

Anti-windup kompenzace LQ řízení jednofázového měniče s LCL filtrem

Štěpán Bláha, Tomáš Komrská, Václav Šmídl, Zdeněk Peroutka

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Fakulta elektrotechnická

Západočeská univerzita v Plzni

blahast@kev.zcu.cz, komrská@rice.zcu.cz, vsmidl@rice.zcu.cz, pero@kev.zcu.cz

Anti-windup compensation of LQ control of single-phase converter with LCL filter

Abstract – The aim of this article was to describe design and verification of anti-windup compensation for LQ control of single-phase converter with LCL filter. The Matlab environment is used for verification of proposed design.

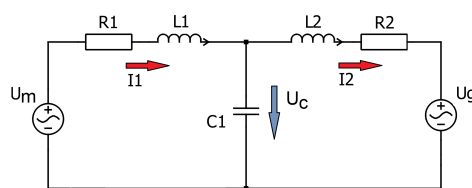
Keywords – LQ control; Anti-windup; LCL filter; state variable.

I. ÚVOD

Výkonové polovodičové měniče s LCL filtrem připojené na rozvodnou síť mají v současné době široké uplatnění a to jednak v oblasti distribuovaných zdrojů elektrické energie, kde slouží jako rozhraní mezi rozvodnou sítí a zdrojem, ale také v celé řadě dalších aplikací. Mezi takové aplikace může patřit například řízení toku výkonu, korekční systémy nebo aktivní filtry a to jako třífázové tak i jednofázové varianty. Široké spektrum použití výkonových polovodičových měničů klade velké nároky na jejich řízení. Jedním z možných způsobů řízení je tzv. LQ (Linear Quadratic) řízení doplněné o Anti-windup kompenzaci [1], [2].

II. MATEMATICKÝ POPIS

Celý systém jednofázového měniče s LCL filtrem připojený na síť lze nahradit ekvivalentním schématem (Obr.I), které slouží k definování základních stavových rovnic systému. Napěťový zdroj U_g reprezentuje napětí sítě (napětí na sekundárním vinutí transformátoru) a zdroj U_m představuje výstupní napětí měniče. Stavovými proměnnými jsou proudy indukčností i_1, i_2 , napětí kondenzátoru u_c , napětí sítě u_g a jeho derivace u'_g .



Obrázek I. Schéma zapojení

Stavový popis systému je uveden v maticovém tvaru (1). První část reprezentuje stavové rovnice pro dvě napěťové smyčky a jeden proudový uzel. Druhá část stavového

popisu představuje reprezentaci napětí sítě prostřednictvím harmonického oscilátoru.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ u_c \\ u_g \\ u'_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_1}{L_1} & 0 & \frac{-1}{L_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-R_2}{L_2} & \frac{1}{L_2} & \frac{-1}{L_2} & 0 \\ \frac{1}{C} & \frac{-1}{C} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -\omega^2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ u_c \\ u_g \\ u'_g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u_m \quad (1)$$

$$x' = Ax + Bu_m \quad (2)$$

Pro určení regulátoru K_{LQ} LQ řízení byl stávající model systému (1) reprezentovaný maticí A rozšířen o referenci na požadovaný proud i_2^* , pro kterou je využit netlumený harmonický oscilátor (3).

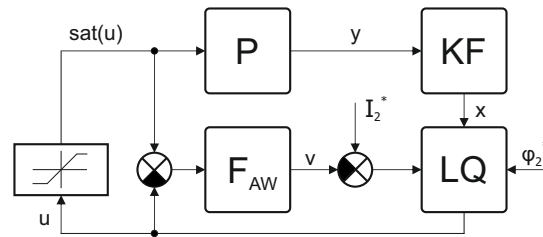
$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ i_2^* \\ i_2^{*'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\omega_{(1)}^2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ i_2^* \\ i_2^{*'} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u_m \quad (3)$$

Výsledné LQ řízení má tvar (4), kde K_{LQ} je vlastní regulátor a x_e je stavový vektor x rozšířený o referenci na požadovaný proud i_2^* a její derivaci $i_2^{*'}$.

$$u = -K_{LQ} \cdot x_e \quad (4)$$

III. ANTI-WINDUP KOMPENZACE

Každý reálný řídicí systém má omezené schopnosti zásahu jako například maximální napětí na stejnosměrné straně měniče. Tyto omezení mohou mít zásadní vliv na chování zpětnovazebního systému především z pohledu saturace řídicí veličiny. Z tohoto důvodu je do řízení zavedena tzv. anti-windup kompenzace [1], jejímž úkolem je zpomalení reakce zpětnovazebního systému vedoucí ke stabilizaci celého systému. Obr.II představuje implementovanou strukturu anti-windup kompenzace, kde P reprezentuje řízený systém, KF zastupuje Kalmanův filtr pro estimaci stavů systému. Blok LQ představuje řízení a F_{AW} je vlastní anti-windup kompenzace.



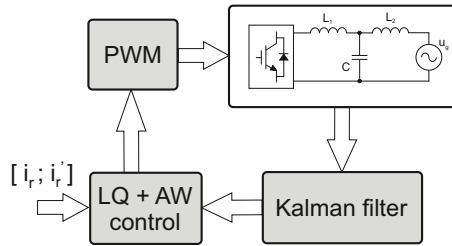
Obrázek II. Struktura anti-windup kompenzace

Popis anti-windup kompenzace je uveden soustavou rovnic (5), kde i_2^* představuje referenci vyjádřenou v časové oblasti. Od amplitudy této reference I_2^* je odečtena výsledná anti-windup kompenzace v . Pokud není výstup řízení u v saturaci, anti-windup kompenzace do řízení nezasahuje. V opačném případě provede kompenzaci amplitudy referenční veličiny tak, aby systém dosáhl stabilního stavu.

$$\begin{aligned} v &= F_{AW} [sat(u) - u] \\ i_2^* &= (I_2^* - v) \sin(\omega t + \varphi_2^*) \\ i_2^{*'} &= \omega (I_2^* - v) \cos(\omega t + \varphi_2^*) \end{aligned} \quad (5)$$

IV. OVĚŘENÍ NA MATEMATICKÉM MODELU

Pro ověření vlastností a funkce anti-windup kompenzace byl využit matematický model, který byl postaven na základě výše zmíněných vztahů. Blokový diagram matematického modelu je uveden na obr. III. Celý model lze rozdělit do celkem 4 částí. První dvě části tvoří PWM modulátor a blok představující jednofázový měnič s LCL filtrem připojený na síť. Další částí je blok Kalmanova filtru, který je využit k estimování stavových veličin, především stavu síťového napětí. Poslední část tvoří vlastní blok LQ řízení doplněný o anti-windup kompenzaci. Základní parametry celého modelu jsou pak představeny v tabulce (I).



T_s	$50\mu s$
LCL	$2 \times 500\mu H, 60\mu F$
f_{pwm}	$20kHz$
V_{dc}	$1,25 \cdot V_{ac}$
V_{ac}	$230V_{rms}$

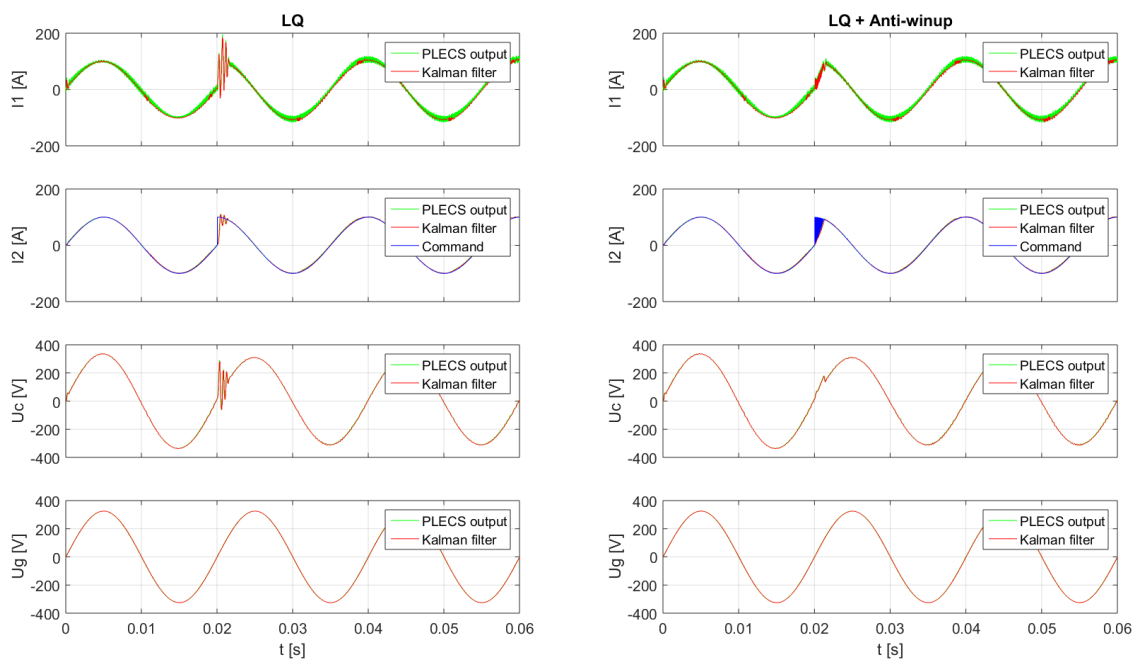
Tabulka I. Parametry modelu

Obrázek III. Blokový diagram modelu

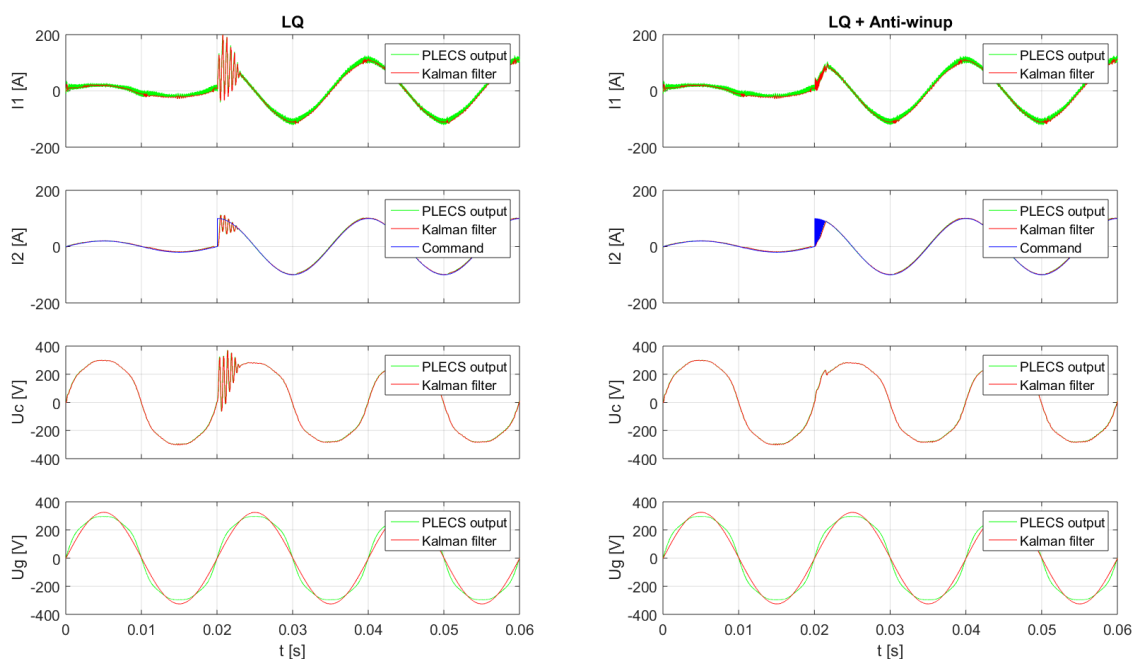
Vzhledem k tomu, že byla reference na požadovaný proud reprezentována formou netlumeného oscilátoru, je vstupem do bloku LQ řízení vektor dané reference i_r a její derivace i_r' . Funkce anti-windup kompenzace byla ověřena s využitím dvou typů dynamické změny požadované reference.

V prvním případě (IV) byla ponechána konstantní amplituda požadavku a došlo pouze ke změně fáze o 90° v čase $20ms$. Napětí sítě v tomto případě obsahovalo pouze první harmonickou složku. Druhý typ dynamické změny (V) reference obsahoval kromě fázové změny o 90° také změnu amplitudy z 20A na 100A v čase $20ms$. Při této zkoušce obsahovalo napětí sítě již další vyšší harmonické (3.,5.,7.).

V obou případech je porovnán průběh základních stavových veličin při použití anti-windup kompenzace a při použití samotného LQ řízení.



Obrázek IV. LCL filtr - výstupy



Obrázek V. LCL filtr - výstupy 2

V. ZÁVĚR

Cílem této práce bylo ověřit funkci anti-windup kompenzace ve spojení s LQ řízením jednofázového měniče připojeného na síť prostřednictvím LCL filtru. V první fázi byl představen matematický popis systému a struktura anti-windup kompenzace. Za účelem posouzení funkce této kompenzace byla simulačně ověřena reakce systému na různé druhy vstupního požadavku. Z výsledků je patrné, že rozšíření LQ řízení o anti-windup kompenzaci vedlo ke snížení oscilací stavových veličin systému a tím ke zvýšení jeho celkové stability. V další fázi bude daný řídicí algoritmus implementován a proběhne experimentální měření na prototypu.

PODĚKOVÁNÍ

Tento článek vznikl za podpory interního projektu na podporu studentských vědeckých konferencí SVK-2016-006 a projektu SGS-2015-038: Výzkum a vývoj perspektivních technologií v elektrických pohonech a strojích II.

LITERATURA

- [1] ZACCARIAN, Luca. a Andrew R. TEEL. *Modern anti-windup synthesis*. Princeton: Princeton University Press, 2011. ISBN 978-069-1147-321.
- [2] PARKER, Stewart G. *Discrete Time Current Regulation of Grid Connected Converters with LCL Filters*. Melbourne, 2014. RMIT University.