_a) & ; i_a > 0 \\ -u_T(i_a) + s_a [u_T(i_a)] - u_D(i_a) & ; i_a < 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\Delta u_{Vb} = \begin{cases} u_D(i_b) + s_b [u_T(i_b)] - u_D(i_b) & ; i_b > 0 \\ -u_T(i_b) + s_b [u_T(i_b)] - u_D(i_b) & ; i_b < 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\Delta u_{Vc} = \begin{cases} u_D(i_c) + s_c [u_T(i_c)] - u_D(i_c) & ; i_c > 0 \\ -u_T(i_c) + s_c [u_T(i_c)] - u_D(i_c) & ; i_c < 0 \end{cases} \quad (6)$$

kde  $u_T(i_{a,b,c})$  je napětí na tranzistoru závislé na příslušném fázovém proudu

$u_D(i_{a,b,c})$  je napětí na diodě závislé na příslušném fázovém proudu

$$s_{a,b,c} \text{ je střída v příslušné větvi } s_x = \frac{T_{xon}}{T_S}$$

Závislost úbytku napětí na procházejícím proudu lze modelovat lomenou přímkou, jejíž parametry jsou ve schématu znázorněny zdroji napětí a sériově zařazenými dynamickými odpory. Pro napětí na tranzistoru platí:

$$u_T(t) = u_{T0} + R_T i_c(t) \quad (7)$$

a na diodě:

$$u_D(t) = u_{D0} + R_D i_F(t) \quad (8)$$

Vzhledem k tepelným závislostem parametrů spínacích prvků je zřejmé, že nebude možné kompenzovat tyto úbytky zcela přesně. Zkreslení vlivem úbytků se bude projevovat tím zřetelněji, čím menší napětí bude ve stejnosměrném meziobvodu střídače. Předpokládejme, že velikosti úbytků napětí při jmenovitých proudech dosahují hodnoty okolo 2,5V. U střídačů, kde je ve stejnosměrném meziobvodu usměrněné napětí rozvodné sítě jsou tyto úbytky do 1% tohoto napětí. Naproti tomu u střídačů na malé napětí (typicky 24 - 48V) se tyto úbytky blíží 10% a zkreslení výstupních napětí může být značné.

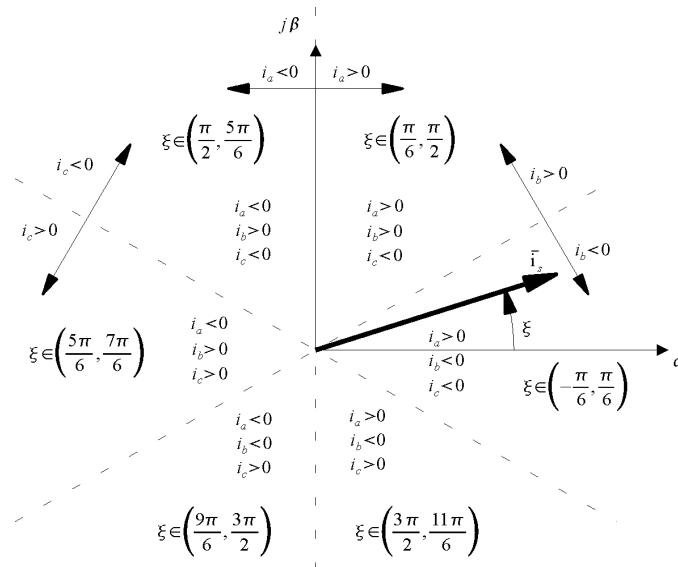
### 3. Zkreslení fázových napětí

Známe-li zkreslení větrových napětí, pro zkreslení fázových napětí lze napsat vztah:

$$\begin{bmatrix} \Delta u_a \\ \Delta u_b \\ \Delta u_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 \operatorname{sgn}(i_a) & -\operatorname{sgn}(i_b) & -\operatorname{sgn}(i_c) \\ -\operatorname{sgn}(i_a) & 2 \operatorname{sgn}(i_b) & -\operatorname{sgn}(i_c) \\ -\operatorname{sgn}(i_a) & -\operatorname{sgn}(i_b) & 2 \operatorname{sgn}(i_c) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_{Va} \\ \Delta u_{Vb} \\ \Delta u_{Vc} \end{bmatrix} \quad (9)$$

### 4. Zkreslení napětí na motoru vlivem ochranných dob

Komplexní rovinu lze rozdělit na sektory podle Obr.3. Nachází-li se prostorový vektor statorového proudu v daném sektoru, je polarita fázových proudů tímto sektorem jednoznačně určena. Přerušované čáry určují hranici změny polaritu naznačeného fázového proudu



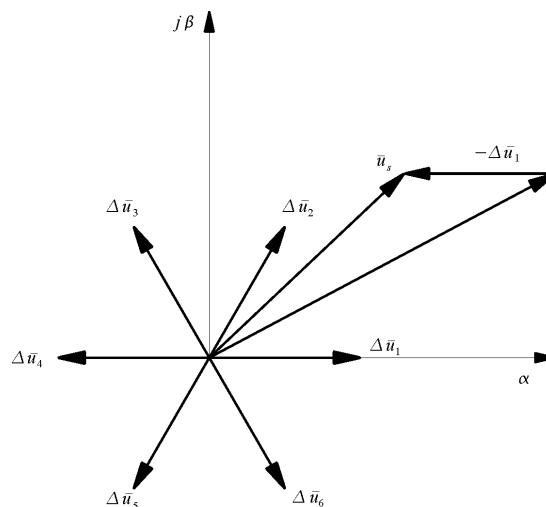
Obrázek 3 Určení znamének fázových proudů v závislosti na orientaci prostorového vektoru satorového proudu

Budeme-li uvažovat orientaci prostorového vektoru proudu v sektoru  $\xi \in \left(-\frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{6}\right)$ , pak lze najít zkreslující napětí v jednotlivých fázích:

$$\Delta u_a = \frac{4}{3} U_{DC} \frac{T_D}{T_S}, \quad \Delta u_b = -\frac{2}{3} U_{DC} \frac{T_D}{T_S}, \quad \Delta u_c = -\frac{2}{3} U_{DC} \frac{T_D}{T_S} \quad (10, 11, 12)$$

Z takto vzniklých fázových napětí lze vytvořit zkreslující prostorový vektor napětí  $\Delta \bar{u}_1$ , který představuje zkreslení prostorového vektoru satorového napětí. Pro další polaritu fázových proudů v ostatních sektorech je možné odvodit podobné vektory. Jejich znázornění v komplexní rovině je na Obr.4 a absolutní hodnota těchto vektorů je:

$$|\Delta \bar{u}_x| = \frac{4}{3} U_{DC} \frac{T_d}{T_S} \quad (13)$$



Obrázek 4 Zkreslující vektory a zkreslení prostorového vektoru napětí vlivem ochranných dob

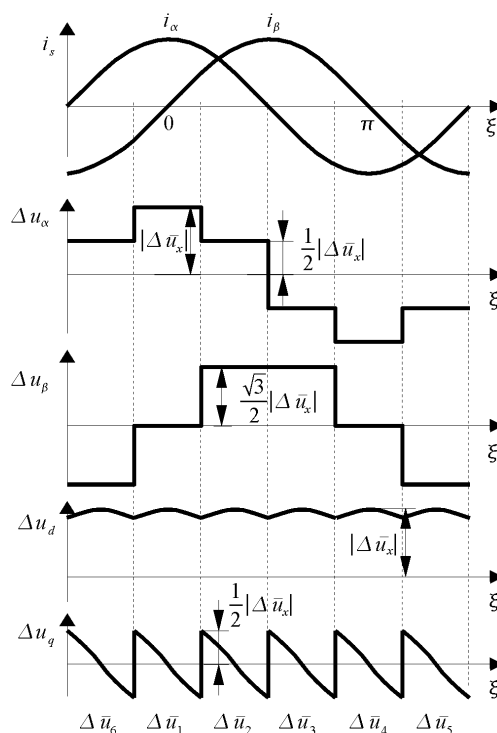
Odečteme-li aktuální zkreslující vektor od požadovaného vektoru, získáme skutečný prostorový vektor napětí aplikovaný na motor. Pro orientaci prostorového vektoru proudu v intervalu  $\xi \in \left(-\frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{6}\right)$  je konstrukce výsledného vektoru zakreslena rovněž na Obr.4.

Pro případnou kompenzaci zkreslení je účelné znát průběhy zkreslujících napětí v referenčních souřadnicích, ve kterých probíhá regulace. Průběhy zkreslujících napětí ve stacionárních i rotačních referenčních souřadnicích ukazuje Obr.5. Ve stacionárních souřadnicích mají zkreslující napětí  $\Delta u_\alpha$ ,  $\Delta u_\beta$  tvar schodovitých funkcí, jednotlivé napěťové úrovně jsou na obrázku vyznačeny. V rotujících referenčních souřadnicích pro průběhy zkreslujících napětí  $\Delta u_d$ ,  $\Delta u_q$  v intervalu  $\xi \in \left(-\frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{6}\right)$  platí:

$$\Delta u_d = |\Delta \bar{u}_x| \cdot \cos(\xi) \quad (14)$$

$$\Delta u_q = |\Delta \bar{u}_x| \cdot (-\sin(\xi)) \quad (15)$$

a v dalších intervalech se tato funkce cyklicky opakuje.



Obrázek 5 Zkreslující napětí ve stacionárních a rotujících referenčních souřadnicích

## 5. Zkreslení napětí na motoru vlivem úbytků na spínacích prvcích

Známe-li fázové proudy, zkreslení větвовých napětí a fázových napětí lze vypočítat podle vztahů (4, 5, 6) a (9). Je nutné znát rovněž parametry spínacích prvků a střídny v jednotlivých větvích měniče. Pro kompenzaci je pak nutné zkreslení fázových napětí transformovat opět do

rotujících referenčních souřadnic. Potom lze provést kompenzaci napětí  $u_d$  a  $u_q$  přičtením složek vektoru zkreslujícího napětí vlivem úbytků.

## 6. Závěr

Při řízení střídačů pomocí digitálních signálových procesorů (DSP) lze uvedený matematický popis využít ke kompenzaci vlivů zmiňovaných neideálních vlastností spínacích prvků. Kompenzací je možné dosáhnout nižšího obsahu vyšších harmonických ve výstupních napětích a proudech střídače. Důsledkem může být lepší rovnoměrnost chodu na malých otáčkách při malých výstupních napětích a rovněž určité zlepšení účinnosti soustavy měnič – motor. Je patrné, že vliv ochranných dob lze kompenzovat pomocí jednoznačně vyjádřeného zkreslujícího vektoru, jehož absolutní hodnota je mimo jiné funkcí napětí ve stejnosměrném meziobvodu. Možnost kompenzace nabývá významu zejména při malých amplitudách výstupního napětí střídače, kdy je poměr absolutní hodnoty zkreslujícího vektoru a výstupní amplitudy napětí vysoký. Některé DSP pro aplikace v el. pohonech mají již implementovány podobné funkce pro kompenzaci vlivu ochranných dob (Motorla DSP56F8xx).

Matematický popis vlivu úbytků napětí na spínacích prvcích je postaven na modelech voltampérových charakteristik spínacích součástek, které mohou do výpočtu vnášet určité nepřesnosti. Velikost úbytků na spínacích prvcích je nezávislá na velikosti napětí ve stejnosměrném meziobvodu a při dostatečně vysoké napěťové hladině je tento vliv zanedbatelný. Naopak při malých napěťových hladinách lze očekávat, že by uvedená možnost kompenzace mohla být přínosná ke zlepšení rovnoměrnosti chodu a účinnosti takovýchto měničů.

## 7. Literatura

- [1] PATOČKA, M. *Sinusová pulsní šířková modulace ve střídavých pohonech s trojfázovým motorem. Možnosti zvýšení nosného kmitočtu do nadakustické oblasti.* Disertační práce, FEI VUT Brno, 1993
- [2] [www.analog.com](http://www.analog.com); *Analysis and Compensation of Inverter Non-Idealities*, Motor control technology seminar, 1996
- [3] [www.motorola.com](http://www.motorola.com); *DSP56F801/803/805/807 16-Bit Digital Signal Processor User's Manual*