

Prediktivní řízení u duálního měniče s prodlouženým horizontem pro minimalizaci ztrát

Martin Votava, Tomáš Glasberger, Zdeněk Peroutka

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Fakulta Elektrotechnická

Západočeská univerzita v Plzni

mvotava@rice.zcu.cz

Improved Model Predictive Control with Extended Horizon for Dual Inverter with Real-Time Minimization of Converter Power Losses

Abstract – The paper is focused on reduction and balancing of power losses in a dual inverter. The proposed technique is based on finite control set model predictive control with two techniques which improve the behavior of the basic predictive algorithm to deal with different time constants in the system. The proposed algorithm uses approximation of the power losses by an exponential filter and furthermore, it combines this approximation with extended prediction horizon. The behavior of the system is then significantly improved with respect to balancing of power losses among the transistors and with respect to quality of the output current.

Keywords – switching losses; converter control; IGBT; device modeling.

I. ÚVOD

Duální měniče se rozšířily do mnoho aplikací např. do automobilového průmyslu, obnovitelných zdrojů, atd. Předností duálního měniče je velký počet redundantních spínacích kombinací. Toho lze využít při návrhu řídicího algoritmu, kde je lze využít k vyrovnávání ztrát měniče. [1], [2]

II. DUÁLNÍ MĚNIČ SE ZÁTĚŽÍ S OTEVŘENÝM VINUTÍM

Topologie duálního měniče se zátěží s otevřeným vinutím je zobrazena na Obrázku I. Topologie je složena ze dvou dvouúrovňových měničů. Výstup prvního měniče je zapojen na začátek vinutí a výstup druhého měniče je zapojen na konec vinutí. Díky tomu lze na zátěži dosáhnout 19 nezávislých vektorů pomocí 64 spínacích kombinací (Obrázek II).

III. NAVRHOVANÉ PREDIKTIVNÍ ŘÍZENÍ S EXPONENCIÁLNÍM FILTREM

A. Proudový model

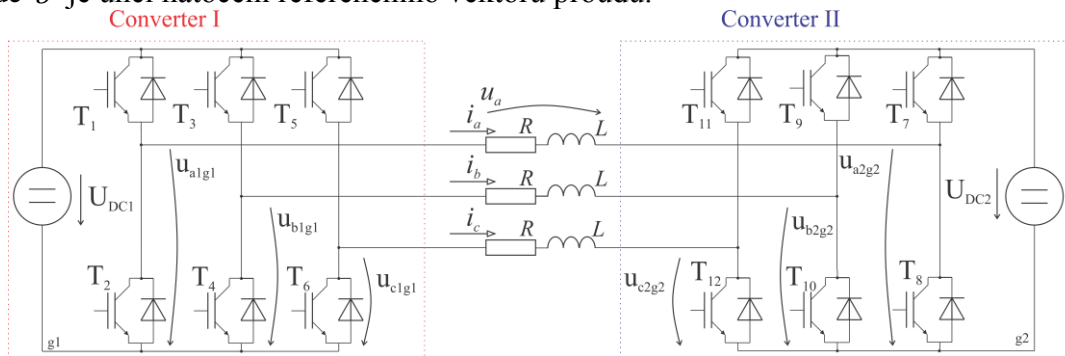
Proudový model je dán:

$$i_{ph,k+1} = i_{ph,k} + \frac{u_{ph,k} - R \cdot i_{ph,k}}{L} \cdot T_s, \quad (1)$$

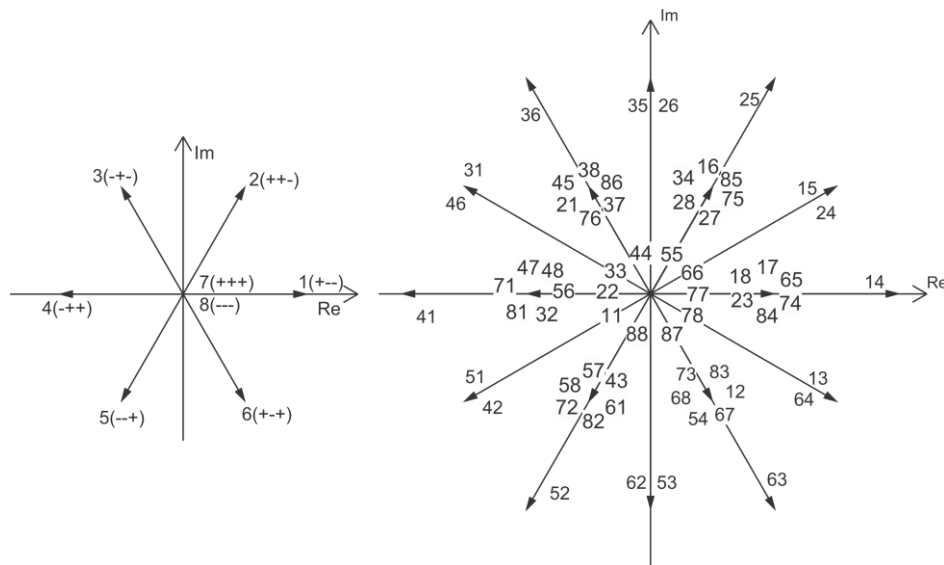
kde $i_{ph,k+1}$ je proud protékající fází ph v kroku $k+1$, $i_{ph,k}$ je proud fáze ph v kroku k , $u_{ph,k}$ je napětí zátěže na fázi ph v kroku k , R je odpor rezistoru a L indukčnost tlumivky. Proud je dále transformován do rotujícího souřadného systému spojeného s referenčním vektorem proudu pomocí Parkovi transformace:

$$\begin{aligned} i_{d,k+1} &= \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot i_a - i_b - i_c) \cdot \cos \vartheta + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (i_b - i_c) \cdot \sin \vartheta, \\ i_{q,k+1} &= -\frac{1}{3} \cdot (2 \cdot i_a - i_b - i_c) \cdot \sin \vartheta + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (i_b - i_c) \cdot \cos \vartheta, \end{aligned} \quad (1)$$

kde ϑ je úhel natočení referenčního vektoru proudu.



Obrázek I. Topologie duálního měniče



Obrázek II. Spínací kombinace a dosažitelné vektory zleva u dvouúrovňového měniče a duálního měniče

B. Model výkonových ztrát

Model výkonových ztrát vychází z předpokladu, že tranzistory a diody jednotlivých půlmůstek jsou umístěni v těsné blízkosti. Díky tomu lze redukovat model výkonových ztrát a výkonové ztráty modelovat pouze pro šest elementů, kde jeden element je složen ze dvou IGBT tranzistorů a dvou zpětných diod jedné větve měniče. Výkonové ztráty jednotlivých lze následně pomocí exponenciálního filtru

$$P_{x,k+1} = \phi \cdot P_{x,k} + (1 - \phi) \cdot \left(u_{T0} \cdot i_{x,k+1} + r_T \cdot i_{x,k+1}^2 + \frac{\gamma}{2} \cdot i_{x,k+1} \cdot |S_{x,k} - S_{x,k-1}| \right), \quad (1)$$

kde ϕ je koeficient filtru, u_{T0} je prahové napětí tranzistoru, $i_{x,k+1}$ je proud tekoucí x -tým elementem v kroku $k+1$ a $\gamma = \frac{E_{on}+E_{off}+E_{rr}}{2} \cdot \frac{U_{dc,n}}{U_{NT}} \cdot \frac{1}{T_s}$. Zde E_{on} je aproximovaný koeficient zapínacích ztrát tranzistoru, E_{off} je aproximovaný koeficient vypínacích ztrát tranzistoru a E_{rr} je aproximovaný koeficient vypínacích ztrát diody, $U_{dc,n}$ je jmenovité napětí stejnosměrného meziobvodu měniče n , U_{NT} je jmenovité napětí tranzistorů.

C. Ztrátová funkce

Volba spínací kombinace je daná minimalizací ztrátové funkce složené ze dvou kritérií

$$g_l = \sum_{k=1}^{l+N} \left((i_{d,k+1} - i_{d,k}^*)^2 + (i_{q,k+1} - i_{q,k}^*)^2 + \sum_{x=1}^6 \lambda_x \cdot P_x^2 \right), \quad (1)$$

kde N je počet kroků predikčního horizontu, $i_{d,k}^*$ a $i_{q,k}^*$ jsou složky referenčního vektoru proudu, λ_x je váhových koeficient ztrát x -tého elementu.

D. Preselekcce spínacích kombinací

Počet evaluací (evaluace reprezentuje všechny výpočty potřebné pro určení hodnoty ztrátové funkce jedné spínací kombinace v jednom časovém kroku) je bez preselekcce roven

$$j = 64^N. \quad (1)$$

Pro omezení výpočetní náročnosti dlouhých horizontů byla do algoritmu zavedena preselekcce. Dle preselekcce je v prvním predikčním kroku vypočtena ztrátová funkce u všech spínacích kombinací. Do dalšího predikčního kroku jsou vybrány spínací kombinace s nejmenší hodnotou ztrátové funkce a spínací kombinace, u které nedochází k sepnutí. To vede na dvě větve ve druhém predikčním kroku. Dále do dalšího predikčního kroku jsou z každé větve vybrány spínací kombinace s nejmenší hodnotou ztrátové funkce a spínací kombinace, kde nedošlo k sepnutí. Dále se algoritmus opakuje až do N -tého kroku. Díky tomu je výpočetní náročnost omezena na

$$j = (2^N - 1) \cdot 64. \quad (1)$$

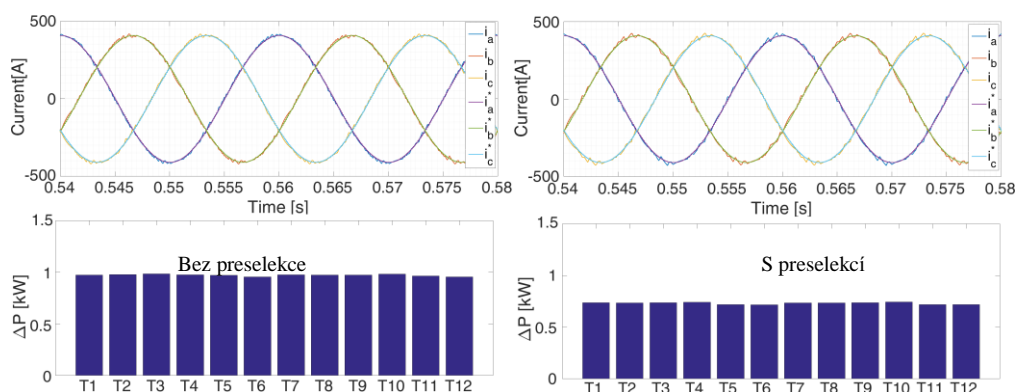
IV. SIMULACE

Simulace byly provedeny pro měnič a zátěž s následujícími parametry:

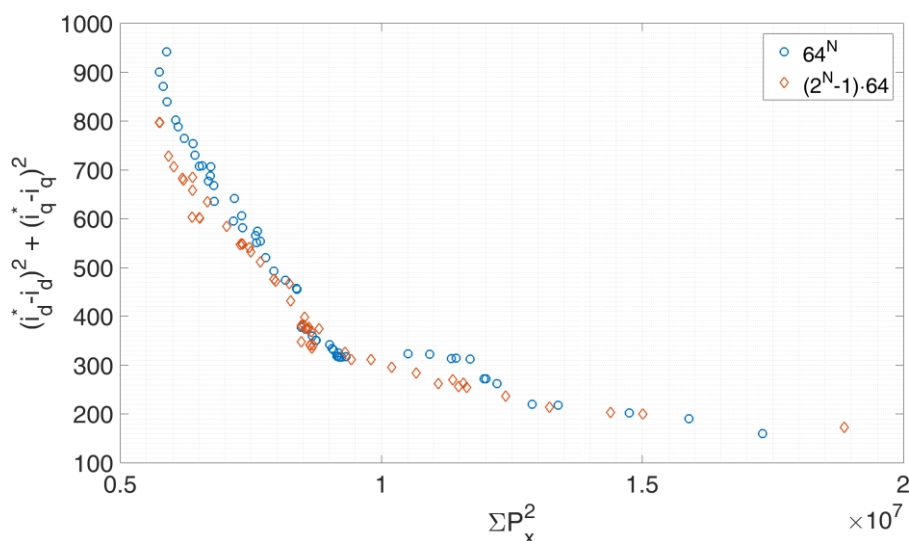
$$\begin{aligned} U_{dc1} = U_{dc2} = 3 \text{ kV} & \quad R = 8 \Omega & \quad L = 8 \text{ mH} & \quad E_{off} = 5 \text{ mJA}^{-1} & \quad u_{T0,T} = 2,1667 \text{ V} \\ E_{on} = 6,7 \text{ mJA}^{-1} & \quad r_{T,T} = 2,4 \text{ m}\Omega & \quad E_{rr} = 4 \text{ mJA}^{-1} & \quad r_{T,D} = 1,5 \text{ m}\Omega & \quad u_{T0,D} = 1,8571 \text{ V} \end{aligned}$$

Délka predikčního horizontu byla u algoritmu bez preselekcce zvolena $N=3$. Pro dosažení přibližně stejné výpočetní náročnosti byla u preselekcce zvolena $N=12$. Na Obrázku III jsou zleva pro algoritmus bez preselekcce a algoritmus s preselekcí zobrazeny v prvním řádku průběhy požadovaného a simulovaného průběhu proudu a v druhém řádku ztráty jednotlivých tranzistorů. Prodloužení horizontu s preselekcí vede k snížení ztrát a k navýšení odchylky proudu. Pro detailnější porovnání byla na obrázku IV zpracována závislost $(i_{d,k+1} - i_{d,k}^*)^2 + (i_{q,k+1} - i_{q,k}^*)^2$ na $\sum \lambda_x \cdot P_x^2$. Je patrné, že v oblasti

nízkých ztrát lze při stejných ztrátách dosáhnout delším horizontem menšího zkreslení proudu.



Obrázek III. Průběh fázových proudů zátěže a ztráty jednotlivých tranzistorů



Obrázek IV. Závislost $(i_{d,k+1}^* - i_{d,k}^*)^2 + (i_{q,k+1}^* - i_{q,k}^*)^2$ na $\Sigma \lambda_x \cdot P_x^2$

V. ZÁVĚR

V práci byla představena modifikace prediktivního řízení zaměřeného řízení duálního měniče. Navrhovaná modifikace umožňuje zároveň řídit veličiny s rozdílnou časovou konstantou jako ztráty jednotlivých elementů a proud zátěže. Navržená preselekcce snižuje výpočetní náročnost a umožňuje snížení ztrát při zachování přesného řízení proudu zátěží.

PODĚKOVÁNÍ

Tento článek vznikl za podpory interního projektu na podporu studentských vědeckých konferencí SVK-2017-008 a projektu SGS-2015-038: Výzkum a vývoj perspektivních technologií v elektrických pohonech a strojích II.

LITERATURA

- [1] K. Corzine, S. Sudhoff, and C. Whitcomb, “Performance characteristics of a cascaded two-level converter,” *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 14, no. 3, pp. 433–439, 1999.
- [2] J. Rodriguez and P. Cortes, *Predictive control of power converters and electrical drives*, vol. 40. John Wiley & Sons, 2012.