

FACTS KOMPENZACIJA JALOVE SNAGE VJETROELEKTRANE

Dr. sc. Nijaz Dizdarević – dr. sc. Mislav Majstrovic – dr. sc. Srđan Žutobradić, Zagreb

UDK 621.3.016.25:621.311.24
IZVORNI ZNANSTVENI ČLANAK

U ovom je radu predstavljen problem FACTS regulacije napona i kompenzacije jalove snage u distribucijskoj mreži s priključenom vjetroelektranom. Vjetroelektrana je u izvedbi sa stalnom brzinom i konstantnom frekvencijom uz korištenje asinkronog generatora pogonjenog nereguliranom vjetroturbinom. Problem je razmatran s obzirom na kratkotrajni (10 sekundi), srednjotrajni (10 minuta) i dugotrajni (48 sati) vremenski period odziva varijabli sustava na različite promjene brzine vjetra. S obzirom na promjenjivu brzinu vjetra, vjetroelektrana injektira promjenjivi iznos djelatne i jalove snage u distribucijsku mrežu te time izlaže obližnje potrošače značajnim promjenama iznosa napona. U konvencionalnom pristupu rješavanja problema korištene su poprečne kondenzatorske baterije smještene u čvorištu asinkronog generatora. U FACTS pristupu korišten je "objedinjeni regulator tokova snaga" (eng. *Unified Power Flow Controller, UPFC*) koji je smješten u točki priključenja vjetroelektrane na distribucijsku mrežu. Korištenje FACTS naprave predstavlja pokušaj rješavanja tehničkih pitanja vezanih uz regulaciju napona u čvorištu priključenja vjetroelektrane te uz minimiziranje razmjene jalove snage vjetroelektrane s distribucijskom mrežom.

Ključne riječi: vjetroelektrana, FACTS, UPFC, regulacija napona, kompenzacija jalove snage.

1. UVODNA RAZMATRANJA

Odnedavno se kao posljedica snažne ekološke svijesti u gotovo svim industrijskim granama javljaju alternativna rješenja distribuirane proizvodnje električne energije [1] – [3]. Štoviše, javljaju se i inicijative potencijalnih investitora koje dolaze s liberalizacijom tržišta električne energije. Navedene tendencije stvaraju potrebu osmišljavanja i provođenja novih oblika tehničke analize mreža i sustava [4] – [5]. Priključenje obnovljivih izvora na električnu mrežu poprima sve veće značenje s povećanjem zanimanja za njihovom izgradnjom [6] – [7]. Sa stajališta distribucijske mreže, priključenje malih disperziranih proizvodnih jedinica zahtijeva veliku pozornost [8]. U slučaju povećane veličine izgradnje, disperzirane proizvodne jedinice mogu biti priključene i na prijenosnu mrežu.

Distribuirana proizvodnja električne energije postala je čestim predmetom polariziranih tehničkih diskusija. S jedne se strane nalaze inženjeri motivirani iskustvenim spoznajama o složenosti pogona ees-a koji iskazuju zabrinutost u pogledu elementarne ostvarivosti masovnog uvođenja nereguliranih i neupravljivih generatora u distribucijsku mrežu. S druge se pak strane nalaze entuzijastični zagovarači izvora obnovljive energije poput vjetroelektrana i kombi-elektrana koji vjeruju da takve proizvodne jedinice nužno treba uvoditi u pogon kako bi se ispunili domaći i međunarodni zahtjevi za smanjenjem emisije CO₂. Štoviše, obnovljivi izvori povećavaju samoodrživost ees-a u slučajevima

eventualne energetske krize u proizvodnji električne energije koja je danas ovisna o isporuci ugljena, plina i nafte.

Povećana penetracija obnovljivih izvora poput vjetroelektrana stvara komponentu neupravljivosti u ees-u. Na temelju vremenske prognoze moguće je predvidjeti srednju brzinu vjetra u kratkoročnom periodu, ali ne i dinamičke promjene manjeg ili većeg iznosa koje se javljaju oko srednje brzine. Dinamičke promjene brzine vjetra čine snagu koju vjetroelektrana injektira u mrežu vrlo promjenjivom. U ovisnosti o intenzitetu i brzini promjena, moguća je pojava poteškoća s regulacijom frekvencije i napona što izravno utječe na kvalitetu isporučene električne energije. Uvjeti ekonomičnosti zahtijevaju izgradnju vjetroelektrana u područjima visoke iskoristivosti vjetra. Takva su područja često locirana u ruralnim predjelima s relativno slabim elektroenergetskim mrežama. Kako bi se uspostavila ravnoteža između polariziranih stavova nužno je prije toga odgovoriti na pitanja tehničke, ekonomske i sigurnosne naravi koja su vezana uz priključenje vjetroelektrana na elektroenergetsku mrežu.

U tom je pogledu za cilj ovog rada postavljeno stvaranje protumjera pomoću kojih bi se uklonile prevelike promjene iznosa napona u obližnjim čvorištima potrošnje te minimizirala razmjena jalove snage između vjetroelektrane i distribucijske mreže. Bez protumjera moguće je da na izvjesnim lokacijama izgradnje vjetroelektrana dođe do ograničenja broja priključenih vjetroturbina. Veći broj vjetroturbina ne bi bilo moguće priključiti na mrežu zbog pogoršanih naponskih

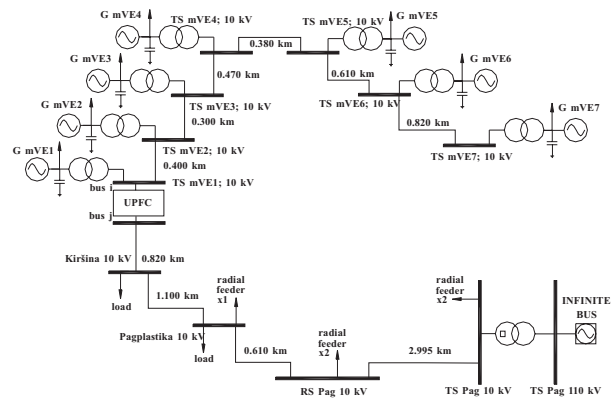
prilika te povećanih gubitaka snage i energije u obližnjoj mreži. Time ne samo da bi energetska potencijal vjetra na lokaciji izgradnje ostao neiskorišten, već bi zbog ograničenja broja vjetroelektrana bila ugrožena i ekonomska isplativost cijelog projekta.

U pokušaju prevladavanja negativnog dinamičkog utjecaja koji stvaraju promjene brzine vjetra, problemu regulacije napona i kompenzacije jalove snage pristupa se ne samo s konvencionalnog stajališta već i s obzirom na FACTS naprave. Asinkroni generator u vjetroelektrani predstavlja potrošač jalove snage. Potrošnja njegove jalove snage ovisi o proizvodnji djelatne snage. U konvencionalnom pogledu, poprečne kondenzatorske baterije priključuju se u generatorskom čvorištu radi kompenzacije jalove snage generatora. U nekim se shemama poprečne kondenzatorske baterije automatski uklapaju/isklapaju korištenjem povratne veze po jalovoj snazi asinkronog generatora. Promjena sklopnog stanja baterije inicira se putem algoritma i to ukoliko jalova snaga asinkronog generatora odstupa od prethodno zadanog raspona tijekom određenog vremena. Nadalje, kontinuirana regulacija napona i kompenzacija jalove snage u točki priključenja vjetroelektrane na mrežu izvodi se korištenjem FACTS naprave. Među FACTS napravama odabran je objedinjeni regulator tokova snaga (*eng. Unified Power Flow Controller, UPFC*) zbog najznačajnijih regulacijskih sposobnosti [9]. UPFC se sastoji od poprečne i serijske grane koje je moguće koristiti naizmjenično i istodobno. Ukoliko je UPFC lociran u točki priključenja vjetroelektrane na distribucijsku mrežu moguće je istodobno upravljati iznosom napona vjetroelektrane i/ili serijskim tokom jalove snage koju vjetroelektrana razmjenjuje s distribucijskom mrežom. Očekuje se da bi ova protumjera mogla značajno pridonijeti kvaliteti lokacije izgradnje vjetroelektrane istodobno povećavajući broj vjetroelektrana.

2. MODEL SUSTAVA

Poboljšanje regulacije napona i kompenzacije jalove snage korištenjem UPFC-a u točki priključenja male vjetroelektrane (7x800 kW) postavljeno je u ovom članku kao temeljni cilj. Vjetroelektrana je priključena na 10 kV distribucijsku mrežu (78 čvorišta, 77 elemenata) bez drugih proizvodnih jedinica osim one u glavnoj pojnoj točki koja predstavlja krutu 110 kV mrežu (slika 1). Pretpostavljeno je da je vjetroelektrana u izvedbi sa stalnom brzinom i konstantnom frekvencijom u kojoj je asinkroni generator pogonjen nereguliranom vjetroelektrinom [8]. Ukoliko se takva vjetroelektrana priključi na naponski slabu mrežu, brze i velike promjene koje se događaju oko srednje brzine vjetra mogu uzrokovati prevelike promjene napona u obližnjim čvorištima tevelike zbog fluktuacija injektirane snage vjetroelektrane. UPFC je lociran u točki priključenja vjetroelektrane na mrežu. Distribucijska mreža je

putem LTC transformatora priključena na 110 kV prijenosnu mrežu. Osnovni skup parametara sustava nalazi se u Dodatku, a detaljni u [8].



Slika 1. Distribucijska mreža s vjetroelektranom i FACTS napravom

3. MATEMATIČKI MODEL VJETROELEKTRANE I FACTS NAPRAVE

Utjecaj UPFC-a na regulaciju napona i kompenzaciju jalove snage vjetroelektrane istražen je korištenjem vlastitog računalnog programa utemeljenog na kombiniranom dinamičkom i statičkom modelu ees-a [8] – [9]. U vremenskoj je domeni postavljen skup diferencijalnih i algebarskih jednadžbi. Diferencijalne jednadžbe koriste se za simuliranje vladanja asinkronog generatora vjetroelektrane te generatora krute mreže u prijelaznim stanjima. Algebarske jednadžbe nužne su za proračun napona čvorišta po iznosu i kutu u okviru analize tokova snaga. Rješavanje diferencijalnih jednadžbi korištenjem Runge-Kutta metode 4. reda sekvencijalno je praćeno rješavanjem algebarskih jednadžbi korištenjem Newtonove i Gaussove metode. Broj diferencijalnih jednadžbi, koji ovisi o broju vjetroelektrana, definiran je s 5 jednadžbi po svakom asinkronom generatoru. Broj algebarskih jednadžbi ovisi o broju čvorišta u mreži, što za mrežu s približno 80 čvorišta čini 160 jednadžbi (80 za iznose napona i 80 za kutove napona). Osim algebarskih jednadžbi tokova snaga u modelu postoji veći broj ostalih algebarskih jednadžbi koje su vezane uz npr. promjenu brzine vjetra (linearna, udarna, šumna) i vjetroelektrane. Osnovne diferencijalne jednadžbe koje opisuju tranzijentni model asinkronog generatora, odnosno dvomasenu osovinu koja je sastavljena od dva rotora spojena putem mjenjačke kutije [10] glase

$$\frac{dE'_q}{dt} = \omega_s - \omega_m E'_d - \frac{E'_q}{T'_0} - \frac{X - X'}{T'_0} I_d, \quad (1)$$

$$\frac{dE'_d}{dt} = \omega_s - \omega_m E'_q - \frac{E'_d}{T'_0} - \frac{X - X'}{T'_0} I_q, \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{c}{T} - \frac{m}{n} \right), \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{P_w(V_w) \frac{1}{S_{ngen}} - c_c - (D_c - D_T) \frac{D_c}{n}}{2H_T} m, \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\frac{C_c}{n} - \frac{D_c}{n} - D_m \frac{D_c D_g}{n^2} - T_e}{2 H_m \frac{H_g}{n^2}}, \quad (5)$$

$$T_e = (E'_d I_d - E'_q I_q) / \omega_s \quad (6)$$

u kojima je Θ_c kut torzije osovine između rotora vjetroturbine i rotora asinkronog generatora (rad_c), ω_T , ω_m brzina vrtnje rotora vjetroturbine i generatora (pu, u stacionarnom stanju vrijedi $\omega_T = \omega_m/n$), P_w aerodinamička snaga (W), V_w brzina vjetra (m/s), S_{ngen} nazivna snaga generatora (VA), c_c koeficijent torzijske krutosti (pu/rad_c), D_c torzijsko prigušenje spoja između rotora vjetroturbine i generatora (pu/pu), D_T prigušenje vjetroturbine (pu/pu), D_g prigušenje mjenjačke kutije (pu/pu), D_m prigušenje generatora (pu/pu), H_T tromost vjetroturbine (s), H_g tromost mjenjačke kutije (s) i H_m tromost generatora (s).

Numerička analiza osjetljivosti injektirane snage vjetroelettrane s obzirom na promjenu brzine vjetra u ovom je članku najprije provedena korištenjem kompozitne brzine vjetra

$$V_w = V_{wB} + V_{wR} + V_{wG} + V_{wN}, \quad (7)$$

pri čemu V_{wB} predstavlja osnovnu, V_{wR} linearnu, V_{wG} udarnu i V_{wN} šumnu komponentu.

Osnovna komponenta V_{wB} brzine vjetra V_w definirana je kao konstanta

$$V_{wB} = const. \quad (8)$$

Linearna komponenta V_{wR} brzine vjetra V_w definirana je prema funkciji

$$V_{wR} = \begin{cases} 0 & \text{za } t < T_{1R} \\ V_{ramp} & \text{za } T_{1R} \leq t < T_{1R} + T_R \\ MAXR * V_{wB} & \text{za } t \geq T_{1R} + T_R \end{cases}, \quad (9)$$

gdje V_{ramp} treba izračunati korištenjem izraza

$$V_{ramp} = MAXR * V_{wB} \frac{t - T_{1R}}{T_R}. \quad (10)$$

Konstanta $MAXR$ definira maksimalni koeficijent linearne promjene s obzirom na osnovnu komponentu V_{wB} , t vrijeme, T_{1R} početni trenutak promjene i T_R ukupno trajanje linearne promjene.

Udarana komponenta V_{wG} brzine vjetra V_w definirana je prema funkciji

$$V_{wG} = \begin{cases} 0 & \text{za } t < T_{1G} \\ V_{sico} & \text{za } T_{1G} \leq t < T_{1G} + T_G \\ 0 & \text{za } t \geq T_{1G} + T_G \end{cases}, \quad (11)$$

gdje V_{sico} treba izračunati pomoću izraza

$$V_{sico} = \frac{1}{2} MAXG * V_{wB} \sin 3 \frac{t - T_{1G}}{T_G} - \cos 2 \frac{t - T_{1G}}{T_G}. \quad (12)$$

Konstanta $MAXG$ definira maksimalni koeficijent udarne promjene s obzirom na osnovnu komponentu V_{wB} , t vrijeme, T_{1G} početni trenutak promjene i T_G ukupno trajanje udarne promjene.

Šumna komponenta V_{wN} brzine vjetra V_w definirana je prema funkciji spektralne gustoće

$$V_{wN} = 2 \frac{N}{i-1} S_V \cos \frac{1}{2} \phi_i t, \quad (13)$$

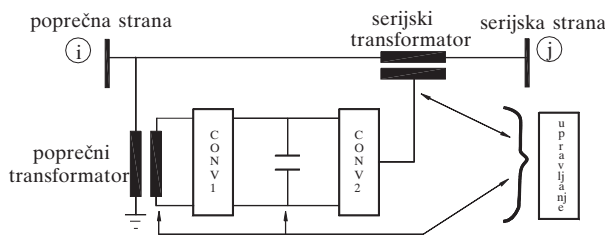
$$\phi_i = i - \frac{1}{2}, \quad (14)$$

$$S_V(\phi_i) = \frac{2K_N F^2 | \phi_i |}{2 \frac{F}{V_w} \frac{1}{3}}. \quad (15)$$

U (13 – 15), varijabla ϕ_i je slučajni broj utemeljen na uniformnoj distribuciji unutar intervala $[0; 2\pi]$, $S_V(\omega_i)$ funkcija spektralne gustoće, $\Delta\omega$ brzina (za $N=50$, $\Delta\omega=0.5-2.0$ rad/s), K_N površinski koeficijent ($K_N=0.001-0.040$), F skala turbulencije ($F=600-700$ m) i V_w brzina vjetra na referentnoj visini (m/s).

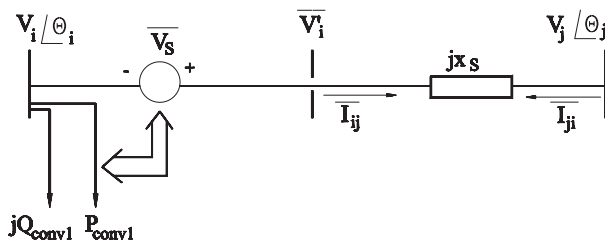
Na temelju definiranih komponenti brzine vjetra moguće je proračunati odzive varijabli stanja te algebarskih varijabli vjetroelettrane u vremenskoj domeni. Nakon proračuna osjetljivosti s obzirom na promjenu kompozitne brzine vjetra, numerička analiza izvedena je korištenjem jednog karakterističnog 48-satnog perioda s izmjerenom brzinom vjetra V_w na lokaciji izgradnje vjetroelettrane. Izmjereni podaci tretiraju se kao dovoljno reprezentativni za analizu kontinuiranog pogona vjetroelettrane u dugotrajnom periodu. Na temelju izmjerene brzine vjetra izvedeni su proračuni odziva varijabli stanja te algebarskih varijabli vjetroelettrane.

Drugi skup diferencijalnih jednadžbi definiran je za upravljački sustav UPFC-ovog modela zasnovanog na injektiranim snagama koji je opisan proporcionalno-integracijskom karakteristikom. Model UPFC-a uključen je u model ukupnog sustava. Upravljački sustav modela predložen je kako bi se prepoznala dobrobit u okviru istraživanja problema regulacije napona i kompenzacije jalove snage vjetroelettrane. UPFC može istodobno regulirati tri osnovna parametra ees-a (napon, impedancija i fazni kut) te dinamički kompenzirati sustav. Regulator može istodobno ispunjavati zadaće poprečne kompenzacije jalove snage, serijske kompenzacije te regulacije kuta uz zadovoljavanje višestrukih upravljačkih ciljeva. Iz funkcionalne perspektive, ciljevi se postižu primjenom serijskog transformatora koji injektira napon i poprečnog transformatora koji injektira jalovu struju (slika 2). Injektirani napon upravljačiv je s obzirom na iznos i kut te se dodaje naponu čvorišta poprečne strane UPFC-a. Jalova struja razmjenjuje se na poprečnoj strani UPFC-a.



Slika 2. Objedinjeni regulator tokova snage

Funkcijska struktura UPFC-a rezultira s odgovarajućim razmještajem električnih elemenata [11]. Izmjenični napon serijskog konvertera injektiran je u seriju s vodom (slika 3).

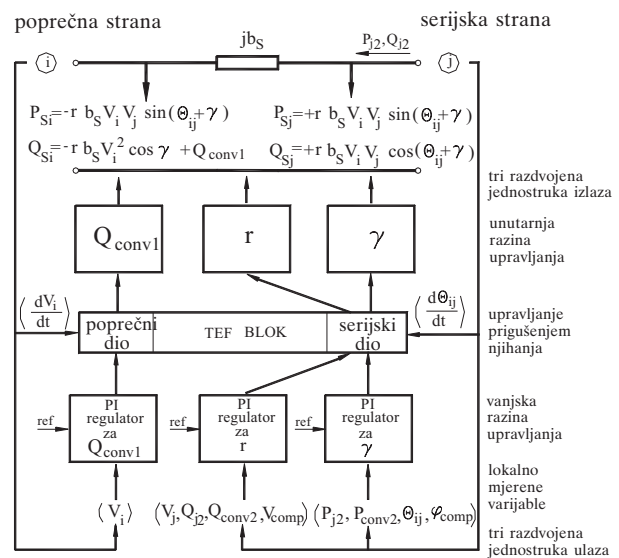


Slika 3. Električna shema UPFC-a

Serijski konverter razmjenjuje samo djelatnu snagu s poprečnim konverterom. Reaktancija x_s viđena je s priključnica serijskog transformatora. Model UPFC-a koji je zasnovan na injektiranim snagama izveden je na način da omogućuje istodobno upravljanje trima parametrima [9]. Parametri su poprečna jalova snaga Q_{conv1} , te iznos r i kut γ injektiranog serijskog napona V_s . Osim konstantne serijske susceptancije b_s uključene u matricu admitancija čvorišta cijelog sustava, injektirane snage UPFC-a P_{Si} , Q_{Si} , P_{Sj} i Q_{Sj} također su pridružene modelu sustava (slika 4).

Radi ostvarivanja cilja upravljanja, injektirane snage se modificiraju putem promjene parametara r , γ i Q_{conv1} . Upravljački sustav modela predložen je u razdvojenom proporcionalno-integracijskom obliku s jednim ulazom i jednim izlazom. Upravlja sustavom prema definiranoj pogonskoj točki putem mijenjanja referentnih veličina. Izbor ulaznih i izlaznih signala ovisi o prethodno definiranom upravljačkom režimu. Poprečnu je stranu moguće regulirati samo u naponskom režimu $V_i \Leftrightarrow Q_{conv1}$, naglašavajući da Q_{conv1} predstavlja ostatnu vrijednost opterećenja poprečnog konvertera jalovom snagom. Serijsku se stranu može regulirati putem parametara $r \Leftrightarrow \gamma$ u različitim režimima pogona.

U vremenskoj se domeni proračunavaju proširena Jacobi matrica te matrica varijabli stanja. Kombinirani model omogućuje korištenje različitih pokazatelja u predviđanju sigurnosti naponskih stanja. Pokazatelji zasnovani na singularnim vrijednostima rezultiraju s osjetljivošću pogonske točke na male poremećaje [12].



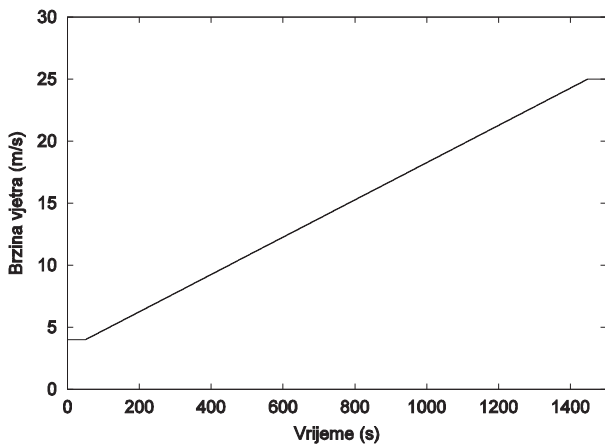
Slika 4. Model UPFC-a zasnovan na injektiranim snagama

4. NUMERIČKI REZULTATI

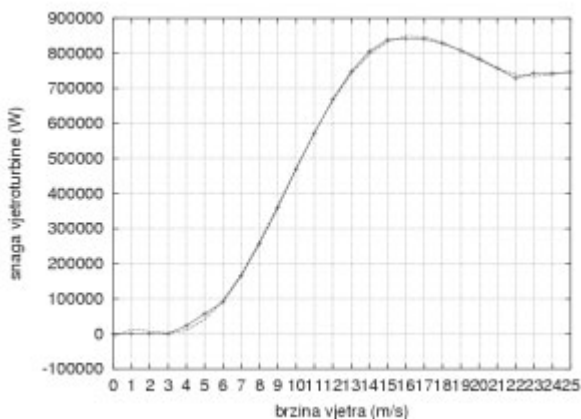
Konvencionalne i FACTS naprave primijenjene su radi izravnavanja profila napona, očuvanja stabilnosti, korigiranja faktora snage te smanjenja gubitaka snage i energije putem minimiziranja toka jalove snage u mreži. U okviru regulacije napona i kompenzacije jalove snage analizirane su strujne i naponske prilike u mreži kao dio ukupnog problema vezanog uz tehničke aspekte priključenja vjetroelektrane na mrežu. Vjetroelektrana je u izvedbi sa stalnom brzinom i konstantnom frekvencijom. Opremljena je asinkronim generatorom koji je pogonjen nereguliranom vjetro-turbinom. Prilike u čvorištima mreže dinamički su analizirane u ovisnosti o promjeni brzine vjetra. Uvjeti pod kojima dolazi do interakcije između vjetroelektrane i LTC distribucijskog transformatora razmotreni su tijekom ekstremno turbulentnih vjetrova. Prijelaz vjetroelektrane iz pogona na krutu mrežu u otočni pogon također je analiziran.

4.1. Linearna promjena brzine vjetra

Uz linearnu promjenu brzine vjetra V_w (slika 5), vjetro-turbina prolazi kroz sve pogonske točke $P_w(V_w)$ krivulje (slika 6) omogućujući injektiranje djelatne snage u mrežu od minimuma do maksimuma. Izborom dužeg vremenskog perioda izbjegavaju se tranzijenti vezani uz uklapanje/isklapanje kondenzatorskih baterija (UKB/IKB) ili prebacivanje s jednog skupa namota statora generatora na drugi (PNSG). Svaki asinkroni generator opremljen je skupom od 8x50 kvar baterija koje se uključuju/isključuju ukoliko je jalova snaga generatora izvan zone nedjelovanja ± 30 kvar dulje od 15 s. Opremljen je i s dva skupa statorskih namota koji pripadaju manjoj/većoj nazivnoj snazi (g/G).

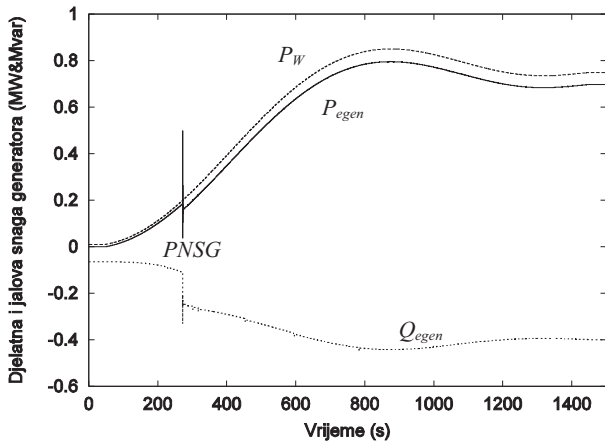


Slika 5. Linearna promjena brzine vjetra

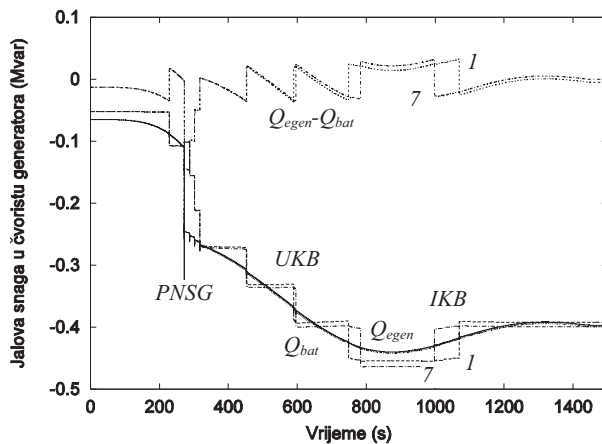


Slika 6. Krivulja $P_w(V_w)$ vjetroturbine

Injektirana snaga P_{egen} postaje promjenjiva prema $P_w(V_w)$ krivulji, uzrokujući promjenjivost jalove snage koju generator povlači iz mreže (slika 7). U točki priključenja na mrežu, vjetroelektrana treba injektirati djelatnu snagu uz minimalnu razmjenu jalove. Stoga se kondenzatorske baterije uklapaju/isklapaju u čvorištu generatora kako bi se razmjena jalove snage održavala unutar ± 30 kvar (slika 8). Diskretnost uklapanja/isklapanja baterija prenosi se dalje u mrežu.

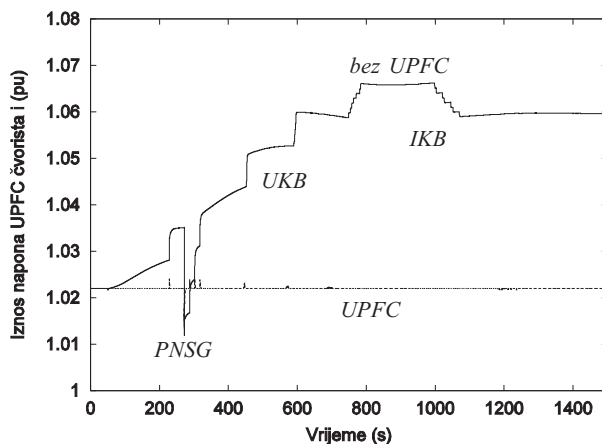


Slika 7. Djelatna i jalova snaga asinkronog generatora

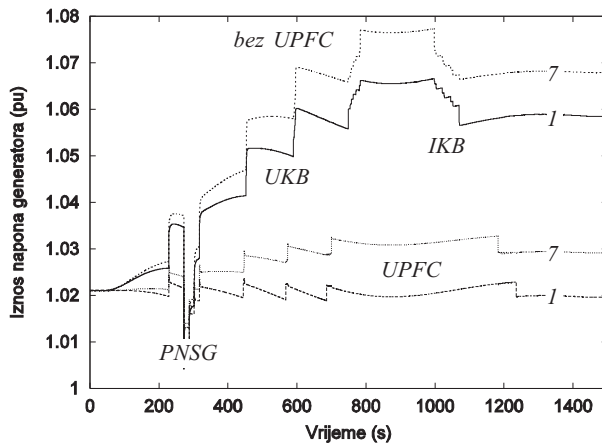


Slika 8. Tok jalove snage u čvorištu generatora 1 i 7

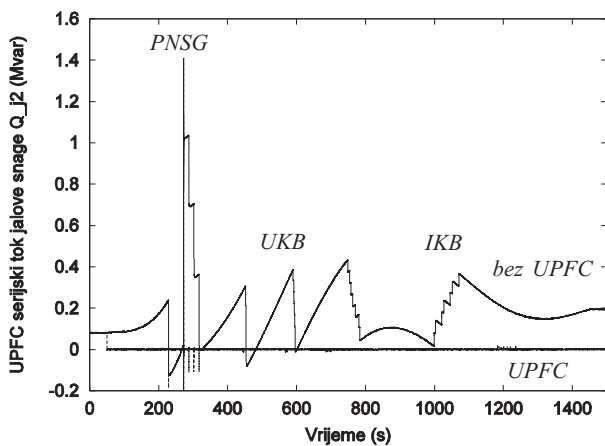
FACTS neutralizira diskretnost konvencionalne protumjere primjenom kontinuirane regulacije napona i jalove snage u točki priključenja vjetroelektrane na mrežu i to pri svim brzinama vjetra. Ukoliko se UPFC koristi kao spojka između vjetroelektrane i mreže, moguće je istodobno regulirati iznos napona u čvorištu (slika 9) i neizravno smanjiti promjenu napona generatora (slika 10) te anulirati serijski tok jalove snage



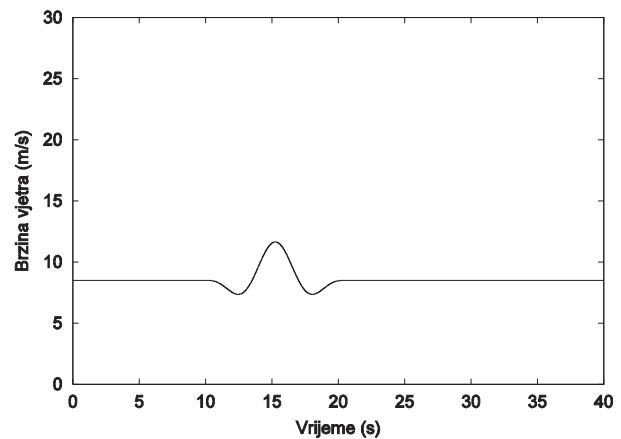
Slika 9. Iznos napona UPFC čvorišta i, V_i



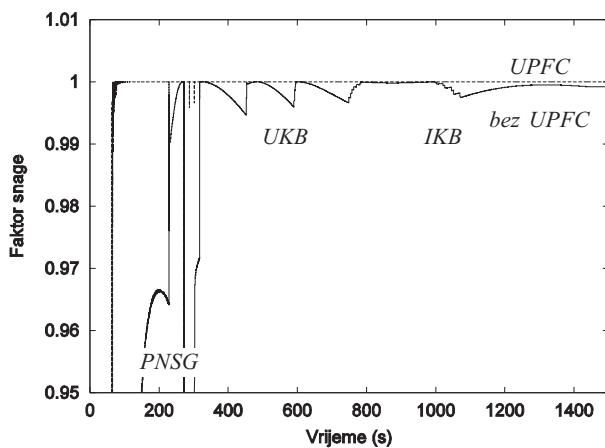
Slika 10. Iznos napona asinkronog generatora 1 i 7



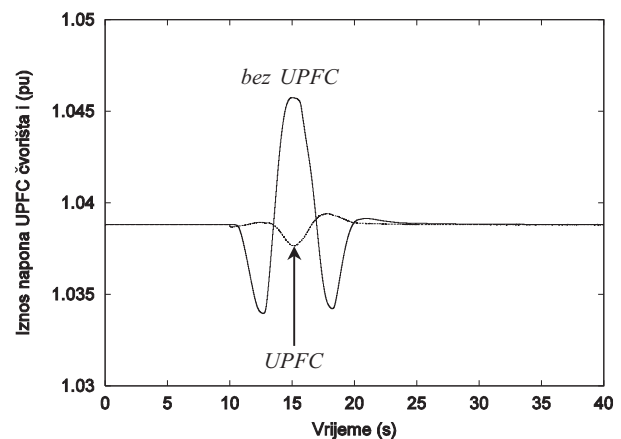
Slika 11. Tok jalove snage prema UPFC čvorištu j , Q_{j2}



Slika 13. Udarne promjene brzine vjetra



Slika 12. Faktor snage u UPFC čvorištu j



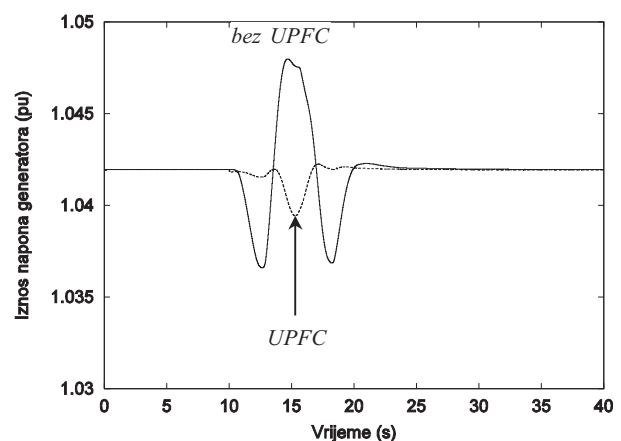
Slika 14. Iznos napona UPFC čvorišta i , V_i

(slika 11) i neizravno održavati točno jedinični faktor snage (slika 12). Devijacije iznosa napona ne prenose se u mrežu i ne uzrokuju narušavanje kvalitete isporučene električne energije. Razmjena jalove snage svedena je na nulu te su time smanjeni gubici djelatne snage na radijalnom kraku vjetroelektrane.

4.2. Udarne promjene brzine vjetra

Posljedice udarne promjene brzine vjetra V_w (slika 13) moguće je ublažiti FACTS protumjerom i izbjeći fluktuiranje iznosa napona i toka jalove snage. Udarne promjene definirane je tijekom 10.5 s kao 40%-tno najveće odstupanje od početne vrijednosti (8.5 m/s) prema jednogodišnjem obliku pojavnosti.

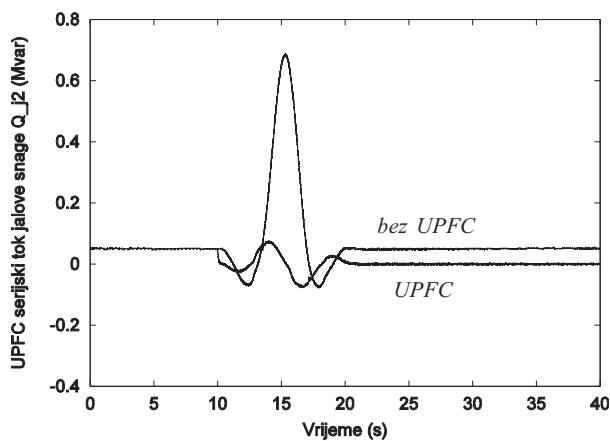
Uz aktiviran UPFC, napon u čvorištu priključenja vjetroelektrane na mrežu manje je promjenjiv (slika 14). Podržavajući napon, UPFC smanjuje promjenu napona generatora (slika 15). Zbog vremenskog kašnjenja od 15 s pri sklapanju kondenzatora, ova udarna promjena ne inicira niti jednu sklopnu operaciju kondenzatora. Istodobnim reguliranjem serijskog toka jalove snage, UPFC značajno smanjuje razmjenu jalove snage vjetroelektrane s mrežom (slika 16).



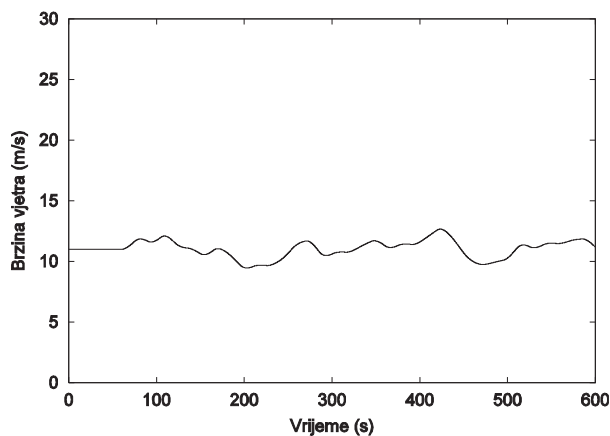
Slika 15. Iznos napona asinkronog generatora 1

4.3. Šumna promjena brzine vjetra

Šumna promjena brzine vjetra V_w (slika 17) ilustrira FACTS sposobnost istodobnog izravnavanja profila napona i minimiziranja razmjene jalove snage između vjetroelektrane i mreže. Izabrana je kao $\pm 10\%$ slučajna promjena oko početne vrijednosti (11 m/s).

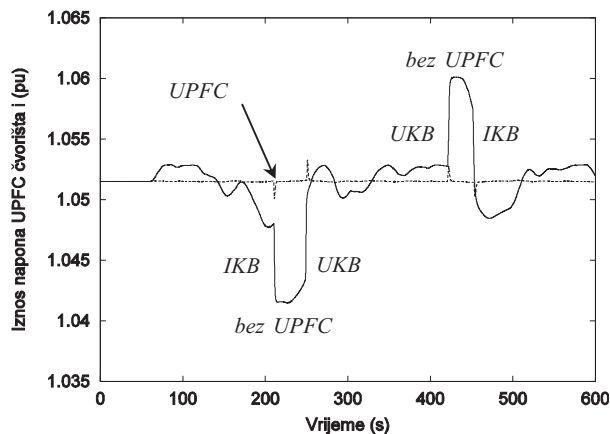


Slika 16. Serijski tok jalove snage kroz UPFC čvorište j , Q_{j2}



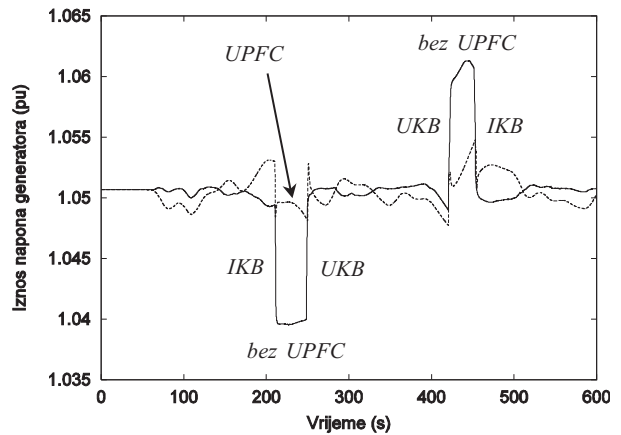
Slika 17. Šumna promjena brzine vjetra

Uz aktivirani UPFC, napon u točki priključenja vjetroelektrane na mrežu održava se konstantnim (slika 18). Time se ne dozvoljava da tranzijenti uđu dublje u mrežu i naruše kvalitetu isporučene električne energije. Podržavajući napon u 10 kV mreži, UPFC također smanjuje promjenu napona asinkronog generatora (slika 19) u uvjetima pojave sklopnih opera-

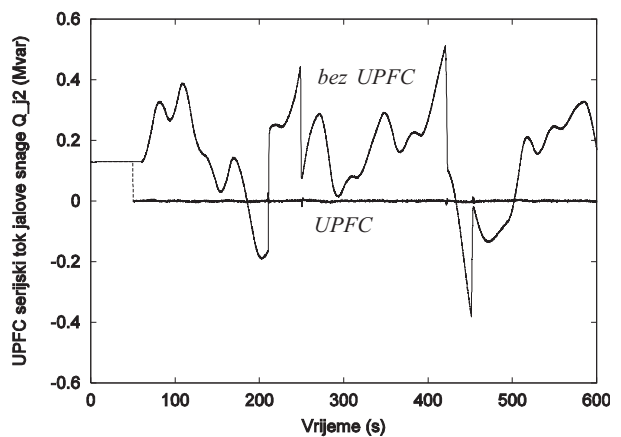


Slika 18. Iznos napona UPFC čvorišta i , V_i

cija unutar lokalnog sloga poprečnih kondenzatorskih baterija. Upravljaajući serijskim tokom jalove snage, UPFC minimizira razmjenu jalove snage (slika 20) te njezinim dovođenjem na nultu vrijednost smanjuje gubitak djelatne snage na 10 kV radijalnom kraku između vjetroelektrane i glavne pojne točke 110 kV / 10 kV.



Slika 19. Iznos napona asinkronog generatora 1

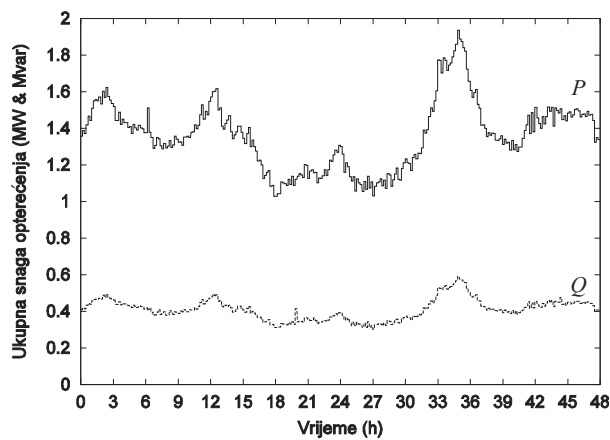


Slika 20. Serijski tok jalove snage kroz UPFC čvorište j , Q_{j2}

4.4. Kontinuirana promjena brzine vjetra

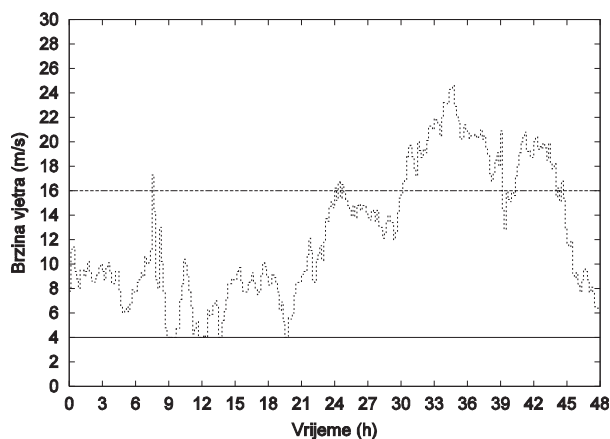
U okviru rješavanja problema regulacije napona i kompenzacije jalove snage u dugotrajnom periodu, strujne i naponske prilike su analizirane kao dio ukupnih tehničkih aspekata priključenja vjetroelektrane na mrežu. Radi toga su strujne i naponske prilike dinamički analizirane u ovisnosti o kontinuirano promjenjivoj brzini vjetra tijekom 48-satnog perioda. Proračunati su odzivi karakterističnih varijabli vjetroelektrane u ovisnosti o brzini vjetra izmjerenoj na lokaciji izgradnje te u ovisnosti o djelatnoj i jalovoj snazi opterećenja izmjerenoj u 10 kV mreži tijekom 48-satnog perioda. Ukupna snaga opterećenja izmjerena je u glavnoj pojnoj točki 10 kV distribucijske mreže (slika 21). Unutar 10-minutnih intervala, ukupno opterećenje mreže raspodijeljeno je na čvorišta opterećenja proporcionalno

iznosima njihovih najvećih snaga. Snage opterećenja predstavljaju srednje vrijednosti svakog 10-minutnog intervala tijekom 48-satnog perioda.



Slika 21. Ukupna snaga opterećenja u 10 kV mreži

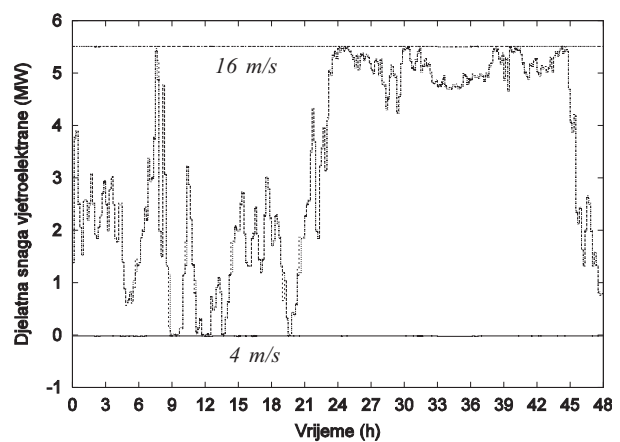
Konstantni minimalni, konstantni maksimalni i kontinuirano promjenjivi režimi pogona vjetroeletreane superponirani su na istodobno promjenjive snage opterećenja u čvorištima radi predviđanja ugroženosti pogona mreže nakon priključenja vjetroeletreane. Različiti režimi pogona vjetroeletreane simulirani su primjenjujući različite oblike brzine vjetra (slika 22). Najprije su analizirana dva potpuno kompenzirana režima konstantnog pogona koji odgovaraju minimalnom (4 m/s) i maksimalnom (16 m/s) angažmanu vjetroeletreane. Nakon toga je simuliran utjecaj izmjerene kontinuirano promjenjive brzine vjetra na pogon vjetroeletreane. Oblik kontinuirano promjenjive brzine vjetra uzet je kao uprosječna vrijednost svakog 10-minutnog intervala tijekom 48-satnog perioda koji se odvija između 4 m/s i 25 m/s. Pri tome niti u jednom trenutku ne dolazi do diskontinuiteta uzrokovanih zaustavljanjem i ponovnim pokretanjem vjetroeletreane, već se radi o njezinom kontinuiranom pogonu.



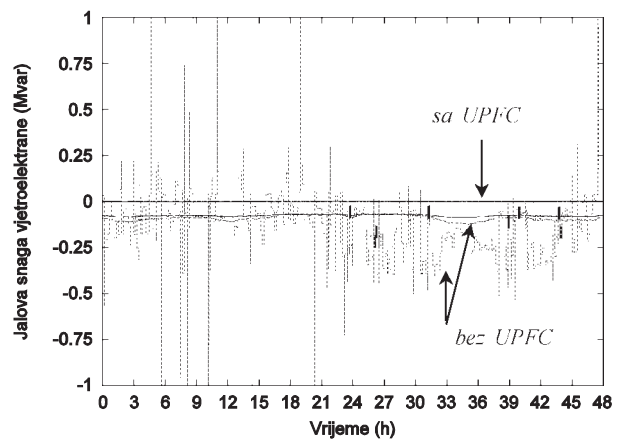
Slika 22. Konstantni i kontinuirano promjenjivi oblici brzine vjetra

S obzirom na promjenjivost brzine vjetra kao ulaznog parametra, vjetroeletreane injektira promjenjivu djelatnu i jalovu snagu u distribucijsku mrežu izlažući obližnje potrošače neželjenim devijacijama iznosa napona. Promjenjiva djelatna snaga ovisi o $P_w(V_w)$ karakteristici vjetroturbine (slika 6). Konvencionalne (poprečne kondenzatorske baterije) i FACTS naprave (UPFC) primijenjene su radi izravnavanja naponskog profila u mreži, održavanja stabilnosti, ispravljanja faktora snage i smanjivanja gubitaka djelatne snage i energije putem minimiziranja toka jalove snage u mreži. Protumjera zasnovana na djelovanju FACTS naprave ima kontinuirani utjecaj na fluktuirajući iznos napona i tok jalove snage za razliku od konvencionalnih naprava čiji je utjecaj diskontinuitetno diskretan.

Zbog promjenjivosti djelatne i jalove snage opterećenja u čvorištima te različitih oblika brzine vjetra, injektirana djelatna snaga vjetroeletreane postaje promjenjiva prema $P_w(V_w)$ karakteristici vjetroturbine (slika 23), istodobno uzrokujući promjenjivost jalove snage koju asinkroni generatori povlače iz mreže (slika 24). Kapacitivnost pogona asinkronog generatora nužno traži protumjeru u obliku lokalnog kompenza-



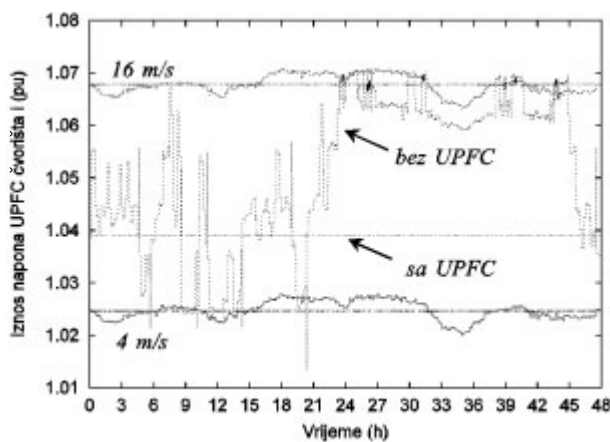
Slika 23. Djelatna snaga vjetroeletreane injektirana u 10 kV mrežu



Slika 24. Razmjena jalove snage vjetroeletreane s 10 kV mrežom

cijskog uređaja. U točki priključenja na mrežu, vjetroelektrana treba injektirati djelatnu snagu uz minimalnu razmjenu jalove snage. Uočava se da konvencionalna protumjera ne samo da uzrokuje diskontinuitetnu diskretnost, već se njezine sklopne operacije prenose dalje u 10 kV mrežu. Ukoliko je UPFC aktiviran u modu podrške iznosu napona i serijskom toku jalove snage, njegov je utjecaj na injektiranu djelatnu snagu vjetroelektrane zanemariv. Međutim, utjecaj na razmjenu jalove snage između vjetroelektrane i 10 kV mreže postaje vrlo značajan.

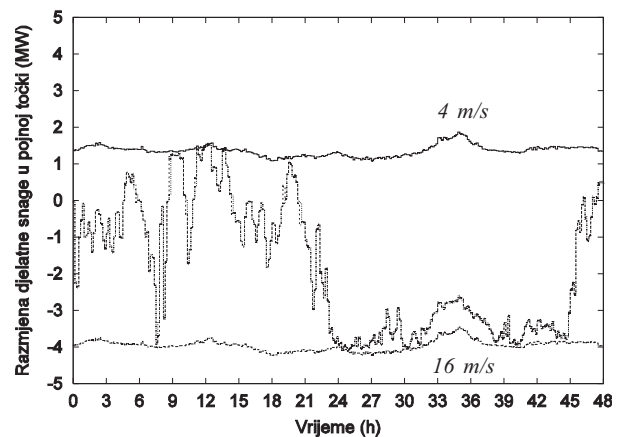
Ukoliko UPFC predstavlja spojku između vjetroelektrane i mreže, osim anuliranja serijskog toka jalove snage (slika 24) moguće je istodobno regulirati i iznos napona u čvorištu priključenja (slika 25). FACTS protumjera ne samo da neutralizira diskretnost konvencionalnih naprava forsiranjem kontinuiranog odziva varijabli vjetroelektrane već i utječe na izravnavanje profila napona koji je pod utjecajem promjenjive injektirane snage vjetroelektrane uzrokovane promjenjivom brzinom vjetra.



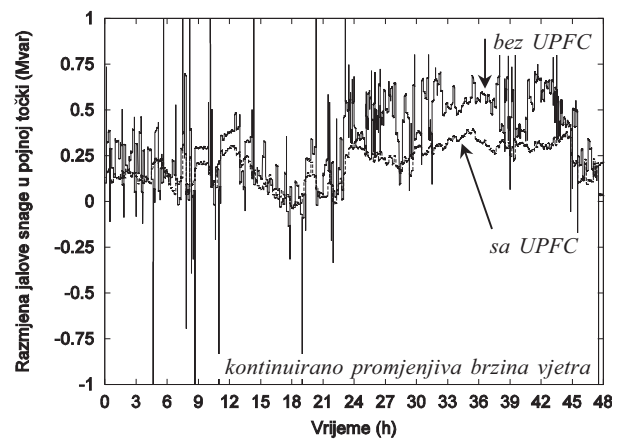
Slika 25. Iznos napona UPFC čvorišta i , V_i

Različiti režimi pogona vjetroelektrane i promjenjive snage opterećenja uzrokuju promjenjivost razmjene snage u glavnoj pojnoj točki 110 kV/10 kV (slike 26 – 27). Pri $V_w=4$ m/s, djelatna snaga se distribucijskoj mreži dobavlja iz 110 kV mreže (pozitivne vrijednosti). Pri $V_w=16$ m/s, djelatna snaga ima suprotni smjer (negativne vrijednosti). Vjetroelektrana injektira onaj dio djelatne snage koji nije utrošen na 10 kV razini u 110 kV mrežu. Razmjena jalove snage održava se konstantnom. Konvencionalna protumjera stvara kratkotrajna odstupanja zbog diskretne naravi 10-minutnih intervala. FACTS kontinuirana kompenzacija smanjuje odstupanje jalove snage razmjene.

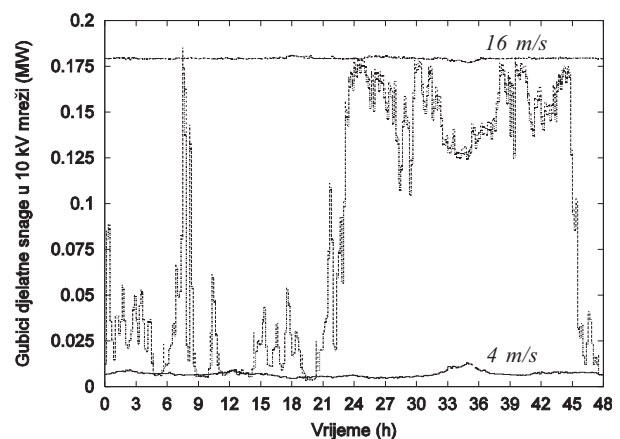
Promjenjive snage opterećenja i različiti režimi pogona vjetroelektrane čine promjenjivima gubitke djelatne snage i energije u 10 kV mreži (slike 28 – 29). Ako se vjetroelektrana nalazi u intermitentnom pogonu između minimuma i maksimuma, gubici djelatne snage postaju izrazito poremećeni. Maksimalni pogon



Slika 26. Razmjena djelatne snage u pojnoj točki 110 kV/10 kV

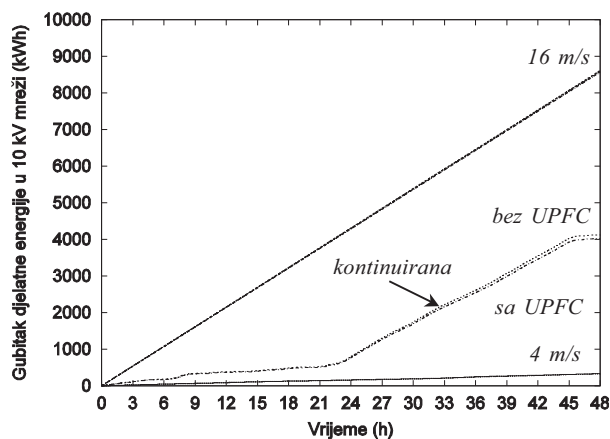


Slika 27. Razmjena jalove snage u pojnoj točki 110 kV/10 kV



Slika 28. Gubici djelatne snage u 10 kV mreži

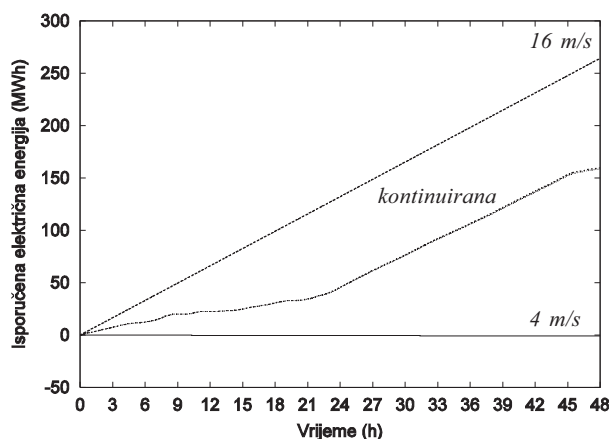
vjetroelektrane čini približno 20 puta veće gubitke u usporedbi s minimalnim. Gubici djelatne energije ovise o gubicima djelatne snage. Na kraju 48-satnog perioda, za tri režima pogona (bez/sa UPFC) gubici djelatne energije iznose 333/327 kWh (4 m/s),



Slika 29. Gubitak djelatne energije u 10 kV mreži

4125/4023 kWh (intermitentni pogon) i 8607/8572 kWh (16 m/s). Uz aktivirani UPFC, gubici djelatne energije smanjeni su zbog anuliranja toka jalove snage kroz radialni krak koji povezuje vjetroelektranu s glavnim pojnom točkom.

Tijekom 48-satnog perioda, vjetroelektrana isporučuje električnu energiju u 10 kV distribucijsku mrežu (slika 30). Na kraju perioda, za tri režima pogona isporučena električna energija iznosi -1 MWh (4 m/s), 159 MWh (intermitentni pogon) i 264 MWh (16 m/s). UPFC ima zanemariv utjecaj na isporučenu električnu energiju. Pri 4 m/s, energija ima negativni predznak jer je vlastita potrošnja vjetroelektrane veća od minimalne proizvodnje svih vjetroturbina. Na kraju perioda, gubici energije u 10 kV mreži približno iznose 2.5% od isporučene energije u intermitentnom pogonu, odnosno 3.3% u maksimalnom pogonu (16 m/s).



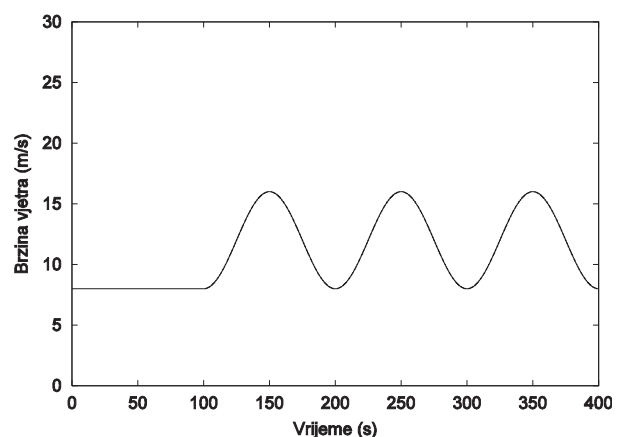
Slika 30. Isporučena električna energija vjetroelektrane

Na temelju ukupnog broja radnih sati tijekom jedne godine ekstrapoliraju se iznosi proizvedene energije i energije gubitaka s 48-satnog perioda na godišnju razinu. Također, daljnjim razvijanjem različitih modela vjetroelektrane omogućilo bi se provođenje usporedbe različitih tipova vjetroturbina s obzirom na proizve-

deni električnu energiju. Naime, u ovom je članku analiziran tip vjetroturbine sa stalnom brzinom vrtnje i konstantnom frekvencijom koji optimalni pogon ima samo u jednoj radnoj točki, odnosno samo pri jednoj brzini vjeta. Nadalje bi bilo potrebno razviti model vjetroturbine s promjenjivom brzinom vrtnje i reguliranom frekvencijom koji optimalni pogon ima u više radnih točaka, odnosno pri više različitih brzina vjeta. Tada bi se ista vrsta analize provela i za taj suvremeniji tip vjetroturbine. Međusobnom usporedbom iznosa proizvedene električne energije za ta dva tipa vjetroturbina postigao bi se čvrsti ekonomski numerički pokazatelj. Na temelju tog pokazatelja provela bi se ekonomska analiza isplativosti povećanog inicijalnog ulaganja u suvremeniji (skuplji) tip vjetroturbine čijim se korištenjem proizvodi veći iznos električne energije. Ukoliko je električna energija koja je proizvedena u suvremenim vjetroturbinama tijekom određenog razdoblja znatnije povećana u usporedbi sa standardnim tipom vjetroturbine, financijski je opravdano inicijalno veće ulaganje u novo tehnološko rješenje.

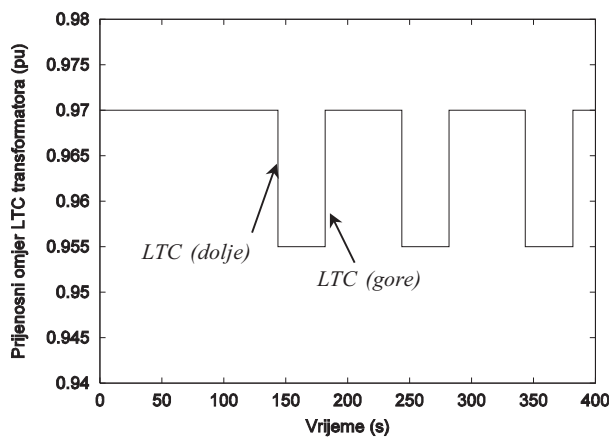
4.5. Interakcija između vjetroturbine i LTC transformatora

Vjetroelektrana je putem radialnog kraka spojena na niskonaponsku stranu LTC transformatora u glavnoj pojnoj točki distribucijske mreže. Interakcija između vjetroelektrane i LTC-a može se javiti pri ekstremno velikim i ponavljajućim udarnim promjenama brzine vjeta V_w (slika 31). Promjena je definirana periodom od 100 s te 100%-tnim najvećim odstupanjem od početne vrijednosti (7.5 m/s). Predstavlja ekstremno veliki poremećaj ulazne varijable na mehaničkoj strani vjetroturbine. Izaziva velika odstupanja injektirane snage vjetroelektrane i napona u mreži.

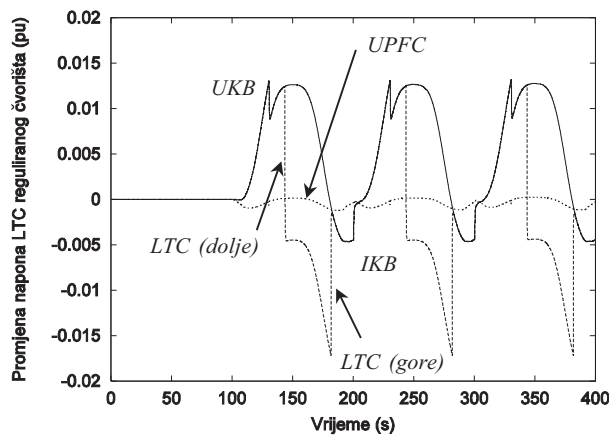


Slika 31. Ponavljajuća udarna promjena brzine vjeta

Ako je zona nedjelovanja regulacije napona LTC transformatora postavljena unutar uskog raspona (± 0.010 pu), a ukupno vremensko zatezanje prorade korespondira s periodom udarne promjene, fluktuacije napona mogu izazvati proradu LTC-a (slike 32 – 33).

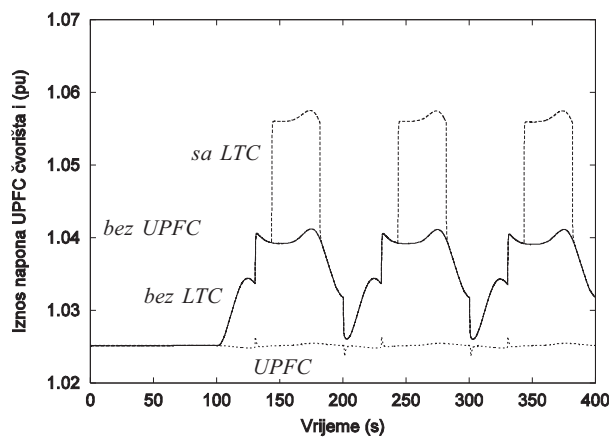


Slika 32. Prijenosni omjer LTC transformatora



Slika 33. Promjena reguliranog napona LTC transformatora

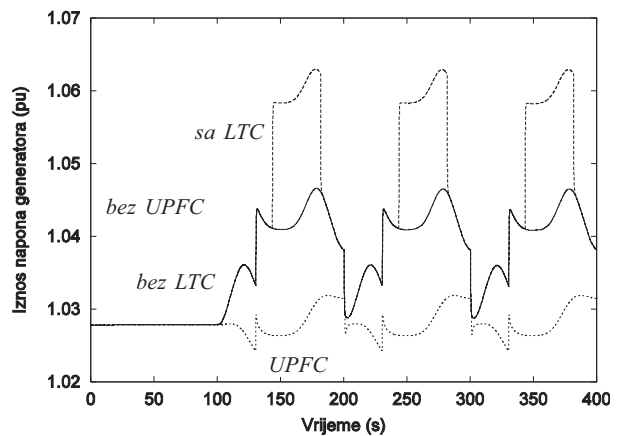
FACTS protumjera ublažava fluktuacije napona u mreži koje su inducirane velikim ponavljajućim promjenama brzine vjetro. Uz aktiviran UPFC, LTC shema se ne inicira budući da se regulira napon u čvorištu priključenja vjetroelektrane na mrežu (slika 34). UPFC blokira penetraciju velikih odstupanja iznosa



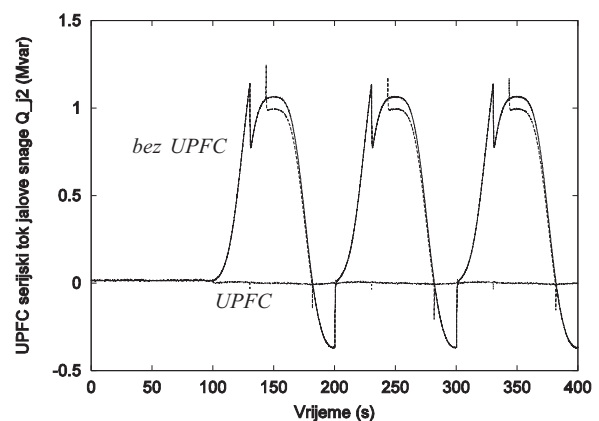
Slika 34. Iznos napona UPFC čvorišta i , V_i

napona uzduž radijalnog kraka od vjetroelektrane prema glavnoj pojnoj točki gdje je smješten LTC transformator.

Podržavajući napon, UPFC smanjuje promjenu napona asinkronog generatora (slika 35). Istodobnim reguliranjem serijskog toka jalove snage, UPFC značajno smanjuje razmjenu jalove snage s mrežom (slika 36). FACTS protumjera ponovno se pokazuje vrlo uspješnom.



Slika 35. Iznos napona asinkronog generatora 1

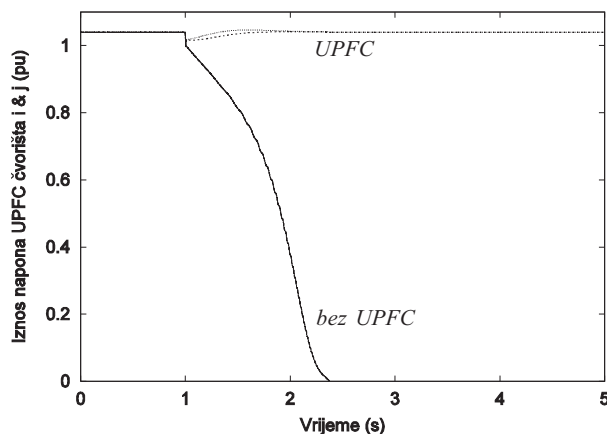
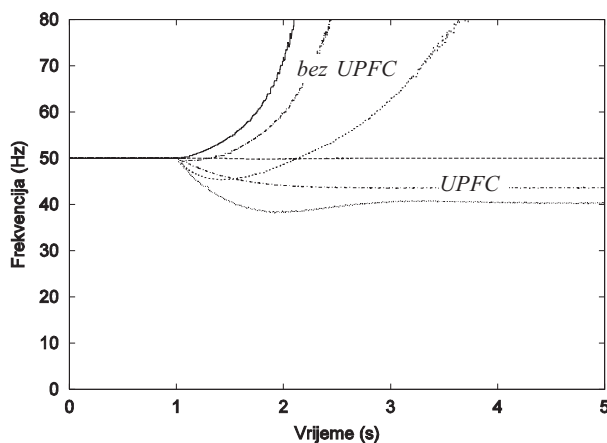


Slika 36. Serijski tok jalove snage kroz UPFC čvorište j , Q_{j2}

4.6. Otočni pogon vjetroelektrane

Vjetroelektrana u nereguliranoj izvedbi, općenito nije u mogućnosti zadržati stabilan pogon nakon odvajanja od krute mreže ukoliko u istoj izoliranoj mreži nema drugih reguliranih jedinica. Otočni pogon nije ostvariv niti u slučaju kada je brzina vjetro na lokaciji vjetroelektrane dostatna za uravnoteživanje snaga u mreži. Primarno je problem vezan uz nedostatak sposobnosti vjetroelektrane za regulacijom frekvencije te sekundarno za regulacijom napona. U hibridnim shemama, vjetroelektrana se kombinira s drugom reguliranom proizvodnom jedinicom koja omogućuje zadržavanje stabilnog otočnog pogona.

Ilustrirana je neupravljivost vjetroelektrane tijekom odvajanja od krute mreže. Analizirana su tri slučaja u ovisnosti o razlici između snage potrošnje i proizvodnje u distribucijskoj mreži nakon odvajanja ($P=0.1$ MW, 1.1 MW i 2.2 MW). Nakon ispada LTC transformatora, distribucijska mreža izolirana je od krute mreže i ima snagu proizvodnje samo iz vjetroelektrane. S obzirom na neupravljivost vjetroelektrane predmetnog tipa, odvajanje uzrokuje problem s frekvencijom i/ili naponom. Unutar 1.5 s dolazi do sloma napona u čvorištima mreže (slika 37). Frekvencija u otočnom sustavu poprima vrlo velike vrijednosti već unutar prve sekunde nakon poremećaja (slika 38). U svakom od slučajeva, frekvencija se povećava nakon sloma napona s obzirom da potrošnja tereta pada na nulu zbog ovisnosti o iznosu napona. Uz aktiviran UPFC u naponskom režimu s obje strane, naponski dio problema moguće je riješiti. Ukoliko je napon u čvorištu priključenja vjetroelektrane podržan djelovanjem UPFC-a, naponi u mreži se stabiliziraju. Međutim, odstupanje frekvencije može biti preveliko ne dozvoljavajući kontinuirani pogon.

Slika 37. Iznos napona UPFC čvorišta i i j , V_i i V_j 

Slika 38. Frekvencija nakon odvajanja od krute mreže

5. ZAKLJUČAK

Unutar ovog članka uspoređene su konvencionalne i FACTS protumjere u okviru problema regulacije napona i kompenzacije jalove snage. Korist od primjene FACTS naprava zasnovanih na energetskej elektronici jasno je ilustrirana unutar problema priključenja vjetroelektrane na distribucijsku mrežu. FACTS rješenje preventivno smanjuje odstupanje iznosa napona koje inducira vjetroelektrana injektiranjem promjenjive snage u distribucijsku mrežu. Uz aktivirani UPFC, problem regulacije napona i kompenzacije jalove snage vjetroelektrane značajno se ublažava istodobnom regulacijom iznosa napona i serijskog toka jalove snage u čvorištu priključenja vjetroelektrane na mrežu. Predočeni rezultati ukazuju na mogućnost primjene FACTS naprava u još jednom zanimljivom i progresivnom području.

6. DODATAK

Tablica A.1 Osnovni parametri UPFC-a

S_{CONV1n} (MVA)	4
S_{CONV2n} (MVA)	4
r_{max} (pu)	0.05
X_k (pu)	0.05

Tablica A.2 Osnovni parametri vjetroelektrane (G/g)

P_n (kW)	7x(800/200)
U_n (V)	690 V \pm 10 %
S_n (kVA)	909/232
$l:n$	1:63.6
R_s (Ω)	0.0131/0.1165
X_s (Ω)	0.24/0.72
R_r (Ω)	0.014/0.073
X_r (Ω)	0.16/0.97
X_{mag} (Ω)	5.94/22.2
H_m (s)	0.234/0.410
H_g (s)	0.008/0.014
H_T (s)	5.644/9.787
Θ_c ($^\circ$)	3.6 $^\circ$ /3.6 $^\circ$
c_c (pu torque/rad $_c$)	884/821
D_c (pu torque/pu speed)	1200/1200
D_m (pu torque/pu speed)	0.008664/0.008031
D_g (pu torque/pu speed)	1.168/1.083
D_T (pu torque/pu speed)	147.15/136.73

LITERATURA

- [1] N. JENKINS et al., "Embedded generation", IEE Series 31, ISBN 0 85296 774 8, London, UK, 2000
- [2] CIGRÉ, "Impact of increasing contribution of dispersed generation on the power system", WG 37.23, Feb. 1999
- [3] T. ACKERMANN et al., "Distributed generation: a definition", *Electric Power Systems Research*, vol. 57, 2001, pp. 195-204
- [4] N. HATZIARGYRIOU, "Distributed energy sources: Technical challenges", *IEEE 2002 Winter Meeting*, NY, USA, Jan. 2002
- [5] J. LOPES, "Integration of dispersed generation on distribution network – Impact studies", *IEEE 2002 Winter Meeting*, NY, USA, Jan. 2002
- [6] S. HEIER, "Grid integration of wind energy conversion systems", John Wiley & Sons, 1998
- [7] CIGRÉ, "Modelling new forms of generation and storage", WG 38.01, Nov. 2000
- [8] N. DIZDAREVIC, "Unified Power Flow Controller in alleviation of voltage stability problem", Ph.D. thesis, University of Zagreb, Croatia, Oct. 2001, [Online]. Raspoloživo: www.eihp.hr/čndizdar
- [9] N. DIZDAREVIĆ et al., "Utjecaj vjetroelektrane na naponske i strujne prilike u elektroenergetskoj mreži", studija, EI 'HRVOJE POŽAR', Zagreb, Hrvatska, 2003, [Online]. Raspoloživo: www.eihp.hr/čndizdar
- [10] R. CHEDID et al., "Adaptive fuzzy control for wind-diesel weak power systems", *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 15, No. 1, March 2000, pp. 71-78
- [11] M. NOROOZIAN et al., "Use of UPFC for optimal power flow control," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 17, no. 4, pp. 1629-1634, Oct. 1997
- [12] N. DIZDAREVIC et al., "Composite load sensitivity in voltage stability problem solved by Unified Power Flow Controller," *Power System Computation Conference*, Seville, Spain, June 2002, 38/4, [Online]. Raspoloživo: www.eihp.hr/čndizdar

FACTS COMPENSATION OF REACTIVE POWER FROM WIND POWER PLANTS

In this paper the problem of FACTS regulation of voltage and reactive power compensation is presented in a distribution network with wind power plant connected.

Wind power plant has constant speed and constant frequency using asynchronous generator operated by not regulated wind turbine. The problem is analyzed based on short-term (10sek), mid-term (10min) and long-term (48 hours) time period of system variables reaction on different wind speed changes. Regarding different wind speed wind power plant injects different values of active and reactive power into distribution network whereby near consumers are subject to significant voltage changes.

In a conventional approach to the problem shunt compensation batteries situated in the node of asynchronous generator were used. In FACTS approach Unified Power Flow Controller – UPFC is used, which is situated in the node where wind power plant is connected to the distribution grid.

Using FACTS compensation presents an attempt to resolve technical questions of voltage regulation in the node of wind power plant connection and minimisation of reactive power interchange between wind power plant and distribution network.

ANPASSUNGSFÄHIGE BLINDLEISTUNGSKOMPENSIERUNG EINES WINDKRAFTWERKES

Im Artikel sind, für einen Verteilungsnetz mit angeschlossenem Windkraftwerk, Fragen der Spannungsregelung und der Kompensierung der Blindleistung bearbeitet. Dazu bediente man sich der Technologie genannt "FACTS" (Flexible Alternative Current Transmissiom System = anpassungsfähiges Wechselstromübertragungssystem).

Das Kraftwerk hat eine nichtgeregelte Windturbine und einen Asynchrongenerator und ist bei unstätiger Drehgeschwindigkeit an ein Netz mit stätiger Frequenz angeschlossen. Das Problem ist für eine kurzdauernde (10 s), eine mitteldauernde (10 min) und eine langdauernde (48 st) Abfragezeit der Systemvariablen bei verschiedenen Windgeschwindigkeitsänderungen erörtert worden. Wegen der Änderungen der Windgeschwindigkeit, speisst das Windkraftwerk ins Verteilungsnetz eine sich verändernde Wirk- und Blindleistung ein, und setzt damit naheliegende Verbraucher bedeutenden Schwankungen der Spannung aus.

Bei der üblichen Lösung dieser Frage wurden querliegende Kondensatorenbatterien im Knotenpunkt des Asynchrongenerators verwendet.

Bei der "FACTS"- Lösung wurde (im Anschlusspunkt des Windkraftwerkes an das Verteilungsnetz) ein integrierter Regler des Leistungsflusses (engl. = Unified Power Flow Controller "UPFC"), eingebaut.

Durch die Nutzung einer "FACTS"-Einrichtung wurde versucht technische Fragen der Spannungsregelung im Anschlusspunkt des Windkraftwerkes zu lösen, sowie den den Blindleistungsaustausch zwischen Kraftwerk und Verteilungsnetz auf einen Mindestmaß zurückzuführen.

Tumačenja iz rječnika Brandstetter i Lexrom:

automatische Protokollumschaltung (HPS) / automatic protocol switching

equivalent isotropically radiated power (EIRP) (RP) / isotrope Strahlungsleistung

Protokoll n (π) / protocol n (formal set of conventions between communicating processes on the format and content of messages to be exchanged)

electronic highway (Net, Tr) / elektronische Breitbandtrasse, elektronische Autobahn

diffused junction (S_c) / diffundierter Übergang (DIN 41852, Aug. 1978), diffundierter Zonenübergang

Naslov pisaca:

Dr. sc. Nijaz Dizdarević, dipl. ing.
dr. sc. Matislav Majstrovic, dipl. ing.
dr. sc. Srdan Žutobradić, dipl. ing.
Energetski institut "Hrvoje Požar"
Savska 163,
10000 Zagreb, Hrvatska

Uredništvo primilo rukopis:
 2003 – 09 – 10.

