

# EGYEDÜLÁLLÓ SZÉLGENERÁTOR ÉS AZ ORSZÁGOS HÁLÓZAT EGYÜTTMŰKÖDÉSE

## CO-OPERATION BETWEEN SINGLE WIND GENERATOR AND NATIONAL GRID

*Dr. Szentirmai László\**

### ABSTRACT

The ambitious Europe 2020 strategy envisages 20% increase of renewable energy resources and 20% energy savings. Single wind turbine-generator units are applicable to supply mainly farming areas and medium-sized enterprises with electricity around two to five megavoltamper rated power. Co-operation is needed with the national grid to ensure continuous electricity supply and to sell out the surplus energy accordingly. This co-operation however requires 3-phase voltage generation in sinusoid wave at 50 hertz frequency, the latter is ensured by various control systems. Pure sine wave is distorted by magnetic non-linearity occurring both in the generator and the consumers, but its waveform remains cyclical. Based on Fourier theorem, such periodic waveform is composed of pure sine and cosine waves. In county Borsod of Hungary, such a 2.0 MVA wind generator was scrutinised and found that its total harmonic distortion due to adequate harmonic suppression is less than the permissible 2.5%. Symmetry of the 3-phase voltages is also indispensable and one-month-long continuous measurements verified the asymmetry was ranging about 0.2% instead of the allowable 2.0%. Measurement-series verify that such single wind generator can co-operate with the national grid without generating and transmitting any significant distortion and/or fault in the system.

### 1. BEVEZETÉS

Az első és második ipari forradalom a természetes viselkedésmód elvesztését, az erdők nagymértékű csökkenését és az üvegházhatású gázok koncentrációjának növekedésével pedig a Föld hőmérsékletének 0,74°C-kal (egyres források szerint 0,76°C-kal) való megemelkedését okozták. Szélsőséges természeti jelenségek lépnek fel akkor, ha a Föld felmelegedése eléri a 2,0°C-ot. Az eredmény a klímaváltozásban, valamint az állat- és növényvilág biológiai sokféleségének jelentős csökkenésében mutatkozik.

Az Európai Unió 2020-ra ambiciózus elhatározásokat jelentett meg: 20% csökkenést az üvegházhatású gázok

kibocsátásában az 1990-es szinthez viszonyítva és 20% növekedést a megújuló energiák vonatkozásában (villamosenergia-termelés, fűtés, hűtés-légkondicionálás és közlekedés) amelyek ma mindössze 8,5% megújuló energiát használnak, valamint 20% energia-megtakarítást részben új technológiák bevezetésével.

Az energia hagyományos formái (szén, olaj, természetes gáz és urán) drasztikusan csökkennek (az urán a kiégett hulladék raktározása miatt jelent nagy gondot) és végül az emberiségnek nem marad más választása, mint kizárólag megújuló energiaforrásokból fedezni az igényeket. A szél- és napenergia döntő hátránya, hogy alapvetően az időjárástól függenek – sőt-e a nap és fűj-e a szél – nem pedig a felhasználók igényeitől.

A magyar 2020 stratégia a megújuló arányát 14%-ra, vagyis 120,57 petajoule-ra (PJ) tervezi a 2010-es 55,25 PJ-ről. Jelenleg a megújuló 80%-a biomassa, ennek is több mint fele tűzifa alapú, így a széleresia jelentősége fokozódik.

Az egyedülálló szélgenerátor azonban csak akkor gazdaságos, ha a tulajdonos a fogyasztói kör igényeit meghaladó energiát "eladhatja" az áramszolgáltatónak. Ehhez azonban a szigorú minőségi követelményeket teljesíteni kell. A hálózati frekvenciának megfelelő 50 hertz (Hz) előirt határok közötti tartását automatika biztosítja. Ugyanakkor a szélgenerátor kimeneti (kapocs-) feszültségének szinuszos hullámalakját a fogyasztók jelentősen torzíthatják, ezt a torzítást csak akkor tudjuk a megengedett érték alatt tartani, ha nagyszámú mérési adatunk van. Háromfázisú energiarendszerben pedig a rendszer szimmetriájának fenntartása is elengedhetetlen, aminek kiértékelésére ugyancsak mérés-sorozatok adnak támpontot.

Ahhoz azonban, hogy e két fontos működési hibaforrást feltárhassuk, ismerni kell a szélgenerátor főbb jellegzetességeit, hogy az országos hálózatra kapcsolás megvalósulhasson.

A tanulmány a Miskolci Egyetem Elektrotechnikai-Elektronikai Tanszékének a témakörbe vágó mérés-sorozatainak felhasználásával mutatja be az országos hálózatra kapcsolás és a hálózattal együttműködés lehetséges módozatait.

\* Professor Emeritus, Miskolci Egyetem  
Elektrotechnikai-Elektronikai Tanszék

## 2. EGYEDÜLÁLLÓ SZÉLGENERÁTOR JELLEMZŐI ÉS MŰKÖDÉSE

A szélenergia hasznosítása bár a honfoglalás idejében ismeretes volt, jelentős előrelépés mégis csak az első olajválságot követően (1973) történt. Jelenleg négy fő rendszer ismeretes:

1. Állandó fordulatszámú szélturbina aszinkron generátorral (dán rendszer).
2. Változó fordulatszámú szélturbina és változó forgórész-ellenállású szélgenerátor rendszer.
3. Változó fordulatszámú és közel névleges teljesítményű rendszer.
4. Változó fordulatszámú szélturbina két oldalról táplált aszinkron generátorral. A dán rendszer mellett igen gyakori, mert 4 m/s szélsébségnél már működésbe lép és a névleges szinkronfordulatszámtól  $\pm 30\%$  eltérésnél is kifogástalanul működik.

A szélturbina kimeneti teljesítménye a  $v$  szélsébséggel erőteljesen emelkedik:

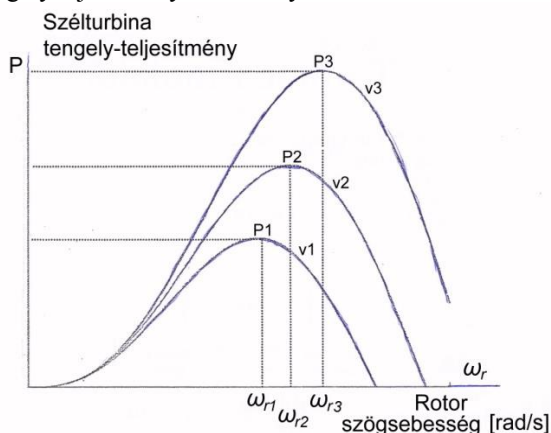
$$P = \frac{1}{2} A \rho C_p \lambda v^3 \quad (1)$$

Ahol  $A$  a lapátok által súrolt terület [ $\text{m}^2$ ],  $\rho$  a levegő fajlagos sűrűsége [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  $C_p$  a teljesítmény-átalakítás tényezője, amely a szélturbina lapátkerék aerodinamikai hatásfokát mutatja (függ a szélsébségtől és a lapátállítás szögétől),  $\omega_r$  a forgórész (rotor) szögsebessége [ $\text{rad}/\text{s}$ ],  $v$  a szélsébség [ $\text{m}/\text{s}$ ],  $R$  a turbina lapátkerék sugara [ $\text{m}$ ] és  $\lambda$  a sebességarány,

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{v} \quad (2)$$

amely a forgórész szögsebességének és a szélsébségnek a viszonya.

Az egyenletekből a szélturbina jelleggörbéi is meghatározhatók (1. ábra); a tengelyteljesítmény változása a forgórész fordulatszámának függvényében ábrázolható; növekvő szélsébség növekvő tengelyteljesítményt eredményez.

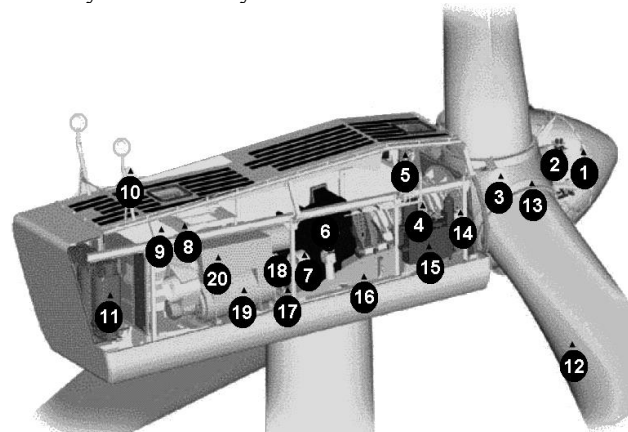


1. ábra. Szélturbina jelleggörbéi

Az egyedülálló szélgenerátorok körében előnyösek a 2 - 5 MVA (megavoltamper) névleges teljesítményűek, mert éves viszonylatban 4000 üzemórát feltételezve 10 éven belül megtérül a befektetési költség és élettartamuk rendszerint 50 év. Különösen kedvezőek a tanyavilágban, közepes vállalkozások energiaellátására és így az energiatartósság és a költségek csökkentésére.

Magyarországon az uralkodó szélirány északnyugat-délkelet irányú, így a borsodi térség bár kiesik ebből a fő vonulatból, a lapátok automatikusan a megfelelő szélirányba állításával mégis elérhető az évi 4000 üzemóra.

Egy 2 MVA névleges teljesítményű, a borsodi térségben működő egyedülálló szélturbina-generátor egységet a 2. ábra mutat. A méretekre jellemző, hogy a szélkerék átmérője 90 méter, a lapátok által súrolt terület  $6,362 \text{ m}^2$ , a percnkénti névleges szögsebesség  $13,3 \text{ 1}/\text{min}$ , a percnkénti működési szögsebesség  $8,8\text{-}14,90 \text{ 1}/\text{min}$ , a három lapátot munkahengerek közvetítésével lehet a szélirányba állítani. A szélturbina-generátor egységet tartalmazó "gondola" 68 tonna, míg a torony 150 tonnát nyom.



2. ábra. Egyedülálló szélturbina-generátor egység

Az egyedülálló szélturbina-generátor egység fő részei:

- 1 lapátszög-állító automatika, 2 munkahengerek az automatikához, 3 lapátkerék (propeller), 4 főtengely, 5 olajhűtés, 6 mechanikus áttétel, 7 mechanikus lemezfék, 8 emelőgép szereléshez, javításhoz és karbantartáshoz, 9 szabályozó a teljesítményelektronikai-átalakítóhoz, 10 hangsebesség feletti szélsébség-érzékelő, 11 nagyfeszültségű (0,6/20 kilovolt) transzformátor, 12 lapát, 13 lapát-csapágyazás, 14 rotor-záró rendszer, 15 hidraulikus rendszer, 16 a gondola külső háza, 17 segéd-villamosajtás, 18 tengelykapcsoló, 19 generátor, 20 a generátor levegő hűtése.

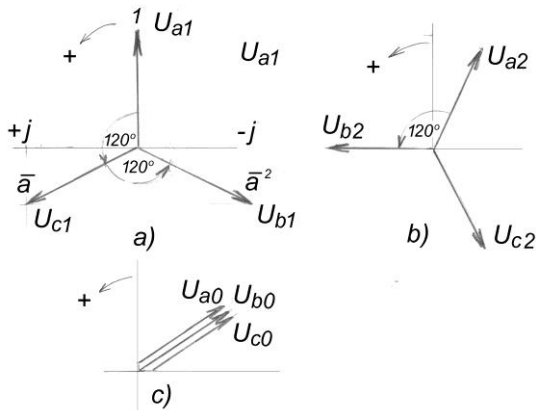
## 3. A SZÉLERŐMŰ ASZIMMETRIKUS HÁROMFÁZISÚ RENDSZERE

Szimmetrikusnak nevezzük a gyakorlatban azt a háromfázisú rendszert, amelyben a fázisáramok és a fázisfeszültségek: az egyes fázisokban mérhető mennyiségek abszolút értékei mindhárom fázisban azonosak, ugyanakkor a mennyiségeket az időben leíró vektorok, (vagy ha a fázisszöveget is figyelembe vesszük: fázorok) iránya egymással  $120^\circ$ -ot zár be.

A fogyasztói rendszert akkor nevezzük szimmetrikusnak villamos szempontból, ha a fogyasztók áramfelvétele mindhárom fázisban azonos értékű és azonos fáziseltolású ön- és kölcsönös impedanciákból áll.

Az aszimmetrikus eset az, amikor a legáltalánosabb esetben mindhárom fázisban az áramok és feszültségek abszolút értékei egymástól eltérnek, a vektorok közötti szögeltérés nem  $120^\circ$ , és a fogyasztói háromfázisú rendszer sem szimmetrikus. Szimmetrikus összetevőkre bontással szimmetrikus esetekre vezethető vissza az aszimmetrikus rendszer.

Háromfázisú rendszer esetén az eredeti három, nem szimmetrikus vektort három szimmetrikus vektorrendszerre lehet felbontani: ezek a pozitív, negatív és a zérus-sorrendű rendszerek (3. ábra).



3. ábra. Pozitív (a), negatív (b) és zérus-sorrendű (c) szimmetrikus összetevők

A pozitív vagy 1-es sorrendű rendszer szimmetrikus vektorainak hossza  $U_{a1}$  és a vektorok közötti szögeltérés  $120^\circ$ .

Az  $\bar{a}$  vektoroperátor egyszerűsíti a számításokat, mert:

$$\bar{a} = -0,5 + j \frac{\sqrt{3}}{2} = e^{j120^\circ}$$

és hasonlóan:  $\bar{a}^2 = -0,5 - j \frac{\sqrt{3}}{2} = e^{j240^\circ}$

A pozitív sorrendű rendszer szimmetrikus:  $1 + \bar{a} + \bar{a}^2 = 0$ .  
A pozitív sorrendű rendszer vektorai tehát:

$$\begin{aligned} U_{a1} &= U_{a1} \\ U_{b1} &= e^{j240^\circ} U_{a1} = \bar{a}^2 U_{a1} \\ U_{c1} &= e^{j120^\circ} U_{a1} = \bar{a} U_{a1} \end{aligned}$$

A pozitív sorrendű rendszerben tehát a fázisok sorrendje *abc*.

A negatív sorrendű vagy 2-jelű vektorrendszer ugyancsak az óramutató járásával ellentétes pozitív forgásirányban forog, ezért a fázisok sorrendje *acb*.

$$U_{a2} = U_{a2} \quad U_{b2} = \bar{a} U_{a2} \quad U_{c2} = \bar{a}^2 U_{a2}$$

A zérus-sorrendű vagy 0-jelű rendszerben az egyes vektorok közötti szög  $0^\circ$ , tehát a három vektor azonos irányú és értékű:

$$U_{a0} = U_{b0} = U_{c0} = U_0$$

Három tetszőleges fázisfeszültség szimmetrikus összevetői:

$$U_a = U_{a1} + U_{a2} + U_0$$

$$U_b = \bar{a}^2 U_{a1} + \bar{a} U_{a2} + U_0$$

$$U_c = \bar{a} U_{a1} + \bar{a}^2 U_{a2} + U_0$$

Az egyenleteket rendezve, összeadva, valamint figyelembe véve, hogy  $1 + \bar{a} + \bar{a}^2 = 0$ :

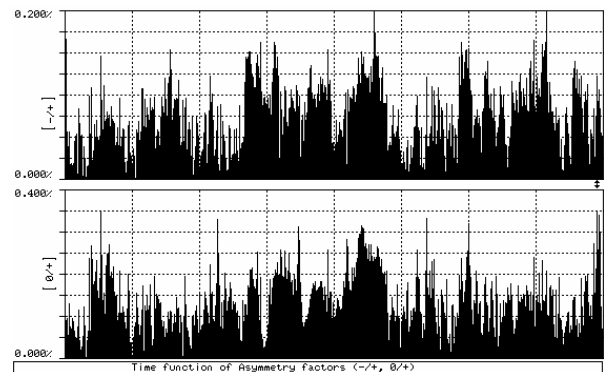
$$U_{a1} = 1/3 (U_a + \bar{a} U_b + \bar{a}^2 U_c) \quad (3)$$

$$U_{a2} = 1/3 (U_a + \bar{a}^2 U_b + \bar{a} U_c) \quad (4)$$

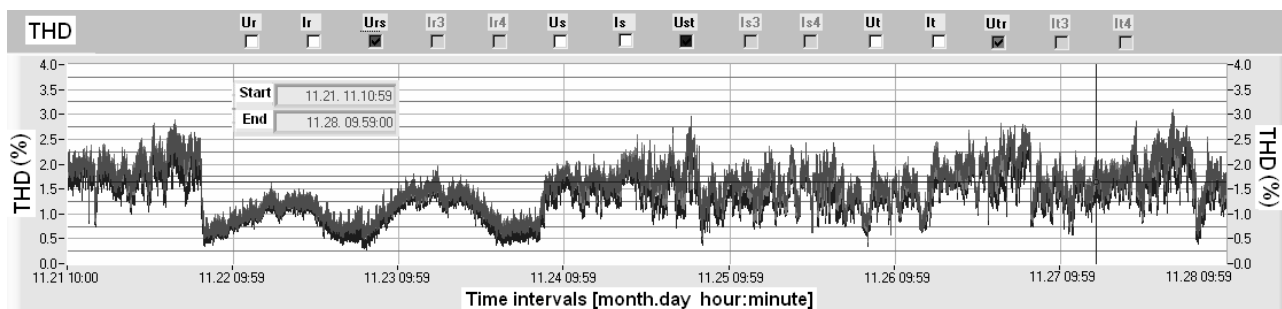
$$U_{a0} = 1/3 (U_a + U_b + U_c) \quad (5)$$

Az eredmény az aszimmetrikus rendszer pozitív, negatív és zérus-sorrendű összetevőit adja. Természetes, hogy ugyanezek az összefüggések érvényesek az áramerősségekre is.

A feszültségek aszimmetriája mind a  $120^\circ$  fázis-szögökben, mind az effektív értékekben torzulást okoz. A feszültségcsökkenés meghatározott fogyasztók működési zavaraihoz vezet, gyártósorok akár le is állhatnak, de váratlan meghibásodásokat is okozhat. A jelentős feszültségemelkedés pedig tönkre is tehet számos működő villamos berendezést. Mindezek miatt az aszimmetria legfeljebb 2,0% eltérés lehet, amelyeket a pozitív sorrendű feszültségrendszerre (+) vonatkoztatunk, mivel az a szabványos szimmetrikus háromfázisú rendszerrel megegyezik. Így a -/+ és a 0/+ időfüggvények ismerete és dokumentálása szükséges az egyedülálló szélgenerátor országos hálózatra kapcsolásához.



4. ábra. Fázisfeszültség aszimmetriájának a pozitív sorrendű feszültségrendszerhez viszonyított aránya az idő függvényében



5. ábra A teljes harmonikus torzítás (THD) százalékos értékei a mért időtartam alatt

A 4. ábra a fázisfeszültségek aszimmetriájának ezt az egymáshoz viszonyított arányát mutatja az idő függvényében: a felső ábrán a viszonyított negatív/pozitív sorrendű értékek (-/+), míg az alsó ábrán a viszonyított zérus/pozitív sorrendű (0/+) feszültségek idődiagramjai láthatók egy teljes novemberi hónap időtartama alatt.

A vizsgált egyedülálló szélgenerátor kedvező műszaki tulajdonságát mutatja, hogy a megengedett 2,0% eltérés helyett az aszimmetria – értékek aránya a 0,2%-ot sem éri el, tehát aszimmetria szempontjából a hálózatra kapcsolás követelményeinek teljesen megfelelt az egység.

#### 4. NEM SZINUSZOS – HARMONIKUSOKKAL TORZÍTOTT – FESZÜLTSEGEK

A szélgenerátorban indukált és a kapcsokon megjelenő feszültség elméletileg tiszta szinusz hullám alakú. A gyakorlatban azonban már a generátor nemlineáris vasanyaga torzítja a szinusz hullámot és további torzítások keletkeznek a fogyasztói oldal felől ugyancsak főleg a változó mágneses tér következtében. A szinusz hullám jellege azonban továbbra is periodikus marad, így érvényesíthető a Fourier tétel. *Jean Baptiste Joseph Fourier* ugyanis kimutatta, hogy egy  $f(t)$  periodikus függvény a következő formában is leírható (Fourier-sor):

$$f(t) = a_0 + a_1 \cos \omega_0 t + a_2 \cos 2\omega_0 t + \dots b_1 \sin \omega_0 t + b_2 \sin 2\omega_0 t \dots$$

$$f(t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cos n\omega_0 t + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin n\omega_0 t \quad (6)$$

Az egyenletben  $\omega_0 = 2\pi/T$  az alap-harmonikus szögsebessége,  $a_0$  a periodikus hullám átlagértéke, vagy egyenáramú összetevője.

Az első két koszinusz és szinusz hullám összege fejezi ki az alap-harmonikust, amelynek frekvenciája megegyezik az  $f(t)$  függvényével. Az

$$a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t$$

kifejezés pedig az  $f(t)$  függvény  $n$ -edik harmonikus összetevője vagy más néven felharmonikus.

A teljes harmonikus torzítás (az angol Total Harmonic Distortion szavak kezdőbetűiből: THD)

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} U_k^2}}{U_1} \cdot 100 \quad [\%] \quad (7)$$

Az egyenletben az  $U$  betű jelzi, hogy a feszültségekre vonatkoztatott torzításról van szó.  $U_1$  az alap-harmonikus,  $U_2, U_3 \dots U_k$  pedig a felharmonikusakat jelentik.

Egy teljes heti mérési időtartam alatt folyamatosan végzett mérések azt mutatták, hogy a THD átlagos értéke 2% volt és a mért teljes időtartam 95%-ában nem érte el a 2,5%-ot. THD csúcserő, ebben az esetben 5%, akkor volt mérhető, amikor a szélgenerátor forgott ugyan, de energiát nem fejlesztett. THD százalékos értékét a mért időtartam alatt az 5. ábra mutatja. Az időtengelyen a sorrend: hónap, nap, óra: perc.

#### 5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A bemutatott kutató munka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

#### 6. IRODALOM

- [1] European Commission: Europe 2020 Strategy. p. 20. Brussels, Luxembourg, 2010.
- [2] VÁRADI, A. Sz., SZENTIRMAI, L. and SZARKA, T.: Drastic need for renewable sources in light of electrical power quality of a wind power plant. Clean Electrical Energy – IEEE International Conference ISBN 978-1-4244-2544-0/08, Capri, Italy, p. 330-337. 2009.