

## Vpliv obratovanja ciklokonverterja na kakovost električne energije: harmoniki, medharmoniki in fliker

**Tomaž Pfajfar<sup>1</sup>, Boštjan Blažič<sup>1</sup>, Igor Papič<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, Tržaška 25, SI-1000 Ljubljana, Slovenija  
E-pošta: tomaz.pfajfar@fe.uni-lj.si

**Povzetek.** Ciklokonverterji se pogosto uporabljajo v večjih industrijskih procesih za direktno krmiljenje izmeničnih pogonskih sistemov. So velik vir harmonskega popačenja in tipičnih harmonskih komponent, generirajo tudi medharmoniske komponente, ki so odvisne predvsem od izhodne frekvence ciklokonverterja. Medharmoniske komponente povzročajo nihanje efektivne in temenske vrednosti napetosti, kar lahko privede do nastanka flikerja. V članku je predstavljena simulacija poenostavljenega modela pogonskega sistema, napajanega s ciklokonverterji. Analiziran je vpliv takega pogonskega sistema na kakovost električne energije s poudarkom na harmonskem popačenju, medharmonikih in flikerju.

**Ključne besede:** ciklokonverterji, kakovost električne energije, harmonsko popačenje, medharmoniki, fliker

## Impact of Cycloconverter Operation on Power Quality: Harmonics, Interharmonics and Flicker.

**Extended abstract.** Cycloconverters are widely used in many industrial applications. Their impact on power quality is considerable [1, 2]. A phase-controlled cycloconverter can be used for speed control of an AC machine [1]. Each output phase-group consists of a positive and a negative converter, permitting a bidirectional power flow (Figure 1). The firing angle of each converter is sinusoidally modulated to generate a voltage of a variable frequency and magnitude to supply an AC machine drive. Cycloconverters produce a variety of harmonics and interharmonics. Besides thermal and other impacts, one of their consequences can also be flicker. While harmonic components (e.g. the 5th and 7th) are common for power electronics applications, injected interharmonics depend mainly on the output frequency of cycloconverters (5), (6). When a signal contains interharmonics, both RMS and peak values of the signal will vary [2-7] and might consequently cause flicker. While the RMS magnitude fluctuation influences the functioning of incandescent lamps, fluorescent lamps are more sensitive to peak values. The peak voltage fluctuation level is equal to the interharmonic amplitude, while changes in the RMS voltage depend on the interharmonic amplitude and frequency (Figure 2).

A three-phase six-pulse cycloconverter operating in a blocking mode was modeled in the PSCAD program.

To show the impact of cycloconverter operation on the power quality, cycloconverters were used to supply a simplified drive system. They were supplying two 4.7 MW drives (Figure 3) with the operating frequency equal to 10 Hz. When operating at the nominal power, a single drive system consumes over 5 MVar of the reactive power. Therefore reactive power compensation might be required. It must be properly designed to avoid resonance conditions near harmonic and interharmonic frequencies. Simulations showed that total harmonic distortion (THD) produced by one drive system is some 24 % (Table 1). Interharmonics produced by cycloconverters were at frequencies 10 Hz, 110 Hz, 490 Hz, 610 Hz and 630 Hz. According to (7), these interharmonics (except at 630 Hz) can cause voltage fluctuation of the frequency of 10 Hz (Figure 5), which can consequently lead to light flicker. Flicker was measured with an IEC flickermeter [11, 12] developed in PSCAD software. The measured flicker values were 0.5 at the 35 kV level and 0.15 at the 110 kV level. However, we must consider that according to [4, 5, 7] the standard IEC flickermeter is not capable of detecting flicker caused by interharmonics of the frequency above 85 Hz. Besides setting the limits for interharmonics, which are still under research, the influence of interharmonics on flicker should be investigated further, too.

**Keywords:** Cycloconverters, power quality, harmonics, interharmonics, flicker.

## 1 Uvod

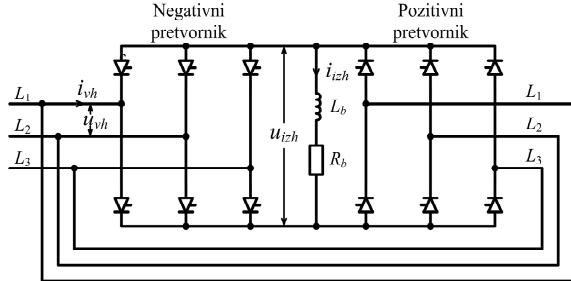
Uporaba ciklokonverterjev je znana že iz tridesetih let prejšnjega stoletja, ko so bili na nemških železnicah ciklokonverterji uporabljeni za pretvorbo trifazne, 50 Hz napetosti v enofazno napetost frekvence 16 2/3 Hz. V današnjih časih so ciklokonverterji razširjeni v vseh večjih industrijskih procesih, predvsem za krmiljenje asinhronskih in sinhronskih motorjev. Ciklokonverte je uporabljajo pri velikih pogonskih sistemih (reda moči nekaj MW), obratujejo pa tudi sistemi moči 20 MW in več. Najdemo jih v železarski, rudarski, papirni industriji ter tudi v letalski industriji in ladjarstvu [1, 2].

V članku je predstavljen vpliv obratovanja ciklokonverterja na kakovost električne energije, pri čemer je glavni poudarek na harmonskem popačenju, medharmonskih komponentah in posledično flikerju. Vpliv ciklokonverterja na kakovost električne energije je predstavljen s pomočjo simulacijskega modela ciklokonverterja, ki smo ga uporabili za napajanje poenostavljenega modela pogonskega sistema.

Ciklokonverter je vir harmonskega popačenja, ki poleg harmonskih komponent, ki so celoštivlki večkratniki osnovne frekvence (50 Hz), injicira v omrežje tudi medharmonske komponente (t.i. medharmoniki oz. interharmoniki). Medharmoniki povzročijo kolebanje efektivne (RMS) in temenske vrednosti napetosti, kar v določenih primerih privede do nastanka flikerja [2-7]. Zaradi samega načina delovanja je ciklokonverter relativno velik porabnik jalove energije, zato pogosto skupaj s ciklokonverterji srečujemo tudi kompenzatorje jalove energije. Posledično to pomeni možnost nastopa resonančnih stanj, kar lahko privede do ojačitve harmonskega popačenja in s tem poslabša kakovost električne energije.

## 2 Ciklokonverter

Ciklokonverter je v principu frekvenčni pretvornik, ki pretvarja vhodno izmenično napetost frekvence  $f_{vh}$  v izhodno izmenično napetost različne frekvence  $f_{izh}$  in amplitude [1]. Pretvorba poteka brez vmesnega enosmernega tokokroga. Frekvenca izhodne napetosti se giblje med 0 Hz (usmerniško obratovanje) in zgornjo mejo, ki je lahko nižja, kot je frekvenca vhodne veličine (step-down cycloconverter) oziroma višja (step-up cycloconverter). Pri industrijskih izmeničnih pogonih napajanih s ciklokonverterji, se najpogosteje uporabljajo "step-down" ciklokonverterji. Pri krmiljenju hitrosti pogonov je vhodna izmenična napetost pretvorjena v izhodno izmenično napetost spremenljive frekvence in amplitude. Ciklokonverter omogoča štiri kvadrantno obratovanje oziroma preteke moči poljubnih smeri. Primer trifaznega ciklokonvertera, ki napaja enofazno RL breme, je prikazan na sliki 1. Pri napajanju trifaznega bremena potrebujemo tri tovrstne tipne pretvornike.



Slika 1: Trifazni ciklokonverter za napajanje enofaznega bremena  
Figure 1. Three phase to single phase cycloconverter.

Glede na princip delovanja obstajata dve izvedbi ciklokonverterja, in sicer ciklokonverter z naravnim komutacijom in ciklokonverter s prisilno komutacijo. Ciklokonverter je sestavljen iz dveh pretvornikov, pozitivnega in negativnega (slika 1), ki usklajeno obratujeta v režimu s krožnim tokom ali v režimu brez krožnega toka (imenovanega tudi prekinjevalni režim). Pozitivni pretvornik je aktivен v pozitivni polperiodi izhodnega (bremenskega) toka, medtem ko je negativni aktivен v negativni polperiodi. V prekinjevalnem režimu obratovanja je potrebno pri prehodu bremenskega toka skozi nič, to je pri prehodu delovanja pozitivnega pretvornika na negativnega in nasprotno, ustvariti kratko pavzo ( $T \approx 1$  ms). Tako se prepreči nastop prevelikega krožnega toka, ki lahko preobremeni tristorje [8].

Ciklokonverter je omrežno voden in fazno krmiljen pretvornik, pri čimer je vklopni kot ( $\alpha$ ) sinusno moduliran. Frekvenca modulacije je enaka frekvenči izhodne napetosti. Ker ciklokonverter ne vsebuje enosmernega tokokroga oziroma elementov za shranjevanje energije (kondenzatorji), sta ob neupoštevanju izgub trenutna vhodna in izhodna moč enaki. Izhodna napetost je podana z naslednjo enačbo:

$$u_{izh} = \sqrt{2} \cdot U_{izh} \sin \omega_{izh} t , \quad (1)$$

kjer je  $U_{izh}$  efektivna vrednost izhodne napetosti,  $\omega_{izh}=2\pi f_{izh}$  in  $f_{izh}$  izhodna frekvenca. Med pozitivnim in negativnim pretvornikom velja razmerje:

$$\alpha_P + \alpha_N = \pi , \quad (2)$$

kjer je  $\alpha_P$  vklopni kot pozitivnega pretvornika in  $\alpha_N$  vklopni kot negativnega pretvornika. Glede na enačbo (2) lahko zapišemo:

$$u_{izh} = U_{d0} \cos \alpha_P = -U_{d0} \sin \alpha_N , \quad (3)$$

$$\cos \alpha_P = \frac{\sqrt{2}U_{izh}}{U_{d0}} \cdot \sin \omega_{izh} t = m_f \cdot \sin \omega_{izh} t , \quad (4)$$

kjer je  $m_f$  faktor modulacije in  $U_{d0}$  enosmerna izhodna napetost pozitivnega ali negativnega pretvornika pri  $\alpha_P=0$  oz.  $\alpha_N=0$ . V industrijskih procesih, kjer gre

ponavadi za napajanje trifaznih bremen, so najpogosteje uporabljeni trifazni ciklokonverterji v polmostični izvedbi z 18 tiristorji (half-wave dual converter) ali v mostični izvedbi s 36 tiristorji (dual bridge converter). Pri izvedbi ciklokonverterja s 36 tiristorji znaša  $U_{d0}=1,35U_{vh}$ , kjer je  $U_{vh}$  efektivna medfazna vrednost vhodne (omrežne) napetosti. Pri izvedbi ciklokonverterja z 18 tiristorji je  $U_{d0}=0,675U_{vh}$ .

Značilnost omrežno vodenih in fazno krmiljenih pretvornikov je, da ne glede na faktor moči bremena ( $\cos\phi$ ) predstavljajo porabnika jalove energije [1]. Poraba jalove energije je odvisna od obremenitve, zato se v primeru velikih moči pojavi potreba po kompenzaciji jalove energije.

### 3 Harmonsko popačenje

Izhodna napetost ciklokonverterja je harmonsko precej popačena, medtem ko je izhodni tok ponavadi manj popačen zaradi induktivnosti bremen. K harmonskemu popačenju dodatno pripomore tudi kratka pavza pri prehodu bremenskega toka skozi nič (prekinjevalni režim). Harmonsko popačenje na bremenu in na strani omrežja je odvisno od:

- načina obratovanja: s krožnim tokom ali v prekinjevalnem režimu,
- števila pulzov,
- faktorja modulacije  $m_f$ ,
- razmerja vhodne (omrežne) in izhodne (bremenske) frekvence,
- faktorja moči bremena ( $\cos\phi$ ),
- obremenitve.

#### 3.1 Harmonsko popačenje izhodne napetosti

Pri obratovanju ciklokonverterja v prekinjevalnem režimu je spekter harmonskih in medharmonskih komponent izhodne napetosti podan kot  $p \cdot n \cdot f_{vh} \pm n \cdot f_{izh}$ , kjer je  $p$  število pulzov,  $n=1, 2, 3\dots$  in  $p \cdot n \pm n =$ liho celo število. Pri šest pulznem ciklokonverterju izvedenem s 36 tiristorji, nastopajo harmonske komponente, ki so podane s (5).

$$\begin{aligned} n &= 1, \quad 6f_{vh} \pm f_{izh}, 6f_{vh} \pm 3f_{izh}, 6f_{vh} \pm 5f_{izh} \dots \\ n &= 2, \quad 12f_{vh} \pm f_{izh}, 12f_{vh} \pm 3f_{izh}, 12f_{vh} \pm 5f_{izh} \dots \\ n &= 3\dots \end{aligned} \quad (5)$$

#### 3.2 Harmonsko popačenje vhodnega toka

Zaradi ohranjanja ravnotežja med vhodno in izhodno trenutno močjo je pri sinusni vhodni napetosti na omrežni strani ciklokonverterja harmonsko popačen predvsem vhodni tok. Harmonski in medharmonski spekter izhodnega toka je podan z  $(p \cdot n \pm 1) \cdot f_{vh} \pm m \cdot f_{izh}$ , kjer je  $(n \cdot p \pm 1) \pm m =$ liho celo število. Pri šest pulznem ciklokonverterju s 36 tiristorji vsebuje vhodni tok harmonske komponente, ki so podane s (6).

$$\begin{aligned} n &= 0, \quad f_{vh}, f_{vh} \pm 6f_{izh}, f_{vh} \pm 12f_{izh} \dots \\ n &= 1, \quad 5f_{vh}, 5f_{vh} \pm 6f_{izh}, 5f_{vh} \pm 12f_{izh} \dots \\ &\quad 7f_{vh}, 7f_{vh} \pm 6f_{izh}, 7f_{vh} \pm 12f_{izh} \dots \\ n &= 2\dots \end{aligned} \quad (6)$$

Iz enačb (5) in (6) je razvidno, da so harmonske in medharmonske komponente odvisne tako od vhodne kot od izhodne frekvence. Medtem ko so določene harmonske komponente (npr. 5. in 7. reda) vedno prisotne, so medharmoniki odvisni predvsem od izhodne frekvence.

### 4 Medharmonske komponente

Medharmonska komponenta ali medharmonik toka oz. napetosti je sinusna veličina s frekvenco med harmonikoma. Ima torej frekvenco, ki ni celoštevilski večkratnik osnovne frekvence. Medharmoniki sosednjih frekvenc lahko nastanejo sočasno in tvorijo širokopasovni spekter [9].

Glavni povzročitelji medharmonikov so indirektni in direktni frekvenčni pretvorniki (ciklokonverterji), elektroobločne peči, varilne naprave, aplikacije dvojno napajanih asinhronski motorjev, napetostni signali v omrežju itd. [2, 10].

Posledice medharmonikov se podobno kot pri harmonskem popačenju kažejo v dodatnih izgubah in pregrevanju posameznih delov, kar vodi v skrajšanje življenske dobe ali celo okvare izolacije elementov elektroenergetskega sistema in nanj priključenih naprav. Poleg termičnega učinka povzročajo medharmonske komponente vibracije motorjev, interference v komunikacijskih distribucijskih in prenosnih sistemih, nasičenje tokovnih transformatorjev, preobremenitev vzporedno vezanih filtrov itd. Med najpogosteje posledice prisotnosti medharmonikov sodi tudi nihanje efektivne in temenske vrednosti napetosti ter posledično fliker.

#### 4.1 Medharmoniki in fliker

Medharmoniki povzročajo nihanje RMS in temenske vrednosti napetosti, kar posledično lahko povzroči nastanek flikerja. Fliker je definiran kot vtis nestalnosti vidnega zaznavanja zaradi svetlobnega dražljaja, katerega svetlost ali spektralna porazdelitev časovno niha. Nastopi zaradi nihanja amplitudo napetosti v določenem frekvenčnem območju (nekje med 0,5 in 25 Hz) in nad določenim pragom postane zelo moteč. Učinek motenja zelo hitro raste z amplitudo nihanja. Mejne vrednosti flikerja so določene v standardu SIST EN 50160 [10], ki postavlja meje za parametre kakovosti električne napetosti. Pri tem velja poudariti, da mejne vrednosti za medharmonike še niso postavljene in so še vedno v fazi raziskovanja in analiz.

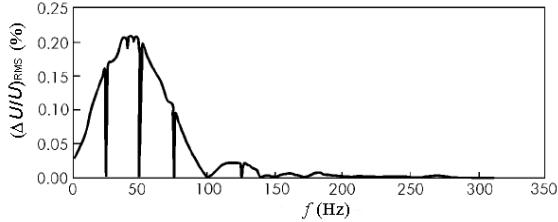
Frekvenca nihanja amplitudo napetosti zaradi medharmonika je določena z enačbo (7):

$$f_{\text{fliker}} = |f_{IH} - f_h|, \quad (7)$$

kjer je  $f_{IH}$  frekvenca medharmonika in  $f_h$  harmonska frekvenca, ki je najbližje frekvenci medharmonika [4, 5, 7]. Frekvenca nihanja RMS ali temenske vrednosti napetosti je tudi frekvenca flikerja.

Na nihanje RMS vrednosti napetosti so občutljive predvsem žarnice z žarilno nitko, medtem ko so fluorescenčne sijalke občutljive predvsem na nihanje temenske vrednosti napetosti [4, 6].

Amplituda nihanja temenske vrednosti napetosti je enaka amplitudi medharmonika, ki povzroča nihanje. Amplituda nihanja RMS vrednosti pa je odvisna od amplitude in frekvence medharmonika [2, 4, 7]. Na sliki 2 je podana odvisnost nihanja RMS vrednosti napetosti od frekvence medharmonika, pri konstantni amplitudi medharmonika  $m=0,2\%$  osnovne harmonske komponente napetosti.



Slika 2: Odvisnost nihanja RMS vrednosti napetosti od frekvence medharmonika, konstantne amplitudo ( $m=0,2\%$ )

Figure 2. Dependence of maximum RMS voltage variation on the frequency of an interharmonic of a constant amplitude ( $m=0,2\%$ ).

Iz slike 2 je razvidno, da medharmonik močno vpliva na amplitudo nihanja RMS vrednosti napetosti, če je njegova frekvenca v bližini osnovne frekvence. Z naraščanjem frekvence medharmonika tudi njegov vpliv upada, vendar se lahko pri resonančnih pogojih njegov vpliv poveča tudi pri višjih frekvencah.

## 4.2 Merjenje flikerja zaradi medharmonikov

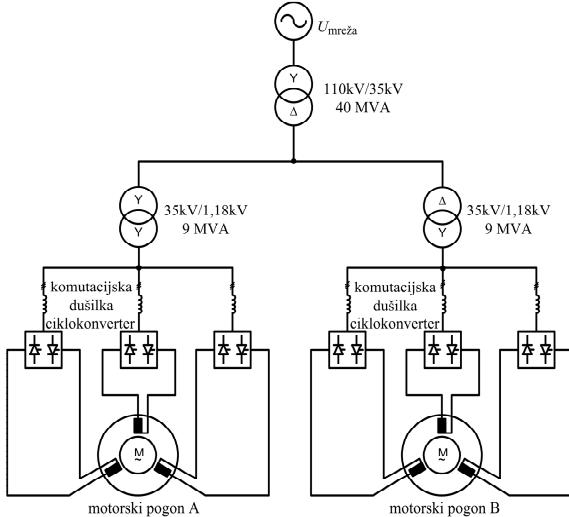
Za ovrednotenje flikerja se ponavadi uporablja flikermeter, ki deluje v skladu s standardom EN 61000-4-15. V zadnjih raziskavah [4, 5, 7] je bilo ugotovljeno, da flikermeter v sedanji izvedbi ne omogoča merjenja flikerja, povzročenega z medharmoniki nad določeno frekvenco. Razlog je v bloku 3 flikermeta [11], t.j. v pasovnem Butterworthovem filtru z mejnima frekvencama 0,05 in 35 Hz (za 50 Hz sistem) pri 3 dB. Filter namreč odpravi enosmerno komponento in vse više harmonske komponente, zato flikermeter ni sposoben detekcije flikerja, povzročenega z medharmoniki nad frekvenco 85 Hz. Ker npr. medharmonik s frekvenco 160 Hz še vedno povzroča nihanje temenske vrednosti napetosti s frekvenco 10 Hz, lahko nastopi opazen fliker, vendar ga s trenutno veljavnim modelom flikermeta ni mogoče ovrednotiti.

## 5 Simulacija delovanja ciklokonverterja in vpliv na kakovost električne energije

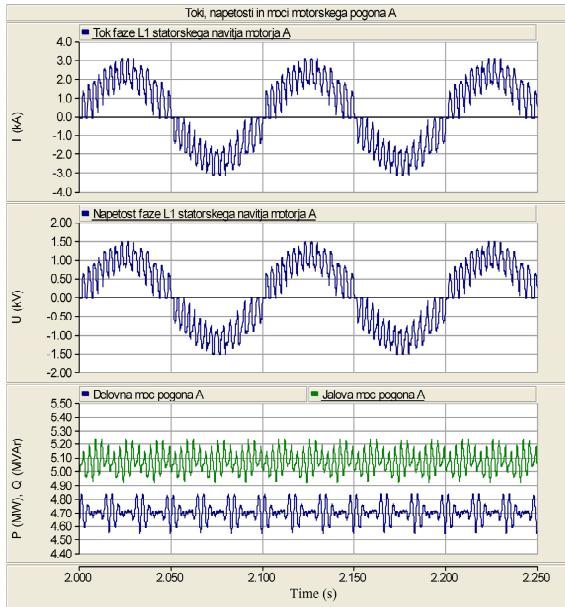
Simulacijski model trifaznega ciklokonverterja je bil razvit v simulacijskem programskem okolju PSCAD. Ciklokonverter v šest pulzni mostični izvedbi s 36 tiristorji deluje na principu naravne komutacije (v prekinjevalnem režimu). Zaradi naravne komutacije med posameznimi fazami je maksimalna izhodna frekvenca omejena na približno  $f_{\text{izh}} \approx 0,5f_{vh}$  [8]. Proženje tiristorjev temelji na pulzno širinski modulaciji (PWM).

Model ciklokonverterja je bil uporabljen za krmiljenje poenostavljenega modela pogonskega sistema (slika 3). Pogonski sistem temelji na dejanskem pogonu v omrežju industrijskega porabnika. Trifazni ciklokonverterji napajajo statorska navitja dveh sinhronskih motorjev moči  $2 \times 4,7$  MW. Navitja so poenostavljeno modelirana kot ohmsko-induktivno breme. Vzbujanje sinhronskega motorja ni upoštevano. Ker ponavadi deluje sinhronski motor s faktorjem moči  $\cos\varphi=1$ , smo to obratovalno stanje simulirali kot navitje, ki ima samo ohmsko komponento. Ciklokonverterji so priključeni enofazno, tako da vsak ciklokonverter napaja eno fazno navitje statorja. Posamezen motorski pogon je na 35 kV omrežje priključen prek komutacijskih dušilk vrednosti  $34,6 \mu\text{H}$  in prek dveh transformatorjev z močjo 9 MVA, vezave Yy0 in Dy5. Sistem je na visokonapetostno omrežje (110 kV) priključen prek transformatorja z močjo 40 MVA. V simulacijskem primeru motorja delujeta z nazivno močjo 4,7 MW pri frekvenci 10 Hz.

Na sliki 4 sta prikazana tok in napetost na statorskem navitju motorskega pogona, napajanega prek transformatorja vezave Yy0 (motorski pogon A) ter delovna in jalova moč. Razvidno je relativno veliko popačenje napetosti in toka na bremenu, ki pa je odvisno predvsem od prisotne induktivnosti v



Slika 3: Shema modela simuliranih motorskih pogonov  
Figure 3. Scheme of an adjustable speed drive system.



Slika 4: Tok in napetost na statorskem navitju motorskega pogona A ter delovna in jalova moč

Figure 4. Output current and voltage of a drive system A and consumed active and reactive power.

tokokrogu. Oscilacije, kot posledica harmonskega in medharmonskega popačenja, so vidne tudi na delovni moči motorja. Poraba jalove moči motorskega pogona je reda 5 MVA in v danem primeru presega delovno moč, zato je smiselna uporaba kompenzacijskih naprav. Pri dimenzionirjanju tovrstnih naprav je treba posebno pozornost nameniti resonančnim stanjem, ki lahko pripomorejo k poslabšanju kakovosti električne energije [12]. Pri preobremenitvah se skladno s povečanjem delovne moči pogona povečuje tudi jalova moč.

### 5.1 Harmonsko popačenje

Harmonsko popačenje pogonskega sistema je podano v tabeli 1. Podane so relativne vrednosti posameznega harmonika in medharmonika ter vrednost celotnega harmonskega popačenja (THD). V tabeli 1 je podano harmonsko popačenje na 35 kV in 110 kV strani transformatorja 40 MVA, ki napaja oba pogona, ter harmonsko popačenje, ki ga generira motorni pogon A.

Glede na tabelo 1 znaša celotno tokovno harmonsko popačenje na 35 kV strani napajalnega transformatorja pogona A okoli 24 %, pri tem je vrednost 5. harmonika okoli 20 % in vrednost 7. harmonika okoli 6 %. Tipični harmonski komponenti obeh pogonov, t.j. 5. in 7., se na sekundarni strani transformatorja 40 MVA medsebojno izničujeta. Razlog je v različni vezavi transformatorjev, prek katerih so napajani ciklokonverterji, in dejstva, da so tudi vklopni pulzni posameznih ciklokonverterjev sinhronizirani na različni napetosti, ki sta med seboj premaknjeni za  $30^\circ$ . Skupen THD toka obeh pogonov (na 35 kV strani transformatorja 40 MVA) tako znaša le

Napetostno in tokovno harmonsko popačenje						
	napajalni transformator pogona A (Yy0)	transformator 40 MVA		transformator 40 MVA		
nap. nivo	35 kV		35 kV		110 kV	
	$I_{35,A}$ (%)	$U_{35,A}$ (%)	$I_{35}$ (%)	$U_{35}$ (%)	$I_{110}$ (%)	$U_{110}$ (%)
<b>f (Hz)</b>						
10	1,04	/	1,1	/	1,1	/
50	100	100	100	100	100	100
70	0,8	0,1	0,8	/	0,88	/
110	1,04	0,15	1,15	0,15	1,12	/
170	0,76	0,12	0,71	0,1	0,7	/
190	3,76	/	0,31	/	0,29	/
250	20,2	0,31	0,22	0,32	0,23	0,27
290	5,9	/	0,13	/	0,12	/
310	3,52	/	0,16	/	0,15	/
350	6,16	0,13	0,1	0,13	/	0,11
490	3,89	2,5	3,84	2,05	3,86	0,39
550	2,56	1,52	2,7	1,55	2,6	0,25
590	0,95		0,95	0,6	0,94	0,12
610	3,73	2,35	3,37	2,05	3,25	0,48
630	1,59	1,15	1,63	2,35	1,57	0,26
<b>THD</b>	<b>24</b>	<b>4,5</b>	<b>6,7</b>	<b>4,4</b>	<b>6,7</b>	<b>1,25</b>

Tabela 1: Harmonsko popačenje obravnavanega pogonskega sistema

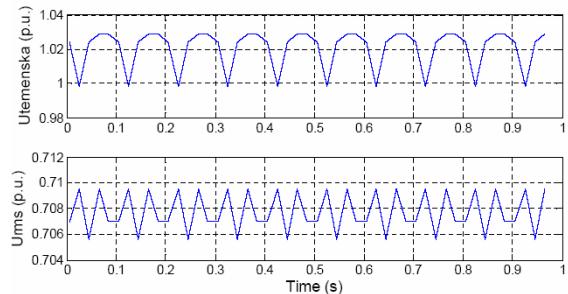
Table 1. Harmonic distortion of simulated drive system.

6,7 %. THD napetosti na 35 kV strani znaša 4,4 %, kar je pod mejno vrednostjo (8 %), ki jo določa standard [9] in 1,25 % na 110 kV strani transformatorja 40 MVA.

### 5.2 Medharmoniki in fliker

Pri obratovalni frekvenci 10 Hz nastopajo v toku medharmoniki frekvenc 10 Hz, 110 Hz, 190 Hz, 490 Hz, 610 Hz, 630 Hz, medtem ko so v napetosti najbolj prisotni medharmoniki frekvence 490 Hz, 610 Hz in 630 Hz. Glede na prisotne harmonike in medharmonike (tabela 1) je na sliki 5 prikazano nihanje temenske in RMS vrednosti napetosti na 35 kV strani transformatorja 40 MVA. V simuliranem primeru je bolj izrazito predvsem nihanje temenske vrednosti napetosti s frekvenco okoli 10 Hz.

V danem primeru je bil s simulacijskim modelom



Slika 5: Nihanje temenske in RMS vrednosti napetosti na 35 kV strani transformatorja 40 MVA

Figure 5. Peak and RMS voltage fluctuation on the 35 kV side of a 40 MVA transformer.

flikermetra, ki je podrobneje opisan v [12], izmerjen fliker reda 0,5 na 35 kV strani in 0,15 na 110 kV strani transformatorja 40 MVA. Glede na medharmonike, ki nastopajo v opisanem primeru, se postavlja vprašanje o točnosti izmerjene vrednosti, kajti kot je bilo že omenjeno, flikermeter v obliki, kot jo predpisuje standard EN 61000-4-15, ne zazna flikera, ki je povzročen s strani medharmonikov frekvence nad 85 Hz. S tega stališča je treba za pravilno ovrednotenje flikera zaradi medharmonikov posodobiti obstoječi flikermeter, saj se uporablja čedalje več naprav, ki proizvajajo tudi medharmoniske komponente, in je pojav flikera zaradi medharmonikov čedalje bolj prisoten.

## 6 Sklep

V članku je bila predstavljena problematika kakovosti električne energije pri obratovanju sistemov s ciklokonverterji. Ciklokonverter je velik vir harmonskega popačenja, ki poleg harmonskih komponent proizvaja tudi medharmoniske komponente. Proizvedene medharmoniske komponente so odvisne predvsem od frekvence obratovanja, medtem ko sta npr. 5. in 7. harmonik prisotna ne glede na vrednost izhodne frekvence in sta tudi najizrazitejša. Zaradi medharmonskih komponent nastaja nihanje efektivne in temenske vrednosti napetosti. Slednja v simulacijskem primeru pogonskega sistema izrazito niha s frekvenco okoli 10 Hz, kar lahko pripelje do nastanka flikera. Rezultati simulacij so potrdili, da predstavlja ciklokonverter relativno velikega porabnika jalove energije, zato s ciklokonverterji pogosto nastopajo tudi kompenzatorji jalove energije. Zaradi širokega spektra injiciranih harmonikov s strani ciklokonverterja je treba posebno pozornost namenjati morebitnim resonančnim stanjem, ki lahko še poslabšajo harmonsko popačenje in lahko v določenih primerih privedejo tudi do ojačanja flikera.

V članku je bila omenjena tudi problematika merjenja flikera, ki ga povzročajo medharmoniki, katerih frekvence presega 85 Hz. Tega flikera ne moremo ovrednotiti s flikermetrom, ki ga predpisuje standard EN 61000-4-15. Glede na povedano je treba na področju standardov, ki obravnavajo medharmonike in fliker, opraviti še veliko dela, saj se število naprav, ki proizvajajo medharmonike, povečuje, s tem pa je tudi problem flikera čedalje bolj prisoten.

## Literatura

- [1] Bimal K. Bose, "Modern Power Electronics and AC drives", Prentice Hall, 2002.
- [2] IEEE Interharmonic Task Force Working Document, Draft 3, July 2001, Online available: <http://grouper.ieee.org/groups/harmonic/iharm/docs/ih519c.pdf>.
- [3] C. R. Dugan, M. F. McGranahan, S. Santoso, H. W. Beaty, "Electric Power System Quality", McGraw-Hill, 2002.
- [4] T. Tayjasanant, W. Wang, C. Li, W. Xu, "Interharmonic-Flicker Curves", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, April 2005.
- [5] D. Gallo, R. Langella, A. Testa, "Interharmonics, Part 2: Aspects Related to Measurements and Limits", L'Energia Elettrica, Vol. 81, 2004.
- [6] M. De Koster, E. De Jaeger, W. Vancoetsem, "Light Flicker Caused by Interharmonics", Online available:<http://grouper.ieee.org/groups/harmonic/iharm/docs/ihflicker.pdf>.
- [7] W. Xu, "Deficiency of the IEC Flicker Meter for Measuring Interharmonic-Caused Voltage Flickers", IEEE Power Engineering Society General Meeting, June, 2005.
- [8] R. Cajhen, "Tiristorski prevorniki s prisilno komutacijo" Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, 1990.
- [9] F. Žlahtič, M. Zorman, D. Žebeljan, "Vrednotenje kakovosti električne napetosti s kriteriji elektromagnetne združljivosti: Komentar standarda SIST EN 50160", Agencija Poti, Ljubljana, 2000.
- [10] Z. Hanzelka, A. Bien, "Power Quality Application Guide; Harmonics-Interharmonics", Leonardo Power Quality Initiative, July, 2004.
- [11] EN 61000-4-15, "Electromagnetic Compatibility (EMC), Part 4: Testing and measurement techniques, Section 15: Flicker meter - Functional and design specifications", standard.
- [12] I. Papič, P. Žunko, B. Blažič, T. Pfajfar, "Vpliv delovanja večjih nelinearnih porabnikov v SŽ Acroni Jesenice na kakovost električne energije", raziskovalna naloga, Fakulteta za elektrotehniko, julij 2005.

**Tomaž Pfajfar** je diplomiral leta 2004 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani, kjer se je istega leta zaposlil kot mladi raziskovalec. Njegovo raziskovalno delo zajema področji distribuiranih virov in kakovosti električne energije.

**Boštjan Blažič** je doktoriral leta 2005 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani, kjer je tudi zaposlen kot raziskovalec. Njegovo delo zajema področji kakovosti električne energije in sodobnih kompenzacijskih naprav.

**Igor Papič** je diplomiral leta 1992, magistriral leta 1995 in doktoriral leta 1998 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. V letih 1994–1996 je bil na izpopolnjevanju na Siemensovem oddelku za prenos in razdelitev električne energije v Erlangnu v Nemčiji. Od leta 2004 je izredni profesor na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. V letu 2001 je bil gostujuči profesor na University of Manitoba v Winnipegu (Kanada). Njegova raziskovalna dejavnost vključuje aktivne kompenzatorje, naprave FACTS in kakovost električne energije.