

A szintetikus inercia értelmezése, elemzése

A villamosenergia-rendszer stabilitásának kérdései a növekvő megújuló penetráció fényében

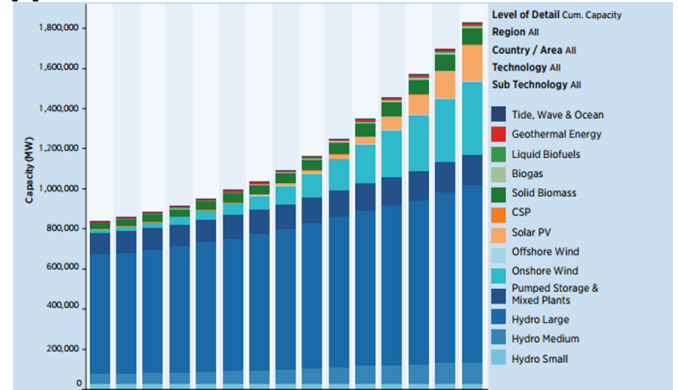
A megújuló energiaforrások térnyerésével a rendszer irányítói és üzemeltetői eddig nem ismert kihívásokkal szembesülnek. A termelésben megjelenő új technológiák komoly hányada teljesítményelektronikai átalakítókön keresztül csatlakozik a hálózatra, a közvetlen kapcsolat hiánya pedig a konvencionális rendszereknél jól ismert inercia csökkenését eredményezi. A mögöttes forgótömeg – mint egy kinetikus energiatartalék a stabilitás megőrzésére - frekvenciaváltozásokkal szemben ellenálló képességgel rendelkezik, a hatásos teljesítmények egyensúlyának felbomlásánál. A megfelelő biztonság érdekében a szél- és naperőművek betáplált teljesítményének vezérlését érdemes kiegészíteni az inercia hatását emuláló megoldással. A cikk témája a probléma fizikai hátterének bemutatása és technológiai megoldások szerepének bemutatása a jövő villamosenergia-rendszerében.

The growing share of renewable energy sources leads the system operators to previously unknown challenges. Beside the well-known issues of balancing and capacity adequacy, the stability is also essential and the electric power grid's operation must meet the expectations. Some of the emerging technologies are connecting to the grid via power converters so they are practically decoupled from the system and its frequency changes. The electric power system has not been designed for that: stability relied heavily on the inertial response of synchronous generators which decreases the rate of change of frequency (ROCOF). The rotating mass of those generators is directly coupled to the system and functions as a kinetic energy storage component which was incredibly useful. Renewable energies such as wind and solar has to be augmented with synthetic inertia to provide such a useful function or stability issues, load shedding and outages will occur. This study introduces the policy, physical and technical background, the possible role of the implemented synthetic inertia and also provides simulation results for further understanding.

Kulcsszavak: Stabilitás, inercia, megújuló energiaforrások

1. HÁTTÉR

A villamosenergia-rendszer irányítása és üzemeltetése alapvetően változik meg a megújuló energiaforrások térnyerésével. Az egyre növekvő decentralizált – és az esetenként időjárásfüggő – termelés az ellátáslánc teljes spektrumán változásokat generál. A mögöttes mozgató erő exponenciális lefolyású, ahogy az az 1. ábrán jól látható. Az International Renewable Energy Agency nemzetközi szervezet által vizsgált országokban az 1828 GW beépített teljesítmény összemérhető az 1500 GW gáz és 1880 GW szénérőművi beépített teljesítménnyel. Dániában a megújuló energiaforrások biztosították a termelés 39%-át 2014-ben, több országban regisztráltak olyan időszakot, amikor a teljes energiafelhasználást fedezte az aktuális zöldenergiából származó termelés. Ez az irány egyértelműen hasznos környezetvédelmi szempontból, a rendszerbe integrálás műszaki kérdése azonban korántsem egyszerű. Az átviteli és elosztóhálózatok rugalmasságát növelni kell, tartalékok létesítése szükséges a kiegyensúlyozásokhoz. A hosszútávú kapacitáskérdések további kérdéseket vetnek fel, melyeknél körültekintő tervezés szükséges. A felállított határfeltételeket kielégítő megoldás esetén fontos, hogy a vezérlés és üzemeltetés megfeleljen az elosztott és variábilis termelés okozta új környezetnek.

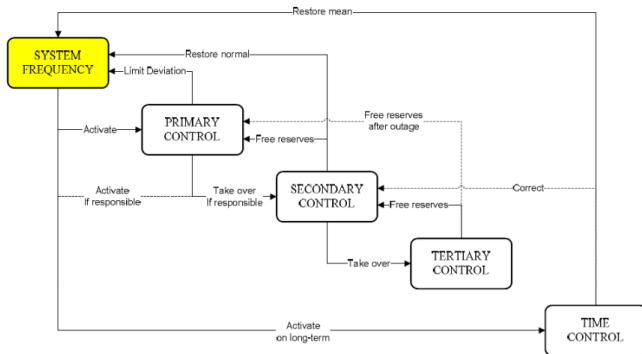


1. ábra: megújuló energiaforrások beépített kapacitásának növekedése 2001-2015 között [IRENA]

A szél- és napenergia számtalan tekintetben különbözik a konvencionális technológiáktól. A villamos paramétereik és vezérlésük kulcsszerepet játszanak a változó körülmények közt kialakítható üzemirányításban. Ezek teljesítményelektronikai átalakítókön keresztül csatlakoznak a hálózatra, amely azt jelenti, hogy fizikailag el vannak választva attól, beleértve a frekvenciaváltozásokat. A hatásos teljesítmény szabályozásának módja ezt figyelembe véve radikálisan megváltozhat, a stabilitás kérdése kritikussá válhat.

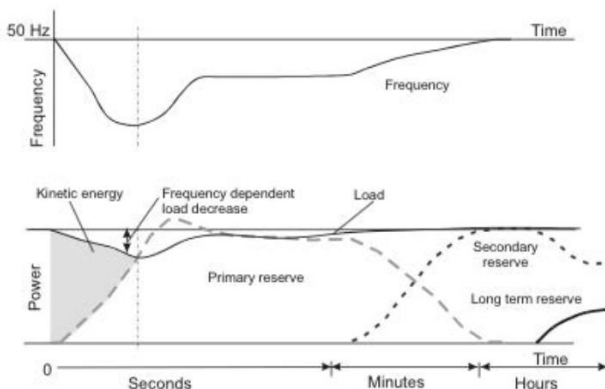
2. A HATÁSOS TELJESÍTMÉNY ÉS A FREKVENCIA KAPCSOLATA

A rendszerirányítás fő feladata a feszültség és frekvencia tűréshatáron belül tartása a rendszer minden csomópontján. Amikor a fogyasztás ugrásszerűen megnő, vagy egy erőmű leválik a rendszerről, a frekvencia csökkenni kezd. A 2. ábra szemléletesen a frekvenciaszabályozás szintjeit és azok kapcsolatát. Az egyes szintek közti különbség a reakcióidőben rejlik. Azonban még a primer szabályozás érvényre jutása előtt van egy fontos fizikai folyamat, amelyet a hálózatra közvetlenül csatlakozó szinkrongenerátorok okoznak, ez az inercia hatása. Ez kulcsfontosságú az egyensúly felbomlása utáni első néhány másodpercben, gyakorlatilag ez határozza meg a frekvenciaváltozás meredekségét (Rate Of Change Of Frequency, ROCOF). Az inercia tehát a szinkrongépek forgó tömegében tárolt kinetikus energián keresztül leadott közvetlen fizikai válasza.[1][16][27]



2. ábra: frekvenciaszabályozás szintjei és kapcsolatuk [ENTSO-E]

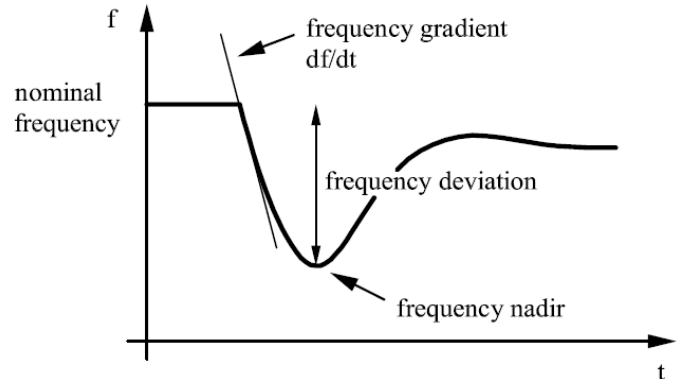
Néhány másodperc elteltével a primer szabályozás érvényre jut és a turbinaszabályozók a mechanikai teljesítmény növelésével megállítják a frekvenciacsökkenést, kialakítanak egy egyensúlyi állapotot egy új frekvenciaértéken. A szekunder szabályozás felelős a frekvencia nominális értékre emeléséért. Az egyes szabályozások hatásai frekvencia-idő diagramon a 3. ábrán láthatóak. [16][27]



3. ábra: jellemző frekvenciakép a szabályozás során [1]

A teljesítményelektronikai berendezéseken keresztül a hálózatra csatlakozó termelőegységek számának növekedésével az inercia hatása gyengül, mely meredekebb frekvenciaváltozásokhoz vezethet. Ez komoly következményekkel járhat az ellátásbiztonság és megbízhatóság tekintetében. [4]

A 4. ábrán a frekvenciaváltozás görbéjének jellemzői láthatóak. A névleges értéktől számított különbség az abszolút eltérés, a változás sebessége (gradiens) és a szélsőérték (minimális érték) a legfontosabb mutatók. Ezek alapján a frekvenciaváltozások összehasonlíthatók és értékelhetők a stabilitás szempontjából.



4. ábra: a frekvenciaváltozás fő paraméterei [1]

3. A LENGÉSI EGYENLET ÉS AZ INERCIA

A rendszerbe betáplált és a vételezett teljesítmény egyensúlya statikus esetben:

$$P_{Gen} = P_{Mech} = P_{Load} = P_{Load} + P_{Loss} \quad (1)$$

Ahol P_{Gen} a teljes betáplált villamos hatásos teljesítmény, P_{Mech} a turbinák mechanikai teljesítményének összege. P_{Load} a teljes fogyasztás, míg a P_{Loss} tag reprezentálja a veszteségeket (egyaránt MW-ban értendők)

Változás (kiesés, hirtelen terhelésnövekedés) esetén a rendszert a dinamikus egyensúlyt leíró egyenlettel vizsgálhatjuk. A lengési egyenlet egyetlen gépre:

$$P_{mi} = P_{gi} + D_i * \Delta\omega_i + \frac{dE_{KINI}}{dt} \quad (2)$$

Ahol a $\Delta\omega_i$ a gép szögsebesség különbsége rad/s egységekben. A D_i a gép rotorjára jellemző csillapítási tényező. A forgó tömeg kinetikus energiájának deriváltjaként származtatott tag az, amely az egyensúlyt megteremti a villamos és mechanikai hatásos teljesítmények különbsége közt. Ez az energiamennyiség számítható az egység látszólagos teljesítményéből és inercia állandójából is:

$$E_{KINI} = \frac{1}{2} J * \omega_n^2 = H_i * S_i \quad (3)$$

Ahol ω_n a névleges szögsebesség érték és J a tehetetlenségi nyomaték. Az inercia állandó tehát

meghatározza a frekvenciaváltozás meredekségét, a ROCOF nagyságát (a nagyobb H csökkenti a szöggyorsulást), azaz a frekvenciaváltozás kezdeti pillanatának ismeretében H meghatározható:

$$H_i = \frac{\Delta P_i(t_0) f_n}{2 \frac{df_i}{dt} \Big|_{t=t_0}} \quad (4)$$

A 4. egyenletben az egyes értékek az i -vel jelölt generátoregységre vonatkoznak. A teljes rendszer inerciája az egyes termelőegységek és fogyasztók inerciájának összessége. Amennyiben a szinkrongenerátorok részesedése csökken a termelési mixben, a rendszer inerciája drasztikusan csökken, mely hosszabb lefolyású és nagyobb amplitúdójú frekvencialengésekhez vezethet. [4]

$$S_n H = S_{n1} H_{n1} + S_{n2} H_{n2} + \dots + S_{nm} H_m \quad (5)$$

4. A SZINTETIKUS INERCIA BIZTOSÍTÁSÁNAK TECHNOLÓGIAI LEHETŐSÉGEI

A szintetikus inercia lényege, hogy a teljesítményelektronikai berendezéseken keresztül a hálózatra csatlakozó termelők kimeneti teljesítményét úgy befolyásoljuk egy vezérlésen keresztül, mintha azok is rendelkeznének forgó tömeggel. Ez emulálja a szinkrongenerátorok hatását. Több életképes megoldás is kínálkozik ennek megvalósítására, ez a fejezet összegzi a megújuló energiákhoz köthető példákat. Mindazonáltal a közvetlen fizikai válasz nem reprodukálható tökéletesen, a megoldások teljesítménylengésekhez, mechanikai elemek túlterheléséhez vezethetnek, tehát az optimális paraméterválasztás kulcsfontosságú.

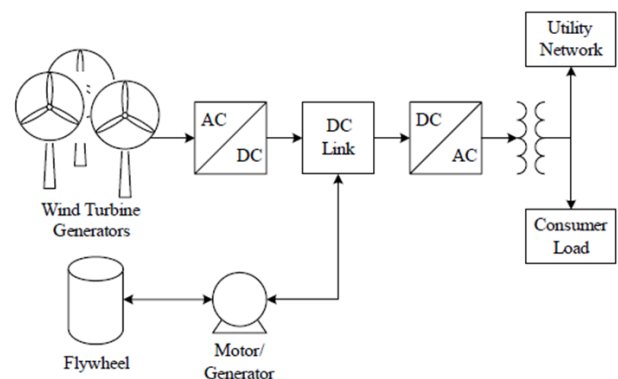
4.1. Szélenergia

A szélerőművek rendelkeznek forgó tömeggel, azaz lapátjaikban tárolnak kinetikus energiát. Az állandó sebességű típusok nem használhatóak megfelelően szabályozásra. A változtatható sebességű szél turbinák (Variable Speed Wind Turbines, VSWT) rendelkeznek a megfelelő elemekkel. 2 fő típust különböztethetünk meg, a kétoldalról táplált aszinkron gépes (Doubly-Fed Induction Machine) és a Full Converter (FC) kialakítást. A közvetlen válasz hiánya ellenére ezek a termelők kiválóan felhasználhatók szintetikus inercia szolgáltatására. A vezérlés egy plusz párhuzamos ágként illeszthető az alapvezérléshez. Ez gyakorlatilag egy frekvenciamérés alapján történő teljesítményváltoztatást jelent, mely segítségével a forgó tömeg energiája felhasználható szabályozási célokra. Ha a frekvencia egy bizonyos érték alá csökken (vagy egy bizonyos változási sebességgel csökken), a vezérlés plusz mechanikai teljesítményt nyer a forgás lassításával. Ez természetesen a frekvencia növekedésekor is hasznosítható. A vezérlés kialakítása során ügyelni kell a műszaki körülmények adta határfeltételekre, valamint a tényleges igény alapján

megfelelő aktivációs sémát kell kialakítani. A vezérlés miatt elvesztett szélenergia az elérhető kutatási eredmények alapján nem haladja meg az 1%-ot. Az inercia állandó egy szélerőmű esetén 2-6 s közé esik, mely összemérhető a szinkrongenerátorokéval (2-10 s). [14][4][1]

4.2. Napenergia

A fotovoltaikus rendszereknek nincsen mozgó alkatrésze, mely a forgó tömegekhez hasonló tulajdonságokkal rendelkezne. Ezáltal önmagában képtelen az inerciális válaszra. Az átalakítók a maximális energiamennyiség rendszerbe juttatására törekzenek. További probléma, hogy a teljesítményelektronika csak egy szűk frekvenciasávon belül tartja a hálózaton a berendezést, egyébként izolálja azt, ezzel tovább rontva a helyzetet a rendszer frekvenciaváltozásának szemszögéből. Mindazonáltal az energiatárolás nyújtotta széles lehetőségek segítségével találhatunk a stabilitás megőrzésére – és a naperőmű paramétereivel arányos szintetikus inercia biztosítására – alkalmas berendezéseket. A legegyszerűbb választás a lendkerekes energiatároló, mely pontosan a kinetikus energia tárolásának elvén működik. Szuperkapacitások és akkumulátorok egyaránt rendelkeznek a gyors válaszidővel és a szükséges kimeneti teljesítményleadási képességgel. Egy optimális méretű és beállítású energiatárolóval kiegészítve a naperőművek is bevonhatók a stabilitásmegőrzésbe (5. ábra).



5. ábra: energiatárolóval megvalósított szintetikus inercia vázlata [5]

4.3. Egyenáramú hálózatok

Az egyenáramú hálózatok számos előnnyel rendelkeznek a stabilitás szempontjából. A decentralizált struktúra maga után vonja ezek kiaknázásának ötletét is. A teljesítményelektronikai berendezések – megfelelő kommunikációs egységekkel felvértezve – intelligens megoldásokat ígérnek a vezérlésben. Egy igen izgalmas lehetőség a szintetikus inercia biztosítására a nagyfeszültségű egyenáramú hálózatok (High Voltage Direct Current, HVDC) belső

vezérlésének kiegészítése. Ez a megoldás széles skálán biztosíthatja a szükséges inercia állandókat. [24]

5. VEZÉRLÉSI ELVEK A SZINTETIKUS INERCIA KIALAKÍTÁSÁRA

A szintetikus inercia képzéséhez valamilyen energiatárolásra alkalmas elemre van szükségünk, amely képes a hatásos teljesítmény megváltoztatására meghatározott ideig. Mivel ez nem egy közvetlen válasz, a rendszer frekvenciája alapján szükséges vezérelni a teljesítményt.

A legegyszerűbb megoldás az inerciális válasz emulálása, azaz egységnyi frekvenciaváltozáshoz egy adott teljesítményválasz tartozik. A zaj komoly probléma lehet egy ilyen kialakítás esetén és az alacsonyfrekvenciás teljesítménylengések is visszahathatnak rá a kiegyenlítődéskor, tehát a vezérlő és beavatkozó jelek megfelelő szűrése és beállítása elengedhetetlen.

Egy másik megoldás lehet a rendszerfrekvencia számítása a generátorok forgási sebessége alapján. Ez komoly kommunikációs infrastruktúrát igényel, hogy a részrendszerekről megfelelő információhoz jussunk, de van néhány életképes megoldás a becslésre (Kálmán szűrő, FIR szűrő). [2]

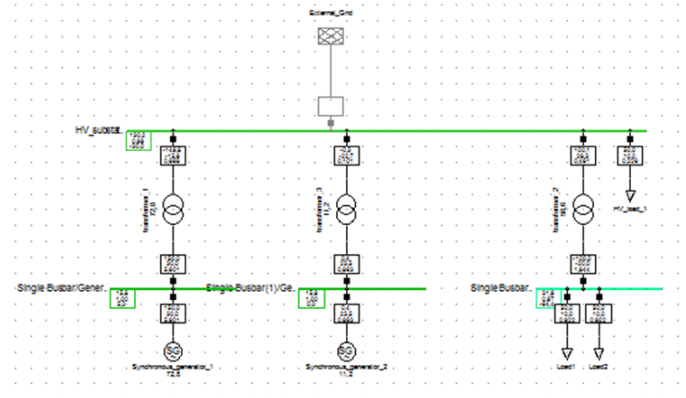
A kimeneti teljesítmény változtatása a frekvencia abszolút eltérése alapján is történhet. Ez gyakorlatilag egy frekvenciatámogatást biztosító rendszer, mely alapján akár a berendezés beállítható szekunderszabályozó üzembe is. Hátrány, hogy ekkor a kezdeti gradiensre nem gyakorol hatást a vezérlés, de a legmélyebb frekvencia csökkentésére alkalmas lehet. Előnye, hogy sokkal kisebb terhelést jelent az egyes elemek számára. Fontos, hogy az aktiváció után a berendezés egy ideig biztosítja ezt a megnövekedett kimenetet, de ez az időtartam a szintetikus inercia koncepcióján belül rövid (10-20 s legfeljebb), figyelembe kell venni a lejáratkör bekövetkező teljesítményváltozást is. Ez akár komolyabb problémákhoz is vezethet, hiszen alapvetően alacsonyabb frekvenciaértékről indul a változás. [2]

Egy további lehetséges vezérlés alapja, hogy a kimeneti teljesítmény alapvetően kisebb, mint amire a termelő képes, ezáltal mindig van egy szabályozási tartalék (pl.: a névleges teljesítmény 3-6%-a), mely felhasználható droop control üzemben. Energiatárolóval kiegészítve hatékonyabbá tehető a megoldás. [2][4]

Mindegyik lehetőségnek megvan a maga előnye és hátránya. A változásra reagáló vezérlés jól imitálja a fizikai hatást, de lengéseket okozhat. Az abszolút eltérési aktiváció egyszerű és kevésbé terheli meg a berendezést, de könnyen okozhat nagyobb problémát hibás beállítás esetén. A teljesítmény egy részének tartalékolása folyamatos veszteség, de általános forgótartalékként is értelmezhető. [1][2]

6. DEMONSTRÁCIÓS HÁLÓZAT AZ INERCIA ÉS A PRIMER SZABÁLYOZÁS HATÁSELEMZÉSÉRE

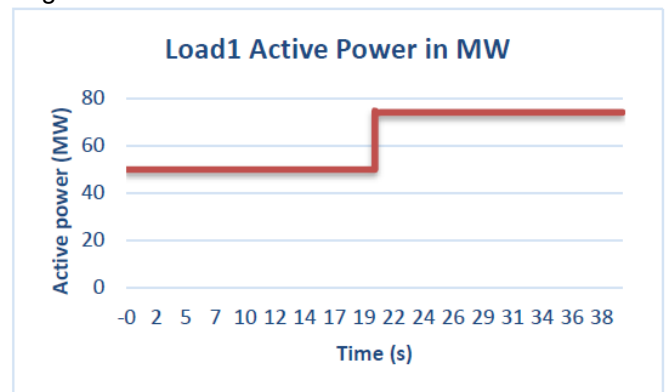
A következőkben egy tesztrendszer kerül bemutatásra, mely a DigSilent Power Factory v15.1 programmal készült és célja a dinamikus szimulációs lehetőségeken belül az inercia és a primer szabályozás hatásainak elemzése. A hálózat topológiája a 6. ábrán látható. 2 gázturbina adja a szinkrongenerátoros termelést (210 MVA, beépített típus, turbinaszabályozóval és gerjesztésszabályozóval ellátva) 150 MW és 50 MW kezdeti kimeneti teljesítményre állítva. Egy koncentrált terhelés 120 kV-on 100 MW hatásos teljesítménnyel, és koncentrált terhelés 33 kV-on egyaránt 50 MW hatásos teljesítménnyel. A terhelések frekvenciafüggők ($k_{pf}=1$, $k_{qt}=-0,5$). A transzformátorok szintén beépített típusok, elégséges átvivő képességgel, hogy ne korlátozzák a többi hálózati elemet a vizsgálatok során. A topológián látható mögöttes hálózat elem inaktív, tehát a hálózatrész szigetüzemben van. Minden szimuláció RMS típusú, 40 s teljes időt ölel fel, a változások pedig 20 s időpontban következnek be.



6. ábra: tesztrendszer topológia

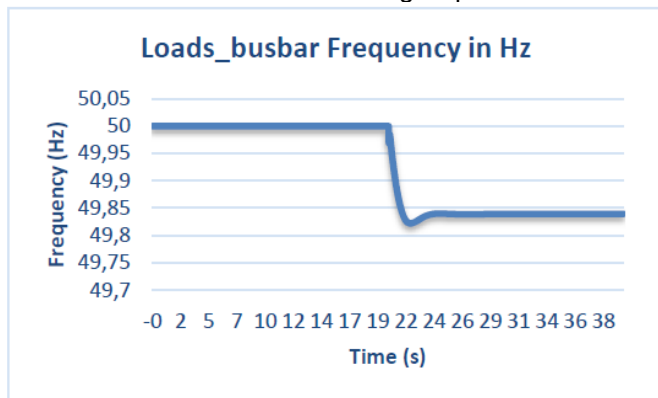
6.1. Megnövekedett fogyasztás

A 7. ábrán látható, hogy a középfeszültségen az egyik fogyasztó teljesítménye ugrásszerűen 20 MW-al megnő.

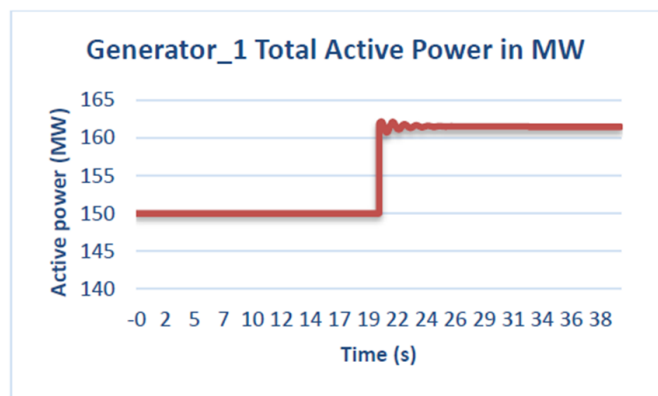


7. ábra: ugrásszerű fogyasztásnövekedés a szimuláció során

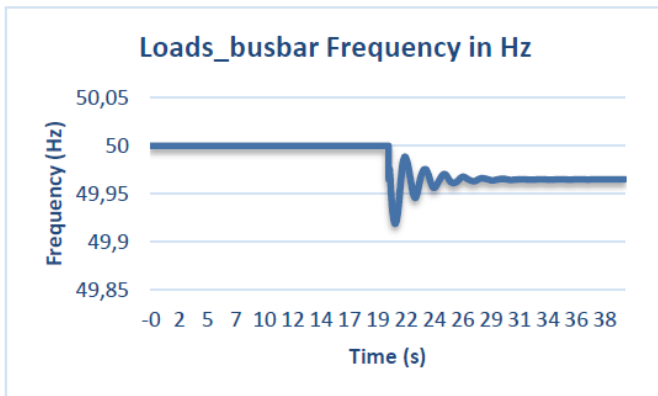
A 8. ábrán látható a terhelésváltozás okozta frekvenciakép. A legkisebb frekvenciaérték 49,839 Hz. A 9. ábrán látható az egyik generátor kimenete, melyen megfigyelhető a turbinaszabályozó működése. Ebben a szimulációs környezetben nincs olyan elem, mely szekunder szabályozást valósítana meg, így az újonnan kialakult frekvenciaérték lesz a végállapot is.



8. ábra: ugrásszerű fogyasztásnövekedés hatására kialakuló frekvenciakép



9. ábra: generátor kimeneti teljesítménye a terhelésváltozás folyamán

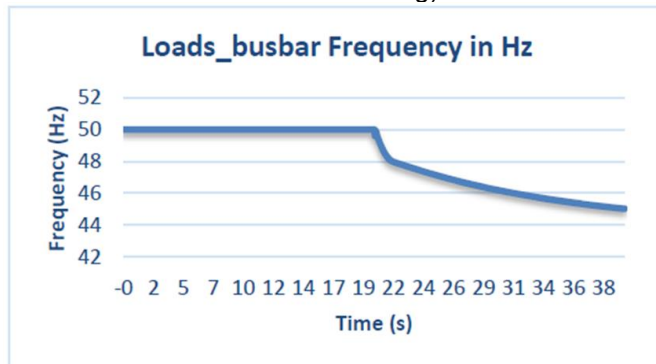


10. ábra: statizmus változtatásának hatása a frekvenciaképre

A 10. ábrán a generátor statizmusának változtatása (R paraméter csökkentése) okozta lengésváltozás látható. A megfelelő paraméterbeállítás a szintetikus inercia képzése során kulcsfontosságú lesz.

6.2. Termelőegység kiesése

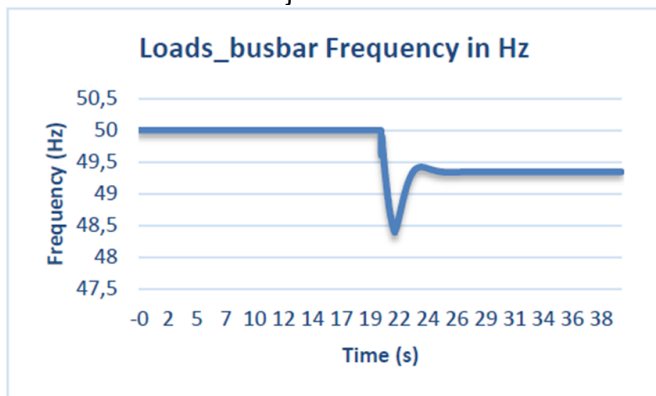
Nagyobb zavarhelyzetet okozhat egy generátor leválása a hálózatról. Ebben a tesztrendszerben a visszamaradó 1 generátor nem elégséges a fogyasztók ellátásához, így a rendszer összeomlik (nincsenek frekvenciaalapú védelmek implementálva az egyes elemeken, tehát effektíve a leválás nem történik meg).



11. ábra: frekvencia-összeomlás generátor kiesése esetén

6.3. Fogyasztói terheléskorlátozás szerepe

A 6.2-ben ismertetett esetekben a frekvenciaalapú fogyasztói terheléskorlátozás (FTK) megoldás lehet a rendszer integritásának megőrzésére. Fontos, hogy az ilyen megközelítések ellentmondanak a villamosenergia-rendszer alap célkitűzésének, a fogyasztók ellátásának, de a rendszer egészére nézve ez a megoldás is megfelelő lehet. A 12. ábrán látható, hogy a generátor kiesése után a rendszer képes stabilizálódni, de ez FTK működés hatására alakulhat ki (a teljes 120 kV-ra csatlakozó terhelés leválik). Az FTK adaptivitásának növelése tökéletes párja lehet a szintetikus inercianak a jövő hálózatában.

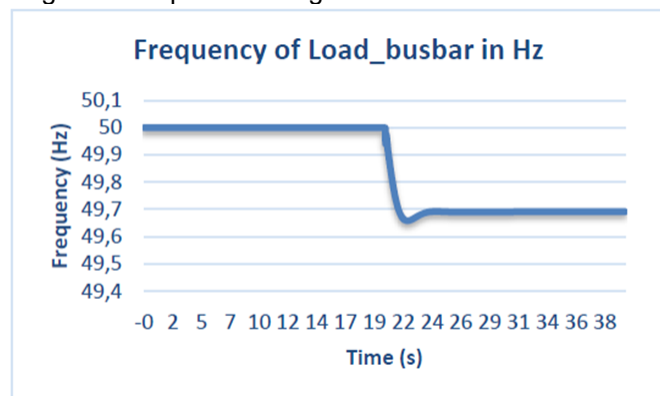


12. ábra: FTK hatása a frekvenciaképre generátor kiesése esetén

6.4. Megújuló energiaforrások

Ebben a szcenárióban az egyik gázturbinát beépített típusú szélörmű park helyettesíti, megegyező teljesítménnyel. A kimeneti teljesítményvezérlés a szélörmű park esetén a kihasználás maximalizálására törekszik. Jól látható, hogy a frekvenciaváltozás

gradiense és az abszolút eltérés maximuma is nagyobb, mint a 6.1. esetben. A szintetikus inercia megvalósítása ebben az esetben segíthetett volna a rendszer megfelelő állapotának megőrzésében.



13. ábra: frekvenciakép szélerőmű park beiktatása és fogyasztásnövekedés esetén

7. KONKLÚZIÓK

A megújuló energiaforrások térnyerésével a rendszer teljesítményegyensúlyának felborulása esetén kialakuló frekvenciakép megváltozik. A kérdéskör aktualitását jól mutatja, hogy az európai rendszerirányítókat összefogó szervezet, az ENTSO-E a 2015-17 közti munkatervének kiemelt témái közé emelte az inercia problémáját. Több technológiai lehetőség kínálkozik a változó sebességű szélerőművek esetén, valamint az energiatárolás és az egyenáramú rendszerek terén. Ahogy az 5. fejezetben olvasható, nincs ideális megoldás a frekvenciaszabályozás megvalósítására, több kialakítás együttes alkalmazásából lehet egy műszaki optimumot képezni a hatékony üzemirányításhoz. A fogyasztói terheléskorlátozások adaptívva tétele fontos kiegészítője lehet ezeknek a megoldásoknak. A rendszerszemlélet kiemelten fontos a megfelelő kialakításhoz. A technológiai és irányítási lehetőségek, valamint a hatáselemzés, amelyet ez a cikk összefoglalt, kiváló alapként szolgálhat egy rendszerszintű frekvenciaszabályozás kialakításához, mely magában foglalja a gradiens viselkedést, abszolút eltérések korlátozását, megfelelő paraméter beállítást, adaptív FTK alkalmazást és a klasszikus szinkrongenerátoros szabályozásokat.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] **Johan Björnstedt**: *Integration of Non-synchronous Generation (Doctoral Dissertation)*, 2012.
- [2] **IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions**: *Definition and Classification of Power System Stability (IEEE Transactions on Power Systems)*, 2004.
- [3] **F. Gonzalez-Longatt, E. Chikuni, E. Rashayi**: *Effects of the Synthetic Inertia from Wind Power on the Total System Inertia after a Frequency Disturbance*
- [4] **Toshio Inoue, Haruhito Taniguchi, Yasuyuki Ikeguchi, Kiyoshi Yoshida**: *Estimation of Power System Inertia Constant and Capacity of Spinning-reserve Support Generators Using Measured Frequency Transients (IEEE Transactions on Power Systems)*, 1997.
- [5] **Gauthier Delille, Bruno Francois, Gilles Malarange**: *Dynamic Frequency Control Support by Energy Storage to Reduce the Impact of Wind and Solar Generation on Isolated Power System's Inertia (IEEE Transactions on Sustainable Energy)*, 2012.
- [6] **Andreas Ulbrig, Theodor S. Borsche and Göran Andersson**: *Impact on Low Rotational Inertia on Power System Stability and Operation*, 2014.
- [7] **National Renewable Energy Laboratory, Yingchen Zhang, Vahan Gevorgian, Erik Ela, Vikas Singhvi, Pouyan Pourbeik**: *Role of Wind Power in the Primary Frequency Response of an Interconnection*, 2013.
- [8] **Gonzalez Longatt**: *Activation schemes of synthetic inertia controller on full converter type wind turbine (type 4) (Loughborough University Institutional Repository)*, 2015.
- [9] **IEEE Power System Dynamic Performance Committee, Power System Stability Controls Subcommittee, Benchmark Systems for Stability Controls Task Force**: *Benchmark Systems for Small-Signal Stability Analysis and Control (IEEE PES Technical Report PES-TR18)*, 2015.
- [10] **Power System Dynamic Performance Committee, Power System Stability Subcommittee, Test Systems for Voltage Stability and Security Assessment Task Force**: *Test Systems for Voltage Stability Analysis and Security Assessment (IEEE PES Technical Report PES-TR19)*, 2015.
- [11] **H.R. Chamorro, M. Ghandhari, R. Eriksson**: *Wind Power Impact on Power System Frequency Response (North American Power Symposium)*, 2013.
- [12] **Slavomir Seman, Raimo Sakki (ABB)**: *Inertial response – generators and the power electronics*
- [13] **Adam Stock, William Leithead (University of Strathclyde)**: *Providing Grid Frequency Support Using Variable Speed Wind Turbines with Augmented Control*, 2012
- [14] **Lisias V. L. Abreu, Mohammad Shahidehpour**: *Wind Energy and Power System Inertia (IEEE PES General Meeting)*, 2006.
- [15] **Jacob Aho, Andrew Buckspan, Jason Laks, Yunho Jeong, Fiona Dunne, Lucy Pao, Paul Fleming, Matt Churchfield, Kathrin Johnson (National Renewable Energy Laboratory, University of Colorado)**: *Tutorial of Wind Turbine Control for Supporting Grid Frequency through Active Power Control*, 2012.
- [16] **Francisco M. Gonzalez-Longatt**: *Effects of the Synthetic Inertia from Wind Power on the Total System Inertia: Simulation Study (2nd International Symposium on Environment-Friendly Energies and Applications EFEA)*
- [17] **Xueguang Wu, Yibin Zhang, Atputharajah Arulampalam, Nick Jenkins**: *Electrical Stability of Large Scale Integration of Micro Generation into Low-*

voltage Grids (*International Journal of Distributed Energy Resources*), 2005.

- [18] **Sudarshan Dahal, Nadarajah Mithulanathan, Tapan Kumar Saha:** Assessment and Enhancement of Small Signal Stability of a Renewable Energy Based Electricity Distribution System (*IEEE Transactions on Sustainable Energy*), 2012.
- [19] **M. Ribbens-Pavela, P. G. Murthy, J. L. Howard, J. L. Carpentier:** Transient Stability Index for On-line Stability Assessment and Contingency Evaluation (*International Journal of Power and Energy Systems*), 1982.
- [20] **DigSILENT Power Factory** User Manual for version 14.2, 15.1.
- [21] **Frei Teng, Goran Strabac:** Evaluation of Synthetic Inertia Provision from Wind Plants (*IEEE PES General Meeting*), 2015.
- [22] **Jan Van de Vyver, Jeroen D. M. De Kooning, Bart Meersman, Lieven Vandevelde, Tine L. Vandoorn:** Droop Control as an Alternative Inertial Response Strategy for the Synthetic Inertia on Wind Turbines (*IEEE Transactions on Power Systems*), 2016.
- [23] **Xudan Liu, Andreas Lindemann:** Coordinated Control of VSC-HVDC Connected Offshore Windfarms for Enhanced Ability of Providing Synthetic Inertia (*IEEE 6th Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems PEDG*), 2015.
- [24] **Thibaut Kovaltchouk, Vincent Debusschere, Seddik Bacha, Mirko Fiacchini, Mazan Alamir:** Assessment of the Impact of Frequency Containment Control and Synthetic Inertia on Intermittent Energies Generators Integration (*11th Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies EVER*), 2016.
- [25] **European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E):** Future System Inertia (Nordic Report)
- [26] **National Renewable Energy Laboratory, E. Ela, V. Gevorgian, P. Fleming, Y. C. Zhang, M. Singh, E. Muljadi, A. Scholbrook, J. Aho, A. Buckspan, L. Pao (University of Colorado), V. Singhvi, A. Tuohy, P. Pourbeik, D. Brooks, N. Bhatt (Electric Power Research Institute):** Active Power Controls from Wind Power: Bridging the Gaps, 2014.