Kvaliteta električne energije - naponsko treperenje

Krejča, Krešo

Master's thesis / Diplomski rad

2015

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:200:148579

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-23**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni studij

KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE – NAPONSKO TREPERENJE

Diplomski rad

Krešo Krejča

Osijek, 2015.

DIPLOMSKI ZADATAK:

Definirati pojam naponskog treperenja te opisati moguće izvore i posljedice spomenutog pokazatelja kvalitete električne energije. Definirati ograničenja za kolebanje napona i naponsko treperenje u normi EN 50160. Proučiti mogućnosti širenja naponskog treperenja te metode ublažavanja. Izvesti analizu rezultata mjerenja naponskog treperenja u industrijskom pogonu.

SADRŽAJ:

1. UVOD 1

2. DEFINICIJA, IZVORI I POSLJEDICE NAPONSKOG TREPERENJA 2

2.1. Definicija 2

2.2. Izvori naponskog treperenja 3

2.2.1. Lučne peći 4

2.2.2. Uređaji za lučno i točkasto zavarivanje 6

2.2.3. Asinkroni motori 7

2.2.4. Kondenzatorske baterije 7

2.2.5. Naponski međuharmonici 8

2.2.6. Distribuirani izvori električne energije 12

2.3. Posljedice naponskog treperenja 22

2.3.1. Posljedice naponskog treperenja na izvore svjetla 22

2.3.2. Posljedice naponskog treperenja na električne strojeve 25

2.3.3. Posljedice naponskog treperenja na statičke pretvarače 26

3. KOLEBANJE I TREPERENJE NAPONA U NORMI EN 50160 27

3.1. Uvod u normu EN 50160 27

3.2. Parametri norme EN 50160 27

3.2.1. Kolebanje napona 27

3.2.2. Naponsko treperenje 28

3.2.3. Naponi viših harmonika i međuharmonika 28

3.3. Uvjeti kada se norma EN 50160 ne primjenjuje 29

4. ŠIRENJE NAPONSKOG TREPERENJA I METODE UBLAŽAVANJA 30

4.1. Širenje naponskog treperenja 30

4.1.1. Širenje naponskog treperenja stvorenog jednim promjenjivim opterećenjem 30

4.1.2. Širenje naponskog treperenja stvorenog iz više izvora 32

4.1.3. Širenje naponskog treperenja u zamkastoj mreži 35

4.2. Metode ublažavanja naponskog treperenja 36

4.2.1. Metoda snižavanja jalove snage opterećenja 36

4.2.2. Metoda povećanja snage kratkog spoja 40

4.2.3. Ostale metode ublažavanja naponskog treperenja 41

5. ANALIZA REZULTATA MJERENJA TREPERENJA NAPONA U KOTLOVNICI POSTROJENJA ZA PRERADU DRVA 42

5.1. Analiza kratkotrajnog i dugotrajnog treperenja kotlovnice 43

5.2. Analiza 10-minutnih efektivnih usrednjenih vrijednosti struje i kratkotrajnog treperenja kotlovnice 44

5.3. Analiza 10-minutnih efektivnih usrednjenih vrijednosti struje i napona kotlovnice 45

5.4. Metode ublažavanja naponskog treperenja u kotlovnici 46

6. ZAKLJUČAK 47

LITERATURA 48

SAŽETAK 49

ŽIVOTOPIS 50

1. UVOD

Zbog velike upotrebe različitih električnih aparata s nelinearnim djelovanjem u kućanstvu ili industriji, nužno je analizirati kvalitetu električne energije. Kod analize kvalitete električne energije analiziraju se dvije temeljne komponente: neprekinutost i razina napona. Neprekinutost je definirana kao stupanj raspoloživosti električne energije krajnjem korisniku tijekom vremena, dok je razina napona specificirani opseg unutar kojega se održava napon u svakom trenutku. [1]

Analiziranje razine napona podrazumijeva analiziranje amplitude, frekvencije, valnog oblika i simetrije napona. Najčešći problemi koji se javljaju u mreži su: naponski propadi i prekidi, naponsko treperenje, prijelazni prenaponi, tranzijetni prenaponi, naponska nesimetrija, promjene osnovne frekvencije, te prisutnost istosmjernog napona u izmjeničnom.

U ovom radu je temeljno opisan problem naponskog treperenja. Rad sadrži definiciju naponskog treperenja, opis izvora (lučne peći, uređaji za lučno zavarivanje, asinkroni motori, kondenzatorske baterije, vjetroelektrane i naponski međuharmonici) i posljedica naponskog treperenja na promjenu svjetlosnog toka žarulje, promjenu momenta i klizanja električnih strojeva te smanjenje faktora snage i generiranje ne karakterističnih harmonika i međuharmonika kod statičkih pretvarača.

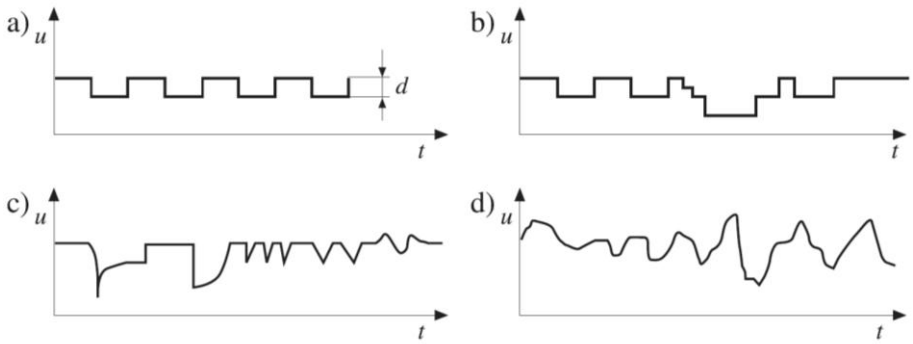
Uz izvore i posljedice naponskog treperenja rad sadrži i opis europske norme EN 50160 koja ograničava kolebanje i treperenje napona, opis rasprostiranja treperenja napona u nekoj točki mreže, i metode ublažavanja treperenja koje se temelje na snižavanju promjene jalove snage opterećenja i povećanju snage kratkog spoja.

U radu su, uz teoretsku podlogu o samom naponskom treperenju, analizirani rezultati mjerenja naponskog treperenja u kotlovnici postrojenja za preradu drva. Mjerenje naponskog treperenja u kotlovnici postrojenja za preradu drva je obavljeno Flukeovim uređajem 1745 Power Quality Logger, pomoću kojega se mjere svi pokazatelji električne energije, dok je analiza napravljena na računalu u programu PQ Log. Glavni razlozi naponskog treperenja koje se mjeri u kotlovnici ne mogu se točno odrediti, ali su određene metode kako ublažiti to isto naponsko treperenje.

2. DEFINICIJA, IZVORI I POSLJEDICE NAPONSKOG TREPERENJA

2.1. Definicija

Kolebanje napona, tj. promjena amplitude napona u nekom određenom razdoblju je glavni razlog naponskog treperenja. Slika 2.1. pokazuje neke oblike kolebanja napona.



Slika 2.1. Kolebanje napona – a) pravokutno kolebanje napona
b) naponsko kolebanje s konstantnim razdobljem
c) nepravilno kolebanje napona
d) stohastičko ili stalno kolebanje napona [2]

Promjene amplitude napona mogu se pojaviti jednom ili više puta. Ako se kolebanje napona pojavljuje s frekvencijom od oko 0,005 Hz do 35Hz, to uglavnom vodi tome, u ovisnosti o amplitudi, da svjetlo počinje treperiti. Intenzitet naponskog treperenja ovisi o razini naponskog kolebanja, o frekvenciji kojom se treperenje javlja i o vrsti žarulje. Osim tih fizičkih čimbenika, intenzitet treperenja također određuju uvjeti okoliša, kao i fizičko i psihičko stanje osobe izložene treperenju zato što je ljudski faktor jako bitan kod definicije naponskog treperenja [2].

Naponsko treperenje je definirano na sljedeći način: ako u prostoriji boravi 100 ljudi pod jednakim uvjetima i ako se intenzitet svjetla mijenja toliko da to opazi 50 od 100 nazočnih ljudi kaže se da treperenje ima intenzitet 1 [3].

Postoje dvije vrste naponskog treperenja:

- Kratkotrajno treperenje P_{st} (engl. *short time*): mjeri se unutar intervala od 10 minuta te je osnovni parametar mjerenog treperenja. Veličina P_{st} odgovara pragu razdražljivosti, tj. granici koja se ne smije prekoračiti kako se ne bi dogodila slabost promatrača.
- Dugotrajno treperenje P_{lt} (engl. *long time*): računa se na temelju 12 uzastopnih vrijednosti P_{st} prema sljedećoj jednadžbi:

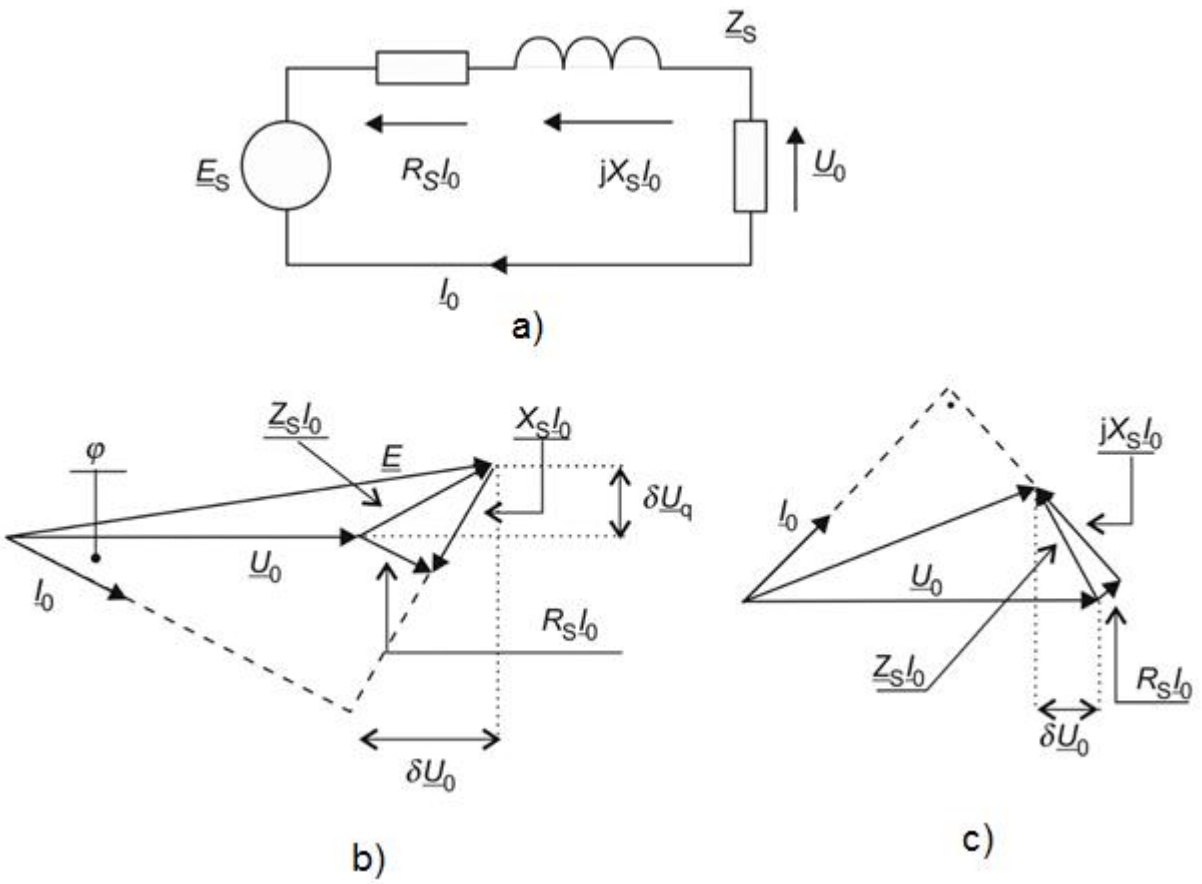
$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{sti}^3}{12}} \tag{2-1}$$

2.2. Izvori naponskog treperenja

Naponi na početku i na kraju dalekovoda se razlikuju. To se može prikazati na jednostavnom primjeru jednofaznog dijagrama, prema slici 2.2. (pretpostavlja se da jednofazni dijagram prikazuje simetrični trofazni sustav), gdje je: E_s – napon izvora, U_o – napon na trošilu, I_o – struja, Z_s – ekvivalentna impedanicija, X_s – reaktancija, R_s – otpornost.

Određivanje promjene amplitude napona ΔU_o u promatranom čvoru mreže, prema jednadžbi (2-2), može se dobiti pomoću fazorskog dijagrama (Sl. 2.2.b. i Sl. 2.2.c.) i jednostavnih trigonometrijskih odnosa:

$$\frac{E_S - U_0}{U_0} \approx \frac{\Delta U_0}{U_0} = R_S \frac{P_0}{U_0^2} + X_S \frac{Q_0}{U_0^2} \cong R_S \frac{P_0}{U_0^2} + \frac{Q_0}{S_{SC}} \tag{2-2}$$



Slika 2.2. Jednofazna nadomjesna mreža opskrbne mreže (a) i fazorski dijagrami za induktivno opterećenje $E_s \geq U_o$ (b) te za kapacitivno opterećenje $E_s \leq U_o$ (c) [4]

Pod pretpostavkom da je otpor dalekovoda zanemariv u usporedbi sa svojom reaktancijom ($Xs>10R$), te da to vrijedi za visokonaponsko napajanje sustava, dobivamo pojednostavljenu formulu koja opisuje relativnu promjenu napona na kraju dalekovoda (uz pretpostavku $\delta U_p \approx 0$):

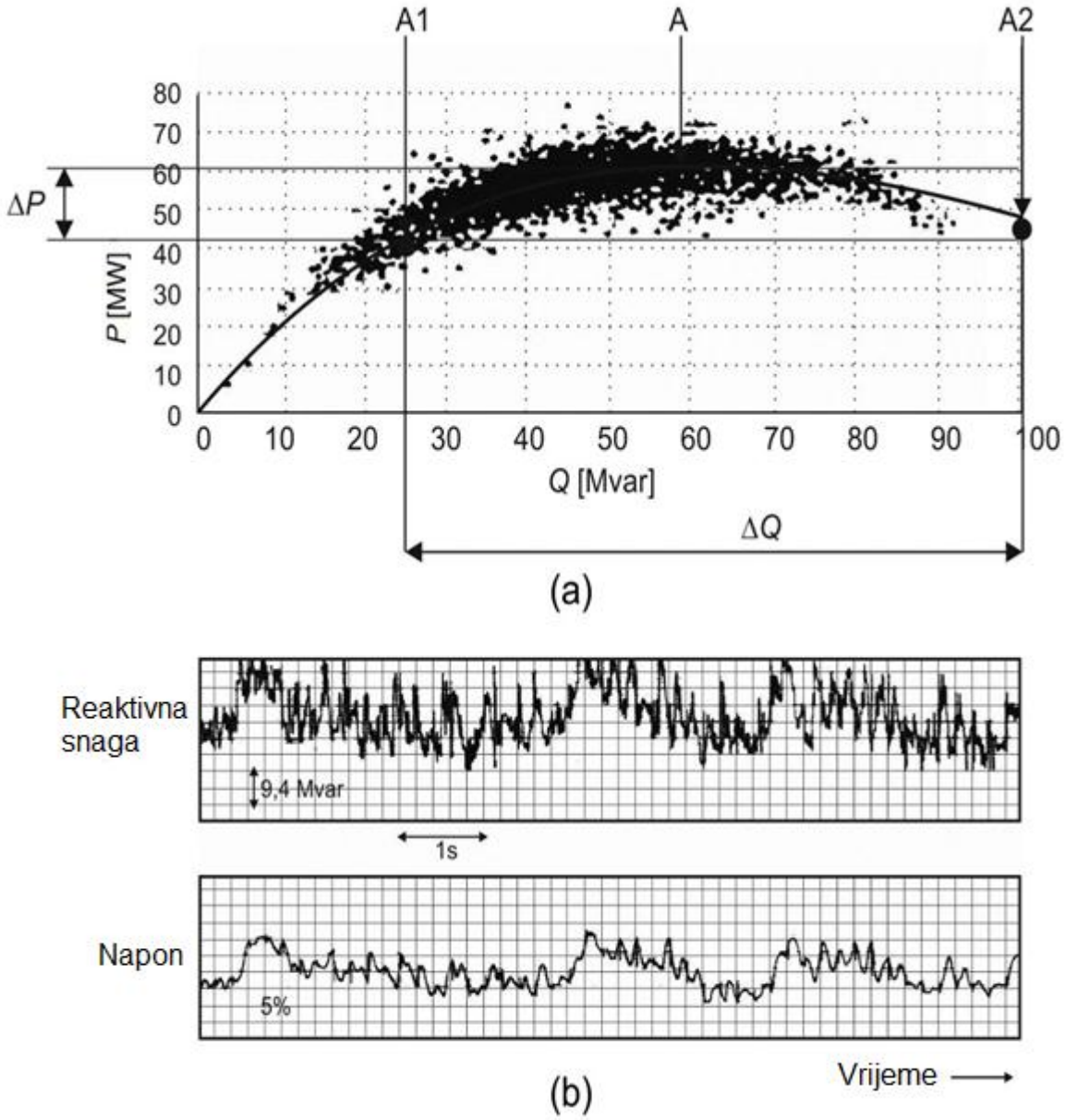
$$\frac{\Delta U_0}{U_0} \cong \frac{Q_0}{S_{SC}} \tag{2-3}$$

Kao što slijedi iz jednadžbe (2-3), primarni uzrok naponskih promjena, uključujući i kolebanje te treperenje, je promjena snage opterećenja. Izvori tih promjena su uglavnom industrijska opterećenja s npr. lučnim pećima, velikim industrijskim motorima s promjenjivim opterećenjima, uređajima za lučno zavarivanje, električnim čekićima, itd. Općenito, izvori naponskih promjena su svi uređaji ili postrojenja čija je snaga relativno velika u odnosu na snagu kratkog spoja na mjestu njihovog priključenja na mrežu. Rendgenski uređaji ili fotokopirni uređaji velikih kapaciteta koriste se za komercijalne svrhe, ali imaju sličan utjecaj na mrežu kao i velika industrijska opterećenja. Izvori naponskog treperenja u stambenim zgradama mogu biti bilo koji uređaji čiji rad podrazumijeva cikličko uključivanje i isključivanje (npr. perilice rublja, hladnjaci, štednjaci, klima uređaji, itd.). Zbog svojih malih pojedinačnih snaga, njihov nepovoljan utjecaj je obično ograničen na mali broj potrošača.

Naponsko treperenje također se javlja kao posljedica nekog procesa u elektroenergetskom sustavu (npr. nepravilnog rada preklopke prijenosnog omjera transformatora) te zbog rada nekih distribuiranih izvora energije (npr vjetroelektrana) [4].

2.2.1. Lučne peći

Kao što je prikazano na kružnom dijagramu na slici 2.3.(a), faktor snage u točki A poprima vrijednost 0,7 što odgovara maksimalnoj snazi peći (tj. maksimalnoj učinkovitosti metalurškog procesa) te je radna snaga otprilike jednaka jalovoj snazi. Promjenom otpora tijekom rada peći radna točka se nalazi negdje između točke A1 i točke A2. U tom slučaju, promjena jalove snage će biti nekoliko puta veća od promjene djelatne snage. Brze promjene reaktivne snage, su glavni uzrok naponskih prilika na sabirnicama električnih željezara (Sl. 2.3.(b)).

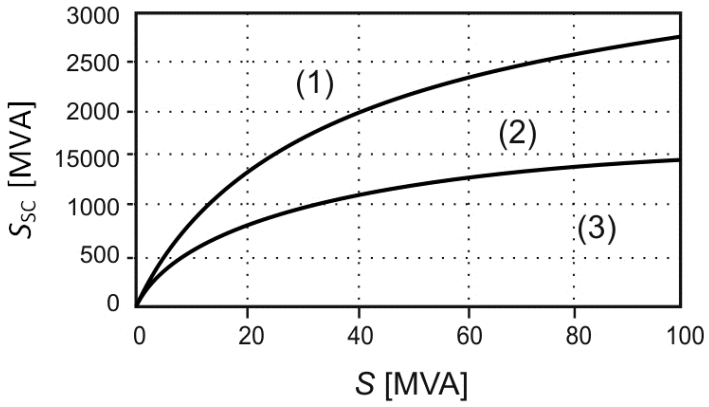


Slika 2.3. (a) kružni dijagram lučne peći; (b) primjer promjene jalove snage i kolebanja napona na električnim sabirnica lučne peći [4].

Budući da impedancija visokonaponske mreže ima gotovo induktivni karakter ($R_S << X_S$) (a gotovo sve električne željezare, zbog svoje velike snage, se spajajaju na visokonaponsku mrežu), promjene snage moraju zadovoljiti uvjet $\Delta P << \Delta Q$. Iz jednadžbe (2-3), vidljivo je da je promjena razine napona izravno proporcionalna promjeni jalove snage i obrnuto proporcionalna snazi kratkog spoja na mjestu spajanja peći i mreže.

Slika 2.4. prikazuje u koordinatnom sustavu snagu kratkog spoja na mjestu priključka (SSC) i snagu transformatora peći (S), što omogućuje preliminarnu procjenu emisije naponskog treperenja uzrokovanog radom peći. Na toj karakteristici se mogu prepoznati tri područja: područje (1) u

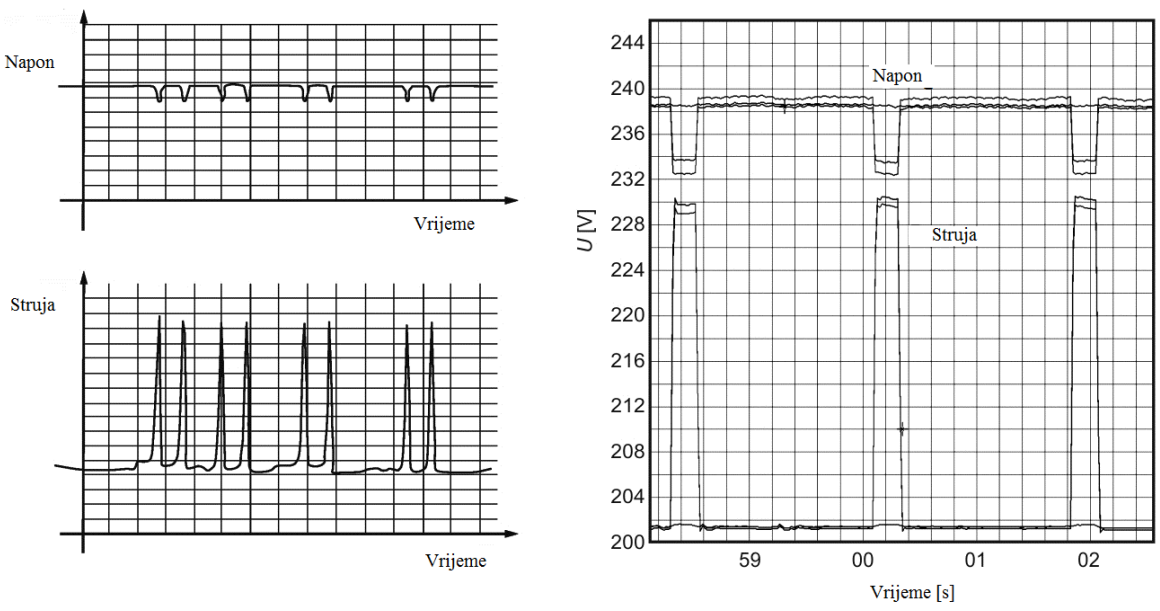
kojoj peć ne uzrokuje značajne promjene, područje (2) u kojemu peć stvara male promjene te postoji mala potreba za uporabu kompenzatora / stabilizatora, i područje (3) u kojem peć stvara veliku promjenu napona i potrebno je korištenje kompenzatora ili drugih uređaja za ublažavanje kolebanja napona [4].



Slika 2.4. Karakteristike koje omogućuju procjenu emisija naponskog treperenja uzrokovanog radom peći [4]

2.2.2. Uređaji za lučno i točkasto zavarivanje

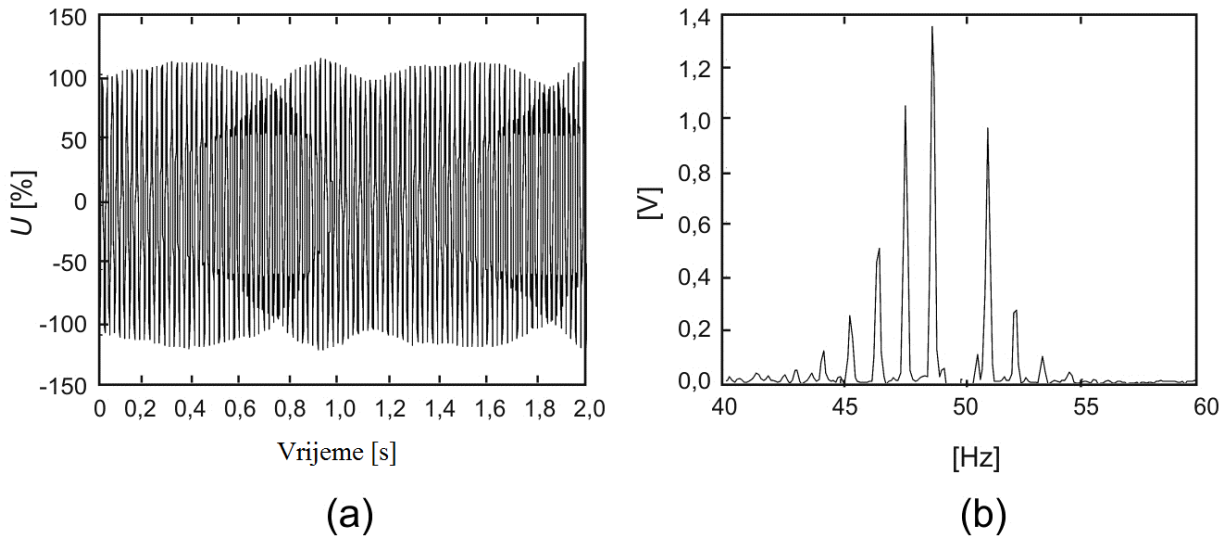
Slika 2.5. prikazuje primjer efektivne vrijednosti promjene napona i struje tijekom procesa zavarivanja. Zbog velike struje zavarivanja vidljivo je kolebanje napona koje uzrokuje naponsko treperenje. Problem postaje ozbiljniji u slučaju istovremenog, nezavisnog rada više zavarivača koji su spojeni na isti transformator [4].



Slika 2.5. Kolebanje napona i struje tijekom lučnog zavarivanja (a) i točkastog zavarivanja (b) [4]

2.2.3. Asinkroni motori

Važni izvori kolebanja i treperenja napona su ponavljajuće pokretanje motora i rad električnih pogona s promjenjivim momentom opterećenja, npr. električne pile, preše, pumpe, kompresori, klima uređaji, itd. Isto vrijedi i za regulatore brzine koji su opremljeni energetskom elektronikom - AC / DC ili AC / AC pretvaračem [4].

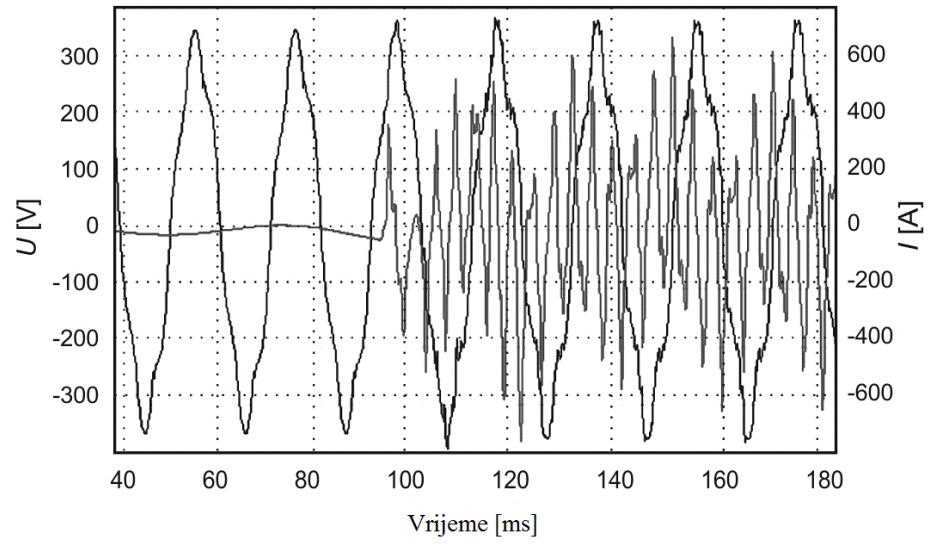


Slika 2.6. a) kolebanje napona na priključcima elektromotora velike snage s promjenjivim opterećenjem

b) spektar amplitude moduliranog napona [4]

2.2.4. Kondenzatorske baterije

Prolazna stanja nastala zbog uključivanja kondenzatorskih baterija koji se obično koriste za automatsku kompenzaciju jalove snage na svim naponskim razinama (Sl. 2.7.) mogu biti izvor kolebanja i treperenja napona [4].



Slika 2.7. Valni oblik napona i struje tijekom uključivanja kondenzatora [4]

2.2.5. Naponski međuharmonici

Kako bi se utvrdile naponske spektralne komponente koje mogu biti izvor kolebanja i treperenja napona treba analizirati trenutnu snagu izvora. U tu svrhu, pretpostavlja se da je napon napajanja periodični i da ga opisuje relacija:

$$u(t) = u_1(t) + u_h(t) + u_{In}(t) = U_m \cos \omega t + \sum_h m_h \cos(h\omega t + \varphi_h) + \sum_{In} m_{In} \cos(\omega t + \varphi_{In}) \qquad (2\text{-}4)$$

gdje indeks (*1*) označava temeljnu komponentu s frekvencijom ω i amplitudom U_m; (*h*) označava h-ti red harmonika; (I_n) označava h-ti red međuharmonika.

Snaga žarulje sa žarnom niti (pod pretpostavkom da je otpor žarulje konstantan) je proporcionalna kvadratu napona napajanja:

$$u^2(t) = u_1^2(t) + u_h^2(t) + u_{In}^2(t) + 2u_1(t)u_h(t) + 2u_1(t)u_{In}(t) + 2u_h(t)u_{In}(t) \qquad (2\text{-}5)$$

Doprinos izraza $u_{In}^2(t)$ se može zanemariti, jer se u praksi veličine s indeksom *In* zanemaruju. Izraz $u_1^2(t)$ daje istosmjernu komponentu snage i dvostruku komponentu frekvencije. Iako posljednja komponenta može biti značajna, njezina učestalost je izvan vizualnog dometa percepcije i stoga ona nije uzrok titranja.

Uz pretpostavku konstantne vrijednosti harmonika napona, isto vrijedi i za izraz $u_h^2(t)$, čije frekvencije nisu manje od 50 Hz. Ako se vrijednosti harmonika mijenjaju, oni će dovesti do međuharmonika u susjednim harmonicima i njihova frekvencija može biti sadržana unutar raspona osjetljivosti ljudskog oka.

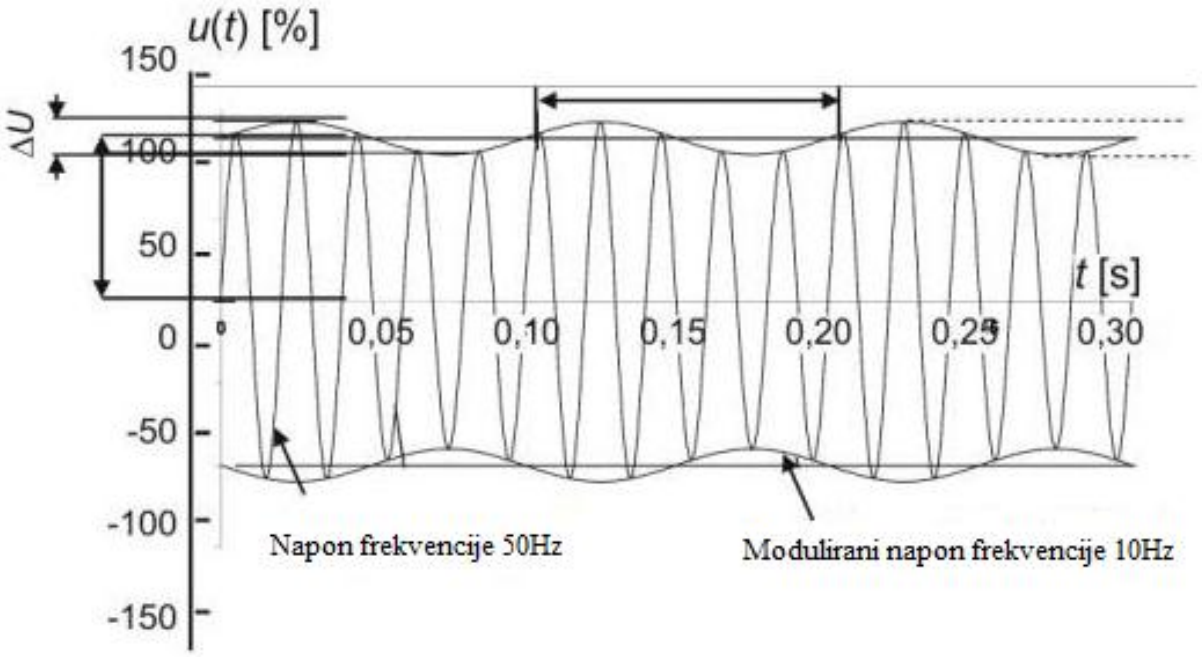
Rezultati množenja $2u_1(t)u_h(t)$ su dijelovi s kutnim frekvencijama *(h±1)ω*, od kojih je najniža frekvencija (ω) izvan vidljivog raspona treperenja.

Isto tako, rezultati množenja $2u_h(t)u_{In}(t)$ su dijelovi s kutnim frekvencijama: $\omega+\omega_{In}$ i $\omega-\omega_{In}$, od kojih samo $\omega-\omega_{In}$ može biti potencijalni izvor titranja za: $h\omega-\omega_{max} \le \omega_{In} \le h\omega+\omega_{max}$, gdje je ω_{max}=35*Hz*. Rezultati množenja $2u_1(t)u_{In}(t)$ su dijelovi kutne frekvencije: $\omega+\omega_{In}$ i $\omega-\omega_{In}$, od kojih samo $\omega-\omega_{In}$ može biti potencijalni izvor smetnji za $\omega-\omega_{max} \le \omega_{In} \le \omega+\omega_{max}$, tj. $\omega_{In} \in$ (15 - 85) *Hz*.

Slika 2. 8. pokazuje primjer valnog oblika napona i amplitudu moduliranog sinusnog signala frekvencije 10 Hz opisanog formulom:

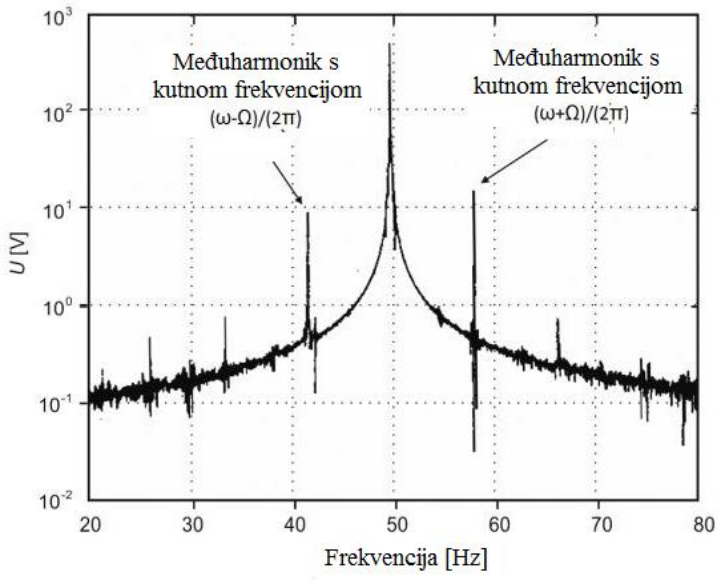
$$u(t) = U_m(1 + m\cos\Omega t)\cos\omega t = U_m \cos\omega_0 + \frac{mU_m}{2}\left[\cos(\omega - \Omega)t + \cos(\omega + \Omega)t\right] \qquad (2\text{-}6)$$

gdje je Ω kutna frekvencija moduliranog signala, a m je indeks modulacije (= ΔU / $2U$).



Slika 2.8. Valni oblik napona s moduliranim sinusnim signalom frekvencije 10 Hz [4]

Jednadžba (2-6), osim harmonika (s kutnom frekvencijom ω), sadrži dvije komponente kutnih frekvencije (ω-Ω) i (ω+Ω) koje su simetrične u odnosu na prijenosnu frekvenciju (Sl. 2.9.).

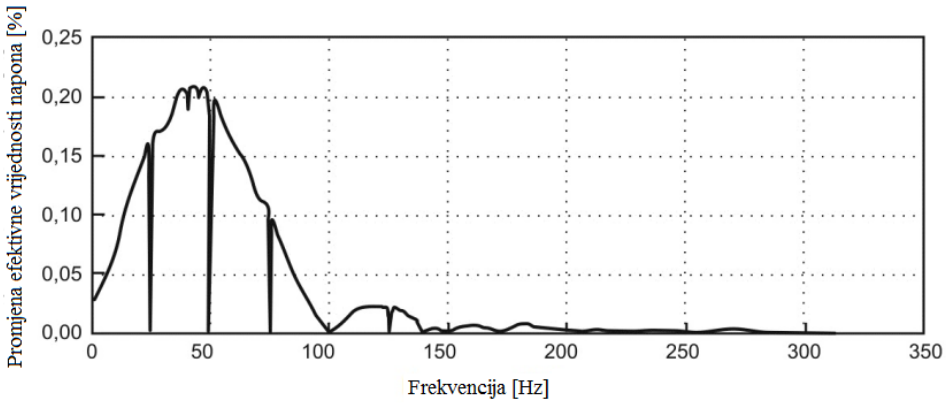


Slika 2.9. Grafičko tumačenje frekvencijskog spektra amplitude moduliranog napona [4]

Superpozicija dvije komponente napona daje valni oblik s frekvencijom: $f = |f_{inh} - f_0|$, gdje je: f_{Inh} - međuharmonička komponenta frekvencije, a f_0 – najbliža komponenta frekvencije cjelobrojnom umnožku temeljne frekvencije.

Na primjer, za međuharmonik reda n = 3.1, modulacijska frekvencija je: (3,1-3) = 0,1 ili (155-150) Hz = 5 Hz. Međuharmonici s frekvencijama manjim od 100 Hz uglavnom utječu na efektivnu vrijednost napona, dok međuharmonici s frekvencijama većim od 100 Hz utječu na modulacijske vršne vrijednosti.

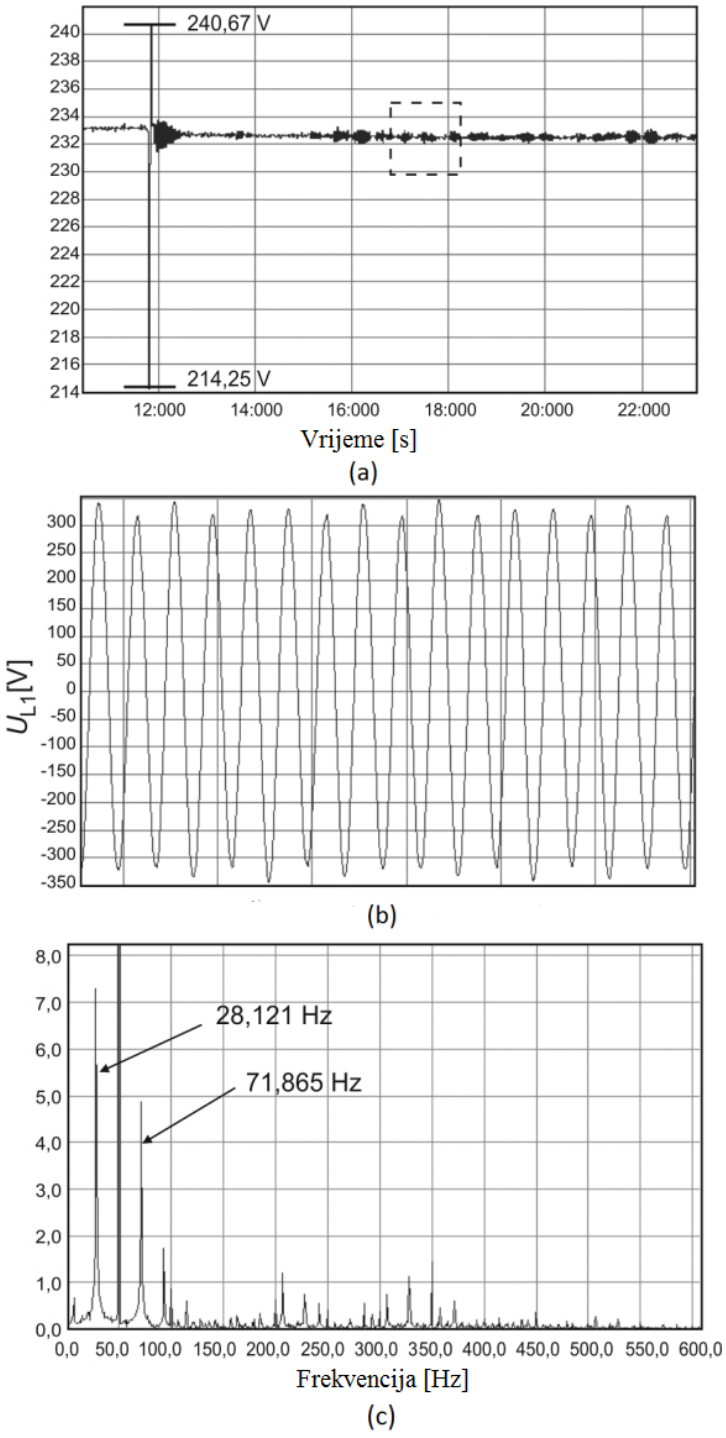
Slika 2.10. prikazuje najveću promjenu efektivne vrijednosti napona uzrokovane međuharmonikom s promjenjivom frekvencijom i konstantnom amplitudom m = 0,2% temeljne komponente U_1.



Slika 2.10. Promjena efektivne vrijednosti napona uzrokovana međuharmonikom s promjenjivom frekvencijom i konstantnom amplitudom m = 0,2% temeljne komponente U_1 [4]

Upravljački daljinski signali za sklopke, zaštitu, prijenos podataka i slično mogu biti specifični izvor treperenja napona. Usprkos malim veličinama, ti signali mogu izazvati treperenja napona koje remete rad osjetljivih izvora svjetlosti.

Slika 2.11. prikazuje valni oblik izlaznog napona UPSa u odabranoj fazi. UPS opskrbljuje klima uređaj. Proces uključivanja/isključivanja i treperenje napona tijekom rada mogu se vidjeti u oba valna oblika i na njegovom spektru.

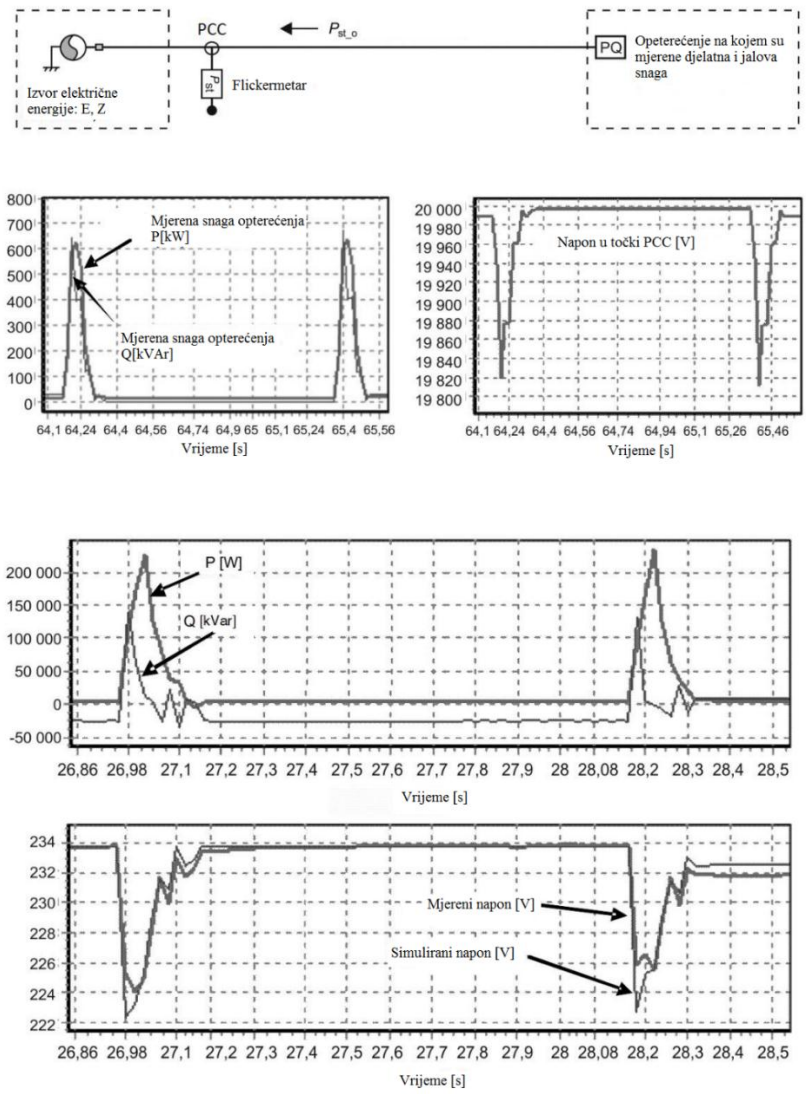


Slika 2.11. Valni oblik izlaznog napona UPSa: (a) RMS vrijednost, (b) trenutačna vrijednost, i (c) napon spektra [4]

Opis frekvencijske domene treperenja napona je složen. Naponsko treperenje i međuharmonici su svakako međusobno ovisni i metode koje se temelje na Fourierovoj analizi neće biti dovoljni za opisivanje slučajnih, nestacionarnih signala, gdje vrijeme i frekvencija igraju bitnu ulogu. Zbog toga treba tražiti druge metode za rješavanje ovog problema, npr. metode koje koriste teoriju obrade signala, uključujući analize spektralne gustoće i linearne transformacije [4].

2.2.6. Distribuirani izvori električne energije

Izvori električne energije s velikom snagom kratkog spoja na mjestu njihovog spoja mogu biti uzrok naponskog treperenja. Naponsko treperenje se događa zbog uključivanja ili isključivanja izvora ili zbog promjene njihove izlazne snage. Ako su promjene spore, kao što je slučaj kod fotonaponskih izvora, one uglavnom ne proizvode treperenje napona.



Slika 2.12. Primjer promjene mjerene i simulacijske efektivne vrijednosti napona i snage [4]

Simetrični generator s konstantnim opterećenjem, strujom uzbude i brzinom vrtnje, proizvodi konstantan napon na svojim izlaznim stezaljkama. Ako se bilo koji od ovih parametara promjeni, može doći do promjene napona. Promjena brzine je dominantna, jer vremenska konstanta uzbude generatora učinkovito smanjuje utjecaj generatorskog toka na naponske promjene.

Nejednak zračni raspor generatora između rotora i statora također može rezultirati kolebanjem izlaznog napona. Međutim, u današnje vrijeme, vjerojatnost nejednakog zračnog raspora je mala.

U slučaju loše kvalitete goriva ili neadekvatnog održavanja može doći do zapaljenja motora i, posljedično tome, do promjene izlazne snage.

Kod vrlo velikih, niskobrzinskih motora, promjene izlazne snage mogu se pojaviti čak i za vrijeme normalnog rada. Frekvencija promjene izlazne snage je: $f_F = (Nn/25k)$ Hz , gdje je: N broj cilindara; n – okretaji generatora u minuti, a koeficijent k poprima vrijednosti 2 za dvotaktne motore i 4 za četverotaktne motora.

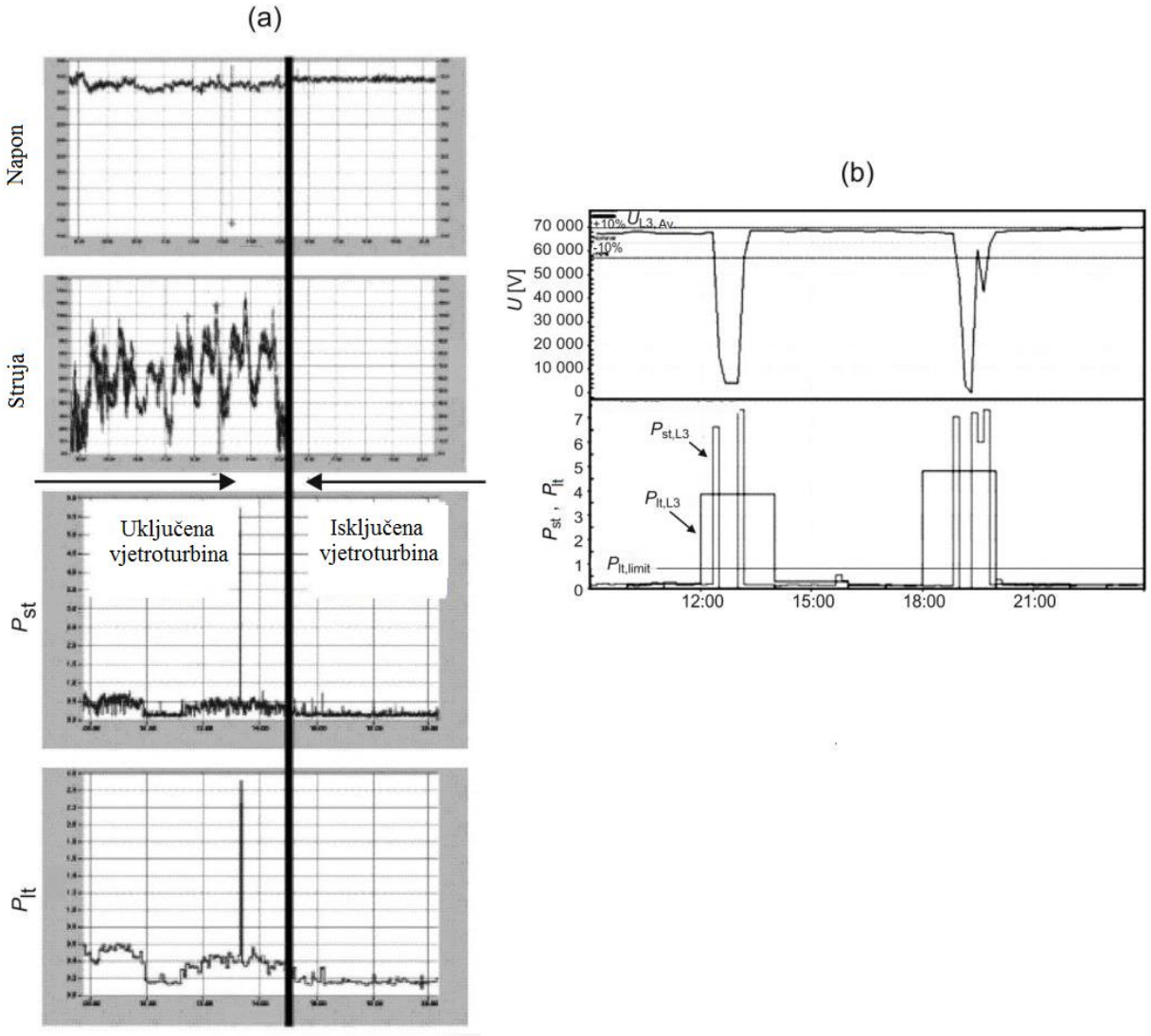
Ako dođe do zatajenja paljenja u cilindru, frekvencija promjene napona može se izraziti kao: $f_F = (n/25k)$. U takvom slučaju učestalost naponskih promjena podudara se s najnepovoljnijim područjem. Na primjer, četiri cilindra, 900 okretaja motora proizvodi treperenje s frekvencijom 7,5 Hz. Stanje se poboljšava pri 1,800 okretaja u minuti što odgovara frekvenciji od 15 Hz. To znači da se nalazi u području gdje je ljudsko oko manje osjetljivo na treperenje. Osnovni način da se spriječi ovaj efekt je kontrola kvalitete goriva i pravilno održavanje motora

Kod vjetrolektrana, njihov način utjecaja na elektroenergetsku mrežu ovisi o tome kako su vjetroturbine konstruirane kao i o načinu njihovog spajanja na elektroenergetski sustav. Vjetroelektrane su postavljene u mjestima koji imaju dobre uvjete vjetra i obično se nalaze u područjima gdje su slabe mreže. Prema tome, mrežni parametri i struktura mogu imati značajan utjecaj na rad vjetroelektrana i opseg njegovog štetnog utjecaja.

Električna energija proizvedena vjetroturbinom je promjenjiva, a time i napon na sabirnicama može biti promjenjiv (Sl. 2.13.). To je uglavnom zbog promjena brzine vjetra što rezultira i promjenom momenta rotora.

Treperenje napona se može pojaviti i u ekstremnim uvjetima kada je vjetar gust. Brzina vjetra može biti nejednolika te se može dogoditi da je veća brzina vjetra u gornjem dijelu turbine nego u donjem dijelu. Štoviše, sve vibracije i oscilacije kule mogu utjecati na rad vjetroelektrane, osobito pod uvjetima djelomičnog opterećenja.

Bitan aspekt utvrđivanja tehničkih uvjeta priključenja vjetroturbina je analiza njihovog potencijalnog utjecaja na naponsko treperenje na mjestu priključka.



Slika 2.13. Primjer valnih oblika napona, struje i treperenja turbine uslijed normalnog rada (a) i uključivanja turbine (b) [4]

Analiza se temelji na podacima dobivenim od proizvođača vjetroturbina i operatera elektroenergetskog sustava.

Emisije treperenja iz vjetroelektrane treba ublažiti tako da se nalaze unutar granica smetnji. Nadalje, relativna promjena napona uzrokovana radom vjetroelektrana mora biti ograničena, odnosno: $d \leq (\Delta U_{dyn} / U_N)$ gdje je d relativna promjena napona zbog uključivanja vjetroelektrane, a $(\Delta U_{dyn} / U_N)$ je najveća dopuštena promjena napona [4].

2.2.6.1. Kontinuirani rad vjetroelektrane

Normalno radno stanje vjetroelektrane je njezin kontinuirani rad, bez uključivanja i isključivanja. Koeficijent treperenja za kontinuirani rad c (ψ_k, v_a) se koristi za procjenu naponskog treperenja koji ovisi o prosječnoj godišnjoj brzini vjetra v_a i snazi mreže nadomjesne impedancije faznog kuta ψ_k na mjestu priključka. Koeficijent treperenja za kontinuirani rad je:

$$c(\psi_k) = P_{st,pc} \cdot \frac{S_{SC}}{S_N} \tag{2-7}$$

Gdje je: $P_{st,pc}$ - emisija treperenja iz vjetroelektrane tijekom kontinuiranog rada

S_N - procijenjena prividna snaga vjetroelektrane.

Koeficijent treperenja za kontinuirani rad je identičan za kratak (10 min) i dugi (120 min) vremenski period.

Kod vjetroturbina s promjenjivom brzinom, vrijednosti naponskog treperenja su obično male, dok kod vjetroturbina s fiksnom brzinom mogu varirati od srednje do visoke propisane vrijednosti.

Za procjenu globalne emisije iz N vjetroturbina koje zajedno rade koristi se izraz [4]:

$$P_{st} = P_{lt} = \frac{1}{S_k} \sqrt{\sum_{i=1}^{N} (c(\psi_k, v_a) \cdot S_{n,i})^2} \tag{2-8}$$

2.2.6.2. Uključivanje vjetroelektrane

Analizirane karakteristike uključivanja vjetroelektrane su:

- Vjetroelektrana se uključuje na promjenjivoj brzini vjetra
- Vjetroelektrana se uključuje na nazivnoj brzini vjetra
- Prebacivanje generatora (odnosi se na vjetroelektrane koje imaju više od jednog generatora ili imaju generator s više namota)

Za svaku od navedenih vrsta sklopnih operacija trebaju biti navedeni sljedeći parametri:

- Maksimalan broj sklopnih operacija u roku 10 minuta - N_{10}
- Maksimalan broj sklopnih operacija u roku 120 minuta - N_{120}
- Faktor koraka treperenja $k_f(\psi_k)$ za fazne kuteve impedancije mreže ψ_k = 30 ˚, 50 ˚, 70 ˚ i 85°
- Faktor promjene napona $k_U(\psi_k)$ za fazne kuteve impedancije mreže ψ_k = 30 ˚, 50 ˚, 70 ˚ i 85°

Faktor koraka treperenja, koji je normiranog iznosa, dan je formulom:

$$k_f(\psi_k) = \frac{1}{130} \cdot \frac{S_{SC}}{S_N} \cdot P_{stpc} \cdot T_p^{0,31} \tag{2-9}$$

Gdje je: T_p - razdoblje mjerenja, dovoljno dugo kako bi se osiguralo da prolazna pojava uključivanja prođe pa da su moguće promjene ograničene na zanemarivo male vrijednosti.

Emisija treperenja zbog uključivanja jednog vjetroagregata može se procjeniti prema jednadžbi (2-10):

$$P_{st} = 18 \cdot N_{10}^{0,31} \cdot k_f(\psi_k) \cdot \frac{S_N}{S_{SC}} \qquad P_{lt} = 8 \cdot N_{120}^{0,31} \cdot k_f(\psi_k) \cdot \frac{S_N}{S_{SC}} \tag{2-10}$$

U točki PCC gdje je povezano više vjetroturbina, globalne emisije titranja mogu se procijeniti iz izraza (2-11):

$$P_{st} = \frac{18}{S_{SC}} \left(\sum_{i=1}^{N} N_{10,i} (k_{f,i}(\psi_k) S_{N,i})^{3,2} \right)^{\frac{1}{3,2}} \qquad P_{lt} = \frac{8}{S_{SC}} \left(\sum_{i=1}^{N} N_{120,i} (k_{f,i}(\psi_k) S_{N,i})^{3,2} \right)^{\frac{1}{3,2}} \tag{2-11}$$

gdje je N broj generatora spojenih paralelno, S_N je nazivna snaga i $k_{f,\,i}\,(\psi_k)$ je faktor koraka treperenja i-tog uređaja. $N_{10,\,i}$ i $N_{120,\,i}$ su maksimalni brojevi sklopnih operacija koje se mogu pojaviti u roku od 10 min i 120 min. Parametri N_{10}, N_{120}, $k_f\,(\psi_k)$ i $k_u\,(\psi_k)$ moraju biti osigurani od strane proizvođača. Vrijednosti posljednja dva parametra mogu se mjeriti ili izračunati.

Faktor promjene napona normaliziran mjerenjem promjene napona zbog sklopnih procesa jedne vjetroelektrane:

$$k_u(\psi_k) = \sqrt{3} \cdot \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_N} \cdot \frac{S_{SC}}{S_N} \tag{2-12}$$

Gdje je: - U_{min} maksimalna efektivna vrijednost napona

- U_{max} minimalna efektivna vrijednost napona

- U_N nazivni napon

Faktor promjene napona k_u je definiran kao omjer maksimalne uklopne struje i nazivne struje, i funkcija je kuta mrežne impedancije. Vrijednost k_u ovisi o vrsti opreme.

Očekivana promjena napona u točki PCC zbog sklopnih procesa jedne vjetroturbine računa se prema izrazu:

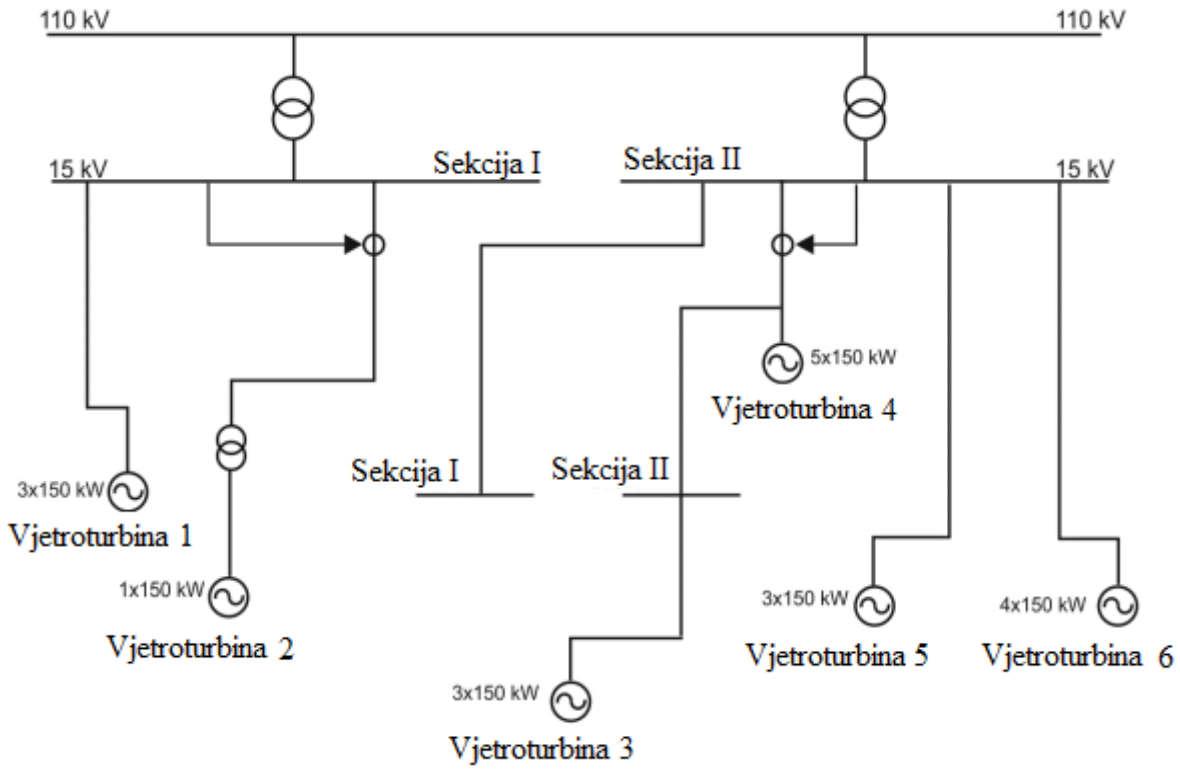
$$d = 100 \cdot k_U(\psi_k) \frac{S_N}{S_{SC}} \tag{2-13}$$

Budući da je malo vjerojatno da će se nekoliko turbina istovremeno uključiti, izraz (2-13) nije funkcija broja turbina [4].

2.2.6.3. Naponsko treperenje u odnosu na pad napona

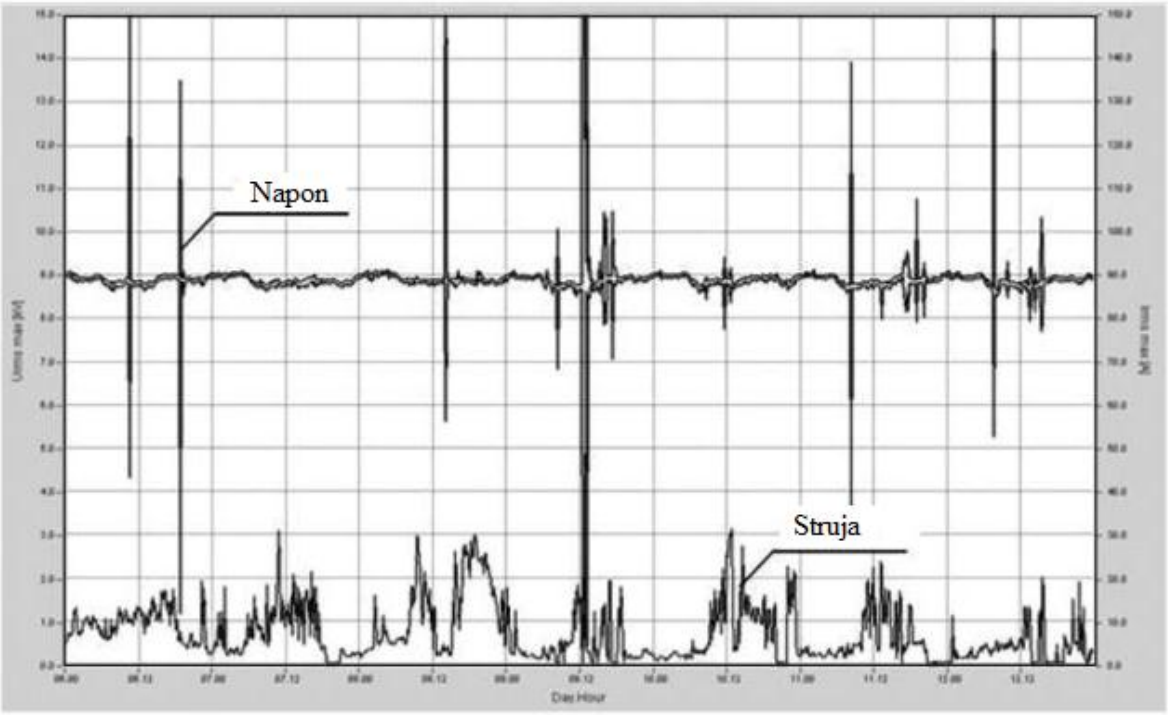
Slika 2.14. prikazuje ekvivalentnu shemu mreže napajanja gdje je nekoliko vjetroturbina (asinkronih strojeva izravno priključeno na električnu mrežu) grupirano kao mala vjetroelektrana ili pojedinačne vjetroelektrane. Svojstva pojedinih postrojenja vjetroelektrana su označeni na slici. Ukupna instalirana snaga vjetrogeneratora na istraživanom području je 2,85 MW.

Kako bi se istražio utjecaj vjetroturbina, serija mjerenja provedena je na mjestima njihove povezanosti na sabirnicama 15 kV i 110 kV. Mjerenja su pokazala pojavu naponskog treperenja.



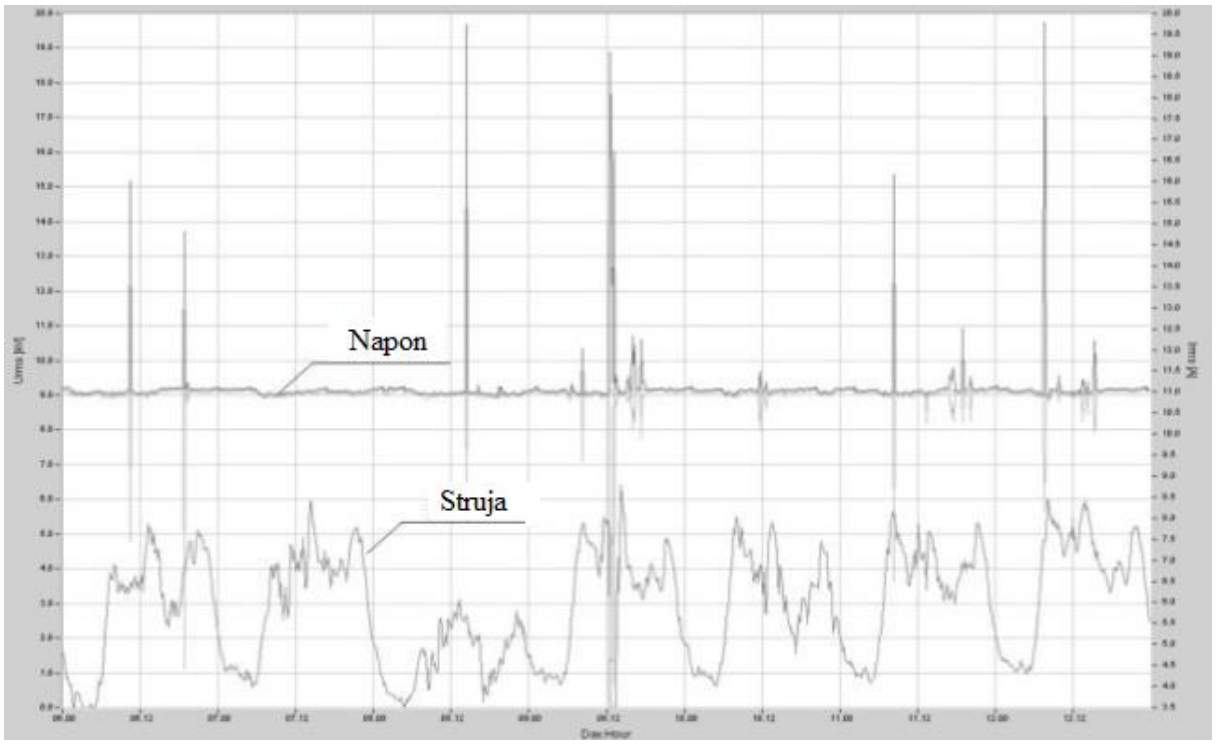
Slika 2.14. Model analizirane mreže s vjetroturbinama [4]

Fazni naponi i struje (efektivne, maksimalne i minimalne vrijednosti napona i maksimalne vrijednosti struje) snimljene su na mjestu vjetroelektrane 4. Vjetroelektrana 4 priključena je na prijenosnu mrežu kao što je prikazano na slici 2.14. Vidljive su velike promjene minimalne i maksimalne vrijednosti napona. Ipak, prosječna vrijednost ne prelazi graničnu razinu ±10%. Kao što se vidi iz slike 2.15., promjene napona nisu u korelaciji s promjenama maksimalne vrijednosti struje, stoga nisu izazvane radom vjetroturbina.

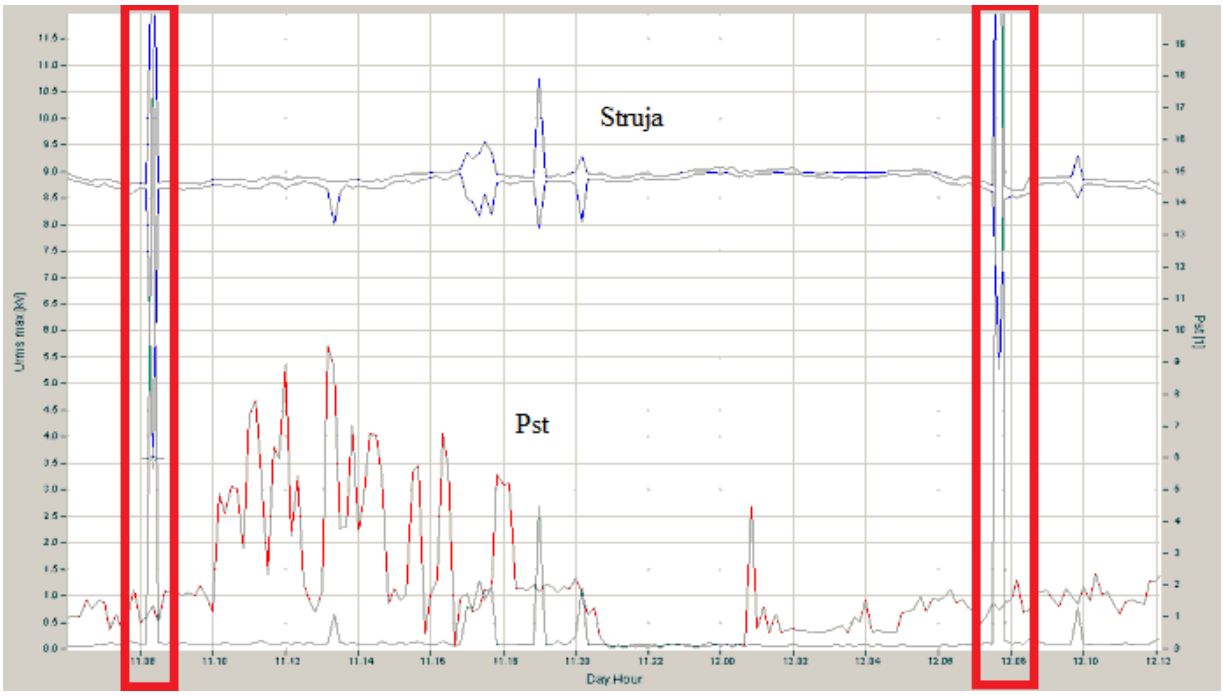


Slika 2.15. Primjeri maksimalne i minimalne vrijednosti napona i maksimalne vrijednosti struje, snimljene u vjetroelektrani 4 (faza L1) [4]

Slični valni oblici faznih napona i struja su zabilježeni i na drugim mjernim mjestima, uključujući i 15 kV sabirnicu. Slika 2.16. prikazuje maksimalne i minimalne vrijednosti napona i trenutne vrijednosti struje zabilježene u II. sekciji sabirnice na mjestu isporuke. Pad napona također se pojavljuje na drugim mjernim mjestima. Nema vremenske korelacije između naponskih događaja i faze struje i kratkotrajnog treperenja P_{st} (Sl. 2.17.).



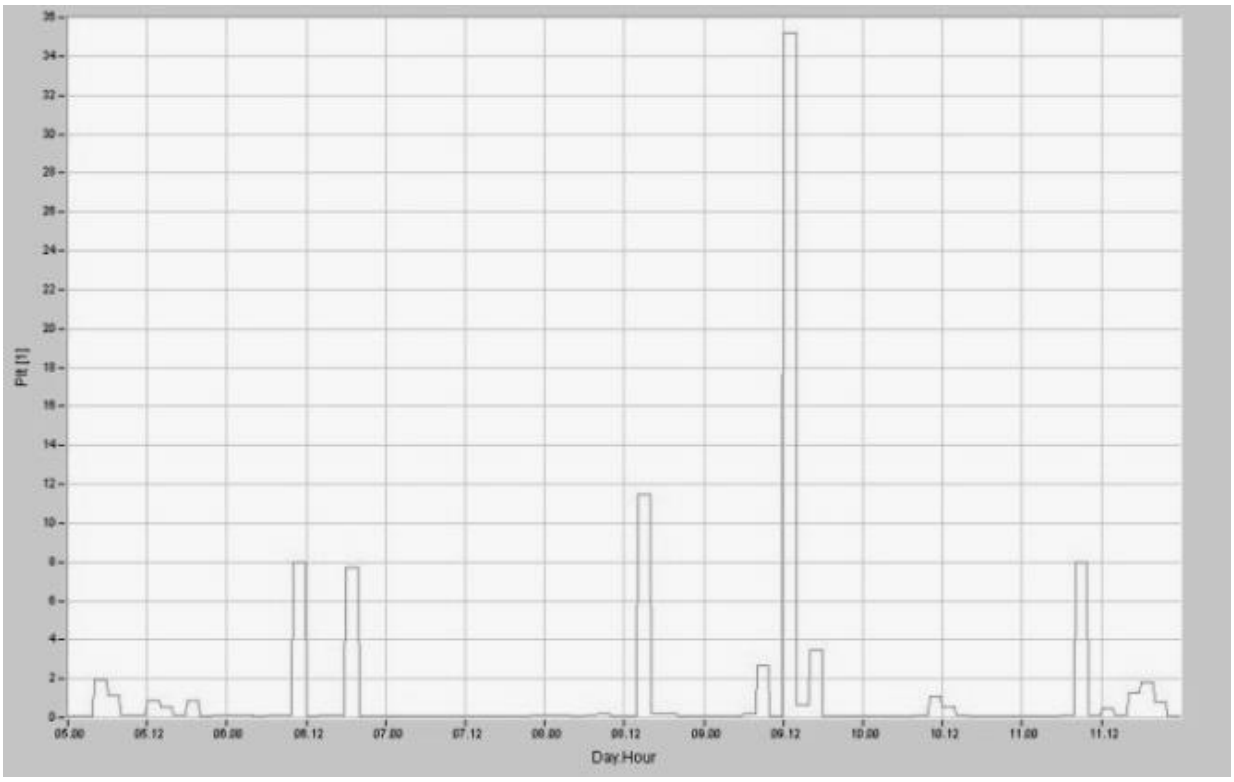
Slika 2.16. Prosječna, maksimalna i minimalna vrijednost napona i struje mjerena na sabirnici glavne trafostanice [4]



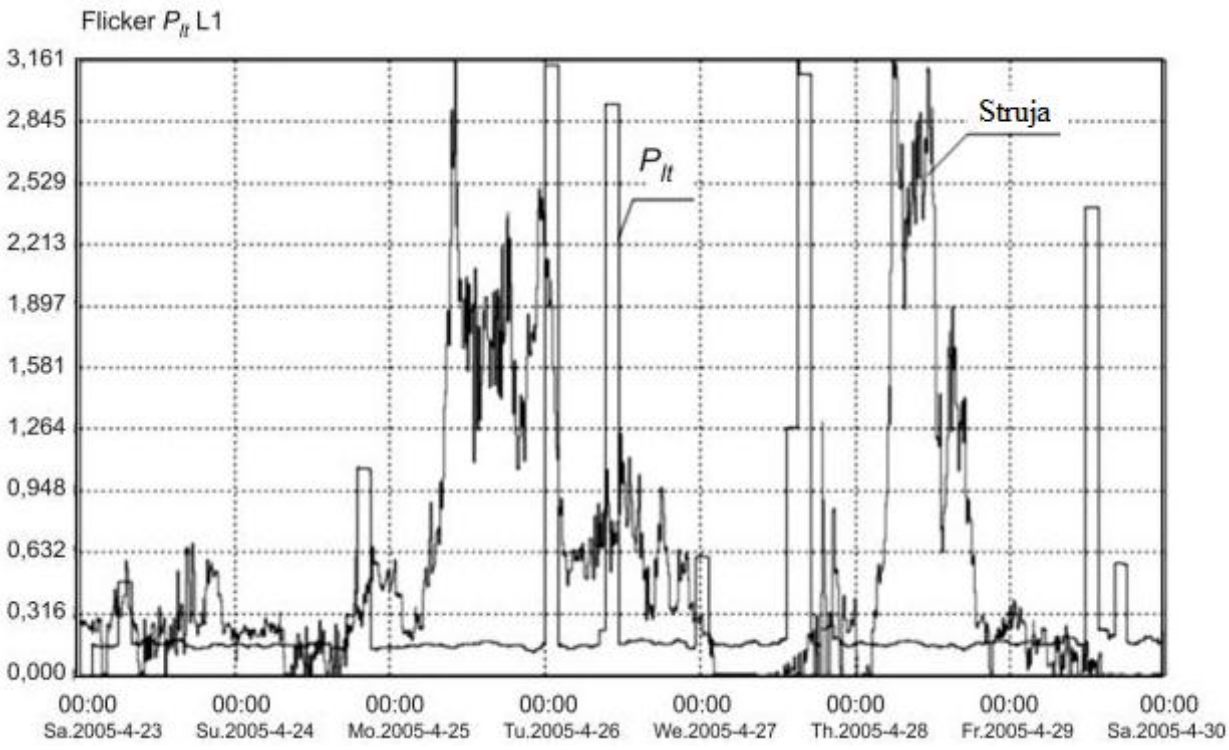
Slika 2.17. Trenutna maksimalna vrijednost struje i kratkotrajno treperenje *Pst* - vjetroelektrana 4 [4]

Izmjereno dugotrajno treperenje prelazi dopuštene vrijednosti za tu naponsku razinu u nekoliko navrata. Slika 2.18. prikazuje primjer dugoročnog treperenja P_{lt} zabilježenog na 15kV sabirnici. Dopuštena vrijednost znatno je premašena.

Kao što se može vidjeti iz slike 2.19., visoke vrijednosti naponskog treperenja nisu u korelaciji s trenutnim promjenama. Razdoblja s niskom vrijednošću P_{lt} pojavljuju se tijekom srednje struje iz vjetroelektrana, a razdoblja s visokim P_{lt} pojavljuju se kada je struja mala. Slična ovisnost je također primjećena i na drugim mjernim točkama.



Slika 2.18. Pokazatelj dugoročnog treperenja P_{lt}, zabilježen tijekom tjedan dana na 15 kV sabirnici (P_{lt} = 7,69) [4]



Slika 2.19. Pokazatelj dugoročnog treperenja P_{lt} i struja vjetroelektrana 1 i 4 [4]

Prema standardu, P_{st} i P_{lt} vrijednosti zabilježene kod pada napona su isključene iz procjene razine treperenja. Krajnji rezultat postiže značajno smanjenje razine treperenja na mjestima priključenja vjetroelektrana na prijenosnu mrežu (približne razine prikazane su u tablici 2.1.) [4].

Tablica 2.1. Mjerene i procijenjene vrijednosti dugoročnog treperenja u mjernim točkama [4]

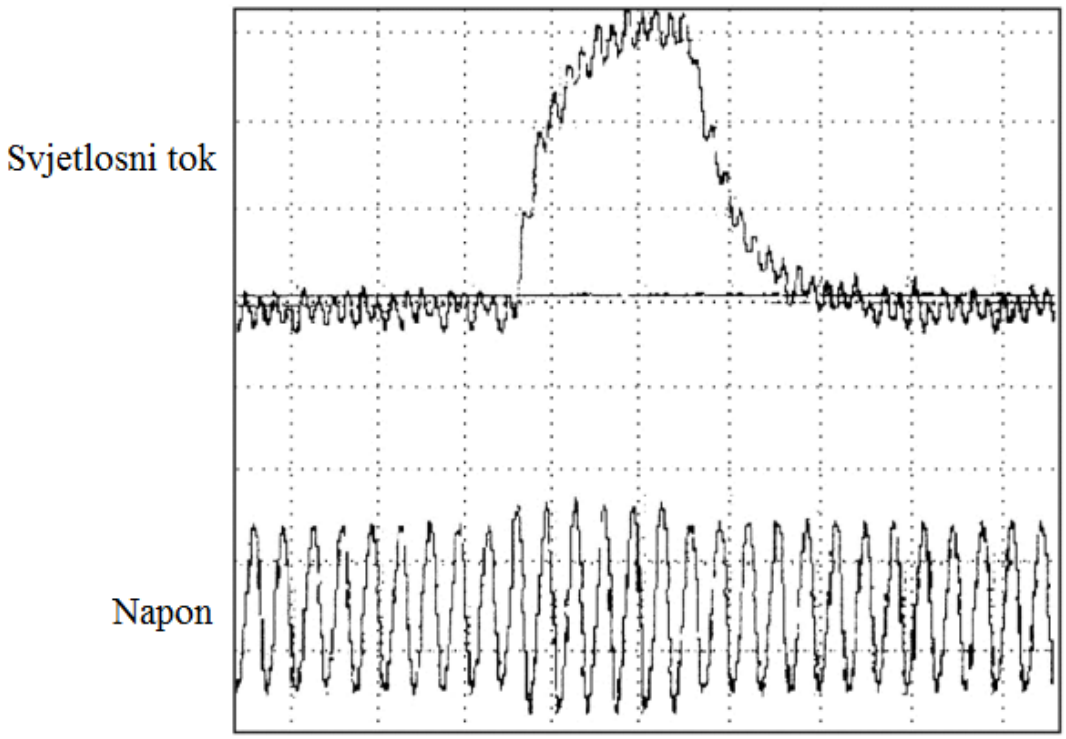
Mjerna točka	**Mjereni P_{lt}**			**Procijenjeni P_{lt}**		
	U_{L1}	U_{L2}	U_{L3}	U_{L1}	U_{L2}	U_{L3}
110kV sabirnica	0,17	0,24	0,20	0,17	0,24	0,20
15kV sabirnica (sekcija I)	1,45	1,42	1,29	0,31	0,22	0,30
15kV sabirnica (sekcija II)	5,87	5,46	7,69	0,19	0,17	0,19
Vjetroturbina 1	1,27	1,42	1,46	0,27	0,25	0,23
Vjetroturbina 2	0,76	0,78	0,70	0,57	0,59	0,57
Vjetroturbina 3	3,05	3,02	3,3	0,27	0,33	0,31
Vjetroturbina 4	7,94	6,16	6,49	0,24	0,21	0,25
Vjetroturbina 5	3,01	3,03	3,03	0,21	0,25	0,24
Vjetroturbina 6	3,01	3,04	3,04	0,21	0,25	0,23

2.3. Posljedice naponskog treperenja

Naponsko treperenje u elektroenergetskim mrežama je uzrok brojnih negativnih učinaka tehničke i ergonomske prirode. U proizvodnji, i tehnički i ergonomski učinci za posljedicu imaju dodatne troškove koje je vrlo teško odrediti. Neki tipični primjeri negativnih učinaka naponskog treperenja su prikazani u nastavku.

2.3.1. Posljedice naponskog treperenja na izvore svjetla

Naponsko treperenje je subjektivni vizualni dojam nestabilnosti toka svjetlosti, kada se njegova svjetlina ili spektralna distribucija mijenja s vremenom. To se može dogoditi u žarulji sa žarnom niti, u fluorescentnim svjetiljkama, kao i u drugim energetski učinkovitim izvorima svjetlosti. Međutim, jakost treperenja i raspon frekvencije, ovisno o izvoru svjetla, su različiti. Slika 2.20. prikazuje promjenu svjetlosnog toka žarulje sa žarnom niti uzrokovanu kratkotrajnom promjenom opskrbnog napona.



Slika 2.20. Rezultat promjene napona na svjetlosni tok žarulje sa žarnom niti [4]

Svjetlosni tok žarulje sa žarnom niti ovisi o temperaturi žarne niti koja izravno utječe na snagu koju žarulja uzima iz mreže. Ako je napon napajanja sinusoidalan, svjetlost je superpozicija stalne prosječne komponente i promijenjivog dijela sa dvostrukom mrežnom frekvencijom koja nije uočljiva ljudskom oku.

U fluorescentnim žaruljama, svjetlosni tok ovisi o kutu paljenja luka, odnosno potrebnim kašnjenjem napona za postizanje razine paljenja, ovisno o geometriji žarulje i fizikalnim svojstvima plazme.

Frekvencijska karakteristika izvora svjetlosti ovisi prvenstveno o vrsti, snazi i nazivnom naponu žarulje. Kod žarulje sa žarnom niti, frekvencijska karakteristika se može opisati prijenosnom funkcijom prvog reda gdje je ulazni signal promjena napona a izlazni signal je promjena svjetlosnog toka:

$$G_{Lamp}(s) = \frac{\frac{\Delta L(s)}{L_N}}{\frac{\Delta U(s)}{U_N}} = \frac{k}{1+sT} \tag{2-14}$$

Gdje je: k, T : Faktor pojačanja i toplinska vremenska konstanta

U_N, L_N : Nazivni napon žarulje i nazivno osvjetljenje

ΔU, ΔL : Promjena napona i svjetline

s : $s=j2\pi fm$

Korelacija između napona napajanja i osvjetljenja je nelinearna, ali se može linearizirati oko nominalne točke izvora napajanja. Faktor pojačanja može se odrediti kao funkcija $L / L_N = f(U / U_N)$ derivacije u nominalnoj točki rada:

$$k = \frac{d\left(\frac{L}{L_N}\right)}{d\left(\frac{U}{U_N}\right)} \qquad \text{za } U=U_N \tag{2-15}$$

U praksi, vrijednost ovog faktora određuje se iz jednadžbe (2-16):

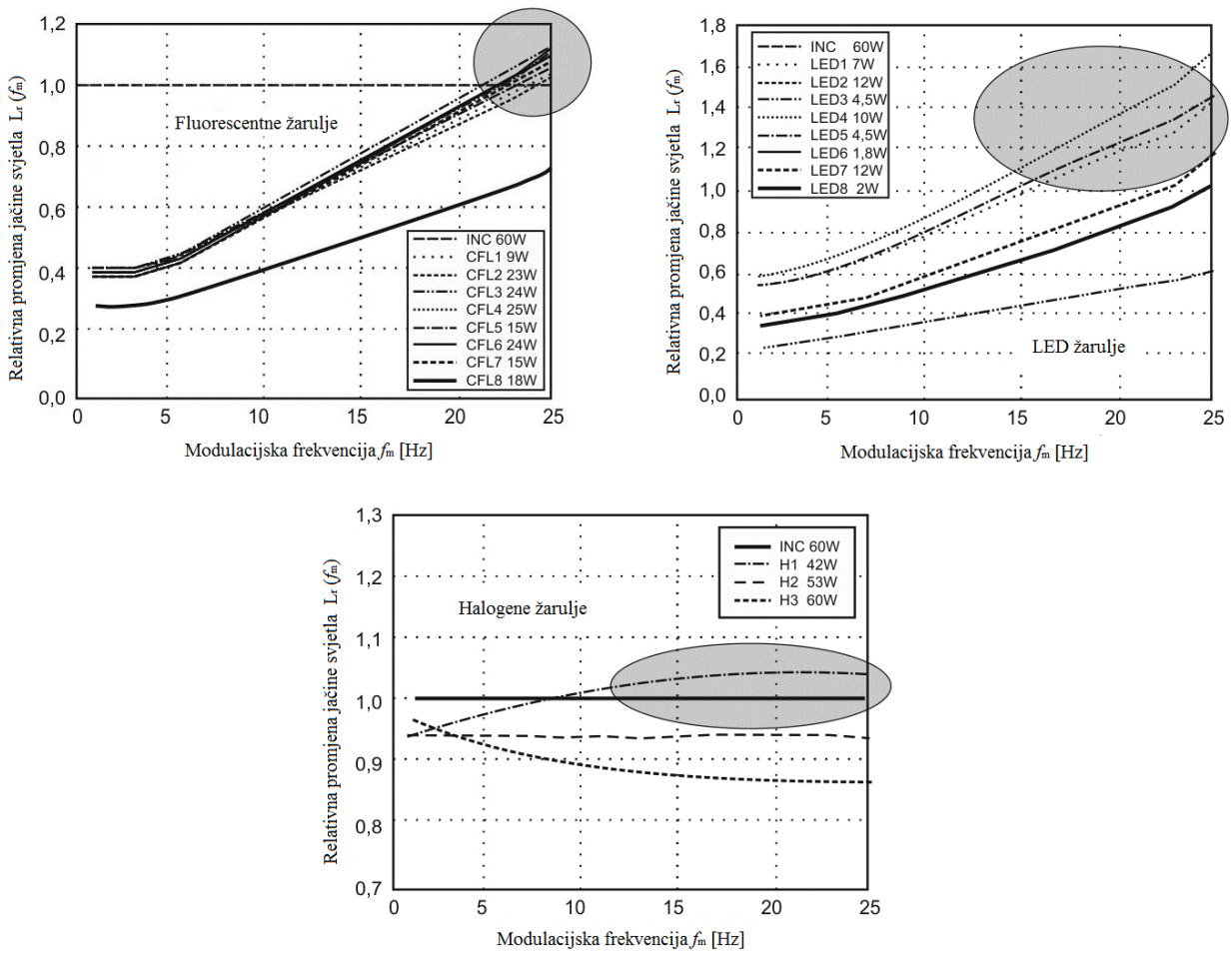
$$k_{N-\Delta U} = \frac{1-\frac{L_{U_N-\Delta U}}{L_{U_N}}}{1-\frac{U_N-\Delta U}{U_N}} \qquad k_{N+\Delta U} = \frac{1-\frac{L_{U_N+\Delta U}}{L_{U_N}}}{1-\frac{U_N+\Delta U}{U_N}} \cdot k_{U_N} = \frac{k_{U_N-\Delta U}+k_{U_N+\Delta U}}{2} \tag{2-16}$$

Približna vremenska konstanta T može se odrediti na temelju promjene svjetlosnog toka uzrokovane promjenom napona. Korištenjem inverzne Laplaceove transformacije jednadžba (2-14) ima oblik:

$$G_{Lamp}(t) = \frac{k}{T} e^{-\frac{t}{T}} u(t) \tag{2-17}$$

Za $t = T$, izlazni signal pada od početne vrijednosti (k/T) na $(k/T)e^{-1}$, odnosno na 36,79%. Vrijednost vremenske konstante ovisi o svojstvima lampe, koji određuju karakteristiku toplinskih gubitaka. Zbog toga, plinom punjene žarulje sa ravnom žarnom niti imaju manju vremensku konstantu od žarulja sa spiralnom žarnom niti. Na primjer, vremenska konstanta žarulje nazivnog napona 230 V i nazivne snage 60 W iznosi od 10ms do 30 ms, dok faktor pojačanja k, iznosi od 3,4 do 3,84.

Fluorescentne žarulje i štedne žarulje opremljene su elektroničkim sklopovima i zbog toga su manje osjetljive na naponsko treperenje, no to nije uvijek tako (Sl. 2.21.). Kod fluorescentne žarulje i štedne žarulje, vršna vrijednost napona napajanja utječe na promjenu svjetlosnog toka u većoj mjeri od efektivne vrijednosti napona. Žarulje sa žarnom niti su praktički linearna trošila dok je strujno – naponska karakteristika fluorescentnih žarulja nelinearna.



Slika 2.21. Primjeri karakteristika treperenja energetski učinkovitih izvora svjetlosti (INC - klasične žarulje, CFL1-8 - fluorescentne žarulje , LED1-8 - LED svjetiljke, H1-3 - halogene žarulje) [4]

Varijabla $L_r(f_m)$ iz karakteristike treperenja žarulja se računa prema jednadžbi (2-18):

$$L_r(f_m) = \frac{L_x(f_m)}{L_{IL}(f_m)} \tag{2-18}$$

Gdje su: $L_x(f_m)$ i $L_{IL}(f_m)$ - promjene jačine svjetla testiranih žarulja u odnosu na modulirani napon pravokutnog signala frekvencije f_m

Mnoga mjerenja naponskog treperenja dovode do zaključka da ne postoji povezanost između izmjerene razine smetnji i pritužbi potrošača. Postoje tri moguća razloga za ovu situaciju:

a) naponsko treperenje se mjeri na visokonaponskoj ili srednjenaponskoj razini, dok je ono vidljivo tek na niskonaponskoj razini

b) suvremene, energetski učinkovite žarulje su manje osjetljive na naponsko treperenje

c) brze promjene napona imaju znatan udio u mjerenjima razine smetnji.

Kod fluorescentnih, halogenih i štednih žarulja, povećanje dubine modulacije napona pri konstantnoj frekvenciji modulacije, unutar frekvencijskog intervala (0,5-25)Hz, povećava promjenu svjetlosnog toka gotovo linearno iako u različitoj mjeri. Međutim, ista dubina modulacije s različitom i većom frekvencijom modulacije ne znači smanjenje promjene svjetlosnog toka. Iznimka su fluorescentne žarulje s magnetskim prigušnicama.

Treperenje svjetla, uzrokovano naponskim treperenjem, značajno narušava viziju, uzrokuje opću nelagodu i umor, te pogoršava kvalitetu rada. Isto tako znatno otežava čitanje i gledanje televizije. Treperenje utječe na vid i reakcije ljudskog mozga, te može biti uzrok nesreća na radu i epileptičkih napadaja [4].

2.3.2. Posljedice naponskog treperenja na električne strojeve

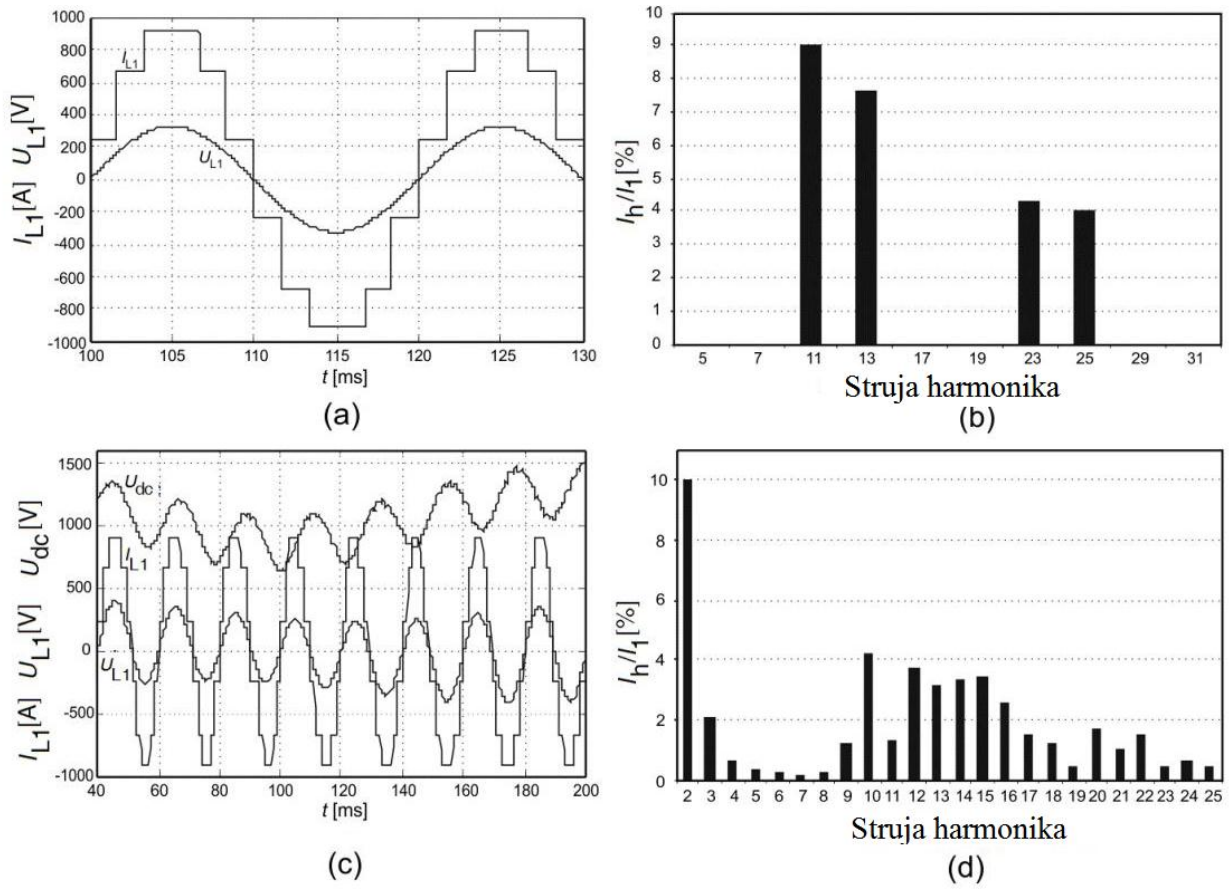
Kolebanje, odnosno treperenje napona na stezaljkama asinkronog motora izaziva promjene momenta i klizanja, te time utječe na proces proizvodnje. U ekstremnim slučajevima naponsko treperenje može dovesti do prekomjerne vibracije, smanjujući pri tome mehaničku čvrstoću i vijek trajanja motora.

Naponsko treperenje na stezaljkama sinkronih motora i generatora može dovesti do preranog trošenja rotora. Također može uzrokovati promjene okretnog momenta, i povećane gubitke [4].

2.3.3. Posljedice naponskog treperenja na statičke pretvarače

Uobičajena posljedica naponskog treperenja na upravljivi ispravljač s kontrolom na istosmjernoj strani je smanjenje faktora snage i generiranje nekarakterističnih harmonika i međuharmonika.

Slika 2.22. prikazuje faznu struju i valni oblik napona 12-pulsnog pretvarača isporučenenog napona promjenjive veličine (m = 10%; $\omega = 80\pi$ Hz) s kutovima kontrole $\alpha_Y = a_D = 0$ (α_Y, α_D-kutovi upravljanja tiristorskih mostova).



Slika 2.22. Valni oblici napona i struje mreže 12-pulsnog ispravljača sa kutovima upravljanja $\alpha_D = \alpha_Y = 0$ i konstantnom istosmjernom strujom $I_d = const$:
(a, b) –sinusoidalni ulazni naponi;
(c, d) -modulirani izlazni napon (U_{DC}-izlazni napon na istosmjernoj strani) [4]

Ne karakteristični harmonici koji nisu prisutni u trenutnom spektru idealnog 12-pulsnog pretvarača (Sl. 2.22.(d)) su izvori treperenja napona [4].

3. KOLEBANJE I TREPERENJE NAPONA U NORMI EN 50160

Kvaliteta električne energije, te maksimalne vrijednosti kolebanja i treperenja, u srednjenaponskim i niskonaponskim mrežama, su definirani normama. U Americi i nekim drugim zemljama se koristi norma IEEE 1159 ili IEC 61000, dok se u Europi koristi norma EN 50160.

3.1. Uvod u normu EN 50160

Norma EN 50160 definira tehničke karakteristike opskrbnog napona u niskonaponskim i srednjenaponskim mrežama na mjestu predaje potrošaču pri normalnim pogonskim uvjetima. Period mjerenja u normi EN 50160 je sedam dana. Mjerni isječak, u kojem se promatra pojedini parametar, je deset minuta osim frekvencije koja se promatra u deset – sekundnim intervalima i signalni naponi koji se promatraju u tri – sekundnim intervalima.

Norma EN 50160 propisuje granice parametara koje moraju biti zadovoljene unutar 95% perioda mjerenja, dok su u ostalih 5% slučajeva granice veće ili čak nisu ni propisane [5].

Odredbe norme mogu biti korištene kao odredbe ugovora o isporuci električne energije potpisanog između isporučitelja i potrošača,tj. kupca električne energije.

3.2. Parametri norme EN 50160

Norma EN 50160 definira tehničke karakteristike opskrbnog napona za sljedeće parametre:

- Kolebanje napona
- Naponsko treperenje: kratkoročno (P_{st}) i dugoročno (P_{lt})
- Napon viših harmonika i međuharmonika
- Signalni napon
- Frekvencija opskrbnog napona
- Nesimetričnost napona
- Naponski propadi i prenaponi
- Prekidi opskrbe [6]

3.2.1. Kolebanje napona

Razlikuju se dvije vrste promjena napona, polagane promjene napona i brze promjene napona. Kolebanje napona je prihvatljivo ako se, pri normalnim pogonskim uvjetima (ne ubrajajući prekid opskrbe), 95% svih 10-minutnih srednjih vrijednosti efektivne vrijednosti opskrbnog napona svakog tjednog intervala nalazi unutar +/- 10 % vrijednosti normiranog nazivnog napona (U_n). To

znači da od ukupno 1008, 10-minutnih srednjih vrijednosti efektivnih vrijednosti napona izmjerenih tijekom jednog tjedna, njih 958 mora imati vrijednost unutar područja 207 –253 V, za nazivni napon od 230 V [6].

3.2.2. Naponsko treperenje

Kao što je već spomenuto u poglavlju 2, naponsko treperenje se definira na sljedeći način: Ako u nekoj prostoriji boravi 100 ljudi pod jednakim uvjetima i ako se intenzitet svjetla promjeni toliko da to primjeti 50 od ukupno nazočnih ljudi, kaže se da treperenje ima intenzitet 1. Jakost treperenja raste sa amplitudom promjene napona. Jačina treperenja izračunava se prema jednadžbi (3-1), te ne smije prijeći vrijednost jedan unutar 95% vremena jednog tjedna [7].

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

3.2.3. Naponi viših harmonika i međuharmonika

Naponi višeg harmonika su sinusni naponi sa frekvencijom koja je višekratnik osnovne frekvencije. U 95% vremena jednog tjedna, deset - minutne srednje vrijednosti efektivnih vrijednosti napona bilo kojeg harmonika ne smiju prijeći graničnu vrijednost u postocima koja je definirana u tablici 3.1.

Tablica 3.1. Prikaz pojedinačnih graničnih vrijednosti viših harmonika [6]

Neparni harmonici		**Parni harmonici**	
Broj harmonika	**Granična Vrijednost [%]**	**Broj harmonika**	**Granična Vrijednost [%]**
3	6	2	2
5	5	4	1
7	5	6-24	0,5
9	1,5		
11	3,5		
13	3		
15	0,5		
17	2		
19	1,5		
21	0,5		
23	1,5		
25	1,5		

3.3. Uvjeti kada se norma EN 50160 ne primjenjuje

Norma EN 50160 ne vrijedi:

a) za pogon nakon nekog kvara i za mjere privremene opskrbe, koje se primjenjuju kako bi se omogućila daljnja opskrba potrošača pri zahvatima održavanja i pri gradnji, te kako bi se na najmanju mjeru ograničili opseg i trajanje prekida opskrbe

b) u slučajevima kad postrojenje ili aparat potrošača ne zadovoljava mjerodavne norme ili tehničke uvjete za priključak ili kad su prekoračene granične vrijednosti smetnja prenošenih vodovima

c) u slučajevima kad neko postrojenje za proizvodnju ne zadovoljava mjerodavne norme ili tehničke uvjete za priključak na razdjelnu mrežu (npr. postrojenja za proizvodnju energije)

d) u iznimnim prilikama na koje može utjecati isporučitelj električne energije, posebno kod:

- iznimnih vremenskih (ne)prilika ili prirodnih katastrofa
- smetnji koje su izazvale treće starane
- mjera javnih tijela ili tijela vlasti
- radnih sporova prema zakonskim odredbama
- ograničenja kapaciteta opskrbe zbog izvanjskih utjecaja
- više sile [7].

4. ŠIRENJE NAPONSKOG TREPERENJA I METODE UBLAŽAVANJA

4.1. Širenje naponskog treperenja

Kod određivanja širenja naponskog treperenja u nekoj točki opskrbne mreže uzrokovanog promjenjivim opterećenjem, razlikuju se dva slučaja:

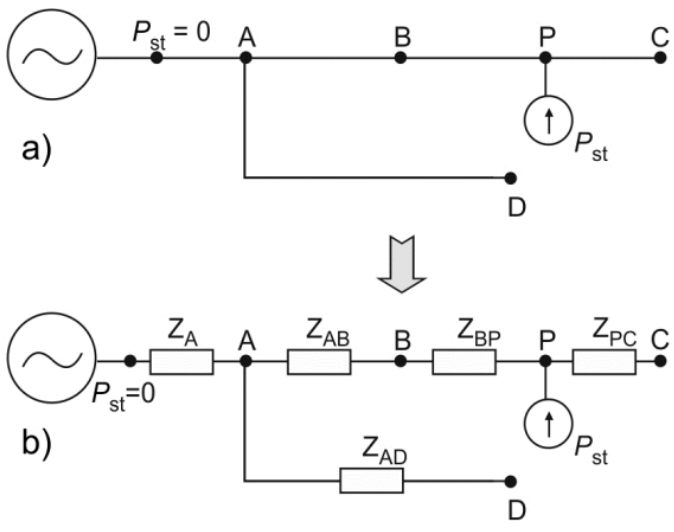
- Promatrana točka se nalazi na velikoj udaljenosti od drugih izvora naponskih treperenja i može se pretpostaviti da razina treperenja u tom trenutku ne ovisi o drugim promjenjivim opterećenjima.
- Jačina treperenja u promatranoj točki je zbroj smetnji iz nekoliko različitih promjenjivih opterećenja spojenih na kratkim udaljenostima [4].

4.1.1. Širenje naponskog treperenja stvorenog jednim promjenjivim opterećenjem

Naponsko treperenje može poremetiti rad elektroenergetskog sustava, ali isto tako i udaljenih opterećenja. Količina koja karakterizira sposobnost sustava za širenje treperenja je tzv. koeficijent prijenosa treperenja (T_{Pst}), koji se za dvije udaljene točke mreže, može definirati kao:

$$T_{P_{st}PA} = \frac{P_{st}(A)}{P_{st}(P)} \tag{4-1}$$

Na slici 4.1. je prikazana osnova za procjenu širenja naponskog treperenja pomoću koeficijenta T_{Pst}. Uzima se da je nadomjesna impedancija sustava konstantna.



Slika 4.1. Širenje kolebanja i treperenja napona u radijalnoj mreži [4]

Promjenjivo opterećenje spojeno u točki P (sl. 4.1.), stvara naponsko kratkotrajno treperenje, dok su stalna opterećenja spojena na drugim mjestima - A, B, C i D. Razina naponskog treperenja smanjuje se sa smanjenjem nadomjesne impedancije u mreži, računajući od mjesta izvora treperenja (P) prema izvoru napajanja. Razina naponskog treperenja u točki A se može izračunati prema jednadžbi (4-2):

$$P_{st}(A) = P_{st}(P)\left|\frac{\underline{Z}_A}{\underline{Z}_A + \underline{Z}_{AB} + \underline{Z}_{BP}}\right| \approx P_{st}(P)\frac{S_{SC}(P)}{S_{SC}(A)} \tag{4-2}$$

Stoga je koeficijent prijenosa treperenja:

$$T_{P_{st}PA} = \frac{P_{st}(A)}{P_{st}(P)} = \left|\frac{\underline{Z}_A}{\underline{Z}_A + \underline{Z}_{AB} + \underline{Z}_{BP}}\right| \tag{4-3}$$

Potrošač u točki B doživljava promjene napona:

$$P_{st}(B) = P_{st}(P)\left|\frac{\underline{Z}_A + \underline{Z}_{AB}}{\underline{Z}_A + \underline{Z}_{AB} + \underline{Z}_{BP}}\right| \tag{4-4}$$

A u tom slučaju koeficijent prijenosa treperenja iznosi:

$$T_{P_{st}PB} = \frac{P_{st}(B)}{P_{st}(P)} = \left|\frac{\underline{Z}_A + \underline{Z}_{AB}}{\underline{Z}_A + \underline{Z}_{AB} + \underline{Z}_{BP}}\right| \tag{4-5}$$

Potrošač D je spojen drugim vodom, ali doživljava isto naponsko treperenje kao da se nalazi u točki A. Koeficijent prijenosa treperenja iznosi P_{stDA} =1:

$$T_{PstPD} = \frac{P_{st}(D)}{P_{st}(P)} = \frac{P_{st}(A)}{P_{st}(P)} \cdot \frac{P_{st}(D)}{P_{st}(A)} = T_{PstPA} \cdot T_{PstDA} = T_{PstPA} \tag{4-6}$$

Potrošač spojen u točki C, koja se nalazi desno od izvora treperenja, može, u najgorem slučaju, iskusiti naponsko treperenje iste veličine kao na sabirnici promjenjivog opterećenja. Prema tome, u ovom slučaju koeficijent prijenosa treperenja može imati vrijednost:

$$T_{PstPC} = \frac{Pst(C)}{Pst(P)} = \frac{Pst(P)}{Pst(P)} = 1 \tag{4-7}$$

U praksi, naponsko treperenje je oslabljeno kada putuje prema nižoj naponskoj razini. Stupanj prigušenja u velikoj mjeri ovisi o prisutnosti rotirajućih opterećenja u mrežama. Prigušenje se također povećava s povećanjem frekvencije moduliranog napona. Ovaj učinak je povezan s prigušenjem međuharmonika. Što je veća udaljenost između međuharmonika i temeljne frekvencije, prigušenje je veće.

Trenutno ne postoje analitičke metode za procjenu koeficijenta širenja treperenja napona između mreža različitih naponskih razina. Empirijski utvrđene vrijednosti koje se koriste za približne izračune su navedene u tablici (4.1.) [4].

Tablica 4.1. Primjeri vrijednosti koeficijenata prijenosa treperenja (nekoliko lučnih peći je radilo na niskonaponskoj mreži) [4]

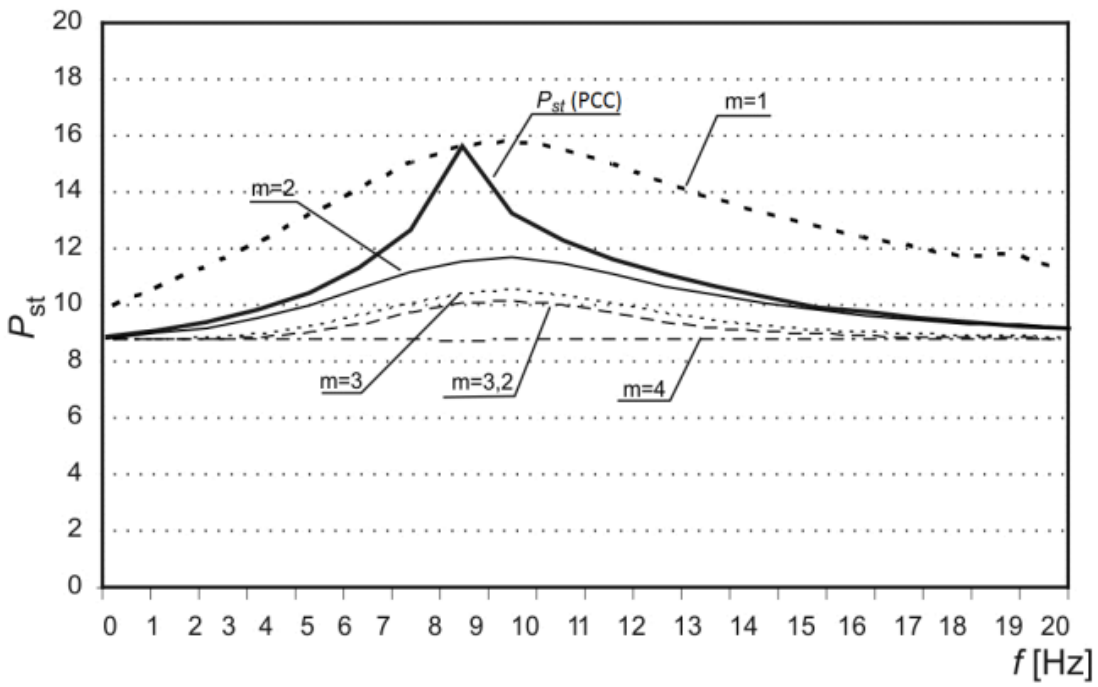
Naponska razina	**$T_{Pst;AB}$**
S 220 kV na 70 kV	0,82
S 70 kV na 15 kV	0,91
S 15 kV na 230 V	0,98-1,0

4.1.2. Širenje naponskog treperenja stvorenog iz više izvora

Općenito, jednadžbe za kratkotrajno i dugotrajno treperenje uzrokovano iz više izvora imaju oblik:

$$P_{st} = \sqrt[m]{\sum_j P_{st_j}^m} \qquad P_{lt} = \sqrt[m]{\sum_j P_{lt_j}^m} \tag{4-8}$$

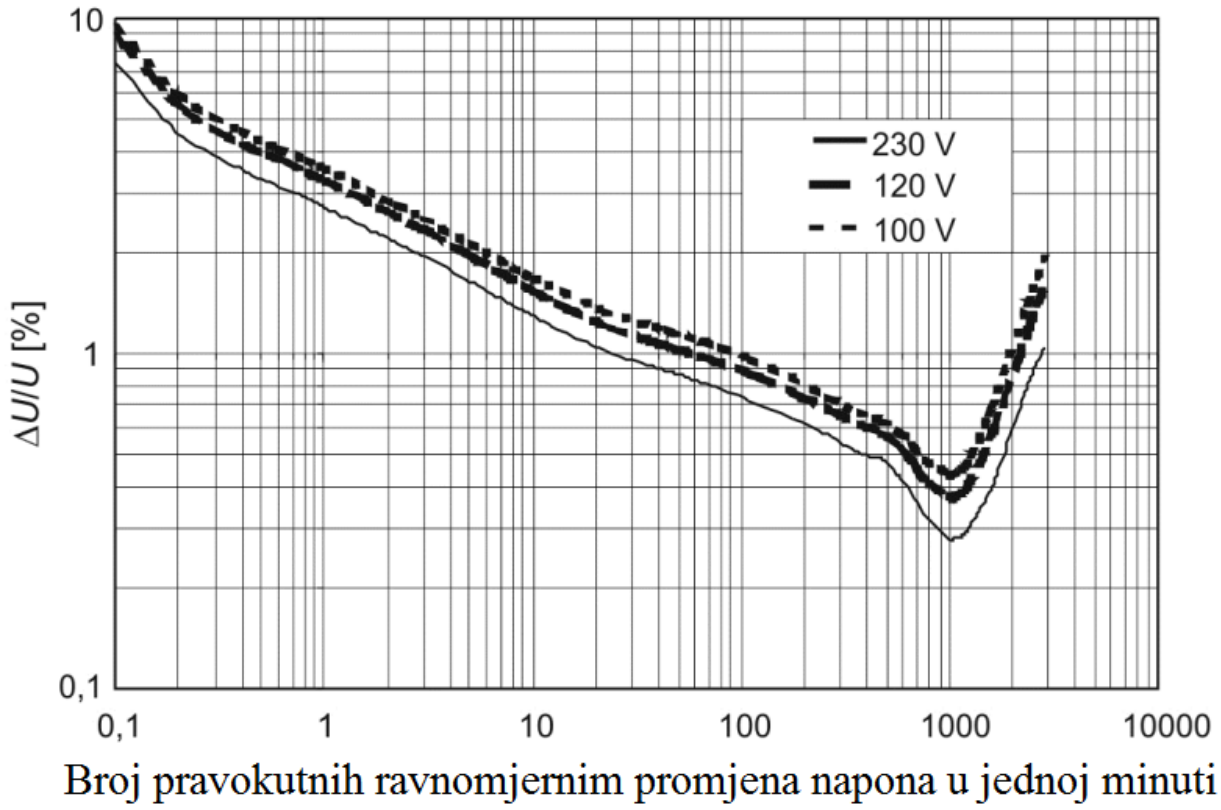
gdje su P_{stj} i P_{ltj} treperenja iz nekoliko pojedinačnih, samostalno upravljivih izvora smetnji (Sl. 4.2.).



Slika 4.2. Prikaz P_{st} pokazatelja vrijednosti jačine treperenja za različite vrijednosti faktora m [4]

Faktor *m* preuzima vrijednosti ovisno o svojstvima izvora:

- ***m* = 4** – se koristi kada se zbrajaju naponska treperenja generirana iz peći koje su radile na način da spriječavaju simultano topljenje
- ***m* = 3** – se obično koristi za većinu tipova treperenja napona u slučaju kada je vjerojatnost istodobnog postupka ograničena
- ***m* = 3,2** – se koristi za linearni dio krivulje P_{st} = 1 (Sl. 4.3.)
- ***m* = 2** – se koristiti ako je više peći ili vjetroelektrana koje kontinuirano rade priključeno na maloj udaljenosti
- ***m* = 1** – se koristi za zbrajanje poklapanja naponskih treperenja (velika vjerojatnost simultanog rada promjenjivih opterećenja)



Slika 4.3. Karakteristika pravokutnih ravnomjernih promjena napona žarulje od 60 W (P_{st} = 1) [4]

Empirijske studije su pokazale da zakon zbrajanja, koji najbolje odgovara rezultatima mjerenja, ovisi o vrijednosti koeficjenta korištenog za procjenu poremećaja. Na primjer, u slučaju da su dvije peći, zbrajanje je gotovo linearno ($m = 1$) do razine vjerojatnosti $p = 50\%$, za $p \approx 75\%$ zbrajanje je kvadratno, a za $p \approx 90\%$ je kubno zbrajanje. Jako teško je formulirati zakon zbrajanja za razinu vjerojatnosti gdje je $p \geq 95\%$ jer izmjerena razina treperenja je isključivo uzrokovana najvećim opterećenjem ($m \geq 4$). Dakle, za potrebe vrednovanja naponskog treperenja, kubno zbrajanje daje najbolju procjenu.

Nekad je prikladno zamijeniti kratkotrajno treperenje P_{st} sa ekvivalentnim kratkotrajnim treperenjem A_{st} definiranim kao $A_{st}=P_{st}^{m}$. Prednost ove zamijene je pojednostavljenje izračuna. Ova metoda analize daje linearni odnos za procjenu treperenja generiranih iz više izvora:

$$A_{st} = \sum_i A_{sti} \tag{4-9}$$

Štoviše, s obzirom da se dugoročni pokazatelj treperenja P_{lt} dobije kao korijen sume pokazatelja P_{st}, pokazatelj $A_{lt,}$ se može dobiti pomoću indikatora jačine A_{st}:

$$A_{lt} = P_{lt}^{3} = \frac{1}{N}\sum_i P_{sti} = \frac{1}{N}\sum_i A_{sti} \tag{4-10}$$

Linearno zbrajanje se također može koristiti za procjenu ekvivalentnog dugotrajnog treperenja A_{lt} uzrokovanog radom nekoliko izvora:

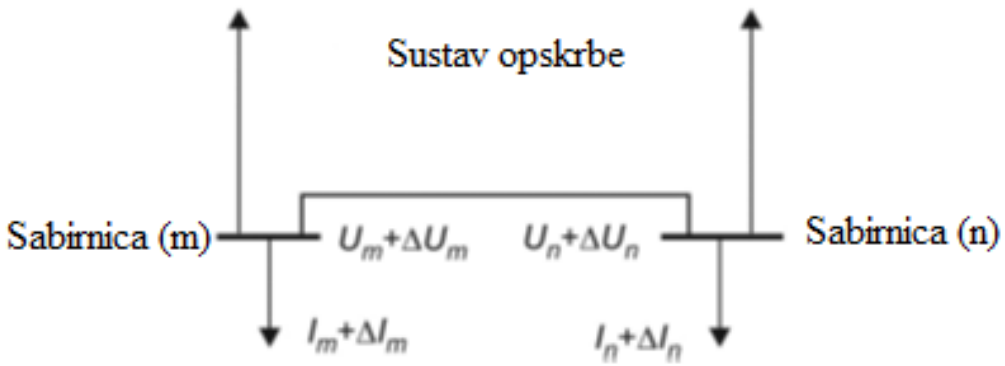
$$A_{lt} = \sum_i A_{lti} \tag{4-11}$$

Treba imati na umu da vrijednost A_{st} nije linearno ovisna o relativnim promjenama napona kao što je to slučaj kod P_{st} pokazatelja [4].

4.1.3. Širenje naponskog treperenja u zamkastoj mreži

Metoda opisana kao prikladan alat za procjenu naponskog treperenja u radijalnim mrežama nije prikladna za procjenu događaja u velikim zamkastim mrežama. Problem se događa na slučaju ispitivanja međusobne interakcije dva promjenjiva opterećenja vezana na dvije različite sabirnice *m i n* u zamkastoj mreži (Sl. 4.4).

Impedancija elektroenergetskog sustava, temeljena na tehnici koja se koristi za računanje kratkog spoja, se također koristi za određivanje odnosa između strujnih i naponskih promjena na sabirnicama m i n.



Slika 4.4. Širenje naponskog treperenja u zamkastoj mreži - primjer dva opterećenja spojena na dvije različite sabirnice [4].

$$\begin{bmatrix} \dots \\ \underline{U}_m + \Delta\underline{U}_m \\ \underline{U}_n + \Delta\underline{U}_n \\ \dots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & Z_{mm} & Z_{mn} & \dots \\ \dots & Z_{nm} & Z_{nn} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dots \\ \underline{I}_m + \Delta\underline{I}_m \\ \underline{I}_n + \Delta\underline{I}_n \\ \dots \end{bmatrix} \tag{4-12}$$

Iz matrica (4-12), vidi se da je promjena napona sabirnice *m* uzrokovana promjenom struje ΔI_m, koja je ovisna o impedanciji Z_{mm}. Također, promjena struje ΔI_m je određena i impedancijom Z_{mn}. Kratkotrajno treperenje P_{st} na sabirnici *m* može se pretvoriti u kratkotrajno treperenje P_{st} na sabirnici *n* prema jednadžbi (4-13):

$$P_{st,n} = P_{st,m}\left(\frac{Z_{mn}}{Z_{mm}}\right) \tag{4-13}$$

Predstavljeni pojednostavljeni izraz temelji se na analizi kratkog spoja i vrijednosti *X / R* i ne razlikuje se puno za različite komponente sustava [4].

4.2. Metode ublažavanja naponskog treperenja

Treperenje je uzrokovano kolebanjem napona. Dakle, svaka metoda usmjerena na ublažavanje treperenja mora se temeljiti na ublažavanju kolebanja napona. Mogu se primijeniti dvije metode:

1. Snižavanje promjene snage (uglavnom jalove snage) opterećenja.
2. Povećanje snage kratkog spoja.

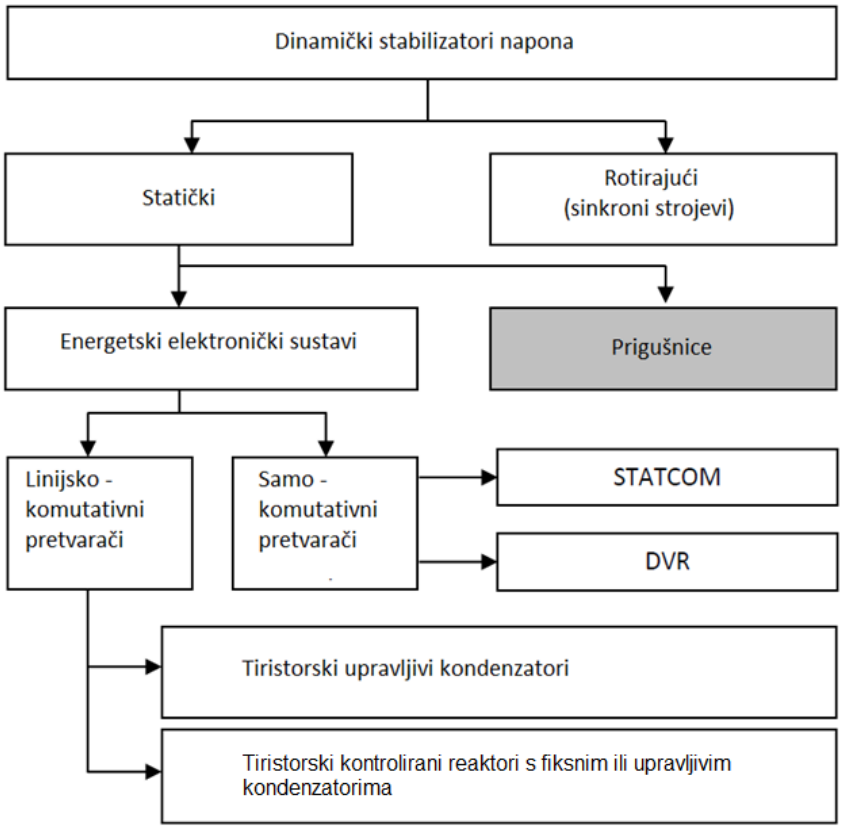
Uređaji za ublažavanje treperenja obično se temelje na prvoj metodi. Druga metoda, u mnogim slučajevima, može se primijeniti samo u fazi projektiranja.

Vrlo često, ublažavanje treperenja se može ostvariti sa kombinacijom više metoda [8].

4.2.1. Metoda snižavanja jalove snage opterećenja

Dinamički stabilizatori napona koriste se za otklanjanje ili ublažavanje naponskih treperenja (u slučaju peći, primjena dinamičkog stabilizatora napona također može poboljšati učinkovitost metalurškog procesa) tako što stvaraju jalovu energiju u domeni temeljnih harmonika. Ovisno o tome je li jalova struja induktivna ili kapacitivna, efektivna vrijednost napona na mjestu zajedničke veze (PCC) se može povećati ili smanjiti (Sl. 2.2.). Njihova učinkovitost uglavnom ovisi o njihovoj nazivnoj snazi i brzini reakcije.

Slika 4.5. prikazuje podijelu dinamičkih stabilizatora napona. Oni se prije svega koriste u trofaznim sustavima, za velike nazivne snage, a dizajnirani su za stabilizaciju napona na čvoru distribucijskog sustava ili stabilizaciju specifičnog opterećenja / skupine opterećenja u točki spoja.



Slika 4.5. Podjela dinamičkih stabilizatora napona [4]

Sinkroni stroj se smatra prvim stabilizatorom napona, dok današnje korištenje napredne elektronike nudi širok izbor različitih tehničkih rješenja koja, između ostalog, mogu ispuniti zadatak stabilizacije.

Učinkovitost ublažavanja naponskog treperenja napona statičkih kompenzatora može se ocijeniti pomoću tzv. faktora smanjenja treperenja:

$$R_F = \frac{P_{st}}{P_{st}^{(K)}} \tag{4-12}$$

Gdje je: P_{st} - kratkotrajno treperenje u sustavu bez kompenzatora

$P_{st}^{(K)}$ - kratkotrajno treperenje nakon instalacije kompenzatora. Može se izračunati prema izrazu:

$$P_{st}^{(K)} = k_{st} \frac{S_{F,SC}}{S_{SC}} \cdot \frac{1}{K_{SVC}} \cdot TC_{U1/U2} \tag{4-13}$$

Gdje je:

- k_{st} - stalni koeficijent svojstva izrade peći; ako je nepoznat može se odrediti iz analize rada peći slične snage i tehnologije. Prema UIC istraživanju, nalazi se unutar intervala

$85 \geq k_{st} \geq 50$. Tipična vrijednost za današnje peći je $k_{st} = 75$

- $S_{F,\,SC}$ – Snaga kratkog spoja peći
- $T_{Pst,U1U2}$ - koeficijent prijenosa naponskog treperenja između dvije naponske razine: U_1 i U_2
- K_{SVC} – faktor smanjenja treperenja postignuta u praksi primjenom dinamičkog kompenzatora / stabilizatora; može se procijeniti iz formule:

$$K_{SVC} = 1 + 0{,}75\frac{S_{SVC}}{S_{TrN}} \tag{4-14}$$

S_{SVC} - nazivna snaga

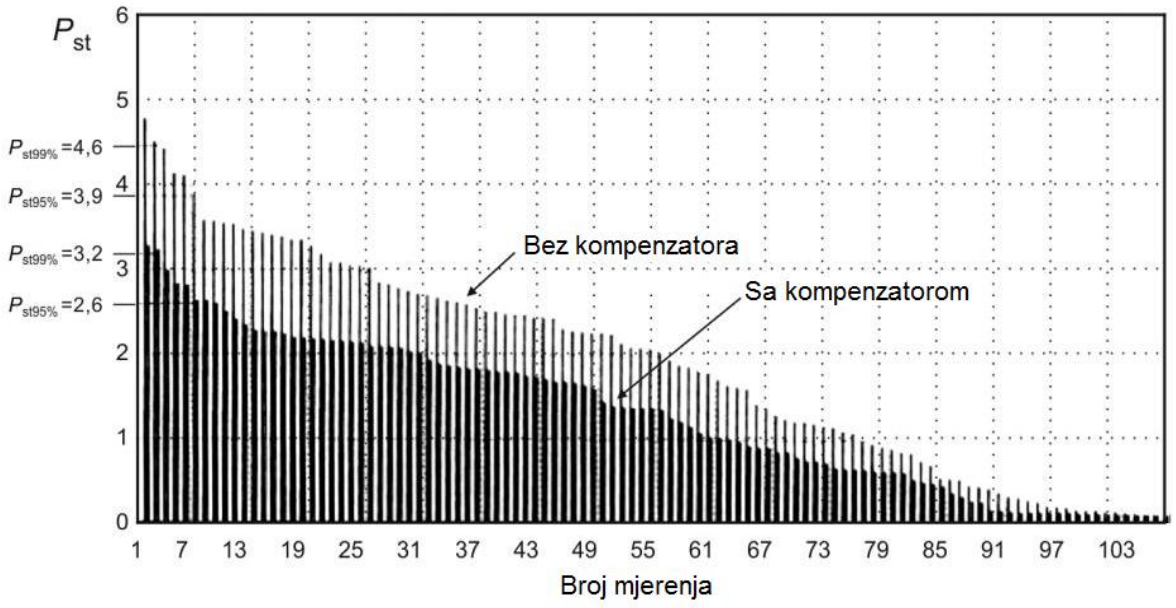
S_{TrN} - Nazivna snaga transformatora peći

Slika 4.6. prikazuje primjer naponskog treperenja karakterističnog za rad peći sa i bez kompenzatora. Za mjerenja kao na slici 4.6. vrijedi:

Teorijska vrijednost faktora smanjenja treperenja: $K_{SVC} = 1 + 0{,}75\frac{48MVA}{48MVA} = 1{,}75$ (4-15)

Stvarne vrijednosti očitane sa slike 4.6.: $K_{SVC;CP95} = \frac{9{,}9}{2{,}6} = 1{,}50$ $\qquad K_{SVC,CP99} = \frac{4{,}6}{3{,}2} = 1{,}44$ (4-16)

Faktor smanjenja treperenja K_{SVC} u slučaju sa STATCOM kompenzatorom se nalazi u intervalu od 3 do 6.

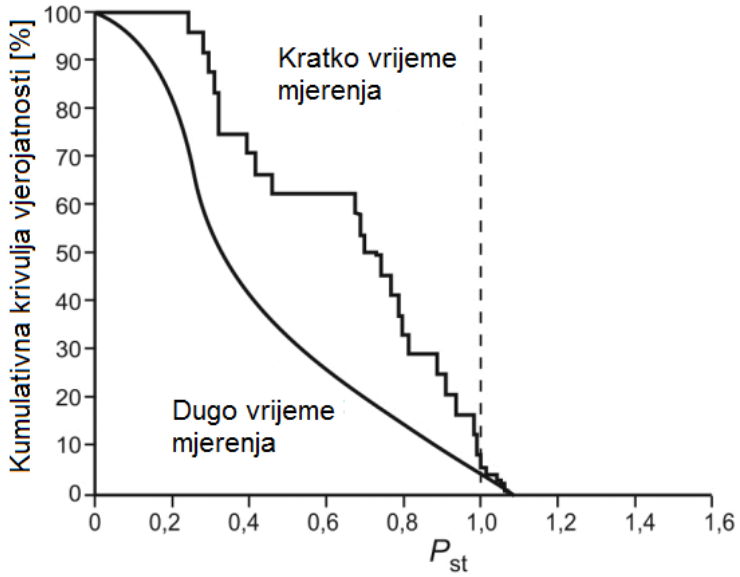


Slika 4.6. Vrijednosti pokazatelja P_{st} tijekom rada peći sa i bez kompenzatora [4].

Istraživanja su pokazala da promjene opterećenja jalove snage opterećenja jamče 35-40% ublažavanja naponskog treperenja. Ako kompenzator još obavlja funkciju symmetrizatora, stupanj ublažavanja može se povećati do 50%. Kompenzacija jalove energije, simetrizacija i filtriranje harmonika napona omogućuje smanjenje naponskog treperenja od 90 - 95%.

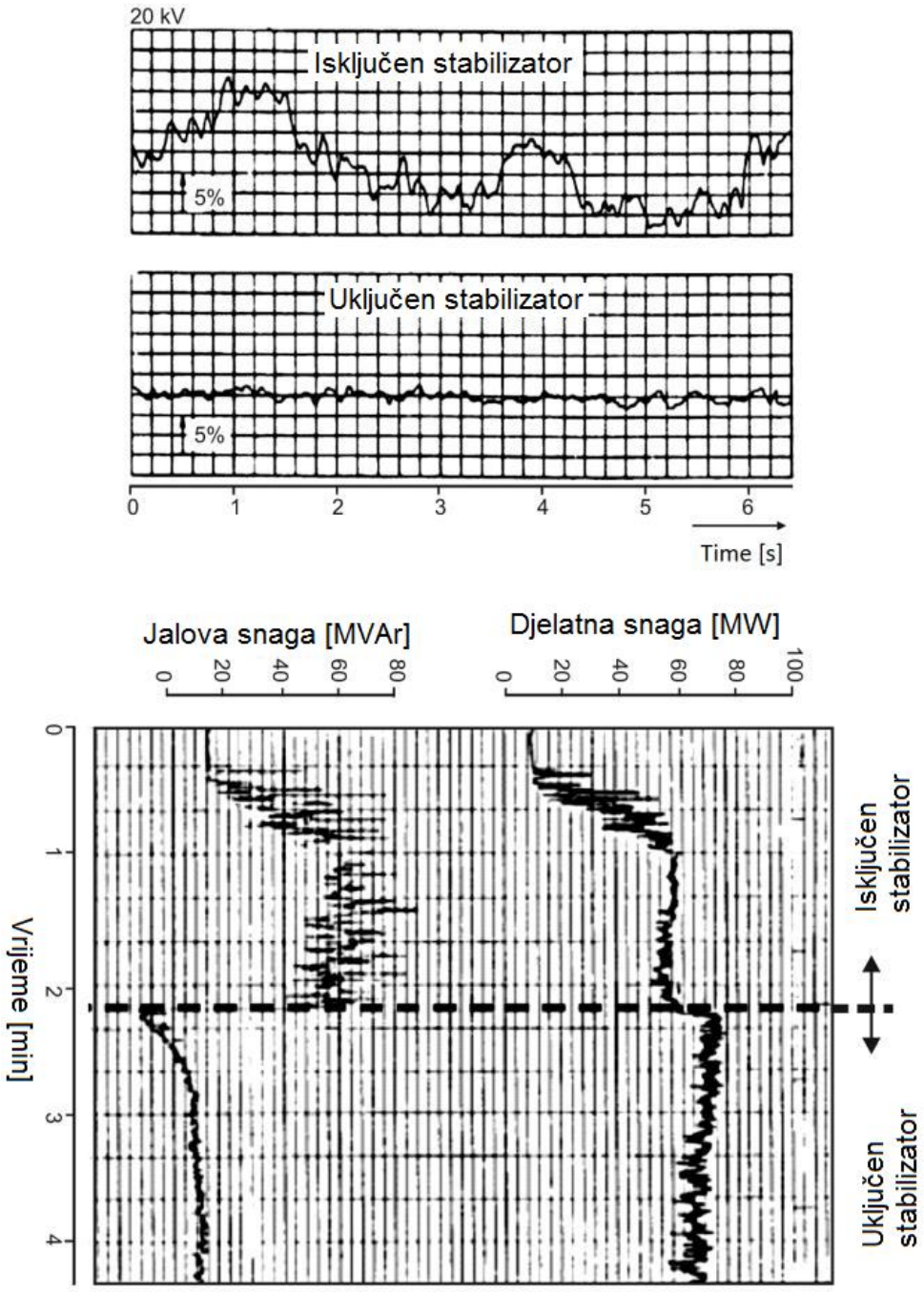
Navedeni izračuni su samo procjena, jer naponsko treperenje zbog rada peći ovisi o više prirodnih čimbenika, a predviđanje prirodnih utjecaja je vrlo teško.

Rezultat procjene učinkovitosti kompenzatora ovisi o trajanju mjerenja provjere, sa i bez kompenzatora. To je vidljivo na kumulativnoj krivulji vjerojatnosti prikazane na slici 4.7. dobivene iz mjerenja provedenih u kratkom i dugom vremenu.



Slika 4.7. Kumulativna krivulja vjerojatnosti P_{st} indikatora u odnosu na trajanje mjerenja [4]

Slika 4.8. pokazuje primjere valnih oblika koji prikazuju promjene vrijednosti efektivne vrijednosti napona na sabirnicama električne željezare sa uključenim i isključenim FC / TCR kompenzatorom [4].



Slika 4.8. Učinkovitost rada FC / TCR kompenzatora - primjer radne i jalove snage i napona na sabirnici električne željezare sa uključenim i isključenim kompenzatorom [4].

4.2.2. Metoda povećanja snage kratkog spoja

Ako se povećava snaga kratkog spoja mreže, naponsko treperenje je podijeljeno prema omjeru:

$$\frac{S_{SCafter}}{S_{SCbefore}} \tag{4-17}$$

Gdje su: $S_{Scafter}$ - snaga kratkog spoja nakon procesa povećanja, a $S_{Scbefore}$ - snaga kratkog spoja prije procesa povećanja

Budući da je jačina treperenja linearna s obzirom na količinu i veličinu koraka promijene, očekuje se smanjenje naponskog treperenja.

Metode za povećanje snage kratkog spoja su vrlo skupe i nisu uvijek primjenjive. Osim toga, ove metode ponekad mogu prisiliti na promjenu cijele električne mreže, što rezultira dodatnim troškovima.

Mjere koje se mogu poduzeti kako bi se povećala snaga kratkog spoja su:

- Dodatni dalekovod koji može biti izgrađen kako bi se pojačao distribucijski dalekovod
- Priključak na mrežu na višoj razini napona
- Paralelni spoj transformatora. Ovo rješenje povećava snagu kratkog spoja na sekundarnoj strani. Međutim, nedostatak ovog postupka je da se smetnje potpuno prenose na sabirnice [8].

4.2.3. Ostale metode ublažavanja naponskog treperenja

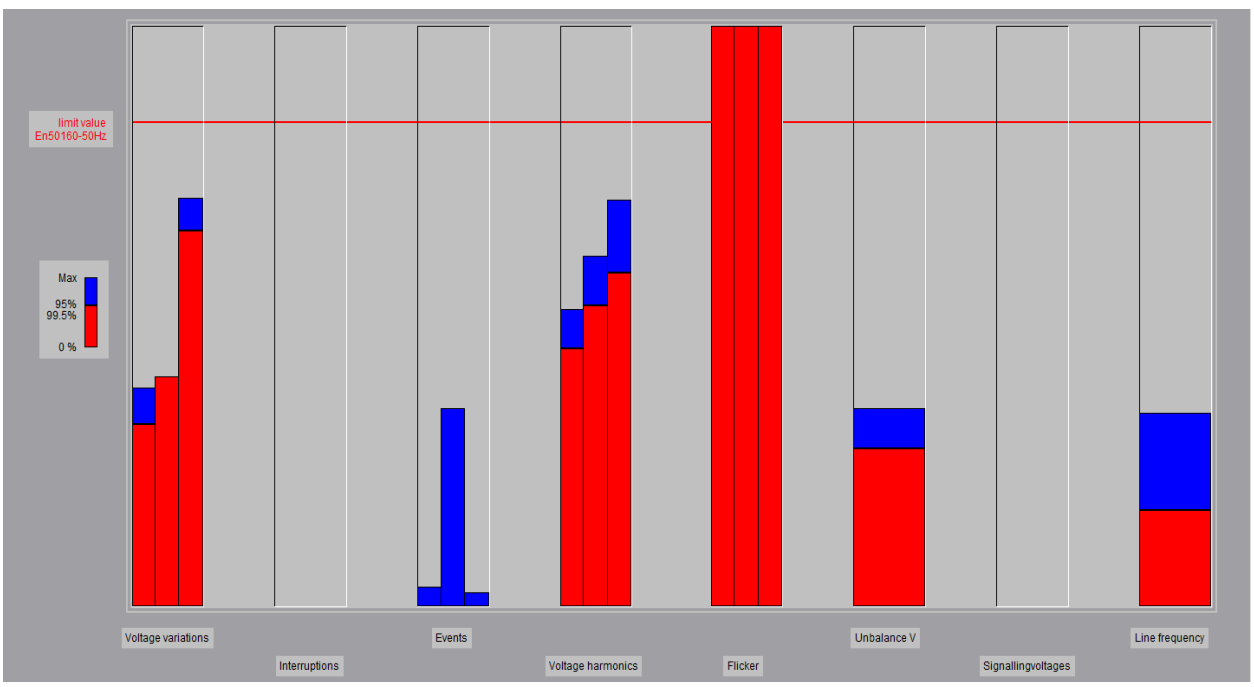
U nekim slučajevima, mogu pomoći neke druge metode da se smanji razina treperenja. Te metode su:

- Odvajanje, izoliranim transformatorom, sabirnice napajanja promjenjivih opterećenja od ostatka mreže, osobito od rasvjete.
- U slučaju kada su promjenjiva opterećenja jednofazna, promjenjiva opterećenja se spajaju na jednu fazu, a rasvjeta na drugu, ne poremećenu fazu. Ovo rješenje se primjenjuje za neka niskonaponska opterećenja (kao što su veliki foto - kopirni uređaji ili uređaji za zavarivanje).
- Ponekad, promjene u operativnoj praksi ili dizajnu opreme mogu pomoći da se smanji naponsko treperenje. Na primjer, u slučaju peći, treba smanjiti radni napon, a s njime se onda značajno smanjuje i vrijednost kratkotrajnog treperenja[8].
- U slučajevima u kojima je naponsko treperenje posljedica pokretanja motora, sve mjere su usmjerene na smanjenje uklopne struje što također može biti korisno u smanjenju naponskog treperenja.

5. ANALIZA REZULTATA MJERENJA TREPERENJA NAPONA U KOTLOVNICI POSTROJENJA ZA PRERADU DRVA

Mjerenje naponskog treperenja u kotlovnici je obavljeno Flukeovim uređajem 1745 Power Quality Logger, pomoću kojega se mjere svi pokazatelji električne energije (kolebanje napona, naponsko treperenje, napon viših harmonika i međuharmonika, frekvencija opskrbnog napona, nesimetričnost napona...). Pokazatelji kvalitete električne energije su analizirani na računalu u programu PQ Log koji ne zahtjeva snažno računalo i radi na MS WINDOWS operativnom sustavu.

Slika 5.1. prikazuje pokazatelje kvalitete električne energije u kotlovnici, te je vidljivo da su svi pokazatelji kvalitete električne energije, osim naponskog treperenja, u skladu s ograničenjima norme EN 50160.

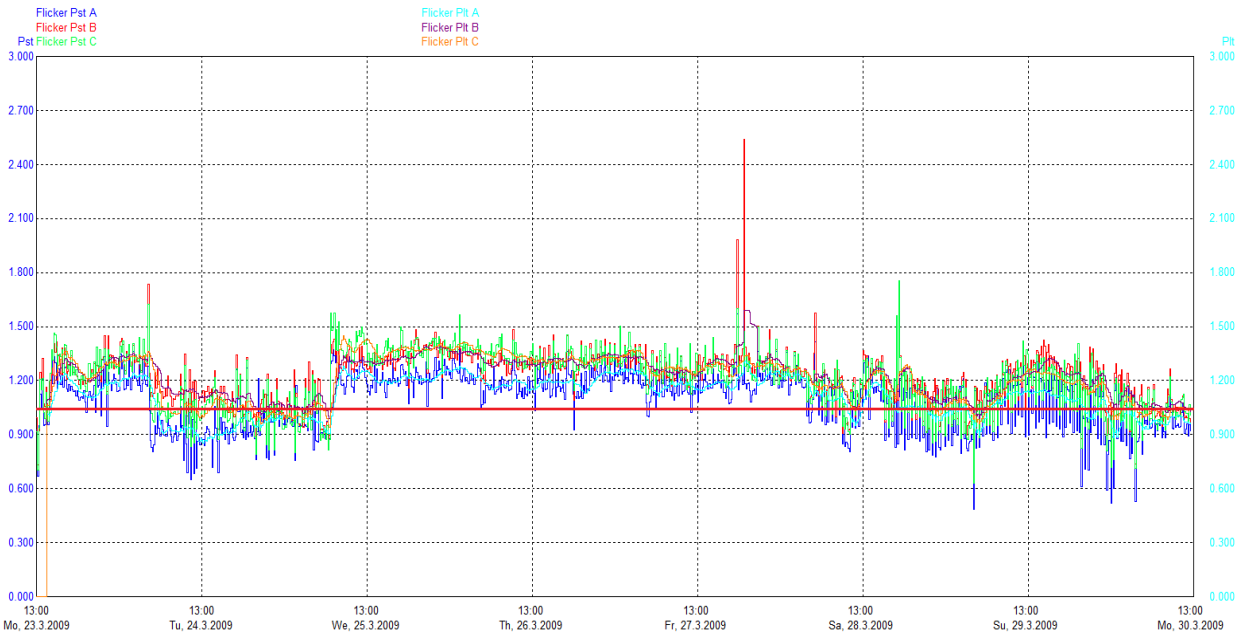


Slika 5.1. Grafički prikaz pokazatelja kvalitete električne energije

5.1. Analiza kratkotrajnog i dugotrajnog treperenja kotlovnice

Karakteristika kratkotrajnog treperenja (P_{st}) i dugotrajnog treperenja (P_{lt}) je prikazana na slici 5.2. U analizi treperenja napona koristi se kratkotrajno treperenje (P_{st}) zato što se ono direktno dobiva mjerenjem, a dugotrajno treperenje se računa na temelju kratkotrajnog treperenja.

Crvenom crtom je označena granična dopuštena vrijednost za dugotrajno treperenje koju propisuje norma, te je vidljivo da je vrijednost jačine treperenja skoro cijelo vrijeme iznad crvene crte, odnosno iznad granične dopuštene vrijednosti. Granična dopuštena vrijednost dugotrajnog treperenja koju propisuje norma EN 50160 iznosi $P_{lt} = 1$.

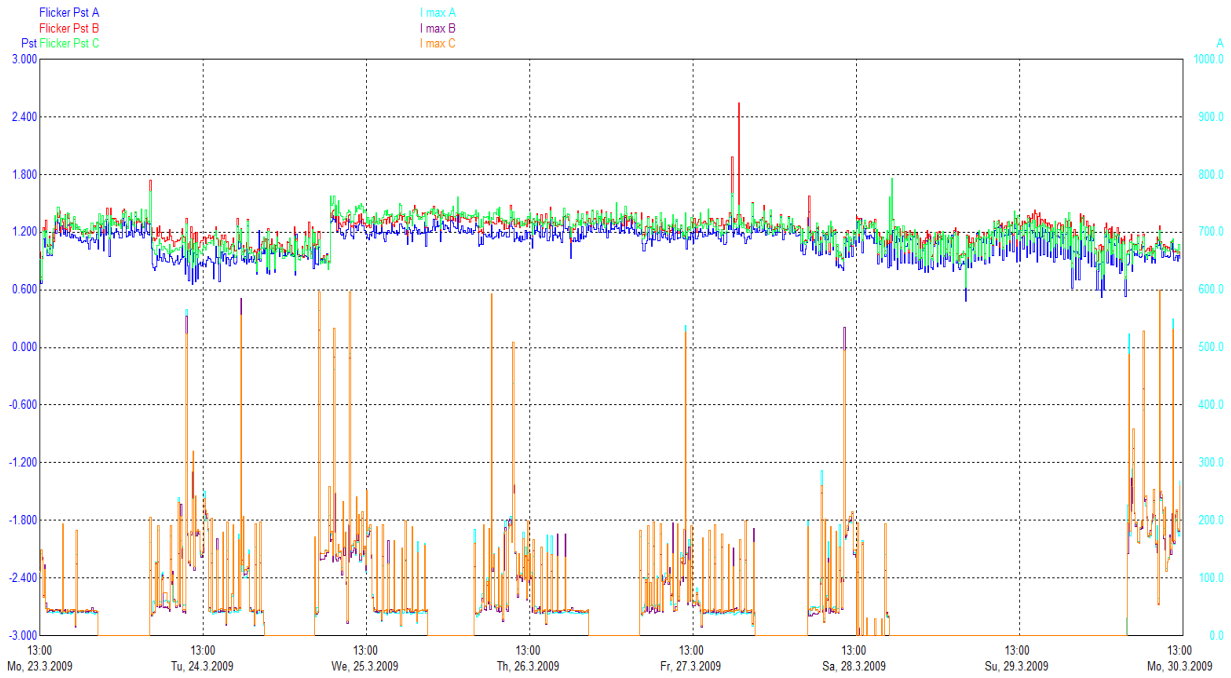


Slika 5.2. Kratkotrajno (P_{st}) i dugotrajno (P_{lt}) treperenje u kotlovnici

5.2. Analiza 10-minutnih efektivnih usrednjenih vrijednosti struje i kratkotrajnog treperenja kotlovnice

Na slici 5.3. prikazan je odnos između kratkotrajnog treperenja (P_{st}) i strujnih skokova u kotlovnici. Strujni skokovi uzrokovani su uključivanjem velikih asinkronih motora koji se nalaze u raznim pumpama i kompresorima.

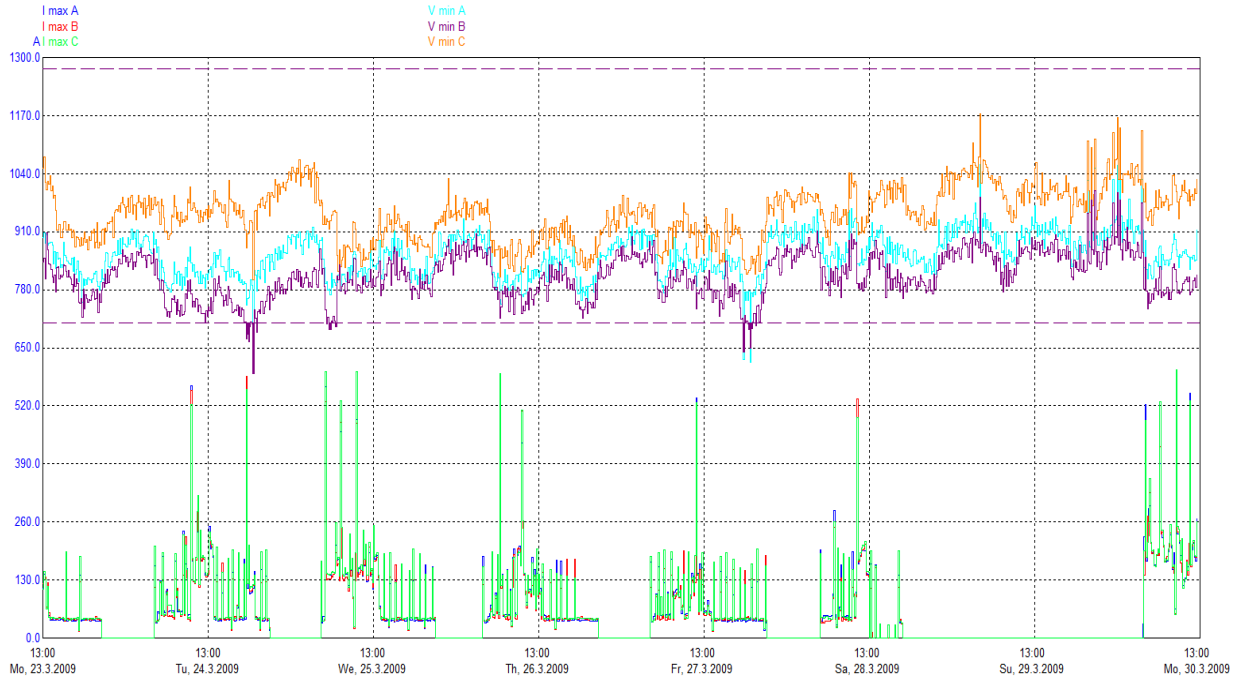
Vrijednost kratkotrajnog treperenja je cijelo vrijeme iznad dopuštenene vrijednosti, čak i kada je struja jednaka nuli, te se zbog toga ne mogu povezati strujni skokovi koje uzrokoju pumpe i kompresori sa naponskim treperenjem, tj. trošila u kotlovnici ne uzrokuju naponsko treperenje.



Slika 5.3. 10-minutne efektivne usrednjene vrijednosti struje i kratkotrajno treperenja (P_{st}) kotlovnice

5.3. Analiza 10-minutnih efektivnih usrednjenih vrijednosti struje i napona kotlovnice

Na slici 5.4. se može uočiti da se mjestimično strujni skokovi mogu povezati s kolebanjem napona i naponskim propadima, ali može se zaključiti da trošila u kotlovnici nisu glavni uzrok naponskih propada i kolebanja napona.



Slika 5.4. Maksimalne vrijednosti struje i minimalne vrijednosti napona

Sa slike 5.4. također je moguće utvrditi i radno vrijeme kotlovnice, tj. postrojenja za preradu drveta. Radno vrijeme je: ponedjeljak – petak od 5h ujutro do 21h navečer, subota od 6h ujutro do 18h navečer, a nedjeljom se ne radi.

5.4. Metode ublažavanja naponskog treperenja u kotlovnici

Poznato je da naponsko treperenje najviše utječe na rasvjetu te bi jedna od metoda ublažavanja naponskog treperenja mogla biti zamjena vrste rasvjete jer su fluorescente žarulje manje osjetljive na naponsko treperenje od klasičnih žarulja.

Druga metoda koja bi ublažila naponsko treperenje je ugradnja neprekidnog napajanja – UPS (engl. *Unitedrrupted Power Supply*). Ova metoda je ekonomična samo ako je više osjetljivih uređaja grupirano zajedno.

Treća metoda ublažavanja naponskog treperenja je preuređenje mreže, tj. povećanje snage kratkog spoja. Ta metoda je vrlo skupa i nije uvijek primjenjiva jer ponekad može prisiliti na promjenu cijele električne mreže, što rezultira dodatnim troškovima. Mjere koje se mogu poduzeti kako bi se povećala snaga kratkog spoja su priključak na mrežu na višoj razini napona i paralelni spoj transformatora gdje se povećava snaga kratkog spoja na sekundarnoj strani.

6. ZAKLJUČAK

Pojam treperenja je subjektivni dojam ljudi koji primjećuju promjene koje se događaju u intenzitetu jakosti svjetla. Jedan od razloga složene procjene ovog fenomena je ljudski faktor u definiciji. S električnog stajališta, može se reći da je kolebanje napona, odnosno promjena amplitude u nekom određenom trenutku, glavni uzrok naponskog treperenja.

Najčešći izvori kolebanja napona, a ujedno i naponskog treperenja su lučne peći, uređaji za lučno zavarivanje, asinkroni motori, kondenzatorske baterije, vjetroelektrane i naponski međuharmonici. Ti izvori uzrokuju promjenu svjetlosnog toka žarulja, promjenu momenta i klizanja električnih strojeva te smanjenje faktora snage i generiranje ne karakterističnih harmonika i međuharmonika kod statičkih pretvarača.

Ograničenja za kolebanje i treperenje napona su definirana europskom normom EN 50160. Kolebanje napona prihvatljivo je ako se, pri normalnim pogonskim uvjetima, 95% svih 10-minutnih srednjih vrijednosti efektivne vrijednosti opskrbnog napona svakog tjednog intervala nalazi unutar +/- 10 % vrijednosti normiranog nazivnog napona (U_n), dok jačina treperenja ne smije prijeći vrijednost jedan unutar 95% vremena jednog tjedna.

Kod određivanja rasprostiranja naponskog treperenja u nekoj točki mreže uzrokovanog promjenjivim opterećenjima razlikuju se dva slučaja - kada se promatrana točka nalazi na velikoj udaljenosti od drugih izvora treperenja i kada je jačina treperenja u promatranoj točki zbroj smetnji iz više promjenjivih opterećenja spojenih na kratkim udaljenostima.

Metode ublažavanja naponskog treperenja se temelje na ublažavanju kolebanja napona. Postoje dvije metode: metoda snižavanja promjene jalove snage opterećenja i metoda povećanja snage kratkog spoja.

Analizom rezultata mjerenja naponskog treperenja u kotlovnici postrojenja za preradu drva nisu utvrđeni točni razlozi naponskog treperenja u kotlovnici, ali su određene metode ublažavanja naponskog treperenja. Metode za ublažavanje naponskog treperenja su: promjena vrste rasvjete, ugradnja neprekidnog napajanja, povećanje snage kratkog spoja priključkom kotlovnice na mrežu više razine napona i povećanje snage kratkog spoja paralelnim spojem transformatora gdje se povećava snaga kratkog spoja na sekundarnoj strani.

LITERATURA

[1] Z. Klaić, 1. predavanje iz kolegija Kvaliteta napona u EES, Osijek, 2014.

[2] J. Schlabbach, D. Blume i T. Stephanblome, Voltage Quality in Electrical Power Systems, IET, Power and Energy Series 36, London, 2000.

[3] Z. Klaić, 2. predavanje iz kolegija Kvaliteta napona u EES, Osijek, 2014.

[4] Z. Hanzelka, Application note voltage fluctuacions in power networks („Flicker“), European Copper Institute, cu0208, 2014.

[5] https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/EMCPredavanje20070615.pdf, datum pristupa: 4.6.2015.

[6] I.Ivšinović, Diplomski rad - Kvaliteta električne energije, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2003.

[7] Ž. Novinc, Priručnik – Kvaliteta električne energije, Elektrotehnički fakultet, Osijek, 2006.

[8] A. Baggini, Handbook of power quality, University of Bergamo, Italy, 2008.

SAŽETAK

U sklopu ovog diplomskog rada opisan je problem naponskog treperenja. Opisani su izvori i posljedice naponskog treperenja, opisana je europska norma EN 50160, rasprostiranje naponskog treperenja u nekoj točki mreže i metode ublažavanja naponskog treperenja. U radu se osim detaljnog teoretskog opisa problema naponskog treperenja nalazi i analiza rezultata mjerenja naponskog treperenja u kotlovnici postrojenja za preradu drva. Mjerenje naponskog treperenja u kotlovnici postrojenja za preradu drva je obavljeno Flukeovim uređajem 1745 Power Quality Logger a analiza je napravljena na računalu u programu PQ Log. Analizom mjerenja naponskog treperenja nisu utvrđeni razlozi naponskog treperenja u kotlovnici, ali su određene metode ublažavanja naponskog treperenja

Ključne riječi: Napon, treperenje, izvori, posljedice, EN 50160, širenje, ublažavanje, analiza, mjerenje, 1745 Power Quality Logger, PQ Log

POWER QUALITY – VOLTAGE FLUCTUATIONS

SUMMARY

In this study the problem of voltage fluctuations is described. The sources and effects of voltage fluctuations, the European standard EN 50160, Propagation of voltage fluctuations at some point in the network and methods of mitigating voltage fluctuations are described. The study except a detailed theoretical description of the problem of voltage fluctuations contains of analysis of measurement of voltage fluctuations in the boiler plant for in plant for wood processing. Measurement voltage fluctuations in the boiler plant is done device by Fluke 1745 Power Logger, and the analysis is made on the computer in the program PQ Log. The analysis of the measurements of voltage fluctuations not identify the main sources of voltage fluctuations in the boiler room, but are determine methods to mitigate voltage fluctuations are determined.

Keywords: voltage, flicker, sources, effects, EN 50160, propagation, mitigate, analysis, measuring, 1745 Power Logger, PQ Log

ŽIVOTOPIS

Krešo Krejča

Končanica 432, 43505 Končanica

Telefon: 043/325-226

Mobitel: 095/887-8564

Email: keko007.1@gmail.com

Krešo Krejča rođen je u Bjelovaru 20.08.1991. godine. Završio je Češku osnovnu školu Josip Ružička u Končanici gdje je sudjelovao je na mnogim školskim i županijskim natjecanjima, te se zatim upisao u Tehničku školu Daruvar, smjer elektrotehnika. 2010. godine upisuje preddiplomski studij elektrotehnike na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku, smjer elektroenergetika. Nakon tri godine završava preddiplomski studij, te u jesen 2013. upisuje diplomski studij elektrotehnike također na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku.

Materinji jezik mu je hrvatski. Znanje češkog jezika je na odličnoj razini, kako pisanje tako i govor, dok su njemački i engleski jezik na nižoj razini znanja pisanja i govora.

Ima iskustva s radom u AutoCAD-u, Matlab-u, Eplan-u, Easy Power-u, DIgSILENT-u, Multisim-u... Aktivno se bavi nogometom, a u slobodno vrijeme se druži s prijateljima, te slaže LEGO kockice.