

DISTRIBUIRANI IZVORI ELEKTRIČNE ENERGIJE

Distribuirana proizvodnja (engl. *Distributed generation* – DG) je termin koji se u elektroenergetici koristi za proizvodnju električne energije na lokaciji potrošača.

Samim tim, **distribuirani izvori električne energije** (DI) su izvori električne energije locirani u blizini potrošača, odnosno na teritoriji ili u samoj blizini potrošačkih konzuma.

Distribuirani izvori se najčešće priključuju na distributivnu mrežu, što u principu pomaže smanjivanju gubitaka u prenosnom sistemu.

Distribuirani izvori predstavljaju decentraliziranu proizvodnju električne (i toplotne) energije i kao takvi povećavaju pouzdanost snabdijevanja potrošača električnom energijom i u principu smanjuju gubitke u prenosnoj mreži. Takođe, njihovom primjenom se smanjuje emisiju štetnih materija u okolinu.

Osnovne povoljnosti proizvodnje iz DI su:

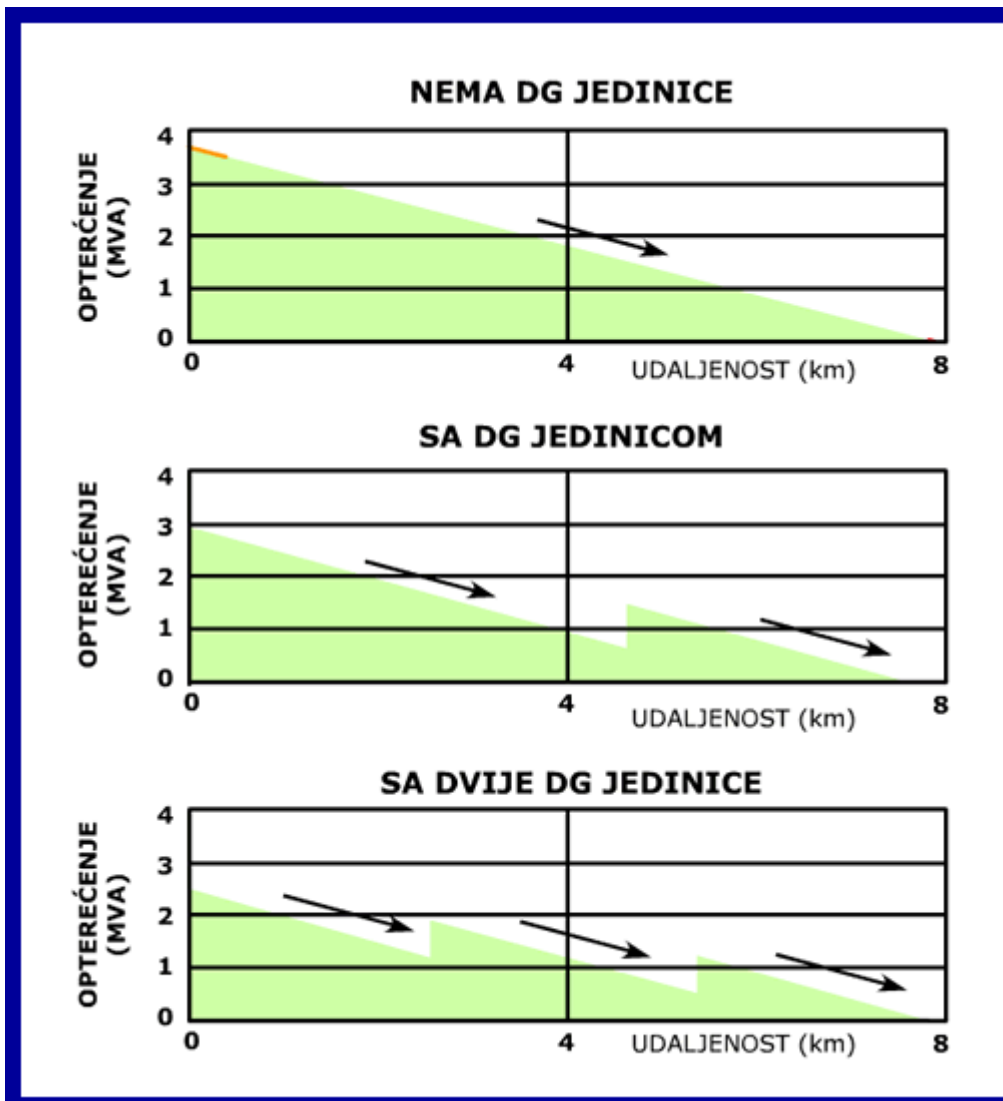
- Energija se proizvodi u blizini, odnosno na samom mjestu potrošnje,
- Povećava se sigurnost snabdijevanja,
- Očuvanje okolice i klime (manje emisija štetnih materija u okolinu)
- Bolje iskorišćenje mreže sa promjenom parametara režima koji su u osnovi pozitivnog karaktera (poboljšanje naponskih prilika i smanjenje gubitaka - *slika*), ali mogu imati i negativne efekte u odnosu na naponske prilike i gubitke električne energije.

Priključak DI na distributivnu mrežu, bez obzira na snagu elektrane i naponski nivo, odnosno mjesto priključa, dovode do značajnih promjena pogonskih parametara distributivne mreže, koje se mogu grupisati u stacionarne i dinamičke karakteristike.

Posmatrajući samo stacionarne karakteristike, treba istaći dva osnovna aspekta:

- naponske prilike duž radijalnog odvoda distributivne mreže na koju je priključen jedan ili više DI,
- uticaj na gubitke snage i energije u distributivnoj mreži.

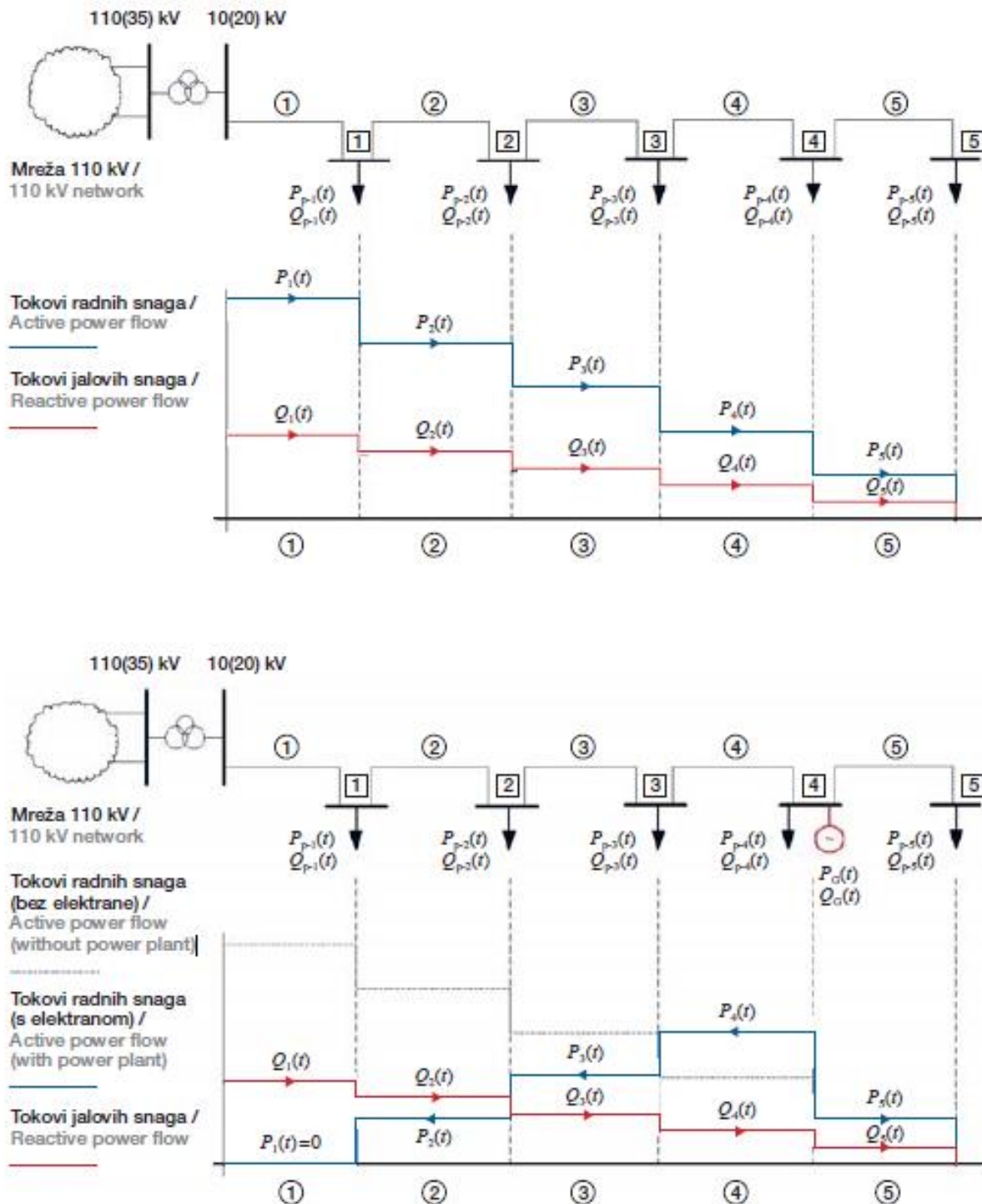
Oba navedena aspekta mogu imati pozitivne i negativne uticaje, zavisno od tipa i režima rada DI s jedne strane, te režimu opterećenja i tehničkih karakteristikama distributivne mreže sa druge strane.



Slika 1.

Uticaj priključka DI na gubitke snage i energije u distributivnoj mreži, ilustrovaćemo na sljedećem primjeru.

U tzv. pasivnoj distributivnoj mreži aktivne i reaktivne snage u granama mreže $P_i(t)$, $Q_i(t)$ rezultat su isključivo potrošnje, odnosno potrošača priključenih na kraju (u odnosu na napojnu tačku) posmatrane grane mreže i gubitaka snage u granama (koji su obično reda veličine do nekoliko postotaka). Zbog toga se na radijalnom izvodu distributivne mreže (npr. Izvodu 10 kV ili 20 kV) snage u granama smanjuju kako se kreće od napojne tačke prema kraju izvoda, pa se i gubici koncentrišu na početnim granama, te opadaju prema kraju izvoda. Na slici 2 je prikazan primjer 10(20) kV- nog izvoda napajanog iz TS x/10(20) kV sa 5 čvorova (mjesto priključka TS x/0,4 kV) i 5 dionica (grana vodova). Grafikonom su prikazani tokovi aktivnih i reaktivnih snaga duž izvoda, tj. po svim granama. Potrošnja aktivne i reaktivne snage u i -tom čvorištu označena je sa P_{p-i} , odnosno Q_{p-i} .



Slika 2.

Ako se npr. u čvoru 4 priključi DI – mala elektrana, ona će u trenutku t proizvoditi aktivnu snagu $P_G(t)$ i reaktivnu snagu $Q_G(t)$, pa se takva mreža, odnosno dio mreže od napojne tačke do čvora s priključenom elektranom, naziva aktivna distributivna mreža.

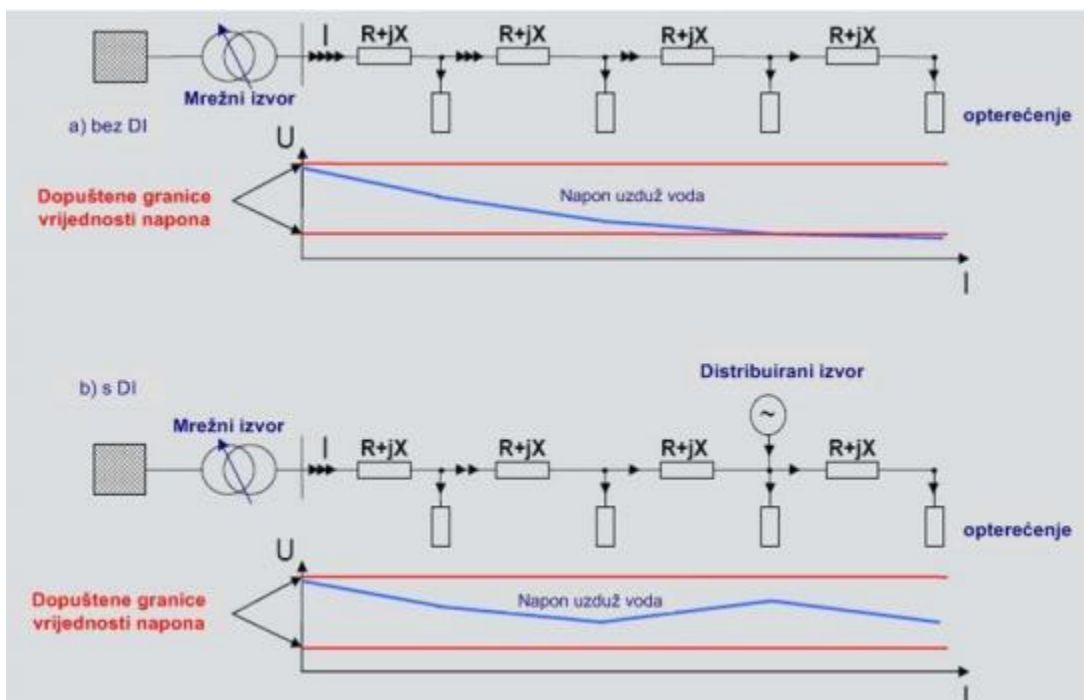
U slučaju da nema potrošnje na izvodu, aktivna i reaktivna snaga koju proizvede elektrana ima tok prema napojnoj tački i to u jednakom iznosu preko svih grana 1 do 4 (također zanemareni gubici).

Superpozicijom tokova snaga u granama koje su rezultat potrošnje i tokova snaga koje su rezultat proizvodnje elektrane, dobije se situacija prikazana na slici 2. Odabran je slučaj kad je aktivna snaga elektrane upravo jednaka potrošnji na izvodu, dok je reaktivna snaga elektrane jednaka nuli, budući da je najčešći slučaj da DI rade s faktorom snage $\cos\varphi = 1$. Međutim, u nekim slučajevima radi se o asinhronim generatorima bez kompenzacije reaktivne snage, tako da elektrana u tom slučaju predstavlja dodatnog potrošača reaktivne snage, povećavajući na taj način opterećenje grana reaktivnom snagom.

Prikazani primjer ilustruje tipičnu situaciju u aktivnoj distributivnoj mreži, u kojoj se mijenja iznos i smjer tokova aktivnih snaga u svim granama od napojne tačke do mjesta priključka elektrane u mreži.

Sa stanovišta gubitaka aktivne snage, elektrana u ovakvom slučaju ima pozitivni efekat, budući da u cjelini smanjuje tokove aktivnih snaga u mreži, pa tako i gubitke aktivne snage. Međutim, u slučaju da je proizvodnja aktivne snage elektrane znatno veća od ukupne potrošnje radne snage na izvodu, dobiti će se obrnuti efekat, tj. povećanje ukupnih tokova aktivne snage po granama, tako da će ukupni gubici aktivne snage biti veći.

Na sljedećoj slici je prikazan tok vrijednosti napona uzduž voda (naponski profil) bez i sa DI, a s regulacijom napona u mrežnom izvoru (napojnom TR).



U principu, svako priključenje DI na mrežu zahtijeva analizu parametara režima mreže i sa tog aspekta izbor kako optimalnih karakteristika izvora tako i optimalne tačke priključenja DI na mrežu.

Napomena:

Najveće promjene u mreži se osjećaju kada je distributivna mreža veoma malo opterećena, tako da snaga koju proizvodi distribuirani generator ne može biti potrošena u samoj distributivnoj mreži, nego snaga teče prema prenosnom sistemu.

Do promjene naponskih prilika dolazi i zbog toka reaktivne snage u distributivnoj mreži, npr. ako sinhroni generator radi u poduzbuđenom sistemu ili ako je na mrežu priključen nekompensirani asinhroni generator (kome je reaktivna energija potrebna da bi uopšte mogao raditi).

Kod distributivnih mreža, pad napona duž dionica voda, otpora R i induktivnosti L ($X = \omega L$), može računati prema izrazu:

$$\Delta V = \frac{PR + QX}{V^2}$$

Distribuirani generator priključenjem na distributivnu mrežu povećava **snagu kratkog spoja** mreže, tako da se moraju ponovo razmotriti i najvjerojatnije izmjeniti zaštitne mjere koje su već postojale u distributivnoj mreži. Ako pojavu povećanja snage kratkog spoja posmatramo sa aspekta kvaliteta električne energije, onda je to pozitivna pojava. Jer veća snaga kratkog spoja distributivne mreže znači i da je bolji kvalitet električne energije u toj mreži.

Priključenje DI na distributivnu mrežu, zahtijeva proučavanje nekoliko različitih aspekata **zaštite**:

1. Zaštita DG i cijele male elektrane.
2. Zaštita od kvarova u distributivnoj mreži od struja kratkog spoja koje su značajno povećane zbog priključenja DG.
3. Zaštita od pojave ostrvskog rada.
4. Uticaj DG na već postojeću zaštitnu opremu u distributivnom sistemu.

Svi ovi aspekti izazivaju dodatna ulaganja u adaptaciju sistema zaštite, nakon priključenja DI.

Distribuirani generator kada se priključi na distributivnu mrežu postaje aktivan dio cjelokupnog sistema i ima manji ili veći **uticaj na stabilnost EES**, zavisno od same njegove snage, mjesta gde je priključen, jačine konzuma u njegovoj blizini i sl.

Ako je distribuirani generator priključen na jaku mrežu (veliki konzum) i ako je njegov uticaj takav da se može posmatrati samo kao objekat koji proizvodi kWh iz obnovljivih izvora energije, onda je njegov uticaj na tranzijentnu stabilnost zanemariv. Tj. ako dođe do poremećaja (kvara) u distributivnoj mreži koji za posljedicu ima pad napona u mreži, tada će

doći do ubrzanja rotora distribuiranog generatora (koji nastoji da nadoknadi pad napona) sve dok ne proradi zaštita generatora i dođe do njegovog ispadanja sa mreže. Kada se prilike u mreži vrate u normalu, relej koji je satavni dio šeme upravljanja distribuiranog generatora poslaće signal i doći će do ponovnog automatskog uključanja generatora na mrežu. Najveća „šteta“ u tom slučaju je period (vrijeme) u kojem nema proizvodnje električne energije od strane distribuiranog generatora. Ali ako je generator priključen na slabu mrežu (mali konzum) tada on ima itekako veliki uticaj na tranzijentnu ugaonu stabilnost distributivne mreže. Promjene u takvoj mreži može izazvati i samo uključenje ili isključenje generatora na mrežu, kao i režim njegovog rada. Zavisno od tačke priključenja distribuiranog generatora i njegove snage distribuirani generator ima manji ili veći uticaj i na cjelokupan EES.

Ekonomski efekat priključenja distribuiranih izvora na distributivnu mrežu može se posmatrati kroz više uticaja.

Sa ekonomskog stanovišta, DG mogu povećati ili smanjiti gubitke u distributivnoj mreži tako da mogu uticati i negativno i pozitivno na ekonomske rezultate distributivnih kompanija. Dakle ako su distribuirani generatori priključeni na distributivnu mrežu koja ima veliki konzum, smanjiće se put potreban da energija dođe do potrošača i samim time će se smanjiti i troškovi koje izazivaju gubici u mreži, dok je sasvim suprotna slika ako je distribuirani generator priključen na mrežu malog konzuma, tada se gubici u distributivnoj mreži povećavaju na značajan nivo i praktično su distributivne kompanije na gubitku.

Trenutno, distribuirani generatori nemaju ulogu regulatora napona u mreži, mada bi se to moglo urediti određenim mrežnim pravilima tako da tokom velikih (vršnih) opterećenja (potrošnje) generator u mrežu injektira reaktivnu snagu (Q), a tokom minimalnog opterećenja mogao bi reaktivnu snagu da vuče iz mreže. Takav pokušaj uređenja rada distribuiranih generatora uveden je u Danskoj za generatore koji su instalirani u kombinovanim toplanamaelektranama (kogeneraciji). U stvari urađeno je slijedeće: distribuirani generatori rade u tri režima (tri različita faktora snage) zavisno od doba dana. Tokom perioda vršnog opterećenja generatori u mrežu injektiraju reaktivnu snagu, dok u periodu slabog opterećenja (male potrošnje) generatori rade sa jediničnim faktorom snage ili ako je to potrebno u poduzbuđenom režimu (vuku reaktivnu snagu iz mreže).

Zaštitna tehnika i ostala oprema u distributivnim mrežama priključenjem generatora više nije adekvatna ni po snazi niti po parametrima na koje je podešena zaštita, te su zbog toga potrebna dodatna finansijska ulaganja.

Uticaj DI na prenosni sistem takođe može biti pozitivan, ako se problem postavi na taj način da će tokom „vrha“ potrošnje (vršnog opterećenja) zbog rada distribuiranog generatora biti potrebno manje snage preuzeti iz prenosnog sistema, tako da će se i na prenosnim vodovima (zbog manje potražnje) smanjiti prenos snage. Taj uticaj može biti

veoma značajan ako imamo prenosne vodove koji rade na gornjoj granici svoga kapaciteta. Takođe taj uticaj može biti i negativan, npr. ako tokom „vrha“ potrošnje iz nekog razloga DG prekine proizvodnju (ispadne sa mreže), tada naglo poraste snaga koja se povlači iz prenosnog sistema koji je u tom periodu već ionako opterećen i radi na granici svoga kapaciteta.

Uticaj DI na proizvodni sistem ogleda se u činjenici da DG mogu umanjiti potražnju za izlaznom snagom velikih elektrana, ali sistem upravljanja postaje nesigurniji, jer je sada teže procijeniti stanje i potrebe u EES. Tako da sistem operator koji upravlja EES zbog nemogućnosti upravljanja DG na način kojim upravlja velikim elektranama mora u sistemu uvijek imati dodatne rezerve u odnosu na sistem bez DG kako bi održao cjelovitost i integritet EES.

Nesigurnost koju izazivaju DG u EES može se opisati na način da je teško predvidjeti njihovu mogućnost proizvodnje u svakom trenutku, prvenstveno zbog izvora energije koje oni koriste (vjetar, sunce itd.), tako da se predviđanja proizvodnje vrše na osnovu meteroloških izvještaja koji ne moraju biti tačni.

Uticaj DI na kvalitet električne energije može biti značajan i različit. Kao pozitivan uticaj može se izdvojiti poboljšanje naponskih prilika – odstupanja napona u mrežama sa DI. S druge strane DG mogu imati značajne negativne uticaje na harmonisku distorziju napona u distributivnim mrežama sa DG (prvenstveno sa vjetroelektranama).

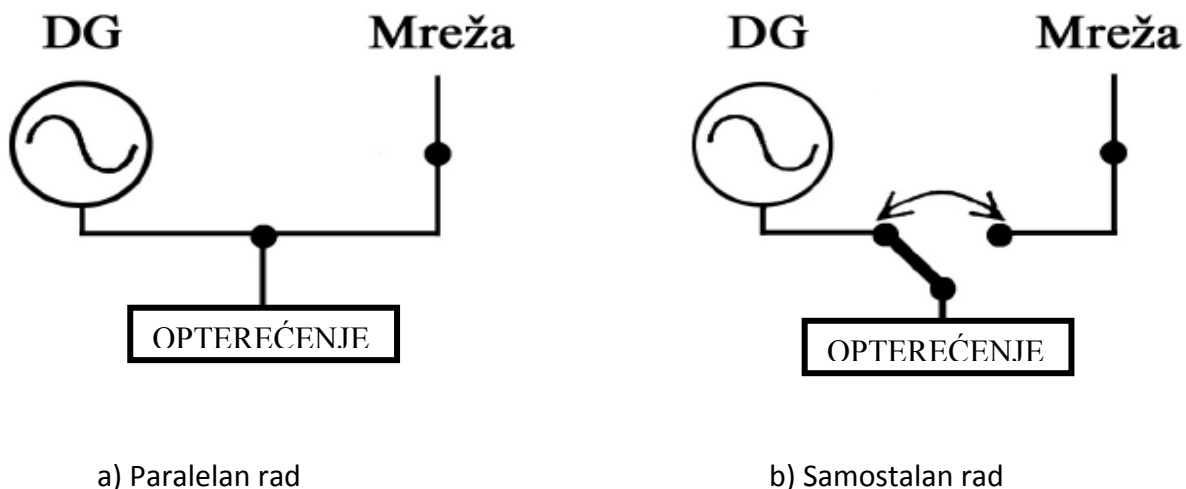
Načini spajanja DG jedinica na mrežu

Tehnički se DI, odnosno distribuirana generatorske jedinica – distribuirani generator (DG), na mrežu može spojiti na dva načina, i to: paralelnim (mrežnim) i samostalnim spojem.

Kod paralelnog spoja (*slika a.*), DG jedinica i mreža neprestano su povezane i stalno su pod opterećenjem. U tom se sistemu povezanosti prekid napajanja iz jednog izvora automatski nadoknađuje radom drugoga, bez prekida. Ovo bitno smanjuje učestanost prekida i u principu poskupljuje električnu energiju, jer DG jedinica neprestano radi, te se povećavaju troškovi održavanja i potrošnje goriva. Kod paralelnog sistema nedostatak je potreba ugradnje kontrolne i sigurnosne opreme što ga bitno poskupljuje.

Kod samostalnog pogona (*slika b.*) samo je jedan izvor uključen, dok je drugi neprekidno na raspolaganju uključivanjem sklopke. To znači da u slučaju prekida rada jednog izvora, treba da prođe određeno vrijeme da se sklopka prebaci na drugi. To može trajati kraći ili duži vremenski period, zavisno od toga, da li je prespajanje automatsko ili ručno. Rad DG jedinice i mreže u preklopnom spoju skraćuje samo vrijeme prekida, ali ne popravljaju broj prekida koji se može očekivati. Paralelni spoj redukuje i jedno i drugo.

Paralelni način spajanja je posebno interesantan, jer pri njemu može da dođe do tzv. ostrvskog rada DI.



Slika 3.

VRSTE DISTRIBUIRANIH IZVORA

Distribuirani izvori (DI), odnosno distribuirana proizvodnja (DG) obuhvata sljedeće tehnologije (od kojih su neke još u tehnološkom razvoju):

- tehnologije **obnovljivih izvora**,
- kogeneracijske tehnologije i
- tehnologija toplotnih pumpi

DISTRIBUIRANA PROIZVODNJA IZ OBNOVLJIVIH IZVORA

Distribuiranu proizvodnju dominantno čine obnovljivi izvori električne energije:

U obnovljive izvore spadaju:

- Vjetroenergija
- Hidroenergija (male i velike hidroelektrane)
- Solarna energija (fotonaponska i solarna termalna)
- Energija mora (talasa, plime i oseke, toplota mora)
- Energija biomase
- Geotermalna energija (ogromne količine energije)

Osnovni razlozi zbog kojih se promoviše upotreba obnovljivih izvora energije mogu se sumirati u tri grupe:

- Zaštita životne sredine, smanjenje emisije gasova staklene bašte i predupređenje rizika koje nosi nuklearna energetika.
- Poboljšanje energetske sigurnosti, smanjenje zavisnosti od uvoza energije i smanjenje posljedica postepenog nestajanja goriva fosilnog porijekla.
- Povećavanje ekonomske konkurentnosti, stvaranje novih radnih mjesta i novi put za tehnološki napredak.

UTICAJ NA ŽIVOTNU SREDINU: KONVENCIONALNI IZVORI – OBNOVLJIVI (ALTERNATIVNI) IZVORU

Efekti zagađenja životne sredine usled proizvodnje električne energije iz konvencionalnih elektrana

Lokalni:

- Zagađenje vazduha, zemljišta i voda (TE)
- Promjena mikroklimе (TE, HE)
- Toplotno zagađenje rječnih tokova i vazduha (TE, NE)
- Uništavanje plodnog zemljišta i stvaranje jalovišta (TE, HE)
- Stvaranje radioaktivnog otpada (NE) ...

Globalni:

- Povećanje globalne temperature na Zemlji (efekat “staklene bašte”)
- Pojava kiselih kiša
- Negativan uticaj na kvalitet voda i ekosistem

EFEKAT STAKLENE BAŠTE

Eekat staklene bašte je prirodno prisutan proces kojim se zagrijava Zemljina površina i atmosfera.

Nastaje poremećajem energetske ravnoteže između količine zračenja koje od Sunca prima i u svemir zrači Zemljina površina. Ovaj efekat predstavlja rezultat povećanja količine zračenja koje ne može od površine Zemlje da bude emitovano u svemir, već ga atmosfera upije i postane toplija.

Ukratko, Sunce emituje energiju raznih talasnih dužina, dobar dio toga stigne do Zemljine površine, doprinosi stvaranju i održavanju života na Zemlji, a dio tog zračenja potom biva emitovan u svemir i priroda je u ravnoteži.

Gasovi staklene bašte: vodena para H_2O , **ugljen dioksid CO_2 , metan CH_4 , azotsuboksid N_2O , sumpor heksafluorid SF_6 , fluorisani ugljovodonici apsorbuju dugotalasno zračenje sa Zemljine površine a propuštaju niskotalasno zračenje od Sunca.**

Povećavanjem koncentracije gasova staklene bašte u atmosferi se narušava termodinamička ravnoteža i dolazi do permanentnog povećanja temperature na Zemlji

Sa industrijalizacijom i rastom populacije, emisija gasova sa efektom staklene bašte se konstantno povećavala. U poslednjih 100 godina čovečanstvo je emitovalo gasove staklene bašte u atmosferu brže nego što su ih prirodni procesi mogli ukloniti.

Glavni izvori gasova staklene bašte su: sagorevanje fosilnih goriva, industrijski procesi, odlaganje otpada, sječa šuma, poljoprivredna proizvodnja i stočarstvo

Doprinos ugljen dioksida CO₂ zagrijavanju zemlje zbog efekta staklene bašte je oko 60%. Pri tome, ugljen dioksid ima relativno mali potencijal zagrijavanja, ali mu je koncentracija u masi gasova u atmosferi daleko najveća.

Gavni izvor ugljen dioksida CO₂ je sagorevanje fosilnih goriva kao što su ugalj, nafta i gas, te erozija šuma i zemljišta (oksidacija ugljenikovih materijala u tlu), odnosno izmjenjenih uslova i namjena korišćenja zemljišta.

Okeani i biljke (prije svega velike površine prekrivene šumom) apsorbuju CO₂ iz atmosfere (smanjuju nivo CO₂).

KISELE KIŠE

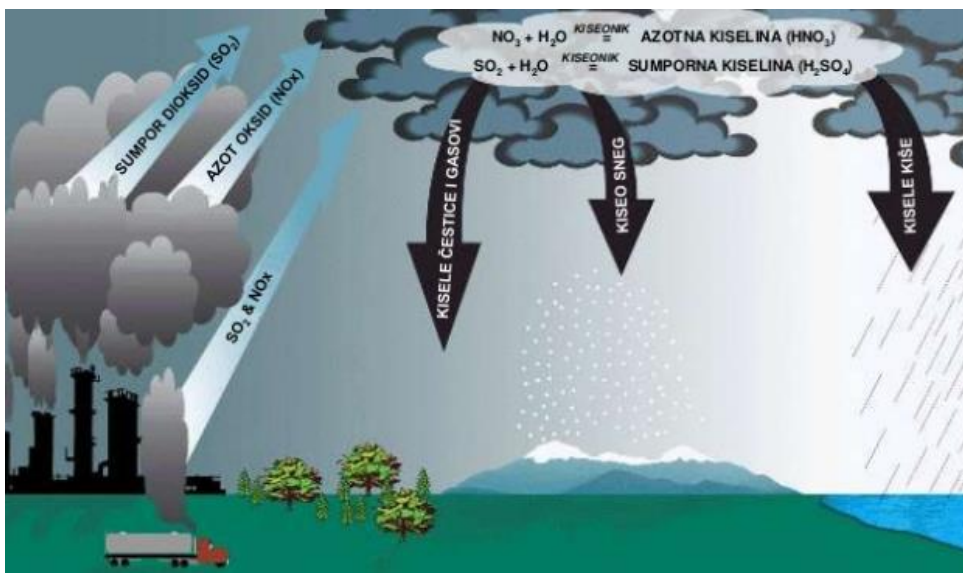
“Kisele kiše” su široko korišćen pojam za opisivanje više puteva kojima kiseline padaju iz atmosfere. Precizniji termin bi bio kisela depozicija, koja ima dva oblika:

Vlažna depozicija se odnosi na **kiselu kišu, maglu i sneg**. Sve ove kisele padavine spolja i kroz zemlju utiču na biljke i životinje. Jačina tog uticaja zavisi od niza faktora: stepena kiselosti vode, hemijskog sastava zemljišta, tipa drveća, vrste riba i drugih organizama u vodi.

Suva depozicija se odnosi na **kisele gasove i čestice**. Oko polovine kiselosti u atmosferi pada na zemlju u vidu suve depozicije. Vjetar nanosi kisele čestice i gasove na zgrade, kola, kuće, drveće... Suvo deponovani gasovi i čestice mogu takođe biti sprani kišom, čineći vodu još kiselijom.

Kisele kiše su prvenstveno posljedica sagorevanja fosilnih goriva. Većina gasova koji stvaraju kiselu kišu potiču iz električnih centrala i tvornica ili iz ispušnih gasova motornih vozila.

Kisele kiše nastaju kada se produkti emisije gasova pri sagoravanju fosilnih goriva, u prvom redu SO₂ - sumpor dioksid, NO_x – azot oksid (S obzirom na uticaj na životnu sredinu i zdravlje najznačajniji oksidi azota su: - NO azotmonoksid, - NO₂ azotdioksid, - N₂O azotsuboksid, a zajednički se označavaju kao NO_x) i SO_x – sumpor oksid, kombinuju sa vlagom u atmosferi.



Ekološki efekti kisele kiše su:

- Zakiseljavanje jezera i reka,

- Pomor riba i divljači,
- Oštećenje šuma i drugog rastinja,
- Ubrzano propadanje zgrada,
- Smanjenje vidljivosti,
- Lošiji kvalitet vazduha.
- Ozbiljan je uzročnik oboljenja (utiče na rad srca i oboljenje pluća, izaziva astmu i bronhitis)

Tehnologija obnovljivih izvora energije ima veoma važnu ulogu u smanjenju emisije CO₂ u atmosferu pa samim tim doprinosi smanjenju efekta staklene bašte. Ona je čista i ima mnogo manji uticaj na okolinu od konvencionalnih energetske tehnologije.

ANALIZE UTICAJA OBNOVLJIVIH IZVORA NA ZAGAĐENJE ŽIVOTNE SREDINE

Primjer:

Na jednoj lokaciji planirana je izgradnja dvije vjetroelektrane ukupne instalisane snage 300 MW. Na osnovu mjerenja brzina vetra u regionu proračunato (procenjeno) je da će vjetroelektrane raditi sa prosječnim godišnjim faktorom iskorišćenja kapaciteta od 27,15%. Procijeniti godišnju uštedu u emisiji gasova staklene bašte i kiselih kiša, koja se postiže proizvodnjom električne energije u analiziranim vjetroelektranama.

Rješenje:

Jedan od osnovnih motiva za nagli razvoj obnovljivih izvora energije je njihov relativno mali negativan uticaj na životnu sredinu u poređenju sa konvencionalnim elektranama. Glavni negativni uticaji proizvodnje električne energije je emisija štetnih gasova u atmosferu pri proizvodnji svakog kWh električne energije.

U tabeli 1 je dat pregled prosječne emisije neradioaktivnih gasova pri proizvodnji električne energije iz različitih izvora. Navedene vrijednosti predstavljaju ekvivalentne emisije u koje su uključene i emisije koje su prouzrokovane proizvodnjom elemenata elektrane i njihovom montažom.

Tabela 1. Tipična emisija gasova pri proizvodnji električne energije iz različitih izvora

Tip elektrane	CO ₂ (mg/kWh)	NO _x (mg/kWh)	SO ₂ (mg/kWh)	Čvrste čestice (čad) (mg/kWh)
Ugalj/lignit	986000	2986	16511	347
Nafta	1131178	5253	81590	128
Natural gas turbine	560000	1477	152	34
Natural gas combined	450000	756	152	6
Nuklearna	21435	51	27	2
Hidro	22696	23	33	5
Vetro	17652	32	54	20
Solarna (fotonaponska)	49174	178	257	101
Biomasa	58000	1325	76	269
Geotermalna	18913	280	20	0

Glavni negativni uticaji proizvodnje električne energije, odnosno emisije štetnih gasova, pri radu elektrana su:

- Globalno zagrijavanje zbog efekta staklene bašte
- Pojava kiselih kiša

Ima i drugih negativan uticaja na kvalitet voda i ekosistem, npr. amonijak NH₃.

Svaki od navedenih štetnih gasova koji se emituju u atmosferu u manjoj ili većoj mjeri uzrokuje navedene negativne uticaje na životnu sredinu. Uticaj pojedinih gasova na određenu kategoriju zagađenja životne sredine se kvantifikuje preko odgovarajućih koeficijenata. U tabeli 2 navedene su vrijednosti tih koeficijenata (*Characterization factor – Udj*) za osnovne emisije gasove koji su od interesa za ovu analizu.

Kvantifikacija uticaja proizvodnje električne energije na određenu kategoriju ugrožavanja životne sredine se posmatra kroz utvrđivanje nivoa ekvivalentne emisije određenog referentnog gasa (CO₂ je referentni gas za globalno zagrevanje, SO₂ za stvaranje kiselih kiša i PO₄³⁻ za ugrožavanje voda i ekosistema, amonijak NH₃ ...).

Tabela 2. Faktori uticaja emisijih gasova na zagađenje životne sredine

Kategorije uticaja	Inventory parameter	Characterization faktor U	Reference	Value U (kg _{material} /kg _{reference})
Globalno zagrevanje	CO ₂	Global warming potential (GWP)	CO ₂ equiv.	1
	CH ₄		CO ₂ equiv.	21
	N ₂ O		CO ₂ equiv.	310
Kisele kiše	SO ₂	Acidification potential (AP)	SO ₂ equiv.	1
	NO _x		SO ₂ equiv.	0,7
	NH ₃		SO ₂ equiv.	1,88
	HCl		SO ₂ equiv.	0,88

Za analiziranu vjetroelektranu može se procjeniti ukupna godišnja proizvodnja električne energije:

$$W = Pk, T = 300 \cdot 0,2715 \cdot 8760 = 713,388 \text{ GWh} / \text{god.}$$

Imajući u vidu podatke date u tabelama 1 i 2 i utvrđenu godišnju proizvodnju električne energije perspektivnih vjetroelektrana, mogu se proceniti ekvivalentne emisije referentnih gasova:

- za globalno zagrevanje, ekvivalentno CO₂
- za stvaranje kiselih kiša, ekvivalentno SO₂

Ukupna godišnja emisija ekvivalentnog ugljen-dioksida CO₂ pri proizvodnji električne energije u vjetroelektranama, mjerodavna za efekat staklene bašte, je:

$$M CO_2^{VE} = W(mCO_2 + U_{dj}mNO_x) = 713,388(17652 + 310 \cdot 32) = 19.700 tCO_2e / god$$

Ukupna godišnja emisija ekvivalentnog sumpor-dioksida SO₂ pri proizvodnji električne energije u vjetroelektranama, mjerodavna za efekat kiselih kiša, je:

$$M SO_2^{VE} = W(mSO_2 + U_{dj}mNO_x) = 713,388(54 + 0,7 \cdot 32) = 54,5 tSO_2e / god$$

Ekološka valorizacija projekta vjetroelektrane se izražava kroz uštedu u emisiji analiziranih referentnih gasova u odnosu na emisiju tih gasova pri proizvodnji iste količine električne energije u termoelektrani na lignit (TE).

Ukupna godišnja emisija ekvivalentnog CO₂ pri proizvodnji električne energije u ekvivalentnoj TE je:

$$M CO_2^{TE} = W(mCO_2 + U_{dj}mNO_x) = 713,388(986000 + 310 \cdot 2986) = 1.364.000 tCO_2e / god$$

Ukupna godišnja emisija ekvivalentnog SO₂ pri proizvodnji električne energije u ekvivalentnoj TE je:

$$M SO_2^{TE} = W(mSO_2 + U_{dj}mNO_x) = 713,388(16511 + 0,7 \cdot 2986) = 13.600 tSO_2e / god$$

Na osnovu prethodnih proračuna mogu se utvrditi uštede u emisiji pojedinih gasova pri radu vjetroagregata:

Ušteta u emisiji CO₂:

$$M CO_2^{TE} - M CO_2^{VE} = 1.344.300 tCO_2e / g$$

Ušteta u emisiji SO₂:

$$M SO_2^{TE} - M SO_2^{VE} = 13.545,5 tSO_2e / g$$

Proizvodni kapaciteti električne energije

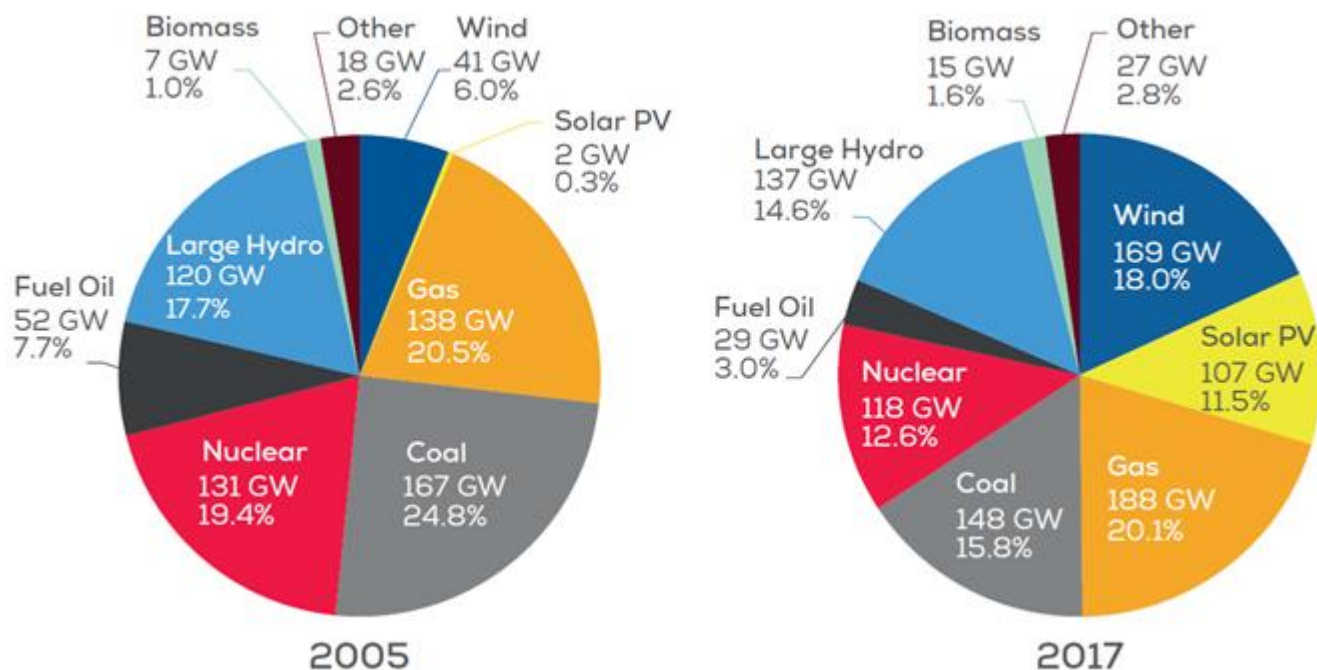
Glavni izvori energije u prošlom stoljeću a i u sadašnjosti su [neobnovljivi izvori energije](#). To su: [ugali](#), [nafta](#), [prirodni gas](#), [nuklearna energija](#)

Osnovni problemi kod neobnovljivih izvora energije su:

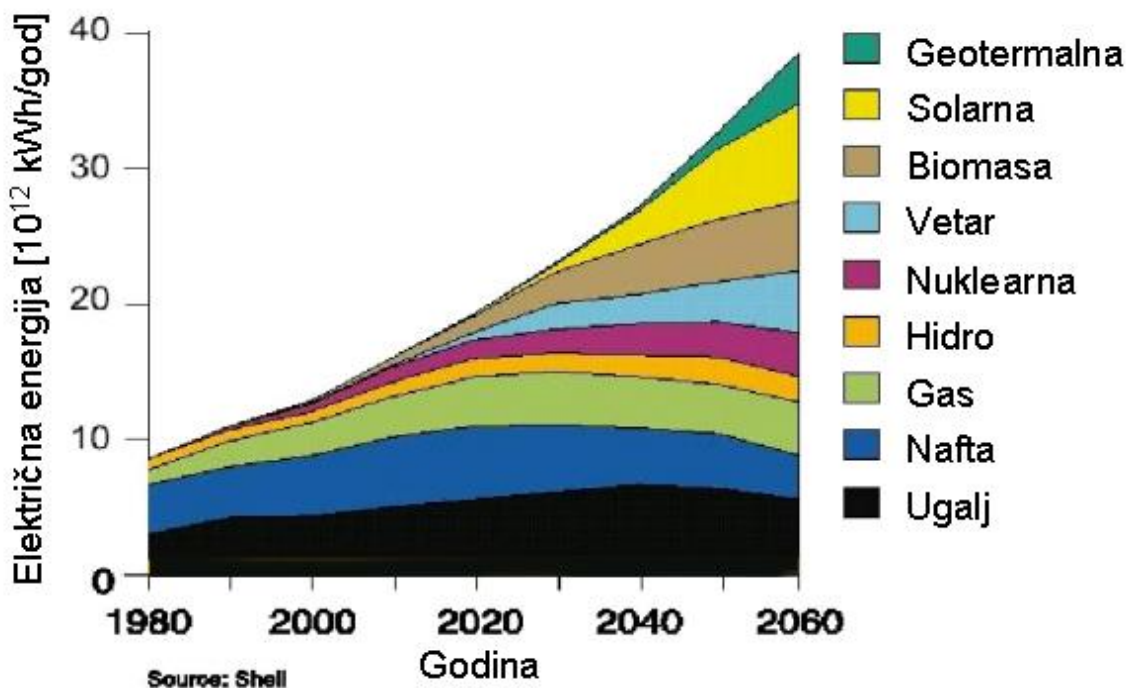
- Ima ih u ograničenim količinama.
- Zagađuju okolinu (Sagorevanjem fosilnih goriva oslobađa se velika količina CO2 koji doprinosi povećavanju efekta staklene bašte, i drugi negativne uticaje na životnu sredinu).
- Nuklearna goriva nisu opasna za atmosferu, ali nuklearni otpad ostaje radioaktivan duži niz godina i mora biti skladišten u objektima specijalne namjene, uz veliki rizik po okolinu u incidentnim slučajevima.

Struktura proizvodnih kapaciteta električne energije u EU izražena u [GW] na kraju 2005. i 2017. godine

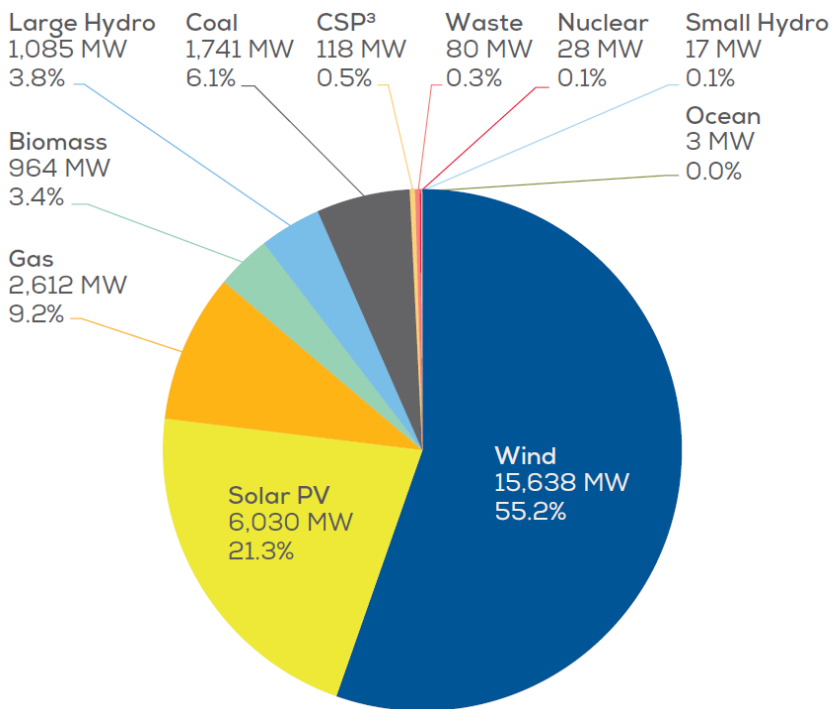
Share in installed capacity in 2005 and 2017



Struktura / ostvareno i prognoza/ učešća pojedinih primarnih energenata u ukupnoj svetskoj proizvodnji električne energije

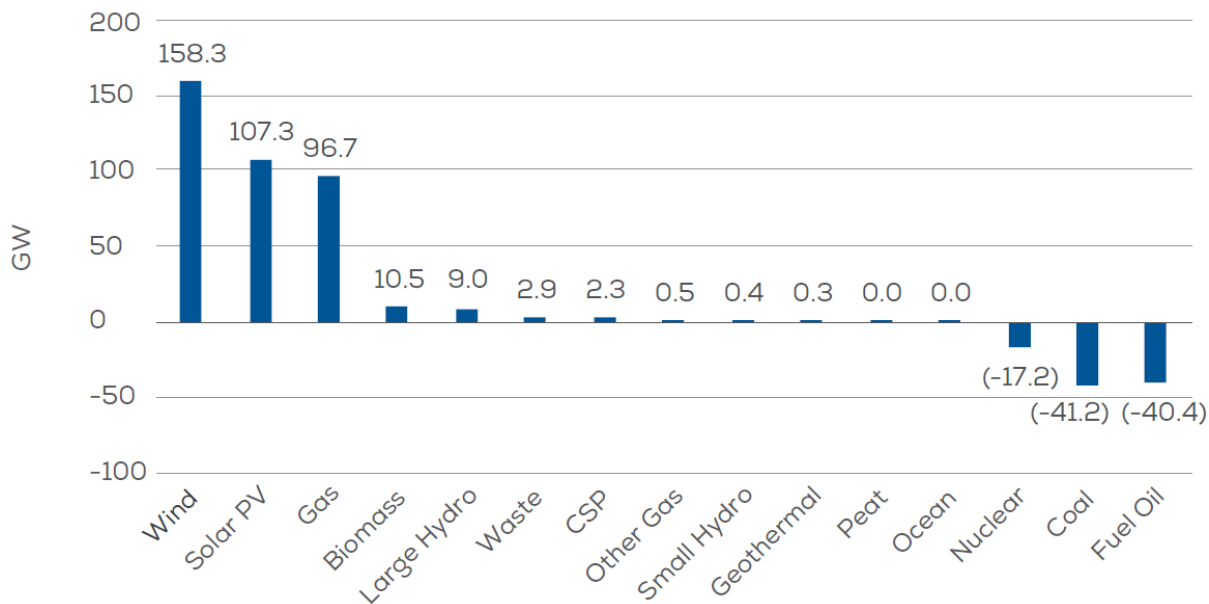


Struktura novoizgrađenih izvora električne energije u EU u 2017. godini



Struktura izgrađenih i dekomponovanih izvora električne energije [MW] u EU 2000 - 2017.

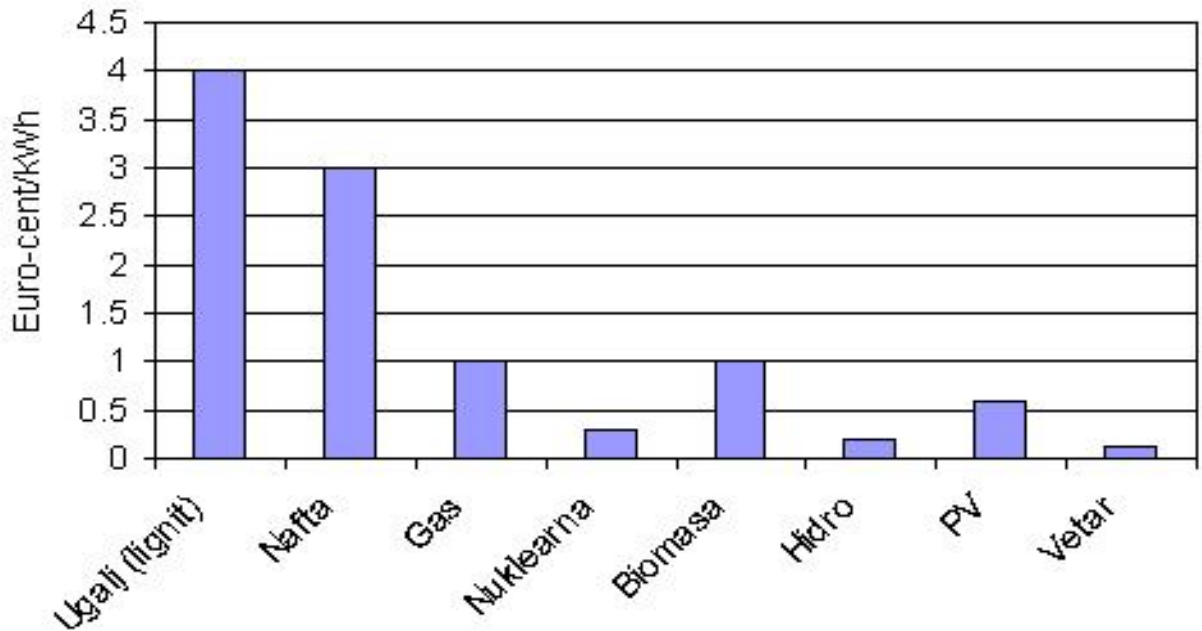
Net electricity installations in the EU from 2000 to 2017



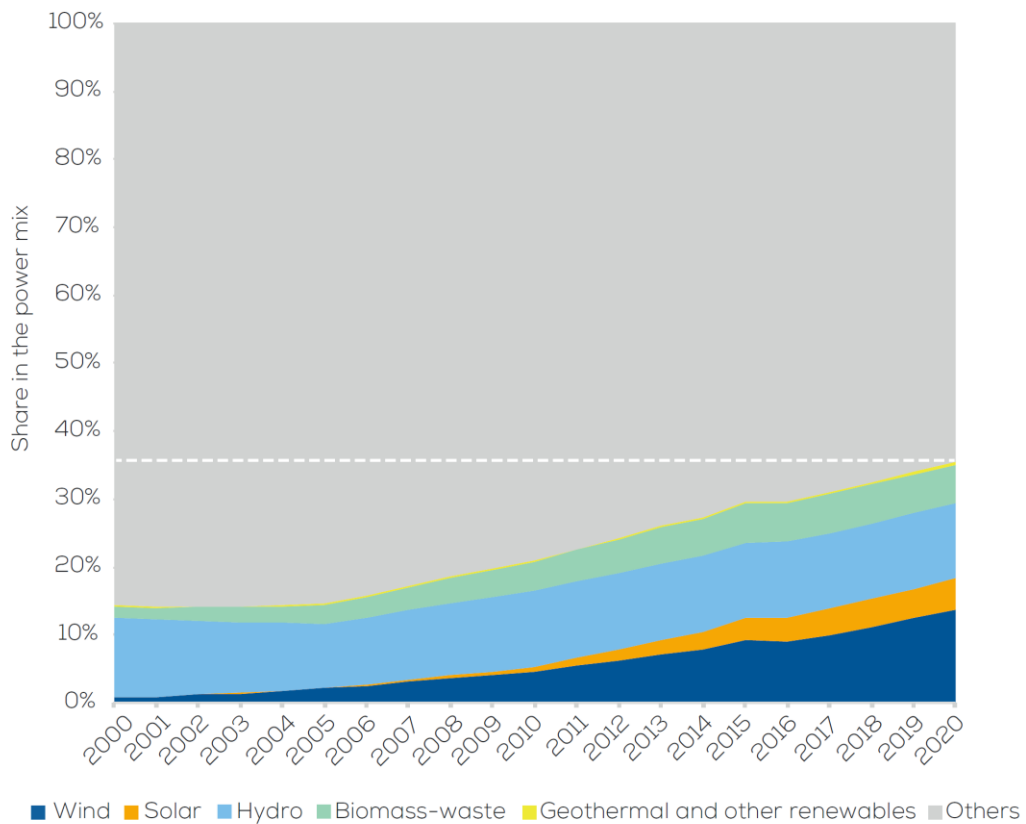
Eksterni troškovi proizvodnje električne energije iz različitih izvora izraženi u Euro-cent/kWh

Zemlja	PRIMARNI IZVOR ELEKTRIČNE ENERGIJE							
	Ugalj (lignit)	Nafta	Gas	Nuklearna	Biomasa	Hidro	PV	Vetar
Austrija			1-3		2-3	0,1		
Belgija	4-15		1-2	0,5				
Nemačka	3-6	5-8	1-2	0,2	3		0,6	0,05
Danska	4-7		2-3		1			0,1
Španija	5-8		1-2		3-5			0,2
Finska	2-4				1			
Francuska	7-10	8-11	2-4	0,3	1	1		
Grčka	5-8	3-5	1		0-0,8	1		0,25
Irska	6-8							
Italija		3-6	2-3			0,3		
Holandija	3-4		1-2	0,7	0,5			
Norveška			1-2		0,2	0,2		0-0,25
Portugal	4-7		1-2		1-2	0,03		
Švedska	2-4				0,3	0-0,7		
Engleska	4-7	3-5	1-2	0,25	1			0,15
EU	2-15	3-11	1-4	0,2-0,7	0-5	0-1	0,6	0-0,25

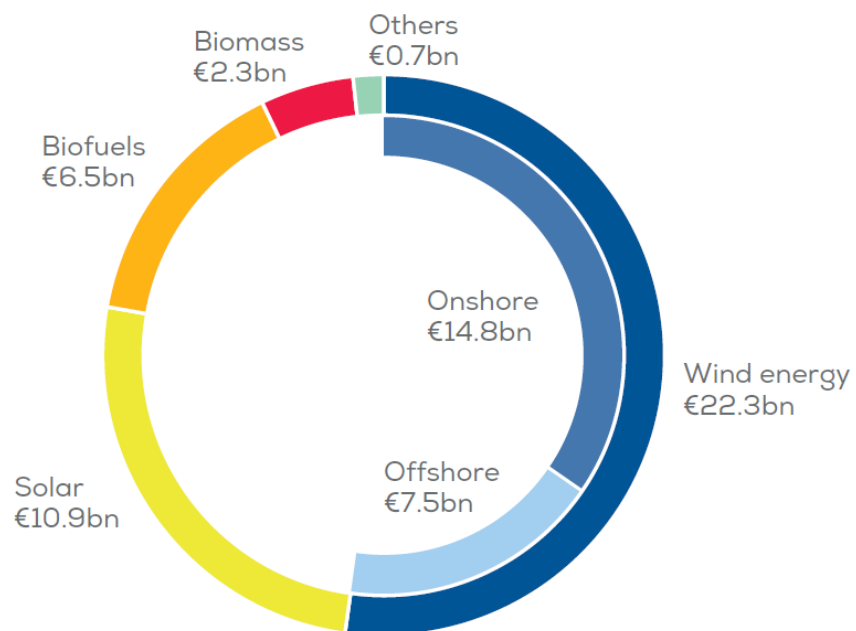
Prosječni minimalni eksterni troškovi za različite konvencionalne i obnovljive izvore električne energije



Trend u strukturi proizvodnih kapaciteta obnovljivih izvora električne en.



Investicioni troškovi u izgradnju obnovljivih izvora energije u EU u 2017.



Source: WindEurope

ENERGIJA VJETRA

- VJETROAGREGATI (VJETROELEKTRANE) KAO DISTRIBUIRANI IZVORI ELEKTRIČNE ENERGIJE -

Zadnjig godina, posebno je intenzivan rast novih DI ostvaren u vjetroelektranama. Razlog tome je prvenstveno ekonomske prirode, tj.

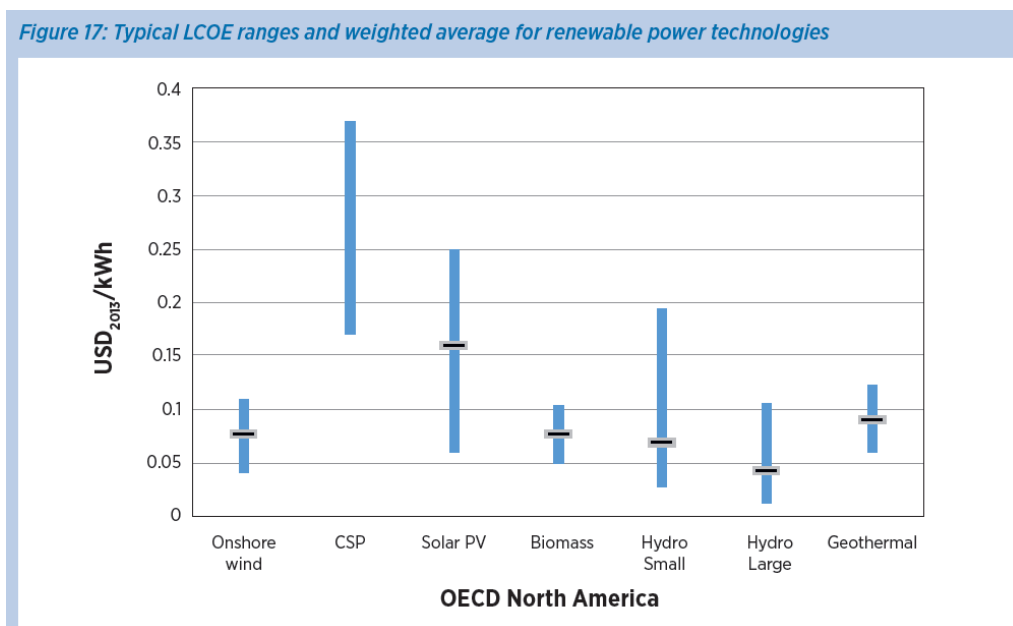
- najkraće vrijeme povrata investicije u odnosu na ostale obnovljive izvore, ali i ostali faktori, kao što su
- zanemariv negativni uticaj na okoliu,
- kratko vrijeme izgradnje (tipski proizvod),
- veliki potencijalni resursi energije vjetra itd.

Trend značajnog rasta instalisanih kapaciteta vjetroelektrana prisutan je i dalje, pri čemu tendencije razvoja vjetroagregata idu prema većim jedinicama (vjetroagregatima) i većim vjetroelektranama koje se u tom slučaju priključuju na prenosnu mrežu.

Za domaćinstva vrlo su interesantne mali vjetroagregati snage do nekoliko desetina kW. Oni se mogu koristiti kao dodatni izvor energije ili kao primarni izvor energije u udaljenim područjima. Kad se koriste kao primarni izvor energije nužno im se dodaju baterije (akumulatori), u koje se energija sprema kad se generiše više od potrošnje.

Velike vjetroelektrane, snaga i više stotina MW, instaliraju se kao vjetrofarme (vjetrofarme) i preko transformatorskih postrojenja spajaju na prenosnu mrežu.

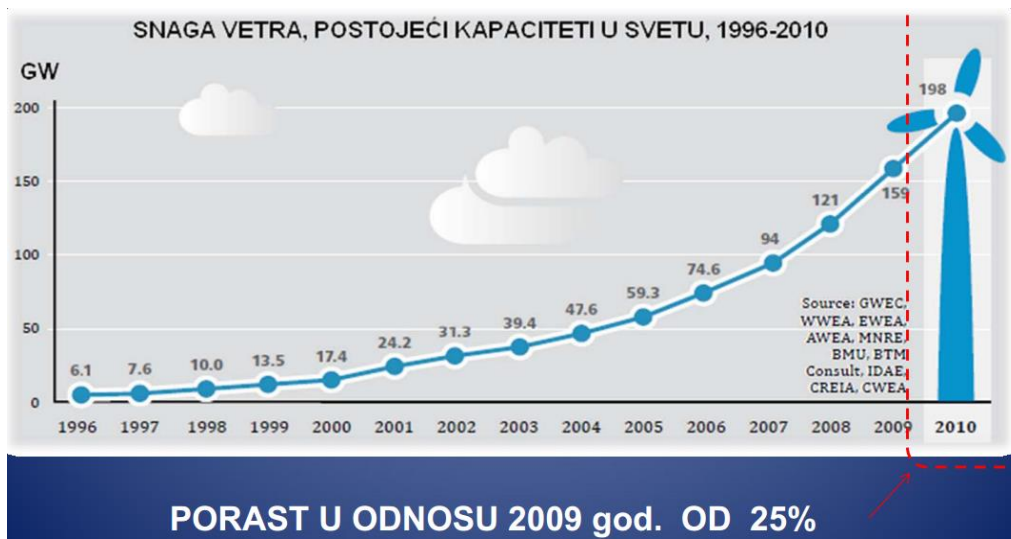
Na slici je dat pregled cijena (bez subvencija) proizvodnje električne energije iz pojedinih vrsta obnovljivih izvora (izvor: IRENA / (Međunarodna agencija za obnovljive izvore energije)).



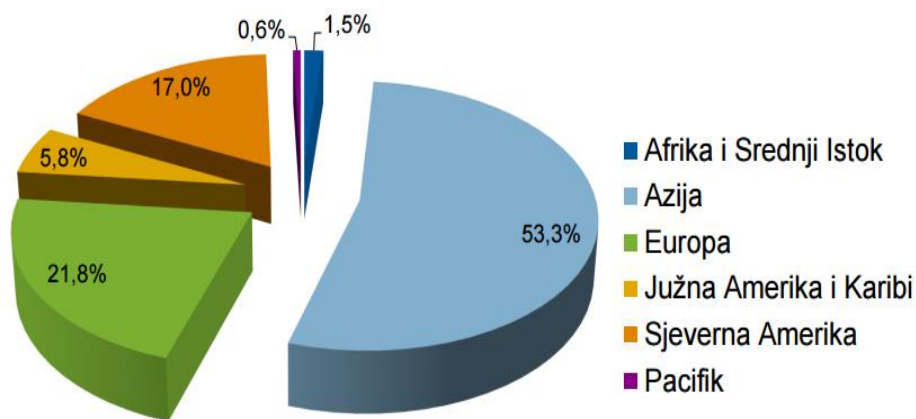
Izveštaj pokazuje da cijena električne energije iz vjetro u određenim slučajevima (zavisno od područja, tehnologije i sl.) dostiže vrijednost od 0,4 dolara po proizvedenom kWh, čime postaje konkurentna i konvencionalnim izvorima električne energije.

Vidi se da je već nekoliko tipova obnovljivih izvora (ne računajući velike hidroelektrane koje spadaju u konvencionalne izvore) konkurentno konvencionalnim izvorima, a ako se dodatno uključe subvencije, uticaj na životnu sredinu, klimu i nuklearni rizici njihova perspektiva je i sa ekonomskog aspekta je osigurana.

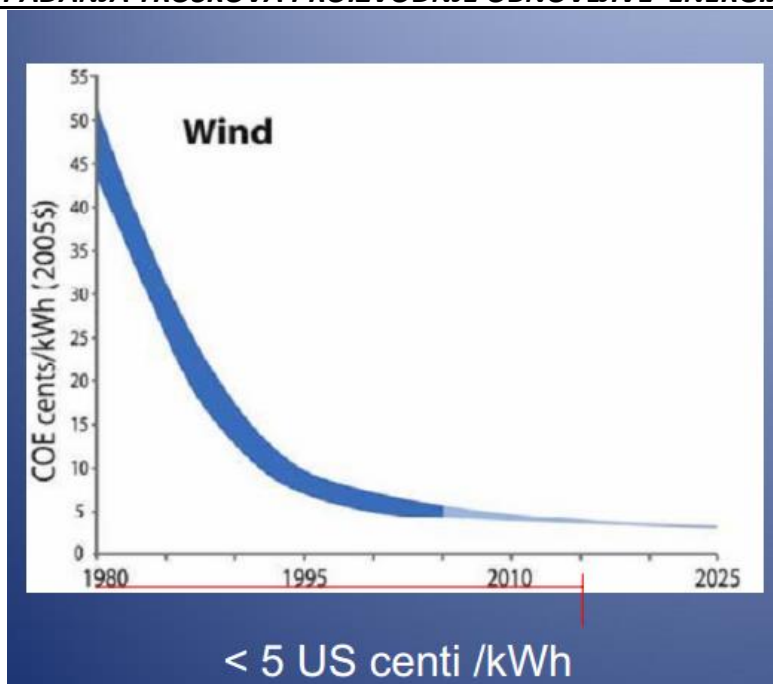
PERESPEKTIVE I INSTALISANI KAPACITETI VJETROELEKTRANA



Novoinstalirani kapaciteti vjetroelektrana 2015. u MW



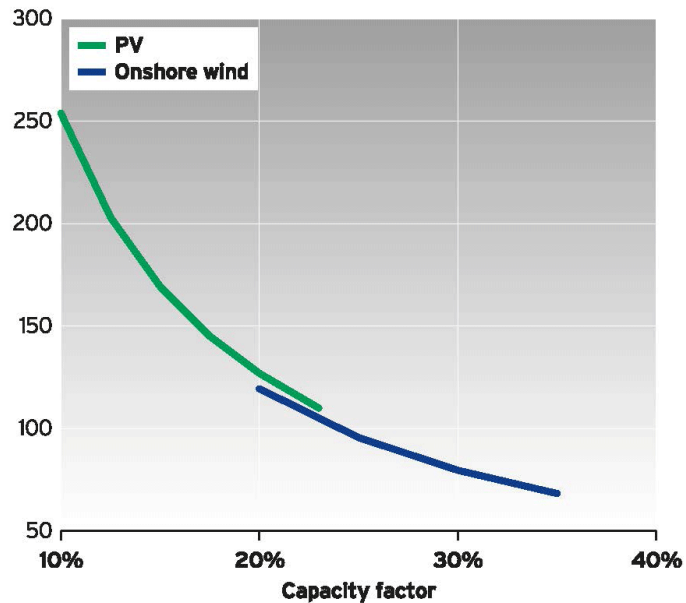
TREND OPADANJA TROŠKOVA PROIZVODNJE OBNOVLJIVE ENERGIJE- VJETAR



WIND BEATS SOLAR ON PRODUCTIVITY

Utility-scale PV and onshore wind generating costs

Electricity generating cost, \$/MWh



Slika: Troškovi fotonapona i kopnenih vjetroelektrana zavisno od faktora iskorištenja

Grafik pokazuje da je trošak visoko iskoristivog fotonapona usporediv sa slabo iskoristivim vjetrom (20% kapacitet iskorištenja za oba), te iznosi oko 120 dolara po MWh.

Energija vjetra – vjetroelektrane

Upravo vjetroelektrane čine značajno mjesto u distribuiranoj proizvodnji električne energije. One se izgrađuju i smještaju u područjima sa visokom iskoristivosti vjetra. Takva područja često se nalaze unutar naponski relativno slabih dijelova mreže koji su locirani u ruralnim predjelima, te se time znatno otežava njihovo efikasno priključenje na distributivnu mrežu.

Sam pojam vjetroelektrana podrazumijeva sistem za pretvaranje kinetičke energije vjetra u električnu energiju.

Energija vjetra je kinetička energija, pa je vrlo važno poznavati brzinu vjetra. Brzina vjetra se neprestano mjenja, što podsistem regulacije vjetroturbinskog agregata čini složenim.

Zanimanje za korištenje vjetra se naglo povećava. Razlog tome svakako pronalazimo u velikoj obnovljivoj energiji, te visokoj pozitivnosti što se tiče ekološkog aspekta. Mala koncentracije snage jedan je od razloga za njegovu ograničenu primjenu u proizvodnji električne energije.

Na raspoloživu energiju vjetra utječu njegove karakteristike, kao što su:

- smjer,
- učestalost,
- brzina,
- temperatura, te
- sastav vazduha.

Vjetroelektrane trenutno imaju najveći porast među obnovljivim izvorima.

Vjetroagregat (slika) je obrtni uređaj koji pretvara kinetičku energiju vjetra prvo u mehaničku, a zatim preko električnih generatora u električnu energiju. Pri tome se rotor vjetroturbine i rotor električnog generatora nalaze na istoj osovini (vratilu).

Vjetroagregat se sastoji od **vjetroturbine** i **vjetrogeneratora**.

Vjetroagregat se naziva i **vjetroturbina** ili **vjetrogenerator**, a u stvari vjetroagregat se sastoji od vjetroturbine i vjetrogeneratora.

Naziva se i **vjetroelektrana**, što nije sasvim točno, pošto **pojam vjetroelektrana označava niz blisko smještenih vjetroagregata, najčešće istog tipa, izloženih istom vjetru i priključenih posredstvom zajedničkog rasklopnog postrojenja na električnu mrežu.**



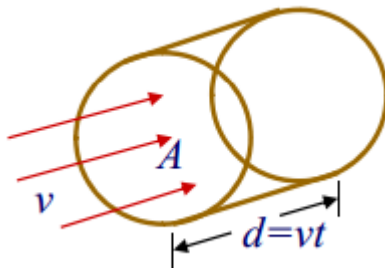
Snaga vjetra

Kinetička energija vjetra je određena jednačinom jednačinom:

$$E_k = \frac{mv^2}{2} ,$$

gdje je m - masa vazduha gustine $\rho[kg/m^3]$ koja struji kroz presjek $A[m^2]$ brzinom $v[m/s]$, jednaka :

$$m = \rho V = \rho A d = \rho A v t .$$



Snagu vjetra P dobijamo **diferenciranjem energije u vremenu**, pri čemu brzinu vjetra smatramo konstantnom:

$$P = \frac{dE_k}{dt}$$

$$P = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} v^2$$

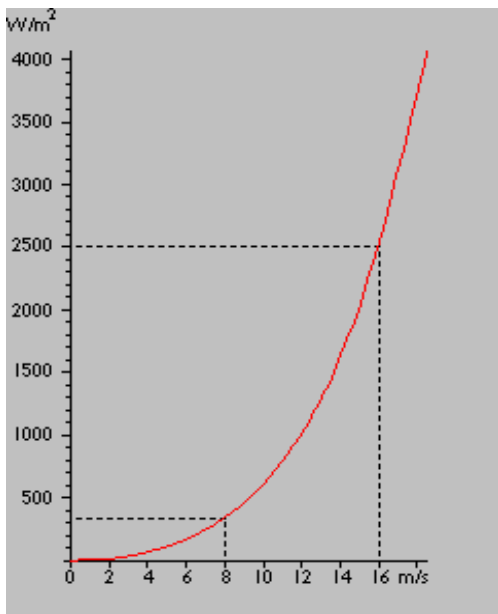
$\frac{dm}{dt}$ je maseni protok vazduha , jednak: $\frac{dm}{dt} = \rho A v$

⇒ Snaga vjetra je:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3$$

Vidi se da snaga vjetra P raste sa **trećim stepenom brzine vjetra** i sa **površinom turbine A** .

Površina na koju djeluje vjetar - $A[m^2]$ zavisi od izvedbe vjetroturbine, prvenstveno od veličine lopatica.



Porast snage vjetra sa brzinom



Površina A vjetroturbine

Snaga se također mijenja sa promjenom gustine vazduha.

Gustina vazduha - $\rho[kg/m^3]$ zavisi od pritiska i temperature, ona se mijenja proporcionalno s pritiskom pri konstantnoj temperaturi.

Pritisak se mijenja sa nadmorskom visinom prema izrazu:

$$p = p_0 e^{-1,185 \cdot 10^{-4} \cdot H},$$

gdje su: $p_o = 101,3 \text{ kPa}$ normalni pritisak,
 $H[m]$ - visina na kojoj se određuje pritisak.

Za standardne uslove (101,3 Pa i 15 °C) na moru je $\rho_o = 1,225 \text{ kg/m}^3$.

Moguće je koristiti standardnu gustinu uz korekciju faktorom odstupanja (prosjeaka) stvarnog pritiska i temperature:

$$\rho[\text{kg/m}^3] = \rho_o k_p k_T$$

Korekcionni faktori za pritisak i temperature su:

$$k_p = \frac{p}{101,3} \text{ i } k_T = \frac{273,15 + 15}{T} = \frac{288,1}{T},$$

gdje su $p[\text{Pa}]$ i $T[\text{K}]$ stvarni pritisak i temperature.

Unutar uobičajenih promjena temperature i pritiska gustina varira do 10%

Zadaci

1. Naći gustinu vazduha pri sljedećim uslovima:

a) Temperatura vazduha je 15 °C, a nadmorska visina je 2000 m,

b) Temperatura vazduha je 5 °C, a nadmorska visina je 2000 m.

Rješenje:

a) Pritisak na posmatranoj nadmorskoj visini $H = 2000\text{m}$ je:

$$p = p_o e^{-1,185 \cdot 10^{-4} H} = 101,3[\text{kPa}] e^{-1,185 \cdot 10^{-4} \cdot 2000} = 101,3[\text{kPa}] 0,79 = 80 \text{ kPa}$$

$$\rho_H = \rho_o k_p = \rho_o \frac{p}{101,3} = 1,225[\text{kg/m}^3] \frac{80}{101,3} = 0,96[\text{kg/m}^3]$$

b) Pritisak na posmatranoj nadmorskoj visini $H = 2000\text{m}$, pri temperaturi $T=273,15+5=278,15$ je:

$$\rho_{H,T} = \rho_H k_T = \rho_H \frac{288,1}{T} = 0,96[\text{kg/m}^3] \frac{288,1}{278,15} = 0,99[\text{kg/m}^3]$$

2. Izračunati gustinu snage vetra (površinsku snagu vetra) u $[\text{W/m}^2]$, pri brzini vjetra od 10 m/s , na visini od $H = 2000\text{m}$ i temperaturi od $t = 5^\circ \text{C}$.

Rješenje:

Gustina vazduha na visini $H = 2000m$ i pri temperature $t = 5^0C$ je $\rho_{HT} = 0,99kg / m^3$.

Gutina snage vetra pri brzini vetra od $v = 10m / s$ je:

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho v^3 = \frac{1}{2} 0,99[kg / m^3](10[m / s])^3 = 495 \frac{W}{m^2} .$$

3. Izračunati površinsku snagu vjetra (gustinu snage vetra) u $[W / m^2]$ pri sljedećim uslovima:

a) Temperatura vazduha je $t = 0^0C$, brzina vjetra je $v = 10m / s$, na visini mora.

b) Temperatura vazduha je $t = 20^0C$, pri brzini vjetra od $v = 5m / s$, na visini 1000 m.

Rješenje:

$$a) p_V = 643 \frac{W}{m^2} \quad b) p_v = 67 \frac{W}{m^2}$$

Brzina vjetra - $v[m / s]$ raste sa visinom i vrlo je promjenljiva.

Kako je snaga vetra proporcionalna trećem stepenu brzine vjetra, ekonomski uticaj čak i malih povećanja brzine vjetra može biti značajan. Jedan način da se turbina dovede u područje jačih vetrova je da se postavi na viši stub.

U prvih nekoliko stotina metara iznad površine tla, na brzinu vjetra jako utiče trenje između vazduha i površine preko koje prelazi.

Glatke površine, kao što je površina mirnog mora, imaju jako male koeficijente trenja, tako da kod ovakvih prepreka porast brzine sa visinom nije veliki. Drugi ekstremni slučaj predstavljaju visoke prepreke kao što su visoke zgrade i šume, kod kojih su koeficijenti trenja veliki, a površinski vjetrovi jako usporeni.

Izraz koji se često koristi za opisivanje uticaja hrapavosti zemljine površine na brzine vjetrova je sljedeći:

$$\frac{v}{v_o} = \left(\frac{H}{H_o} \right)^\alpha ,$$

gde su: v - brzina vetra na visini H ,

v_o - brzina vetra na visini H_o (često je to referentna visina od 10m),

α - koeficijent trenja.

Koeficijent trenja α zavisi od zemljišta preko koga vjetar duva. *Tabela* daje neke reprezentativne vrijednosti za labavo definisane vrste zemljišta. Često se kao gruba aproksimacija za otvorene tipove zemljišta za α uzima vrednost od 1/7.

Osobine zemljišta	Koeficijent trenja α
Glatko tvrdo tlo, mirna voda	0,10
Visoka trava na nivou tla	0,15
Visoki usevi, živa ograda, žbunje	0,20
Šumsko seosko područje	0,25
Mali grad sa drvećem i žbunjem	0,30
Veliki grad sa visokim zgradama	0,40

4. Zadatak

Anemometar koji se nalazi na visini od $H_0 = 10m$ iznad površine zemlje sa usjevima, živom ogradom i žbunjem, pokazuje brzinu vetra od $v = 5m/s$. Procjeniti brzinu i specifičnu snagu vjetra na visini od $H = 50m$. Pretpostaviti da je temperatura vazduha jednaka $t = 15^\circ C$, a da je pritisak jednak normalnom atmosferskom.

Rješenje:

Iz tabele, koeficijent trenja α za zemljište sa usevima, živom ogradom i žbunjem je procjenjen na vrijednost $\alpha = 0,2$. U tekstu zadatka je navedeno da je pritisak jednak normalnom atmosferskom,

$p_0 = 101,3kPa$, a temperatura $t = 15^\circ C$, pa je gustina vazduha jednaka $\rho_0 = 1,225kg/m^3$.

Za brzinu vjetra na visini 50 m se dobija:

$$v_{50} = v_{10} 1,38 = 6,9m/s$$

Specifična snaga vjetra (gustina snage vetra) na visini od 50 m će biti:

$$p_V = \frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho v^3 = \frac{1}{2} \rho_0 v_{50}^3 = \frac{1}{2} 1,22[kg/m^3] 6,9[m/s]^3 = 201[W/m^2]$$

Ova vrijednost specifične snage je više od dva i po puta veća od specifične snage vjetra na visini od $H_0 = 10m$ koja iznosi $p_{V_0} = 76,5W/m^2$.

Iskorišćenja snage vjetra

Kada se snaga vjetra koristi za pretvaranje iz kinetičke u električnu energiju u vjetroagregatima, od interesa je da se postigne što veća iskoristivost, dakle što veći udio snage vjetra treba biti iskorišten i pretvoren u električnu energiju.

Vjetroturbina smanjuje svojim djelovanjem brzinu vjetra s ulazne brzine v_1 na izlaznu brzinu v_2 , te iskorištava nastalu razliku snage. Snaga na taj način iskorištena u vjetroturbini može se izraziti kao:

$$P_t = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} (v_1^2 - v_2^2)$$

Nakon uvrštavanja diferencijala mase:

$$P_t = \frac{1}{4} \rho A (v_1 + v_2) (v_1^2 - v_2^2)$$

Snaga vjetra bez uticaja vjetroturbine je:

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho A v_1^3 .$$

Koeficijent snage $c_p = \frac{P_t}{P_0}$ kazuje koliko je snage vjetra iskorišteno u pretvaranju energije.

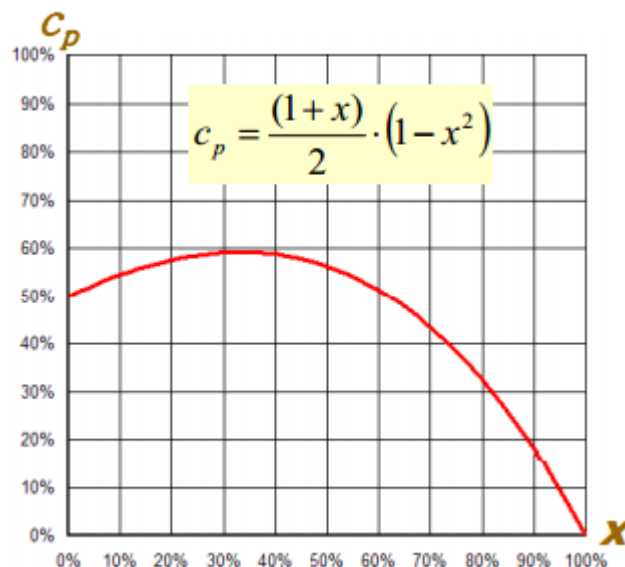
Neka je: $\frac{v_2}{v_1} = x$

Tada je: $P_t = \frac{1}{2} \rho A v_1^3 \frac{1+x}{2} (1-x^2),$

odnosno: $c_p = \frac{1+x}{2} (1-x^2)$

Iskoristiva snaga vjetra je:

$$P_t = \frac{1}{2} \rho A v_1^3 c_p$$



Maksimalni koeficijent snage izračunao je **Betz** (1926.), pa se idealni koeficijent snage zove i **Betzov koeficijent snage** i iznosi $c_{p\text{ Betz}} = 0,593$ pri odnosu brzina $\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{3}$.

Stvarna postrojenja ne dostižu taj idealni slučaj, ali moguće je postići $c_p = 0,4 - 0,5$. Iz toga slijedi da je **efikasnost postrojenja jednaka odnosu stvarnog koeficijent snage i idealnog koeficijenta snage**.

Zadatak 5

Kolika je teorijska snaga vjetroturbine ako je brzina vjetra $v=10$ m/s?

Rješenje:

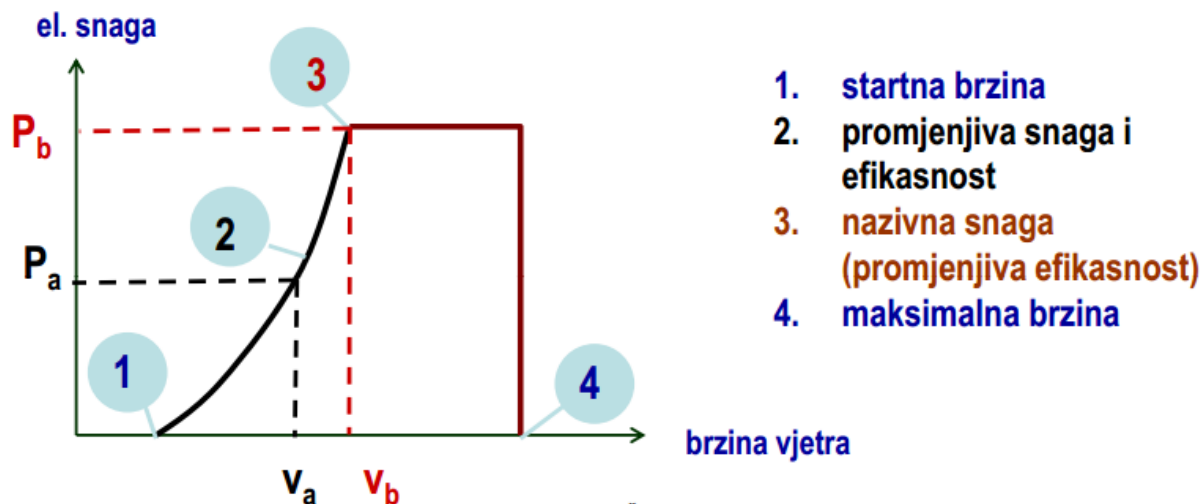
Snaga vjetra dolazi je $P = \rho Av^3$, raste s kubom brzine vjetra. Prečnik rotora posmatrane vjetroturbine je $2r = 52$ m, pa je površina vjetroagregata $A = r^2\pi = 262\pi = 2100$ m². Snaga vjetra $P = \rho Av^3 = 1.3\text{kg/m}^3 \cdot 2100 \text{ m}^2 \cdot (10\text{m/s})^3 = 2.7$ MW. Teorijski iskoristiva snaga vjetra je $P_t = C_p P = 0.59 \cdot P = 1.6$ MW

Tri glavne promjenljive određuju koliko električne energije može proizvesti vjetroagregat

- **brzina vjetra**: jači vjetar proizvodi više energije. Vjetroagregati tipično proizvode energiju na brzinama od 4 m/s do 30 (ili 25, ovisi o izvedbi) m/s (14,4 - 108 km/h ili 7,77 - 58,31 čvorova). Ako vjetar dosegne brzinu preko 30 (25) m/s vjetroagregati se zaustavljaju da se ne bi oštetili uslijed prevelikih mehaničkih naprezanja.
- **promjer lopatica**: veći promjer lopatica rotora, tj. veća površina koju zahvaćaju lopatice znači i veću proizvodnju energije. Duplo veći promjer lopatica može uzrokovati četiri puta veću proizvodnju energije.
- **gustina vazduha**: "teži" vazduh stvara veći potisak na lopaticama rotora. Gustina vazduha je funkcija nadmorske visine, temperature i pritiska. Lokacije na visokim nadmorskim visinama imaju manji pritisak i "lakši" vazduh, pa su to lokacije na kojima su vjetroagregati relativno manje efikasni. Vjetroagregati na nivou mora su zbog "težeg" vazduha relativno efikasniji.

Snaga koja se dobija iz vjetra preko vjetroagregata, određena je: brzinom vjetra i karakteristikom vjetroagregata:

Opšti oblik karakteristike snage vjetroagregata od brzine vjetra:



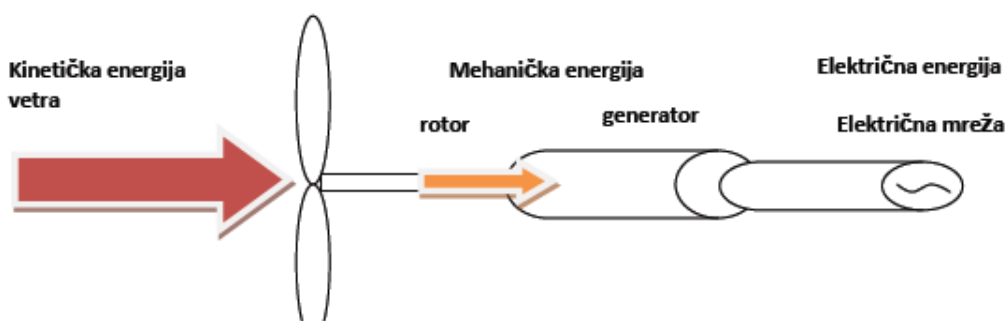
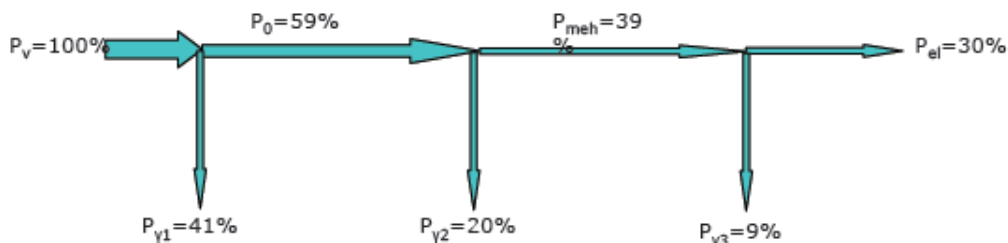
Svaki vjetroagregat ima karakteristiku snage u zavisnosti od brzine vjetra.

Karakteristika snage zavisi od tehničke izvedbe agregata.

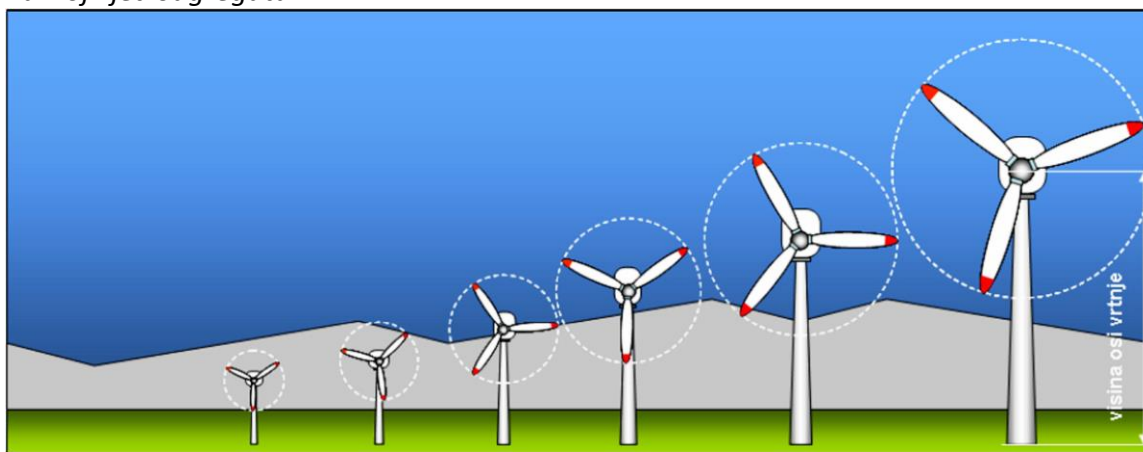
- Moderni vetrogeneratori počinju **da proizvode električnu energiju već pri brzini vjetra od 2,5 m/s, a zaustavljaju se iz bezbednosnih razloga pri brzini od 25 m/s**

- Vetrogenerator može da obezbjedi ekonomičnu proizvodnju struje električne energije ukoliko je srednja godišnja brzina vetra veća od 6 m/s.

Energetski bilans snage nekog vjetroagregata, u procentima.



Razvoj vjetroagregata



Godina	1980.	1985.	1990.	1995.	2000.	2005.
Nazivna snaga	30 kW	80 kW	250 kW	600 kW	1.500 kW	5.000 kW
Promjer rotora	15 m	20 m	30 m	46 m	70 m	115 m
Visina osi vrtnje	30 m	40 m	50 m	78 m	100 m	120 m
Godišnja proizvodnja	35.000 kWh	95.000 kWh	400.000 kWh	1.250.000 kWh	3.500.000 kWh	17.000.000 kWh

Vetroagregati srednjih snaga do nekoliko desetina kilovata daju trofaznu struju i obično se priključuju na niskonaponsku distributivnu mrežu.

Na izlazu vetrogeneratora dobija se naizmenična trofazna struja napona 690 V i frekvencije 50/60 Hz.

Pomoću transformatora se napon podiže na 10 - 30 kV što odgovara naponu srednjenaponskih mreža.

Vjetroagregati većeg kapaciteta (od 10 kW do 3 MW) koriste se kao elektrane, što znači da proizvedenu energiju predaju elektroenergetskom sistemu.

Najčešće primjenjivani moderni vjetroagregati su kapaciteta od 500 kW do 3 MW mada se grade i veći.

Najekonomičnija primena vjetroagregata je njihovo udruživanje na pogodnim lokacijama u takozvanu farmu vjetroelektrana.

Takva elektrana može da ima kapacitet od nekoliko MW do nekoliko stotina MW koji obezbeđuje više desetina vjetroagregata.

Faktor iskorištenja vjetroagregata (brojka koja ukazuje na postotak godišnjeg vremena u kojem vjetroagregat radi na nazivnoj snazi) ponajviše ovisi o resursima vjetra na lokaciji, ali i o efikasnosti vjetroagregata, činjenici da li VA odgovara lokaciji, te dostupnosti tokom radnog vijeka. Na primjer 1 MW vjetroagregat sa faktorom iskorištenja od 25% će godišnje proizvesti 2190 MWh električne energije dok će 2 MW sa 35% faktorom iskorištenja proizvesti čak 6132 MWh električne energije u godini. Prosječni faktori iskorištenja danas su otprilike 28%, ali ovise od regije do regije, te isti raste sa razvojem na vjetrovitim lokacijama kao što su Brazil, Meksiko i slično. Osim toga sve više se razvijaju posebni vjetroagregati za lokacije sa nižim resursima vjetra. Obično se radi o višim stupovima sa manjim generatorima i dužim lopaticama.

Ipak za GWEO scenarij je ostavljen faktor iskorištenja od 28% do 2020. godine, nakon čega je isti povećan na 30%. Realnost je da će ipak biti veći od 30% s obzirom na trendove razvoja vjetroagegata.

U idućem članku očekujte daljnji svjetski pregled po scenarijima.

PRINCIP RADA VJETROAGREGATA

Većina vjetroturbina danas ima tri aerodinamički dizajnirane lopatice. Te lopatice pokreću osovinu koja je spojena na generator koji proizvodi električnu energiju.

Vjetar prolazi preko lopatica i stvara potisak/uzgon (kao na avionskom krilu) koji uzrokuje okretanje rotora.

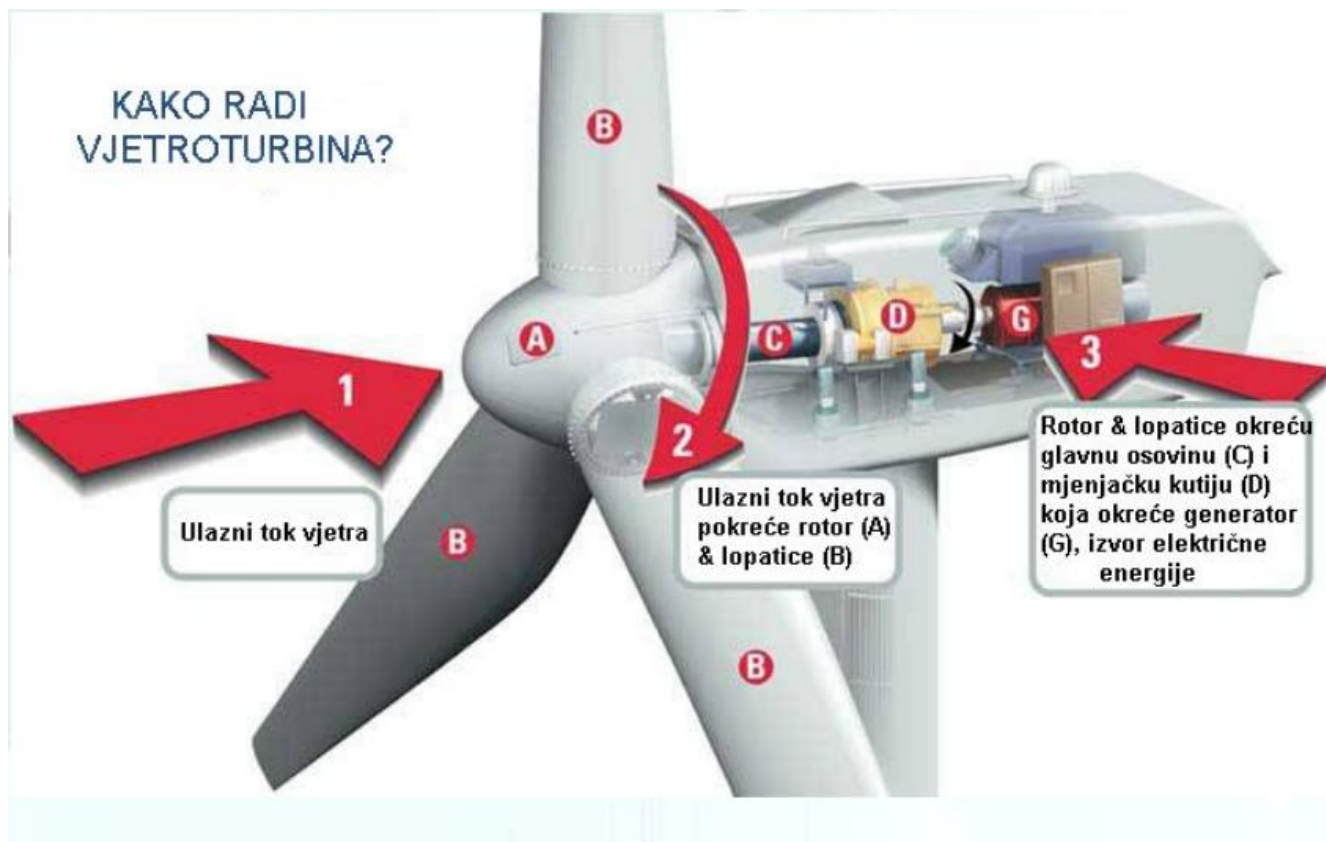
U kućištu se nalazi sporohodna osovina, mjenjačka kutija (alternativno, i u današnje vrijeme sve češće, sporohodni generator bez mjenjačke kutije), brzohodna osovina i generator

Rotirajuće lopatice okreću sporohodnu osovinu brzinom od 30-60 puta u minuti.

Mjenjačka kutija spaja sporohodnu i brzohodnu osovinu povećavajući brzinu obrtanja brzohodne osovine na 1000-1800 okretaja u minuti.

Brzohodna osovina pokreće generator koji proizvodi električnu energiju.

Proizvedena električna energija iz generatora se šalje na transformator koji je transformiše na napon elektrodisributivne mreže.





Vjetroagregate razlikujemo prema:

- a) snazi
- b) mjestu ugradnje
- c) položaju ose vratila
- d) načinu regulacije snage
- e) načinu pretvaranja energije vjetra u električnu energiju

Prema snazi vjetroagregati se mogu grubo podijeliti na male vjetroagregate do 600 kW i na velike preko 600 kW.

Vjetroagregati mogu biti instalirani na kopnu (onshore) i na području mora (offshore). Na kopnu se uglavnom postavljaju vjetroagregati snage do 3 MW, dok se vjetroagregati snage preko 3 MW instaliraju na moru.

Danas dominiraju vjetroagregati s horizontalnim vratilima s obzirom na smjer vjetra u odnosu na one s vertikalnim vratilima.

Konstruktivski oblici vjetroturbina

Vjetroturbine možemo podijeliti prema položaju vratila, odnosno ose obrtanja. Uobičajene vjetroturbine imaju horizontalno postavljenu osu obrtanja i zbog toga se nazivaju Vjetroturbine s horizontalnom osom obrtanja ili VSHO (eng. HAWT). Ređe,

vjetroturbine imaju vertikalnu osu obrtanja i nazivaju se Vjetroturbine s vertikalnom osom obrtanja ili VSVO (eng. VAWT).

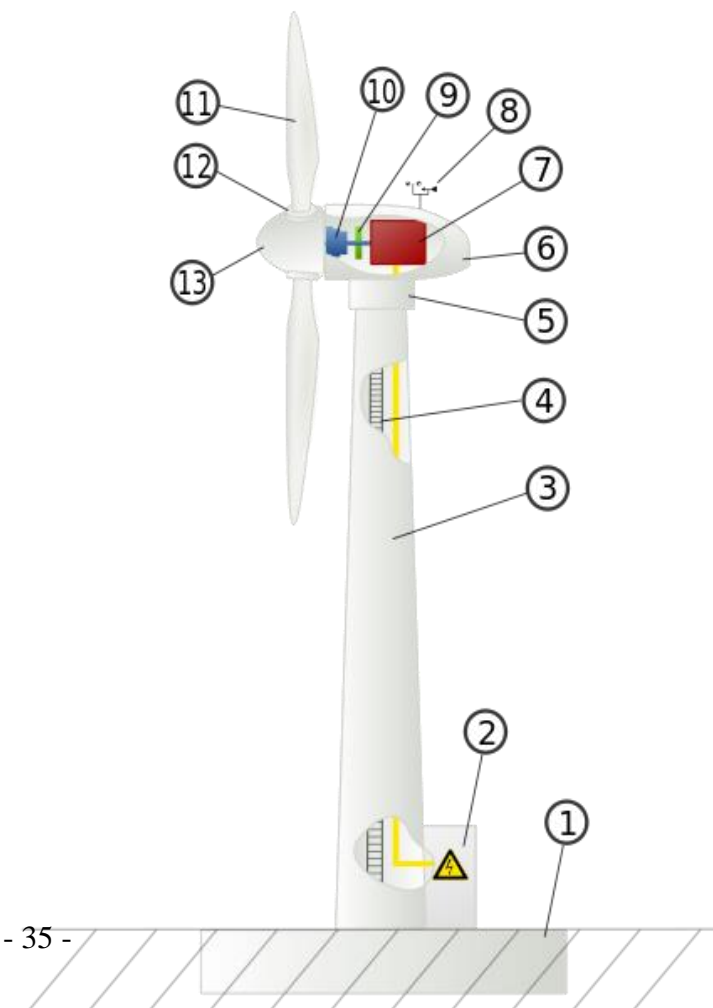
Vjetroturbine sa horizontalnom osom ili VSHO

Rotor ovih turbina postavljen je horizontalno na vrhu stupa. Lopatice na koje djeluje vjetar moraju biti usmjerene u njega. Generator ovih turbina obično se postavlja na vrh stuba u trup zajedno s multiplikatorom (mjenjačka kutija) ako je on potreban (zavisno o tipu električnog generatora). Multiplikatorom povećavamo brzinu obrtanja ukoliko je brzina obrtanja lopatica premala za proizvodnju električne energije.

Visina stuba vjetroturbine iznosi oko 1,5 do 2 prečnika lopatica zbog toga da bi turbine mogla hvatati vjetrove veće brzine na većim visinama. Ove vjetroturbine moraju imati mogućnost zakretanja trupa zbog zahvaćanja vjetra iz različitih smjerova pa tako manje izvedbe imaju jednostavna krilca koja usmjeravaju vjetroturbinu u pravom smjeru dok veće imaju servo motor.

Glavni dijelovi vjetroagregata sa horizontalnom osovinom:

1. temelj,
2. priključak na elektroenergetski sistem (mrežu)
3. stup,
4. ljestve za pristup,
5. zakretnik,
6. kućište,
7. električni generator,
8. anemometar,
9. kočioni sistem (elektromagnetska ili mehanička kočnica),
10. prijenosnik snage (obično multiplikator),
11. lopatice rotora,
12. sistem za zakretanja lopatica (eng. *pitch*),
13. glavčina rotora.



Broj lopatica

Broj lopatica rotora kod horizontalnih vjetroturbina ima veliki utjecaj na njihove karakteristike. Uobičajena vjetroturbina s tri lopatice naziva se klasični Danski koncept. Prema tom konceptu ocjenjuju se ostali jer se pokazao kao najbolje rješenje. Te turbine koriste asinhronu generatore. Neparni broj lopatica u odnosu na parni pokazao se kao bolje rješenje zbog uravnoteženosti konstrukcije.

Vjetroturbina s dvije lopatice

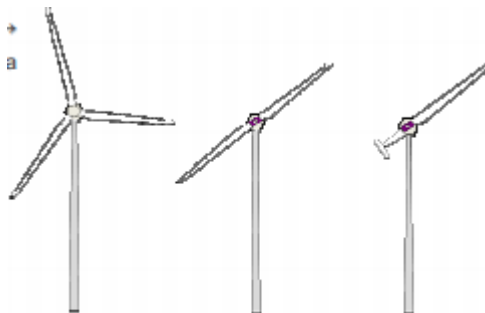
Uštedom na jednoj lopatici dobijamo potrebu za većom brzinom obrtanja da bi dobili jednaku količinu energije kao vjetroturbina sa tri lopatice. Veće brzine povećavaju nivo buke. Osim toga ovakva izvedba zahtjeva složenije učvršćenje lopatica za trup jer im se mora dopustiti mali kut zakretanja u vertikalnoj osi da bi se izbjegla velika naprezanja pri prolasku lopatice ispred stupa.

Vjetroturbina s jednom lopaticom

Pored još veće uštede zbog smanjenja broja lopatica ovakva izvedba nije se pokazala dobrom. Javlja se još veća buka, i potreba za protiv utegom na suprotnoj strani lopatice.

Vjetroturbina s više lopatica - "Američka" vjetroturbina

Ovakve se vjetroturbine koriste na farmama za pogon pumpi za vodu. Brzina vrtnje je mala. Imaju velik moment pokretanja ali malu ukupnu efikasnost. Izvedba je jednostavna i robusna.



Tehničko rješenje koje dominira među vjetroagregatima većih snaga (od 1 MW i više) temelji se na konceptu s tri lopatice. Okretanjem lopatica pokreće se generator koji proizvodi električnu energiju.

Lopatice i generator mogu biti spojeni direktno ili indirektno. Indirektni pogon podrazumijeva upotrebu multiplikatora koji brzinu okretanja lopatica mehanički prilagođava generatoru. U ovom se slučaju obično radi o asinhronom generatoru koji mora imati konstantnu brzinu obrtanja. Rješenje s multiplikatorom je starije, ali još uvijek najčešće među proizvođačima.

Direktni pogon je novije rješenje i kvalitetnije. Vjetroagregat s direktnim pogonom koristi sinhroni generator koji se vrti promjenjivom brzinom, a na mrežu se spaja preko frekvencijskog pretvarača da bi izlazni napon imao mrežnu frekvenciju.

Primjeri vjetroagregata sa horizontalnom osovinom



Bonus 2 MW,
promjer rotora je 72 metra.



Nordex 2,5 MW ,
promjer rotora turbine je 80 metara.



Vestas 1650 kW ,
promjer rotora od 63 metra.



Lagerway 750 kW

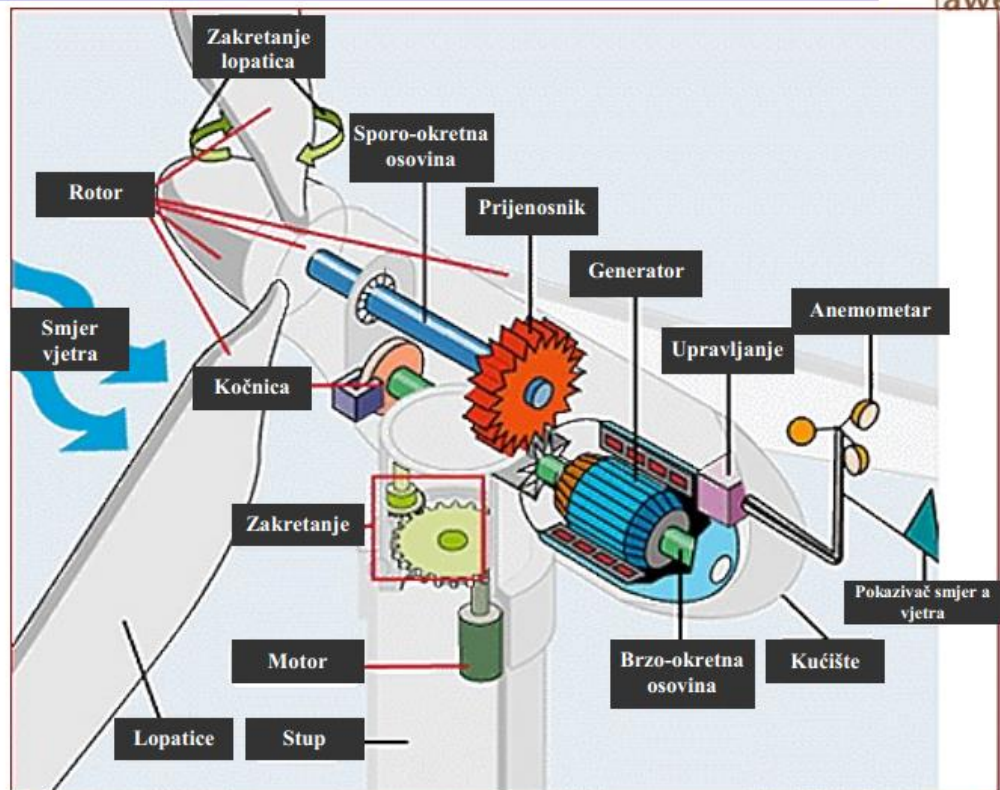


NEG Micon 2 MW,
promjer rotora te turbine je 72 metra.



HSW 1000kW

Osnovni dijelovi VE



Lopaticice (eng. blades)

S obzirom na izvedbu možemo razlikovati:

1. lopaticice sa zakretnim vrhovima (kao aerodinamičnim kočnicama) ili
2. lopaticice s krilcima (funkcioniraju na način da se krilca odvajaju od površine, smanjujući aerodinamične značajke profila kod brzine iznad projektne).

Obje izvedbe su ujedno sekundarni kočni sistemi, koji u slučaju otkaza primarnog kočnog sistema (mehanička kočnica) stvaraju moment kočenja (zakretanjem vrha lopaticice ili pomičnom ravnom površinom (eng. spoiler)).

Ako se u obzir uzmu nivo buke i vizualni efekt, izvedba s tri lopaticice predstavlja najčešće rješenje (oko 90%).

Pored toga, dinamikom rotora s tri kraka je najlakše upravljati. Inercijski moment trokrakog rotora prema tornju ne mijenja se tokom okretanja. To rezultira manjim problemima uslijed oscilacija nego kod jednokrakih i dvokrakih rotora. Uz to je i optički mirniji zbog okretanja na manjoj brzini.

Rotor

Sastavni dijelovi rotora vjetroturbine: glava (eng. hub) i lopaticice. Zavisno od toga kako regulišemo snagu, rotor može biti izveden:

1. Tako da se regulacija ugla tokom rada vrši zakretanjem lopaticice, na način da se profil namješta u optimalni položaj (eng. Pitch). Ovakva regulacija je složena i rotori ovakve izvedbe su skuplji, ali nužno primjenjivi za lopaticice duže od 25-30 m. Također postoji poseban motor za zakretanje, koji mijenjajući ugao lopaticice mijenja napadni ugao struje vazduha.

2. Tako da se regulacija snage vjetroturbine vrši korištenjem aerodinamičnog efekta poremećenog rrougla brzina (eng. stall). Dakle, s promjenom brzine vjetra mijenja se na aeroprofilu ugao struje vazduha, odnosno dolazi do poremećaja trougla brzina te do porasta ili gubitaka uzgona. Za ovaj slučaj izvedbe rotora lopatice nemaju mogućnost zakretanja. Međutim, kako je vjetroturbina projektovana za neko područje brzina, u ovom slučaju izvedbe lopatice imaju unaprijed namješten ugao za dotično područje brzina, što omogućuje najveću transformaciju energije vjetra u el. energ

Kočnica (eng. brake)

Kada generator ispadne iz mreže, odnosno brzina naleta vjetra pređe maksimalnu vrijednost (isključnu vrijednost, npr. 25 m/s) dolazi do izrazitog dinamičkog opterećenja. Zato mora postojati kočni sistem kako bi rasteretio prijenosnik snage, odnosno zaustavio rotor.

Zadatak ovog sistema je održati projektnu brzinu obrtanja konstantnom, odnosno osigurati sistem čije je djelovanje dinamički uravnoteženo.

Disk kočnica je najčešća izvedba kočnog sustava (kojom se na savremenim izvedbama upravlja mikroprocesorski), a smještena je na sporookretnoj osovini prije prijenosnika ili na brzookretnoj osovini generatora.

Prenosnik snage (eng. gear box)

Prenosnik vjetroturbine spaja sporookretnu s brzookretnom osovinom i povećava brzinu obrtanja s oko 30 – 60 o/min na oko 1200 – 1500 o/min tj. na brzinu obrtanja, za većinu generatora, potrebnu za stvaranje električne energije. Prijenosnik je u većini slučajeva multiplikator i može biti različitih izvedbi. Hlađenje prijenosnika se najčešće vrši vazduhom, a podmazivanje sintetičkim uljem. Prilikom analiziranja načina na koji se obrtanje prenosi s vjetroturbinskog dijela na električni generator, naročitu važnost zauzimaju materijali izrade elemenata sklopa, vrsta prijenosa i prijenosni odnos. Prijenosnik je skup i težak dio vjetroturbine pa zbog toga inženjeri istražuju mogućnost direktnog pogona generatora bez prenosnika.

- Postotak iskoristivosti energije je 98%, a gubitak energije koji nastaje uslijed trenja zupčanika prenosnika manifestira se u obliku toplote i buke.

- Ukoliko su generatori višepolni niskobrzinski i po mogućnosti sinhroni s uzбудnim namotom ili uzбудnim permanentnim magnetima, mehanički prenosnik nije potreban (slučaj kod vjetroturbina novijeg dizajna).

Upravljački i nadzorni sistem (eng. controller)

Mikroprocesorski upravljani sistem je u osnovi zadužen za cjelokupno upravljanje i nadziranje rada vjetroturbinsko-generatorskog sistema. Ako ovakav sistem nije u cijelosti smješten na vjetroturbinskoj jedinici (kao što može biti slučaj), već je jednim dijelom na nekom udaljenijem mjestu onda sistem zahtjeva i posebnu telekomunikacijsku opremu.

Oprema za zakretanje (eng. yaw gear)

Služi za zakretanje turbinsko-generatorskog sistema. Nalazi se ispod kućišta vjetroturbine, na vrhu stuba. Preko prijenosa (onosa reda veličine 1:1000) s velikim zupčastim prstenom, učvršćenim na stubu, izravnava se os osovine rotora s pravcem vjetra. Zakretanje vrši motor. On na sebi ima ugrađenu kočnicu koja onemogućuje zakretanje kućišta zbog naleta vjetra.

Zakretanje kućišta reguliše sistem koji je izvan funkcije kad su poremećaji smjera vjetra manji (u prosjeku - jednom u deset minuta dogodi se zakretanje kućišta).

Kućište (eng. nacelle)

Kućište s jedne strane štiti generatorski sistem sa svim komponentama od ticaja okoline, a s druge štiti okolinu od buke dotičnog sistema.

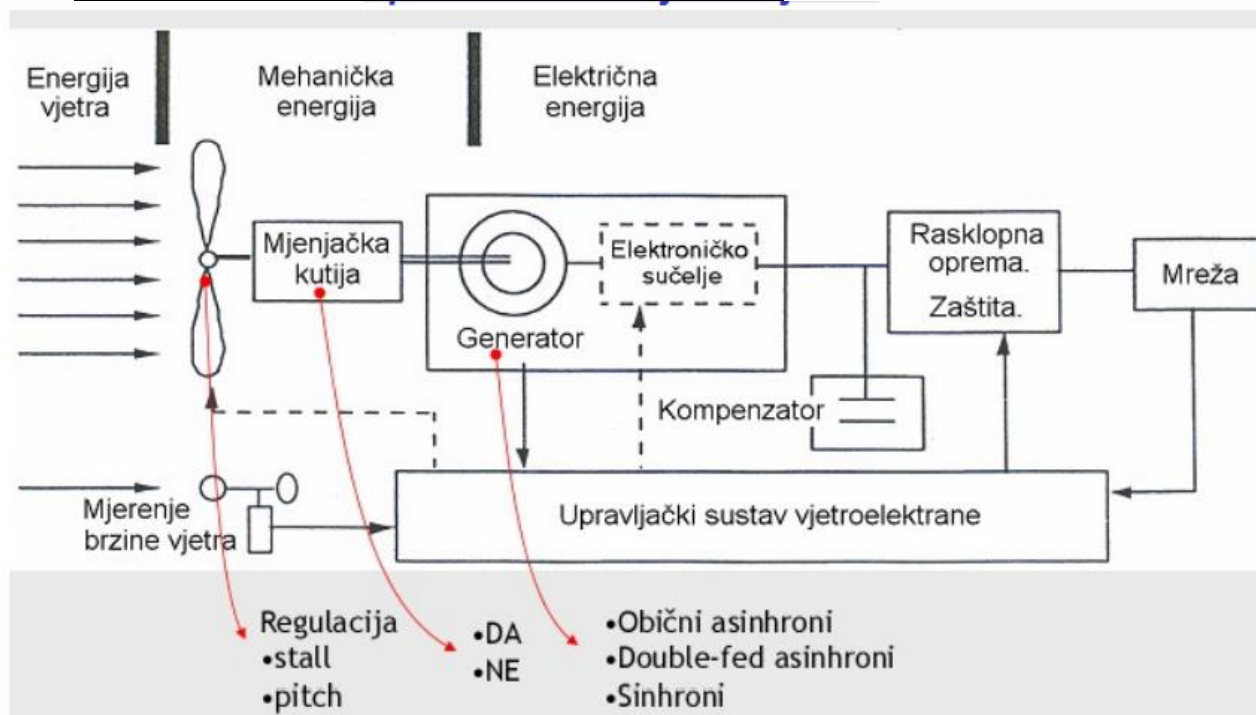
Stub (eng. tower)

Može biti izveden kao cjevasti, konusni, teleskopski, rešetkasti, učvršćeni ili povezani.

Danas se najčešće koristi cjevasta konstrukcija, a prednost joj se nalazi u tome što je osim visoke čvrstoće karakterišei veća otpornost na vibracije.

Prednost rešetkaste konstrukcije nalazi se u jednostavnosti, a budući da ju je moguće rastaviti na manje dijelove prikladnija je za transport i montažu.

Opšta šema djelovanja vjetrogeneratora



Podjele i vrste vjetroelektrana

Vjetroturbina je vazдушna turbina koja pretvara kinetičku energiju strujanja vjetra u mehaničku, a koja se dalje u generatorima pretvara u električnu energiju. Jedna ili više vjetroturbina s pripadajućom opremom (generator, prenosnik, kućište, toranj, temelj, sistem regulacije, transformator itd.) čine vjetroelektranu. Vjetroelektrana može biti:

- povezana na elektroenergetski – distributivni sistem (više vjetroturbina, što se još često i naziva farmom, međusobno povezanih i preko transformatora spojenih na mrežu).
- autonoman izvor (jedna vjetroturbina redovno u kombinaciji sa nekim drugim izvorom električne energije na primjer dizel ili solarnim generatorom).

Vjetroelektrane se mogu podijeliti u dvije grupe u zavisnosti od lokacije na kojoj su postavljene, i to su: vjetroelektrane na moru (offshore) i vjetroelektrane na kopnu (onshore).



Slika 2.2.3.5. Vjetroelektrana na kopnu (onshore).



Slika 2.2.3.6. Vjetroelektrana na moru (offshore).

Prema proizvodnji električne energije vjetroelektrane možemo podijeliti na:

- male vjetroelektrane i crpne stanice do 20 kW,
- srednje vjetroelektrane od 20kW do 50 kW,
- velike vjetroelektrane od 50 kW do 3 MW i više.

Male vjetroelektrane sa proizvodnjom do 5 kW uglavnom se koriste za punjenje akumulatora. Vjetroelektrane snage od 5 do 20 kW možemo koristiti u dvije svrhe: prva je za dostavljanje energije u javnu mrežu, dok druga može poslužiti za grijanje stanova i porodičnih kuća, seoskih farmi i slično, posebno zimi kada je povećana potrošnja energije. Male bi vjetroelektrane, mogle veoma dobro poslužiti za napajanje električnom energijom i pitkom vodom planinskih domova, vikendica, površina za rekreaciju i ostrva koja su nenaseljena. Vjetroelektrane se mogu koristiti i na brodovima te i na ostalim teretnim plovilima. Osim toga, prikladne su za velike autoprikolice. Autonorne izrade vjetroturbina popularno nazivamo „vjetrenjače”, a postižu snage od svega nekoliko stotina vati i služe za punjenje akumulatorskih baterija, Slika 2.2.3.7. Tako akumulirana električna energija koristi se za rasvjetu, radio i TV prijemnike, kao i za razne druge kućanske aparate malih snaga. Takođe se primjenjuju i u objektima koji se iz raznih razloga ne mogu priključiti na elektroenergetsku mrežu [L.6].

Vjetroelektrane sa proizvodnjom iznad 20 kW izričito se koriste za dostavu energije u javnu mrežu, Slika 2.2.3.8.

Iako se vjetroturbine srednje snage mogu naći kao usamljeni, one se najvišeće povezuju u farme vjetroturbina. Farma predstavlja niz blisko smještenih vjetroturbina (najčešće istog tipa) izloženih „istom”

vjetru i priključenih preko transformatora i zajedničkog rasklopnog uređaja na električnu mrežu. Konačna ocjena uticaja kao i razmještaj vjetroturbina unutar farme zavisi od učestalosti smjera vjetra, odnosno raspodjeli energije vjetra po smjerovima i njegovoj brzini. Prednost smještanja većeg broja vjetroturbina na ograničenom području proizlazi iz moguće uštede troškova povezivanja sa javnom elektroenergetskom mrežom, te smanjenje troškova održavanja i nadzora vjetroturbina. U Južnoj Kaliforniji će do kraja 2013. godine biti završena najveća vjetroelektrana koja će moći da obezbijedi električnu energiju za 3 miliona domaćinstava, Slika 2.2.3.9.



Slika 2.2.3.7. Izgled male vjetroelektrane.



Slika 2.2.3.8. Vjetroturbina snage 12 kW.



Slika 2.2.3.9. Farma vjetroelektrana u Južnoj Kaliforniji.

Najveća priobalna vjetroelektrana svijeta Walney

Priobalna vjetroelektrana Walney se nalazi nekih 14 kilometara zapadno od otoka Walney na obali Cumbrie u Irskom moru, a nalazi se u teritorijalnim vodama Velike Britanije.

Ukupna snaga vjetroelektrane Walney je 367,2 MW, a sastoji se od 102 Siemensova vjetroagregata pojedinačne snage 3,6 MW. Siemensovi 3,6 MW priobalni vjetroagregati imaju promjer lopatica 107 metara (Walney faza 1) odnosno 120 metara (Walney faza 2), a visina stupa je 83,5 metara (Walney 1) odnosno 90 metara (Walney 2). Svaki vjetroagregat ima 550 tona, a radi pri brzinama vjetra od 4 m/s do 25 m/s



Slika 1: Prvi vjetroagregati na Walneyu

Projekt je koštao oko 1,2 milijarde eura, a proizvodit će dovoljno električne energije za napajanje 320.000 domaćinstava u Velikoj Britaniji. Vjetroelektrana se rasprostire na 73 kilometara kvadratna, a nalazi se na udaljenosti od 14,4 do 25,8 kilometara od obale. Vjetroagregati su sa transformatorskom stanicom spojeni preko podmorskih kablova sa elektroenergetskom mrežom. Od transformatorske stanice se električna energija prenosi podmorskim kablom do Thorntona na naponu od 132 kV.



Slika 2: Priobalna vjetroelektrana Walney



Slika 3: Trafostanica

Dong Energy je najavio da će zatražiti daljnje proširenje priobalne vjetroelektrane Walney i to za 750 MW. Očekuje se da bi dozvola za to proširenje trebala doći tokom iduće godine.

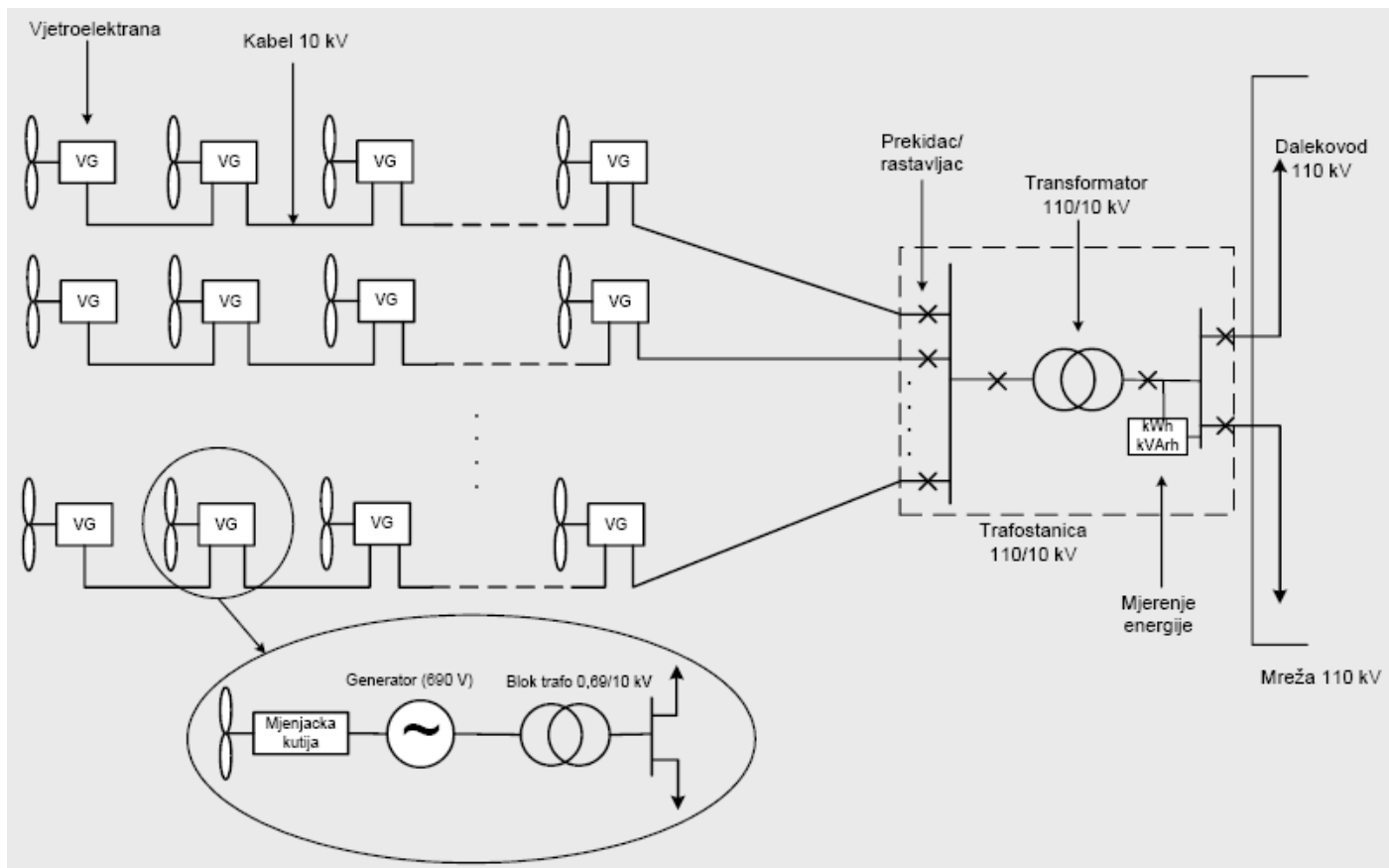
PRIKLJUČENJE VETROELEKTRANE NA MREŽU

Svaki elektroenergetski sistem radi u skladu sa određenim pravilima koja definišu obaveze postojećih i budućih korisnika za pogon i priključenje na elektroenergetsku mrežu. Ovi zahtevi moraju biti ispunjeni od strane proizvođača električne energije, potrošača konektovanih na elektroenergetsku mrežu i kompanija koja upravljaju mrežom. Ta pravila su poznata kao “Pravila o radu elektroenergetskog sistema” (Grid Code). Slično prenosnim mrežama, distributivna mreža određuje zahteve za priključenje svojih korisnika u „Pravilima o radu Distributivne Mreže“ (Distribution Code) U poredjenju sa korisnicima prenosne mreže, korisnici distributivne mreže imaju manje snage i manji uticaj na rad mreže, tako da su zahtevi Pravila o radu Distributivne Mreže značajno lakši u poredjenju sa prenosom.

Činjenica je da se zahtevi „Pravila o radu EES“ stalno prilagođavaju razvoju tehnologije. Ona uključuju problematiku kvarova, regulaciju aktivne snage, frekvencije, regulaciju reaktivne snage, napona i planiranje proizvodnje.

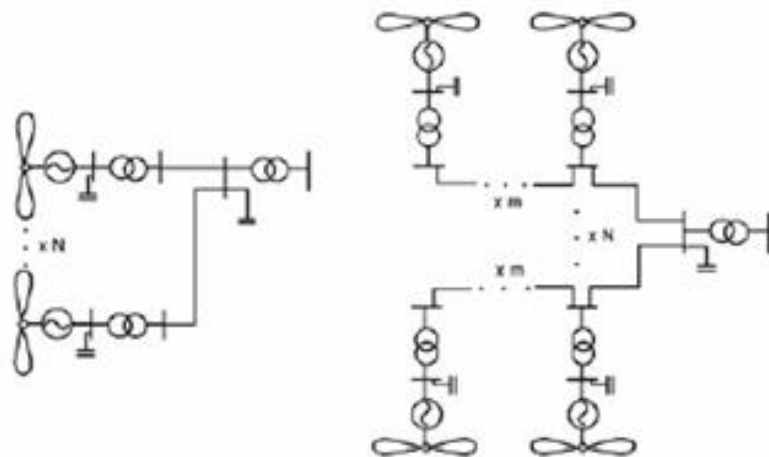
Glavni nedostatak vjetroelektrana u poredjenju sa konvencionalnim izvorima energije je nesigurnost proizvodnje električne energije, kao posledica konstantnih promena u brzini vetra. Iz tih razloga, vetrogeneratori ne mogu ispuniti zahteve koje sinhroni generatori velike snage ispunjavaju, naprimer tačna predikcija proizvodnje električne energije, ograničena brzina promene snage, ostrvski rad i puštanje u rad bez podrške mreže (black start). Takodje, razna tehnološka rešenja farmi vetrogeneratora su karakterisana različitim upravljanjem, kako u stabilnom pogonu, tako i u vreme poremećaja u radu sistema, što određuje kako utiču na rad elektroenergetskog sistema. Na primer, vetro-turbina sa kaveznom asinhronim generatorom (squirell cage induction generator) direktno povezana na mrežu i sa ograničenjem mehaničkog inputa (stall turbines) ima najjednostavniji dizajn bez mogućnosti kontrole toka aktivne ili reaktivne snage u normalnom pogonu ili tokom poremećaja rada. Za vreme propada napona, asinhroni generator dodatno opterećuje mrežu povećanom potrošnjom reaktivne snage, što može ugroziti stabilnost mreže. Sa druge strane, vetrogenerator sa energetske pretvaračima ima mnogo više mogućnosti, čak i prednosti u poredjenju sa konvencionalnim elektranama. Njihova sposobnost da brzo kontrolišu tokove aktivne i reaktivne snage može obezbediti dodatnu podršku mreži u smislu doprinosa regulaciji frekvencije i napona.

Parkovi vetrogeneratora se priključuju na elektroenergetsku mrežu, u zavisnosti od snage: za instalisane snage preko 15 MW, farme su priključene uglavnom na prenosnu mrežu, dok za snage ispod 15 MW su priključene na distributivnu mrežu. Jedna mogućnost za organizaciju i priključenje farme vetrogeneratora je prikazana na SLICI. S obzirom da farme vetrogeneratora mogu imati značajan uticaj na kvalitet električne energije i stabilnost elektroenergetskog sistema, njihova instalacija, aktiviranje i pogon predstavljaju značajan problem. U tom smislu propisana su tehnička pravila za priključenje farmi vetrogeneratora u Pravilima za rad elektroenergetskih sistema (Grid Code). Tehnologija vetrogeneratora se brzo razvija i ima puno specijalnih funkcionalnosti u poredjenju sa konvencionalnim elektranama. Iz tog razloga, u mnogim zemljama zahtevi za priključenje farmi vetrogeneratora imaju poseban tretman u vidu posebnih pravila (Wind Code).



SLIKA: Priklučenje vjetroelektrane na mrežu

U nekim zemljama kriterijum prema kojem se izvodi priključenje vjetroelektrana na mrežu, vezan je za odnos između snage kratkog spoja u tački priključka i nazivne snage vjetroelektrana. Međutim, ovaj kriterijum je teško zadovoljiti ukoliko je vjetroelektrana smještena u području sa niskom prenosnom moći. Vjetroagregati se na mrežu priključuju poje dinačno ili serijski u grupama. Na slici su prikazana dva karakteristična načina priključenja vjetroagregata.



SLIKA: Načini priključenja vjetroagregata na mrežu