

Vektorová PWM pro pětifázový napěťový střídač

Tomáš Glasberger

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky, Západočeská univerzita v Plzni

Space vector PWM for five-phase voltage source inverter

Abstract

This paper deals with analysis of a space vector pulse width modulation for five-phase voltage source inverters. There is introduced the topology of five-phase voltage source inverters (VSI) and the Park's transformation for five-phase systems in the paper. Further, the selection of corresponding space vectors and switching times calculation are described. Theoretical results are verified by simulations on a VSI model supplying a RL load.

Keywords

Space vector PWM, five-phase voltage source inverter (VSI), Park's transformation.

Úvod

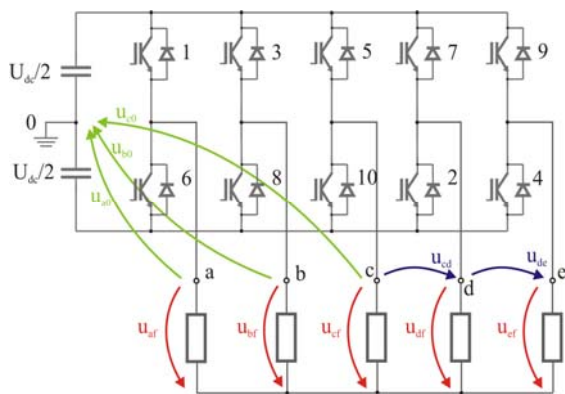
S masivním rozvojem polovodičových součástek, zejména IGBT, je možné sestavit relativně snadno měnič s velkým počtem fází, takže je možné řídit střídavé motory i s více než třemi fázemi. Tyto motory mají proti klasickým třífázovým řadu výhod, jež lze najít v literatuře [1]. Jedná se zejména o větší spolehlivost, menší zvlnění momentu, menší proudy procházející jednotlivými fázemi atd. Protože nedílnou součástí řízení měniče je modulátor, který zajišťuje zadávání signálů na řídicí elektrody tranzistorů střídače v závislosti na požadavku od nadřazené regulační struktury, bylo nutné vyvinout algoritmus řízení těchto signálů a tedy i měniče jako celku. Modulátor může pracovat buď na bázi sinusové PWM [2] nebo vektorové PWM [3]. Tato práce se zabývá návrhem algoritmu a analýzou vektorové PWM. Je zde popsána topologie pětifázového střídače a také potřebná Parkova transformace, známá jako transformace na prostorový vektor. Jako základní druh modulace je představen typ s použitím pouze velkých aktivních vektorů střídače. Uvedené teoretické předpoklady jsou ověřeny simulačně na modelu pětifázového měniče napájejícího RL zátěž.

Pětifázový napěťový střídač

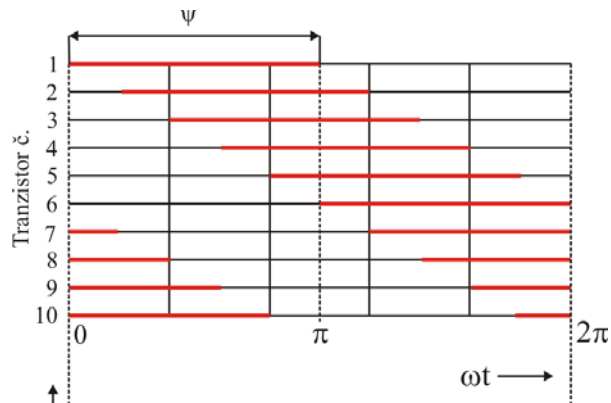
Schéma pětifázového napěťového střídače je uvedeno na obr. 1. Od třífázového se liší pouze jiným počtem fází, jinak je topologie stejná – dvojice IGBT a antiparalelních diod v každé větvi měniče. Na obrázku jsou označeny tři kategorie napětí, které lze pro analýzu uvažovat: u_{a0} - u_{e0} jsou fázová napětí střídače, u_{af} - u_{ef} jsou fázová napětí zátěže, u_{ab} - u_{ea} jsou napětí sdružená. Pro přehlednost nejsou v obrázku zanesena všechna. Spínací diagram pro obdélníkové řízení s řídicím úhlem $\psi=180^\circ$ je zobrazen na obr. 2. Průběh fázového napětí lze získat podobným odvozením, jak je to známé u třífázového průběhu – např. z fázových napětí střídače.

Napětí v jednotlivých fázích jsou posunuta o $\frac{360}{5} = 72^\circ = \frac{2\pi}{5} rad$. Podle spínacího diagramu dochází k přepínání jednotlivých prvků po $\frac{\pi}{5} rad$. Čísla spínacích prvků ve

schématu zároveň udávají pořadí vedení (popř. přivádění spínacího signálu) v průběhu periody.



Obr. 1: Schéma pětifázového napěťového střídače.



Obr. 2: Spínací diagram pro obdélkovém řízení.

Tvorba základních vektorů střídače

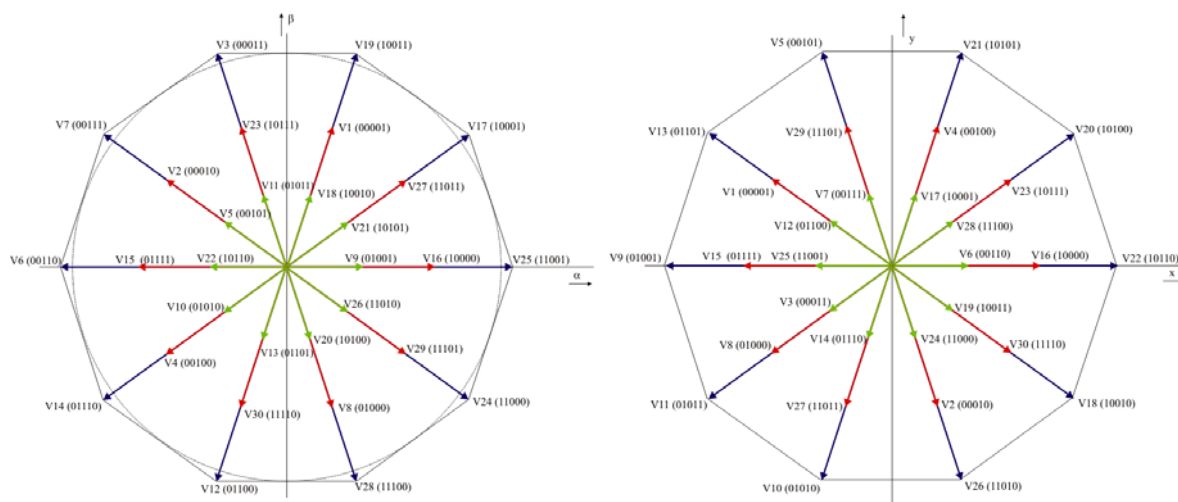
Po vyjádření průběhů fázových napětí střídače lze přistoupit k odvození základních prostorových vektorů a jejich zakreslení do komplexní roviny. Pomocí klasického přístupu by došlo k tomu, že by se základní vektory nacházely v pětirozměrném prostoru, proto je využita tzv. dekompozice vektorového prostoru, kdy dojde na rozdělení na dva dvojrozměrné (roviny $\alpha\beta$, xy) a jeden jednorozměrný prostor (nulové vektory). Vektory pak lze graficky znázornit, viz obr. 3. Základní vektory se spočítají podle vztahů (1).

$$\mathbf{u}_{\alpha\beta} = u_{\alpha} + j.u_{\beta} = \frac{2}{5} \cdot (u_{af} + \mathbf{a}.u_{bf} + \mathbf{a}^2.u_{cf} + \mathbf{a}^{*2}.u_{df} + \mathbf{a}^*.u_{ef}), \quad (1)$$

$$\mathbf{u}_{xy} = u_x + j.u_y = \frac{2}{5} \cdot (u_{af} + \mathbf{a}^2.u_{bf} + \mathbf{a}^*.u_{cf} + \mathbf{a}.u_{df} + \mathbf{a}^{*2}.u_{ef}),$$

kde u_{α} , u_{β} , u_x , u_y jsou souřadnice jednotlivých vektorů v příslušných rovinách ($\alpha\beta$ nebo xy), $\mathbf{a} = e^{j\frac{2\pi}{5}}$ je komplexní konstanta. Jak je dále vidět z obr. 3, vyskytují se zde tři různé velikosti vektorů – velké, střední a malé. Zároveň dochází k tomu, že vektory velké z roviny $\alpha\beta$ se transformují na vektory malé v rovině xy a opačně. Zároveň se liší fázová natočení téměř všech vektorů v rovině $\alpha\beta$ od vektorů v rovině xy . Vektory jsou vzájemně otočené o úhel $\frac{\pi}{5} rad = 36^\circ$. Výpočtem se dají zjistit délky základních vektorů: Vektory velké mají délku $0,6472.U_{dc}$, vektory střední – $0,4.U_{dc}$ a vektory malé – $0,2472.U_{dc}$, kde U_{dc} je napětí ve stejnosměrném meziobvodu.

Výpočet časů sepnutí pro vytvoření libovolného výstupního vektoru lze vyjádřit podobně jako u třífázového střídače pomocí vztahů (2) :



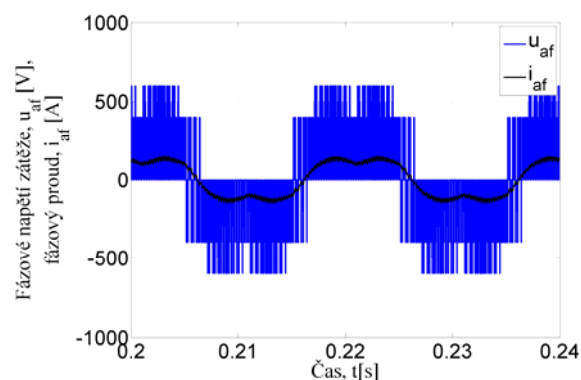
Obr. 3: Znázornění základních prostorových vektorů v komplexních rovinách.

$$t_1 = t_{pwm} \cdot \frac{|\mathbf{u}^*|}{0,6472 \cdot U_{dc}} \cdot \frac{\sin\left(\frac{\pi}{5} - \vartheta\right)}{\sin \frac{\pi}{5}}, \quad t_2 = t_{pwm} \cdot \frac{|\mathbf{u}^*|}{0,6472 \cdot U_{dc}} \cdot \frac{\sin(\vartheta)}{\sin \frac{\pi}{5}}, \quad t_0 = t_{pwm} - t_1 - t_2, \quad (2)$$

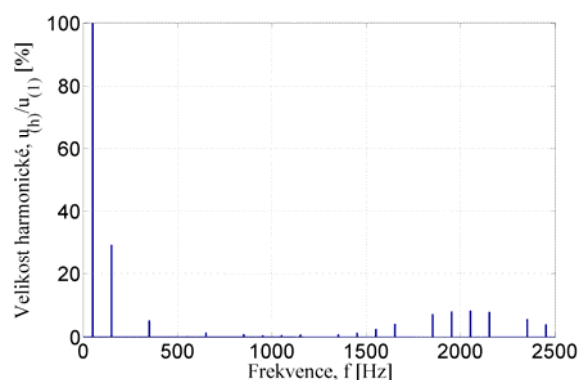
kde t_1 , t_2 , t_0 jsou časy sepnutí dvou aktivních vektorů a vektoru nulového, t_{pwm} je spínací perioda, $|\mathbf{u}^*|$ je velikost požadovaného vektoru a ϑ je úhel natočení požadovaného vektoru v příslušném sektoru.

Simulační výsledky

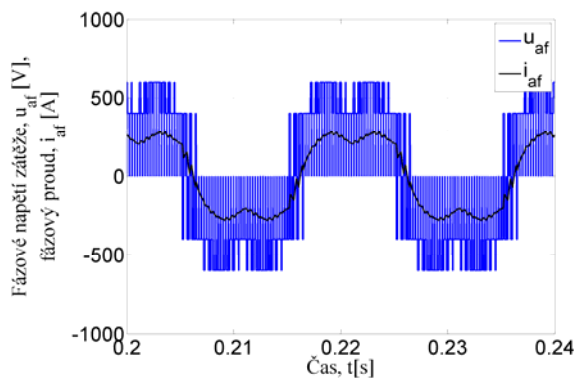
Na následujících obrázcích jsou uvedeny simulační výsledky uvedeného způsobu vektorové PWM. Střídač pracoval do RL zátěže o parametrech $R=2 \Omega$ a $L=1 \text{ mH}$, spínací frekvence byla nastavena na $f_{pwm}=2000 \text{ Hz}$, výstupní frekvence byla $f_{out}=50 \text{ Hz}$, napětí ve ss mezibvodu bylo $U_{dc}=1000 \text{ V}$. Na obr. 4 je znázorněn průběh fázového napětí a proudu zátěže při požadované velikosti výstupního napětí $|\mathbf{u}^*|=300 \text{ V}$, na obr. 5 je harmonická analýza napětí. Podobně na dalších obrázcích 6 a 7 je uveden průběh fázového napětí a proudu při požadavku na $|\mathbf{u}^*|=615 \text{ V}$, spolu s harmonickou analýzou napětí.



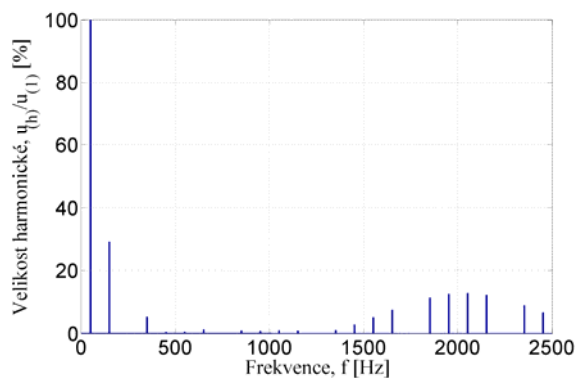
Obr. 4: Fázové napětí a proud zátěže,
 $|\mathbf{u}^*|=300 \text{ V}$.



Obr. 5: Harmonická analýza fázového napětí zátěže.



Obr. 6: Fázové napětí a proud zátěže,
 $|\mathbf{u}^*| = 615 \text{ V}$.



Obr. 7: Harmonická analýza fázového
 napětí zátěže.

Závěr

V této práci byl představen algoritmus řízení pětifázového napěťového střídače pomocí vektorové PWM. Byl zde popsán výpočet fázových napětí zátěže a následně vytvoření základních vektorů střídače. Vektorový prostor je v tomto případě pětirozměrný. Aby bylo možné vektory graficky znázornit, bylo nutné provést tzv. dekompozici vektorového prostoru - rozdělit tento prostor na dva dvojrozměrné a jeden jednorozměrný. Dále byl uveden výpočet časů sepnutí pro vytvoření libovolného výstupního vektoru.

Simulační výsledky ukázaly správnou funkčnost algoritmu vektorové PWM s využitím pouze velkých vektorů pro tvorbu vektoru požadovaného. Při této metodě je maximálně využito napěťový rozsah střídače, problém vyvstává v tom, že výstupní napětí obsahuje výraznou 3. harmonickou, která by mohla mít nežádoucí důsledky pro pětifázový motor. Pro eliminaci nežádoucích harmonických bude nutné využít více základních vektorů pro tvorbu referenčního (v tomto případě čtyři), ovšem za cenu snížení maximálního napětí na výstupu měniče.

Literatura

- [1] Singh, G.,K. *Multi-phase induction machine drive research—a survey*. Electric Power Systems Research. 2002. Vol. 61, no. 2, s. 139-147.
- [2] Ojo, O., Gan, Dong. *Generalized discontinuous carrier-based PWM modulation scheme for multi-phase converter-machine systems*. In Industry Applications Conference 2005. Fourtieth IAS Annual Meeting. 2005. Vol. 2, s. 1374-1381.
- [3] Iqbal, A., Levi, E. *Space Vector Modulation Schemes for a Five-Phase Voltage Source Inverter*. In European Conference on Power Electronics and Applications, EPE 2005. 2005. Dráždany, Německo: 2005, s. 12.
- [4] Vondrášek, F. *Výkonová elektronika - svazek 3 : Měniče s vlastní komutací a bezkomutace*. 2003. vyd. Plzeň: ZCU, 2003.