

ГЛАВА 6: ЕНЕРГИЯ НА ВЯТЪРА

6.1. Цели:

Обучаемите трябва да могат да:

- *определят параметрите на енергията на вятъра;*
- *посочат предимствата и недостатъците при използване енергията на вятъра;*
- *изучат режимите на работа на вятърна турбина;*
- *разгледат възможните начини за свързване на ветрогенераторите с електрическата мрежа;*
- *обяснят характеристиките на турбина с променлива скорост на вятъра;*
- *описват и категоризират статичните преобразуватели на честота;*
- *изброят елементите на веригата за преобразуване на енергията при работа на турбината с променлива скорост на вятъра;*
- *дефинират и обяснят мощностната характеристика на вятърните турбини при променлива скорост на въртене.*

6.2. Вятърни турбини с фиксирана скорост . Работа на ветрогенератора като автономен източник на енергия. Работа на ветрогенератора, свързан към електрическа мрежа. Асинхронен генератор с две статорни намотки.

Асинхронни генератори с две статорни намотки

Енергията на вятъра се преобразува чрез вятърна турбина. Ветровете се създават в следствие неравномерното нагряване на земната повърхност от енергията, идваща от Слънцето. Това променливо нагряване на въздушните пластове предизвиква движение на въздуха. Кинетичната енергия на вятъра може да се използва за задвижване на вятърни турбини, които предават тази енергия на електрически генератори. Някои вятърни турбини са в състояние да задвижват електрически генератори с мощност от 5 MW. За тях необходимата минимална скорост на вятъра е от около 5 m/s или 20 km/h. Единственият недостатък при използването енергията на вятъра е фактът, че вятърните турбини изискват управление и обслужване, за да се осигури работа с висока ефективност.

Основните предимства при използване енергията на вятъра са:

- липсата на емисии на замърсяващи вещества и парникови газове (този ефект се дължи на факта, че за получаването на електрическа енергия не се използват газ или друг вид гориво);
- няма отпадъчни продукти - вятърната енергия се генерира без да оставя отпадъчни продукти;
- ниска стойност за единица енергия (разходите за електрическата енергия, произведена в съвременните вятърни електроцентрали напоследък са намалели). В САЩ те са дори по-ниски от тези за добиване на горива. При атомните електроцентрали, стойността за прекратяване дейността им, може да е няколко пъти по-висока от цената за изграждането им. Стойността за спиране работата на ветрогенераторите след прекратяване на дейността им е минимална, а съоръженията могат да бъдат напълно рециклирани за разлика от тези на атомните централи.

Недостатъци при използване на вятърната енергия:

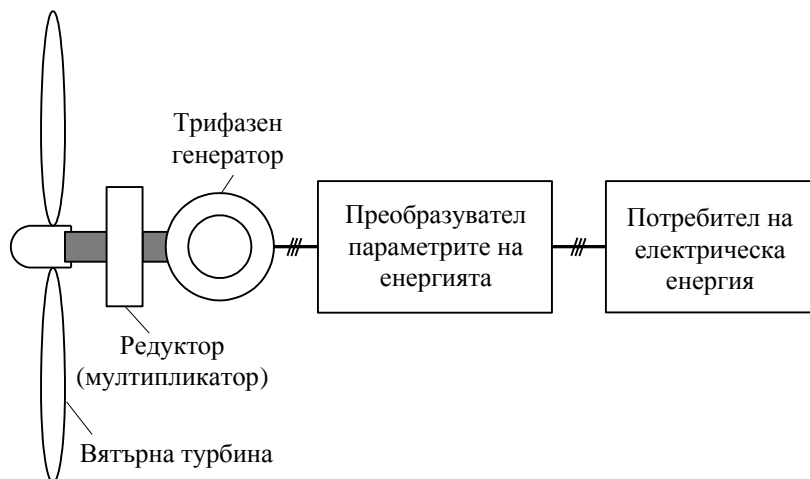
- сравнително висока цена на произведената енергия и относително ниска надеждност на турбината. Въпреки това, през последните години, след подобряването на техническите параметри на вятърните турбини, разходите за производство на енергия са сведени до (3...4) евроцента на kW.h .
- визуално замърсяване - те въздействат негативно върху хората и са източници на шум.

- влияят на околната среда и околните екосистеми, препятстват свободната миграция на птиците, причиняват тяхната смърт и изискват големи свободни площи за инсталираното им.

- работата им зависи съществено от скоростта на вятъра. Различните технологии за изграждане и експлоатация на вятърни системи за преобразуване енергията на вятъра в електрическа, са обект на изследване.

Основни положения

Елементи на веригата за преобразуване енергията на вятъра в електрическа са: вятърна турбина, редуктор (мултипликатор), трифазен генератор, преобразувател параметрите на напрежението, потребител на електрическа енергия (фиг. 6.1).



Фиг. 6. 1. Блокова схема при преобразуване енергията на вятъра

В системите за преобразуване енергията на вятъра, най-често се използват асинхронни генератори с накъсо съединен ротор, но през последните години намират приложение и асинхронните генератори с навит ротор.

Вятърна турбина с фиксирана скорост

При класическите синхронни и асинхронни машини с накъсо съединен ротор, скоростта на въртене е пряко и в строга зависимост от честотата на въртящото се магнитно поле.

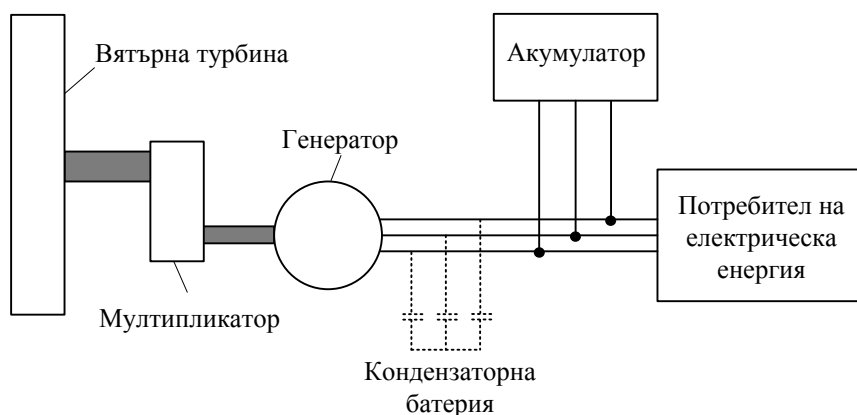
Тъй като асинхронната машина с накъсо ротор има определен набор от чифтове полюси, тя може да функционира в рамките на ограничен диапазон на скоростта: хлъзгането може да достигне няколко процента.

Самостоятелна работа на ветрогенераторите

Ветрогенераторите, които не са свързани към електрическата мрежа, се нуждаят от акумулатори на електрическа енергия. Произведената над товара електрическа енергия се акумулира и се използва в случаите когато няма вятър или консумацията на енергия надвишава произвежданата (фиг. 6.2).

Използването на акумулаторните батерии е решение за дългосрочно съхранение на електрическата енергия. Съществуват и други видове системи за съхранение, като например инерционното (краткосрочно съхранение). В този случай се избягва използването на акумулаторните батерии, които замърсяват околната среда. Получената от вятъра енергия се съхранява като кинетична енергия в маховик.

Генераторът може да бъде синхронна машина с постоянни магнити или асинхронна машина с накъсо съединен ротор. Последният е снабден задължително с кондензатори, които осигуряват реактивна енергия за създаване на въртящото му магнитно поле.



Фиг. 6.2. Схема на вятърна турбина с фиксирана скорост в режим на автономна работа

Работа на ветрогенераторите, свързани директно към електрическата мрежа

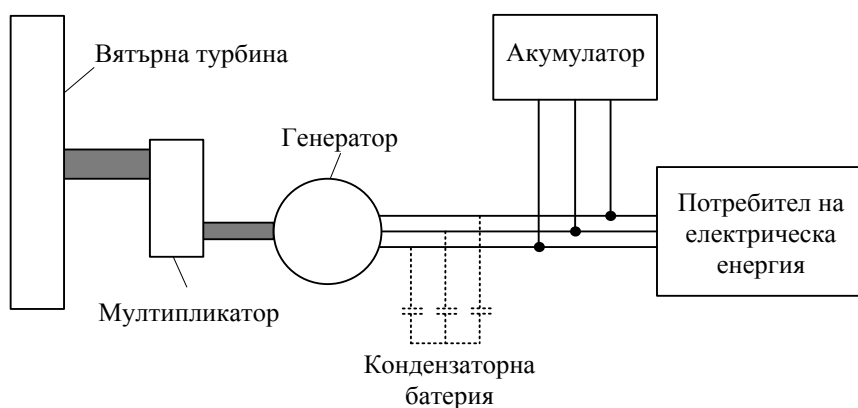
За да се гарантира стабилно управление на генератора, когато ветрогенераторът е свързан директно към мрежата, скоростта на въртене на асинхронен генератор трябва да остане практически постоянна и да има близки стойности до синхронната скорост. Честотата на мрежата влияе върху скоростта на въртене на генератора. Ветрогенераторът, директно свързан към електрическата мрежа, трябва да бъде снабден с редуктор. Вятърната турбина работи при определена скорост на въртене в рамките един малък диапазон на скорост на вятъра. Следователно, нейните приложения са ограничени.

Пример за свързване на асинхронен генератор, директно включен към електрическата мрежа.

Блок-схема на ветрогенератор, използващ редуктор и асинхронен генератор с накъсосъединен ротор, директно свързан към електрическата мрежа е представена на фиг.6.3.

Към статорните намотки на асинхронната машина обикновено се включват резистори с цел да се ограничат пусковите токове. По време на този етап лопатките на турбината са ориентирани така, че да създадат въртящ момент, достатъчен да завърти ротора до честота, близка до синхронната. Чрез съединителя, въртящият момент се предава от вятърната турбина на генератора. Този процес е с продължителност от няколко секунди. Пусковите резистори се шунтират, лопатите на вятърната турбина се ориентират така, че да се създаде максимален въртящ момент.

Преходният режим, свързан с пускането на асинхронната машина в генераторен режим, е съпроводен с наличието на големи стойности на пусковия ток (няколкократно по-големи от номиналния). В разглеждания случай пусковият ток се ограничава от резисторите. Последните могат да бъдат заменени с честотни преобразуватели на напрежение (VFC).



Фиг. 6.3. Блок-схема на асинхронен генератор с накъсо съединен ротор, директно свързан към електрическата мрежа

Асинхронен генератор с две статорни намотки

Тази конструкция на асинхронния генератор позволява две работни скорости на вятърна турбина (фиг. 6.4). В каналите на статорния пакет са разположени две намотки. Те са с различен брой полюси и следователно различни синхронни скорости. При промяна на броя чифтови полюси, се променя синхронната скорост на магнитното поле. При по-ниска скорост на вятъра, статорната намотка на генератора се превключва на по-големия брой полюси. Мощността, която се отдава в мрежата е:

$$P_{tr} = \Gamma \Omega_s, \quad (6.1)$$

където P_{tr} е мощността, отдавана от генератора в мрежата;

Γ - електромагнитната мощност;

Ω_s - синхронната скорост

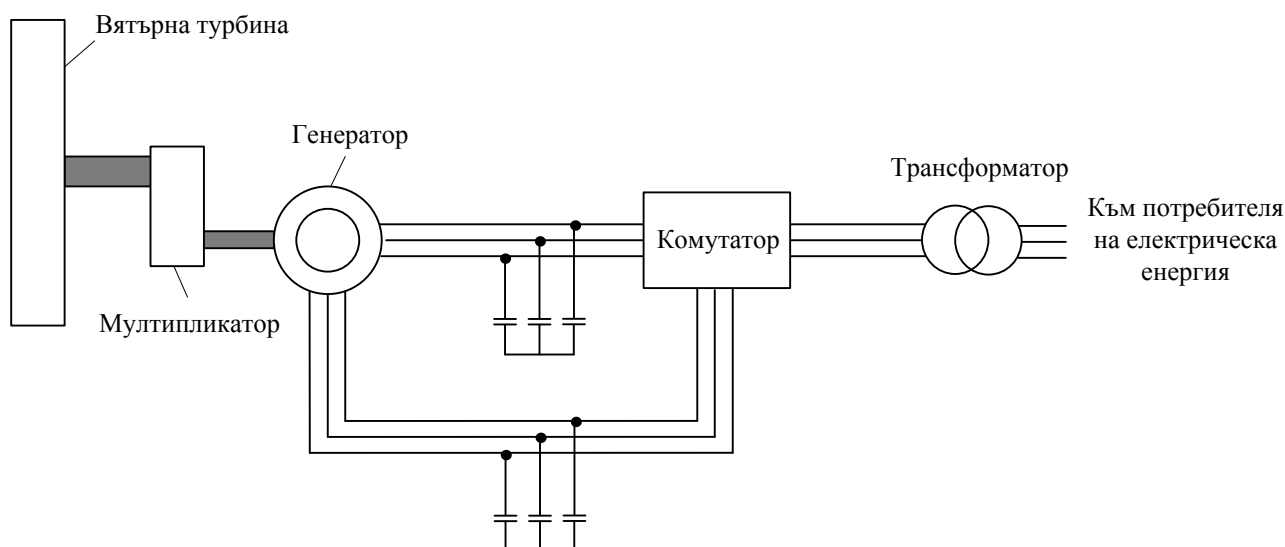
$$\Omega_s = \frac{\omega}{p}, \quad (6.2)$$

където ω е ъгловата честота;

p - броят чифтови полюси.

При ниски скорости на вятъра, скоростта на вятърната турбина е малка. Синхронната скорост е по-ниска поради по-големия брой на полюсите, както е показано в ур. (6.2).

По-малкият брой полюси се използва когато скоростта на вятъра е по-висока. Намотките са с по-голямо сечение. При по-високи скорости на вятъра, получената мощност, както и скоростта на вятърната турбина са по-високи.



Фиг. 6.4. Блок-схема на ветрогенератор, използващ асинхронен генератор с превключване на чифтовите полюси

Тест за самоподготовка

1. Елементите на веригата за преобразуване на енергията на вятъра са:
 - а. Вятърна турбина, трифазен генератор и междинно свързващо устройство;
 - б. Вятърната турбина, трифазен генератор, комутационни устройства към разпределителната мрежа;
 - в. Вятър, вятърна турбина, устройство за връзка с електрическата мрежа

Отговор: а
2. Синхронният генератор, работещ при фиксирана скорост на вятърната турбина:
 - а. Работи с постоянна скорост;
 - б. Има малко хлъзгане;
 - в. Работи в широк диапазон на скоростта.

Отговор: а, б
3. Автономните вятърни турбини са снабдени с:
 - а. Синхронен генератор с постоянни магнити;
 - б. Асинхронен генератор с накъсосоединен ротор;
 - в. Кондензатори, които осигуряват реактивна енергия

Отговор: а, б, в

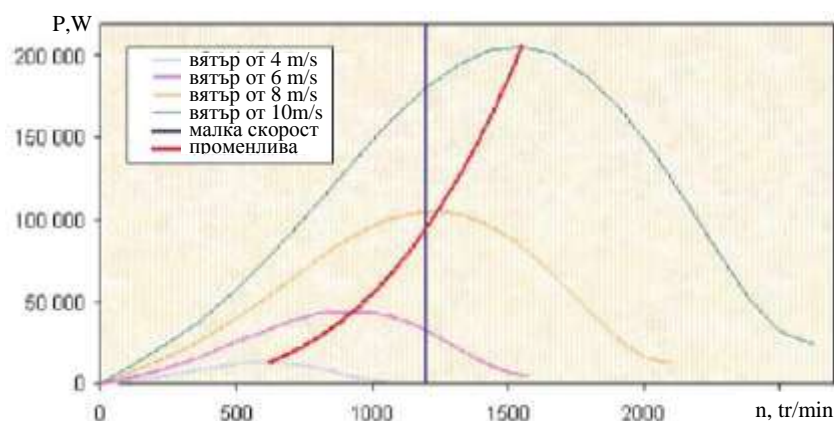
Тест за оценяване

1. Какви са предимствата и недостатъците при използването на вятърната енергия?
2. Обяснете как работи вятърната турбина с постоянна скорост като автономен източник на енергия.
3. Какви са възможностите за свързване на ветрогенераторите с електрическите мрежи?

6.3. Вятърни турбини с променлива скорост. Статични преобразуватели на честота. Генератори с променлив брой полюси. Асинхронни генератори с реостати в роторната намотка. Асинхронни генератори с двойно захранване. Асинхронни генератори с накъсо съединен ротор. Синхронни генератори с редуктор (мултипликатор) и преобразувател в статора. Синхронни генератори с възбудителна намотка. Синхронни генератори с възбуждане от постоянни магнити. Съвързване към електрическата мрежа.

Мощност на вятърната турбина в зависимост от честотата на въртене

При изменение честотата на въртене на турбината се променя честотата на въртене на генератора. По тази причина при свързване на вятърните турбини към електрическата мрежа (система) се използват статични преобразуватели на честота.



Фиг.6.5. Изменение мощността на вятърната турбина в зависимост от честотата на въртене

Статични преобразуватели на честота

При промяна скоростта на въртене, се променят честотата и амплитудата на изходното напрежение на генератора. За да се осъществи връзка с електрическата мрежа, трябва тези променливите параметри на получената електрическа енергия да се трансформират и адаптират към параметрите на напрежението в електрическата мрежа. Това се осъществява от статични преобразуватели на честота, които се поставят между генератора (синхронен или асинхронен) и мрежата. Преобразувателят превръща генерираната променливотокова енергия с изменяща се амплитуда и честота в електрическа енергия, на която амплитуда и честота на напрежението са постоянни и равни на тези на електрическата мрежа.

Генераторите с този вид обзавеждане са в състояние да намалят ударното механично натоварване, което се получава при поривите на вятъра.

Схемата за преобразуване включва (фиг.6.6.):

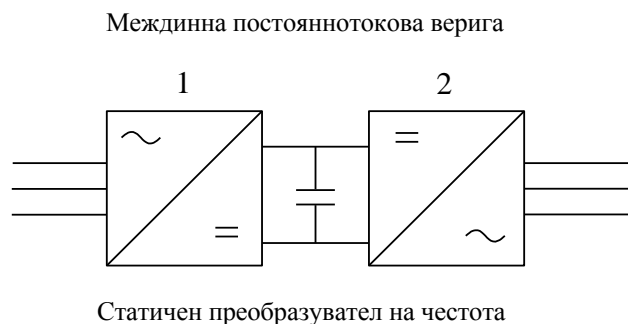
- електрически генератор;
- статичен преобразувател на честота, състоящ се от: AC – DC преобразувател (1) и DC- AC преобразувател (инвертор) (2).

Неуправляемите диодни токоизправители са еднопосочни преобразуватели и се използват при синхронните генератори.

При асинхронните генератори се използват управляеми токоизправители, защото те осигуряват необходимата за намагнитване (създаване на магнитния поток) на генератора реактивна енергия.

Честотата и ефективната стойност на напрежението се регулират с честотните преобразуватели и така се осигурява добра връзка с електрическата мрежа. Трябва да се

използват инвертори с широчинно импулсна модулация, тъй като те осигуряват по-добро качество на електроенергията (с по-малко висши хармоници).



Фиг. 6.6. Блок схема на статичен преобразувател на честота

Тези преобразуватели се управляват чрез вграден компютър. Предаването на мощността между токоизправителя и инвертора се осъществява през междинна постояннотокова верига, в която е включен кондензатор. Той не само осигурява филтрация на напрежението, но и действа като източник на напрежение за междинната верига.

За работа с променлива скорост на вятъра се препоръчват:

- две разновидности на генераторите;
- генератори с променлив брой на полюсите.

Две разновидности на генераторите

При по-ниски скорости на вятъра се препоръчва да се използват генератори с по-малка мощност и с по-голям брой на полюсите, а при силни ветрове - по-мощни генератори с голям брой на полюсите. Това важи както за синхронните, така и асинхронните генератори.

Генератори с променлив брой на полюсите

Според ветровите условия, свързването на статорните намотки на синхронните и асинхронните генератори може да бъде променено, при което се получават различен брой чифтове полюси, т.е. различни синхронни скорости на въртене.

Това се вижда от уравнението за синхронната скорост

$$\Omega_s = \frac{\omega}{p}, \quad (6.3.)$$

където ω е ъгловата честота на въртене на магнитното поле;

p - броят на чифтове полюси.

Синхронната скорост се променя стъпално, тъй като броят на чифтовете полюси е цяло число.

По време на работа на асинхронните генератори, хлъзгането се променя, което се дължи на леките вариации на скоростта на въртене на ротора. Могат да бъдат показани няколко конфигурации с асинхронни генератори:

Асинхронни генератори с реостат в ротора верига

При тези генератори, корекцията на скоростта на ротора се базира на факта, че хлъзгането зависи от активното съпротивление на роторната намотка. При включване на допълнителни активни съпротивления в роторната намотка, се променя хлъзгането. Така се регулира скоростта на въртене на ротора в зависимост от параметрите на вятъра.

Скоростта на въртене на ротора в зависимост от хлъзгането s и се изразява с уравнението:

$$\omega_r = s\omega. \quad (6.4.)$$

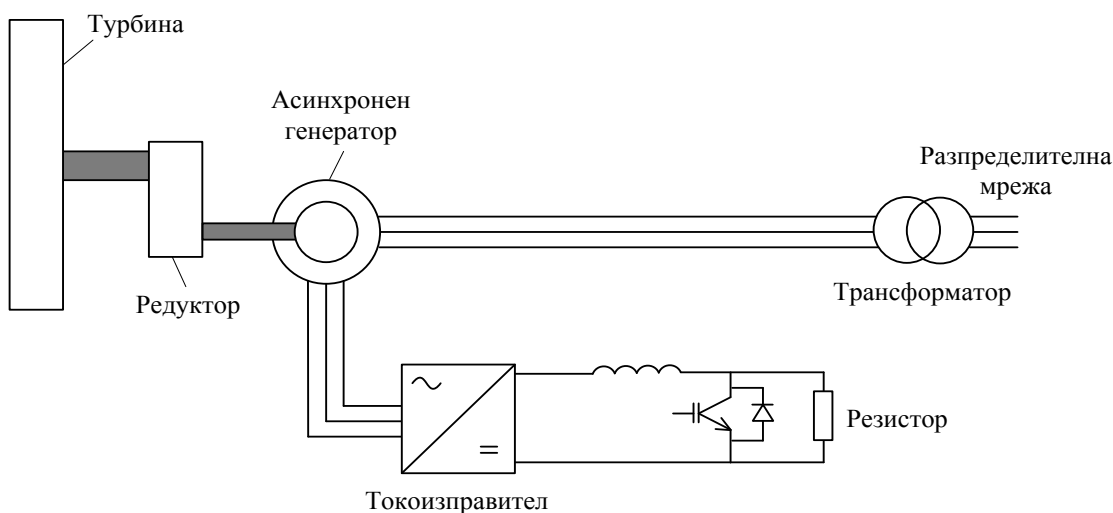
В най-общия случай:

$$\Omega - \Omega_s \cong \frac{\omega_r}{p}, \quad (6.5)$$

където Ω е ъгловата скорост на ротора.

При генераторен режим ($s < 0$) хлъзгането може да е по-голямо от 10%.

Такава корекция на скоростта може да се използва както при асинхронни генератори с двойно захранване, така и при асинхронни генератори с навит ротор (фигура 6.7.).

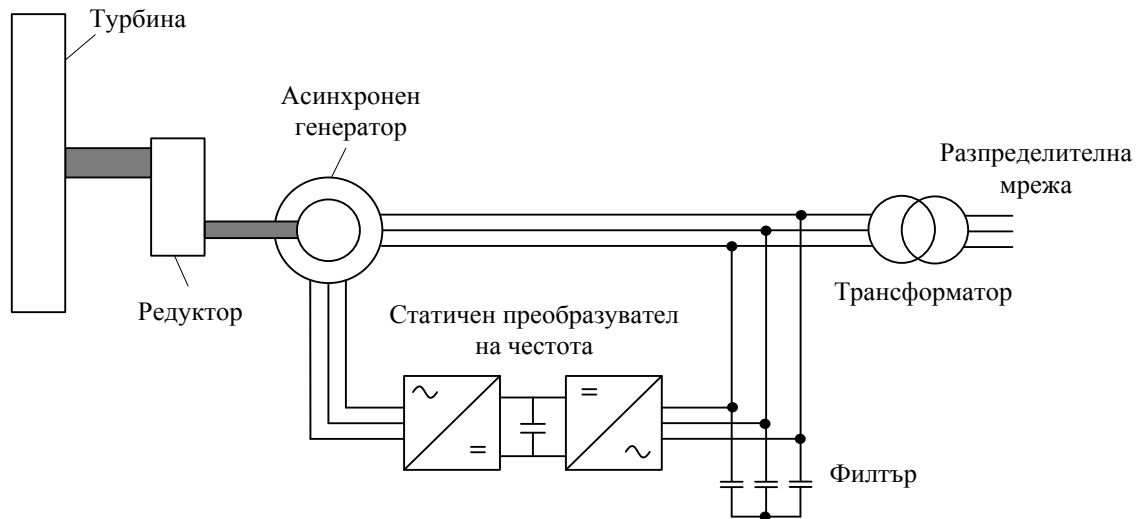


Фиг. 6.7. Схема за свързване към разпределителната мрежа на вятърна турбина с асинхронен двигател и реостат в ротора верига

Асинхронни генератори с двойно захранване (DFAM) и статичен преобразувател с двойно преобразуване на енергията.

На фиг. 6.7. е показан асинхронен генератор с навит ротор, който е комбиниран със статичен преобразувател на честота.

Идеята на двойното захранване се основава на факта, че статорът е пряко свързан с електрическата мрежа, а роторът се свързва към мрежата чрез статичен преобразувател на честота. Този тип структура се използва за мощни вятърни генератори при изменение на скоростта на въртене в широк диапазон. В случая се използва двупосочен статичен преобразувател на честота, който осигурява циркулацията на енергия през роторната намотка в две посоки - от ротора към електрическата мрежа и обратно - от мрежата към ротора. Той действа също така като регулатор на скоростта и контролира съотношението на активната и реактивната мощност между генератора и мрежата.

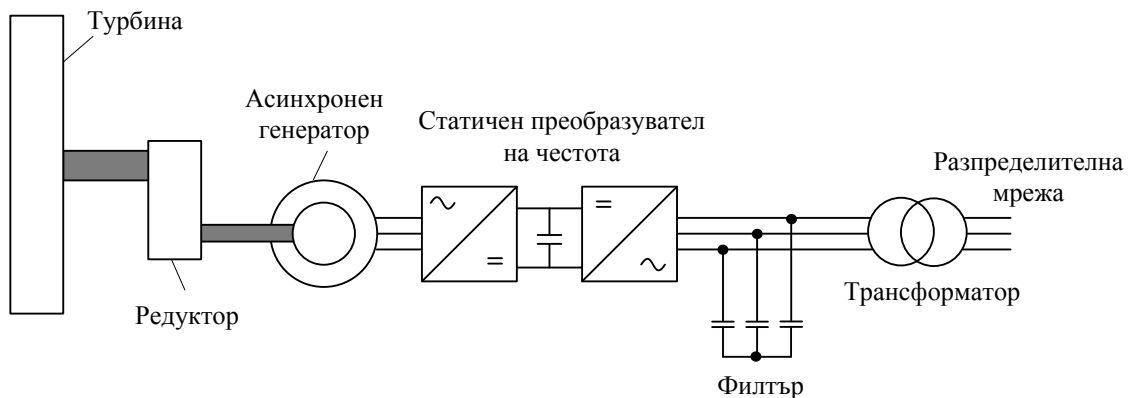


Фиг. 6.8. Схема за свързване към разпределителната мрежа на вятърна турбина с двустранно захранван асинхронен генератор

Двупосочното изменение на честота на напрежението на статичния преобразувател осигурява регулиране на скоростта както под синхронната (под естествената механична характеристика), така и над синхронната скорост (над естествената механична характеристика). Освен това се контролира консумацията на реактивна енергия от разпределителната мрежа.

Асинхронни генератори с накъсо съединен ротор

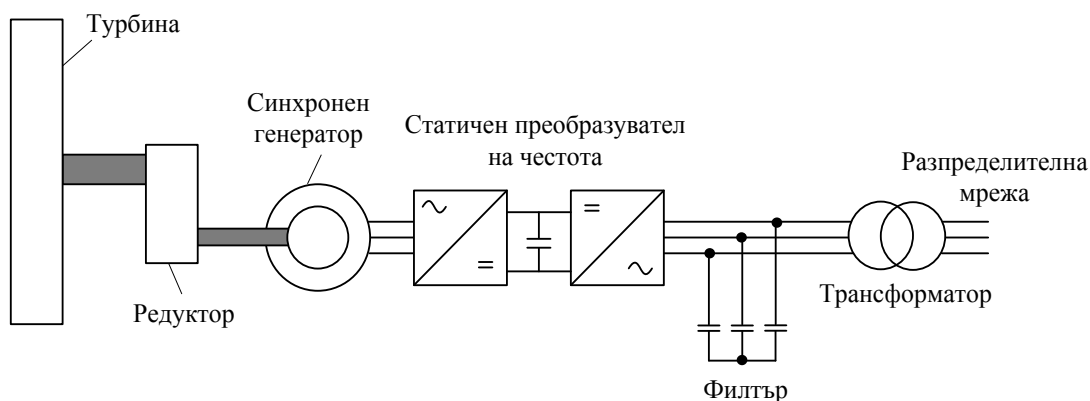
На фиг. 6.9. е показан синхронен генератор с накъсо съединен ротор, който е свързан индиректно към разпределителната мрежа чрез честотен преобразувател на напрежение.



Фиг. 6.9. Схема за свързване към разпределителната мрежа на вятърна турбина с асинхронен генератор с накъсо съединен ротор

Синхронни генератори с редуктор и преобразувател в статорната намотка

Амплитудата и честотата на изходното напрежение на синхронния генератор зависи от скоростта на въртене на ротора. Затова свързването му към електрическата мрежа трябва да е чрез честотен преобразувател. Преобразувателят се състои от токоизправител, междинна постояннотоковата верига и инвертор (фиг.6.10.).



Фиг. 6.10. Схема за свързване към разпределителната мрежа на вятърна турбина със синхронен генератор

За синхронните генератори е в сила следната зависимост

$$\Omega_s = \Omega = \frac{\omega}{p}. \quad (6.6.)$$

Роторите на синхроните генератори са два вида: с възбудителна намотка (електромагнитно възбуждане) и с постоянни магнити.

Ротор с възбудителна намотка

При използване на синхронен генератор с голям брой полюси, механичният редуктор може да бъде премахнат. Следва да се отбележи, че тези генератори имат ниска синхронна скорост на въртене и статор с големи габаритни размери. При отпадане на редуктора, скоростта на въртене на вятърната турбина и ротора на синхронния генератор не се синхронизират. Затова изводите на генератора се свързват към електрическата мрежа индиректно, посредством статичен преобразувател на честота. Преобразувателят превръща генерираната променливотокова енергия с променяща се амплитуда и честота в електрическа енергия, на която амплитуда и честота на напрежението са постоянни и равни на тези на разпределителната мрежа.

Ротор на синхронен генератор с постоянни магнити

Синхронните генератори с възбуждане от постоянни магнити са компактни електрически машини. Роторът им се състои от постоянни магнити, които създават аксиален магнитен поток.

При синхронните генератори с постоянни магнити, не се използва синхронизиране на скоростта на въртене на турбината и генератора. По тази причина изводите на статорната намотка на генератора се свързват към електрическата мрежа индиректно, посредством статичен преобразувател на честота. Преобразувателят превръща генерираната променливотокова енергия с променяща се амплитуда и честота в електрическа енергия, на която амплитудата и честота на напрежението са постоянни и равни на тези на разпределителната мрежа.

Свързване към електрическата мрежа

Електроенергийната система изисква стабилни стойности на ефективната стойност и честота на захранващото напрежение. Затова трябва да се вземат специални мерки за тяхното осигуряване по времена на преходните работни режими на вятърните турбини, като например: включване, изключване или работа при турбуленция.

Вятърни генератори трябва да генерират възможно най-малко висши хармоници. Последните са причинени от статичните честотни преобразуватели, които се използват за свързване на генераторите към електрическа система. Това налага освен използването на филтри да се усъвършенстват самите преобразувателите. Освен това трябва да се осигурява необходимата реактивна енергия за създаване на магнитното поле на асинхронните генератори.

Постоянството на параметрите (честота, ефективна стойност и др. стойност) на електроенергийната система може да бъде повлияно от вятърните турбини, броят на които непрекъснато расте. С цел осигуряване стабилност на електроенергийната система, трябва да се включат различни елементи на устройството за присъединяване на вятърната турбина: повишаващ трансформатор и кондензаторни батерии.

Повишаващ трансформатор

Обикновено вятърните генератори са с номинално напрежение 690 V. Това налага да се използват повишаващи трансформатори при свързването на генераторите към електрическата мрежа, която обикновено е с напрежение 20 kV. В момента няма пряко свързан вятърен генератор към електрическата система, т.е. без да се използва трансформатор.

Кондензаторни батерии

С цел подобряване фактора на мощността на ветрогенераторите, към електрическата мрежа се свързват кондензаторни батерии. Те са съставени от три монофазни кондензатора, които са свързани в триъгълник. Кондензаторните батерии също така се използват да гарантират компенсация на консумираната реактивна мощност (при отчитане промените на вятъра).

Реактивната енергия е необходима за създаване на магнитния поток в асинхронните машини. По този начин, кондензаторните батерии (източници на реактивна енергия) гарантират необходимата енергията за създаване на магнитния поток, а също така подобряват фактора на мощността на вятърната турбина. Когато вятърните турбини работят като автономни източници на енергия, кондензаторните батерии са задължителни, тъй като те осигуряват реактивната енергия за създаване на магнитния поток в асинхронния генератор.

Тест за самоподготовка

1. Статичният честотен преобразувател се състои от:
 - а. Токоизправител;
 - б. Инвертор;
 - в. Тиристор.Отговор: а, б
2. При ниски скорости на вятъра е важно да се използват:
 - а. Генератори с малка мощност и малък брой полюси;
 - б. Генератори с малка мощност и голям брой полюси;
 - в. Мощни генератори с голям брой полюси.Отговор: б
3. Допълнителни резистори се включват в роторната верига на асинхронния генератор за да се:
 - а. Кorigира хлъзгането и скоростта;
 - б. Отчете скоростта на вятъра;

в. Осигури двупосочна циркулацията на енергията през ротора.

Отговор: а

Тест за оценяване

1. Как се свързва ветрогенератор към електрическата система?
2. Обяснете схемата за свързване към електрическата система на вятърна турбина с асинхронен генератор и реостат в роторната верига!
3. Обяснете ролята на статичния честотен преобразувател при ветрогенератора!