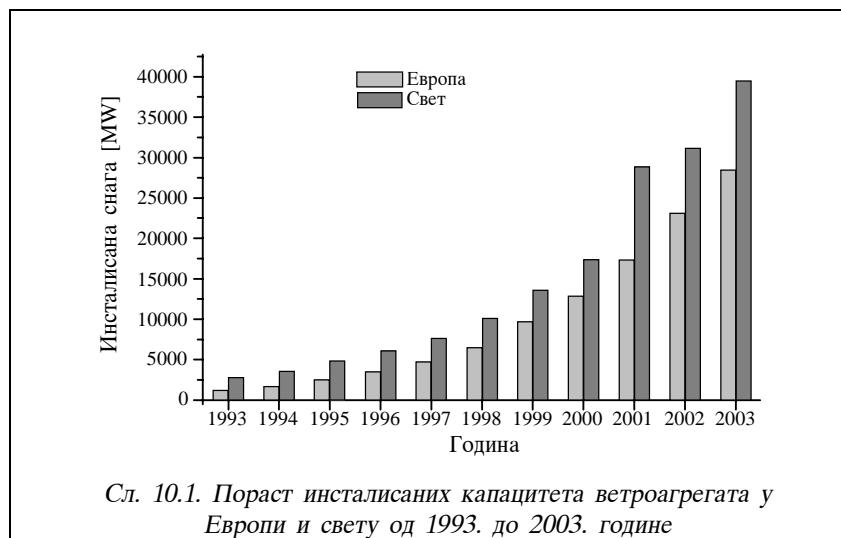


10. ВЕТРОГЕНЕРАТОРИ

Ветар је бесплатан и неисцрпан енергетски ресурс. Користи се од давнина. До индустријске револуције ветар је уз дрво био највећи извор енергије. Користио се за покретање бродова, млинова и пумпи за воду. Производња електричне енергије из ветра почела се развијати тридесетих година прошлог века. Тада је почела изградња првих ветроагрегата за конверзију енергије ветра у електричну. Развојем великих хидро, термо и нуклеарних електрана ветроагрегати, економски и технички неконкурентни, су пали у заборав. Међутим, иссрпивост резерви фосилних горива и еколошки проблеми иззвани њиховом експлоатацијом, довели су почетком деведесетих година прошлог века до ваксра ветроагрегата.

Ветроенергетика је млада грана енергетике која се интензивно развија у погледу технолошког развоја ветроагрегата, али и у погледу њихове изграђене инсталисане снаге. Слика 10.1 даје пораст инсталисаних капацитета ветроагрегата у Европи и свету у последњих 10 година.



Око 80% свих светских ветроагрегата инсталирало је у земљама Европске Уније (ЕУ). ЕУ из инсталираних 28440 MW (децембар 2003.) подмирује око 2,5% укупних потреба за електричном енергијом. Предвиђа се да ће ветроагрегати у будућности битно повећати учешће у производњи укупне

електричне енергије. Оваква предвиђања се базирају на чињеници да је ветар обновљиви еколошки извор и да су његови технички искористиви ресурси вишеструко већи од укупне тренутне потрошње електричне енергије. Међутим, ветар као примарни енергент има и низ недостатака, па се о перспективи ветроагрегата још увек не може поуздано говорити.

Циљ овог одељка је да изложи основне принципе и проблеме везане за ветроагрегате, при чему је пажња посвећена ветроагрегатима који се везују на дистрибутивну мрежу, те су саставни део електроенергетског система (ЕЕС). Приказани су различити типови ветроагрегата који су до сада развијени.

10.1. ГЛОБАЛНИ И ЛОКАЛНИ ВЕТРОВИ

Ветар као облик сунчеве енергије представља усмерено кретање ваздушних маса. Настаје као последица разлика у атмосферским притисцима, које су узроковане неједнаким загревањем ваздушних маса. Разликују се **глобални и локални ветрови**.

Глобални ветрови су висински. Настају као последица неједнаких загревања ваздушних маса у земљиној атмосфери. У зонама око екватора ваздух се интензивније загрева него на половима, где је соларно зрачење мање због мањег упадног угла. Ове разлике у температури генеришу ветрове. Топао ваздух са екватора се диже увис и струји ка северном и јужном полу. Зато се у зонама око екватора смањује атмосферски притисак, те хладнији ваздух са севера и југа струји ка екватору, наравно на мањој висини у односу на топли ваздух. Ово кретање ваздушних маса се одвија на висинама од 1 km до 10 km и представља глобалне ветрове. Када Земља не би ротирала, топле ваздушне масе, које се уздижу са екватора би стизале до северног и јужног пола где би се хладиле, понирале и враћале назад. Међутим, због Земљине ротације, при кретању ваздушних маса ка половима на њих делује и Кориолисова сила која утиче на смерове струјања ваздуха. Осим тога ова сила на различитим географским ширинама формира зоне са високим и ниским ваздушним притиском које представљају изворе и поноре глобалних ветрова. С обзиром да су глобални ветрови висински они се не могу користити за погон ветрогенератора, али их треба познавати јер утичу на ветрове у низим слојевима атмосфере.

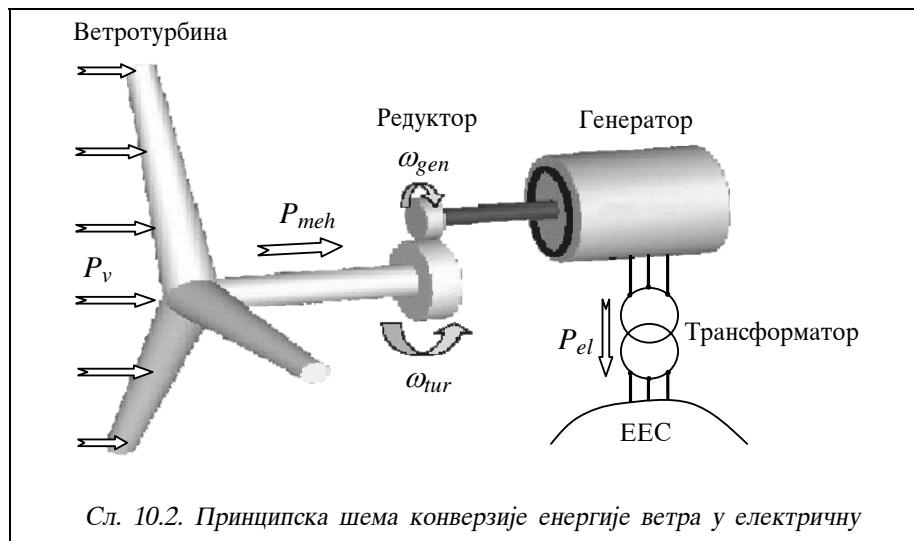
Локални ветрови представљају кретање ваздушних маса у приземном слоју атмосфере. Настају због локалних разлика у атмосферским притисцима. Типични локални ветрови су морски и планински ветрови. Морски ветрови настају услед разлике у температурама мора и копна. Копно се дању брже греје од мора, па се топлији ваздух изнад копна диже и ствара низак притисак изнад тла. Тиме се покреће хладнији ваздух изнад мора ка копну. Ноћу, због бржег хлађења копна, море постаје топлије, па се мења смер ветра од копна ка мору.

У планинама, као последица загревања сунчаних страна планине, настају струјања која су преко дана усмерена уз планину, а ноћу мењају смер.

На локалне ветрове велики утицај има рељеф терена. С тим у вези јавља се низ ефеката локалног повећања брзине ветра. На пример, ветар је интензивнији на врху брда него у подножју. Тунел ефекат је убрзавање ветра између два брда која на ветар делују као природни левак. Ефекат брда и ефекат тунела могу локално повећати брзину ветра и до 30%, што вишеструко повећава његову снагу. Осим ових позитивних ефеката, у граничном површинском слоју постоје различите природне и вештачке препреке које узрокују и негативне ефекте смањења брзине ветра и појаву турбуленција, што знатно утиче на квалитет ветра као примарног енергента.

10.2. ПРИНЦИП КОНВЕРЗИЈЕ ЕНЕРГИЈЕ ВЕТРА У ЕЛЕКТРИЧНУ

За ветроенергетику су од посебног интереса површински ветрови у приземном слоју атмосфере до висине од 200 м. У том слоју се на погодним локацијама постављају ветроагрегати који врше конверзију енергије ветра у електричну. Електрична енергија се испоручује ЕЕС-у или изолованим потрошачима. Принципска шема конверзије енергије ветра у електричну у ветроагрегатима, који су прикључени на мрежу приказана је на слици 10.2.



Сл. 10.2. Принципска шема конверзије енергије ветра у електричну

Кинетичка енергија ветра се трансформише у механичку енергију помоћу ветротурбине. Брзину обртавања ветротурбине (која износи неколико

десетина обратаја у минуту) обично је потребно прилагодити захтеваној брзини генератора. Зато се користи механички редуктор. Електрични генератор (у даљем тексту користиће се термин **ветрогенератор**, по аналогији са хидрогенератором и турбогенератором) може бити синхрони или индукциони (асинхрони), при чему може радити са фиксном или променљивом брзином обртања. Генератор се напонски прилагођава ЕЕС-у помоћу енергетског трансформатора.

10.3. ВЕТРОТУРБИНА

Постоје различите конструкције ветротурбина. Циљ је да се постигне што већи степен искоришћења и стабилан рад у што ширем опсегу брзина ветра. Развој ветротурбина је још увек интензиван.

10.3.1. Врсте ветротурбина

Постоје ветротурбине са:

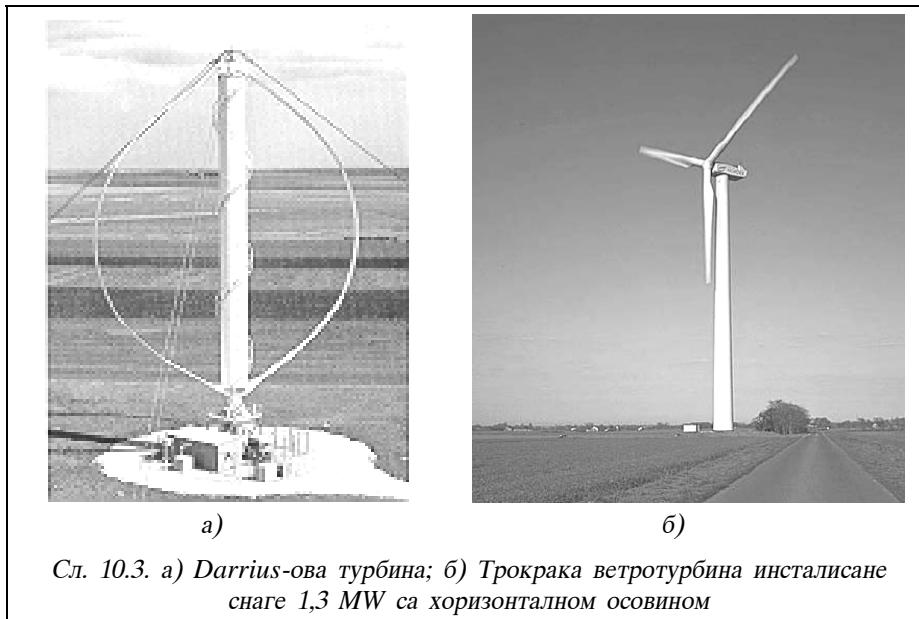
- вертикалном осовином, и са
- хоризонталном осовином.

Код ветротурбина са вертикалном осовином ветар струји нормално на осу ротације, па се оне не морају усмеравати према смеру дувања ветра. Код њих се генератор поставља у подножје турбине, те нису потребни јаки торњеви. Вертикално вратило има Darrius-ова турбина, (сл. 10.3. а). Име је добила по инжењеру George Darrius-у (патент из 1931. год). Dartius-ова турбина се обично гради са два или три лука. Ветротурбине са вертикалном осовином генерално имају низак степен искоришћења, па се из тог разлога данас практично не користе за ветроагрегате већих снага.

Ветротурбине са хоризонталном осовином могу бити постављене уз и низ ветар. Ветротурбине постављене низ ветар се саме прилагођавају смеру ветра. Недостатак им је што лопатице при ротацији пролазе кроз заветрину стуба, чиме се стварају механичке вибрације и бука. Осим тога стуб ствара и турбулencије што смањује ефикасност ветротурбине, па се овај концепт не користи за веће снаге.

Модерне ветротурбине се граде са хоризонталном осовином која има систем за закретање осовине у хоризонталној равни за праћење промене смера ветра. Могу имати различит број лопатица, али се за веће снаге најчешће користе три лопатице јер дају највећи степен искоришћења (сл. 10.3. б). Пречник ротора (радног кола или елисе) ових турбине зависи од снаге и креће се од 30 m за снагу од 300 kW до 115 m за снагу од 5 MW. Ветротурбина се поставља на вертикални стуб који, у зависности од пречника ротора турбине,

може бити висок и преко 100 м. Стуб се најчешће гради као челични конусни, а ређе као челично-решеткасти.

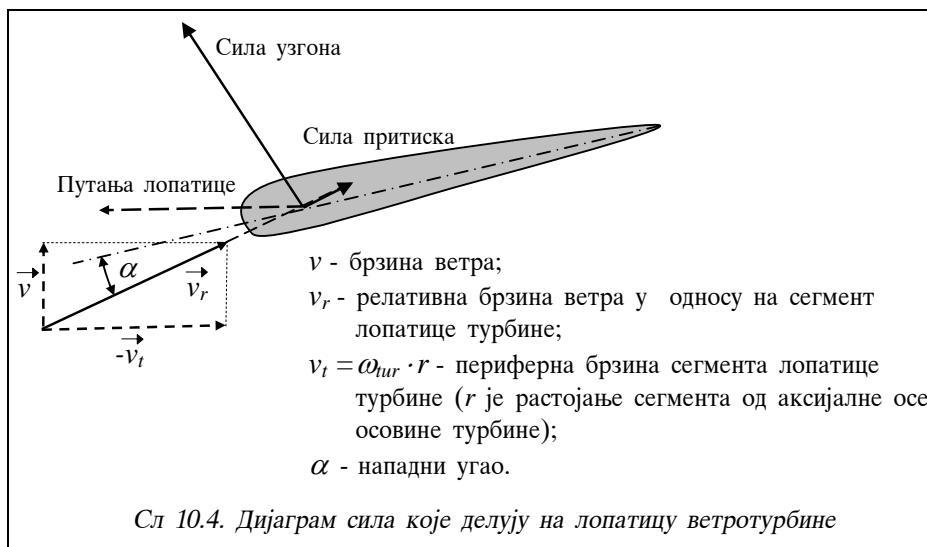


Сл. 10.3. а) *Darrius*-ова турбина; б) Трекрака ветротурбина инсталисане снаге 1,3 MW са хоризонталном осовином

10.3.2. Механичка карактеристика ветротурбине

Конверзија кинетичке енергије ветра у обртно кретање турбине се врши захваљујући аеродинамичком профилу лопатица ветротурбине. На слици 10.4. приказан је попречни профил лопатице ветротурбине и означене су сile које делују на њу. Као код авионских крила, лопатица турбине има аеродинамички профил, те ваздух са задње стране лопатице струји брже од ваздуха са предње стране, гледано у смеру ветра. Услед разлике у брзинама струјања ваздуха јавља се разлика у притисцима са задње и предње стране лопатице турбине, што узрокује узгонску силу, чија пројекција на раван ротације генерише обртни момент. Поред ове силе, делује и сила директног притиска ветра на лопатицу али је њен утицај на обртни момент много мањи.

С обзиром да лопатица ротира, за сile које делују на лопатицу меродавна је брзина ветра (v) и обимна брзина (v_r) посматраног сегмента лопатице, односно релативна брзина ветра у односу на лопатицу турбине (векторска сума обимне брзине лопатице са (-) предзнаком и брзине ветра). Сваки сегмент лопатице има различиту брзину (сегменти даљи од осе ротације имају већу обимну брзину), те се и релативна брзина ветра мења дуж лопатице.



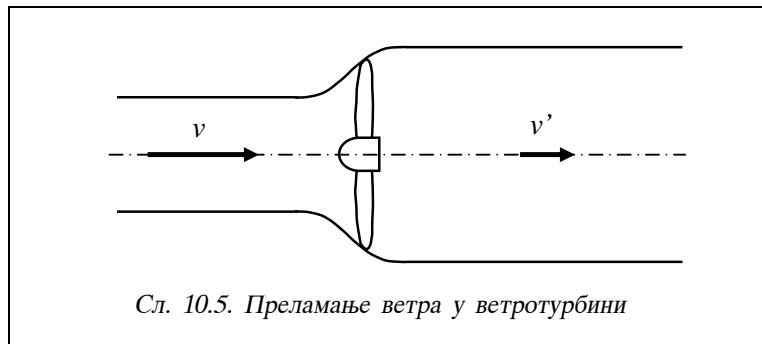
Идући од осе ротације ка периферији лопатице релативна брзина ветра се повећава а њен нападни угао у односу на осу ротације се смањује. Зато су лопатице ветротурбина увијене дуж аксијалне осе. Сегменти лопатице блиски оси ротације имају велики угао у односу на раван ротације, док периферни сегменти имају мали угао у односу на раван ротације. Када би сви сегменти лопатице турбине имали исти и велики угао у односу на раван ротације, на периферним деловима лопатице стварао би се негативан (кочиони) момент. Овај ефекат се користи за аеродинамичко кочење ветротурбина при великим брзинама ветра, о чему ће бити речи касније.

На ефикасност ветротурбина утичу: ламинарност струјања ветра, стање површине лопатица, густина, влажност и температура ваздуха и други фактори. Зато се за обликовање лопатица ветротурбина користе сложени математички модели а верификација прорачуна врши се на физичким моделима у аеродинамичким тунелима.

При проласку ветра кроз ветротурбину један део његове кинетичке енергије се предаје ротору. Макроскопски гледано ветротурбина успорава ветар. Количина ваздуха која улази у ветротурбину у стационарном режиму једнака је количини ваздуха која из ње излази. Излазна брзина ваздуха је мања од улазне, те ваздух који излази из турбине захвата пресек већег пречнича. Овај ефекат се назива **преламање ветра** (сл.10.5).

У реалности преламање ветра наступа пре него што ветар дође до ветротурбине. Како ветар прилази ветротурбини притисак испред ње постепено

расте, јер се она понаша као баријера која је на путањи ветра. Струјице ваздуха услед тога почињу да се закрећу (преламају) тежећи да "обиђу" ветротурбину. Услед таквог опструјавања притисак иза турбине нагло опада, а затим постепено расте до вредности која одговара атмосферском притиску.



Енергетски посматрано ветротурбина одузима енергију ветру која је сразмерна разлици кинетичких енергија ветра пре и након проласка кроз турбину. Снага којом се врши конверзија енергије ветра, односно механичка снага P_{meh} коју развија ветротурбина на свом вратилу је:

$$P_{meh} = \frac{1}{2} C_p \rho \pi R^2 v^3 , \quad (10.1)$$

где је: v - брзина ветра на улазу у ветротурбину,
 R - радијус ветротурбине,
 ρ - густина ваздуха и
 C_p - коефицијент искоришћења снаге ветротурбине, који се дефинише као однос механичке снаге ветротурбине према одговарајућој снази ветра P_v на улазу у ветротурбину ($C_p = \frac{P_{meh}}{P_v}$).

Максимална теоријска снага коју може ветротурбина развити дефинисана је Betz-овим законом. Betz је показао да се максимална снага идеализоване ветротурбине постиже ако је однос брзина ветра пре и након проласка кроз турбину $\frac{v'}{v} = \frac{1}{3}$. При овом односу брзина ветра степен

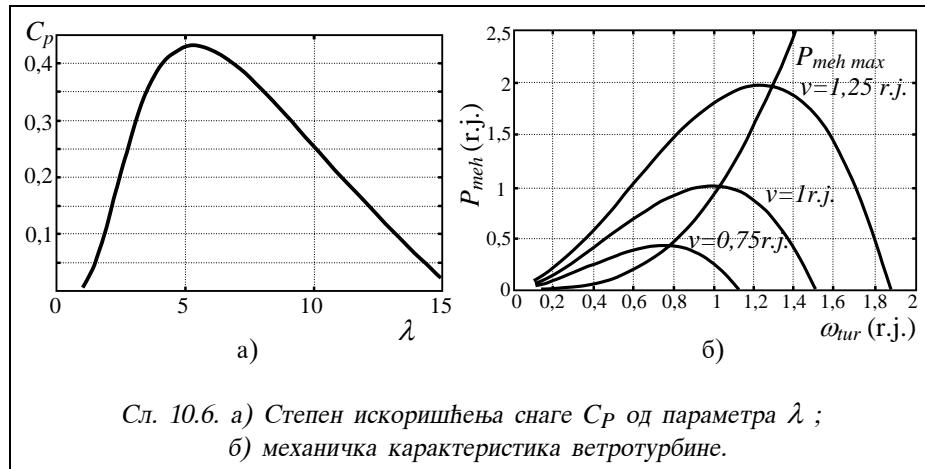
искоришћења снаге има максималну вредност $C_{p\max} = \frac{16}{27} = 0,5926$. Теоријски максимум степена искоришћења енергије ветра у ветротурбини је 59 %. За стандардну густину ваздуха $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$, израз (10.1) даје:

$$P_0 = 0,369 A v^3 , \quad (10.2)$$

где је $A = R^2 \pi$ површина круга који при обртању пребришу лопатице.

Код реалних ветротурбина максималан степен искоришћења креће се од 40 до 45%. Интересантно је упоредити степен искоришћења снаге C_p ветротурбине са коефицијентом искоришћења хемијске енергије угља у термоелектранама, који износи (30 – 40)%.

При некој брзини ветра, променом брзине обртања ветротурбине ω_{tur} мења се упадни угао релативне брзине ветра, те се мења сила узгона и степен искоришћења C_p . Обично се даје степен искоришћења снаге C_p у функцији параметра $\lambda = \frac{\omega_{tur} R}{v}$, који представља однос обимне брзине врха лопатице и брзине ветра (tip - speed - ratio). Зависност $C_p = f(\lambda)$ за једну трокраку ветротурбину је приказана на слици 10.6. а).



Сл. 10.6. а) Степен искоришћења снаге C_p од параметра λ ;
б) механичка карактеристика ветротурбине.

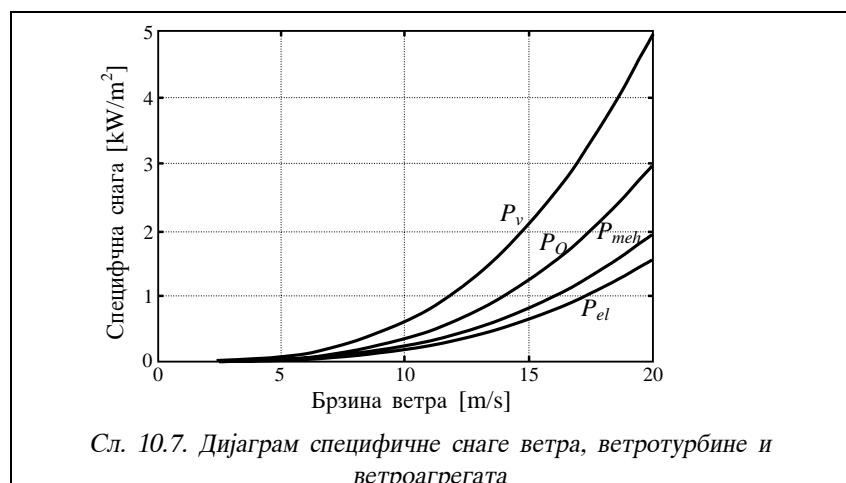
Из $C_p = f(\lambda)$ може се закључити да за неку брзину ветра v постоји оптимална брзина обртања турбине ω_o при којој је степен искоришћења максималан. Односно, за сваку брзину ветра постоји оптимална брзина обртања

ветротурбине при којој је степен искоришћења највећи. Повезивањем ових максимума добија се механичка карактеристика ветротурбине (сл. 10.6. б). При промени брзине ветра потребно је мењати брзину обртања ротора ветротурбине да би се постигао режим са највећим степеном искоришћења. Зато савремени ветроагрегати великих снага раде са променљивом брзином обртања. Када ветротурбина покреће ветрогенератор коме се брзина не може мењати, брзина обртања турбине се бира тако да степен искоришћења буде највећи при доминантној брзини ветра на месту инсталисања ветроагрегата.

Како је $\lambda = \frac{\omega_{tar} R}{v}$ турбине мањег пречника имаје већу оптималну

брзину обртања од турбина већег пречника при истој брзини ветра.. Зато ветротурбине ветроагрегата мање снаге имају већу брзину обртања. Оптимална вредност параметра λ генерално је већа ако је број лопатица турбине мањи. Зато двокрака и једнокрака турбина са контратегом имају знатно веће радне брзине обртања у односу на трокраку турбину исте номиналне снаге, што није добро због већих механичких напрезања ротора и генерирања буке при раду.

На слици 10.7. дат је дијаграм специфичне снаге ветра, ветротурбине и ветроагрегата у функцији брзине ветра. Дијаграм одговара принципској шеми са слике 10.2. На ординати је специфична снага по јединици површине ветротурбине. Дијаграм са слици 10.2 није узео у обзир ограничења по максималној снази ветроагрегата. Реални ветроагрегати имају ограничења по максималној снази, па се дијаграм снаге реалне ветротурбине само у одређеном опсегу брзина ветра поклапа са датим дијаграмом, о чему ће бити речи у наредном одељку.



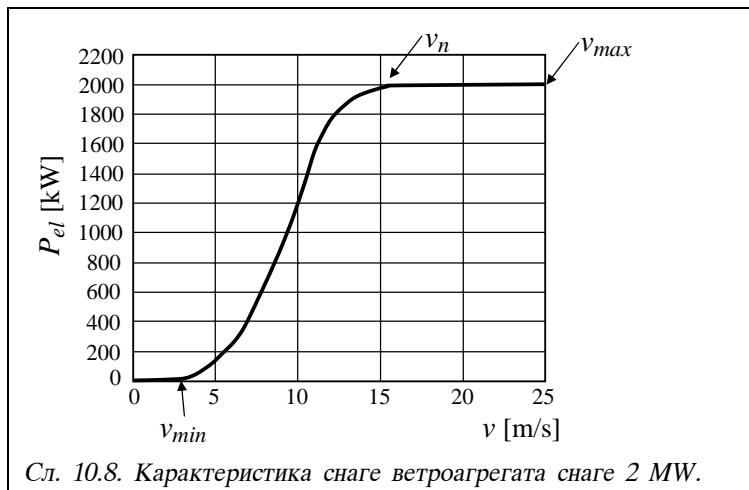
Са слике 10.7. види се да је специфична снага ветра за најчешће брзине ветра релативно мала. Зато се граде велике ветротурбине да би се постигле снаге реда неколико MW. Највећа комерцијална ветротурбина развија снагу од 5 MW. Пречник ротора је 115 м. Величина ветротурбина ограничава снагу ветроагрегата. Стохастичност ветра и мала густина снаге су највеће мање ветра као примарног извора енергије.

10.3.3. Управљање ветротурбином

Није економично пројектовати ветротурбину која би при свим брзинама ветра имала максималан степен искоришћења, јер се ветрови великих брзина (изнад 14 m/s) ретко јављају, па би ветротурбина за најчешће ветрове била предимензионисана. При великим брзинама ветра (изнад 25 m/s) ветротурбина се из сигурносних разлога зауставља. Пројектовати ветротурбину за рад при великим брзинама ветра је технички могуће али је неекономично. Ветротурбина има и минималну радну брзину, јер при малим брзинама ветра њен рад постаје неефикасан и нестабилан. Дакле, ветроагрегат нормално ради у одређеном опсегу брзине ветра. Тада опсег је дефинисан са три карактеристичне брзине ветра за сваки ветроагрегат:

- минимална радна брзина ветра v_{min} (*cut-in wind speed*) је брзина ветра при којој ветроагрегат почиње производњу електричне енергије. За брзине ветра $v < v_{min}$ ветротурбина је укочена. Типична вредност брзине укључења код трокраких ветротурбина је $v_{min} = (2,5 \div 3,5)$ m/s;
- номинална радна брзина ветра v_n (*nominal wind speed*) је минимална брзина ветра при којој ветроагрегат достиже своју номиналну снагу. Номинална брзина код ветроагрегата за мање ветровите локације је $v_n = (10 \div 13)$ m/s, а за ветровите локације је $v_n = (14 \div 17)$ m/s;
- максимална радна брзина ветра v_{max} (*cut-out wind speed*) је брзина ветра при којој се ветротурбина зауставља. Брзина искључења је обично $v_{max} = 25$ m/s, мада постоје ветроагрегати са $v_{max} > 30$ m/s. Ветротурбина је механички пројектована да у укоченом стању издржи и екстремно велике брзине ветра (*survival wind speed*) од $(60 \div 70)$ m/s.

Карактеристичне брзине ветра су означене на карактеристици снаге једног реалног ветроагрегата (сл. 10.8).



Сл. 10.8. Карактеристика снаге ветроагрегата снаге 2 MW.

С обзиром на облик карактеристика снаге назива се "S" кривом ветроагрегата. Она је најважнија карактеристика за корисника ветроагрегата, јер показује колику активну снагу ветроагрегат може развити при различитим брзинама ветра мереним на нивоу осовине ветротурбине. "S" крива ветроагрегата је од стране произвођача дата за одређену густину, притисак, температуру ваздуха (обично за $\rho=1,225 \text{ kg/m}^3$, $p=1015 \text{ mbar}$ и $t=15^\circ \text{ C}$) и ниво турбулентности ветра. Сматра се да ветар дува нормално на раван ротације ротора.

Са аспекта управљања ветротурбином на карактеристици снаге разликују се две суштински различите радне области $v_{\min} < v < v_n$ и $v_n < v < v_{\max}$.

У опсегу брзина ветра $v_{\min} < v < v_n$ код ветротурбина са променљивом брзином обртања активна је управљачка контура $v - \omega_{tur} - P_{meh}$. Помоћу анемометра мери се брзина ветра v и прорачунава се оптимална брзина обртања турбине ω_0 тако да степен искоришћења турбине буде максималан. У опсегу брзина $v_{\min} < v < v_n$ ветроагрегат прати криву максималне снаге турбине P_{mehmax} , слика 10.6. б). Промена брзине обртања турбине се врши управљањем електромагнетским моментом ветрогенератора којег погони ветротурбина. Проблем код оваквог управљања је промена параметара ветра (густина ваздуха, турбулентност, ...) који мењају механичку карактеристику турбине и отежавају проналажење оптималне брзине обртања турбине ω_0 .

Развијени су алгоритми за нумеричко одређивање оптималне брзине обртања турбине.

Када брзина ветра постане $v=v_n$ генератор достиже своју номиналну снагу. При даљем повећању брзине ветра потребно је смањивати степен искоришћења ветротурбине да се генератор не би преоптеретио. У овом опсегу брзина ветра основни захтев је смањити степен искоришћења ветротурбине тако да јој снага остане блиска номиналној вредности. Реализација контроле у опсегу брзина ветра $v_n < v < v_{max}$ врши се у оквиру управљачко – контролне петље $P_{el} - P_{meh}$. На мрежним приклучцима ветрогенератора мери се активна (P_{el}) и реактивна (Q) снага ветрогенератора. Ако је $P_{el} > P_n$ (уз претпоставку да је фактор снаге $\cos\varphi=1$) треба смањити степен искоришћења ветротурбине тако да снага буде номинална. ($P_{el} \approx P_n$).

Постоје различити начини регулације снаге ветротурбине:

- **Конструкцијом лопатица (*Stall* контрола).** Ово је пасивни систем регулације снаге ветротурбине. Постиже се конструкцијом лопатица ветротурбине. Лопатице су тако конструисане да при брзинама ветра близким номиналној брзини v_n нападни угао ветра на одређеном делу лопатица постане релативно велики $\alpha = (15^\circ \div 20^\circ)$. При том нападном углу струја ваздуха се одвајају од профила лопатице и започиње турбуленција, те сила узгона слаби. Ово се назива *stall* ефекат. Са порастом брзине ветра, *stall* ефекат постаје израженији и захвата све већи део лопатице. Турбуленција смањује узгонску силу и снагу ветротурбине. Мана овог начина регулације снаге је што он није у потпуности контролабилан, а карактерише га опадање снаге турбине испод номиналне вредности након појаве *stall* ефекта. *Stall* ефекат се може појавити и при низим брзинама ветра од номиналне ако су лопатице ветротурбине запрљане или оштећене. Предност овог начина контроле је једноставност и ниска цена. Користи се углавном код ветротурбина са константном брзином обртања.
- **Закретањем лопатица (*Pitch* регулација).** Користи се за ветроагрегате веће снаге са променљивом брзином обртања. Лопатице ветротурбине закрећу се помоћу хидрауличног серво мотора. Опсег промене угла лопатице (*pitch angle*) је 0° до 35° . Закретањем лопатица мења се нападни угао ветра, те се мења узгонска сила односно снага ветротурбине. Закретање лопатица ветротурбине је аналогно закретању лопатица обртног кола код Капланових хидротурбина. Закретањем лопатица при покретању ветротурбине подешава се нападни угао ветра тако да се постигне највећи

полазни момент. Предност овакве регулације је контролабилност а мана је сложен механизам и висока цена.

- **Закретањем и конструкцијом лопатица (активна stall регулација).** Ово је комбинација претходна два начина регулације па се назива *Combi Stall* регулација. Код овог система опсег промене угла закретања је мали. Циљ је да се елиминишу негативни ефекти *stall* регулације. Овај и претходни систем регулације штити ветроагрегат у случајевима непланираног искључења са мреже или кратког споја у мрежи при јаком ветру. У таквим случајевима долази до растерећења ветрогенератора и повећања брзине обртања ветроагрегата. Услед великих центрифугалних сила може доћи до хаварије.

При брзинама ветра већим од максималне радне ветроагрегат се из сигураносних разлога зауставља и одржава у закоченом стању помоћу хидрауличне диск кочнице која је смештена на високобрзинској (генераторској) осовини.

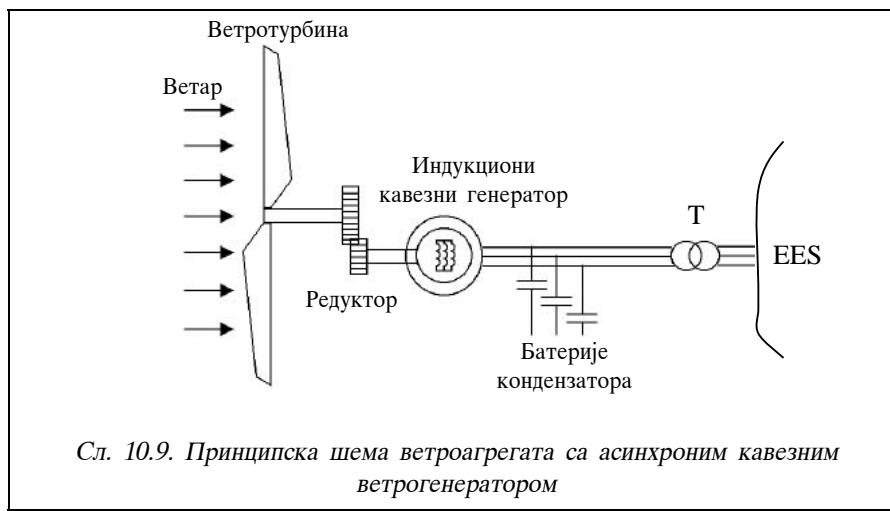
10.4. КОНЦЕПТИ КОНВЕРЗИЈЕ ЕНЕРГИЈЕ ВЕТРА У ЕЛЕКТРИЧНУ

Основни проблем при конверзији енергије ветра у електричну је обезбеђење поузданог и ефикасног рада ветрогенератора при променљивој снази ветра. Ефикасан рад ветроагрегата захтева прилагођавање ветротурбине брзини ветра тако да се оствари максималан степен искоришћења уз задовољење електричних и механичких ограничења. При великим варијацијама брзине ветра, јавља се проблем нестабилног рада ветроагрегата али и електричних величине које он генерише (напонски флиkeri - пропади напона, ниво хармоника и слично). Зато се у ветроагрегатима не могу користити стандардни синхрони генератори и стандардни системи управљања и регулације какви се примењују у хидро и термоелектранама где је могуће планирати снагу агрегата.

Код савремених ветроагрегата користи се више врста ветрогенератора. Ветрогенератори могу бити са сталном или променљивом брзином обртања. Такође могу бити директно приклучени на мрежу или преко AC-DC-AC конвертора. Ветрогенератор са сталном брзином обртања је индукциони (асинхрони) генератор са краткоспојеним ротором. Ветрогенератор са променљивом брзином обртања је двострано напајан индукциони (асинхрони) генератор или синхрони многополни (спороходни) генератор са сталним магнетима.

10.4.1 Ветроагрегат са индукционим кавезним ветрогенератором

Принципска шема оваквог ветроагрегата дата је на слици 10.9.



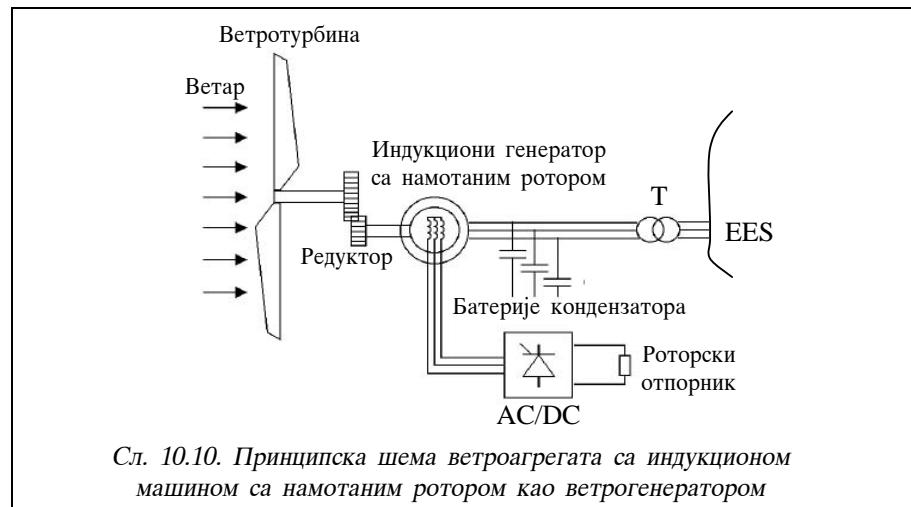
Код ветроагрегата са асинхроним кавезним ветрогенератором није могуће мењати брзину обртања ветротурбине, што је мана ових агрегата. Због крутости карактеристике (момент-брзина) асинхроне машине, ради се са брзинама које се незнатно разликују од синхроне брзине коју диктира мрежа на коју је ветрогенератор прикључен. Овај недостатак делимично се ублажава израдом двоструког статорског намотаја (као код мотора за веш машину). Намот пројектован за мању снагу има већи број пари полов (3 или 4). Намот за номиналну снагу има мањи број пари полов (типично 2 или 3). При малим брзинама ветра (типично за $v < \frac{2}{3}v_n$) активан је намот мање снаге и мање синхроне брзине, а при већим брзинама ветра укључује се намот веће снаге и веће синхроне брзине. На овај начин се повећава степен искоришћења ветроагрегата. На прикључке статора везује се уређај за ограничење полазне струје и момента индукционе машине, тзв. *soft* стартер. Он штити турбину и редуктор од ударног момента и ограничава струју поласка при прикључењу ветрогенератора на мрежу. Након постизања радне брзине *soft* стартер се кратко преспаја и генератор ради директно повезан на мрежу.

Кавезна асинхронна машина троши реактивну енергију, па се код оваквих ветрогенератора врши компензација реактивне енергије помоћу батерија кондензатора. Ветроагрегат са асинхроним кавезним ветрогенератором

није погодан за локације са ударним ветровима, јер се због крутости механичке карактеристике ветрогенератора обртни момент ветротурбине оштро преноси на вратило те може доћи до оштећења зупчаника у редуктору. Такође, у случају квара у електричној мрежи, ветрогенератор лако губи стабилност због повећања брзине обртања изнад превалне. Овакав ветроагрегат није погодан за прикључак на слабу дистрибутивну мрежу због великих варијација снаге које узрокују појаву напонских фликера. Предност овог ветроагрегата је у цени, јер се користи јефтина и робусна индукциона машина која се директно везује на мрежу. Ветротурбина се код оваквих ветроагрегата регулише обликовањем лопатица или комбинацијом закретања и обликовања лопатица. Регулација само закретањем лопатица није уobičajena. Овај тип ветроагрегата заступљен је код данских производа. Користи се за називне снаге до 2 MW и назива се "Дански концепт".

10.4.2. Ветроагрегат са индукционом машином са намотаним ротором као ветрогенератором

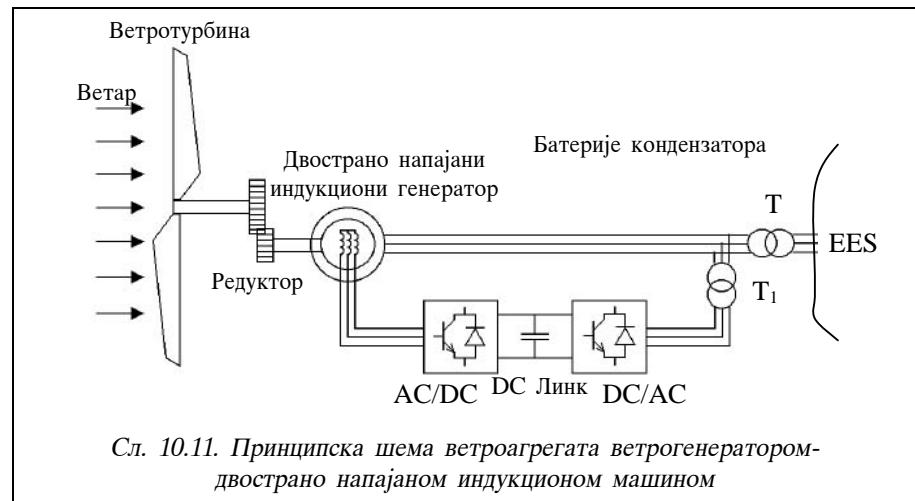
Овакав ветроагрегат сличан је "Данском концепту" (сл. 10.10). Разлика је у примени намотаног ротора и роторског отпорника који се напаја преко контролисане трофазне усмераче. На овај начин може се у ужем опсегу мењати брзина асинхроног генератора променом карактеристике момент-брзина. Овакав ветроагрегат спада у групу са делимично променљивом брзином обртања.



Помоћу регулисане усмераче врши се динамичка промена отпорности у роторском колу, чиме се мења нагиб механичке карактеристике, односно радно клизање асинхроне машине. Номинална снага оваквих ветроагрегата не прелази 1,8 MW, а ветротурбина се регулише закретањем лопатица. Недостатак је велика дисипација снаге у роторском отпорнику и мали опсег промене брзине. И у овом случају је потребна компензација реактивне енергије.

10.4.3. Ветроагрегат са ветрогенератором-двоstrано напајаном индукционом машином

Овакав ветрогенератор најчешће се користи код ветроагрегата велике снаге. Омогућава промену брзине агрегата у широком опсегу око синхроне брзине, те обезбеђује висок степен искоришћења ветротурбине у широком опсегу брзина ветра. Опсег промене брзине ветротурбине је од 10 до 25 obr/min, па је за прилагођење брзини обртања генератора, као и у претходним случајевима потребан механички редуктор. Принципска шема ветроагрегата са ветрогенератором-двоstrано напајаном индукционом машином дата је на слици 10.11.



Статорски намот је директно прикључен на мрежу, а роторски намот је преко клизних прстенова, претварачке групе инвертор-исправљач и трансформатора прикључен на мрежу. Промена активне и реактивне снаге генератора врши се променом фреквенције и фазе струје којом се напаја роторски намотај. Машина може радити у широком опсегу брзина и у

надсинхроном и у подсинхроном режиму, што омогућава потпуно прилагођавање брзине обртања ветроагрегата брзини ветра.

Када машина ради у надсинхроном режиму и ротор и статор одјају активну снагу мрежи, док је у подсинхроном режиму ток активне снаге у роторском колу од мреже ка ротору. Снага која се преноси кроз инвертор је пропорционална одступању брзине од синхроне брзине (коју диктира мрежа). Снага претварача је обично око ($20\div30\%$) номиналне снаге ветрогенератора.

Двострано напајана индукциона машина може генерисати и реактивну енергију, али је обично ветрогенератор пројектован да ради са фактором снаге $\cos \varphi = 1$, јер генерирање реактивне енергије додатно струјно оптерећује конвертор у роторском колу. Ипак, у колико је потребно стабилисати напоне у дистрибутивној мрежи, ветрогенератор може на рачун смањења активне снаге генерисати реактивну снагу, односно радити у капацитивном режиму.

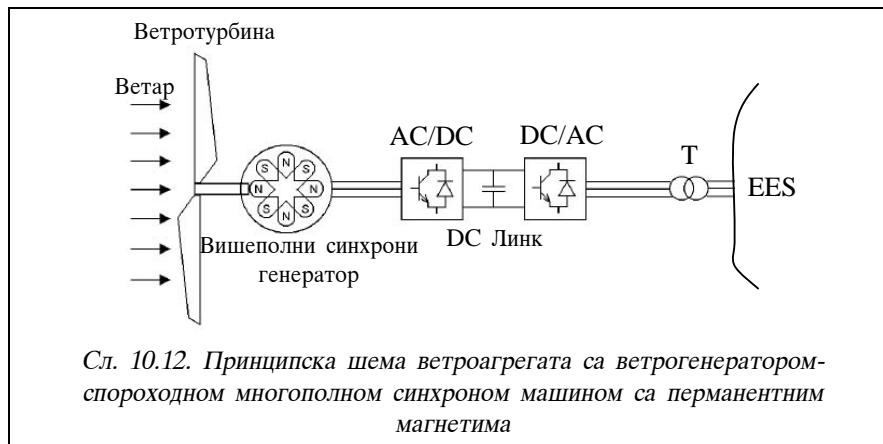
Двострано напајана индукциона машина се уградије у ветроагрегате највећих снага, у оне који су пројектовани за рад на копну (*onshore*), тако и у моделе за приобалне морске појасе (*offshore*). Највећу *offshore* ветроелектрану Horns Rev на западној обали Данске чини 80 ветроагрегата снаге 2 MW са двострано напајаним индукционим машинама.

Овакви ветроагрегати имају већи степен искоришћења, могу генерисати реактивну снагу, мања су им ударна механичка напрезања, јер је карактеристика генератора адаптивна, раде стабилније и генеришу мању буку. Недостаци су: релативно висока цена због енергетске електронике, осетљивији су на атмосферске препаноне (IGBT транзистори), повећани губици у генератору, генеришу више хармонике. Ограничавајући фактор код ветроагрегата највећих снага је редуктор који трпи велика напрезања.

Експериментише се са двострано напајаном индукционом машином са двоструким намотом на статору и краткоспојеним ротором (*Doubly Fed Twin Stator Induction Machine*). Један намот служи за управљање, а преко другог намота се генерише активна и реактивна снага. Предност овакве машине је робусност, јер не постоје клизни прстенови на ротору. Међутим, овај концепт је још увек у фази развоја.

10.4.4. Ветроагрегат са ветрогенератором-многополном синхроном машином са перманентним магнетима

Основни недостатак до сада приказаних ветроагрегата је коришћење редуктора између турбине и генератора. Ова мана је избегнута код концепта са спороходним вишеполним синхроним генератором са перманентним магнетима који се директно повезује са ветротурбином. Принципска шема овог ветроагрегата приказана је на слици 10.12.



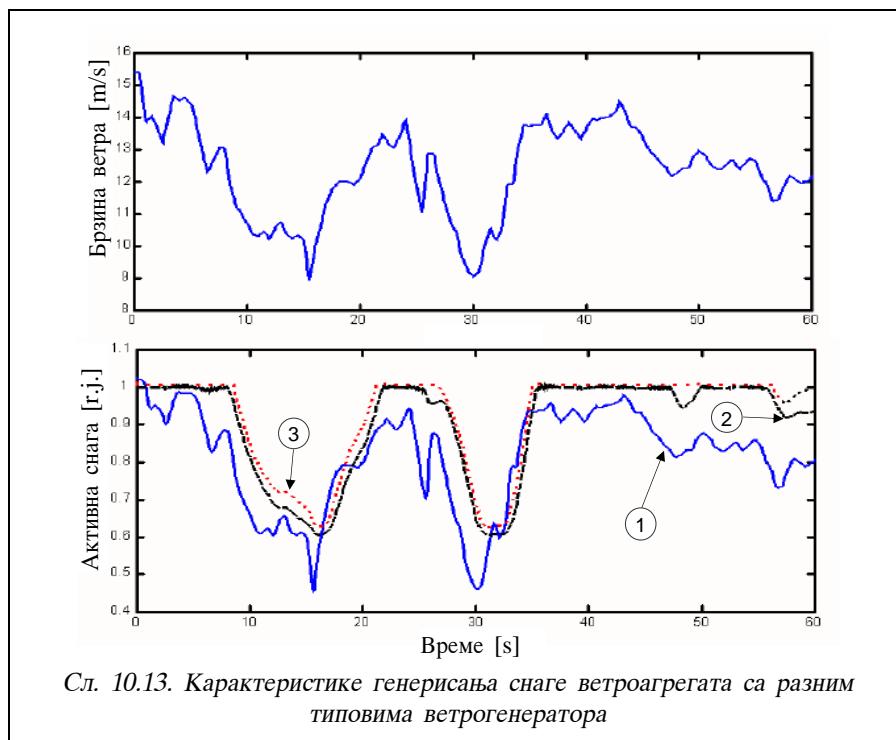
Ветрогенератор ради са променљивим брзинама, те мора бити фреквенцијски распругнут од мреже, што се постиже AC-DC-AC претварачима. Снага и брзина ветротурбине регулише се закретањем лопатица ротора. AC-DC-AC претварачи морају имати снагу ветрогенератора, што је мана овог концепта. Због ограничења снаге конвертора, ветрогенератор је пројектован да ради са номиналном снагом уз фактор снаге $\cos \varphi = 1$, или је могуће на рачун смањења активне снаге генерирати реактивну снагу када је то потребно.

Ветроагрегати са спороходним синхроним ветрогенераторима користе се и за агрегате малих снага (300 kW), али и за ветроагрегате највећих снага. Немачки производјач ветротурбина *Enercon* производи ветроагрегате са спороходним синхроним ветрогенераторима. Овај производјач нуди ветроагрегат номиналне снаге 4,5 MW, са ветротурбином пречника 114 m и носећим стубом висине 124 m. Радни опсег брзина ветра за ову турбину је (2,5 до 34)m/s. Брзина обртања ротора ветротурбине је (8 до 13) obr./min, при чему периферна брзина врха лопатице достиже брзину од 270 km/h.

Ветроагрегат са спороходним синхроним ветрогенератором има сличне карактеристике као ветроагрегат са ветрогенератором-двоstrано напајаном индукционом машином. Мана му је висока цена, због коришћења нестандартне машине и конвертора велике снаге. Због великог броја полова, генератор има велику масу и пречник. Предност у односу на претходна решења је директно спрезање ветрогенератора са ветротурбином, односно нема редуктора.

10.4.5. Поређење карактеристика различитих врста ветроагрегата у реалним условима

Ради поређења карактеристика генерирања активне снаге различитих типова ветрогенератора, у условима стохастичке промене брзине ветра, на слици 10.13. су дати резултати симулације рада ветротурбине која погони различите ветрогенераторе.



Сл. 10.13. Карактеристике генерирања снаге ветроагрегата са различитим типовима ветрогенератора

Ознаке на слици 10.13. се односе на:

1. Ветрогенератор-индукциони генератор са краткоспојеним ротором директно прикључен на мрежу. Турбина регулисана конструкцијом (*stall* регулација).
2. Ветрогенератор-двостррано напајани индукциони генератор са променљивом брзином обртања. Турбина регулисана закретањем лопатица (*pitch* регулација).
3. Ветрогенератор-синхрони спороходни генератор са перманентним магнетима. Турбина регулисана закретањем лопатица.

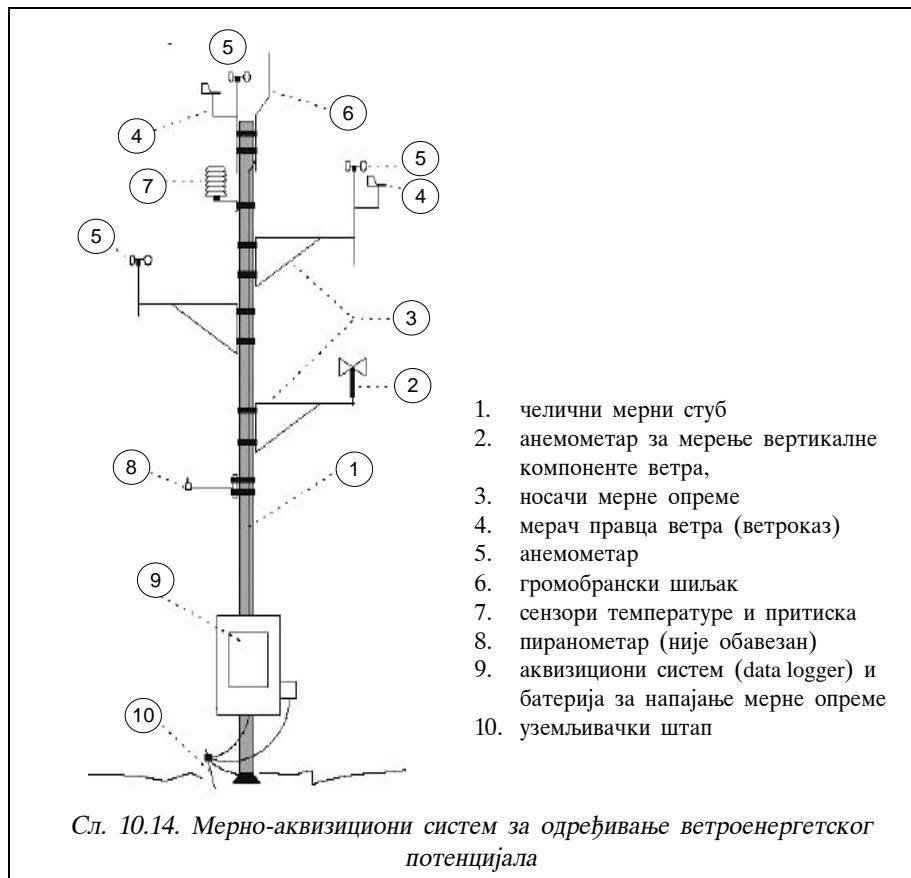
Види се да ветроагрегати са променљивом брзином обртања и закретањем лопатица ветротурбине генеришу мање променљиву активну снагу него ветроагрегати са индукционом машином са краткоспојеним ротором.

10.5. ИЗБОР ЛОКАЦИЈЕ ЗА ПОСТАВЉАЊЕ ВЕТРОАГРЕГАТА

Избор локације за постављање ветроагрегата је најважнија фаза при планирању изградње ветроелектране. Најбитнији параметар при анализи погодности локације за постављање ветроагрегата је брзина ветра. У почетној фази одређивања локације најчешће се располаже само са метеоролошким подацима. На основу тих података, односно средњих годишњих брзина ветра, потребно је издвојити регионе у којима постоје потенцијално погодне микролокације за постављање ветроагрегата. Од интереса су локације у којима је средња годишња брзина ветра мерена на 10 m изнад тла (стандардна висина на коју се постављају анемометри у хидрометеоролошким станицама) $v_{sr} \geq 5$ m/s. На основу конфигурације терена, прелиминарних мерења и консултација са метеоролозима треба одабрати микролокације на којима се **морају** извршити наменска мерења параметара ветра. На основу ових мерења, са одговарајућом опремом, једино се могу поуздано проценити енергетски ресурси ветра. Постоје различити системи за мерење релевантних параметара за естимацију ресурса ветра. На слици 10.14. приказана је конфигурација система за мерење ресурса ветра ради процене погодности локације за постављање ветроагрегата.

Број анемометара и мерача правца ветра зависи од висине мernог стуба, минималан број је 2. Њихова калибрација и монтирање на мерни стуб је дефинисано IEC стандардом 61400-12. Од велике важности је да инструменти буду поуздани и да имају велику класу тачности. Грешка од 10% у мерењу брзине ветра се, сходно релацији (10.2), одражава са грешком од преко 30% у прорачуну снаге ветра. Мерење се мора спроводити континуално најмање једну годину. Пожељно је да се спроведе већи број целих година. Уз мерни систем користи се софтвер за обраду мерених величине. На основу измерених величине за сваку висину анемометра даје се за посматрани интервал времена графички приказ правца, брзине и снаге ветра у виду тзв. **руже ветрова**. Ружа ветрова се најчешће црта у поларном координатном систему. Цео хоризонт од (360°) подели се на 12 сектора од 30° . За сваки сектор се наноси процентуална учестаност појављивања ветра одређене брзине (проценти су дефинисани у односу на посматрани временски интервал за који се црта ружа ветрова). Осим тога, за сваки сектор се црта и производ средње брзине ветра и процентуалне учестаности појављивања ветра у том сегменту. На карају се за сваки сектор

графички приказује колико процентуално од укупне енергије ветра је садржано у ветровима чији смер припада датом сегменту. Најпогодније су локације које имају изражен доминантан правац брзине ветра (ружа ветрова је спљоштена).



Ако се софтверу зада и карактеристика снаге и висина стуба ветроагрегата он естимира и хистограм електричне енергије коју би произвео одабрани ветроагрегат на тој локацији. Већина софтвера подразумева ламинарно струјање ваздуха. Уколико постоје вртлози, или изражена рафалност ветра, за поуздану естимацију производње електричне енергије потребно је консултовати произвођача ветроагрегата.

Већим бројем анемометара и мераца правца на различитим висинама утврђује се евентуално вртложно струјање и висински профил брзине ветра. Услед трења ваздуха о тло и унутрашњег вискозног трења, брзина ветра расте са повећањем висине. На профил брзине ветра утиче храпавост терена, присуство природних и вештачких препрека као и други елементи рељефа. Ови параметри се разликују од локације до локације, те је и профил брзине различит за различите локације. Храпавост терена се разликује за различите правце дувања ветра па је потребно за сваки сегмент руже ветрова дефинисати храпавост, односно ружу храпавости. Постоји више модела који описују висински профил брзине ветра. Најчешће се користи логаритамска зависност брзине ветра од висине, дата релацијом:

$$v_2 = v_1 \cdot \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_1}{z_0}\right)}, \quad (10.3)$$

где су:

v_1 - брзина ветра измерена на висини z_1 изнад земље,

v_2 - брзина ветра на висини z_2 ,

z_0 - дужина храпавости (*roughness length*) у датом правцу ветра.

Дакле, утицај храпавости терена на висински профил брзине ветра се дефинише параметром z_0 . Параметар z_0 представља висину на којој је брзина ветра једнака 0. Параметар z_0 се за одређени терен одређује на основу класе храпавости терена. У табели 10.1. је приказана најчешће коришћена класификација терена према класи храпавости.

Параметар храпавости се најпоузданije може одредити ако за дату локацију постоје мерења на различитим висинама, z_1 и z_2 . Тада се, према (10.3), z_0 може одредити рачунски:

$$\ln(z_0) = \frac{v_1 \ln(z_2) - v_2 \ln(z_1)}{v_1 - v_2}. \quad (10.4)$$

Ако се на анализиранијој локацији планира градња веће ветроелектране морају се вршити мерења у више тачака. Број мерних тачака зависи од сложености конфигурације терена. Измерени подаци и одговарајуће руже

храпавости се обрађују у посебном софтверу, који одређује оптималне позиције ветроагрегата у оквиру ветроелектране.

Табела 10.1. Класа храпавости и дужина храпавости за различите терене.

Класа храпавости	Површина	Опис терена	z_0 [m]
1	Море	Отворено море	0,0002
2	Глатка	Равне пешчаре; снег; ниска вегетација, без препрека	0,005
3	Отворена	Равни терени; травњаци, неколико изолованих препрека	0,03
4	Отворена храпава	Ниски усеви; раштркане високе препреке	0,1
5	Храпава	Високи усеви; раштркане препреке	0,25
6	Веома храпава	Воћњаци, жбуње; бројне препреке	0,5
7	Затворена уређена	Терен са високим уређеним (једноликим) препракама (предграђа, шуме)	1
8	Неуређена	Градска насеља са високим и ниским грађевинама	>2

Ако је за неку локацију позната само средња годишња брзина ветра, расподела учестаности појављивања ветра неке брзине подлеже *Weibull*-овој расподели. Користећи *Weibull*-ову расподелу брзина ветра и карактеристике ветроагрегата, може се помоћу (10.5) грубо проценити електрична енергије E коју на годишњем нивоу може произвести ветроагрегат по јединици површине ветротурбине.

$$E = 3,2 \cdot v_{sr}^3 \left[\frac{kWh}{m^2} \right], \quad (10.5)$$

где је: v_{sr} [m/s] - средња годишња брзина ветра на нивоу висине осовине ветротурбине.

Електрична енергија произведена у ветроагрегату по цени је конкурентна енергији из конвенционалних електрана ако је годишња производња по јединици површине ветротурбине $1100 \text{ kWh/m}^2/\text{god}$, што према релацији (10.5) одговара средњој годишњој брзини ветра $v_{sr} = 7 \text{ m/s}$. Просечан

ветроагрегат у Европи производи око ($900 \div 1000$) kWh/m²/год, па је цена електричне енергије из просечног ветроагрегата за (20 до 30)% већа у односу на цену електричне енергије из просечне конвенционалне електране.

Поред ветровитости, при избору локације ветроагрегата мора се водити рачуна и о другим битним елементима, као што су постојећа електроенергетска, путна и телекомуникациониа мрежа. Треба водити рачуна и о визуелном уклапању ветроагрегата и буци коју они стварају при раду, што је битно када је локација у близини насеља.

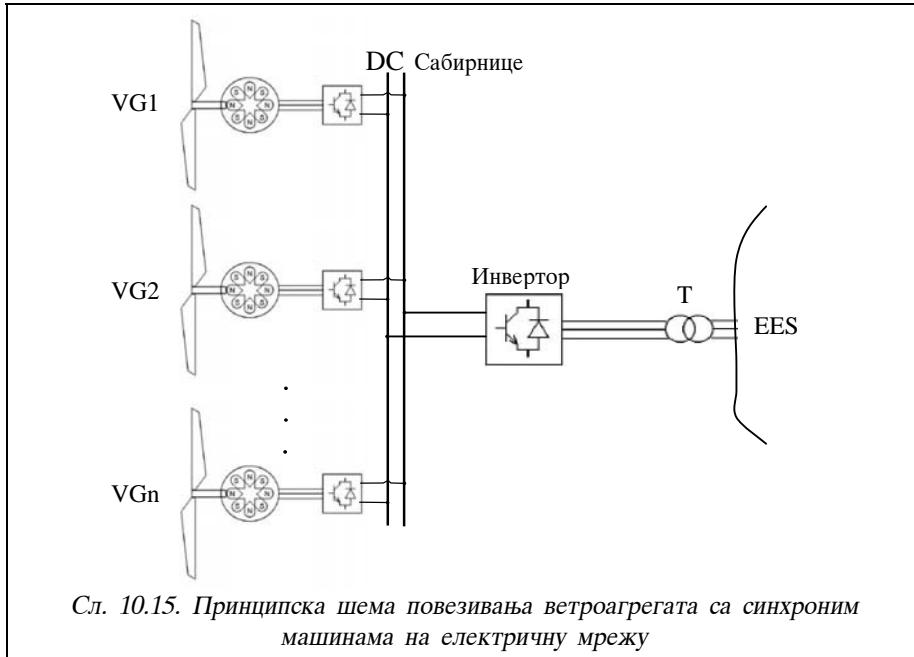
У Србији и Црној Гори нису извршена систематска мерења и истраживања ветроенергетског потенцијала, тако да се о перспективама развоја ветроенергетике у нашој земљи може говорити тек након поузданог утврђивања ресурса ветра.

10.6. ВЕЗИВАЊЕ ВЕТРОАГРЕГАТА НА МРЕЖУ

На локацијама које омогућавају технички и економски оправдану експлоатацију ветра граде се ветроелектране. Више ветроагрегата групише се у целину. Инсталисана снага тако формиране ветроелектране може бити од неколико MW до неколико стотина MW. Могу се градити у приобалном плитком мору (*offshore*) или на копну (*onshore*). Просторни распоред ветроагрегата у оквиру ветроелектране зависи од конфигурације терена и доминантног правца дувања ветра. Свака ветротурбина узрокује смањење брзине ветра и повећање његове турбулентности, тако да турбина у њеној заветрини има ветар мање брзине и лошијег квалитета. Та појава се назива **ефекат заветрине** (*wake effect*). Он је израженији код већих турбина. Смањење негативног утицаја заветрине постиже се повећањем растојања између ветротурбина на линији доминантног правца дувања ветра, односно оптимизацијом њиховог распореда у оквиру ветроелектране. Оптимизација се врши помоћу посебно развијених софтвера за ту намену. Типично растојање између ветротурбина у оквиру електране је 5 до 7 дужина пречника ротора турбина. У погледу заузимања простора на 1 km² могу се поставити ветроагрегати чија је укупна снага (10 до 15) MW.

Ветроагрегати се у оквиру ветроелектране повезују на заједничке сабирнице кабловским водовима да би се избегао утицај атмосферских препона. Користе се различите једнополне шеме за повезивање ветроагрегата које зависе од величине ветроелектране и просторног распореда ветроагрегата. Ветроелектрана се на преносну или дистрибутивну мрежу везује помоћу енергетског трансформатора. Трансформатор је обично место разграничења између надлежности власника ветроелектране и власника преносне или дистрибутивне мреже.

Ветроагрегати са синхроним ветрогенераторима (VG) и AC-DC-AC конверторима могу се повезати на DC нивоу, а снажан DC/AC претварач (инвертор) инсталисан је у трансформаторској станици. Принципска шема овакве везе дата је на слици 10.15.



Сл. 10.15. Принципска шема повезивања ветроагрегата са синхроним машинама на електричну мрежу

Напонски ниво мреже на коју се везује ветроелектрана зависи од инсталисане снаге ветроагрегата у њој. Веће ветроелектране се директно прикључују на високонапонску преносну мрежу, док се усамљени ветроагрегати и мање ветроелектране прикључују на дистрибутивну средњенапонску мрежу.

Да би се неки ветроагрегат или ветроелектрана прикључили на дистрибутивну мрежу треба да задовоље прописане техничке услове за прикључење (свака електропривреда прописује техничке услове о прикључењу ветроагрегата на дистрибутивну мрежу). Електропривреда Србије је у мају 2003. године, у виду препоруке, донела "Основне техничке захтеве за прикључење малих електрана на мрежу Електродистрибуције Србије". Препоруке се односе на све мале електране (хидроелектране, ветроелектране, соларне електране, термоелектране на биомасу итд.) снаге до 16 MVA које се прикључују на дистрибутивну мрежу напона 0,4 kV, 10 kV, 20 kV или 35 kV. Основни услови прикључења су у наведеној препоруци дефинисани кроз четири критеријума:

- 1) критеријум дозвољене снаге мале електране;
- 2) критеријум флиker-a;
- 3) критеријум дозвољених струја виших хармоника;
- 4) критеријум снаге кратког споја.

Осим националних прописа постоје и међународне препоруке (IEC) које прецизирају услове и све битне техничке аспекте прикључивања ветроагрегата на електричну мрежу.

10.7. УКЛАПАЊЕ ВЕТРОАГРЕГАТА У ЕЕС

Ветар је стохастичке природе, па је и снага ветроагрегата стохастична величина. Велике варијације генерисане снаге стварају проблеме у планирању производње, напонским варијацијама и стабилности рада, како ветроагрегата тако и целог електроенергетског система (EEC-а).

Непредвидљивост производње електричне енергије у ветроагрегатима ограничава њихово максимално процентуално учешће у производњи неког ЕЕС-а и захтева повећање регулационе резерве у ЕЕС-у. Погодно је да у ЕЕС-у са ветроелектранама постоје реверзибилне хидроелектране или гасне термоелектране са резервоарима ваздуха под притиском. Развој дугорочне и краткорочне прогнозе ветровитости је од великог значаја за поуздано планирање производње у ЕЕС-има са снажним ветроелектранама.

У погледу стабилности критични су ветроагрегати прикључени на слабу дистрибутивну мрежу. Проблеми стабилности и напонских прилика се морају анализирати при пројектовању електране на ветар. Мора се анализирати потреба изградње електричне мреже на коју се прикључују ветроагрегати. По потреби, треба предвидети компензациона постројења (статичка или динамичка) која би генерисала реактивну енергију у ветроелектранама, чиме би се побољшали напони. Ветроагрегати и њихов управљачки систем врло су осетљиви на напонске флиker-e, те је стабилност напона неопходна и за сам рад ветроагрегата. Прикључењем ветроагрегата на дистрибутивну мрежу она постаје активна (губи радијалност), па се концепт релејне заштите у дистрибутивној мрежи мења.

Поред проблема везаних за транзијентну и напонску стабилност, присутан је и проблем генерисања виших хармоника напона и струја као последица рада енергетских претварача (инвертора) преко којих су ветроагрегати прикључени на мрежу. Међутим, он је код савремених ветроагрегата превазиђен конструкцијом инвертора и употребом филтара виших хармоника.