

Analiza utjecaja obnovljivih izvora energije u ruralnom području na kvalitetu električne energije

Budimski, Vanja

Master's thesis / Diplomski rad

2019

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:200:116611>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-28**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH
TEHNOLOGIJA

Sveučilišni studij

ANALIZA UTJECAJA OBNOVLJIVIH IZVORA
ENERGIJE U RURALNOM PODRUČJU NA KVALITETU
ELEKTRIČNE ENERGIJE

Diplomski rad

Vanja Budimski

Osijek, 2019.

SADRŽAJ

| | |
|--|----|
| 1. UVOD | 1 |
| 2. POKAZATELJI KVALITETE ELEKTRIČNE ENERGIJE | 2 |
| 2.1. Kolebanje napona i treperenje | 3 |
| 2.2. Naponski propadi i prekidi | 6 |
| 2.3. Previsoki naponi i prenaponi | 9 |
| 2.4. Harmonici | 10 |
| 2.5. Nesimetrija napona | 13 |
| 3. DISTRIBUIRANA PROIZVODNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE | 15 |
| 3.1. Bioplinske elektrane | 16 |
| 3.2. Fotonaponske elektrane | 17 |
| 3.3. Vjetroelektrane | 20 |
| 4. ANALIZA MJERENJA | 23 |
| 4.1. Mjerni instrument | 23 |
| 4.2. Programski paket | 24 |
| 4.3. Bioplinska elektrana | 24 |
| 4.4. Fotonaponska elektrana | 35 |
| 4. ZAKLJUČAK | 46 |
| POPIS LITERATURE I DRUGIH IZVORA INFORMACIJA | 47 |
| SAŽETAK | 48 |
| SUMMARY | 48 |
| ŽIVOTOPIS | 49 |

1. UVOD

Od početka proizvodnje električne energije pa do danas, kao glavni izvor energije koriste se fosilna goriva. S obzirom na to da fosilna goriva nisu neiscrpan izvor te da negativno utječu na okoliš, čovječanstvo je primorano okrenuti se obnovljivim izvorima energije poput energije Sunca i vjetra.

Današnja elektrodistribucijska mreža izgrađena je u vrijeme centralne proizvodnje električne energije u velikim elektranama, a posljednjih godina uvodi se distribuirana proizvodnja električne energije iz obnovljivih izvora energije. Dok s jedne strane imamo brojne prednosti distribuiranih izvora poput rasterećenja prijenosnih vodova i smanjenja zagađenja okoliša, s druge strane se postavlja pitanje kakav utjecaj na kvalitetu električne energije imaju takvi izvori.

Kvaliteta električne energije je pojam o kojemu se raspravlja od samih početaka korištenja električne energije i postaje sve bitnija s vremenom zbog povećanog broja trošila nelinearnih karakteristika koja su posebno osjetljiva na kvalitetu energije kojom su napajana te koja i sama utječu na kvalitetu. Utjecaj na kvalitetu tako imaju i proizvođač i kupac korištenjem energetske elektronike pri proizvodnji, tj. pri potrošnji električne energije.

Za zaštitu kako potrošača, tako i proizvođača, uspostavljeni su međunarodni standardi prema kojima se poremećaji u kvaliteti mogu klasificirati. Hrvatska je 2012. godine prihvatila standard HRN EN 50160:2012 „Naponske karakteristike električne energije iz javnih distribucijskih mreža“ prema kojem se kvaliteta kontrolira.

U ovom diplomskog radu proučiti će se utjecaj obnovljivih izvora, točnije bioplinske elektrane te fotonaponske elektrane, na kvalitetu električne energije.

2. POKAZATELJI KVALITETE ELEKTRIČNE ENERGIJE

Jedno od najvažnijih pitanja prilikom isporuke električne energije jeste kvaliteta električne energije. Kvalitetu električne energije možemo definirati kao stupanj otklona glavnih parametara koje čine amplituda, frekvencija, valni oblik i simetrija napona, od nazivnih vrijednosti. Pokazatelji kvalitete električne energije prikazani su na slici 2.1. Osobine napona koje u pravilu budu obuhvaćene analizom kvalitete su:

- naponski propadi i prekidi,
- kolebanja napona,
- harmonici i međuharmonici,
- previsoki naponi i prenaponi,
- valovitost,
- nesimetrija napona,
- promjene osnovne frekvencije mreže,
- prisutnost istosmjerne u izmjeničnoj komponenti,
- prisutnost signalnih napona,

te nije potrebno mjerenje svih navedenih tipova poremećaja. [1]



Slika 2.1. Pokazatelji kvalitete električne energije

Najčešće korištene klasifikacije poremećaja kvalitete električne energije su:

- IEC (International Electrotechnical Commission),
- IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers),
- CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardization).

Zemlje Europske Unije koriste normu EN 50160 koju je razvila CENELEC za kvalitetu napona u javnim distributivnim mrežama na mjestima predaje potrošaču pri normalnim pogonskim uvjetima. [2] Zahtjevi norme EN 50160 prikazani su u tablici 2.1.

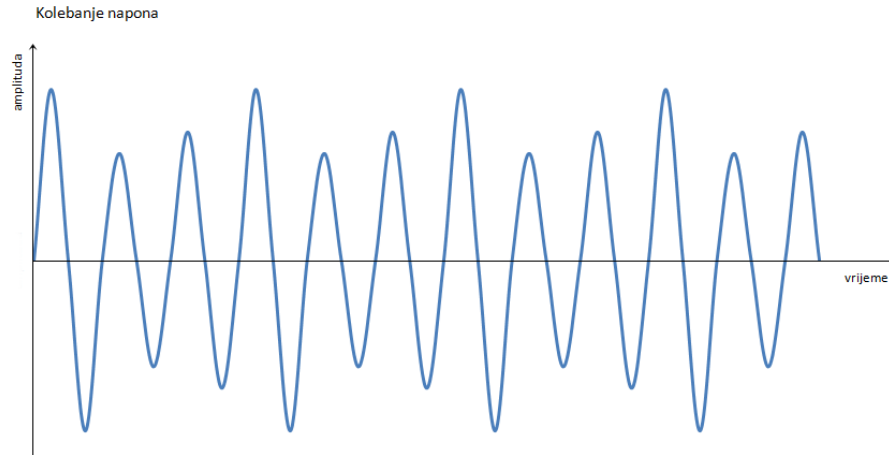
Tablica 2.1. *Zahtjevi norme EN 50160 [3]*

| EN 50160 | | | |
|-----------------|-----------------|---|--------------------------------|
| Pokazatelj | Mjerna jedinica | Niskonaponske mreže | Srednjenaponske mreže |
| Frekvencija | Hz | $\pm 1 \% f_n$ (49.5 – 50.5 Hz) za 99,5 % tjedna | |
| | | -6 % / +4 f_n (47 – 52 Hz) za 100 % tjedna | |
| Promjene napona | V | $\pm 10 \% U_n$ za 95 % tjedna +10 / -15 % za 5 % tjedna | $\pm 10 \% U_c$ za 95 % tjedna |
| Kratki prekidi | Broj | <3 min. – nekoliko desetaka do stotina godišnje | |
| Dugi prekidi | Broj | ≥ 3 min. - < 10-50 godišnje | |
| Propadi | Broj | nekoliko desetaka do tisuću godišnje | |
| THD napona | % U_n | <8 % U_n | |
| Treperenje | P_{lt} | $P_{lt} \leq 1$, za 95 % tjedna | |
| Nesimetrija | % U_n | < 2 % U_n | |

2.1. Kolebanje napona i treperenje

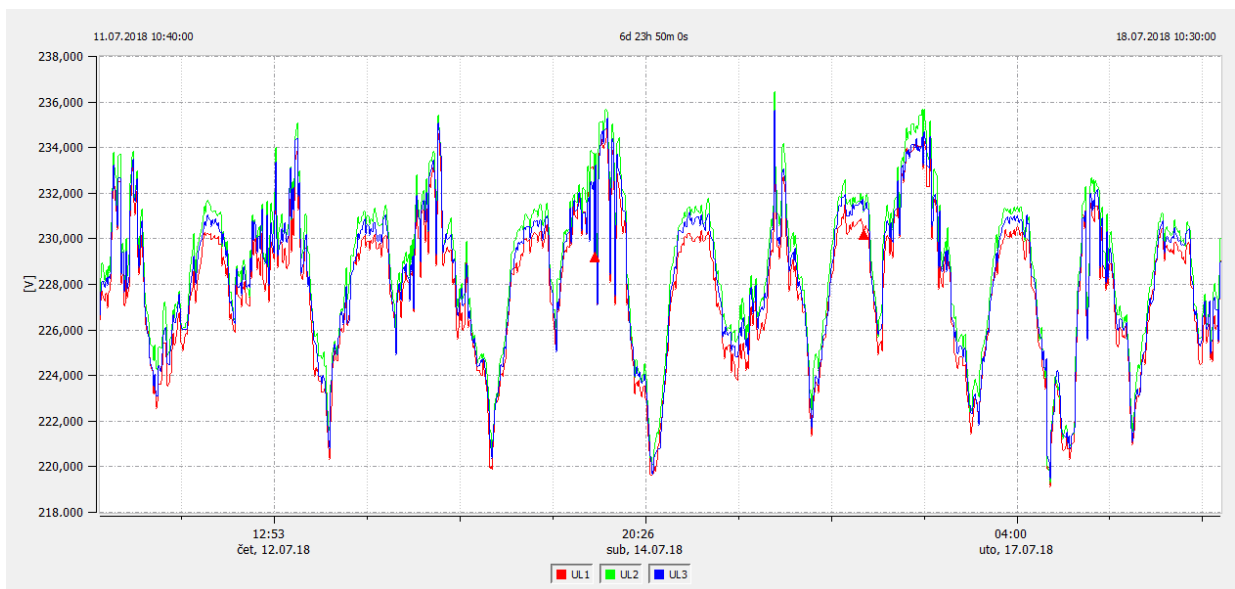
Razina napona u mreži se konstantno mijenja, razlikujemo brze i spore promjene napona. Promjene napona uzrokovane su stalnim uklapanjem i isklapanjem opreme, a promjene će biti veće s povećanjem impedancije mreže.

Kolebanje napona predstavlja uzastopne naponske promjene ili periodičnu promjenu envelope, tj. odstupanje efektivne od stacionarne vrijednosti kroz određeni vremenski interval. Pravilnim planiranjem i upravljanjem mrežom moguće je umanjiti naponska kolebanja u mreži. Kolebanje napona prikazano je na slici 2.2.



Slika 2.2. *Kolebanje napona*

Prema zahtjevima norme EN 50160 navedenima u tablici 2.1., 95 % srednjih desetminutnih vrijednosti napona treba biti u rasponu $U_n \pm 10 \% U_n$, a sve mjerene vrijednosti moraju biti u rasponu $U_n + 10 \% / -15 \% U_n$. Drugim riječima od 1008 desetminutnih srednjih iznosa efektivne vrijednosti napona koji se bilježe unutar mjerenja od tjedan dana, njih 958 treba imati vrijednost između 207 V i 253 V, a sve zabilježene vrijednosti trebaju biti između 195,5 V i 253 V ako je u pitanju mreža nazivnog napona 230 V. Slika 2.3 prikazuje kolebanje napona snimljeno na fotonaponskoj elektrani u trajanju od tjedan dana.

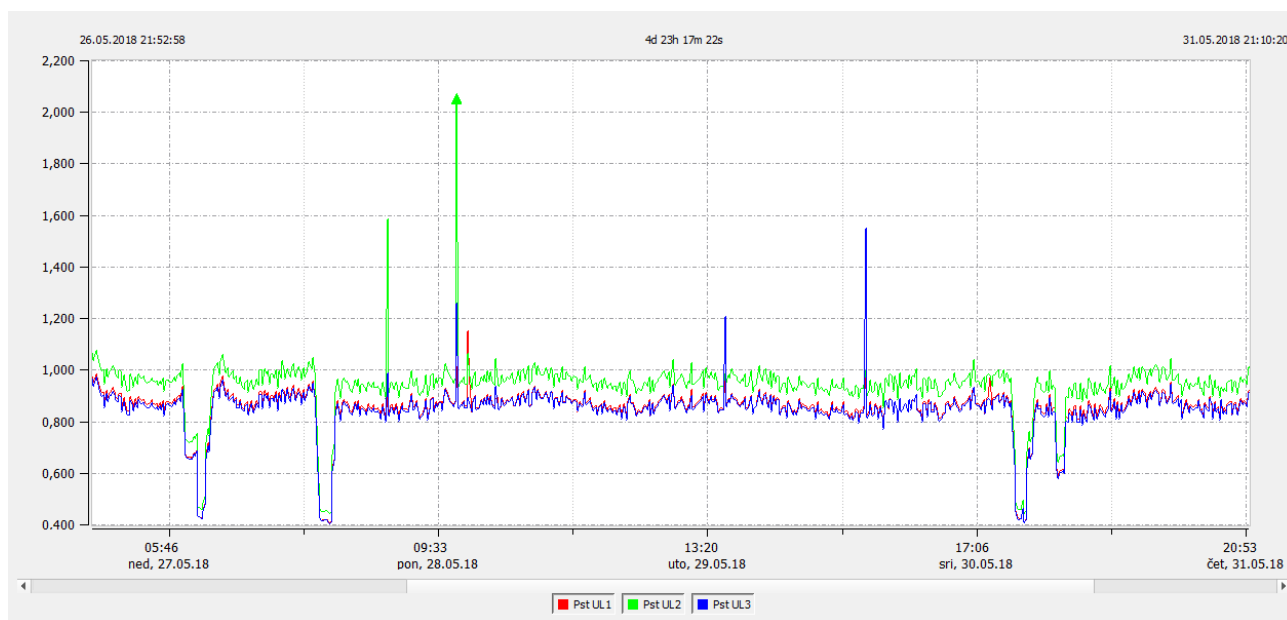


Slika 2.3. *Kolebanje napona*

Kao posljedica brzih naponskih kolebanja javlja se treperenje (flickeri) koje utječe na rasvjetu. Treperenje napona uzrokuje vizualno primjetnu nestabilnost intenziteta rasvjete. Intenzitet treperenja iznosi 1 ako u prostoriji u kojoj boravi 100 ljudi pod jednakim uvjetima, 50 od 100 nazočnih opazi promjenu intenziteta svjetla. Dugotrajna izloženost treperenju može kod ljudi uzrokovati glavobolje i umor. [4] Prema normi EN 50160 vrijednost 1 je granična i sve veće vrijednosti nisu prihvatljive za ljude i za uređaje. Slika 2.4 prikazuje treperenje napona snimljeno na bioplinskoj elektrani u razdoblju od tjedan dana.

Razlikuje se kratkotrajno i dugotrajno treperenje. Kratkotrajno treperenje P_{st} je osnovni parameter treperenja i mjeri se unutar desetminutnog intervala. Dugotrajno treperenje P_{lt} računa se na temelju dvanaest uzastopnih izmjerenih vrijednosti kratkotrajnog treperenja unutar perioda od dva sata prema formuli (2-1). [3]

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{sti}^3}{12}} \quad (2-1)$$



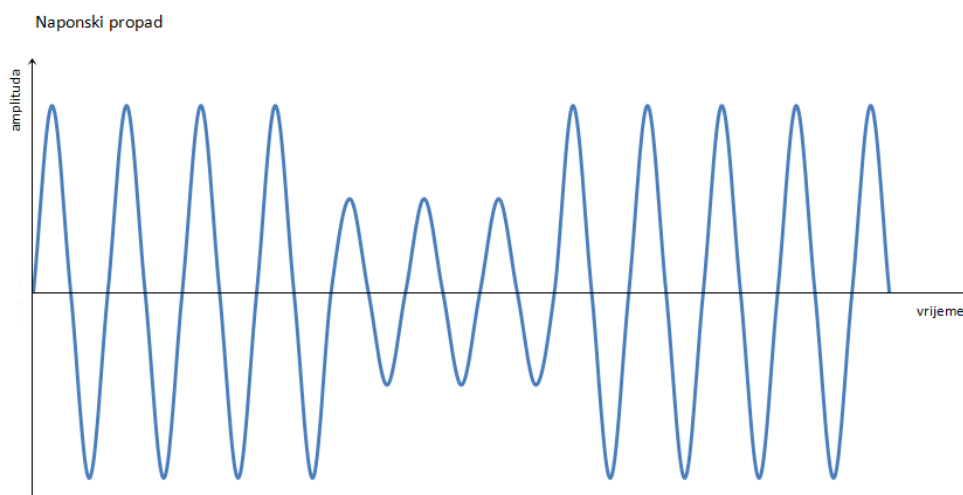
Slika 2.4. Treperenje napona

Glavni uzroci kolebanja i treperenja napona jesu industrijska opterećenja te kao posljedicu imamo svjetlosno treperenje koje tijekom dužeg razdoblja uzrokuje glavobolje i umor čak i kada treperenje nije vidom primjetno. Problem treperenja nije moguće potpuno ukloniti, ali se može

ublažiti zamjenom žarulja sa žarnom niti fluorescentnim žaruljama, ugradnjom neprekidnog napajanja, preuređenjem mreže itd.

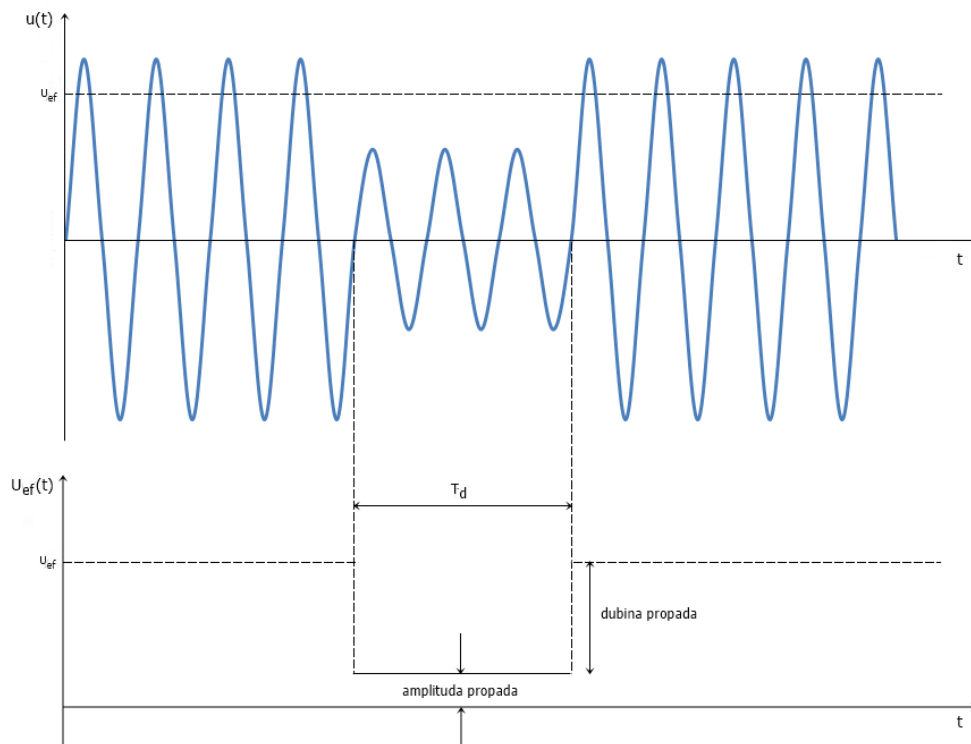
2.2. Naponski propadi i prekidi

Naponski propad je dvodimenzionalni elektromagnetski poremećaj određen vremenom trajanja i razinom napona, tj. dubinom propada. Definira se kao naglo i kratkotrajno smanjenje opskrbnog napona nakon čega se ponovno uspostavlja vrijednost bliska nazivnoj. [3] Naponski propad prikazan je na slici 2.5.



Slika 2.5. *Naponski propad*

Vrijednost napona za koju se podrazumijeva da je naponski propad jeste ispod 90% nazivnog napona, a vrijeme trajanja se kreće od 10 ms do 1 minute. Dozvoljen broj naponskih propada u jednoj godini iznosi između 10 i 1000 s tim što većina treba biti trajanja kraćeg od 1 s i vrijednosti veće od 60% nazivnog napona. Karakteristike naponskog propada prikazane su na slici 2.6.

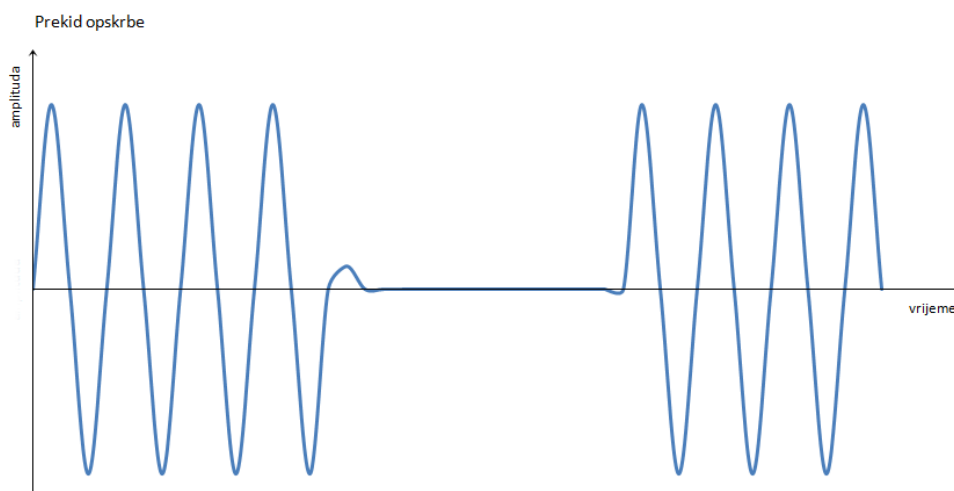


Slika 2.6. Karakteristike naponskog propada

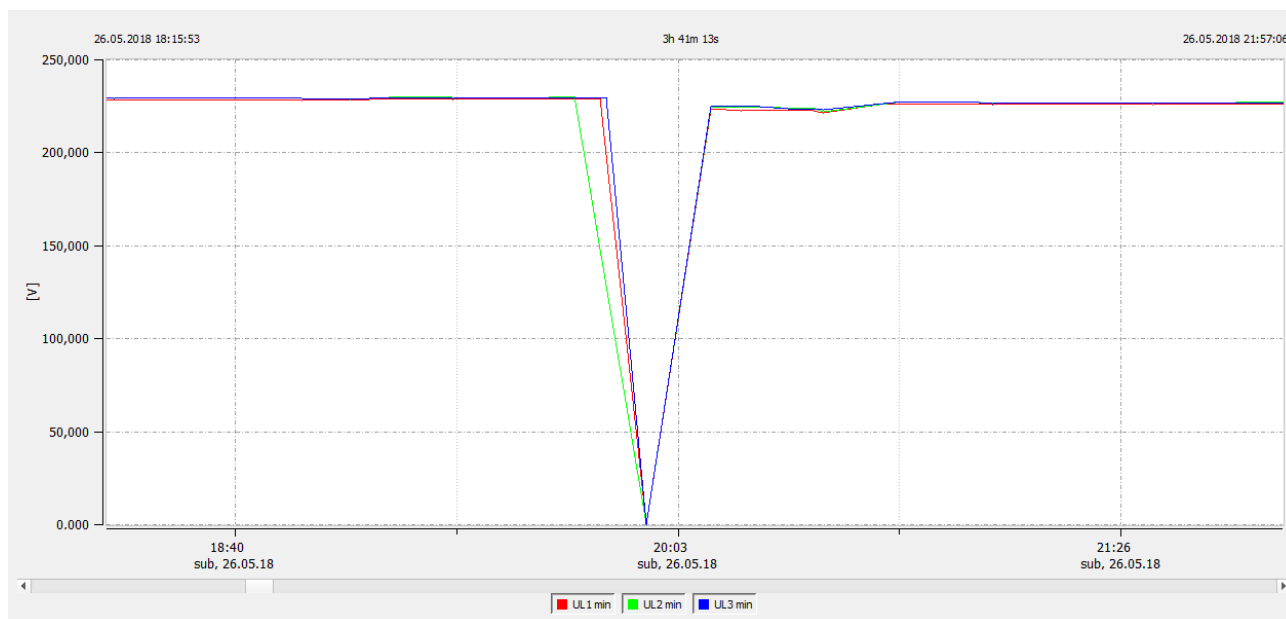
Iz slike 2.6 vidljivo je da je naponski propad određen dubinom propada, tj. razlikom efektivne vrijednosti napona za vrijeme propada i kad propada nema, amplitudom propada koja je vrijednost sniženog efektivnog napona za vrijeme propada i vremenom trajanja propada, odnosno vremenskim intervalom između vremena pada napona ispod granične vrijednosti i povratka iznad granične vrijednosti. Propadi su većinom izazvani pokretanjem motora veće snage i kratkim spojevima te je veći broj naponskih propada i prekida na nadzemnim mrežama koje su izložene nepovoljnim vremenskim prilikama, nego na mrežama koje se nalaze ispod zemlje. Pogoni s promjenjivom brzinom su naročito osjetljivi na propade kao i računalna oprema te oprema za vođenje procesa. Veća uporaba distribuiranih izvora zahtjeva i uvođenje novih vodova i kabela što može dovesti do povećanog broja naponskih propada kod potrošača spojenih u blizini tih vodova. [4]

Prekid opskrbe je nagli pad opskrbnog napona na mjestu isporuke ispod vrijednosti od 1 % nazivnog napona. Razlikujemo kratkotrajne i dugotrajne prekide, tj. prekide trajanja kraćeg od 3 minute i duljeg od 3 minute, te planirane i neplanirane prekide. Dugotrajni prekidi se događaju kao

posljedica djelovanja zaštitnih uređaja kod trajnog kvara ili kao posljedica svjesnog otvaranja prekidača pri djelomičnom kvaru. Kod planiranog prekida, potrošače se pravovremeno obavijesti o planiranim radovima koji zahtjevaju prekid opskrbe dok do neplaniranih prekida dolazi zbog iznenadnog kvara opreme, vanjskih utjecaja i slično. [3] Slike 2.7 i 2.8 prikazuju prekid opskrbe. Prekid sa slike 2.8 snimljen je na bioplinskoj elektrani.



Slika 2.7. Prekid opskrbe



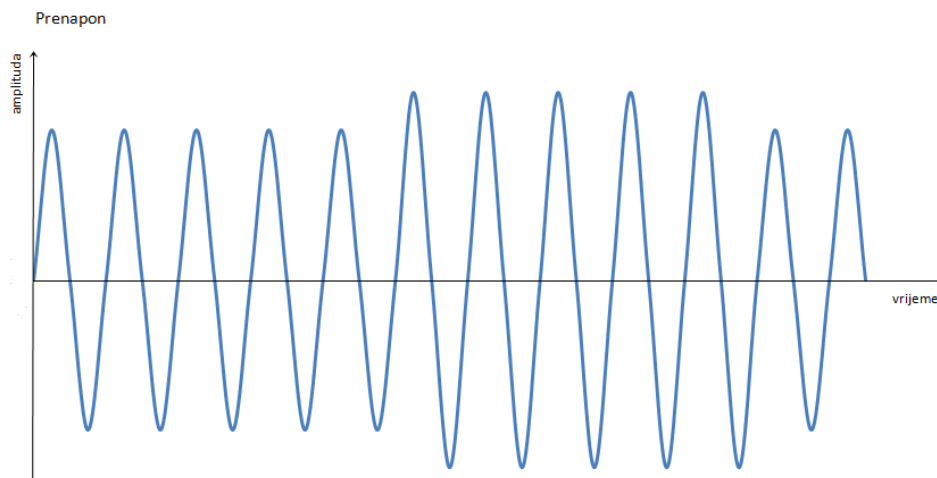
Slika 2.8. Prekid opskrbe

2.3. Previsoki naponi i prenaponi

Do pojave previsokih napona dolazi kada se prekorači gornja granična vrijednost nazivnog napona, što po normi EN 50160 iznosi $U_n + 10 \% U_n$. Karakteristika prenapona određena je visinom i vremenom trajanja poremećaja. Kod atmosferskih pražnjenja, povećanja napona pri uklapanjima i isklapanjima te kratkim spojevima u mreži, prenaponi su prijelazne pojave. S obzirom na razlog nastanka previsokog napona, dijelimo ih na:

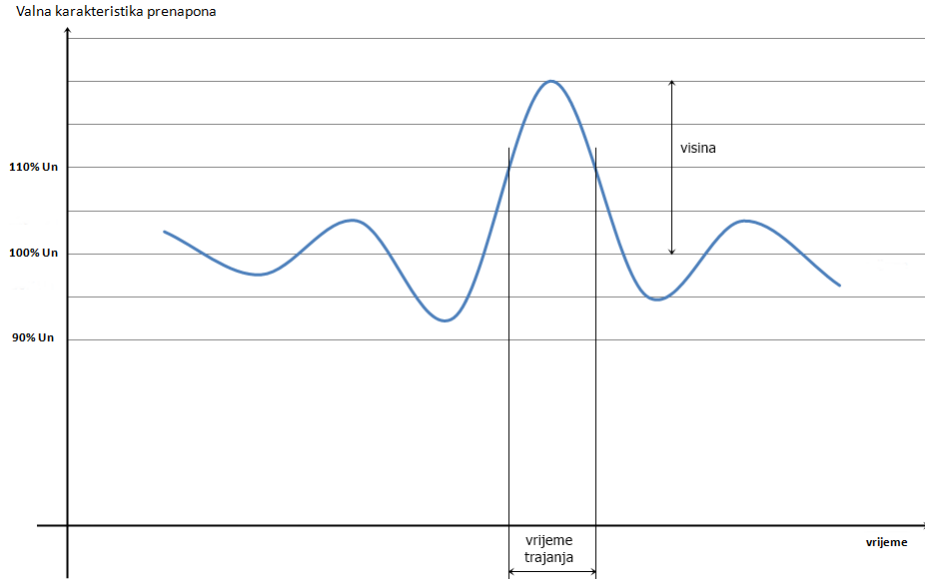
- prolazne,
- sklopne,
- atmosferske.

Do pojave prolaznih previsokih napona može doći zbog prekida neutralnog vodiča, neispravne regulacije napona transformatora ili generatora, prekompenzirane jalove snage ili proboja izolacije faze i zemlje. Uzrok sklopnih previsokih napona mogu biti sklapanja kapacitivnih krugova ili niskih induktivnih struja. Atmosferski prenaponi rezultat su munja koje mogu udariti izravno na vod ili dio mreže ili mogu neizravno inducirati porast potencijala zemlje i prenapone. Slike 2.9 i 2.10 prikazuju prenapon i njegove valne karakteristike.



Slika 2.9. *Prenapon*

Pojava prenapona može dovesti do proboja dielektrika i trajnog oštećenja opreme, propadanja opreme kod čestog ponavljanja prenapona, dugotrajnih naponskih prekida uzrokovanih uništenjem opreme, poremećaja u upravljačkim i komunikacijskim sustavima te požara.



Slika 2.10. Valna karakteristika prenapona

Preventivnom i represivnom zaštitom smanjujemo rizik od prenapona. Preventivnom zaštitom zaštitnim užetom, nulovanjem, regulatorima, zaštitinim relejima i sl. ograničavamo unutarnje prenapone, a represivna zaštita podrazumijeva posebnu opremu koja usmjerava prenapon u zemlju. Električnu opremu također je potrebno zaštititi od prenapona, a to se postiže ograničavanjem napona, smanjenjem i usmjeravanjem udarne struje, uzemljavanjem opreme i stvaranjem niskopropusnog filtra. [5]

2.4. Harmonici

Harmonik je komponenta frekvencije koja je višekratnik osnovne frekvencije. Taj višekratnik može biti cijeli broj, a ako nije onda govorimo o međuharmonicima. Deformirani valni oblik napona dobiven je zbrojem harmonika te dekompenzacijom iskrivljenog valnog oblika on biva rastavljen na harmonijske komponente. Na taj način možemo prikazati svaku komponentu iskrivljenog valnog oblika odvojeno. Slika 2.11 prikazuje izobličeni sinusni val.

Do porasta harmoničkih poremećaja u elektroenergetskom sustavu došlo je povećanjem primjene energetske elektronike, tj. povećanom uporabom uređaja nelinearnih karakteristika koji u sustav injektiraju više harmonijske komponente struje koje prolaskom kroz impedanciju sustava

deformiraju napon. Ukupno harmoničko izobličenje računa se prema formuli (2-2) i prema normi EN 50160 ne smije prelaziti 8 % U_n . [3]

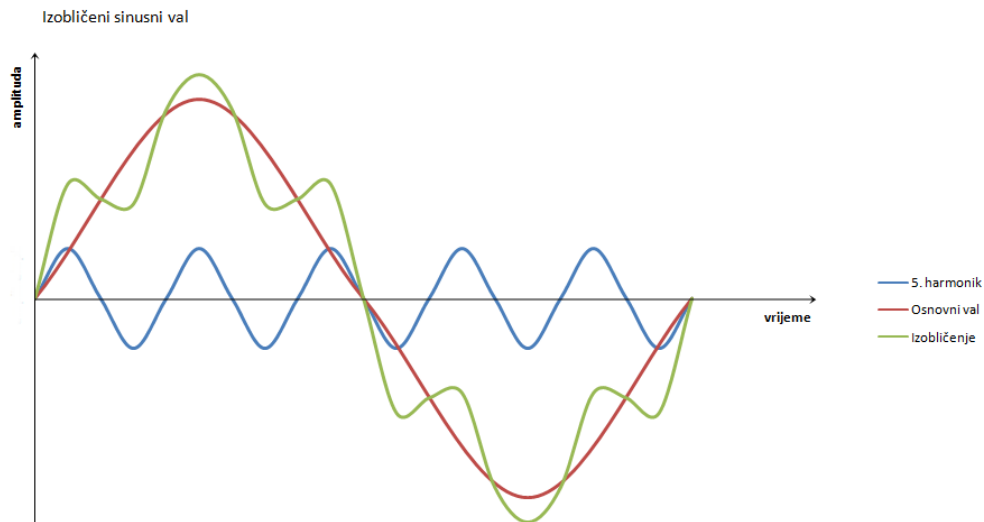
$$THDU = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} (U_h)^2} \frac{100\%}{U_1} \quad (2-2)$$

gdje je:

THDU – ukupno harmoničko izobličenje napona (eng. Total Harmonic Distortion)

$\sum_{h=2}^{40} (U_h)^2$ - zbroj vrijednosti napona od drugog do četrdesetog harmonika

U_1 - nazivni napon. [3]



Slika 2.11. *Izobličeni sinusni val*

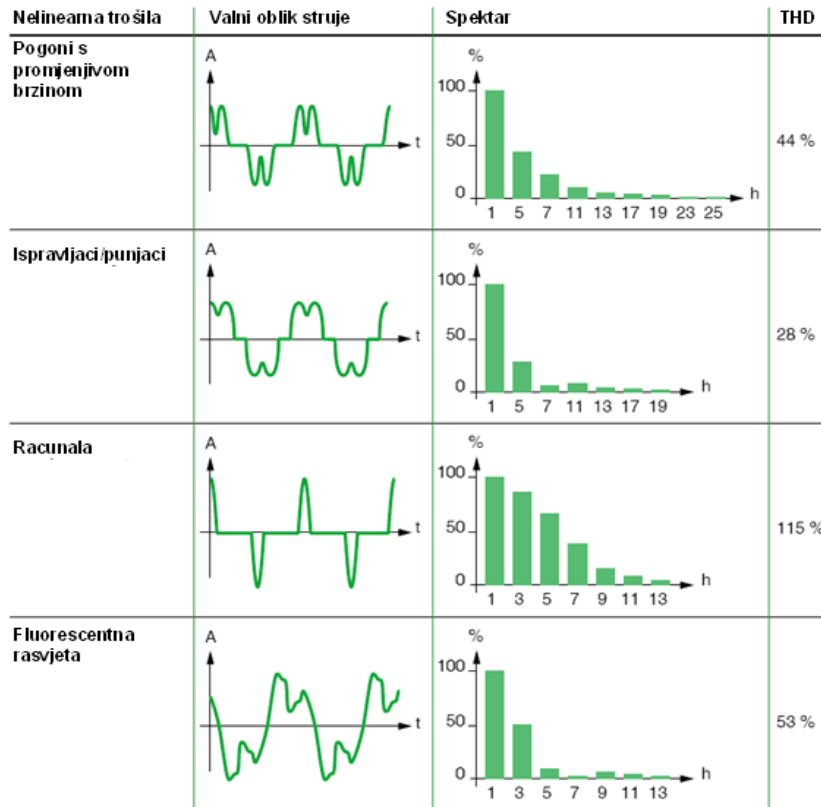
Uređaji često korišteni u kućanstvima poput televizora, osobnih računala, mikrovalnih pećnica, malih kuhinjskih uređaja, pisača, fotokopirnih aparata, sklopki s potencijetrom i fluorescentnih svjetiljki imaju malu nazivnu snagu i proizvode struje viših harmonika nižih razina, ali imaju velik sveukupni efekt zbog količine i česte uporabe takvih trošila. Tablica 2.2 prikazuje vrijednosti pojedinih viših harmonika napona na mjestu predaje, a na slici 2.12 možemo vidjeti više harmonike generirane nelinearnim trošilima.

Kod distribuirane proizvodnje, pojava harmonika ovisi o tehnologiji koja je upotrebljena pri povezivanju izvora sa mrežom. Korištenje sklopova energetske elektronike poput izmjenjivača i pretvarača kod fotonaponskih i vjetroelektrana dovodi do povećane pojave viših harmonika. [6]

Prema normi EN 50160, pri normalnim pogonskim uvjetima 95 % desetminutnih srednjih vrijednosti efektivne vrijednosti napona ne smije prelaziti vrijednosti iz tablice 2.2.

Tablica 2.2. Vrijednosti pojedinih viših harmonika napona na mjestu predaje [3]

| Neparni viši harmonici | | | | Parni viši harmonici | |
|---------------------------|-----------------|---------------------------|-----------------|----------------------|-----------------|
| Nisu višekratnici broja 3 | | Jesu višekratnici broja 3 | | | |
| Redni br. h | U_h u % U_n | Redni br. h | U_h u % U_n | Redni br. h | U_h u % U_n |
| 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 | | | | |

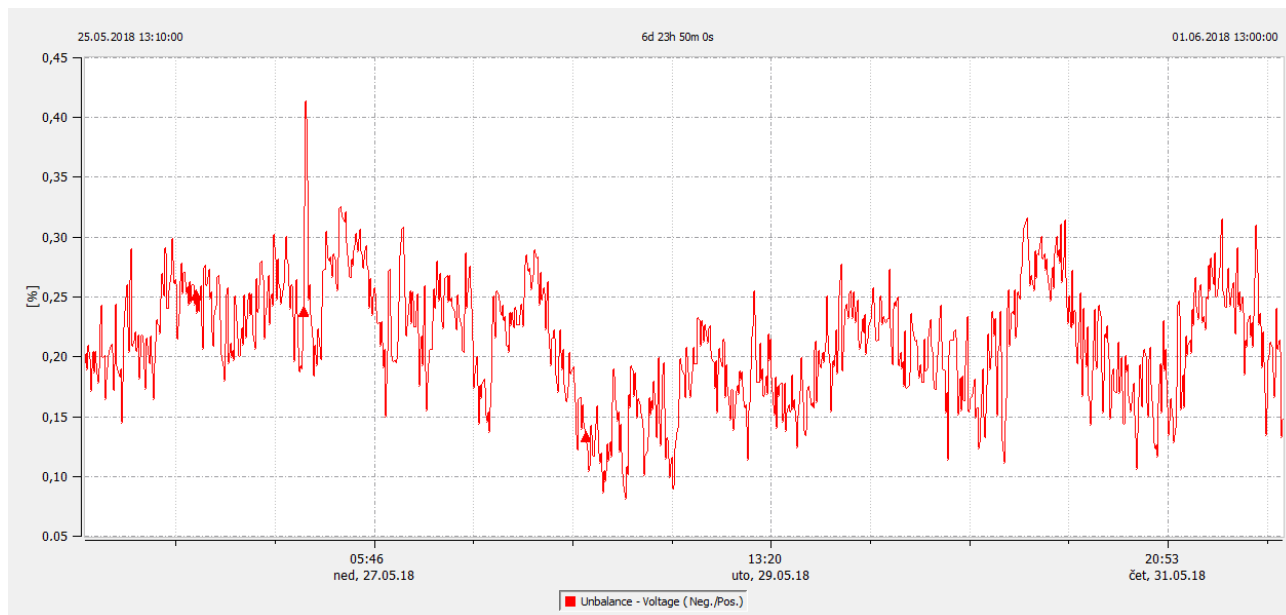


Slika 2.12. Viši harmonici generirani nelinearnim trošilima [7]

2.5. Nesimetrija napona

U višefaznim sustavima u kojima efektivne vrijednosti linijskih napona ili fazni kutevi između tih napona nisu jednaki dolazi do naponske nesimetrije. Stupanj nesimetrije izražava se kao omjer inverzne i direktne komponente. Na slici 2.13 prikazana je nesimetrija napona snimljena na bioplinskoj elektrani u trajanju od tjedan dana.

Prema normi EN 50160, pri normalnim pogonskim uvjetima 95 % desetminutnih srednjih vrijednosti inverzne komponente napona ne smije prelaziti 2 % odgovarajuće direktne komponente. [3]

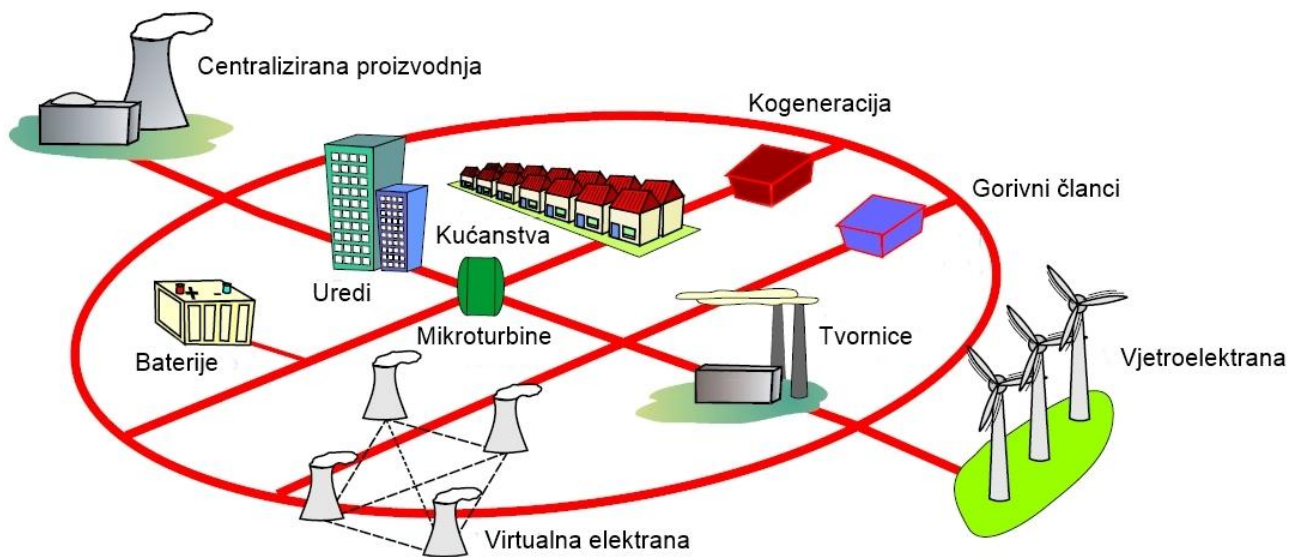


Slika 2.13. *Nesimetrija napona*

Jednofazna i dvofazna opterećenja poput vlakova, lučnih peći, indukcijskih peći i različito distribuiranih opterećenja potrošača na jednofaznim niskonaponskim sustavima su izvori nesimetrije. Negativna posljedica nesimetrije je pregrijavanje trofaznog asinkronog stroja koji zbog toga može povući struju s nekoliko puta većim stupnjem nesimetrije te tako raste pregrijavanje faza kroz koje teku najveće struje. U najgorem slučaju kod nesimetričnog napajanja može doći do prekida spoja jedne faze te uništenja stroja. Zbog opasnih posljedica nesimetrije, motore i generatore je potrebno opremiti zaštitom koja ih isključuje iz pogona u slučaju pojave nesimetrije. U praksi nije moguće postići potpunu simetriju u distribucijskom sustavu, ali se ta nesimetrija može ublažiti simetriranjem jednofaznih opterećenja na sve tri faze, ugradnjom jednofaznih regulatora, ugradnjom zaštitnih uređaja i slično. [7]

3. DISTRIBUIRANA PROIZVODNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE

Manje elektrane raspoređene u cijelom elektroenergetskom sustavu u blizini potrošača predstavljaju distribuirane izvore. Takav elektroenergetski sustav prikazan je na slici 3.1. Na taj način rasterećuju se vodovi i smanjuju se gubici nastali prijenosom električne energije od centralizirane proizvodnje do potrošača, te se povećava pouzdanost sustava. Distribuirana proizvodnja i obnovljivi izvori povećavaju sigurnost opskrbe električnom energijom tako što smanjuju ovisnost o fosilnim gorivima te smanjuju emisiju stakleničkih plinova. [8] Elektrane koje se najčešće koriste u distribuiranoj proizvodnji su mikroturbine, gorivni članci, fotonaponske elektrane, vjetroelektrane, bioplinne elektrane i male hidroelektrane. [6]



Slika 3.1. Elektroenergetski sustav s priključenim distribuiranim izvorima [6]

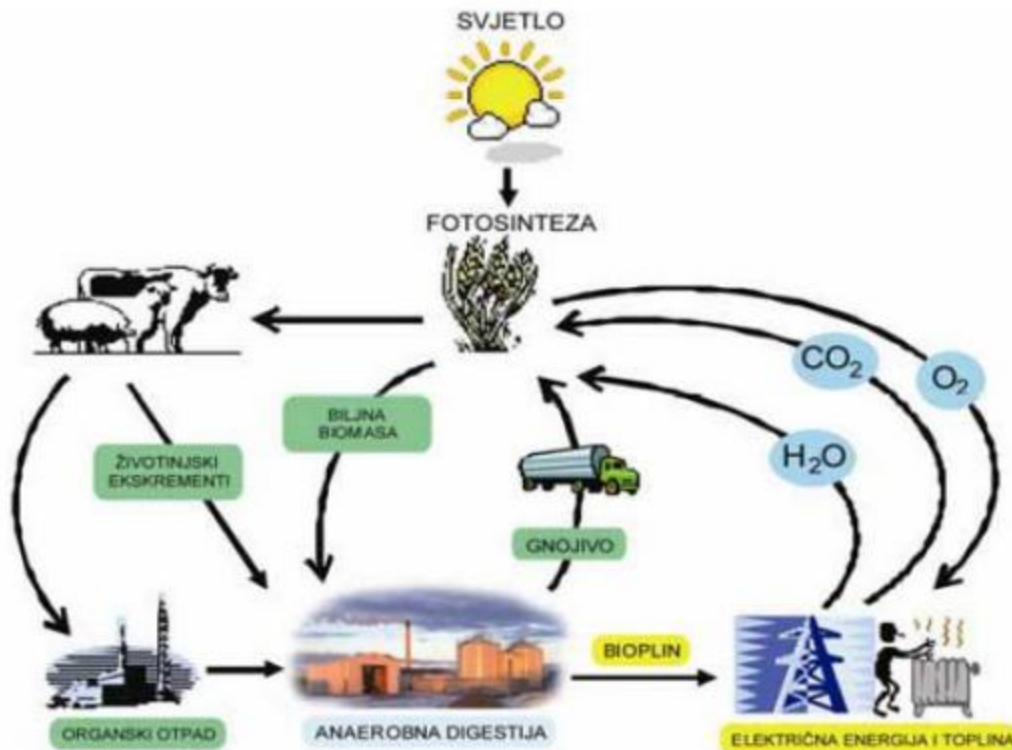
Uvođenje distribuirane proizvodnje ima svoje prednosti i mane. Prednosti su smanjeno zagađenje okoliša zbog korištenja obnovljivih izvora energije, niži investicijski troškovi, mogućnost subvencije troškova zbog čiste tehnologije, povećana isplativost, smanjenje gubitaka pri prijenosu električne energije, neovisnost o cijeni fosilnih goriva te neposredna blizina potrošača.

Problemi u mreži mogu nastati jer mreža nije napravljena za tokove snage u oba smjera što utječe na kvalitetu električne energije. Također mana je i cijena početnih ulaganja koja je često viša kod elektrana na obnovljive izvore energije. Dodatni problem predstavlja i otežano predviđanje

izvora poput vjetra i sunčeve svjetlosti, tj. kretanja oblaka. Poremećaji koji mogu nastati su porast napona, naponski propadi, kolebanje napona i flikeri, harmonici i nesimetrija. [6] [8]

3.1. Bioplinne elektrane

Bioplin nastaje kao rezultat biokemijske pretvorbe anaerobne digestije. Ciklus proizvodnje bioplina prikazan je na slici 3.2. Proizvodi se metan, ugljikov dioksid, vodik, ostali plinovi u tragovima, toplina i gnojivo s većom količinom dušika. Da bi anaerobna digestija bila moguća, potrebno je održavati specifične uvjete: pH vrijednost ulazne mješavine između 6 i 7, temperatura 25-35°C te je potrebno određeno vrijeme zadržavanja mješavine u digestoru. Slika 3.3 prikazuje digestore bioplinne elektrane.



Slika 3.2. Ciklus proizvodnje bioplina [5]

Dobiveni plin koristi se za proizvodnju toplinske energije, električne energije ili kao pogonsko gorivo u vozilima. Najjednostavniji način primjene bioplina je direktno izgaranje u svrhu dobivanja topline gdje se bioplin spaljuje na mjestu proizvodnje ili se transportira do korisnika

plinovodima. Bioplin koji se koristi u ovu svrhu nije potrebno pročišćavati. U kogeneracijskim postrojenjima proizvodi se i toplinska i električna energija što je vrlo učinkovit način korištenja bioplina. Proizvedena toplinska energija tako se može djelomično iskoristiti i za grijanje digestora, a ostatak se koristi za druge potrebe. Proizvedena električna energija može se iskoristiti i za pokretanje pumpi, mješalica i kontrolnih sustava, a ostatak se predaje u mrežu.



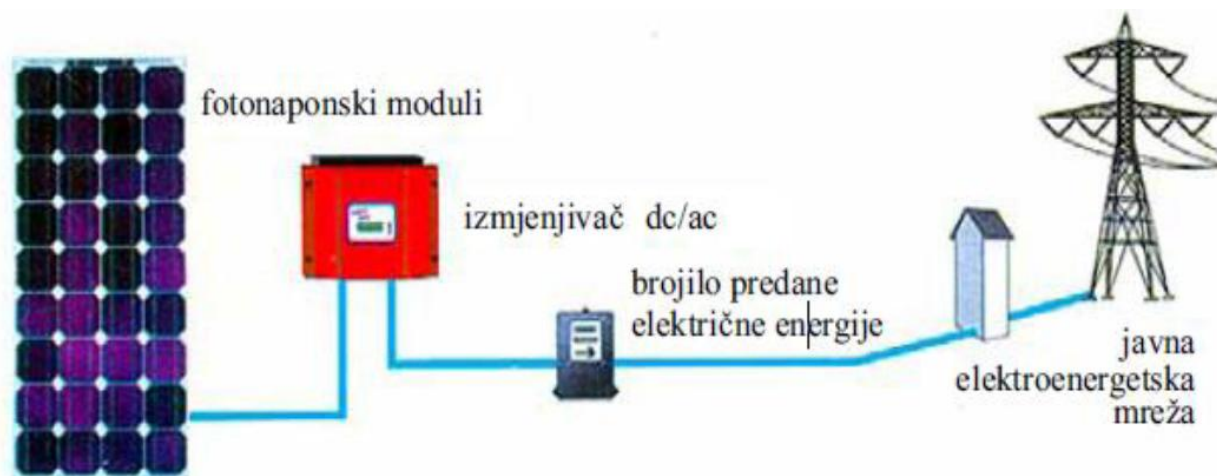
Slika 3.3. *Bioplinska elektrana [9]*

Bioplinske elektrane u Hrvatskoj većinom koriste sinkroni generator koji mehaničku energiju pretvara u električnu. Bioplinske elektrane se većinom nalaze u ruralnim područjima uz farme gdje potrošnja nije značajna te se zbog toga mogu očekivati problemi s regulacijom napona. Bitno je pobrinuti se da napon ne bude previsok što se rješava ručnom regulacijom napona na transformatoru. [10]

3.2. Fotonaponske elektrane

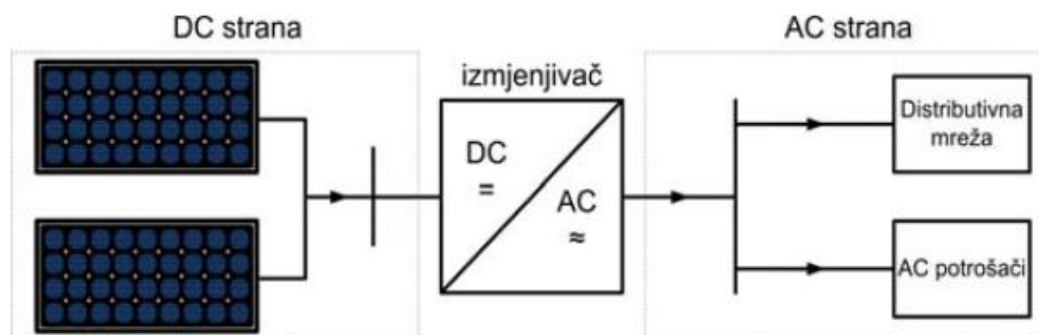
U fotonaponskim elektranama se pomoću fotonaponskih modula putem sunčeve svjetlosti proizvodi električna energija. Na slici 3.4 prikazana je fotonaponska elektrana direktno priključena na mrežu. S obzirom na to da je dobivena struja istosmjerna, potrebno ju je izmjenjivačem pretvoriti u izmjeničnu struju sinhroniziranu s naponom i frekvencijom mreže. Fotonaponske elektrane imaju

mnoge prednosti jer ne onečišćuju okoliš, smanjuju gubitke kod prijenosa i distribucije, blizu su mjestu konzumacije električne energije, nemaju velike troškove održavanja, a sama instalacija i puštanje u pogon su jednostavni i brzi. [4] Električna energija koju fotonaponski panel proizvede ovisi o lokaciji (povoljniji je položaj bliže ekvatoru) i o naoblaci, a najveća dnevna proizvodnja postiže se oko podne. S obzirom da to nije doba najveće potrošnje električne energije, da bi fotonaponske elektrane pomogle u pokrivanju takozvanih vrhova potrošnje, predlaže se zakrivljenje panela koje bi doprinijelo poklapanju najveće proizvodnje sa najvećom potrošnjom. [4]



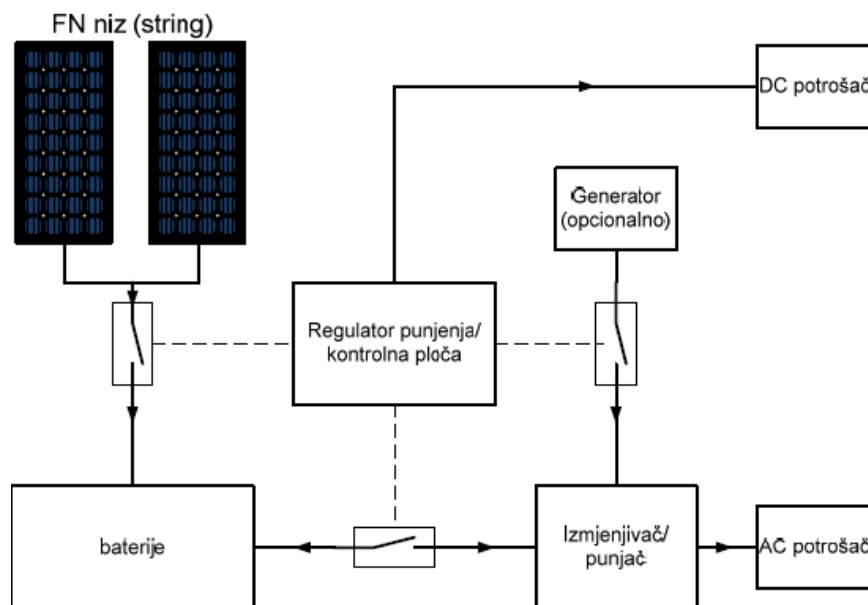
Slika 3.4. Fotonaponska elektrana priključena direktno na mrežu [4]

Fotonaponske elektrane mogu biti mrežne, on-grid, kada su spojene na elektroenergetsku mrežu što je prikazano na slici 3.5. Tada nisu potrebni punjači i baterije jer se sva izlazna snaga predaje u mrežu.



Slika 3.5. Mrežna fotonaponska elektrana [11]

Za razliku od mrežnih, autonomne fotonaponske elektrane samostalno opskrbljuju potrošače i pokrivaju sveukupne potrebe potrošača za električnom energijom. Zbog promjenjivosti sunčeva zračenja i ovisnosti o prirodnim faktorima, postoji potreba za dodatnim baterijama i drugim spremnicima energije. Princip rada autonomne fotonaponske elektrane prikazan je na slici 3.6.



Slika 3.6. *Autonomna fotonaponska elektrana [11]*

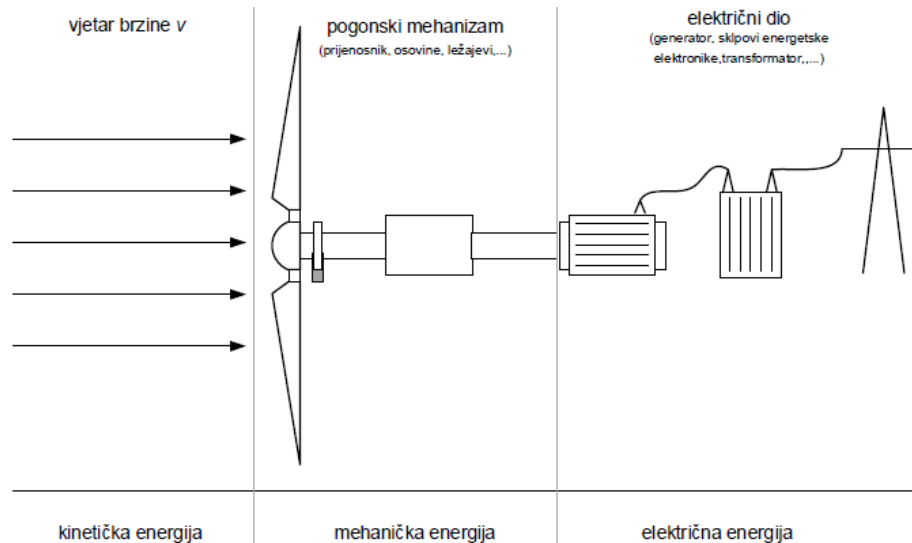
Fotonaponska elektrana prema normi EN50160 mora zadovoljavati uvjete vezane uz frekvenciju, napon, harmonike te nesimetriju i valni oblik napona. U tablici 3.1 navedene su dozvoljene vrijednosti doprinosa pojedine elektrane pokazateljima kvalitete električne energije prema mrežnim pravilima. Poremećaji koje fotonapon može uzrokovati su pojava viših harmonika zbog korištenja energetske elektronike, posebice u vrijeme uključanja i isključenja fotonapona, pojava naponskih kolebanja i flikera kao rezultat kretanja oblaka, te nesimetrija kod fotonaponskih sustava manjih snaga. [4]

Tablica 3.1. *Dozvoljene vrijednosti doprinosa elektrane pokazateljima kvalitete [4]*

| Pokazatelji kvalitete | Dozvoljene vrijednosti |
|-----------------------|----------------------------------|
| THDU | < 2,5 % (za 0,4 kV) |
| Treperenje napona | Kratkotrajno 0,7, dugotrajno 0,5 |
| Nesimetrija napona | < 1,3 % U_n |

3.3. Vjetroelektrane

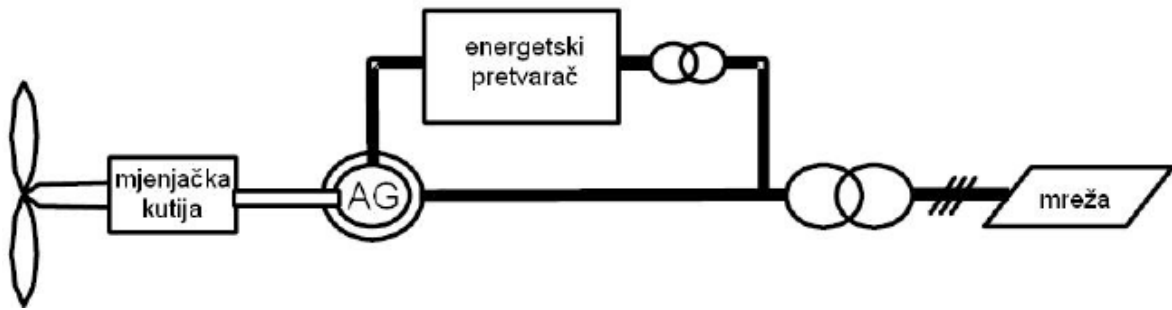
Vjetroelektrane su postrojenja koja se sastoje od više blisko postavljenih vjetroagregata koji kinetičku energiju vjetra pretvaraju u električnu. Princip rada vjetroelektrane prikazan je na slici 3.7. Kinetička energija prenosi se sa lopatica rotora na sporookretnu osovinu te potom na brzookretnu osovinu preko prijenosnika čime se prenosi mehanička energija osovini generatora te on na svojim stezaljkama daje električnu energiju. [12]



Slika 3.7. Princip rada vjetroelektrane [12]

Pri analizi utjecaja rada vjetroelektrane na kvalitetu električne energije uglavnom se pozornost obraća na utjecaj na napon u stacionarnom stanju, utjecaj dinamičkih promjena, tranzijenata uzrokovanih sklapanjem i injektiranje viših harmoničkih članova struje u mrežu. Da bi se bolje iskoristila energija vjetra i ublažila fluktuacija snage, koriste se vjetroagregati s promjenjivom brzinom vrtnje.

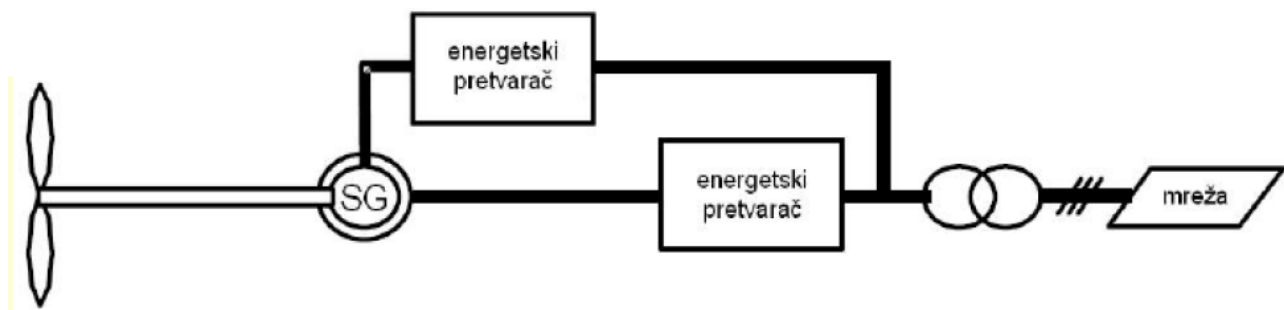
Vjetroagregati s promjenjivom brzinom vrtnje koriste energetske pretvarače te se turbulencije vjetra ne prenose izravno u mrežu kao oscilacije proizvedene snage jer se brzina vrtnje rotora mijenja polako i jer pretvarač kontrolira jalovu snagu te na taj način smanjuje fluktuacije iznosa napona. Kod uklopa na mrežu, vjetroagregat može uzrokovati propade napona i flikere. Kao posljedica rada energetskih pretvarača imamo injektiranje viših harmonika struje u mrežu kod vjetroagregata s promjenjivom brzinom vrtnje. [12] Slika 3.8 prikazuje vjetroagregat s dvostrano napajanim asinkronim generatorom, a slika 3.9 vjetroagregat sa sinkronim generatorom.



Slika 3.8. Vjetroagregat s dvostrano napajanim asinkronim generatorom [12]

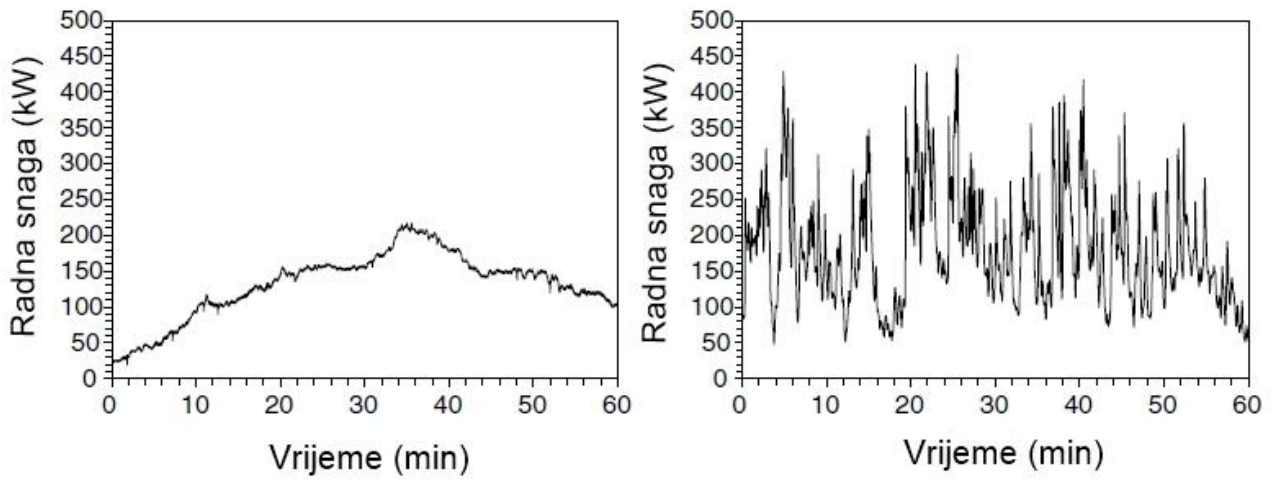
Kod vjetroelektrana sa dvostrano napajanim asinkronim generatorom, generator je spojen s elisama preko mjenjačke kutije. Stator je spojen direktno na mrežu, a rotor generatora je spojen preko energetskog pretvarača koji djeluje na struju rotora čime je omogućena kontrola izlazne snage te stoga nije potrebna kompenzacija jalove snage. Takvi vjetroagregati mogu raditi u širokom rasponu brzina i naleti vjetra se ne prenose direktno u mrežu. Rotor djeluje kao privremeni spremnik energije što kao posljedicu ima smanjenje promjena napona i emisije flikera u mrežu.

Za razliku od izvedbe sa dvostrano napajanim asinkronim generatorom, vjetroagregati sa sinkronim generatorom nemaju mjenjačku kutiju pa su elise i generator direktno mehanički povezani, a stator i rotor su na mrežu spojeni preko energetskog pretvarača. Ova izvedba također ima smanjenu emisiju flikera u mrežu. [12]



Slika 3.9. Vjetroagregat sa sinkronim generatorom [12]

Na slici 3.10 prikazane su fluktuacije snage tijekom jednog sata na istoj turbini i istoj lokaciji u razmaku od 20 sati. Primjetne su velike razlike što integraciju vjetroelektrane u elektroenergetski sustav čini dodatnim izazovom zbog nestalnosti i teške predvidivosti vjetra.



Slika 3.10. *Fluktuacije snage turbine tijekom dva perioda od sat vremena [4]*

4. ANALIZA MJERENJA

Mjerenja su provedena na bioplinskoj i fotonaponskoj elektrani. Oba mjerenja su trajanja tjedan dana, provedena su prema normi HRN EN 50160:2012, *Naponske karakteristike električne energije iz javnog distribucijskog sustava* (EN 50160:2010) i prikazuju stanje u mreži sa aktivnim distribuiranim izborima. Pri mjerenju je korišten mjerni instrument a-berle PQ – Box 200, a analiza je provedena u programskom paketu WinPQ Mobil.

4.1. Mjerni instrument

Uređaj a-berle PQ – Box 200 je moguće koristiti za mjerenja na javnim mrežama te za mjerenja u industriji pri naponima do 1000 V. Instrument zadovoljava zahtjeve standarda IEC 61000-4-30 (2015) uređaja klase A za točnost mjerenja napona, izmjerene vremenske intervale, bilježenje izmjerenih vrijednosti događaja, harmonike i međuharmonike, flikere, frekvenciju, nesimetriju napona, bilježenje događaja i vremensku sinhronizaciju. [13]



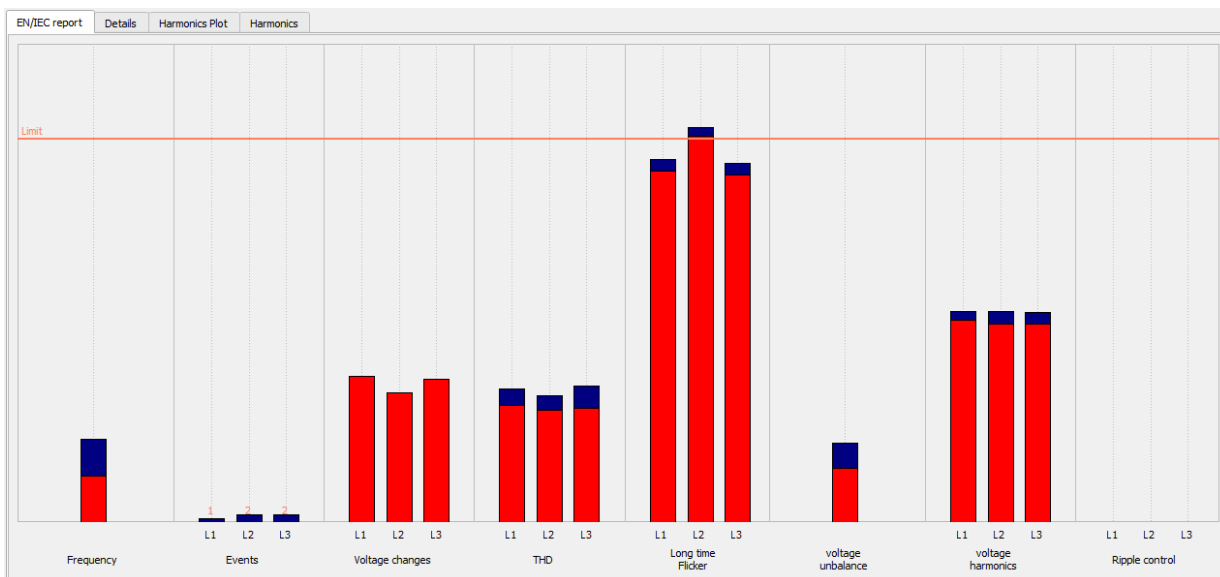
Slika 4.1. Mjerni instrument a-berle PQ – Box 200 [13]

4.2. Programski paket

Za analizu rezultata mjerenja dobivenih uz pomoć instrumenta a-berle PQ – Box 200 korišten je software WinPQ Mobile. Memorija moguća za obradu iznosi od 4 do 32 GB. Procjenjuje se kvaliteta električne energije u skladu s normom EN 50160. Moguća je analiza minimalnih, srednjih i maksimalnih vrijednosti napona i struje, prividne, realne i jalove snage te kuta, kratkotrajnih i dugotrajnih flikera, nesimetrije napona, harmonika, frekvencije itd. [13]

4.3. Bioplinska elektrana

Mjerenja na bioplinskoj elektrani snage 300 kW su vršena tijekom sedam dana, od 25.5.2018. do 1.6.2018. Slika 4.2 prikazuje ukupni prikaz pokazatelja kvalitete električne energije. Stupci su podijeljeni na dvije boje, crvena predstavlja poremećaje tokom 95 % tjedna na način da je prikazana najveća zabilježena vrijednost unutar 95 % tjedna, a plava boja predstavlja najveću zabilježenu vrijednost tijekom cijelog tjedna, tj. u preostalih 5 % tjedna. Izuzetak je frekvencija kod koje crvena boja predstavlja najveću vrijednost unutar 99,5 % tjedna. Crvena vodoravna linija predstavlja granicu propisanu normom EN 50160. Svi poremećaji, osim frekvencije i nesimetrije, prikazani su za sve tri faze posebno. Prikazani su frekvencija, događaji, naponska kolebanja, ukupno harmoničko izobličenje napona THD, dugotrajno trepenje (dugotrajni flikeri), naponska nesimetrija, naponski harmonici i valovitost. Na slici je vidljivo da svi pokazatelji osim dugotrajnih flikera u fazi L2 zadovoljavaju normu.



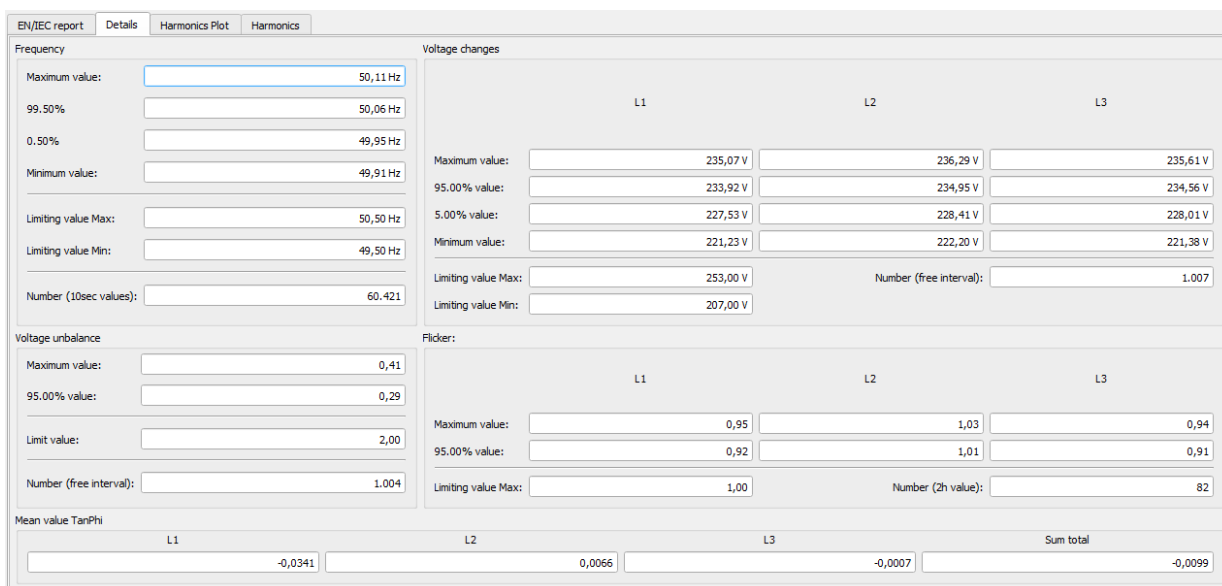
Slika 4.2. Sumarni prikaz pokazatelja kvalitete električne energije

Na slici 4.3. je detaljan prikaz mjerenih vrijednosti. Za frekvenciju su prikazane maksimalna vrijednost, minimalna izmjerena vrijednost te normom propisana dopuštena maksimalna i minimalna vrijednost. Frekvencija se kretala u rasponu od 50,11 Hz i 49,9 Hz što je unutar dopuštenog raspona od 50,50 Hz i 49,50 Hz te je norma zadovoljena.

Vrijednosti naponskih kolebanja prikazana su za sve tri faze pa se tako za svaku fazu prikazuju maksimalne, minimalne i normom propisane vrijednosti. Dopušteni maksimum iznosi 253 V, a dopušteni minimum 207 V. Vrijednosti u sve tri faze zadovoljavaju normu. Maksimalne vrijednosti iznose 235,07 V, 236,29 V i 235,61 V, a minimalne vrijednosti 221,23 V, 222,20 V i 221,38 V.

Za dugotrajne flikere prikazane su maksimalne izmjerene vrijednosti i maksimalne vrijednosti u 95 % tjedna te ograničenje norme koje iznosi 1 u 95 % tjedna. Vrijednosti u fazama L1, 0,95 i 0,92, i u fazi L3, 0,94 i 0,91, zadovoljavaju normu, ali flikeri u fazi L2 u 95 % tjedna iznose 1,01 što prekoračuje vrijednost zadanu normom te stoga norma nije zadovoljena. Maksimalna izmjerena vrijednost faze L2 iznosi 1,03.

Naponska nesimetrija prikazana je najvećim izmjerenim vrijednostima u cijelom tjednu i u 95 % tjedna te je iznosila 0,41 %, tj. 0,29 % u 95 % tjedna. Granična vrijednost nesimetrije iznosi 2 % te je norma zadovoljena.



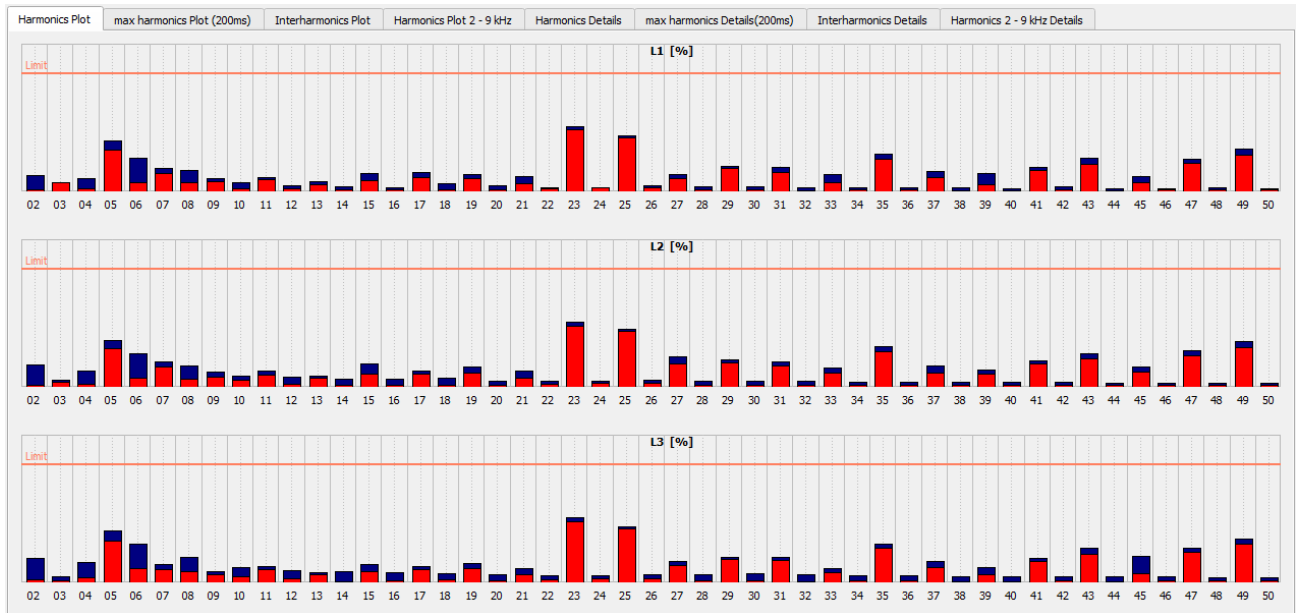
Slika 4.3. Detaljan prikaz vrijednosti pokazatelja kvalitete električne energije

Slika 4.4 prikazuje vrijednosti vezane za više harmonike. U tablici se nalaze granične vrijednosti, maksimalne izmjerene vrijednosti u 95 % tjedna i maksimalne vrijednosti u cijelom tjednu za svaku fazu posebno. Vrijednosti svih viših harmonika su ispod granične vrijednosti. Najveće ukupno harmoničko izobličenje THD u 95 % tjedna je u fazi L1 i iznosi 2,45 % U_n , a u cijelom tjednu je u fazi L3 i iznosi 2,85 % U_n što je daleko ispod granične vrijednosti od 8 % U_n .

| | Limit value [%] | L1 - 95,00% [%] | L1 - 100,00% [%] | L2 - 95,00% [%] | L2 - 100,00% [%] | L3 - 95,00% [%] | L3 - 100,00% [%] |
|-----|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|
| THD | 8,00 | 2,45 | 2,79 | 2,34 | 2,66 | 2,39 | 2,85 |
| 02 | 2,00 | 0,03 | 0,07 | 0,03 | 0,05 | 0,05 | 0,09 |
| 03 | 5,00 | 0,37 | 0,39 | 0,23 | 0,28 | 0,09 | 0,27 |
| 04 | 1,00 | 0,03 | 0,08 | 0,03 | 0,10 | 0,05 | 0,13 |
| 05 | 6,00 | 2,11 | 2,56 | 1,99 | 2,40 | 2,13 | 2,61 |
| 06 | 0,50 | 0,04 | 0,14 | 0,04 | 0,14 | 0,06 | 0,16 |
| 07 | 5,00 | 0,76 | 0,99 | 0,87 | 1,08 | 0,58 | 0,78 |
| 08 | 0,50 | 0,04 | 0,09 | 0,03 | 0,09 | 0,05 | 0,11 |
| 09 | 1,50 | 0,13 | 0,17 | 0,13 | 0,19 | 0,10 | 0,14 |
| 10 | 0,50 | 0,01 | 0,03 | 0,03 | 0,05 | 0,03 | 0,05 |
| 11 | 3,50 | 0,35 | 0,42 | 0,37 | 0,48 | 0,38 | 0,47 |
| 12 | 0,50 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,03 |
| 13 | 3,00 | 0,18 | 0,27 | 0,23 | 0,29 | 0,20 | 0,27 |
| 14 | 0,50 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,01 |
| 15 | 0,50 | 0,05 | 0,08 | 0,05 | 0,10 | 0,05 | 0,08 |
| 16 | 0,50 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,02 |
| 17 | 2,00 | 0,24 | 0,32 | 0,22 | 0,27 | 0,23 | 0,28 |
| 18 | 0,50 | 0,01 | 0,03 | 0,01 | 0,04 | 0,01 | 0,04 |
| 19 | 1,50 | 0,16 | 0,22 | 0,18 | 0,25 | 0,19 | 0,24 |
| 20 | 0,50 | 0,01 | 0,03 | 0,01 | 0,03 | 0,01 | 0,04 |
| 21 | 0,50 | 0,04 | 0,06 | 0,04 | 0,07 | 0,03 | 0,06 |
| 22 | 0,50 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,02 |
| 23 | 1,50 | 0,79 | 0,83 | 0,78 | 0,83 | 0,78 | 0,82 |
| 24 | 0,50 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| 25 | 1,50 | 0,69 | 0,71 | 0,71 | 0,74 | 0,69 | 0,71 |
| 26 | 0,35 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| 27 | 0,20 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,03 | 0,03 |
| 28 | 0,34 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |

Slika 4.4. Detaljan prikaz vrijednosti viših harmonika

Na slici 4.5 je vizualna usporedba vrijednosti viših harmonika i granice propisane normom. Crvena boja se odnosi na najveće vrijednosti u 95 % tjedna, a plava na najveće vrijednosti tijekom 100 % tjedna. Svi harmonici zadovoljavaju normu. Na slici su prikazane vrijednosti do pedesetog harmonika. Vidljive su povećane vrijednosti petog, dvadeset trećeg i dvadeset petog harmonika. Iz slike 4.4 može se iščitati da je najveća vrijednost za peti harmonik u fazi L3 i iznosi 2,61 % U_n , tj. 2,13 % U_n u fazi L3 za 95 % tjedna, a granica je 6 % U_n . Najbliže graničnoj vrijednosti je dvadeset treći harmonik, najveće vrijednosti su 0,83 % U_n u fazama L1 i L2, tj. 0,79 % U_n u fazi L2 za 95 % tjedna, granična vrijednost iznosi 1,5 % U_n . Nešto niže su vrijednosti dvadeset petog harmonika koji ima istu graničnu vrijednost kao i dvadeset treći te je njegova najviša vrijednost 0,74 % U_n u fazi L2, tj. 0,71 % U_n također u fazi L2 za 95 % tjedna.



Slika 4.5. *Naponi viših harmonika*

Na slici 4.6 prikazani su naponski događaji. Vidljivo je da su se dogodila dva naponska propada pri kojima je vrijednost napona bila između 80 i 90 % nazivnog napona trajanja između 10 i 200 ms. Zabilježena su i tri prekida opskrbe trajanja između 200 i 500 ms, te tri prekida trajanja između 500 i 1000 ms. Iz tablice se također vidi da nije zabilježen niti jedan prenapon.

| Residual voltage U [%] | Duration t [ms] | | | | | |
|------------------------|-------------------|--------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|----------------|
| | $10 \leq t < 200$ | $200 \leq t < 500$ | $500 \leq t < 1000$ | $1000 \leq t < 5000$ | $5000 \leq t < 60000$ | $t \geq 60000$ |
| $90 > u \geq 80$ | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $80 > u \geq 70$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $70 > u \geq 40$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $40 > u \geq 5$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $5 > u$ | 0 | 3 | 3 | 0 | 0 | 0 |

| Swell voltage U [%] | Duration t [ms] | | | |
|---------------------|-------------------|---------------------|-----------------------|----------------|
| | $10 \leq t < 500$ | $500 \leq t < 5000$ | $5000 \leq t < 60000$ | $t \geq 60000$ |
| $u \geq 120$ | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $120 > u \geq 110$ | 0 | 0 | 0 | 0 |

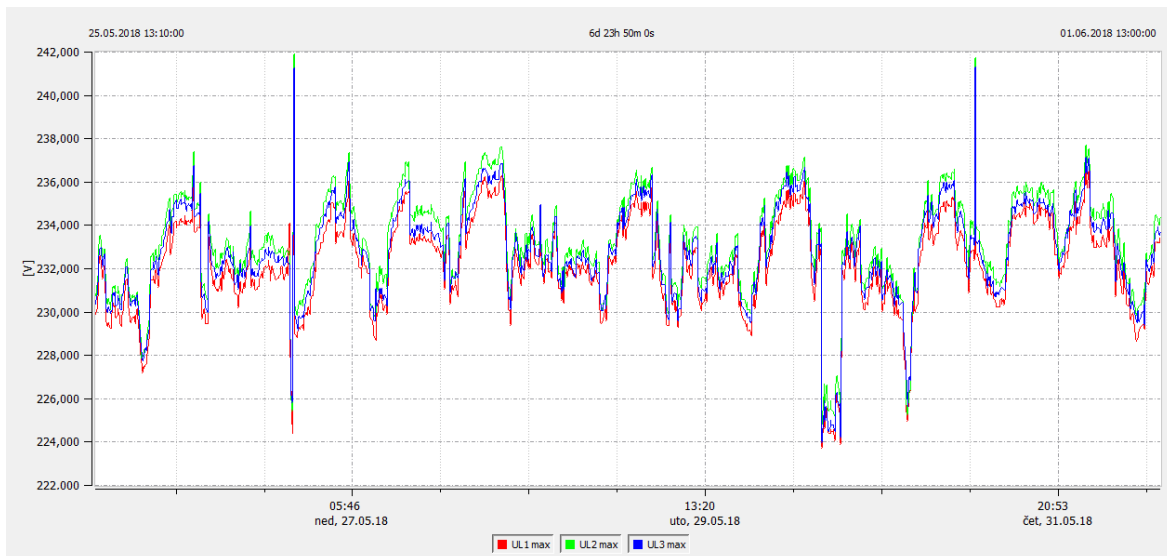
Slika 4.6. *Prikaz naponskih događaja*

Slika 4.7 prikazuje usrednjene desetminutne efektivne vrijednosti napona. Norma propisuje da vrijednost napona mora biti unutar $U_n \pm 10 \% U_n$ za 95 % tjedna što u ovom slučaju znači da vrijednosti trebaju biti unutar raspona od 207 V i 253 V. Iz grafa je vidljivo da su vrijednosti unutar zadanog raspona.



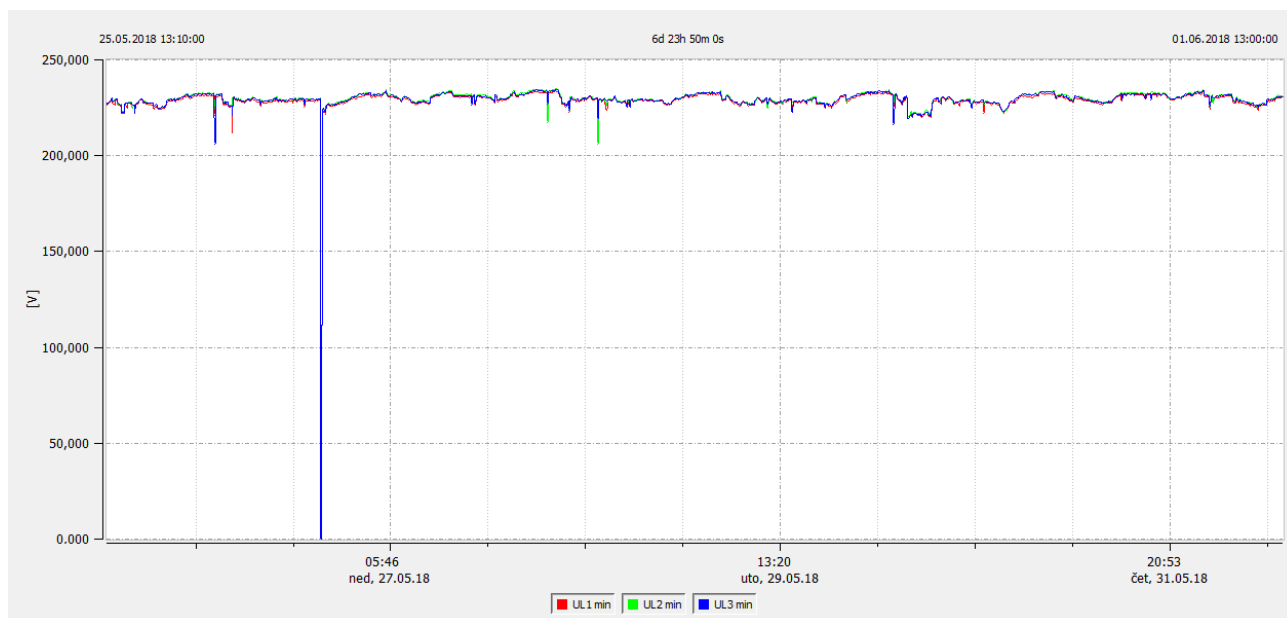
Slika 4.7. *Usrednjene desetminutne efektivne vrijednosti napona*

Za detaljniju analizu promjena napona mogu se prikazati maksimalne desetminutne efektivne vrijednosti napona. Na slici 4.8 vidi se da vrijednost napona nije prelazila 242 V i da nije bilo prenapona. Za fazu L1 maksimalna vrijednost iznosi 240.836 V, za L2 241.917 V, a za fazu L3 241.302 V.

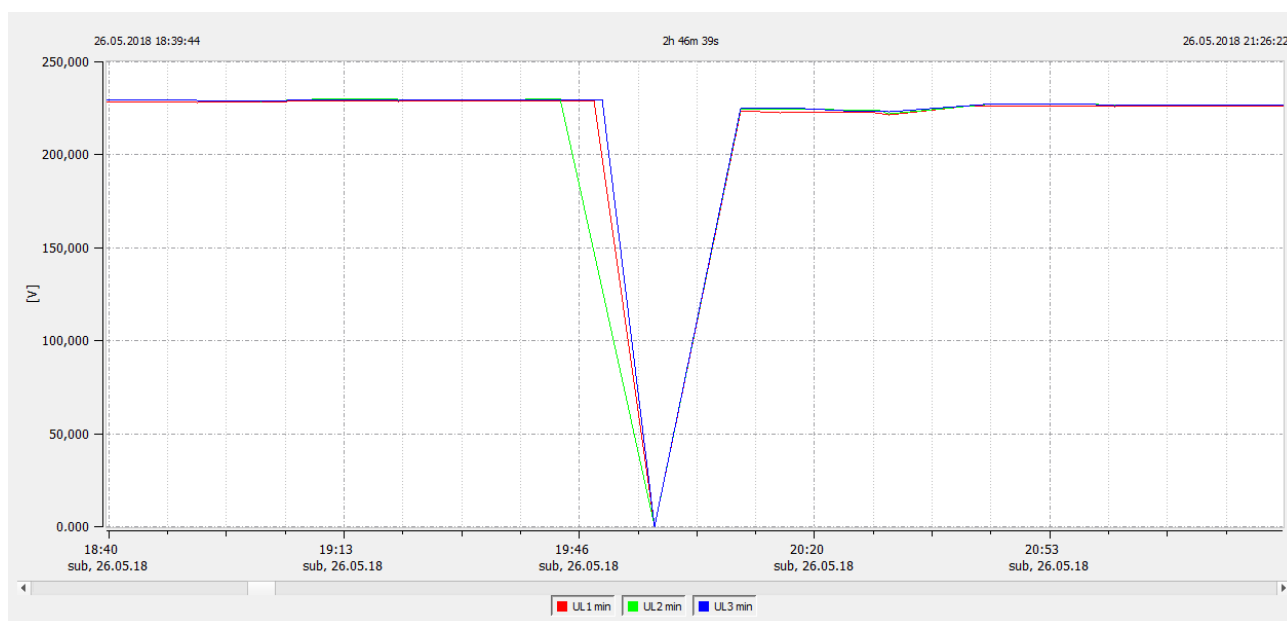


Slika 4.8. *Maksimalne desetminutne efektivne vrijednosti napona*

Na slici 4.9 prikazane su minimalne desetminutne efektivne vrijednosti napona. Na taj način se mogu vidjeti događaji sa slike 4.5, tj. naponski propadi i prekidi opskrbe. Minimalna efektivna vrijednost napona u fazi L1 iznosi 0.041 V, u fazi L2 0.036 V, a u fazi L3 0.014 V. Do minimalnih vrijednosti u sve tri faze je došlo istovremeno, 26.5.2018. u 19:57:20. Na slici 4.10. detaljnije je prikazan prekid opskrbe. Uz prekid opskrbe, na slici 4.9 primjetna su i dva prije spomenuta naponska propada jedne od faza.

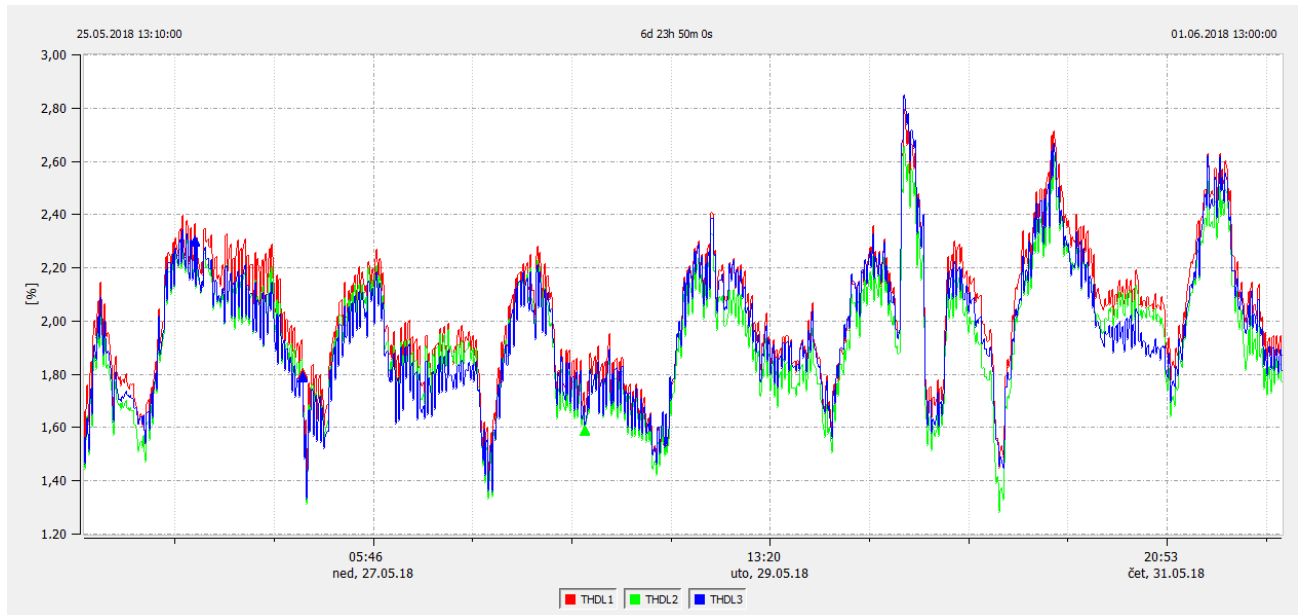


Slika 4.9. Minimalne desetminutne efektivne vrijednosti napona



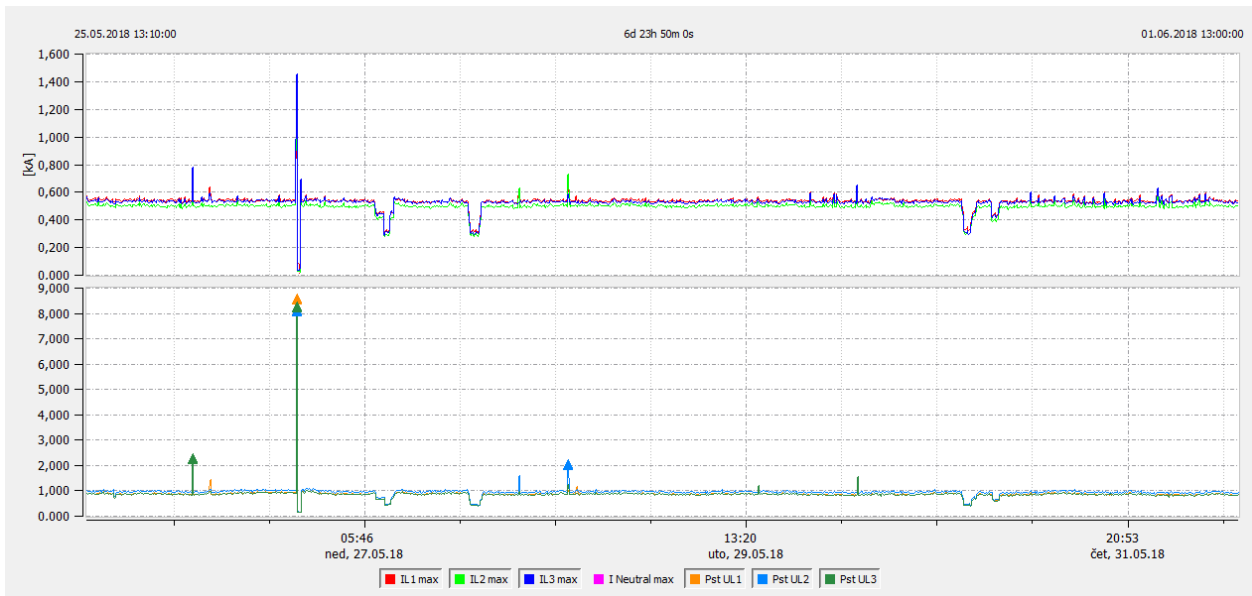
Slika 4.10. Prekid opskrbe

Slika 4.11 prikazuje ukupno harmoničko izobličenje napona THD. Najveća izmjerena vrijednost iznosi 2,848 % U_n . Prema normi EN 50160 granična dopuštena vrijednost iznosi 8 % U_n što znači da je norma zadovoljena.



Slika 4.11. Ukupno harmoničko izobličenje napona THD

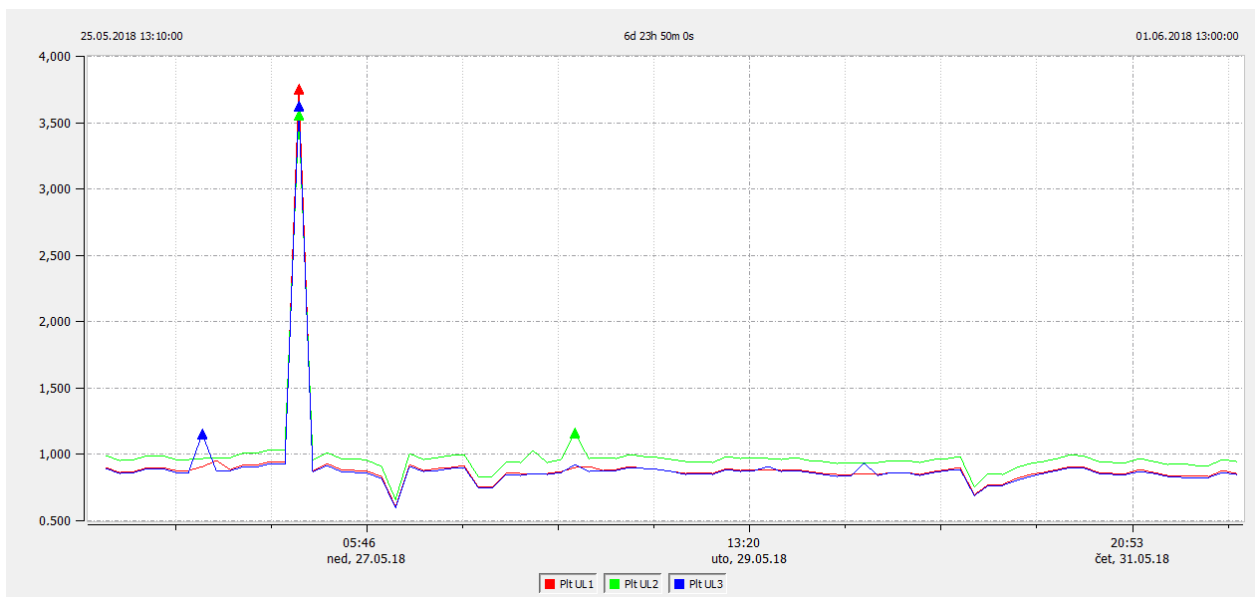
Kratkotrajno treperenje napona, tj. flikeri prikazani su na slici 4.12. Najveća zabilježena vrijednost je 26.5.2018. u 20:00:00 i iznosi 8,556. Povećanje struje može biti uzrokom flikera te je na slici 4.12 prikazana i usporedba maksimalnih vrijednosti struje i treperenja. Usporedbom slike 4.12 sa slikom 4.9 vidljiva je istovremenost flikera sa prekidom proizvodnje. U tom slučaju to nije pravi fliker nego je događaj – naponski prekid.



Slika 4.12. Usporedba kratkotrajnog treperenja napona i maksimalne efektivne vrijednosti struje

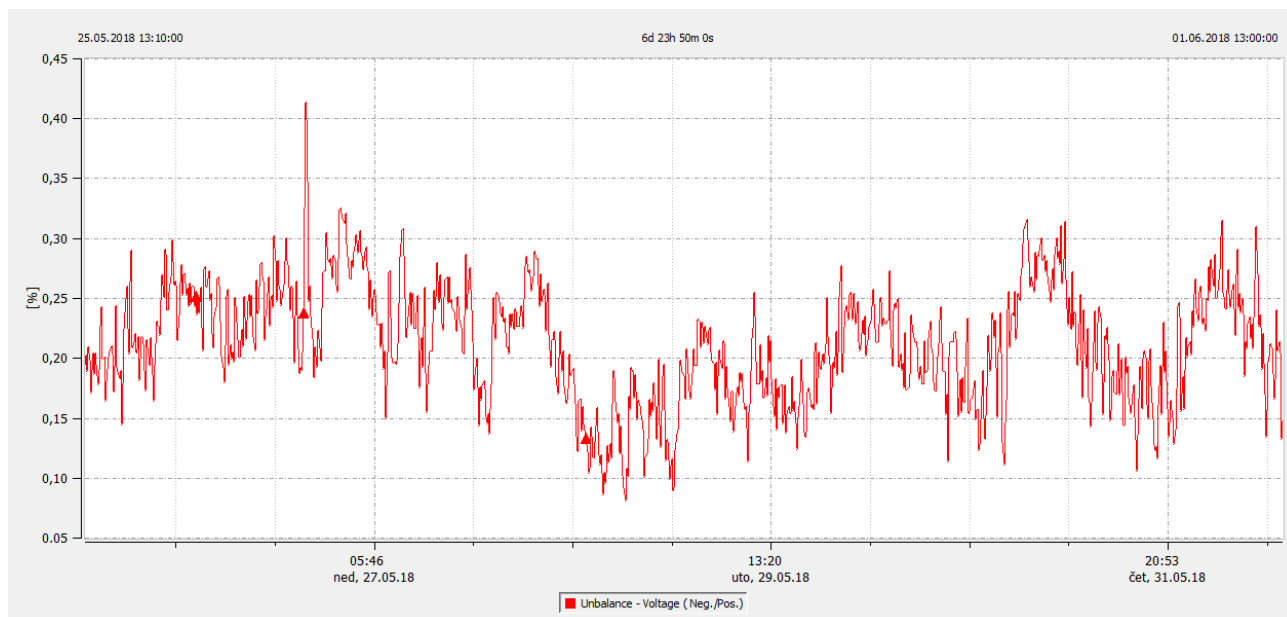
Iz slike 4.12. logično je zaključiti da elektrana utječe na mrežu jer vrijednosti flikera prate vrijednosti struja. Može se zaključiti da elektrana izaziva dio flikera, a razlog njenog utjecaja je slaba mreža, tj. odnos snage sinkronog generator i snage sustava.

Na slici 4.13. prikazani su dugotrajni flikeri koji se računaju na temelju dvanaest uzastopnih izmjerenih vrijednosti prema formuli (2-1) te je iz slike vidljivo prekoračenje dopuštenih vrijednosti.



Slika 4.13. Dugotrajno treperenje napona P_{It}

Na slici 4.14 prikazana je naponska nesimetrija koja se prikazuje kao omjer inverzne i direktne komponente. Prema normi EN 50160, nesimetrija ne smije prelaziti 2 % U_n u 95 % tjedna. U ovom slučaju najveća izmjerena nesimetrija u 95 % tjedna iznosi 0,29 % U_n , a tijekom cijelog tjedna je najveća izmjerena vrijednost 0,414 % U_n što zadovoljava normu.



Slika 4.14. Nesimetrija napona

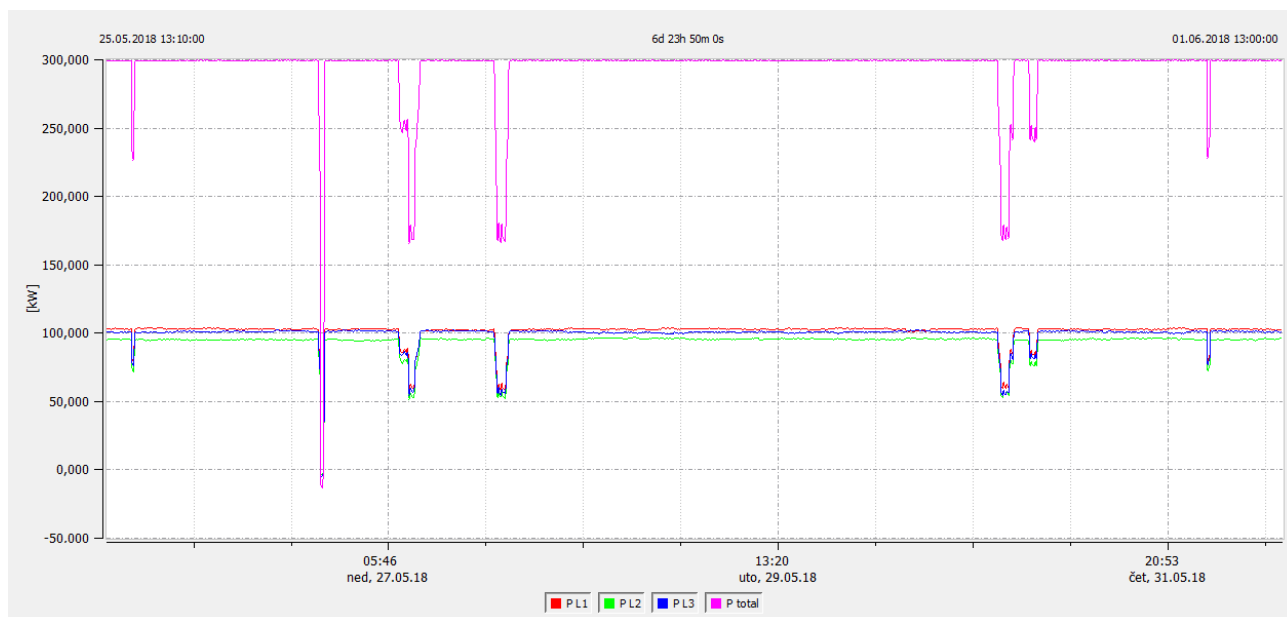
Slika 4.15 prikazuje vrijednosti frekvencije tijekom mjernog tjedna. Normom je propisano da frekvencija tijekom 99,5 % tjedna treba biti unutar raspona $f_n \pm 1 \% f_n$ te $f_n +4 / -6 \% f_n$ tijekom cijelog mjernog tjedna. Pri frekvenciji 50 Hz to znači da frekvencija treba ostati u rasponu 49,5 - 50,5 Hz tijekom 99,5 % tjedna te u rasponu 47 - 52 Hz tijekom cijelog tjedna.



Slika 4.15. *Pogonska frekvencija*

Najviša izmjerena vrijednost frekvencije tijekom 99,5 % tjedna iznosi 50,06 Hz, a tijekom cijelog mjernog tjedna iznosi 50,069 Hz. Najniža vrijednost u 99,5 % tjedna je izmjerena 49,947 Hz, a najniža u cijelom tjednu 49,906 Hz što zadovoljava normu EN 50160.

Na slici 4.16 prikazana je predana trofazna radna snaga za sve tri faze odvojeno te sumarni iznos predane snage. Primjetno je nekoliko padova predane snage te se sa slike vidi da je elektrana 26.5.2018. u 20:09:31 prestala davati snagu te je sljedećih 20 minuta uzimala snagu iz mreže u iznosu od skoro 13 kW. Taj događaj poklapa se s vremenom prekida opskrbe koji je ranije opisan.



Slika 4.16. Predana trofazna radna snaga

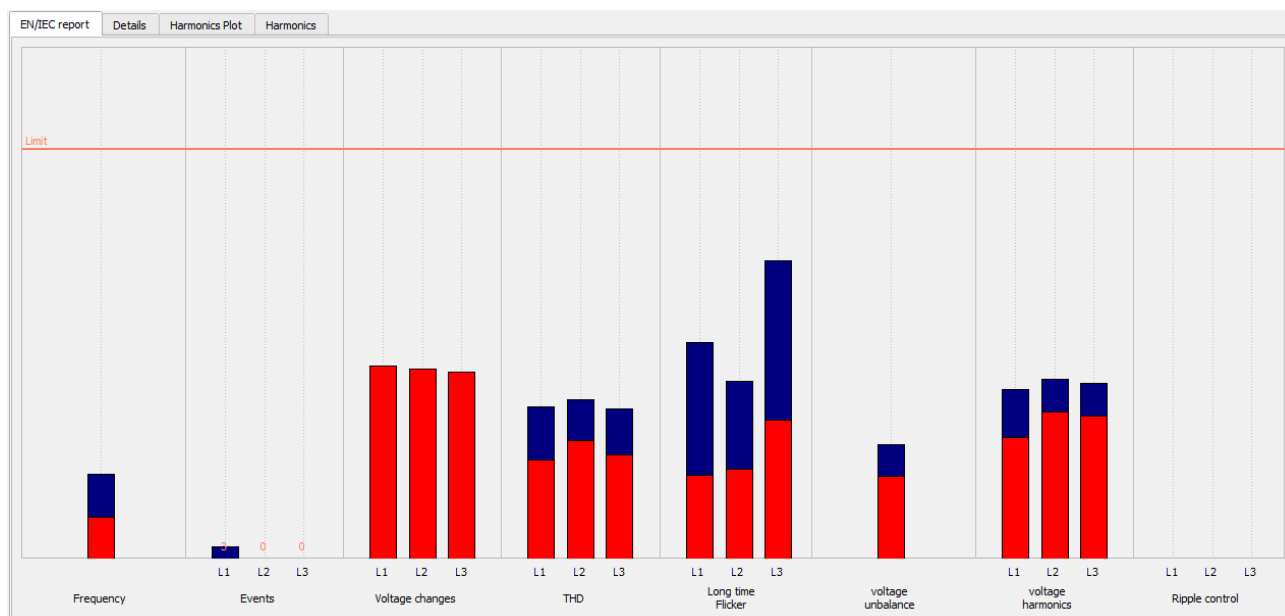
U tablici 4.1 sažeto su prikazani rezultati analize mjerenja. Iz tablice je vidljivo da svi pokazatelji kvalitete osim dugotrajnih treperenja zadovoljavaju normu.

Tablica 4.1. Sažeti pregled rezultata

| Pokazatelj | Opseg | Granica | Ocjena |
|------------------|---|---------------------------------|----------------------------|
| Promjene napona | $230 \pm 10 \% U_n$ $230 +10 / -15 \% U_n$ | za 95 % tjedna za 5 % tjedna | zadovoljava zadovoljava |
| THD napona | $< 8 \% U_n$ | za 95 % tjedna | zadovoljava |
| Treperenje | $P_{lt} \leq 1$ | za 95 % tjedna | ne zadovoljava |
| Nesimetrija | $< 2 \% U_n$ | za 95 % tjedna | zadovoljava |
| Frekvencija | $f_n \pm 1 \% f_n$ $f_n +4 / -6 \% f_n$ | za 99,5 % godine | zadovoljava |
| | | za 100 % godine | zadovoljava |
| Naponski propadi | $< 90 \% U_n$ | za 100 % godine | zadovoljava |
| Prekidi opkrbe | $< 1 \% U_n$ | za 100 % godine | zadovoljava |
| Prenaponi | $> 110 \% U_n$ | za 100 % godine | zadovoljava |

4.4. Fotonaponska elektrana

Mjerenja na fotonaponskoj elektrani snage 300 kW su vršena tijekom sedam dana, od 11.7.2018. do 18.7.2018. Na slici 4.17 vidimo da su najveće izmjerene vrijednosti svih pokazatelja kvalitete električne energije ispod normom propisane granične vrijednosti označene crvenom linijom.



Slika 4.17. Sumarni prikaz pokazatelja kvalitete električne energije

Na slici 4.18 su prikazane izmjerene karakteristične vrijednosti. Maksimalna mjerena frekvencija je 50,10 Hz, a minimalna 49,91 Hz. Najviši mjereni napon je izmjereno u fazi L2 i iznosi 236,43 V, a najniži u fazi L1 i iznosi 219,17 V. U 95% tjedna najveća izmjerena vrijednost flikera iznosi 0,34 u fazi L3, a tijekom cijelog tjedna najviša zabilježena vrijednost je 0,73 u fazi L3. Najveća nesimetrija u 95 % tjedna iznosi 0,40 % U_n , odnosno 0,56 % U_n u cijelom tjednu.

Sve izmjerene vrijednosti zadovoljavaju zahtjeve postavljene normom EN 5160 čije granične vrijednosti se također mogu očitati sa slike 4.18.

EN/IEC report Details Harmonics Plot Harmonics

Frequency

Maximum value: 50,10 Hz

99.50%: 50,05 Hz

0.50%: 49,95 Hz

Minimum value: 49,91 Hz

Limiting value Max: 50,50 Hz

Limiting value Min: 49,50 Hz

Number (10sec values): 60,421

Voltage changes

| | L1 | L2 | L3 |
|---------------------|----------|----------|-------------------------------|
| Maximum value: | 235,34 V | 236,43 V | 235,66 V |
| 95.00% value: | 232,73 V | 233,74 V | 233,08 V |
| 5.00% value: | 222,19 V | 223,00 V | 222,42 V |
| Minimum value: | 219,17 V | 219,33 V | 219,49 V |
| Limiting value Max: | 253,00 V | | Number (free interval): 1.007 |
| Limiting value Min: | 207,00 V | | |

Voltage unbalance

Maximum value: 0,56

95.00% value: 0,40

Limit value: 2,00

Number (free interval): 1.005

Flicker:

| | L1 | L2 | L3 |
|---------------------|------|------|-----------------------|
| Maximum value: | 0,53 | 0,43 | 0,73 |
| 95.00% value: | 0,21 | 0,22 | 0,34 |
| Limiting value Max: | 1,00 | | Number (2h value): 81 |

Mean value TanPhi

| | L1 | L2 | L3 | Sum total |
|--|---------|--------|---------|-----------|
| | -1,3641 | 1,8393 | -6,9004 | -13,7213 |

Slika 4.18. Detaljan prikaz vrijednosti pokazatelja kvalitete električne energije

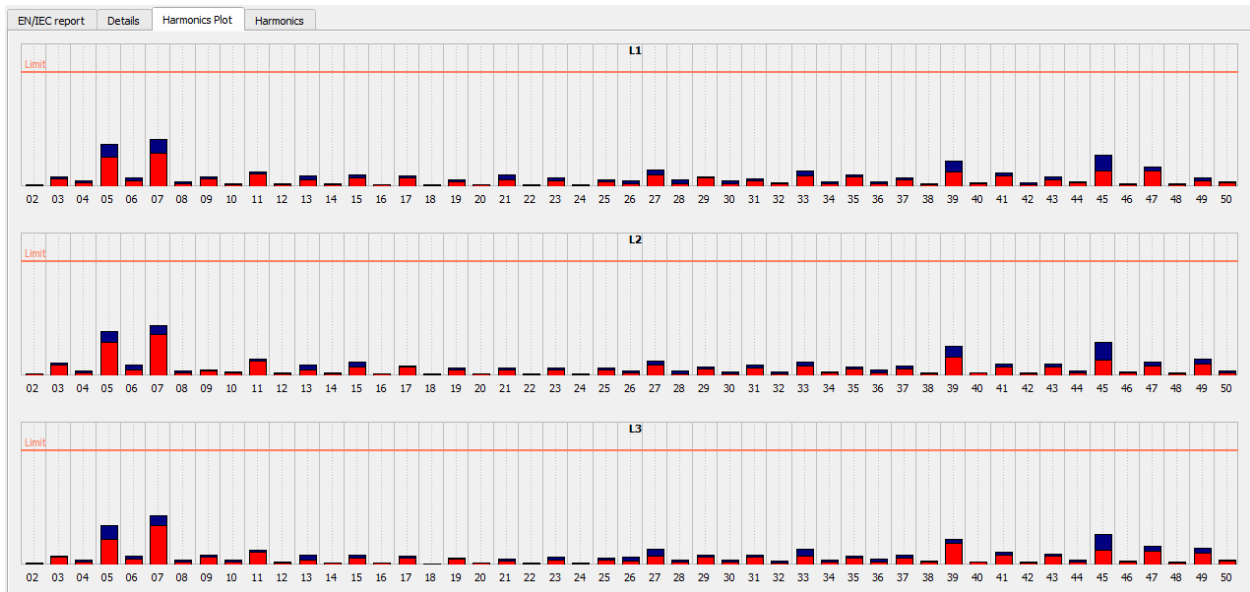
Slika 4.19 prikazuje izmjerene maksimalne vrijednosti viših harmonika te njihovu graničnu vrijednost propisanu normom. Vidljivo je da su mjerene vrijednosti svih viših harmonika ispod granične.

EN/IEC report Details Harmonics Plot Harmonics

| | Limit value [%] | L1 - 95,00% [%] | L1 - 100,00% [%] | L2 - 95,00% [%] | L2 - 100,00% [%] | L3 - 95,00% [%] | L3 - 100,00% [%] |
|-----|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|
| THD | 8,00 | 1,94 | 2,97 | 2,31 | 3,11 | 2,04 | 2,93 |
| 02 | 2,00 | 0,02 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,02 | 0,03 |
| 03 | 5,00 | 0,35 | 0,41 | 0,46 | 0,55 | 0,33 | 0,40 |
| 04 | 1,00 | 0,04 | 0,05 | 0,02 | 0,05 | 0,03 | 0,04 |
| 05 | 6,00 | 1,54 | 2,22 | 1,76 | 2,30 | 1,35 | 2,08 |
| 06 | 0,50 | 0,03 | 0,04 | 0,02 | 0,05 | 0,02 | 0,04 |
| 07 | 5,00 | 1,48 | 2,08 | 1,80 | 2,19 | 1,74 | 2,14 |
| 08 | 0,50 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,02 |
| 09 | 1,50 | 0,11 | 0,13 | 0,06 | 0,08 | 0,10 | 0,13 |
| 10 | 0,50 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,02 |
| 11 | 3,50 | 0,40 | 0,46 | 0,44 | 0,52 | 0,39 | 0,44 |
| 12 | 0,50 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| 13 | 3,00 | 0,17 | 0,29 | 0,16 | 0,27 | 0,13 | 0,26 |
| 14 | 0,50 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| 15 | 0,50 | 0,04 | 0,05 | 0,04 | 0,06 | 0,03 | 0,04 |
| 16 | 0,50 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| 17 | 2,00 | 0,16 | 0,19 | 0,15 | 0,18 | 0,13 | 0,15 |
| 18 | 0,50 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,01 |
| 19 | 1,50 | 0,06 | 0,09 | 0,08 | 0,10 | 0,07 | 0,09 |
| 20 | 0,50 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| 21 | 0,50 | 0,03 | 0,05 | 0,02 | 0,03 | 0,02 | 0,03 |
| 22 | 0,50 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| 23 | 1,50 | 0,08 | 0,12 | 0,07 | 0,10 | 0,06 | 0,10 |
| 24 | 0,50 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| 25 | 1,50 | 0,06 | 0,09 | 0,08 | 0,11 | 0,07 | 0,09 |
| 26 | 0,35 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,02 |
| 27 | 0,20 | 0,02 | 0,03 | 0,02 | 0,03 | 0,02 | 0,03 |
| 28 | 0,34 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |

Slika 4.19. Detaljan prikaz vrijednosti viših harmonika

Na slici 4.20 vizualno su prikazane vrijednosti harmonika u usporedbi sa graničnim vrijednostima te se može primjetiti da su peti i sedmi harmonik nešto viši. Najveća izmjerena vrijednost petog harmonika iznosi 2,30 % U_n , a sedmog harmonika 2,19 % U_n što zadovoljava granične vrijednosti norme.



Slika 4.20. Detaljan prikaz vrijednosti viših harmonika

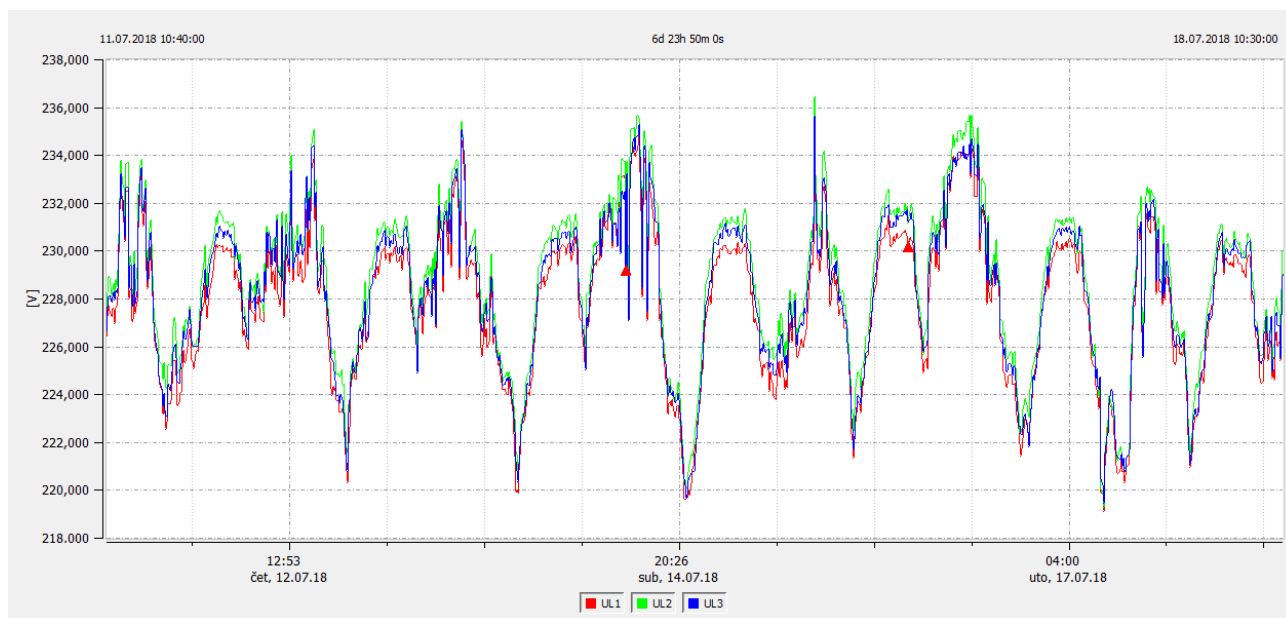
Sa slike 4.21 vidljivo je da su se dogodila dva naponska propada dubine 10-20 % i jedan propad dubine 20-30 %, svi propadi su bili trajanja između 10 i 200 ms. Prenapona nije bilo.

| Residual voltage U [%] | Duration t [ms] | | | | | |
|--------------------------|-------------------|--------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|----------------|
| | $10 \leq t < 200$ | $200 \leq t < 500$ | $500 \leq t < 1000$ | $1000 \leq t < 5000$ | $5000 \leq t < 60000$ | $t \geq 60000$ |
| $90 > u \geq 80$ | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $80 > u \geq 70$ | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $70 > u \geq 40$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $40 > u \geq 5$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $5 > u$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| Swell voltage U [%] | Duration t [ms] | | | |
|-----------------------|-------------------|---------------------|-----------------------|----------------|
| | $10 \leq t < 500$ | $500 \leq t < 5000$ | $5000 \leq t < 60000$ | $t \geq 60000$ |
| $u \geq 120$ | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $120 > u \geq 110$ | 0 | 0 | 0 | 0 |

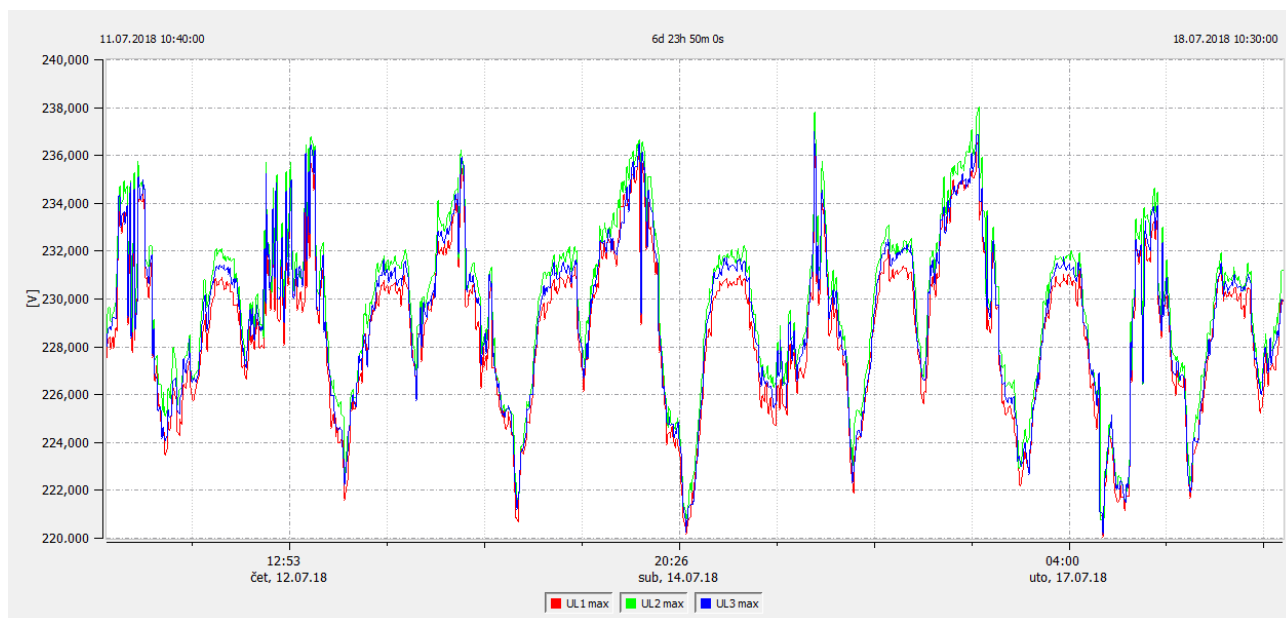
Slika 4.21. Prikaz naponskih događaja

Slika 4.22. prikazuje usrednjene desetminutne efektivne vrijednosti napona koje se kreću u rasponu od 219,169 V do 236,435 V te zadovoljavaju normu.



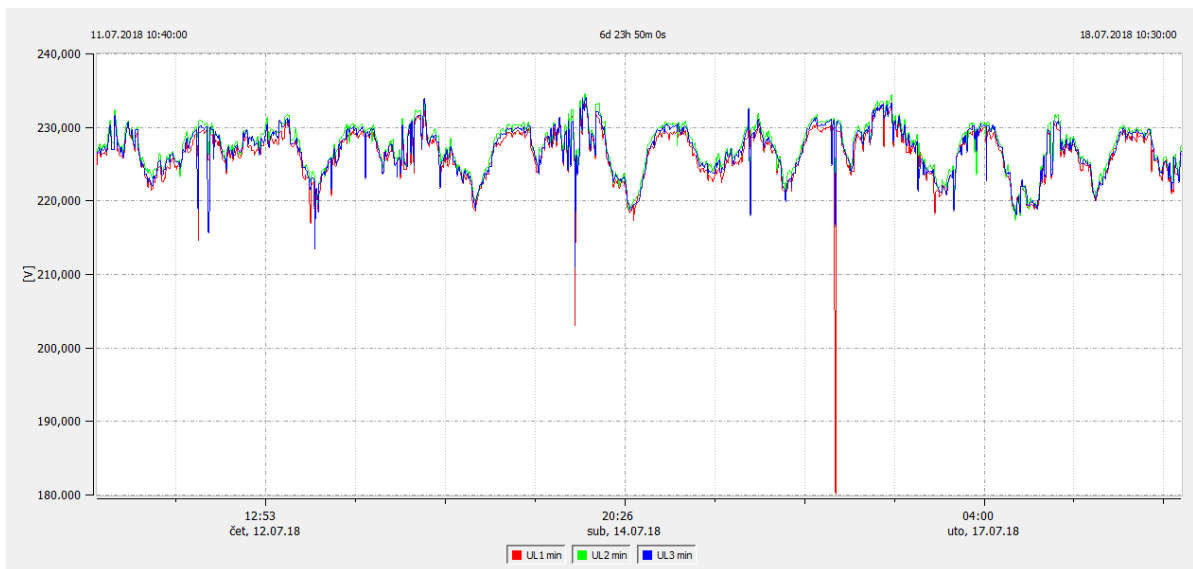
Slika 4.22. *Usrednjene desetminutne efektivne vrijednosti napona*

Slika 4.23 prikazuje maksimalne izmjerene efektivne vrijednosti napona koje su vrlo slične vrijednostima sa slike 4.22. Najveća izmjerena vrijednost napona iznosi 238,013 V u fazi L2.



Slika 4.23. *Maksimalne desetminutne efektivne vrijednosti napona*

Na slici 4.24 vidljivi su naponski propadi sa slike 4.21. Minimalna efektivna vrijednost napona u fazi L1 iznosi 180.242 V, u fazi L2 214.679 V, a u fazi L3 210.983 V. Oba naponska propada dogodila su se u fazi L1 te su detaljnije prikazana na slikama 4.25, 4.26, 4.27 i 4.28.

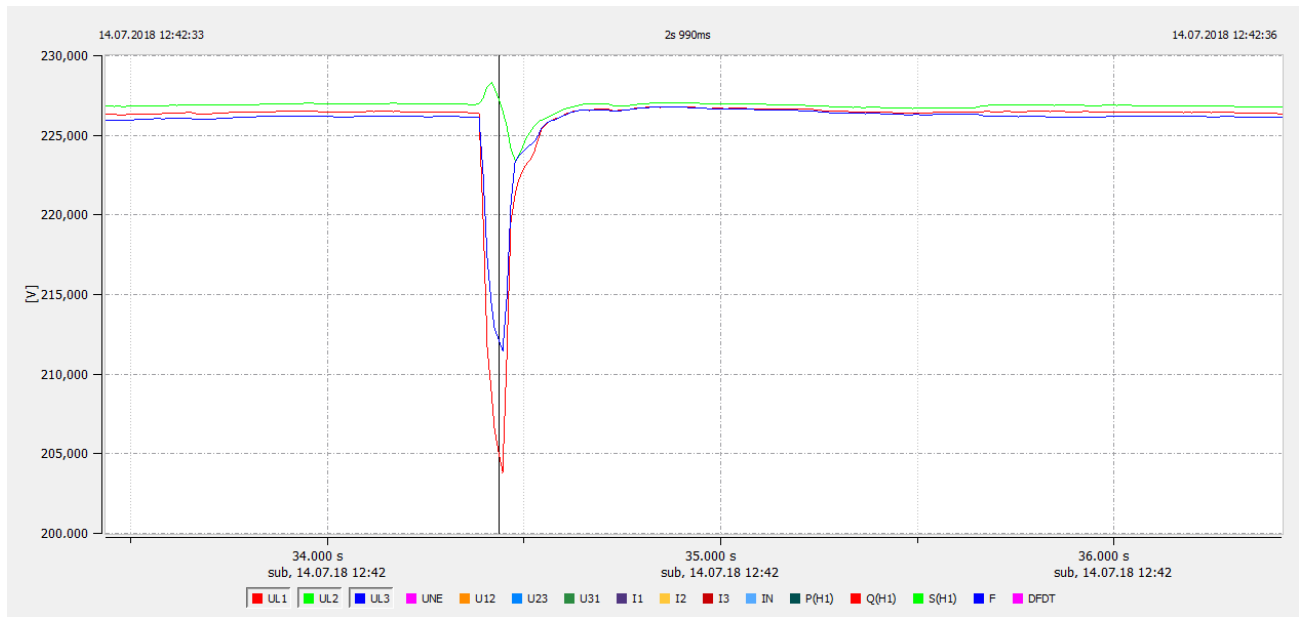


Slika 4.24. Minimalne desetminutne efektivne vrijednosti napona

Naponski propad sa slike 4.25 dogodio se u 12:42:34 dok je bilo sunčeve svjetlosti i elektrana je radila, ali propad sa slike 4.27 se dogodio u 05:09:14 dok nije bilo sunčeve svjetlosti te time elektrana nije radila što znači da je taj propad došao iz mreže i nije ga uzrokovala elektrana.



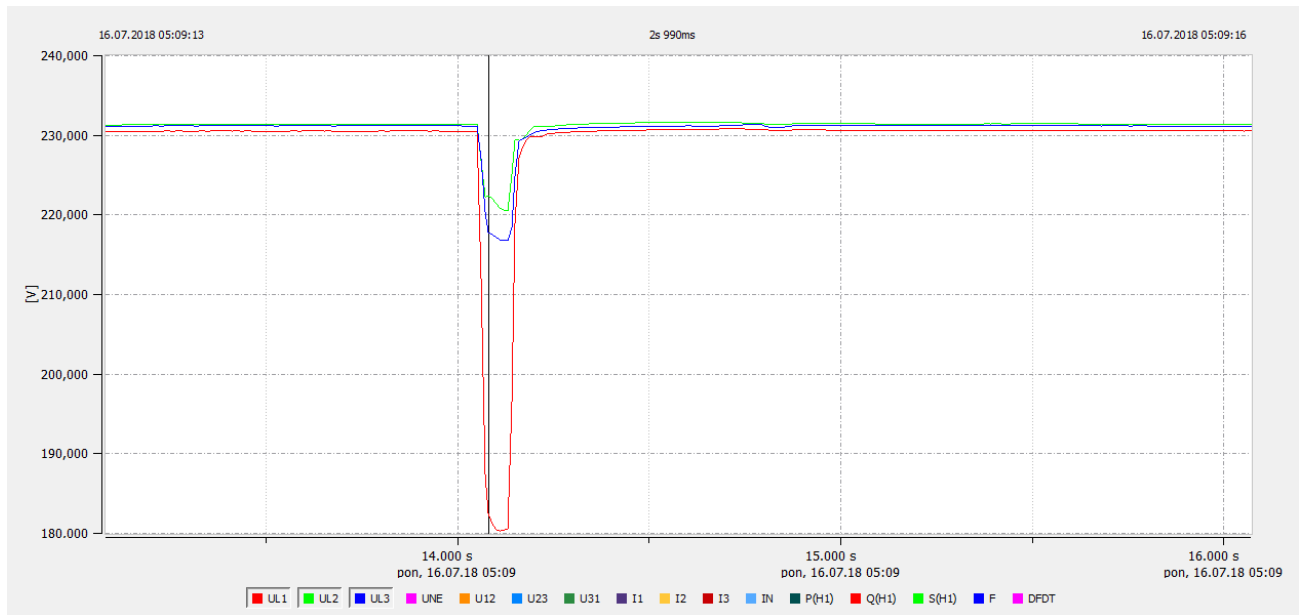
Slika 4.25. Naponski propad u fazi L1(14.7.2018. u 12:42:34)



Slika 4.26. Prikaz RMS vrijednosti naponskog propada u fazi L1(14.7.2018. u 12:42:34)

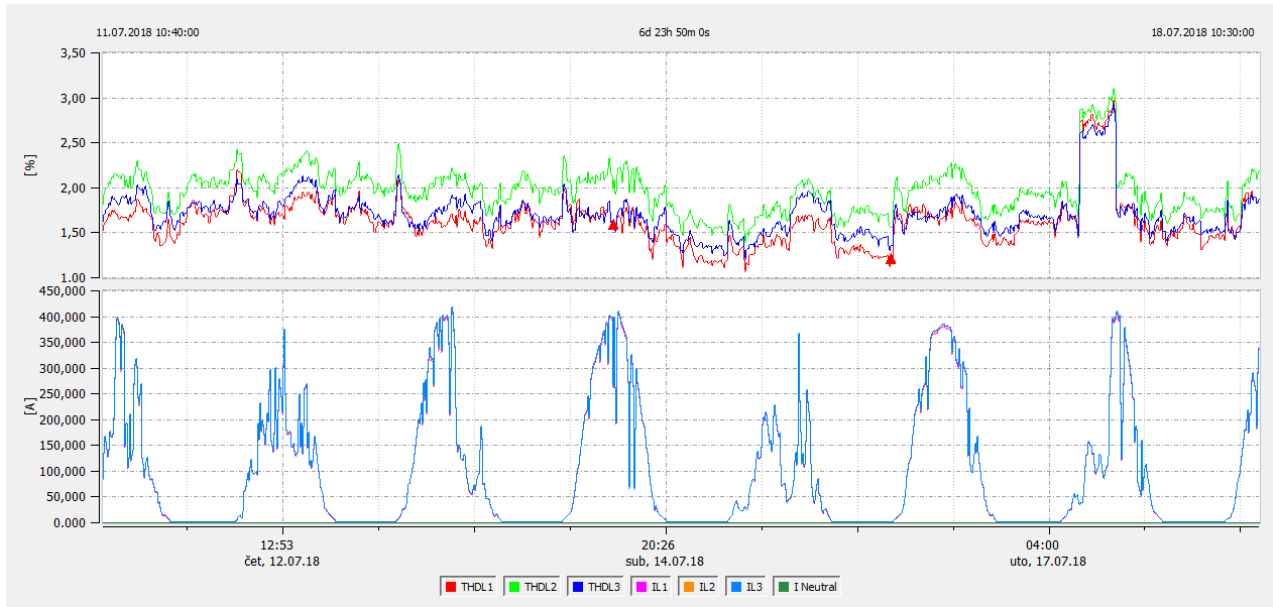


Slika 4.27. Naponski propad u fazi L1(16.7.2018. u 05:09:14)



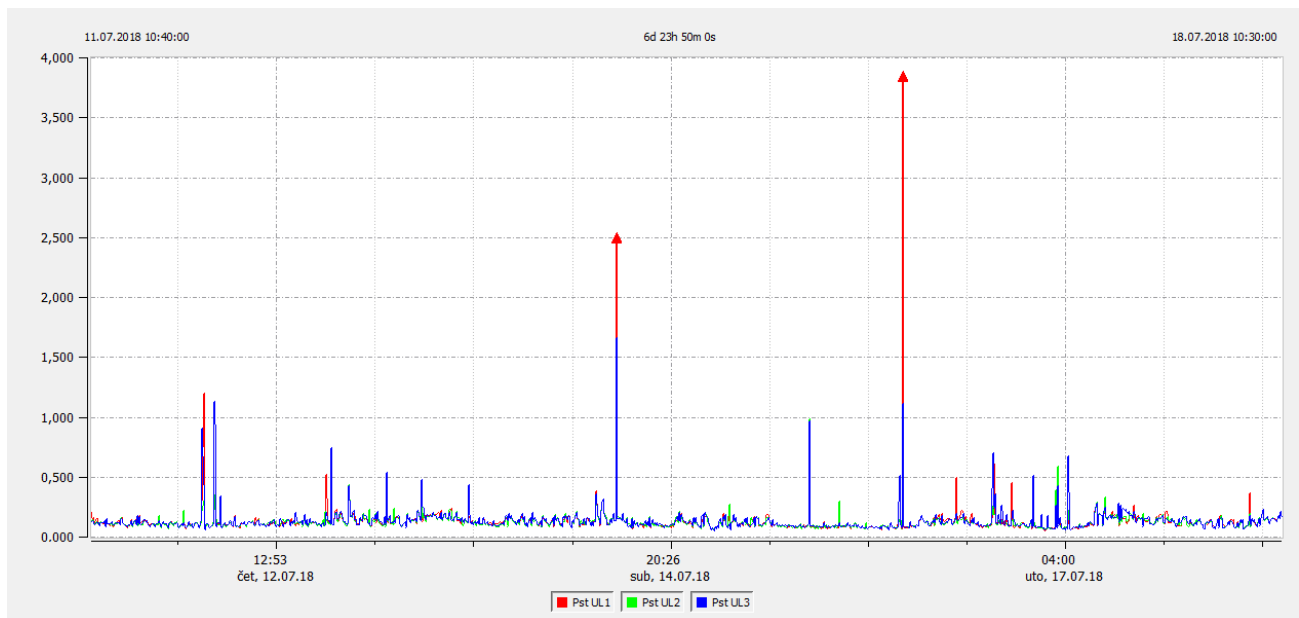
Slika 4.28. Prikaz RMS vrijednosti naponskog propada u fazi L1(16.7.2018. u 05:09:14)

Slika 4.29 prikazuje ukupno harmoničko izobličenje napona THD koje prema normi treba biti ispod 8 % U_n . Sa slike je vidljivo da je izmjerena vrijednost uglavnom ispod 2,5 % U_n osim u jednom periodu kada je išla do 3,112 % U_n što i dalje zadovoljava normu. Na slici je prikazana usporedba THD-a i efektivne vrijednosti struje. U zadnjem danu mjerenja vidljivo je povećanje THD-a. Do povećanog harmoničkog izobličenja napona vjerojatno je došlo zbog promjenjivosti sunčevog zračenja uslijed moguće naoblake zbog čega je i efektivna vrijednost struje bila vrlo promjenjiva kao i radna snaga prikazana na slici 4.34.

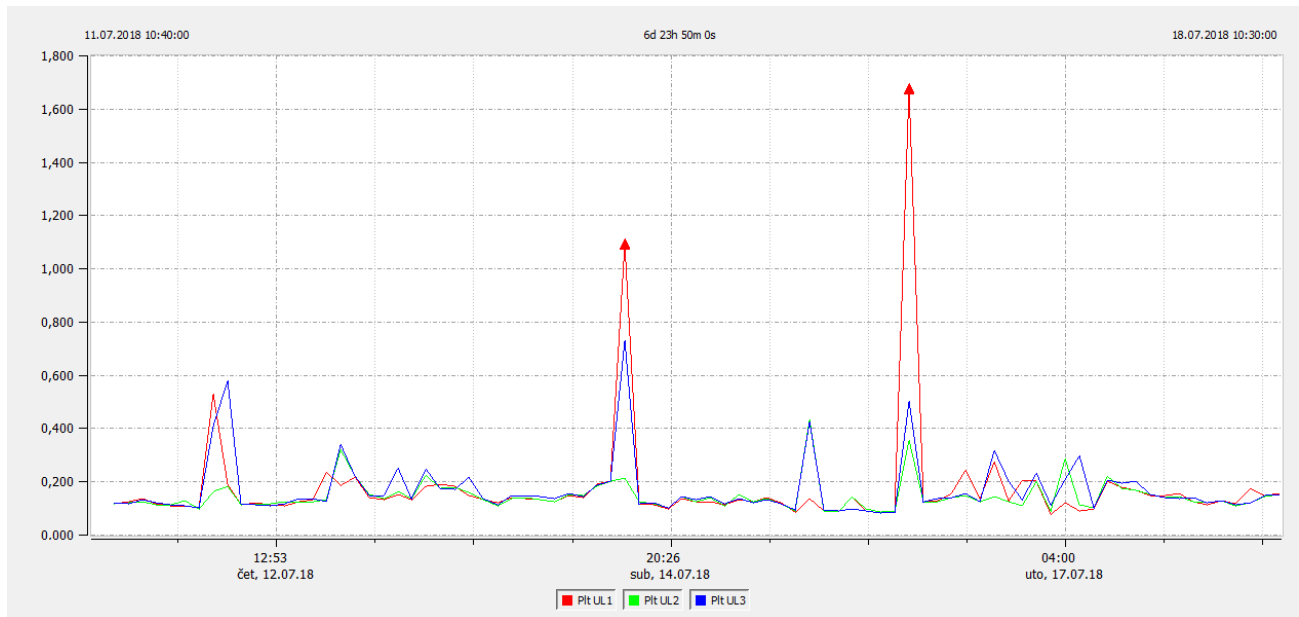


Slika 4.29. Ukupno harmoničko izobličenje napona THD i efektivna vrijednost struje

Na slici 4.30 prikazani su kratkotrajni flikeri. Izmjerene vrijednosti su uglavnom ispod 1, zabilježena su tri mjerenja u fazi L1 i tri u fazi L3 gdje je vrijednost prešla 1. Najveći zabilježeni fliker iznosio je 3,841 i dogodio se u fazi L1. Slika 4.31. prikazuje dugotrajne flikere. Usporedbom slika 4.24 i 4.31 primjetna je istovremenost naponskih propada i flikera zbog čega te skokove flikera ne uzimamo kao previsoke vrijednosti nego ih smatramo propadima napona.

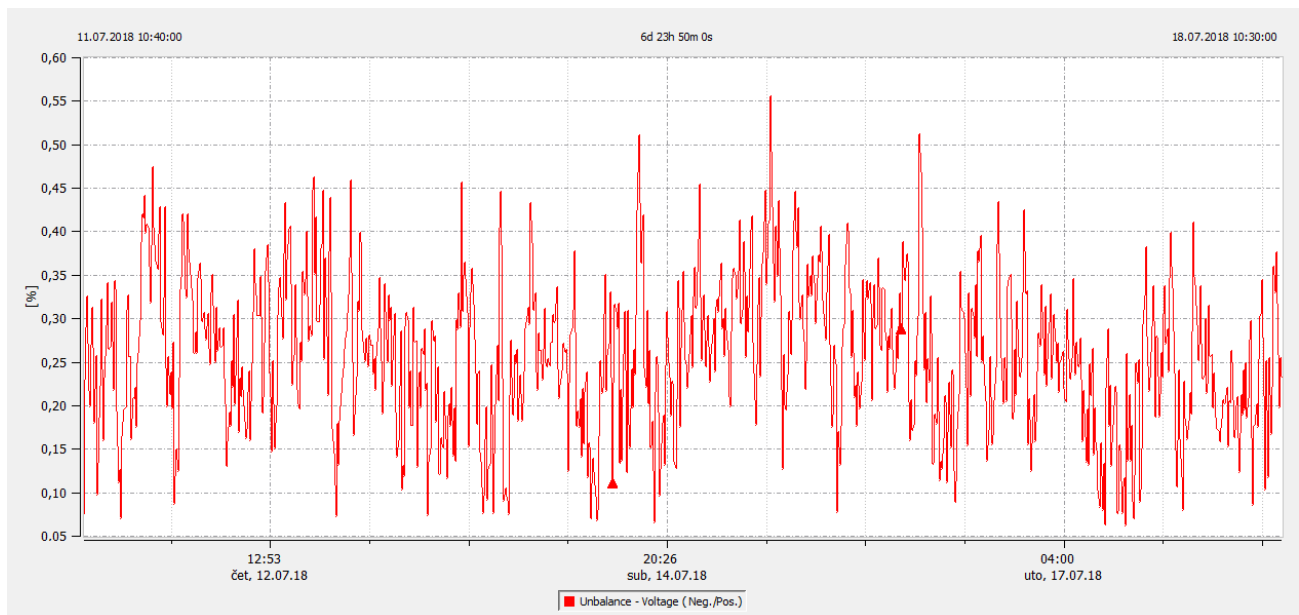


Slika 4.30. Kratkotrajno treperenje napona P_{st}



Slika 4.31. Dugotrajno treperenje napona P_{lt}

Na slici 4.32 prikazana je nesimetrija napona. Normom je propisano da vrijednost ne smije preći 2 % U_n . Najveća izmjerena vrijednost iznosila je 0,557 % U_n čime je norma zadovoljena.



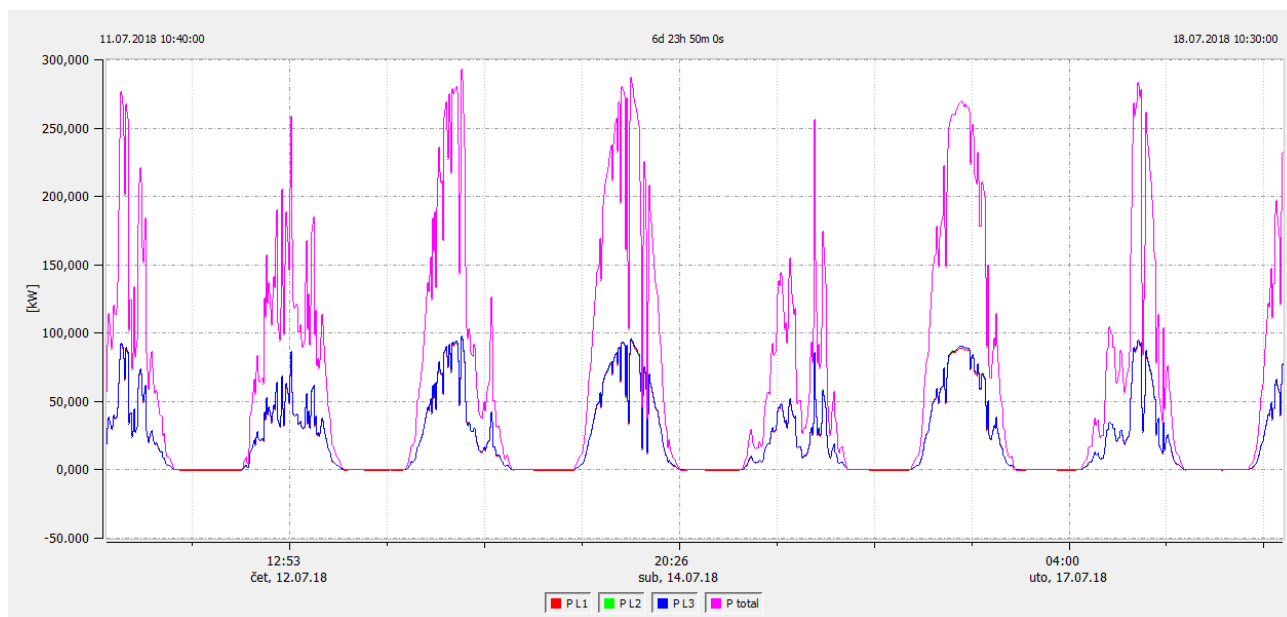
Slika 4.32. Nesimetrija napona

Na slici 4.33 prikazane su srednje izmjerene vrijednosti frekvencije. Vrijednosti se kreću u rasponu od 49,942 Hz do 50,062 Hz. Ako uključimo i maksimalne i minimalne izmjerene vrijednosti, frekvencija se kretala u rasponu od 49,906 Hz do 50,107 Hz. Zadovoljena su pravila norma za 99,5 % tjedna te za 100 % tjedna.



Slika 4.33. Pogonska frekvencija

Fotonaponske elektrane su specifične po predanoj trofaznoj radnoj snazi. Zbog svoje prirode snagu mogu predati samo dok ima sunčeve svjetlosti te zbog toga imaju prepoznatljiv graf predane snage. Zbog nestalnosti jakosti sunčeve svjetlosti, predana snaga je dosta promjenjiva. Najveća izmjerena predana radna snaga iznosi 292,972 kW.



Slika 4.34. Predana trofazna radna snaga

Iz tablice 4.2 koja prikazuje sažeti pregled rezultata analize mjerenja vidljivo je da su vrijednosti svih navedenih pokazatelja kvalitete unutar zadanih granica te je norma zadovoljena.

Tablica 4.2. Sažeti pregled rezultata

| Pokazatelj | Opseg | Granica | Ocjena |
|------------------|---|---------------------------------|----------------------------|
| Promjene napona | $230 \pm 10 \% U_n$ $230 +10 / -15 \% U_n$ | za 95 % tjedna za 5 % tjedna | zadovoljava zadovoljava |
| THD napona | $< 8 \% U_n$ | za 95 % tjedna | zadovoljava |
| Treperenje | $P_{lt} \leq 1$ | za 95 % tjedna | zadovoljava |
| Nesimetrija | $< 2 \% U_n$ | za 95 % tjedna | zadovoljava |
| Frekvencija | $f_n \pm 1 \% f_n$ $f_n +4 / -6 \% f_n$ | za 99,5 % godine | zadovoljava |
| | | za 100 % godine | zadovoljava |
| Naponski propadi | $< 90 \% U_n$ | za 100 % godine | zadovoljava |
| Prekidi opkrbe | $< 1 \% U_n$ | za 100 % godine | zadovoljava |
| Prenaponi | $> 110 \% U_n$ | za 100 % godine | zadovoljava |

4. ZAKLJUČAK

Električna energija postala je dio naše svakodnevice te je neophodna za normalan život. Povećanom upotrebom trošila nelinearnih karakteristika povećava se i nužnost održavanja kvalitete električne energije, a rastom potrošnje raste i potreba za drugim nekonvencionalnim izvorima. To je dovelo do uvođenja distribuiranih izvora u elektroenergetski sustav čime se utječe na kvalitetu električne energije. Održavanje kvalitete posebno je važno zbog posljedica koje može ostaviti korištenje električne energije loše kvalitete. U industrijskim pogonima loša kvaliteta može dovesti do kvarova na opremi te do zaustavljanja proizvodnje što rezultira ekonomskim gubicima, a kod kućanstava loša kvaliteta može rezultirati kraćim životnim vijekom kućanskih aparata.

Potreba za održavanjem kvalitete električne energije dovela je do nastanka normi. Hrvatska, kao i druge članice EU, je prihvatila standard HRN EN 50160:2012 „Naponske karakteristike električne energije iz javnih distribucijskih mreža“ koji propisuje dopuštene vrijednosti pokazatelje kvalitete električne energije.

U tjedan dana mjerenja kvalitete bioplinske elektrane dogodila su se dva propada i dva prekida opskrbe u sve tri faze. Svi pokazatelji kvalitete su bili unutar ograničenja zadanih normom osim dugotrajnih flikera koji su prekoračili dopuštene vrijednosti. Vrijednost kratkotrajnih flikera konstantno je blizu vrijednosti 1 zbog čega je moguće da elektrana utječe na kvalitetu. Za valjan zaključak potrebno je provesti dodatna mjerenja i analize.

Analizom rezultata mjerenja na priključku fotonaponske elektrane vidljivo je da svi pokazatelji kvalitete zadovoljavaju normu. Dogodila su se tri naponska propada, nije bilo prekida ni prenapona. Vidljive su oscilacije kod predane radne snage što je tipično za fotonaponske elektrane koje ovise o vremenskim uvjetima. Iz rezultata se može pretpostaviti da elektrana ne utječe negativno na kvalitetu električne energije.

POPIS LITERATURE I DRUGIH IZVORA INFORMACIJA

- [1] Zvonimir Klaić, Srete Nikolovski: Kvaliteta električne energije – mjerenja prema normi EN 50160, Elektrotehnički fakultet, Osijek 2003.
- [2] CENELEC, <https://www.cenelec.eu/dyn/www/f?p=104:6> , pristup ostvaren 29. kolovoza 2019.
- [3] Henryk Markiewicz, Antoni Klajn: Standard EN 50160 – Voltage Characteristics in Public Distribution Systems, Wroclaw University of Technology, Poljka 2004.
- [4] Math Bollen, Fainan Hassan: Integration of Distributed Generation in the Power System, SAD 2012.
- [5] Vedran Tukera: Analiza kvalitete električne energije na farmi muznih krava, diplomski rad, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, Osijek 2016.
- [6] Leonardo Energy: Power Quality and Utilisation Guide, Section 8 – Distributed Generation, Integration & Interconnection, 2006.
- [7] Željko Božić: Kvaliteta električne energije na niskonaponskom razvodu u tehničkoj školi Nikole Tesle u Vukovaru, diplomski rad, Odjel za fiziku, Osijek 2011.
- [8] Leonardo Energy: Power Quality and Utilisation Guide, Distributed Generation and Renewables, 2006.
- [9] Sun&Wind Energy, <https://www.sunwindenergy.com/bioenergy/1-mw-biogas-plant-australia>, pristup ostvaren 30. kolovoza 2019.
- [10] Z. Klaić, M. Primorac, Utjecaj obnovljivih izvora energije na elektroenergetsku mrežu – primjeri iz prakse, CIGRÉ, Šibenik 2017.
- [11] Gilbert M. Masters: Renewable and Efficient Electric Power Systems, SAD 2004.
- [12] M. Lasić, S. Nekić, J. Šimić, A. Tomasović, M. Veža, D. Škrlec, Utjecaj vjetroagregata s promjenjivom brzinom vrtnje na kvalitetu napona, HO CIRED, Šibenik 2008.
- [13] a-eberle, <http://www.a-eberle.de/> , pristup ostvaren 25. kolovoza 2018.

SAŽETAK

Uz postepeno uvođenje obnovljivih izvora energije u ulozu distribuiranih izvora električne energije postavlja se pitanje kakav utjecaj na kvalitetu električne energije imaju takvi izvori. Ovaj diplomski rad analizira utjecaj bioplinske i fotonaponske elektrane na kvalitetu električne energije. U prvom dijelu diplomskog rada obrađeni su pokazatelji kvalitete električne energije (kolebanje napona, treperenje, naponski propadi i prekidi, prenaponi, harmonici i nesimetrija napona) te zahtjevi norme HRN EN 50160:2012 „Naponske karakteristike električne energije iz javnih distribucijskih mreža“ koja propisuje dopuštene vrijednosti pokazatelja kvalitete. Drugi dio diplomskog rada obuhvaća rezultate i analizu mjerenja provedenih na bioplinskoj i fotonaponskoj elektrani te njihov utjecaj na kvalitetu električne energije.

Ključne riječi:

Kvaliteta električne energije, obnovljivi izvori energije, norma EN 50160, distribuirana proizvodnja

SUMMARY

With gradual introduction of renewable energy sources in the role of distributed electric energy sources, the question arises: what influence on the quality of electric energy do such sources have. This master thesis analyses the influence of biogas and photovoltage powerplant on the quality of electric energy. In the first part of the thesis, the indicators of electric energy quality are processed (voltage fluctuation, flickers, voltage dips and supply interruptions, increase of voltage, harmonics and voltage dissymetry) and requirements of Standard HRN EN 50160:2012 „Voltage characteristics in public distribution systems“ which dictates the allowed values of quality indicators. The second part of the thesis covers the results and analysis of measuring conducted on the biogas and photovoltage powerplant and their influence on the quality of electric energy.

Key words:

Power quality, renewable energy, standard EN 50160, distributed generation

ŽIVOTOPIS

Vanja Budimski rođena je 28.02.1992. u Županji. Osnovnu školu je pohađala u Gunji, srednju školu opću gimnaziju u Županji nakon čega upisuje preddiplomski studij elektrotehnike na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku. Po završetku preddiplomskog studija upisuje diplomski smjera elektroenergetski sustavi.

U Osijeku, 26.09.2019.

Vanja Budimski

Potpis: _____