



mr.sc. Jandro Šimić, dipl.ing.
Mate Lasić, dipl.ing.
Končar - Institut za elektrotehniku d.d.
mr.sc. Zoran Stanić, dipl.ing.
HEP d.d., Sektor za razvoj

R4

MJERENJA I ANALIZA KVALITETE ELEKTRIČNE ENERGIJE NA OTOKU PAGU PRIJE I NAKON PRIKLJUČKA MALE VJETROELEKTRANE RAVNA1

SAŽETAK

Posljednjih desetak godina u svijetu vlada trend naglog povećanja korištenja obnovljivih izvora energije (ponajviše energije vjetra) pri proizvodnji električne energije. Prvi veći takav projekt u Hrvatskoj predstavlja izgradnja male vjetroelektrane Ravna1 na otoku Pagu. Pošto su obnovljivi izvori energije, a naročito vjetar, uglavnom stohastičke prirode, postavlja se pitanje kako elektroenergetski objekti poput vjetroelektrana mogu djelovati na kvalitetu električne energije, s obzirom da se oni redovito spajaju na male i relativno slabe distribucijske mreže.

U ovom radu je dan prikaz mjerenja kvalitete električne energije elektrodistribucijske mreže otoka Paga prije i nakon priključka vjetroelektrane Ravna1 prema europskoj normi EN 50160 kao i kratki opis DFIG (Doubly-fed induction generator) izvedbe vjetroturbine, koja je instalirana na otoku Pagu. Na kraju je dan komentar mjernih rezultata i povratnog djelovanja vjetroelektrane na kvalitetu električne energije distribucijske mreže otoka Paga.

Ključne riječi: distribucijska mreža, kvaliteta električne energije, norma EN 50160, vjetroelektrana, DFIG

MEASUREMENTS AND ANALYSIS OF POWER QUALITY ON THE ISLAND PAG BEFORE AND AFTER GRID CONNECTION OF RAVNA1 SMALL WIND PARK

SUMMARY

In the last ten years there is a worldwide trend of rampant use of renewable sources of energy (wind energy in particular) in the generation of electricity. The first major project of this kind in Croatia is the construction of a small wind park Ravna1 on the island of Pag. Since renewable sources of energy, especially the wind, are mainly of a stochastic nature, the question arises how power stations like wind parks can influence power quality having in mind that they are as a rule connected to small and relatively weak distribution networks.

This paper gives a survey of power quality measurements made in accordance with the standard EN 50160 in the distribution network of the island of Pag before and after grid connection of Ravna1 small wind park. The DFIG (Doubly-fed induction generator) wind turbine system that is installed on Pag is briefly described. In conclusion, some comments are given regarding the measurement results and influence of the wind park on the quality of electric power in the Pag distribution network.

Keywords: distribution system, power quality, standard EN 50160, wind park, DFIG

1. UVOD

Vjetar je po svojoj prirodi stohastička pojava i njegova snaga (brzina) je vrlo promjenjiva. Međutim, energiju vjetra je ipak moguće koristiti za proizvodnju električne energije. Vjetroelevtrane su postrojenja koja se sastoje od nekoliko vjetroturbina u kojima se kinetička energija vjetra pretvara u električnu energiju. Vjetroturbine su zbog tehničkih i ekonomskih razloga građene tako da proizvode električnu energiju samo u određenom rasponu brzina vjetra (tipično 4-25 m/s). Zbog stohastičkog karaktera vjetra kao izvora energije, vjetroelevtrane svojim radom utječu na naponske prilike na mjestu priključka na mrežu.

Vjetroturbine generalno možemo podijeliti na dvije velike grupe: vjetroturbine sa stalnom brzinom vrtnje i vjetroturbine sa promjenjivom brzinom vrtnje. Utjecaj vjetroturbina na kvalitetu električne energije uvelike se razlikuje za ove dvije grupe vjetroturbina.

Kada se analizira utjecaj rada vjetroelevtrana na kvalitetu električne energije obično se raspravlja o četiri kriterija: utjecaj rada vjetroelevtrana na napon u stacionarnom stanju, utjecaj dinamičkih promjena napona (flikera), tranzijenti uzrokovani sklapanjem te injektiranje viših harmoničkih članova struje u mrežu. Procedura određivanja utjecaja vjetroturbine na kvalitetu električne energije je dana u [3].

1.1. Utjecaj rada vjetroelevtrane na napon u stacionarnom stanju

Promjena napona u stacionarnom stanju je posljedica injektiranja struje u mrežu. Iznos napona na mjestu priključka vjetroelevtrane kao funkcije proizvedene radne i jalove snage se može približno odrediti izrazom:

$$U = R \cdot \frac{P}{U_n} - X \cdot \frac{Q}{U_n} + U_n \quad (1).$$

U_n - nazivni napon mreže

U – napon na mjestu priključka vjetroelevtrane

P – proizvedena radna snaga

Q – jalova snaga

R – radni otpor mreže

X – induktivni otpor mreže

Utjecaj na iznos napona vjetroturbina sa asinkronim generatorom izravno spojenim na mrežu (vjetroturbine sa stalnom brzinom vrtnje) najviše ovisi o X/R omjeru mreže, dok u manjoj mjeri ovisi o značajkama generatora. S druge strane vjetroturbine sa energetske pretvaračima automatski mogu provoditi kontrolu po bilo kojem zadanom kriteriju (održavanje iznosa napona ili održavanje faktora snage na zadanoj vrijednosti).

1.2. Dinamičke promjene napona (emisija flikera)

Turbulencije vjetra stvaraju varijacije proizvedene snage a time i varijacije iznosa napona u rasponu 0.01-10 Hz. Ove varijacije iznosa napona stvaraju fliker koji je mjera za promjenu jačine svjetla uzrokovanog promjenom napona na rasvjetnom tijelu.

Turbulencije vjetra se izravno prenose kao oscilacije predane snage u mrežu kod vjetroturbina sa stalnom brzinom vrtnje. Kod vjetroturbina koje koriste energetske pretvarače (vjetroturbine sa promjenjivom brzinom vrtnje) turbulencije vjetra se ne prenose izravno u mrežu kao oscilacije proizvedene snage. Razlog leži u činjenici da se brzina vrtnje rotora polako mijenja pa se rotor ponaša kao svojevrsan zamašnjak u kojemu se privremeno pohranjuje energija vjetra. Osim toga energetski pretvarač omogućava i kontrolu jalove snage da bi se smanjile fluktuacije iznosa napona.

1.3. Tranzijenti uzrokovani sklapanjem

Utjecaj vjetroturbine na mrežu prilikom sklapanja se može podijeliti na dva slučaja. Prvi slučaj je utjecaj na napon u stacionarnom stanju za vrijeme spajanja generatora na mrežu. Visoki iznosi struje prilikom uklopa mogu izazvati propade napona. Ovo se naročito odnosi na uklop vjetroturbine sa stalnom brzinom vrtnje na nazivnoj brzini vjetra. Sklapanja izazivaju i fliker što se ograničava određivanjem maksimalnog broja sklapanja u vremenskom intervalu od dva sata. Sklapanja kod vjetroturbina sa promjenjivom brzinom vrtnje uglavnom nemaju značajni utjecaj na mrežu.

Drugi slučaj sklapanja se odnosi na sklapanje kondenzatora kod asinkronih generatora izravno spojenih na mrežu. Ovaj tip sklapanja je popraćen strujnim udarima visokih frekvencija i odgovarajućim naponskim tranzijentima koji se šire u mrežu. Kod vjetroturbina s promjenjivom brzinom vrtnje ne postoje kondenzatorske baterije za kompenzaciju već je kontrola jalove snage omogućena energetskim pretvaračem.

1.4. Injektiranje viših harmonika struje u mrežu

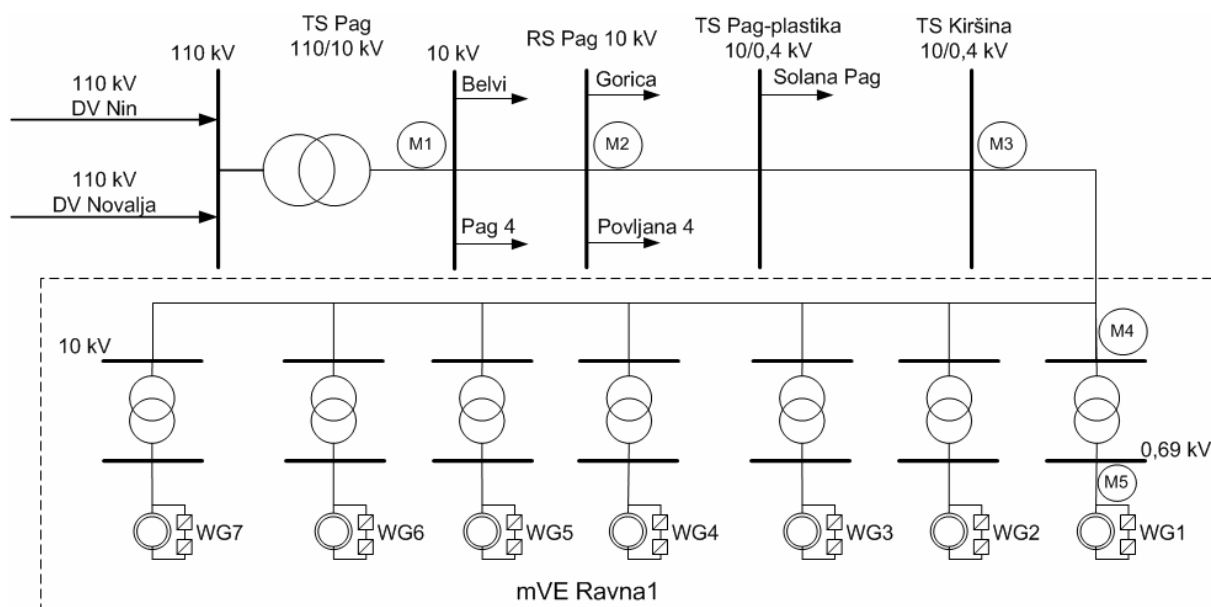
Injektiranje viših harmonika struje u mrežu je posljedica rada energetskih pretvarača koji se koriste kod vjetroturbina sa promjenjivom brzinom vrtnje. Emisije harmoničkih članova struje su uglavnom ispod preporučenih vrijednosti pa bitno ne narušavaju kvalitetu električne energije. Kod vjetroturbina kod kojih je generator izravno spojen na mrežu (vjetroturbine sa stalnom brzinom vrtnje) ovaj aspekt kvalitete električne energije se može zanemariti.

Uzimajući u obzir navedene činjenice, prije priključka vjetroelektrane na mrežu obavljena su mjerenja kvalitete električne energije s ciljem utvrđivanja postojećeg stanja kvalitete električne energije obzirom na postojeću konfiguraciju mreže i priključena trošila te da se ustanove potencijalni problemi u konfiguraciji mreže, koji bi se mogli pojaviti nakon priključka vjetroelektrane na mrežu (tokovi snaga, iznosi napona u glavnim čvorištima, tokovi viših harmonika i fliker).

Nakon priključka vjetroelektrane na mrežu i puštanja u rad obavljena su nova mjerenja kvalitete električne energije s ciljem utvrđivanja novog stanja kvalitete električne energije te davanja ocjene povratnog djelovanja vjetroelektrane na mrežu.

2. OPIS DISTRIBUCIJSKE MREŽE OTOKA PAGA

Rad male vjetroelektrane Ravna1 je ostvaren na način da su elektrana i lokalna distribucijska elektroenergetska mreža u paralelnom radu. Distribucijska mreža je nazivnog napona 10kV i većinom je kabelska. Nadzemni 10 kV vodovi su rijetki i ukupne su duljine 2 km, što je jako malo uspoređujući s 81 km ukupne duljine pozemnih 10 kV kabela. Nakana DP „Elektra“ Zadar je da zamijeni preostale nadzemne vodove kabelima. Ova zamjena je prvenstveno uzrokovana problemima koji nastaju u mreži kao posljedica posolice. Ova pojava se javlja većinom u zimskim mjesecima, a nastaje kad bura nanese velike količine soli na kopno otoka. Sol se tada nataloži na prijenosnim elementima elektroenergetske mreže (kritični elementi su upravo izolatori kod nadzemnih vodova) i uzrokuje preskoke i pojave luka u postrojenjima, a time i izbacivanje dijelova mreže iz pogona.



Slika 1. Dio distribucijske mreže otoka Paga s izvedenim priključkom male vjetroelektrane Ravna1

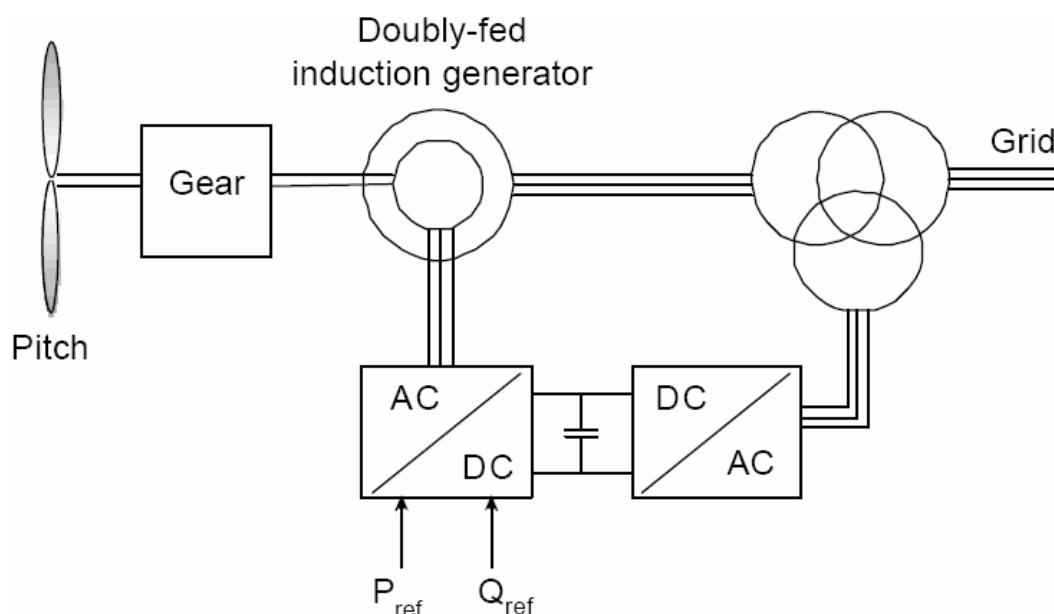
Pojna točka distribucijske mreže je transformatorska stanica TS Pag transformacije 110/10 kV, instalirane nazivne snage energetskog transformatora 10 MVA, a pripadno sredjenaponsko 10 kV

postrojenje sastoji se od 3 aktivna vodna polja preko kojih se napaja oko 40 transformatorskih stanica 10/0,4 kV. Konzum uglavnom čine stambeni i turistički objekti te solana Pag.

Promatrana distribucijska mreža je radijalna, tako da iz pojne točke kabelski izlaz napaja određen broj 10/0,4kV transformatorskih stanica. S obzirom na veličinu distribucijske mreže na koju je priključena, mVE Ravna1 s maksimalnom proizvodnjom od 5.95 MW predstavlja značajan izvor električne energije pa se teoretski očekuje da bi njen rad mogao značajnije utjecati na promjene u cijeloj mreži (slika 1). Predviđeno je da elektrana svu proizvedenu električnu energiju isporučuje u distribucijsku mrežu.

3. DFIG IZVEDBA VJETROTURBINE

Dvostrano napajani asinkroni generator (engl. doubly-fed induction generator) je moderna izvedba vjetroturbine sa promjenjivom brzinom vrtnje. Kod ove izvedbe vjetroturbine stator asinkronog generatora je priključen izravno na mrežu, dok se rotor izvodi s namotima i klizno-kolutnim prstenovima preko kojih je rotor posredno preko energetskog pretvarača priključen na mrežu. Otuda i naziv dvostrano napajani asinkroni generator. Slika 2. prikazuje principijelnu shemu DFIG izvedbe vjetroturbine.



Slika 2. Izvedba vjetroturbine s dvostrano napajanim asinkronim generatorom (DFIG)

Prednosti ove izvedbe su višestruke. Energetskim pretvaračem u rotorskom krugu je omogućen 4-kvadrantni rad generatora tj. rad u području podsinkrone i nadsinkrone brzine vrtnje u određenim granicama (tipično 0.7 do 1.2 p.u.). Energetski pretvarač također omogućava kontrolu napona u rotoru po iznosu i faznom kutu pa se zbog toga koristi za kontrolu radne i jalove snage. Zato nije potrebna kompenzacija jalove snage (nema kondenzatorske baterije, a samim time ni problema sa sklapanjem kondenzatorske baterije). Zbog mogućnosti rada u širokom rasponu brzina oko sinkrone brzine naleti vjetra se ne prenose izravno u mrežu. Tada se rotor ponaša kao privremeni spremnik energije. Ova značajka smanjuje fluktuacije napona i snage koja se predaje u mrežu pa se samim time i smanjuju vrijednosti emisija flikera u mrežu. Snaga energetskog pretvarača iznosi 20-30% nazivne snage vjetroturbine pa je stoga jeftiniji i njegovi gubici su manji nego kod izvedbe kada se generator priključuje na mrežu preko energetskog pretvarača (sinkroni generator, kavezni asinkroni generator). Glavni nedostaci ove izvedbe su postojanje klizno-kolutnih prstenova i mjenjačke kutije. Ove komponente zahtijevaju češće održavanje.

3.1. Vjetroturbina Vestas V52

Na otoku Pagu na lokaciji Ravna izgrađena je mala vjetroelektrana od 7 vjetroturbina V52 danske tvrtke Vestas. Vetsas V52-850 kW OptiSpeed je vjetroturbina nazivne snage 850 kW sa regulacijom kuta zakreta elisi (pitch control) i rotorom s tri elise. To je tip vjetroturbine sa promjenjivom brzinom vrtnje koja koristi asinkroni 4-polni generator s namotima i klizno-kolutim prstenovima na rotoru. Rotor asinkronog generatora je preko energetskog pretvarača zasnovanog na IGBT-u posredno spojen na mrežu.

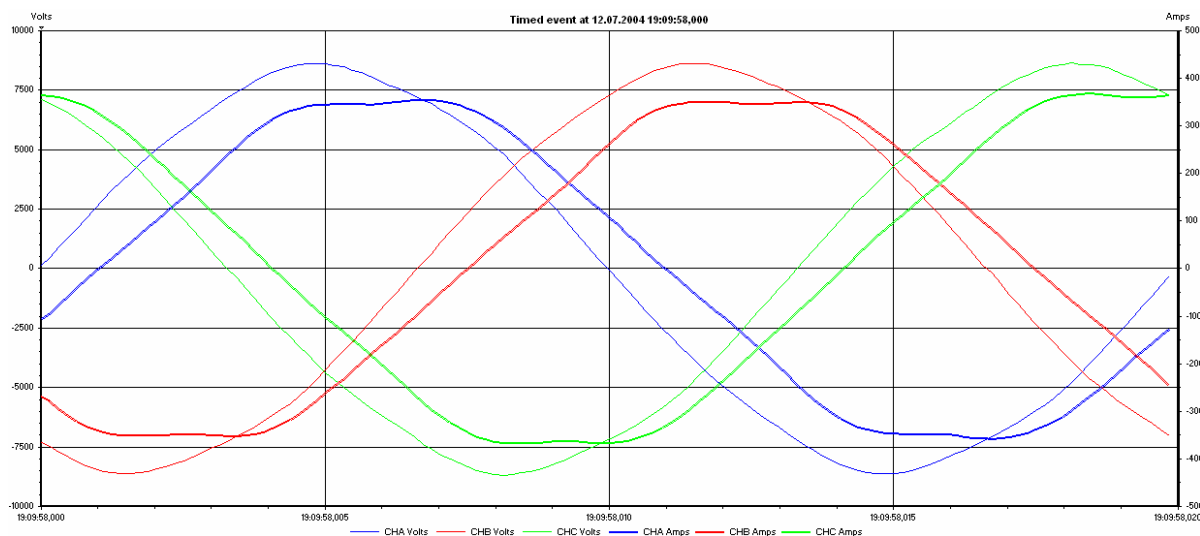
Za vrijeme malih brzina vjetra (4-8m/s) vjetroturbina radi u modu malog generatora (generator radi u spoju zvijezda), a za vrijeme srednjih i velikih brzina vjetra vjetroturbina radi u modu velikog generatora (generator radi u spoju trokut).

Vjetroturbina sa dvostrano napajanim asinkronim generatorom predstavlja dobar izbor u pogledu proizvodnje električne energije kao i u pogledu kvalitete električne energije. Upravljanje radom vjetroturbine sklopovima energetske elektronike omogućava potpunu kontrolu radne i jalove snage kao i dinamičkih fluktuacija napona uzrokovanih stohastičkom prirodom vjetra. Jedini nedostatak ove izvedbe vjetroturbine je injektiranje viših harmonika struje u mrežu. Kod uporabe energetskog pretvarača zasnovanog na IGBT sklopkama injektiranje viših harmonika struje u mrežu je vrlo malo.

4. ANALIZA REZULTATA MJERENJA KVALITETE ELEKTRIČNE ENERGIJE PRIJE PRIKLJUČKA MALE VETROELEKTRANE RAVNA1

Mjerenja kvalitete električne energije prije priključka male vjetroeletre Ravana1 obavljena su u srpnju 2004. godine za vrijeme sunčanog i vrlo sparnog vremena. Mjerenja su obuhvatila snimanja valnih oblika svih aktivnih 10 kV odvoda u TS Pag 110/10 kV (Transformator1, Belvi, Pag4 i RS Pag) i RS Pag 10 kV (Povljana, Gorica i Pag-plastika). Na osnovu ovih kratkotrajnih skeniranja odvoda dobiven je uvid u karakter potrošača lokalne distribucijske mreže na osnovu kojeg su određene dvije mjerne točke na kojima će se provesti trajna sedmodnevna mjerenja kvalitete napona u skladu s europskom normom EN 50160. Za trajna ispitivanja kvalitete napona odabrani su 10 kV odvodi Transformator1 u TS Pag (M1) i Pag-plastika u RS Pag (M2). Konzum lokalne otočke mreže uglavnom čine domaćinstva i turistički objekti s jednim većim industrijskim potrošačem (Solana Pag). Pošto su ova mjerenja vršena u ljetnom periodu na vrhuncu turističke sezone očekivan je povećan udio nelinearnih trošila u ukupnom konzumu lokalne distribucijske mreže zbog velikog broja instaliranih klima uređaja. Mjerenja su obavljena instrumentima Memobox 808 tvrtke Lem i PP 4300 tvrtke Dranetz.

Na slici 3. a) je dan prikaz tipičnih valnih oblika struja i napona na 10 kV odvodu Transformator 1 (M1) u TS Pag 110/10 kV, a na slikama 3. b) i 3 c) su dani rezultati FFT analize valnog oblika napona i struje u fazi L1. Iz navedenih slika se vidi da je valni oblik napona blago izobličen. Najizraženiji su redom 5, 7 i 3 harmonik napona. Valni oblik struje je također izobličen i u njemu su dominantni redom 5 i 7 harmonik struje. Može se reći da u ovoj mjerenoj točki nije izraženo izobličenje valnog oblika struja i napona.

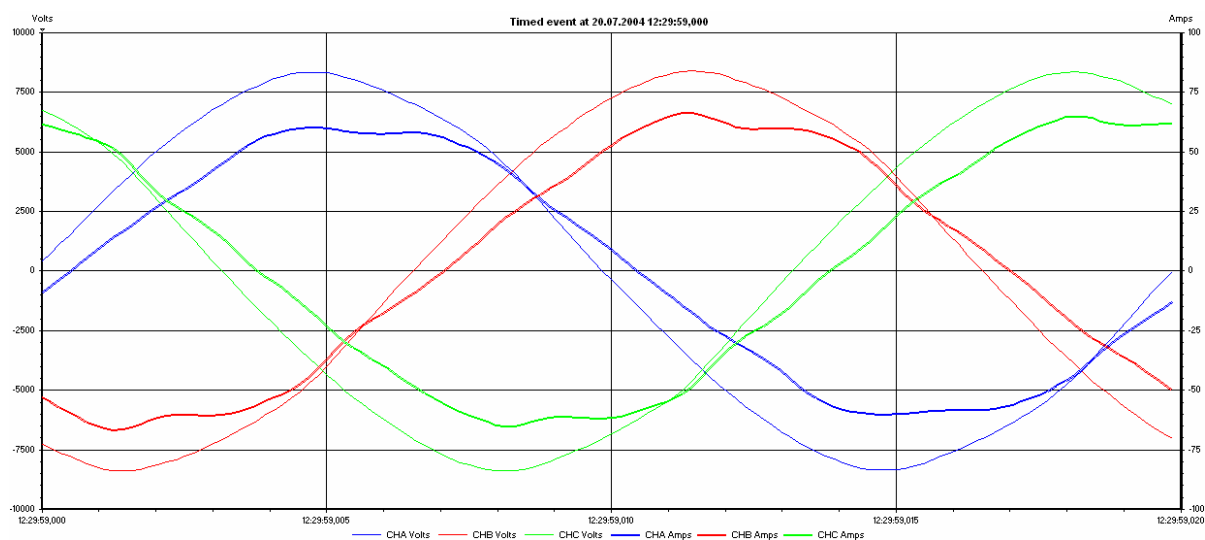


a)

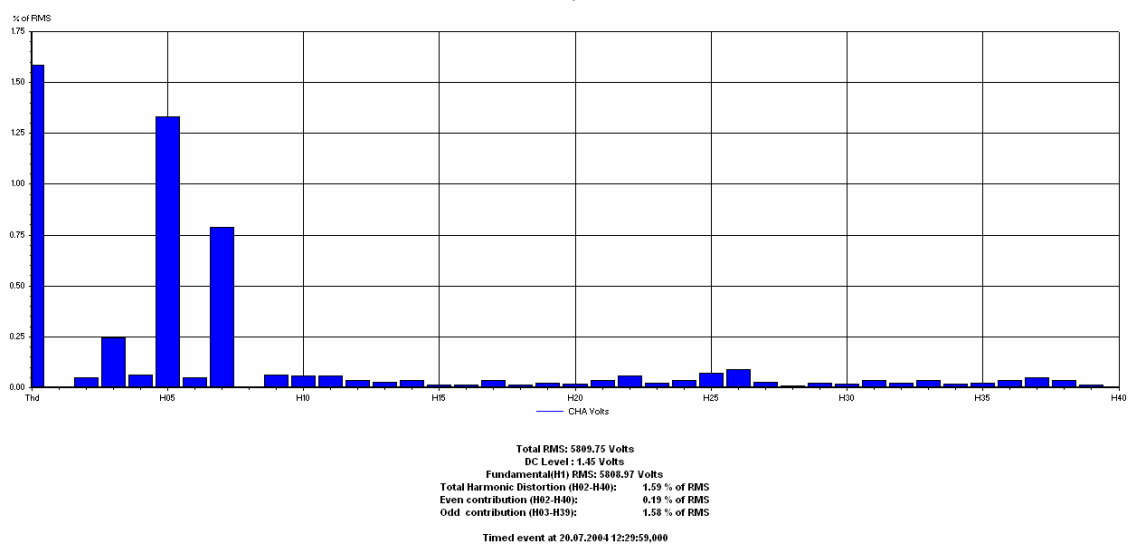


Na slici 4. a) je dan prikaz tipičnih valnih oblika struja i napona na 10 kV odvodu Pag-plastika (M2) u RS Pag 10 kV, a na slikama 4. b) i 4. c) su dani rezultati FFT analize valnog oblika napona i struje u fazi L1. Iz navedenih slika se vidi da je valni oblik napona blago izobličen. Najizraženiji su redom 5, 7 i 3 harmonik napona. Valni oblik struje je također izobličen i u njemu su dominantni redom 5, 7 i 13 harmonik struje. Može se reći da u ovoj mjernoj točki nije izraženo izobličenje valnog oblika struja i napona.

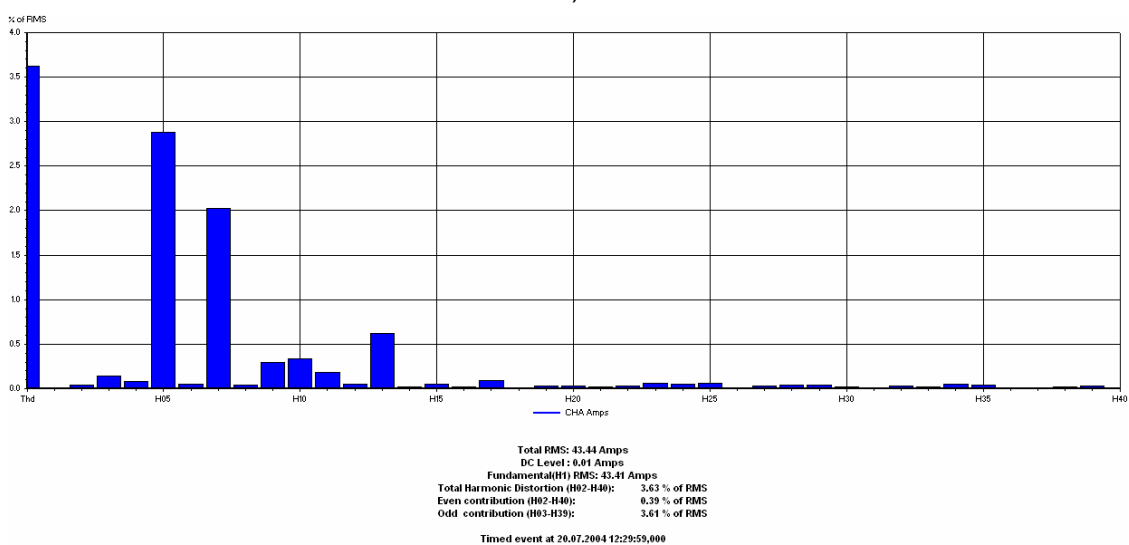
68



a)

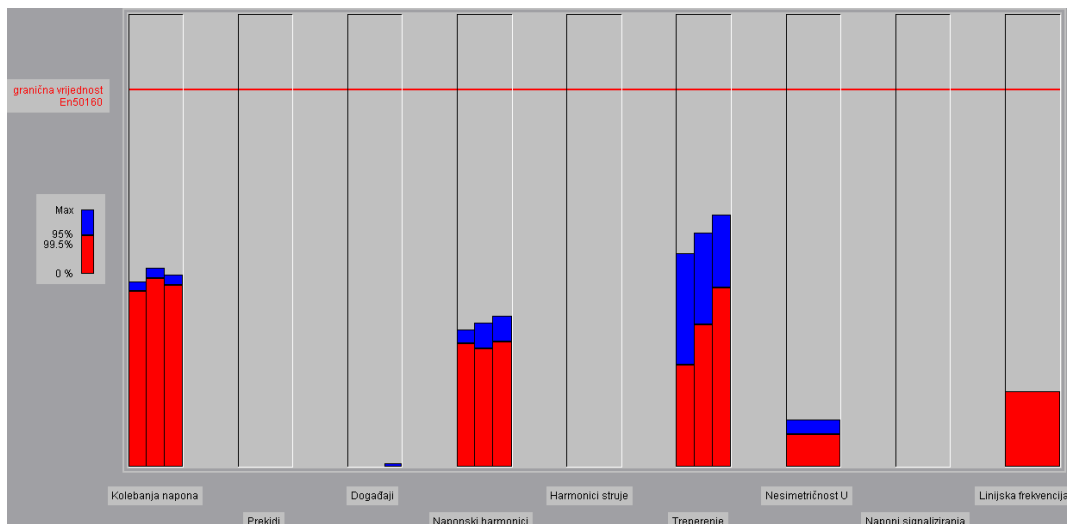


b)

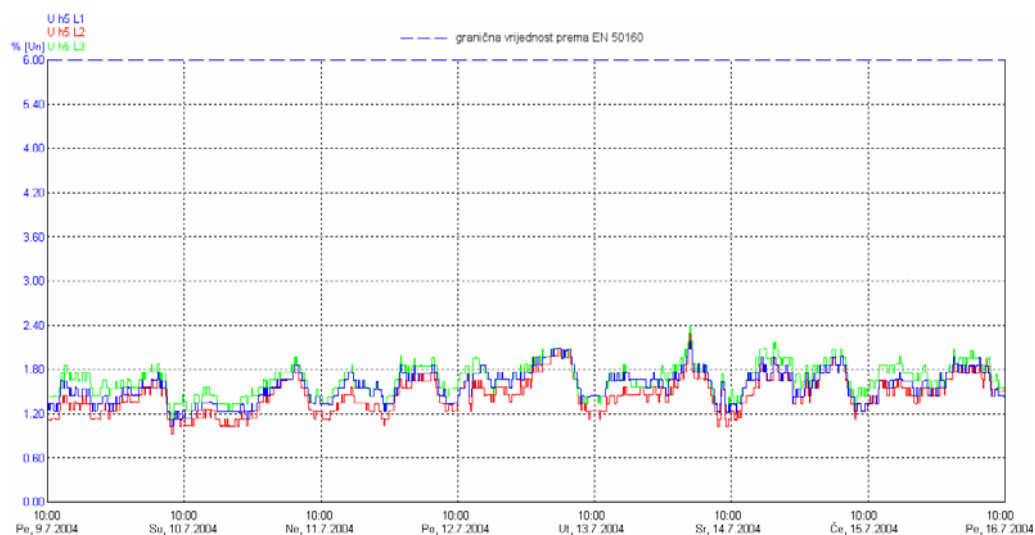


c)

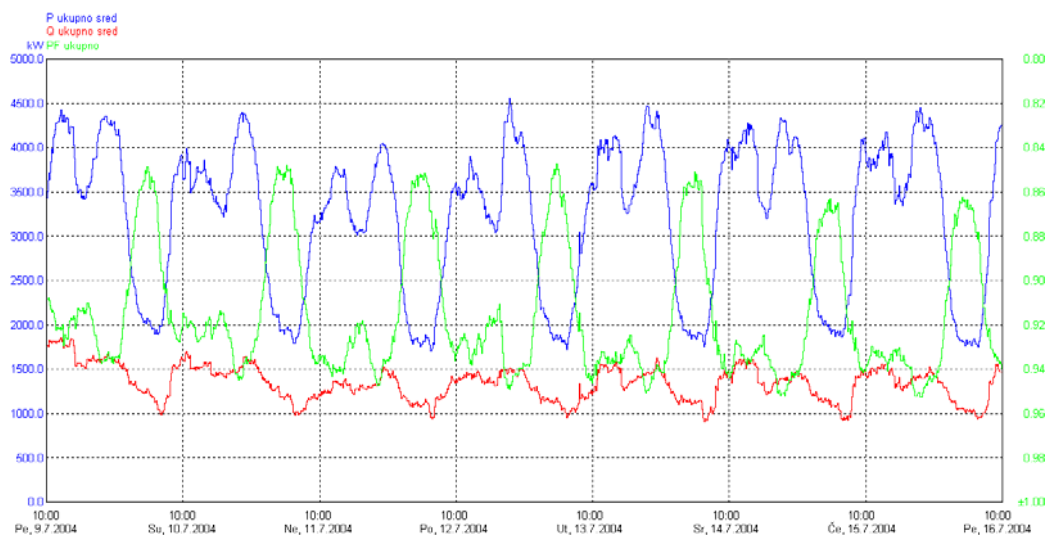
Slika 4. a) b) c) Tipični valni oblici struja i napona na 10 kV odvodu Pag-Plastika (M2) u RS Pag te FFT analiza valnih oblika struje i napona u fazi L1



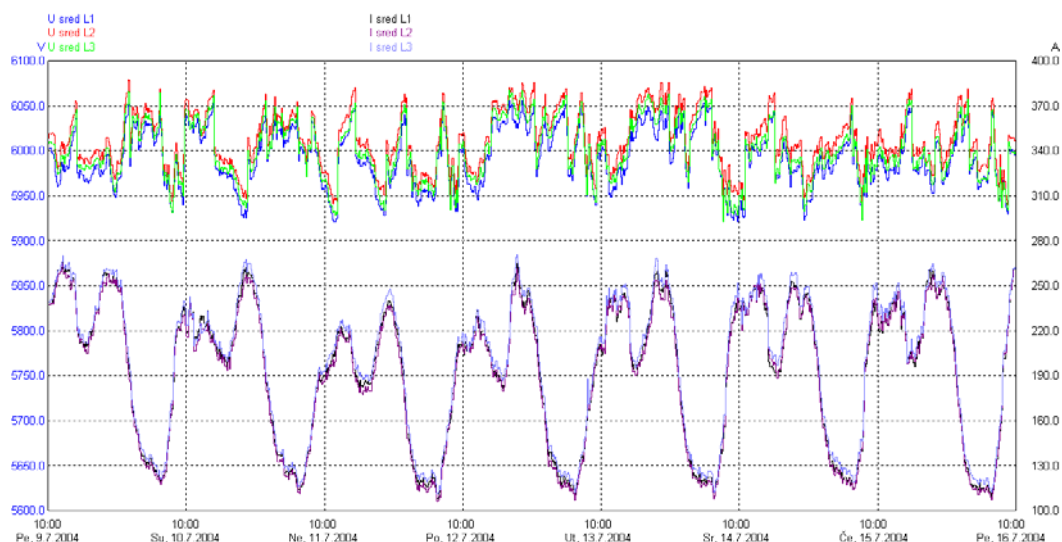
Slika 5. Rezultati mjerenja kvalitete napona u skladu s EN 50160 na 10 kV odvodu Transformator1 (M1) u TS Pag



Slika 6. Rezultat mjerenja 5-tog harmonika napona (10-minutni prosjeci) na 10 kV odvodu Transformator1 (M1) u TS Pag

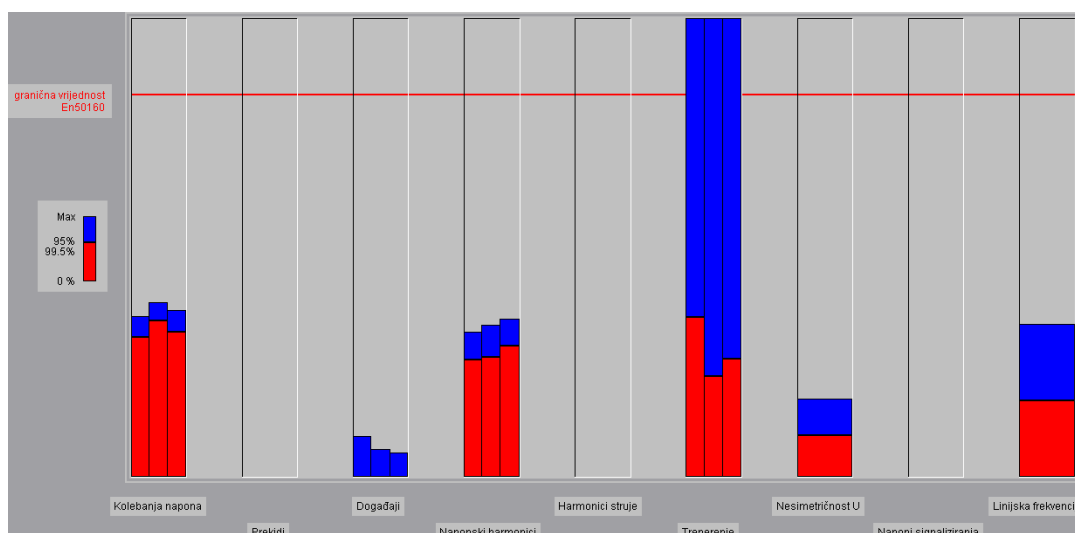


Slika 7. Ukupna radna i jalova snaga te faktor snage (10-minutni prosjeci) na 10 kV odvodu Transformator1 (M1) u TS Pag

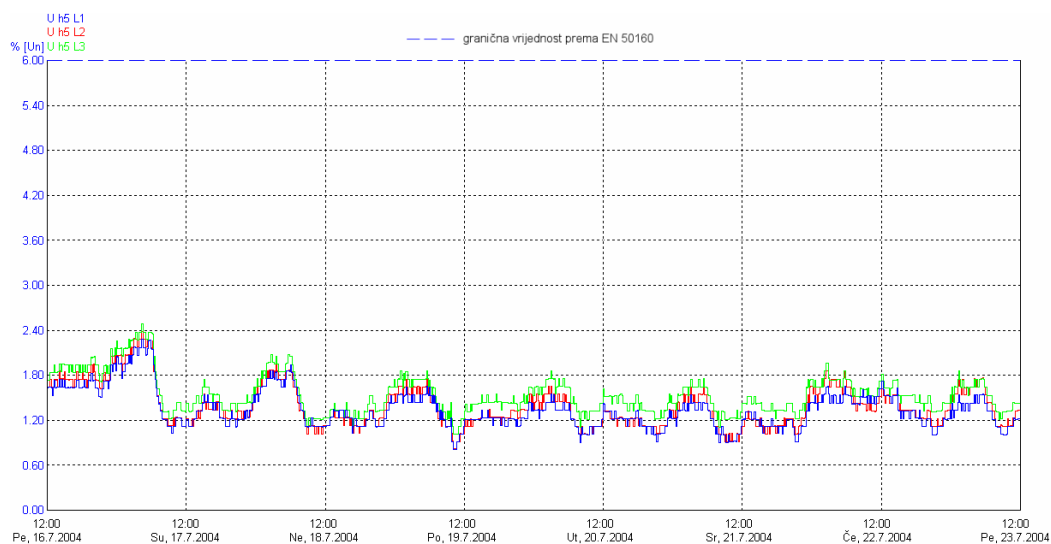


Slika 8. Usporedba faznih iznosa struja i napona (10-minutni prosjeci) na 10 kV odvodu Transformator1 (M1) u TS Pag

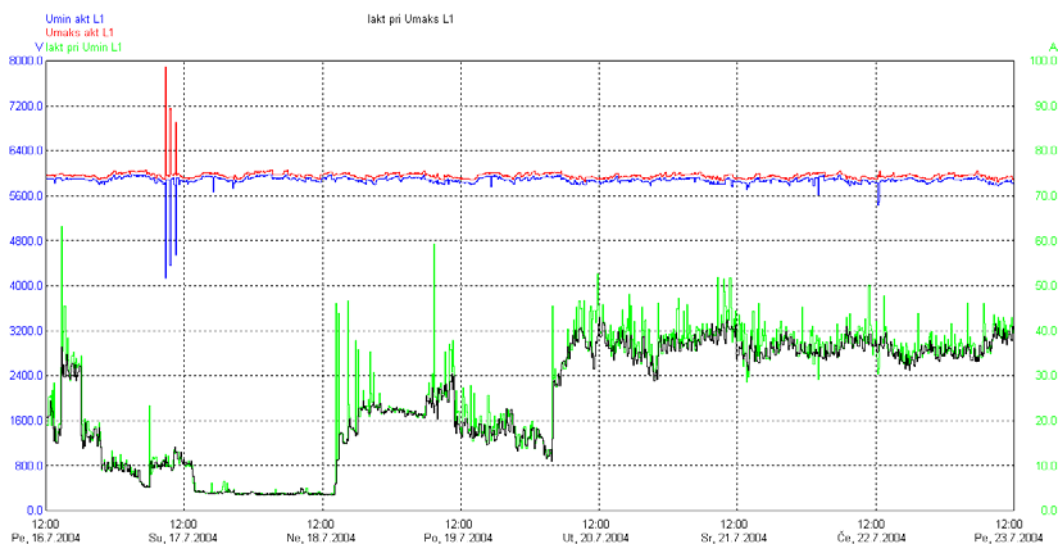
Na drugoj lokaciji, 10 kV odvod TS Pag-Plastika (M2) u rasklopištu RS 10 kV Pag, su provedena mjerenja u vremenu od 16.07.2004. do 23.07.2004. U transformatorskoj stanici TS Pag-Plastika se nalazi odvod za transformatorsku stanicu TS Kiršina koja predstavlja točku priključka male vjetroelektrane Ravna1. Dnevni dijagrami opterećenja se bitno ne razlikuju za radne dane. Vikendom su razine opterećenja puno manje u odnosu na radni dan. Izmjerena su vršna radna opterećenja od 800 kW (slika 12.). Izobličenje napona se za cijeli period mjerenja kretalo u granicama 1-2%. Najizraženiji je 5-ti harmonik napona (slika 10.). Izobličenje struje se kretalo u granicama 5-10% za vrijeme radnog dana dok su vikendom razine izobličenja puno veće i iznose i do 50%. Međutim razine viših harmonika struje u apsolutnim iznosima tijekom radnog dana su veće ili jednake iznosima izobličenja struje tijekom vikenda. Doprinos nelinearnih trošila u ukupnom konzumu opterećenja TS Pag-Plastika nije izrazit tako da je izobličenje napona u redu. Jakost flikera (treperenja napona) se u 95% vremena nalazila u granicama 0.2-0.4 pa se može reći da nije izražena. Zabilježeno je nekoliko propada napona i prenapona koji su u manje od 5% vremena uzrokovali visoke vrijednosti flikera (slika 11.). Iz svega navedenog se može zaključiti da kvaliteta električne energije u ovoj mjernoj točki u potpunosti zadovoljava sve uvjete iz norme EN 50160 (slika 9.).



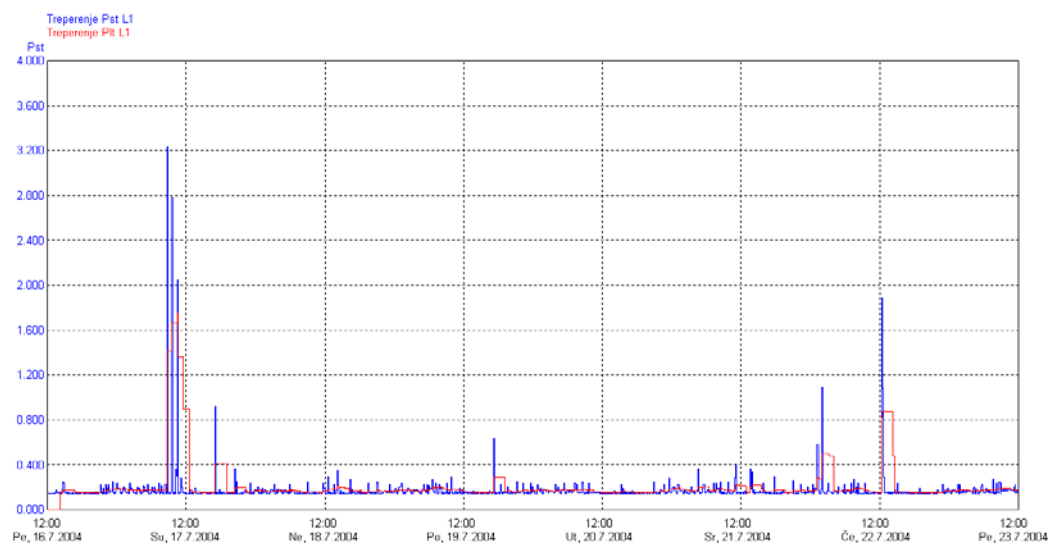
Slika 9. Rezultati mjerenja kvalitete napona u skladu s EN 50160 na 10 kV odvodu Pag-plastika (M2) u RS Pag



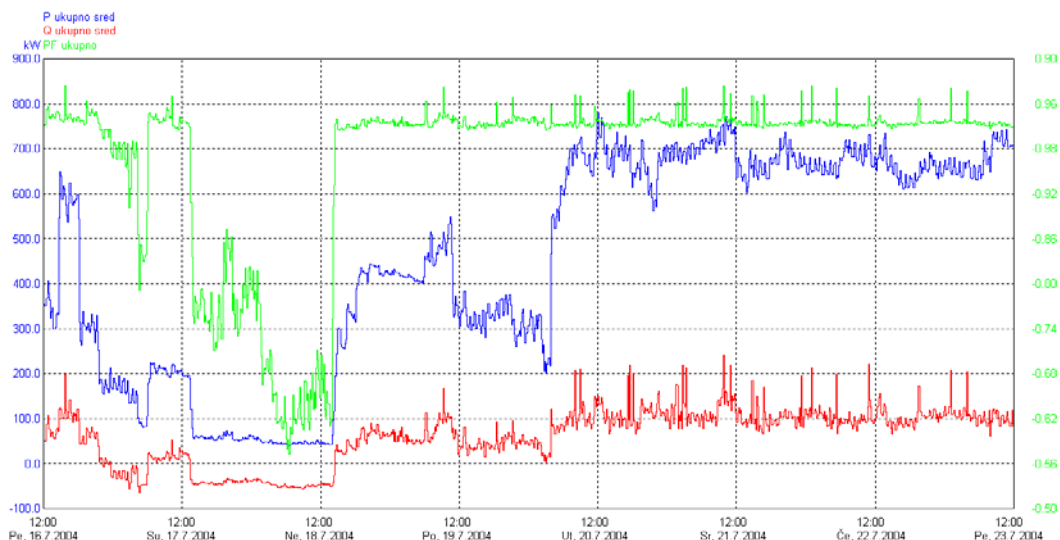
Slika 10. Rezultat mjerenja 5-tog harmonika napona (10-minutni prosjeci) na 10 kV odvodu Pag-plastika (M2) u RS Pag



a)



Slika 11. a) b) Analiza rezultata mjerenja flikera na 10 kV odvodu Pag-plastika (M2) u RS Pag

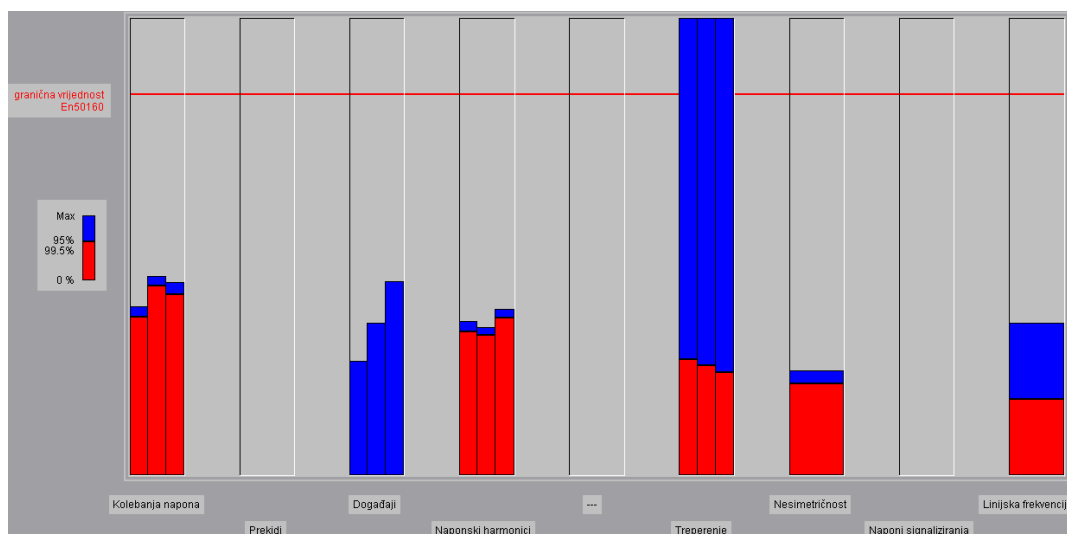


Slika 12. Ukupna radna i jalova snaga te faktor snage (10-minutni prosjeci) na 10 kV odvodu Pag-plastika (M2) u RS Pag

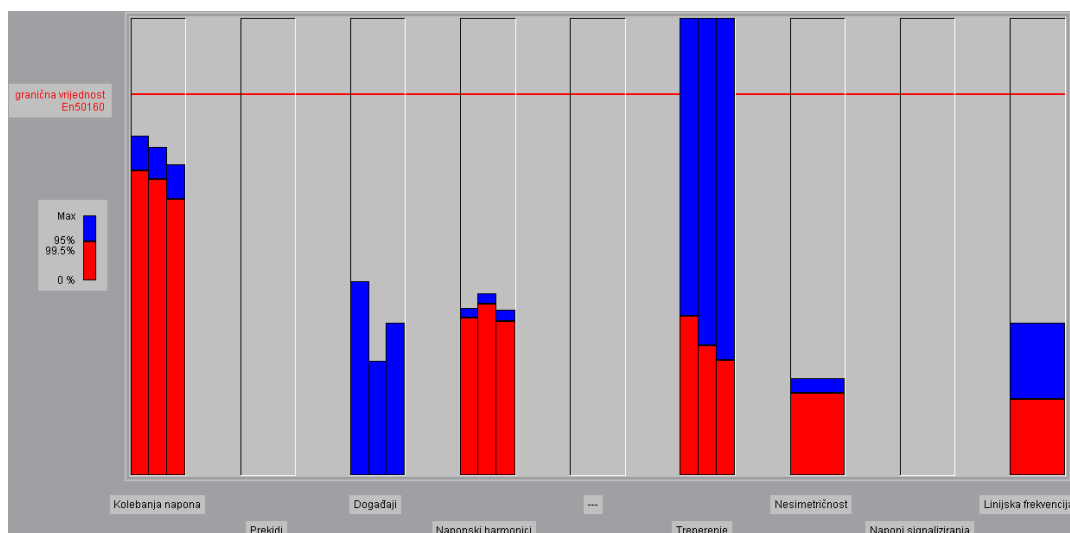
Mjerenja kvalitete električne energije prije priključka mVE Ravna1 na mrežu su pokazala da kvaliteta napona lokalne distribucijske mreže u potpunosti zadovoljava europsku normu EN 50160 te da nema potencijalnih problema u konfiguraciji mreže koji bi mogli bitnije narušiti kvalitetu električne energije nakon priključka mVE Ravna1.

5. ANALIZA REZULTATA MJERENJA KVALITETE ELEKTRIČNE ENERGIJE NAKON PRIKLJUČKA MALE VETROELEKTRANE RAVNA1

Mjerenja kvalitete električne energije nakon priključka male vjetroeletkrane Ravna1 obavljena su u veljači, ožujku i travnju 2005. godine. U sklopu ovih mjerenja su povedena trajna sedmodnevna mjerenja kvalitete napona u skladu s europskom normom EN 50160 istodobno na dvije mjerne točke: 10 kV odvod Transformator1 u TS Pag (M1) i mjesto predaje električne energije iz mVE Ravna1 (M3). Mjerenja kvalitete napona su provedena u vremenu od 24.02.2005. do 03.03.2005. Osim mjerenja kvalitete napona provedena su još mjerenja viših harmonika struje, ispitivanja sklapanja vjetroturbine Vestas V52 te simulacija otočnog pogona mVE Ravna s dijelom distribucijske mreže. Mjerenja su obavljena instrumentima Memobox 808 tvrtke Lem i PP 4300 tvrtke Dranetz.

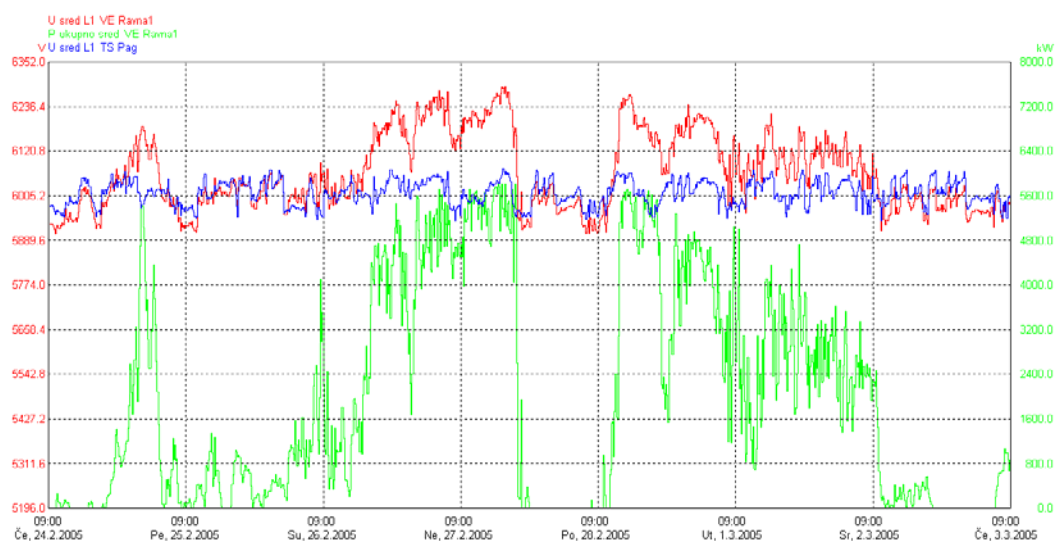


Slika 13. Rezultati mjerenja kvalitete napona u skladu s EN 50160 na 10 kV odvodu Transformator1 (M1) u TS Pag

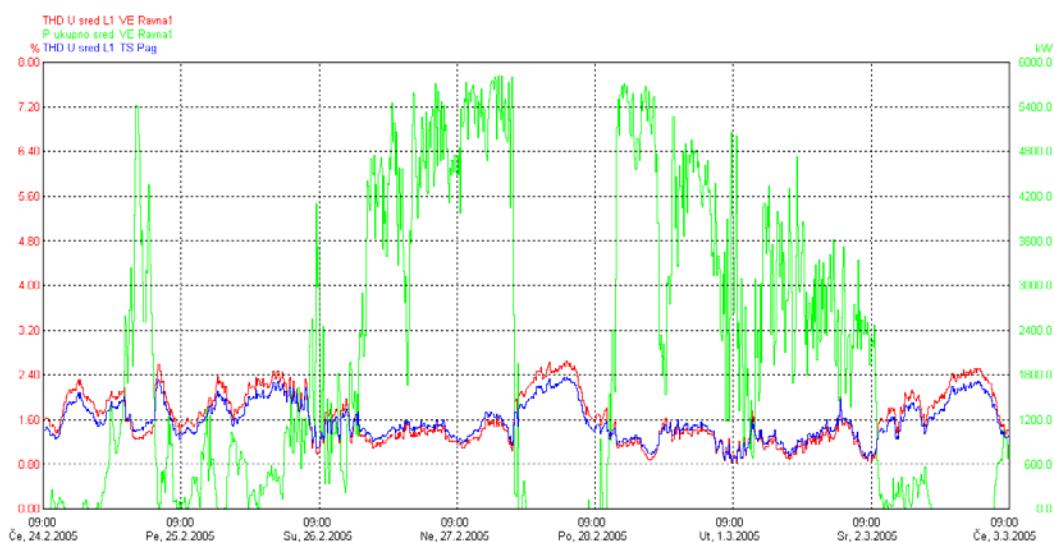


Slika 14. Rezultati mjerenja kvalitete napona u skladu s EN 50160 na mjestu predaje električne energije iz mVE Ravna1 (M3)

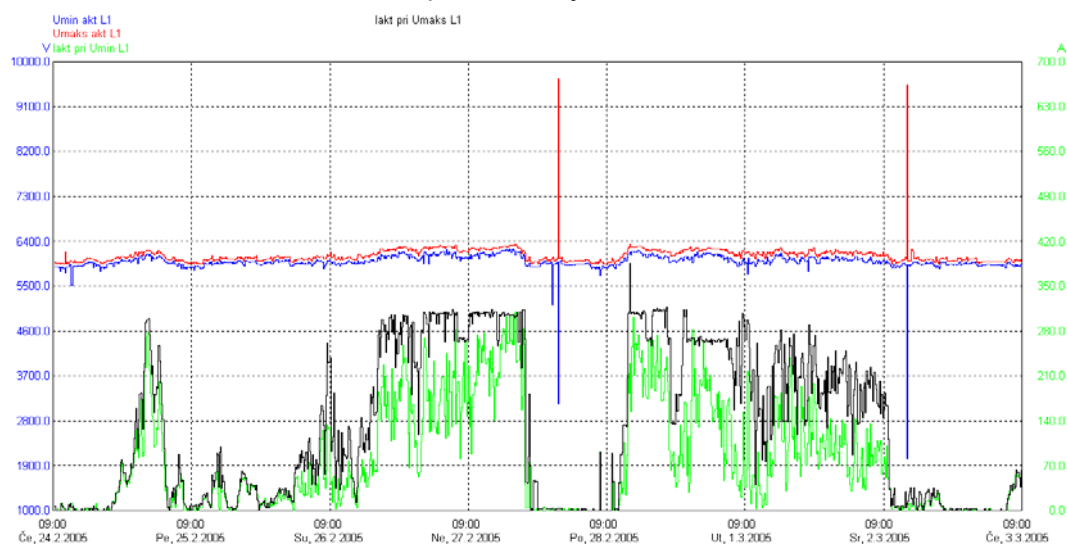
Na slikama 13. i 14. su dani rezultati mjerenja kvalitete napona nakon priključka mVE Ravna1. Na mjestu predaje električne energije iz mVE Ravna1 (M3) su izražena kolebanja napona što je posljedica pogona vjetroelektrane Ravna1. Apsolutni iznos napona na mjestu predaje električne energije iz mVE Ravna1 je veći u slučaju relativno velike proizvodnje (0.5 Pn i više). Tada je konzum lokalne distribucijske mreže manji od proizvodnje iz vjetroelektrane Ravna1 (slika 15.). Iznosi flikera su podjednaki u obje mjerne točke. Jakost flikera se u 95% vremena nalazila u granicama 0.2-0.4 pa se može reći da nije izražena. Zabilježeno je nekoliko propada napona i prenapona koji su u manje od 5% vremena uzrokovali visoke vrijednosti flikera (slika 17.). Ovi prenaponi i propadi su posljedica posolice (slika 18.). Za vrijeme relativno velike proizvodnje (0.5 Pn i više) iz mVE Ravna1 razina ukupnog harmoničkog izobličenja napona u cijeloj distribucijskoj mreži se smanjuje (slika 16.). Tada je ukupno harmoničko izobličenje napona na mjestu predaje električne energije iz mVE Ravna1 manje od ukupnog harmoničkog izobličenja napona u TS Pag 110/10 kV. Kada je vjetroelektrana van pogona ukupno harmoničko izobličenje napona u cijeloj distribucijskoj mreži je veće i tada je ukupno harmoničko izobličenje napona u TS Pag 110/10 kV manje od ukupnog harmoničkog izobličenja napona na mjestu predaje električne energije iz mVE Ravna1. Najizraženiji je peti harmonik napona. Međutim treba reći da su sve vrijednosti napona na 10 kV odvodu Transformator1 (M1) u TS Pag 110/10 kV i na mjestu predaje električne energije (M3) iz mVE Ravna1 unutar dozvoljenih granica propisanih normom EN 50160.



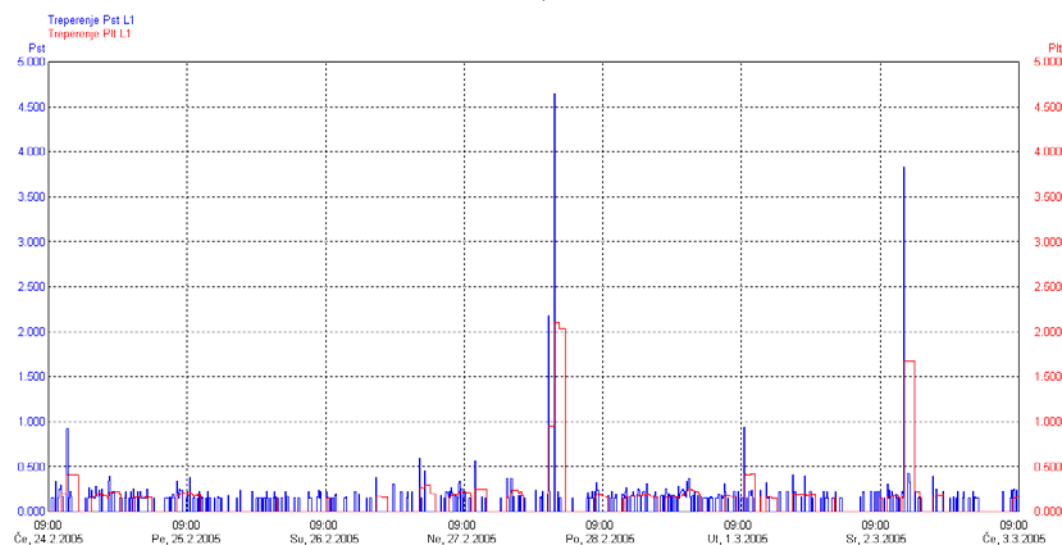
Slika 15. Usporedba iznosa faznih napona na 10 kV sabirnicama (10-minutni prosjeci) u TS Pag (M1) i na mjestu predaje električne energije iz mVE Ravna1 (M3) u ovisnosti o proizvedenoj snazi



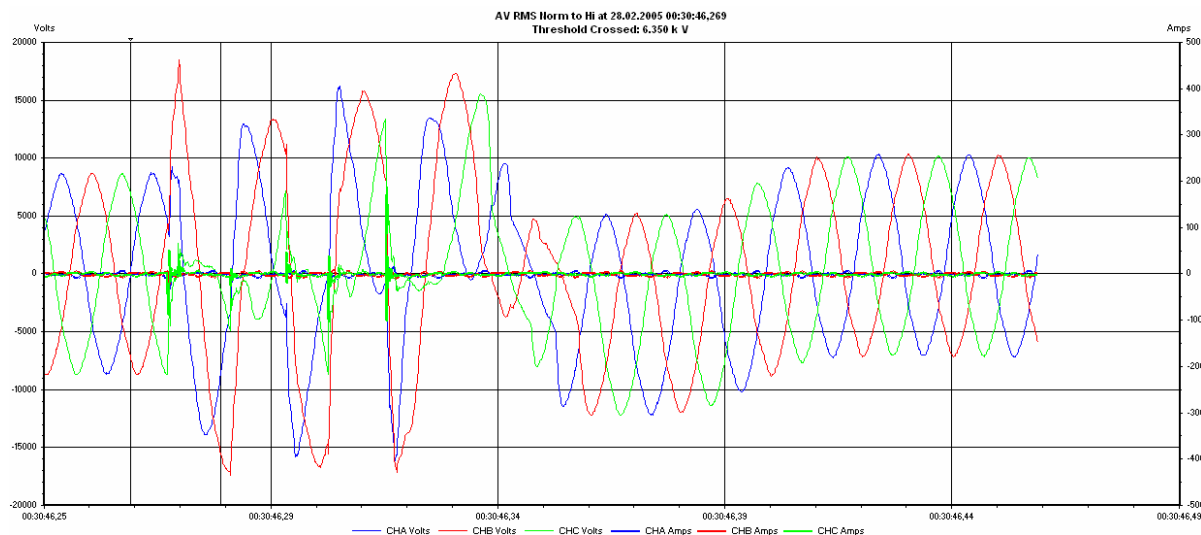
Slika 16. Usporedba iznosa totalnog harmoničkog izobličenja napona (10-minutni prosjeci) na 10 kV sabirnicama u TS Pag (M1) i na mjestu predaje električne energije iz mVE Ravna1 (M3) u ovisnosti o proizvedenoj snazi



a)

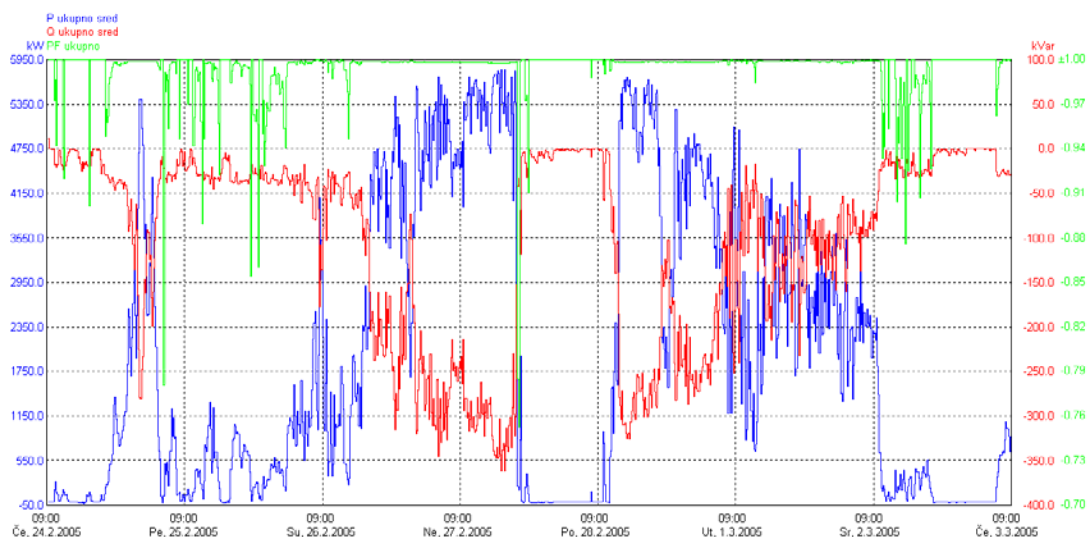


Slika 17. a) b) Analiza rezultata mjerenja flikera na mjestu predaje električne energije iz mVE Ravna1 (M3)



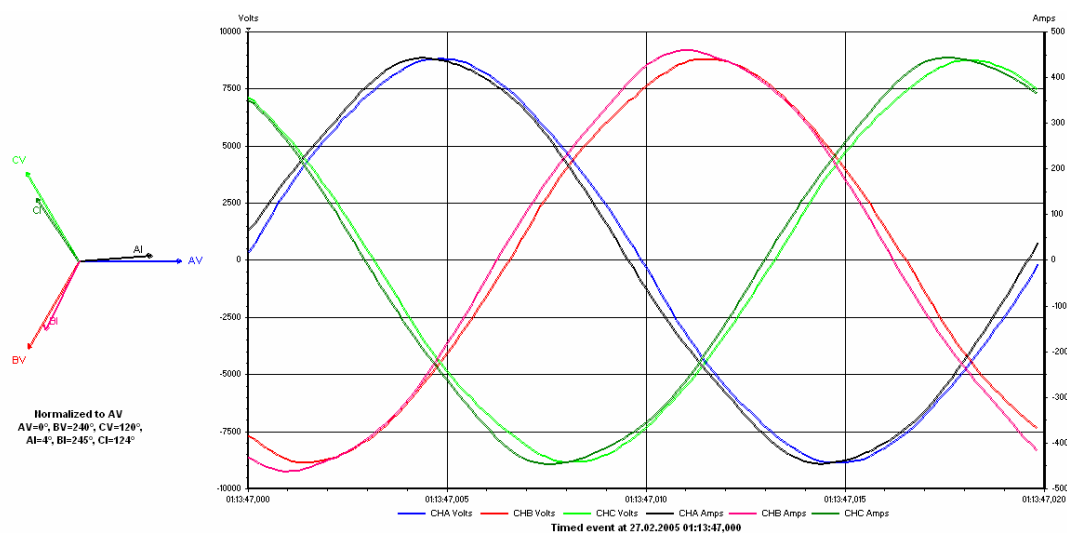
Slika 18. Valni oblici struja i napona za vrijeme zemljospoja uzrokovanog posolicom na mjestu predaje električne energije iz mVE Ravna1 (M3)

Na slici 19. je dana usporedba ukupne radne, ukupne jalove snage te faktora snage na mjestu predaje električne energije mVE Ravna1 (M3). Iz navedene slike se vidi da vjetroelektrana Ravna1 uzima jalovu snagu iz mreže. Pri relativno maloj proizvodnji (do 20 % P_n) faktor snage iznosi ispod -0,95. Porastom proizvodnje raste i ukupna jalova snaga međutim tada faktor snage iznosi 1.

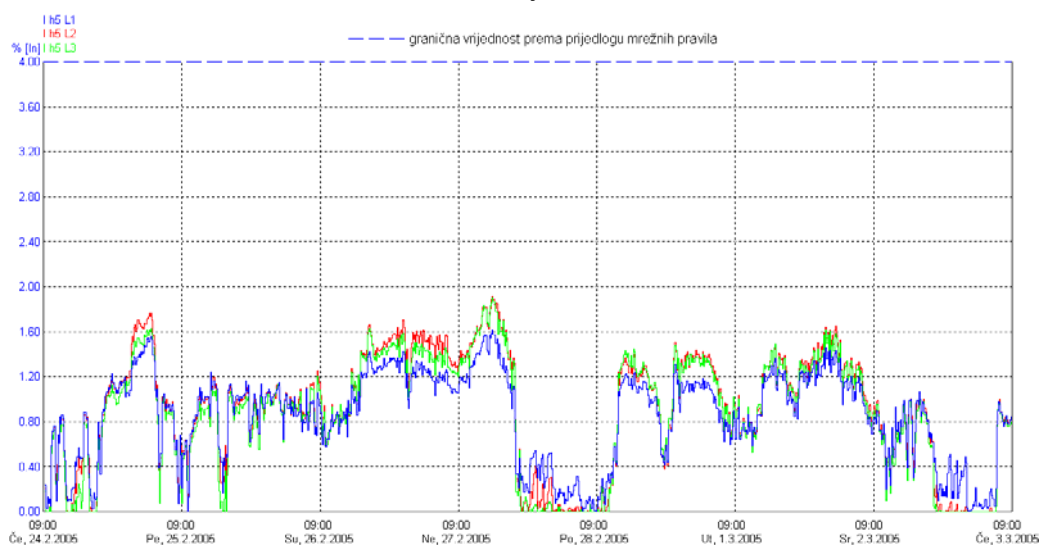


Slika 19. Ukupna radna i jalova snaga te faktor snage (10-minutni prosjeci) na mjestu predaje električne energije iz mVE Ravna1 (M3)

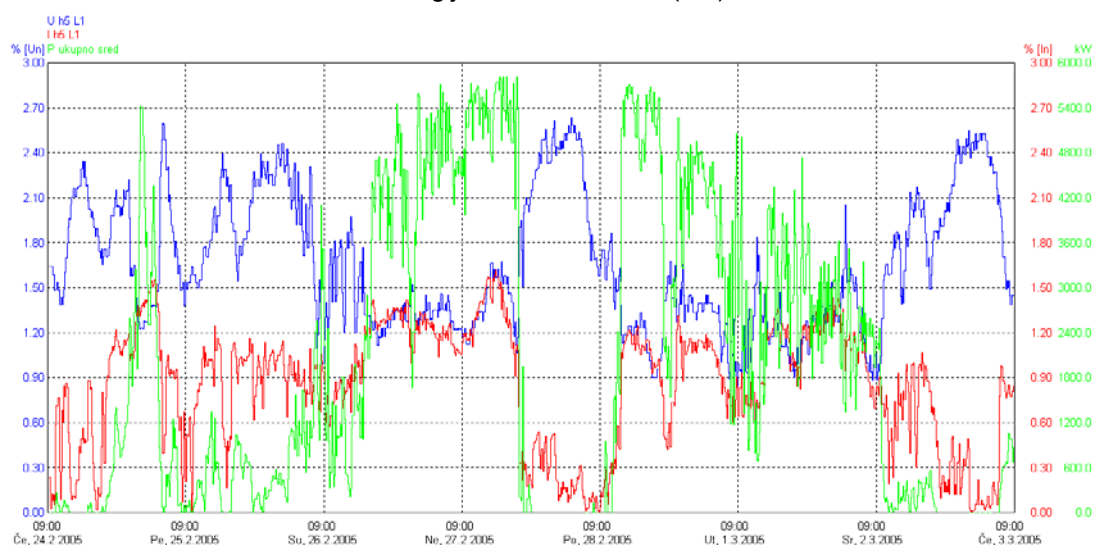
Rad energetskog pretvarača u krugu rotora vjetroturbine izaziva injektiranje viših harmoničkih članova struje u mrežu. Najizraženiji je peti harmonik struje čiji maksimalni iznos iznosi oko 2% od nazivne struje male vjetroelektrane Ravna1 (slika 21.). Maksimalni iznosi svih viših harmonika struje na mjestu predaje električne energije iz mVE Ravna su manji od graničnih vrijednosti danih u prijedlogu mrežnih pravila. Slika 22. daje usporedbu 10-minutnih prosjeka vrijednosti petog harmonika struje i napona (u postocima nazivnih vrijednosti struje i napona) te ukupne snage na mjestu predaje električne energije mVE Ravna1 (M3). Iz navedene slike se vidi da se pri relativno velikoj proizvodnji (50 % P_n i više) smanjuje iznos petog harmonika napona usprkos blagom povećanju iznosa struje petog harmonika te su tada postotne vrijednosti petog harmonika struje i napona gotovo jednake. Najveći iznosi petog harmonika napona se pojavljuju kada vjetroelektrana nije u pogonu. Mjerenja viših harmoničkih članova struje su pokazala da rad male vjetroelektrane Ravna1 nema negativni utjecaj na iznos harmoničkog izobličenja napona na mjestu predaje električne energije (slika 20.).



Slika 20. Tipični valni oblici struja i napona na mjestu predaje električne energije iz mVE Ravna1 (M3) pri nazivnoj snazi



Slika 21. Rezultat mjerenja 5-tog harmonika struje (10-minutni prosjeci) na mjestu predaje električne energije iz mVE Ravna1 (M3)

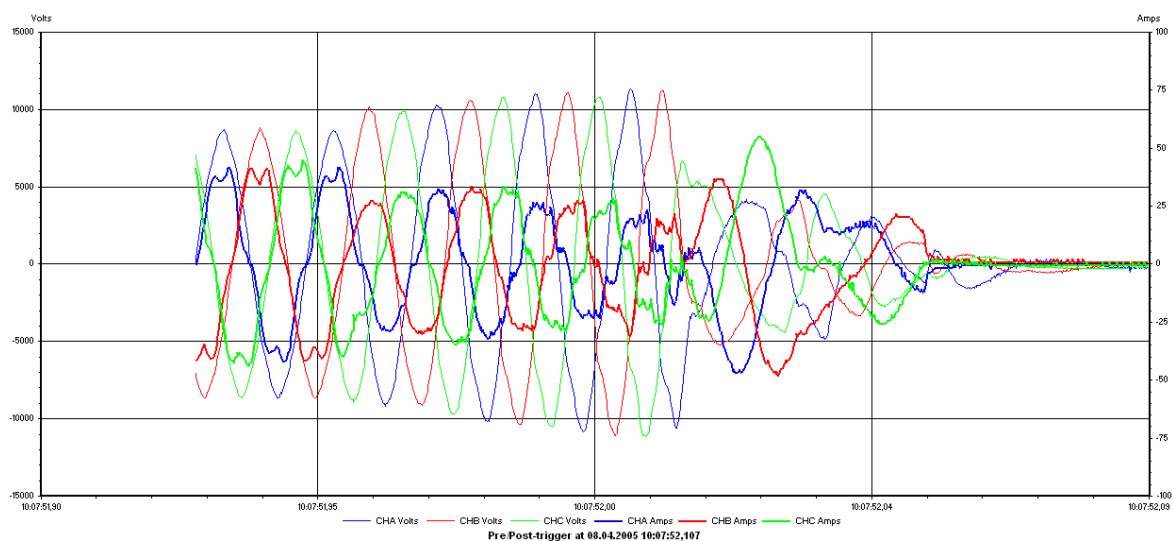


Slika 22. Usporedba 5-tog harmonika struje i napona u fazi L1 i ukupne snage (10-minutni prosjeci) na mjestu predaje električne energije iz mVE Ravna1 (M3)

Na slici 23. su dani oscilogrami struja i napona na mjestu predaje električne energije mVE Ravna1 (M3) pri isključenju prekidača na priključnom vodu za Pag-plastiku u RS Pag 10 kV. Prilikom ovih isklopa je provjeravana mogućnost otočnog rada vjetroelektrane Ravna1. Ova vjetroelektrana nema P-f regulaciju potrebnu za otočni rad te su moguća dva scenarija nakon isklopa prekidača:

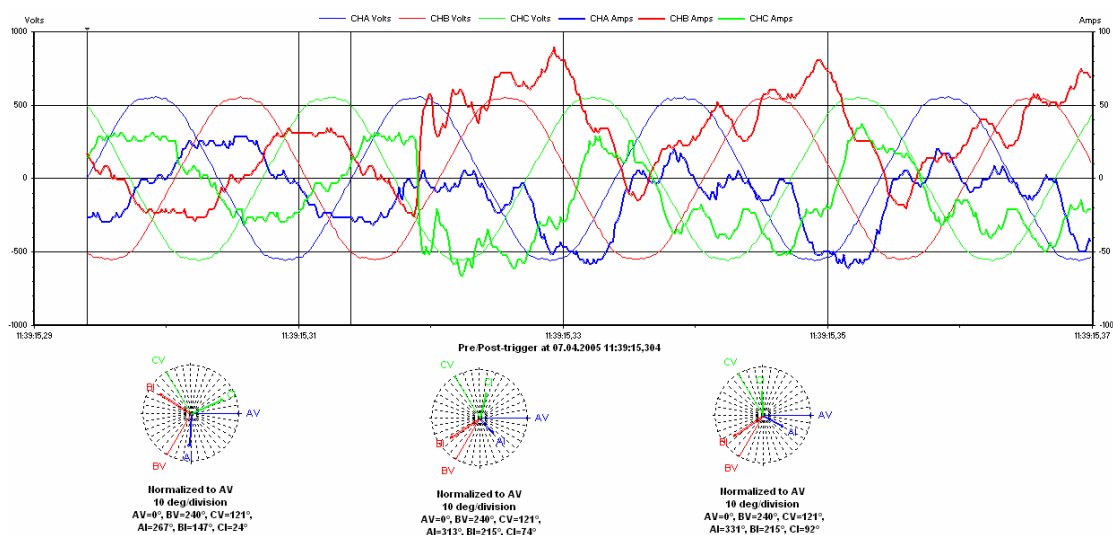
1. Trenutna izlazna snaga vjetroelektrane je veća od preostalog konzuma (Pag-plastika, Solana Pag, odašiljač) – nakon isklopa dolazi do povišenja iznosa napona i frekvencije uslijed ubrzavanja rotora vjetroturbina
2. Trenutna izlazna snaga vjetroelektrane je manja od preostalog konzuma – nakon isklopa dolazi do smanjenja iznosa napona i frekvencije uslijed usporavanja rotora vjetroturbine.

Iz navedenog proizlazi da nije moguće ostvariti otočni pogon vjetroelektrane Ravna1. Iz slike je vidljivo da je trenutni konzum bio manji od izlazne snage vjetroelektrane Ravna1 pa je došlo do povišenja napona i ubrzavanja rotora vjetroturbina. Nakon toga djelovanjem zaštite vjetroturbina je došlo do zaustavljanja pogona i isklopa prekidača u TS1 mVE Ravna1.

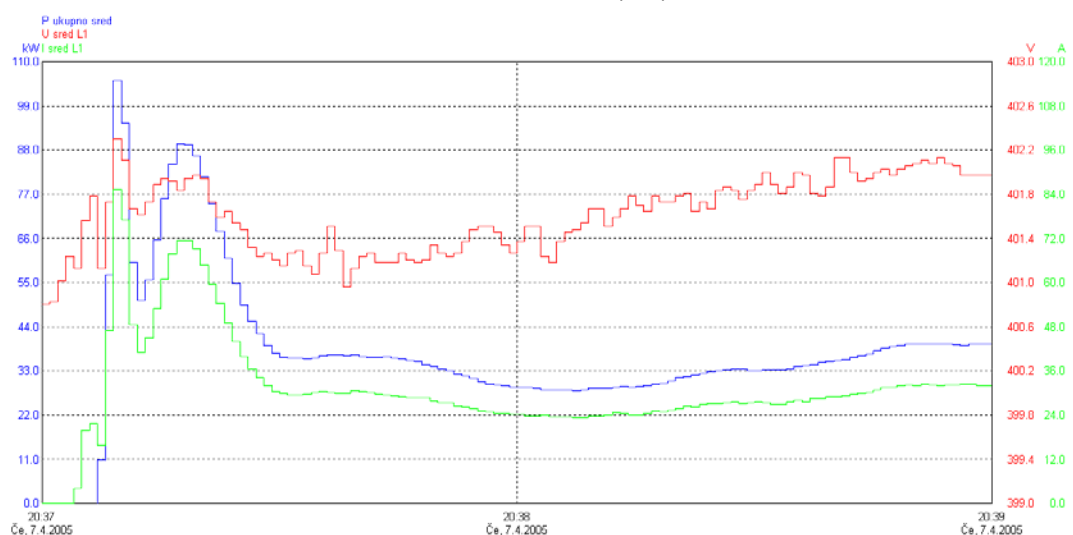


Slika 23. Valni oblici struja i napona u trenutku uspostave otočnog pogona mVE Ravna1 na mjestu predaje električne energije iz mVE Ravna1 (M3)

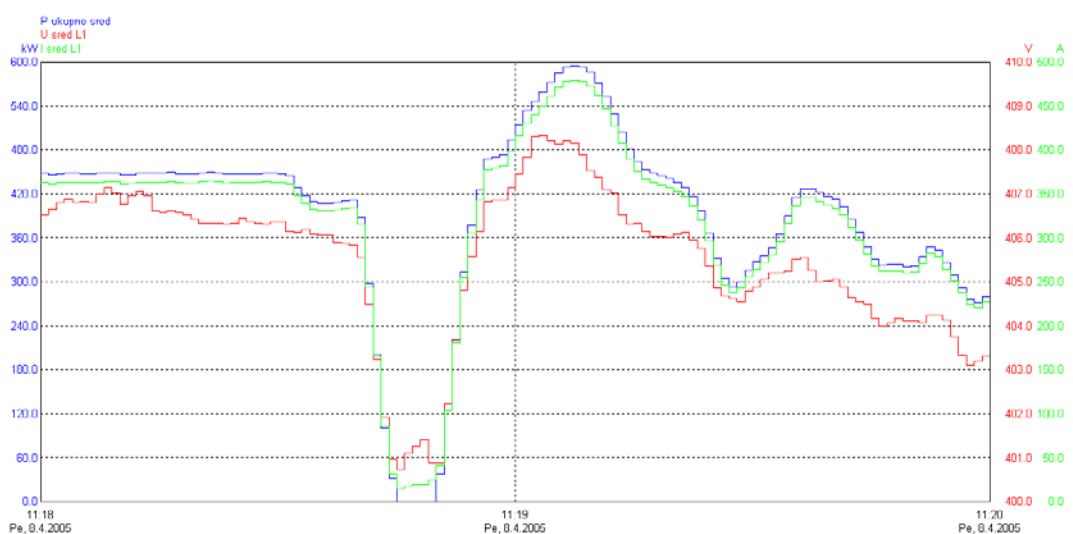
U sklopu provedenih mjerenja su obavljena i mjerenja struja i napona na vjetroturbini Vestas V52 pri različitim sklopnim operacijama. Mjerenja su obavljena visokonaponskoj strani vjetroturbine (M4) kao i na niskonaponskoj strani (M5) pri sklapanju pri ulaznoj brzini vjetra (slika 25.), pri sklapanju generatora zvijezda-trokut (slika 26.), pri sklapanju pri nazivnoj brzini vjetra (slika 27.) te pri zaustavljanju pogona na nazivnoj snazi vjetroturbine (slika 28.). Na slici 24. su dani valni oblici struja i napona s fazorskim dijagramima pri uklopu vjetroturbine Vestas V52. Mjerenja su pokazala da prilikom ovih sklapanja ne dolazi do skokovite promjene struje i napona u čvorištu priključenja vjetroturbine.



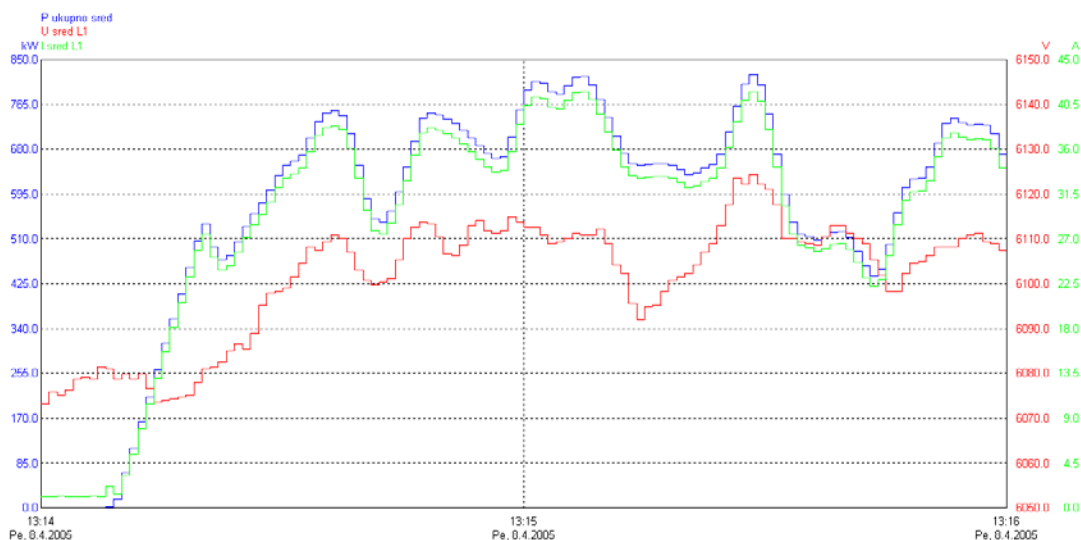
Slika 24. Valni oblici struja i napona s fazorskim dijagramima pri uklopu vjetroturbine Vestas V52 na 0.69 kV strani (M5)



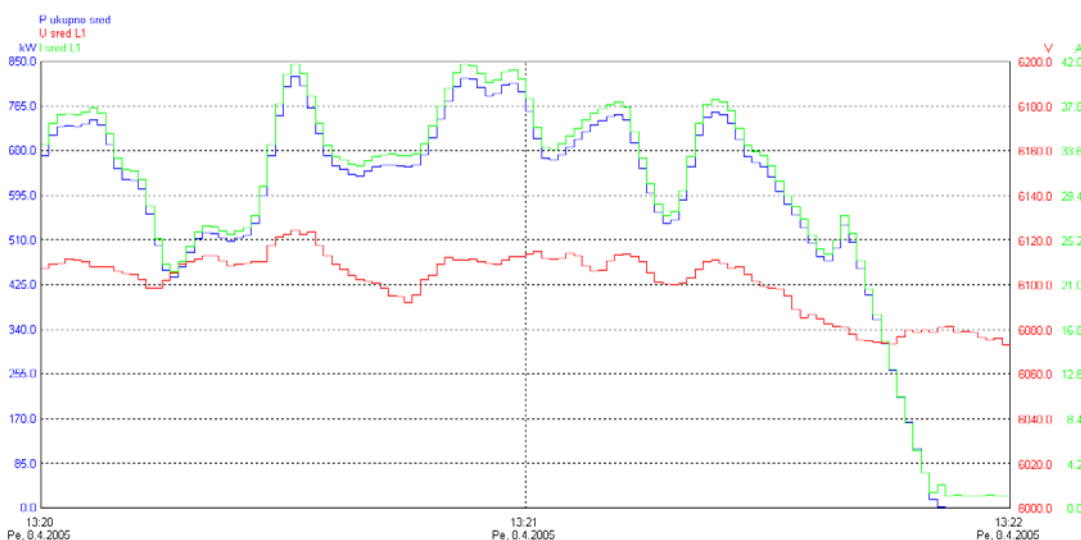
Slika 25. Iznosi ukupne radne snage, napona i struje (1-sekundne vrijednosti) pri sklapanju vjetroturbine Vestas V52 pri ulaznoj brzini vjetra na 0.69 kV strani (M5)



Slika 26. Iznosi ukupne radne snage, napona i struje (1-sekundne vrijednosti) pri sklapanju zvijezda-trokut vjetroturbine Vestas V52 na 0.69 kV strani (M5)



Slika 27. Iznosi ukupne radne snage, napona i struje (1-sekundne vrijednosti) pri sklapanju vjetroturbine Vestas V52 pri nazivnoj brzini vjetra na 10 kV strani (M4)



Slika 28. Iznosi ukupne radne snage, napona i struje (1-sekundne vrijednosti) pri zaustavljanju vjetroturbine Vestas V52 pri nazivnoj snazi na 10 kV strani (M4)

Provedena mjerenja kvalitete električne energije nakon priključka male vjetroelektrane Ravna1 su pokazala da rad male vjetroelektrane bitnije ne mijenja kvalitetu napona lokalne distribucijske mreže te da su i dalje zadovoljeni svi parametri napona u skladu s europskom normom EN 50160.

6. ZAKLJUČAK

U posljednja dva desetljeća broj instaliranih vjetroturbina u svijetu se drastično povećao. Ovakav velik iskorak na području korištenja energije vjetra je nastao uslijed velikog napretka u tehnologiji vjetroturbina, što je izravno utjecalo na smanjenje cijena vjetroturbina, kao i u povećanom interesu za korištenje energije vjetra kao važnog izvora energije u budućnosti.

Slijedeći svjetske trendove u Hrvatskoj je izgrađena prva vjetroelektrana na otoku Pagu - mala vjetroelektrana Ravna1. Glavno pitanje prije njene izgradnje je bila mogućnost priključka vjetroelektrane Ravna1 na mrežu te kako njezin rad utječe na naponske prilike u mreži. U tu svrhu su provedena mjerenja kvalitete električne energije prije priključka i nakon priključka mVE Ravna1.

Mjerenja kvalitete električne energije prije priključka male vjetroelektrane Ravna1 su obavljena u srpnju 2004. godine. U sklopu tih mjerenja su provedena dva sedmodnevna monitoringa kvalitete napona prema europskoj normi EN 50160 na 10 kV odvodu Transformator1 u TS Pag 110/10 kV (koji predstavlja

pojnu točku lokalne distribucijske mreže) i na 10 kV odvodu Pag-plastika u RS Pag 10 kV (radijalni krak na čijem je kraju priključena mVE Ravna1). Osim toga provedena su i kratkotrajna snimanja viših harmonika struja na važnijim odvodima u TS Pag i RS Pag. Mjerenja kvalitete električne energije prije priključka mVE Ravna1 na mrežu su pokazala da kvaliteta napona lokalne distribucijske mreže u potpunosti zadovoljava europsku normu EN 50160 te da nema potencijalnih problema u konfiguraciji mreže koji bi mogli bitnije narušiti kvalitetu električne energije nakon priključka mVE Ravna1.

Mjerenja kvalitete električne energije nakon priključka mVE Ravna1 su provedena u veljači, ožujku i travnju 2005. godine. U sklopu tih mjerenja su obavljena dva istovremena monitoringa kvalitete napona prema europskoj normi EN 50160 na 10 kV odvodu Transformator1 u TS Pag 110/10 kV i na mjestu predaje električne energije iz mVE Ravna1. Osim toga provedena su ispitivanja sklapanja vjetroturbine Vestas V52 kao i simulacija otočnog pogona mVE Ravna1 s dijelom distribucijske mreže otoka Paga. Mjerenja kvalitete napona su pokazala da rad mVE Ravna1 ima najviše utjecaja na promjene iznosa napona (povećanje) na mjestu predaje električne energije kao posljedice injektiranja snage u mrežu. Rad mVE Ravna1 nema negativan utjecaj na iznose izobličenja napona i flikera u lokalnoj distribucijskoj mreži. Mjerenja na vjetroturbini Vestas V52 su pokazala da sklapanja vjetroturbine nemaju bitan utjecaj na iznos napona u čvorištu priključenja. Simulacijom otočnog pogona je ustanovljeno da otočni pogon mVE Ravna1 s dijelom distribucijske mreže praktički nije ostvariv. Bez obzira na pogon vjetroelektrane Ravna1 kvaliteta napona lokalne distribucijske mreže zadovoljava sve uvjete iz europske norme EN 50160.

LITERATURA

- [1] IEC 61000-4-30 Ed 1.0 (2003): "Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods"
- [2] IEC 61000-4-15: "Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4: Testing and measurement techniques - Section 15: Flickermeter - Functional and design specifications"
- [3] IEC 61400-21: "Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines"
- [4] EN 50160:1999: "Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems", CENELEC, 1999
- [5] IEC 61000-3-6 Ed 1.0 (1996): "Electromagnetic compatibility (EMC), Part 3: Limits, Section 6: Assessment of emission limits for distorting loads in MV and HV power systems – Basic EMC publication",
- [6] IEC 61000-3-7 Ed 1.0 (1996): "Electromagnetic compatibility (EMC)- Part 3: Limits – Section 7: Assessment of emission limits for fluctuating loads in MV and HV power system – Basic EMC publication"
- [7] IEEE 519-1992: "Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems "
- [8] G. Šagovac, I. Klarić: "Razmatranje kvalitete električne energije u distribucijskim mrežama", 5. Simpozij o elektrodistribucijskoj djelatnosti HO CIGRE, Travanj 25-28, 2004, Zadar, Hrvatska
- [9] M. Lasić, J. Šimić, S. Gros: "Power Quality on the island Pag before connection of the Ravno small wind park", EDPE2005, September 26-29, 2005, Dubrovnik, Croatia
- [10] I. Mužić, M. Lasić, I. Tomšić: "Razvoj vjetroelektrana u EU i njihov utjecaj na mrežu", 7.Savjetovanje HO CIGRE, Studeni 07-10, 2005, Cavtat, Hrvatska
- [11] J. Šimić, S. Gros, M. Lasić: "Harmonici u niskonaponskim i srednjenaponskim mrežama", 7.Savjetovanje HO CIGRE, Studeni 07-10, 2005, Cavtat, Hrvatska