

Hunyár Mátyás–Schmidt István

## Követelmények korszerű szélerőművek generátor hajtásaival szemben

Jelen cikkben – a teljesség igénye nélkül – áttekintjük a modern szélerőművek villamos rendszereivel szemben támasztott legfontosabb követelményeket. Megvizsgáljuk, hogy a lehetséges főáramköri megoldások közül melyek azok, amelyek a legtöbb követelménynek megfelelnek. Külön figyelmet szentelünk annak a kérdésnek, hogy a Magyarországon tapasztalható alacsony átlagos szélességek energiája hogyan hasznosítható legjobban. Bemutatják a méretezés alapadatainak meghatározását a statisztikai szélelmélet alapján.

In this article the most important requirements of the electrical systems of modern wind power plants are surveyed, without the intention to be exhaustive. The article examined which of the possible arrangements fulfill the greatest number of demands. Extra attention is devoted to the question of how the energy of low average wind speeds existing in Hungary can be best utilized. Obtainment of essential data of design based on the wind statistics will be presented.

A szélenergia hasznosítása a vízszintes irányban áramló levegővel hajtott szélturbinák segítségével valósul meg. A szélturbinák alkalmazhatók közvetlen mechanikai hajtásokhoz (szivattyúk, szélmalomok stb.) és villamosenergia előállítására. Jelen cikkben csak az utóbbi alkalmazásokkal foglalkozunk, ezek közül is elsősorban az erőművi jelleggel a villamos elosztóhálózatra kapcsolódó vízszintes forgástengelyű szélturbiná-generátor egységekkel.

Egy szélturbiná teljesítményét döntően a szélesség és a turbiná geometriai méretei határozzák meg. A  $r$  sugarú és  $v$  sebességű légáram a sebességre merőleges  $A$  felületen áthaladva:

$$P_0 = (1/2)\rho A v^3 = (\pi/8)\rho D^2 v^3 \quad (1)$$

teljesítmény leadására képes. A teljes energia kinyerése a szélből nem lehetséges, elsősorban amiatt, mert a turbiná mögötti szélesség nem csökkenhet zérusra. A ténylegesen kinyerhető teljesítmény:

$$P_p = C_p P_0 \quad (2)$$

ahol a  $C_p$  teljesítmény-tényező függvénye a szélturbiná típusának és a  $\lambda$  gyorsjárású tényezőnek (lásd 1. ábrát). Ez utóbbi definíció szerint:

$$\lambda = wR/v \quad (3)$$

(Itt  $R=D/2$  a szélturbiná külső sugara,  $w$  pedig a szögsebesség). A szélkerekek lehetnek gyorsjárásúak ( $\lambda \gg 10$ ) és lassújárásúak ( $\lambda \approx 1$ ) attól függően, hogy  $C_{pmax}$ -ot milyen  $\lambda$  értéknél érik el. Villamosenergia termelésre szinte kizárólag a gyorsjárásúak használatosak.

Az (1)–(3) összefüggések alapján egyszerű, közelítő pontosságú összefüggések nyerhetők a geometriailag hasonló szélturbinák összehasonlítására. Két különböző  $P$  névleges teljesítményű de azonos  $\lambda$  gyorsjárású tényezőjű szélturbinára, a megkülönböztetés céljából „1”-es és „2”-es indexet használva:

$$\frac{P_1}{D_1^2 v_1^3} = \frac{P_2}{D_2^2 v_2^3} \quad \text{és} \quad \frac{w_1 D_1}{v_1} = \frac{w_2 D_2}{v_2} \quad (4a,b)$$

(4)-ből következik, hogy pl.  $v_1=v_2$ -nél a nagyobb teljesítményű turbiná általában nagyobb  $D$  átmérőjű és kisebb szögsebességű (fordulatszámú).

Korszerű szélromuk generátor-hajtási rendszerének a következő jobb követelményeknek kell eleget tenniük:

1. A turbina-generátor gépcsoport fordulatszáma és tengelyiránya legyen változtatható.
2. A durva nyomatéklökések (széllökések) legyenek távoltartva a gépcsoporttól és a hálózattól.
3. A hálózatba továbbított energia minőségi jellemzői feleljenek meg a szabványos követelményeknek.
4. A gépcsoport fordulatszáma legyen egy biztonságos értékre ( $n_{\max}$ ) korlátozva.
5. Lehetőleg ne tartalmazzon áttételt a hajtás vagy az minimális fokozatszámú legyen.
6. Ne tartalmazzon elhasználódó és/vagy gyakori karbantartást igénylő részegységet (kommutátort, csúszógyurut stb-t).
7. Legyen kicsi a teljesítményelektronikából vagy a torony árnyékoló hatásából származó nyomatéklüktetés.
8. Az egységek névleges teljesítménye legyen optimálisan megválasztva a fajlagos energiaár alapján.
9. A toronymagasság igazodjon a szélromu névleges teljesítményéhez.
10. Az eromu rendelkezzen a villamos rész minimális veszteségét biztosító szabályozással.
11. A névleges szélesség ( $v_n$ ) – a helyi szélviszonyok ismeretében – legyen optimálisan kiválasztva. Az eromu eredő hatásfokának maximuma legyen a legnagyobb éves energiát szolgáltatató szélesség közelében.
12. Szigetüzemben működő eromuk esetében legyen pontos a feszültség és a frekvencia tartás (a hatásos, valamint a meddő teljesítmény egyensúly megteremtésével).
13. A turbina lapátmozgása legyen aerodinamikailag tervezett.

Természetesen további követelmények is fennállhatnak – mint pl. a villamos gép segítségével való indíthatóság – de ezek vagy kevésbé általános érvényűek, vagy kevésbé fontosak.

A generátor típusa és a szabályozó elektronika alapján a következő jobb csoportokba sorolhatók a szélromuk villamos rendszerei:

- A. Hálózathoz közvetlenül (frekvenciaváltás nélkül) csatlakozó aszinkron és szinkron generátor.
- B. Csúszógyurus aszinkron generátor impulzus vezérelt rotor ellenállással.
- C. Szinkron alatti és feletti (csúszógyurus) aszinkron kaszkád kapcsolások.
- D. Kefenélküli kétoldalról táplált (kalickás) aszinkron generátor.
- E. Frekvenciaváltón keresztül hálózatra csatlakozó, kalickás aszinkron generátor.
- F. Áramirányító/frekvenciaváltós tekercselt forgórészű szinkron generátorok.
- G. Frekvenciaváltón keresztül hálózatra csatlakozó állandómágneses szinkron generátor

Az 1-es követelmény szerint a szélturbina forgástengelyét általában a szélirányba kell forgatni a maximális teljesítmény kinyerése céljából. A gépcsoport fordulatszámának pedig igazodnia kell a pillanatnyi szélességhez, hogy az üzem maximális teljesítménytényezővel valósuljon meg (lásd  $C_{p\max}$ -ot az 1. ábrán).

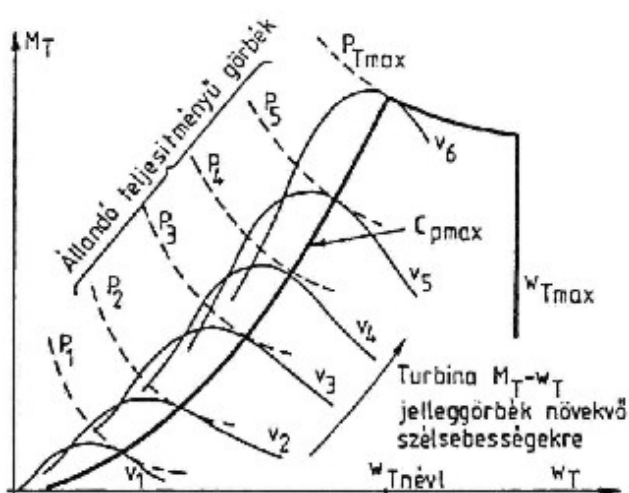
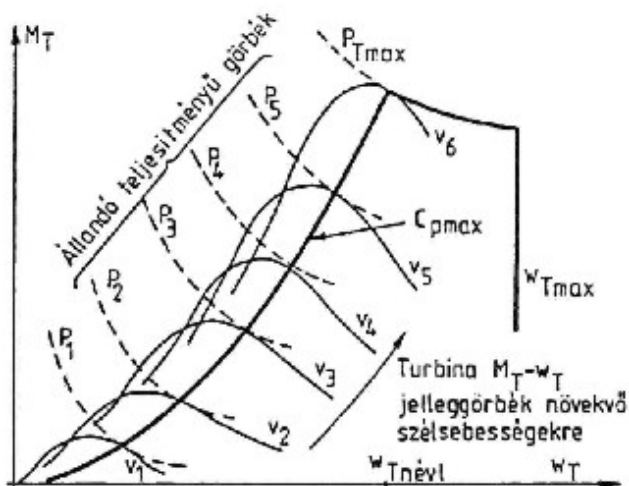
A 2-es és 3-as követelmények is megkövetelik a változtatható fordulatszámot, ugyanis a széllökések alkalmával a nagy tehetetlenségi nyomatékú szélturbina (és a hozzákapcsolódó részek) lendítokerékként viselkednek. Ezek átmenetileg tárolják az energia lenge részét, csökkentve a tengelyek és az áttétel igénybevételét és a hálózatba táplált teljesítmény lüktetését. Az elmondott követelmények miatt ma már nem használják a 80-as évek elején (különösen a MW-os tartományban) gyakran alkalmazott A megoldást. Közvetlen hálózati csatlakozás esetén a hálózati frekvencia mereven rögzíti a szinkron fordulatszámot (ami szinkron generátorok esetében egyben a forgórész fordulatszáma). Ez nagy nyomatéklökéseket és kellemetlen tranziens jelenségeket okoz széllökésekkor, vagy ugrásszerű terhelésváltozáskor. Aszinkron generátorok fordulatszáma – a szlip miatt – kissé rugalmasabban változhat, de a növekvő rugalmasság növekvő roterellenállással, nagyobb veszteségek árán érhető el.

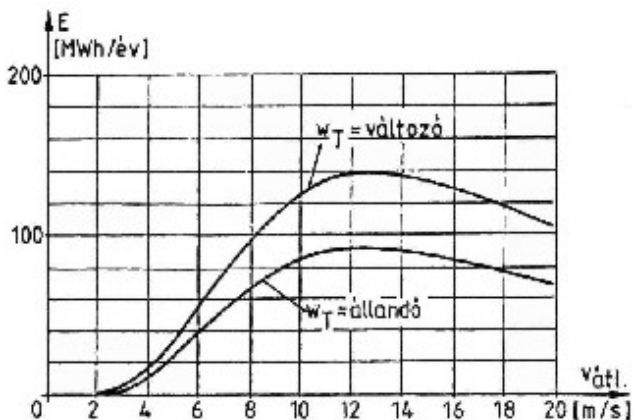
Az 1-es kritérium legjobban frekvenciaváltón keresztül hálózatra csatlakozó generátorral teljesíthető (E, F, G megoldások). A 2. ábrán vázoltuk egy ilyen hajtás három szokásos üzemi tartományát a

szögsebesség-nyomaték síkon:

- „normál” üzemmód  $C_{pmax}$ -mal ( $w_T L w_{Tnévl}$ ),
- üzem a teljesítménykorláton ( $P_T \leq P_{Tmax}$ ), ezzel elsősorban a teljesítmény-elektronikát védjük a rövid idejű túlterheléstől ( $w_{Tnévl} < w_T < w_{Tmax}$ ),
- üzem a sebességkorláton ( $w_T \leq w_{Tmax}$ ).

A 3. ábrán egy 30 kW-os szélromu E éves energiatermelését hasonlítottuk össze állandó és változó fordulatszámú hajtás esetében, az éves átlagos szélesség függvényében. A szélességekre a Rayleigh-féle eloszlást tételeztük fel, és a változó fordulatszámú turbina  $w_{Tmax}$  szögsebesség korlátját azonosnak vettük az állandó sebességu turbina szögsebességével. Láthatóan a  $w_T$ -változó esetben a kinyert energia minden átlagos szélességen nagyobb, mint a  $w_T$ -állandó esetben, elsősorban a jobb  $C_p$  miatt.



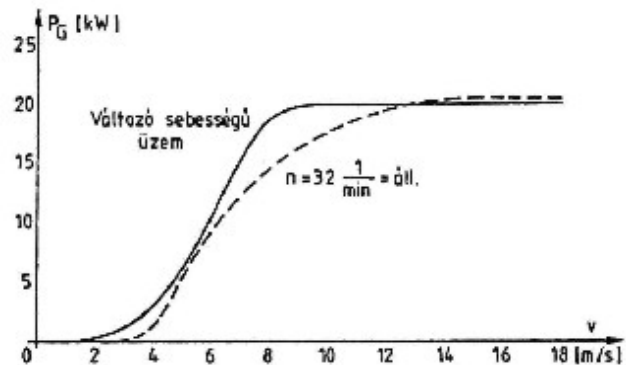
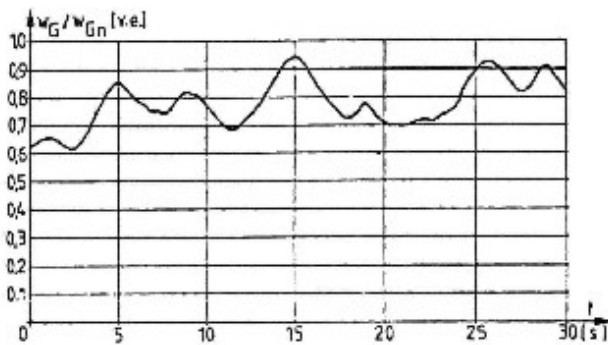
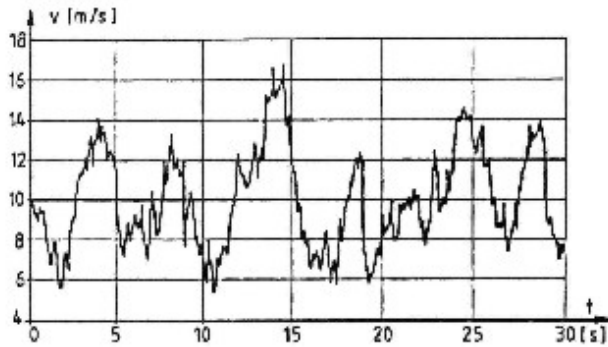
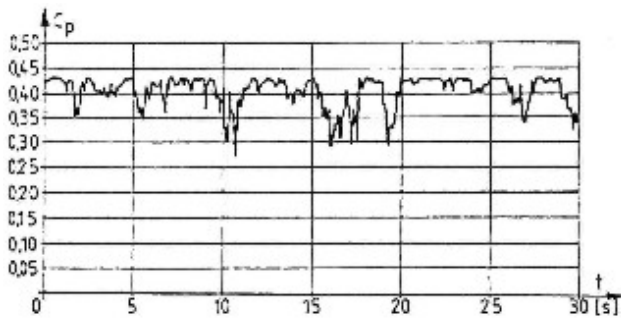


A 4. ábrán egy hagyományos szabályozású frekvenciaváltós generátor esetében vázoltuk a  $C_p$  teljesítménytényezőt, a szélességet és a generátor  $w_G/w_{Gn}$  relatív szögsebességét az idő függvényében. A  $C_p(t)$  görbe  $C_{pmax}$ -tól való eltérése a hajtás dinamikájára és a szabályozás követőképességére jellemző. (A végeredményül kiadódó átlagos teljesítménytényező kisebb  $C_{pmax}$ -nál.) A generátor szögsebessége – a szélességhez képest – az elektromechanikai időállandó által szurt és késleltetett. Az ábrák alapján belátható, hogy az 1-es és 2-es követelmények bizonyos határon túl ellentétesek. Ugyanis ha a turbina szögsebességének gyorsan kell követnie a szélesség változásokat  $C_p \gg C_{pmax}$  elérése érdekében, akkor ez csak nagy és gyorsan változó nyomatékkal lehetséges. Ezért a két célkitűzésnek valamilyen kompromisszumos megoldását kell keresni. Az elérhető legjobb eredmények az időben változó rendszerek állapot- és szabályozóköri változóira vonatkozó másodfokú kritérium alapján számíthatók [2].

A változó fordulatszámú üzem elvileg a *B*, *C* és *D* villamos kapcsolásokkal is megvalósítható. A *B* és *C* kapcsolások azonban nem felelnek meg az elhasználódás és minimális karbantartás 6-os követelményének. A *B* kapcsolásban további hátrányt jelent a szlippel megnövekedett rotorköri veszteség, míg a *C* kapcsolásban a szlippel növekvő típus teljesítmények (és költségek) rontják a gazdaságosságot egy szélessávú fordulatszám változtatás esetén.

A villamos rész minimális veszteségét megkövetelő 10-es kritérium is legjobban változtatható fordulatszámmal elégíthető ki. Alacsonyabb fordulatszámon ugyanis alacsonyabbak a súrlódási és ventilációs veszteségek. Továbbá frekvenciaváltós hajtás esetén a kisebb frekvenciának megfelelően kisebbek a generátor vasveszteségei is. Az 5. ábrán ismét összehasonlítottuk az állandó szögsebességu (frekvenciájú) és változó szögsebességu (frekvenciaváltós) üzemben elérhető  $P_G$  generátor teljesítményeket, ezúttal a pillanatnyi szélesség függvényében. (Az állandó teljesítményre szabályozás 8 m/s szélességnél kezdődik.) A kis sebességeken mutatkozó különbség két részből tevődik össze. A hasznos teljesítmény növekedése egyrészt a már említett veszteség csökkenésből és  $C_p$  növekedéséből származik. A frekvenciaváltós kapcsolásban ezen kívül az energiaszolgáltatás kisebb (2 m/s-os) szélességtől kezdődik el, a kisebb üresjárási veszteségeknek köszönhetően.

A teljesítmény és sebesség szabályozás/korlátozás sokszor nem különíthető el, hiszen itt a szélesség egyben elérhető maximális teljesítményt is jelent. A fenti szabályozások nem villamos beavatkozásokkal is megvalósíthatók:



- I. a gondola és szélkerék elforgatása/elbillentése a szél irányához képest,
- II a szélirányhoz viszonyított lapátszög változtatása a lapát (sokszor csak egy csúcsközeli lapátrész) hossz tengely körüli elforgatásával,
- III. a lapátprofil (szárnyprofil) speciális kialakítása („stoll-control”).

A fenti beavatkozások alkalmasak a teljesítmény szabályozására ( $P_{Tmax}$  = állandó), a szögsebesség változtatására azonban csak akkor alkalmasak, ha azt a főáramköri kapcsolás is lehetővé teszi ( $B - G$  megoldások). Az utóbbi esetben az *I* és *II* megoldásokkal kielégíthetők a 2, 3 és 4-es követelmények. A 4-es kritérium már kis ráfordítással teljesíthető speciális szárnyprofil (*III*) kialakítással, amely adott relatív szélesség felett a szögsebesség és teljesítmény csökkenésével jár. Ez a megoldás más szabályozási feladatra nem alkalmas.

50 Hz-es hálózati frekvencia esetén egy pl.  $2p=4$  pólusú generátornak  $n=1500/\text{min}$  fordulatszámmal kell forognia, míg a szélturbina fordulatszáma a névleges teljesítménytől (a szélkerék átmérojétől) függően kb.  $15\sim 40/\text{min}$ . Ez  $i \gg 30\sim 100$  közötti áttételi viszonyozást tételez fel a két gép között, amely általában  $2\sim 3$  fokozatú áttételt igényel. Az áttétel veszteségei miatt fokozatonként kb. a névleges teljesítmény 2%-a megy veszendőbe. Az áttétel elhagyása (az 5-ös követelmény) látszólag könnyen megoldható frekvenciaváltó alkalmazásával, és alacsony névleges frekvencia választásával. Azonban az  $f_{in}=50$  Hz névleges frekvenciánál kisebb frekvencia a generátor méreteit növelné meg (a nagyobb  $f_{in}$  pedig a vasvesztést) megengedhetetlen mértékben. Pl. a  $15/\text{min}$  fordulatszám  $f_{in}=50$  Hz mellett is elérhető, ha a póluspárok számát  $p=200$ -ra tudjuk növelni. A generátor külső átmérojét  $D=6$  m-re korlátozza a vasúti szállíthatóság, az üzem közbeni mechanikai rezgések, és a túl nagy takarás a turbina hatásos felületéből. A fentiek alapján kiadódó  $30\sim 40$  mm-es pólus- szélesség azonban megvalósíthatatlan gerjesztotekercset tartalmazó forgórészszel. Ezért ma Szamárium-Kobalt, vagy

Neodium–Vas–Bór ritkaföldfémekből készített állandó-mágneseket alkalmaznak erre a célra ( $G$  megoldás). Az 5-ös követelmény így teljesíthető, és a mechanikus áttételben keletkező veszteség elmaradásán túlmenően csökken az eromu zajszintje és karbantartási igénye is. Az áttétel és a csapágyazás költségei (6. ábra) kb. fedezik a különleges generátor többletköltségeit. Az üresjárási veszteségek és az indulási szélesség csökkenése miatt e megoldásnak különös jelentősége van Magyarországon, az alacsony átlagos szélességre való tekintettel.

A követelmények másik csoportja (8. 9) a technológia fejlődésével és a gyártási sorozatok nagyságával függ össze. Ma a leggazdaságosabb nagyságnak az 500~750 kW-os névleges teljesítményű egységek tekinthetők (kb. 800 ECU/kW egységárral), e teljesítmény azonban folyamatosan növekszik az évek múlásával. A szélesség a tapasztalat szerint változik a  $h$  magassággal:

$$v_n = v_{10} (h / h_{10})^n \quad (5)$$

Itt  $v_{10}$  a  $h_{10}=10$  m magasságban mért szélesség és  $n \approx 0,14 \sim 0,34$ . Ezzel (1) pontosítható, így  $P \sim D^{2,43}$ . Az elmondottak szerint érdemes a nagyobb turbinákat nagyobb  $h$  toronymagassággal építeni. Kis teljesítményen célszerű nagy  $h/D$  arányt alkalmazni, hogy a földközeli légmozgások káros hatásait távol tartsuk,  $D=30$  m felett a toronymagasság megközelíti a  $h \gg D$  értéket.

A 11-es követelmény teljesítése feltételezi, hogy a méretezés a statisztikai szélelmélet alapján történik. Analitikus megoldás akkor nyerhető, ha a szél  $p(v)$  sűrűség-eloszlási függvényére (egy  $v$  középpontú  $lm/s$  szélességű intervallumon belüli szélességre) folytonos eloszlású analitikus függvényt tételezünk fel. Leggyakrabban az ún. Weibull eloszlást alkalmazzák [3]:

$$p(v) = \frac{k}{c} \left( \frac{v}{c} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}, \int_0^{\infty} p(v) dv = 1 \quad (6a,b)$$

(A korábban említett Rayleigh-féle eloszlás a Weibull eloszlás alelete, speciális „ $k$ ” formatényezővel ( $k=2$ ) és „ $c$ ” skálatényezővel.)

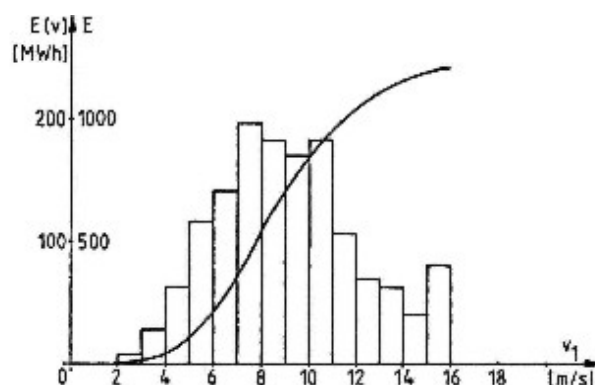
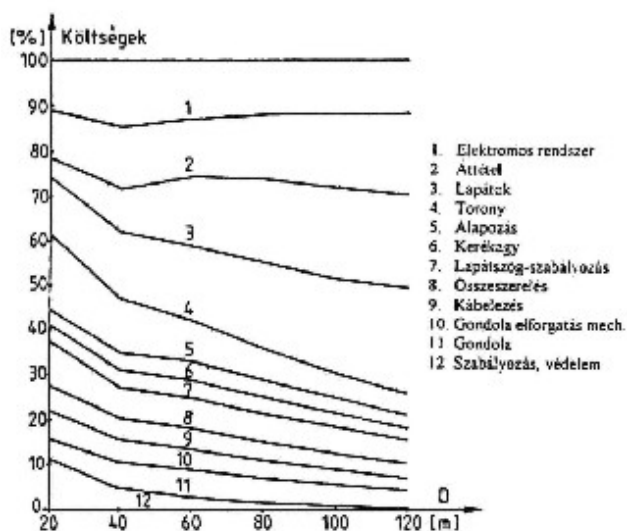
A széleromu egyik legfontosabb jellemzője az átlagos leadott teljesítmény:

$$P_{\text{átlag}} = \int_0^{\infty} P_{\text{t}}(v) p(v) dv \quad (7)$$

Ez szabja meg a teljes energiatermelést és a bevételt. Az integrálást elvégezve az átlagos teljesítmény számítható a névleges szélességhez ( $v_n$ ) tartozó  $P_{Gn}$  névleges teljesítménnyel és a  $K_F$  kapacitás tényezővel:

$$P_{\text{átlag}} = P_{Gn} K_F(v_n, v_i, v_{\text{max}}) \quad (8)$$

A  $v_n$  névleges szélesség megválasztása közvetett módon meghatározza a  $v_i$  indulási és a  $v_{\text{max}}$  maximális szélesség értékét is az üresjárási veszteségeken, és az állandó teljesítményű tartomány kivitelezhetőségén keresztül.  $P_{Gn}$  növelés együtt jár nagyobb teljesítményű turbina, generátor, transzformátor, stb. alkalmazásával, vagyis a költségeket növeli. Érdemes tehát a  $K_F$  kapacitástényezőt is maximalizálni. A 7. ábrán adott szélességekhez tartozó éves energiák hisztogramját rajzoltuk fel adott esetre. Szemléletesen úgy kereshetjük meg az optimális névleges szélességet, hogy adott sebességarányok mellett (pl.  $v_n=2v_i$  és  $v_{\text{max}}=2v_n$ ) egy  $v_{\text{max}}-v_i$  szélességű „ablakban” keressük az  $E$  teljes éves energiából a  $v_{\text{max}}-v_i$  tartományba eső energiarész maximumát. Ha ehhez az optimumhoz mérten túl nagyra választjuk  $v_n$ -et, akkor a turbina ritkán működik a teljes kapacitás közelében és kis sebességeken veszítünk energiát, ha  $v_n$ -et túl kicsire választjuk, akkor nagy szélességeken veszítünk energiát. Az optimális névleges szélesség elsősorban a  $k$  formatényezőtől függvénye a helyi szélviszonyoknak, és ez szabja meg pl. hogy  $v_n$  hányszorosa az átlagos szélességnek. Megjegyezzük, hogy a maximális energiatermelés és a gazdasági optimum  $v_n$  értékei nem esnek egybe.



## Irodalomjegyzék

[1] Hunyár M, Schmidt I., Veszprémi K., Vincze Gyné: Megújuló és környezetbarát energetika villamos gépei és szabályozásuk. ISBN 963 420 670 0. Muegyetemi Kiadó. Budapest. 2001.

[2] Novák, P., Ekelund, T., Schmidtbauer, B.: Modelling and Control of Variable-Speed Wind-Turbine Drive-System Dynamics. IEEE Control Systems. Vol. 15., No. 4. pp.28–37. 1995.

[3] Johnson G.L.: Wind Energy Systems. Prentice-Hall, INC, Englewood Cliffs. New Jersey 1985.

[4] Heir S.: Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems. John Wiley and Sons. Chichester. 1988.