

# Mjerenje i analiza utjecaja FN elektrane ETFOS na strujne i naponske prilike na mjestu priključka

---

Simić, Siniša

Master's thesis / Diplomski rad

2016

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:147550>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-15**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET**

**Sveučilišni studij**

**MJERENJE I ANALIZA UTJECAJA FN ELEKTRANE  
ETFOS NA STRUJNE I NAPONSKE PRILIKE NA  
MJESTU PRIKLJUČKA**

**Diplomski rad**

**Siniša Simić**

**Osijek, 2016.**



**ETFOS**  
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET OSIJEK



Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

**Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada**

Osijek,

Odboru za završne i diplomske ispite

**Imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada**

<b>Ime i prezime studenta:</b>	Siniša Simić	
<b>Studij, smjer:</b>	Sveučilišni diplomski elektrotehnike,	
<b>Mat. br. studenta, godina upisa:</b>	D-590, 2012.	
<b>Mentor:</b>	Prof.dr.sc. Damir Šljivac	
<b>Sumentor:</b>	Doc.dr.sc. Zvonimir Klaić	
<b>Predsjednik Povjerenstva:</b>		
<b>Član Povjerenstva:</b>		
<b>Naslov diplomskog rada:</b>	<b>MJERENJE I ANALIZA UTJECAJA FN ELEKTRANE ETFOS NA STRUJNE I NAPONSKE PRILIKE NA MJESTU PRIKLJUČKA</b>	
<b>Primarna znanstvena grana rada:</b>	Elektrotehnika	
<b>Sekundarna znanstvena grana (ili polje) rada:</b>		
<b>Zadatak diplomskog rada:</b>	Na temelju dostupnih i dodatnih potrebnih mjerenja sa DC i AC strane izvršiti analizu utjecaja proizvodnje iz FN elektrane 10 kW na krovu ETFOS-a na strujne i naponske prilike na mjestu priključka.	
<b>Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):</b>		
<b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b>	<b>Primjena znanja stečenih na fakultetu: Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: Jasnoća pismenog izražavanja: Razina samostalnosti:</b>	
<b>Potpis sumentora:</b>	<b>Potpis mentora:</b>	
<b>Dostaviti:</b> <b>1. Studentska služba</b>		
<b>U Osijeku,</b>	<b>godine</b>	<b>Potpis predsjednika Odbora:</b>



**ETFOS**  
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET OSIJEK



Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

## IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA

**Osijek,**

**Ime i prezime studenta:**

**Siniša Simić**

**Studij :**

**Sveučilišni diplomski elektrotehnike**

**Mat. br. studenta, godina  
upisa:**

**D-590, 2012.**

**Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom:  
MJERENJE I ANALIZA UTJECAJA FN ELEKTRANE ETFOS NA STRUJNE I  
NAPONSKE PRILIKE NA MJESTU PRIKLJUČKA**

**izrađen pod vodstvom mentora**

**Prof.dr.sc. Damira Šljivca**

**i sumentora**

**Doc.dr.sc Zvonimir Klaića**

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

## SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
1.1. Zadatak diplomskog rada.....	1
2. HARMONICI.....	2
2.1. Pojava harmonika .....	2
2.2. Veličine koje opisuju harmonike.....	4
2.3. Harmonijska izobličenja.....	6
2.4. Uređaji koji uzrokuju harmonijska izobličenja .....	8
2.4.1. Jednofazni pretvarači snage .....	8
2.4.2. Trofazni pretvarači snage .....	10
3. FOTONAPONSKE ELEKTRANE.....	16
3.1. Sunce kao izvor energije.....	16
3.2. Fotonaponska ćelija .....	17
3.3. Fotonaponski modul .....	19
3.4. DC/AC pretvorba.....	21
3.4.1. Princip rada izmjenjivača .....	22
3.5. Integracija FN elektrane na mrežu.....	23
3.6. Pokazatelji kvalitete električne energije .....	25
3.7. Kolebanje i treperenje napona .....	26
3.8. Nesmiterija napona .....	27
3.9. Naponski prekidi i propadi .....	28
3.10. Previsoki naponi i prenaponi .....	29
3.11. Harmonici .....	29
3.12. Zahtjevi iz mrežnih pravila .....	30
3.13. HRN EN 50160:2012.....	31
4. ANALIZA MJERENJA .....	33
4.1. Analiza frekvencije.....	33

4.1.1.	Snimka frekvencije prije priključenja elektrane na mrežu.....	33
4.1.2.	Snimka frekvencije nakon priključenja elektrane na mrežu .....	34
4.2.	Analiza mjerenja faznih napona .....	35
4.2.1.	Snimka faznih napona prije priključenja elektrane na mrežu .....	35
4.2.2.	Snimka faznih napona nakon priključenja elektrane na mrežu.....	36
4.3.	Analiza prisutnosti flikera u mreži .....	37
4.3.1.	Snimka dugotrajnih flikera prije priključenja elektrane na mrežu.....	37
4.3.2.	Snimka dugotrajnih flikera nakon priključenja elektrane na mrežu .....	38
4.3.3.	Snimka kratkotrajnih flikera prije priključenja elektrane na mrežu.....	39
4.3.4.	Snimka kratkotrajnih flikera nakon priključenja elektrane na mrežu .....	40
4.4.	Analiza naponskih nesimetrija u mreži .....	41
4.4.1.	Snimke naponskih nesimetrija prije priključenja elektrane na mrežu.....	41
4.4.2.	Snimke naponskih nesimetrija nakon priključenja elektrane na mrežu .....	42
4.5.	Analiza harmonijskih izobličenja napona (THD).....	43
4.5.1.	Snimka ukupnih harmonijskih izobličenja napona (THD) prije priključenja elektrane na mrežu .....	43
4.5.2.	Snimka ukupnih harmonijskih izobličenja napona (THD) nakon priključenja elektrane na mrežu .....	44
4.6.	Proizvedena djelatna snaga (W) .....	46
5.	ZAKLJUČAK .....	47
	LITERATURA.....	48
	POPIS KORIŠTENIH KRATICA I OZNAKA .....	50
	SAŽETAK.....	51
	ABSTRACT .....	52
	ŽIVOTOPIS .....	53

## **1. UVOD**

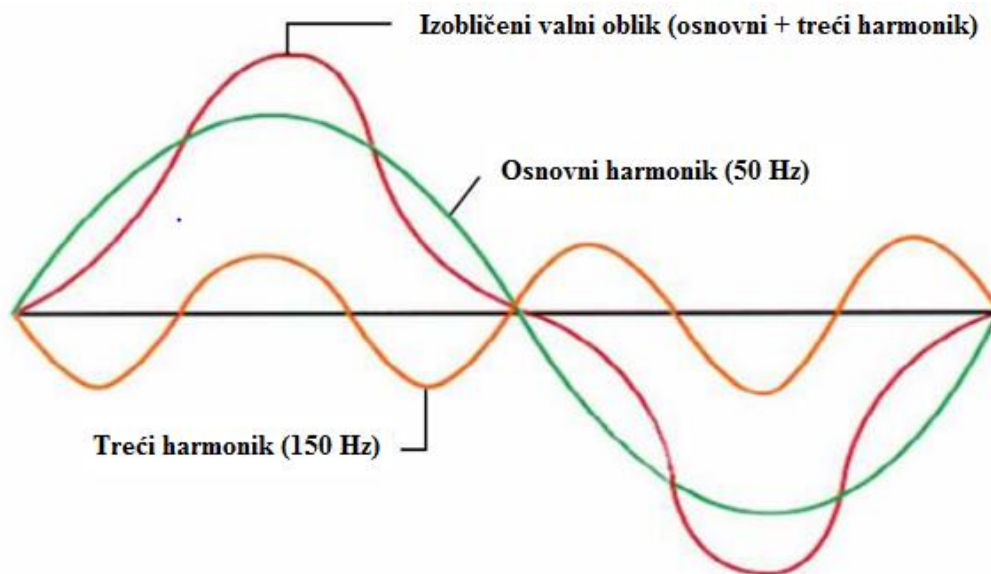
Zbog velikih klimatskih promjena i zagađenja okoliša Zemlje, čovječanstvo je primorano u što bržem roku poduzeti drastične mjere očuvanja okoliša, te samim time u prvi plan postaviti poticanje proizvodnje iz obnovljivih izvora energije, koji još uvijek nisu u potpunosti ekonomski isplativi. Vodeći i svakako najveći potencijal iskorištenja energije iz prirode je Sunce. Sunčeva energija koja upada na zemljinu plohu u vremenskom periodu jednog sata, dostatna je energiji koju čovječanstvo potroši u jednoj godini. Samim time, u današnje vrijeme sve više dolazi do ekspanzije fotonaponskih elektrana, te sunčevih kolektora za grijanje vode. Fotonaponske elektrane dijelom se smatraju novinom u EES–om sustavu, te je potrebno obratiti pozornost na koji način one utječu na EES. Kako bismo sagledali ukupne čimbenike proizvodnje iz FN sustava, njihov utjecaj se mora analizirati, što je i zadatak ovog diplomskog rada. Stoga, kao važno poglavlje obrađen je utjecaj harmonika (izobličenja sinusnog valnog oblika) na mrežu, kako njihova pojava djeluje na kvalitetu električne energije, te što ih generira. U daljnjem radu, definirano je poglavlje samih fotonaponskih elektrana, od čega se sastoji FN sustav, te kako se odvija proizvodnja i prijenos proizvedene električne energije u mrežu. Krajnji rezultat rada, je analiza utjecaja elektrane na mjestu priključka na mrežu, te naponske prilike koje se javljaju prije i poslije priključenja elektrane na mrežu. Rezultati mjerenja i analize utjecaja prikazani su u 4. poglavlju ovoga rada.

### **1.1. Zadatak diplomskog rada**

Na temelju dostupnih i dodatnih potrebnih mjerenja sa DC i AC strane izvršiti analizu utjecaja proizvodnje iz FN elektrane 10 kW na krovu ETFOS-a na strujne i naponske prilike na mjestu priključka.

## 2. HARMONICI

Dobra odlika za većinu elektroenergetskih sustava je karakteristika sinusnog valnog oblika. U većini područja, napon u prijenosnim sustavima ne prelazi 1 % izobličenja. Međutim, izobličenje se povećava pri povećanju opterećenja, tj. isporuci krajnjim potrošačima u distribuciji. Prilikom analize kvalitete električne energije, karakteristika kvalitete napona definirana je od strane proizvođača, dok kvalitetu struje diktira potrošač. U nekim područjima valni oblik struje na potrošačkoj strani jedva sliči sinusnom valu, što je posljedica sve veće uporabe elektroničkih pretvarača, koji doprinose izobličenju osnovnog sinusnog vala. Većina izobličenja je periodična, iako postoje slučajevi gdje je izobličenje slučajno. Karakterizira ga valni oblik struje koji je isti tijekom prolaska jedne periode, koji se jako sporo ili uopće ne mijenja. Takav signal, moguće je matematički razdvojiti na niz valnih oblika, čije se frekvencije odnose kao cjelobrojni višekratnik osnovnog sinusnog valnog oblika (50 Hz.). Takve frekvencije nazivamo harmonicima, kako je prikazano na slici 2.1. [1] [2]



**Slika 2.1.** Prikaz utjecaja harmonika na sinusni val [2]

### 2.1. Pojava harmonika

Pojava harmonika očituje se kod opreme elektroenergetskog sustava čije struje ne prate sinusni valni oblik napona. Elektronička oprema uglavnom se napaja iz istosmjernih izvora, te kao takva zahtijeva AC/DC ispravljače. Ispravljač uzima struju u serijama kratkih impulsa, osim ako nije instaliran poseban aktivni sklop koji to sprječava. Harmonici u mreži ne nastaju prilikom



opskrbe električnom energijom, nego uključanjem u sustav specifičnih uređaja, trošila, opreme ili potrošača. Pojava harmonika je manje izražena što je mreža jača. U prošlosti zbog manjeg opsega elektroenergetskog sustava harmonicima nije pridavan veliki značaj. Međutim u današnje vrijeme, u mrežama velikog opsega a samim time i povećanim brojem potrošača, utjecaj harmonika na uvjete u mreži poprima veliko značenje. Najveći udio u ovome problemu imaju uređaji koji se temelje na energetskej elektronici, kojih je svakim danom sve više. Najčešće korišteni uređaji temeljeni na energetskej elektronici su:

- ispravljači
- izmjenjivači
- usmjerivači
- frekvencijski pretvarači
- elektroničke peći
- fluorescentna rasvjeta
- različita uredska i kućna elektronika
- male distributivne elektrane (solarne)

Svi gore navedeni uređaji i oprema su nelinearna trošila. Velika uporaba nelinearnih trošila u industriji dovodi do povećanog harmonijskog izobličenja u distributivnim mrežama. Najveće izobličenje je uvijek u blizini nelinearnog trošila, a smanjuje se prolaskom kroz mrežu. Izvori električne energije (generatori) smanjuju utjecaj harmonika proizvodeći pravilan sinusni oblik koji nadjača smetnje. Praćenje smetnji nastalih harmonicima potrebno je izvršavati što bliže izvora same smetnje. Većina smetnji nastalih u mreži dolazi od strane potrošača. Viši harmonici struja nelinearnih trošila uzrokuju više harmonike napona u mreži, priključeni na drugačijim naponskim razinama. Ako na nekom dijelu mreže postoji potrošač s negativnim povratnim djelovanjem koji je izvor značajnih viših harmonika struje, u mreži nastaju viši harmonici napona u točki na koju je to trošilo priključeno. [2][3]

Svi potrošači spojeni u toj točki osjete smetnje u obliku smanjenja kvalitete napona. Kako bi se pridržavali mrežnih pravila, opskrbljivači električnom energijom moraju osigurati kvalitetnu energiju svim potrošačima tako da će na neki od načina smanjiti utjecaj smetnji u mreži. [2]

## 2.2. Veličine koje opisuju harmonike

Razlikujemo sljedeće veličine kojima možemo opisati harmonijska izobličenja:

- Efektivna vrijednost (engl. RMS Value)

Zagrijavanje vodiča kojim teče struja određeno je efektivnom vrijednošću struje. Definira se kao:

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} \quad (2-1)$$

Pri pojavi signala sa više različitih frekvencija efektivnu vrijednost računamo:

$$I_{RMS} = \sqrt{I_{1RMS}^2 + I_{2RMS}^2 + I_{3RMS}^2 + \dots} \quad (2-2)$$

- Vršni faktor (engl. Crest factor – CR)

Upotrebljava se kod određivanja dielektričnog opterećenja materijala. Definira se kao omjer vršne i efektivne vrijednosti signala:

$$CF = \frac{\text{vršna vrijednost}}{\text{efektivna vrijednost}} \quad (2-3)$$

- Harmonijski faktor (engl. Harmonic Factor - HF)

Definira se za svaki harmonik posebno kao omjer efektivne vrijednosti promatranog harmonika i efektivne vrijednosti osnovnog harmonika:

$$HF_n = \frac{U_n}{U_1} \quad (2-4)$$

- Totalno harmonijsko izobličenje (engl. Total Harmonic Distortion - THD)

Opisuje koliko se stvarni valni oblik signala i njegov osnovni harmonik podudaraju. Ova veličina često se koristi u praksi i standardima.

$$THDU = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} (U_h)^2} \frac{100\%}{U_1} \quad (2-5)$$

Vrijednosti ove veličine lako se izračunavaju te su standardizirane u nacionalnim standardima. Nedostatak ove veličine je što ne prati porast frekvencije, odnosno iz ove veličine ne može se doći

do zaključka u kojem frekvencijskom opsegu se nalaze harmonici. Razlikujemo dvije vrste THD faktora:

- simetrični THD (engl. Balanced THD) koji se računa na temelju direktnih i inverznih komponenti napona ili struja
- nulti THD (engl. Residual THD) koji se računa na temelju nultih komponenti napona ili struja.

Kako kod nultog THD-a ne postoji poništavanje po fazama on je mnogo štetniji od simetričnog. THD može izračunati i na sljedeći način:

$$THD = \frac{\sqrt{I^2 - I_1^2}}{I_1} \quad (2-6)$$

gdje je  $I$  efektivna vrijednost signala a  $I_1$  efektivna vrijednost prvog harmonika. Za subharmonike i interharmonike može se definirati totalno subharmonijsko (interharmonijsko) izobličenje TSDH (TIHD):

$$TSHD = \frac{\sqrt{\sum_{s=1}^m I_s^2}}{I_1} \quad (2-7)$$

- Najniži značajni harmonik (engl. Lowest Order Harmonic - LOH)

Harmonik čija je frekvencija najbliža osnovnome harmoniku, a čija je amplituda veća ili jednaka 3% od amplitude osnovnog harmonika

- Faktor snage (engl. Power Factor - PF)

Često se koristi u određivanju količine jalove energije koju je potrebno platiti uslijed induktivnog opterećenja. Prilbližno prikazuje gubitke u mreži uzrokovane tokovima jalove snage.

$$PF = \frac{P_{uk}}{|U_{RMS}| |I_{RMS}|} \quad (2-8)$$

- Faktor pomjeranja (engl. Displacement Power Factor - DPF)

$$DPF = \cos(\phi_{50Hz}) \quad (2-9)$$

Za čisti sinusni napon jednak faktoru snage. Ako postoje viši harmonici dolazi do razlike u faktorima koju nazivamo engl. True PF (TPF) koju možemo opisati na sljedeći način:

$$(T)PF = \frac{I_{1RMS}}{I_{RMS}} DPF \quad (2-10)$$

gdje je  $I_{1RMS}$  efektivna vrijednost prvog harmonika a  $I_{RMS}$  efektivna vrijednost signala.

- Indeks izobličenja (engl. Distortion Indeks - DIN)

$$DIN = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_{RMS}} \quad (2-11)$$

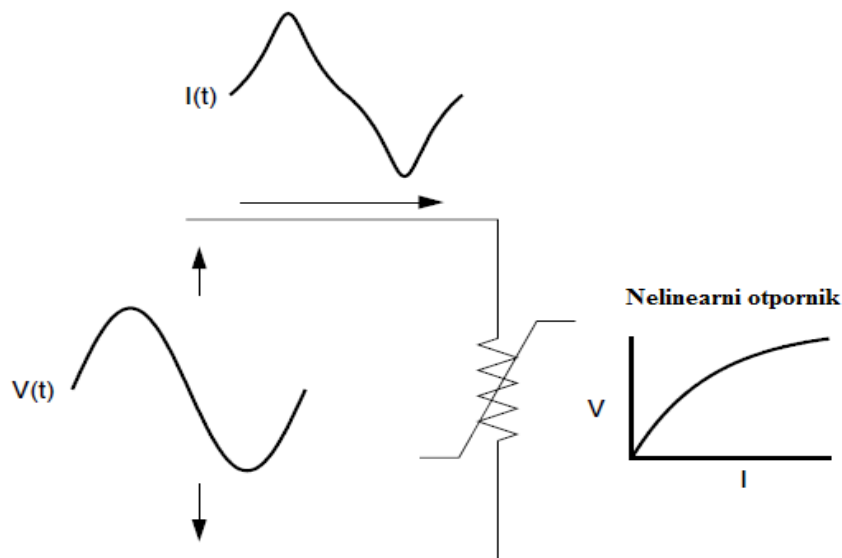
- Faktor distorzije (engl. Distortion Factor - DF)

$$DF = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2}}{I_1} \quad (2-12)$$

[4]

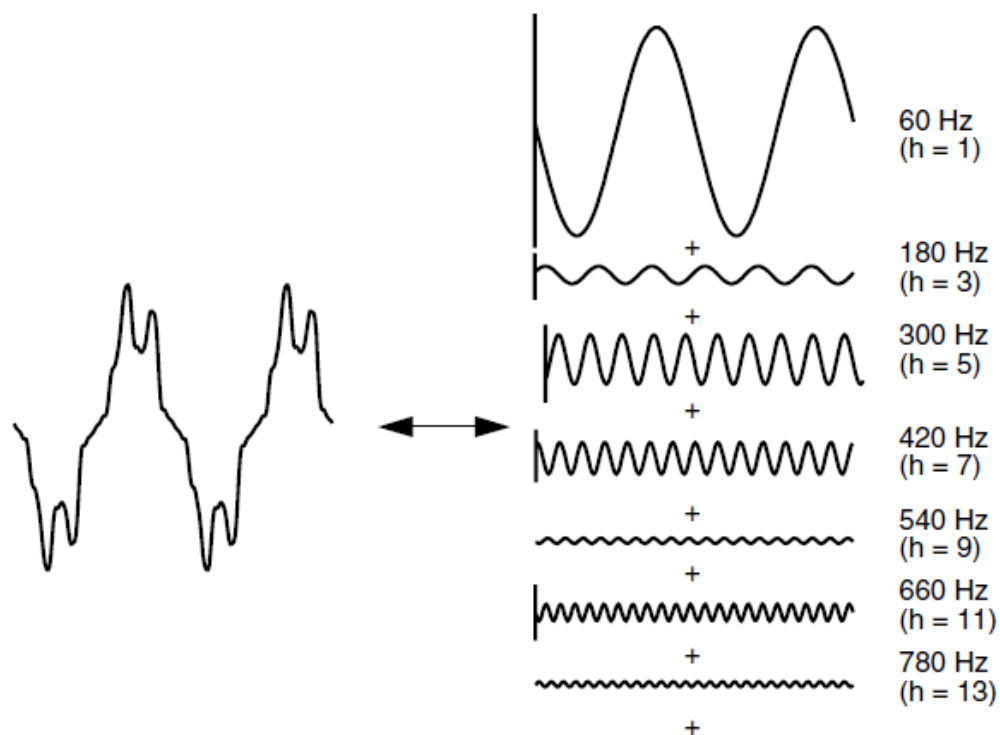
### 2.3. Harmonijska izobličenja

Harmonijska izobličenja uzrokovana su nelinearnim uređajima u EES–u. Nelinearni uređaj je onaj kojemu struja nije proporcionalna s naponom. Slika 2.2. prikazuje slučaj gdje je sinusni oblik napona primijenjen na nelinearnom otporniku, u kojem struja i napon variraju tijekom jednog perioda. Dok je oblik napona čista sinusoida, rezultanta struja je izobličena. Povećanje napona za nekoliko postotaka može uzrokovati udvostručenje struje koja dobiva drugačiji valni oblik. To je izvor većine harmonijskih izobličenja u EES–u. [1]



**Slika 2.2.** Izobličenje struje uzrokovano nelinearnim otpornikom [1]

Slika 2.3. prikazuje da bilo koja perioda, izobličenog valnog oblika, može biti prikazana kao zbroj sinusoida. Kada je valni oblik jednak od periode do periode, može se prikazati kao zbroj čistih sinusnih valova, u kojem je frekvencija svakog sinusnog vala čini cjelobrojni umnožak nazivne frekvencije izobličenog valnog oblika. Ova pojava naziva se harmonik temeljnog oblika vala. Zbroj sinusoida razvija se u Fourierov red, nazvan po matematičaru koji ga je otkrio. Fourierov red učestalo se primjenjuje u analizi harmonika. Sustav se time može analizirati za svaki harmonik zasebno. Samim time pojednostavljena je analiza svakog harmonika za razliku od ukupnog izobličenja vala. Izlaz svake frekvencije kombinira se tako da tvori novi Fourierov red, iz kojih se može izračunati izlazni valni oblik. Vrlo često se promatraju samo veličine harmonika. Kada obje pozitivne i negativne poluperiode valnog oblika imaju jednake oblike, Fourierov red sadrži samo neparne harmonike. Primjenom navedenog dolazi do pojednostavljenja daljnjih analiza harmonika, jer najčešće harmonici nelinearnih uređaja izgledaju isto u oba polariteta. U principu pojava bilo kojeg harmonika često je znak da nešto nije u redu, bilo sa potrošačima ili mjernim uređajima. Postoje značajne iznimke, kao što su poluvalni ispravljajući i lučne peći. [1][2]



**Slika 2.3.** Prikaz Fourierovog reda za izobličeni valni oblik frekvencije 60 Hz [1]

Obično su harmonici višeg reda (25.–50., ovisno o sustavu) zanemarivi za analiza u EES-u. Pojava smetnje sa elektroničkim uređajima, obično ne šteti EES-u. Također je teško skupiti dovoljno točne podatke za konstrukciju EES-a na tim frekvencijama, pri čemu je iznimka ako postoji

rezonancija u rasponu frekvencija. Rezonancija može biti uzrokovana prijelaznim pojavama u energetskim pretvaračima. Tu pojavu uzrokuje valni oblik napona s više prolaska kroz nulu, koji čini poremećaj u vremenskim sklopovima. Rezonancije se općenito javljaju u sustavima s podzemnim kabelima. Ako je EES prikazan kao serija i shunt elementima, velika većina nelinearnosti pridodaje se shunt elementima (opterećenjima). Serijska impedancija distribucijskog sustava (impedancija kratkog spoja između izvora i potrošača) je linearna. U transformatorima, također kao izvor harmonika smatra se shunt grana (impedancija magnetiziranja) zajedničkog „T“ modela, propusna impedancija je linearna. Prema tome, izvor harmonijskih izobličenja biti će u konačnici opterećenja krajnjeg korisnika. To ne govori da svi krajnji korisnici proizvode harmonijska izobličenja, ali u praksi izobličenja uglavnom dolaze od strane potrošača ili kombinacije potrošača. [1]

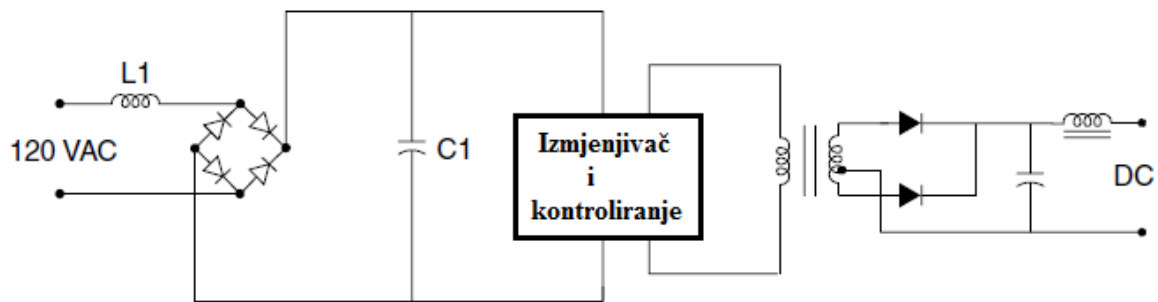
## **2.4. Uređaji koji uzrokuju harmonijska izobličenja**

### **2.4.1. Jednofazni pretvarači snage**

Elektronički pretvarači snage opterećuju sustav proizvodeći strujne harmonike. Oni predstavljaju najvažniju vrstu nelinearnih opterećenja u elektroenergetskom sustavu. Napredak u poluvodičkoj tehnologiji utjecao je na revoluciju u energetskoj elektronici u posljednjem desetljeću, a postoje sve naznake da će se taj trend nastaviti. Oprema uključuje: motorne pogone s podesivim brzinama, elektronička napajanja, istosmjernu motorne pogone, punjače baterija, elektronske prigušnice, i mnoge druge primjene ispravljača i pretvarača. [1]

Veliki problem u poslovnim zgradama je korištenje uređaja čija napajanja sadrže elektroničke komponente koje generiraju previše strujnih harmonika. Istosmjerno napajanje za suvremenu elektroničku i mikroprocesorsku opremu obično je izvedeno kao jednofazni punovalni ispravljač s diodnim mostom. Postotak opterećenja potrošnje koja sadrži elektronička napajanja dramatično raste s povećanom upotrebom osobnih računala u svakom komercijalnom sektoru.[1][4]

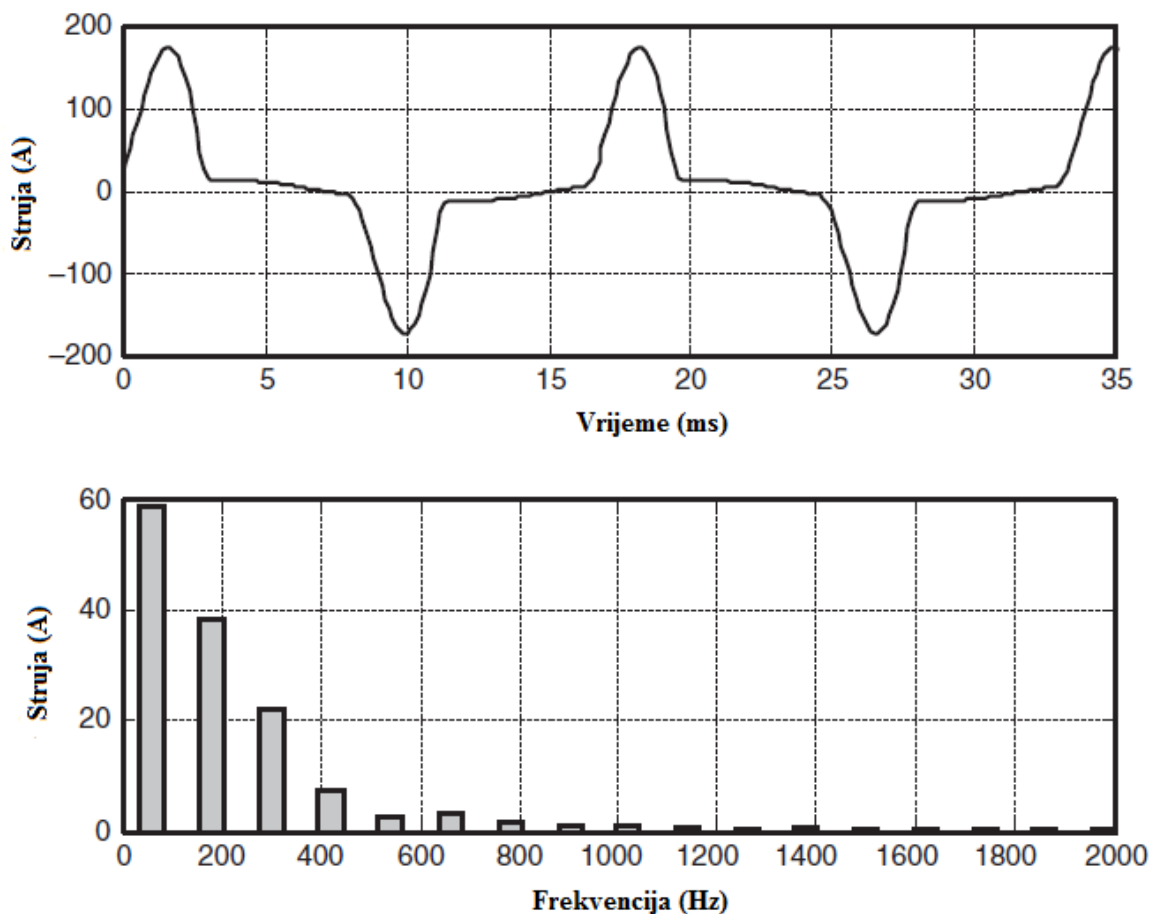
Starije tehnologije koriste metode kontrole napona na izmjeničnoj strani, kao što su transformatori, tako što smanjuju napone do razine koja je potrebna za istosmjernu sabirnicu. Induktivitet transformatora pruža korisnu nuspojavu koja izgladuje valni oblik ulazne struje, smanjujući harmonijski utjecaj. Na slici 2.4. prikazano je napajanje koje koristi DC-DC pretvorbu kako bi se postigao gladak oblik izlaznog DC napona, sačinjen od malih i laganih komponenti. [1][5]



**Slika 2.4.** Napajanje s izmjenjivačem [1]

Ulazni diodni most spojen je direktno na AC stranu, eliminirajući transformator, što rezultira grubu regulaciju istosmjernog napona na kondenzatoru. Istosmjerna struja se zatim pretvara u izmjeničnu pri vrlo visokim frekvencijama, pomoću izmjenjivača, te nakon toga ponovno ispravlja. Osobna računala, pisači, fotokopirni uređaji, te većina druge elektroničke opreme koja koristi jednofazno napajanje bazira se na takvom načinu pretvorbe. Ključne prednosti su manja težina, kompaktne dimenzije, učinkovit rad, te neupotreba transformatora. Takva vrsta napajanja može tolerirati velike varijacije ulaznog napona.

Budući da ne postoji veliki induktivitet na izmjeničnoj strani, ulazna struja napajanja dolazi u vrlo kratkim impulsima kako se kondenzator  $C_1$  ponovno puni na svakoj polovici ciklusa. Slika 2.5. prikazuje valni oblik struje i spektar za cijeli krug napajan različitim vrstama elektroničke opreme s ovakvom vrstom napajanja. [1]



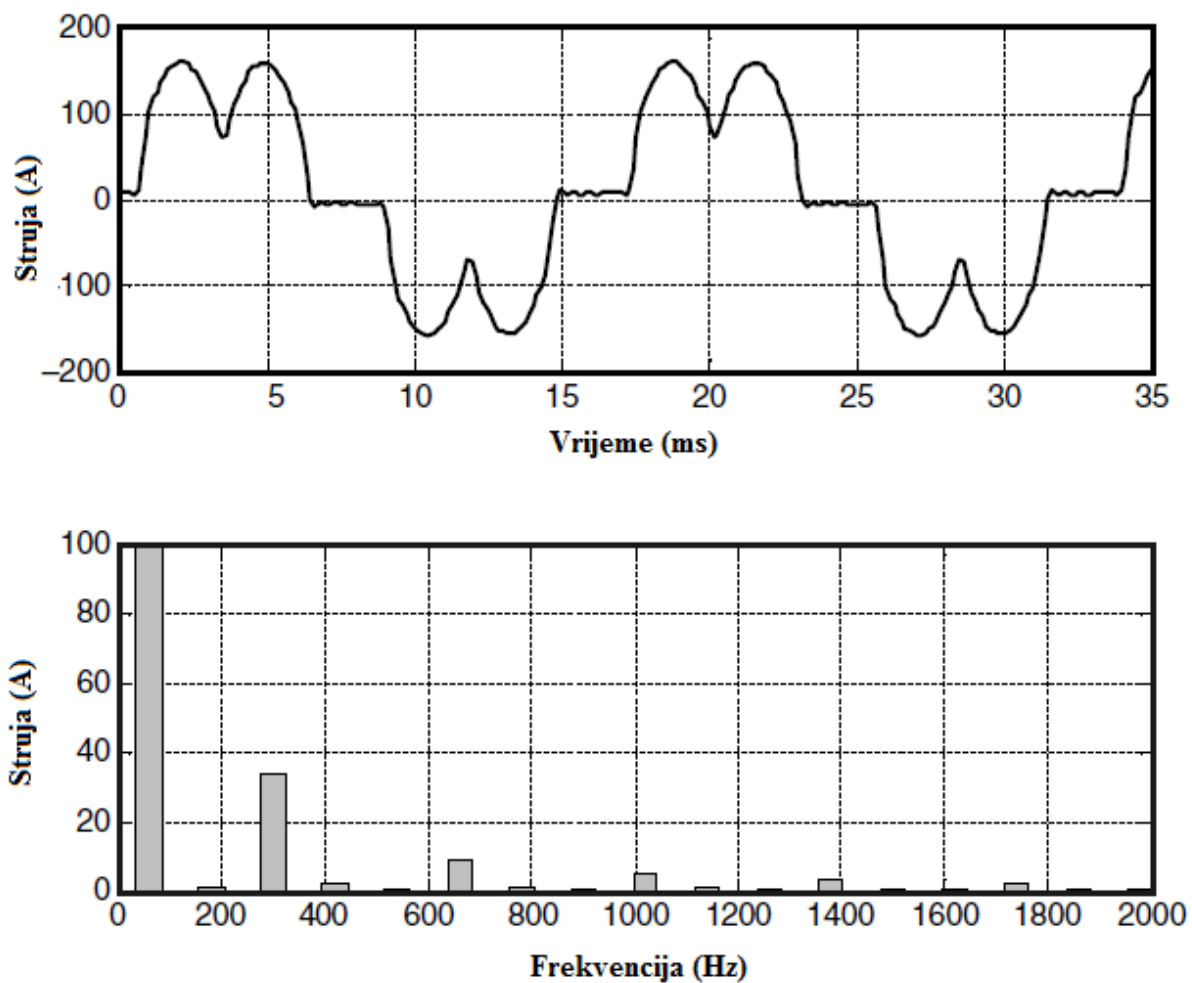
**Slika 2.5.** Struja i njezin harmonijski spektar [1]

Posebnost napajanja s izmjenjivačem je vrlo visok treći harmonik struje. Budući da se treći harmonik struje očituje u neutralnom vodiču trofaznog sustava, povećanje primjene takvih napajanja izaziva zabrinutost za preopterećenje neutralnih vodiča, osobito u starijim zgradama gdje je moguće da instalirani vodiči nisu odgovarajućeg presjeka. Također treba obratiti pozornost da ne bi došlo do pregrijavanja transformatora zbog kombinacije harmonijskog sadržaja struje i velikih struja u neutralnim vodičima. [1]

#### 2.4.2. Trofazni pretvarači snage

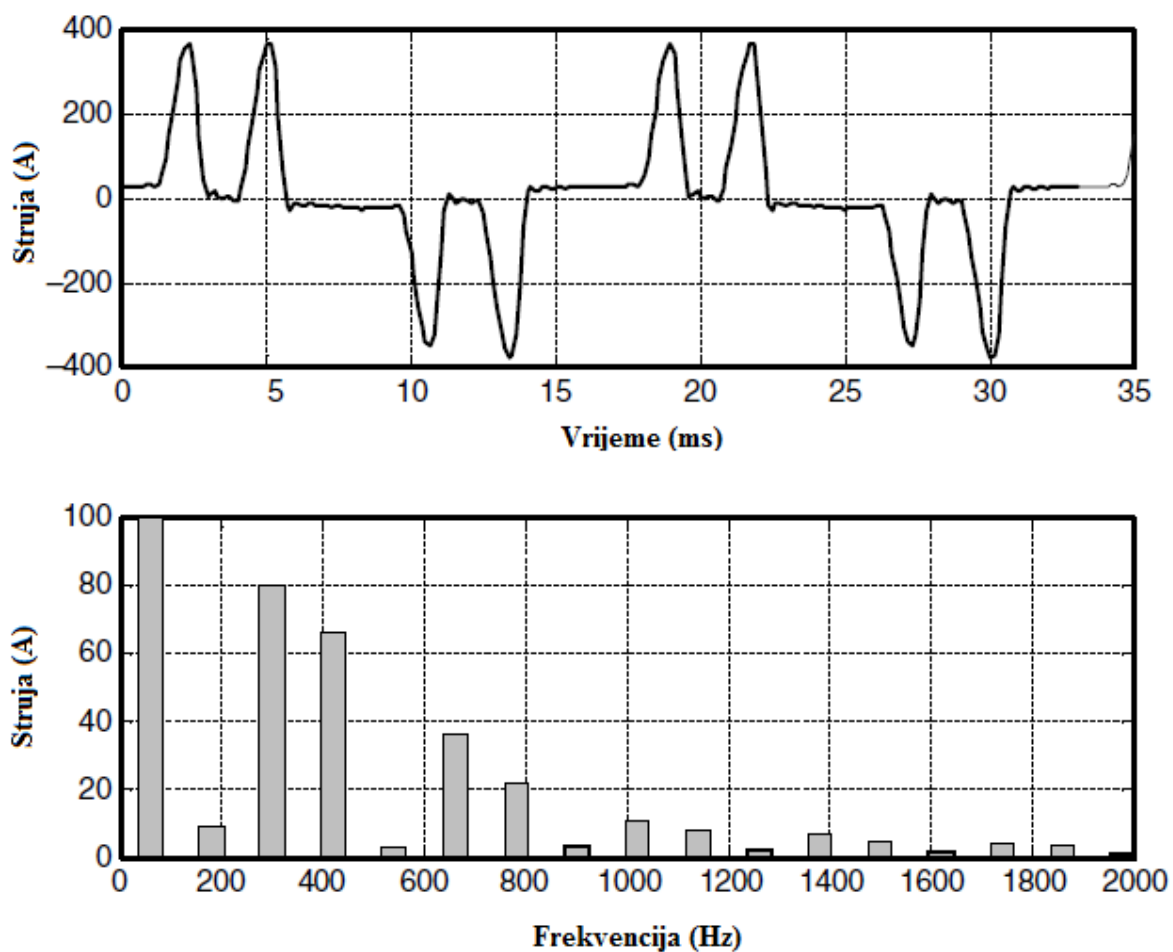
Trofazni elektronički pretvarači snage razlikuju se od jednofaznih pretvarača uglavnom po tome što ne generiraju treći harmonik struje. To je velika prednost, jer treći harmonik struje ima najveći udio u ukupnom harmonijskom spektru. Međutim, oni još uvijek mogu biti značajan izvor harmonika pri svojim karakterističnim frekvencijama, kao što je prikazano na slici 2.6.





**Slika 2.6.** Valni oblik struje i ukupni harmonijski spektar pogona podesive brzine [1]

Na slici 2.7. prikazan je tipičan izvor struje pogona podesive brzine, kao i harmonijski spektar, također tipičan za istosmjerni izvor. Naponski izmjenjivač može imati puno više razina izobličenja kao što je prikazano na slici 2.7.



**Slika 2.7.** Valni oblik struje i harmonijskog spektra naponskog izmjenjivača [1]

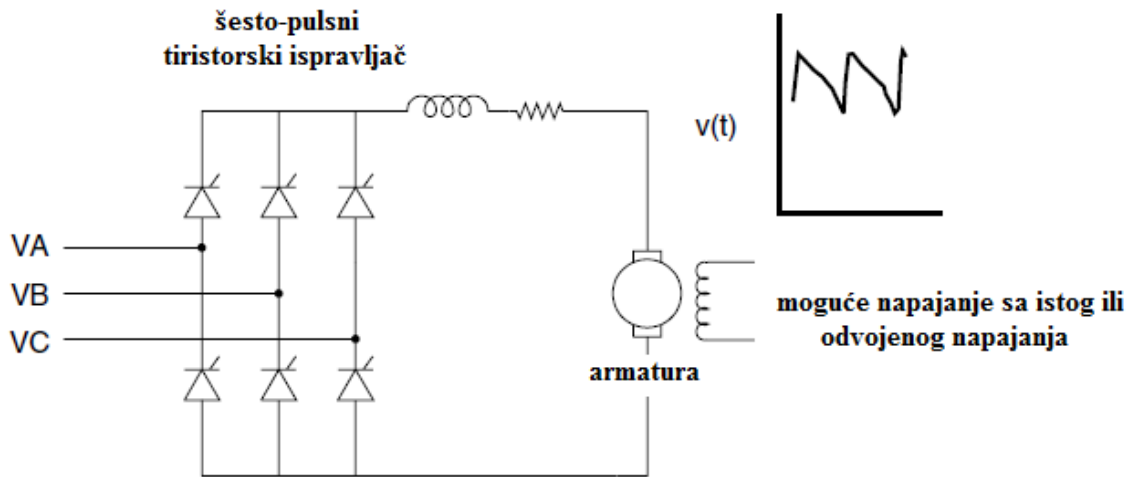
Ulaz u PWM (engl. pulse-width modulation) općenito je osmišljen kao trofazna verzija napajanja s izmjenjivačem koji se koristi u osobnim računalima. Ispravljač se napaja direktno iz izmjenične sabirnice do kondenzatora na istosmjernoj sabirnici. S malo namjernog induktiviteta, kondenzator se napaja u vrlo kratkim impulsima, stvarajući prepoznatljivo „zečje uho“ na izmjeničnoj strani. Valni oblik struje poprima visoka izobličenja. Dok su napajanja s izmjenjivačem uglavnom za vrlo mala opterećenja, PWM pogoni se sada primjenjuju za opterećenja do 500 konjskih snaga. [1]

### DC pogoni

Ispravljanje je jedini korak potreban za DC pogone, stoga, oni imaju prednost zbog relativno jednostavnog upravljačkog sustava. U usporedbi s AC pogonskim sustavima, DC pogon nudi širi raspon brzine i veće pokretne momente. Međutim, troškovi i održavanje DC pogona su vrlo visoki, dok cijena energetske elektronike opada iz godine u godinu. Prema tome, ekonomski razlozi

ograničavaju korištenje DC pogona u pogonima koji zahtijevaju brzinu i momentne karakteristike istosmjernog motora. [1][6]

Većina DC pogona koristi šesto-pulsni ispravljač prikazan na slici 2.8.



Slika 2.8. Šestero-pulsni tiristorski ispravljač [1]

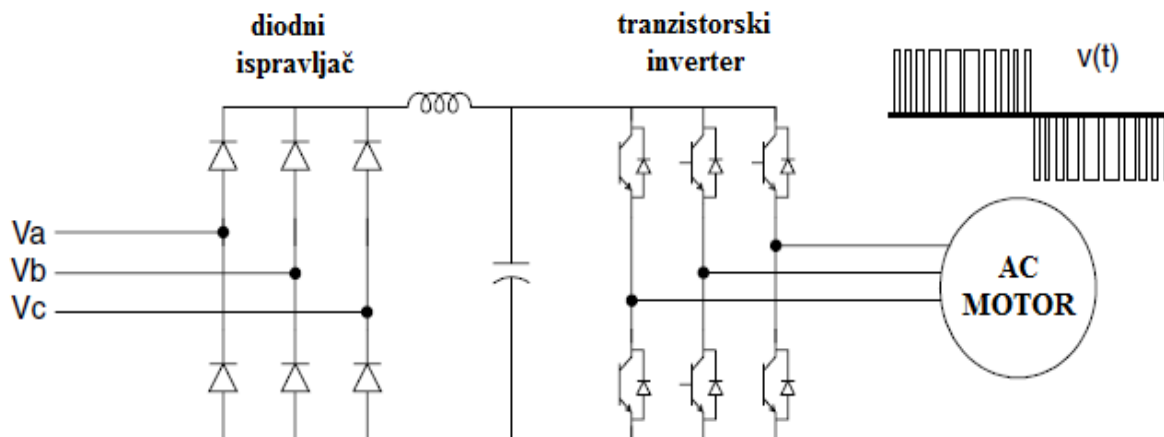
Veliki pogoni mogu zahtijevati i dvanaesto-pulsne ispravljače. Time se smanjuju struje tiristora i viši harmonici struje na izmjeničnoj strani. Dva najveća harmonika šesto-pulsnog ispravljača su peti i sedmi, koji su najproblematičniji u smislu odziva sustava. Dvanaesto-pulsni ispravljač u svojoj primjeni očekivano uklanja oko 90% petog i sedmog harmonika, ovisno o neuravnoteženosti sustava. Nedostaci dvanaesto-pulsnog ispravljača su veća cijena elektronike i činjenica da je uglavnom potreban dodatni transformator. [1][6]

### AC pogoni

U AC pogonima, izlaz ispravljača je obrnut da se dobije napon promjenjive frekvencije za motor. Izmjenjivači su klasificirani kao naponski pretvarači ili strujni pretvarači. Naponski pretvarač zahtijeva stalni ulazni napon na izmjenjivaču, koji se postiže kondenzatorom ili LC filtrom u istosmjernoj vezi. Strujni pretvarač zahtijeva stalnu ulaznu struju, stoga je postavljen niz prigušnica u istosmjernoj vezi.

AC pogoni uglavnom koriste standardne kavezne asinkrone motore koji su robusni, relativno niske cijene i zahtijevaju malo održavanja, dok se sinkroni motori koriste kada je potrebna precizna kontrola brzine.

Često korištena konfiguracija AC pogona je ona s naponskim pretvaračem koristeći PWM tehniku za dobivanje izmjeničnog valnog oblika kao niz istosmjernih impulsa promjenjive širine, kao što je prikazano na slici 2.9.

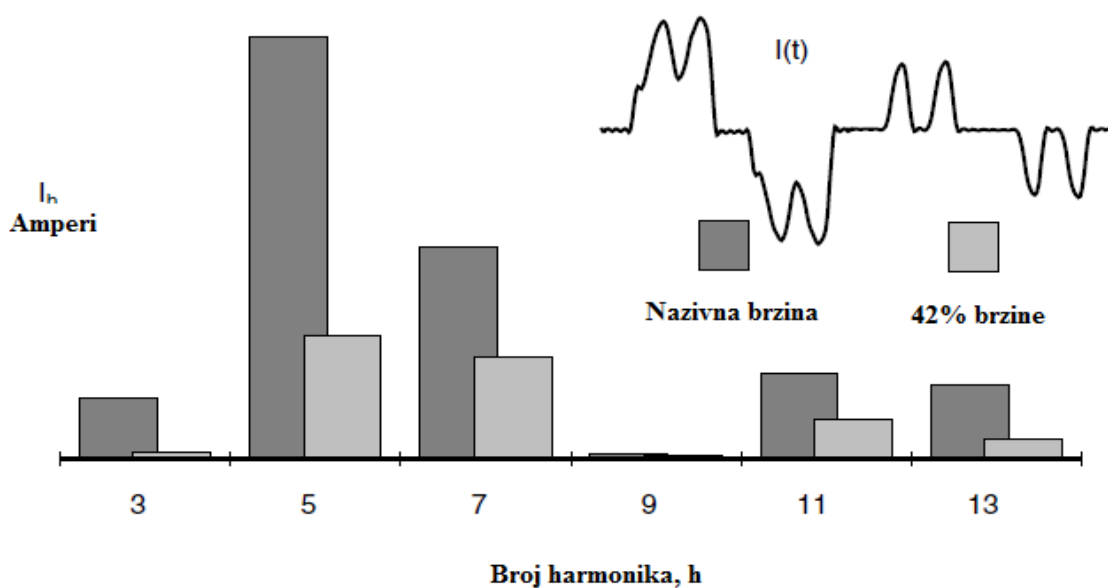


**Slika 2.9.** Trofazni pretvarač s PWM modulacijom [1]

Pretvarač koristi GTO tiristore ili tranzistore snage. Trenutačno takvi pogoni nude najbolju učinkovitost u pogonima preko 500 konjskih snaga, koji kao takvi zahtijevaju širok raspon brzina. Još jedna prednost takvih pogona je da, za razliku od drugih vrsta pogona, nije potrebno mijenjati izlazni napon za kontrolu brzine motora. To omogućuje da se ispravljački tiristori zamijene diodama, a tiristorski upravljački krug bude uklonjen. [1][4]

### Utjecaj u pogonskom stanju

Harmonijsko izobličenje struje u pogonima podesive brzine nije konstantno, pri čemu se valni oblik značajno mijenja za različite brzine i vrijednosti momenta. Na slici 2.10. prikazana su dva pogonska uvjeta za PWM pogon koji omogućuje podešavanje brzine vrtnje, te stupčani graf koji prikazuje količinu injektirane struje.



**Slika 2.10.** Utjecaj promjene brzine vrtnje i momenta na harmonike [1]

Pri 42% brzine valni oblik je puno više proporcionalno izobličen, u odnosu na značajno veću amplitudu harmonika pri nazivnoj brzini. To je ograničavajući faktor, a ne ukupno harmonijsko izobličenje, THD.

### **3. FOTONAPONSKE ELEKTRANE**

Obnovljivi izvori energije stvoreni su iz prirodnih, odnosno obnovljivih izvora, tj. izvora koji su iznova ponovno punjivi. To su: sunčeva svjetlost, vjetar, geotermalna toplina, kiša i valovi. Tehnologija obnovljivih izvora energije uključuje: sunčevu energiju, snagu vjetra, energiju biomase, biogoriva te hidroenergiju. [7][8]

Dok se stoljećima koristila energija fosilnih goriva, danas se sve više koristi obnovljiva energija te se smatra ključnim čimbenikom daljnjeg razvoja Zemlje. Na to su utjecale i klimatske promjene te visoke cijene fosilnih goriva, ali i poticaji država usmjereni na komercijalizaciju obnovljivih izvora energije. Sporazum potpisan u ožujku 2007. godine od strane predsjedatelja Europske Unije, uvjetuje da 20 % nacionalno proizvedene energije treba biti iz obnovljivih izvora, a do 2020. godine i smanjenje emisija ugljikovog dioksida CO<sub>2</sub> koji je uzročnik globalnog zatopljenja. [9] Samim time instalirani kapaciteti u Republici Hrvatskoj morat će se do 2020. godine povećati na 1545 MW, iz čega će na elektrane na sunčevu energiju otpasti 40 MW. [10]

Do 30. siječnja 2015. godine, u Hrvatskoj je instalirano 1070 elektrana na obnovljive izvore, ukupne snage 412,594 MW. Kao vodeće, prema instaliranoj snazi, zasigurno su vjetroelektrane, čija instalirana snaga prelazi 330 MW. Shodno time, odmah na drugom mjestu po proizvodnji su sunčane elektrane ukupne proizvodnje 34 MW. [11]

#### **3.1. Sunce kao izvor energije**

Sunčeva ili solarna energija je energija Sunca, njegova svjetlost i toplina koju ljudi koriste od davnina uz pomoć raznih tehnologija. Sunce je nama najbliža zvijezda te je središnja zvijezda Sunčevog sustava i izvor gotovo sve raspoložive energije na Zemlji. Sunčeva energija potječe od nuklearnih reakcija koje se zbivaju u njegovom središtu gdje temperatura doseže 15 milijuna °C. Radi se o fuziji, gdje spajanjem vodikovih atoma nastaje helij te se oslobađa velika količina energije. Na taj način svake sekunde oko 600 milijuna tona vodika prelazi u helij te se masa od nekih 4 milijuna tona vodika pretvori u energiju. Ova se energija u vidu svjetlosti i topline širi u svemir pa tako jedan njezin mali dio dolazi i do Zemlje u obliku Sunčeva zračenja. [9][10]

Sunčeva energija je danas uzročnik većine izvora energije, ona se ubraja u najčešće dostupne izvore energije na Zemlji. Ona pruža električnu energiju pomoću toplinskih strojeva ili pomoću fotonaponskih sustava. Kada se ona jednom pretvori, njezina uporaba zapravo je ograničena samo ljudskim postignućima. U optimalnim uvjetima, na površini Zemlje može se dobiti 1 kW/m<sup>2</sup>, a stvarna vrijednost ovisi o lokaciji, godišnjem dobu, dobu dana, vremenskim uvjetima i sl.

U Hrvatskoj je prosječna vrijednost dnevne insolacije na horizontalnu plohu 3-4,5 kWh/m<sup>2</sup>. Sunčeve tehnologije su karakterizirane kao pasivne ili aktivne, ovisno o načinu sakupljanja, pretvaranja i raspodjele sunčevog svjetla. Pasivne tehnike uključuju orijentaciju zgrade prema Suncu, odabir materijala s povoljnim termalnim svojstvima ili svojstvima raspršivanja svjetlosti, te projektiranje prostora kod kojih prirodno cirkulira zrak. Aktivne tehnike pak podrazumijevaju uporabu fotonaponskih ćelija i sunčevih toplovodnih kolektora (s električnom ili mehaničkom opremom) kako bi sunčevu svjetlost pretvorili u korisne izlazne jedinice. Osnovni problemi iskorištavanja sunčeve energije su mala gustoća energetskega toka, velike oscilacije intenziteta zračenja te veliki investicijski troškovi.

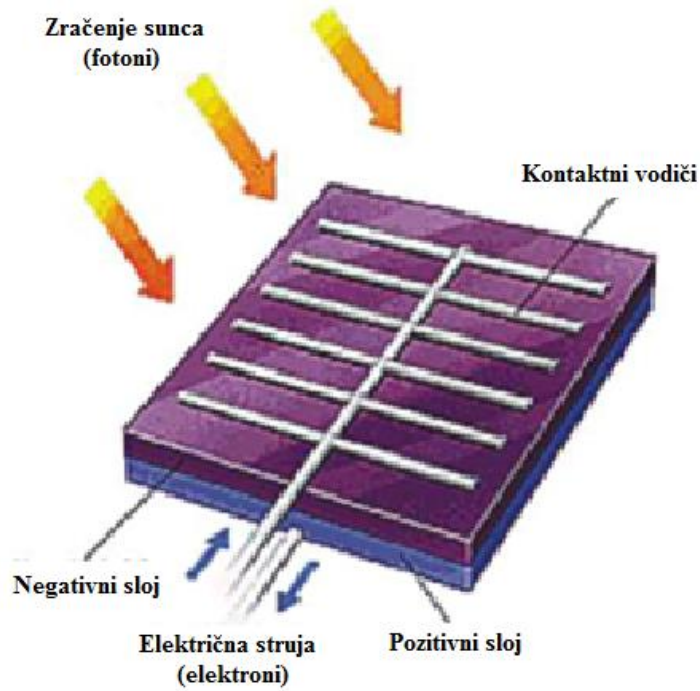
Osnovni principi direktnog iskorištavanja sunčeve energije su:

- solarni kolektori - pripremanje vruće vode i zagrijavanje prostorija
- fotonaponske ćelije - direktna pretvorba sunčeve energije u električnu energiju
- fokusiranje sunčeve energije - upotreba u velikim energetskega postrojenjima

### **3.2. Fotonaponska ćelija**

Početak 19.-tog stoljeća francuski fizičar Alexandre-Edmond Becquerel prilikom pokusa elektrolitskim stanicama, koristeći anode i katode od platine, otkrio je povećanje vrijednosti struje pri većem osvjetljenju. Na taj način otkrivena je temeljna primjena fotonapona. Nobelovu nagradu za potpuno objašnjenje fotonaponskog efekta dobio je 1905. godine, Albert Einstein.

Ukoliko se PN-spoj, izloži svjetlosti, fotoni koji upadaju na površinu fotonaponske ćelije, prikazane na slici 3.1., predaju svoju energiju, te se na taj način negativno nabijeni elektroni izbijaju iz atomske strukture. Srazom fotona, ostvaruje se pokretljivost elektrona od „P“ ka „N“ spoju, te se tako ostvaruje razlika potencijala, tj. napon otvorenog kruga. Ukoliko se na kontakte FN ćelije spoji neko trošilo, ćelija se ponaša kao izvor konstantne struje. [13]

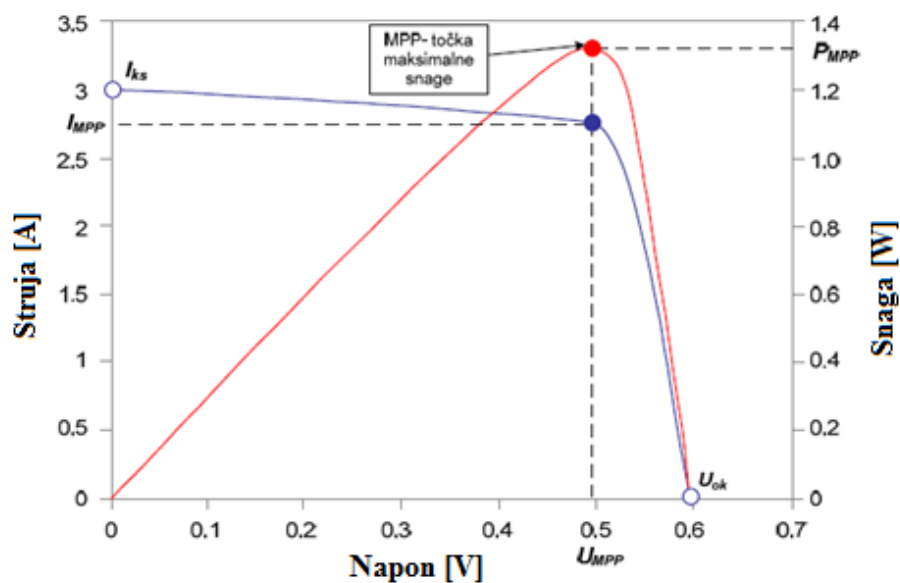


Slika 3.1. Pojednostavljeni prikaz fotonaponske ćelije [14]

Osnovni parametri FN ćelije najvjernije se mogu prikazati na strujno naponskoj karakteristici prikazanoj na slici 3.2. [13]

U njih ubrajamo:

- Točka maksimalne snage (MPP)
- Struja kratkog spoja ( $I_{ks}$ )
- Napon otvorenog kruga



Slika 3.2. Strujno-naponska karakteristika FN ćelije [15]



- a) **Točka maksimalne snage** (engl. MPP – Maximum Power Point ) – Radna točka ćelije karakterizirana maksimalnom snagom, tj., sjecište krivulje i pravokutnika najveće površine koji se može upisati u krivulju. Pri čemu je najveća snaga određena je jednadžbom: [13]

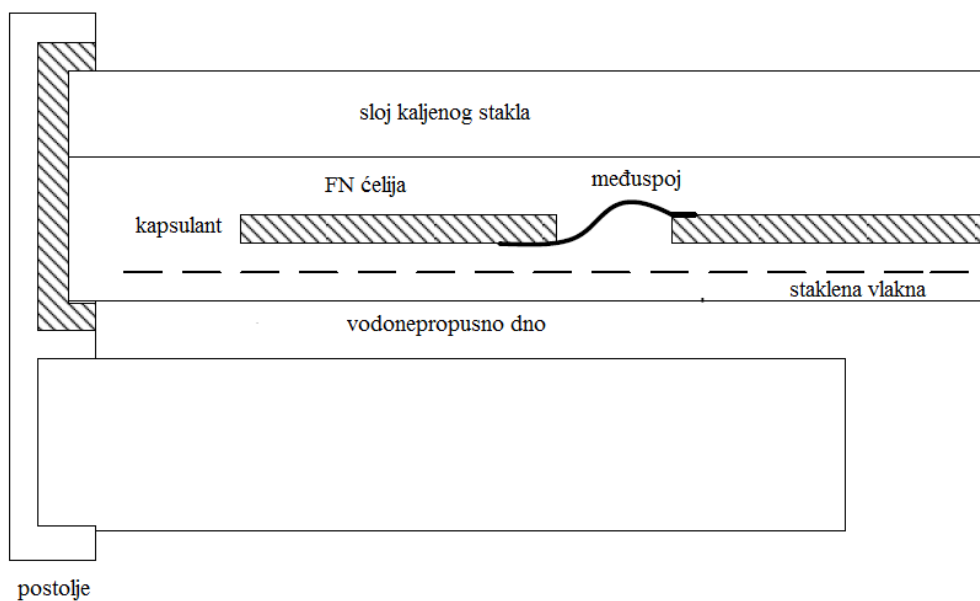
$$P_{mpp} = U_{mpp} * I_{mpp} \quad (3-1)$$

- b) **Struja kratkog spoja** – ukoliko je napon na krajevima FN ćelije jednak nuli ( $U=0$ ), tada je struja kratkog spoja ekvivalentna fotostruji, iz čega proizlazi:  $I_{ks}=I_f$   
Porast struje kratkog spoja kod silicijskih ćelija iznosi oko (0,05 – 0,07) %/°C, za razliku od amorfnih kod kojih je porast oko 0,02 %/°C. Iz čega proizlazi da veći učinak imaju amorfne ćelije, pri normalnim temperaturama, od kristaličnih. [13]
- c) **Napon otvorenog kruga** – Količina sunčeva zračenja ekvivalentna je povećanju napona otvorenog kruga. Temperatura zraka uvelike utječe na vrijednost napona otvorenog kruga, jer temperature ćelija u određenim vremenskim periodima dosežu višestruko više vrijednosti od temperature zraka. [13]

### 3.3. Fotonaponski modul

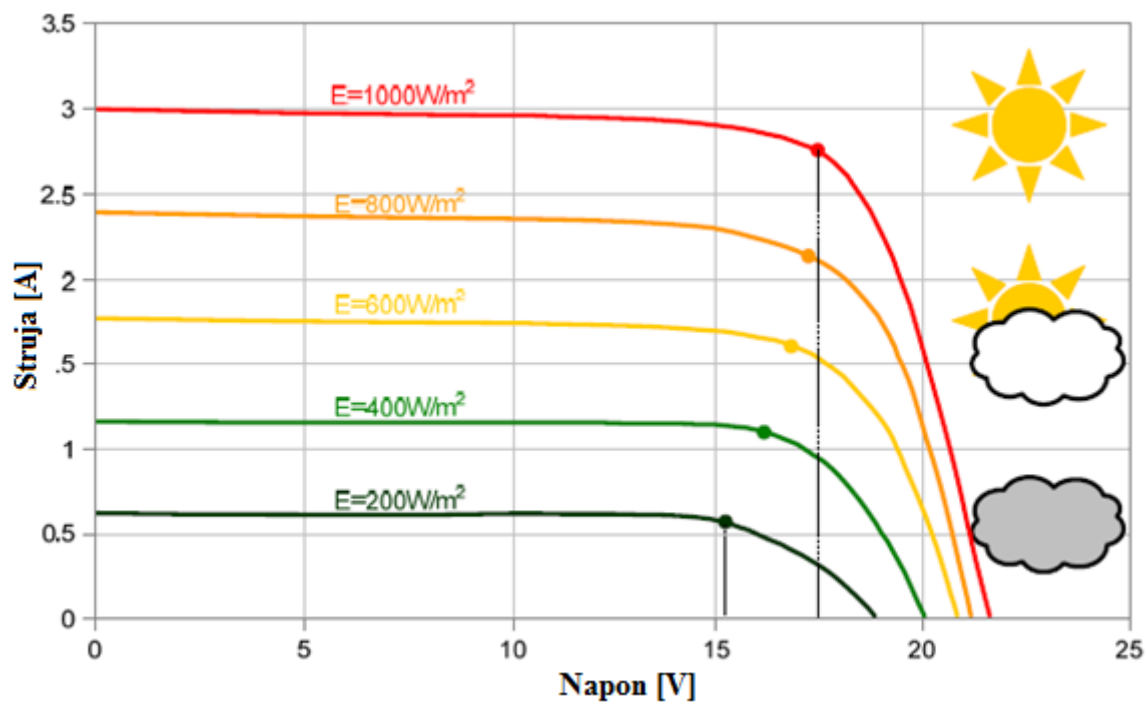
Kako bi povećali ukupnu izlaznu snagu, ćelije se međusobno povezuju u serijski spoj, kako bi dobili što veći napon (12-38 V), i povećanje vrijednosti struje spojem u paralelu. Takav spoj nazivamo fotonaponski modul. Kombinacijom spajanja modula u paralelan i serijski spoj nazivamo string, te kao krajnji rezultat dobivamo željenu izlaznu snagu. Kako veliki utjecaj na dugotrajnost FN ćelija imaju mehanička oštećenja, te sami atmosferski utjecaji, ćelije se smještaju u veće fotonaponske module, panele. [13]

Kako bi ćelije bile zaštićene od prisutnosti vlage, postavljaju se između slojeva kaljenog stakla, koje optimalno hvata difuznu svjetlost, i bijelog teclara. Takav sustav modula bio bi nepraktičan za samu konstrukciju i postavljanje, stoga se moduli ugrađuju u aluminijski okvir, prikazan na slici 3.3. [1][6]



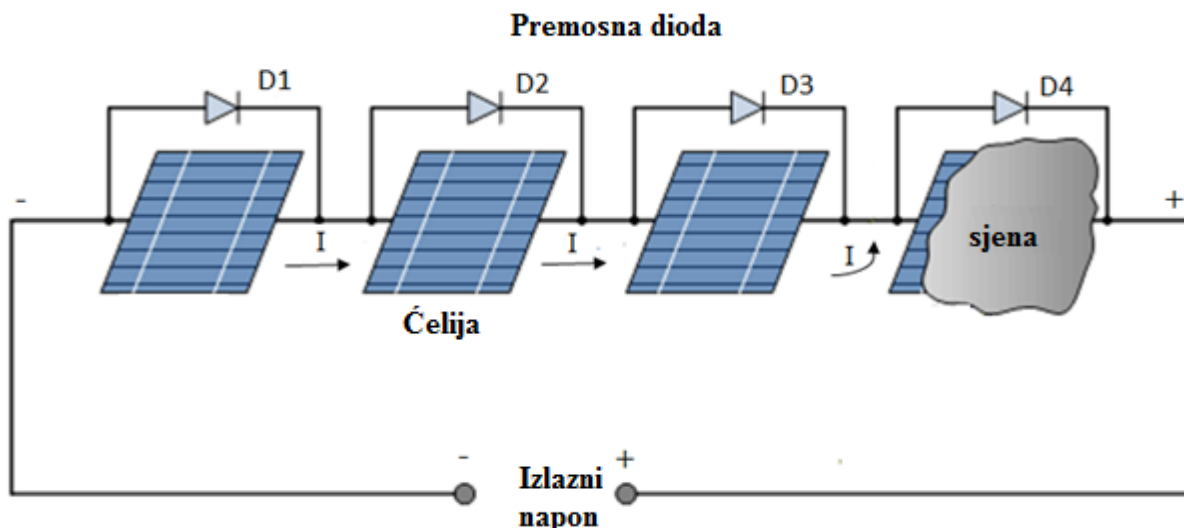
**Slika 3.3.** Poprečni presjek panela [13]

Na slici 3.4. prikazane su izlazne karakteristike FN modula, uz pretpostavku da su sve ćelije identičnog karaktera, tj. da sve ćelije unutar modula rade pod istim uvjetima, pri čemu se karakteristika predstavlja kao model jedne sunčane ćelije. Radna točka direktno ovisi o temperaturi i sunčevu zračenju. Variranje sunčeva zračenja tijekom dana rezultira promjenom struje, dok se napon u radnoj točki neznatno mijenja.



**Slika 3.4.** U–I karakteristika u ovisnosti o sunčevom zračenju [15]

Negativna strana serijskog spoja odnosi se na osvijetljenost ćelije. Naime, ukoliko je jedna od ćelija u nizu djelomično ili potpuno neosvijetljena, povećava se temperatura ćelije, te se drastično smanji snaga, jer se smatra kao da nijedna od preostalih ćelija nije u funkciji. Razvijena temperatura prilikom pregrijavanja ćelije prelazila bi vrijednost od 100 °C, jer bi takva ćelija trošila ukupnu struju koje bi proizvele osunčane ćelije. Kako bi spriječili navedeni problem, te samo pregrijavanje pogodne ćelije, paralelno sa ćelijom spaja se premosna ili bypass dioda (prema slici 3.5.)



**Slika 3.5.** Premosna dioda u paralelnom spoju sa ćelijom [16]

### 3.4. DC/AC pretvorba

Jedan od glavnih dijelova fotonaponskog sustava je izmjenjivač ili inverter prikazan na slici 3.6. To je elektronički sklop koji služi za pretvorbu istosmjerne struje fotonaponskih modula u izmjeničnu. Ovisno o vrsti sustava, pretvorena struja koristi se direktno za napajanje trošila, ili se šalje u električnu mrežu. Isporučka električne energije u mrežu mora se isporučiti najvećom snagom, stoga se izmjenjivači opremaju MPP–tracker-om kako bi u svakom trenutku radna točka bila u području najveće snage. MPP točka se uglavnom nalazi na prijelomu, koljenu, U-I karakteristike. S obzirom da se krivulja, zbog promjene zračenja (vremenskih uvjeta) često mijenja, tracker mora biti veoma brz u traženju MPP–a. Pored pretvorbe energije, izmjenjivač ima i ulogu praćenja rada fotonaponskog sustava, zaštite sustava i upravljanja. Ukoliko vrijednosti koje mjeri izmjenjivač (napon i struja) premaše granice dopuštenih nazivnih vrijednosti, izmjenjivač ima zadaću isključivanja paralelnog rada s mrežom kako ne bi došlo do ispada stabilnih dijelova mreže. Jedna od glavnih uloga zaštite izmjenjivača je zaštita od otočnog rada u mrežnim

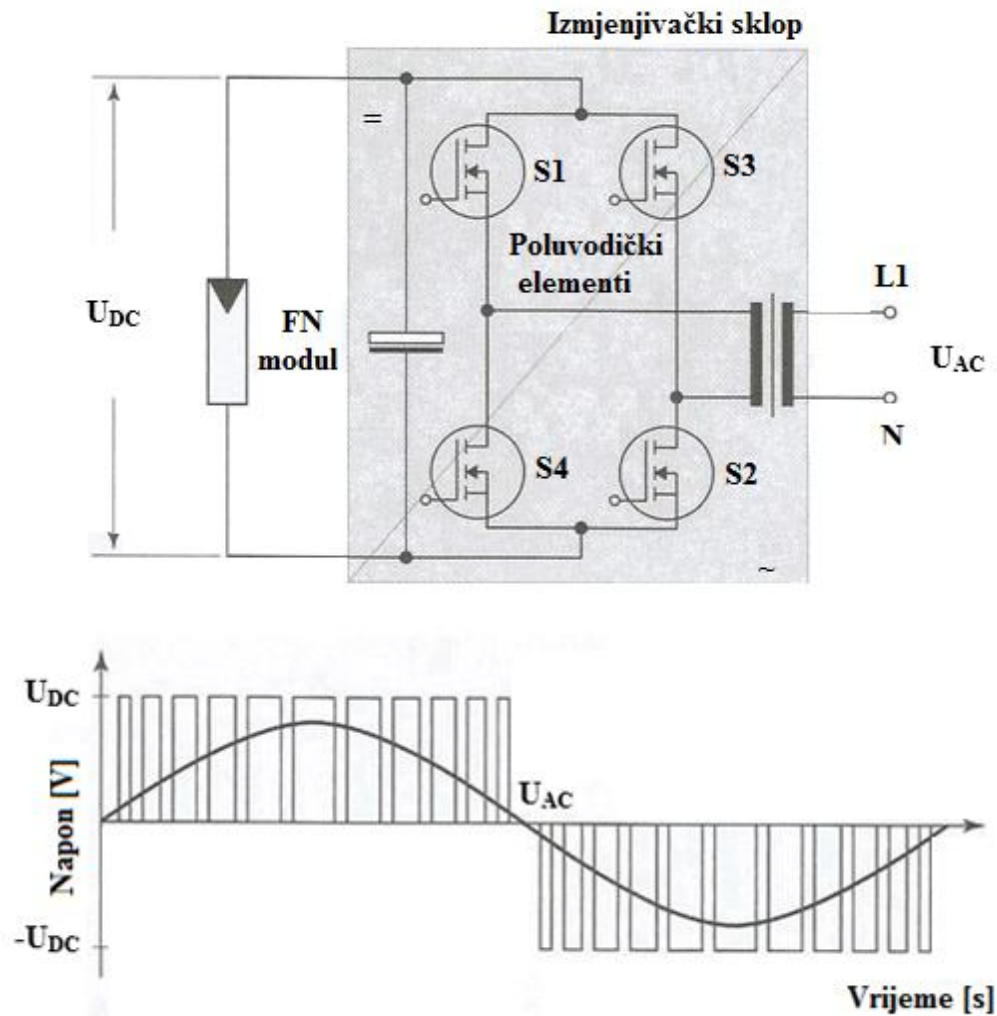
izmjenjivačima, jer fotonaponska elektrana ne može raditi kao autonomni sustav na mreži. Naime, ukoliko bi došlo do kvara u mreži na kojoj je FN sustav priključen, pojavilo bi se napajanje mreže iz točke proizvodnje FN sustava, te bi se time ugrozila sigurnost djelatnika koji imaju zadatak uklanjanja kvara nastalog na mreži. [13]



**Slika 3.6.** Inverter [17]

#### **3.4.1. Princip rada izmjenjivača**

Svaki izmjenjivač sadrži upravljivi poluvodički most, koji služi za pretvorbu istosmjernog napona u izmjenični. Izmjenjivački režim rada ostvaruje se periodičkim uklapanjem ili isklapanjem sklopki. Prema slici 3.7., ukoliko su uklopljene sklopke S1 i S3 trošilo je priključeno na pozitivan DC napon, a ako su uklopljene sklopke S2 i S4 trošilo je priključeno na negativan DC napon. Prolaskom jednog ciklusa izmjenjivačkog rada, na trošilu se inducira pravokutni napon kako je prikazano na slici 3.7. Karakter pravokutnog napona nije povoljan, jer generira više harmonike koji negativno utječu na rad pojedinih trošila koji su uzročnici glavnih negativnih parametara u mreži pri radu izmjenjivača. Kako bi se poništio utjecaj viših harmonika, nakon izmjenjivačkog sklopa ugrađuje se niskopropusni filter koji zajedno sa širinskom modulacijom (PWM) smanjuje udio utjecaja viših harmonika, te se ostvaruje sinusni oblik napona. [18]

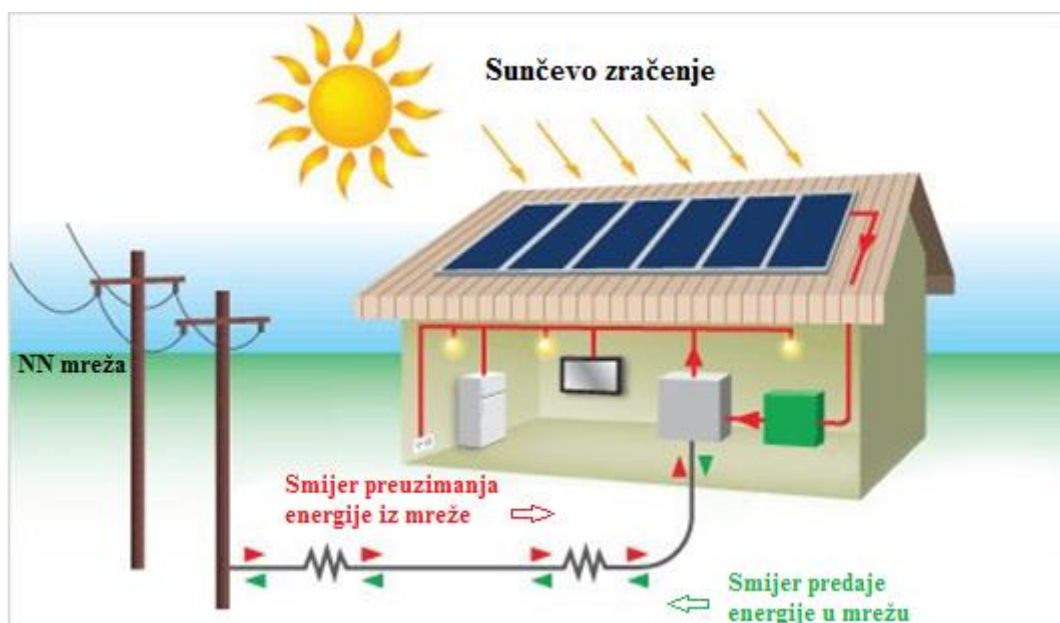


Slika 3.7. Shema izmjenjivača i valni oblik napona [13]

### 3.5. Integracija FN elektrane na mrežu

Fotonaponska elektrana spaja se paralelno s mrežom preko DC/AC izmjenjivača kako je prikazano na slici 3.8. Ovisno o veličini instalirane snage, elektrane se spajaju direktno preko izmjenjivača na niskonaponsku mrežu, ili za elektrane snage 0.5–10 MW preko transformatorske stanice na srednjenaponsku distributivnu mrežu te se naziva distribuiranom proizvodnjom. Takva proizvodnja ima značajan utjecaj na distributivnu mrežu, gledajući s aspekta stabilnosti i kvalitete električne energije. Prilikom same pretvorbe napona, kao što je opisano u principu rada izmjenjivača, generiraju se harmonici višeg reda, koji utječu na održivost napona u mreži. Od strane proizvodnje fotonaponske elektrane, moguća je i pojava flikera u mreži, zbog naglih promjena insolacije na panele, a samim time i nestabilnosti ukupne snage koju daju paneli, a izmjenjivači isporučuju u mrežu. Gledajući pojedinačne sustave, problem izobličenja nema

znatnog utjecaja. Naime, ako bi problem razmatrali sa aspekta cijele distributivne mreže uvidjeli bi prisutnost većeg broja malih proizvođača električne energije, koji zajedno generiraju ukupne smetnje koje utječu na održivost kvalitete napona u mreži. Prilikom integracije elektrane na mrežu, od strane elektroenergetskog sustava propisana su Mrežna pravila koja su vođena zahtjevima kvalitete električne energije prema normi EN50160, kojih se strogo treba pridržavati, kako bi se omogućilo spajanje elektrane na distribucijsku mrežu. Prema pravilima HEP-ODS-a u Hrvatskoj, za male fotonaponske elektrane predaja električne energije predviđena je u priključnom mjernom ormariću (SPMO), odakle se dalje šalje u NN mrežu. Nazivni napon mreže u koju elektrana isporučuje proizvedenu električnu energiju je 3 x 230/400 V, 50 Hz.



**Slika 3.8.** Priključak elektrane i smjer energije [23]

Ukoliko se radi o velikim fotonaponskim elektranama (npr. 300 kW), izvode se sljedeće vrste priključka:

- Ako je mjesto priključka blizu elektrane, elektrana se spaja po principu ulaz/izlaz, tj. elektrana se interpolira na obližnji 10 kV vod. Takav priključak izvodi se na način da se postojeći vod razdvoji na dva dijela, pri čemu se postiže nova pojna točka u mreži. Primjena ovakvog priključka primjenjuje se na srednje naponskim kabelskim mrežama.
- Ukoliko je fotonaponska elektrana znatno udaljena od mjesta priključka na mrežu, sam priključak izvodi se preko radijalnog (T) spoja od priključne transformatorske stanice do sredjenaponskog voda na kojemu se realizira priključak.



**Slika 3.9.** Priključak fotonaponske elektrane preko transformatorske stanice [23]

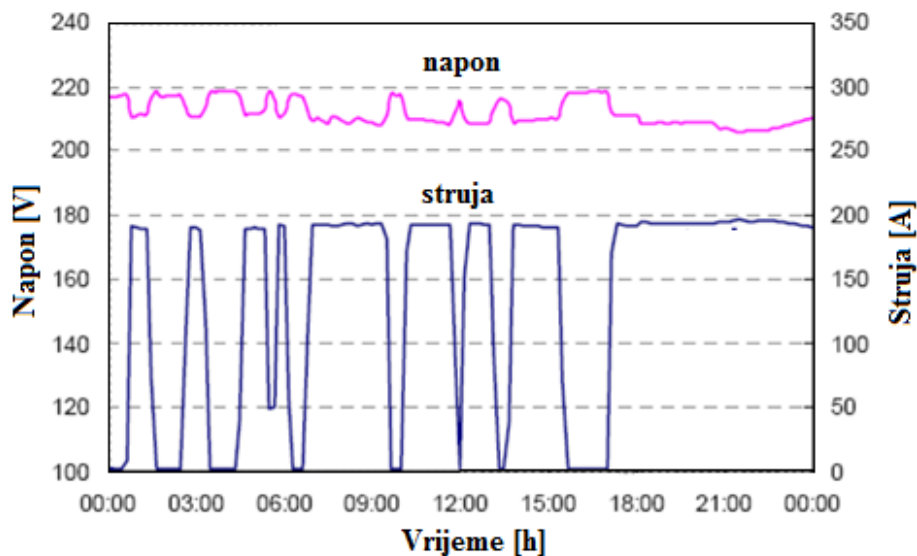
### 3.6. Pokazatelji kvalitete električne energije

Vrlo bitan pokazatelj kvalitete opskrbnog napona na mjestu potrošnje je kvaliteta predane energije krajnjem potrošaču, od kojih su temeljne komponente neprekinutost i stabilnost napona. Ukoliko se radi o mjerenju kvalitete električne energije na mjestu priključka elektrane, ono se odvija u vremenskom ciklusu od 7 dana. Kako bi dobili što bolji uvid u kvalitetu napona, mjerenje se obavlja 7 dana prije, te 7 dana nakon puštanja elektrane u pogon, da bi smo mogli analizirati utjecaj elektrane na mrežu. Samim time, mjerenja kvalitete električne energije obavljaju se u svrhu poboljšanja održivosti stabilnog napona i ostalih parametara u mreži, čija su moguća odstupanja uzrokovana sljedećim pokazateljima: [20]

- naponska kolebanja,
- treperenje napona
- harmonici i međuharmonici,
- prijelazni prenaponi,
- valovitost,
- tranzijentni prenaponi,
- naponska nesimetrija,
- promjene osnovne frekvencije mreže,
- prisutnost istosmjernog napona u izmjeničnom te
- prisutnost signalnih napona.

### 3.7. Kolebanje i treperenje napona

**Kolebanje napona** definira se kao uzastopna promjena napona, čija amplituda općenito ne prelazi (6–8) % nazivnog napona, kako je prikazano na slici 3.10. Spore naponske promjene mogu znatno utjecati na životni vijek uređaja koje sadrže elektroničke elemente, te na smanjenje svjetlosnog toka kod rasvjetnih tijela. [20][21]

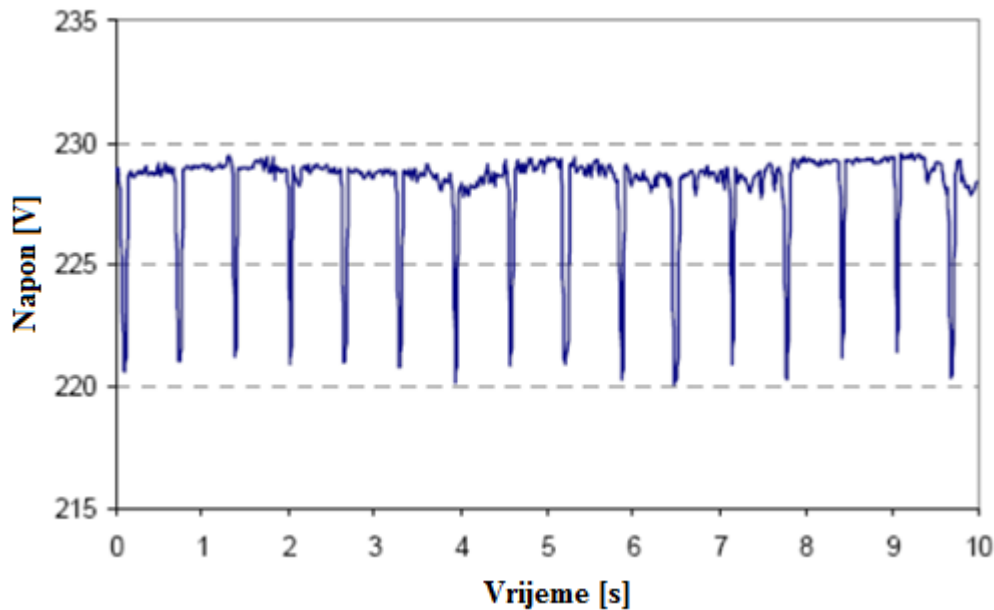


**Slika 3.10.** Prikaz valnog oblika napona pri naponskom kolebanju [22]

**Treperenja** kako je prikazano na slici 3.11. (engl. Flicker) uzrokuju kolebanja napona, ili trošila kao što su aparati za zavarivanje i elektrolučne peći, te je samo treperenje vidljivo na rasvjetnim tijelima. Karakterizira se kao vidom zamjetljivo periodičko titranje žarulje. Prema normi 50160, 95% dugotrajnih flikera mora biti ispod vrijednosti 1. Prilikom mjerenja pojavu flikera karakteriziraju kratkotrajne vrijednosti  $P_{st}$ , koje se promatraju u 10 minutnom intervalu, i dugotrajne  $P_{lt}$  kao 12 usrednjenih vrijednosti kratkotrajnih flikera, prema formuli:[21] [22]

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{sti}^3}{12}} \quad (3-3)$$





**Slika 3.11.** Naponska treperenja, flikeri [22]

### 3.8. Nesimetrija napona

U višefaznom sustavu, simetrični fazni naponi imaju istu amplitudu, te su fazno pomaknuti za  $120^\circ$ . Ukoliko dođe do bilo kakvog odstupanja navedenih vrijednosti, sustav prelazi u nesimetrično stanje. Razina nesimetrije može se odrediti rastavom trofaznog sustava na tri sustava [20] [22]

- Direktni  $U_d = \frac{1}{3}(U_1 + aU_2 + a^2U_3)$
- Inverzni  $U_l = \frac{1}{3}(U_1 + a^2U_2 + aU_3)$
- Nulti  $U_0 = \frac{1}{3}(U_1 + U_2 + U_3)$

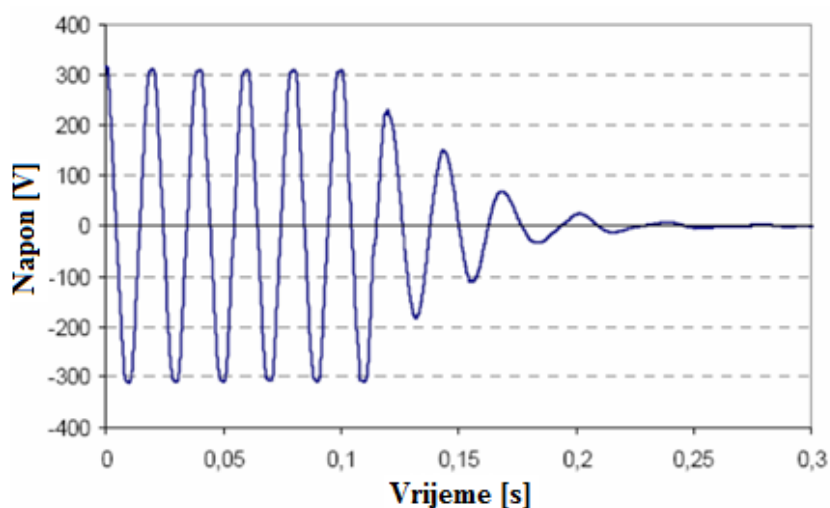
Gdje je  $a = -0,05 + j0,866$

Uzroci nesimetrije:

- Jednofazna i dvofazna opterećenja
- Lučne peći
- Pregrijavanje asinkronog motora
- Višefazni pretvarači

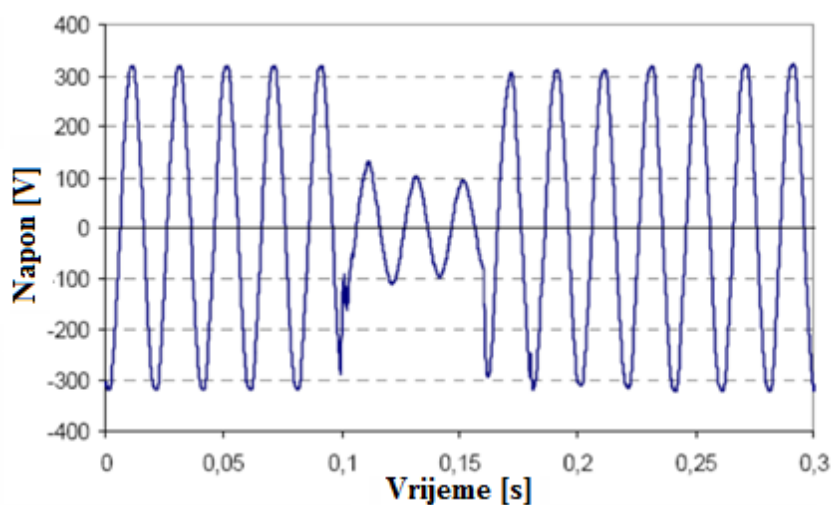
### 3.9. Naponski prekidi i propadi

**Naponski prekid** je stanje u kojem je vrijednost opskrbnog napona na mjestu predaje za 1% manja od normiranog iznosa napona kako je prikazano na slici 3.12. Kratkotrajni prekidi su oni koji ne prelaze vremensko razdoblje od ukupno 3 minute, dok se dugotrajni prekidi karakteriziraju dužim vremenom nestanka opskrbnog napona u trajanju preko 3 minute. [20][21]



Slika 3.12. Naponski prekid [22]

**Naponski propad** je naglo smanjenje vrijednosti opskrbnog napona, koji odstupa od dogovorenog napona od 90% do 1% kako je prikazano na slici 3.13. Naponski propad karakterizira ponovno stabiliziranje napona na nazivnu vrijednost u vremenskom intervalu od 10 ms do 1 min. Dubina propada definira se kao razlika između najmanje efektivne vrijednosti napona za vrijeme propada i dogovorenog napona. [20][21]



Slika 3.13. Naponski propad [22]

Jedan od vodećih uzročnika naponskih propada i prekida je kratki spoj u mreži. Prilikom nastanka kratkog spoja vrijednost struje višestuko se povećava, čime se pojavljuju naponski propadi na impedancijama sustava. [20]

### 3.10. Previsoki naponi i prenaponi

**Prenaponi** se definiraju kao pojava visokih vrijednosti napona uzrokovanih samo prilikom prijelaznih pojava, kao što su atmosferska pražnjenja, kratki spojevi, te uklapanje i isklapanje. [20]

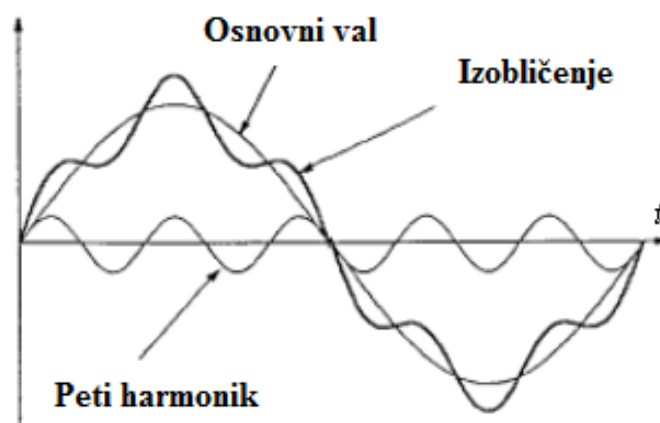
**Previsok napon** definira se prelaskom dopuštene granice opskrbnog napona. Dopušteno odstupanje od gornje granične vrijednosti nazivnog napona je 10 %, definirano normom 50160.

Gledajući prema uzroku nastajanja, previsoke napone možemo podijeliti na:

- Prolazne – prekid nultog vodiča, kvarovi na regulaciji napona transformatora i sl.
- Sklopne – prorada zaštitnih uređaja
- Atmosferske – izravan udar munje na dio mreže, te neizravni (porast potencijala Zemlje)

### 3.11. Harmonici

Harmonici su sinusni oblici struje i napona, čije se frekvencije odnose kao cjelobrojni višekratnik osnovnog sinusnog valnog oblika (50 Hz.). Na slici 3.14 prikazan sinusni val izobličen prisustvom petog harmonika. [1][20]



Slika 3.14. Izobličenje sinusnog vala prisustvom petog harmonika [20]

Izobličenje signala računa se faktorom ukupnog harmoničkog izobličenja – THD (engl. *Total Harmonic Distortion*):

$$THDU = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} (U_h)^2} \frac{100\%}{U_1} \quad (3-4)$$

Pojava izobličenja napona uzrokovana je pojavom harmonika kroz impedancije mreže, te na taj način utječe na rad potrošača spojenih na mrežu. Kako bi ograničili naponska izobličenja, poželjno je imati što poznatije impedancije napajanja pojavom raznih harmonijskih frekvencija. [20]

### 3.12. Zahtjevi iz mrežnih pravila

Kod rada male sunčane elektrane paralelno sa mrežom važno je razmotriti utjecaj fotonaponskog sustava na distribucijsku niskonaponsku mrežu. U tu svrhu je potrebno izvesti potrebne proračune i mjerenja utjecaja na kvalitetu mrežnog napona. Paralelni pogon elektrane s distribucijskom mrežom može uzrokovati određene promjene na mjestu priključka s distribucijskom mrežom. Mjerenje kvalitete električne energije obavljaju se prema normi EN 50160, koja daje kvantitativne odlike kvalitete napona. HEP-ODS d.o.o. odgovoran je za kvalitetu napona, koja mora biti sukladna mrežnim pravilima i normi EN 50160/2012. Ovo se postiže ograničavanjem povratnog utjecaja korisnika ili proizvođača el. energije na distribucijsku mrežu. Mrežnim pravilima određene su granice vrijednosti parametara kvalitete napona prikazane u tablici 1. [23]

**Tablica 3.1.** Granične vrijednosti parametara kvalitete napona za NN postrojenja (0,4 kV) [21] [23]

<i>Parametar</i>	<i>Granične vrijednosti</i>	<i>Napomena</i>
Odstupanje frekvencije	49,95 do 50,05 Hz	Normalni pogonski uvjeti (postoji interkonekcija)
Odstupanje napona	$U_n \pm 10\%$ $U_n +10\% / -15\%$	95% 10-min. prosjeka tijekom tjedan dana 100% 10-min. prosjeka tijekom tjedan dana
Ukupno harmonijsko izobličenje – THD	$\leq 2,5\%^*$	95% 10-min usrednjenih vrijednosti
Indeks jačine flikera	$\leq 0,7^*$ $\leq 0,5^*$	Kratkotrajni flikeri (10 min) Dugotrajni flikeri (2h)
Nesimetrija napona	$\leq 1,3 \% U_n^*$	95 % 10 min. usrednjenih vrijednosti

\* vrijednosti se odnose na doprinos priključenjem korisnika

### 3.13. HRN EN 50160:2012

Europska norma određuje, opisuje i specificira karakteristike napona za distributivne mreže niskog i srednjeg napona pri normalnim pogonskim uvjetima čije su vrijednosti prikazane u tablici 3.2 i 3.3: [12][21]

**Tablica 3.2.** Granične vrijednosti pojedinačnih harmonika [21]

Neparni harmonici				Parni harmonici	
Nisu višekratnici od 3		Višekratnici od 3		Red h	Relativna amplituda
Red h	Relativna amplituda	Red h	Relativna amplituda		
5	6,0 %	3	5,0%	2	2,0 %
7	5,0 %	9	1,5 %	4	1,0%
11	3,5 %	15	0,5 %	6... 24	0,5 %
13	3,0 %	21	0,5 %		
17	2,0 %				
19	1,5 %				
23	1,5 %				
25	1,5 %				

**Tablica 3.3.** Granične vrijednosti parametara kvalitete napona prema normi HRN EN 50160:2012

[24]

Parametar	Granične vrijednosti		Mjerni i vrijednosni parametri			
	NN	SN	Osnovna veličina	Interval usrednjavanja	Promatrano razdoblje	Granice (%)
Frekvencija	49,5 do 50,5 Hz 47 – 52 Hz		Prosječna vrijednost	10 s	1 godina	99,5 100
Spore promjene napona	Un±10% Un +10%/-15%		Efektivna vrijednost	10 min	1 tjedan	95 100
Brze promjene napona	5% max 10%	4% 6%	Efektivna vrijednost	10 ms	1 dan	100
Flikeri	Pst Plt< 1		Algoritam flikera	10 min 2 h	1 tjedan	95
Padovi napona ≤1 min	Ispod 85% Un 10 do 1000 godišnje		Efektivna vrijednost	10 ms	1 godina	100
Kratki prekidi opskrbe ≤ 3 min	Ispod 1% Un 10 do 100 godišnje		Efektivna vrijednost	10 ms	1 godina	100
Dulji prekidi opskrbe > 3 min	Ispod 1% Un 10 do 50 godišnje		Efektivna vrijednost	10 ms	1 godina	100
Povremeni prenaponi mrežne frekvencije	<1,5 kV	1,7 do 2,0 Un	Efektivna vrijednost	10 ms	-	100
Nesimetrija napona	<2 %		Efektivna vrijednost	10 min	1 tjedan	95
Viši harmonici napona	THD ≤ 8% (tablica do 40. harm.)		Efektivna vrijednost	10 min	1 tjedan	95
Signalni napon	Do 500 Hz: <9% 1-10 kHz: <5%		Efektivna vrijednost	3 s	1 dan	99

## 4. ANALIZA MJERENJA

### 4.1. Analiza frekvencije

#### 4.1.1. Snimka frekvencije prije priključenja elektrane na mrežu

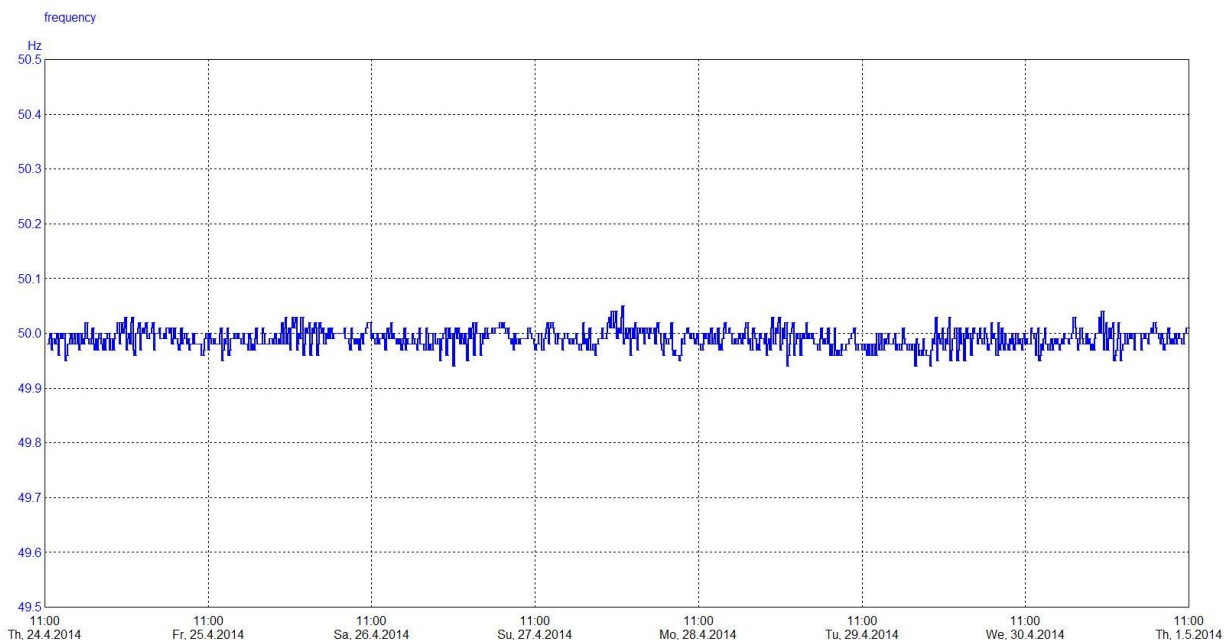
Frekvencija napona, prema normi EN50160

**Nominalna frekvencija:** 50,00Hz

**Definicija parametra:** Srednja vrijednost osnovne frekvencije mjerena preko 10s

**Ograničenja:** Za sustave s sinkronom vezom međusobno povezanih sustava

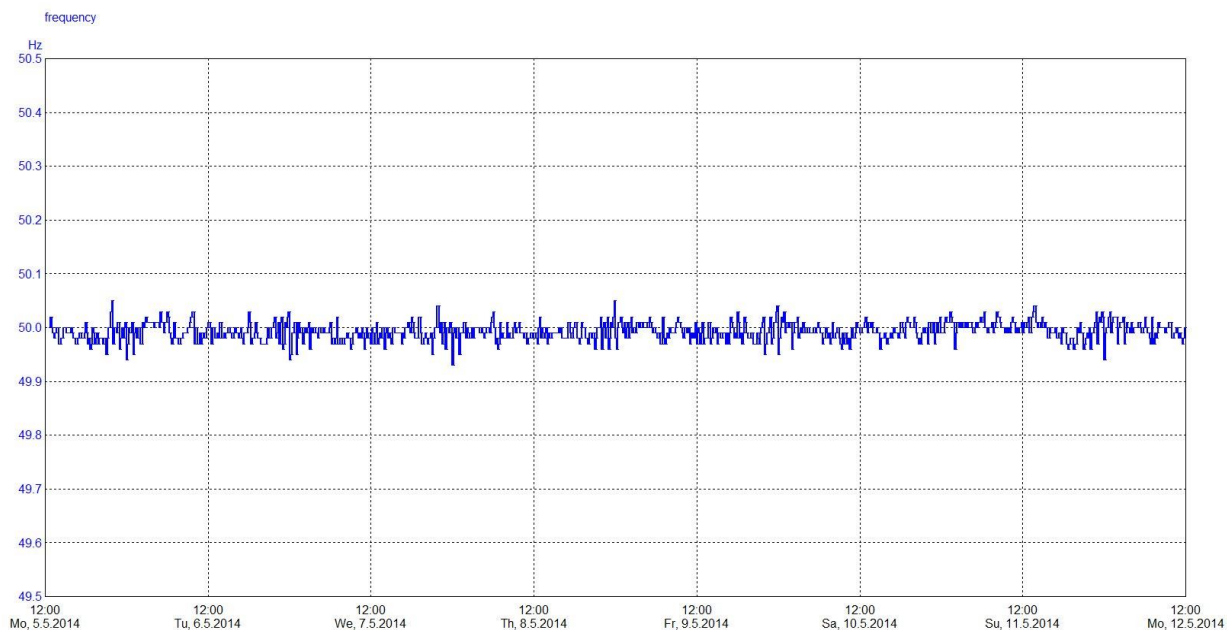
EN50160 zahtjev	Mjerena frekvencija
99,5% za vrijeme: 49,50Hz - 50,50Hz	49,90Hz~50,30Hz
100% za vrijeme: 47,00Hz - 52,00Hz	49,90Hz~50,30Hz



**Slika 4.1.** Oblik osnovne frekvencije prije priključenja elektrane na mrežu [20]

#### 4.1.2. Snimka frekvencije nakon priključenja elektrane na mrežu

EN50160 zahtjev	Mjerena frekvencija
99,5% za vrijeme: 49,50Hz - 50,50Hz	49,90Hz~50,10Hz
100% za vrijeme: 47,00Hz - 52,00Hz	49,90Hz~50,10Hz



**Slika 4.1.** Oblik osnovne frekvencije prije priključenja elektrane na mrežu [20]

#### Komentar:

U periodu mjerenja frekvencije prije, te nakon priključenja elektrane, prema slici 4.1 i slici 4.2. vidljivo je da FN elektrana nema utjecaja povratnih djelovanja na mrežnu frekvenciju, te su izmjerene vrijednosti u skladu sa zahtjevima koje propisuje norma EN50160.



## 4.2. Analiza mjerenja faznih napona

### 4.2.1. Snimka faznih napona prije priključenja elektrane na mrežu

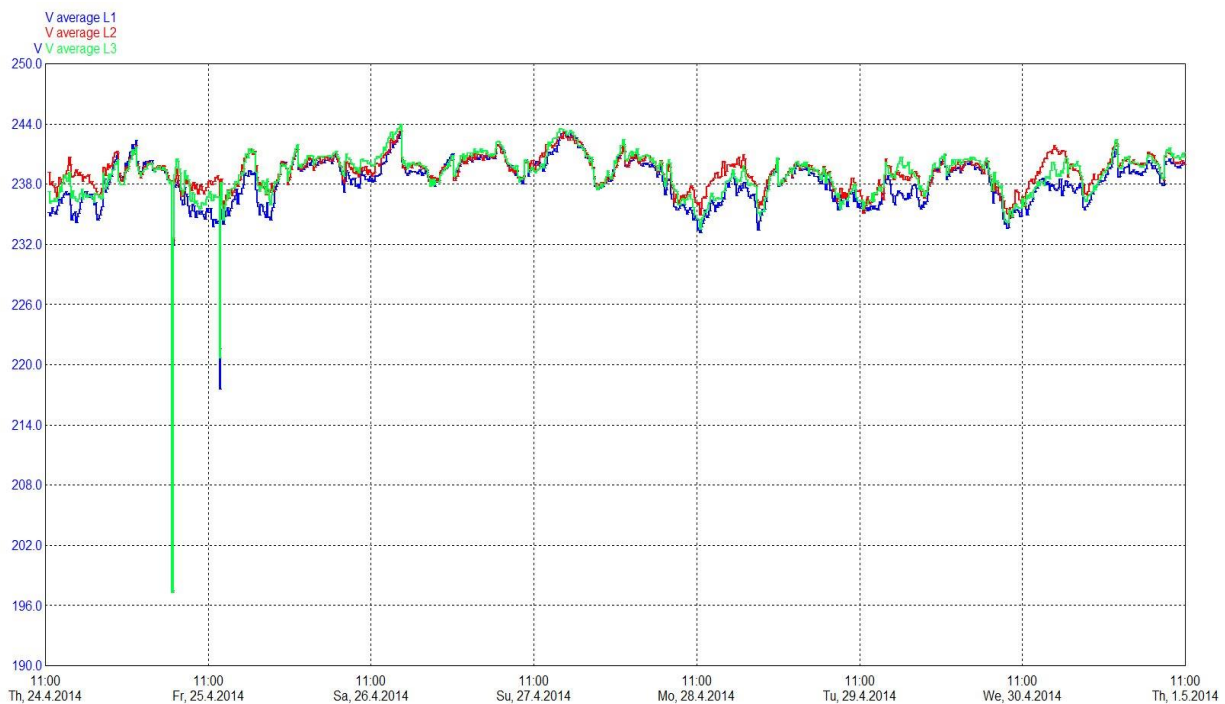
Varijacije napona napajanja, prema normi EN50160

**Nominalni napon:** 230,00V L-N / 400,00V L-L

**Definicija parametra:** 10 minutna srednja RMS vrijednost napona

**Ograničenja:** Za sustave s sinkronom vezom međusobno povezanih sustava

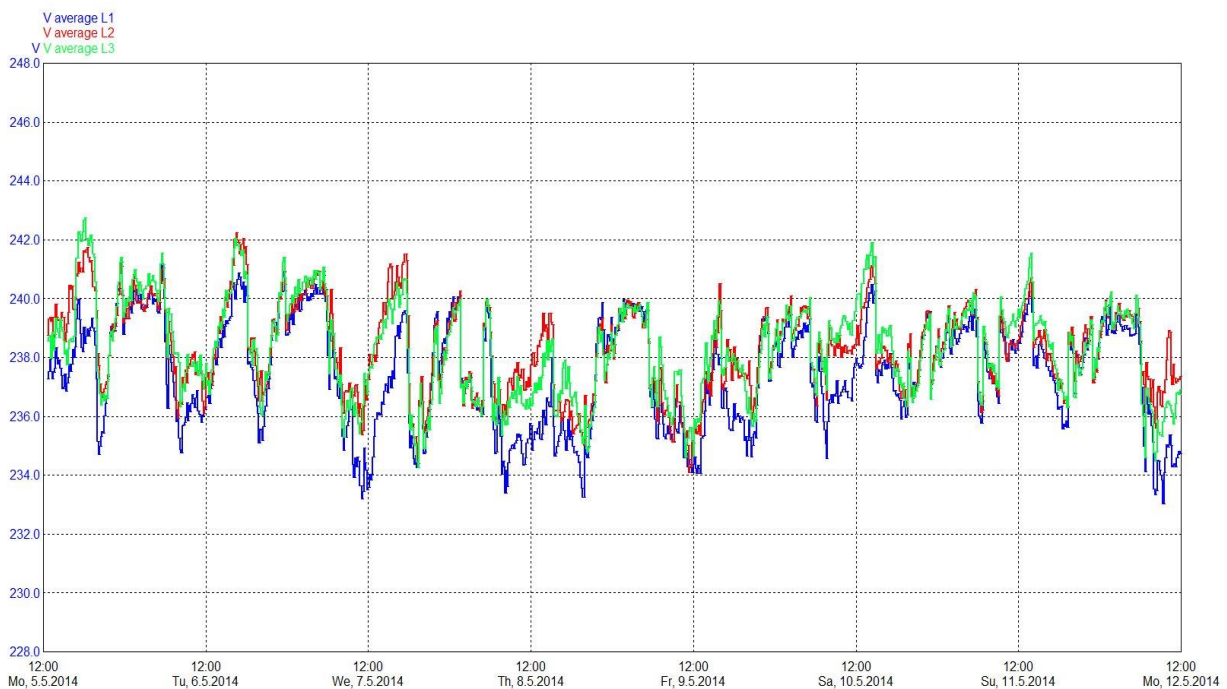
EN50160 zahtjev	Mjereni napon L1	Mjereni napon L2	Mjereni napon L3
95% za vrijeme: 207,00V - 253,00V	217,58~241,45V	221,56~241,75V	220,66~241,85V
100% za vrijeme: 195,50V - 253,00V	197,29~243,34V	197,5V~243,35V	197,30V~243,94V



Slika 4.3. Efektivne vrijednosti napona prije priključenja elektrane [20]

#### 4.2.2. Snimka faznih napona nakon priključenja elektrane na mrežu

EN50160 zahtjev	Mjereni napon L1	Mjereni napon L2	Mjereni napon L3
95% za vrijeme: 207,00V - 253,00V	233,02~241,19V	234,09~242,26V	234,25V~242,74V
100% za vrijeme: 195,50V - 253,00V	233,02~241,19V	234,09~242,26V	234,25V~242,74V



Slika 4.4. Efektivne vrijednosti napona poslije priključenja elektrane [20]

#### Komentar:

Analizom dobivenih mjernih rezultata, prema slici 4.3. te slici 4.4., vrijednosti faznih napona kreću se u dopuštenim vrijednostima, gotovo konstantnih, osim pojave naponskih propada u sve tri faze, te jednog naponskog prekida. Potrebno je naglasiti da su se naponski propadi i prekid dogodili prilikom mjerenja prije priključenja elektrane na NN mrežu, što se u periodu probnog rada elektrane nije javljalo. Samim time, iz dobivenih rezultata mjerenja može se zaključiti da u periodu kada je elektrana priključena na mrežu nema negativnih povratnih djelovanja na naponske prilike u NN mreži.

### 4.3. Analiza prisutnosi flikera u mreži

#### 4.3.1. Snimka dugotrajnih flikera prije priključenja elektrane na mrežu

Jačina flikera, prema normi EN50160.

Definicija parametra:

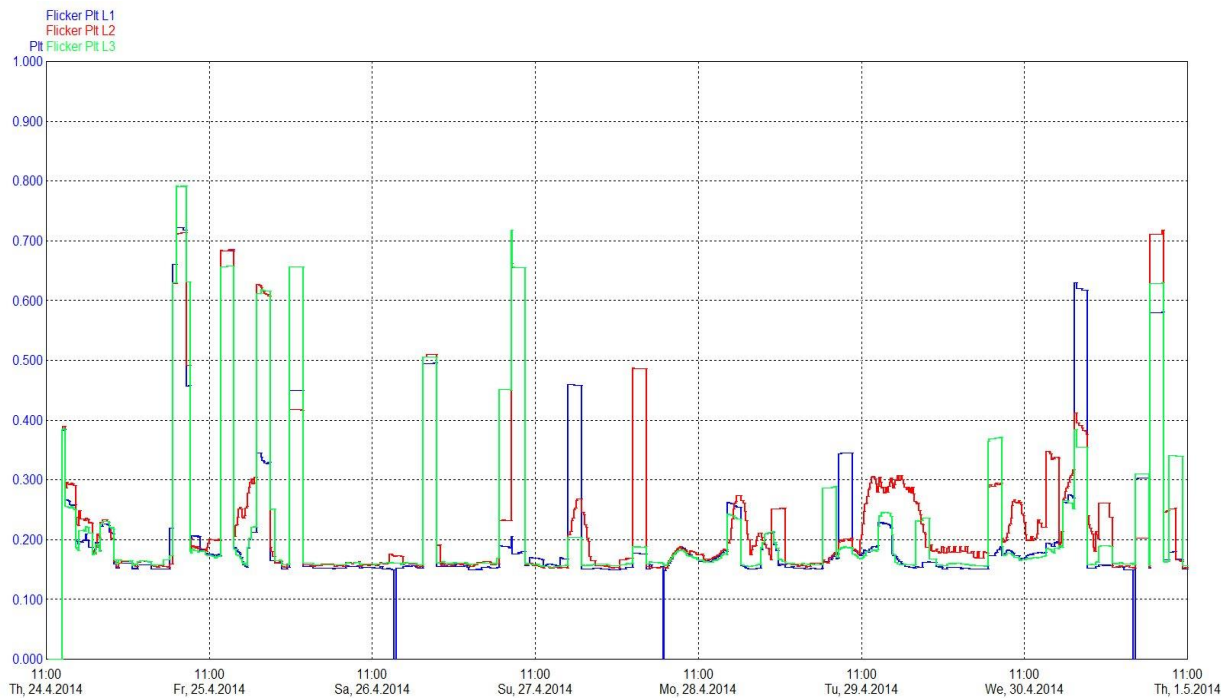
Jačina dugotrajnih flikera Plt (dvosatni intervali)

Ograničenja:

Pod normalnim radnim uvjetima

EN50160 zahtjev	Mjereni L1 Plt	Mjereni L2 Plt	Mjereni L3 Plt
95% za vrijeme: $Plt \leq 1$	<b>0,723*</b>	<b>0,718*</b>	<b>0,791*</b>

\*maksimalne izmjerene 10-min. vrijednosti

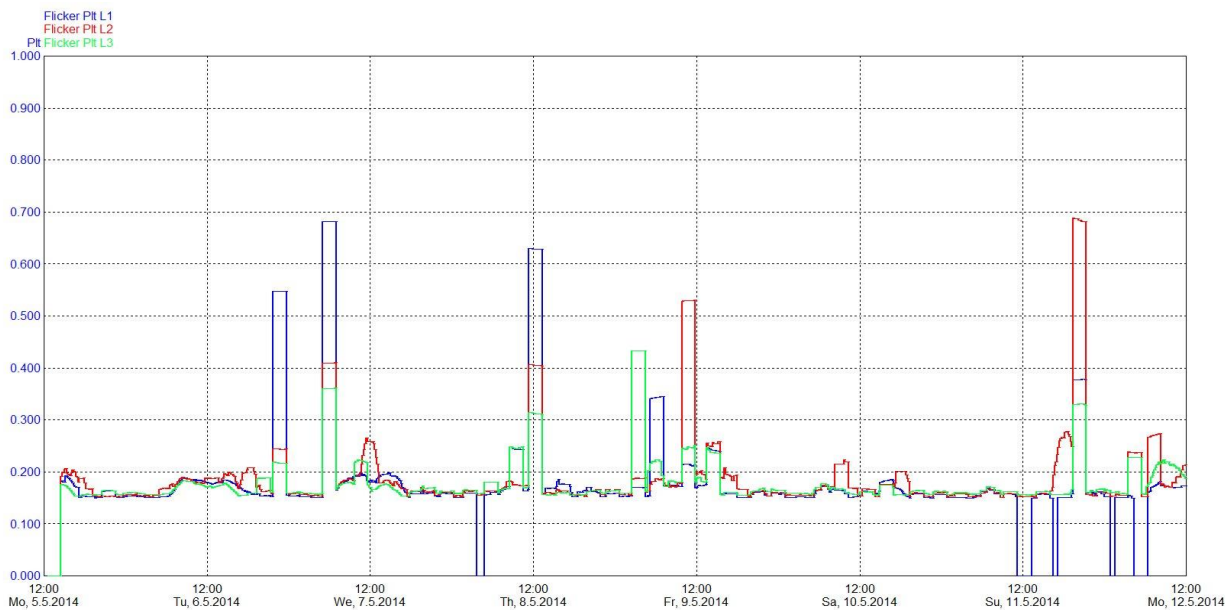


Slika 4.5. Dugotrajno naponsko treperenje (flikeri), prije priključenja elektrane [20]

### 4.3.2. Snimka dugotrajnih flikera nakon priključenja elektrane na mrežu

EN50160 zahtjev	Mjereni L1 Plt	Mjereni L2 Plt	Mjereni L3 Plt
95% za vrijeme: $Plt \leq 1$	<b>0,682*</b>	<b>0,688*</b>	<b>0,433*</b>

\*maksimalne izmjerene 10-min. vrijednosti



Slika 4.6. Dugotrajno naponsko treperenje (flikeri), nakon priključenja elektrane [20]

### 4.3.3. Snimka kratkotrajnih flikera prije priključenja elektrane na mrežu

Jačina flikera, prema normi EN50160

Definicija parametra:

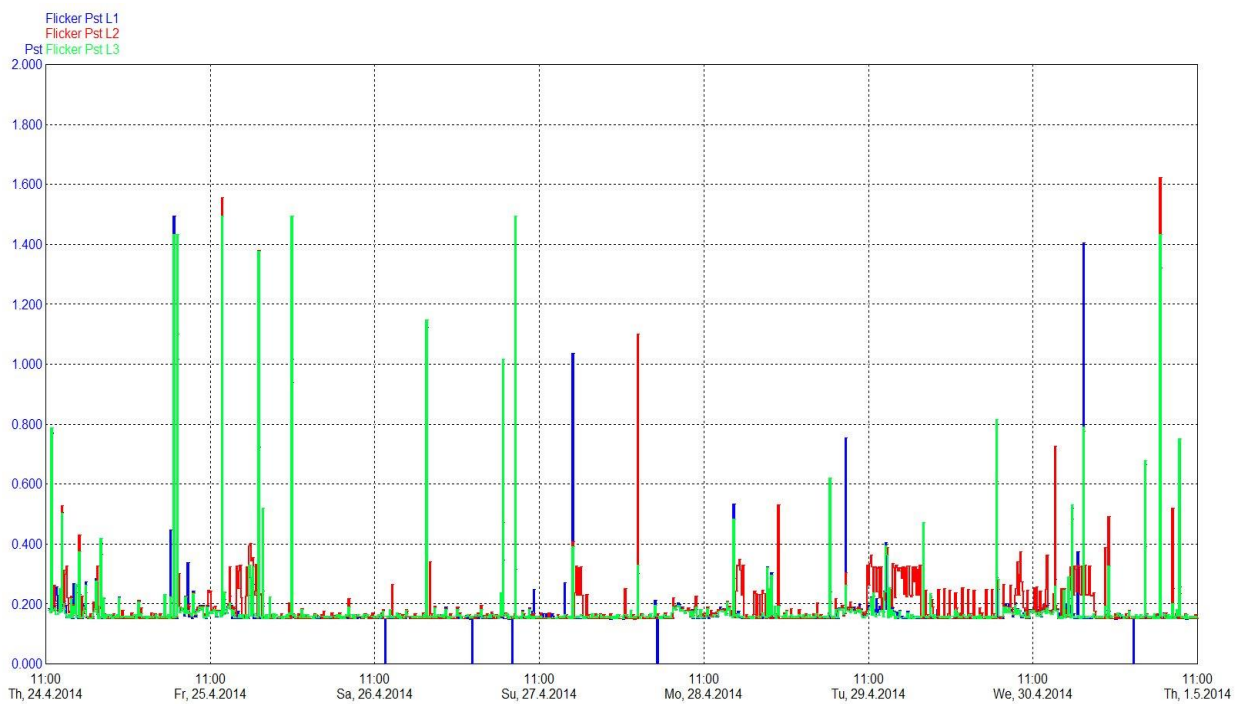
Jačina kratkotrajnih flikera  $P_{st}$  (10 minutni intervali)

Ograničenja:

Pod normalnim radnim uvjetima

EN50160 zahtjev	Mjereni L1 Pst	Mjereni L2 Pst	Mjereni L3 Pst
95% za vrijeme: $P_{st} \leq 1$	<b>1,52*</b>	<b>1,65*</b>	<b>1,51*</b>

\*maksimalne izmjerene 10-min. vrijednosti

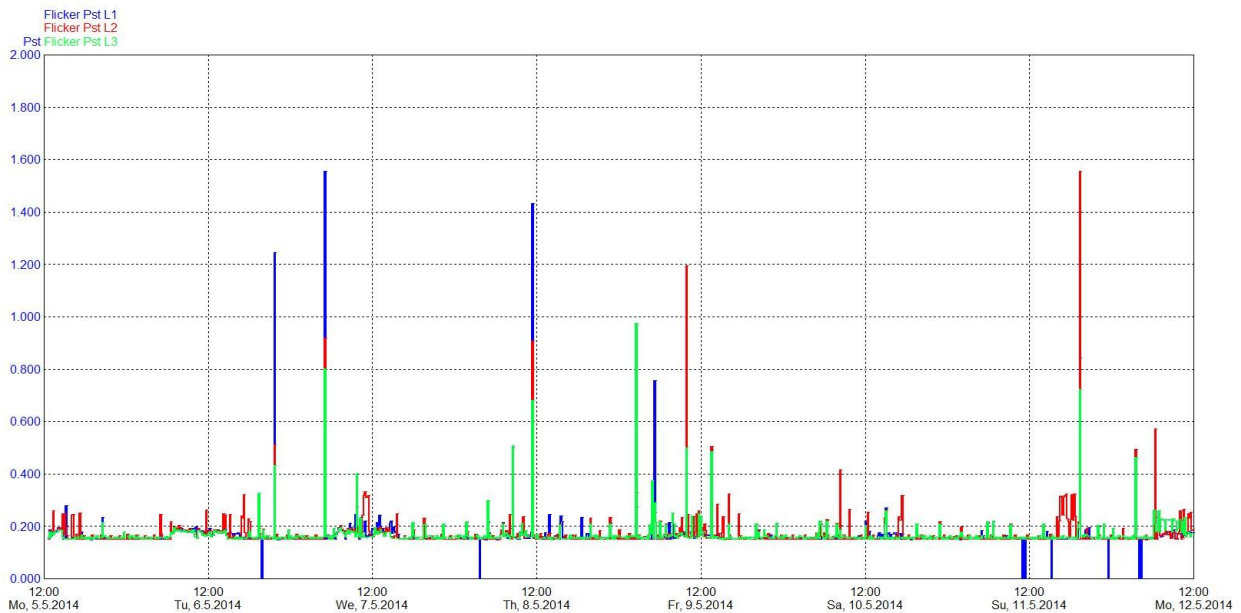


Slika 4.7. Kratkotrajno naponsko treperenje (flikeri), prije priključenja elektrane [20]

#### 4.3.4. Snimka kratkotrajnih flikera nakon priključenja elektrane na mrežu

EN50160 zahtjev	Mjereni L1 Pst	Mjereni L2 Pst	Mjereni L3 Pst
95% za vrijeme: $Pst \leq 1$	<b>1,47*</b>	<b>1,48*</b>	<b>0,95*</b>

\*maksimalne izmjerene 10-min. vrijednosti



**Slika 4.8.** Kratkotrajno naponsko treperenje (flikeri), nakon priključenja elektrane [20]

#### Komentar:

Pregledom dobivenih rezultata mjerenja, te snimljenih dijagrama kratkih i dugih flikera, koji su prikazani na slikama 4.4.,4.5.,4.6. i slici 4.8., prije i poslije spajanja elektrane na NN mrežu, vidljivo je da postoje periodi povećanih kratkotrajnih flikera, a vrijednost dugotrajnih flikera se poboljšala. Mogućnost nastanka kratkotrajnih flikera je brza promjena opterećenja u mreži koju uzrokuju potrošači. Sami kratkotrajni flikeri nisu predmet razmatranja prema normi EN50160. Iz svega vidljivoga zaključujemo da elektrana nema negativnih djelovanja po pitanju nastajanja i povećanja flikera.

## 4.4. Analiza naponskih nesimetrija u mreži

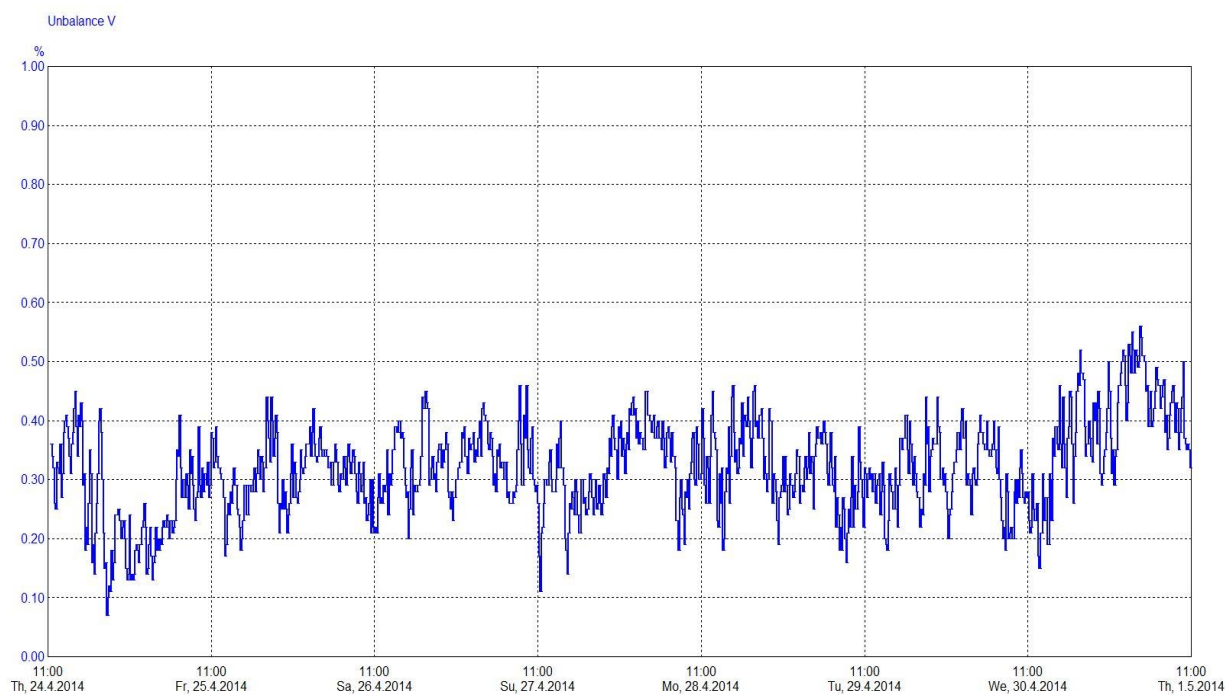
### 4.4.1. Snimke naponskih nesimetrija prije priključenja elektrane na mrežu

Naponska nesimetrija, prema EN50160

Definicija parametra: 10 minutna srednja RMS vrijednost negativne sekvence u2

Ograničenja: Pod normalnim radnim uvjetima

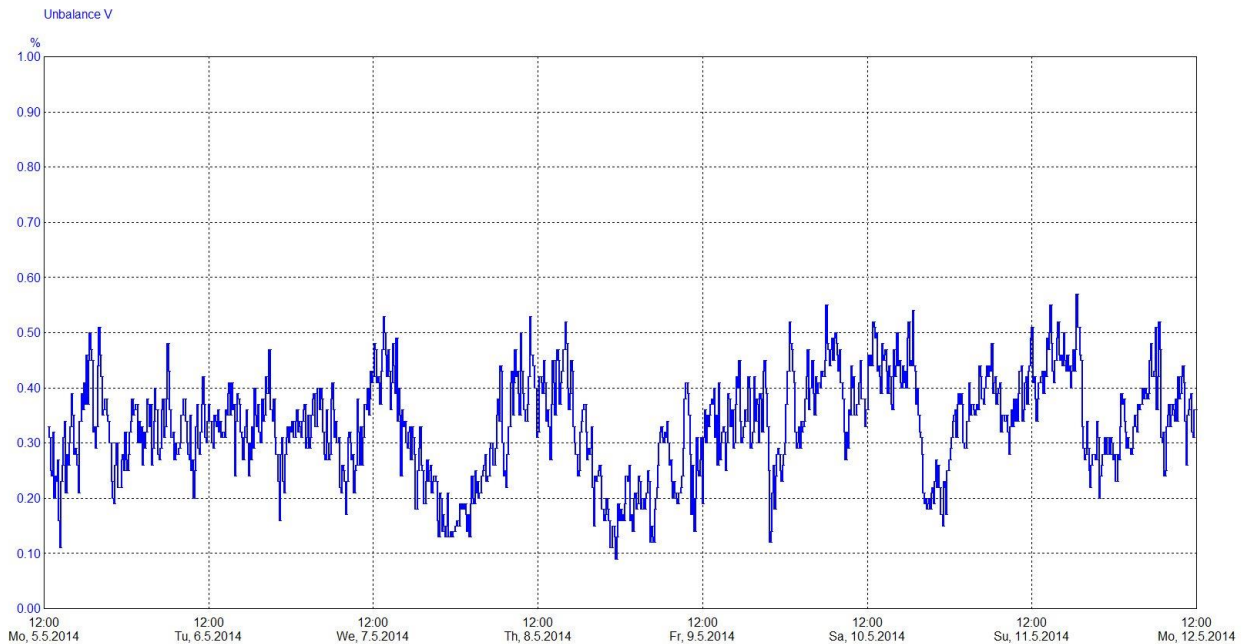
EN50160 zahtjev	Izmjerena sprega u2
95% za vrijeme: 0% ~ 2% u2	<b>0,56%</b>



**Slika 4.9.** Nesimetrija napona prije priključenja elektrane [20]

#### 4.4.2. Snimke naponskih nesimetrija nakon priključenja elektrane na mrežu

EN50160 zahtjev	Izmjerena sprega u2
95% za vrijeme: 0% ~ 2% u2	<b>0,67%</b>



**Slika 4.9.** Nesimetrija napona nakon priključenja elektrane [20]

##### Komentar:

Prema dobivenim vrijednostima mjerenja, te iz snimljenih dijagrama, kako je prikazano na slici 4.8. i slici 4.9. vidljivo je da elektrana nema značajnih utjecaja na naponsku nesimetriju u mreži. Ukoliko bi sagledali podatke mjerenja prije priključenja elektrane, vidljivo je da su vrijednosti nesimetrije nešto povoljnije, nego vrijednosti izmjerene nakon priključenja. Prema slici 4.12. vidljivo je da naponska nesimetrija nije rezultat rada elektrane, jer bi u tome slučaju došlo do povećane nesimetrije proporcionalno proizvodnoj snazi elektrane. Samim time, posljedica neznatne promjene nesimetrije nije uzrokovana radom elektrane.



## 4.5. Analiza harmonijskih izobličenja napona (THD)

### 4.5.1. Snimka ukupnih harmonijskih izobličenja napona (THD) prije priključenja elektrane na mrežu

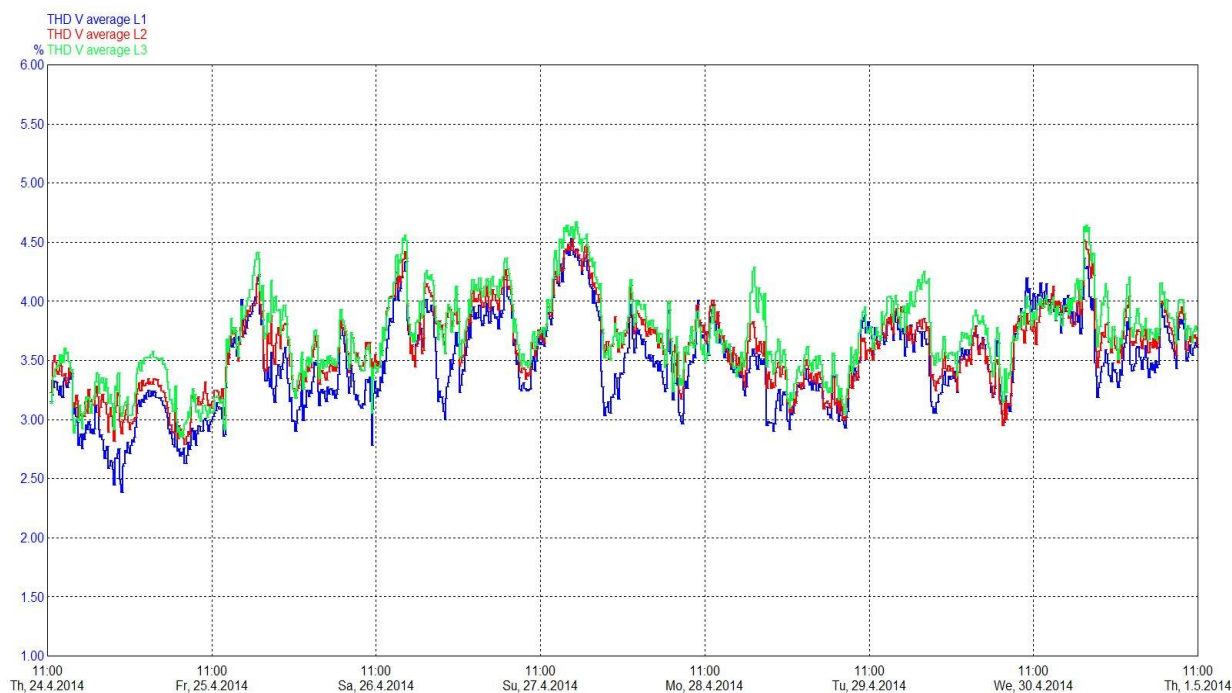
Naponski THD, prema EN50160

Definicija parametra: 10 minute srednje vrijednosti THD

Ograničenja: Pod normalnim radnim uvjetima

EN50160 Zahtjev	Mjereno L1 THD	Mjereno L2 THD	Mjereno L3 THD
95% za vrijeme: THD $\leq$ 8%	4,53%*	4,53%*	4,68%*

\*maksimalne izmjerene 10-min. vrijednosti



Slika 4.10. Ukupna harmonijska izobličenja prije priključenja elektrane [20]

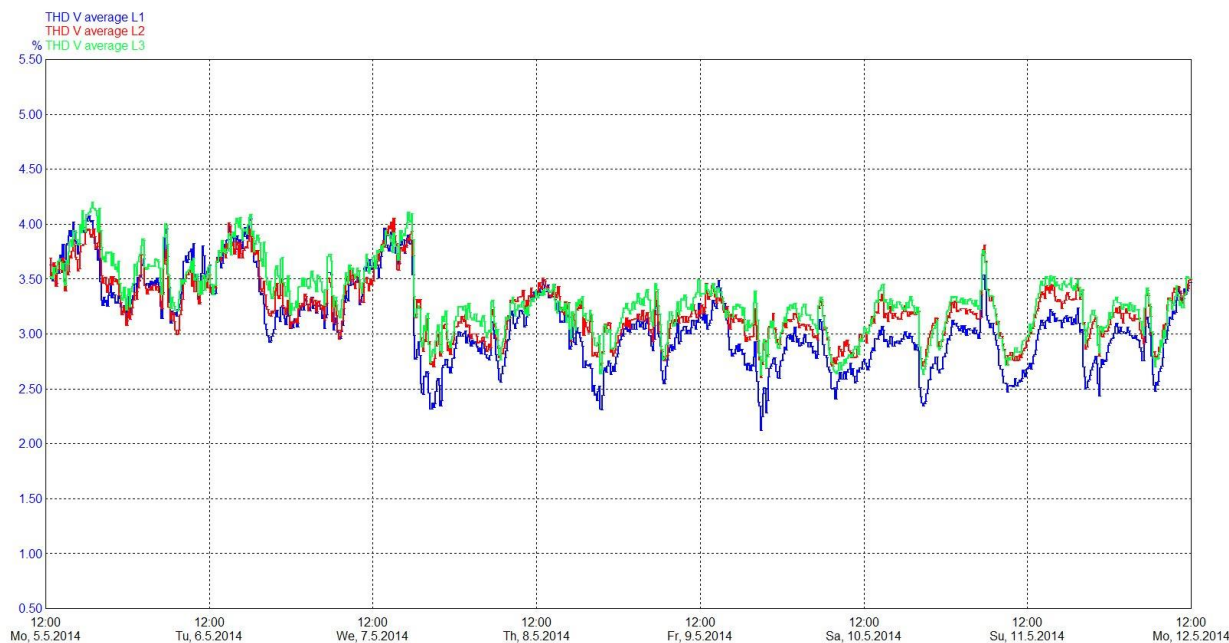
**Tablica 4.1.** Prikaz 10 minutne srednje vrijednosti svakog naponskog harmonika prije priključenja elektrane

Redoslijed harmonika	EN50160 limit	95% Vrijednost L1	95% Vrijednost L2	95% Vrijednost L3
H3	5,0%	1,6%	1,39%	0,92%
H5	6,0%	4,07%	4,17%	4,39%
H7	5,0%	2,78%	2,63%	2,90%
H9	1,5%	1,03%	0,98%	1,13%
H15	0,5%	0,52%	0,57%	0,52%

#### 4.5.2. Snimka ukupnih harmonijskih izobličenja napona (THD) nakon priključenja elektrane na mrežu

EN50160 Zahtjev	Mjereno L1 THD	Mjereno L2 THD	Mjereno L3 THD
95% za vrijeme: THD ≤ 8%	4,08%*	4,05%*	4,20%*

\*maksimalne izmjerene 10-min. vrijednosti



**Slika 4.11.** Ukupna harmonijska izobličenja nakon priključenja elektrane [20]

**Tablica 4.1.** Prikaz 10 minutne srednje vrijednosti svakog naponskog harmonika nakon priključenja elektrane

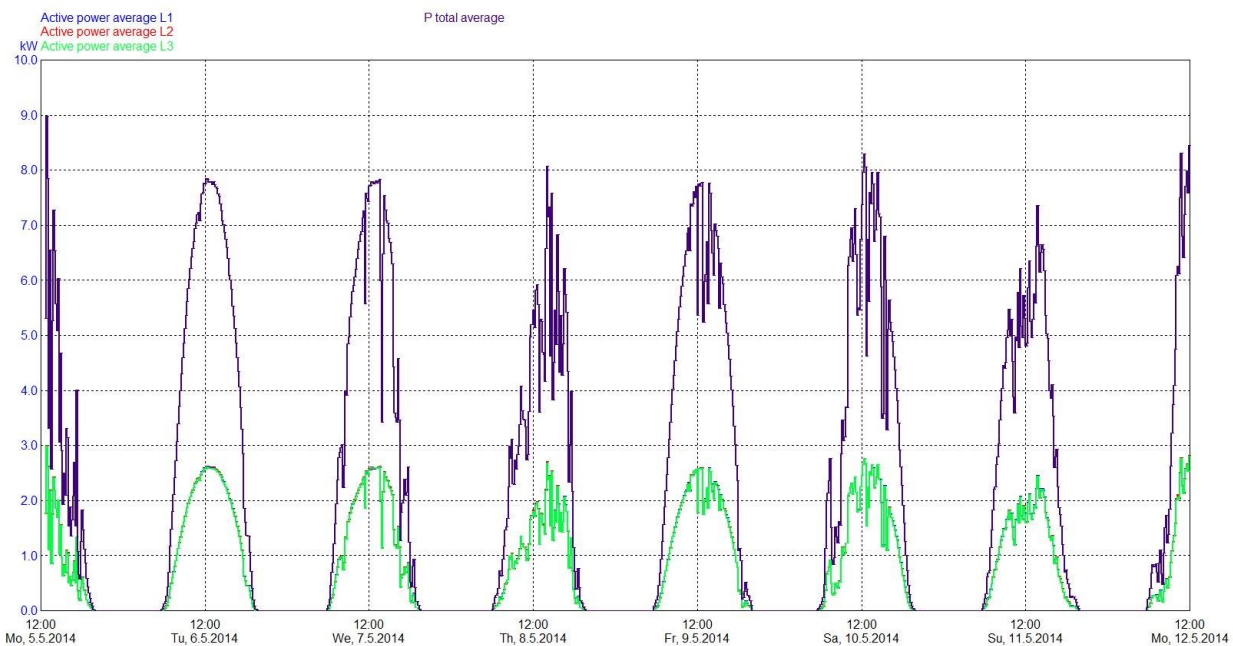
<b>Redosljed harmonika</b>	<b>EN50160 limit</b>	<b>95% Vrijednosti</b>	<b>95% Vrijednosti</b>	<b>95% Vrijednosti</b>
H3	5,0%	<b>1,6%</b>	<b>1,25%</b>	<b>0,77%</b>
H5	6,0%	<b>3,72%</b>	<b>3,72%</b>	<b>3,99%</b>
H7	5,0%	<b>2,12%</b>	<b>2,03%</b>	<b>2,10%</b>
H9	1,5%	<b>1,13%</b>	<b>0,98%</b>	<b>1,03%</b>
H15	0,5%	<b>0,42%</b>	<b>0,42%</b>	<b>0,42%</b>

Komentar:

Prema normi EN50160, maksimalno dopušteno odstupanje u 95% vremena ne smije biti veće od 8%. Analizom rezultata i snimaka ukupnih naponskih izobličenja, kako je prikazano na slici 4.10. i 4.11., vidljivo je da su vrijednosti naponskih harmonijskih izobličenja, nakon priključenja elektrane na NN mrežu, povoljniji, što je analizirano i u tablici 4.1. u kojoj je vrijednost 15.–og harmonika izvan dopuštene granice, što u tablici 4.2. nakon priključenja elektrane nije slučaj. Samim time može se zaključiti da elektrana povoljno djeluje na smanjenje nesimetrija u mreži, te da ne generira značajna povratna djelovanja na harmonijska izobličenja u mreži.

## 4.6. Proizvedena djelatna snaga (W)

Zahtjevi	Mjerena djelatna snaga (05.svibnja, 2014.)
Nijedan	<b>P<sub>max</sub>= 8,986 kW</b>



Slika 4.12. Predana trofazna energija u mrežu [20]

### Komentar:

Mjerenje količine predane energije u mrežu nije propisano normom EN50160, te se analiza količine isporučene energije smatra dodatkom. No međutim, ovaj dijagram je jako koristan u analizi mjernih rezultata elektrane, jer je vidljiva proizvodnja električne energije kroz vrijeme, pa se može uspoređivati sa određenim događajima u mreži. Prema slici 4.12. vidljivo je da vrijednost proizvedene energije ovisi o količini dnevne insolacije. Naime, 6. svibnja 2014. postignuta je idealna proizvodnja, gledajući sa stajališta konstantnosti, dok najnepovoljnija, tj. isprekidana proizvodnja (uzrokovana nepovoljnim vremenskim uvjetima), je proizvodnja 8. svibnja 2014. Stoga se može zaključiti, a kako je i vidljivo iz grafa predane energije u mrežu, da proizvodnja uvelike utječe o količini osunčanosti panela, jer pojavom bilo kakve sjene na panele smanjuje se količina proizvodnje el. energije. U grafu su prikazana ukupna proizvedena snaga (ljubičasta krivulja) i simetričnost faznih snaga, čime zaključujemo da je izmjenjivač simetričan izvor.

## 5. ZAKLJUČAK

Prilikom izrade ovoga rada, obrađena su poglavlja o osnovnim teoretskim saznanjima FN elektrana, te o pojavi harmonika koji su značajno prisutni u EES-u, a koja su bila od velike važnosti za pristup obradi analize utjecaja. Nakon obrade teorijskog dijela o harmonicima, utvrđeno je da njihovu prisutnost, u današnje moderno doba, nije moguće eliminirati, jer skoro svaki potrošač sadrži komponente energetske elektronike koji ih generiraju. Moguće je samo smanjiti njihov utjecaj koristeći dostupne tehnike. Kako su naponske i strujne prilike veoma značajne u održavanju što bolje kvalitete napona, bilo je potrebno uraditi mjerenja, pomoću mjernog instrumenta, te svaki utjecaj pojedinačno obraditi i predstaviti. Analizom mjerenja utvrđeno je da FN elektrana ETFOS nema negativnih povratnih djelovanja u mrežu, te da njena prisutnost u sustavu poboljšava naponske prilike u tom dijelu mreže pri većim opterećenjima. Elektrana kao takva nema značajnijeg negativnog djelovanja. Kako bismo što bolje analizirali utjecaj, potrebno je razmatrati povećani broj elektrana i njihovih snaga te njihovu nekontinuiranu proizvodnju kao negativan utjecaj na EES i njegovu stabilnost. Dakako, u povećanom broju FN elektrana doći će do izražaja problem tiristorskog pretvarača povećanjem harmonijskih izobličenja u mreži. Ta problematika se mora razmatrati sa strane EES, sa mogućim centralnim upravljanjem (dispečerskim), upravljanjem proizvodnje i po mogućnosti faktora snage što se u svijetu već radi i naziva smart grid.

## LITERATURA

- [1] Roger C. Dugan, Marc F. McGranahan, Surya Santoso, H. Wayne Beaty, **Electrical Power System Quality, second edition**
- [2] Denisa Galzina, **Harmonici u visokonaponskoj mreži**, HEP – operater prijenosnog sustava
- [3] Doc.dr.sc. Srđan Žutobradić, **Harmonici u elektroenergetskom sustavu**, Hrvatska energetska regulatorna agencija (HERA)
- [4] [http://ees.etf.bg.ac.rs/predmeti/27/kvalitet\\_2.pdf](http://ees.etf.bg.ac.rs/predmeti/27/kvalitet_2.pdf)
- [5] Angelo Baggini, **Handbook of Power Quality**, University of Bergamo, Italy
- [6] mr. Mithad Umihanić, dipl. ing.el., **Analiza viših harmonika šestopulsnog ispravljača sprega transformatora YgY**, Tehnički glasnik 9, 1(2015), 64-69
- [7] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Obnovljiva\\_energija](https://hr.wikipedia.org/wiki/Obnovljiva_energija)
- [8] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Obnovljivi\\_izvori\\_energije](https://hr.wikipedia.org/wiki/Obnovljivi_izvori_energije)
- [9] Doc.dr.sc. Damir Šljivac, Doc.dr.sc. Zdenko Šimić, **Obnovljivi izvori energije**, 2009.
- [10] <http://www.zelenaenergija.org/clanak/hrvatska-nastavlja-putem-poticanja-obnovljivih-izvora-energije/2031>
- [11] <http://www.croenergo.eu/U-Hrvatskoj-je-u-pogonu-1070-elektrana-na-obnovljive-izvore-energije-instalirane-snage-412594-MW-25209.aspx>
- [12] Ivan Ivšinović, **Diplomski rad – Kvaliteta električne energije**, Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, lipanj 2013.
- [13] Boris Labudović, dipl.ing., **Osnove primjene fotonaponskih sustava**, Zagreb, veljača 2011.
- [14] <http://samsara.rs/solarni-sistemi/>
- [15] Doc.dr.sc. Ranko Goić, Jakub Krstulović Opara, dipl.ing.el., Ivan Penović, dipl.ing.el, Damir Jakus, dipl.ing.el., Ivo Zlatunić, student, **Priključak velikih fotonaponskih elektrana na distribucijsku mrežu, 8. Savjetovanje**, Umag, 16. – 19. svibnja 2010.
- [16] <http://www.alternative-energy-tutorials.com/solar-power/pv-panel.html>
- [17] <http://www.nwcomp-solar.de/Inverters-Kaco-Powador-160-TR3>
- [18] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Fotonaponski\\_sustavi#Pretvara.C4.8D\\_.28inverter.29](https://hr.wikipedia.org/wiki/Fotonaponski_sustavi#Pretvara.C4.8D_.28inverter.29)
- [19] <http://www.elektro-performance.hr/Mrezni-solarni-sistemi.html>
- [20] Doc.dr.sc. Zvonimir Klaić, dipl.inž.el., **Utjecaj sunčane elektrane ETFOS 1, na distribucijsku mrežu HEP ODS-a, DP „Elektroslavonija“ Osijek**, Osijek svibanj 2014.
- [21] Prof.dr.sc Srete Nikolovski, Mario Kresonja, dipl.ing., Goran Knežević, dipl.ing., Jurica Gorup dipl.ing., **Analiza parametara kvalitete električne energije FN elektrane 120 kW u Virovitici**, Trogir/Seget Donji, 11. – 14. svibnja 2014.

[22] Prof. dr. sc. Tomislav Tomiša, **Kvaliteta opskrbe električnom energijom**, Zavod za visoki napon i energetiku, FER Zagreb

[23] Ministarstvo gospodarstva, rada i poduzetništva **MREŽNA PRAVILA ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA**, »Narodne novine«, broj 177/0

[24] HRN EN 50160:2012, **Naponske karakteristike električne energije iz javnog distribucijskog sustava** (EN 50160:2010)

## POPIS KORIŠTENIH KRATICA I OZNAKA

AC – izmjenično

DC – istosmjerno

FN – fotonaponski modul

MPP – maximum power point (točka maksimalne snage)

PWM – pulse-width modulation (širinska modulacija)

EES – elektroenergetski sustav

THD – total harmonic distortion (ukupno harmonijsko izobličenje)

EES – elektroenergetski sustav

NN – niskonaponska

SN - srednjenaponska

el. energija – električna energija

PV - photovoltaic

LV – low voltage



## SAŽETAK

U ovome diplomskome radu obrađena je analiza utjecaja FN elektrane ETFOS na mjestu priključka pomoću izvršenih mjerenja kvalitete napona pri priključenju FN elektrane na mrežu. Cilj rada je analizirati na koji način FN elektrana utječe na naponske prilike, tj. da li se priključenjem elektrane poboljšavaju naponske prilike, ili ona negativno utječe na stanje u mreži. Nakon analize mjerenja, prije i nakon priključenja elektrane na mrežu, rezultati su pokazali kako naponske prilike, nakon priključenja, postaju stabilnije, te je dokazano da elektrana povoljno utječe na kvalitetu napona u NN mreži.

Ključne riječi: Sunce, harmonici, inverter, solarna ćelija, fotonaponska elektrana, utjecaj na mrežu.

## **ABSTRACT**

The topic of this graduation thesis is the analysis of the influence of ETFOS PV power plant on the connection point, through the measurement of the voltage quality when the PV power plant is connected to the power grid. The aim of the thesis is to analyze the influence of the PV power plant on the voltage conditions: are the voltage conditions improved by connecting the plant, or does the plant have a negative influence on the network condition? After the analysis of the measurement, before and after connecting the plant to the grid, the results show that the voltage conditions are stable after the plant is connected, and that the influence of the power plant on the voltage quality of the LV network is positive.

Key words: the Sun, harmonics, inverter, solar cell, photovoltaic power plants, the impact on network

## ŽIVOTOPIS

Siniša Simić, rođen je 07. veljače, 1989. godine u Osijeku. Prva četiri razreda osnovne škole pohađao je u Karancu, a ostatak osnovnoškolskog obrazovanja u Belom Manastiru. Nakon završene osnovne škole, upisuje se u Prvu srednju školu Beli Manastir, gdje nakon završetka stječe zvanje Elektrotehničara. Odmah zatim upisuje Preddiplomski studij elektrotehnike u Osijeku, te nakon uspješnog završetka studija stječe zvanje Sveučilišnog prvostupnika, inženjera elektrotehnike. Daljnji studij nastavlja na Diplomskom studiju, smjera elektroenergetike. Tijekom cijelog studija obnašao je poslove elektrotehničara preko student servisa, te stekao mnoga znanja i vještine u području elektrotehnike.