Utjecaj distribuirane proizvodnje na kvalitetu električne energije

Bereš, Benjamin

Master's thesis / Diplomski rad

2017

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:014902

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek

zir.nsk.hr

Image not found or type unknown

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

Sveučilišni studij

UTJECAJ DISTRIBUIRANE PROIZVODNJE NA KVALITETU ELEKTRIČNE ENERGIJE

Diplomski rad

Benjamin Bereš

Osijek, 2017.

SADRŽAJ

1. UVOD 1

1.1 Zadatak diplomskog rada 1

2. KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE 2

2.1. Neke definicije u svezi kvalitete električne energije 2

2.2. Norme za kvalitetu električne energije 3

2.3. Istraživanje i utvrđivanje stanja kvalitete električne energije 4

2.4. Elementi kvalitete električne energije 5

2.5. Mjerenje kvalitete električne energije 11

2.6. Izvori smetnji 12

2.7. Posljedice smetnji 14

2.8. Mjesta mjerenja kvalitete napona 17

2.9. Mjerni uređaji 18

3. UTJECAJ DISTRIBUIRANE PROIZVODNJE 19

4. BRZO KOLEBANJE NAPONA 21

4.1. Brza kolebanja kod vjetroelektrana 22

4.2. Flikeri kod fotonaponskih elektrana 24

4.3. Vrlo kratka odstupanja 24

4.4. Raširenost naponskih kolebanja 29

5. NESIMETRIJA NAPONA 33

5.1 Slabiji prijenosni sustav 33

5.2 Jači prijenosni sustav 34

5.3 Jednofazni proizvođači velike snage 34

5.4 Veliki broj jednofaznih proizvođača 36

6. NISKOFREKVENTNI HARMONICI 38

6.1 Snage vjetra: asinkroni generatori 39

6.2 Proizvođači sa sučeljima energetske elektronike 40

6.3 Sinkroni generatori 41

6.4 Primjer mjerenja 41
7. UTJECAJ SUNČANE ELEKTRANE ETFOS 1, NA DISTRIBUCIJSKU MREŽU HEP ODS-a DP „ELEKTROSLAVONIJA“ OSIJEK 46
7.1 Tehnički opis 46
7.2 Rezultati mjerenja 47
7.2.1 Prvi mjerni tjedan,od 24.04.2014. do 01.05.2014. 47
7.2.2 Drugi mjerni tjedan, nakon priključenja elektrane, od 05.05.2014. do 12.05.2014. 52
8. UTJECAJ BIOPLINSKOG POSTROJENJA SNAGE 1700 kW NA DISTRIBUCIJSKU MREŽU 56
8.1 Rezultati mjerenja 56
8.1.1 Prvi mjerni tjedan, - od 19. 02. 2016. do 26. 02. 2016. 56
8.1.2 Drugi mjerni tjedan, nakon priključenja elektrane, - od 23.03.2016. do 30.03.2016. 60
9. UTJECAJ ELEKTRANE NA BIOMASU NA 20kV MREŽU 65
9.1 Rezultati mjerenja 65
9.1.1 Prvi mjerni tjedan, od 18.06.2012. do 25.06.2012. 65
9.1.2 Drugi mjerni tjedan, nakon priključenja elektrane, od 13.08. do 20.08.2012. ... 67
9.2 Zaključni osvrt na analizu mjerenja pokazatelja kvalitete napona 71
10. ZAKLJUČAK 72
LITERATURA 73
SAŽETAK 74
ŽIVOTOPIS 75

1. UVOD

Mjerenje kvalitete električne energije je relativno novi pojam u elektroenergetskom sustavu. Postao je bitan kada su se 80-ih godina 20. stoljeća raširili uređaji sa elementima energetske elektronike. To su televizori, stolna računala, laptopi itd. Uređaji koji sadrže energetsku elektroniku „kvare“ kvalitetu električne energije (najčešće) zbog toga što izazivaju više harmonike.

Kad govorimo o mjerenju kvalitete električne energije, ustvari mislimo na tehničke veličine koje možemo mjeriti kao na primjer: napon, struja, frekvencija itd. S gledišta da elektrodistribucija može osigurati kvalitetni napon, a ne može garantirati kvalitetnu struju koja uvelike ovisi o potrošačima, ali i o distribuiranim izvorima energije, umjesto o kvaliteti električne energije, govorimo o kvaliteti napona.

U ovom radu obrađuje se detaljnije utjecaj distribuirane proizvodnje na kvalitetu električne energije.

1.1 Zadatak diplomskog rada

Dati teorijski pregled utjecaja elektrana iz obnovljivih izvora na kvalitetu napona. U praktičnom dijelu analizirati i iskomentirati utjecaj prije i poslije uključenja tri različite elektrane na obnovljive izvore na kvalitetu napona.

2. KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE

O kvaliteti električne energije govori se zadnjih 30 – 35 godina i za razliku od kvalitete većine drugih roba teško je mjerljiva. K tome ne postoji ni jedinstvena definicija kvalitete električne energije. Definicije se razlikuju prema tome definira li se pojam s aspekta operatora distribucijskog sustava ili s aspekta potrošača. U današnjim tržišnim uvjetima najvažniji kontrolori kvalitete električne energije upravo su potrošači, pa bi stoga praktična definicja kvalitete električne energije mogla glasiti: to je odsutnost svake nepravilnosti u bilo kojoj veličini, koja bi prouzročila kvar ili nepravilno djelovanje trošila potrošača. Uz to tehničke norme ne reguliraju kvalitetu električne energije u cjelini, nego napon, struju, frekvenciju i druge tehničke veličine koje je moguće egzaktno mjeriti. Stoga, u biti, pod kvalitetom električne energije zapravo podrazumijevamo kvalitetu napona. [1]

2.1. Neke definicije u svezi kvalitete električne energije

Kako smo već naveli, definicija kvalitete električne energije je obilježje električne energije u određenoj točki elektroenergetskog sustava promatrano u usporebi s referentnim tehničkim parametrima.[2]

Referentne vrijednosti tehničkih parametara određuju se temeljem višegodišnjih iskustava stečenih analizama stanja u elektroenergetskim mrežama i to dogovorima na međunarodnoj razini. Primjer jednog takvog dogovornog tehničkog parametra je frekvencija napona, koja u Europi iznosi 50 Hz.[2]

Neke od međunarodnih organizacija, koje definiraju vrijednosti tehničkih parametara su IEC (engl. *International Electrotechnical Commission*), CENELEC (engl. *European Committee for Electrotechnical Standardisation*), IEEE (engl. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*), UNIPEDE (engl. *International Union of Producers and Distributors od Electrical Energy*), CIGRE (fran. *Conseil International des Grands Réseaux Electriques* – ili engl. *International Council On Large Electric Systems*), ANSI (engl. *American National Standards Institute*) i druge.[2]

U preporukama, koje ove organizacije daju, definiraju se referentne (nazivne) vrijednosti tehničkih parametara, kao i njihova preporučena odstupanja od tih vrijednosti. Ukoliko pojedini parametar varira unutar preporučenih granica, to ne bi trebalo uzrokovati teškoće u elektroenergetskom sustavu, tj. smetnje u radu trošila i opreme, jer se trošila i oprema izrađuju s određenom tolerancijom što se tiče napajanja.[2]

Bitno je reći da se međunarodne preporuke vezane za kvalitetu električne energije stalno usavršavaju i nadopunjuju, te da se provode stalne analize i mjerenja kvalitete električne energije u elektroenergetskim mrežama širom svijeta.[2]

2.2. Norme za kvalitetu električne energije

Jedina u Hrvatskoj važeća norma za upravljanje kvalitetom (HRN:EN:ISO9001) govori da prihvaćanje sustava upravljanja kvalitetom treba biti strateška odluka organizacije na koju utječu razne potrebe, konkretni ciljevi, ponuđeni proizvodi, uspostavljeni procesi te veličina i ustrojstvo organizacije. Da bi organizacija radila učinkovito, mora utvrditi brojne međusobno povezane radnje i njima upravljati.[1]

Model sustava upravljanja kvalitetom temeljen na procesnom pristupu koji obuhvaća sve zahtjeve spomenute međunarodne norme pokazuje da kupac ima važnu ulogu u utvrđivanju zahtjeva kao ulaznih podataka. Trajno praćenje zadovoljstva kupca zahtjeva vrednovanje informacija koje se odnose na kupčevu predodžbu o tome je li organizacija ispunila njegove zahtjeve.[1]

U svijetu se primjenjuju različite norme kojima se definira kvaliteta električne energije:[1]

- IEEE 1159-1995 (SAD i neke druge zemlje);
- EN 50160 – 1994 (Europa);
- IEC 61000-4-30-2000 (Međunarodna norma).

Europska norma EN 50160 obrađuje i određuje osnovne zahtjeve na kvalitetu električne energije u srednjenaponskim i niskonaponskim mrežama. Norma je sadržajno zbirka pravila i razina elektromagnetske kompatibilnosti definiranih kroz trinaest parametara napona. Normom se reguliraju elektromagnetske smetnje u točkama (mjesto priključenja i predaje) NN i SN mreža, a u najnovijoj normi iz 2012. godine regulira se i visoki napon, u kojima se susreću potrošač i operator mreže (javna mreža). U tim se točkama valni oblik, amplituda i stalnost napona definiraju parametrima koji su funkcijski ovisni o čvrstoći mreže koja se iskazuje: snagom kratkog spoja u točki priključenja, postojećim elektromagnetskim smetnjama u mreži koje uzrokuju okolni potrošači kao i potrošači u drugim dijelovima mreže u na drugim naponskim razinama, nelinearnostima elemenata elektroenergetskog sustava i karakteristikama potrošača (nelinearnosti i druge značajke potrošača).[1]

Cilj je norme EN 50160 propisati obilježja napona napajanja u odnosu na valni oblik, visinu, frekvenciju i simetriju kod trofazne mreže na mjestu predaje potrošaču. Te se značajke pri

normalnom pogonu mijenjaju zbog promjena opterećenja, smetnji iz određenih postrojenja ili kvarova izazvanih vanjskim događajima. No kompletni ispad mreže ne može se smisleno opisati putem graničnih vrijednosti. Zbog toga norma ne zadaje stvarne granične vrijednosti, nego postavlja one vrijednosti koje ne smiju biti premašene tijekom 95 % vremena promatranja. Mjeri se, ovisno o mjerenoj veličini, 10-sekundna ili 10-minutna srednja vrijednost mjerene veličine. Mjerenje traje jedan tjedan.[1]

Norma je službeno u upotrebi od srpnja 1995. godine. U Hrvatskoj je također preuzeta, a zadnja verzija je preuzeta 2012. godine.[1]

2.3. Istraživanje i utvrđivanje stanja kvalitete električne energije

Za ocjenu stanja parametara kvalitete električne energije primjenjuju se sljedeći kriteriji iz europske norme EN50160:[1]

-pogonska frekvencija – 50 Hz; za sinkronu vezu srednja 10-sekundna vrijednost mora biti: +/- 1% (99,5% tjedna) i -6%/+ 4% (100% promatranog vremena);

- veličina napona napajanja – srednja 10 minutna rms mora biti:+/- 10% (95% tjedna) i + 10%/-15% (100% tjedna);

- naponsko treperenje (flikeri) – subjektivni osjećaj promjene gustoće svjetla. Mjere se vrijednosti samo kratkotrajne jakosti treperenja P_{st} tijekom vremenskog intervala od 10 minuta, dok se dugotrajna jakost treperenja P_{lt} izračunava temeljen niza od 12 uzastopnih vrijednosti P_{st}:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{1/12 \sum_{k=1}^{12} P_{st}^3} \tag{2.1}$$

P_{lt} ne smije prijeći vrijednost 1 tijekom 95% tjedna.

- naponski propadi – nastaju najčešće zbog kvarova u postrojenjima potrošača ili u javnoj ditribucijskoj mreži. Definiraju se kao nagla, kratkotrajna (od 10 ms do 1 minute) smanjenja opskrbnog napona na neku vrijednost u pojasu od 90% pa do 1% U_n, nakon čega se ponovno uspostavlja nazivni napon. Pad napona u niskonaponskim mrežama računa se prema izrazu:

$$\Delta U = \sqrt{3} \frac{\Delta S_A}{\ddot{S}_{k3}} U_n \tag{2.2}$$

gdje je S_{k3} rasklopna snaga za tropolni kratki spoj, a ΔS_A gubitak snage na potrošaču. Dopušteni orijentacijski broj propada napona tijekom jedne godine smije se kretati u opsegu od 10 do 1000.

- kratki prekidi napajanja – stanje pri kojem je opskrbni napon na mjestu predaje manji od 1% U_n. Razlikuju se planirani i neplanirani, te kratkotrajni i dugotrajni prekidi. Trajanje oko 70% kratkih prekida (<3 minute) godišnje mora biti kraće od 1s. Za druge prekide opskrbnog napona (>3 minute) dopušta se 10-50 prekida godišnje.

- nesimetrija napona – pri normalnim pogonskim uvjetima rada nijedna 10-minutna rms inverzna komponenta napona ne smije tijekom 95% tjedna prelaziti 2% odgovarajuće direktne komponente.

- napon harmonika – može se prikazati na dva načina: pojedinačno, njihovim amplitudama (U_h) svedenim na amplitudu osnovnog harmonika U_1, ili zajednički, preko ukupnog sadržaja viših harmonika, koji se računa pomoću izraza:

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} (U_h)^2} \frac{100\%}{U_1} \tag{2.3}$$

Tijekom svakoga 10-minutnog intervala vrijednost THD-a mora biti manja od 8% vrijednosti prvog harmonika, dok vrijedsst pojedinih harmonika mora imati iznose u pojasu od 0,5% do 6% vrijednosti prvog harmonika.[1]

2.4. Elementi kvalitete električne energije

Važnost pojedinih elemenata kvalitete električne energije mijenjala se s gospodarskim razvojem,. U početku, kada je većina trošila bila radnog karaktera, osnovna je bila dostupnost električne energije, te da napon i frekvencija, ukoliko odstupaju od nazivnih vrijednosti, budu u razumnim granicama. Kada je glavni problem dostupnost električne energije, tada propadi, tranzijenti i slične smetnje nemaju veliki utjecaj na pojam kvalitete električne energije.[2]

S naprednijim ekonomskim razvojem kontinuitet opskrbe, vrijednost napona, te frekvencija i dalje ostaju bitni parametri, no uzimaju se zdravo za gotovo, pa se naglasak pomiče na skupinu karakteristika koje danas podrazumijevamo pod pojmom kvalitete električne energije.

Tehničke karakteristike električne energije isporučene potrošaču promatraju se preko opskrbnog napona, tj. njegove veličine, valnog oblika i frekvencije, te mogućih smetnji.[2]

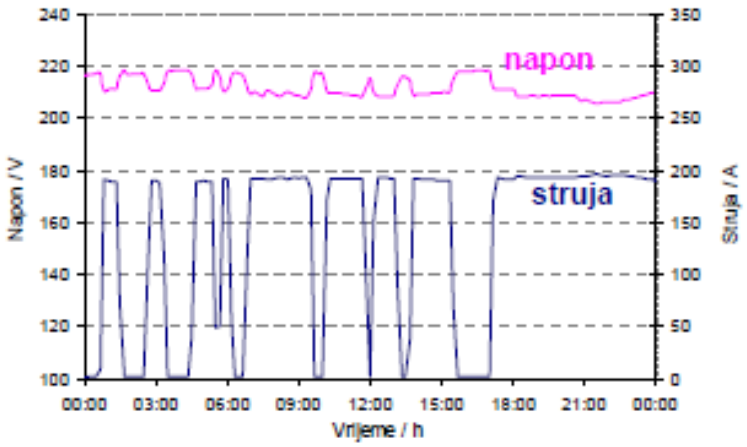
Tehnički parametri električne energije, tj. napona, koji se promatraju su:

- mrežna frekvencija
- veličina napona
- promjene napona
- treperenje napona
- propadi napona
- kratkotrajni prekidi napona
- duži prekidi napona
- privremeni mrežni prenaponi između faznih vodiča i zemlje
- impulsni prenaponi između faznih vodiča i zemlje
- nesimetrija napona
- naponi viših harmonika
- naponi međuharmoika
- signalni naponi

Mrežna frekvencijaje broj titraja naponskog vala u sekundi. U europskim elektroenergetskim mrežama ona iznosi 50 Hz (u SAD je 60 Hz).

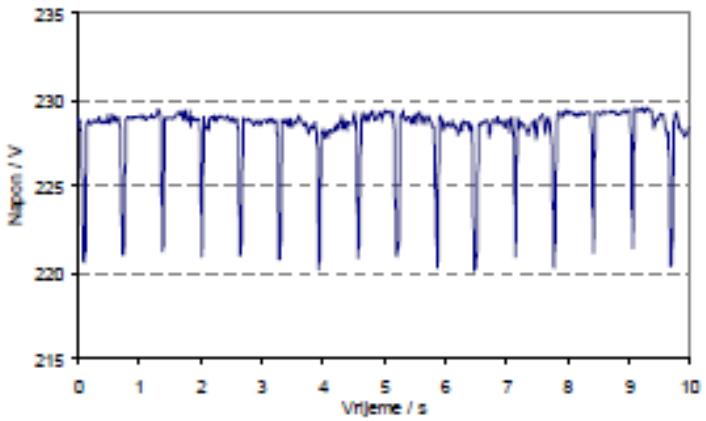
Veličina napona definirana je kao efektivna vrijednost napona na mjestu predaje električne energije u određenom trenutku, mjerena u određenom vremenskom periodu. Referentna vrijednost određena je nazivnim naponom mreže.

Promjene napona su odstupanja napona od nazivne vrijednosti. Uzrokovane su promjenama opterećenja, tj. uključivanjem i isključivanjem velikog broja trošila ili kvarovima u elektroenergetskom sustavu.



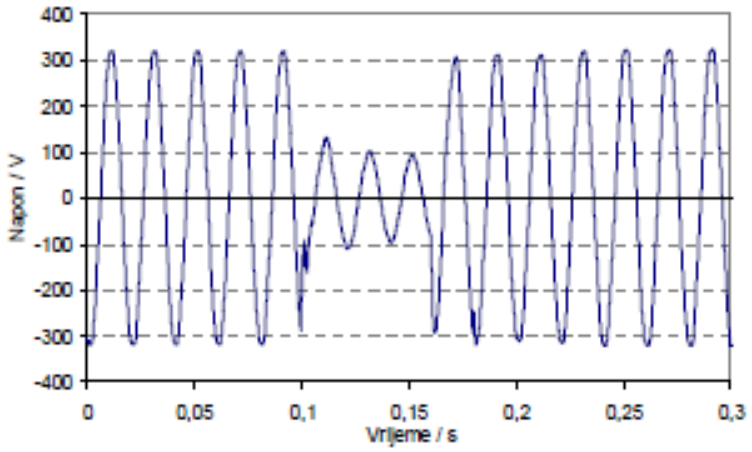
Slika 2.1. Primjer promjene napona uzrokovane promjenom opterećenja[2]

Treperenje napona (eng Flicker) su oscilacije vrijednosti napona koje se ponavljaju. Flickeri su definirani kao vidom zamjetljivo treperenje, izazvano svjetlosnim podražajem uz vremensko kolebanje svjetlosne gustoće ili spektralne razdiobe. Jednostavnije rečeno, to je titranje npr. svjetla žarulje ili zaslona računala. Uzroci treperenja su nagle učestale promjene opterećenja uzrokovane radom npr. elektrolučnih peći, fotokopirnih strojeva, aparata za zavarivanje i sličnih strojeva u susjedstvu. Uočavanje treperenja ovisi od osobe do osobe, tj. o senzibilnosti oka. Jakost treperenja definira se putem uočavanja sljedećeg: svjetlosno treperenje pojačava se do trenutka kada od 100 osoba njih 50 uoči treperenje (promjenu svjetla), tada se kaže da treperenje ima vrijednost 1. Ljudskom oku najviše smetaju flickeri frekvencije od 7 do 10 Hz.[2]



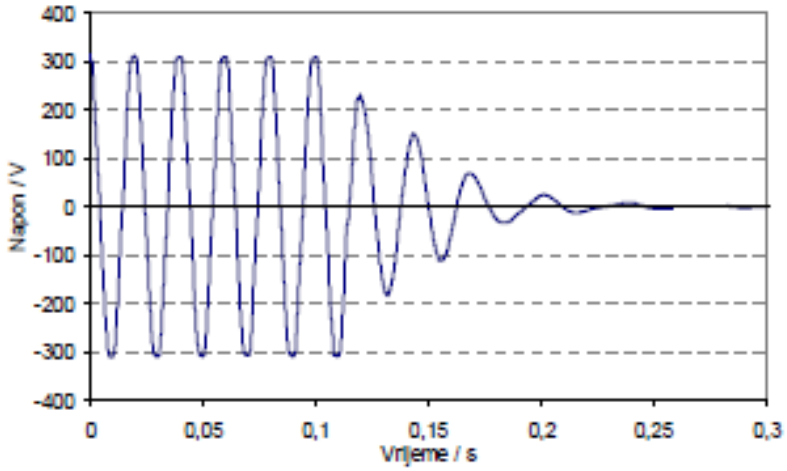
Slika 2.2. Primjer treperenja napona[2]

Propad napona definira se kao privremeno smanjenje vrijednosti napona ispod unaprijed određene granice. Te su granice najčešće u opsegu od 90% doo 1% nazivne vrijednosti. Propadi su najčešće uzrokovani kvarom u sustavu ili naglim povećanjem opterećenja. Uobičajeno se razvrstavaju po dubini i trajanju.[2]



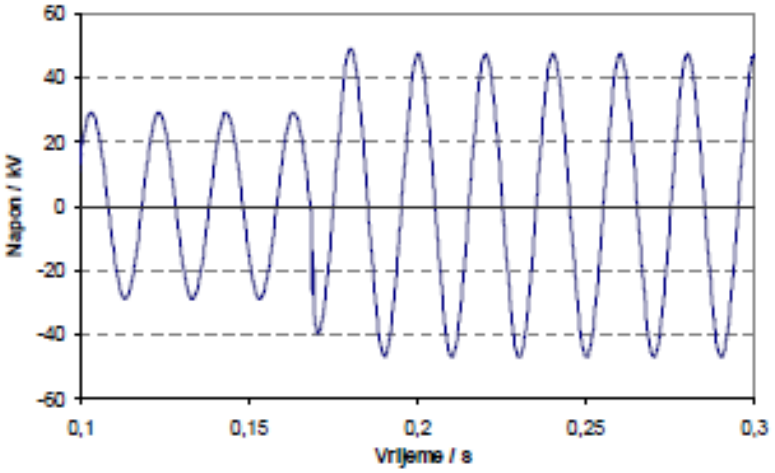
Slika 2.3. Primjer propada napona[2]

Prekid napona je stanje pri kojem napona jednostavno nestane. U većini preporuka smatra se da je nasutupio prekid kada napon padne ispid 1% svoje nazivne vrijednosti. Prekidi se dijele na duge i kratke, pri čemu se u većini preporuka kao dugi prekid definira onaj trajanja dužeg od 3 minute. Bitno je naglasiti da se u ove prekide napona, dakle one vezane uz kvalitetu električne energije, ne ubrajaju i ona isključenja napajanja unaprijed najavljena i planirana.[2]



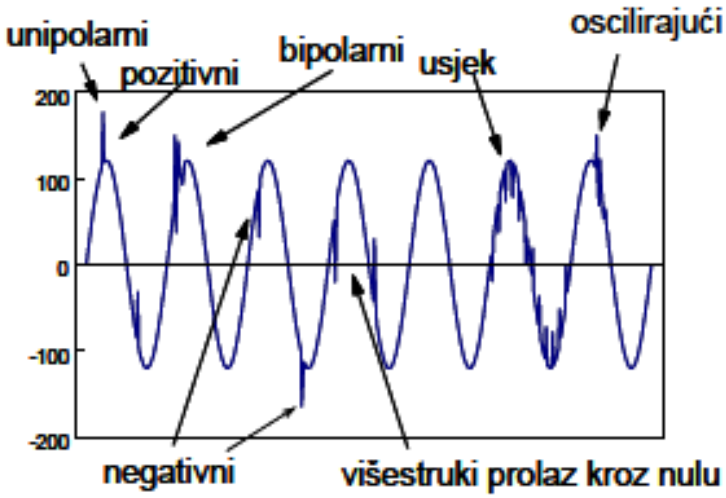
Slika 2.4. Primjer prekida napona[2]

Prenapon je stanje pri kojem napon poraste preko neke unaprijed određene granice. Kratkotrajni se prenaponi u mreži javljaju u slučaju kvara ili su uzrokovani sklopnim manipulacijama, udarima groma i sl. Njihova vrijednost uglavnom ovisi o načinu uzemljenja mreže.[2]



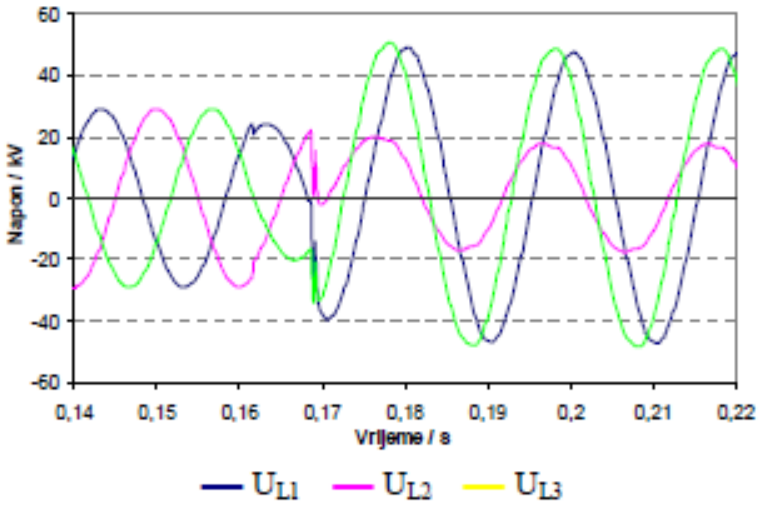
Slika 2.5. Primjer prenapona[2]

Impulsni prenapon (tranzijent) je visokofrekvencijska promjena napona u trajanju kraćem od jedne poluperiode (10ms). Mogu biti uzrokovani sklopnim operacijama u mreži, udarima groma, uklapanjima kapacitivnih terreta itd. Oblici im mogu biti razni.[2]



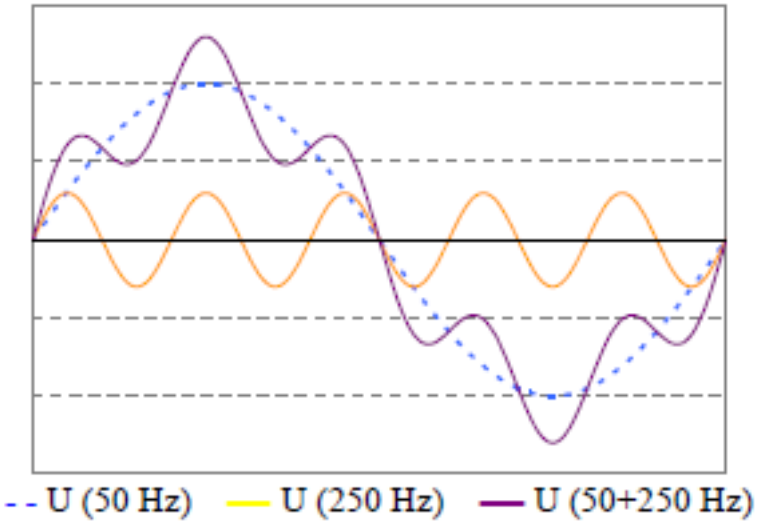
Slika 2.6. Primjeri nekih vrsta tranzijenata[2]

Nesimetrija napona je stanje pri kojem se naponi u trofaznom sustavu međusobno razlikuju po iznosu (amplitudi) ili ukoliko kut između pojedine dvije faze nije 120°. Mjerilo asimetričnosti napona definirano je kao omjer inverzne i direktne (izravne) komponente. Nesimetrija u distribucijskim mrežama uzrokovana je neravnomjernom raspodjelom tereta po fazama ili kvarom.[2]



Slika 2.7. Primjer nesimetrije uzrokovane kvarom[2]

Naponi viših harmonika sinusoidalni su naponi frekvencija koje su cjelobrojni višekratnici osnovne frekvencije (50Hz kod nas). Viši su harmonici nepoželjni u mrežama, jer se zbrajaju na osnovni val i izobličuju ga, što uzrokuje probleme u napajanju osjetljivih trošila, npr. medicinske opreme, koja zahtjeva čisti sinusoidalni napon.[2]



Slika 2.8. Primjer harmonički izobličenog naponskog vala[2]

Naponi međuharmonika sinusoidalni su naponi frekvencija koje nisu višekratnici osnovne frekvencije. Danas se razina međuharmonika u elektroenergetskim mrežama povećava zbog sve učestalije upotrebe pretvarača frekvencije i sličnih uređaja. Međuharmonici su opasni, jer mogu ometati MTU signal.[2]

Signalni naponi su naponi superponirani na osnovni naponski val, a koriste se za upravljanje trošilima i opremom (primejrice MTU signal). Njih je potrebno kontrolirati kako ne bi imali nepoželjan utjecaj na ostala trošila u sustavu.

Jasnija slika stanja kvalitete električne energije dobiva se ukoliko se u razmatranje uključe i karakteristike opterećenja, jer je upravo ono u najvećoj mjeri uzrok kvalitete električne energije.

Osim loše kvalitete napajanja, smetnje u radu trošila mogu biti uzrokovane i elektromagnetskim djelovanjem drugih elemenata elektroenergetske mreže.

Na području elektromagnetskog međudjelovanja elektroenergetskog sustava, te trošila i opereme priključenih na njega, postoje dvije razine podudaranja. Jedna je razina definirana kao emisija smetnji koju trošilo smije emitirati pri svom radu, a da pri tome ne uzrokuje smetnje u radu drugih trošila. Druga je razina elektromagnetskog djelovanja koje pojedino trošilo može podnijeti, a da ga te smetnje ne ometaju u radu. Obje razine se definiraju preporukama koje koriste proizvođači opreme/trošila pri njihovoj proizvodnji. Te se preporuke mogu koristiti kasnije za kontrolu emisije harmonika koje trošilo daje u mrežu pri svom normalnom pogonu.[2]

2.5. Mjerenje kvalitete električne energije

Mjerenje kvalitete električne energije provodi se prikupljanjem mjernih veličina (vrijednosti struja, napona i frekvencije) unutar određenog vremenskog intervala. Kasnije se ti podaci obrađuju u skladu s preporukama za kvalitetu električne energije programskom potporom na računalu. Rezultat takvih mjerenja tvrdnja je: da li kvaliteta električne energije na promatranom mjestu u mreži zadovoljava ili ne zadovoljava preporuke.

Danas većina uređaja, koji se koriste na području mjerenja kvalitete električne energije, ima u svojoj programskoj potpori ugrađene postave preporuke (norma) za kvalitetu električne energije (najčešće EN 50160), te se izvješća o kvaliteti napona u promatranoj točki unutar preporukom propisanog vremenskog intervala mogu automatski izraditi.

Ukoliko nas zanima samo neki od parametara kvalitete električne energije, a ne cjelokupna slika kvalitete, npr. samo harmonička analiza stanja u nekoj točki elektrodistributivne mreže, postoje uređaji, kojima se podešenja mogu prilagoditi za takve namjene, pri čemu se granice parametara mogu preuzeti iz preporuke. Tako , primjerice, neki registratori napona iz norme

EN 50160 preuzimaju dopuštene granice naponskih varijacija (veličina napona, granice za propade i prenapone, ...) i mjerni period od 10 minuta, dok druge veličine zanemaruju (npr. titranje napona).

Svi ovi uređaji uglavnom služe za mjerenje kvalitete napona na zahtjev, pa im je izvedba prijenosna (off-line mjerenja), a prilagodba parametara uređaja i očitavanje izmjerenih podataka obavlja se izravnim spajanjem računala (PC) na mjerni uređaj komunikacijskim kabelom (RS-232 ili Ethernet).

Osim mjerenja kvalitete električne energije na zahtjev ili periodičkih mjerenja, postoje i sustavi za trajno praćenje kvalitete električne energije u sustavu (on-line mjerenje). Takav se sustav sastoji od mjernih uređaja trajno priključenih na npr. 10kV stranu transformatora u TS 110/10 kV, komunikacijske veze putem koje se podaci daljinski prikupljaju, te od središnjeg računala na kojem se prikupljeni podaci spremaju i obrađuju, te se na temelju njih izrađuju izvješća.[2]

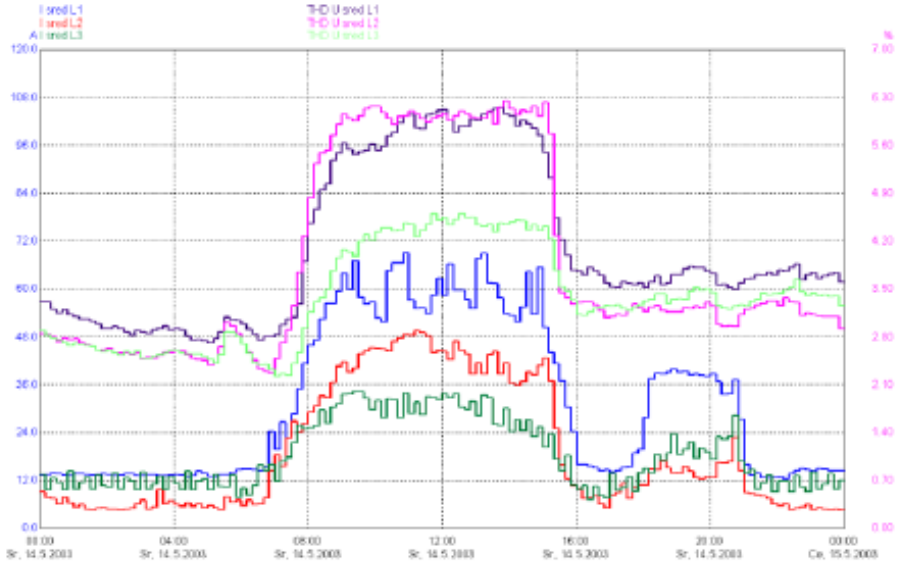
2.6. Izvori smetnji

Većina propada i prekida napona nastaje u distribucijskim i prijenosnim mrežama pa odgovornost za njih leži kod distributera ili elektroprivrednog poduzeća. No, za probleme uzrokovane višim harmonicima u sustavu su gotovo uvijek odgovorni potrošači.

Velik dio smetni kvaliteti električne energije uzrokovan je radom trošila i to onih nelinearnih karakteristika. Kako se u zadnjih nekoliko godina broj nelinearnih trošila znatno povećao, tako i njihov utjecaj na elektroenergetsku mrežu, gledano sa stajališta kvalitete električne energije, sve veći. Istovremeno, takva su trošila osjetljiva na promjene sinusoidalnog napona i zahtijevaju njegovu stabilnost za svoj rad.

Iako neko trošilo samo po sebi nije uzrok velikog izobličenja napona, više istih i/ili sličnih trošila, koja rade istovremeno, mogu biti uzrokom značajnih izobličenja valnog oblika opskrbnog napona. To se naziva „sumacijski efekt“. Takva su trošila npr. TV uređaji, osobna računala, pisači, štedne žarulje, uređaji za klimatizaciju, kopirke i sl.

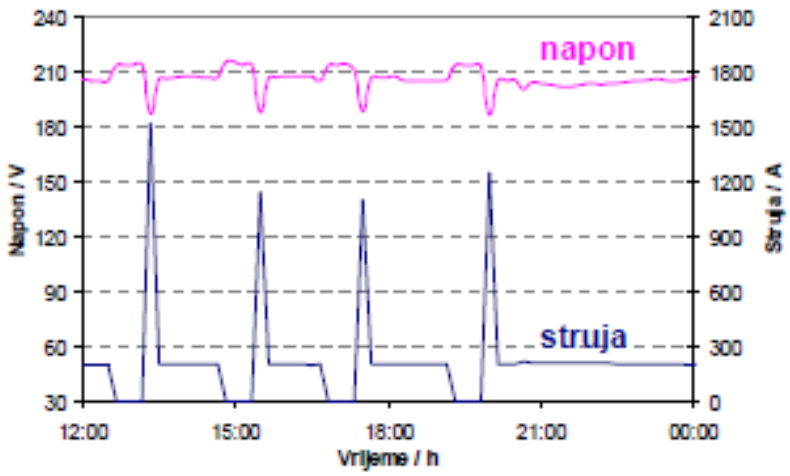
Velik dio harmoničkog izobličenja u elektroenergetskoj mreži su i industrijski tereti. To su: uređaji koji sadrže sklopove energetske elektronike, pogoni s motorima promjenjivih brzina, indukcijske peći, lučne peći i itd.[2]



Slika 2.9. Primjer naponskog harmoničkog izobličenja (THD) uzrokovanog nelinearnim teretom[2]

Nelinearna trošila generiraju više harmonike u struji. Posebno je problematičan treći viši harmonički član (150 Hz), koji se zbog svog karaktera u nultom vodiču trofaznog sustava zbraja, što taj vodič dodatno opterećuje i uzrokuje njegovo zagrijavanje.

Propadi napona su u niskonaponskim mrežama najčešće uzrokovani naglim povećanjem opterećenja, primjer čega je prikazan na slici 2.10.



Slika 2.10. Primjer propada napona uzrokovan naglim porastom opterećenja[2]

Osim oscilacijama tereta, promjene napona, te prekidi i propadi uzrokovani su kvarovima u elektroenergetskom sustavu. Kvar, bez obzira na kojem se naponskom nivou dogodio,

uzrokuje smetnje na svim naponskim razinama, i višim i nižim od onog na kojem se dogodio. Zato je kvar potrebno što brže otkloniti, kako bi se trajanje smetnje svelo na najmanju moguću mjeru.[2]

Najčešći primjer kvara jest jednopolni kratki spoj. U zračnim mrežama on je uzrokovan npr. padom stabla, preskokom izolatora, malenim životinjama ili pticama. Takav se kvar u distribucijskim stanicama uklanja proradom relejne zaštite s ciklusom automatskog ponovno uklopa (APU). Pri jednopolnom kratkom spoju napon faze na kojoj je nastao kvar pada na nulu, a napon preostale dvije faze raste s faznog na linijski napon. Tako u jednoj fazi imamo pad napona ili čak prekid, a u druge dvije se javlja prenapon. Proradom relejne zaštite prekidač voda na kojem je nastao kvar isklapa se, što potrošačima napajanima putem tog voda uzrokuje prekid napajanja u sve tri faze, dok se na ostalom dijelu mreže priključenom na iste sabirnice uspostavlja normalno pogonsko stanje. Uz aktiviran ciklus APU prekidač voda na kojem je nastao kvar nakon određenog vremena (najčešće 300 ms) će se ponovno uklopiti. Ukoliko je kvar bio prolaznog karaktera, npr. preskok iskre preko izolatora, tada se i na tom vodu uspostavlja normalno pogonsko stanje, pa je prekid napajanja za potrošače na tom vodu bio u dužini trajanja ciklusa APU-a. Ukoliko kvar na vodu i dalje postoji, relejna će zaštita isklopiti prekidač na vodu i opet izazvati prekid napajanja za potrošače na tom vodu, i to će trajati dok se kvar ne locira, pa se izvrši preklapanje dijela potrošača, ili do otklanjanja kvara.[2]

2.7. Posljedice smetnji

Jasno je da nekvalitetno napajanje uzrokuje teškoće u rad trošila koja nisu projektirana za takve uvjete rada. Posljedice su: kvarovi, smetnje, te neispravan rad trošila.

Za procesnu industriju najveće štete uzrokovane su naponskim propadima ili prekidima napajanja kada se računalna oprema (mikroprocesori), koja upravlja procesima i trošilima, „zamrzne“. Pri timse događajima očituje najveća razlika u shvaćanju kvalitete električne energije od strane distribucijskog poduzeća i potrošača. Ti su događaji kratkotrajni, pa ih je teško dokazati ukoliko ne postoji trajno praćenje stanja u elektroenergetskoj mreži.

Još je teže odrediti gubitke uzrokovane propadima ili prekidima. Distribucijsko poduzeće prekid napajanja promatra samo kroz cijenu energije neisporučene potrošačima, dok potrošač gubitak električne energije promatra kroz gubitke u proizvodnom procesu. Električna energija relativno je jeftina (u odnosu na npr. naftu), a i prekidi napajanja su relativno kratki, dok gubitak u proizvodnom procesu može biti vrlo skup. Potrošaču je često nakon takvog prekida

u proizvodnom procesu potrebno neko vrijeme da ga ponovno pokrene i sanira štetu koja je tim prekidom bila uzrokovana.

Sljedeći parametar koji uzrokuje najviše štete viši su harmonički članovi. Utjecaji harmoničkog izobličenja u elektroenergetskim mrežama ne moraj biti odmah vidljivi, no dugoročno mogu imati ozbiljne posljedice. Neki od najbitnijih su:

- opterećivanje potrošačkih instalacija i elemenata elektroenergetskog sustava naponima i strujama frekvencija za koje nisu projektirani
- povećano zagrijavanje transformatora i neutralnih vodiča uzrokovano strujama viših harmonika čiiji je red višekratnik broja 3, a posebno 3. harmonika koji se u neutralnom vodiču trofaznog sustava ne poništava, nego zbraja. Radi povećane razine 3. harmonika u neutralnom vodiču može doći i do požara, zato što se neutralni vodič ne štiti od preopterećenja
- pojačano zagrijavanje transformatora uzrokovano višim harmonikim članovima, kao i efekti zasićenja u jezgri, uzrokuju smanjenje opteretivosti transformatora ispod nazivne snage u potrošačkim i postrojenjima elektrodistribucijskih poduzeća.[2]

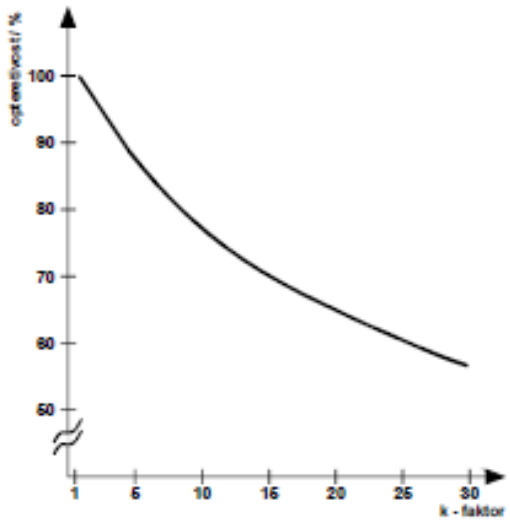
Tu su interesantne i sljedeće pojave i posljedice:

- pojava viših harmoničkih struja koje teku po elektroenergetskom sustavu mogu izazvati smetnje na telekomunikacijskim linijama;
- loš faktor snage povezan s nelinearnim teretima odgovoran je za značajan porast struja koje teku kroz elektroenergetski sustav i inastalacije potrošača, a time i za značajan porast troškova uzrokovanih gubicima;
- smanjivanje životnog vijeka opreme i trošila radi npr. pojačanog opterećenja izolacje uzrokovano dodatnim zagrijavanjem.[2]

Naponi viših harmonika, razina viših od preporučenih granica, mogu biti uzrokom zamjene transformatora, sklopne opreme i vodova od strane distribucijskog poduzeća, uz jako velike troškove, iz razloga što je postojeća mreža preopterećena, jer harmoničko izobličenje uzrokuje dodatne tokove snaga.

Na niskonaponskom nivou (NN) distribucijskih mreža ima smisla govoriti o još jednom parametru, koji se u Europi ne razmatra, dok je u SAD-u poprilično bitan. Riječ je o K-faktoru transformatora. K-faktor je mjera za utjecaj viših harmoničkih članova u struji na transformator, a definiran je prema ANSI/IEEE preporuci C57.110-1986. K-faktor

transformatora opisuje kako transformator podnosi dodatno zagrijavanje (gubitke) izazvane višim harmoničkim članovima u struji. Na temelju K-faktora računa se smanjenje raspoložive snage zbog dodatnih gubitaka. K-faktor računa se iz struje tereta i prema njemu se određuje potreban K-faktor transformatora. Ovisnost smanjenja opteretivosti transformatora o porastu K-faktora tereta, tj. harmoničkog izobličenja tereta, prikazana je na slici 2. 11.[2]



Slika 2.11. Ovisnost opteretivosti transformatora o K-faktoru tereta[2]

Znači, transformator s većim K-faktorom može podnijeti veći nelinearni teret, tj. veće opterećenje snagama viših harmoničkih članova, a da mu se radi toga ne smanji opteretivost snagom na nazivnoj frekvenciji. Jasno je da su takvi transformatori zbog svoje konstrukcije skuplji, no s obzirom da su građeni za specijalne uvjete rada, imat će duži životni vijek od običnog distribucijskog transformatora, ukoliko ih opteretimo istim harmonički izobličenim teretom.

Pri normalnim pogonskim uvjetima 95% 10-minutnih srednjih vrijednosti efektivne vrijednosti napona svakog pojedinog višeg harmonika ne smije u nijednom tjednom ntervalu prelaziti vrijednost iz tablice.[2]

Tablica 2.1 Maksimalne dozvoljene vrijednosti harmonika izražene u postotcima nazivnog napona[2]

Neparni viši harmonici				Parni viši harmonici	
koji nisu višekratnik od 3		koji su višekratnik od 3			
redni br.h	Uh u % Un	redni br-h	Uh u % Un	redni br.h	Uh u % Uh
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,5	6 do 24	0,5
13	3	21	0,5		
17	2				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

Napomena:vrijednosti nisu navedene za više harmonike (iznad 25. višeg harmonika), jer su one obično vrlo malene.

Obveza distributera električne energije, Operatora distribucijskog sustava (ODS) da nadzire kvalitetu napona u mreži i o njoj izvješćuje temeljem Općih uvjeta za opskrbu električne energije, (Članak 117.) nastupila je 1.siječnja 2008. godine. Obveza distributera se odnosi na provođenje nadzora i temeljem njega izvješćivanje kako HERA-e (Hrvatska energetska regulatorna agencija) tako i kupaca o stanju kvalitete isporučenog napona, na razvidan, objektivan i nepristran način te sve to o svome trošku.[2]

2.8. Mjesta mjerenja kvalitete napona

Kvaliteta napona za ODS je obvezatna na mjestu isporuke električne energije na visokom, srednjem i niskom naponu. Kod nas (RH) je takvih mjesta 2.200.000. Većina mjernih mjesta je na niskom naponu gdje je prosječno 90 kupaca po SN/NN transformatoru. Ugroženija mjesta u NN mreži koje možebitno pogađa smanjena kvaliteta napona su najčešće na sredini i periferiji NN mreže. Mjerna mjesta kvalitete napona mogu biti bilo gdje u mreži, ali poradi minimizacije troškova potrebito je odrediti i minimalni do optimalni broj mjesta na kojima se mjeri kvaliteta napona. Veći broj mjernih mjesta kvalitete napona implicira znatne troškove ODS-a pa izbor treba učiniti krajnje obazrivo. Troškovi koji pri tome nastaju su različiti kao što su: investicijski troškovi uređaja, troškovi prikupljanja podataka, troškovi obrade podataka, troškovi izvješćivanja i troškovi vlastite potrošnje uređaja za mjerenje kvalitete. Svi navedeni troškovi se ciklički ponavljaju.[3]

2.9. Mjerni uređaji

Danas postoje prijenosni i fiksni uređaji za mjerenje i nadzor kvalitete napona u distribucijskoj mreži po standardu EN 50160 i to od brojnih proizvođača. Obje vrste uređaja se izrađuju kako za srednji tako i za niski napon. Do nedavno su se uređaji za mjerenje i nadzor kvalitete proizvodili u zasebnom kućištu, a danas se počinju proizvoditi i pojavljivati na tržištu kao uređaji integrirani u brojilu električne energije. Danas je uobičajeno da svako složenije elektroničko brojilo bilo kojeg proizvođača ima integrirano mjerilo nekih elemenata kvalitete napona.[3]

Prijenosni i fiksni uređaji u zasebnom kućištu za mjerenje kvalitete napona obično su visoke rezolucije i klase točnosti (tipično 0,2%) opremljeni velikim iznosom memorije tako da podatke mogu sakupljati nekoliko tjedana ili mjeseci poslije čega se trebaju očitovati. Uređaji zahtjevaju poseban prostor za ugradnju u ormarić mjernog mjesta, zahtjevaju napon napajanja kojim ostvaruje vlastitu potrošnju koja ako se ne mjeri posebnim brojilom električne energije, čini dodatni netehnički gubitak u EE mreži, zahtjeva trošak ožičenja, specifičnu komunikaciju za lokalno ili daljinsko očitavanje i specifičan software za naknadnu obradu rezultata. Uređaji mogu biti prenosivi na drugo mjerno mjesto, ali tada nemamo podatke za cijelu godinu na jednom mjestu mjerenja.[3]

Uređaji za mjerenje kvalitete napona integrirani u brojilo električne energije su fiksni i bilježe kvalitetu napona 52 tjedna. Obično su nešto slabije klase (0,5-1%) opremljeni memorijom kao i za bilježenje 15 minutnih opterećenja cca 100 do 300 dana. Uređaj ne zahtjeva dodatni prostor za ugradnju u ormariću mjernog mjesta, ne zahtjeva dodatno napajanje jer koristi postojeću napojnu jedinicu standardnog brojila, ne povećava gubitak električne energije u mreži, ne zahtjeva trošak ožičenja-ugradnje, za obradu podataka nije potreban specijalni software jer je izlazni rezultat mjerila kvalitete napona integriranog u brojilu indikativna veličina (+) ili (-), zadovoljava (kvačica) ili ne zadovoljava (iks) po elementu kvalitete za promatrani tjedan, uz dodatnu brojnu vrijednost razine 95% i 100% mjernih vrijednosti kao na standardnom prikazu koji se koristi i kod prenosivih uređaja.[3]

3. UTJECAJ DISTRIBUIRANE PROIZVODNJE

Uvođenje proizvodnje u distribucijsku mrežu utječe na kvalitetu električne energije na različite načine. Spajanje manje količine distribuirane proizvodnje uglavnom ima lokalne posljedice, dok uvođenjem velike količine distribuirane proizvodnje mogu očekivati posljedice većih razmjera (npr.na prijenosnim razinama).

Sve veći udio distribuirane proizvodnje imat će utjecaje (pozitivne ili negativne) na kvalitetu električne energije.

Emisija poremećaja od strane proizvodnih jedinica može uzrokovati povećanje razine emisije.Ovo se odnosi posebno na harmonike, kolebanja napona i nesimetriju, kao i poremećaje uzrokovane uklapanjem i isklapanjem proizvođača. Emisije distribuirane proizvodnje bit će predmet rasprave u svim sljedećim poglavljima. Uz neke iznimke emisije poremećaja kvalitete električne energije uzrokovane distribuiranom proizvodnjom nisu zabrinjavajuće. Fliker uzrrokovan brzim kolebanjima napona i harmonici do oko 1 kHz spominju se u literaturama uglavnom kao ozbiljni izvori emisija. Međutim emisija ovih harmonika i flikera u većini slučajeva je ograničena. Harmonici pri višim frekvencijama nisu česta tema u literaturi, vjerojatno zbog nedostatka standarda i drugih informacija, ali nekoliko vrsta sučelja za distribuiranu proizvodnju uzrokuje emisije pri ovim višim frekvencijama. Također nekoliko vrsti distirbuirane proizvodnje ima širi spektar od postojeće opreme. Manjak znanja o posljedicama ovoga kazuje da su potrebna daljnja istraživanja.

Veliki jednofazni proizvođači ili mnogi manji jednofazni proizvođači uzrokuju povećanje naponske nesimetrije.

Povećanje snage distribucijske mreže ograničava širenje poremećaja. Utjecaj je drukčiji za različite vrste sučelja i različite vrste poremećaja. Sinkroni strojevi su uglavnom napredniji od ostalih vrsta sučelja. Utjecaj može postati kompliciran za harmonike zbog ovisnosti frekvencije o impedanciji izvora. Smanjenje impedancije izvora pri jednoj frekvenciji ne isključuje povećanje impedancije izvora pri drugoj frekvenciji.

Prebacivanje proizvodnje sa prijenosa na distribuciju smanjuje snagu prijenosne mreže. Ovo uzrokuje širi spektar poremećaja koji proizlaze na prijenosnoj razini ili koji dospiju na prijenosni sustav sa niže razine. Ovo može utjecati na kolebanja napona, na nesimetriju, ili harmonike uzrokovane velikim industrijskim pogonima, također naponskim propadima uzrokovanim kvarovima na prijenosnoj razini. Količina flikera znatno se povećava zbog velikih čeličana u sjevernoj Europi kadgod su lokalne elektrane ispadale iz pogona zbog rada čeličana.

Nekoliko tipova distribuirane proizvodnje spajaju se uz kondenzatore ili kondenzatorske baterije. Također, dugi vodovi na prijenosnoj razini uzrokovat će dodatni kapacitet spojen na mrežu. Ovo povećava rizik od rezonancije pri frekvencijama harmonika i pomaku postojećih rezonancija na niže frekvencije. Rezonancije oko 1 kHz vežu se uz solarne elektrane na kućanstvima. Proračuni indiciraju da se rezonancije mogu očekivati na sedmom harmoniku zobg indukcijskih generatora sa kondenzatorima. Glavna briga su nove rezonancije, moguće čak i na 100 Hz, zbog uvođenja dugačkih vodova na prijenosnim razinama. Rezonancije se također mogu dogoditi i u mreži vjetroparka.

Svi dosad spomenuti utjecaji su neželjeni; čak iako su pozitivni i dalje su neželjeni. Međutim, moguće je koristiti distribuiranu proizvodnju u svrhu poboljšanja kvalitete električne energije. Prisutnost distribuirane proizvodnje može biti korštena od strane mrežnog operatera u svrhu odgađanja ulaganja. Mogući su neki od sljedećih primjera:

Prisutnost distribuirane proizvodnje ima pozitivan utjecaje na određene razine poremećaja. Ovo se odnosi, između ostalih, na propade napona,harmonike i kolebanja napona. Prisutnost izvora napona čini distribucijski sustav jačim i prigušuje neke poremećaje. Lokacija proizvođača može biti odabrana na način da poboljšanje kvalitete napona bude dovoljno za odgodu ulaganja u distributivnoj mreži. Ovo očigledno zahtjeva suradnju između mrežnog operatera i vlasnika proizvodne jedinice.

Napon na terminalima proizvodne jedinice može se kontrolirati aktivnim upravljanjem tokom jalove snage između proizvođača i mreže. Ovo je moguće kada se koriste sinkroni strojevi ili generatori sa sučeljima energetske elektronike. Potonje omogućuje najfleksibilnije i najbrže mogućnosti upravljanja. Korištenjem aktivnog upravljanja, kolebanja napona i naponski propadi mogu biti ublaženi.

Harmoničko izobličenje može biti ublaženo korištenjem naprednih opcija upravljanja koje posjeduju moderni pretvarači energetske elektronike. Pretvarači mogu jednostavno kompenzirati emisiju harmonika prema nižim naponskim razinama korištenjem upravljanja opterećenjem. Pretvarači također omogućuju prigušenje harmoničkih rezonancija i na taj način ograničavaju izobličenje napona pri rezonantnoj frekvenciji.[4]

4. BRZO KOLEBANJE NAPONA

Brze promjene u amplitudi napona nazivaju se naponsko treperenje ili „flikeri“. Najveći problem je taj da izazivaju pojavu zvanu „svjetlosni fliker“ frekvencijskog spektra od 1 do 10 Hz. Fliker je osjećaj neustaljenosti intenziteta svijetla gdje promatrač primjećuje da svijetlo nije stalnog intenziteta tijekom dužeg perioda, ali ne može primjetiti pojedine promjene. Većini ljudi flikeri smetaju čak i kada ih ne mogu primjetiti. Ispitivanja su pokazala da će i neprimjetni flikeri izazvati pojačanu aktivnost u nekim dijelovima mozga. Dugotrajno izlaganje flikerima uzrokovat će umor i glavobolju. Količinu flikera koju uzrokuje kolebanje napona, za standardnu žarulju sa žarnom niti, kvantificirana je „jačinom flikera“, P_{st}, gdje P_{st} = 1 odgovara razini koja izaziva nelagodu 50 osoba od 100 prisutnih.[4]

Svjetlosni fliker ne treba pomiješati sa povremenim promjenama ili propadima u svjetlosnom intenzitetu uzrokovanom naponskim kolebanjem i naponskim propadom. Moguće ih je primjetiti i za naponsko kolebanje i do nekoliko postotaka nazivnog napona, ali nisu stalni i nemaju isti utjecaj kao kontinuirani flikeri. Pojam „kolebanje napona“ i „brze promjene napona“ ponekad se koriste slijedećim značenjima:[4]

- *Kolebanje napona* je neprekidna promjena u amplitudi napona koja može trajati do nekoliko minuta.
- *Brze promjene napona* su brze i stupnjevite promjene u amplitudi napona.

Gönen u ovom kontekstu razlikuje „nagli fliker“ i „sinusoidalni fliker“.[4]

Ne postoje jasne definicije ili ograničenja za ove pojave. Jedina ograničenja tiču se kolebanja napona u trajanju do nekoliko sekundi i brzih promjena napona između dvije razine amplitude napona. Prvo spomenuta ograničenja temelje se na uočljivim svjetlosnim flikerima kod žarulja sa žarnom niti uzrokovana kolebanjima napona. Zamjena žarulja sa žarnom niti drugim vrstama izvora rasvjete koja je započela nedavno u Europskoj uniji i u nekim drugim državama zahtijevat će nova razmatranja ograničenja u promjenama naponske amplitude. Rasprava o ovoj temi još nije zapravo počela, ali postoje jasne naznake da su žarulje bez žarne niti manje osjetljive na flikere od žarulja sa žarnom niti.[4]

4.1. Brza kolebanja kod vjetroelektrana

Brze promjene električne energije uzrokuju kolebanje napona. Ovo je problem onim izvorima čija proizvedena električna energija varira tijekom vremena. To se uglavnom odnosi na vjetroelektrane i fotonaponske elektrane. Proizvodnja vjetroelektrana cijelo vrijeme varira. Razlikujemo tri vremenska okvira:[4]

- Varijacije frekvencije od nekoliko herca uzrokovano dinamikom turbine, rezonancijom tornja i prijenosnim mehanizmom.
- Periodički impulsi snage pri frekvenciji kojom lopatice prolaze toranj, obično oko 1 Hz za veće turbine. Nazivaju se 3p oscilacije za turbine sa 3 lopatice.
- Sporije varijacije izazvane promjenom brzine vjetra.

Postoje naznake da turbine u vjetroparkovima mogu dostići stanje „sinroniziranog rada“, i tako pojačati impulse snage. Uzrok sinkronog rada nije potpuno jasan, ali pretpostavlja se da je zbog interakcije turbina preko mreže. Sinkroni rad se može očekivati samo za lokacije sa otprilike konstantnom brzinom vjetra na koju ne utječu turbulencije uzrokovane terenom. U prošlosti je ovo često spominjan problem, ali od nedavno, rizik od sinkronog rada smatra se vrlo malim.[4]

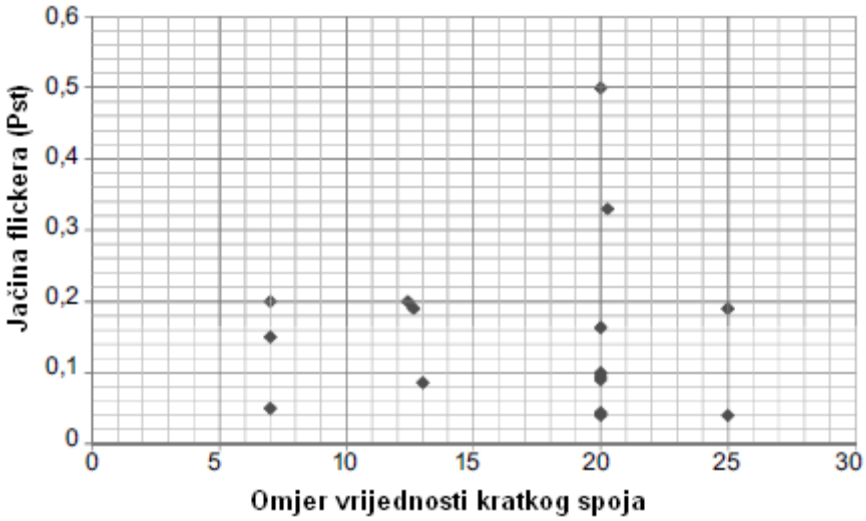
Postoji studija različitih kolebanja u snazi proizvedenoj na vjetroturbini sa fiksnom brzinom gdje su mjerenja izvedena nakon frekvencijskih komponenti, između 0,1 i 10Hz. Slijedeće komponente su pronađene, pored neprekidnog spektra:[4]

- 1,1 Hz kolebanje vezano uz rezonancjiu tornja.
- 2,5 Hz kolebanje vezano uz brzinu vrtnje prijenosa.
- Četiri različite komponente vezane uz rotaciju lopatica: 1p, 2p, 3p, i 6p. 1p kolebanja su uzrokovana neuravnoteženošću rotora i malim razlikama među lopaticama. 3p oscilacije su uzrokovane prolaskom lopatica ispred tornja. 2p i 6p komponente su vjerojatno harmonici 1p i 3p kolebanja.

Za manje turbulencije vjetra (u ovom slučaju vjetra sa mora), ove diskretne komponente dominiraju spektrom. Za velike turbulencije vjetra, kolebanja formiraju neprekidan spektar.

Flikeri dobiveni mjerenjima ili simulacijama koji su uzrokovani vjetroelektranama prikazani su u mnogim publikacijama. Pregled rezultata ovih studija prikazan je na Slici 4.1. Vrijednost flikera prikazana je kao funkcija omjera vrijednosti kratkog spoja (SCR, engl.,

short circuit ratio), što je omjer razine kvara i snage turbine. Većina vrijednosti je ispod 0,2. Dvije iznimke se pojavljuju za vrijednost omjera kratkog spoja 20 i za simulacije. Vrijednost omjera kratkog spoja 20 je često korištena vrijednost u simulacijama. Iz slike se može izvući zaključak da je doprinos vjetroelektrana razini flikera oko 0,2, prilično neovisno o veličini instalacije i razine kvara.[4]



Slika 4.1 Jačina flikera izazvana vjetroelektranama: sažetak mnogih studija[4]

U slučaju nekoliko turbina spojenih međusobno blizu, razina flikera bit će veća nego samo jedne turbine. Prema IEC 61400-21, jačina kratkotrajnog flikera treba biti zbrojena korištenjem slijedećeg izraza:

$$P_{st} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} P_{st,i}^2} \tag{4.1}$$

gdje je $P_{st,i}$ doprinos pojednine turbine. Sa identičnim turbinama, doprinos N jedinica je $\sqrt{N}$ puta doprinos jedne jedinice. Ako je emisija uzrokovana jednom jedinicom jakosti kratkotrajnog flikera jednaka 0,2, razina jednaka 1,0 dobiva se od 25 jedinica. Veliki vjetropark nerijetko sadrži i više jedinica od ovoga. Kao posljedica, emisija flikera izazvana jednom jedinicom, trebala bi biti ispod 0,2 za velike vjetroparkove. Detaljnije informacije u utjecaju velikih vjetroparkova na razinu flikera su rijetke, ali uobičajeno mišljenje je da je u većini slučajeva povećanje razine flikera mala.

4.2. Flikeri kod fotonaponskih elektrana

Varijacije u proizvodnji solarnih elektrana događaju se u raznim vremenskim okvirima, od promjena godišnjih doba do nekoliko sekundi koliko je potrebno oblaku da prođe. Potonji je uzrok brzih kolebanja u naponskoj amplitudi, i moguće da uzrokuje svjetlosni fliker. Mjerenja određenih simulacija nagovješćuju da se za jedan solarni panel, proizvodnja može promijeniti do 50% nazivne snage u vremenu od 5-10 s. Za određeni broj panela raširenih preko nekoliko stotina metara (npr. niskonaponski vod), takve promjene traju 30-60 s.

Obavljena su mjerenja u svrhu određivanja odnosa između jakosti flikera (P_{st}) i kolebanja snage FN elektrane. Mjerenja su izvedena na 101 kW postrojenju, koje se sastoji od 55 pretvarača, 1,8 kW svaki, i za 37 kW instalaciju koja se sastojala od četiri pretvarača od 1,5 kW i četiri od 4,6 kW. Za jednu od instalacija nije pronađena korelacija između jakosti flikera i kolebanja snage, što navodi na zaključak da dominira pozadinska razina. Druga instalacija pokazuje jasno povećanje jačine flikera sa ubrizganom snagom. Razlog je povezan sa upravljačkim sustavom korištenim na inverterima. Svake sekunde obavljeno je mjerenje impedancije mreže nakon kojeg je podešena referentna vrijednost struje na inverteru. Rezultat kolebanja struje unutar 1 Hz je unutar raspona flikera.[4]

4.3. Vrlo kratka odstupanja

U prijašnjim poglavljima se raspravljalo u najbržim varijacijama naponskih amplituda. Pored ovih brzih kolebanja, proizvodnja električne energije distribuirane proizvodnje varira u određenom vremenskom rasponu, od sekundi do godina. Najveća briga na distribucijskoj razini su varijacije u proizvodnji električne energije solarnih i vjetroelektrana u vremenskim rasponima između sekundi i minuta.

Zasad ne postoje ograničenja za varijacije naponske amplitude u vremenskom rasponu od nekoliko sekundi (najsporija varijacija rezultira flikerom) i 1 – 10 min (prosječno vrijeme za varijacije naponske amplitude). Utjecaj takvih varijacija je nepoznat, ali očekuje se da visoke razine varijacija posebno utječu na motore.

Provedena mjerenja iz ovog područja pokazuju da se znatna odstupanja u amplitudi strujedogađaju u vremenskom rasponu od 3 s do 10 min. Ovaj vremenski raspon nije predmet rasprava o kvaliteti električne energije. Izraz vrlo kratka odstupanja (VSV, engl., *very short variations*) uveden je kao način kvantificiranja odstupanja u ovom vremenskom rasponu.

Ovaj indeks je počela koristiti međunarodna radna grupa koja se bavi proučavanjem brzih promjena napona i proširila ga na raspon i kraći od 3 s.[4]

Obavljena su mjerenja vrlo kratkih odstupanja na ograničenom broju lokacija u različitim zemljama. Mjerenja pokazuju dvije komponente u vrlo brzim odstupanjima:[4]

- Neprekidna razina izazvana vrlo malim promjenama amplitude napona koja se događa zbog promjena opterećenja u velikog broja uklapanja i isklapanja malih tereta (nadovezuje se na „neprekidna kolebanja napona“ spomenuta ranije).
- Povremeno povećanje razine uzrokovano brzim i većim promjenama amplitude napona (nadovezuje se na „brze promjene napona“).

Slijedeći kriteriji su zaključeni iz ovih mjerenja:[4]

- 50% 10 minutnih vrlo kratkih odstupanja tijekom jednog tjedna ne smije prijeći 1,0 V.
- 95% 10 minutnih vrlo kratkih odstupanja tijekom jednog tjedna ne smije prijeći 2,5 V.

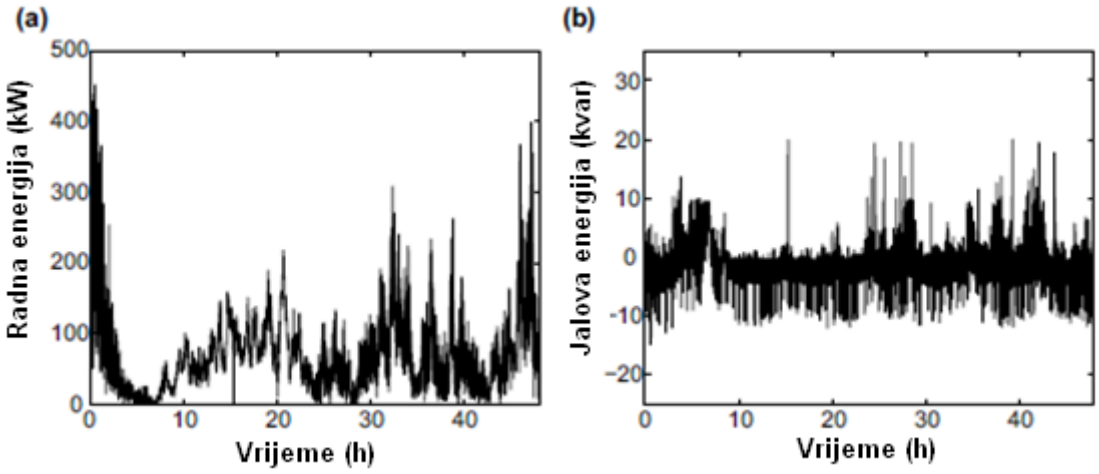
Ovdje je bitno napomenuti da su ovi kriteriji temeljeni na ograničenom broju mjerenja na određenom broju lokacija. Gore spomenute razine su, međutim, zasigurno sigurnosna ograničenja, tako da se mogu koristiti za procjenu donje granice kapaciteta u odnosu na vrlo kratka odstupanja.

Također, iz obavljenih mjerenja na stezaljkama solarne elektrane snage 100 kW koja je spojena na niskonaponsku mrežu vidljiva su vrlo kratka odstupanja struje i napona. Razina kvara u točki zajedničkog spoja sa ostalim korisnicima je 3 MVA sa omjerom X/R oko 0,9. za vrijeme oblačnog dana, kada su odstupanja u zračenju najveća, izmjerena vrlo kratka odstupanja struje su bila do oko 20 A ili oko 25% amplitude struje. Međutim, vrlo kratka odstupanja u naponu bila su gotovo jednaka tijekom dana i noći, sa najvećim vrijednostima do oko 1,5 V.

Za proračun vrlo kratkih odstupanja uzrokovanih distribuiranom proizvodnjom, na primjer, snage vjetra, odstupanja u snazi, VSV_P, i u jalovoj snazi,VSV_Q, moraju se računati odvojeno. Odstupanja u naponu, VSV_V, dobivaju se iz:

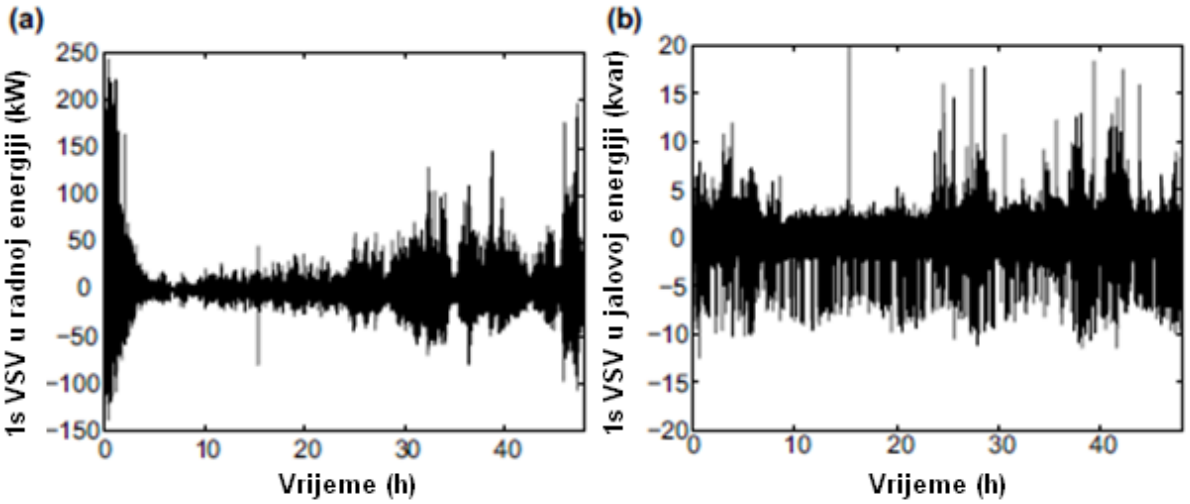
$$VSV_V = \mathrm{R} \cdot VSV_P + \mathrm{X} \cdot VSV_Q \tag{4.2}$$

Mjerenja provedena na grupi od tri 650 kW vjetroturbine, sa izmjenjivačem aktivne energije, korištena su da ilustriraju kolebanja u energiji dobivenoj iz vjetroeletrana u vremenskom rasponu manjem od nekoliko minuta. Radna i jalova energija kao funkcije vremena za jednu turbinu prikazane su na Slici 4.2. Radna i jalova energija dobiju se mjernom opremom svake sekunde tijekom mjerenog perioda, koji je u ovom slučaju nešto duži od 2 dana. Radna snaga pokazuje odstupanja širokog raspona, sporih i brzih odstupanja. Jalova energija je, međutim, blizu nuli, ali sa brzim kolebanjima od 10 – 20 kVAr-a na pozitivnu i negativnu stranu.[4]



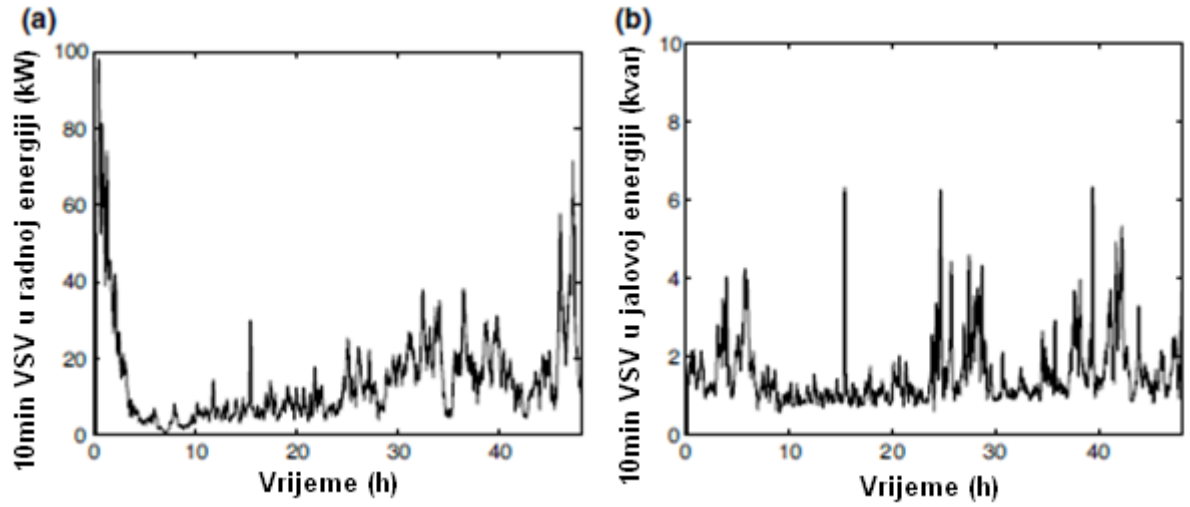
Slika 4.2 Radna energija (a) i jalova energija (b) koju je proizvela turbina snage 650 kW tijekom perioda od 48 h[4]

Za kvantificiranje kolebanja u radnoj i jalovoj energiji u vremenskom rasponu manjem od nekoliko minuta, tzv. „vrlo kratka odstupanja“ proizvodnje radne energije su izračunata. Vrlo kratka odstupanja su prije spomenuta za kvantificiranje odstupanja u amplitudi napona. Važan razlog za uvođenje ovog koncepta je integracija vjetroelektranai drugih obnovljivih izvora energije. Vrlo kratko odstupanje od 1 s je u ovom poglavlju izračunato kao razlika srednje snage u 1 s i srednje snage u 10 min. Potonje je određeno preko prozora oko vrijednosti pri 1 s. Rezultati za jednu turbinu su prikazani na Slici 4.3. Potrebno je primjetiti veliku razliku na apscisi među grafovima: vrlo kratka odstupanja u radnoj energiji su mnogo veća nego u jalovoj energiji. Iz Slike 4.2 je tada moguće zaključiti da se vrlo kratka odstupanja u naponu moguodrediti uglavnom odstupanjima u radnoj energiji.[4]



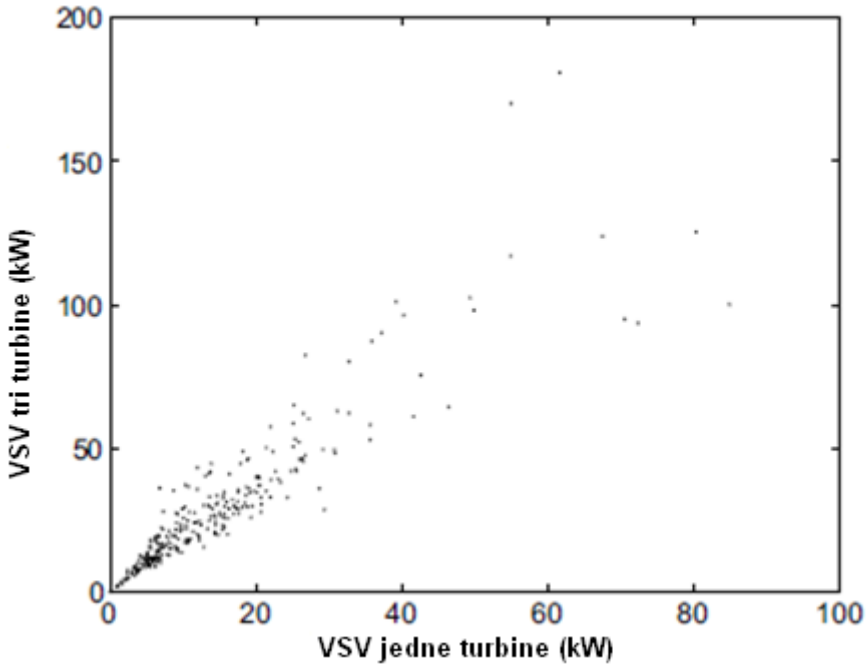
Slika 4.3 Vrlo kratka odstupanja u trajanju 1 s u radnoj energiji (a) i jalovoj energiji (b) koju proizvodi turbina snage 650 kW tijekom 48 h[4]

Vrlo kratka odstupanja trajanja 1 s slijedeća se koriste za računanje vrlo kratkih odstupanja trajanja 10 min. 10 minutna odstupanja su korijen 1 sekundnih odstupanja tijekom 10 minutnog perioda. Rezultat je prikazan na Slici 4.4. Krivulje prikazuju jednaka odstupanja tijekom vremena kao i 1 sekundna odstupanja, ali izglađenija. Vrlo kratka odstupanja su mnogo veća kod radne energije nego kod jalove.



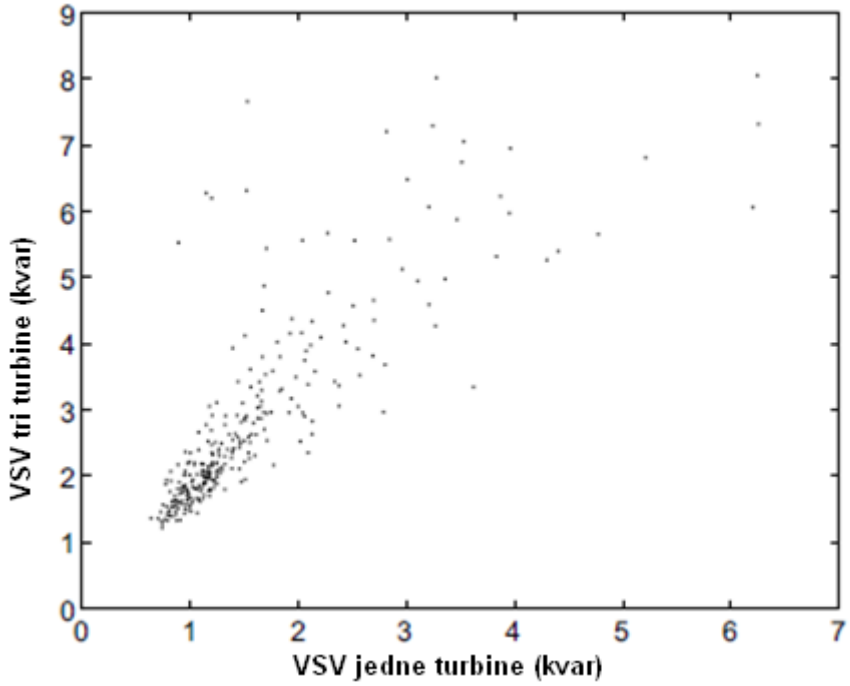
Slika 4.4 10 minutna vrlo kratka odstupanja u radnoj energiji (a) i jalovoj energiji (b) koje proizvodi turbina snage 650 kW tijekom 48 h.[4]

Proizvodnja radne i jalove energije tri turbine zajedno mjerena je u isto vrijeme kao i proizvodnja samo jedne turbine. 10 minutna odstupanja su također računata za sve tru turbine zajedno. Odstupanja u radnoj energiji za jednu tri turbine uspoređene su na Slici 4.5. Odstupanja za tri turbine nešto su niže od dvostruko manja nego za jednu turbinu. Omjer maksimalnih vrijednosti je 1,92, dok je omjer srednjih vrijednosti 1,99.[4]



Slika 4.5 Korelacija između 10 minutnih vrlo kratkih odstupanja u radnoj energiji za jednu i tri turbine[4]

Usporedba za jalovu energiju također je napravljena na Slici 4.6. Korelacija između jedne i tri jedinice manja je nego za jalovu energiju, i najveće vrijednosti za tri jedinice su neznatno veće od onih za jednu jedinicu. Omjer je 1,33 za vršne vrijednosti, a 1,79 za srednje vrijednosti.[4]



Slika 4.6 Korelacija između 10 minutnih vrlo kratkih odstupanja u jalovoj energiji za jednu turbinu u tri turbine[4]

4.4. Raširenost naponskih kolebanja

Naponska kolebanja uzrokovana su kolebanjima radne i jalove energije na stezaljkama generatora. Najveća naponska kolebanja mogu se, međutim, dogoditi negdje drugdje. Za liustraciju ovoga, uzimamo u obzir generator koji opskrbljuje mrežu sa radnom energijom *P* ali u isto vrijeme troši jalovu snagu *Q*. Impedancija izvora je *R + jX*, a napon izvora je *E*. Na „električnoj udaljenosti“ α od generatora, impedancija izvora je *(1 - α)R + j(1 - α)X;*α = 1 se odnosi na izvor napona; a $\alpha = 0$ se odnosi na generator. Tok radne i jalove energije na ovoj lokaciji sastoji se od toka energije na stezaljkama generatora i gubitaka:

$$P(\alpha) = P - \alpha R S^2 \tag{4.3}$$

$$Q(\alpha) = Q - \alpha X S^2 \tag{4.4}$$

gdje je $S^2 = P^2 + Q^2$ kvadrat prividne snage. Sve varijable su izražene u jediničnim vrijednostima gdje je nazivni napon bazni napon. Napon je ovdje približno

$$V(\alpha) = E + (1-\alpha)(RP - XQ) - \alpha(1-\alpha)Z^2S^2 \tag{4.5}$$

gdje je $Z^2 = (R^2 + X^2)$ kvadrat impedancije. Najviši ili najniži napon događa se pri dV/dα = 0, što daje

$$\alpha_{ex} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\frac{RP-XQ}{Z^2S^2} \tag{4.6}$$

Maksimalna vrijednost napona dobiva se supstituirajući (4.6) sa (4.5), rezultirajući slijedećim izrazom:

$$V_{ex} = E + \frac{1}{2}(RP - XQ) - \frac{1}{4}Z^2S^2 - \frac{1}{4}\frac{(RP-XQ)^2}{Z^2S^2} \tag{4.7}$$

Kada su radna i jalova energija na stezaljkama generatora takve da ne utječu na napon stezaljki, $RP - XQ = 0$, najniži napon je postignut električki na pola puta između generatora i izvora, $\alpha = ½$. Ova najniža vrijednost dobiva se supstituirajući $RP - XQ = 0$ sa (4.7):

$$V_{min} = E - \frac{1}{4}\frac{Z^4}{X^2}P^2 \tag{4.8}$$

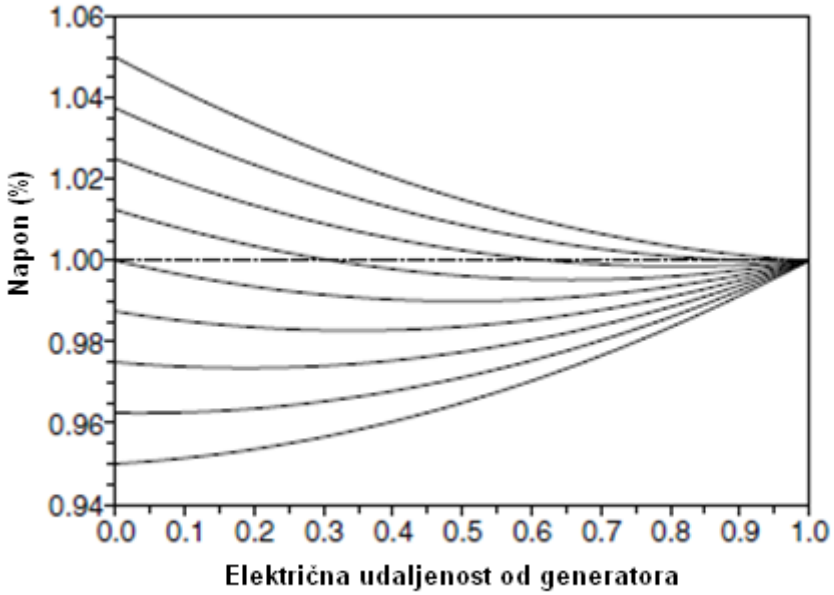
Ovo je važno jer se odnosi na upravljanje naponom generatora ili dodatnom upravljaćkom opremom kao što je SVC, blizu stezaljkama generatora. Moguće je vidjeti da odžavanje napona na stezaljkama generatora konstantnim ne spriječava sva odstupanja napona. Za Rp – XQ > 0, napon na stezaljkama generatora raste i minimum se postiže za α> ½, što znači, pomiče se prema izvoru. Minimalni napon se postiže na izvoru, što znači da napon raste u cijeloj mreži pri

$$RP - XQ > Z^2S^2 \tag{4.9}$$

Na jednak način, za RP – XQ < 0, napon na stezaljkama generatora pada i minimalni napon se dobiva za α< ½, što znači da se pomiče prema generatoru. Minimalni napon se dobiva na stezaljkama generatora, što znači da napon pada svugdje u mreži pri

$$RP - XQ < -Z^2S^2 \tag{4.10}$$

Napon duž voda prikazan je na Slici 4.7. Za velike poraste napona ili padove napona na stezaljkama generatora, ekstremna vrijednost dobivena je na stezaljkama generatora. Međutim, za mali porast ili pad, minimalni napon se postiže dalje u distribucijskoj mreži.[4]



Slika 4.7 Napon duž distribucijske mreže za različite vrijedsnosti porasta napona na stezaljkama generatora. Generator je s lijeve,a izvor s desne strane.[4]

Proračuni koji rezultiraju Slikom 4.7 dobiju se za impedanciju izvora 0,2 jedinične vrijednosti za jednaku prividnu snagu, što znači, za omjer kratkog spoja iznosa 5. Što je veća impedancija izvora, tj. slabija mreža, to je veći pad napona na vodu. Utjecaj generatora na napon može se minimizirati dozvoljavajući mali porast napona na stezaljkama generatora. Posljedica je, međutim, mala tako da čak i u slaboj mreži, kao u Slici 4.7, ne iznosi više od 1% nominalnog napona.

Ti proračuni se mogu ponoviti uzimajući u obzir promjenu napona uzrokovanu promjenama u radnoj i jalovoj energiji. Promjene napona dobijaju se iz (3.5):

$$\Delta V(\alpha) = (1 - \alpha)(R\Delta P - X\Delta Q) - \alpha(1 - \alpha)Z^2(2P\Delta P + 2Q\Delta Q) \qquad (4.11)$$

Maksimum se postiže pri

$$\alpha = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\frac{R\Delta P - X\Delta Q}{Z^2(2P\Delta P + 2Q\Delta Q)} \qquad (4.12)$$

Kada se napon na generatoru održava konstantnim upravljačkim sustavom, RP – XQ je također konstantno. Stoga, Slijedeći izraz sadržava razlike u radnoj i jalovoj energiji:

$$\mathrm{R\Delta P = X\Delta Q} \tag{4.13}$$

Iz (4.11) dobiva se slijedeći izraz za promjene napona uzrokovane promjenama u radnoj energiji:

$$\Delta V(\alpha) = \alpha(1 - \alpha)\frac{Z^4}{X^2}2P\Delta \tag{4.14}$$

Moguće je primjetiti porast promjene napona sa smanjenjem reaktancije voda. Razlog je što sa smanjenjem reaktancije voda, potrebne su sve veće količine jalove energije za kompenzaciju porasta napona uzrokovanog injekcijom radne energije. Prijenos jalove energije vodom uzrokuje promjene napona.[4]

5. NESIMETRIJA NAPONA

Spajanje distribuirane proizvodnje može utjecati na strujnu i naponsku nesimetriju na više načina. Velike jednofazne jedinice ili mnogo nasumično postavljenih malih jedinica uzrokovat će pogoršanjem nesimetriju. Jednofazni proizvođači se nalaze najčešće u niskonaponskim mrežama, u domaćinstvima ili manjim komercijalnim korisnicima. Spajanje trofaznih proizvođača ograničit će nesimetrija napona stvaranjem nisko-impedancijskog puta za inverznu impedanciju (asinkroni i sinkroni generatori) ili stvaranjem uravnoteženog naponskog izvora (pretvarači energetske elektronike). Na prijenosnim i podprijenosnim razinama, pomak iz konvencionalne proizvodnje na distribuiranu proizvodnju može rezultirati povećanjem nesimetrije.[4]

5.1 Slabiji prijenosni sustav

Povećanjem distribuirane proizvodnje manje konvencionalnih proizvođača će biti u pogonu. Rezultat je smanjenje kapaciteta kratkog spoja u prijenosnim i podprijenosnim sustavima. Ista neuravnotežena struja (inverzna) uzrokovat će neuravnoteženiji napon. Dva glavna razloga neuravnoteženog napona na prijenosnoj razini su:

- Neuravnoteženi (netransponirani ili loše transponirani) prijenosni vodovi generiraju inverzan napon čak i kada teče samo direktna struja. Kod dugačkih netransponiranih vodova, može se pojaviti inverzan napon i do 2%.
- Velika jednofazna opterećenja kao što su neke vrste lučnih peći, koriste vrlo neuravnoteženu struju. Brze željeznice se smatraju glavnim izvorom nesimetrije u nekim državama.

Na prvi doprinos manje utječe konvencionalna proizvodnja spojena na sustav.Potonji doprinos obrnuto je proporcionalan razini kvara. Kada se razina kvara prepolovi, nesimetrija napona se udvostruči. Znatno povećanje nesimetrije na prijenosnoj razini se očekuje kada konvencionalne elektrane koje se nalaze blizu velikih jednofaznih tereta rade sa pola snage ili ne rade uopće. Teško je unaprijed predvidjeti za koji će iznos distribuirane proizvodnje ovo biti slučaj. Također treba napomenuti da postoje odstupanja u potrošnji tako da će s vremenom svejedno doći do promjene količine distribuirane proizvodnje spojene na prijenosnu mrežu. Doprinos ovome je pomak od velikih elektrana prema distribuiranoj proizvodnji, ali nije jedini razlog.[4]

5.2 Jači prijenosni sustav

Prisutnost trofaznih proizvođača spojenih na distribucijski sustav izaziva smanjenje indirektnog napona. Inverzna impedancija asinkronih i sinkronih strojeva manja je od 0,2 jedinične vrijednosti. Kada se koristi transformator, njegova impedancija bi se trebala zbrojiti inverznoj impedanciji. Smanjenje nesimetrije je manje u ovom slučaju.

Primjer 5.1 Potrebno je uzeti u obzir niskonaponsku sabirnicu napona 400 V, napajanu preko 200 kVA, 5% transformatora iz 70 MVA srednjenaponske mreže. Razina kvara na niskonaponskoj sabirnici iznosi 3,78 MVA. Ova vrijednost će biti direktna i inverzna vrijednost. 100 kVA asinkroni generator spojen je na istu sabirnicu sa inverznom impedancijom iznosa 0,17 jedinične vrijednosti. Inverzna impedancija izvora nakon spajanja ovog generatora odgovara razini kvara od 4,37 MVA. Povećanje od 16% razine kvara znači oko 14% smanjenje inverznog napona. U ekstremnom slučaju gdje se stroj snage 250 kVA spaja na sabirnicu, Razina kvara povećava se do 5,26 MVA; ukupno povećanje od 39% smanjujući inverzni napon za 28%.

Iz Primjera 5.1 da čak i za velike količine distribuirane proizvodnje, utjecaj na razinu kvara ostaje mala. Ovo vrijedi za generator spojen na glavnu niskonaponsku sabirnicu. Situacija se mijenja kada je jedinica spojena negdje duž voda, udaljena od glavne sabirnice.[4]

5.3 Jednofazni proizvođači velike snage

Spajanje jednofaznog proizvođača velike snage rezultirat će injekcijom direktne, inverzne i nulte struje približno jednakog iznosa. Proizvodnja radne energije P_{gen} i nulte jalove energije daju struju

$$I = \frac{P_{gen}}{U} \tag{5.1}$$

gdje je U fazni napon na mjestu spoja. Ovdje se pretpostavlja da je proizvođač spojen na fazu i nulu. Inverzna struja injektirana od strane jednofaznog proizvođača jednaka je

$$I_2 = \frac{1}{3}I = \frac{P_{gen}}{3U} \tag{5.2}$$

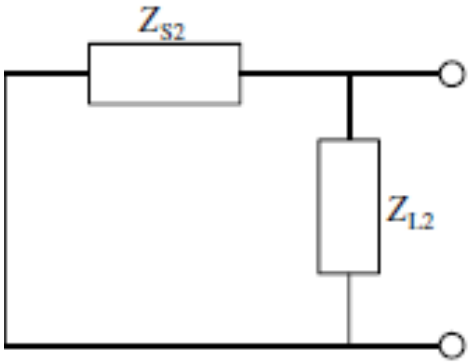
Ova inverzna struja će uzrokovati inveznim naponom, omjer između struje i napona bit će određen inverznom impedancijom Z_2 na mjestu spoja.

$$\bar{U}_2 = \bar{I}_2 \cdot \dot{Z}_2 = \frac{P_{gen} \cdot \dot{Z}_2}{3\bar{U}} \tag{5.3}$$

Inverzna impedancija Z_2 je spojena u paralelu sa impedancijom mreže i impedancijom shunta. Ovo je prikazano na Slici 5.1.

Impedancija Z_{S2} je najviše impedancija distribucijskog transformatora i žica između distribucijskog transformatora i mjesta spoja. Impedancija shunta Z_{L2} većinom je utvrđena inverznom impedancijom tereta u okolini mjesta spoja.

Primjer 5.2 Potrebno je uzeti u obzir jednofaznog proizvođača u prigradskoj mreži proizvodi 10 kW, sa mjestom spoja udaljenog 1 km podzemnim kablom na 400 kVA, 5% distributivni transformator. Impedancija distributivnog transformatora je 20 mΩ. Impedancija podzemnog kabela dugog 1 km pretpostavlja se da je 150 mΩ.



Slika 5.1 Inverzna impedancija gledana od strane jednofaznog tereta[4]

U najgorem slučaju, gdje je napon 90% nazivne vrijednosti (npr. 207 V), inverzni napon iznosi

$$U_2 = 0{,}17\Omega \cdot \frac{10\ kW}{207\ V \cdot 3} = 2{,}74\ V$$

To je 1,3% napona, koristeći stvarni napon (207 V) kao referentni.[4]

5.4 Veliki broj jednofaznih proizvođača

Prisutnost velikog broja jednofaznih proizvođača (npr. do nekoliko kilovata) također uzrokuje povećanje nesimetrije u niskonaponskim mrežama. Primjeri su kućne kogeneracije i krovne fotonaponske elektrane.

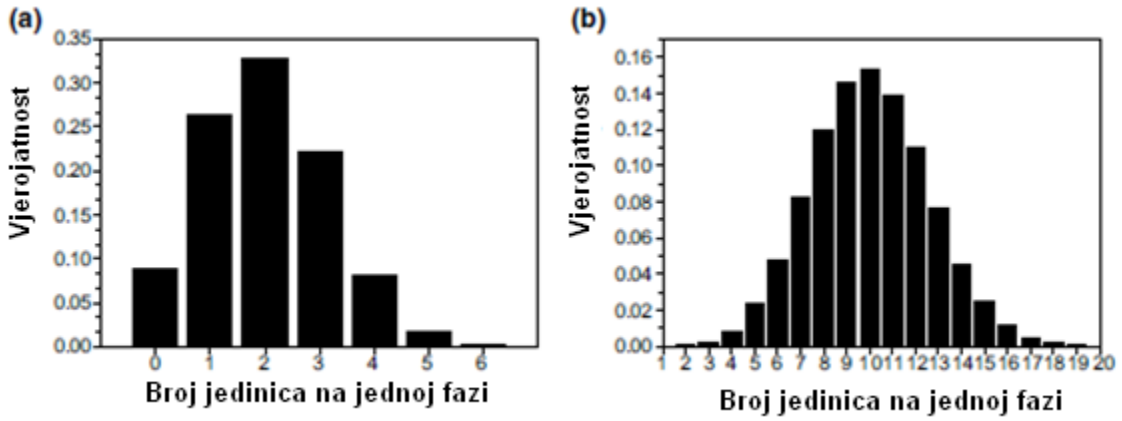
Kada je nekoliko jednofaznih proizvođača spojeno na isti vod, vrlo vjerojatno će biti nasumično raspoređeni po fazama. Povećanjem broja proizvođača smanjuje se vjerojatnost da će sve biti spojene na istu fazu. Za N jedinica, vjerojatnost da će biti svi na jednoj fazi iznosi[4]

$$\Pr(n = N) = \frac{1}{3^{N-1}} \tag{5.4}$$

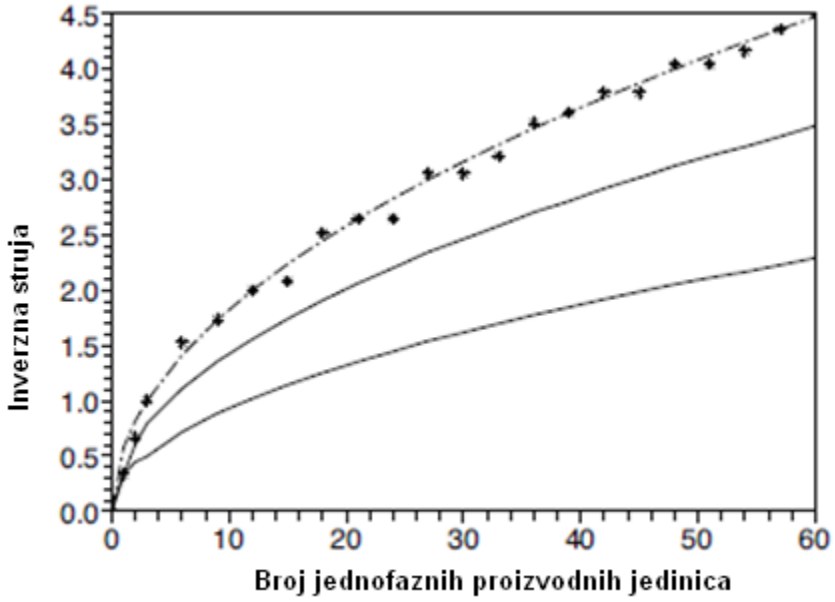
Vjerojatnost da su svi na jednoj specifičnoj fazi, na primjer, fazi A, jednako je jednoj trećini ovoga: $1/3^N$. Za tri jedinice, vjerojatnost da su na jednakoj fazi prema (5.4), jednaka je 11%; za šest jedinica vjerojatnost je 0,4%; a za 9 jedinica vjerojatnost je 0,015%.Velikim brojem malih jednofaznih proizvođača eliminira se potreba za dizajniranjem mreže za situaciju gdje će se sve jedinice naći na jednoj fazi. Međutim, sve jedinice se neće rasporediti jednako po fazama pa svejedno dolazi do neuravnoteženja.

Raspored proizvođača po fazama ilustriran je na Slici5.2. Monte Carlo simulacija učinjena je da se utvrdi vjerojatnost da će se na određenoj fazi naći određeni broj proizvođača. Ovi proračuni su provedeni za ukupno šest spojenih proizvođača na vod i za ukupno trideset proizvođača spojenih na vod. U oba slučaja, 100 000 simulacija je provedeno da bi se procjenila vjerojatnost. Za šest proizvođača, broj jedinica spojenih na jednu fazu varira sa 95 % sigurnošću od 0 do 4. Za trideset jedinica, ovaj broj varira od 5 do 15.[4]

Povećanjem broja jednofaznih proizvođača, dolazi do porasta inverznih struja. Potrebno je napomenuti da nesimetrija struje (omjer inverzne i direktne struje) se smanjuje povećanjem broja jedinica. Mreži je bitan apsolutna vrijednost inverzne struje jer određuje inverzni napon. Koristeći gore spomenutu Monte Carlo simulaciju, može se izračunati funkcija raspodjele vjerojatnosti inverzne struje. Iz ove raspodjele, izračunate su i plotane u Slici 5.3 prosječna vrijednost, standardna devijacija i 95 posto (vrijednost nije prijeđena u 95 % slučajeva).



Slika 5.2 Funkcija raspodjele vjerojatnosti broja proizvodnih jedinica na jednu određenu fazu, za ukupno 6 jedinica (a) i za ukupno 30 jedinica (b)[4]



Slika 5.3 Inverzna struja uzrokovana povećanjem broja jednofaznih proizvodnih jedinica[4]

Primjer 5.3 Ukupno 30 jednofaznih jedinica spojeno je na trofazni vod, od kojih svaka konzumira 500 W, pri 230 V. Izmjerena struja na jednoj jedinici iznosi 2,17 A. Iz slike moguće je pronaći vrijednosti za inverznu struju:

Srednja: 1,62 · 2,17 = 3,5 A

Srednja plus standardna devijacija: 2,47 ·2,17 = 5,4 A

95 postotna: 3,06 · 2,17 = 6,6 A

6. NISKOFREKVENTNI HARMONICI

Distribuirana proizvodnja ne proizvodi potpuno sinusoidalni valni oblik struje, kao i većina uređaja. Harmonici injektirani u distribucijsku mrežu uzrokovat će izobličenje napona. Međutim, emisija distribuirane proizvodnje manja je nego većina modernije opreme prosječnog potrošača, tako da će povećanje izobličenja napona biti neznatno i rijetko će predstavljati problem. Ovo će posebice biti slučaj sa frekventnim komponentama koje su tradicionalno bile dominantne u elektroenergetskim sustavima: harmonici 5, 7, 9, 11, 13, 17, 19, itd., kao i 3, 9, i 15 pri niskom naponu. Prisutnost distribuirane proizvodnje može, međutim, uzrokovati znatan porast razine frekventnih komponenti koje su tradicionalno bile male, čak i harmonici, trojni harmonici višeg reda i međuharmonici. Dozvoljene razine ovih komponenti frekvencije su bile niske tako da je kapacitet isto ponekad bio nizak. Također, ove frekvencije su bile korištene za komunikaciju preko pojnog voda (PLC, engl., *Power Line Communication*), zato što su razine poremećaja ovdje bile niske. Povećanje distribuirane proizvodnje bi ,stoga, moglo izazvati smetnje sa PLC-om. Interakcija između nove opreme i PLC-a je, međutim, kompliciranija, ovisno o razini izobličenja.

Emisije harmonika distribuirane proizvodnje su niske za frekvencije koje su dosad bile zabrinjavajuće vezano uz harmonike (treći, peti, sedmi, do oko 1 kHz). Napravljena je procjena kapaciteta kada je harmoničko izobličenje napona ograničavajući faktor. Pretpostavljeno je maksimalno izobličenje napona od 3% (po harmoniku), po IEEE standardu 519. Nadalje je pretpostavljeno da je emisija proizvodne jedinice jednaka ograničenju u IEEE standardu 519 sa velike potrošače (omjer kratkog spoja 20). Tri uobičajena srednjenaponska voda različite duljine su uzeta u obzir. Napravljena je razlika između proizvođača jednako raspoređenih duž voda, koncentrirajući se na kraj i početak voda. Prva ograničenja su dostignuta za trojne harmonike. Očekivani su visoke razine naponskih harmonika na dugim vodovima kada je proizvodnja bila koncentrirana prema kraju voda.

Pri interpretiranju Tablice 6.1, treba imati na umu da nigdje nije korištena stvarna emisija distribuiranih proizvođača tijekom analize. Umjesto toga, jednostavno je pretpostavljeno da je emisija bila jednaka ograničenju postavljenom IEEE standardom 519 za velike potrošače. Bez daljnjih informacija o stvarnim emisijama teško je znati jesu li ova ograničenja konzervativna ili nisu. Međutim, ako mrežni operator nametne IEEE standard 519 na proizvodne jedinice, rijetko će doći do visokih razina harmonika izazvanih distribuiranom proizvodnjom.

Tablica 6.1 Emisije harmonika iz distribuirane proizvodnje: sažetak različith izvora[4]

Oznaka izvora	Opis	THD(%)	Pojedini harmonici
31	37 i 110 kW fotonaponska elektrana	3.5	
109	30 kW vjetroturbina sa kond. baterijama	5-6	
133	800 kW vjetroturbina	1	Do 0,4% za 3, 5, 7, 11, 13 i 16
149	650 kW puni pretvarač		4% na 29 i 31
222	Izmjenjivač uobičajen za kogeneraciju	3-6	1,5% treći, peti i sedmi
257	30 kW vjetroturbina	1.5-4	
277	DFIG		1% slot harmonici; 3% pri 220, 250, 320, i 350 Hz
279	660 kW asinkroni stroj	6-7	
399	Vjetroturbina sa punim pretvaračem		1,6% peti harmonik, 0.6 sedmi harmonik

6.1 Snage vjetra: asinkroni generatori

Također su obavljena mjerenja koja prikazuju emisije harmonika 30 kW-ne vjetroturbine sa kondenzatorskom baterijom. THD struje je između 5% i 6% za harmonike 5, 11 i 13 koji su dominantni. Izobličenje struje mjeri se između mreže i kondenzatorske baterije. Glavni harmonici su vjerojatno uzrokovani kondenzatorskom baterijom. Harmonička izobličenja napona su bila oko 2,5% blizu kondenzatorske baterije, gdje je peti harmonik bio daleko najdominantniji.

Mjerenja harmonijske emisije vjetroturbine snage 30 kW u laboratorijskim uvjetima pokazuju THD između 1,5% i 4% za struju prema vjetroturbini. Harmonijsko izobličenje povećava se od 1,5% kad nema vjetra do 4% kad vjetar ubrza na oko 12 m/s.

Obavljena su i mjerenja za harmonike u statorskoj i rotorskoj struji duplo napajanog asinkronog generatora (DFIG, engl., *double-fed induction generator*). Prema tim mjerenjima, frekvencija uklapanja i isklapanja pretvarača je prilično visoka, tako da ovi harmonici ne spadaju o ovaj frekvencijski spektar. Zanimljivo zapažanje ovoga rada je prisutnost

takozvanih „slot harmonika“ u struji statora do kojih dolazi zbog ograničenog broja slotova u asinkronom stroju.

Tablica 6.2 Tipične harmoničke struje izazvane asinkronim motorom[4]

Frekvencija (Hz)	Struja (% nazivne)	Uzrok
20	3	Neuravnoteženost polova
40	2.4	Neuravnoteženost faza rotora
50	100	Nazivna
80	2.3	5. i 7. harmonik
220	2.9	5. i 7. harmonik
320	3	11. i 13. harmonik
490	0.3	11. i 13 harmonik
590	0.4	

6.2 Proizvođači sa sučeljima energetske elektronike

Odrađene su simulacije emisija harmonika uzrokovanih različitim uzorcima prekidanja sa pretvaračem izvora napona. Modelirna je jedinica snage 650 kW spojena na 6 kV. Prikazana su izobličenja napona do 40. reda. Za histerezno upravljanje, najveće izobličenje (oko 1,2%) događa se za 40. harmonik. Širok spektar emisija vidljiv je od 20. reda na više. Spektar jasno pokazuje rastući trend prema višim frekvencijama, ali nažalost prikazani su samo harmonici do 40. reda. Pošto je maksimalna frekvencija prekidanja 5 kHz, očekuje se da će emisije preko 40. reda biti još više. Za sinusoidalni PWM (sa frekvencijom prekidanja 1,5 kHz), harmoničko naponsko izobličenje je najveće (oko 4%) na 29. i 31. redu, što je blizu frekvencije prekidanja.[4]

Također su obavljena mjerenja harmoničkog izobličenja invertera za kakvog se očekuje da će biti tipičan za buduće fotonaponske elektrane ili kogeneracijske instalacije. Drugi harmonik, sa 3% je najveći; harmonici 3, 5, i 7 su oko 1.5% dok je 9. harmonik tek ispod 1%. Visoka razina drugog harmonika veže se uz visoko izobličenje pregledne tablice koja se koristi za generiranje referentnog sinusnog vala.

Međuharmonici uzrokovani pretvaračima energetske elektronike događaju se uglavnom zbog frekvencija koje se događaju na na stani pretvarača suprotnoj od one gdje je mreža. Spoj dvije strane pretvarača najjači je kod ciklokonvertera, ali čak i dva pretvarača

spojena DC vezom prenijet će frekventne komponente. Rezonancije u DC vezi mogu čak pojačati određene međuharmoničke frekvencije. uzimajući u obzir šestopulsni ulaz kao i izlazni stupanj (uobičajena konfiguracija) rezultira spektrom gdje su slijedeće frekvencije prisutne:[4]

$$f = (6m \pm 1)f_{in} \pm 6nf_{out} \tag{6.1}$$

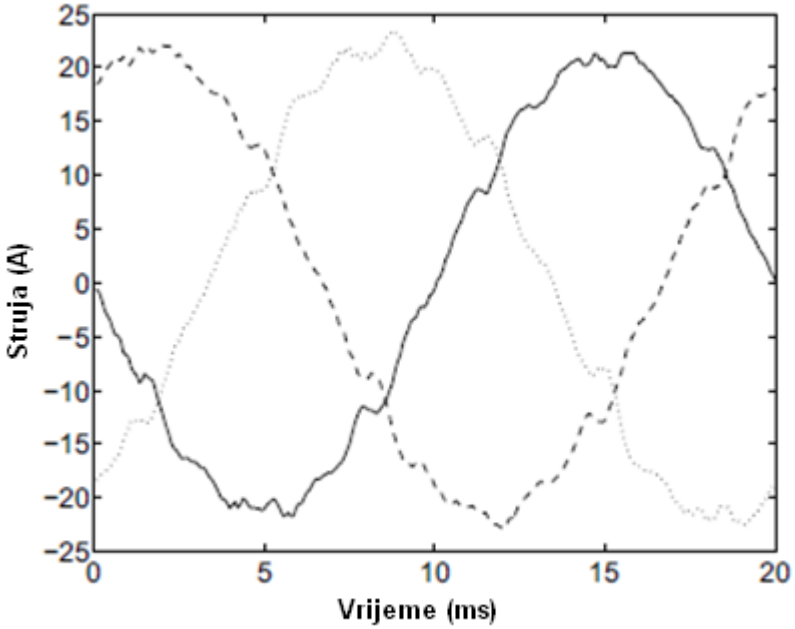
gdje je f_{in} frekvencija mreže, f_{out} je frekvencija strane gdje nije mreža, n = 0, 1, 2,…, i m = 1, 2,…. Ulazni spektar sadrži karakteristične harmonike frekvencije elektroenergetskog sustava (5., 7., 11., 13., itd.). Primjeri malih proizvodnih jedinica koje mogu voditi međuharmonicima su vjetroturbine (dvostruko napajane ili sa DC vezom) i mikroturbine. Postoje indikacije da aktivni pretarači energetske elektronike (IGBT ili GTO) generiraju više neprekidan spektar nego postojeći pretvarači energetske elektronike. Ovo će uzrokovati više međuharmonika i povećan rizik od jakog izobličenja uzrokovanog rezonancijama.[4]

6.3 Sinkroni generatori

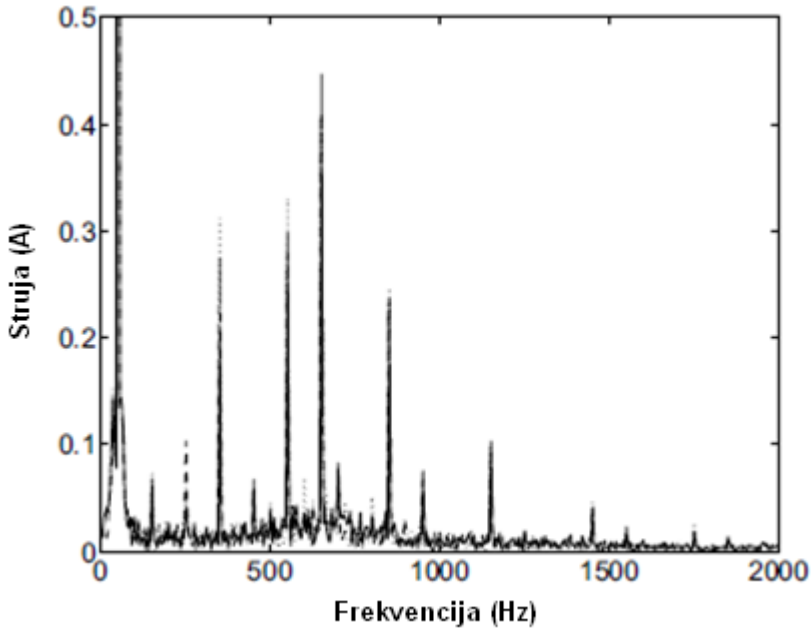
Pri korištenju sinkronih generatora, njihov dizajn bi trebao biti takav da stvaraju malo izobličenja 3. harmonika. Niskonaponski sustav je gotovo kratki spoj za treće harmonike, koji može izazvati velike struje trećeg harmonika kod standardnih sinkronih generatora (gdje su potpuno smanjene komponente 5. i 7. harmonika). Standardan način namatanja sinkronih strojeva relativno velike napone trećeg harmonika: oko 10% nazivne komoponente, gdje su naponi 5. i 7. harmonika oko 1%. Kako komponenta trećeg harmonika ima nulti karakter, prenosi se kroz transformator generatora spoja zvijezda – trokut. Međutim, kod spajanja rotirajućeg stroja direktno na niskonaponsku mrežu (npr. bez transformatora) ili preko transformatora spoja zvijezda-zvijezda, izobličenje trećeg harmonika može se raširiti sustavom. Visoka penetracija takvih generatora može dovesti do značajnih struja kroz nulte vodiče i namote spojene u trokut u niskonaponskim i srednjenaponskim mrežama.[4]

6.4 Primjer mjerenja

Mjerenja su izvedena na određenom broju vjetroturbina u sjevernoj Švedskoj. Spektar je proračunat za struje mjerene na tri turbine snage 600 kW sa pretvaračem. Mjerenja su izvedena na 10 kV strani struja sve tri turbine odjednom. Valni oblik tijekom 20 ms perioda prikazan je na Slici 3. 11. Spektar dobiven primjenom 200 ms četvrtastog prozora prikazan je na Slici 5.1.



Slika 6.1 Struja tri vjetroturbine snage 600 kW sa pretvaračem[4]

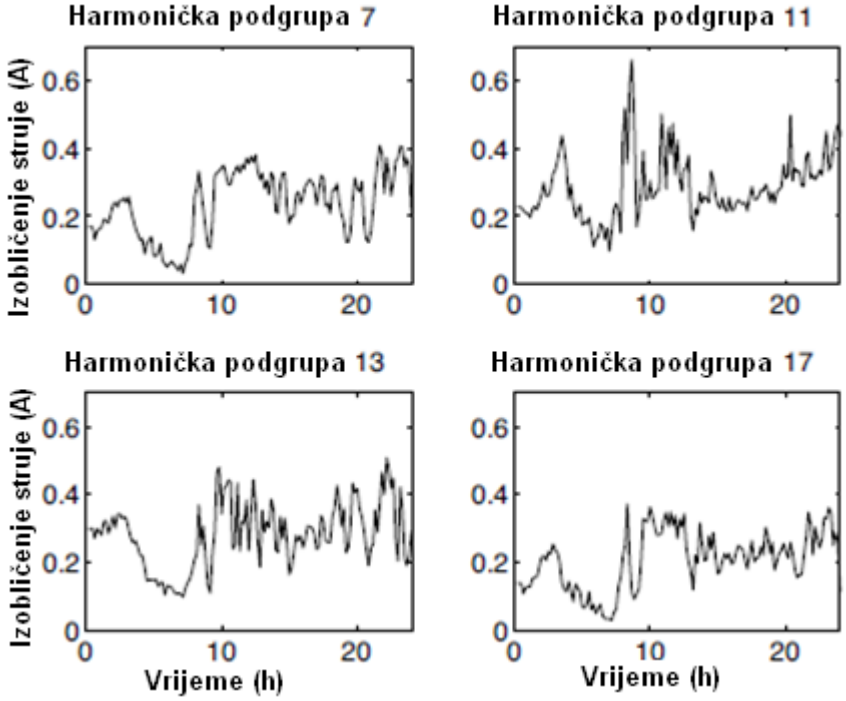


Slika 6.2 Spektar struja grupe od tri vjetroturbine snage 600 kW sa pretvaračem[4]

Spektar prikazuje dominantnu komponentu pri 50 Hz (14,9, 15,2, i 15,4 A u fazama A, B i C, daleko višlje od gornjeg limita vertikalne skale), pokraj koje je nekoliko diskretnih harmonika. Najveći diskretni harmonici su reda 13 (650 Hz), 11 (550 Hz), 7 (350 Hz), i 17 (850 Hz). Vidljivi su neki diskretni harmonici , ali najvažnije svojstvo spektra je širokopojasna emisija koja pokriva cijeli frekvencijski spektar sa maksimumom negdje oko

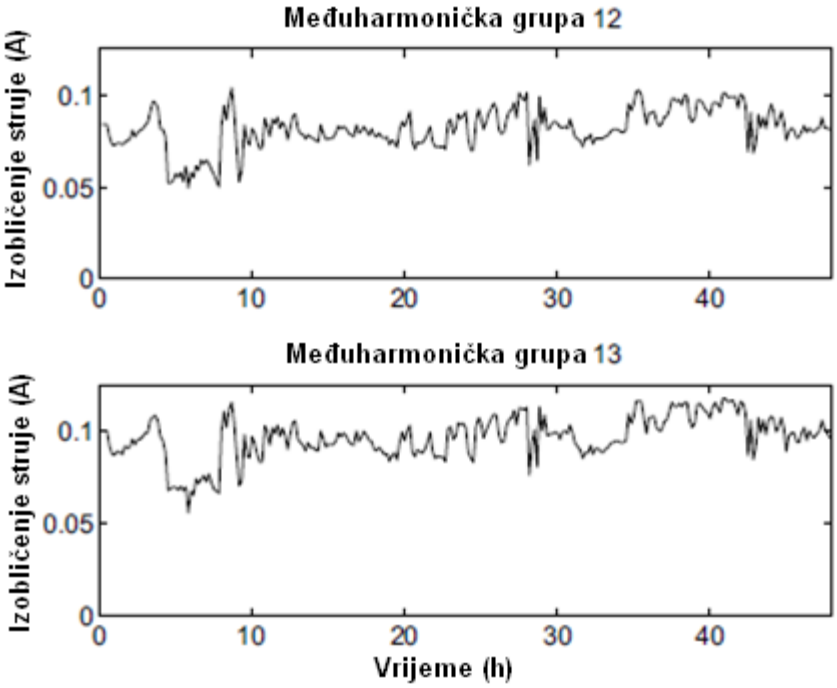
700 Hz. Ovaj širokopojasni spektar se nastavlja i dalje od 2 kHz sa drugim maksimumom oko 4 kHz.

Odstupanja tijekom vremena ova 4 dominantna harmonika prikazana su na Slici 6.3 za 24 satni period. Na slici ne vidimo samo da harmonička izobličenja odstupaju s vremenom nego i da se cijeli spektar mijenja. Ne dominira uvijek isti harmonik. 13. harmonik je najveći većinu vremena, ali 11. ima najviše vrijednosti sveukupno gledano.



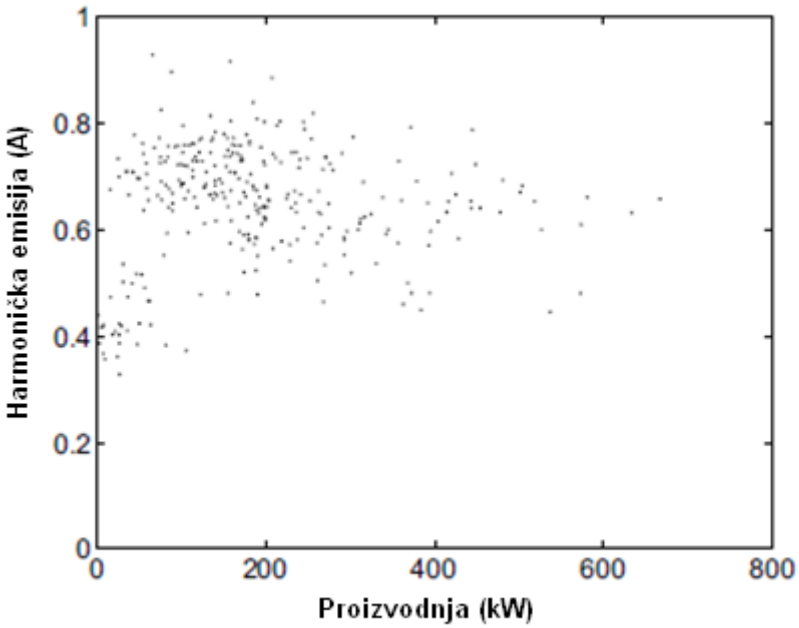
Slika 6.3 Harmoničko izobličenje za grupu od tri vjetroturbine kao funkcija vremena: harmoničke podgrupe 7, 11, 13, i 17.[4]

Dvije najjače međuharmoničke podgrupe su prikazane kao funkcija vremena na Slici 6.4. Međuharmoničke podgrupe predstavljaju širokopojasni spektar vidljiv na Slici 6.2. Dva međuharmonika su snažno korelirani. Također, ostale međuharmoničke podgrupe variraju s vremenom na sličan način.



Slika 6.4 Harmoničko izobličenje za grupu od tri vjetroturbine kao funkcija vremena: međuharmoničke podgrupe 12 i 13[4]

Harmonička emisija pokazuje samo manje odstupanje kod varijacija proizvodnje električne energije. Ovo je ilustrirano na Slici 6.5 gdje vertikalna skala pokazuje efektivnu vrijednost harmoničkom izobličenja, što je, korijen sume kvadrata svih harmoničkih komponenti. Rezultat se dobije kada se koristi THD, gdje je korijen sume kvadrata podijeljen sa osnovnom komponentom struje. Pošto je potonje malo kada je proizvodnja niska, rezultat su visoke vrijednosti THD-a. Gledano od strane mreže, važna je „emisija u amperima“.[4]



Slika 6.5 Korelacija između proizvodnje vjetroelektrane i harmoničkih emisija[4]

7. UTJECAJ SUNČANE ELEKTRANE ETFOS 1, NA DISTRIBUCIJSKU MREŽU HEP ODS-a DP „ELEKTROSLAVONIJA“ OSIJEK

7.1 Tehnički opis

U ovome dijelu rada razmatrat će se snimanje kvalitete napona i električne energije na priključku sunčane elektrane ETFOS 1, na adresi Kneza Trpimira 2b, Osijek. Elektrana se nalazi na krovu zgrade FERIT-a. Ukupna priključna snaga sunčane elektrane ETFOS 1 je 12 kW.

Kvaliteta napona mjerena je prije i nakon priključenja fotonoaponske elektrane, a uređaj za mjerenje bio je spojen u niskonaponskom priključnom ormariću,u kojem je izveden spoj fotonoaponske elektrane ETFOS 1 s distribucijskom mrežom.

Mjerenje kvalitete napona izvodi se trofaznim mrežnim analizatorom Fluke 1745. Gore spomenuti analizator mjeri kvalitetu električne energije prema normi HRN EN 50160:2012, *Naponske karakteristike električne energije iz javnog distribucijskog sustava* (EN 50160:2010) u klasi točnosti A prema zahtjevima norme IEC 61000-4-30.

Mjerenja se izvode u razdoblju od dva tjedna, od 24.04.2014. u 11:30:00 sati do 01.05.2014. u 11:30:00 sati (snimanje kvalitete prije priključenja elektrane) te od05.05.2014.u12:40:00 satido12.05.2014. u 12:40:00 sati(snimanje kvalitete nakon priključenja elektrane).

Fluke 1745 je mjerni instrument za analizu kvalitete mreže i mjerenje svih električnih veličina u mrežama niskih, srednjih i visokih napona. Mjeri tri napona i četiri struje i može se konfigurirati za više različitih mjernih funkcija. Izmjerene vrijednosti spremaju se u programiranim vremenskim razmacima. Povezane s PC-om one se mogu grafički ili numerički prikazati.

Tablica 7.1. - Osnovni opis mjernih funkcija analizatora Fluke 1745.

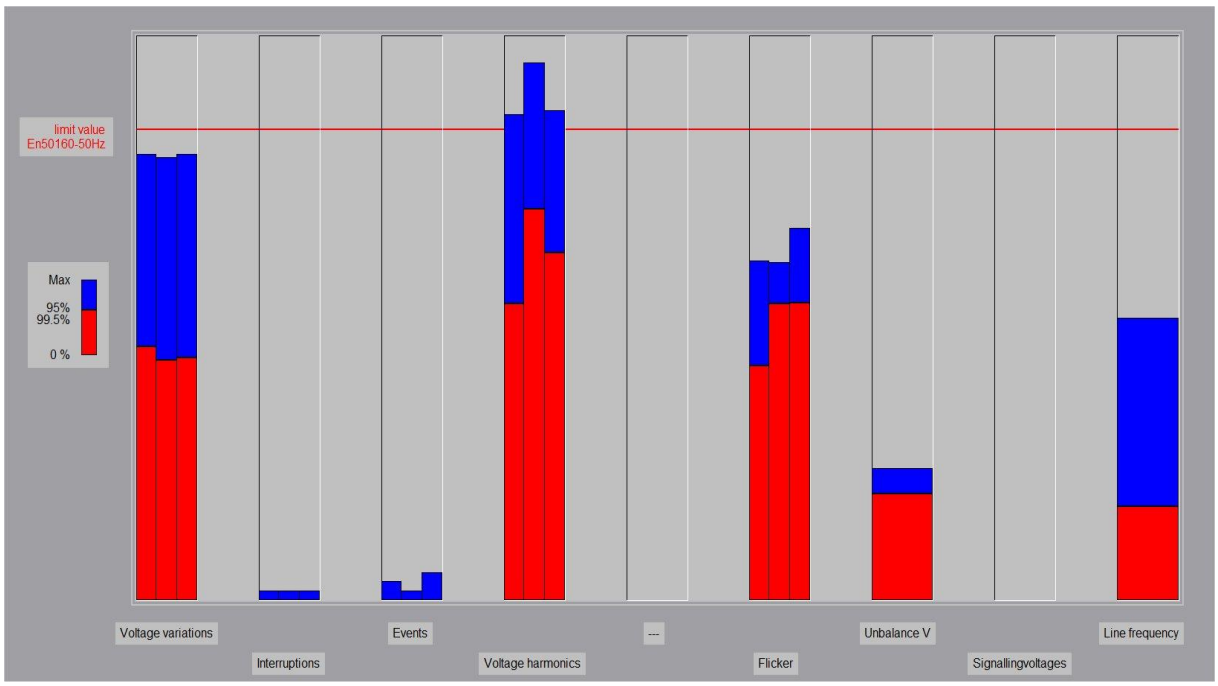
Mjerna veličina	A Kvaliteta i snaga
Napon (Srednja, maksimalna i minimalna vrijednost)	●
Struja L1, L2, L3 (Srednja, maksimalna i minimalna vrijednost)	●
Struja nulvodiča (Srednja, maksimalna i minimalna vrijednost)	●
Promjene napona (Padovi, prekoračenja, prekidi)	●
Snaga (P, |P|, Q, S, Srednja, maksimalna i minimalna vrijednost, faktor snage)	●
Zbroj snaga - ukupna snaga (P, |P|, Q, S, Srednja, maksimalna i minimalna vrijednost, faktor snage)	●
Energija	●
Fliker (Pst, Plt)	●
Naponi harmonika	●
THD U	●
THD I	●
Vršni faktor (crestfaktor)	●
Naponski međuharmonici	●
Signalni naponi	●
Nesimetrija	●
Frekvencija	●

7.2 Rezultati mjerenja

7.2.1 Prvi mjerni tjedan,od 24.04.2014. do 01.05.2014.

Na slikama 7.1 do 7.5 prikazane su vrijednosti pokazatelja kvalitete električne energije prema normi HRN EN 50160. Odnosno, prikazana je maksimalna vrijednost tijekom tjedna (plavo na Slici 7.1) i 95% vrijednosti tijekom tjedna (crveno na Slici 7.1) Izuzetno, kod pogonske frekvencije prikazana je 99,5 % vrijednost.

Slika 7.1 prikazuje sve pokazatelje kvalitete napona. Na slici je lako uočljivo da su svi pokazatelji osim naponskih harmonika unutar norme. S obzirom da graničnu liniju norme nadvisuju samo plavi stupci zaključujemo da su mjerenja zadovoljavajuća s obzirom na normu HRN EN 50160.



Slika 7.1. Sumarni prikaz pokazatelja kvalitete prije priključenja FN elektrane.

Na slici 7.2 može se vidjeti da je u mjernom tjednu zabilježeno ukupno 18 naponskih događaja, odnosno 12 naponskih propada i 6 prekida opskrbe.

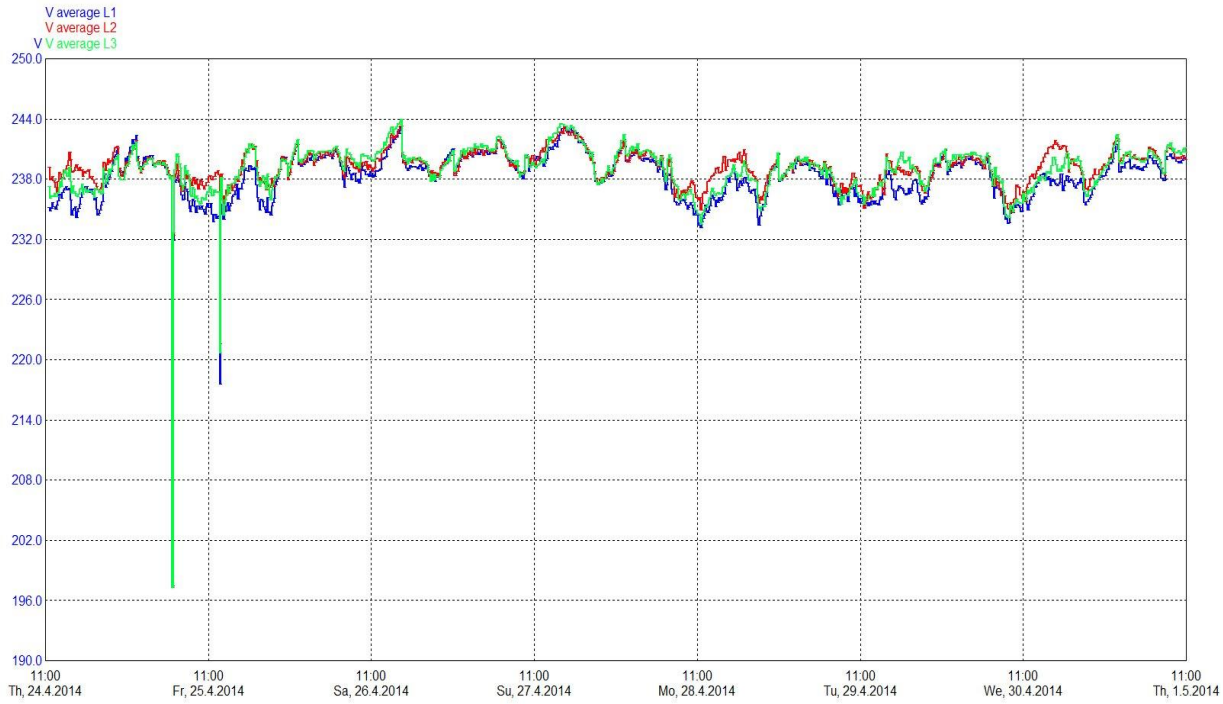
Phase L1, L2, L3	< 20 ms	20...< 100 ms	100...< 500 ms	0.5...< 1 s	1...< 3 s	3...< 20 s	20...< 60 s	>= 1 min
Swell > 10.00%								
Dip > 10.00%								
10...< 15 %	3	2						
15...< 30 %	2	4						
30...< 60 %		1						
60...< 99 %								
Interruption								6

Recording as events from -10.00 / +10.00% of the nominal voltage
Dip according to UNIPEDE measurement guide

Number of swells	0
Number of Dips	12
Number of short interruptions (<3 min)	3
Number of long interruptions (>=3 min)	3
Number of interruptions	6
Total events and interruptions	18
Total number of allowed events	100
Total number of allowed interruptions	100

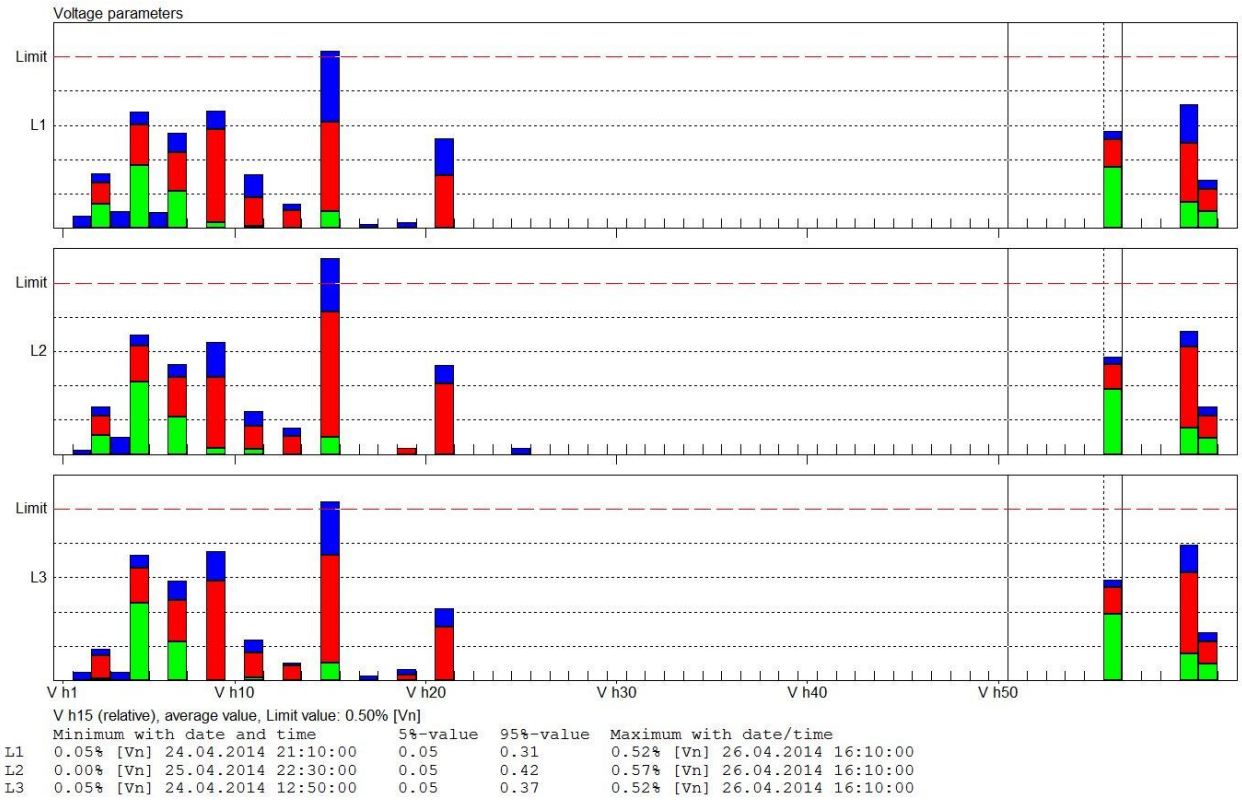
Slika 7.2. Prikaz naponskih događaja, prije priključenja FN elektrane.

Slika 7.3 prikazuje da su srednje 10-minutne efektivne vrijednosti napona za vrijeme normalnog pogona unutar ograničenja norme EN 50160 (granice su 207 V i 253 V), a većina snimljenih 10-minutnih vrijednosti kreće se između 233 V i 244 V. Na slici je moguće vidjeti niske vrijednosti napona 25. 04. 2014. oko 5:50. Također je vidljiva niska vrijednost napona 25.04.2014. oko 12:43, što je posljedica zabilježenog kratkotrajnog prekida opskrbe u sve tri faze i naponskih propada u fazi L3.



Slika 7.3. Srednje 10-minutne efektivne vrijednosti napona prije priključenja FN elektrane.

Slijedeća slika nam prikazuje naponske harmonike. Već smo spomenuli da one prelaze dozvoljeni iznos propisan normom. Na slici vidimo da se radi o 15. harmoniku. Ipak, pošto se radi o 100 postotnoj vrijednosti tjedna vrijednosti su unutar norme.

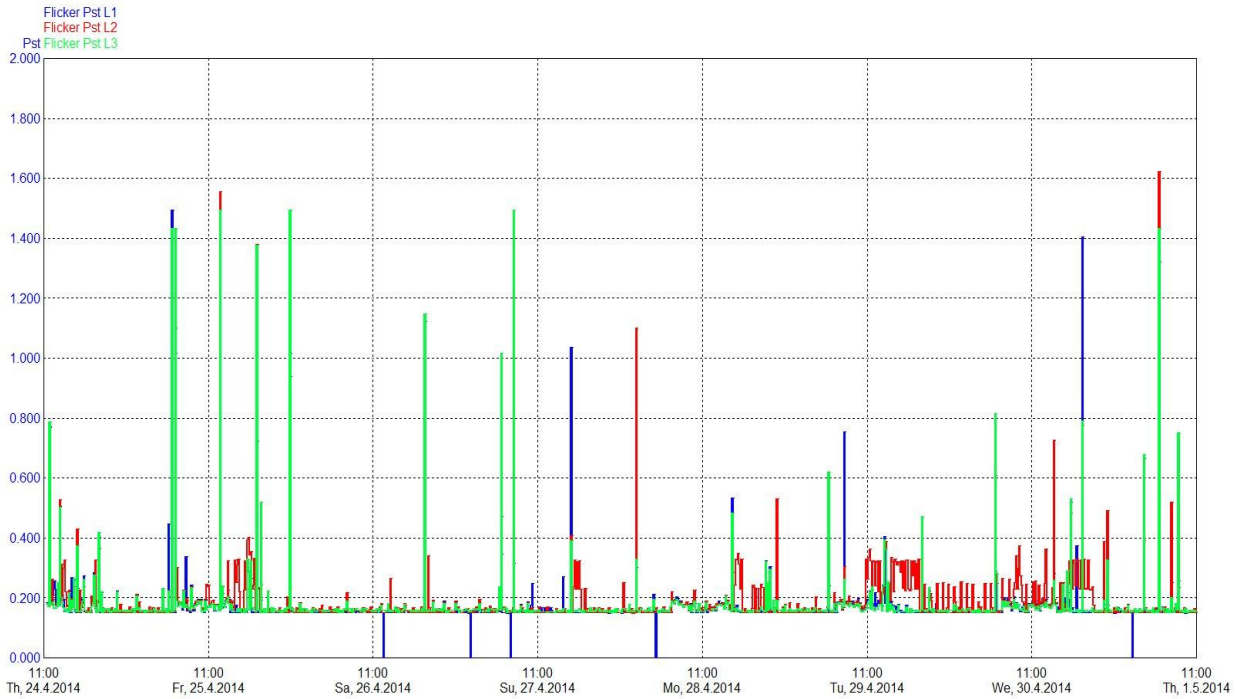


V h15 (relative), average value, Limit value: 0.50% [Vn]

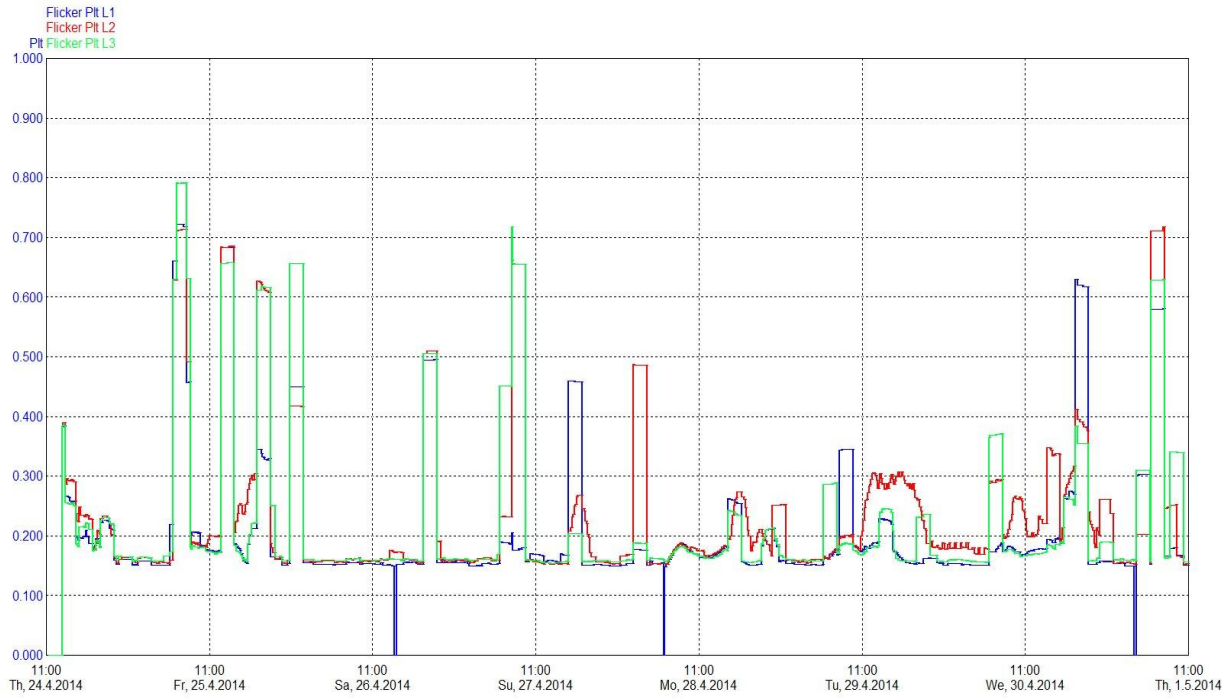
	Minimum with date and time	5%-value	95%-value	Maximum with date/time
L1	0.05% [Vn] 24.04.2014 21:10:00	0.05	0.31	0.52% [Vn] 26.04.2014 16:10:00
L2	0.00% [Vn] 25.04.2014 22:30:00	0.05	0.42	0.57% [Vn] 26.04.2014 16:10:00
L3	0.05% [Vn] 24.04.2014 12:50:00	0.05	0.37	0.52% [Vn] 26.04.2014 16:10:00

Slika 7.4. Naponi viših harmonika snimljeni prije priključenja FN elektrane.

Na slici 7.5. mogu se vidjeti vrijednosti kratkotrajnog naponskog treperenja (flikera) prije priključenja FN elektrane. Premda je u mjernom tjednu zabilježeno preko deset prekoračenja granične vrijednosti P_{st} = 1, vrijednosti dugotrajnih flikera (koji se i razmatraju u normi) u potpunosti su u granicama norme EN 50160, što se može vidjeti na slici 7.6.



Slika 7.5.Kratkotrajno naponsko treperenje (flikeri) prije priključenja FN elektrane.

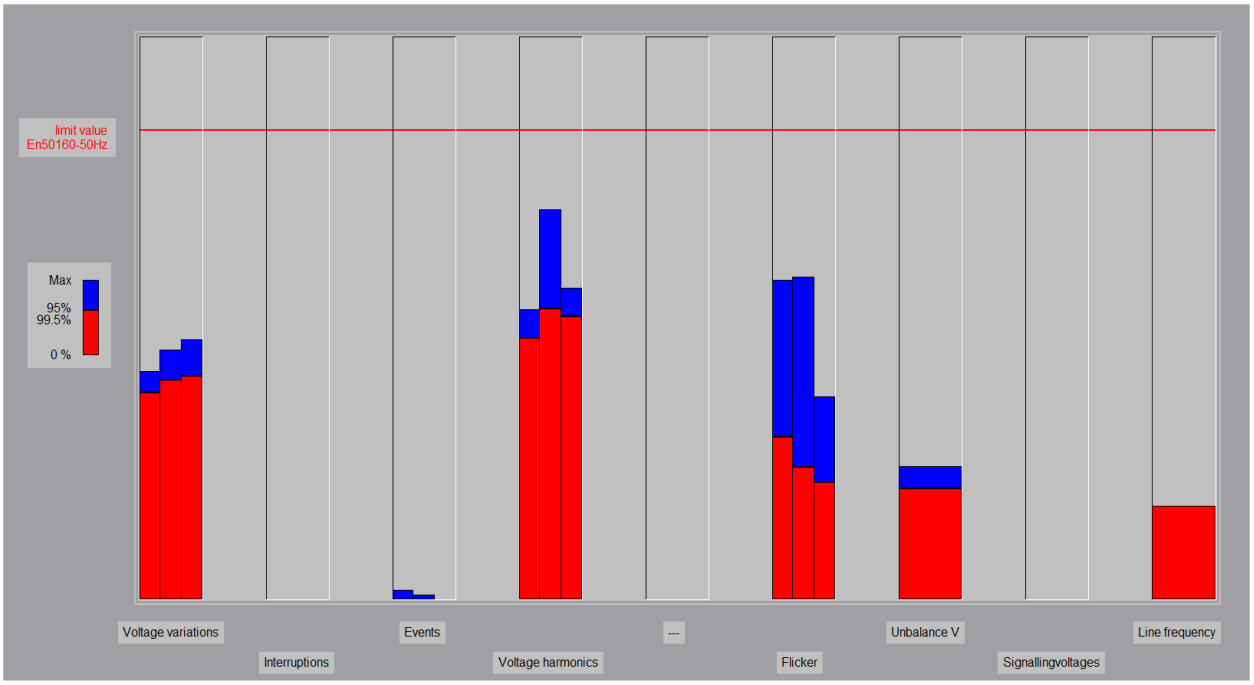


Slika 7.6. Dugotrajno naponsko treperenje (flikeri), prije priključenja FN elektrane.

7.2.2 Drugi mjerni tjedan, nakon priključenja elektrane, od 05.05.2014. do 12.05.2014.

Na slici 7.7 su prikazane vrijednosti svih pokazatelja kvalitete napona u odnosu na vrijednost dozvoljenu normom HRN EN 50160.

Slika 7.7 daje cjelovit grafički prikaz pokazatelja kvalitete tijekom mjernog tjedna na mjestu priključka. Moguće je zaključiti da je razina kvalitete električne energije vrlo slična onoj prije priključenja fotonaponske elektrane: svi pokazatelji redom su u skladu s ograničenjima spomenute norme.



Slika 7.7. Cjelokupni prikaz pokazatelja kvalitete opskrbnog napona u odnosu na ograničenja norme HRN EN 50160:2012., nakon priključenja FN elektrane ETFOS 1.

Na Slici 7.8 može se vidjeti da je zabilježeno 3 naposka propada, dok prekida opskrbe nije bilo.

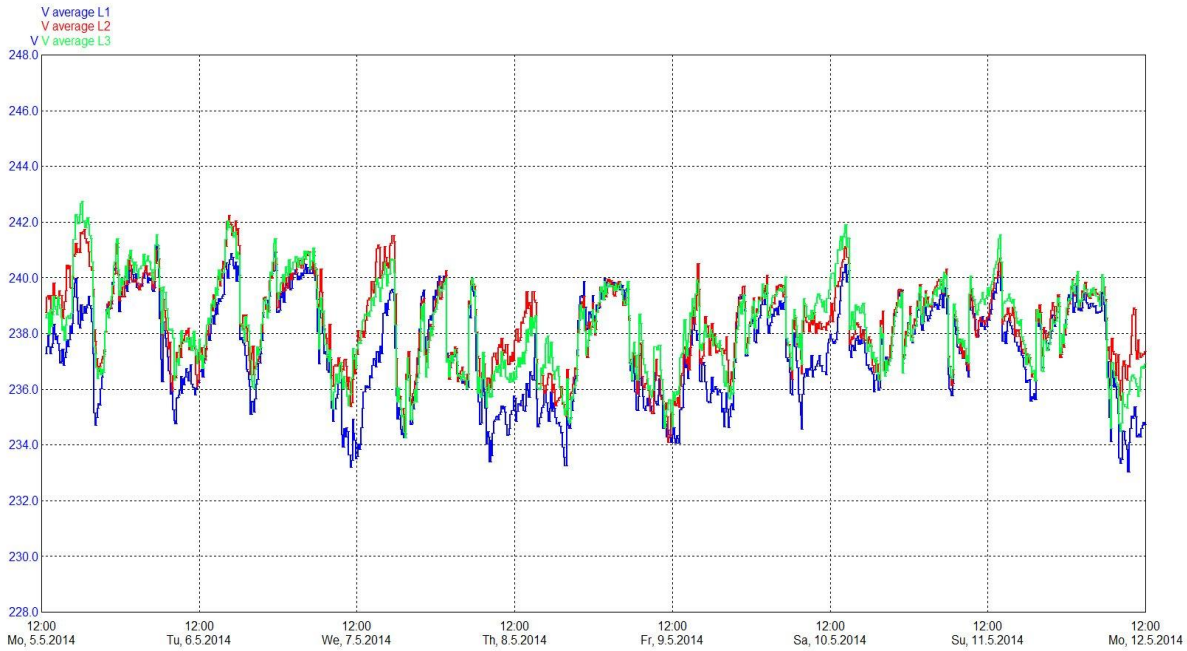
Phase L1, L2, L3	< 20 ms	20...< 100 ms	100...< 500 ms	0.5...< 1 s	1...< 3 s	3...< 20 s	20...< 60 s	>= 1 min
Swell > 10.00%								
Dip > 10.00%								
10...< 15 %		1						
15...< 30 %		2						
30...< 60 %								
60...< 99 %								
Interruption								

Recording as events from -10.00 / +10.00% of the nominal voltage
Dip according to UNIPEDE measurement guide

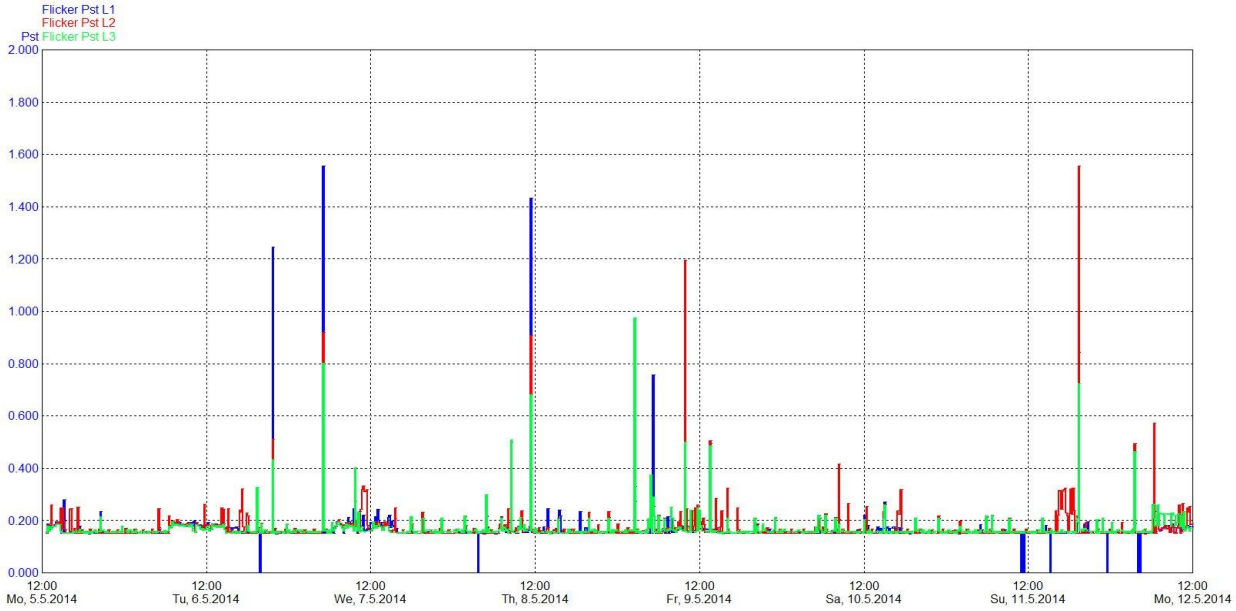
Number of swells	0
Number of Dips	3
Number of short interruptions (<3 min)	0
Number of long interruptions (>=3 min)	0
Number of interruptions	0
Total events and interruptions	3
Total number of allowed events	100
Total number of allowed interruptions	100

Slika 7.8. Prikaz naponskih događaja, nakon priključenja FN elektrane.

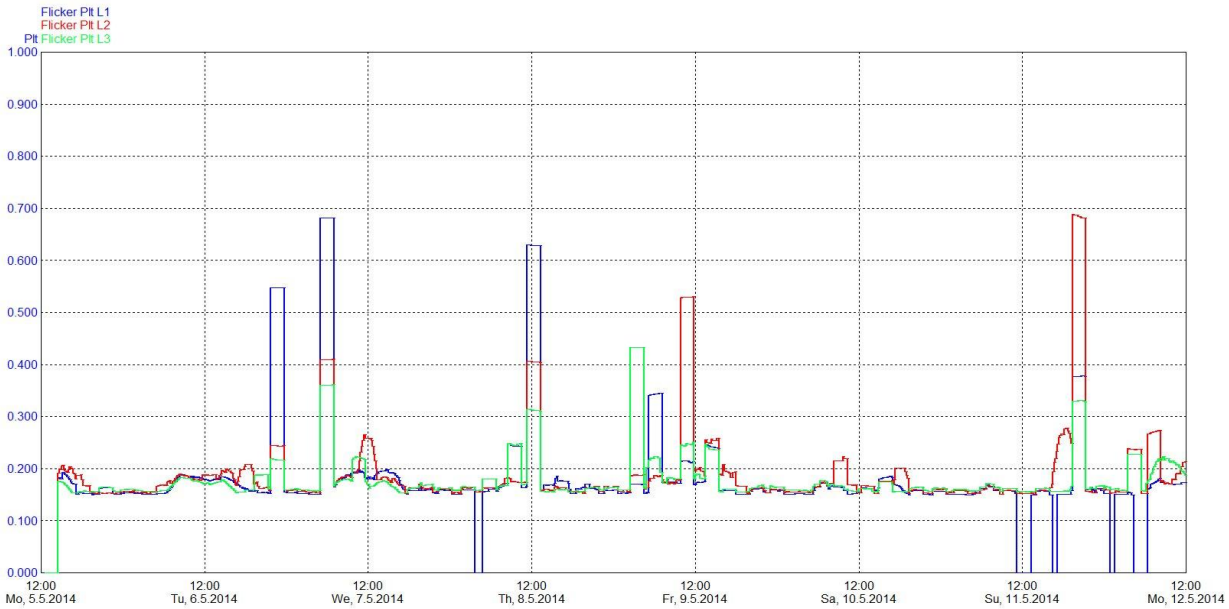
Usporedbom slika 7.5 s 7.10 i 7.6 s 7.11 može se uočiti da su vrijednosti kratkotrajnih P_{st} I dugotrajnih P_{lt} flikera nakon uključenja sunčane elektrane ETFOS 1 nešto povoljnije od vrijednosti prije priključenja. Na slici 7.10 može se primijetiti manji broj prekoračenja vrijednosti kratkotrajnih flikera nakon uključenja elektrane, sada samo u pet navrata. Vrijednosti dugotrajnih flikera, koje norma i razmatra, su u potpunosti zadovoljavajući.



Slika 7.9.Srednje 10-minutne efektivne vrijednosti napona nakon priključenja FN elektrane.

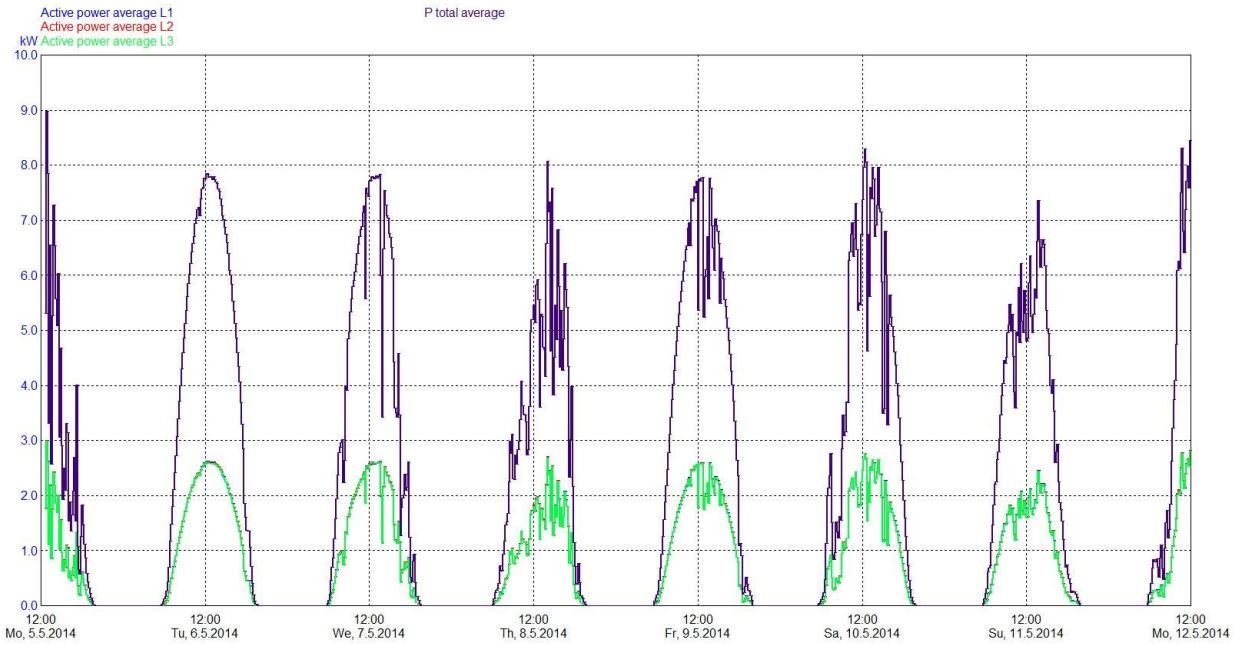


Slika 7.10. Kratkotrajno naponsko treperenje (flikeri), nakon priključenja FN elektrane.



Slika 7.11. Dugotrajno naponsko treperenje (flikeri) nakon priključenja FN elektrane.

Slika 7.11 prikazuje isporučenu radnu snagu P u mjernom tjednu u mrežu HEP ODS DP „Elektroslavonija“ Osijek. Prikazane su snage za svaku fazu te ukupan iznos snage (ljubičasta linija). Maksimalna isporučena trofazna radna snaga P = 8,986 kW zabilježena je 05.05.2014. u 13.00 sati.



Slika 7.12. Dijagram predane trofazne rade snage u distribucijsku mrežu HEP ODS DP „Elektroslavonija“ Osijek, u mjernom tjednu.

8. UTJECAJ BIOPLINSKOG POSTROJENJA SNAGE 1700 kW NA DISTRIBUCIJSKU MREŽU

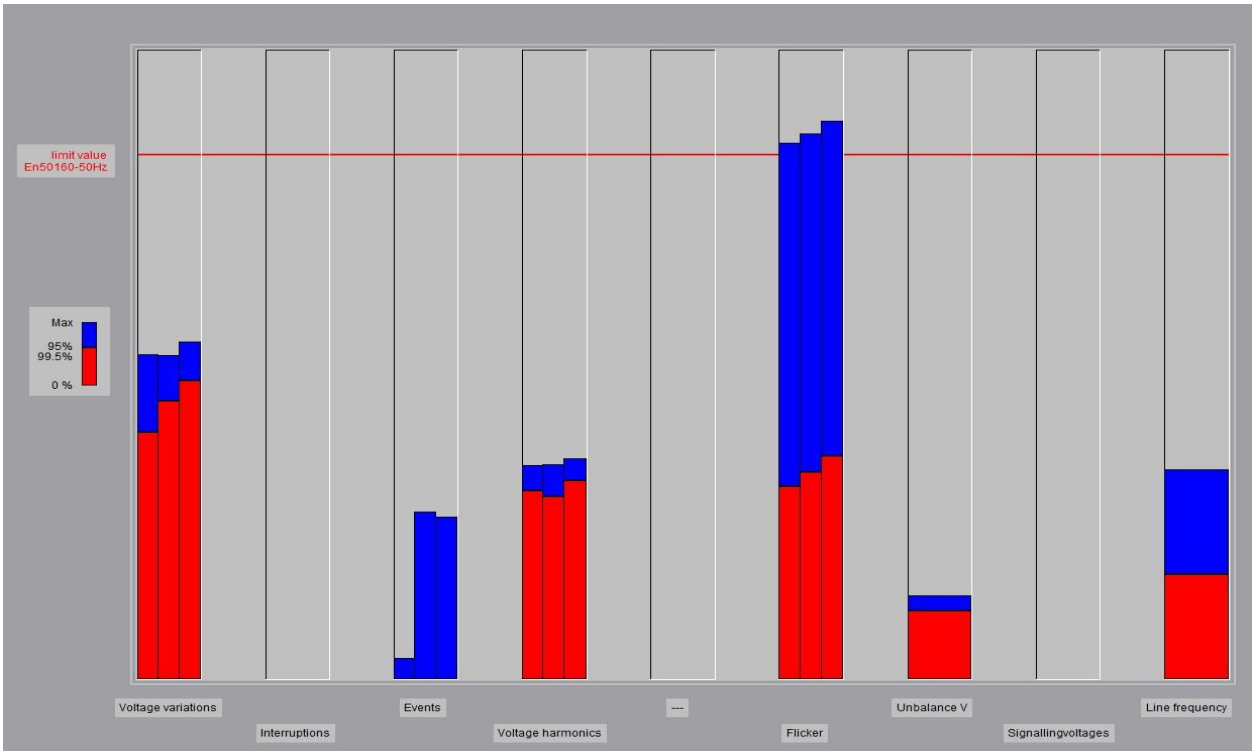
8.1 Rezultati mjerenja

Kao i u prijašnjem poglavlju, mjerenje kvalitete električne energije izvedeno je prema normi HRN EN 50160:2012, *Naponske karakteristike električne energije iz javnog distribucijskog sustava* (EN 50160:2010), i to u razdoblju od **dva tjedna:**

- od **19.02.2016.u 12:30 sati** do**26.02.2016.u 12:30 sati** (prije priključenja elektrane) te,
- od **23. 03. 2016. u 9:30 sati** do **30. 03. 2016. u 10:30 sati** (nakon priključenja elektrane).

8.1.1 Prvi mjerni tjedan, - od 19. 02. 2016. do 26. 02. 2016.

Na Slici 8.1 nalazi se sumarni prikaz pokazatelja kvalitete napona na stezaljkama transformatora prije priključenja BPP na distributivnu mrežu. Vidimo da su vrijednosti flikera malo iznad crvene linije koja predstavlja granične vrijednosti norme. Iako ima nekoliko slučajeva gdje je premašena granica P_{st} = 1, samo jedan je slučaj da je dugotrajni fliker prekoračio dozvoljenu vrijednost, a dugotrajni flikeri se uzimaju u obzir u normi.



Slika 8.1. Sumarni prikaz pokazatelja kvalitete prije priključenja BPP.

Na slici 8.2 može se vidjeti da je u mjernom tjednu zabilježeno ukupno 67 naponskih događaja, odnosno 55 prenapona te 12 naponskih propada.

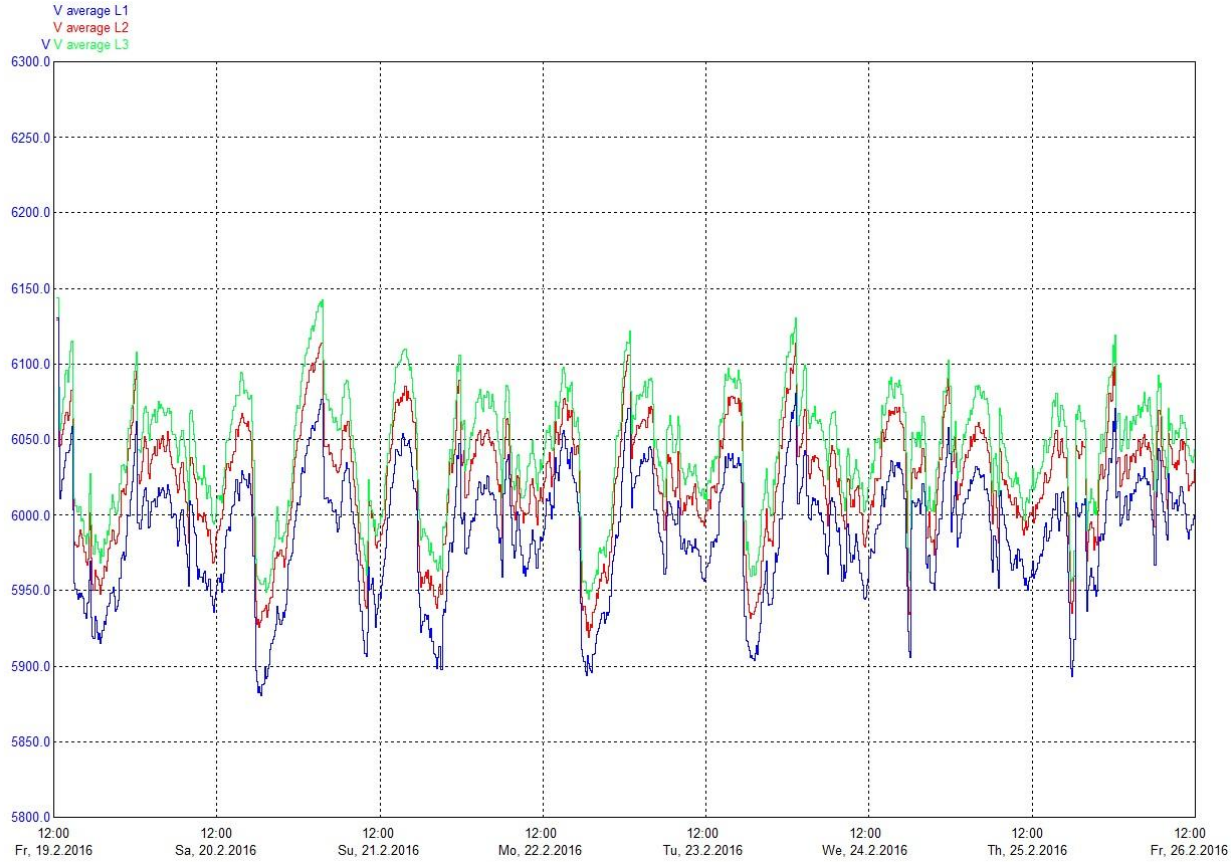
Phase L1, L2, L3	< 20 ms	20...< 100 ms	100...< 500 ms	0.5...< 1 s	1...< 3 s	3...< 20 s	20...< 60 s	>= 1 min
Swell > 10.00%	55							
Dip > 10.00%								
10...< 15 %	4	1						
15...< 30 %	2	2	1					
30...< 60 %	1		1					
60...< 99 %								
Interruption								

Recording as events from -10.00 / +10.00% of the nominal voltage
Dip according to UNIPEDE measurement guide

Number of swells	55
Number of Dips	12
Number of short interruptions (<3 min)	0
Number of long interruptions (>=3 min)	0
Number of interruptions	0
Total events and interruptions	67
Total number of allowed events	100
Total number of allowed interruptions	100

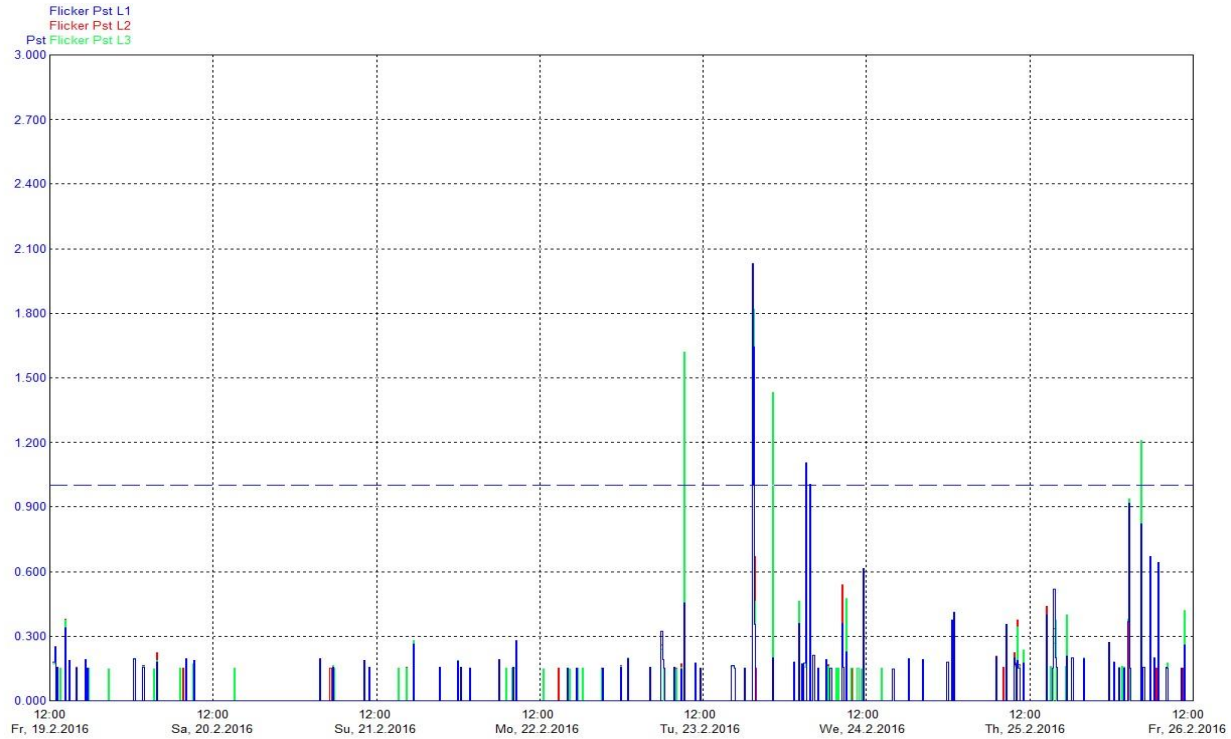
Slika 8.2. Prikaz naponskih događaja, prije priključenja BPP.

Na slici 8.3 može se vidjeti da su srednje 10-minutne efektivne vrijednosti napona za vrijeme normalnog pogona unutar ograničenja norme EN 50160 (granice su 5195,70 V i 6350,30 V), a većina snimljenih 10-minutnih vrijednosti kreće se između 5900 V i 6150 V.

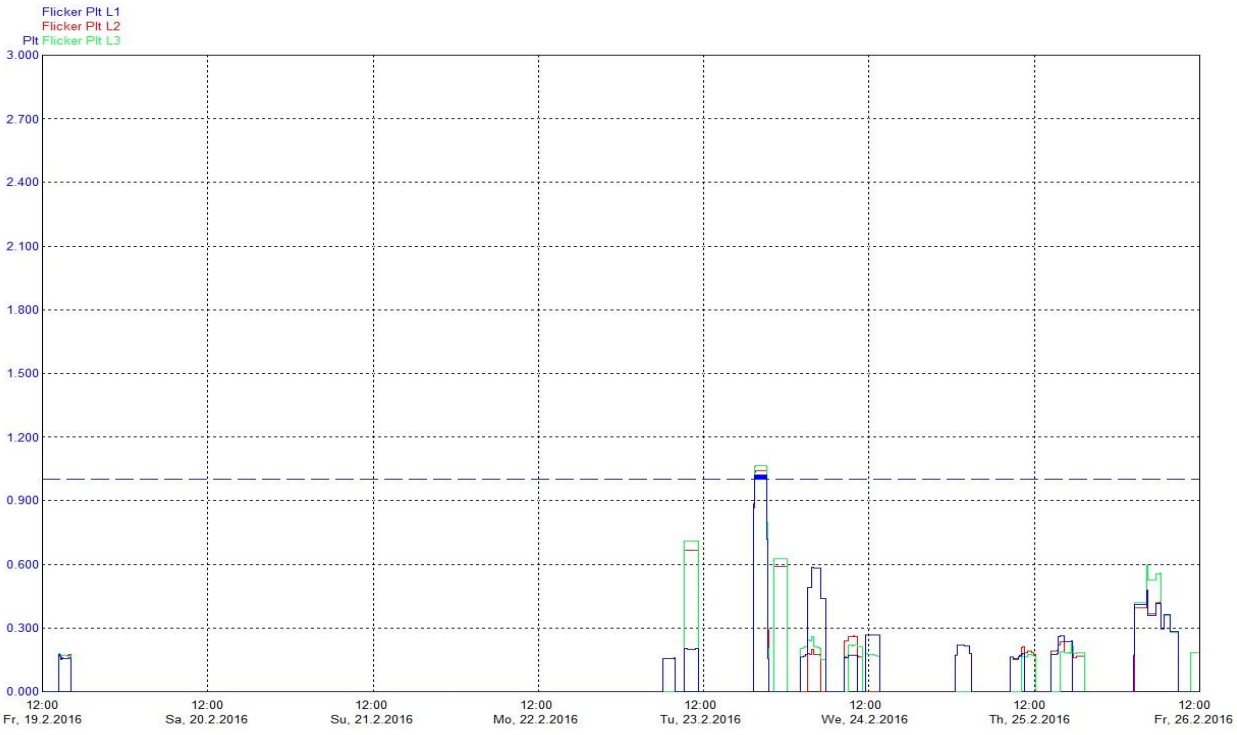


Slika 8.3. Srednje 10-minutne efektivne vrijednosti napona prije priključenja BPP.

Na slici 8.4. mogu se vidjeti vrijednosti kratkotrajnog naponskog treperenja (flikera) prije priključenja FN elektrane. Vidi se da je u mjernom tjednu zabilježeno nekoliko prekoračenja granične vrijednosti $P_{st} = 1$. Međutim, na slici 8.5 gdje su prikazane vrijednosti dugotrajnih flikera (koji se i razmatraju u normi) vidljivo je samo jedno prekoračenje granične vrijednosti norme EN 50160 u mjernom tjednu.



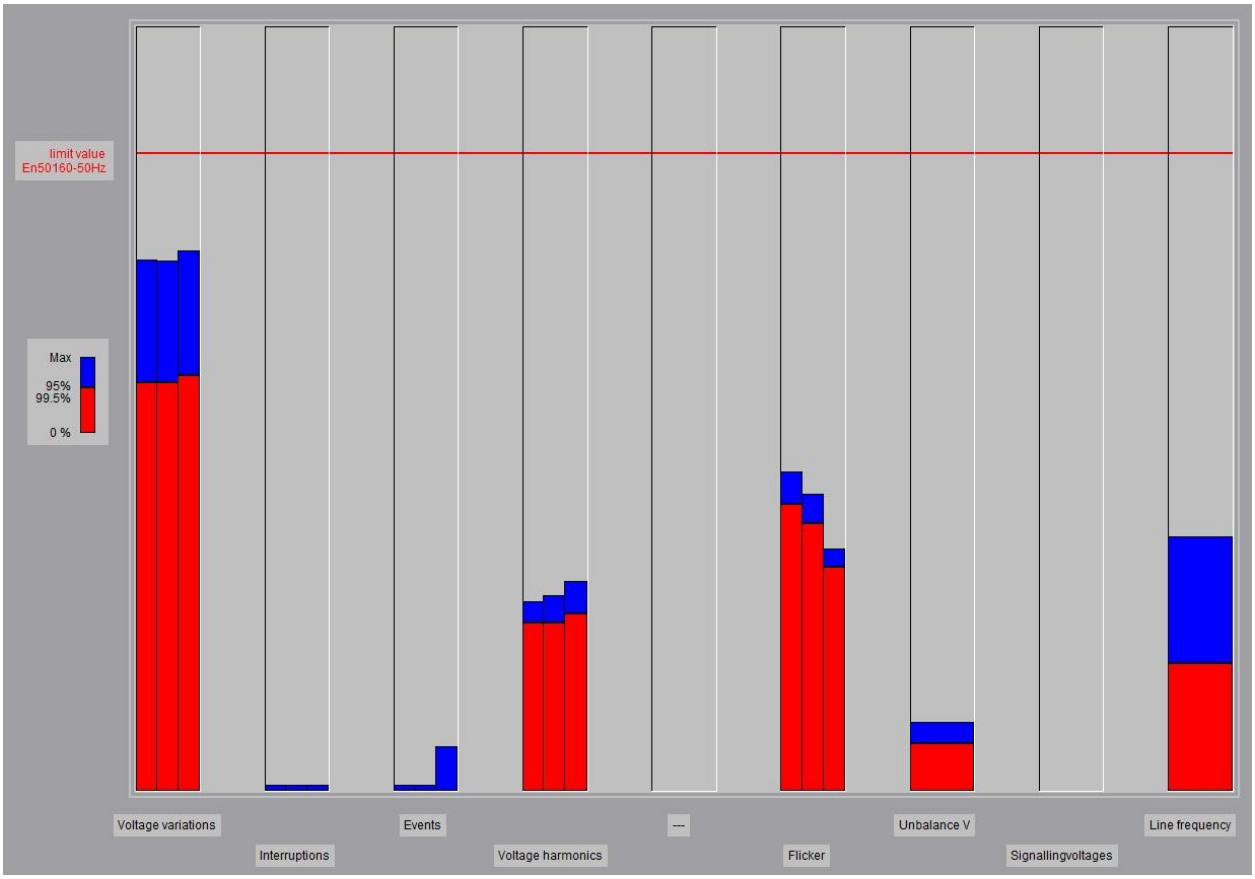
Slika 8.4.Kratkotrajno naponsko treperenje (flikeri) prije priključenja BPP.



Slika 8.5. Dugotrajno naponsko treperenje (flikeri), prije priključenja BPP.

8.1.2 Drugi mjerni tjedan, nakon priključenja elektrane, - od 23.03.2016. do 30.03.2016.

Na Slici 8.6 je sumarni prikaz pokazatelja kvalitete napona nakon priključenja BPP i možemo zaključiti da nijedan ne prelazi ograničenja norme. Dapače, uspoređujući vrijednosti prije i nakon priključenja BPP, vidljivo je čak i znatno poboljšanje situacije u mreži.



Slika 8.6. Cjelokupni prikaz pokazatelja kvalitete opskrbnog napona u odnosu na ograničenja norme HRN EN 50160:2012., nakon priključenja BPP.

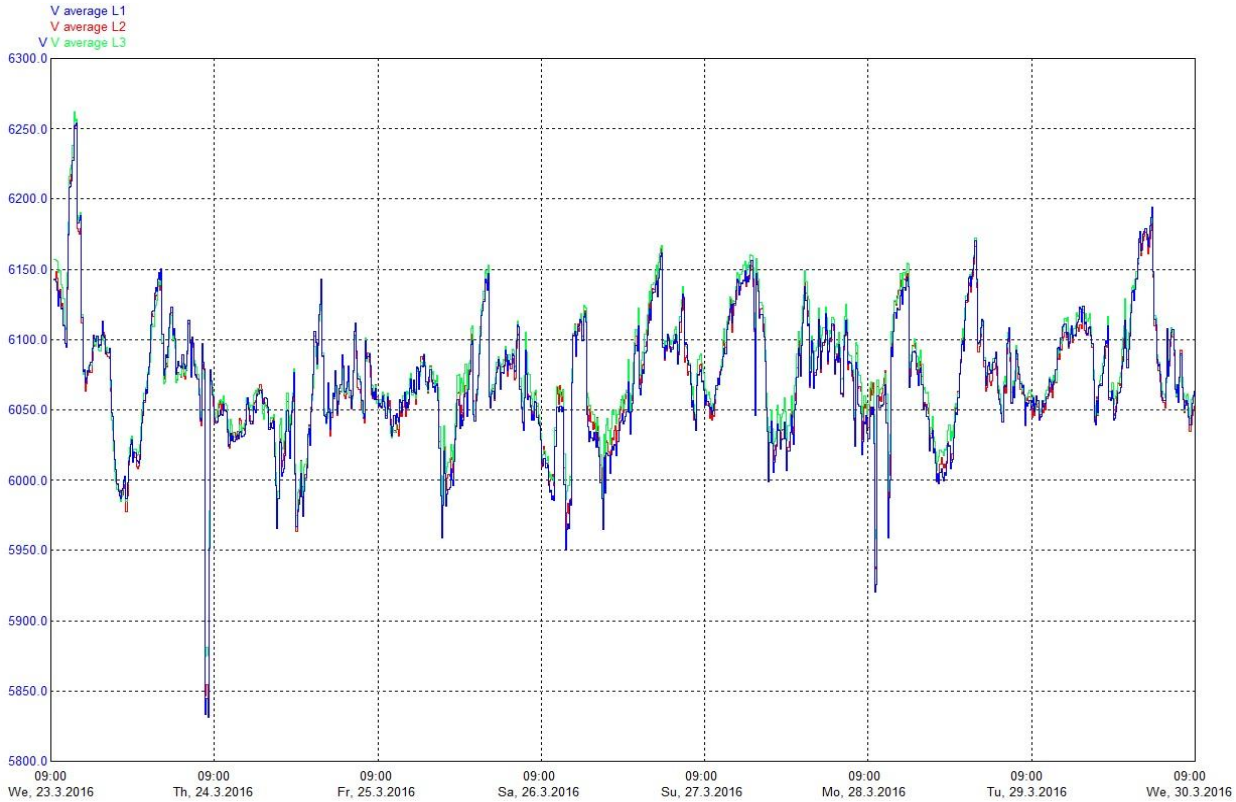
Na slici 8.7 može se vidjeti detaljan popis snimljenih naponskih događaja. Između ostalog, može se vidjeti da su 3 prekida opskrbe zapravo 1 prekid istovremeno u sve tri faze (24.3.2016. u 7.46 sati). Ovaj kratkotrajni prekid rada BPP rezultat je prolaznog kvara u elektrodistribucijskoj mreži. Usporedbom slika 8.2 i 8.7 primjećuje se znatno manji broj naponskih događaja čime zaključujemo da je priključenje elektrane povoljno utjecalo na mrežu.

Phase L1, L2, L3	< 20 ms	20...< 100 ms	100...< 500 ms	0.5...< 1 s	1...< 3 s	3...< 20 s	20...< 60 s	>= 1 min
Swell > 10.00%	2	1	2		2			
Dip > 10.00%								
10...< 15 %								
15...< 30 %								
30...< 60 %								
60...< 99 %		2						
Interruption								3

Recording as events from -10.00 / +10.00% of the nominal voltage
Dip according to UNIPEDE measurement guide

Number of swells	7
Number of Dips	2
Number of short interruptions (<3 min)	3
Number of long interruptions (>=3 min)	0
Number of interruptions	3
Total events and interruptions	12
Total number of allowed events	100
Total number of allowed interruptions	100

Slika 8.7. Prikaz naponskih događaja, nakon priključenja BPP



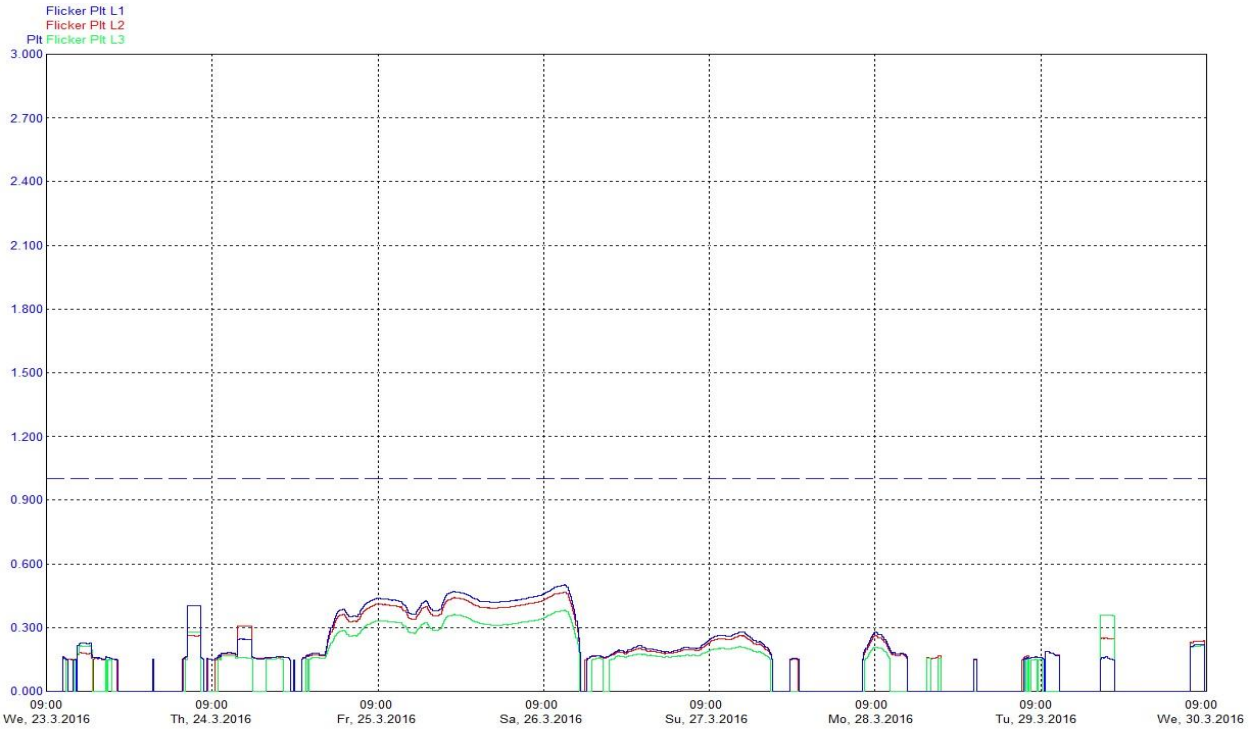
Slika 8.8.Srednje 10-minutne efektivne vrijednosti napona nakon priključenja BPP

Usporedbom slika 8.4 s 8.9 i 8.5 s 8.10 može se uočiti da su vrijednosti kratkotrajnih P_{st}I dugotrajnih P_{lt}flikera nakon uključenja BPP povoljnije od vrijednosti prije priključenja. Na slici 89 može se primijetiti kako nisu zabilježena prekoračenja vrijednosti P_{st} = 1 nakon uključenja elektrane. Vrijednosti dugotrajnih flikera (koji se i razmatraju u normi) nakon

priključenja BPP potpunosti su u granicama norme EN 50160, slika 8.10. Ovo znači da BPP ima dopušten doprinos flikera, i prema normi HRN EN 50160 i prema Mrežnim pravilima.



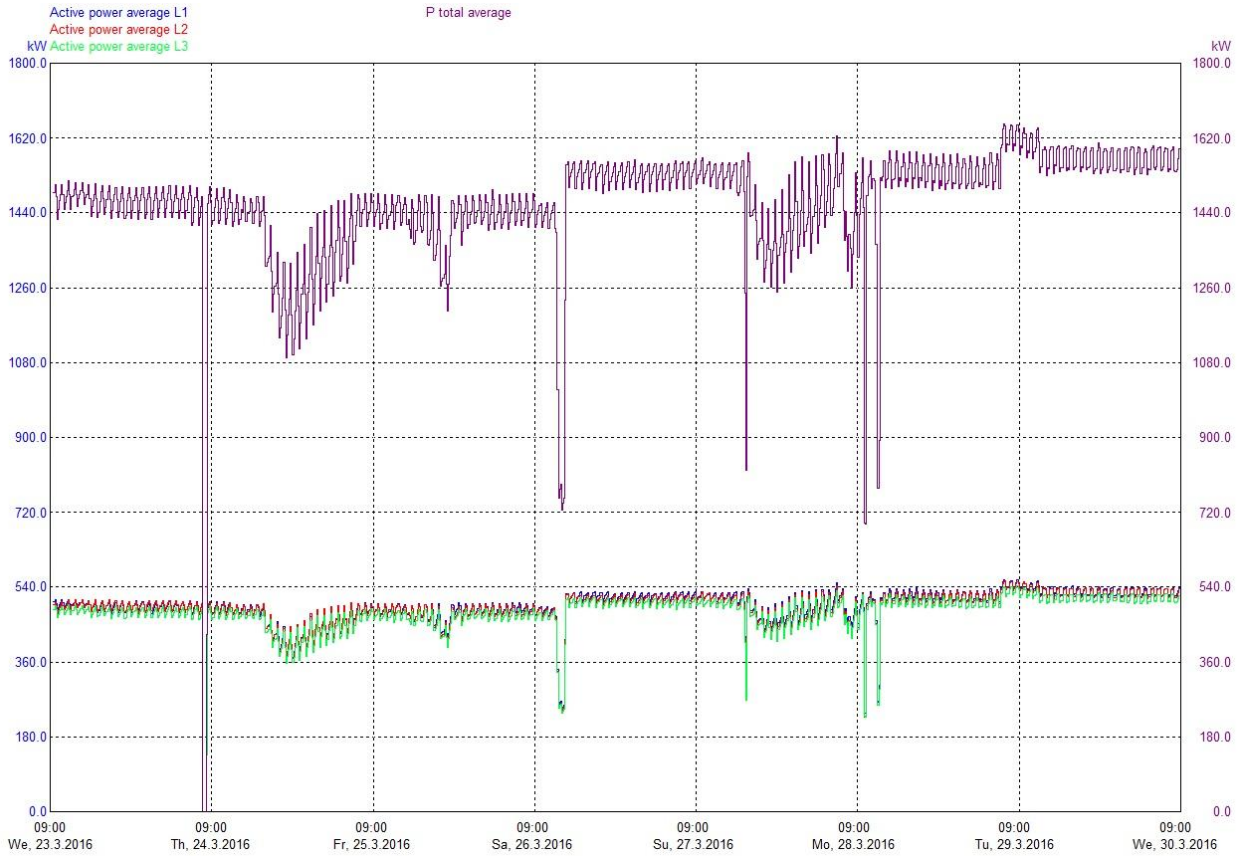
Slika 8.9. Kratkotrajno naponsko treperenje (flikeri), nakon priključenja BPP.



Slika 8.10.Dugotrajno naponsko treperenje (flikeri) nakon priključenja BPP .

Na slici 8.11 prikazana je i isporučena radna snaga P u mjernom tjednu u mrežu HEP ODS DP „Elektroslavonija“ Osijek. Prikazane su snage za svaku fazu te ukupan iznos snage (ljubičasta linija). Maksimalna isporučena trofazna radna snagaP = 1653,52 kW zabilježena je 29.03.2016. u 6.50 sati.

Na slici se može primijetiti i kratkotrajni prekid rada elektrane 24.3.2016. u 7.46 sati te kratkotrajna zaustavljanja jednog pogonskog stroja 26.3., 27.3. te 28.3.2016. Kao što je već ranije opisano, kratkotrajni prekid rada BPP rezultat je prolaznog kvara u elektrodistribucijskoj mreži, a zaustavljanja jednog pogonskog stroja posljedica su podešavanja strojno-tehničkih karakteristika pogonskog stroja.



Slika 8.11. Dijagram predane trofazne rade snage u distribucijsku mrežu HEP ODS DP „Elektroslavonija“ Osijek, u mjernom tjednu.

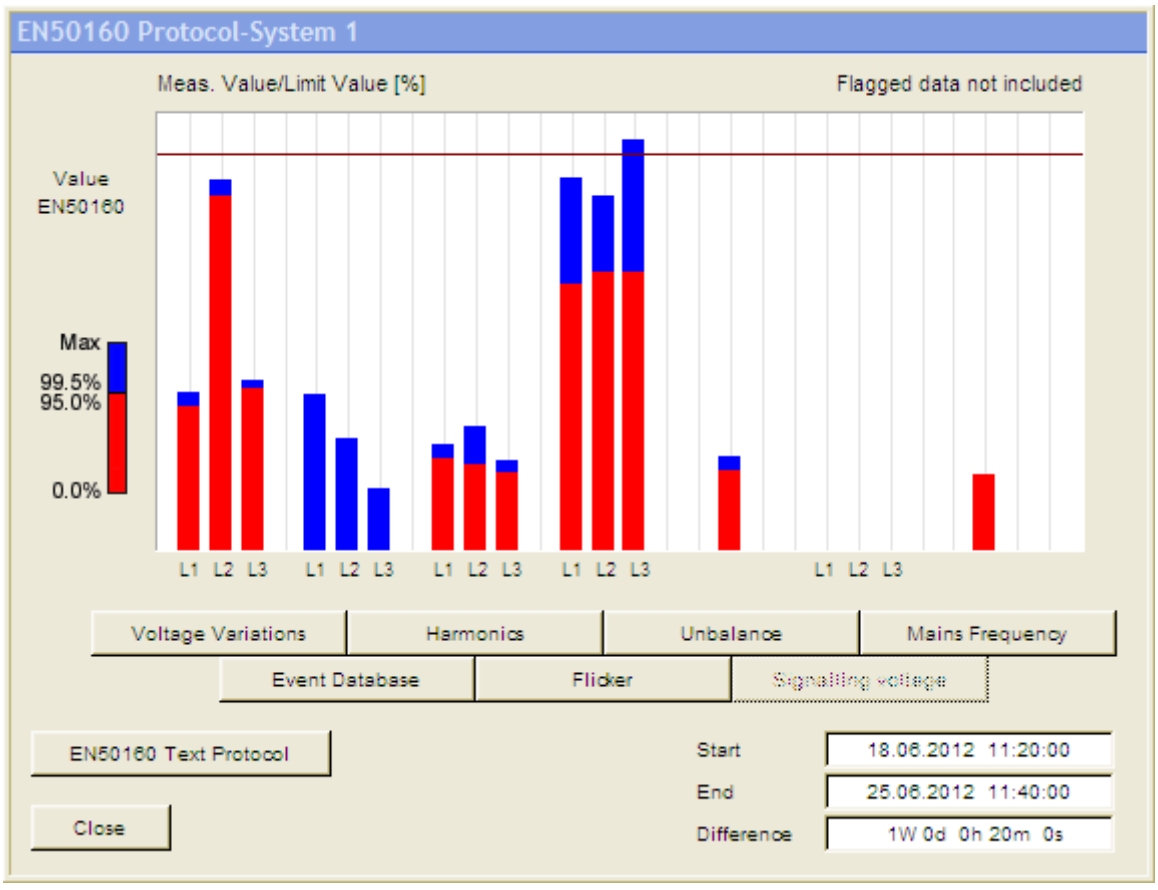
9. UTJECAJ ELEKTRANE NA BIOMASU NA 20kV MREŽU

9.1 Rezultati mjerenja

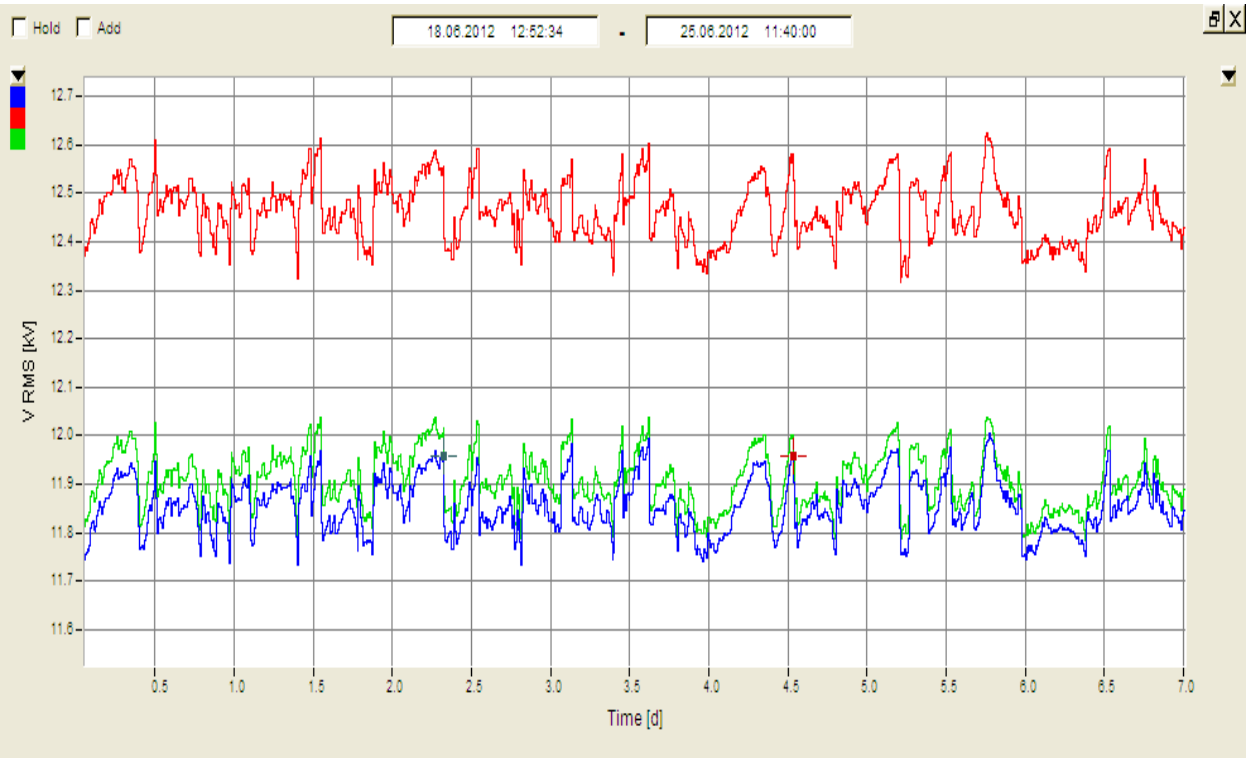
Mjerenja u elektrani na biomasu izvedena su prema normi HRN EN 50160:2008, i to u razdoblju od **18.06.2012 11:20:00.**do**25.06.2012 11:20:00.** Mjerenja su izvedena na 20 kV izvodu.

9.1.1 Prvi mjerni tjedan, od 18.06.2012. do 25.06.2012.

Slijede rezultati mjerenja kvalitete opskrbnog napona za prvi tjedan, od 18.06. do 25.06. 2012. na naponskoj razini 20 kV. Na slici 9.1 možemo vidjeti sumarne pokazatelje kvalitete opskrbnog napona mreže HEP DP «Elektroslavonija» Osijek, prije priključenja elektrane na mrežu. Svi pokazatelji kvalitete električnog napona su unutar norme. Jedini pokazatelj koji prelazi dozvoljenu granicu je naponsko treperenje (flikeri), ali se radi o plavom dijelu stupca koji se odnosi na 5% vrijednosti tjedna koji za koji nema ograničenja.

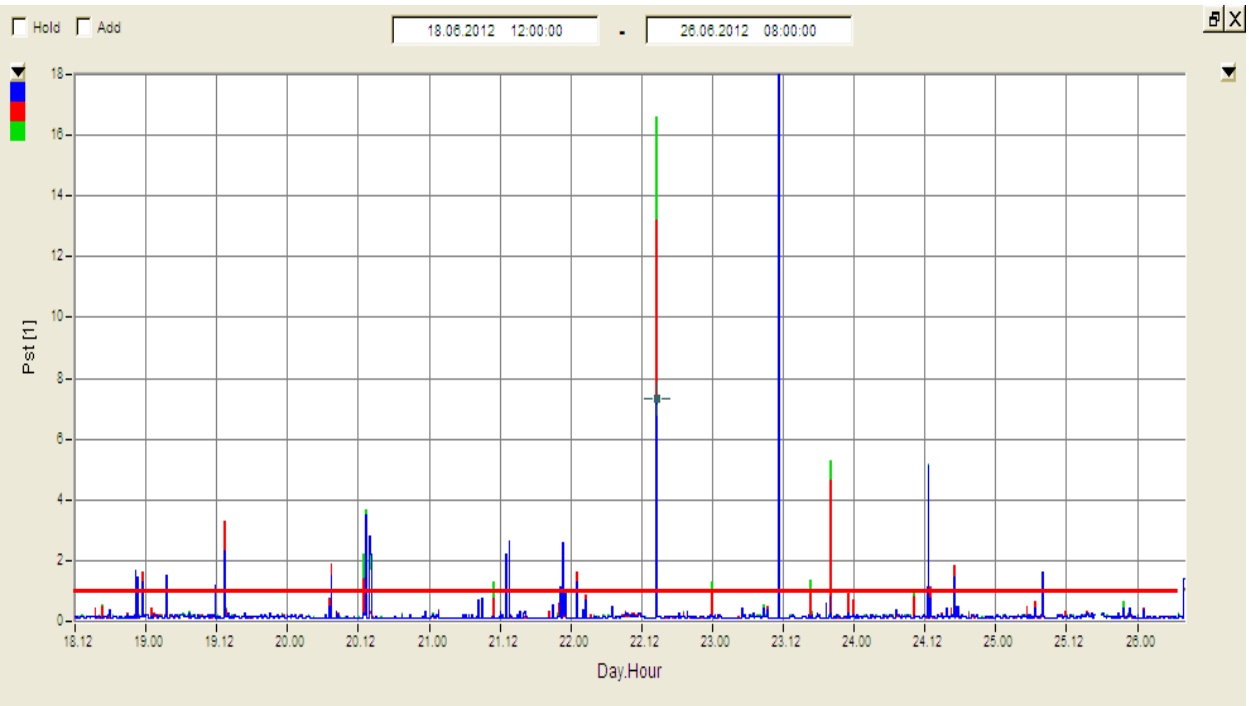


Slika 9.1. Sumarni prikaza pokazatelja kvalitete na izvodu 20 kV.



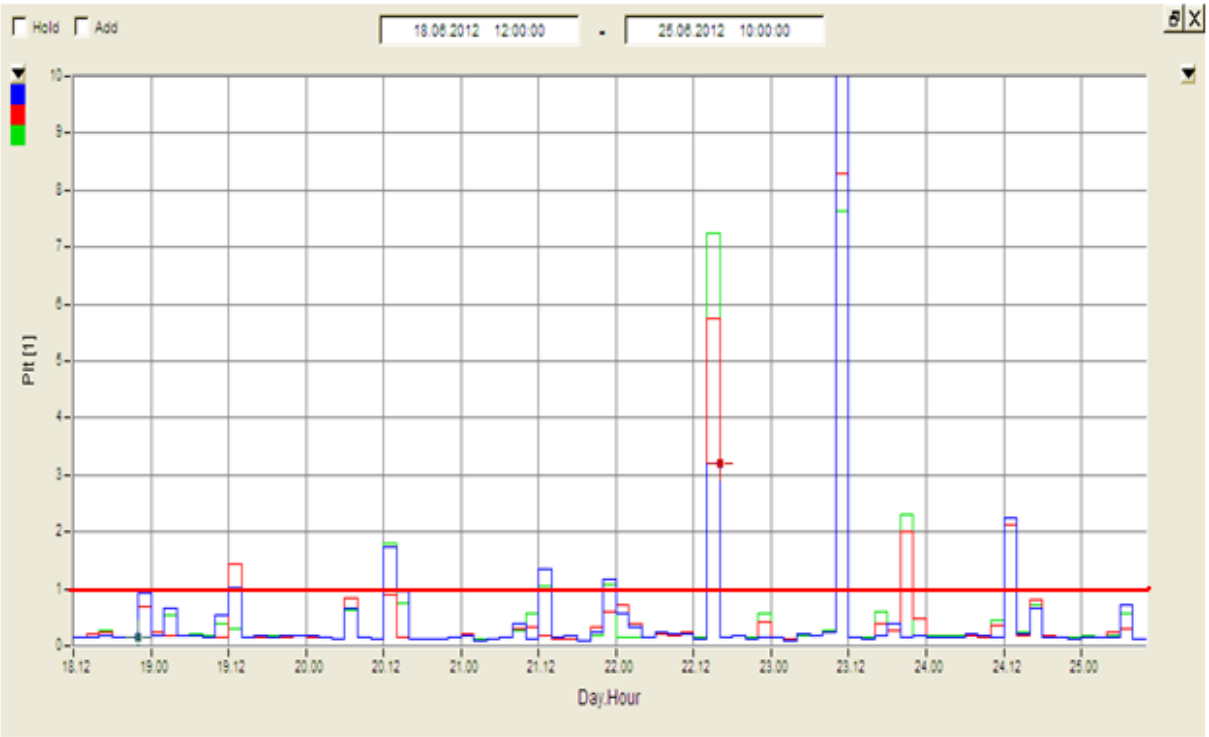
Slika 9.2. Prikaz mjerenja srednje vrijednosti napona

Na slici je moguće uočiti da je napon unutar granica norme, ali postoji nesimetrija jer je povećan iznos napona faze L2. To povećanje manje je od 10%.



Slika 9.3 Kratkotrajno naponsko treperenje P_{lt} na 20 kV

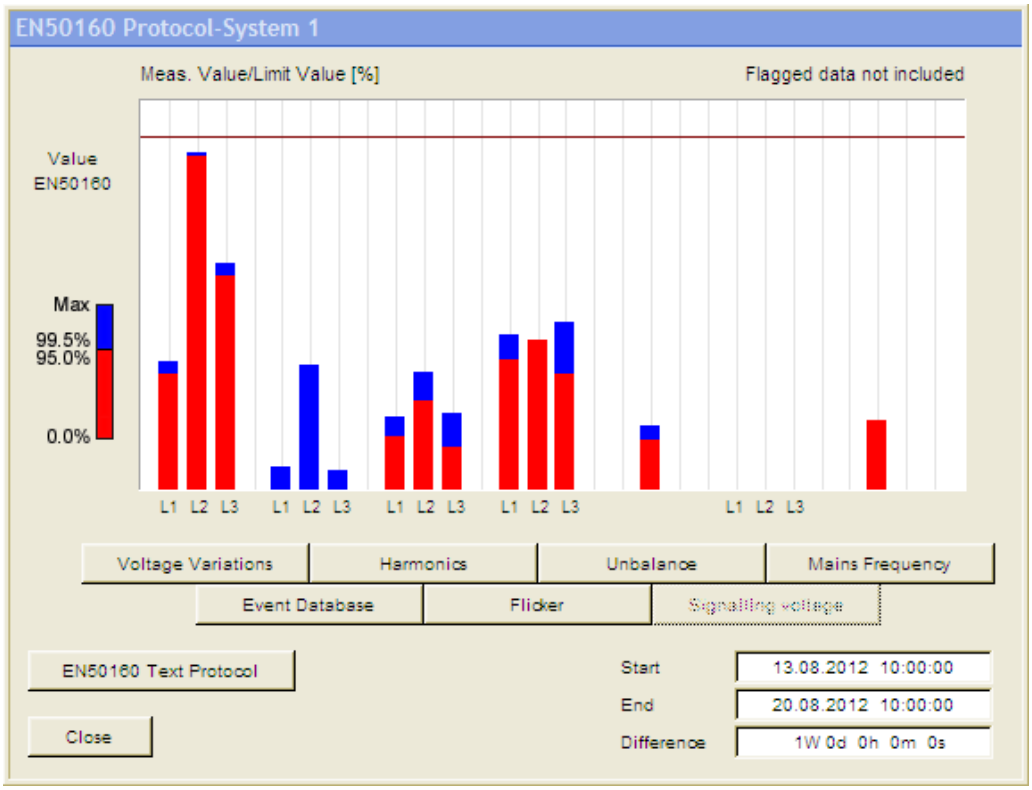
Na slici 9.4 mogu se vidjeti vrijednosti dugotrajnog naponskog treperenja. U osam trenutaka je vrijednost iznad granice norme, ali ono ne traje dulje od 5% tjedna.



Slika 9.4 Dugotrajno naponsko treperenje P_{lt}na 20 kV

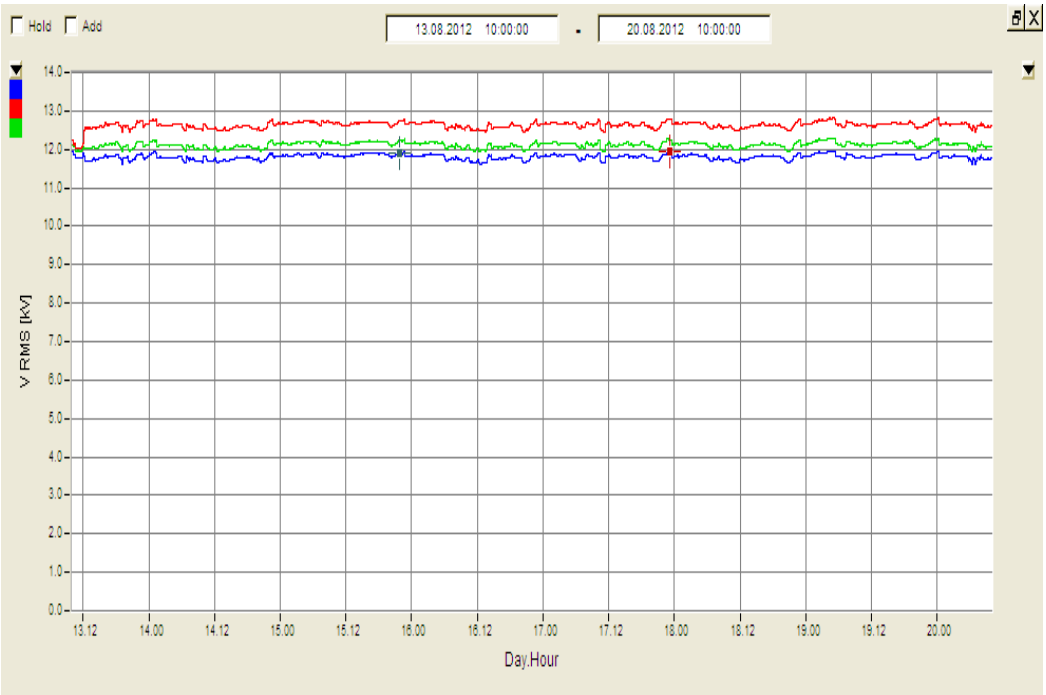
9.1.2 Drugi mjerni tjedan, nakon priključenja elektrane, od 13.08. do 20.08.2012.

Slijede rezultati mjerenja kvalitete opskrbnog napona za drugi mjerni tjedan, od 13.08. do 20.08.2012.na naponskoj razini 20 kV. Na slijedećoj slici možemo vidjeti sumarne pokazatelje kvalitete napona nakon puštanja elektrane u pogon. Sve vrijednosti su u granicama norme.



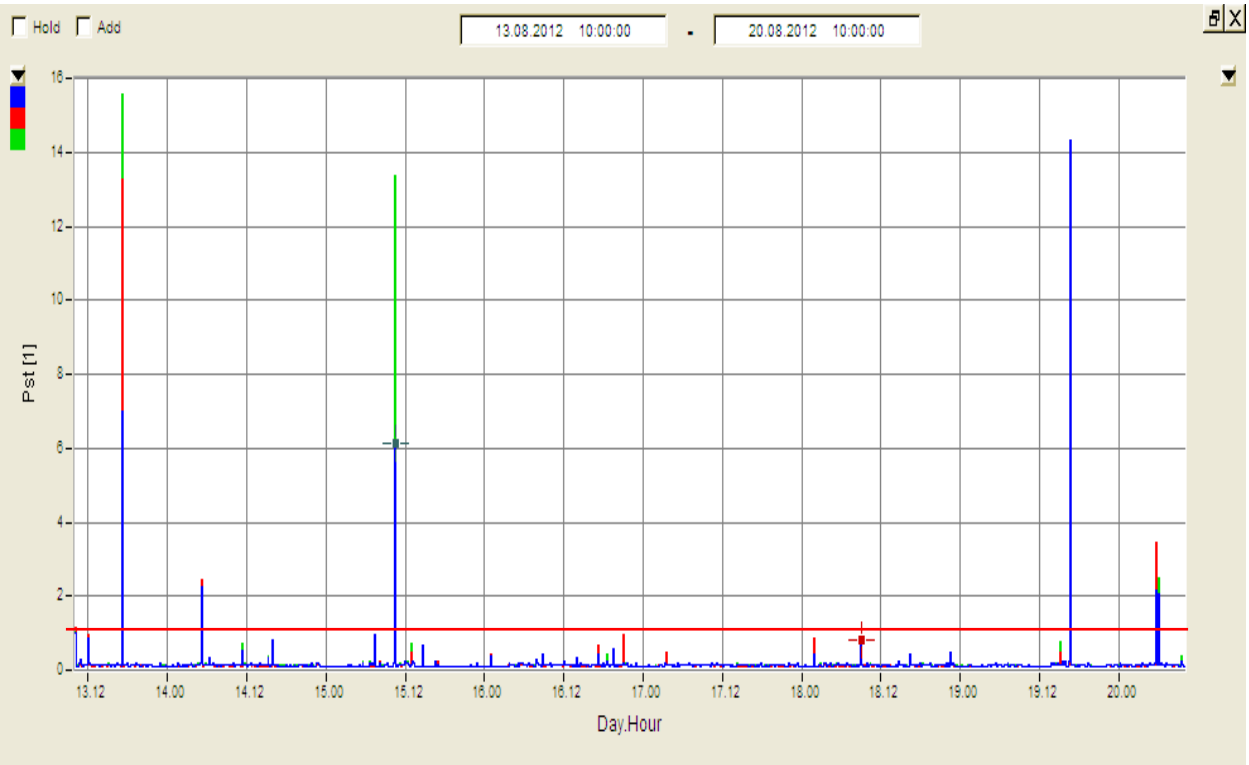
Slika 9.5. Sumarni prikaz pokazatelja kvalitete na izvodu 20 kV nakon priključenja elektrane

Uspoređujući sliku 9.5 sa slikom 9.1, tj. uspoređujući pokazatelje kvalitete napona prije i poslije uključenja elektrane lako je zaključiti da su se naponske prilike znatno poboljšale.

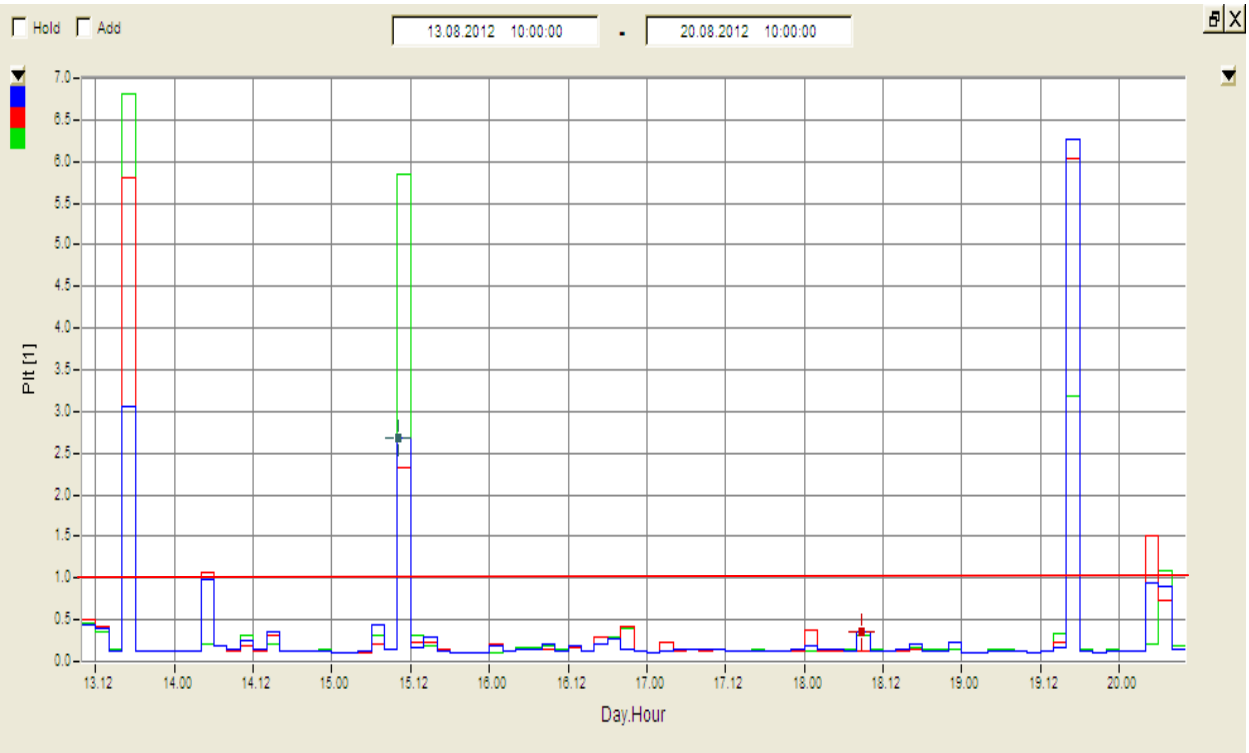


Slika 9.6. Srednje 10-minutnevrijednostifaznih naponausvetrifazenakon priključenja elektrane

Uspoređujući kratkotraje i dugotrajne flikere prije i poslije uključenja elektrane, vidimo da se uključenjem elektrane broj jednih i drugih znatno smanjio. Većina vrijednosti kratkotrajnih flikera prije uključenja se kreće oko 0.14, dok se nakon uključenja taj broj spušta na 0.12. Nakon uklopa snimljeno je 6 prekoračenja normom zadane vrijednosti dugotrajnih flikera što je manje nego prije uključenja elektrane.

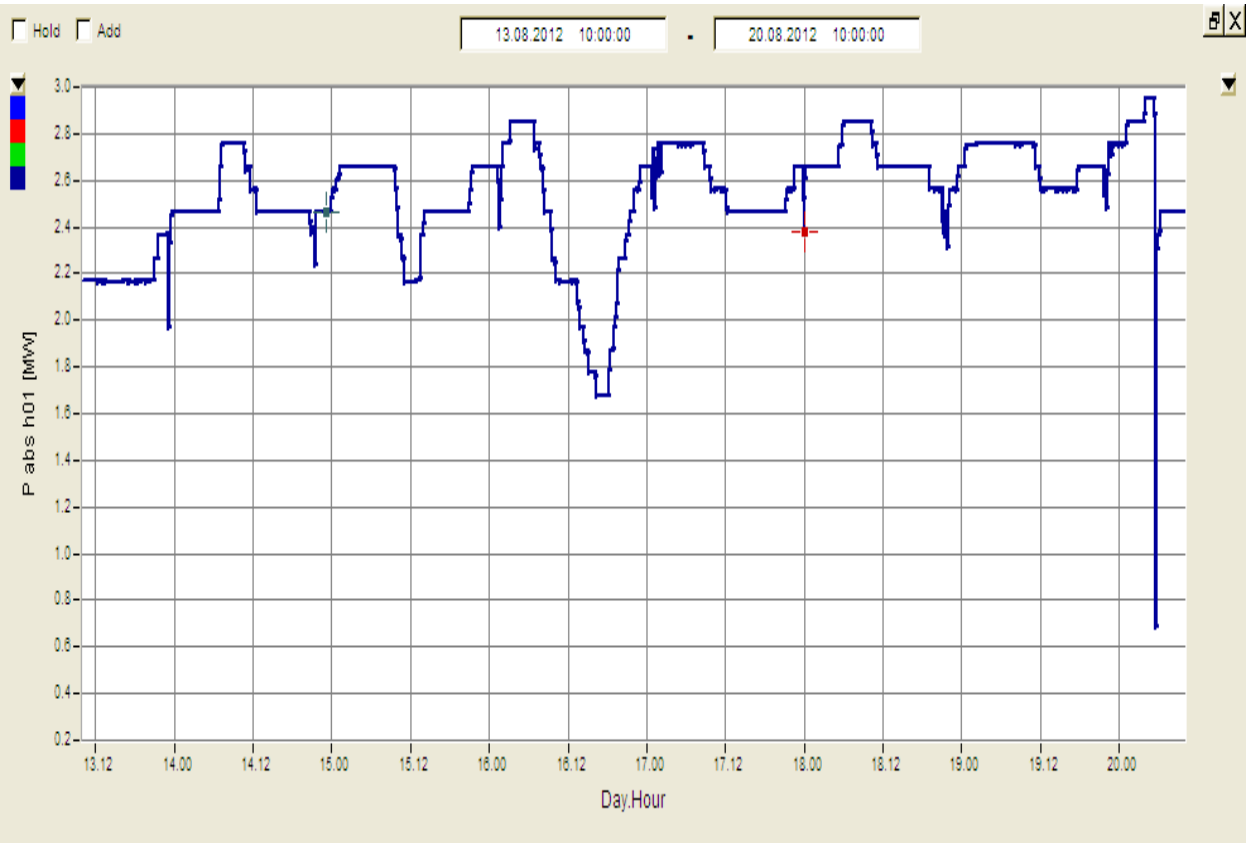


Slika 9.7 Kratkotrajno naponsko treperenje P_{lt}na 20 kV nakon uklopa elektrane



Slika 9.8 Dugotrajno naponsko treperenje P_{lt}na 20 kV nakon uklopa elektrane

Na slici 9.9 prikazana je i predana radna snaga za drugi mjerni tjedan u mrežu HEP-a DP „Elektroslavonija“ Osijek.



Slika 9.9 Predana trofazna radna snaga genaratora u mrežu HEP-a

9.2 Zaključni osvrt na analizu mjerenja pokazatelja kvalitete napona

Analiza mjerenja kvalitete napona u tri različite elektrane na tri različita mjesta u mreži pokazuju da distribuirana proizvodnja ne utječe loše na naponske prilike u mreži. Naprotiv, analizirajući rezultate može se zaključiti da distribuirana proizvodnja utječe manje ili više povoljno na mrežu. Dublje proučavajući grafove vidi se da je došlo do znatnijeg poboljšanja nekih pokazatelja, dok su drugi pokazatelji ostali slični. Npr., broj dugotrajnih i kratkotrajnih flikera se znatnije smanjio dok se iznos nekih harmonika popravio u manjem iznosu ili je ostao isti. Kod bioplinske elektrane i elektrane na biomasu vide se poboljšanja naponskih prlika, čemu je svakako razlog sinkroni generator koji je sastavni dio tih elektrana. Sa stajališta mreže preporučljivo je integriranje distribuirane proizvodnje zbog povoljnog utjecaja na mrežu.

Tablica 9.1 Osvrt na pokazatelje kvalitete napona nakon uljučenja elektrane na mrežu

	Naponsko kolebanje	**Događaji**	**Harmonici**	**Naponsko treperenje (Flikeri)**	**Frekvencija**
Fotonaponska elektrana	✓	✓	=	✓	=
Bioplinska elektrana	✓	✓	✓	✓	=
Elektrana na biomasu	✓	=	✓	✓	=

10. ZAKLJUČAK

Kvaliteta električne energije (napona) postaje sve važniji dio studija na području elektroenergetike. Zbog povećanog broja uređaja koja koriste elemente energetske elektronike uočene su nepovoljne pojave na strani korisnika u elektroenergetskom sustavu, kao što su flickeri, naponski propadi, kolebanja napona itd. Tako se postepeno pojavila želja da se te neželjene pojave uklone ili do određene mjere ublaži njihov učinak.

U ovom radu provodila se analiza rezultata prikupljenih snimanjem kvalitete napona prije i poslije priključenja tri eletrane. Radi se o fotonaponskoj elektrani, elektrani na biomasu i bioplin. Na primjeru ovih rezultata može se zaključiti da znatnijih problema u mreži prije spajanja nije bilo. Nakon uključenja vidimo da je čak i došlo do poboljšanja naponskih prilika.

LITERATURA

[4] Marijana Živić Đurović – Vitomir Komen – Renato Čućić; **Istraživanje i utvrđivanje stanja kvalitete električne energije;** Engineering Review : Međunarodni časopis namijenjen prezentaciji i razmjeni originalnih istraživanja s aspekta dizajna, materijala i novih tehnologija u području strojarstva, brodogradnje, temeljnih tehničkih znanosti, elektrotehnike, računarstva i građevinarstva; Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci; prosinac 2008.

[1] dr. Željko Novinc; **Kvaliteta električne energije** – priručnik; Elektrotehnički fakultet Sveučilišta J. J. Strossmayer u Osijeku

[9] Krešimir Šimleša, dipl. ing.el. , Borislav Milašinović, dipl. ing. el. ; **Mjerilo kvalitete napona integrirano u brojilo električne energije**; Hrvatski ogranak međunarodne elektrodistribucijske konferencije – HO CIRED; Svibanj 2008.

[3] Math H. Bollen, Fainan Hassan: **Integration of Distributed Generation in the Power System**; John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2011.

[5] Ivan Mužić; **Mjerenje i nadzor kvalitete električne energije;** HEP-DP Elektroprimorje Rijeka d.o.o

[2] Zvonimir Klaić, Srete Nikolovski, **Kvaliteta električne energije – Mjerenja prema normi EN 50160**; Hrvatski komitet međunarodnog vijeća za velike električne sisteme,Zagreb, 2003.

SAŽETAK

U ovome radu dan je teorijski pregled utjecaja elektrana iz obnovljivih izvora na kvalitetu napona. U praktičnom dijelu analiziran je i iskomentiran utjecaj prije i poslije uključenja tri različite elektrane na obnovljive izvore na kvalitetu napona.

Ključne riječi: obnovljivi izvori, fotonaponska elektrana, biomasa, kvaliteta napona, flicker

ABSTRACT

This paper gives a theoretical review of the influence of power plants from renewable sources on the quality of the voltage. In the practical part, the impact before and after the inclusion of three different power plants on renewable sources on the voltage quality was analyzed and commented.

Keywords: renewable energy, Photovoltaic power plant, biomass, voltage quality, flicker

ŽIVOTOPIS

Benjamin Bereš rođen je 28. srpnja 1990. godine u Osijeku. 1997. upisuje osnovnu školu u Višnjevcu koju završava 2004. godine nakon koje upisuje Elektrotehničku i prometnu školu u Osijeku. Nakon mature upisuje preddiplomski studij elektroenergetike na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku koji završava i trenutno je na svršetku diplomskog studija elektroenergetike.