

POGON VJETROELEKTRANA

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

UDK 621.311.24.05
PREGLEDNI ČLANAK

U ovom je radu predstavljen generički model sustava za pretvorbu vjetra u električnu energiju. Razmotrena je općenita shema djelovanja vjetroelektrane koja obuhvaća elemente projektirane obzirom na tri oblika energije: energiju vjetra, mehaničku energiju te električnu energiju. U svrhu analize pogona vjetroelektrane nužno je provesti razmatranja elektroničkog sučelja prema izmjeničnoj mreži, generatora, vjetroturbine kao pogonskog stroja te vjetra kao primarnog izvora energije. Osnovna obilježja pogona vjetroelektrane opisana su sa stajališta izbora izvedbe vjetroelektrane obzirom na vrstu priključenja na mrežu te stalnost brzine vrtnje glavne osovine.

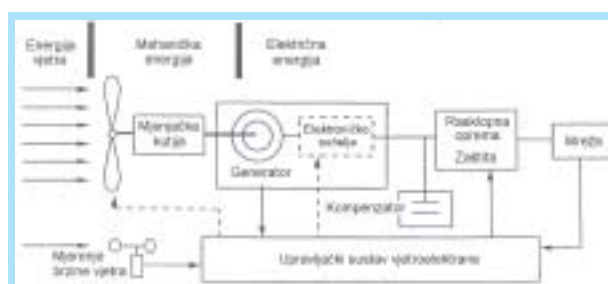
Ključne riječi: vjetroelektrana, elektroničko sučelje, generator, vjetroturbina, vjetar.

1. OPĆENITI OPIS SUSTAVA ZA PRETVORBU ENERGIJE VJETRA U ELEKTRIČNU ENERGIJU

Sustav za pretvorbu energije vjetra u električnu energiju (vjetroelektrana) transformira energiju gibajuće zračne mase u električnu energiju [10, 12]. Vjetar predstavlja izrazito promjenjivi energetski resurs koji se ne može uskladištiti. Obzirom na nemogućnost uskladištenja potrebno je definirati uvjete pogona sustava za pretvorbu energije vjetra unutar elektroenergetskog sustava. Vjetrenjače su u uporabi od 10. stoljeća, a u Europi su postale široko rasprostranjene u 18. stoljeću. Proizvodnja električne energije iz vjetroelektrana započinja 1940-ih godina u Njemačkoj, SAD i Danskoj. Od tog doba kreće masovna proizvodnja komponenti i sustava vezanih uz vjetroelektrane. Stanje njihove razvijenosti danas doseže razinu visoke pouzdanosti i isplativosti. Razvijene su jedinice u rasponu od 500 kW do 1500 kW koje se ističu visokom raspoloživošću i dobrim mogućnostima povrata investicije.

Općenita shema djelovanja vjetroelektrane (slika 1) obuhvaća elemente koji se projektiraju obzirom na tri oblika energije: energiju vjetra, mehaničku energiju te električnu energiju. Predočeni su samo glavni dijelovi sustava (crtkanom linijom su označeni dijelovi koji nisu prisutni u svim izvedbama).

Energija vjetra transformira se u mehaničku energiju korištenjem vjetroturbine koja ima jednu ili više elisa. Obzirom na razinu buke i vizualni efekt, izvedba s tri elise predstavlja najčešće rješenje. Spoj između vjetroturbine i generatora ostvaren je pomoću mehaničke spojke. Mehanička spojka uobičajeno u sebi uključuje mjenjačku kutiju s prijenosnikom pomoću kojeg se niža brzina vrtnje rotora vjetroturbine prilagođava višoj brzini vrtnje rotora generatora. Vjetroturbine no-

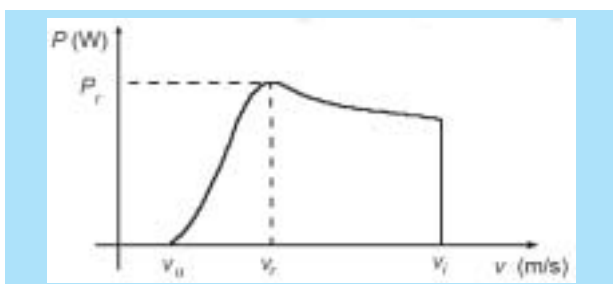


Slika 1. Općenita shema djelovanja vjetroelektrane

vijeg dizajna koriste višepolne niskobrzinske generatore koji su uglavnom sinkroni s uzбудnim namotom ili uzbudnim permanentnim magnetima kako bi se uklonila potreba za mehaničkim prijenosnikom. U opremi nekih vjetroturbina nalazi se sustav za upravljanje kutem zakreta elisa pomoću kojeg se utječe na iznos snage pretvorbe. Brzina vjetra mjeri se anemometrom. Generator transformira mehaničku u električnu energiju, a može biti sinkroni ili asinkroni. Ukoliko se radi o sinkronom generatoru, opremu je potrebno proširiti uvođenjem sustava uzbuđbe ili permanentnih magneta. Vjetroelektrana u izvedbi s promjenjivom brzinom vrtnje priključuje se na mrežu putem sučelja zasnovanog na energetskej elektroni. Elektroničko sučelje može biti projektirano na temelju vrlo različitih konfiguracija. Jedinica za kompenzaciju jalove snage može u sebi uključivati uređaj za korekciju faktora snage (aktivne ili pasivne naravi) te filtere za više harmoničke članove. Filteri postaju neophodni ukoliko su elektroničke naprave priključene na mrežu. Rasklopna oprema treba biti projektirana na način koji omogućuje glatko priključenje na mrežu što predstavlja uobičajeni i standardizirani zahtjev. U standardima su također specificirani zaštitni uređaji koji su neophodni za pogon proizvodne

jedinice. Konačno, upravljački sustav vjetroelektrane može biti izveden s različitim stupnjevima složenosti. Detaljniji opis nalazi se u nastavku.

Snaga koju vjetroturbina predaje generatoru prema tipičnom obliku ovisi o brzini vjetra (slika 2). Kod vjetroelektrane s promjenjivom brzinom vrtnje, gornji dio krivulje koji se nalazi između referentne brzine vjetra v_r i izlazne brzine v_i moguće je održavati jednakim referentnoj snazi vjetroturbine P_r . Na slici 2 korištene su slijedeće oznake: P_r referentna snaga vjetroturbine (najveća snaga koju vjetroturbina može postići), v_r referentna brzina vjetra (brzina vjetra pri kojoj se postiže referentna snaga), v_u ulazna brzina vjetra (brzina vjetra pri kojoj vjetroturbina započinje predaju snage) i v_i izlazna brzina vjetra (gornja granica brzine vjetra pri kojoj vjetroturbina ostaje u pogonu).



Slika 2. Tipična krivulja ovisnosti snage vjetroturbine o brzini vjetra (bez zakretanja elisa)

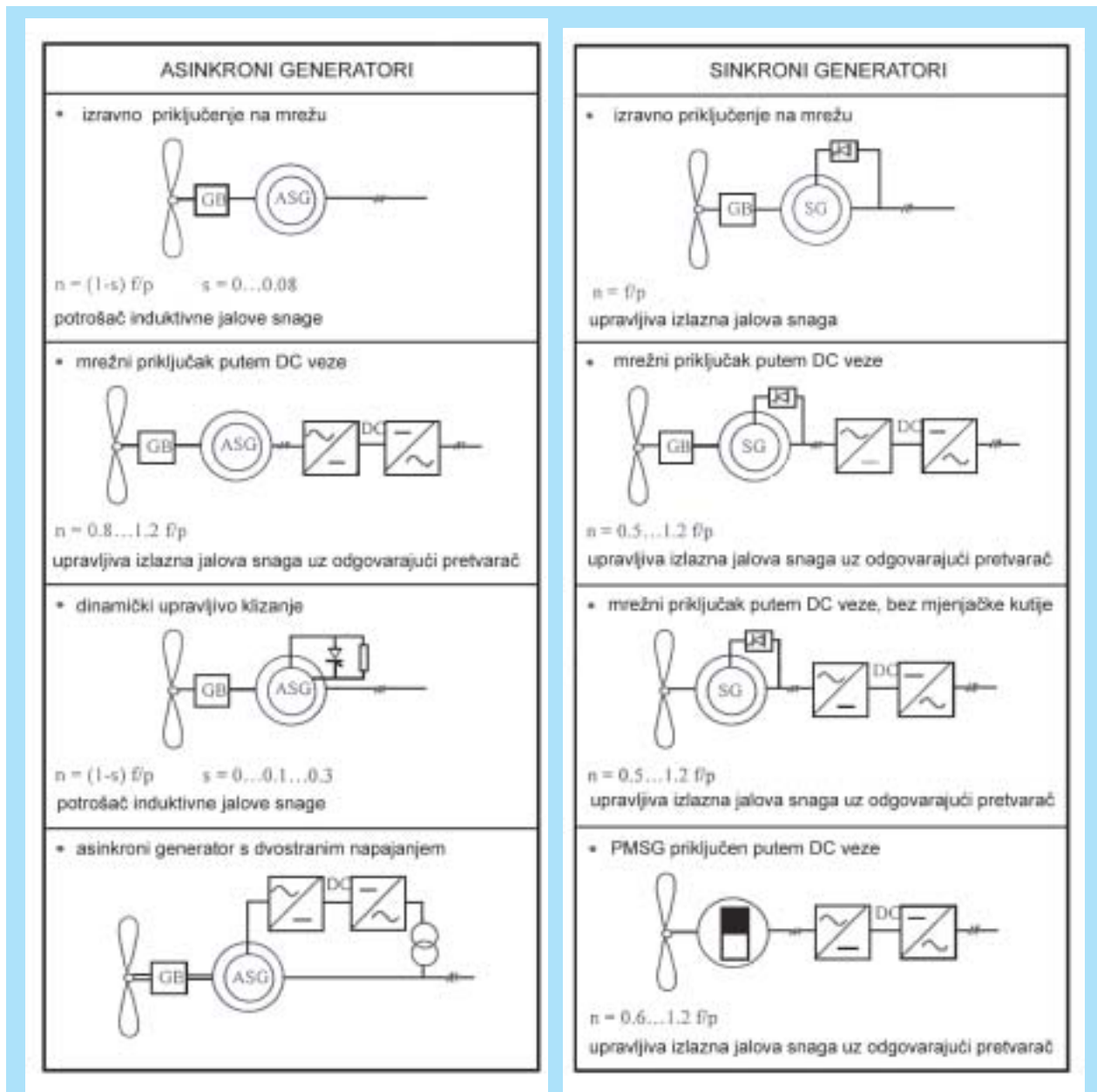
Obzirom na brzinu vrtnje, vjetroelektrane je moguće podijeliti u dvije skupine 6; sa stalnom brzinom vrtnje te s promjenjivom brzinom vrtnje. U izvedbi sa stalnom brzinom vrtnje 14, generator je izravno priključen na elektroenergetsku mrežu. Frekvencija sustava određuje brzinu vrtnje generatora te time i rotora. Niska brzina vrtnje rotora vjetroturbine transformira se u visoku brzinu vrtnje generatora putem mjenjačke kutije s prijenosnikom. Brzina vrtnje generatora ovisi o broju pari polova i frekvenciji mreže. U izvedbi s promjenjivom brzinom vrtnje 17, generator je priključen na mrežu ili putem inverterskog sustava zasnovanog na energetskej elektronici ili napajanjem uzбудnih namota generatora iz inverterskog sustava vanjske frekvencije. Brzina vrtnje okretnog magnetskog polja generatora, te time i rotora, odvojena je od frekvencije sustava. Rotor je u pogonu s promjenjivom brzinom vrtnje koja se prilagođava trenutnim stanjima brzine vjetra. Svaka vjetroturbina može biti u izvedbi sa ili bez sustava za regulaciju kuta zakreta elisa (*eng. pitch or stall regulated*). Pomoću tog regulacijskog sustava, elisa se zakreće oko njezine duže osi. Korištenjem regulacijskog mehanizma moguće je smanjiti mehaničku snagu prema karakteristikama vjetroturbine. Ukoliko vjetroturbina nije izvedena s regulacijskim sustavom zakretanja, pozornost se pridaje konstrukciji elisa. Elise se projektiraju u skladu s aerodinamičkim efektom. Na taj se način vjetroturbinu štiti od povišenja snage u uvjetima kada brzina vjetra nadvisuje nazivnu razinu.

Obzirom na vrstu priključenja na mrežu, većinu je postojećih vjetroelektrana moguće svrstati u neku od sljedećih skupina (slika 3):

- I. Vjetroelektrana u izvedbi sa stalnom brzinom vrtnje koja je izravno priključena na mrežu:
 - A. Vjetroturbina s asinkronim generatorom i
 - B. Vjetroturbina sa sinkronim generatorom.
- II. Vjetroelektrana u izvedbi s promjenjivom ili djelomično promjenjivom brzinom vrtnje:
 - A. Sinkroni ili asinkroni generator s pretvaračem u glavnom strujnom krugu,
 - B. Asinkroni generator s upravljivim promjenjivim klizanjem i
 - C. Asinkroni generator s nadsinkronom ili podsinkronom pretvaračkom kaskadom.

U svakom od navedenih sustava vjetroturbina može biti u izvedbi sa ili bez sustava za regulaciju kuta zakreta elisa. Prednosti vjetroelektrane u izvedbi sa stalnom brzinom vrtnje su jednostavnost i niski troškovi. Asinkroni generator potrebno je opremiti s dodatnim izvorom jalove snage. Vjetroelektrane u izvedbi s promjenjivom brzinom vrtnje omogućavaju veću proizvodnju električne energije, manja mehanička naprezanja mehaničkih dijelova te ravnomjerniju proizvodnju koja je manje ovisna o promjenama vjetra i njihovim u sustavu. U nekima od tih vjetroelektrana, spoj rotora vjetroturbine i generatora konstrukcijski je izveden bez mjenjačke kutije. Ponekad se pokazuje potrebnim dodatno uvesti zasebnu kompenzaciju viših harmoničkih članova zbog postojanja elektroničkih pretvarača. Izravni priključak asinkronog generatora na mrežu najčešća je vrsta priključenja. Koristi se kod velikog broja različitih vjetroelektrana čije se vjetroturbine nalaze u rasponu nazivnih snaga između 50 kW i 1500 kW. Najveće jedinice uobičajeno su izvedene bez regulacijskog sustava zakretanja elisa. Izravni priključak sinkronog generatora na mrežu primjenjuje se samo kod manjeg broja malih vjetroelektrana koje su uglavnom u samostalnim sustavima. Vjetroelektrane u izvedbi s promjenjivom brzinom vrtnje primjenjuju se sve češće.

Veličina pripadnih vjetroturbina sve više raste. Osnovni cilj pogona s promjenjivom brzinom vrtnje vjetroturbine pronalazi se u optimizaciji njezine učinkovitosti, odnosno u maksimiziranju iskorištenja raspoložive energije vjetra. Vjetroturbine s promjenjivom brzinom vrtnje tehnološki su motivirane rješenjima iz područja električnih pogona prilagodljive brzine. Pogon s promjenjivom brzinom vrtnje moguće je ostvariti korištenjem odgovarajuće kombinacije generatora i pretvarača utemeljenog na energetskej elektronici. Jedan primjer predstavlja asinkroni generator s kaveznom ili namotanom rotorom te sa statorskom ili rotorskom pretvaračkom kaskadom. U drugom primjeru, sinkroni generator s uzбудnim namotom ili uzбудnim permanentnim magnetima ima statorsko AC/DC/AC pretvaračko sučelje prema mreži. Svaka

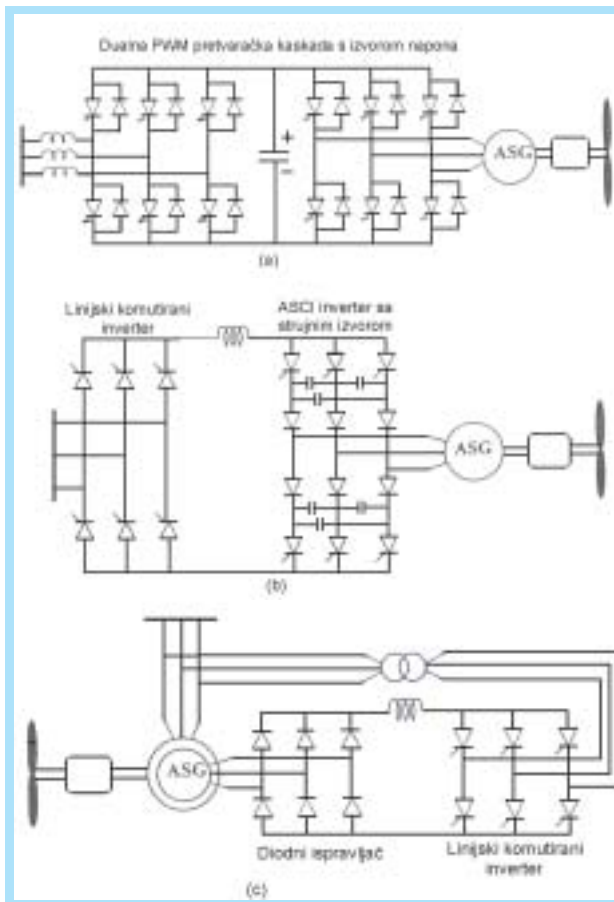


Slika 3. Vrsta priključenja vjetroelektrane na mrežu

kombinacija generatora i pretvarača ima svoje prednosti i nedostatke obzirom na troškove, složenost, pogonske i upravljačke karakteristike, dinamička svojstva, harmoničke članove, regulaciju faktora snage...

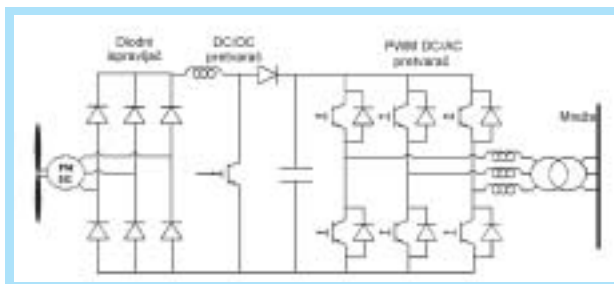
U današnjem stanju razvoja niti jedna shema se ne izdvaja kao znatno nadmoćnija u odnosu na ostale. Testiraju se i vrednuju različite konfiguracije električnog dijela vjetroelektrane. U svrhu ilustracije razmotrene su tri različite sheme vjetroelektrane u izvedbi s promjenjivom brzinom vrtnje i asinkronim generatorom (slika 4). Na slici 4.a predočena je shema prema kojoj se asinkroni generator s kaveznim rotorom priključuje na mrežu putem dualne pretvaračke kaskade s izvorom napona i pulsno-širinskom modulacijom. Prekidački elementi su GTO tiristori (*eng. gate turn off thy-*

ristors), iako se u današnje doba na razinama snage iznad 1 MW sve češće koriste IGBT tranzistori (*eng. insulated gate bipolar transistors*) koji dozvoljavaju znatno više frekvencije prekidanja. Na slici 4.b, asinkroni generator s kaveznim rotorom kombiniran je s inverter-skom kaskadom koja je zasnovana na izvoru struje. S generatorske strane, pretvarač je ASCI tipa (*eng. auto-sequential commutated inverter*). Na mrežnoj strani koristi se konvencionalni fazno upravljivi tiristori inverter. Na slici 4.c predočen je statički Kramerov pogon s asinkronim generatorom dvostrukog izlaza. U ovoj se konfiguraciji koristi asinkroni stroj s namotanim rotorom te s rotorskom pretvaračkom kaskadom. Kaskada se sastoji od diodnog ispravljača i linijski komutiranog tiristoriskog invertera.



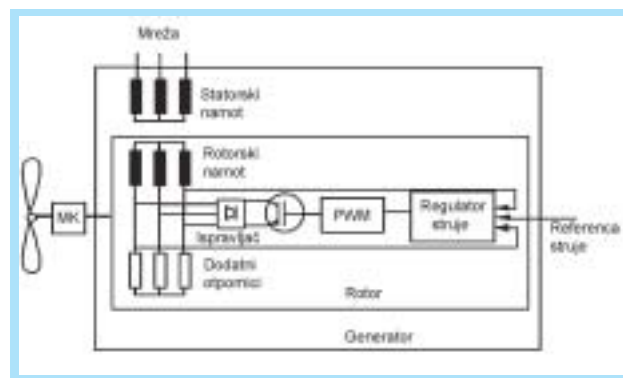
Slika 4. Različite sheme vjetroelektrane u izvedbi s promjenjivom brzinom vrtnje i asinkronim generatorom

Vjetroelektrana u izvedbi s promjenjivom brzinom vrtnje može biti izvedena sa sinkronim generatorom (slika 5). Generator je konstruiran kao višepolni stroj s permanentnim magnetima. U ovakvoj je izvedbi uklonjena potreba za mjenjačkom kutijom u pogonskom dijelu. Izlazne se veličine generatora najprije ispravljaju, a zatim invertiraju u izmjenične vrijednosti putem IGBT invertera s izvorom napona i pulsnoširinskom modulacijom. Alternativno rješenje izvedbe s promjenjivom brzinom vrtnje odnosi se na vjetroelektranu u kojoj se koristi asinkroni generator s namotan rotorom te s elektronički upravljivim vanjskim



Slika 5. Vjetroelektrana u izvedbi s promjenjivom brzinom vrtnje koja koristi sinkroni generator s permanentnim magnetima bez mjenjačke kutije

djelatnim otporom priključenim na njegove rotorske krugove (slika 6). Neki proizvođači smatraju ovu shemu poželjnijom od ostalih zbog jednostavnosti iako ima ograničeni raspon promjenjivosti brzine (do 10%). Postignuta je ravnomjernost momenta, ali bez maksimizacije izlazne električne energije.

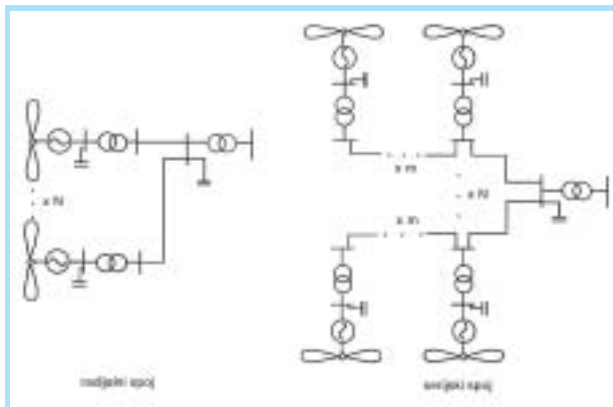


Slika 6. Vjetroelektrana u izvedbi s promjenjivom brzinom vrtnje koja koristi asinkroni generator s upravljivim promjenjivim klizanjem

Poput električnih pogona, ni u analizi prijelaznih pojava vjetroelektrana u izvedbi s promjenjivom brzinom vrtnje ne uvodi se samo jedan opći model pomoću kojeg se uz zadovoljavajuću točnost opisuje dinamičko vladanje svih različitih shema. U stvarnosti svaka konfiguracija zahtijeva izradu individualnog modela koji ovisi o vrsti generatora, pretvarača i korištenih upravljačkih sustava. Zahtjevi poput vremenskog perioda promatranja odziva i naravi prijelazne pojave također utječu na postavke modela.

Električne komponente agregata projektirane su za niske napone (do 1000 V) zbog smanjenja troškova. Stoga su u većini slučajeva neophodni transformatori. Samo ukoliko su agregati individualno priključeni na mrežu ili ukoliko je nazivna snaga vjetroelektrane manja od 100 kW, priključak se izvodi na niskonaponsku mrežu. Ako se nazivna snaga nalazi u rasponu između 100 kW i nekoliko MW, priključak se izvodi na srednje naponsku mrežu (10 kV - 66 kV) 7. Velike vjetroelektrane (na primjer više od 50 MW) priključuju se na visokonaponsku mrežu 8. U nekim je zemljama kriterij prema kojem se izvodi priključenje vjetroelektrana na mrežu vezan uz omjer između snage kratkog spoja u točki priključka i nazivne snage vjetroelektrane. Međutim, ovaj je kriterij teško zadovoljiti ukoliko je vjetroelektrana smještena u području s niskom prijenosnom moći. Agregati se na mrežu priključuju individualno ili u skupinama. Konfiguracija priključka definira se na više načina. Dva osnovna su radijalni i serijski (slika 7).

Većina se postojećih načina izvođenja procjene interakcije između vjetroelektrane i električne mreže temelji na detaljnim modelima. Njima se simulira vladanje pojedinačnih agregata ili cijelog vjetroparka tijekom prijelaznih režima rada. Osnovni nedostatak



Slika 7. Osnovne konfiguracije priključenja agregata unutar vjetroelektrane

temeljnih modela odnosi se na zahtjevnost proračuna koja može dosegnuti granicu nepraktičnosti ukoliko se razmatra vjetroelektrana s 20 i više pojedinačnih agregata. Praktičnost proračuna vrlo je značajna obzirom da pri razmatranju interakcije između vjetroelektrane i mreže uključuje brzih dinamičkih članova ne doprinosi uvijek dobivanju relevantne informacije. Korištenje reduciranog modela vjetroelektrane uvelike olakšava provođenje analize stabilnosti velikog sustava. Time se javlja potreba za dinamičkim ekvivalentiranjem vjetroelektrane, pri čemu bi ekvivalent trebao zadržati relevantnu razinu dinamike obzirom na električnu mrežu. Ekvivalenti se postavljaju na način da je omogućen proračun utjecaja fluktuacije brzine vjetra.

Prvi korak prema uspostavljanju takvih dinamičkih ekvivalenata predstavlja primjena metodologije za redukciju reda modela. Vrijedno je napomenuti da se tim tehnikama, dakle, ne izvodi agregacija već se reducira red sustava. To zapravo znači da je za svaku od postojećih vjetroelektrana neophodno riješiti manji broj jednostavnijih diferencijalnih jednadžbi. Tehnike poput singularnih perturbacija pokazale su se najprihvatljivijima u postizanju reduciranih modela uz istodobno očuvanje prihvatljive razine točnosti. U daljnjem koraku, pojednostavljenje reduciranog modela postiže se primjenom tehnika agregacije nad prethodno razvijenim singularno perturbiranim modelom vjetroelektrane. U konačnici, ovisno o uvjetima vjetra moguće je dobiti model koji sa samo jednim agregatom predstavlja vjetroelektranu.

2. MODELIRANJE VJETROELEKTRANE OBZIROM NA ZAHTJEVE STABILNOSTI

Stabilnost elektroenergetskog sustava opisuje se kao sposobnost zadržavanja stanja pogonske ravnoteže pri normalnim uvjetima pogona te kao sposobnost postizanja prihvatljivog stanja ravnoteže u uvjetima pogona nakon pojave poremećaja [1, 2, 3, 15].

Stabilnost kuta rotora generatora odnosi se na sposobnost zadržavanja sinkronizma međusobno povezanih

sinkronih strojeva unutar ees-a pri normalnim uvjetima pogona te nakon poremećaja. Stabilnost kuta ovisi o sposobnosti održavanja i/ili ponovnog uspostavljanja stanja ravnoteže između elektromagnetskog momenta i mehaničkog momenta svakog sinkronog stroja u sustavu. Nestabilnost se javlja u obliku povećanog njihanja kuta rotora nekih generatora što dovodi do gubitka sinkronizma s ostalim generatorima. Odzivi glavnih varijabli promatraju se u kratkotrajnom vremenskom periodu nakon nastanka poremećaja. Obzirom na veličinu poremećaja, stabilnost kuta se manifestira u dva oblika:

- Stabilnost kuta obzirom na male poremećaje odnosi se na sposobnost zadržavanja sinkronizma pri malim poremećajima. Poremećaji su dovoljno mali tako da je linearizacija sustava jednadžbi dozvoljena u analitičke svrhe.
- Prijelazna stabilnost odnosi se na sposobnost zadržavanja sinkronizma nakon ozbiljnih prolaznih poremećaja. Rezultirajući odziv sustava uključuje pojavu velikih odstupanja kuteva rotora generatora i pod izrazitim je utjecajem nelinearnog odnosa snage i kuta.

Stabilnost napona odnosi se na sposobnost zadržavanja prihvatljivih iznosa napona u svim čvorištima sustava pri normalnim uvjetima pogona te nakon poremećaja. Nestabilnost se javlja u obliku progresivnog pada ili porasta iznosa napona u nekim čvorištima. Glavni uzročnik nestabilnosti napona nalazi se u nesposobnosti sustava da zadrži odgovarajuću uravnoteženost proizvodnje i tokova jalove snage unutar sustava u kojem tereti imaju sposobnost oporavka snage. Odzivi glavnih varijabli promatraju se u kratkotrajnom i dugotrajnom vremenskom periodu nakon nastanka poremećaja.

Obzirom na veličinu poremećaja, stabilnost napona se također manifestira u dva oblika:

- Stabilnost napona pri malim poremećajima odnosi se na sposobnost sustava da upravlja naponima nakon pojave malih promjena (promjene opterećenja ili ispadi elemenata mreže).
- Stabilnost napona pri velikim poremećajima odnosi se na sposobnost sustava da zadrži napone unutar dozvoljenih granica nakon velikih poremećaja poput trofaznog kratkog spoja.

Stabilnost frekvencije opisuje se kao sposobnost zadržavanja frekvencije unutar nazivnog raspona vrijednosti nakon ozbiljnih poremećaja koji ponekad mogu rezultirati podjelom sustava na električki međusobno razdvojene dijelove. Stabilnost frekvencije ovisi o sposobnosti sustava da ponovo uspostavi stanje uravnoteženosti između proizvodnje i opterećenja u sustavu uz minimalni gubitak tereta. Odzivi glavnih varijabli promatraju se u kratkotrajnom i dugotrajnom vremenskom periodu nakon nastanka poremećaja. Stabilnost frekvencije ocjenjuje se samo obzirom na velike poremećaje.

Priključenje vjetroelektrana na električnu mrežu može imati značajan utjecaj na sve vrste stabilnosti. Vjetroelektrane se najčešće priključuju na distribucijsku mrežu. Suvremeni distribucijski sustavi projektirani su na način da omoguće prihvat snage iz prijenosne mreže te da je zatim razdijele potrošačima. Stoga je smjer točkova djelatne i jalove snage uvijek bio od više prema nižoj naponskoj razini. Međutim, uz značajniju penetraciju distribuiranih proizvodnih izvora tokovi snaga mogu poprimiti obrnuti smjer. Na taj način distribucijska mreža više ne bi bila pasivne naravi (napajanje potrošača), već aktivne prema kojoj bi tokovi snaga i naponi bili određeni na osnovi kako opterećenja tako i proizvodnje. Promjena tokova djelatne i jalove snage koja je uzrokovana distribuiranom proizvodnjom stvara značajne tehničke i ekonomske posljedice po elektroenergetski sustav.

Analiza distribucijskih mreža do sada nije obuhvaćala problem stabilnosti obzirom da je mreža bila pasivne naravi te da je uz stabilnu prijenosnu mrežu zadržavala stabilnost u velikoj većini slučajeva. Nadalje, u ranim shemama primjene distribuirane proizvodnje čiji je cilj bio proizvesti kWh iz novih obnovljivih izvora energije, razmatranja prijelazne stabilnosti generatora nisu bila od velikog značenja. Naime, ukoliko bi poremećaj u distribucijskoj mreži uzrokovao propad napona i ispad distribuiranog proizvodnog izvora tada bi jedini gubitak bio povezan s nemogućnosti proizvodnje tijekom kratkog vremenskog perioda. Agregat distribuiranog izvora bi se ubrzao iznad dozvoljene brzine i bio isključen proradom unutarnje zaštite. Sustav upravljanja pogonom agregata bi zatim pričekao ponovnu uspostavu prihvatljivih uvjeta u mreži i ponovo ga automatski pokrenuo. Naravno, ukoliko distribuirani izvor nije obnovljivog već kogenerativnog tipa kod kojeg bi shema proizvodnje bila posvećena većinskoj isporuci pare kao medija kritičnog za cjelokupni proces, tada bi više pozornosti bilo posvećeno očuvanju pogona generatora za slučaj udaljenijih poremećaja u mreži. U uvjetima kada je iznos tromosti agregata distribuiranog izvora nizak, a iznos vremena prorade zaštite visok, stabilnost distribucijske mreže nije moguće održati za sve eventualne poremećaje.

Osobite probleme u nekim zemljama čini neželjena prorada releja za otkrivanje brzine promjene frekvencije. Ti releji imaju vrlo osjetljiva udešenja kako bi otkrili pojavu otočnog pogona. Međutim, u slučaju velikih poremećaja poput ispada velikog središnjeg generatora, propad frekvencije uzrokuje neželjenu proradu releja koji zatim isključuju veliki broj distribuiranih izvora.

Tijekom prijelazne nestabilnosti kod sinkronih generatora dolazi do klizanja polova. Međutim, kada do ubrzavanja dolazi kod asinkronih generatora, iz mreže se povlači veliki iznos jalove struje što nadalje uzrokuje snižavanje napona u mreži i vodi prema nestabilnosti napona. Granica stabilnosti stacionarnog stanja asinkronog generatora također može ograničiti njihovu

primjenu u vrlo slabim distribucijskim mrežama. Naime, vrlo visoka impedancija izvora napajanja ili niska snaga kratkog spoja može smanjiti maksimalni moment asinkronog generatora na tako nizak iznos da upitnim postaje ostvarenje nazivnog pogona generatora.

U većini zemalja stabilnost se rijetko razmatra u postupku procjene iskoristivosti proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora. Međutim, ova će se situacija vrlo vjerojatno promijeniti u skladu s povećanom penetracijom obnovljivih izvora i njihovim doprinosom sigurnosti mreže. Vrste stabilnosti koje je potrebno razmotriti odnose se na stabilnost kuta i napona. U izoliranim sustavima poput onih na udaljenim otocima, stabilnost frekvencije postaje najznačajnijim problemom. U tim je situacijama neophodno razmotriti utjecaj iznenadnog ispada većeg broja distribuiranih izvora na dinamička svojstva izoliranog sustava. Kvarovi u mreži, ispadi konvencionalnih generatora i drugi poremećaji mogu biti uzrokom ispada velikog broja distribuiranih generatora što u nekim slučajevima dovodi do većeg nedostatka proizvodnje i privremenog propada frekvencije.

U slučaju povećane integriranosti vjetroelektrana i elektroenergetskog sustava, brze promjene vjetra i vrlo visoke brzine vjetra mogu rezultirati iznenadnim gubitkom proizvodnje što nadalje dovodi do odstupanja frekvencije i dinamički nestabilnih stanja. Njihanje frekvencije može vrlo lako aktivirati proradu frekvencijske zaštite u vjetroelektrani. Previsoke postavne vrijednosti podfrekvencijske zaštite čine ionako ozbiljnu situaciju nakon ispada proizvodnje još ozbiljnijom. Frekvencijski releji, naime, mogu isključiti distribuirane generatore te čak i povećati nedostatak proizvodnje. Ovakav razvoj situacije može dovesti do nestabilnosti frekvencije i sloma.

U analizi stabilnosti polazi se od generičkog modela proizvodne jedinice (slika 8). U postupku modeliranja vjetroelektrane nužno je provesti razmatranja elektroničkog sučelja prema izmjeničnoj mreži, generatora, vjetroturbine kao pogonskog stroja te vjetra kao primarnog izvora energije.



Slika 8. Generički model proizvodne jedinice

3. ELEKTRONIČKO SUČELJE PREMA IZMJENIČNOJ MREŽI

U starijim izvedbama vjetroelektrana nije predviđeno postojanje elektroničkog sučelja prema mreži. Elektroničko sučelje javlja se u suvremenim izvedbama. U tablici 1 na općeniti su način navedena osnovna obilježja pogona vjetroelektrane sa i bez elektroničkog sučelja prema izmjeničnoj mreži 11 .

Tablica 1. Razlike u pogonu vjetroelektrane sa i bez električnog sučelja prema izmjeničnoj mreži

Obilježje	Bez sučelja	Sa sučeljem
Regulacija napona	Ovisi o izlaznoj djelatnoj snazi vjetroelektrane.	Ovisi o izlaznoj djelatnoj snazi te o razdjeljivoj jalovoj snazi vjetroelektrane
Opterećenje voda	Moguće smanjiti u periodu visokih opterećenja.	Moguće smanjiti u periodu visokih opterećenja. Jalova snaga raspoloživa za optimizaciju ukupne prividne snage.
Upravljanje disperzivnim sustavima	Start, upravljanje i zaustavljanje agregata poznate su procedure.	Općenito, električno sučelje ima brzi odziv.
Harmonici	Ne smatraju se problemom kod većine trofaznih rotirajućih generatora.	Tehnološki starija rješenja zahtijevaju filtriranje. Naprednija su čistija, ali traže pozornost kod viših harmonika članova. Moguće je poništenje harmonika koji dolaze iz mreže.
Prenaponi i propadi napona	Namoti generatora mogu izdržati odstupanja napona.	Starija rješenja su osjetljiva na odstupanja napona. Naprednija rješenja su prilagodljivija.
Zaštita	Standardi su dovoljno dobro poznati i dokumentirani.	Standardne sheme zaštite su primjenjive na električno sučelje. Trend ide za unutarnjom programskom podrškom.

4. IZBOR GENERATORA VJETROELEKTRANE

Vjetroelektrane se uobičajeno dijele prema slijedećim osobinama agregata 9 :

- Stalna brzina vrtnje, konstantna frekvencija,
- Promjenjiva brzina vrtnje, konstantna frekvencija i
- Promjenjiva brzina vrtnje, promjenjiva frekvencija.

Proizvodne jedinice u vjetroelektranama su uobičajeno asinkroni ili sinkroni generatori. Zbog problema s pouzdanosti, istosmjerni generatori rijetko se primjenjuju. Sinkroni generatori se uglavnom koriste za pretpostavljene uvjete otočnog pogona. U slučaju odabira sinkronog generatora, uzbudni sustav i regulator brzine vrtnje potrebni su u svrhu održavanja napona i frekvencije. Asinkroni generatori se gotovo uvijek koriste u slučaju priključenja vjetroelektrane na krutu mrežu (mreža velike naponske i frekvencijske krutosti). Njihova glavna prednost nalazi se u jednostavnoj i jeftinoj konstrukciji. S druge strane, neophodno ih je opremiti s kompenzacijskim uređajem (uglavnom uklopive kondenzatorske baterije) kao i s priključnim uređajem za početnu sinkronizaciju s mrežom (*eng. soft-starter*). Sinkroni se generatori ne koriste u komercijalnim izved-

bama sa stalnom brzinom u pogonu na krutu mrežu. Sustav regulacije kuta zakretanja elisa propelera ne izvodi se u svim sustavima iako je izražena tendencija za njihovim uključenjem kod vjetroturbina čija je nazivna snaga veća od 50 0 kW.

Vjetroelektrane sa stalnom brzinom vrtnje i konstantnom frekvencijom koriste mehaničko-hidraulički sustav regulacije brzine vrtnje pomoću kojeg upravljaju elisama propelera turbine. U njima, generator može biti asinkroni ili sinkroni. Asinkroni generator dodatno je opremljen lokalnim izvorom jalove snage u svrhu održavanja samouzbude i održavanja napona na priključnicama. U pogonu je pri relativno konstantnoj frekvenciji (50 0.5 Hz) između stanja praznog hoda i nazivnog opterećenja.

U izvedbi vjetroelektrane sa stalnom brzinom vrtnje i konstantnom frekvencijom, sinkroni generator ima veći faktor efikasnosti i pouzdanosti, ali teže zadržava sinkronizam u uvjetima poremećaja brzine vrtnje nastalih zbog brzih promjena vjetra i/ili poremećaja u mreži poput kratkog spoja. Sposobnost proizvodnje jalove snage dodatna je prednost sinkronog generatora ako se vjetroelektrana priključuje na naponski slabu mrežu.

U slučaju priključenja na već izgrađenu mrežu dobre infrastrukture, asinkroni generator je u prednosti jer je znatno jeftiniji i robusniji, a ima i jednostavniji sustav upravljanja. Osim toga, uvjeti održivosti sinkronizma fleksibilniji su u usporedbi sa sinkronim generatorom.

Izvedba vjetroelektrane sa stalnom brzinom vrtnje i konstantnom frekvencijom ima optimalan pogon samo za jedan omjer između brzine vrha elise propelera i brzine vjetra. Naime, samo se pri jednom omjeru postiže maksimalna djelatna snaga. Ukoliko omjer odstupa od optimalnog, djelatna snaga manja je od maksimalne.

U literaturi je dobro poznata izvedba vjetroelektrane s promjenjivom brzinom vrtnje i konstantnom frekvencijom. Takve vjetroelektrane imaju generator s promjenjivom brzinom vrtnje i vjetroturbinu koja rotira različitim brzinama vrtnje ovisno o promjenjivosti brzine vjetra. Ostvariv je optimalni pogon za svaki omjer između brzine vrha elise propelera i brzine vjetra, odnosno za svaku brzinu vjetra. Međutim, tada su na električnoj strani vjetroelektrane povećani početni investicijski troškovi zbog složenije izvedbe priključenja na mrežu.

U slučaju primjene sinkronog generatora izvedba uključuje statički pretvarač frekvencije zasnovan na energetskoj elektronici. U slučaju primjene asinkronog generatora izvedba uključuje diodni ispravljač u mostnom spoju za regulaciju djelatnog otpora rotora i promjenu brzina/moment ($/T$) karakteristike asinkronog stroja. Istodobno su na mehaničko-hidrauličkoj strani troškovi smanjeni, jer se regulacija brzine vrtnje agregata više ne izvodi na turbini koja time postaje jednostavnija.

Nazivnu snagu generatora s promjenjivom brzinom vrtnje potrebno je dimenzionirati u iznosu koji je i do pet puta veći od optimalnog iznosa nazivne snage generatora sa stalnom brzinom vrtnje. Štoviše, osim cijene generatora povećava se i bojazan od pojave povećanja ukupne harmoničke izobličenosti zbog primjene statičkih pretvarača.

Iako je najskuplji dio vjetroelektrane njezina turbina, veličina i cijena generatora uz uključenu učinkovitost regulacijskog sustava neosporno čine značajne investicijske troškove. Neophodna je pažljiva financijska analiza kojom bi se odredila opravdanost uvođenja pogona s promjenjivom brzinom vrtnje. Prema nekim statistikama, pogon s promjenjivom brzinom vrtnje na godinu postiže i do 40% veći iznos predane električne energije od pogona sa stalnom brzinom. Ako je cijena isporučene energije dovoljno visokog iznosa, moguće je postići ekonomsku isplativost i uz veće početne investicijske troškove pogona s promjenjivom brzinom vrtnje.

Kombinirana primjena generatora s promjenjivom brzinom vrtnje i statičkog pretvarača frekvencije pomaže u izbjegavanju problema vezanih uz stabilnost kuta i regulaciju frekvencije, odnosno elektromehanička njihanja. Iznenađne promjene brzine vjetra više ne uzrokuju promjene injektirane snage vjetroelektrane. Razlika snage na rotirajućoj osovini pohranjuje se unutar kombinirane inercije agregata u obliku kinetičke energije (agregat se ubrzava/usporava kako vjetar ubrzava/usporava). Kod priključenja vjetroelektrane kao izvora konstantne djelatne snage na naponski slabu mrežu, mogući su problemi stabilnosti napona, što je dobro poznata pojava u HVDC prijenosu. Naime, statički frekvencijski pretvarač (AC/DC/AC) moguće je promatrati kao HVDC sustav primijenjen na niskom naponu i bez istosmjernog voda.

Prema dostupnim informacijama, investitori se uglavnom odlučuju za inicijalno jeftiniju varijantu, dakle za vjetroelektranu u izvedbi sa stalnom brzinom vrtnje i konstantnom frekvencijom uz korištenje asinkronog generatora u pogonu na krutu mrežu.

5. VJETROTURBINA

Aerodinamička snaga rotora vjetroturbine P_w (W) u uvjetima uravnoteženog toka zračne mase ρ , 10, 12, računa se korištenjem izraza

$$P_w = \frac{1}{2} c_p \rho A_{prop} V_{w0}^3, \tag{1}$$

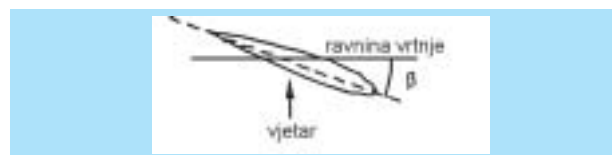
gdje $c_p(\beta, \lambda)$ označava svojstveni koeficijent, ρ gustoću zraka (1.225 kg/m³), A_{prop} površinu obrisa propelera (m²) i V_{w0} srednju brzinu vjetra (m/s).

Ukoliko se radi o vjetroturbini reguliranoj pomoću kuta zakreta elisa propelera, aerodinamička snaga rotora vjetroturbine ne iskazuje se samo u ovisnosti o

brzini vjetra, već i o svojstvenom koeficijentu $c_p(\beta, \lambda)$. Svojstveni koeficijent $c_p(\beta, \lambda)$ ovisan je o kutu zakreta elisa propelera (β) i omjeru između brzine vrha elise propelera i srednje brzine vjetra

$$\lambda = \frac{r_{prop} \omega}{V_{w0}}, \tag{2}$$

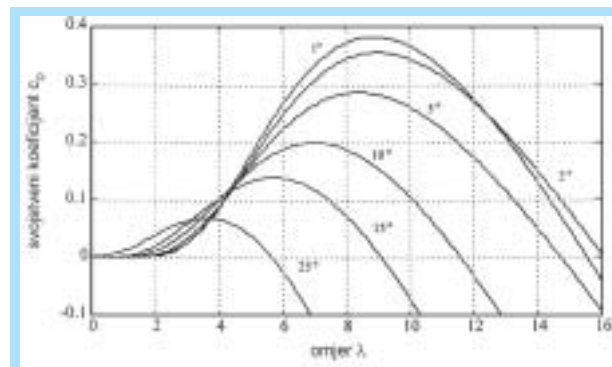
gdje r_{prop} označava radijus propelera (m), a ω brzinu rotora vjetroturbine (rad/m/s). Odnosi između kuta zakreta β , smjera vjetra i ravnine vrtnje predočeni su na slici 9.



Slika 9. Kut zakreta elisa propelera β

Svaka vjetroturbina ima različit svojstveni koeficijent $c_p(\beta, \lambda)$ koji se dobiva eksperimentalnim postupkom. Razvijene su analitičke aproksimacije koje uvelike olakšavaju njegovo izražavanje. Koeficijent se iskazuje numerički s većim brojem konstantnih faktora dobivenih metodom aproksimacije. Na slici 10 predočen je tipični oblik krivulje svojstvenog koeficijenta dobiven analitičkom aproksimacijom. Uvođenjem dodatne proporcionalno-integracijske povratne veze po snazi (ponekad i brzini vrtnje) agregata izvodi se stabilizacija odziva vjetroturbine putem kuta zakreta elisa propelera β . Slično stabilizacijsko djelovanje poznato je iz pogona sinkronog generatora u čijem se uzbuđenom sustavu nalazi stabilizator elektroenergetskog sustava (PSS). Sustav regulacije kuta zakreta elisa propelera potrebno je pravilno modelirati obzirom da kut zakreta izravno utječe na ulaznu mehaničku snagu te time i na električnu snagu koju isporučuje generator. Ovaj sustav se osim za stabilizaciju odziva koristi i za ograničavanje snage koja se predaje mreži u uvjetima visokih brzina vjetra. Kako se povećavaju vrijednosti kuta zakreta β , koriste se niže krivulje sa slike 10 čime se dobivaju smanjene vrijednosti svojstvenog koeficijenta $c_p(\beta, \lambda)$.

Stoga je u uvjetima otočnog pogona regulator brzine vrtnje/frekvencije moguće izvesti putem sustava regulacije kuta zakreta. Na slici 11 predočen je model sus-



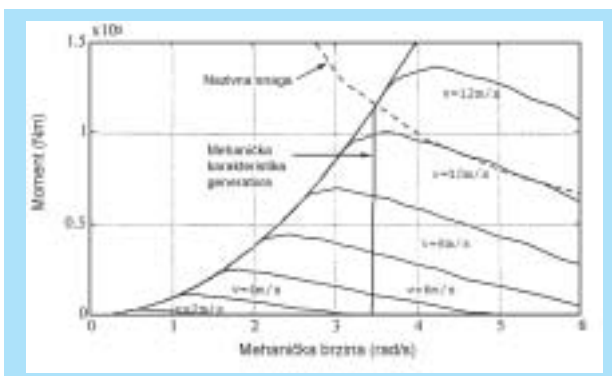
Slika 10. Svojstveni koeficijent $c_p(\beta, \lambda)$

tava regulacije kuta zakreta s povratnom vezom po izlaznoj snazi generatora P_e . Proporcionalno-integracijski član stvara referentnu brzinu promjene kuta β^* koja se ograničava u svrhu izbjegavanja preopterećenja mehanizma. Izlaz iz integratora također je ograničen, a predstavlja referentni kut zakreta β^* . Regulacijskim članom drugog reda predstavljen je aktuator te dinamika elisa propelera.



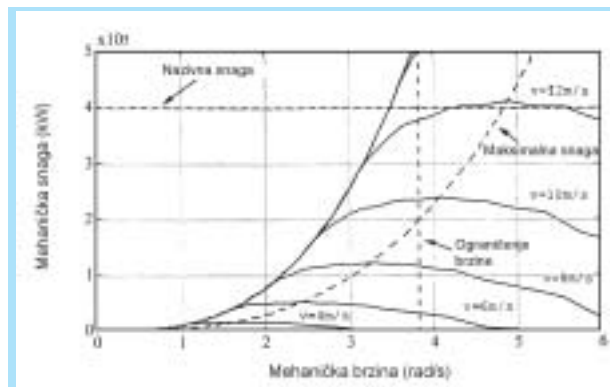
Slika 11. Sustav regulacije kuta zakreta elisa β

Na temelju svojstvenog koeficijenta $c_p(\lambda, \beta)$ te nazivnih veličina vjetroturbine i generatora moguće je definirati pogonsku točku na temelju mehaničkih karakteristika vjetroturbine. Na slici 12 predočene su karakteristike 400 kW vjetroturbine i asinkronog generatora u okviru izvedbe sa stalnom brzinom vrtnje i konstantnom frekvencijom. Pogonska točka vjetroturbine nalazi se u sjecištu između jedne od karakteristika vjetroturbine (u ovisnosti o brzini vjetra) i karakteristike generatora. Sustav upravljanja kod vjetroturbine s promjenjivom brzinom vrtnje poprima vrlo različite oblike. Prema najrasprostranjenijem obliku, aerodinamička učinkovitost optimira se iskorištavanjem najveće raspoložive snage pri svakoj brzini vjetra. Na slici 13 predočeno je upravljanje prema najvećoj raspoloživoj snazi. Crtkanom linijom spojeni su maksimumi krivulja snage, odnosno optimalne pogonske točke obzirom na različite brzine vrtnje.



Slika 12. Karakteristika 400 kW vjetroturbine i asinkronog generatora – stalna brzina vrtnje –

U uvjetima niske brzine vjetra, prate se vrijednosti krivulje snage u potrazi za maksimumom energije koju predaje vjetroturbina. Pri većim brzinama vjetra javljaju se izvjesna pogonska ograničenja poput ograničenja mehaničke brzine, nazivnog momenta i ograničenja snage sustava. U tom je području potrebno modificirati upravljačku strategiju na odgovarajući način kako se ne bi narušila ograničenja. Modifikaciju je prema jednom od pristupa moguće izvesti upravlja-



Slika 13. Upravljačka strategija zasnovana na najvećoj snazi – promjenjiva brzina vrtnje –

njem momentom generatora kako bi se ograničila brzina vrtnje rotora kod vjetroturbina bez sustava za regulaciju kuta zakreta. Prema drugom pristupu, upravlja se brzinom vrtnje putem regulacije kuta zakreta elisa propelera i postavlja referentna veličina momenta generatora na nazivnu vrijednost. Općenito, izvedbe s promjenjivom brzinom vrtnje imaju ulaznu referentnu snagu prema kojoj se izvodi regulacija njihove izlazne snage, ali samo pri vrijednostima koje su niže od najveće raspoložive snage vjetra.

Ukupni aerodinamički moment rotora definiran je kao zbroj srednjeg momenta i momenata koji su definirani različitim njihanjima. Srednji moment T_{ae0} dobiva se na osnovi (1) i (2) u obliku

$$T_{ae0} = \frac{P_w}{T} \cdot \frac{1}{2} r^3 V_{w0}^2 \left(\lambda, \beta \right) \tag{3}$$

Glavni superponirajući utjecaji na srednji moment javljaju se zbog sjenke stupa (*eng. tower shadow*), vertikalnog profila vjetra (*eng. wind shear*) i gravitacijskog opterećenja (težina svake elise).

Sjenka stupa odnosi se na pojavu smanjenja aerodinamičkog momenta elise propelera obzirom na njezin prolazak ispred stupa. Smanjenje momenta javlja se zbog smetnje u toku vjetra koju stvara stup. Promjena momenta T_{ts} za svaku elisu i definirana se izrazom

$$T_{ts} = 2 \frac{T_{ae0}}{N_b} W_{ts}(\lambda, \beta) \tag{4}$$

gdje je N_b broj elisa propelera vjetroturbine, a W_{ts} koeficijent sjenke stupa ovisan o kutu λ_i elise propelera

$$W_{ts}(\lambda_i) = t_0 t_p \cos \lambda_i - t_0 t_p \sin \lambda_i \tag{5}$$

u protivnom

U prethodnom izrazu korištene su slijedeće oznake: $p = \lambda_i / 2$, λ_i kut azimuta elise propelera i t_0 i t_p empirijski faktori.

Vertikalni profil vjetra odnosi se na povećanje brzine vjetra obzirom na povećanje visine. Ova pojava također proizvodi promjenu momenta koja je uzrokovana gradijentom brzine vjetra po uzdužnoj visini h

površine obrisa elise propelera A_r . Promjena momenta ΔT_{ws} obzirom na utjecaj vertikalnog profila vjetra definira se prema izrazu

$$T_{ws} = 2 \frac{T_{ae0}}{N_b} W_{ws}(\alpha_i) \quad (6)$$

gdje je N_b broj elisa propelera vjetroturbine, a W_{ws} koeficijent vertikalnog profila vjetra koji je ovisan o kutu α_i elise propelera prema

$$W_{ws}(\alpha_i) = m \frac{0.75r}{h} \sin^2 \alpha_i \frac{m(m-1)}{2} \frac{(0.75r)^2}{h^2} \cos^2 \alpha_i \quad (7)$$

Težina elise propelera također stvara dodatni teret. Ukoliko se elise gibaju brzinom koja je potpuno jednaka brzini osi vratila, odnosno ukoliko se cijeli rotor smatra jednim tijelom, utjecaj težine elise bio bi poništen. Međutim, u detaljnijem modelu u kojem se razmatra elastični spoj između svake elise i vratila, promjena momenta T_{wb} uslijed utjecaja težine elise ($M_{bi}g$) definira se prema izrazu

$$T_{wb} = r_{cdg} M_{bi} g \cos \alpha_i \quad (8)$$

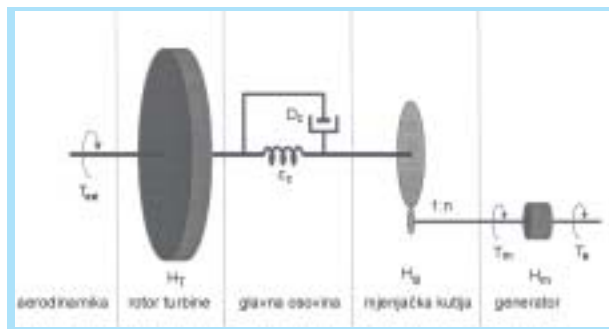
Na temelju prethodno predočenih izraza za različite doprinose, moment T_{bi} koji proizvodi svaka elisa propelera vjetroturbine definira se pomoću izraza

$$T_{bi} = \frac{T_{ae0}}{N_b} T_{ts} + T_{ws} + T_{wb} \quad (9)$$

Ukupni aerodinamički moment rotora dobiva se kao zbroj pojedinačnih momenata svake elise

$$T_{ae} = \sum_{i=1}^{N_b} T_{bi} \quad (10)$$

Zbog zahtjeva za povećanom upravljivošću vjetroturbine, momentna slijednost pogonskog sustava uobičajeno se postiže pomoću 'mekog' osovinskog spoja ili specijalnih elastičnih spojki. Pri modeliranju pogonskog sustava, potrebno je primijeniti višemasene ekvivalente. Na taj se način prepoznaju torzijska nihanja niske frekvencije koja dominiraju dinamičkim vladanjem vjetroturbine. Model pogonskog sustava uključuje tromosti vjetroturbine, generatora i mjenjačke kutije koja spaja dvije rotirajuće osovine. Red modela se određuje na temelju broja rotirajućih masa (ili spojnih masa). Dvomaseni model (turbina i generator) predstavlja rezonantni sustav manje složenosti (slika 14). Tromost mjenjačke kutije obično je znatno manja od tromosti generatora ($1/30$). Stoga mjenjačka kutija nema dinamički utjecaj pri nižim frekvencijama nihanja, odnosno zasebno se uglavnom ne modelira. Ipak, ostavlja se mogućnost njezinog uključivanja u okviru tromosti generatora. Izbor drugog reda modela zasnovan je na poznavanju dominantnih temeljnih modova rezonancije pogonskog sustava te želje za održavanjem niskog stupnja složenosti ukupnog modela. Osim s dvomasenim ekvivalentom, pogonski sustav moguće je modelirati korištenjem još dva mehanička ekvivalenta; tromasenim i šesteromasenim.

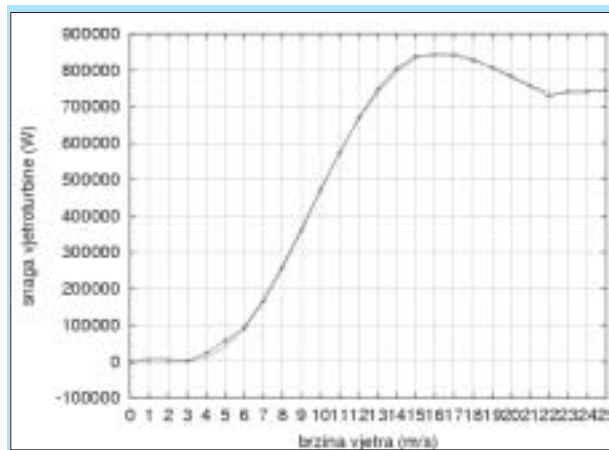


Slika 14. Dvomaseni evivalent pogonskog sustava

Za npr. vjetroturbinu sa stalnom brzinom vrtnje i konstantnom frekvencijom te bez sustava za regulaciju kuta zakreta elisa propelera, primjer ovisnosti snage o brzini vjetra predočen je na slici 15. Primjer se odnosi na vjetroturbinu NORDEX N-50 nazivne snage 800 kW. Za navedenu vjetroturbinu, ovisnost aerodinamičke snage rotora vjetroturbine P_w (W), odnosno ulazne mehaničke snage generatora, o brzini vjetra V_w (m/s) aproksimirana je polinomom šestog reda

$$P_w = a_6 V_w^6 + a_5 V_w^5 + a_4 V_w^4 + a_3 V_w^3 + a_2 V_w^2 + a_1 V_w + a_0 \quad (11)$$

U prethodnom su izrazu koeficijenti polinoma određeni minimiziranjem funkcije zbroja kvadrata odstupanja. Dobivene su slijedeće vrijednosti koeficijenta: $a_6 = -0.2166248$, $a_5 = 18.01868$, $a_4 = -541.4492$, $a_3 = 6813.510$, $a_2 = -29382.79$, $a_1 = 43470.16$, i $a_0 = -8490.896$. Obzirom da proizvođači vjetroturbina u pravilu tablično obznanjuju opisanu ovisnost, aerodinamička snaga P_w se u analizi prijelaznih pojava uglavnom proračunava na temelju aproksimacijskog polinoma (11), a ne temeljem polaznog izraza (1).



Slika 15. Ovisnost snage vjetroturbine o brzini vjetra

6. VJETAR

Analiza stabilnosti vjetroelektrane uvelike ovisi o modelu promjene brzine strujanja vjetra [13]. Promjena brzine vjetra V_w uzrokuje promjenu aerodinamičke

snage P_w , nakon čega prema jednadžbi gibanja dolazi do promjene električne snage koju generator injektira u mrežu. Promjenjivost injektirane snage uzrokuje pojavu promjenjivog iznosa napona u čvorištu priključenja vjetroelektrane te time i u široj utjecajnoj okolini unutar distribucijske mreže. Uglavnom se proračuni provode uz pretpostavku da u najsloženijem obliku brzina vjetra ima četiri komponente prema izrazu

$$V_w = V_{wB} + V_{wR} + V_{wG} + V_{wN}, \tag{12}$$

pri čemu V_{wB} predstavlja osnovnu komponentu brzine vjetra (*eng. base*), V_{wR} komponentu linearne promjene brzine vjetra (*eng. ramp*), V_{wG} komponentu udarne promjene brzine vjetra (*eng. gust*) i V_{wN} komponentu promjene brzine vjetra koja je podložna šumu (*eng. noise*).

Osnovna komponenta brzine vjetra V_{wB} definirana je pomoću izraza

$$V_{wB} = konst. \tag{13}$$

Komponenta linearne promjene brzine vjetra V_{wR} definirana je pomoću izraza

$$V_{wR} = \begin{cases} 0 & \text{za } t < T_{1R} \\ V_{ramp} \frac{t - T_{1R}}{T_R} & \text{za } T_{1R} \leq t < T_{1R} + T_R \\ MAXR * V_{wB} & \text{za } t \geq T_{1R} + T_R \end{cases}$$

pri čemu je V_{ramp} definiran u obliku

$$V_{ramp} = MAXR * V_{wB} \frac{t - T_{1R}}{T_R}. \tag{15}$$

Veličina $MAXR$ definira maksimalni koeficijent linearne promjene prema osnovnoj komponenti brzine vjetra V_{wB} , t vrijeme, T_{1R} i T_R vremenski trenutak početka i ukupno trajanje linearne promjene.

Komponenta udarne promjene brzine vjetra V_{wG} definirana je pomoću izraza

$$V_{wG} = \begin{cases} 0 & \text{za } t < T_{1G} \\ V_{sico} \sin 3 \frac{t - T_{1G}}{T_G} - \cos 2 \frac{t - T_{1G}}{T_G} & \text{za } T_{1G} \leq t < T_{1G} + T_G \\ 0 & \text{za } t \geq T_{1G} + T_G \end{cases}, \tag{16}$$

pri čemu je V_{sico} definiran u obliku

$$V_{sico} = \frac{1}{2} MAXG * V_{wB} \sin 3 \frac{t - T_{1G}}{T_G} - \cos 2 \frac{t - T_{1G}}{T_G}. \tag{17}$$

Veličina $MAXG$ definira maksimalni koeficijent udarne promjene prema osnovnoj komponenti brzine vjetra V_{wB} , t vrijeme, T_{1G} trenutak početka udarne promjene i T_G ukupno trajanje promjene.

Komponentu promjene brzine vjetra V_{wN} podložnu šumu moguće je definirati na dva načina. Prvi je poznat pod nazivom Weibull raspodjele vjerojatnosti, a drugi pod nazivom funkcije spektralne gustoće.

Prema Weibull raspodjeli vjerojatnosti, komponenta V_{wN} definirana je izrazom

$$V_{wN} = c - \ln(r)^{\frac{1}{k}}, \tag{18}$$

pri čemu k i c označavaju koeficijente nagiba i skaliranja ($k=1.9$ za $A=6.8$ m/s, $c=0.1V_{wB}$), a r slučajni broj temeljen na jednolikoj raspodjeli unutar intervala 0:1. Prema funkciji spektralne gustoće, komponenta V_{wN} definirana je izrazom

$$V_{wN} = 2 \sum_{i=1}^N S_V(i)^{\frac{1}{2}} \cos(i t - \phi_i), \tag{19}$$

pri čemu je

$$\phi_i = \frac{1}{2} i, \tag{20}$$

$$S_V(i) = \frac{2K_N F^2 |i|^{\frac{1}{2}}}{2^{\frac{1}{2}} 1^{\frac{1}{2}} \frac{F}{V_w} i^{\frac{4}{3}}}. \tag{21}$$

U izrazima (19-21), veličina i označava slučajni broj temeljen na jednolikoj raspodjeli u intervalu 0:2, $S_V(i)$ funkciju spektralne gustoće, ϕ_i brzinu (za $N=50$, $\phi_i=0.5-2.0$ rad/s), K_N površinski koeficijent ($K_N=0.001-0.040$), F skalu turbulencije ($F=600-700$ m) i V_w brzinu vjetra na ref. Visini (m/s).

7. TRANZIJENTNI MODEL AGREGATA U VJETROELEKTRANI

U studijama stabilnosti koriste se standardni modeli sinkronih ili asinkronih generatora. U aerodinamičkom dijelu, dovoljno je koristiti srednji moment (promjenjiv obzirom na brzinu vjetra) uz dvomaseni model pogonskog sustava 4, 5. Ukoliko je vjetroelektrana u izvedbi sa stalnom brzinom vrtnje te asinkronim generatorom koji je izravno priključen na mrežu, potrebe studije stabilnosti potpuno zadovoljava tranzijentni model asinkronog generatora drugog reda. Tranzijentni model drugog reda ima dvije diferencijalne jednadžbe električnih varijabli te tri diferencijalne jednadžbe gibanja rotora za dvomaseni pogonski sustav. Ukoliko je vjetroelektrana u izvedbi s promjenjivom brzinom te s elektroničkim pretvaračem na statorskim priključnicama, potrebno je koristiti potpune modele generatora (četvrtog reda za asinkroni generator i šestog reda za sinkroni generator). Ako je neophodno simulirati vladanje pretvarača i njegove sklopne operacije, koriste se izravni *abc-koordinatni* modeli generatora.

Uglavnom se investitori odlučuju za tip agregata u kojem je asinkroni generator izravno priključen na mrežu. Pogonjen je vjetroturbinom posredstvom mjenjačke kutije. Vjetroelektrana je u izvedbi sa stalnom brzinom vrtnje i konstantnom frekvencijom. Obzirom da standardni programi u sebi vrlo rijetko imaju uključeni model asinkronog generatora, u nastavku je pozornost posvećena njegovom tranzijentnom modelu. Model je s turbinske, odnosno osovinske strane prilagođen korištenju unutar vjetroelektrane. Uključen je u vlastiti programski paket za simulaciju prijelaznih

elektromehaničkih pojava u višestrojnom elektroenergetskom sustavu obzirom na dinamičke i statičke aspekte analize. Polaznu osnovu izvoda tranzijentnog modela asinkronog generatora predstavlja tranzijentni model asinkronog motora.

Osnovna diferencijalna jednadžba koja opisuje dinamiku električnog dijela tranzijentnog modela asinkronog generatora definirana je izrazom

$$\frac{d\bar{E}'_{gen}}{dt} - j_{os} s \bar{E}'_{gen} - \frac{1}{T'_0} \bar{E}'_{gen} j(X - X') \bar{I}'_{gen}, \quad (22)$$

u kojem se reaktancija X , vremenska konstanta T'_0 i pu frekvencija ω_s dobivaju korištenjem jednadžbi

$$X = X_s + X_{mag}; T'_0 = \frac{X_r + X_{mag}}{\omega_s R_r}; \omega_s = 1 \frac{d}{dt} n. \quad (23)$$

Nakon d-q dekompozicije, izraz (22) postaje

$$\frac{dE'_q}{dt} (\omega_s - \omega_m) E'_d - \frac{E'_q}{T'_0} \frac{X - X'}{T'_0} I_d, \quad (24)$$

$$\frac{dE'_d}{dt} (\omega_s - \omega_m) E'_q - \frac{E'_d}{T'_0} \frac{X - X'}{T'_0} I_q. \quad (25)$$

Kod jednomasenog rotora, dinamika osovine agregata definirana je diferencijalnom jednadžbom

$$\frac{d}{dt} \frac{T_m D}{2H} - \frac{T_e}{T_m}, \quad (26)$$

u kojoj T_e i T_m označavaju elektromagnetski i mehanički moment generatora (pu), D_Σ ukupni koeficijent prigušenja (pu/pu), ω_m brzinu vrtnje generatora (pu) i H vremensku konstantu tromosti agregata (s). Za slučaj korištenja jednomasenog rotora, konstanta H_Σ uzima se jednakom odgovarajućoj konstanti vjetroturbine za poremećaje koji dolaze sa strane primarnog izvora energije, odnosno vjetra. Za poremećaje koji dolaze sa strane električne mreže, konstanta H_Σ uzima se jednakom odgovarajućoj konstanti asinkronog generatora. Približan odnos konstanti tromosti vjetroturbine i generatora reda je veličine 10:1.

Elektromagnetski T_e i mehanički T_m momenti proračunavaju se temeljem izraza

$$T_e = (E'_d I_d - E'_q I_q) / \omega_s; T_m = \frac{P_w}{\omega_m} \frac{1}{S_{ngen}}; \quad (27)$$

Kod dvomasenog rotora 4, 5, dinamika osovine agregata koja je sastavljena od dva rotora povezana pomoću spojke, definirana je pomoću slijedećih diferencijalnih jednadžbi

$$\frac{d}{dt} \frac{c}{T} \frac{m}{n}, \quad (28)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{T}{T} \frac{P_w(V_w)}{S_{ngen}} \frac{1}{2H_T} c_c c_c (D_c D_T) T \frac{D_c}{n} m, \quad (29)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{m}{n} \frac{c}{n} \frac{D_c}{n} \frac{D_m D_g}{n^2} \frac{T_e}{n^2}, \quad (30)$$

u kojima je

- c kut torzije osovine između rotora vjetroturbine i rotora asinkronog generatora (rad_c),
- τ brzina vrtnje rotora vjetroturbine i generatora (pu, u stacionarnom stanju vrijedi $\tau = \tau_m/n$),
- $I:n$ reduktorski prijenosni omjer između dvije brzine,
- 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 koeficijent torzijskog prigušenja spoja između rotora vjetroturbine i rotora generatora (pu/pu),
- D_T koeficijent prigušenja vjetroturbine (pu/pu),
- D_g koeficijent prigušenja mjenjačke kutije (pu/pu),
- D_m koeficijent prigušenja generatora (pu/pu),
- H_T vremenska konstanta tromosti vjetroturbine (s),
- H_g vremenska konstanta tromosti mjenjačke kutije (s), i
- H_m vremenska konstanta tromosti generatora (s).

Obzirom na planiranu izgradnju vjetroelektrana u Republici Hrvatskoj u Energetskom institutu "Hrvoje Požar" pokrenute su aktivnosti vezane uz analizu tehničkih uvjeta njihovog priključenja na mrežu. Korištenjem opisanih modela provedena su istraživanja čiji su rezultati predstavljeni u studiji "Utjecaj vjetroelektrane na naponske i strujne prilike u elektroenergetskoj mreži", N. Dizdarević, M. Majstrovic, S. Žutobradić, D. Bajs. Proračuni su izvedeni obzirom na priključenje iste vjetroelektrane na dvije naponski različite lokacije (Ravna 1 – Pag i Stupište – Vis) gdje su ukupne aktivnosti doživjele najveći pomak.

8. ZAKLJUČAK

Model ees-a s aspekta priključka vjetroelektrana na distribucijsku mrežu opisan je sa stajališta izbora izvedbe vjetroelektrane obzirom na vrstu priključenja na mrežu te stalnost brzine vrtnje. Predočen je tranzijentni model asinkronog generatora. U današnje doba, integracija malih distribuiranih jedinica za proizvodnju električne energije u distribucijsku mrežu predstavlja realnu proizvodnu opciju u većini razvijenih i srednje razvijenih zemalja. Veća penetracija distribuiranih izvora očekuje se u idućih nekoliko godina. Svi današnji igrači u elektroenergetskom sektoru trebaju spoznati mogući utjecaj vjetroelektrana kao distribui-

ranih izvora na elektroenergetski sustav. U okviru ovog članka predložen je model vjetroelektrane pogodan za analizu tehničkih aspekata koji su pridruženi pogonu vjetroelektrane kao distribuiranog izvora električne energije u okviru distribucijske mreže. U ovom je radu trenutni status tehnološkog razvitka vjetroelektrana nadopunjen s odgovarajućim modelom uporabljivim u proračunima tokova snaga, kratkog spoja i stabilnosti kuta i napona. Te je proračune nužno provesti u numeričkim studijama kako bi se ukazalo na električku kvalitativnost/kvantitativnost lokacije priključenja vjetroelektrane u okviru distribucijske mreže. Električko vladanje iste vjetroelektrane na naponski različitim lokacijama mreže može biti vrlo različito. Električki uvjeti u mreži mogu ograničiti priključenje vjetroelektrane unatoč visokoj kvaliteti njezine tehnološke izvedbe.

LITERATURA

- 1 V. AKHMATOV: "A dynamic stability limit of grid-connected induction generators", *Proc. IASTED Conference on Power and Energy Systems*, Marbella, Spain, Sept. 2000, Paper 319-087
- 2 V. AKHMATOV: "Electromechanical interaction and stability of power systems with windmills", *Proc. IASTED Conference on Power and Energy Systems*, Marbella, Spain, Sept. 2000, Paper 319-086
- 3 V. AKHMATOV: "Modelling and transient stability of large wind farms", *Proc. 2nd International Workshop on Transmission Networks for Offshore Wind Farms*, Stockholm, Sweden, March 2001
- 4 R. CHEDID: "A comparative analysis of dynamic models for performance calculation of grid connected wind turbine generators", *Wind Engineering*, vol. 17, No. 4, 1993
- 5 R. CHEDID: "Adaptive fuzzy control for wind-diesel weak power systems", *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 15, No. 1, March 2000, pp. 71-78
- 6 CIGRE, "Modelling new forms of generation and storage", WG 38.01, Nov. 2000
- 7 Eesti Energia, "Technical requirements for connecting wind turbine installations to the power network", EE 10421629 ST 7:2001, Company Standard, 2001
- 8 ELTRA, "Specifications for connecting wind farms to the transmission network", ELT1999-411a
- 9 M. ERMIS: "Various induction generator schemes for wind-electricity generation", *Electric Power Systems Research*, vol. 23, 1992, pp. 71-83
- 10 L. FRERIS: *Wind energy conversion systems*, Prentice Hall, 1990
- 11 P. GARDNER: "Grid connection of wind turbines", *Power Generation Journal*, vol. 18, 1995, pp. 58-63
- 12 S. HEIER: *Grid integration of wind energy conversion systems*, John Wiley & Sons, 1998
- 13 IEC, "Wind turbine generator systems – PART 1 – PART 21", *IEC Standards*, IEC61400-1& IEC61400-21, 1998
- 14 H. KNUDSEN: "Induction generator models in dynamic simulation tool", *Proc. Intl. Conference on Power System Transients IPST99*, Budapest, Hungary, June 20-24, 1999, pp. 253-259
- 15 J. MILANOVIC: "Stability of distribution networks with embedded generators and induction motors", *IEEE paper*, No. 0-7803-7322-7, 2002
- 16 NORDEX, "N50/800 kW: Leading technology for first class outputs", Technical Brochure, Norderstedt, Germany, 2002
- 17 P. NOVAK: "Modeling and control of variable-speed wind-turbine drive-system dynamics", *IEEE Control Systems*, Aug. 1995, pp. 28-38

WIND POWER PLANTS' OPERATION

The paper presents the generic model of wind to electric energy conversion. General scheme of wind power plants concerning three types of energy is discussed: wind, mechanical and electric energy. In order to analyze wind power plant operation it is necessary to consider the electronic interface to alternating current system, wind turbine generator as power generating engine and wind as primary energy source. Basic characteristics of wind power plants' operation are described from the point of choice of power plant design considering the type of connection to the grid as well as the stability of main axle's rotating speed.

DER EINSATZ VON WINDKRAFTWERKEN

Im Artikel ist ein angeeignetes Modell der Umwandlung der Energie des Windes in die elektrische Energie vorgezeigt. Das allgemeine Wirkschaltplan des Windkraftwerkes, alle im Projekt umfasste Anlagenteile jeder der drei Energieformen (Windenergie, mechanische und elektrische Energie) beinhaltend, ist in Betracht gezogen. Zwecks Untersuchung des Windkraftwerkes im Betrieb, ist eine Beurteilung der elektronischen Schnittstelle zum Wechselstromnetz, des Generators, der Windturbine, sowie des Windes, als primären Energieträgers, unentbehrlich. Die Grundmerkmale des Windkraftwerkbetriebes sind vom Standpunkt der Bauartwahl des Windkraftwerkes - seine Ankoppelungsart an das Versorgungsnetz berücksichtigend -, und vom Standpunkt der Stätigkeit der Drehgeschwindigkeit der Hauptwelle aus, betrachtet.

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 – 04 – 24.