

# Analiza delovanja napetostnega stabilizatorja MVB z uporabo enofaznih ortogonalnih razstavitev toka

Silvo Ropoša<sup>1</sup>, Gorazd Štumberger<sup>2</sup>, Miran Rošar<sup>3</sup>, Boris Unuk<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Elektro Maribor d.d.

<sup>2</sup> Univerza v Mariboru, FERI

<sup>3</sup> Elektro Celje d.d.

E-pošta: silvo.roposa@elektro-maribor.si

**Povzetek.** Za reševanje neustreznih napetostnih razmer v nizkonapetostnih omrežjih je mogoče uporabiti napetostne stabilizatorje (MVB – Magtech Voltage Booster), ki pa povzročajo tudi harmonska popačenja toka in napetosti. V prispevku je na podlagi meritve časovnih potekov tokov in napetosti izvedena analiza delovanja MVB in ovrednotenje njegovega vpliva na distribucijsko omrežje. Meritev kakovosti električne energije in uporaba klasičnega koncepta delovne, jalove in navidezne moči ter delovnega, jalovega in navideznega toka ne omogočajo ustreznega ovrednotenja dodatnih izgub pri prenosu električne energije, ki jih s harmonskim popačenjem toka in napetosti povzročajo nelinearni elementi v omrežju. Za dani primer je z enofazno ortogonalno razstavitvijo toka določen tisti del toka, ki je potreben za usmerjen prenos električne energije, in tisti del toka, ki k usmerjenemu prenosu energije ne prispeva ničesar, povzroča pa izgube. Ortogonalne komponente toka so uporabljene za določitev pripadajočih komponent moči. Primerjava tako določenih moči z delovno, jalovo in navidezno močjo, ki so določene v skladu s klasičnimi definicijami moči za osnovno harmonsko komponento, je ovrednoten vpliv dodatnih izgub, ki jih povzročajo višje harmonske komponente toka.

**Ključne besede:** kakovost električne energije, napetostni stabilizator, izgube, ortogonalne razstavitve toka

## Analysis of the Magtech voltage booster operation performed by the single-phase orthogonal decomposition of currents

**Extended abstract.** The Magtech Voltage Booster (MVB), described in Section 2, Figs. 1, 2 and 3, is a fast and economically acceptable solution for improving voltage conditions in low-voltage distribution networks where the voltage level is insufficient. One of the side effects caused by the operation MVB is increased total harmonic distortion of currents and voltages which increases losses related with energy transmission.

In the single-phase and in three-phase electric systems, where currents and voltages contain higher order harmonic components, classic definitions for active, reactive and apparent power are unsuitable. In this case, the power quality measurements in the electric system are not enough to determine all losses in the system. Therefore, the waveforms of the currents and voltages have to be determined by measurements.

Due to the presence of higher order harmonic components in the measured signals, power analysis based on the orthogonal decomposition of currents in the time domain is performed in Section 3, equations (1) to (16). The analysis performed in this paper and results shown in Figs. 4 to 9 and Tables 1 and 2 clearly shows that the impact of MVB on harmonic distortion and power losses related with energy transmission is much higher when proper mathematical tools are applied than in the cases when classical power quality analysis is performed.

**Keywords:** power quality, voltage booster, losses, orthogonal decomposition of currents

### 1 Uvod

Pogost problem v nizkonapetostnih (NN) distribucijskih omrežjih je doseganje predpisanega nivoja napetosti. V letu 2008 je bil v nekaterih slovenskih distribucijskih omrežjih uveden napetostni stabilizator za nizkonapetostna omrežja (Magtech Voltage Booster oziroma MVB). Izkazalo se je, da omenjeni stabilizator v večini primerov zadovoljivo rešuje probleme prenizke napajalne napetosti pri odjemalcih. S pomočjo terciarnega navitja v vezavi trikot naprava na svojem izhodu poskrbi tudi za izenačevanje napetosti trifaznega sistema. Zaradi načina svojega delovanja stabilizator v elektroenergetsko omrežje vnaša tudi neželene motnje, ki so najbolj izrazite v dodatnem harmonskem popačenju tokov in napetosti ter nekoliko povečani tokovni nesimetriji v delu omrežja pred njim. Na izhodu naprave pa le-ta nekoliko povečuje tudi fliker. Prisotnost višjih harmonskih komponent pri prenosu električne energije po nepotrebnem povzroča dodatne izgube, ki predstavljajo dodatni strošek distribucijskih podjetij.

Usmerjen pretok energije in recipročno pretakanje energije med izvori in porabniki je v enofaznem sistemu, v katerem toki in napetosti vsebujejo zgolj osnovno harmonsko komponento, mogoče zadovoljivo obravnavati s konceptom delovne in jalove moči ter

delovnega in jalovega toka. Če pa imamo opravka z nesimetričnim trifaznim sistemom z višjimi harmonskimi komponentami tokov in napetosti, pa ta koncept odzove. V omenjeno kategorijo spada tudi distribucijsko NN-omrežje z vgrajenim MVB. Posebej problematična je določitev toka, ki k usmerjenemu pretoku energije ne prispeva ničesar, zaradi njegove prisotnosti pa v sistemu nastajajo dodatne izgube.

V elektrotehniki bile so v preteklosti zelo hitro sprejete definicije za tok in napetost ter za trenutno in delovno moč. Vse omenjene definicije imajo fizikalni pomen. Prav tako sta bili sprejeti tudi definiciji za jalovo in navidezno moč v sistemih z izključno osnovnima harmonskima komponentama toka in napetosti [1]. Splošno sprejete definicije jalove moči v enofaznih dvožičnih sistemih z višjimi harmonskimi komponentami toka in napetosti pa še vedno ni. Sicer obstaja nekaj definicij, od katerih ena najbolj uveljavljenih trdi, da je celotna jalova moč definirana kot vsota jalovih moči posameznih harmonskih komponent. Vendar pa je bilo v [2] pokazano, da se med izvori in porabniki lahko pretakajo jalovi toki, ki povzročajo padce napetosti na notranjih upornostih izvorov in nepotrebne jouske izgube v vodih, tudi v primerih, ko je celotna jalova moč enaka nič. Z uporabo ustreznih orodij [3,4] je mogoče določiti tisti del toka enofaznega ali trifaznega sistema, ki je nujno potreben za usmerjen prenos električne energije, in tisti del toka, ki k usmerjenemu prenosu energije ne prispeva ničesar, povzroča pa dodatne izgube.

Članek v nadaljevanju podaja primerjavo pretokov energije, moči in izgube, ki jih določimo s klasično obravnavo po posameznih fazah in s pomočjo ortogonalne razstavitve toka trifaznega sistema.

## 2 Napetostni stabilizator MVB

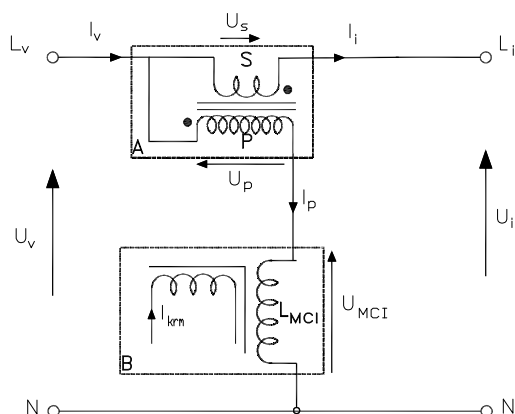
MVB [5,6] je naprava, ki na svojem izhodu dinamično vzdržuje nivo napetosti, ne glede na vhodno napetost in velikost odjema. Princip delovanja naprave prikazujeta sliki 1 in 2. Slika 1 podaja poenostavljeno nadomestno vezje enofaznega MVB, na sliki 2 pa je prikazan primer delovanja enofaznega MVB pri nizki vhodni napetosti.

Stabilizator se sestoji iz avtotransformatorja A s serijskim navitjem S, vezanim med vhodno točko  $L_v$  in izhodno točko  $L_i$  faznega vodnika distribucijskega omrežja ter paralelnim navitjem P, ki je vzporedno serijskemu (slika 1). V prečni veji je nameščena dušilka  $L_{MCI}$  ( $MCI = Magtech Controllable Inductance$ ), kateri lahko s spreminjanjem enosmernega toka  $I_{krm}$  spreminjamo induktanco (sklop B na sliki 1). Sestavni del naprave je tudi regulacijsko vezje, ki na slikah ni prikazano.

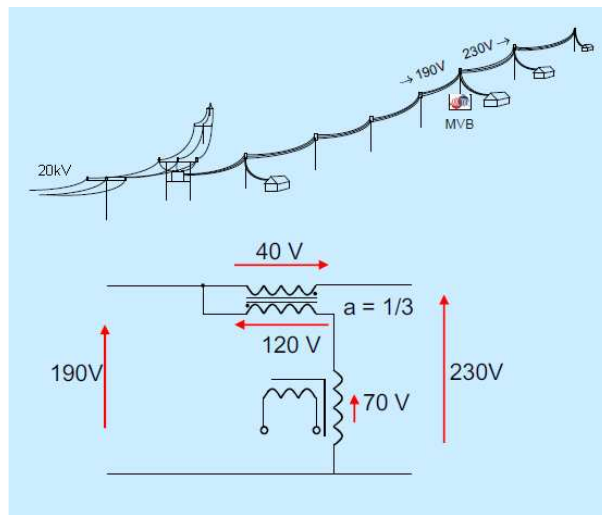
Pri sliki 2, kjer je zaradi padcev napetosti v omrežju, napetost na vhodu MVB ( $U_v$ ) 190 V, mora za zagotovitev izhodne napetosti MVB ( $U_i$ ) 230 V, napetost na serijskem navitju S ( $U_s$ ) znašati 40 V. Glede

na fiksno prestavno razmerje avtotransformatorja  $a=1/3$ , mora v tem primeru na paralelnem navitju P ( $U_p$ ) napetost znašati 120 V. To pomeni, da mora regulacijsko vezje naprave prek spreminjanja enosmernega toka  $I_{krm}$  zagotoviti ustrezno vednost induktivnosti  $L_{MCI}$ , da bo padec napetosti na njej ( $U_{MCI}$ ) znašal 70 V. Izhodna napetost MVB je sicer nastavljena na vrednost 235 V.

Na sliki 1,  $I_v$  in  $I_i$  pomenita tok na vhodu oziroma izhodu MVB,  $I_p$  pa tok, ki teče skozi prečno vejo MVB.



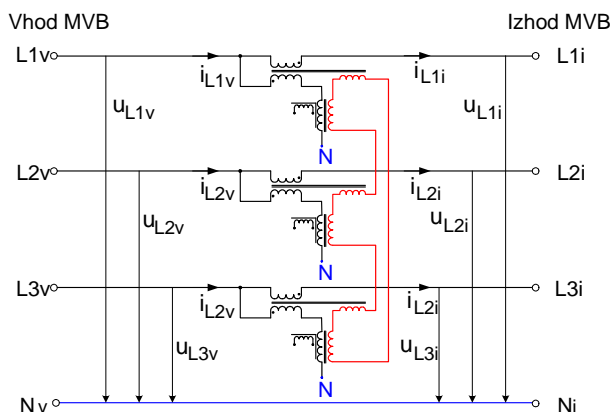
Slika 1: Poenostavljeno nadomestno vezje enofaznega MVB  
Figure 1: Basic circuit representation of a single-phase MVB



Slika 2: Delovanje MVB pri nizki vhodni napetosti  
Figure 2: Operation of MVB at a low input voltage

Trifazni stabilizator, ki ga prikazuje slika 3, dinamično prilagaja ojačenje vsake faze posebej. S prigradenimi, v trikot vezanimi terciarnimi navitji [5,6], ki so prav tako vidna s slike 3, pa MVB omogoča tudi medfazno izravnavo izhodnih napetosti.

Slika 3 hkrati prikazuje tudi shemo meritev posameznih vhodnih in izhodnih spremenljivk MVB, katerih rezultati bodo podani v poglavju 4.



Slika 3: Trifazni MVB s prigrajenim terciarnim navitjem in shema meritve časovnih potekov tokov in napetosti  
Figure 3: Three-phase MVB with a tertiary winding and measurement of currents and voltages

S pomočjo zgornje slike je mogoče tudi orisati delovanje naprave v načinu bypass ter vklopljenem načinu delovanja MVB. V načinu bypass delovanja stabilizatorja so vsa navitja v vzdolžnih vejah premoščena prek stikala, ki sicer na sliki ni prikazano. Vsa navitja v prečnih vejah so pri tem vključena v električni krog, posredno pa tudi v trikot vezana terciarna navitja za fazno izravnavo. Posledično je zaradi vključenih navitij tudi v načinu delovanja bypass harmonska slika na vходу naprave nekoliko poslabšana, kar je prikazano v nadaljevanju. Ko je MVB vključen, so vsa navitja, ki so prikazana na sliki 3, pod napetostjo.

### 3 Ortogonalne razstavitve toka v enofaznem sistemu - časovno področje in izračun moči

Naj bosta napetost  $u(t)$  in tok  $i(t)$  elementa vektorskega prostora  $C[t-T, t]$ , ki ga tvorijo zvezne funkcije definirane na intervalu  $t \in [t-T, t]$  [3]. Trenutno moč  $p(t)$  lahko v tem primeru definiramo z (1), povprečno moč  $P(t)$  z (2), efektivni vrednosti toka  $I(t)$  in napetosti  $U(t)$ , ki sta enaki normama  $\|i(t)\|$  in  $\|u(t)\|$ , pa s (3) in (4).

$$p(t) = i(t)u(t) \quad (1)$$

$$P(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t u(\tau)i(\tau)d\tau = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t p(\tau)d\tau \quad (2)$$

$$\|i(t)\| = I(t) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T}^t i(\tau)i(\tau)d\tau} \quad (3)$$

$$\|u(t)\| = U(t) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T}^t u(\tau)u(\tau)d\tau} \quad (4)$$

Vektor toka  $i(t)$  razstavimo v dve ortogonalni komponenti. Prva, ki jo označimo z  $i_u(t)$ , je kolinearna z vektorjem napetosti  $u(t)$ . Definirana je z zapisom (5).

$$i_u(t) := G(t)u(t) = \frac{P(t)}{\|u(t)\|^2} u(t) \quad (5)$$

Pri tem  $G(t)$  označuje ekvivalentno prevodnost. Druga komponenta vektorja toka je ortogonalna na vektor napetosti. Definirana je s (7) in označena z  $i_{uo}(t)$ .

$$i_{uo}(t) = i(t) - i_u(t) \quad (6)$$

Komponenti toka  $i_u(t)$  in  $i_{uo}(t)$  sta ortogonalni, kar pomeni, da velja (7).

$$\frac{1}{T} \int_{t-T}^t i_u(\tau)i_{uo}(\tau)d\tau = 0 \quad (7)$$

Ker so  $u(t)$  in  $i(t)$  ter posledično tudi  $i_u(t)$  in  $i_{uo}(t)$  vektorji vektorskega prostora  $C[t-T, t]$ , v katerem sta definirana tudi skalarni produkt in norma, lahko v danem primeru [7] vpeljemo tudi posplošeno povprečno jalovo moč  $Q'(t)$  in posplošeno povprečno navidezno moč  $S'(t)$ . Veljajo enačbe (8) in (9).

$$S'^2(t) = P^2(t) + Q'^2(t) \quad (8)$$

$$S'^2(t) = \|i(t)\|_2^2 \|u(t)\|_2^2$$

$$P^2(t) = \|i_u(t)\|_2^2 \|u(t)\|_2^2 \quad (9)$$

$$Q'^2(t) = \|i_{uo}(t)\|_2^2 \|u(t)\|_2^2$$

Pri tem sta  $Q'(t)$  in  $S'(t)$  pripomočka, s katerima lahko skušamo ponazoriti pretakanje energije med izvorom in porabnikom. Norme v (9) so izračunane s (3) in (4). Izkaže se, da sta  $S'(t)$  in  $Q'(t)$  v (9) enaki navidezni in delovni moči, če  $u(t)$  in  $i(t)$  vsebujeta zgolj osnovno harmonsko komponento. V takem primeru je mogoče razmerje med celotnim tokom  $i(t)$  in tokom  $i_u(t)$ , ki pripomore k usmerjenemu prenosu energije, izraziti s faktorjem  $\cos\varphi$  (10).

$$\cos\varphi = \frac{P_{H1}}{S_{H1}} = \frac{U_{H1}I_{H1d}}{U_{H1}I_{H1}} = \frac{\|i_u(t)\|}{\|i(t)\|} \quad (10)$$

Pri tem sta  $P_{H1}$  in  $S_{H1}$  delovna in navidezna moč osnovne harmonske komponente,  $U_{H1}$  je efektivna vrednost napetosti osnovne harmonske komponente,  $I_{H1}$  in  $I_{H1d}$  pa sta efektivni vrednosti celotnega in delovnega toka osnovne harmonske komponente.

V enofaznih sistemih, kjer toki in napetosti vsebujejo tudi višje harmonske komponente, je razmerje med celotnim tokom  $i(t)$  in tokom  $i_u(t)$ , ki pripomore k usmerjenemu prenosu energije, mogoče predstaviti s faktorjem moči  $PF$  (11). Pri tem morajo biti znane delovna moč  $P$  ter efektivni vrednosti napetosti  $U$  in toka  $I$ .

$$PF = \frac{P}{S'} = \frac{P}{UI} = \frac{\|i_u(t)\| \|u(t)\|}{\|i(t)\| \|u(t)\|} = \frac{\|i_u(t)\|}{\|i(t)\|} \quad (11)$$

Za določitev faktorja  $\cos\varphi$  (10) so bile povprečne vrednosti moči osnovne harmonske komponente izračunane s pomočjo enačb (12). Časovna poteka osnovne harmonske komponente napetosti  $u_{H1}(t)$  in toka  $i_{H1}(t)$  sta bila določena z uporabo hitre Fourierjeve transformacije (FFT).

$$\begin{aligned} S_{H1}(t) &= \sqrt{\|i_{H1}(t)\|_2^2 \|u_{H1}(t)\|_2^2} \\ P_{H1}(t) &= \frac{1}{T} \int_{t-T}^t i_{H1}(\tau) u_{H1}(\tau) d\tau \\ Q_{H1}(t) &= \sqrt{S_{H1}^2(t) - P_{H1}^2(t)} \end{aligned} \quad (12)$$

Za potrebe analize so bile določene tudi vrednosti navidezne, delovne in jalove za 40 harmonskih komponent. Tudi v tem primeru je bila izvedena FFT izmerjenih signalov  $u(t)$  in  $i(t)$ . Za izračun navedenih moči so bile uporabljene enačbe (13).

$$\begin{aligned} S_{H1-40}(t) &= \sqrt{\|i_{H1-40}(t)\|_2^2 \|u_{H1-40}(t)\|_2^2} \\ P_{H1-40}(t) &= \frac{1}{T} \int_{t-T}^t i_{H1-40}(\tau) u_{H1-40}(\tau) d\tau \\ Q_{H1-40}(t) &= \sqrt{S_{H1-40}^2(t) - P_{H1-40}^2(t)} \end{aligned} \quad (13)$$

Faktorja celostnega harmonskega popačenja napetosti  $THD_U$  in toka  $THD_I$  sta bila določena s pomočjo enačb (14) in (15), kjer  $n$  pomeni red harmonske komponente.  $U_1$  in  $I_1$  sta efektivni vrednosti napetosti in toka osnovne harmonske komponente,  $U_n$  in  $I_n$  pa  $n$ -te harmonske komponente. Efektivno vrednost  $n$ -te harmonske komponente napetosti in toka so enake normam, določenim s (16).

$$THD_U = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} \frac{U_n^2}{U_1^2}} \cdot 100 \quad (14)$$

$$THD_I = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} \frac{I_n^2}{I_1^2}} \cdot 100 \quad (15)$$

$$U_n^2(t) = \|u_n(t)\|^2 = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t u_n(\tau) u_n(\tau) d\tau \quad (16)$$

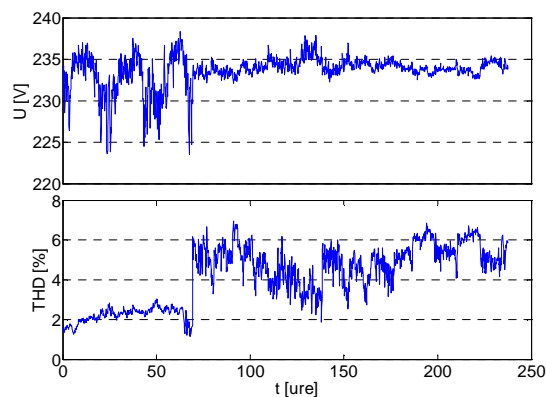
$$I_n^2(t) = \|i_n(t)\|^2 = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t i_n(\tau) i_n(\tau) d\tau$$

## 4 Rezultati

### 4.1 Meritev kakovosti električne energije

V sklopu analize delovanja napetostnega stabilizatorja so bile izvedene večdnevne meritve kakovosti električne energije. Uporabljen je bil instrumentarij, ki ga določa standard SIST EN 61000-4-30. Slika 4 kaže časovna poteka izmerjene povprečne efektivne vrednosti fазne napetosti faze  $L_2$  na izhodu napetostnega stabilizatorja MVB in faktorja celostnega harmonskega popačenja ( $THD$ ) napetosti iste faze.

S slike 3 sta razvidna dvig in stabilizacija napetosti v fazi  $L_2$  na izhodu naprave ob njenem vklopu. Iz pripadajočega diagrama  $THD$  pa je vidno tudi povečanje vsebnosti višjiharmonskih komponent v napetosti iste faze, kar je posledica nelinearnih elementov stabilizatorja MVB.



Slika 4: Izhodna napetost faze  $L_2$  in pripadajoč THD  
Figure 4: Output voltage of phase  $L_2$  and its THD

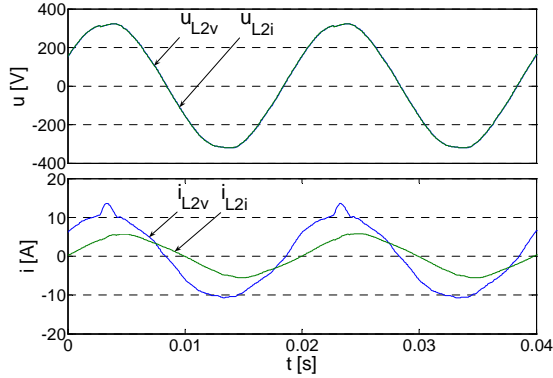
### 4.2 Meritev časovnih potekov toka in napetosti in ortogonalne razstavitve toka

Za določitev delovnega, jalovega in navideznega toka in pripadajočih moči posameznih faz so bile izvedene še meritve časovnih potekov tokov in napetosti. Shema meritve vhodnih in izhodnih spremenljivk stabilizatorja napetosti je bila prikazana že na sliki 3.

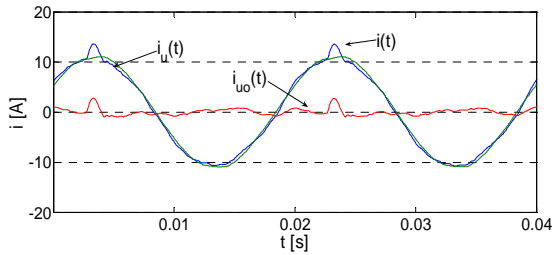
Meritve časovnih potekov tokov in napetosti posameznih faz so bile izvedene pri več različnih obremenitvah stabilizatorja. Napetostni stabilizator je bil pri tem normalno vključen v nizkonapetostno omrežje z obstoječimi odjemalci. Med samo meritvijo na trenutni odjem nismo mogli vplivati. Različne dodatne obremenitve stabilizatorja pa so bile dosežene z vključevanjem raznih enofaznih in trifaznih porabnikov pri enem izmed odjemalcev. Nad izmerjenimi vrednostmi so bile izvedene ortogonalne razstavitve toka v časovnem prostoru.

Sliki 5 in 6 podajata rezultate za bypass način delovanja stabilizatorja MVB. Slika 5 podaja na vohu ( $v$ ) in na izhodu ( $i$ ) stabilizatorja MVB izmerjena časovna poteka napetosti in toka v fazi  $L_2$ . Slika 6 kaže

vhodni tok stabilizatorja MVB  $i$  ter njegovi ortogonalni komponenti  $i_u$  in  $i_{u0}$ , določeni s (5) in (6). Rezultati so podani za interval dveh period.

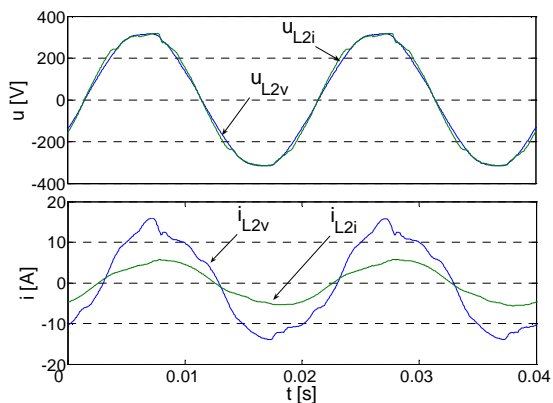


Slika 5: Napetost in tok faze 2 na vhodu (v) in izhodu (i) stabilizatorja MVB v načinu delovanja naprave bypass  
Figure 5: Input (v) and output (i) voltage and current of phase  $L_2$  in a bypass operation regime of the voltage booster

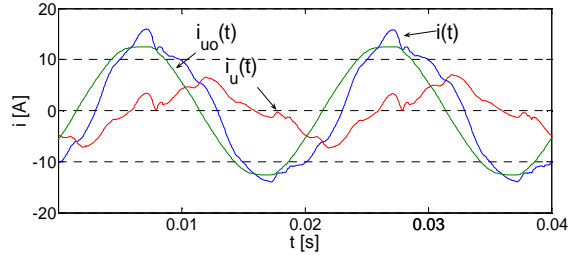


Slika 6: Tok  $i$  ter ortogonalni komponenti toka  $i_u$  in  $i_{u0}$  v fazi  $L_2$  na vhodu MVB - bypass  
Figure 6: Input current of MVB in phase  $L_2$   $i$ , and its orthogonal components  $i_u$  in  $i_{u0}$  during bypass operation

Iste spremenljivke kot sliki 5 in 6 podajata tudi sliki 7 in 8, tokrat za primer vključenega stabilizatorja MVB.



Slika 7: Napetost in tok faze  $L_2$  na vhodu (v) in izhodu (i) pri delovanju stabilizatorja MVB  
Figure 7: Input (v) and output (i) voltage and current of phase  $L_2$  for the operating voltage booster



Slika 8: Tok  $i$  ter ortogonalni komponenti toka  $i_u$  in  $i_{u0}$  v fazi  $L_2$  na vhodu delujočega stabilizatorja MVB  
Figure 8: Input current of operating MVB in phase  $L_2$   $i$  and its orthogonal components  $i_u$  in  $i_{u0}$

Tabela 1 podaja rezultate izračunov vhodne in izhodne moči stabilizatorja MVB, faktor moči in faktor skupnega harmonskega popačenja v fazi  $L_2$  pri dani obremenitvi.

Povprečne moči, ki so izračunane s pomočjo ortogonalnih razstavitev toka ( $S'$ ,  $P$  in  $Q'$ ) ter faktor moči  $PF$  so določeni s pomočjo enačb (9) in (11). S  $S_{H1}$ ,  $P_{H1}$  in  $Q_{H1}$  so v tabeli 1 označene moči osnovnih harmonskih komponent izmerjenih signalov, s pomočjo katerih je bil določen faktor  $\cos\varphi$  (10). Povprečne vrednosti moči so bile izračunane s pomočjo enačb (12).

S  $S_{H1-40}$ ,  $P_{H1-40}$  in  $Q_{H1-40}$  so v tabeli označene izračunane vrednosti moči za 40 harmonskih komponent. Tudi v tem primeru je bila izvedena FFT izmerjenih signalov  $u(t)$  in  $i(t)$ . Za izračun navedenih moči so bile uporabljene enačbe (13), za določitev faktorja celostnega harmonskega popačenja napetosti  $THD_U$  in toka  $THD_I$  pa enačbi (14) in (15).

faza $L_2$	BP-vhod	BP-izhod	VK-vhod	VK-izhod
$S'$ [VA]	1813,0	864,4	2238,2	917,5
$P$ [W]	1805,9	780,5	2057,4	821,9
$Q'$ [VAr]	160,1	371,7	881,2	407,8
PF	0,996	0,903	0,919	0,896
$S_{H1}$ [VA]	1800,9	860,9	2228,3	902,9
$P_{H1}$ [W]	1800,1	774,9	2078,2	824,1
$Q_{H1}$ [VAr]	52,0	375,0	803,8	369,0
$\cos\varphi$	1,000	0,900	0,933	0,913
$S_{H1-40}$ [VA]	1802,6	861,3	2231,1	907,0
$P_{H1-40}$ [W]	1799,1	775,0	2077,6	827,9
$Q_{H1-40}$ [VAr]	53,3	375,3	805,9	370,2
$THD_U$	1,509	1,514	1,580	5,459
$THD_I$	7,640	5,518	12,095	8,614

Tabela 1: Navidezna, delovna in jalova moč v fazi  $L_2$  na vhodu in izhodu MVB

Table 1: Phase  $L_2$  input and output apparent, active and reactive power

V tabeli 1 oznaka »BP« pomeni bypass način delovanja napetostnega stabilizatorja, medtem ko oznaka »VK« pomeni, da je stabilizator vključen.

Že iz tabele 1 je razvidno, da meritve niso bile izvedene v povsem enakih razmerah, kar se kaže v različnih izračunih moči. Razlika je najbolj očitna pri jalovi moči, manjša pri navidezni moči in najmanjša pri



delovni moči. Razen tega je videti, da so nastale večje razlike v izračunih moči na vhodu stabilizatorja, kjer je tudi harmonsko popačenje toka in napetosti večje.

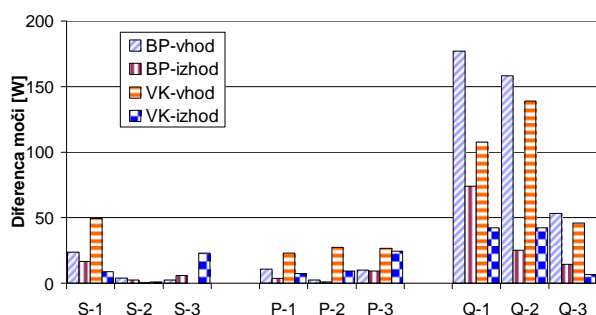
Podobni komentar rezultatov velja tudi za celoten trifazni sistem. Tabela 2 podaja seštevke izračunanih vrednosti vhodnih in izhodnih moči vseh faz pri dani obremenitvi stabilizatorja MVB.

L1+L2+L3	BP-vhod	BP-izhod	VK-vhod	VK-izhod
$S'$ [VA]	9937,3	9647,2	12297,6	10282,2
$P$ [W]	9483,0	9397,7	10593,1	10077,8
$Q'$ [VAr]	2301,4	2068,9	5847,4	1763,2
$S_{HI}$ [VA]	9922,2	9640,9	12265,1	10228,0
$P_{HI}$ [W]	9480,3	9395,2	10619,8	10042,1
$Q_{HI}$ [VAr]	2140,2	2042,0	5702,1	1712,5
$S_{HI-40}$ [VA]	9926,4	9643,6	12274,6	10274,7
$P_{HI-40}$ [W]	9480,5	9396,6	10620,5	10087,2
$Q_{HI-40}$ [VAr]	2143,1	2043,6	5708,4	1720,8

Tabela 2: Trifazna navidezna, delovna in jalova moč na vhodu in izhodu MVB

Table 2: Three-phase apparent, active and reactive power at input and output

Diagram na sliki 9 prikazuje razliko med izračunom moči po klasični metodi in izračunom moči s pomočjo ortogonalnih razstavitev toka.



Slika 9: Razlike med izračunanimi trifaznimi močmi pri različnih obremenitvah in obratovalnih režimih stabilizatorja  
Figure 9: Differences between three-phase powers given for different loads and MVB operating regime

Pri klasični metodi so bile uporabljene enačbe (13), medtem ko so za izračun moči s pomočjo ortogonalnih komponent toka uporabljene enačbe (9). Slika 9 kaže razlike trifazne navidezne, delovne in jalove moči na vhodu in izhodu stabilizatorja MVB. Podane so v treh različnih delovnih točkah naprave, označenih s številkami 1 (trenutni odjem iz NN omrežja), 2 (trenutni odjem in dodatno večje enofazno ohmsko-induktivno ter 3 (trenutni odjem in dodatno vključeno večje trifazno ohmsko-induktivno breme).

Do največjih razlik med metodami izračuna moči prihaja pri določitvi jalove moči. Izrazitejša odstopanja so predvsem takrat, ko je v napetostih in tokih povečana vsebnost višjih harmonskih komponent. Pri stabilizatorju je to vhod naprave.

## 5 Sklep

V referatu je obravnavan izračun moči v električnih sistemih, v katerih razen osnovne nastopajo tudi višjiharmonske komponente. Pokazano je, da klasični izračun v takih sistemih delno odpove. Posebno problematična je določitev jalove moči. Z uporabo ustreznih orodij pa je tudi v takih primerih mogoče zajeti tisti del toka, ki k usmerjenemu pretoku energije ne pripomore, pri tem pa v sistemu povzroča dodatne izgube, ki pa jih v večini primerov žal financirajo distribucijska podjetja.

## 6 Literatura

- [1] S. Svensson, *Power measurement uncertainties in a nonsinusoidal power system*, International Symposium on Electric Power Engineering, Proceedings: Power systems, (Stockholm, Sweden), pp. 617–622, IEEE / KTH, IEEE, 1995
- [2] L. S. Czarnecki, *Powers in nonsinusoidal networks: their interpretation, analysis, and measurement*, IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 39, no. 2, pp. 340–345, 1990
- [3] Gorazd Štumberger, Drago Dolinar, Ferdinand Gubina, Bojan Grčar, *Ortogonalne razstavitev tokov in definicije moči v trifaznih sistemih*. Elektrotehniški Vestnik, 1997, letnik 64, št. 5, str 288-295.
- [4] Gorazd Štumberger, *Obravnava trifaznih sistemov s pomočjo vektorskih prostorov*. Doktorsko delo, UM-FERI, Maribor, 1996
- [5] Darko Lestan, David Arh, Peter Bergant, Alojz Primon, Boris Sterle, Gregor Štern, *Napetostni stabilizator za NN omrežja – delovanje in rezultati*, CIGRÉ-CIRED, 2009
- [6] Silvo Ropoša, Boris Unuk, *Primerjava stanja kakovosti električne energije v nizkonapetostnem omrežju pred in po vgradnji napetostnega stabilizatorja za nizkonapetostna omrežja*, CIGRÉ-CIRED, 2009
- [7] Gorazd Štumberger, Drago Dolinar, Boštjan Polajžer, Matej Toman, Jože Voršič, *Primeri ortogonalnih razstavitev toka v enofaznem sistemu*, Komunalna energetika, 2004
- [8] Interna tehniška dokumentacija proizvajalca Magtech AS, Norveška (<http://www.magtech.no>)

**Silvo Ropoša** je diplomiral leta 2004 na UM-FERI, kjer tudi nadaljuje svoj podiplomski študij. Zaposlen je na Elektro Maribor, kjer se ukvarja z načrtovanjem električnih omrežij.

**Gorazd Štumberger** je diplomiral (1989), magistriral (1992) in doktoriral (1996) na UM-FERI, kjer je zaposlen kot redni profesor. Ukvarja se z optimizacijo, modeliranjem in vodenjem elektromehanskih sistemov in elementov elektroenergetskega sistema. Je član mednarodnih združenj Compumag in IEEE ter slovenskega komiteja CIGRE.

**Miran Rošer** je diplomiral leta 2003 na UM-FERI, kjer tudi nadaljuje svoj podiplomski študij. Zaposlen je na Elektro Celje in se ukvarja z meritvami in relejnimi zaščitnimi sistemi.

**Boris Unuk** je diplomiral leta 1998 na UM-FERI. Zaposlen je na Elektro Maribor, kjer se ukvarja s kakovostjo električne energije – trajni nadzor KEE in periodične meritve KEE.