

Trojfázový striedač s LCL filtrom pripojený do siete

Grid-Connected Three-Phase Inverter With LCL Filter

Marek Pástor¹, Gergő Lénárt²¹marek.pastor@tuke.sk, ²gergo.lenart@student.tuke.sk^{1,2}Katedra elektrotechniky a mechatroniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach, Letná 9, Košice

Abstrakt—Článok sa zaoberá návrhom trojfázového striedača s LCL filtrom pripojeného do siete. Návrh je riešený na úrovni dimenzovania výkonovej časti meniča, LCL filtra a realizácii riadenia prúdu dodávaného do siete v točivých súradniciach s PI regulátorom. LCL filter obsahuje pasívne tlmenie. Článok opisuje výsledky merania na laboratórnom modeli meniča.

Kľúčové slová—LCL filter, striedač, sieť, regulátor

Abstract—The paper deals with design of a grid-connected three-phase inverter with LCL filter. The design is at the level of power part and LCL filter selection and realization of grid supplied current control in rotating reference frame with the PI controller. The LCL filter contains passive damping. The paper describes measurement results from laboratory model.

Keywords—LCL filter, inverter, grid, controller

I. ÚVOD

Výkonová elektronika zaznamenáva s rozširujúcim sa využívaním obnoviteľných zdrojov, zvyšujúcimi sa požiadavkami na kvalitu elektrickej energie a účinnosť jej premeny ako aj stále prísnejšími požiadavkami na spätný vplyv meničov na elektrickú sieť stále väčšiu pozornosť. Využívanie obnoviteľných zdrojov energie by bolo bez výkonovej elektroniky buď nemožné alebo veľmi náročné.

Z dôvodu existencie striedavej elektrickej sústavy je potrebné zmeniť jednosmerné napätie generované obnoviteľnými zdrojmi energie na striedavé. Pre tento účel sa využívajú striedače. V závislosti od výkonu fotovoltaického generátora je použitý buď jednofázový alebo trojfázový striedač.

Pre riadenie výstupného napätia striedačov je v praxi najčastejšie používaná šírko-impulzová modulácia. Dôvodom je jej jednoduchá realizácia, konštantná spínacia frekvencia, ktorá uľahčuje návrh filtrov a definované spektrum vyšších harmonických napätia.

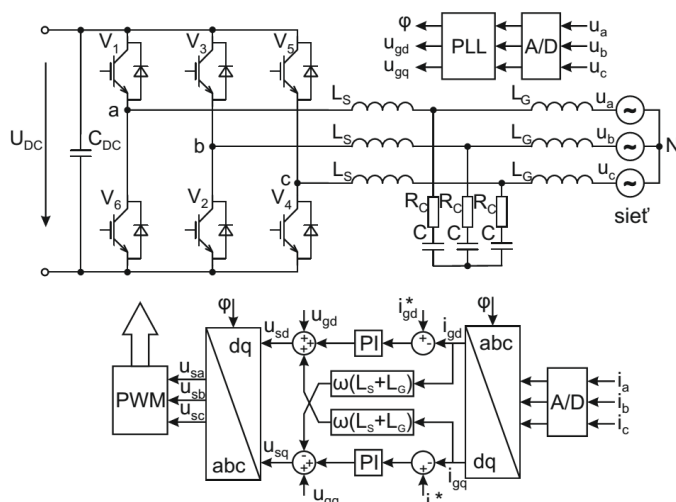
Napätový striedač, riadený širokovo-impulzovou moduláciou, potrebuje na svojom výstupe filter indukčného charakteru. Filter jednak zabezpečuje indukčnú záťaž pre napätový striedač a zároveň slúži na potlačenie vyšších harmonických vznikajúcich v dôsledku šírko-impulzovej modulácie. [1-2]

V prípade striedača pripojeného do siete je potreba regulovať jeho výstupný prúd. Pre tento účel sú najčastejšie využívané klasické riadiace štruktúry. Pre trojfázové systémy je v prípade použitia PI regulátora potrebné transformovať systém do točivého dvojfázového súradnicového systému.

II. OPIS SYSTÉMU

A. Schéma trojfázového striedača s LCL filtrom

Principiálna schéma trojfázového striedača pripojeného do siete cez LCL filter je znázornená na Obr. 1. Trojfázový napätový striedač je napájaný z jednosmerného zdroja, ktorým môže byť napr. fotovoltaický generátor. Obr. 1 zároveň zobrazuje aj základnú schému riadiacej časti meniča. Riadenie neobsahuje časti pre odpojenie v prípade vzniku ostrovného systému, sieťové ochrany a pod.



Obr. 1. Schéma trojfázového striedača pripojeného do siete cez LCL filter

B. Trojfázový mostikový napätový striedač

Trojfázový striedač s mostikovou topológiou je riadený pomocou sínusovej šírko-impulzovej modulácie. Amplitúda fázového napätia je tak určená vzťahom:

$$U_{aN \max} = 0,354U_{DC} \quad (1)$$

Parametre navrhnutého striedača sú uvedené v Tabuľke I.

TABUĽKA I PARAMETRE TROJFÁZOVÉHO STRIEDAČA

Parameter	Hodnota	Jednotka
Zdnalivý výkon S	1,5	kVA
Účinník $\cos \varphi$	$\pm 0,9$	-
Spínacia frekvencia f_s	16	kHz
Napätie medziobvodu U_{DC}	750	V
Fázové napätie siete U_a	230	V
Fázový prúd I_a	2,174	A
Frekvencia siete f_g	50	Hz

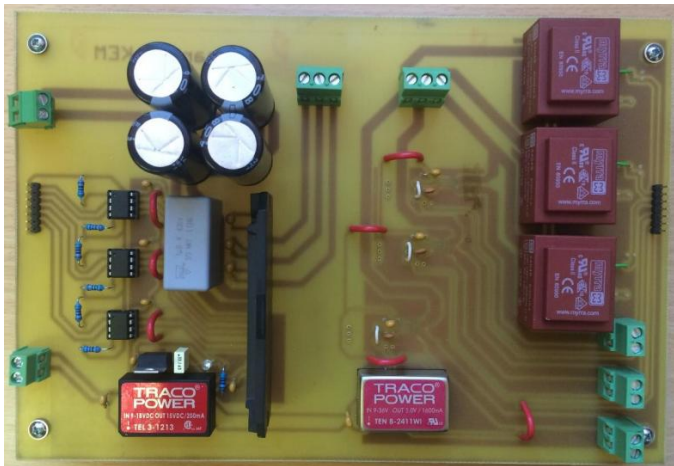
Na základe uvedených parametrov striedača bola dimenzovaná jeho výkonová časť [3]. Maximálna efektívna hodnota prúdu jedného tranzistora bude dosiahnutá pri amplitúdovom modulačnom indexe $m_a = 1$ a účinníku $\cos\varphi = \pm 0,9$:

$$I_{V(rms)} = I_{a(max)} \sqrt{\left(\frac{1}{8} + \frac{m_a \cos\varphi}{3\pi}\right)} = 2,174\sqrt{2} \sqrt{\left(\frac{1}{8} + \frac{\cos 0,9}{3\pi}\right)} = 1,444 A \quad (2)$$

Kapacita kondenzátora napäťového medziobvodu bola zvolená na základe vzťahu pre zvlnienie napätia medziobvodu 5%:

$$C_{DC} = \frac{S}{U_{DC}\Delta U_{DC}2f_g} = \frac{1500}{750 \cdot 37,5 \cdot 2 \cdot 50} = 533 \mu F \quad (3)$$

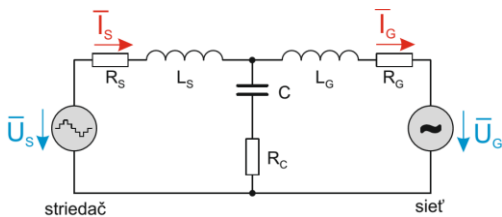
Ako výkonová časť striedača bol zvolený integrovaný bezpotenciálový modul IRAMY20PU60B. Na snímanie sieťového prúdu boli použité snímače s Hallovými sondami ACS712TELC-20A. Na snímanie sieťového napätia boli použité sieťové transformátory Myrra 44049. kapacitro jednosmerného obvodu bol tvorený paralelným zapojením 4 x 150 μF .



Obr. 2. Laboratórny model trojfázového mostikového striedača

C. LCL filter s pasívnym tmením

Vyššie harmonické produkované šírko-impulzovou moduláciou sú potlačené pasívnym filtrom. Pre meniče pripojené do siete majú význam filtre typu L a LCL. Filter typu L má tlenie 20 dB/dek. Filter type LCL má tlenie 60 dB/dek. Vyššie tlenie LCL filtra je hlavným dôvodom pre jeho častú aplikáciu v meničoch pripojených do siete. LCL filter (Obr. 3) obsahuje 3 reaktívne prvky, ktoré formujú rezonančný obvod [4].



Obr. 3. Schéma LCL filtra

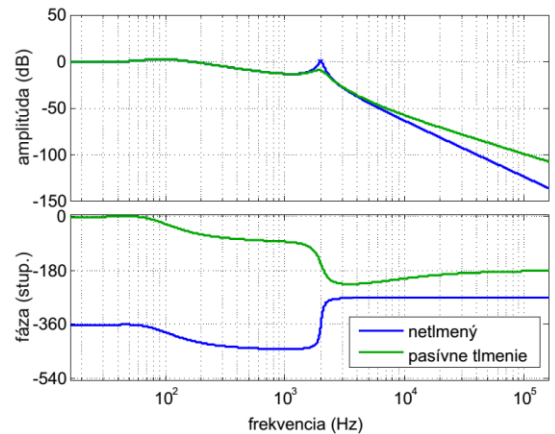
Hlavná rezonančná frekvencia LCL filtra je definovaná vzťahom:

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_s + L_G}{L_s L_G C}} \quad (4)$$

Tlenie rezonancie filtra je možné dosiahnuť pridaním tlmiaceho rezistora R_C . Jeho hodnota sa najčastejšie volí ako 1/3 impedancie kapacitro C na rezonančnej frekvencii:

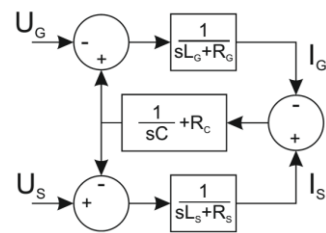
$$R_C = \frac{1}{3} \frac{1}{2\pi f_r C} \quad (5)$$

Pridanie pasívneho tlenia zhorší útlm filtra pre frekvencie vyššie, ako je rezonančná frekvencia filtra a zároveň spôsobí prídavné straty. Pre tieto nedostatky je pasívne tlenie nahradzané tlením aktívnym, prípadne ich kombináciou. Porovnanie frekvenčných charakteristík netlmeného a pasívne tmeného LCL filtra je uvedená na Obr. 4.



Obr. 4. Frekvenčné charakteristiky netlmeného a tmeného LCL filtra

Pre návrh regulátorov prúdu je potrebné poznať obrazový prenos systému. Ten je tvorený prenosom striedača a prenosom LCL filtra spolu so snímačmi. Prenos striedača je uvažovaný jednotkový. Obrazová schéma pre odvodenie prenosu LCL filtra je uvedená na Obr. 5.



Obr. 5. Obrazová schéma LCL filtra

$$\frac{I_G}{U_s} = \frac{1 + sCR_C}{s^3 L_s L_G C + s^2 (L_s CR_G + R_s CL_G + R_C CL_G + L_s CR_C) + s(R_s CR_G + L_s + L_G + R_s R_C C + R_C CR_G) + R_s + R_G} \quad (6)$$

Vynechaním členov s minimálnou hodnotou sa prenos LCL filtra pre frekvenciu siete zjednoduší na:

$$\left. \frac{I_G}{U_s} \right|_{LL} = \frac{1}{s(L_s + L_G) + R_s + R_G} \quad (7)$$

Parametre navrhnutého LCL filtra dimenzovaného pre zdánlivý výkon 1,5 kVA sú uvedené v Tabuľke II. Filter bol navrhnutý na základe požadovaného zvlnienia prúdu striedača a rezonančnej frekvencie f_r .

TABUĽKA II PARAMETRE LCL FILTRA

Parameter	Hodnota	Jednotka
Indukčnosť na strane striedača L_s	5,2	mH
Indukčnosť na strane siete L_s	2,6	mH
Kapacita C	4	μ F
Odpor indukčora R_s	10	m Ω
Odpor indukčora R_G	10	m Ω
Tlmiaci rezistor R_C	10	Ω
Rezonančná frekvencia f_r	1,9	kHz
Zvlnenie prúdu striedača ΔI_s	20	%



Obr. 6. Laboratórny model trojfázového LCL filtra s pasívnym filtrom

III. REGULÁCIA SIEŤOVÉHO PRÚDU

Vyššie opísaný LCL filter má za úlohu zabezpečenie požadovaného harmonického skreslenia prúdu, ktoré je normou IEC 61727 obmedzené na 5%. Samotná regulácia veľkosti a fázového posunu prúdu je zabezpečená regulátorom prúdu. Regulátor musí byť schopný spracovať a regulovať striedavé veličiny. Takýto regulátor teda môže pracovať buď v točivých alebo stacionárnych súradniciach. V stacionárnych súradniciach sú realizované proporcionálno-rezonančné (PR) regulátory hlavne pre jednofázové systémy. V prípade trojfázového systému je možné využitím vhodnej transformácie súradnicového systému pracovať v točivých súradniciach a využívať proporcionálno-integračné (PI) regulátory. V tomto článku je využitá transformácia do točivých súradníc dq a následná regulácia sieťového prúdu pomocou PI regulátorov.

Pre zabezpečenie požadovaného fázového posunu sieťového prúdu, a tým aj účinníka, je potrebná synchronizácia striedača s elektrickou sieťou. Pre tento účel je využitá slučka fázového závesu (PLL). Tento je tiež realizovaný v točivých súradniciach.

Pre transformáciu sieťových prúdov i_a , i_b , a i_c (a obdobne aj sieťových napätí u_a , u_b a u_c) do točivých súradníc i_{gd} a i_{gq} je použitá nasledovná transformácia:

$$\begin{bmatrix} i_{gd} \\ i_{gq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & \cos\left(\varphi - \frac{2}{3}\pi\right) & \cos\left(\varphi + \frac{2}{3}\pi\right) \\ -\sin(\varphi) & -\sin\left(\varphi - \frac{2}{3}\pi\right) & -\sin\left(\varphi + \frac{2}{3}\pi\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (8)$$

Prúdy v točivých sú následne spracované PI regulátormi s odväzbením (Obr. 1) a predkorekciou od sieťového napätia, ktoré predstavuje meranú poruchu. Akčný zásah v točivých

súradniciach (napätia u_{sd} a u_{sq}) sú následne transformované do trojfázovej sústavy abc nasledovnou transformáciou:

$$\begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) & 1 \\ \cos\left(\varphi - \frac{2}{3}\right) & -\sin\left(\varphi - \frac{2}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \end{bmatrix} \quad (9)$$

A. Návrh PI regulátora

Transformácie točivých súradníc vytvoria jednosmerné veličiny a umožnia použiť PI regulátory pre obe zložky prúdu bez trvalej regulačnej odchýlky. Pri návrhu PI regulátora sa vychádza z prenosu LCL filtra za základnej sieťovej frekvencie definovaného (7). Prenos LCL filtra sa tým zjednodušil z prenosu sústavy tretieho rádu na prenos sústavy prvého rádu s časovou konštantou:

$$T_{LCL} = \frac{L_s + L_G}{R_s + R_G} \quad (10)$$

Zosilnenie prenosu tejto sústavy prvého rádu bude:

$$K_{LCL} = \frac{1}{R_s + R_G} \quad (11)$$

PI regulátor je navrhnutý tak, aby kompenzoval časovú konštantu T_{LCL} [5]. Proporcionálne zosilnenie PI regulátora je určené na základe (kde τ je požadovaná časová konštanta):

$$K_P = \frac{T_{LCL}}{\tau K_{LCL}} \quad (12)$$

Integračné zosilnenie PI regulátora je definované na základe:

$$K_I = \frac{K_P}{T_{LCL}} \quad (13)$$

PI regulátor je implementovaný v diskretnej forme s dobou vzorkovania T . Akčný zásah $u_s(kT)$ je určený na základe vzťahu:

$$u_s(kT) = u_s(kT-1) + K_1 e(kT) + K_2 e(kT-1) \quad (14)$$

kde e predstavuje regulačnú odchýlku a konštanty K_1 a K_2 sú definované:

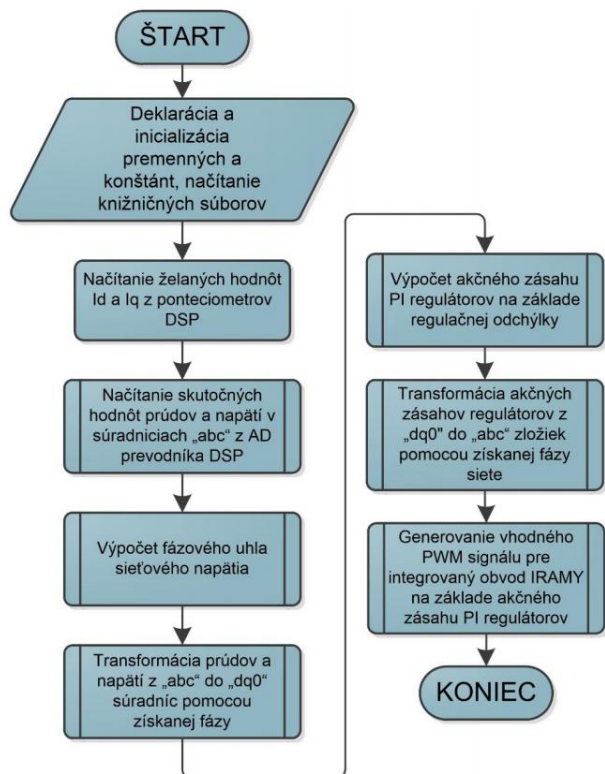
$$\begin{cases} K_1 = K_P + K_I T/2 \\ K_2 = -K_P + K_I T/2 \end{cases} \quad (15)$$

TABUĽKA III PARAMETRE PI REGULÁTORA

Parameter	Hodnota	Jednotka
Proporcionálne zosilnenie K_P	7,871	-
Integračné zosilnenie K_I	20	-
Konštanta dynamiky τ	1	ms
Diskrétne zosilnenie K_1	7,8712	-
Diskrétne zosilnenie K_2	-7,8708	-
Periódna vzorkovania T	20	μ s

Riadenie striedača bolo realizované pomocou digitálneho signálového procesora (DSP) Texas Instruments. DSP zabezpečoval snímanie veličín, synchronizáciu so sieťou prostredníctvom slučky PLL, transformácie veličín do/z točivých súradníc

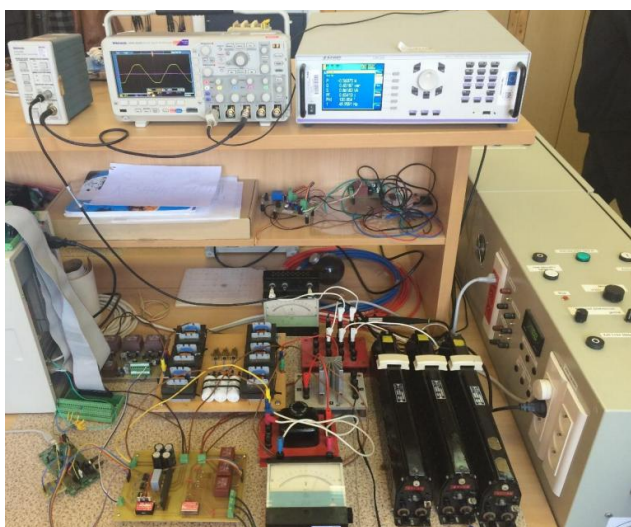
a PI reguláciu. Riadiaci program DSP bol tak pomerne komplexný. Riadiaci algoritmus je stručne opísaný na Obr. 7.



Obr. 7. Zjednodušený riadiaci algoritmus DSP

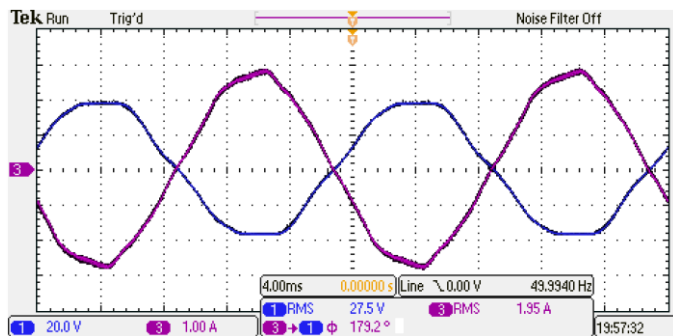
IV. MERANIE NA LABORATÓRNOM MODELI

Činnosť navrhnutého striedača bola overená meraním na laboratórnom modeli (Obr. 8). Na overenie synchronizácie so sieťou a meranie dodávaného výkonu a harmonického skreslenia prúdu bol použitý digitálny osciloskop Tektronix MSO 2024B a digitálny analyzátor výkonu Zimmer LMG500.



Obr. 8. Meranie na laboratórnom modeli striedača

Činnosť striedača bola overená pri zníženom napätí $U_{DC} = 100$ V a fázovom napätí siete $U_S = 28$ V.



Obr. 9. Napätie (kanál 1) a prúd siete (kanál 3): $I_a = 2$ A, $THDi = 3$ %, $\cos \varphi = 0,992$

V. ZÁVER

Článok opisuje návrh, realizáciu a meranie na laboratórnom modeli trojfázového striedača s LCL filtrom pripojeného do siete. Navrhnutý striedač dokáže dodávať regulovaný prúd do elektrickej siete. Striedač vznikol v rámci riešenia diplomovej práce na Katedre elektrotechniky a mechatroniky a umožňuje ďalší vývoj v rámci sieťových meničov. V budúcnosti je možné pridať aktívne tlmenie LCL filtra, sieťové ochrany, reguláciu napätia medziobvodu a pod.

POĎAKOVANIE

Túto prácu podporila Vedecká grantová agentúra Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky a Slovenskej akadémie vied grantom VEGA 1/0464/15. Práca bola podporená projektom FEI-2015-3.

POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] R.T.H. Li, H.H.S.-H. Chung, "Output Current Control for Grid-connected VSI with LCL Filter", *Proc. Power Electronics Conference (IPEC), 2010 International*, s. 1665-1670, 2010
- [2] Y. Tang, P. Ch. Loh, P. Wang, F. H. Choo, F. Gao, F. Blaabjerg, "Generalized Design of High Performance Shunt Active Power Filter With Output LCL Filter", *IEEE Trans. Industrial Electronics*, ročník 59, číslo 3, s. 1443-1452, 2012
- [3] J. Dudrik, *Konštrukcia a dimenzovanie meničov – podklady na prednášky*. Košice: TU, FEI, 132 s., 2015
- [4] W. Zhao and G. Chen, "Comparison of Active and Passive Damping Methods for Application in High Power Active Power Filter with LCL-filter", in *Proc. Sustainable Power Generation and Supply, 2009*.
- [5] M. Pástor, J. Dudrik, "Comparison of MPC and PI controller for grid-connected cascade inverter", *Elektronika ir Elektrotechnika*, ročník 20, číslo 6, s. 46-50, 2014



M. Pástor titul PhD. získal na Technickej univerzite v Košiciach v odbore silnoprúdová elektrotechnika v roku 2014. V súčasnosti pôsobí ako odborný asistent na Katedre elektrotechniky a mechatroniky so zameraním na výkonovú elektroniku.



G. Lénárt absolvoval Technickú univerzitu v Košiciach, kde v roku 2016 získal na Katedre elektrotechniky a mechatroniky titul Ing. V súčasnosti pracuje vo firme BSH Michalovce, kde sa venuje vývoju softvéru pre embedded systémy.