PREDGOVOR

Knjiga je koncipirana da bude prvenstveno udžbenik koji pokriva djelove gradiva iz predmeta: Obnovljivi izvori energije, Integracija obnovljivih izvora energije u EES i Vjetroenergetika i solarna energetika, koje studenti pohađaju na osnovnim, master i doktorskim studijama na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. S obzirom na to da sadrži dosta praktičnih iskustava autora u planiranju i projektovanju vjetroelektrana, knjiga podjednako može biti korisna i za kolege inženjere koji se bave: planiranjem, projektovanjem i eksploatacijom vjetroelektrana.

Vjetroenergetika je oblast energetike sa najvećim trendom razvoja u posljednjih dvadeset godina. Razvoj tehnologija vjetroagregata prati i izgradnja proizvodnih kapaciteta, tako da vjetroelektrane u mnogim zemljama postaju dominantan izvor u pogledu instalisane snage. Planovi daljeg razvoja vjetroenergetike u Evropi i svijetu su vrlo optimistični, tako de se očekuje da će do kraja 2050. godine vjetar biti jedan od dominantnih primarnih izvora električne energije u svijetu. U Srbiji i regionu već su izgrađeni, ili su u fazi izgradnje, značajni proizvodni kapaciteti vjetroelektrana, koje su priključene na srednjenaponsku distributivnu mrežu, ali i na prenosnu mrežu svih naponskih nivoa. U ovakvim dinamičnim uslovima razvoja vjetroenergetike neophodna su znanja iz oblasti planiranja, projektovanja i eksploatacije vjetroelektrana, pa je i knjiga koncipirana tako da bude vodič od ideje do realizacije projekta vjetroelektrane.

Knjiga se u prvom dijelu bavi analizom resursa energije vjetra. Vjetar, kao primarni energent, ima puno specifičnosti, prije svega zbog svoje prostorne disperzivnosti i vremenske promjenljivosti. Iz tog razloga, istraživanje vjetroenergetskog potencijala predstavlja inženjerski izazov i zahtijeva blisku saradnju stručnjaka različitih profila (inženjera, meteorologa, urbanista, ekologa,...).

U drugom dijelu knjige analizirane su tehnologije za elektromehaničku konverziju kinetičke energije vjetra i osnovne eksploatacione karakteristike vjetroagregata. Poznavanje principa konverzije energije vjetra u vjetroturbini i savremenih tehnologija za elektromehaničku konverziju od ključnog je značaja za razvoj stručnjaka u ovoj oblasti, ali je isto tako značajno i za inženjere koji se bave projektovanjem i eksploatacijom vjetroelektrana.

U trećem dijelu knjige dati su elementi planiranja i projektovanja vjetroelektrana na kopnu. Prostorno planiranje vjetroelektrana je glavni zadatak u inicijalnoj fazi razvoja projekta. Optimalno planiranje vjetroelektrane treba uvijek posmatrati kao multikriterijumski optimizacioni problem čija ciljna funkcija nije samo maksimizacija proizvodnje već zahtijeva i kvantifikovanje uticaja vjetroelektrane na okolinu (zauzimanje obradivog zemljišta, uticaj na ekosistem, socijalni uticaj,...). Osnovni

elementi projektovanja vjetroelektrane su takođe obrađeni u knjizi. Cilj ovogo dijela knjige je sagledavanje činilaca bitnih za izbor vjetroagregata i njihovo povezivanje u jedinstvenu funkcionalnu cjelinu. Obrađeni su i osnovni aspekti integracije vjetroelektrana u elektroenergetski sistem, gdje su pokazane mogućnosti učešća ovih izvora ne samo u proizvodnji energije, već i u sistemskim uslugama u pogledu naponske i frekvencijske regulacije, koje obezbijeđuju veću fleksibilnost elektroenergetskog sistema.

Ekološki i ekonomski aspekti proizvodnje električne energije u vjetroelektranama su tema posebnih poglavlja. Vjetroelektrane su izvori električne energije koji su se prije svega pojavili zbog potreba očuvanja životne sredine u procesu proizvodnje električne energije, tako da moraju takvu ulogu u maksimalno mogućoj mjeri potencirati. Iz tog razloga, svi negativni uticaji na životnu sredinu moraju biti detaljno sagledani i minimizovani kroz planiranje i projektovanje vjetroelektrane, ali i u toku njene eksploatacije. Jedno od poglavlja je posvećeno vjetroelektranama na moru, gdje su prikazane specifičnosti mora kao posebnog prostora na kojem se mogu prevazići određeni problemi i ograničenja koja se javljaju kod vjetroelektrana na kopnu.

Posljednje poglavlje u knjizi se bavi monitoringom i dijagnostikom stanja komponenti vjetroagregata. Nagla izgradnja vjetroelektrana u svijetu nije pružila dovoljno praktičnih iskustava, tako da problematika održavanja vjetroagregata ima veoma značajnu ulogu u eksploataciji vjetroelektrana. S obzirom na ogromne gabarite i ekstremne uslove rada vjetroagregata, ovo pitanje je dodatno otežano, a tradicionalni principi preventivnog održavanja se sve više zamjenjuju modernim prediktivnim održavanjem koje obezbijeđuje minimizaciju operativnih troškova i maksimizaciju raspoloživosti vjetroagregata.

S obzirom da na srpskom jeziku ne postoje stručne knjige koje pokrivaju u širem smislu vjetroenergetiku, poseban zadatak ove knjige je bio da predloži terminologiju, kako bi se izbjeglo korišćenje različitih pojmova i slobodnih prevoda određenih termina. U tom pogledu, u knjizi je predložena terminologija koja je u duhu tradicionalnih pojmova vezanih za termoelektrane i hidroelektrane.

Autor se zahvaljuje svima koji su doprinijeli finalizaciji ovog teksta: recenzentima, kolegama sa Katedre za EES, kolegama sa kojima sam sarađivao na izradi idejnih rješenja i projekata vjetroelektrana, izdavaču i sponzorima.

Berane, avgust 2018. god. *Željko R. Đurišić*

S A D R Ž A J

1. UVOD 1
1.1 Istorijat vjetroelektrana 1
1.2 Savremeni koncept elektromehaničke konverzije energije vjetra 3
1.3 Pregled stanja u oblasti vjetroenergetike u Evropi i svijetu 6
1.4 Pravci budućeg razvoja vjetroenergetike 8
1.5 Ekonomski i ekološki motivi proizvodnje električne energije iz vjetroelektrana 9
1.6 Mehanizmi podsticaja izgradnje vjetroelektrana 11
1.6.1 Fiksne otkupne cijene (Feed-in tariffs) 11
1.6.2 Sistem premija (Feed-in Premium) 12
1.6.3 Obavezni ciljevi za obnovljivu energiju (Quota-based Mechanisms) 12
1.6.4 Sistem aukcija (Auction Mechnisms) 12
1.6.5 Finansijski i poreski podsticaji 13

2. ENERGIJA VJETRA 14
2.1 Geostrofski i površinski vjetrovi 14
2.2 Snaga vjetra 19
2.2.1 Zavisnost snage vjetra od pritiska i temperature vazduha 20
2.3 Visinski profil brzine vjetra 24
2.3.1 Logaritamski model 24
2.3.2 Eksponencijalni model 28
2.3.3 Uticaj stabilnosti atmosfere na visinski profil brzine vjetra 30
2.4 Turbulentnost vjetra 41

3. MJERENJE POKAZATELJA RESURSA ENERGIJE VJETRA NA MIKROLOKACIJI 46
3.1 Anemometri 46
3.1.1 Anemometri sa šoljicama (Cup anemometri) 46
3.1.2 Anemometri sa propelerom 47
3.1.3 Ultrazvučni (Sonic) anemometri 48
3.1.4 Laser-Dopler anemometarski sistem – LIDAR 50
3.1.5 Ultrazvučni-Dopler anemometarski sistem – SODAR 51
3.2 Pokazivači smjera vjetra 52
3.3 Oprema za akviziciju mjernih podataka 53
3.4 Montaža mjerne opreme na mjerni stub 53
3.5 Izbor lokacije za postavljanje mjernog stuba 59

4. STATISTIČKI POKAZATELJI RESURSA ENERGIJE VJETRA 61
4.1 Priprema mjernih podataka za statističku analizu 61
4.2 Srednja brzina i gustina snage vjetra 63
4.3 Ruža vjetrova 64
4.4 Histogram brzina vjetra 65
4.5 Vejbulova statistika resursa energije vjetra 67
4.6 Rejlijeva statistika resursa energije vjetra 70
4.7 Dnevne i sezonske varijacije potencijala energije vjetra 73
4.8 Analiza dugoročnog potencijala energije vjetra na ciljnoj lokaciji 75

4.9 Procjena ekstremnih brzina vjetra 82
4.9.2 Metoda prekoračenja praga 87
4.9.3 Visinski profil brzine vjetra pri olujnom vremenu 91
4.9.4 Procjena ekstremnih udara vjetra 91
5. REGIONALNA KLIMATOLOGIJA VJETRA 93
5.1 Modelovanje prepreka 94
5.2 Modelovanje hrapavosti terena 96
5.2.1 Modelovanje hrapavosti terena sa jednolikim objektima 99
5.2.2 Modelovanje hrapavosti zašumljenih terena 100
5.2.3 Regionalna mapa hrapavosti terena 100
5.3 Modelovanje orografije terena 102
5.3.1 Efekat brda 102
5.3.2 Mapa orografije terena 104
5.3.3 Efekat tunela 106
5.4 Regionalna mapa vjetroenergetskog potencijala 107
5.5 Nesigurnosti u procjeni energetskog potencijala vjetra pri planiranju vjetroelektrana 109
5.5.1 Nesigurnost mjernih podataka o brzini vjetra 109
5.5.2 Nesigurnost procjene višegodišnjeg potencijala vjetra 110
5.5.3 Neizvjesnost budućih varijacija potencijala energije vjetra 111
5.5.4 Nesigurnost visinske ekstrapolacije potencijala vjetra 112
5.5.5 Nesigurnost prostorne ekstrapolacije potencijala vjetra 114
5.5.6 Ukupna nesigurnost u procjeni brzine vjetra na mikrolokaciji vjetroelektrane 114
6. VJETROTURBINE 116
6.1 Vjetroturbine sa vertikalnom osovinom 116
6.1.1 Darijusova turbina 116
6.1.2 Savonijusova vjetroturbina 117
6.1.3 H vjetroturbine 120
6.2 Vjetroturbine sa horizontalnom osovinom 120
6.3 Mehaničke karakteristike modernih vjetroturbina velike snage 122
6.3.1 Betzov zakon 122
6.3.2 Principi mehaničke konverzije energije vjetra u vjetroturbini 126
6.3.3 Sila, moment i snaga vjetroturbine 134
6.4 Idealna karakteristika snage vjetroturbine 139
6.5 Koncepti upravljanja snagom kod realnih vjetroturbina 145
6.5.1 Vjetroturbine sa konstantnom brzinom obrtanja i fiksnim uglom lopatica 145
6.5.2 Vjetroturbina sa promjenljivom brzinom obrtanja i promjenljivim uglom lopatica 148
7. KONCEPTI ELEKTROMEHANIČKE KONVERZIJE ENERGIJE VJETRA 154
7.1 Vjetroagregat sa indukcionom mašinom sa kaveznim rotorom 156
7.2 Vjetroagregat sa indukcionom mašinom sa namotanim rotorom i promjenljivim otpornikom u rotorskom kolu 159

7.3 Vjetroagregat sa indukcionom mašinom sa kaveznim rotorom i pretvaračem u statorskom kolu 160
7.4 Vjetroagregat sa dvostrano napajanom indukcionom mašinom 161
7.5 Vjetroagregat sa sinhronom mašinom sa namotanim rotorom 166
7.6 Vjetroagregat sa sinhronom mašinom sa permanentnim magnetima 168
7.6.1 Konvencionalna mašina sa permanentnim magnetima 169
7.6.2 Konvencionalna mašina sa permanentnim magnetima sa koncentracijom fluksa 170
7.6.3 Mašina sa žljebovima i aksijalnim pravcem fluksa 170
7.6.4 Torusne mašine 171
7.7 Blok transformator kod vjetroagregata 172
7.8 Superprovodni vjetrogeneratori 173
8. ENERGETSKI PRETVARAČI KOD VJETROGENERATORA VELIKIH SNAGA 175
8.1 Tipovi energetskih pretvarača kod vjetrogeneratora sa asinhronom mašinom sa kaveznim rotorom i fiksnom brzinom obrtanja 175
8.1.1 Soft starter 175
8.1.2 Kompenzator reaktivne snage 177
8.2 Tipovi energetskih pretvarača u vjetrogeneratorima sa indukcionom mašinom sa namotanim rotorom 179
8.2.1 Pretvarač za dinamičku kontrolu snage disipacije na eksternom otporniku u rotroskom kolu 180
8.2.2 Back-to-back PWM naponski invertor kao pretvarač za DFIG konfiguraciju 181
8.3 Back-to-back PWM naponski invertor kao pretvarač za punu snagu 183
9. EKSPLOATACIONE KARAKTERISTIKE VJETROAGREGATA 186
9.1 Stepen iskorišćenja vjetroagregata 186
9.2 Kriva snage vjetroagregata 187
9.2.1 Kriva snage vjetroagregata sa fiksnom brzinom obrtanja i pasivnom (stall) kontrolom snage vjetroturbine 187
9.2.2 Kriva snage vjetroagregata sa promjenljivom brzinom obrtanja i aktivnom (pitch) kontrolom snage vjetroturbine 188
9.2.3 Histerezis krive snage vjetroagregata 190
9.2.4 Multimodne krive snage vjetroagregata 191
9.3 Uticaj turbulentnosti vjetra na krivu snage vjetroagregata 192
9.4 Uticaj gustine vazduha na krivu snage vjetroagregata 193
9.5 Uticaj atmosferskih padavina na efikasnost vjetroagregata 195
9.5.1 Uticaj snijega na eksploatacione karakteristike vjetroagregata 195
9.5.2 Uticaj grada na ekspoloatacione karakteristike vjetroagregata 195
9.5.3 Uticaj kiše na eksploatacione karakteristike vjetroagregata 195
9.5.4 Uticaj ambijentalne temperature na eksploatacione karakteristike vjetroagregata 196
9.6 Uticaj zaleđivanja vjetroturbina na efikasnost i životni vijek vjetroagregata 198
9.6.1 Zaleđivanje vjetroturbina 199
9.6.2 Efekti zaleđivanja vjetroturbina na krivu snage vjetroagregata 200

9.6.3 Tehnike za detekciju leda na vjetroturbinama 202
9.6.4 Tehnike za spriječavanje zaleđivanja i tehnike odleđivanja vjetroturbina 203
9.6.5 Procjena gubitaka proizvodnje vjetroagregata usljed zaleđivanja vjetroturbine 205
9.7 Mehanička naprezanja vitalnih elemenata vjetroagregata 206
9.8 Inteligentne vjetroturbine 211
9.8.1 Aktivne tehnike inteligentnih vjetroturbina 212
9.8.2 Pasivne tehnike inteligentnih vjetroturbina 213
10. OSNOVI PROJEKTOVANJA VJETROELEKTRANA 216
10.1 Izbor vjetroagregata 218
10.1.1 Klasifikacija mikrolokacije u pogledu karakteristika vjetra 219
10.1.2 Izbor visine stuba vjetroagregata 223
10.1.3 Izbor prečnika vjetroturbine 224
10.1.4 Izbor nazivne snage vjetrogeneratora 227
10.2 Efekat zavjetrine 230
10.2.1 Parametri koji utiču na efekat zavjetrine 232
10.2.2 Proračun brzine vjetra u zavjetrini vjetroturbina 232
10.2.3 Višestruka zavjetrina 235
10.2.4 Proračun turbulentnosti vjetra u zavjetrini vjetroturbine 236
10.2.5 Uticaj zakošenja vjetroturbine na prostiranje zavjetrine 238
10.2.6 Meandriranje zavjetrine 238
10.3 Mikrolociranje vjetroagregata pri projektovanju vjetroelektrana 240
10.4 Uslovi transporta komponenti vjetroagregata 244
10.5 Temelji vjetroagregata 248
10.6 Uslovi montaže vjetroagregata 250
11. GROMOBRANSKA ZAŠTITA I UZEMLJIVAČKI SISTEMI VJETROELEKTRANA 253
11.1 Mehanizmi atmosferskih pražnjenja u vjetroagregat 253
11.2 Zaštita komponenti vjetroagregata od atmosferskih pražnjenja 256
11.3 Uzemljivački sistem vjetroagregata 260
11.3.1 Koncepti uzemljivačkog sistema vjetroagregata 260
11.3.2 Povezivanje uzemljivačkih sistema vjetroagregata u vjetroelektrani 263
12. INTEGRACIJA VJETROELEKTRANA U ELEKTROENERGETSKI SISTEM 266
12.1 Koncept povezivanja vjetroelektrana na prenosni sistem 266
12.1.1 Transformatorska stanica za povezivanje vjetroelektrane na EES 267
12.1.2 Optimizacija interne kablovske mreže vjetroelektrane 270
12.2 Kontrola reaktivne snage vjetroelektrane 271
12.3 Frekvencijska kontrola aktivne snage vjetroelektrane 273
12.4 Stabilnost rada vjetroelektrane pri poremećajima napona u mreži 274
12.5 Prijemna testiranja vjetroelektrane 277
12.5.1 Prijemna testiranje vjetroagregata 277
12.5.2 Prijemna testiranje SCADA sistema 278

13. VJETROELEKTRANE NA MORU 281
13.1 Pregled tehničkih rješenja temeljenja vjetroagregata na moru 283
13.1.1 Vjetroagregati sa jednostubnim temeljima 284
13.1.2 Vjetroagregati sa gravitacionim temeljima 284
13.1.3 Vjetroagregati sa tronožnim temeljima 285
13.2 Pregled tehničkih rješenja plutajućih vjetroelektrana 286
13.2.1 Vjetroagregati sa plovkom (spar bouy) 286
13.3 Koncepti priključenja vjetroelektrana na moru na elektroenergetski sistem 288
13.3.1 Osnovni koncept HVDC sistema veza vjetroelektrane na moru sa postrojenjem na kopnu 290
13.3.2 Multiterminalni HVDC sistem veza vjetroelektrana na moru sa postrojenjima na kopnu 292
13.3.3 Podmorski visokonaponski (HVDC) kablovi 293
13.3.4 Koncepti interne kablovske mreže vjetroelektrane na moru 294
14. EKONOMIJA VJETROELEKTRANA 296
14.1 Struktura troškova izgradnje i eksploatacije vjetroelektrane 296
14.1.1 Investicioni troškovi 296
14.1.2 Operativni troškovi 298
14.1.3 Finansijski troškovi 299
14.2 Troškovi proizvodnje električne energije u vjetroelektrani 299
14.3 Proračun bruto godišnje proizvodnje vjetroelektrane 300
14.4 Procjena gubitaka proizvodnje vjetroelektrane 301
14.4.1 Neraspoloživost vjetroelektrane 301
14.4.2 Gubici usljed prejakog vjetra i histerezisa snage vjetroagregata 301
14.4.3 Električni gubici u internoj mreži do mjesta priključenja na EES 302
14.4.4 Gubici usljed neraspoloživosti priključne mreže 302
14.4.5 Gubici usljed zaleđivanja i degradacije lopatica vjetroturbine 302
14.4.6 Gubici usljed isključenja vjetroturbine zbog buke i drugih uticaja na okolinu 302
14.4.7 Ostali gubici 303
14.4.8 Tipične vrijednosti gubitaka snage 303
14.5 Procjena neto proizvodnje vjetroelektrane 304
14.6 Nesigurnosti u procjeni proizvodnje vjetroelektrane 305
14.7 Procjena proizvodnje vjetroelektrane sa zadatom vjerovatnoćom 307
14.8 Mjere ekonomičnosti projekta vjetroelektrane 310
14.8.1 Neto sadašnja vrijednost 311
14.8.2 Interna stopa povrata 312
14.8.3 Indeks profitabilnosti projekta 312
15. NEGATIVNI UTICAJI RADA VJETROELEKTRANA NA OKOLINU 313
15.1 Uticaj vjetroelektrana na ptice 313
15.2 Uticaj vjetroelektrana na slijepe miševe 316
15.3 Uticaj vjetroelektrana na akustičko zagađenje okoline 318
15.3.1 Izvori buke kod vjetroagregata 318

15.3.2 Prenošenje buke vjetroagregata u okolni prostor 320
15.4 Treperenje sjenke vjetroturbina 324
15.5 Otkidanje ledenica sa lopatica i razlijetanje vjetroturbine 325
15.6 Vizuelni uticaj vjetroelektrana 326
15.7 Uticaj vjetroelektrana na moru na životnu sredinu 328
16. MONITORING I DIJAGNOSTIKA STANJA VJETROAGREGATA 331
16.1 Kvarovi na vitalnim djelovima vjetroagregata 332
16.2 Teorija održavanja vjetroagregata 335
16.2.1 Preventivno održavanje 335
16.2.2 Korektivno održavanje 336
16.2.3 Prediktivno održavanje 336
16.3 Raspoloživost vjetroagregata 337
16.4 Principi monitoringa i dijagnostike stanja komponenti vjetroagregata 338
16.4.1 Prikupljanje podataka 339
16.4.2 Obrada podataka 339
16.4.3 Detekcija kvara 340
16.4.4 Dijagnostikovanje kvara 340
16.4.5 Procjena preostalog radnog vijeka komponenti vjetroagregata 341
16.4.6 Planiranje remonta komponenti vjetroagregata 342
16.5 Tehnologije monitoringa komponenti vjetroagregata 342
16.5 Protivpožarna zaštita vjetroagregata 346
LITERATURA 347

1. UVOD

Globalni ekološki problemi i problemi energetskog deficita se danas u svijetu posmatraju kao jedinstven problem dobijanja čiste energije u skladu sa principima održivog razvoja. Održivi razvoj podrazumijeva razvoj koji ispunjava potrebe sadašnjosti bez ugrožavanja mogućnosti narednih generacija da ispune svoje buduće potrebe. Od svih obnovljivih izvora energije najveći tehnološki napredak i najveći trend izgradnje u svijetu u posljednjih 20 godina imaju vjetroelektrane.

1.1 Istorijat vjetroelektrana

Drvo i energija vjetra su prvi oblici primarne energije koju je čovjek koristio. Vjeruje se da je energija vjetra korišćena za navodnjavanje još prije 3000 godina. Prvi pisani tragovi datiraju iz 200. godine p.n.e. i odnose se na vjetrenjače korišćene za mljevenje žita u tadašnjoj Persiji. Ove drevne mašine imale su vertikalne osovine sa krilima od drveta i trske. Početkom 12. vijeka vjetrenjače se pojavljuju u Evropi u modifikovanom obliku sa horizontalnom osovinom, slika 1.1. Nešto kasnije ove vjetrenjače su usavršene, tako da je rotor mogao ručno da se okreće prema vjetru ili van tog pravca u slučaju jakih vjetrova, kada je i platno sa krila moglo da se skine.



Slika 1.1: Drevna vjetroturbina za mljevenje žita

U inovacijama su prednjačili Holanđani, koji su vjetrenjače koristili za pokretanje pumpi za vodu, kojima su isušivali močvarne predjele. Polovinom 18. vijeka, preko holandskih doseljenika, ova tehnologija stiže u Ameriku gdje se dalje razvija za potrebe pumpanja vode, uglavnom radi zalivanja polja. Američke vjetrenjače sastojale su se od više metalnih lopatica i imale su manju površinu rotora. Bile su veoma dobre za svoju namjenu i široko rasprostranjene (preko 6 miliona ih je instalirano u Americi u periodu 1850–1930. godine).

Prvu vjetroturbinu koja je korišćena za generisanje električne energije napravio je 1891. godine Danac Pol La Kur (*Poul la Cour, 1846–1908*). Interesantno je da je Pol La Kur koristio ovako proizvedenu električnu energiju za elektrolizu vode i na taj način je proizvodio vodonik za gasne lampe, koje su korišćene u lokalnoj školi. Danas se može reći da je on bio 100 godina ispred svoga vremena, jer su savremene vizije razvoja vjetroenergetike povezane upravo sa korišćenjem vjetrogeneratora za proizvodnju vodonika u udaljenim vjetrovitim lokacijama na sjevernom moru.

Nakon prvog vjetrogeneratora počinje njihov dalji razvoj i širenje:

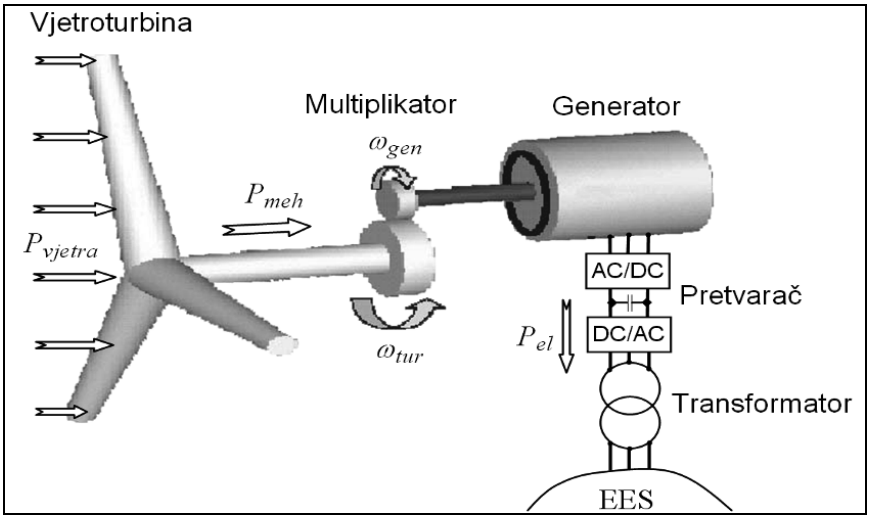
- 1910. postoji oko sto vjetrogeneratora u Danskoj.
- 1925. počinje komercijalna upotreba na američkom tržištu.
- 1931. prvi vjetrogenerator snage 100 kW u Rusiji.
- 1941. u Americi je pušten u rad vjetrogenerator snage 1250 kW. Turbina je imala rotor prečnika 53 m i bila je montirana na tornju visine 34 m. Mogla je da ostvari konstantnu brzinu obrtanja zakretanjem lopatica.

Nakon završetka Drugog svjetskog rata, ekonomija u elektroenergetici biva okrenuta velikim termoelektranama na fosilna goriva i velikim hidroelektranama, tako da vjetrogeneratori, kao i ostali mali izvori, postaju nekonkurentni i polako prelaze u zaborav.

Energetska kriza iz 1973. godine, a kasnije i sve veći ekološki problemi vezani za sagorijevanje fosilnih goriva, ponovo popularizuju obnovljive izvore energije i početkom devedesetih godina vjetrogeneratori doživljavaju renesansu. Velika finansijska ulaganja i jasna opredijeljenost najrazvijenijih država da stimulišu proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora rezultovale su izuzetno brzim razvojem vjetroenergetike, tako da ona danas predstavlja granu energetike sa najvećim trendom razvoja u svijetu. Vjetroenergetika je evropska inicijativa, ali je brzo prihvaćena na svim kontinentima, tako da se danas bilježi porast instalisanih kapaciteta u svim razvijenim ekonomijama svijeta. Očekuje se da će energija vjetra do 2050. godine biti dominantan izvor električne energije u svijetu.

1.2 Savremeni koncept elektromehaničke konverzije energije vjetra

Principska šema konverzije energije vjetra u električnu u modernim vjetroagregatima koji su priključeni na elektroenergetski sistem (EES) prikazana je na slici 1.2.



Slika 1.2: Savremeni koncept elektromehaničke konverzije energije vjetra u vjetroagregatima koji su priključeni na EES

U pogledu terminologije, sugerišu se sljedeći termini: vjetroturbina, vjetrogenerator, vjetroagregat, vjetroelektrana. Ova terminologija je u skladu sa odomaćenim terminima koji se koriste u hidroenergetici (hidroturbina, hidrogenerator, hidroagregat, hidroelektrana) i termoenergetici.

Kinetička energija vjetra se transformiše u mehaničku energiju pomoću **vjetroturbine**. Brzinu obrtanja vjetroturbine (koja iznosi desetak obrtaja u minutu) obično je potrebno prilagoditi zahtijevanoj brzini obrtanja generatora. Za to se koristi mehanički multiplikator. **Vjetrogenerator** je električna mašina (generator) koja može biti sinhrona ili indukciona (asinhrona), pri čemu može raditi sa fiksnom ili promjenljivom brzinom obrtanja. Uloga pretvarača je da frekvencijski raspregne generator od elektroenergetske mreže, odnosno, da omogući upravljanje momentom generatora (promjenljivu brzinu obrtanja), kao i da omogući upravljanje reaktivnom snagom koju vjetrogenerator razmjenjuje sa EES-om. Generator se naponski prilagođava EES-u pomoću energetskog blok-transformatora. **Vjetroagregat** predstavlja kompletan funkcionalni sklop sistema za elektromehaničku konverziju energije vjetra. Njega čine: vjetroturbina, reduktor, vjetrogenerator, blok transformator, sistemi za kontrolu i upravljanje, pomoćni sistemi (kran, sistemi za hlađenje, osvetljenje,...) i stub sa temeljom. Na slici 1.3 prikazan je funkcionalni sklop modernog vjetroagregata (*SiemensGamesa SG 4.5–145 MW*).