



## Fenntartható villamosenergia-rendszerek szabályozásának globális szintű kérdései

Az Energetikai Szakkollégium, amely egyben az IEEE Joint Industrial Applications Society and Power and Energy Society Student Branch Chapter alapítója, 2015. november 19-én rendezte meg félévének hatodik előadását. Az előadó, prof. Costas Vournas, az athéni Műszaki Egyetemről (National Technical University of Athens) az IEEE Distinguished Lecturer Program keretében érkezett Magyarországra. Témája a fenntartható villamosenergia-rendszerek szabályozásában végzett kutatásaival volt kapcsolatos. Az előadó az athéni egyetemen szerezte gépész- és villamosmérnök alapidiplomáját, majd Kanadában mester és doktori fokozatot ért el villamosmérnöki képzésben. Jelenleg az athéni egyetem villamosenergia-rendszerek laboratóriumának vezetője. Több, mint 100 publikációja érhető el villamosenergia-rendszerek dinamikus vizsgálatának, stabilitási kérdéseinek és szabályozásának körében.

### Bevezetés

A villamosenergia-rendszer hatalmas változások előtt áll: a közeljövőben hálózatra csatlakozó megújuló energiaforrások ingadozó penetrációja újszerű kihívások elé állítja a hálózat üzemeltetőit. A kérdéskör intenzíven kutatott terület, így e téma fejlődése rendkívüli tendenciát mutat. Napjainkban az intelligens villamosenergia-rendszer, ún. smart grid rendkívüli fejlődést mutat, aminek része a decentralizált energiatermelés, melynek során különös jelentőséggel bírnak a szélerőművek, amelyek integrációja, üzemeltetése sajátos nehézségeket mutatnak.

A Smart Grid fogalom nem teljesen újszerű a villamosenergia-rendszer üzemeltetői számára: a '60-as évek óta a legnagyobb kiterjedésű folyamatirányító rendszereket az energetikai iparban találhatjuk (pl. SCADA rendszerek). A valós idejű működésvizsgálat is elterjedt bizonyos hibás működések kiszűrésére. A felépítés azon az elven alapult, hogy az igények (energiafelhasználás) változékonyságát kiegyensúlyozhatjuk a termelés szabályozásával. Mivel a teljesítményegyensúly - mint minden fizikai

rendszerre - a villamos hálózatra is teljesül, így ezek a szabályozások pillanatszerű egyensúlyi feltételeket kell, hogy kielégítsenek. A frekvencia, mint fizikai paraméter kiválóan alkalmas volt arra, hogy a szabályozás folyamatában megfigyelt változóként felhasználhassák: könnyen mérhető, és remekül mutatja a kiegyensúlyozatlanságot. Amennyiben a termelés meghaladja a fogyasztást, a frekvencia a névleges (hazánkban 50 Hz) érték felett lesz, míg fordított esetben alatta. A stabilitási határok pedig innen számíthatóak.

## Szélerőművek integrálása a hálózatba

A szél mint energiaforrás felhasználásakor tudatában kell lennünk annak, hogy úgy, mint más megújulók esetében is (például napenergia) a kimeneti teljesítmény variábilis, mely a szélerőművek elterjedésével egyre nagyobb hangsúllyal bír. Ekkor az előzőekben említett gondolkodásmód, a stabilitás megőrzésére értelemszerűen nem járható út. Szükség van tehát a szabályozási eljárásokban újszerű megközelítésekre.

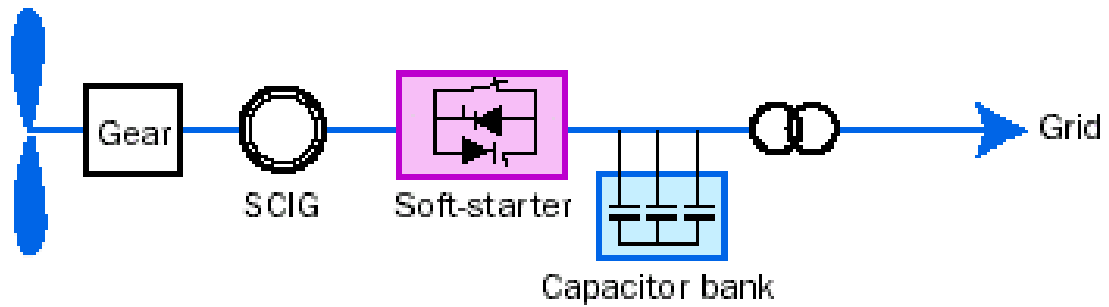
Napjainkban fellelhető legnagyobb szélerőművek teljesítménye elérheti a 10 MW-ot, a csúcsteljesítmény az 1980-as években még csak 150 kW körül alakult. E fejlődés áttekintéséhez meg kell ismernünk a főbb szélerőmű típusokat.

## Technológiák

### Kalickás forgórészű aszinkron

A kalickás forgórészű aszinkron gépeket felhasználó szélerőműveket gyakran nevezik állandó sebességű generátoroknak. A sebesség változtatása ebben az esetben megfelelő mechanikus sebességváltó alkalmazásával megvalósítható. Ebben az elrendezésben a generátor a gerjesztési mező létrehozására nagy meddőteljesítményt vesz fel, és az induláskor nagy áramigénnyel rendelkezik. Ezen igények kielégítésére lágyindító és kondenzátor telepeket építenek a rendszerbe.

## A Fixed speed (one or two speeds)

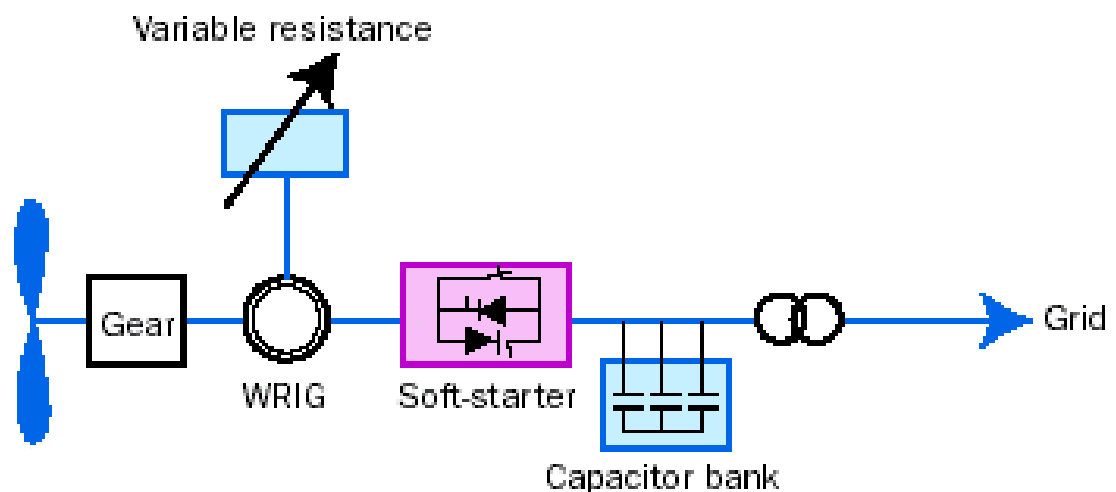


**European market share (cum): 30%.**

1. ábra: Állandó sebességű szélgenerátor elvi felépítése

A sebességváltozások engedélyezésével azonban gazdaságosabb kialakításokhoz juthatunk. A stabilitás megőrzésének érdekében korlátozó ellenállás beépítésével a sebesség egy felső határnál sosem lesz nagyobb a következő elrendezésben. Emellett az indításkor teljesítményelektronikán keresztül szabályozható az áramlás.

## B Limited variable speed

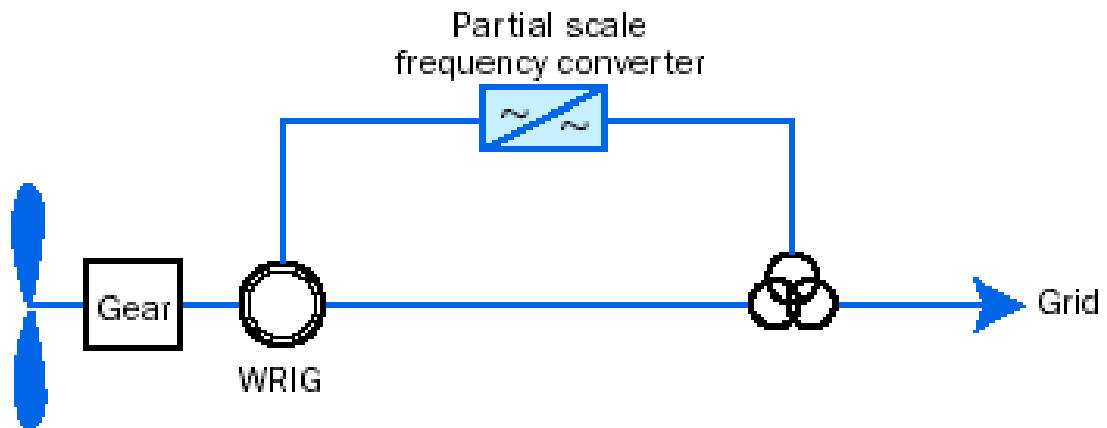


**European market share (cum): 10%**

2. ábra: Korlátozott változó sebességű szélgenerátor felépítése

A változó sebességérték növelésére kitűnő megoldás a kétoldalasan táplált villamos gépek alkalmazása. Jelenleg ez a legelterjedtebb megoldás: a forgó- és az állórész egyaránt rendelkezik tekercseléssel, és hatásos teljesítményt közvetít a tengely és a hálózat közt. Az elrendezésben frekvenciaváltó biztosítja a megfelelő működést.

### C Improved variable speed with DFIG

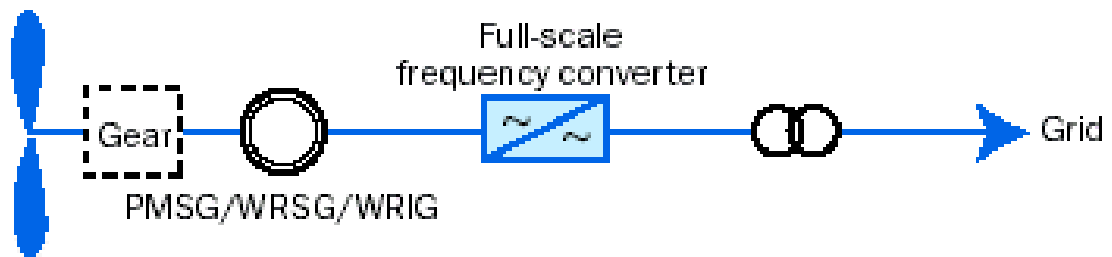


**European market share (cum): 45%**

*3. ábra: Sebesség növelés kétoldalasan táplált villamos gép alkalmazásával*

A frekvenciaváltó teljes tartománybeli üzemelésének biztosításával a változó sebességű forgógép ezen keresztül egyszerűen is a hálózatra kapcsolható. Az elrendezés kevésbé elterjedt, a villamos gépek tekercselésének kialakítása hamarabb tette lehetővé az ilyen gépek hálózatra csatlakozását, így szélesebb körben alkalmazzák.

## D Variable speed with full-scale frequency converter



**European market share (cum): 15%**

*4. ábra: Változó sebesség biztosítása frekvenciaváltó beépítésével*

### Nehézségek az integráció és üzemeltetés során

#### Feszültség stabilitási problémák

A generátorok a stabilitás fenntartásának érdekében bizonyos esetekben leválhatnak a hálózatról: ez komoly kapacitáshiányokhoz vezethet, így nem megfelelő megoldás. A kulcs itt a zárlati áthidaló-képesség megfelelő megteremtése.

#### Frekvencia stabilitási problémák

Amennyiben a névleges frekvenciától egy bizonyos határon túl eltér a pillanatnyi érték (50 Hz-es rendszerénél  $\sim 2,5$  Hz), az összeomláshoz is vezethet. Az ilyen jellegű folyamatokat folyamatosan mérni és kompenzálni kell a megfelelő ellátásbiztonság elérésének érdekében.

#### Stabilitás kérdése kisjelű szinten

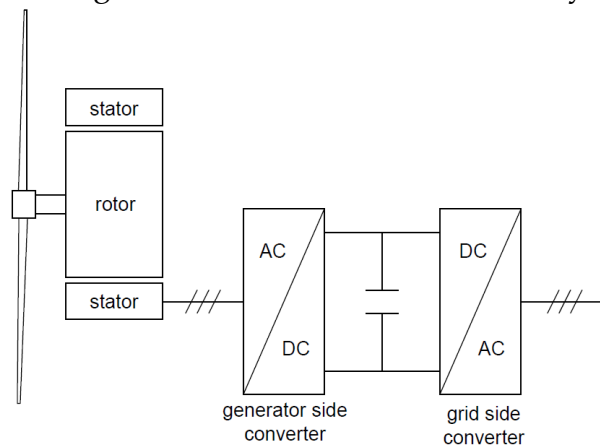
A betáplált teljesítményben kialakuló fel- illetve lefutó élek feszültségminőségi problémákat okozhatnak. Ennek kiszűrésére megfelelő teljesítményelektronikával megvalósított szabályozások javasoltak.

Piaci igények figyelembe vétele a másnapi tőzsdén történő lekötéseken keresztül

Az energiamix megfelelő kialakítása komoly feladat. A szükséges minimális termeléseket figyelembe kell venni a konvencionális erőművek termelésénél (szabályozási korlátok). A megújuló energiaforrások változó költsége közel 0, így a merit order kialakításánál elől helyezkednek el, azonban a rendszer megfelelő működésének érdekében le kell kötni a konvencionális termelőknél is kapacitást, hogy adott esetben megfelelő sebességgel képesek legyenek felszabályozni a kimenetüket.

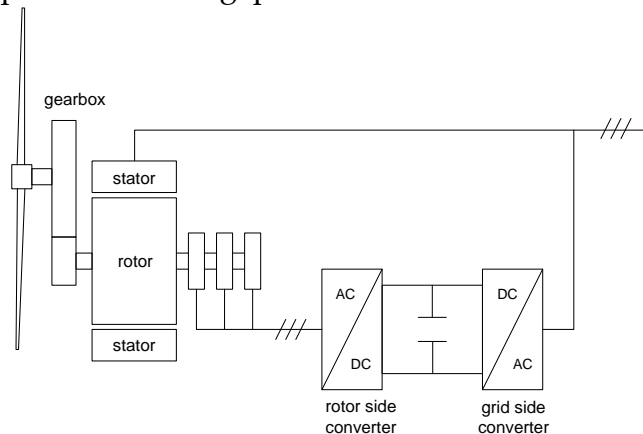
### Változtatható sebességű konstrukciók

A változtatható sebességű szélturbinák esetén a generátor által előállított váltakozó feszültség egyenirányítását egy generátor oldali elektronikai berendezés végzi. Az egyenirányítást követően a közbülső egyenfeszültséget a hálózat oldali inverter a hálózatnak megfelelő frekvenciájú (50 Hz vagy 60 Hz, követelménynek megfelelően) feszültségre alakítja, ezzel bizonyos szabadságot adva a szélgenerátor fordulatszám-tartományának.



5. ábra: Blokkvázlat a változó sebesség hatásainak kiküszöbölésére generátor oldali teljesítményelektronika beépítésével

A kétoldalról táplált aszinkron gép esetén az elrendezés némileg módosul:



6. ábra: Elrendezés kétoldalról táplált aszinkron gép esetén

A kétoldalról táplált aszinkron gép mind az állórész, mind a forgórész tekercsein át táplálható. A forgórész táplálása tipikusan csúszógyűrűs kialakítású. Ebben a rotor (forgórész) áramok nagysága és szöge pillanatszerűen változtatható. Ahogyan a 6. ábrán is látható, ebben az esetben

az állórész az állandó frekvenciájú hálózattal áll közvetlen kapcsolatban, és a forgórészt táplálja a változtatható frekvenciájú inverter. Ezen konstrukció előnyei közé tartozik, hogy ebben az esetben a generátor oldali és a hálózati oldali inverteren nem a teljes termelt energia áramlik, hanem csak a forgórész gerjesztésére szükséges energia. Így a frekvenciaváltó kisebb terhelésen üzemel.

A szélturbina maximális teljesítményét a következő összefüggés határozza meg:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A V_w^3 C_p(\lambda, \beta)$$

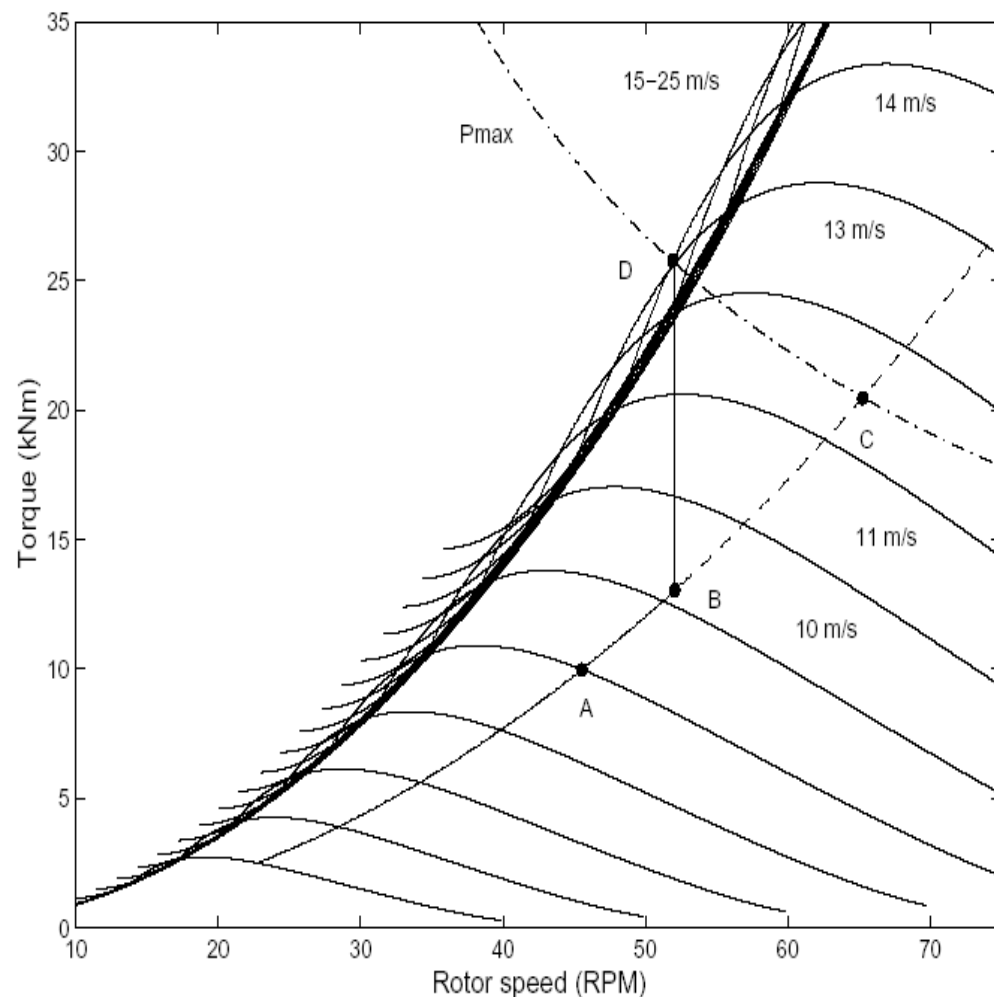
$P_m$  – Szélturbina mechanikai teljesítménye

$\rho$  – levegő sűrűsége [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$V$  – levegő sebessége

$A$  – rotorok felülete

$C$  – Mechanikai nyomaték-sebesség ( $\beta$  – lapát bedőlési szöge)



7. ábra A nyomatékgörbe a forgórész fordulatszámának függvényében

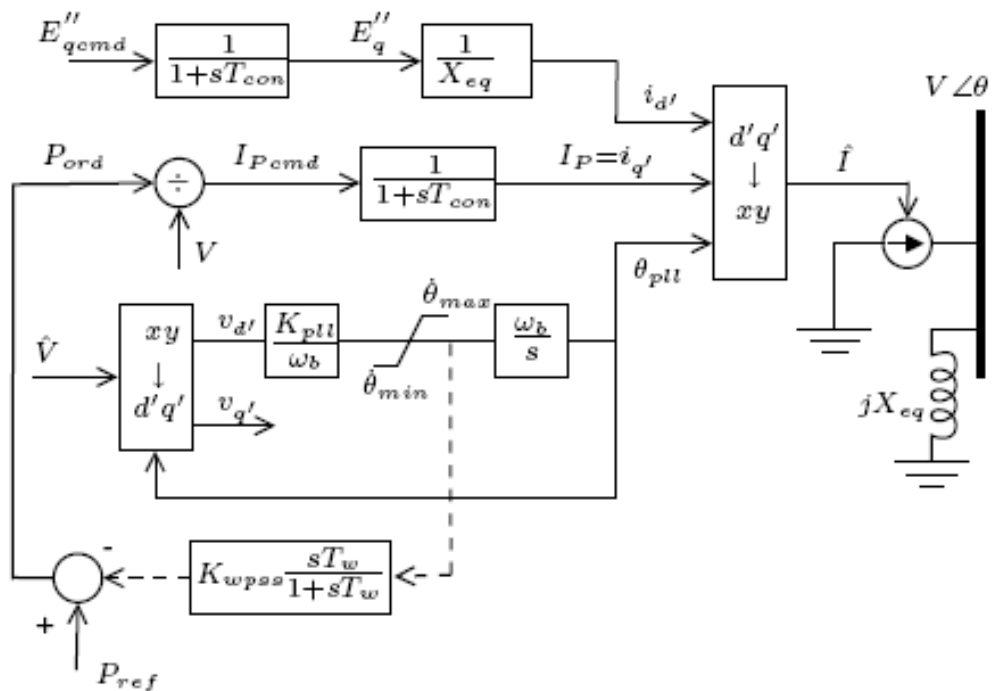
## Konklúzió

A Professor Úr által végzett tanulmányok legnagyobb tanulsága a már említett zárlati áthidaló-képesség növelésének fontossága. Ha ez nem áll

rendelkezésre, akkor csúcstermelés esetén akár 1,5-2,3 GW teljesítmény is elveszhet, ez pedig a teljes rendszer stabilitását is veszélyezteti, valamint időszakos fogyasztási korlátozások bevezetését is indokolhatja. „Blackout” helyzet alakulhat ki, amennyiben a korlátozások nem állítják vissza a szükséges áramlási egyensúlyt. Ezért a fentebb tárgyalt kialakítások kiemelten fontosak a villamosenergia-rendszer normális üzemállapotának megőrzéséhez.

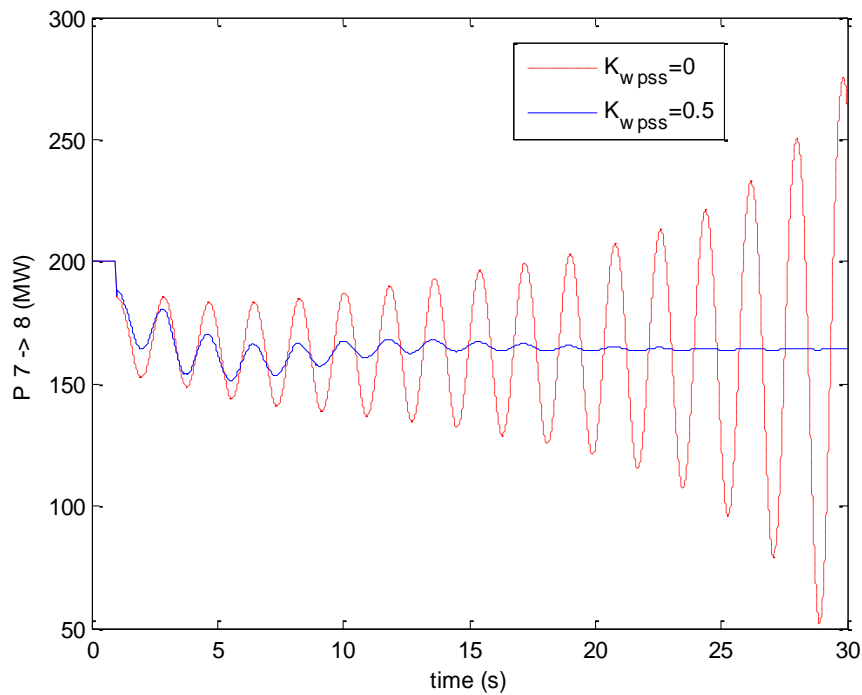
Több nyitott, kutatható kérdés áll még fenn a nagyléptékű szélergia-termelés integrálásával kapcsolatban. Ilyen például a teljesítményelektronikán keresztül biztosítható inercia (a rendszer robusztusságának visszanyerése), a szélviszonyok pontosabb előrejelzése, valós idejű mérési és vezérlési eljárások fejlesztése. Fontos lehet továbbá az egyenáramú hálózatok kialakításának lehetősége, valamint az energiatárolási hálózatfejlesztések megvalósítása. A technológia fejlődésével folyamatosan kialakulnak költséghatékonyabb megoldások, mint ahogy az a generátorok elterjedésénél már megfigyelhető. A következő generációs hálózatok esetén valószínűsíthető, hogy a felsorolt eljárások bizonyos szinten megjelennek, még inkább mérvadóvá téve a szélergia felhasználásának elterjedését.

A teljesítményszabályozó eszközök közül a stabilizátor (WPSS) kiemelten fontos lehet. A perturbációkat a határos teljesítmény munkapontból számítja, lokális frekvenciához képest ellentétes fázisra vetítve. Ezt a módszert pedig egy fáziszárt hurok (PLL) segítségével szabályozza. Előnye, hogy képes inerciát közvetíteni ugyanebben az elrendezésben a hálózat felé. Hátránya, hogy a körzetben található szinkron forgógépek nyomatékát csökkenti.



8. ábra: WPSS blokkvázlata





9. ábra: A WPPSS által megvalósított lokális csillapítás szemléltetése a szabályzó paraméterének változtatásával

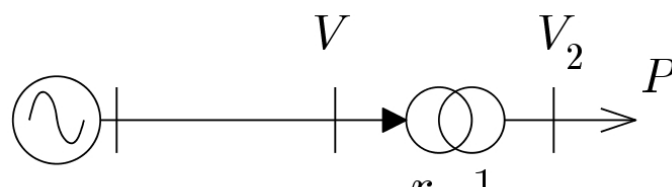
## Feszültségstabilitás probléma

A feszültségstabilitás hiánya tulajdonképpen egy dinamikus folyamat, mely során a fogyasztási igények növekedése miatt a hálózat megpróbál nagyobb teljesítménymennyiséget átvinni, de ez túlmutat a rendszer áteresztő képességén.

A fő meghatározó tényezők:

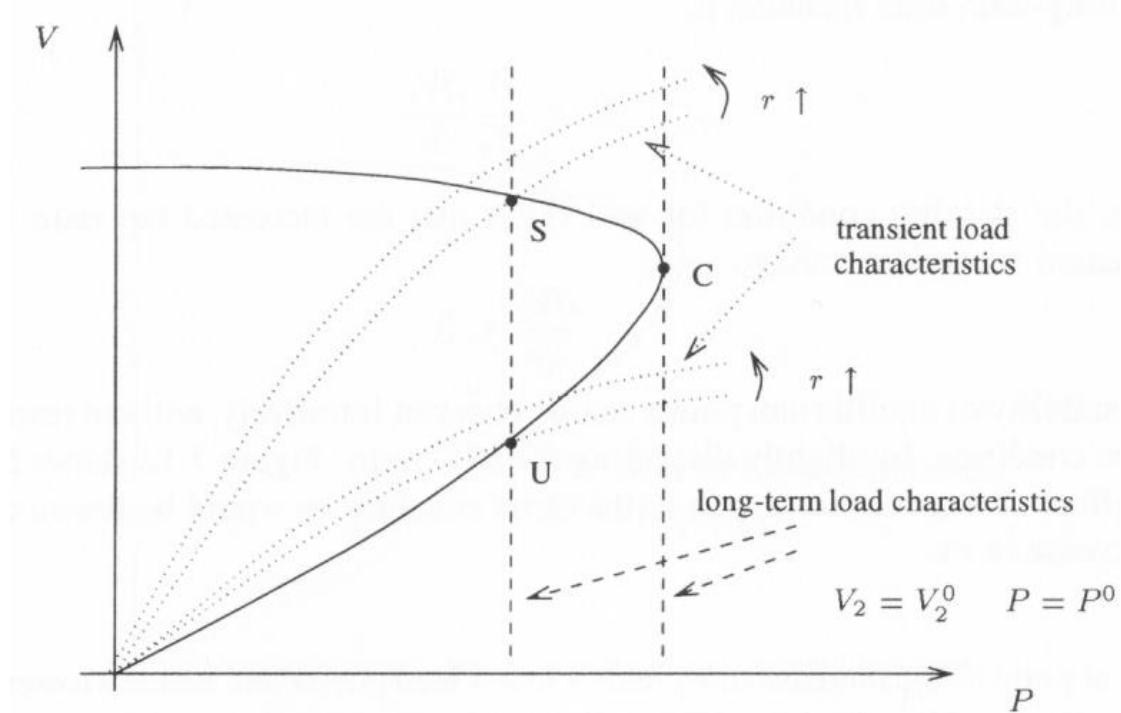
- A teljes áteresztő képesség, melyet a termelő kapacitás és az átviteli kapacitás alapján határozhatunk meg.
- Fogyasztás által vezérelt folyamat (visszahatásszerű).
- Dinamikus megvalósulás, de statikus körülmények közt vizsgálható.
- A meddőteljesítmény kritikus hatást gyakorol a folyamatra, de a hatásos komponens is szerepet játszik.

Az átviteli hálózaton megvalósított feszültség szabályozás egy megoldása a fokozatkapcsolóval ellátott transzformátor használata, mely terhelt állapotban képes a transzformátor primer vagy szekunder tekercs menetszámának változtatására.



10. ábra: Fokozatállítással megvalósított szabályozás legegyszerűbb szemléltetése (r változatható)

A stabilitást leíró görbe a jól ismert jelleget veszi fel. C a maximális hatásos teljesítmény pontja, valamint szaggatott vonalakkal jelölt az állandósult és tranziens állapotok lehetséges helye a görbén.



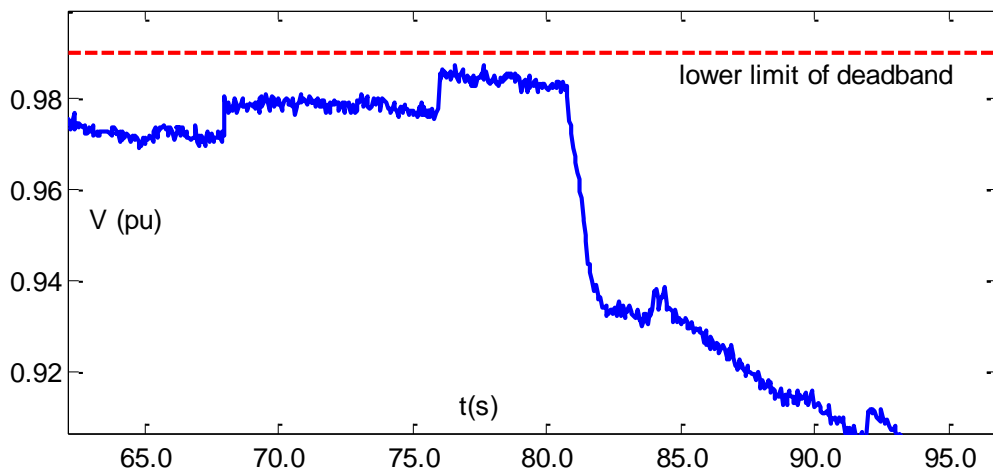
11. ábra: Stabilitás  $U(P)$  diagramja

## Rendszervédelmi sémák

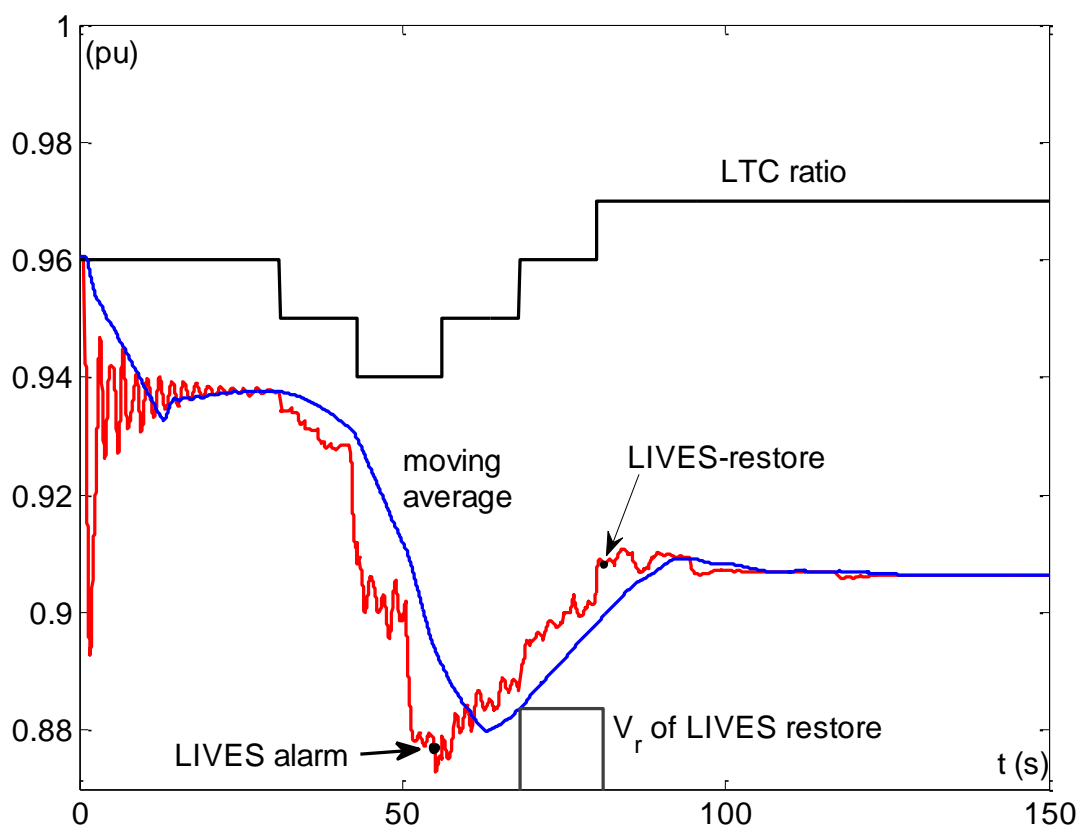
Előreláthatatlan zavarok esetén a rendszert védenünk kell, melyre a fokozatváltoztatás kiválóan alkalmas. Meg kell különböztetni a válaszalapú illetve a váratlan esemény által kiváltott okokat, hiszen ezeket eltérően kell kezelni (bizonyos speciális esetekben a fokozatszabályozás a probléma eszkálálódásához vezethet). A leginkább gyakori megoldás az alacsony feszültség szinteken az áramlás korlátozása, azonban a kontingenciák olykor nem előrejelezhetőek. A valós idejű monitorozás különösen hasznos lehet ilyen rendszerek esetén.

### Helyi felismerésű feszültségmonitorozó rendszer (LIVES)

A helyi felismerésű feszültségmonitorozó rendszer a teljes áteresztőképességet vizsgálja valós időben a működés során. Helyi működésű, tehát nem igényel kommunikációs rendszert, mindig észleli az instabil állapotot (függőségben áll), nincs hibás megszólalása és jó előrejelző képességgel rendelkezik. Egy „stabilitás-váltó” segítségével valósít meg korlátozást, amely kellően finom ahhoz, hogy ne okozzon visszacsatoló zavarokat a rendszerben.



12. ábra: LIVES rendszer működési görbéjének szemléltetése



13. ábra: Riasztás és visszaállítás menete

## Konklúzió

A fenntarthatóság érdekében újszerű szabályozó eljárások szükségesek. Aszinkron módon csatlakoztatott források elterjedése pozitív hatással lehet. A bemutatott vezérlő elemek (WPSS) és megfigyelő-beavatkozó rendszerek (LIVES) térnyerésével növelhető az ellátásbiztonság.

A műszaki problémáknak mindig műszaki megoldása kell, hogy legyen, ez pedig olykor a költséghatékonyság rovására megy. Az optimum megtalálása ezen kérdéskörben a jövő energetikájának fontos feladata.

**Az előadást szervezte:  
Halász Bálint Gergely  
Táczai István**

**Az Energetikai Szakkollégium tagjai**