

**SNAGE U SLOŽENOPERIODIČNIM REŽIMIMA ELEKTROENERGETSKOG SISTEMA  
POWERS IN NON-SINUSOIDAL PERIODIC REGIMES OF ELECTRIC POWER SYSTEM**Vladimir Olear, Dejan Jerkan, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

**Kratak sadržaj** – U radu su definisane snage u prostoperiodičnom režimu, a zatim i u složenoperiodičnom režimu. Dati su izrazi za aktivnu, reaktivnu, prividnu i snagu deformacije. Programski paket Matlab je iskorišćen kako bi se pomoću modela realnog pogona u složenoperiodičnom režimu uporedili rezultati simulacija sa računskim rezultatima, shodno priloženim definicijama.

**Ključne reči:** EES, kvalitet električne energije, Furijeova analiza, viši harmonici.

**Abstract** – The paper defines various electric powers in both sinusoidal and periodic non-sinusoidal operating conditions. Expressions for active, reactive, apparent and deformation power are given. The Matlab software package was used to compare the simulation results with the computational results, according to the given definitions, using a model of real drive in periodic non-sinusoidal operating conditions.

**Keywords:** Power system, electricity quality, Fourier analysis, higher harmonics.

**1. UVOD**

Težnja elektroenergetskog sistema jeste da radi u prostoperiodičnom režimu rada. Ova činjenica posebno je izražena na mrežama viših napona, dok su u pogonima niskog napona moguća neznatna odstupanja.

Pri priključenju nelinearnih potrošača dolazi do pojave struja koji se u praksi nazivaju harmonici. Poželjno je da viši harmonici budu što manje prisutni u strujama i naponima s obzirom da oni izobličuju napon mreže.

Komponente energetskog sistema, kao i potrošači koji se priključuju na njega, podrazumevaju sinusne oblike napona i struje, pa svaka pojava viših harmonika donosi negativne efekte. Kvalitet električne energije je vezan za odstupanje talasnih oblika napona i struja od idealnog prostoperiodičnog oblika. Ukoliko kvalitet električne energije nije zadovoljavajući može se javiti dosta problema. Među najznačajnijim problemima do kojih može dovesti loš kvalitet električne energije, a pre svega harmonijska izobličenja, su: pregrevanje nultog provodnika, pregrevanje transformatora, pregrevanje i nepravilan rad električnih motora, uticaj harmonika na prekidače i zaštitne releje, uticaj na elektronsku opremu, uticaj na rad statičkih energetskih pretvarača, uticaj na telekomunikacione veze, naprezanje kondenzatorskih baterija za kompenzaciju reaktivne energije, izobličenje mrežnog napona usled toka harmonijskih struja, efekti toka harmonika struja kroz provodnike i sabirnice.

**NAPOMENA:**

**Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Dejan Jerkan, docent.**

**2. SNAGE U SLOŽENOPERIODIČNOM REŽIMU**

U ustaljenom složenoperiodičnom režimu se trenutna, srednja (aktivna) i prividna snaga mreže definišu redom kao i u prostoperiodičnom režimu:

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

$$P = \frac{1}{T} \int_{\tau}^{\tau+T} p(t) dt \quad (2)$$

$$S = UI \quad (3)$$

U odnosu na prostoperiodični režim situacija je složenija, jer se javljaju proizvodi harmonika napona i struje različitih frekvencija. Proizvod komponenata napona i struje istog indeksa odgovara trenutnoj ulaznoj snazi  $n$ -tog harmonika:

$$p^{(n)} = u^{(n)}i^{(n)} \quad (4)$$

Proizvod komponenata različitih indeksa jeste deo ukupne trenutne ulazne snage, nastao usled delovanja različitih harmonika, što možemo označiti kao:

$$p^{(n,m)} = u^{(n)}i^{(m)}, n \neq m \quad (5)$$

Srednja (aktivna) snaga u ustaljenom periodičnom režimu srednja snaga se posmatra za vreme jedne periode (ili celobrojnog umnoška perioda) i opisana je izrazom:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad (6)$$

Znači da je u ustaljenom periodičnom režimu srednja snaga jednaka sumi srednjih snaga svih harmonika:

$$P = \sum_{n=0}^{\infty} P^{(n)} \quad (7)$$

Srednja snaga se i ovde, često, naziva i aktivnom snagom jer označava brzinu kojom se konstantno isporučuje energija mreži, tj. označava snagu koja se nepovratno disipira u mreži. Taj naziv ne treba mešati sa nazivima aktivna/pasivna mreža.

Prividna snaga u periodičnom režimu se definiše na isti način kao u prostoperiodičnom režimu: kao proizvod efektivnih vrednosti napona i struje na pristupu mreže:

$$S = UI \quad (8)$$

Ta snaga objektivno opterećuje izvor, mada se stvarno (aktivno) u prijemniku "troši" samo snaga P. S obzirom na definiciju efektivne vrednosti složenoperiodične veličine, prividna snaga je, dalje jednaka:

$$S = \sqrt{(u^{(0)})^2 + \sum_{n=1}^{\infty} (U^{(n)})^2} \sqrt{(i^{(0)})^2 + \sum_{n=1}^{\infty} (I^{(n)})^2} \quad (9)$$

Kao merilo iskorišćenja mreže kao (aktivnog) potrošača električne energije i u složenoperiodičnom režimu se može uvesti pojam faktora snage, što je, formalno, isto kao u prostoperiodičnom režimu:

$$k_p = P/S \quad (10)$$

Prividna snaga u ustaljenom prostoperiodičnom režimu se opisuje jednostavnim izrazom:

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (11)$$

gde su P i Q aktivna i reaktivna snaga mreže. Analizom složenoperiodičnog režima, pokušano je da se i tu formira slična relacija.

$$S^2 = \left[ \sum_{n=0}^{\infty} U^{(n)} I^{(n)} \cos \varphi^{(n)} \right]^2 + \left[ \sum_{n=0}^{\infty} U^{(n)} I^{(n)} \sin \varphi^{(n)} \right]^2 + \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} [U^{(n)2} I^{(m)2} + U^{(m)2} I^{(n)2} - 2U^{(n)} U^{(m)} I^{(n)} I^{(m)} \cos(\varphi^{(n)} - \varphi^{(m)})] \quad (12)$$

Unutar izraza (12) prepoznaje se aktivna snaga mreže u složenoperiodičnom režimu, pa je taj član zapravo, oblika:

$$\left[ \sum_{n=0}^{\infty} U^{(n)} I^{(n)} \cos \varphi^{(n)} \right]^2 = \left[ \sum_{n=0}^{\infty} P^{(n)} \right]^2 = P^2 \quad (13)$$

Drugi član na desnoj strani izraza (12) sadrži, unutar zagrade, sumu reaktivnih snaga harmonika. Po analogiji sa aktivnom snagom, ova suma se često naziva reaktivnom snagom mreže u složenoperiodičnom režimu i označava sa Q:

$$\sum_{n=0}^{\infty} U^{(n)} I^{(n)} \sin \varphi^{(n)} = \sum_{n=0}^{\infty} Q^{(n)} \quad (14)$$

Preostali deo izraza (12) nastaje kao proizvod različitih harmonika napona i struje. Taj član ima istu dimenziju kao ostali članovi u jednačini: to je kvadrat neke fiktivne snage:

$$D^2 = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} [U^{(n)2} I^{(m)2} + U^{(m)2} I^{(n)2} - 2U^{(n)} U^{(m)} I^{(n)} I^{(m)} \cos(\varphi^{(n)} - \varphi^{(m)})] \quad (15)$$

Oznaka D sledi iz uobičajenog naziva te veličine: to je snaga deformacije (ili snaga izobličenja). Naziv je uveo

Budeanu 1927. godine i, mada je dosta osporavan, taj koncept se i danas, ponekad koristi. Saglasno uvedenim veličinama snagama P, Q i D, kvadrat prividne snage se može prikazati u obliku:

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (16)$$

Snaga deformacije se, ako je potrebno, može relativno lako odrediti na osnovu poslednjeg izraza kao:

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (17)$$

s obzirom da su snage S, P i Q određene (relativno) jednostavnim izrazima (9), (7) i (14), koji su (u delovima) slični odgovarajućim izrazima za prostoperiodični režim. Jedinica mere, snage deformacije se navodi kao VAd-volt-amper deformacije.

U električnim kolima, koja se karakterišu prisustvom viših harmonika u struji i naponu, uobičajena predstava faktora snage kao  $\cos \varphi$  nije tačna. Na bazi osnovne definicije faktor snage je iskazan složenijim izrazom:

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} U_n I_n \cos \varphi_n}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2} \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}} \quad (18)$$

## 2.1. Definicija THD-a

Ukupna harmonijska distorzija (THD) se definiše kao kvadratni koren odnosa sume kvadrata efektivnih vrednosti pojedinačnih harmonijskih komponenti i efektivne vrednosti fundamentalnog harmonika i takođe se izražava u procentima:

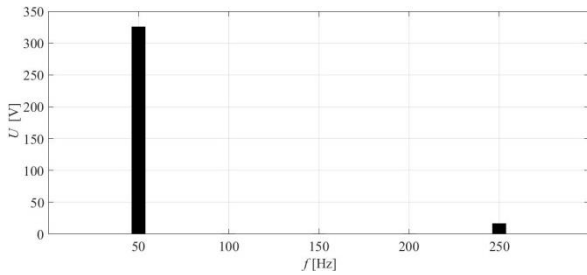
$$THDI = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}{I_1^2}} 100 = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} HDI_n^2} (\%) \quad (19)$$

## 3. NUMERIČKI PRIMER REALIZOVAN U MATLAB-U

Radi sagledavanja pojava napravljena je simulacija u Matlab Simulink programu, u ovom poglavlju biće diskutovani i predstavljeni rezultati simulacije. Simulacija se sastoji od mreže koja daje ne idealno sinusni signal već signal sa petim harmonikom u talasnim oblicima napona, zatim ispravljača snage od oko 5 KW, nominalno opterećenog asinhronog motora od 75 KW i elemenata kojima se modeluju impedase napojnih vodova.

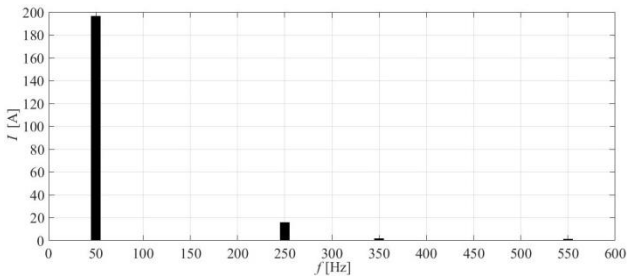
### 3.1. Električne veličine merene na korenu mreže

Model je korišćen u složenoperiodičnom režimu, napon mreže se sastoji od prvog i petog harmonika u vrednosti od 5%. Primenom Furijeove analize i Matlab Simulink programa mogu se dobiti odzivi koji prikazuju zavisnost amplitude od frekvencije. Primetno je postojanje prvog i petog harmonika u naponu mreže. Sa slike 3.1. može se očitati vrednosti harmonika:  $U_1 = \frac{325,23}{\sqrt{2}} V$ ,  $U_5 = \frac{16,22}{\sqrt{2}} V$ .



Slika 3.1. Amplitudni spektar napona mreže

Primenom Furijeove analize i Matlab Simulink programa može se dobiti odziv koji prikazuje zavisnost amplitude struje od frekvencije. Sa slike 3.2. očitavaju se vrednosti struja po harmonicima:  $I_1 = \frac{196,45}{\sqrt{2}} A$ ,  $I_5 = \frac{15,76}{\sqrt{2}} A$ ,  $I_7 = \frac{1,478}{\sqrt{2}} A$ ,  $I_{11} = \frac{1,1}{\sqrt{2}} A$ .



Slika 3.2. Amplitudni spektar struje mreže

Pomoću očitanih vrednosti sa slika iznad i izraza (7), (14) (9), (17) i (18) mogu se proračunati pojedinačno snage i faktor snage kod složenoperiodičnog režima:

Izračunata vrednosti-pozicija 1	Vrednost iz Matlab blokova mreže
$P_{mreže} = 88,27 kW$	$P_{mreže} = 86,77 kW$
$Q_{mreže} = 37,7 kVAr$	$Q_{mreže} = 37,67 kVAr$
$S_{mreže} = 96,27 kVA$	$S_{mreže} = 94,59 kVA$
$D_{mreže} = 7,37 kVAd$	/

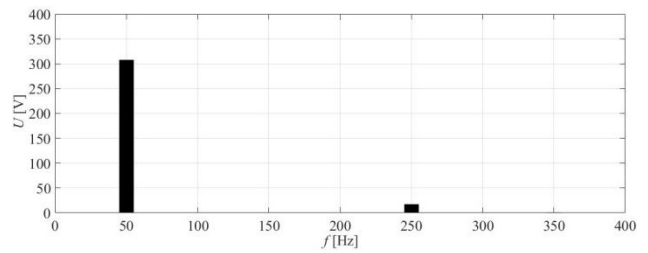
$\lambda = 0.9169$ , odstupanje:  $P_{mreže}$  je 1,71 %,  $Q_{mreže}$  je 0,0716 %,  $S_{mreže}$  je 1,74 %.

Iz tabele iznad vidi se da se vrednosti koje Matlab-ov blok pokaže i proračunate vrednosti malo razlikuju, u izraz za snagu  $S_{mreže}$  treba uračunati i snagu  $D_{mreže}$  koju blok u Matlab-u ne računa, te zbog toga postoje mala odstupanja.

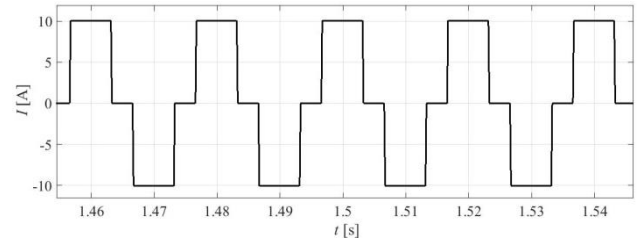
### 3.2. Električne veličine merene na ispravljaču

U modelu se koristi trofazni diodni ispravljač snage oko 5 KW, THD napona na priključcima ispravljača iznosi oko 5,5%. Dominantan je prvi i peti harmonik, dok je sedmi harmonik vrlo male vrednosti, slika 3.3.

Diodni ispravljač je nelinearan potrošač koji prouzrokuje izobličenje struje, unosi više harmonike, struja na ispravljaču je trapezoidalna zbog velike vrednosti prigušnice u kolu, slika 3.4.

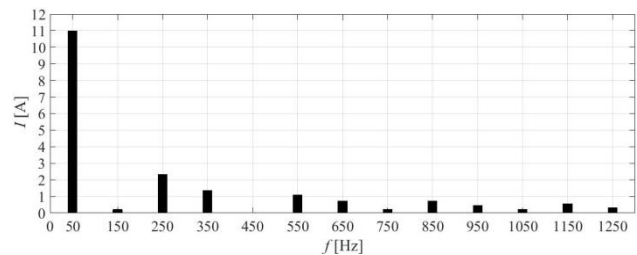


Slika 3.3. Amplitudni spektar napona na ispravljaču

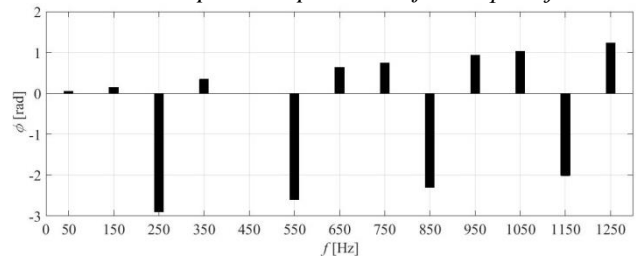


Slika 3.4. Fazna struja na ispravljaču

Sa slike 3.5. se očitavaju struje ispravljača po harmonicima. Struja sadrži dominantni prvi, peti, sedmi, jedanaesti, trinaesti, petnaesti, sedamnaesti, devetnaesti itd. harmonik. Sa slike 3.6. se može očitati argument struje.

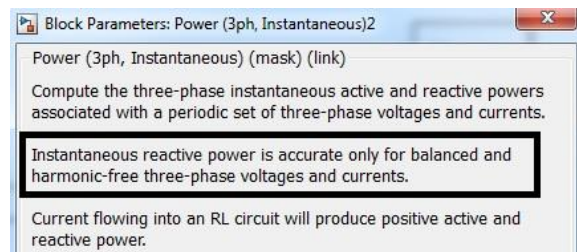


Slika 3.5. Amplitudni spektar struje na ispravljaču



Slika 3.6. Amplitudni spektar struje na ispravljaču

Pomoću očitanih vrednosti sa slika iznad i izraza (7), (14) (9) i (17) mogu se proračunati pojedinačno snage kod složenoperiodičnog režima.



Slika 3.7. Greška kod merenja reaktivne snage

Blok koji meri P i Q u Matlabu pravi grešku kod merenja snage Q, gde u slučaju ispravljača postoji najveće izobličenje struje pa je tu odstupanje najveće i iznosi čak

97,7%.  $Q_{\text{ispravljača}} = 2,97 \approx 0 \text{ VAr}$ , dok je snaga  $D_{\text{ispravljača}}$  oko trećine od ukupne snage ispravljača.

Izračunata vrednost- pozicija 2	Vrednost iz Matlab bloka na ispravljaču
$P_{\text{ispravljač}} = 5.008 \text{ KW}$	$P_{\text{ispravljač}} = 5.06 \text{ KW}$
$Q_{\text{ispravljač}} = 2.969 \text{ VAr}$	$Q_{\text{ispravljač}} = 129.225 \text{ VAr}$
$S_{\text{ispravljač}} = 5287.5 \text{ VA}$	$S_{\text{ispravljač}} = 5.016 \text{ KVA}$
$D_{\text{ispravljač}} = 1.68 \text{ KVAd}$	/

$\lambda = 0.9471$ , odstupanje:  $P_{\text{ispravljač}}$  je 1.17%,  
 $Q_{\text{ispravljač}}$  je 97.7%,  $S_{\text{ispravljač}}$  je 5.14%.

### 3.3. Električne veličine merene na motoru

Pomoću očitanih vrednosti sa slika i izraza (7), (14) (9), (17) i (18) mogu se proračunati pojedinačno snage i faktor snage kod složenoperiodičnog režima i uporediti sa Matlab rezultatima.

Izračunata vrednost- pozicija 3	Vrednost iz Matlab bloka na motoru
$P_{\text{motor}} = 77,44 \text{ kW}$	$P_{\text{motor}} = 75,92 \text{ kW}$
$Q_{\text{motor}} = 37,689 \text{ kVAr}$	$Q_{\text{motor}} = 37,57 \text{ kVAr}$
$S_{\text{motor}} = 86,36 \text{ kVA}$	$S_{\text{motor}} = 81 \text{ kVA}$
$D_{\text{motor}} = 6,4 \text{ KVAd}$	/

$\lambda = 0.8967$ , odstupanje:  $P_{\text{ispravljač}}$  je 1,97% ,  
 $Q_{\text{ispravljač}}$  je 0,31,  $S_{\text{ispravljač}}$  je 6,21%. Kod asinhronog motora su znatno manja izobličenja nego kod ispravljača, te snaga deformacije  $D_{\text{motor}}$  iznosi oko 8 % od ukupne snage motora.

### 4. ZAKLJUČAK

U slučaju linearnih opterećenja, snaga preuzeta iz naizmeničnog izvora ima tri komponente: prividnu, aktivnu i reaktivnu, dok u slučaju nelinearnih opterećenja postoji i četvrta komponenta, snaga deformacije. Nelinearna opterećenja kao što su diodni ispravljači, kada se priključe na prostoperiodični izvor napona, neće imati prostoperiodičan (sinusoidalni) talasni oblik struje što unosi zaprljanje. Uticaj naponskih harmonika: stvaraju dodatno zagrevanje asinhronih motora, sinhronih motora i generatora, pikovi viših harmonika mogu izazvati starenje izolacije kablova, namotaja i kondenzatora, neispravan rad elektronskih komponenti i kola koja koriste naponski talas za sinhronizaciju.

Matlab model dovoljno tačno prikazuje rezultate simulacije izuzev kod velikog zaprljanja mreže gde se pojavljuju mnogo viših harmonika tu je najveće odstupanje kod reaktivne snage, snaga deformacije je velike vrednosti (snaga deformacije ispravljača je oko trećine od prividne snage ispravljača), dok kod motora je snaga deformacije oko osam procenata od ukupne snage motora. U praksi je poželjno da viši harmonici budu što manje vrednosti zbog raznih neželjenih pojava. Kod složenoperiodičnog režima je potrebno da reaktivna snaga i snaga deformacije budu što manje vrednosti.

### 5. LITERATURA

- [1] [Branimir D. Reljin, Teorija električnih kola II, rešavanje kola u frekvencijskom domenu, Akademski misao 2009 Beograd.]
- [2] V.Katic: "Energetski elektronski pretvaraci kao izvori viših harmonika u distributivnoj mreži – I deo", Studija za SOUR Elektrovojdina, Novi Sad, mart 1990.
- [3] V.Katic: "Kvalitet elektricne energije – viši harmonici", Monografija, Univerzitet – I deo, Novi Sad - Fakultet tehničkih nauka, Edicija Tehnicke nauke - Monografije, Br. 6, Novi Sad, 2002.
- [4] F.Martzloff, T.Gruzs: "Power Quality Site Surveys: Facts, Fiction and Fallacies", IEEE Tran. on Industry Applic., Vol.24, No.6, Nov./Dec. 1988, pp.1005-1018.

### Kratka biografija:

**Vladimir Olear** rođen u Vrbasu 1993. god. Master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Energetska elektronika i električne mašine odbranio je 2020.god.

**Dejan Jerkan** je docent na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, na Katedri za Energetsku elektroniku i pretvarače. Oblast interesovanja su mu modelovanje i dijagnostika električnih mašina, kao i metoda konačnih elemenata.