



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

SZÉLERŐMŰVEK

NÉMETH BÁLINT
BME VET VM csoport
Ph.D. hallgatója

BUDAPEST, 2005

1. Bevezetés

Világ Energia Trend

Bármit teszünk is, mindig energiát használunk. Ha utazunk, ha dolgozunk, ha pihenünk, ha szórakozunk. Megtehetjük, ma az energia szinte tetszőleges mennyiségben rendelkezésre áll. Ezt talán természetesnek vesszük, pedig egyáltalán nem az. Bele sem gondolunk, mi lenne, ha hirtelen mindez megszűnne: nem használhatnánk elektromos áramot, hogy világíthassunk, és gépeinket működtethessük, nem juthatnánk benzinhoz, gázolajhoz, hogy járműveinket megtankolhassuk, földgázhoz, hogy otthonainkat fűthessük. A következmények katasztrófálisak lennének. Nem létezhetünk megbízható energiaforrások nélkül: ***az energiatermelés az emberi civilizáció alapja.***

A 2002. szeptemberében megtartott World Summit on Sustainable Development¹, az energetika általános megítélésében merőben új hangot ütött meg. Ez a 191 állam részvételével, a legfelső vezetői szinten megtartott konferencia megállapította, és Politikai Nyilatkozatában, valamint egy Végrehajtási tervben rögzítette, hogy a több mint 2 milliárd embert sújtó szegénység egyik oka az ***„energia-szegénység”***, az energiával való el ***nem látottság***. Kimondta, hogy a legszegényebb fejlődő országoknak a modern, kereskedelmi ***energiával való ellátottságát élesen növelni kell.***

Az energetikát a Johannesburgi Csúcs nem, ***mint kártevőt, hanem mint a felemelkedés zálogát*** minősítette. A csúcskonferencia követelményeket is megfogalmazott az energiával kapcsolatban:

Az energia legyen:

**megbízható,
megfizethető,
gazdaságilag életképes,
társadalmilag elfogadható,
környezetileg megfelelő.**

A követelmények egyenként könnyebben lennének teljesíthetők. Így együtt már nehezebb eleget tenni a követelményeknek, de azért nem is megoldhatatlan. A ma használt energiaforrásokkal nem biztosítható megnyugtatóan az emberiség jövője. Találni kell egy olyan megoldást, mely minden fent említett követelménynek megfelel. Ezért az energia iparnak meg kell birkóznia ezzel a feladattal, ezzel szolgálva a világ társadalmának ***„fenntartható fejlődését”***².

A dolgozatban értékeljük azokat az energiaforrásokat, amelyek szerepet játszhatnak a jövő energiaellátásában.

¹ Világtalálkozó a fenntartható fejlődésről, Johannesburg, 2002.

² "a fenntartható fejlődés olyan fejlődés, amely kielégíti a jelen szükségleteit, anélkül, hogy veszélyeztetné a jövő nemzedékek esélyét arra, hogy ők is kielégíthessék szükségleteiket"

2. Megújuló energiaforrások

Megújuló energiaforrásoknak nevezzük a természetes környezetben folyamatos, illetve folyamatosan ismétlődő energiaáramok formájában jelen levő energiaforrásokat. Hasznosításuk a teljes energiaáram egy részének mellékágakon történő kicsatolása, átalakítása, tárolása és felhasználása útján történik. Felhasználásuk mértéke nem haladhatja meg a megújulás mértékét, tehát csak a keletkezés ütemében aknázhatók ki.

A megújuló energiaforrások fajtái:

- Víz
- Biomassza
- Szél
- Nap
- Geotermikus
- Árapály, tengeri hullámvás

2.1 Vízenergia



1. ábra. Vízierőmű

A vízenergiának a megújuló energiaforrások között kitüntetett szerepe van, mert a biomassza hasznosítás kivételével jelenleg az egyetlen, amely számottevő szerepet játszik a világ energiaigényének kielégítésében (2,3 %). Az elektromos energiatermelés hőskorában, a XX. század első felében sokáig úgy tűnt, a vízenergia lehet az elektromos áramtermelés legfőbb forrása, és a ma fejlett országokban sorra épültek a vízierőművek. A vízenergia részaránya azonban néhány évtizede mégis

folyamatosan csökken. Előállítási költsége ugyanis nagyban függ attól, hogy milyen adottságú helyre telepítik az erőműveket. Először természetesen a legjobb helyekre kerültek. Miután azonban ezeket már felhasználták, a rosszabb adottságú területek már egyre kevésbé voltak versenyképesek az olcsó kőolajjal és földgázzal szemben. A fejlett országokban a vízenergia termelés az elmúlt 30 évben nem nőtt jelentősen és várhatóan már nem is fog. Más a helyzet a fejlődő országokban, ahol még nem használták ki az összes kedvező földrajzi helyzetű területet (például jelenleg is építik a világ majdan legnagyobb energiatermelő mammutját Kínában a Jangce folyón, mely 2009-re készül el és 18,2 GW teljesítményű lesz). Ha számításba vesszük az összes olyan helyet a Földön, ahol egyáltalán érdemes vízierőművet építeni (ezt



2. ábra A Hoover-gát a Colorado folyón (USA)

energiagazdálkodási szakemberek megtették), akkor kiderül, hogy ezek összesen mintegy 3 TW teljesítménnyel tudnának üzemelni.

Az emberiség jelenleg mintegy 14 TW-ot használ, tehát, ha ma minden szóba jöhető helyen lenne vízerőmű, akkor is alig több, mint 20 %-át tudná fedezni a mai szükségleteknek, amely arány a jövőben tovább romlik. Ma még a 3 TW-nak csak mintegy 12 %-át használják ki, tehát elvileg mód van a vízenergia felhasználásának bővítésére, de a további építkezéseket akadályozza az a tény is, hogy a vízerőmű építés jelentős környezeti károkat okoz. A gátak, víztározók, csatornák, zsilipek építése a környezet nagymértékű átalakításával jár. Embereket kell lakóhelyükről elköltöztetni, területeket elárasztani, ami az ökoszisztéma megváltozását eredményezi. Fajok tűnhetnek el a területről, vagy pusztulhatnak ki (na jó, azért legyünk igazságosak: az árvízveszély megszüntetése, az öntöző és ivóvízellátás biztosítása a vízierőművek jótékony hatásai közé tartozik, igaz, ez nem a környezetnek, hanem csak az embernek segít). Mindezek miatt Kanada kivételével egyetlen fejlett ország sem tervezi nagyobb vízerőmű üzembe helyezését. A zöldek is több fantáziát látnak a kisebb, helyi igényeket kielégítő vízerőművekben, melyek jobban képesek beilleszkedni a környezetbe, ezek azonban soha nem fognak jelentős mennyiségű energiát termelni.

A vízenergia-termelés tehát még növelhető, de semmiképpen nem képes az emberiség növekvő energiagondjait megoldani, használata pedig jelentős környezetrombolással jár együtt. Vízerőművek tárgyalásakor említést kell tenni a szivattyús-tározós erőművekről. Ezek nagy esésű, kis teljesítményű erőművek melyek szivattyúval a felső tározóba nyomják a vizet, majd a csúcsterhelési időszakban a turbinán keresztül leengedik az alsó tározóba. A hasznosított energetikai potenciált nem növelik, csupán az időbeli átütemezésre adnak módot. A veszteség mintegy 20-25%. Általában a gazdaságos tehereloszlás szempontjait figyelembe véve alaperőművek (atomerőművek, vízerőművek) kiegészítésére.

A magyarországi folyók elméleti vízierőkészlete mintegy $E=10$ TWh/év eszmei energiamentiséggel jellemezhető. A potenciális vízierőkészlet 91%-át három fő folyónk (a Duna, a Tisza, és a Dráva), a további 9%-ot tizenkét kisebb folyónk képviseli. A természeti potenciálunk jelenleg 2-3%-ban van kihasználva. A közelmúltban több 0,1-5 MW teljesítmény kategóriában adtak ki vízjogi engedélyt. Azonban e kis erőművek megépülte után sem fog az Európában legrosszabb vízierőkihasználási mutatónk kimutathatóan javulni és a vízerőművi villamosenergia termelése változatlanul a közcélú erőművekben megtermelt villamosenergia 0,5%-a körül marad. Elméletileg és gyakorlatilag a Dunán, a Tiszán és a Dráván van alapja jócskán 5 MW feletti beépített teljesítményű fejlesztéseknek, s így lehetővé válna az összes villamosenergia-termelésen belül a megújuló energiaforrások részarányának egy nagyságrenddel történő növelése.

Magyarországon kiépített vízerőművek:

- Tisza-örs (12 MW)
- Kisköre (21 MW)
- Keleti törpék
- Nyugati törpék

2.2 Szélerőenergia



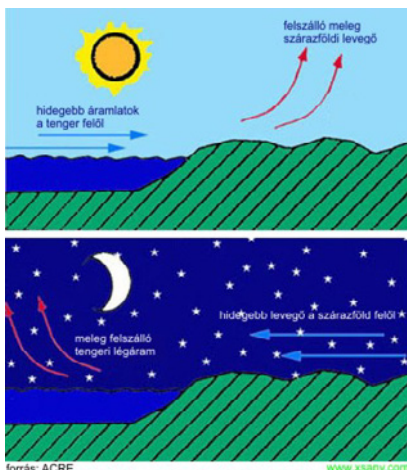
3. ábra. Tengeri telepítésű szélörvények

legfeljebb alakjuk változott kissé, na meg az, hogy ma elektromos energia termelésére használják őket és nem őrlésre. Technológiájukból adódóan a szélgépek turbinái nemcsak szélcsendben, hanem kis szélesség (9 - 18 km/óra) mellett sem tudnak üzemelni, túl nagy sebesség (a szélturbina fajtájától függően 50 - 100 km/óra körül) mellett pedig a berendezések biztonsága érdekében kell őket leállítani, vagyis csak viszonylag állandó, közepes szélességű helyeken használhatók gazdaságosan. A legalkalmasabb ilyen helyek a tengerpartok, de szélörvények a kontinensek belsejében is találhatóak.

Energetikai szakemberek ma a szélerőenergiát tartják a legígéretesebb megújuló energiaforrásnak. Bár becsült kiaknázzható éves mennyisége lényegesen kisebb a napenergiáénál - mintegy 10 TW év - ez bőven elegendő arra, hogy meghatározó szerepet játszhasson az energiatermelésben. Az emberiség már évszázadok óta használja ezt az energiaforrást. A szélerőenergia hasznosítására szolgáló gépek lényegében ma is ugyanazon az elven működnek, mint a régi szélmalmok,



4. ábra. Darrieus-szélkerék



5. ábra. Szélirányok

A szélerőenergia a fejlett országokban ma a leggyorsabban növekvő megújuló energiaforrás. Európa ebben élén jár a világon: Németország a világ legnagyobb szélerőenergia termelője, 2004-ben kb. 17000 MW beépített szélörvényi kapacitás volt. Paksnak: 1860 MW, arány 7,7:1. Ebből is látszik, hogy az E-on szélerőenergia bázisának megközelítőleg csak 20% volt a rendelkezésre állása. A termelt energia 18,6 TWh/év ez a német áramigény 4%, a paksi átlagos termelés 14 TWh/év arány 1,33:1). A szélörvényekből származó áramot kb. 9 eurocent/kWh áron tudták értékesíteni, míg az atomerőműben termelt villanyáram egységköltsége 3-4 eurocent/kWh. Dánia elektromos energiájának 12 %-át

szélörvények termelik. Sokan támadják amiatt a szélörvényeket, hogy a nagy sík területen álló magas szélturbinák hatalmas részt vesznek el a természettől, ráadásul képtelenek beilleszkedni abba, rontva ezzel a tájképet. Bár az esztétika némileg megítélés kérdése, az viszont már nem, hogy a turbinák rendkívül veszélyesek a madarakra. 1991-ben az akkor 1731 MW-os amerikai szélörvény park becslés szerint egy év alatt mintegy 10 ezer szárnyast kaszabolt le. A szélörvények ráadásul zajosak is, ezért lakott településektől megfelelő távolságba kell őket

építeni, és ezzel még nem oldódott meg a természet zajterhelésének kérdése. Ezen környezeti hatások

2.3 Napenergia

Az emberiség által kiaknázható napenergia készlet megdöbbentően nagy. Ha azt mondtuk, hogy jelenleg évente 14 TW év energiát használunk, akkor a Földre évente érkező kb. 90 000 TW évből (!) a mai becslések szerint kiaknázható 1000 TW év energia valóban hatalmas mennyiség. A napenergia hasznosításának számos módja van, ezek technikailag két főbb csoportba sorolhatók. Az egyik esetben a napsugárzást hővé alakítják. Ehhez olyan felületre van szükség, amely jól nyeli el a sugárzást, felmelegszik és hőjét átadja pl: a vele érintkező víznek. Ezt a vizet közvetlenül is fel lehet használni, de akár villamos energia is termelhető vele. Az ilyen berendezéseket napkollektoroknak nevezzük.



6. ábra. „Solar Tower” A napenergia hasznosítása közcélú villamos energia termelésre



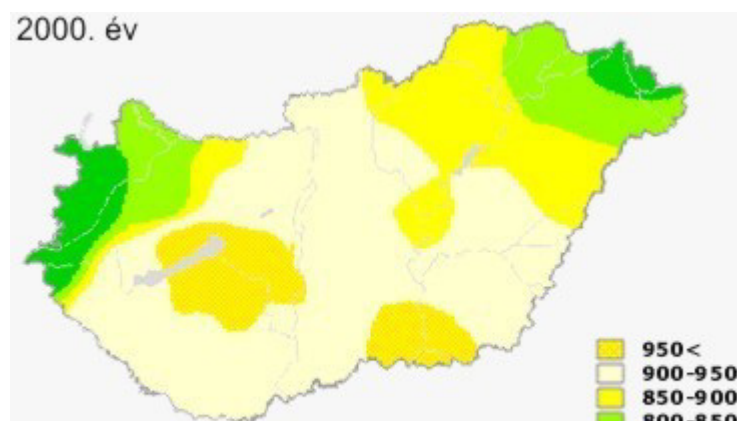
7. ábra. A Mobil napelem

A másik csoportba a napelemek tartoznak, melyek a fotoelektromos hatás segítségével a rájuk eső napsugárzásból közvetlenül elektromos áramot állítanak elő.

Az első csoportba tartozó rendszerek technológiája ma már érettnak tekinthető, olyannyira, hogy egyes melegebb éghajlatú országokban - ilyen például Görögország és Izrael - az egy-egy ház melegvíz ellátására szolgáló napkollektorok rendkívül elterjedtek. A napelemek ma is folyamatos fejlesztés alatt állnak.

Adott tehát egy kimeríthetetlen, hatalmas mennyiségben rendelkezésre álló energiaforrás, amelynek kihasználása ráadásul nem szennyezi a környezetet. A napsugárzás hasznosítása ma a fő energiaforrásokhoz képest mégis elenyésző. Ennek magyarázata a napenergia tulajdonságaiban és a napenergia hasznosítás jelenlegi fejlettségében keresendő.

A **napsugárzás** nem egyenletesen érkezik a Földre, intenzitása az évszak, a napszak és az időjárás változásával jelentősen módosul. Ez a **megbízhatatlanság** rendkívül megnehezíti a napenergia ipari méretű hasznosítását, ugyanis az általa termelt energia mennyisége a Föld



8. ábra. Magyarország nyári naptérképe

jelentős részén nem tervezhető előre. Nehéz lenne egy olyan gazdaságot működtetni, amely leáll, ha felhős az idő. Erre a problémára megoldást jelentene, ha a villamos energiát ipari méreteken lehetne tárolni, mert így a megtermelt energiát

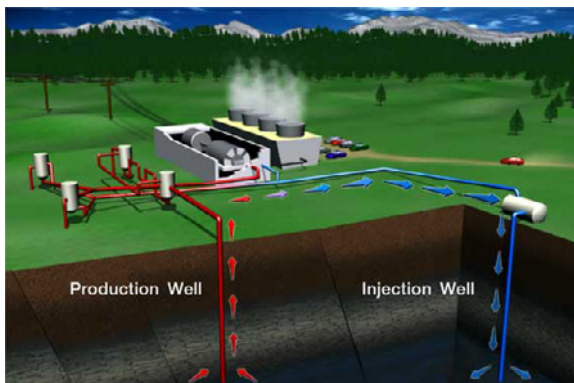
egyenletesen lehetne a hálózatba juttatni. Sajnos ez ésszerű költségekkel jelenleg nem megoldható. A megbízhatatlanság mellett a napenergia hasznosítás másik akadály az, hogy az energiát **óriási területről** kell összegyűjteni. Egy naperőmű telep körülbelül 50-100-szor akkora helyet foglal el, mint egy ugyanannyi energiát előállító atom, vagy hőerőmű. Ahhoz például, hogy a Magyarország számára ma szükséges energiát napelemekből elő tudjuk állítani, az ország területéből nagyságrendileg 100 km²-t kellene lefedni.

A napenergia termelés elterjedésének harmadik gátja az **ára**. A napelemek és napkollektorok jelenleg még túlságosan drágák ahhoz, hogy versenyezni tudjanak a nem megújuló energiaforrásokkal (az a néhány naperőműtelep a világon, amely a hálózatba áramot termel, mind jelentős állami támogatással épült). Ez a napelemek esetében a jövőben valószínűleg változni fog. A napelemek előállításához ugyanis félvezetőket használnak, és a félvezetőipar mögött olyan hatalmas kutató-fejlesztő apparátus áll, hogy azok előállítási költsége jelentősen csökkenhet. Ezzel párhuzamosan határfokuk is nőni fog, ami kisebb területeken való megépítésüket teszi lehetővé.

A napenergia hasznosítás előtt mindent összevetve szép jövő áll - leginkább más energiaforrásoktól távoli helyeken, vagy kisebb közösségek igényeinek kielégítésére - de kiszámíthatatlan jellege és hatalmas területigénye miatt ma úgy látszik, **nem válhat elsődleges energiaforrássá**.

2.4 Geotermikus energia

A felszínről sugárirányban a Föld középpontja felé haladva 1 km-enként átlag 30°C-szal emelkedik a hőmérséklet, de bizonyos területeken ennél nagyobb a hőmérsékletemelkedés,



9. ábra. A geotermikus erőmű működési elve

így Magyarországon is 50-60°C és 2 km mélységben már eléri a 100°C-t. Ez a kőzetek hőtartalmából adódó geotermikus energia. Felszínre hozatala történhet mélyfúrással, hő formájában, a leggyakrabban azonban gőz vagy termálvíz közvetítésével. Ahol gőz hozható fel, ott a geotermikus energiával elektromos áram termelhető, de ilyen terület **viszonylag kevés** van (elsősorban Izlandon, Új-Zélandon és az USA-ban), szemben a szinte mindenütt található 30-100°C-os termálvizes területekkel. Magyarország közismerten gazdag hévizekben: különösen a Duna-Tisza közén és a Nagyalföldön jelentős a hévízkészlet. A legáltalánosabban alkalmazott rendszerekben a termálkútból feltörő vizet gáztalanítják, ülepítik és sótartalmát részben eltávolítják, majd a felhasználás helyére szivattyúzzák, a lehűlt vizet pedig valamilyen vízáramba, vízgyűjtőbe elvezetik. Ezek a rendszerek egyszerűek, megbízhatóan működnek, kis beruházási költséggel létesíthetők és olcsón üzemeltethetők, problémájuk azonban, hogy - ha nincs vízutánpótlásuk - a rétegenergia csökkenése következtében idővel kevesebb vizet adnak. A legjobb megoldást azonban a kitermelt, lehűlt víz visszasajtolása jelenti, mert így a mély vízszint csökkenését lényegesen mérsékelni, a kutak élettartamát nagymértékben növelni lehet.

2.5 Biomassza



10. ábra. Energiaültetvény

biomasszából származó energia túlnyomó részét így termelik, a fa ma is a világ energiaszükségletének több, mintegy 11 %-át fedezi. Másrészt később felhasználható energiaforrást, például belsőégésű motorok üzemanyagát (ebben Brazília jár élen a világon, ahol cukornádból biztosítják az ország üzemanyag szükségletének 60 %-át), vagy biogázt állíthatnak elő belőle, ezek a módszerek a modern biomassza hasznosítást képviselik.

A biomassza erősen kilóg a megújuló energiaforrások sorából amiatt, hogy **használat**a a fosszilis tüzelőanyagokhoz hasonlóan **környezetszennyezéssel jár**. Annyiból jobb a helyzet, hogy ha az elégetett biomassza mennyisége ugyanannyi, mint a megtermelté, akkor a CO₂ gáz kibocsátása a fenntartható fejlődéssel összeegyeztethető, mert a felszabaduló CO₂ mennyisége pontosan annyi, amennyit az adott növény korábban megkötött. A Világ éves biomassza potenciálját a Világ mai éves energiafelhasználásának mintegy kétszeresére becsülik. A



11. ábra. Repcemező melyből később biodízel lesz

km² kell felhasználni.

A biomassza bázisú energiatermelés alapvető módjai:

- A biomassza direkt égetése (hagyományos kondenzációs erőművi blokkokban)

A biomassza gyűjtőfogalom, az élő szervezetekből származó, folyamatosan termelődő, energiatermelésre felhasználható anyagokat jelenti. Ez az emberiség legősibb energiaforrása. Máiig legelterjedtebb ezek közül a fa, de ide tartoznak a mezőgazdasági termelésből visszamaradt növényi hulladékok, állati termékek, az ipari és kommunális szemét, de azok a növények is, melyek magvaiból üzemanyagot lehet gyártani. A biomasszát többféleképpen használhatják fel. Egyrészt közvetlenül elégethetik, ez a hagyományos biomassza hasznosítás. A

biomassza versenyképessége a felhasznált alapanyagtól és az adott lejárás technológiai fejlettségétől függően nagyon változó. Ha arra kérdésre keressük a választ, lehet-e primer energiaforrás az emberiség számára, nemmel kell felelnünk. Ekkor ugyanis csak az energiaültetvények (vagyis a kifejezetten energiatermelés céljára termesztett növények) jönnek szóba. Ugyanannyi energiát a növények közül a cukornádból lehet legkisebb területen "termeszteni", de egy 1000

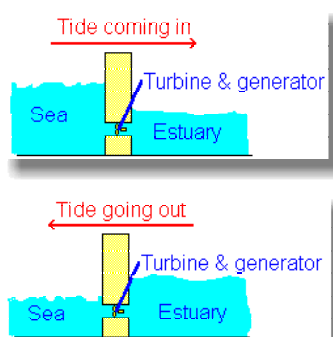
MW-os átlagos hőerőmű teljesítményének eléréséhez így is 1300

- Biomassza bázisú hajtóanyag (gáz,olaj,alkohol): termikus bontás, fermentáció, sajtolás
-> gázmotor
- Biomassza bázisú szilárd energiahordozók előállítása (pellet, biobrikett)

A megújuló energiaforrásokkal kapcsolatos kutatás fejlesztési tevékenység az 1973-as olajárrobbanást követően kapott nagy lendületet. Azóta minden megújuló energiaforrás fajlagos költsége jelentősen csökkent. A vízenergia és a biomasszából származó energia kivételével azonban ezek az energiaforrások még mindig nem versenyképesek, emiatt az erre épülő vállalkozások ma még túlnyomórészt állami támogatással működnek.

A megújuló energiaforrások ritkán hangoztatott jellegzetessége a decentralizáltság. A szinte minden országban monopolhelyzetben levő energiatermelő vállalatok által képviselt centralizáltság helyett a **helyi közösségek önellátásának kialakulását** segíti elő.

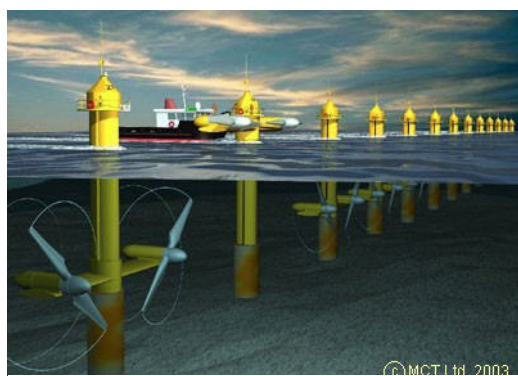
2.6 Árapály, tengeri hullámzás



12. ábra. Hagyományos ár-apály erőmű működési

A hagyományos ár-apály erőmű működése nagyon hasonló egy vízerőműéhez, kivéve, hogy a gát sokkal nagyobb. Egy hatalmas gátat építenek egy folyó torkolatán át. Amikor jön ill. megy a dagály, a víz keresztüláramlik a gátba épített csatornákon. A tengervíz áramlása megforgatja a turbinákat. Egy másik megoldásnál a tengervíz által egy csőbe nyomott levegő hajtja a turbinákat. A hajók áthaladását, a csatornáknál is alkalmazott nagy zsilipkapuk teszik lehetővé. A legnagyobb ár-apály erőmű a világon az észak-franciaországi Rance folyó torkolatánál, ahol a dagálymagasság a 14 métert is eléri. Itt a 24 turbina évente kereken 600 millió kilowatt áramot termel. Jelenleg összesen körülbelül 10 ilyen ár-apály-erőmű működik szerte a világon.

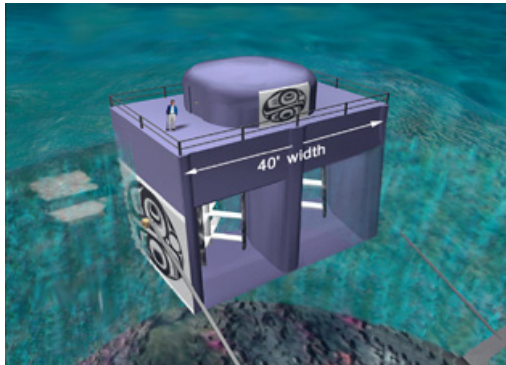
Seaflow



13. ábra. Seaflow

A tengeri ár-apály turbinák elvileg olyanok, mint egy elsüllyesztett szélmalom. Olyan helyekre telepítik, ahol az erős tengeráramlások által hatalmas mennyiségű víztömegek mozognak. Ezeknek az áramlásoknak nagy előnyük, hogy éppolyan előre meghatározható energiaforrás, mint az ár-apály ami kiváltotta ezt, eltérően a szél vagy hullámenergiától, melyek érzékenyek az időjárás véletlenszerű erőteljes megváltozására. A fejlesztés alatt álló technológia egy axiális átömlésű, 15-20 m rotorátmérőjű ikerturbinából áll. Ilyen az Edinburghtól 500 kilométerre délre, 20 méter mély vízben működő seaflow elnevezésű víz alatti rotor, amely 300 kilowatt teljesítményű. 2005 végén egy további, 1,2 megawatt teljesítményű erőművet helyeznek üzembe Észak-Írország partjainál.

Blue Energy Ocean Turbine



14. ábra. Blue energy ocean turbine

A Dareius-szélkerék analógiájára elkészült annak vízi változata. A Blue Energy Ocean Turbine úgy fest, mint egy függőleges tengelyű víz alatti szélmalom. A víz 832-szer sűrűbb, mint a levegő és nem összenyomható közeg, így egy 8 csomó sebességű tengeráramlat egy 390 km/h -ás szélsősebességgel egyenértékű. A Blue Energy Ocean Turbine-nak 4 szárnyprofil alakú lapátja van, amelyek a rotorhoz csatlakoznak, ami meghajt egy integrált hajtóművet és ezen keresztül az elektromos generátor egységet.

Pelamis P-750



15. ábra. Energiatermelő „virslík” a tengeren

A 120 m hosszú építmény - melyet a tengeri kígyó görög elnevezése után hívnak Pelamis-nak - hivatott erre a célra. A norvégek által kifejlesztett generátornak van egy döntő előnye: a 120 méteres, 750 tonnás konstrukció csupán 7 méteres átmérővel nem stabilan fekszik a vízben, hanem a hullámok mozgásához igazodik. Így az építmény nem ellenáll a hullámoknak, hanem "keresztülúszik" a hullámokon, és ezalatt az energiáját villamos árammá alakítja. A Pelamis négy hengeralakú

szegmensből áll, melyek egymással rugalmasan, mozgathatóan vannak összekötve. Már egy méter magasságú hullámok esetén is elkezd a "virslit"

hintázni a hullámban, mely mozgás során a víz az erőmű szegmensbe kerül a nagynyomású tartályokba. A nyomást egy dugattyúhoz továbbítja a szerkezet mely egy generátorral van összekötve, ahol a hullámerő árammá alakul. A hatéves fejlesztéssel kialakított szerkezet prototípusát a norvég energiakonzern, a Hydro néhány hete az Orney szigetek közelében eresztette vízre. Azóta ring a kis erőmű a vízen, a szárazfölddel egy villamos kábel köti össze. A tesztidőszakot ez idáig a prototípus jól bírta, bár az áramellátás nem volt elég stabil. Azzal azonban elégedett lehetett a fejlesztőcsapat, ahogyan az erőmű a hullámok támadásait állta.

2.7 A megújulókkal kapcsolatos nehézségek összefoglalása

Környezeti hatások:

- Számos beruházás jelentős környezetkárosítással, tájrombolással jár. Nem szabad megfeledkeznünk a gyártás során keletkező veszélyes hulladékokról, üvegházhatású gázokról sem. Vitatott kérdés a szélerőműveknek a madárvilágra gyakorolt hatása valamint a környezetnek okozott zajterhelése. Mindezek ellenére, ha a kérdést úgy tesszük fel, hogy: Mit nyerhetünk azzal, amit veszünk? A válasz a következőképp hangzik: Tiszta, alacsony emissziójú energiatermelési mód (sokmillió tonnával kevesebb CO₂ a légkörben), melynek környezetre gyakorolt hatása elfogadható/elhanyagolható.

Energetikai ellátásbiztonság:

- **Időszakos rendelkezésre állás:** A szélsébség, napsütéses órák száma, vízhozam statisztikai törvények szerinti változása miatt a megújulók mindig csak kiegészítő energiaforrások lesznek. A pillanatnyi fogyasztói igények, és a megújulókból aktuálisan előállított villamos teljesítmény közötti különbséget más hagyományos energiaforrásokból kell fedezni. A tartalékteljesítmény rendelkezésre állásán túlmenően többlet költséget jelent. 2003-ban az E.ON-nak ez 100 millió euró veszteséget jelentett, ha a belépő helyettesítő erőmű részterhelésen, így a névlegesnél lényegesen rosszabb hatásfokkal üzemel. Forgó tartalékot kellett tartani. Az így keletkező többletköltség a villamos-energia rendszerben lévő szélerőmű kapacitás nagyságával nő. A teljesítményben jelentkező ingadozások, a bizonytalan rendelkezésre állás kiegyenlítésére legalkalmasabb megoldás a szivattyús-tározós vízerőművek alkalmazása.
- **Nem vagy csak részben tárolhatók:** Ez azt jelenti, hogy megújuló energiaforrásokból nem lehet stratégiai tartalékot tartani. Egyetlen reális megoldás: szivattyús-tározós erőmű

Gazdaságosság:

- **Nem versenyképesek:** Bár az utóbbi 30 évben jelentősen csökkent, a megújulókból származó villamosenergia fajlagos költsége, még mindig többszöröse a fosszilis tüzelő anyagokénak. Ennek oka a **magas beruházási költség** valamint az **alacsony kihasználási óraszám**. Szintén ezzel magyarázható az is, hogy a „zöld” szervezetek miért szorgalmazzák annyira az externális költségek beépítését a villamosenergia egységköltségébe. Belátható, hogy megújuló energiatermelés esetén a külső költségek szinte elhanyagolhatóak, tehát ennek beépítése a villamosenergia egységköltségébe a hagyományos erőműveket érintenék hátrányosan, ezzel teremtve jobb piaci pozíciót a megújulóknak. Ma a legtöbb országban **állami támogatásra** szorulnak a szélerőműveket üzemeltető vállalkozások. (átvételi kényszer, dotált ár) (Persze ez nem azt jelenti, hogy ez nekik ne érné meg, sőt....)

- **Kis teljesítmény- és energiasűrűség:** Egy megújuló erőmű ugyanakkora teljesítmény mellett nagyságrendileg 100-szor nagyobb területet igényel egy fosszilis tüzelőanyagot használó erőműnél, mivel a szélturbinák esetén az optimális hatásfokhoz megfelelő távolságot kell tartani, naperőműveknél hatalmas kollektor-felületeket kell alkalmazni, biomasszánál több 100 km² energianövény-ültetvény szükséges. Bár a megújuló minden bizonnyal növelni fogja részesedését a világ energiatermeléséből, a **hatalmas területigény** miatt valószínűtlen, hogy valaha is meghatározó szerephez jutna.

Kapcsolat a fenntartható fejlődéssel:

- A fenntartható fejlődés elképzelhetetlen megújuló energiaforrások nélkül, így az **energiaturmix értékes tagját** fogják képviselni a jövőben is. Ezen energiaforrások felhasználása az előrejelzések szerint mintegy 50 %-al nőni fog az elkövetkező 20 évben (Európában ez még nagyobb növekedést jelent, az Európa Parlament által 2001-ben elfogadott irányelv szerint 2012-re duplájára kell emelni a megújuló energiaforrások részarányát az Európai Unióban). Ezek szerint a megújulók részaránya az össz-energia termelésben 12%, míg a villamosenergia-termelésben 24%. Ez utóbbi különösen ambíciózus törekvés.
Bár a megújuló energiaforrások részesedése az energiatermelésből a jövőben örvendetesen nőni fog, sajnos nem képesek környezeti terhelés nélkül energiát biztosítani, sokuk egyelőre nem versenyképes, és **jelentős mértékben nem fogják tudni enyhíteni az emberiség növekvő energiagondjait.**

3. Energia és a szél kapcsolata

$$\text{Kinetic Energy} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2 \text{ joules.}$$

A mozgási energiára ismert képlet látható felül. Ebből a levegő áramlási sebességétől függő kinetikus energia összefüggése adódik:

$$\text{Power} = \frac{1}{2} \cdot (\text{mass flow rate per second}) \cdot V^2$$

mass flow rate per second= a tömeg áramlási sebessége secundumonként

Ha bevezetjük:

P= mechanikai energia a mozgó levegőben

ρ = levegő sűrűsége

A= a rotor lapát által súrolt terület

V = levegő sebessége

$$P = \frac{1}{2} (\rho AV) \cdot V^2 = \frac{1}{2} \rho AV^3 \text{ watts.}$$

Meg kell különböztetni kétfajta levegő áramlási irányt: felszálló és leszálló ágban levő.

$$P_o = \frac{1}{2} \text{ mass flow rate per second} \cdot \{V^2 = V_o^2\}$$

Ahol:

P₀= a rotorból nyert mechanikai energia (turbina kimeneti teljesítménye)

V= „felszálló szél” sebessége a rotor lapátokba való beáramláskor

V_0 = „leszálló szél” sebessége a rotor lapátok elhagyásakor.

A tömeg áramlási sebességét tehát a köv. képlet segítségével írhatjuk le, ami a fel és leszálló szél sebességet átlagolja.

$$\text{mass flow rate} = \rho \cdot A \cdot \frac{V + V_0}{2}$$

Felhasználva az előzőeket a köv. képletben a mechanikai energia által meghajtott generátor teljesítményét mutatja be.

$$P_o = \frac{1}{2} \left[\rho \cdot A \cdot \frac{(V + V_0)}{2} \right] \cdot (V^2 - V_0^2)$$

Bevezetve a C_p koefficiens, mely a felszálló ági szélre vonatkozik. Értéke a V_0/V aránytól azaz a fel és leszálló ági szélesebségtől függ, maximuma 0.59.

$$P_o = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot C_p$$

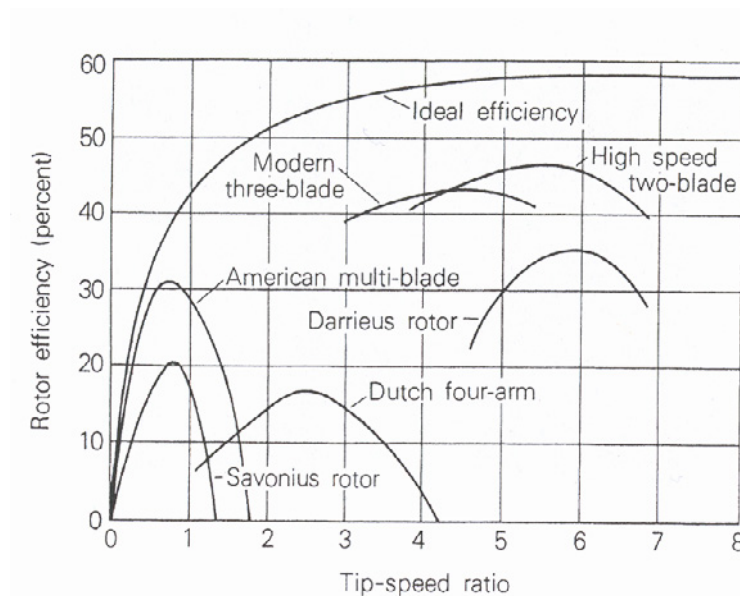
A maximális energia akkor nyerhető, ha a leszállóági szél sebesség egyharmada a felszállóágénak..

$$P_{\max} = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot 0.59$$

A gyakorlatban maximum 0.5-ös C_p állítható elő két lapátos turbinánál, és 0.2 és 0.4 közötti lassabb turbináknál több lapáttal.

A termelt energia függ a rotor pásztázási területétől (lineárisan), a levegő sűrűségétől (lineárisan), szél sebességétől.

Az alábbi ábrán (16. ábra) a vízszintes tengelyen légszárnyvég kerületi sebessége a függőleges tengelyen a rotor eredményessége százalékban (hatásfoka) látható.



16. ábra

4. Szélerőművek energia termelésének előrejelzése

Napjainkban a szélenergia széles körű felhasználásának egyik fő akadálya a szél kiszámíthatatlan természete, amely a villamosenergia-rendszerirányító központnak leadandó termelési menetrendtől való gyakori eltérések esetén lényegesen csökkenti a megtermelt energia megbízhatóságát és így természetesen átvételi árát is. Annak érdekében tehát, hogy a megújuló energiaforrások gazdaságosan kiaknázzhatók legyenek és azok részesedése az ország energiatermeléséből elérhesse az Európa Tanács irányelveiben megfogalmazott arányt, fontos ismerni az energiatermelést befolyásoló tényezők előrejelzésére rendelkezésre álló módszereket, azok megbízhatóságát és korlátait.

Mint arra a későbbiekben konkrét adatokkal alátámasztva kitérek, az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSz) által készített szélelőrejelzések korrekció nélkül sem térbeli felbontásukban, sem pontosságukban nem alkalmasak az energiatermelési menetrend elkészítésére. Az OMSz munkatársai a kifejezetten energetikai célú előrejelzések előkészítése terén az igények felmérésén és a tulajdonképpeni feladat specifikálásán dolgoznak.

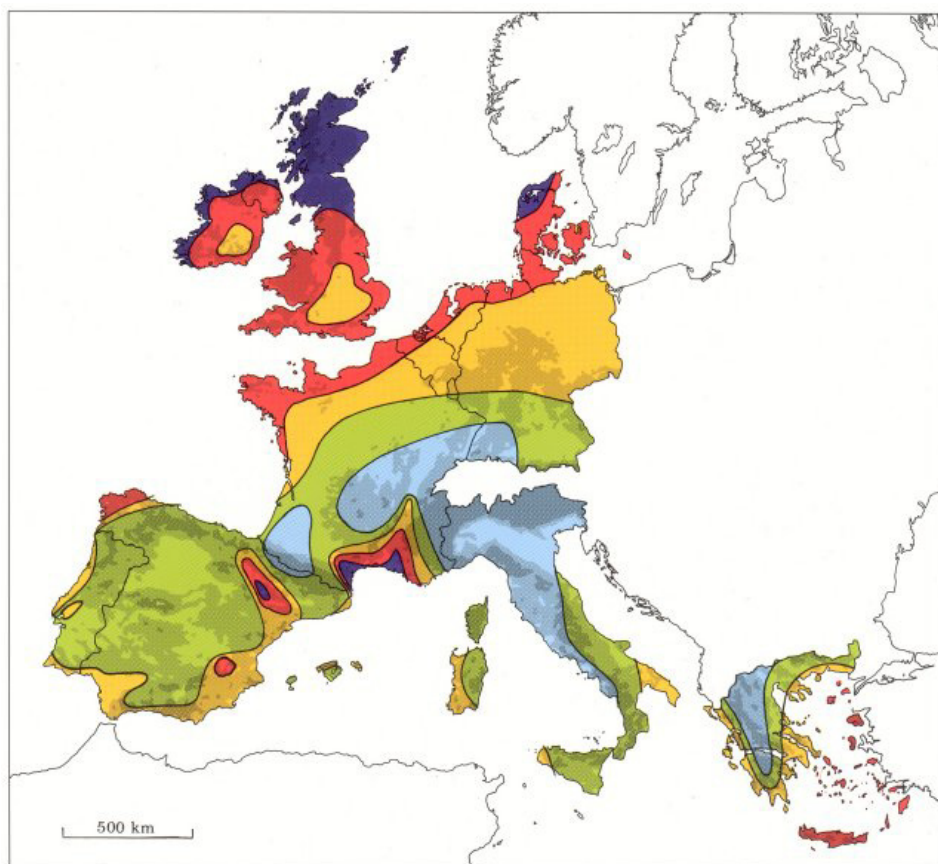
Egy szélerőmű telepítésének előkészítése meteorológiai szempontból többek között a beruházás tervezett helyének környezetében szélerősség- és irányméréseket jelent, amelyeket hosszú ideig (6-12 hónap) és nagy időbeli felbontással (jellemzően 10 perc) végeznek. Az így adódó hatalmas adattömeget feldolgozva a mérési pont helyére vonatkozóan megbízható információ nyerhető a szélerősség és –irány eloszlására. Ezek az eloszlások digitális modellekkel extrapolálhatóak a mérési pont akár 20 km-es körzetére, ami jó alapot szolgáltat a beruházás pontos helyének várható energiahozam szempontjából optimális megválasztására. Ezen modellek azonban nem alkalmasak a rövid távú előrejelzések által az erőműtől távoli pontokban meghatározott értékek extrapolációjára.

A tágabb környezet kiválasztásában segítséget nyújthatnak a meteorológiai statisztikák, térképek, melyekből kiolvashatók, melyek az országnak azon területei, amelyek a főbb szélcsatornák valamelyikébe esnek. Nyugat-Európában és az Egyesült Államokban kifejezetten a várható energiahozam becslése céljából is készültek az átlagos szélesebesség térbeli eloszlásáról térképek, amelyek közül a legelterjedtebb a dán Risø National Laboratory által a saját fejlesztésű WAsP modell és a (15 tagú) Európai Unió több, mint 200 mérőállomásáról származó adatok felhasználásával készült European Wind Atlas.

Az említett WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program) modell a meteorológiai állomások által gyűjtött adatokat a környék digitális térképének felhasználásával „megtisztítja” a felszín domborzati viszonyainak, egyenetlenségeinek, érdességének valamint az árnyékoló műtárgyak hatásától, majd az így nyert referencia-adatokat extrapolálja.

A WAsP érdességi almodellje a talaj simasága és a jellemző növényzet által meghatározott súrlódás becslése alapján számítja ki a felszín közelében kialakuló határrétegben a szélesebesség várható függőleges eloszlását és a turbulencia mértékét.

Az árnyékolási almodell veszi figyelembe az áramlás útjában levő akadályok (pl. magányos fa, épület, oszlop) hatását. A létrehozott turbulencia által módosított áramlási kép vertikálisan az akadály magasságának háromszorosaig, az akadály mögött a magasság 30-40-szereséig figyelhető meg. Az almodell abban az esetben használandó, ha az erőmű tervezett helye erre a leárnyékoló területre esik, de csak akkor ad elegendően pontos eredményt, ha nincs az akadály közvetlen közelében.



Wind resources ¹ at 50 metres above ground level for five different topographic conditions										
	Sheltered terrain ²		Open plain ³		At a sea coast ⁴		Open sea ⁵		Hills and ridges ⁶	
	m s ⁻¹	Wm ⁻²	m s ⁻¹	Wm ⁻²	m s ⁻¹	Wm ⁻²	m s ⁻¹	Wm ⁻²	m s ⁻¹	Wm ⁻²
Dark Red	> 6.0	> 250	> 7.5	> 500	> 8.5	> 700	> 9.0	> 800	> 11.5	> 1800
Red	5.0-6.0	150-250	6.5-7.5	300-500	7.0-8.5	400-700	8.0-9.0	600-800	10.0-11.5	1200-1800
Orange	4.5-5.0	100-150	5.5-6.5	200-300	6.0-7.0	250-400	7.0-8.0	400-600	8.5-10.0	700-1200
Yellow	3.5-4.5	50-100	4.5-5.5	100-200	5.0-6.0	150-250	5.5-7.0	200-400	7.0- 8.5	400- 700
Blue	< 3.5	< 50	< 4.5	< 100	< 5.0	< 150	< 5.5	< 200	< 7.0	< 400

17.ábra. Az European Wind Atlas átfogó képe a kontinens széljárásáról.

Annak érdekében, hogy a környék általános széljárásától való kisebb eltérések jelentőségét érzékeltesük, vizsgáljuk meg az energiahozam átlagos szélességtől való függését. Mivel a turbinalapátok hatáskeresztmetszetén időegység alatt átáramló levegő tömege a sebességgel, egységnyi tömegű levegő mozgási energiája pedig a sebesség négyzetével arányos, a turbina átlagteljesítményét az átlagos szélesség köbével arányosnak vehetjük a belső mechanikai veszteségek által kevésbé befolyásolt tartományban [4]. Eszerint a felszín és környező objektumok által egy kisebb körzetben az átlagos szélességben okozott 10%-nyi (mindössze néhányszor 0,1 m/s) ingadozás is mintegy 30%-os különbséget jelenthet a várható energiahozamban.

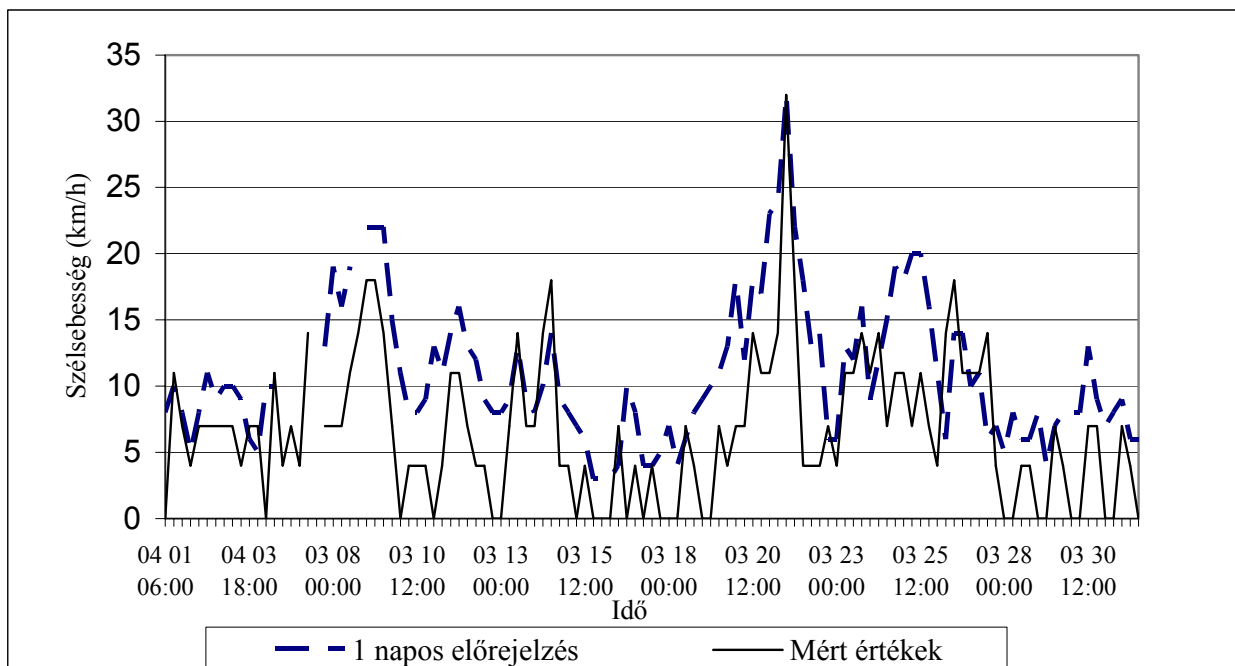
Látnunk kell azonban a WASP és hasonló modellek korlátait is: a domborzati és egyéb áramlámódosító tényezők figyelembevételét végző almodellek mellett nagyrészt statisztikai módszereket alkalmaznak, amelyekkel a tervezés fázisában, átlagos értékek becslésében igen jó eredményeket lehet elérni, nem alkalmasak azonban a rövid távú előrejelzések korrekciójára, azaz az erőmű működtetése során a környékre adott szél-előrejelzés alapján az erőmű pontos helyén várható szélerősség és –irány kiszámítására.

Az ALADIN (Aire Limite Adaptation dynamique Developpement InterNational, azaz korlátos tartományú modellezés dinamikai adaptációval nemzetközi együttműködésben) projekt az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) egyik legfontosabb nemzetközi együttműködése a numerikus előrejelzések terén. A nemzetközi projektet a Météo France

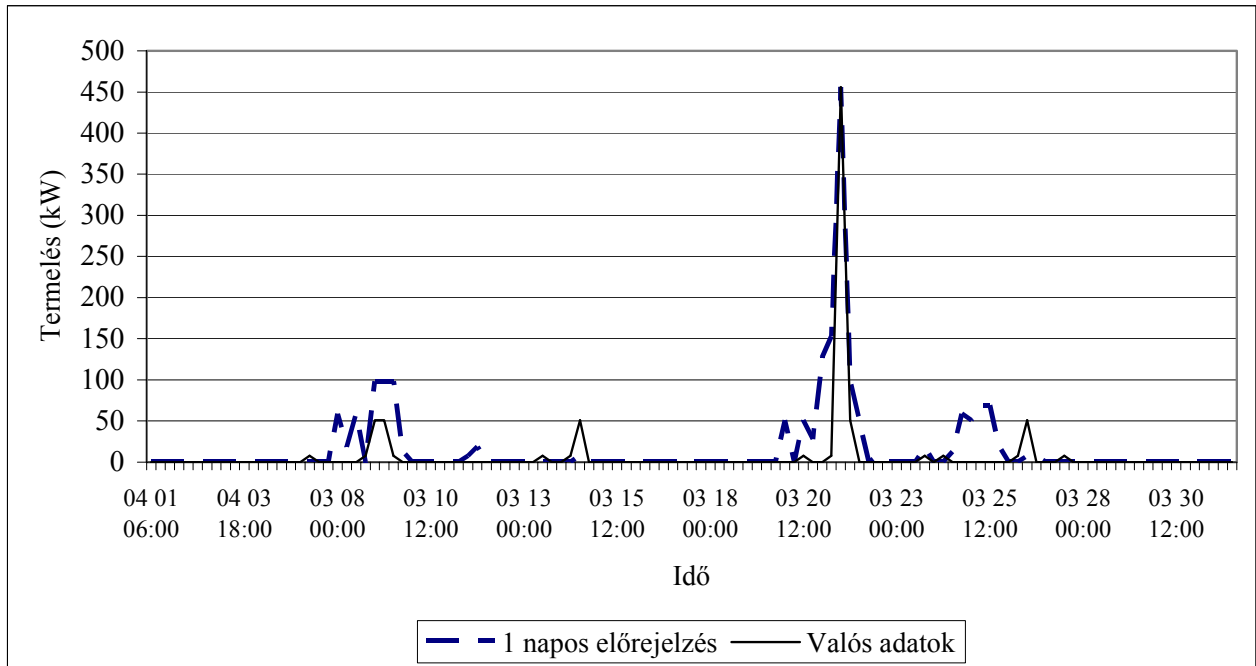
kezdeményezte 1990 végén és napjainkra 15 nemzeti meteorológiai szolgálat tagja az együttműködésnek. Az OMSZ a kezdetektől részt vesz az ALADIN projektben, amelynek a legfontosabb célja egy korszerű korlátos tartományú numerikus előrejelző modell kifejlesztése és további közös fejlesztése [6].

Napjainkban a legtöbb meteorológiai szolgálat számára alapvető feladat regionális és lokális (mezo-) skálájú jelenségek rövidtávú (48 óráig terjedő) előrejelzése. Ezt a feladatot korlátos tartományú modellek futtatásával lehet kielégíteni. A korlátos tartományú modellek a Föld egy viszonylag kis tartományára adnak nagy térbeli felbontású előrejelzéseket. Az OMSZ az ALADIN projekt keretében egy ilyen modell kifejlesztésében vesz részt, valamint a modellt operatív módon futtatja Budapesten egy számára megfelelő tartományon.

A Budapesten futtatott ALADIN modell lényegében a Kárpát-medencére szolgáltat adatokat, a közelítő megoldás során alkalmazott rácstávolsága 6500 m. Ebből adódóan nem veheti figyelembe egy szélérőmű néhány száz méteres körzetében fellelhető áramlásmódosító objektumok hatását. A rácstávolság a rendelkezésre álló számítógép adott sebessége miatt nem csökkenthető, a horizontális felbontás belátható időn belül nem fogja elérni azt a pontosságot, amelynél figyelembe vehetők a felszín jellemzői és egyes árnyékoló objektumok hatásai, így ezeket a hatásokat az előrejelzés korrekciójával lehetne számításba venni.



18. ábra: 1 napos előrejelzés és mért adatok Nagykanizsán (1 hónap adatai)



19. ábra: Az 1 napos előrejelzés és a valós adatok alapján számított erőművi teljesítmény alakulása Nagykanizsán (1 hónap adatai)

A BME-n készült TDK dolgozat szerint (Székely Ádám): az OMSZ-tól kapott adatok alapján, véletlenszerűen kiválasztott városra, Nagykanizsára vonatkozó 1 napos előrejelzésekből és a mért adatokból illetve az ezek alapján számított teljesítményekből készült grafikonok láthatóak. A termelési adatoknál a 0 értékek a 13 km/h alatti szélesebességekhez tartoznak, ebben a tartományban ugyanis a generátor és az áttétek belső, mechanikai ellenállása miatt az erőmű el sem indul, vagy nem képes gazdaságosan energiát termelni. Ezeket az időszakokat az előrejelzések viszonylag jól kijelölik. A grafikonokból azonban jól látszik, hogy a leglényegesebb eltérések éppen az energiatermelés szempontjából legfontosabb, nagyobb szélesebességeknél figyelhetők meg.

A számított adatokból látható, hogy az ingyenesen hozzáférhető előrejelzések nem alkalmasak egy meghatározott ponton várható szélerősség előrejelzésére, mert a mért értékektől való eltérések átlaga összemérhető magával a szélerősséggel.

A nyilvános előrejelzések adatainak térbeli felbontása nagyon durva, megbízhatósága alacsony, csak „tájékoztató” adatoknak tekinthetők, energetikai felhasználásra alkalmatlanok. Az OMSZ által megrendelésre rendelkezésre bocsátható adatok ennél jobb térbeli és időbeli felbontást biztosítanak, a különböző előrejelzések készítéséhez felhasznált modellfuttatások közvetlen eredményei néhány km-es rács távolságban elhelyezkedő pontokra 3 órás felbontásban szolgáltatnak adatokat.

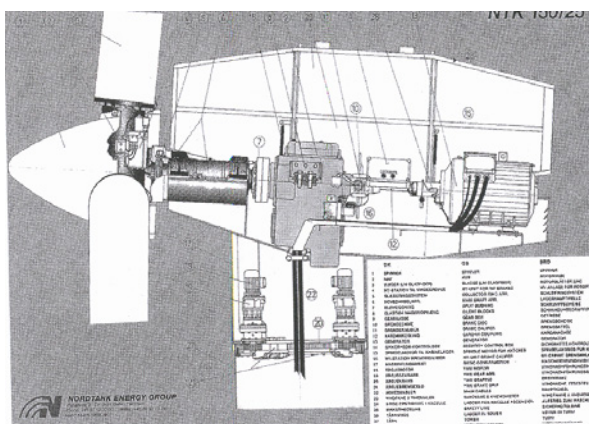
A modellfuttatások eredményeinek energetikai célú felhasználása, a szél erőművek üzemeltetéséhez, energiatermelésük rövid távú tervezéséhez szükséges adatok specifikálása még csak a tervezés fázisában van az Országos Meteorológiai Szolgálatnál.

5. Szélerőművek felépítése

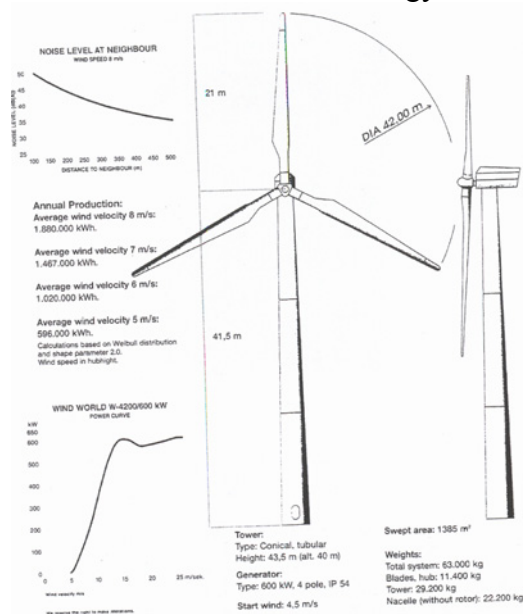
A szélerőmű részei:

- ◆ A torony
- ◆ A szél turbina két vagy három lapáttal
- ◆ Szélirány figyelő berendezés (mérőszárnyvezérlő)
- ◆ Mechanikus hajtómű
- ◆ Generátor
- ◆ Sebesség érzékelő és vezérlő
- ◆ Teljesítmény elektronika és egyéb vezérlő egységek
- ◆ Hálózati kapcsolat.

A torony része a turbina és a gondola tartalmazza a mechanikus hajtóművet, a generátort, a irány szabályzót, lassító vezérlőt. Egy ilyen gondola látható az alábbi ábrán:



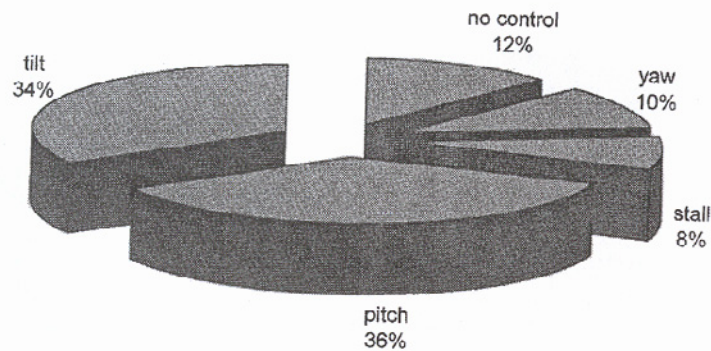
A torony magassága 20 és 50m között mozog. A torony kissé mindig magasabb mint a lapátok átmérője, ahogy ez az a következő ábrán látható egy 600kW-os szélturbina esetében:



A fő feladat a szerkezet dinamikájának kialakítás:

Egyrészt a rezgés másrészt a folyamatos szélesebbesség változás miatti körkörös anyag kifáradás. Ehhez a torony összes rezonancia frekvencia elkerülése szükséges.

A turbinalapát anyaga: üvegszál vagy kompozit epoxigyanta. A modern turbinák két vagy három lapátúak. A centrifugális erő, a rezgés, az anyag kifáradás teszi a lapátot a leggyengébb pontjává a szerkezetnek. A szellőkések alatti mechanikai igénybevételt a megengedett szint alatt kell tartani, mely a rotor sebességének beállításától függ. Ez nemcsak a lapátot védi meg, hanem a generátort is a túlterheléstől és a túlmelegedéstől. Erre használják a lapátszög vezérlést, melynek segítségével befolyásolható a mechanikai igénybevétel és az esetleges túlterhelés.



A fenti ábrán a sebesség szabályozása látható kis turbinák esetén, ahol:

„no control” = nincs szabályozás, úgy van tervezve mind a turbina mind a generátor, hogy a legnagyobb szellőkést is kibírja.

Yaw és tilt control= ha a sebesség átlépi a megengedett értéket a turbina tengelye körül elfordul ezzel csökkentve a sebességet.

Pitch control = a lapát szögét szabályozza a szél sebességének megfelelően.

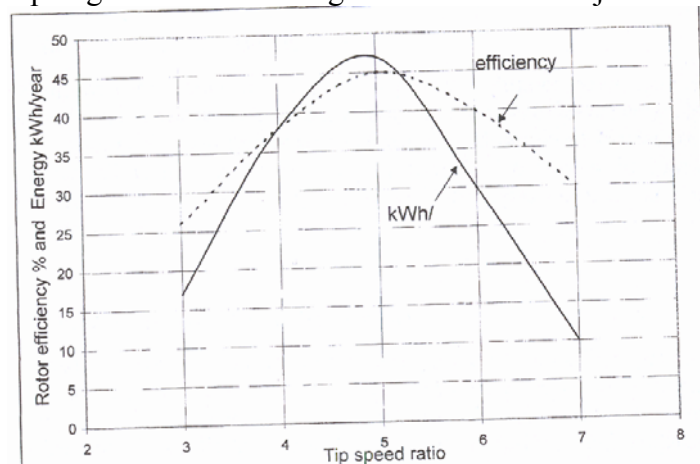
Stall control = ha túllépi a sebesség a megengedett értéket, akkor a lapátok fékező üzemmódba állnak át és teljesen megállnak, majd a turbinát újra kell indítani.

Azt tudjuk, hogy a szélesebb és nagy szellőkések között ingadozhat. A szélesebbéget un. Rayleigh statisztika segítségével lehet a legjobban szemléltetni.

Definiálhatjuk a un. tip speed ratio (légcsavarvég kerületi sebesség hányadost), amely az alábbi képlet:

$$TSR = \frac{\text{Linear speed of the blade outer most tip}}{\text{Free upstream wind velocity}} = \frac{\omega \cdot R}{V}$$

Az alábbi diagram pedig adott szélesebbéghöz tartozó rotor teljesítményt mutatja.



Nagy szélesebbégek esetén, ahhoz hogy nagy teljesítményt nyerjünk a rotornak is nagy sebességen kell forognia, a TSR-t konstans optimális szinten tartva.

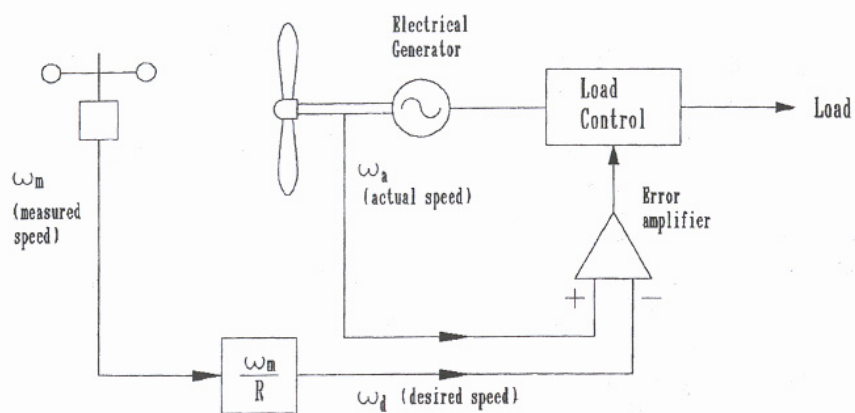
Három tényező befolyásolja a TSR-t:

- ◆ A centrifugális mechanikai erő, tehát ha adott energiát termel adott szélesség mellett és magasabb TSR-n üzemeltetjük ez karcsubb rotorlapátot eredményez.
- ◆ Fordítottan arányos a TSR-el a 'alulterhelt indulás', ahhoz hogy a hányadost növeljük az indítási nyomatékot csökkenteni kell
- ◆ Maximális rotor hatásfok adott TSR esetén érhető el, mely a lapát aerodinamikai sajátosságaitól függ.

Tehát az egyetlen mód, hogy folyamatosan a maximális teljesítményt nyerhessük, hogy a turbina sebességét folyamatosan változtatni kell a szélesség függvényében.

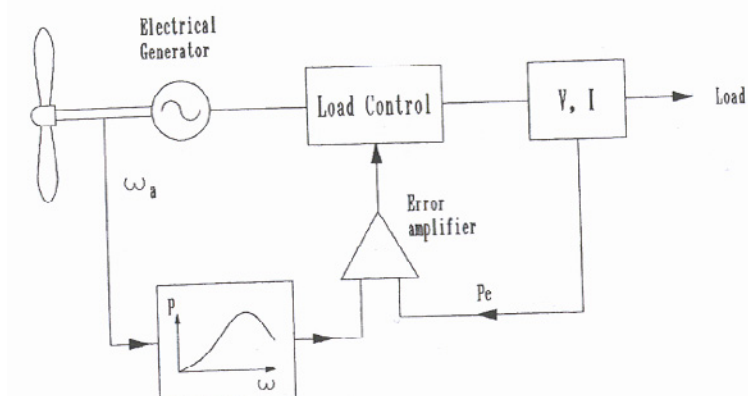
Tapasztalatok szerint a változtatható sebességű üzemmód 20-30%-kal több energiát termel, mint a fix sebességű.

A következő ábrán a konstans légcsavarvég kerületi sebesség séma látható:



A séma azon az elven alapszik, hogy a maximális teljesítmény akkor nyerhető, ha az optimális légcsavarvég kerületi sebesség értéke állandó minden szélesség érték mellett. Az optimális TSR minden szélturbina esetén egy adott karakterisztika. A szélességet folyamatosan mérjük és összehasonlítjuk a lapát vég sebességével. Ha a sebesség megváltozik a vezérlő rendszer hibáüzenetet kap és megváltoztatja a turbina sebességét úgy hogy a hiba minél kisebb legyen. Ez alatt a rotor referencia TSR-en a maximális teljesítményt adja le. Ennek a vezérlési módnak a hibája a plusz szélesség mérő, mely jelentős hibát okozhat egy nagy szélfarm esetén az árnyékhatás miatt. Az optimális TSR-t folyamatosan változtatni kell a vezérlő egységben a turbina élettartama alatt, mely további nehézségeket okoz.

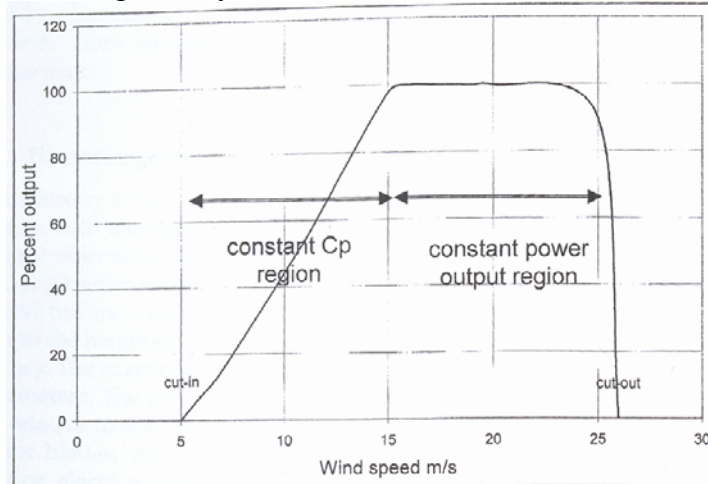
A következő a csúcsteljesítményt követő séma:



Ha a maximumon üzemelünk egy kisebb változás a turbina sebességében, nem okoz a kimeneten teljesítmény változást, ha ezt a pontot alrőbb csúsztatjuk. Tehát a maximális telj.

feltétele a $dP/dw=0$. A sebesség változása esetén, a teljesítmény folyamatos figyelése mellett, a dP/dw folyamatosan számolható, a hányadost közel nullán kell tartani. Ehhez a fajta sémához nem szükséges a plusz szélsősebesség mérés, mint a korábbihoz, ez tehát az előnyben részesített megoldás.

A következő ábra a sebesség szabályzási szakaszokat szemlélteti:



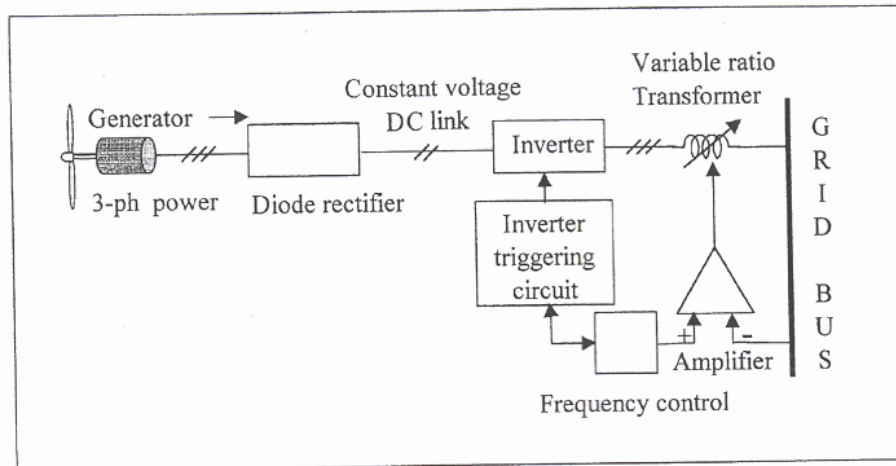
5 fő része van:

- ◆ cut in = Bekapcsolási fordulatszám, mikor a turbina energiát kezd termelni.
- ◆ constant Cp maximum = Konstans maximum Cp tartomány, ahol a rotor sebessége együtt változik a szél sebességével, a TSR-t konstans értéken tartva.
- ◆ constant speed region = Nagy szél esetén a rotor sebessége korlátozódik egy magasabb konstans szintre a szélturbina adottságaitól függően. A konstans sebesség régióban a Cp alacsonyabb, mint a maximum Cp.
- ◆ constant power region = Folyamatos nagy szélsősebesség mellett állandó teljesítményen üzemel, hogy megvédje a generátort a túlterheléstől. Ez alacsonyabb rotor sebességen valósítható meg.
- ◆ cut off = Elérve a kritikus sebességet a rotor leáll.

6. Szélerőművek csatlakoztatása

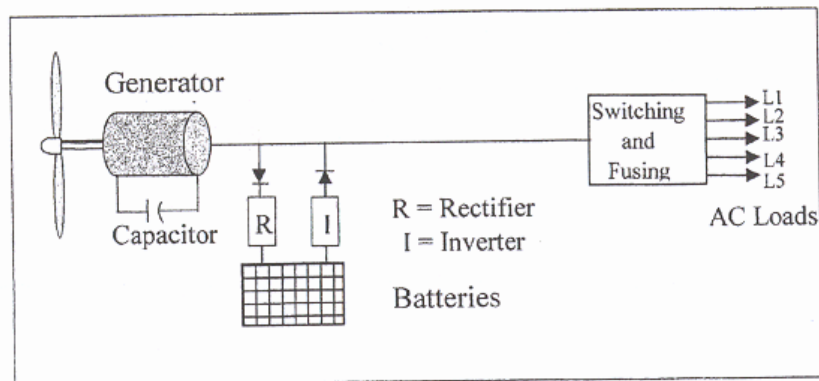
A következőkben a szélerőművek hálózatra történő csatlakoztatás lehetőségeit mutatom be:

Hálózati interfész szabályzás:

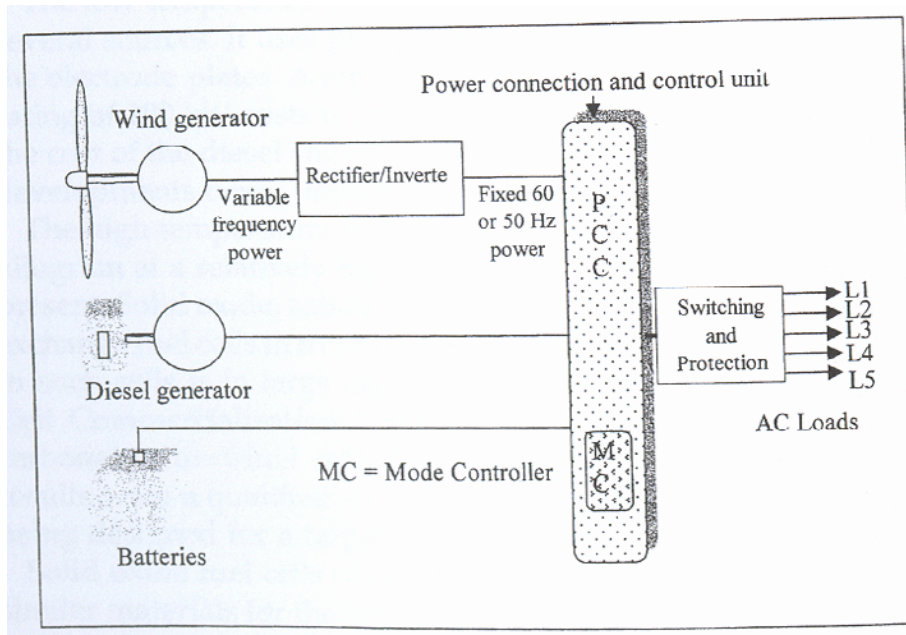


A hálózati feszültséget fixnek tekintve, a feszültség nagyságát és fázisát ellenőrizve a hálózatra táplálhat ill. onnan vételezhet. A feszültség ellenőrzés a következőképpen történhet: (egyenirányítás után) ellenőrizhetjük az inverter kimeneti feszültségét feszültségszabályozható transzformátor alkalmazásával. A feszültség szabályzás egy zárt hurkú rendszeren keresztül történik. A másik megoldás, hogy az egyenirányító elé helyeznek el feszültség szabályozható transzformátort.

Egyedül álló szélerőművek:

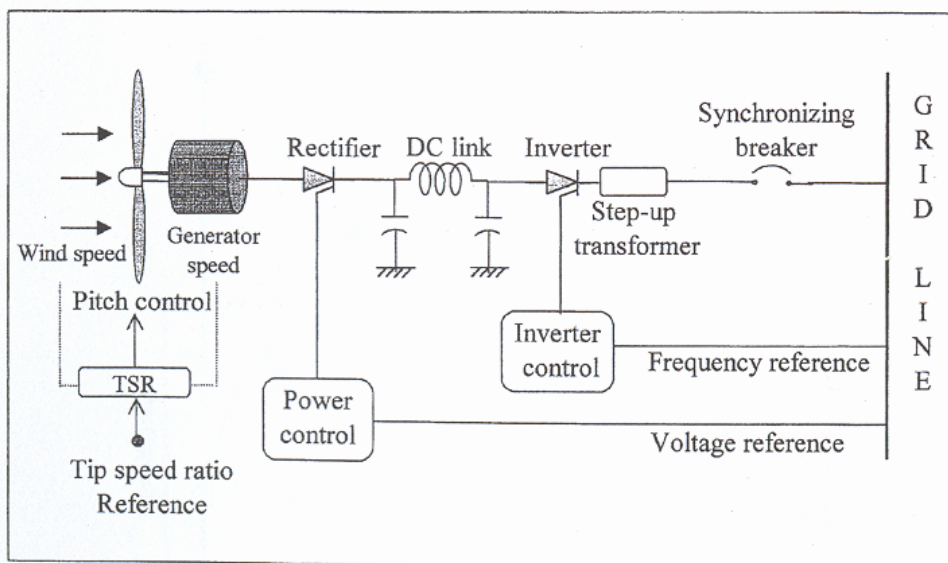


Konstans sebességű generátort alkalmazó megvalósítási sémát láthatunk. Állandó mágneses DC generátort alkalmazunk vagy aszinkron generátort akkor váltakozó áramot kapunk, a generátor öngerjesztett sönt kapacitáson keresztül kapcsolódik a kimenethez. Az akkumulátor töltés AC—DC egyenirányítón keresztül van megoldva, kisütése pedig DC-AC inverteren keresztül. A frekvencia ellenőrzés a turbina sebesség ellenőrzésén keresztül történik. Németországban farmok ellátására szeretettel használják a fenti elrendezést.



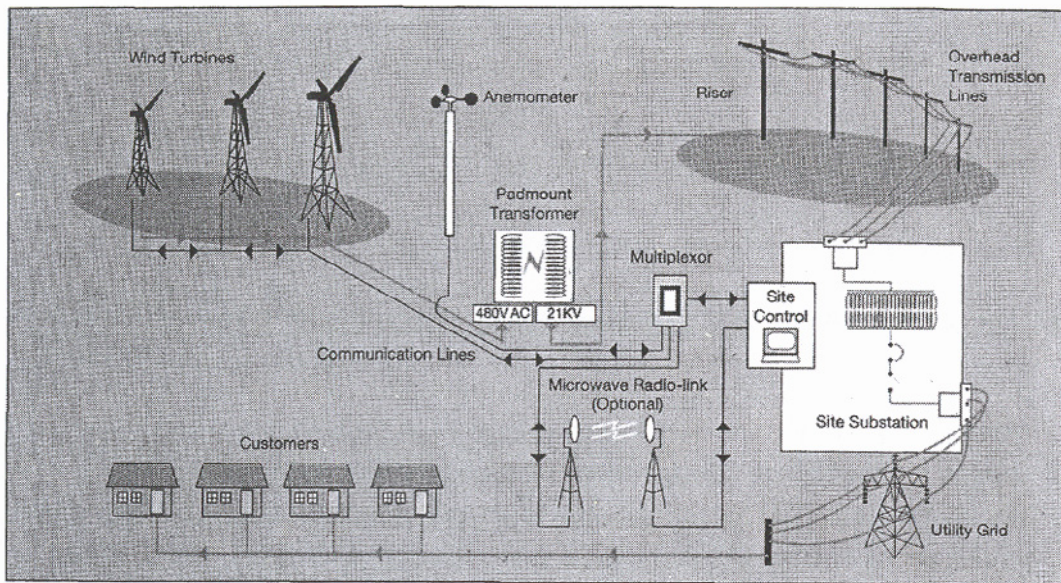
A fenti ábrán egy szél, dízel, akkumulátoros hibrid rendszer sémája látható.

Nagy szélerőmű parkokban egyre inkább a változtatható frekvenciájú generátorokat használják. Egy ilyen generátor hálózatra való csatlakoztatása látható:

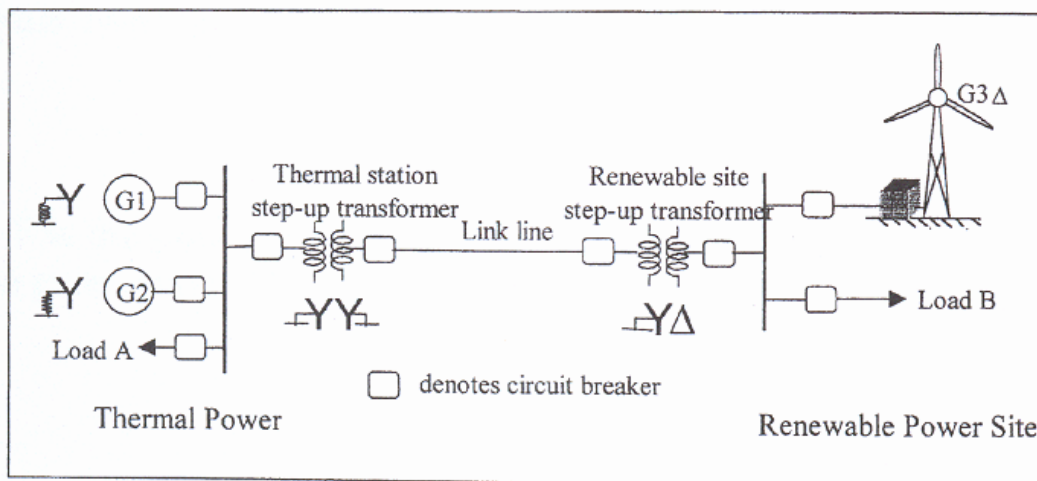


A generátor kimenetét egyenirányítjuk DC-vé, majd inverteren keresztül egy fix frekvenciájú váltakozó árammá. Az átalakítás előtt az egyenirányított harmonikusokat kiszűrjük a DC-ből indukciós tekercsek és kapacitások segítségével. A referencia frekvenciát az inverter számára, a referencia feszültséget az fázisszög vezérelt egyenirányító részére a hálózatról vesszük. A légszárny vég optimális referencia kerületi sebessége tárolódik és folyamatosan összehasonlításra kerül a számított értékkel, mely a mért szél és rotor sebességből adódik.

Egy tipikus hálózati csatlakoztatás látható:



A szélgenerátor kimeneti feszültsége 480 AC, melyet feltranszformálnak 21kV-ra (középfeszültségre), majd távvezetéken egy állomásba szállítják a villamosenergiát. Távoli rádió összeköttetést is használnak, hogy ellenőrizzék a szélturbinák működését a szélesebbeségnek megfelelően.



Bal oldalon 2 Y csatlakozású szinkron generátor, mely az A fogyasztói csoportot látja el. A jobb oldalon egy delta csatlakozású indukciós generátor látható, ellátva a B fogyasztói csoportot, a maradék teljesítményt pedig a hálózatba nyomja bele egy transzformátoron keresztül.

Harmónikusok:

Egy és háromfázisú váltakozó áramnak van pozitív és negatív sorrendű összetevője, a páros számú harmónikusok hiányoznak. A transzformátoron keresztül történő csatlakozás során, ahol a delta kötésű primer tekercs van, az összes hárommal osztható harmónikus hiányzik.

Az inverter körben m-ütemű hídkapcsolás esetén a harmónikusok az $n=mk\pm 1$ képlet szerint adódnak, ahol $k= 1,2,3,4$ stb. Pl.: egy 6 ütemű inverterben 5,7,11,13,17,19 harmónikusok vannak jelen, míg egy 12 üteműnél: 11,13,23,25.

TABLE 14-1

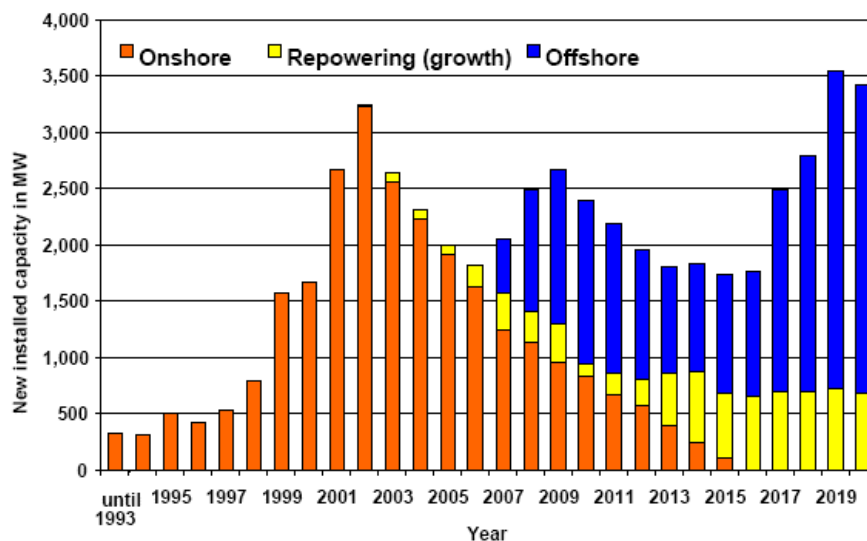
Harmonic Contents of the 6-pulse and 12-pulse Converters

Harmonic Order n	6-Pulse Converter Eq. 14-12	12-Pulse Converter Eq.14-12	3-pulse and 6-pulse Converters (IEEE Standard 519)
5	20	—	17.5
7	14.5	—	11.1
11	9.1	9.1	4.5
13	7.7	7.7	2.9
17	5.9	5.9	1.5
19	5.3	5.3	1.0

A flicker egy speciális sajátossága a szél turbináknak. Konstans sebességű turbinák esetében, a folyamatosan változó, ingadozó szél átalakítódik szekunder oldali ingadozássá, mert nincs buffer (csillapítás) a mechanikai bemenet és az elektromos kimenet között. A mögöttes hálózattól függően ez akár feszültség ingadozást is eredményezhet, azaz flickert. Változtatható fordulatszámú generátor esetén a fenti probléma nem jelentkezik, mert a primer ingadozó szél nem közvetlenül van átalakítva energiává. A rotor inercia rendszerét tekinthetjük buffernek.

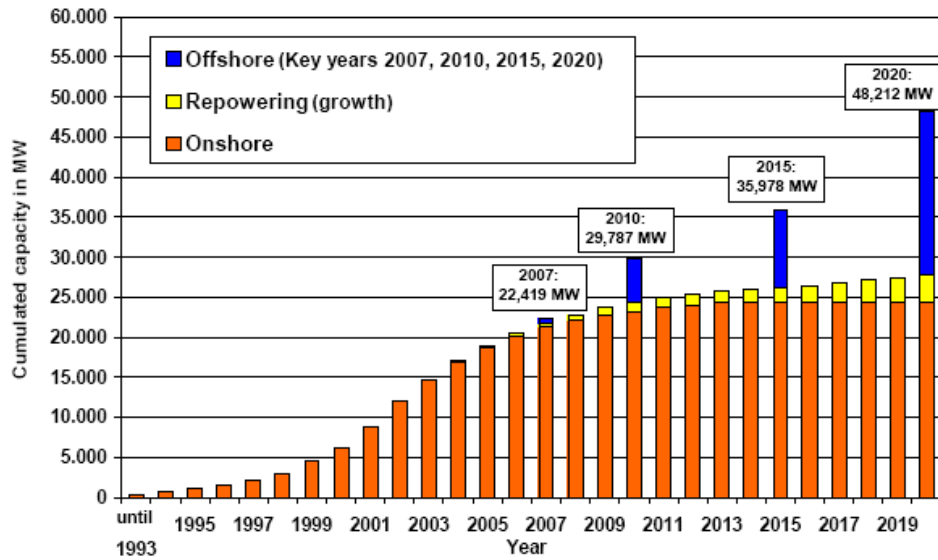
Szélerőművek létesítése Németországban

A következő ábrák a szélerőművek létesítését mutatja be 1993 és 2020 között. Az Onshore a szárazföldi, az offshore a vízi, a repowering pedig az átalakítandó/felújítandó szélerőműveket jelenti.



A tendencia azt mutatja, hogy új szárazföldi erőműveket nem építenek, inkább vizeket ill. a meglévők teljesítményének növelése, felújítása a cél.

Az alsó diagramm a 1993 és 2020 közötti időszak összesített szélerőmű teljesítményét mutatja. Pl.: ahhoz hogy ez megvalósuljon 2015-ig közel 1000km hosszú 400kV-os hálózatot kell kiépíteni, 2015-ig ez közel 1 milliárd EUR plusz beruházást jelent, 2020-ig ez a beruházási költség eléri a 3 milliárd EUR-t.



7. Szélerőművek építésének lehetősége Magyarországon

Mennyi szélerőmű építhető 1 Mrd EUR-ból?

Tételezzük fel, hogy vlki 1 Mrd EUR-t (kb. 260 Mrd Ft-ot) akar hazánkban szélerőművek építésére költeni (áldozni).

A korszerű szárazföldi ún. On-Shore szélerőművek legnagyobb mai egység-teljesítőképessége 1500-2000 kW körül van.

Német szakirodalom alapján 2003-as áron, nagy szélerőmű-parkokban összefogottan elhelyezve a fajlagos létesítési költség (telekár nélkül) 900-100 EUR/kW.

Ezek alapján 1 Mrd EUR-ból olcsó telekár mellett 1000 MW szélerő-teljesítőképesség adódna.

Egy szélerőmű-parkban kb. 100MW-ot (50-70 db egységet) elhelyezve ez mintegy 10 szélerőmű-parkot jelentene. Mindehhez természetesen ki kell építeni a megfelelő, legalább 120 kV-os villamos hálózatot is.

Mennyit termel ennyi szélerőmű Magyarországon?

Mivel 50-70m magasságban az átlagos szélesebesség a Kárpát-medence sík területén – hazánkban - 6m/s alatt van. Kedvező helyen elhelyezve a tíz szélerőmű-parkot, átlagosan 1200 h/a kihasználás várható a névleges villamos teljesítőképességre vonatkoztatva.

Egy éves villamosenergia-termelés tehát várhatóan egy átlagos széljárású évben mintegy $1000 \times 1200 = 1,2$ TWh/a. Elhanyagolható a kihasználás becslése miatt a hálózati veszteség és az önfogyasztás.

Ez a mostani magyar bruttó villamosenergia-felhasználásnak kerekén 3%-a. Jó széljárású években a jövőben, növekvő igények mellett ez felmehet akár 4%-ra is.

Milyen szabályozási gondokat okoz a rendszerben?

A napi terhelésváltozások a VER-ben elérik az 1800-2000 MW-ot (a jövőben többet is). Ez azt jelenti pl.: egy hideg téli munkanapon, hogy az éjszakai minimumról (pl.: 4200 MW) fel kell menni a csúcsig (pl.: 6100 MW) az erőművek együttes teljesítményével.

Ez a napi terhelésváltozás még követhető a menetrendtartó, fosszilis tüzelésű, szabályozható egységekkel, amelyekből üzembiztosan rendelkezésre állhat egy ilyen nap 3000-3500 MW, és ezeknek az egységeknek a szabályozási tartománya átlagosan 30-100% között lehet. Az alaperőművek (atom, lignit) közel zsinórban üzemelhetnek, az import sem nagyon változik egy nap és a kötelezően átvett kapcsolt termelés sem.

Mindezt megváltoztathatja a szélerőmű-park. Mivel a szélerő mintegy 5 m/s szélesebességnél kezd teljesítményt leadni és kb. 15 m/s-nál éri el a 100%-ot (25 m/s=90km/h felett, a viharban leáll), ezért a napközben megélénkülő vagy leálló szél lehetősége miatt ez az 1800-2000 MW változtatási tartomány legalább +/- 50%-kal megnövekedik. Ez ezt jelenti, hogy legalább 900MW-tal nagyobb, üzembiztosan igénybe vehető, szabályozható, fosszilis tüzelésű erőműnek kell rendelkezésre állnia.

Szükség van tehát pl.: egy 450 MW-os CCGT erőműre és három, egyenként kb. 150 MW-os csúcserőműre (nyílt ciklusú gázturbinára).

Hogyan kell értékelni a szélenergia-termelési kapacitások teljesítőképességét?

Mivel a megújuló energia források közül a nem eltűzhető rendelkezésre állása igen változó, ezért pl.: Németországban a szélenergia-termelési kapacitások értékelhető villamos teljesítőképességét a beépítettnek a 14%-ára veszik (a folyami vízerőműveknél 42%-ra, a napenergia-termelési kapacitásoknál viszont csak 4.5%-ra.)

Mivel Mo-n nincs viszonylag állandó széljárású terület és az ország területe jóval kisebb, ezért még kellően széttelepített szélenergia-termelési kapacitásoknál sem lehet arra számítani, hogy a beépített teljesítőképesség évi átlagban 10%-nál jobban rendelkezésre állna.

Úgy kell tehát értékelni az 1000MW-os szélenergia-termelési kapacitásokat, hogy ez az országos villamosenergia-ellátás biztonságát tekintetében csak 100MW-ot ér. Itt is tehát legalább 900 MW fosszilis tüzelésű erőműpark kell a pótláshoz (pl.: az említett 450 MW összetett körfolyamatú és 3x150 MW-os nyílt ciklusú, gázturbinás erőmű).

	Kapacitás 2003 közepén , MW	Villamosenergia 2002-ben, GWh
Hagyományos hőerőművek	3502	12 928
Kapcsolt termelésű kiserőművek	1637	6723
Szélenergia-termelési kapacitások	2359	3825
Összesen	7498	23476
Éves csúcsterhelés és fogyasztás	3685	20858

1. táblázat

Megerősíthető ez egy Dán példával (1. táblázat), ahol már nagyon nagy a szélenergia-termelési kapacitások és a kiserőművek részaránya. Az UCTE-vel együtt járó ELTRA-rendszer (az ország nyugati részén, a Jylland-félszigeten és a Fyn-szigeten) 2003-as adatai:

Látható, hogy több mint kétszer akkora villamos teljesítőképesség szükséges, mint az évi csúcsterhelés. Még a tengerpartra és részben a tengerbe épített szélenergia-termelési kapacitások kihasználási óraszámja is alig haladja meg az 1600 h/a. Lehet tehát sok szélenergia-termelési kapacitást és kapcsolt terhelésű kiserőművet üzemeltetni egy rendszerben, de ezekhez a csúcsterhelést megközelítő mértékben hagyományos hőerőműre is szükség van. Más kérdés, hogy az ELECTRA-rendszer egyenáramú kábelekkel a sok vízerőművel tartalmazó NORDEL-rendszerhez is csatlakozik, így a széljárás miatti kiegyenlítés nem gond, hiszen van tárolható lehetőség a vízerőműveknél.

Mennyibe kerülne a szélenergia-termelési kapacitásokban termelt villany?

Megállapítható, hogy a MO-i szélenergia-termelési kapacitások termelt villamos energia várható önköltsége ilyen kiépítettség mellett 30-40 Ft/kWh között várható (16-17 Ft/kWh a mai magyar kötelező átvételi ár) attól függően, hogy a befektető milyen feltétellel ruházza be a milliárdját, azaz milyen hasznot remél a befektetéstől.

Fel lehet venni német tapasztalatok alapján pl.: 20 év élettartamot, 10 éves hitel-visszafizetési időt, 2-3 év építési időt, az éves üzemeltetési költség beruházás 4%-ára vehető, a leszerelési költség fajlagos 70 EUR/kW-ra és így tovább. Az éves termelés alapján a befektető bevétele évente 36-48Mrd Ft lenne. A befektetése így az üzembe helyezés után 5.5-7 év alatt megtérülhetne. Ennél rosszabb lineáris megtérülést manapság egyetlen befektető sem vállal.

Tekintetbe kell azonban venni, hogy sokba kerül a hálózatépítés, a tartalék tartása. Van viszont fajlagos széndioxid-kibocsátási költségcsökkenés is. Német számítások szerint 1200

h/a kihasználás mellett a szélerőművekkel 100 EUR/t CO₂ körül lehet ez a mutatószám. Ennél persze lényegesen kisebb érték adódik, ha az említett milliárdot jobb hatásfokú, fosszilis tüzelésű (földgáz-tüzelésű) erőművek építésére fordítják- a rosszabb hatásfokú erőművek leállítása mellett.

Mit lehet javasolni?

Szükség van természetesen megújuló forrásokból termelt villamos energiára a jövőben, de nem mindegy hogy mikor és mennyiért, hiszen mindent a magyar fogyasztó fizet meg.

A MAVIR Rt. számításai szerint évtizedünk végéig mintegy 170-220 MW szélerőmű-park építhető ki reálisan, nagyobb zavarok nélkül hazánkban. Kedvező tapasztalatok alapján aztán 2020-ig ez a teljesítőképesség megkétszerezhető.

A magyarországi erőműpark összetétele ebben az évtizedben még nem nagyon módosult, így továbbra is a jelentős részarányt képviselő földgáztüzelésű erőművek teszik lehetővé a rendszer megfelelő szabályzását.

A kötelező átvételek részarányának erős növekedése (kapcsolt termelésű kiserőművek, megújuló forrásokból termelt villamos energia) ebben az évtizedben igen jelentős gondokat jelent a szabályzásban, tekintettel az alaperőművek (atom, lignit) nagy arányára. Ebben az évtizedben új, jól szabályozható nagyerőművek építése csak évtizedünk végére képzelhető el, ha megfelelő ösztönzést kapnak a piacon a befektetők. Amennyiben tehát, túl sok kiserőmű – így szélerőmű – épülne a közeli jövőben, akkor a szabályozási zónánk egyensúlyának mindenkori biztosítása és ezzel a minőségi, biztonságos villamosenergia-ellátás veszélybe kerülne.

Mennyibe kerülne a tartalékolás?

A megújuló energiaforrásokkal történő erőművi termelések kötelező átvétele miatt a közüzemi engedélyesek fizetett kompenzációs pénzösszege (KÁP) a múlt évben mintegy 14 milliárd Ft-ot jelentett. A megújuló erőműtípusokban termelt villamos energiára a GKM rendeletben meghatározott áron átvételi kötelezettség van, amelyet a Közüzemi Nagykereskedő (MVM Rt.) vagy az illetékes Közüzemi Szolgáltató (ÁSZ Rt.) nem tagadhat meg. A kötelező átvételre vonatkozó árak a mindenkori rendszerszintű határkölségnél általában magasabbak, ezért a kötelezően átvett villamos energiára a MAVIR Rt. un. KÁP-ot fizet az említett közüzemi engedélyesnek. Az alacsony terhelésű éjszakai időszakban jelentkező erőművi terhelési minimum problémák enyhítése érdekében a szóban forgó erőművek terhelését a megfelelően meghatározott, rendeletben foglalt átvételi tarifazóna árakkal (csúcs, völgy, mélyvölgy) szabályozásra lelhet ösztönözni a völgyidőszakban történő termelés csökkentés érdekében.

Ha a megújulók termelési részaránya növekszik, ez az üzembiztonsági tartalékok további növekedését teszi szükségessé. E megállapítás különösen vonatkozik a szélerőművekre, mivel hazai viszonyok között ezeknek az éves teljesítménymérlegben figyelembe vehető értékelhető teljesítőképessége, beépített teljesítőképességük mindössze 10%-a, azaz üzembiztonsági tartalék igényük 90%.

Az átlagos rendszerszintű tartalék igény 20%-os értékéhez képest ez 70%-kal magasabb.

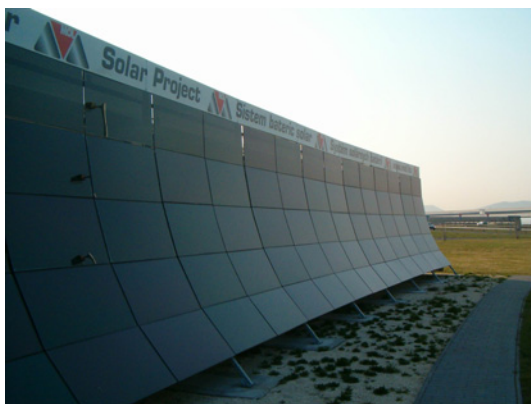
Amennyiben 2010-ig 200MW beépített teljesítőképességű szélerőmű létesül, úgy az ehhez tartozó 70%-kal magasabb tartalékot igényelne, ennek éves lekötési költsége jelenlegi árakon mintegy 3 milliárd Ft-nyi többletköltséget jelentene és a szélerőművi mintegy 160GWh éves villamos energia termelés a KÁP költségeket is növelné kb. 110 millió Ft/ év értékkel.

További költségtöbbletet jelent, hogy a szélerőművi körzetekben a hálózati kapcsolatokat a beépített kapacitások közel 100%-os értékének megfelelően kellene kiépíteni, a hálózati leírási és fenntartási éves költségeket éves szinten kb. 400 millió Ft-tal növelné.

A Paksi Atomerőmű pótlásának lehetősége megújuló energiaforrásokkal?

Sötét Zöld megközelítés: Európai zöld kormányok (pl. Ausztria): „Le az atomenergiával, a megújulók (nap, szél) intenzív állami támogatásával ki kell váltani az európai atomerőművi blokkokat”

Nézzük ezt a megközelítést Magyarországra vetítve!

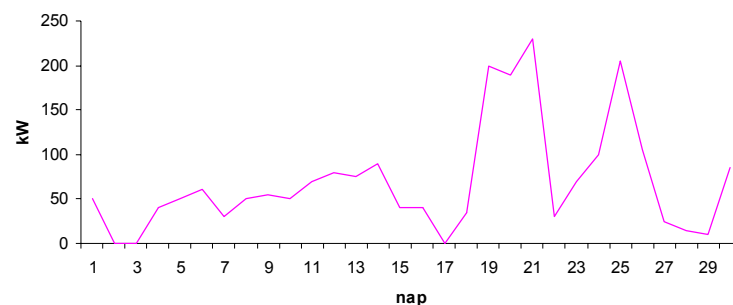


Napenergia: A Paksi atomerőműre nehéz alternatív energiaforrást találni. Ha napelemekkel szeretnénk kiváltani, akkor egy egész Balatont le kellene fedni, ahhoz a teljesítményt pótolja. Természetesen a napnak egész évben 24-órán keresztül üzemelni kellene, mellőzve az éjszakákat és a felhőket.



Szélerőenergia: Ha széllel szeretnénk paksot kiváltani, akkor 8.000-13000 db kulcsi típusú szélkerék kellene. A szekunder oldali villamos teljesítményének alakulása függvényében. A lenti **37.ábra** a 2003. januárjában mért kulcsi teljesítményeket mutatja. Látható, hogy a 600 kW-os generátor maximálisan 220 kW környékén üzemelt, azonban döntő többségben 0 és 100 kW között mozgott! Ha mégis így kellene megoldani az energiaellátást, akkor Magyarország minden 3 km oldalú négyzet közepére kellene telepíteni egy

ilyen szélkereket telepíteni, és gondoskodni a folyamatos szélről.



37. ábra. A szekunder oldalon leadott teljesítmény alakulása 2003. év januárban a kulcsi 600 kW-os generátoroknál

A szélenergia potenciál hasznosítását korlátozó tényezők Magyarországon

1. Jogi, intézményi, engedélyezés (környezetvédelmi): A jogi, intézményi korlátozás elsősorban abban nyilvánul meg, hogy az engedélyt az építmény felállításához- a környezetvédelmi és biztonsági előírások figyelembevételével-a helyi hatóságoknak kell kiadniuk.
2. Technikai és gazdaságossági korlátozások:
 - Szélerőmű telepítésére nem használható területek pl.: települések belterülete, vízfelületek, erdők, utak, stb. Összesen: 60758 km²
 - A gazdaságossági mutatók elsősorban az átlagos szélesebségtől valamint a szélesebség előfordulási gyakoriságának eloszlásától függnnek és a versenyképes fajlagos energiaárakkal jellemezhetők. A 3 m/s éves átlagos szélesebség feletti területek összesen: 32265 km² (93000km²=100%)
 - Az alkalmazható szélturbinák száma: A szél sebessége, miután áthalad a szélturbina kerekén, csökken. Az így keletkező örvénylés és turbulencia a következő turbinánál a kinyerhető energia szempontjából veszteséget jelent. Ez nagyobb beépítendő területet jelent, aminek rendelkezésre állása igen csak korlátozott.
 - Egyedi szélerőművek ill. kis és közepes nagyságú szélparkok esetén alapvető gazdasági követelmény, hogy 10 km-en belül legyen csatlakozásra alkalmas középvezetékű vezeték vagy alállomás.

IRODALOMJEGYZÉK

- ◆ Mukund R. Patel: Wind and Solar Power Systems, CRS Press, 1999
- ◆ Cigré Symposium Athens Greece 13-16 April 2005, Power Systems with dispersed generation
- ◆ Hárfás Zsolt, Tarczal Lajos: Jövönk Energiaforrásai
- ◆ Planning of the Grid Integration of Wind Energy in Germany Onshore and Offshore up to the Year 2020, Consortium DEWI / E.ON Netz / EWI / RWE Transport Grid, Electricity / VE Transmission, Summary, Cologne, February 2005
- ◆ UTILITY GRID CONNECTION AND MODELLING REQUIREMENTS RELATED TO WIND POWER, S. STAPLETON *