

Szinkrongenerátorok és inverteres termelőegységek karakterisztikus jellemzőinek összehasonlítása

A megújuló energiaforrások térnyeréséhez kapcsolódó rendszerintegrációs feladatok napjaink villamosenergia-rendszerének egyik legnagyobb kihívását jelentik. A termelőegységek karakterisztikus tulajdonságainak változása alapvetően befolyásolja a tervezési, irányítási és üzemeltetési folyamatokat. Kutatásom célja összehasonlítani a hagyományos, hálózatra közvetlenül csatlakozó, jelentős forgó tömeggel rendelkező szinkrongenerátoros termelőegységeket és a teljesítményelektronikai átalakítókkal rendelkező berendezések viselkedését terhelésugrás esetén. A hálózattámogató funkciók megvalósításával az átalakítók olyan szolgáltatások biztosítására lehetnek képesek, melyek hozzájárulnak a rendszerszintű költséghatékonysághoz, minőségi szolgáltatáshoz és ellátásbiztonsághoz.

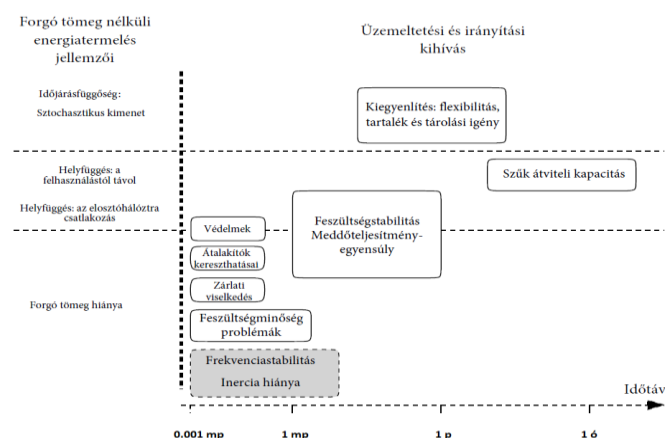
Nowadays, one of the key challenges regarding electric power systems is the effective integration of renewable energy sources. The characteristic changes of the generation mix influence the fundamentals of planning, controlling and operation processes. The scope of this research is to compare the conventional synchronous generators – which are directly coupled to the grid and have rotating mass – to power electronic converter based technologies during rapid load changes. Grid supporting functions of the converters could provide solutions to enhance the system level cost-effectiveness, power quality and security of supply.

Kulcsszavak: Szinkrongenerátor; teljesítményelektronika; megújuló energiaforrások; inercia

1. BEVEZETÉS

A villamosenergia-rendszer termelői összetételének változása napjaink egyik legkomolyabb kihívása az üzemeltetés és irányítás során. A megújuló energiaforrások közül is kiemelkedő ütemben növekszik a nap- és szélerőművek aránya, melyek merőben más karakterisztikus tulajdonságokkal rendelkeznek a

konvencionális szinkrongenerátorokhoz képest. Az időjárásfüggő betáplált teljesítmény mellett fontos kitérni a teljesítményelektronikai átalakítók szerepére is. Az ellátásbiztonság és a minőségi kritériumoknak való megfelelés érdekében a rendszerintegráció következő lépése a hálózattámogató funkciók megvalósítása, a csatlakozási előírások fejlesztése és a rendszerszintű szolgáltatásokba való bevonás lesz. Ez szükséges feltétele annak, hogy a megújuló energiaforrások részaránya tovább növekedhessen, és valóban hatékonyan működve váljanak elérhetővé a klímapolitikai célok. [1] Az 1. ábra kitérően összegzi a főbb kihívásokat az üzemeltetés és irányítás területén. A legrövidebb, másodpercen belüli időtávon stabilitás, villamosenergia-minőség, illetve védelmi működés tekintetében szükséges adaptálódni, hosszabb távon a feszültség szabályozás (~másodpercek, percek időtartománya) és a kiegyenlítés, a rugalmasság megteremtése a fő feladat. Hosszabb időtávon a rendszer topológiai korlátait szükséges felülvizsgálni a megváltozott, elosztottabb termelési struktúra fényében. [2]



1. Ábra. Forgó tömeg nélküli villamosenergia-termelés rendszerintegrációs kihívásai [2]

A cikkben bemutatott kutatómunka a köszönetnyilvánításban megjelölt projekt keretében jött létre. A teljesítményelektronikai átalakítók modellezésével foglalkozó munkacsoport tagjaként feladatom a szinkrongenerátoros és inverteres termelőegységek tulajdonságainak összehasonlítása és frekvenciastabilitást támogató funkciók modellfejlesztése. A kapcsolódó inverter modelleket a munkacsoport további tagjai készítették és tesztelték.

A cikk további felépítése a következő: a második fejezet a szinkrongenerátorok modellezésével kapcsolatos irodalomkutatás rövid kivonata és a rendszerek dinamikus viselkedésének lengési egyenlet alapú leírása. A harmadik fejezet bemutatja az inverterek modellezéséhez kapcsolódó alapismereteket. A negyedik fejezet az összehasonlító szimulációs vizsgálatokat és azok eredményeit tartalmazza, míg az ötödik fejezet a kutatás főbb konklúzióit foglalja össze.

2. SZINKRONGENERÁTOROS VILLAGENERGIA-TERMELÉS

A nagyteljesítményű szinkrongenerátorok kezdetektől fogva domináns szerepet töltek be a villamosenergia-termelésben. A fizikai kialakításuk ezáltal a villamosenergia-rendszer tervezését, üzemirányítását és üzemvitelét meghatározó módszerek fejlesztésének alapeleme volt. Közvetlen hálózati kapcsolatukból kifolyólag a villamos és mechanikai paraméterek közvetlen összefüggésben vannak, egy elektromechanikai rendszert képeznek. A váltakozó áramú gépek működésének alapja minden esetben két szinkron forgó mező, vagy szemléletesen „együttlutó” pólusrendszer. Ez szükséges az állandó nagyságú nyomaték képzéséhez. A tengelyek közt szögeltérés előállhat, de fordulatszámeltérés nem lehetséges. Amennyiben ez mégis bekövetkezik, a gép a hálózat oldaláról szemlélve gyakorlatilag rövidzárnak tekinthető, lengő nyomaték keletkezik. A háromfázisú szinkrongenerátorok kialakítástól függetlenül két fő részből állnak. Az egyik a lemeztelt állórész, melynek háromfázisú tekercselése (az armatúra tekercselés) a hálózathoz csatlakozik, a légrésben pedig szinkron fordulatszámú mezőt (armatúra mező) hoz létre. A szimmetrikus háromfázisú rendszer a tekercsek térbeli elhelyezése és a feszültségek időbeni eltolása révén valósul meg. A másik fő rész a forgórész, melynek egyetlen tekercse egyenárammal táplált. A forgórész mező és a forgórész maga relatív nyugalomban van állandósult állapotban. Típusait tekintve a forgórész lehet hengeres és kiálló pólusú. [3] [4]

A szinkrongépek matematikai leírása során az úgynevezett Park (vagy Clarke) transzformációt (dq0, vagy d-q néven is ismert) alkalmazzák, mely a mágneses körök és a forgórész szimmetriájára támaszkodik. A direkt (d) tengely a mágneses északi pólus irányába mutat, míg a kvadratúra (q) tengely 90°-al megelőzi a d tengelyt térben az Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) definíciója alapján, gyakorlatilag a keresztirányt jelöli. [3] [4]

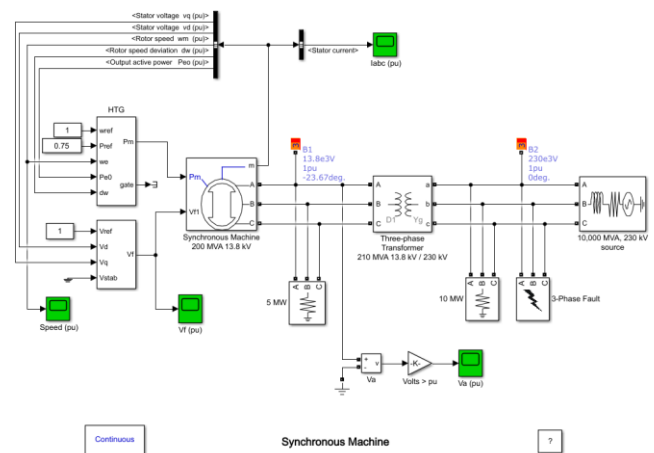
A szinkrongenerátorok leírásakor különböző üzemi állapotokban, illetve eltérő vizsgálati módszerek esetén más-más modell alkalmazható. A modellek teljes levezetését jelen cikk nem tárgyalja, a hivatkozott irodalmakban ([3] [4] [5]) ezek részletesen fellelhetők. Az állandósult állapot leírására az egyszerűsített U_p-X_d modellt alkalmazhatjuk. Származtatásakor kihasználható az unilaterális jelleg, az állórész egy fázistekercse így nyugvó helyettesítő áramkörrel leképezhető. A forgórész póluskerék hatása pedig a pólusfeszültség indukálása, mely ideális feszültségforrásként képezhető le. [3] [4]

Szinkrongenerátorok esetén hatásos teljesítmény a turbinatelsítmény függvénye, míg a meddő teljesítmény a pólusfeszültségé (és ezen keresztül a gerjesztőáramé). Az állandó kapcsolófeszültség fenntartásához a gerjesztőáramon keresztül szabályoznunk kell a pólusfeszültséget. A

szinkrongenerátor forgórészének a hálózati feszültséghez képesti szöghelyzetét elsősorban a hatásos teljesítmény, másodsorban pedig a gerjesztés adja meg. A forgórész áramának csökkentése növeli a terhelési szöveget, a gerjesztés növelése csökkenti azt. [3] [4] [5]

Az elektromechanikus tranziensek vizsgálatához használható az úgynevezett E'-X' modell. Ilyen üzemi állapot akkor következik be, ha a generátor kapcsain a hatásos teljesítmény ugrásszerűen megváltozik (a terhelő impedancia változik valamilyen kapcsolás, kiesés, terhelésugrás hatására). Mivel a vasmag fluxusa nem változhat ugrásszerűen, a megváltozott áram- és feszültségértékek létrejötte után időre van szükség, mire az ahhoz tartozó fluxuskép is kialakul. Ilyenkor alkalmazhatjuk a generátor tranziens helyettesítő képét (a hiba utáni rövid, néhány tized másodperc hosszú szubtranziens eseményeket a modell nem képezi le). Ekkor az eredő fluxus jelentős része a légrésben záródik, melynek mágneses vezetőképessége lényegesen kisebb, mint a vastesté, a szinkrongép kapcsain mérhető impedancia ennek következtében erőteljesen lecsökken (~10%), amely már a szórási reaktanciával összemérhető érték. A tranziens reaktancia mögötti E' feszültséget időben állandónak tekintjük (hatékony gerjesztésszabályozást feltételezve). [4] [6]

A számítógéppel támogatott modellezés lehetőségét biztosít a bemutatott modelleken túlmutató, komplex megoldások tesztelésére és összehasonlítására is. A MATLAB szoftverkörnyezetben rendelkezésre áll egy beépített modell a szinkrongenerátoros rendszer vizsgálatára (2. ábra). Ez lehetőséget biztosít egy egyszerűen paraméterezhető referencia vizsgálat létrehozására a szinkrongenerátor esetére, mely a 4. fejezetben bemutatott szimulációkban került felhasználásra.



2. Ábra. MATLAB generátor modell blokkvázlata [7]

A modell rendelkezik előre paraméterezett gerjesztés- és turbinaszabályozóval. Meg lehet adni továbbá a mechanikai bemenet típusát (teljesítményjel, szögsebesség avagy egy mechanikus forgás port) illetve nem előre definiált modellek esetén kiválasztható,

hogy kiálló pólusú vagy hengeres forgórészű egységet vizsgálunk. Megadhatók a szinkron, tranziens és szubtranzien reakanciák a d-q irányban, valamint a szivárgási reaktancia, a tranziens és szubtranzien időállandók (rövidzárás avagy üresjárás esetén), valamint az állórész ellenállás, az inercia konstans, súrlódási tényező és a póluspárszám. [7]

2.1 A lengési egyenlet

A szimulációs vizsgálatok egyik fő tárgya a szinkrongenerátorok viselkedése a hatásos teljesítmények ugrásszerű megváltozása esetén. Ilyenkor a generátorok forgó tömegükből fakadóan mechanikai fordulatszámuk változásából eredően, mint egyfajta kinetikus energiatároló alakítják ki a dinamikus egyensúlyi állapotot a rendszerben. Statikus egyensúlyi állapotban a hatásos teljesítmények egyensúlya a névleges frekvencián valósul meg, a villamosenergia-termelői összetételt teljes mértékben szinkrongenerátorosnak feltételezve a mechanikai teljesítmények megegyeznek a rendszerbe táplált villamos hatásos teljesítményekkel gépegyeségenként, továbbá ez megegyezik a hatásos teljesítményfelvétellel (rendszerterhelés, beleértve a veszteségeket is) is. A rendszer dinamikus egyensúlyi állapotában a lengési egyenlettel írható le:

$$P_{mi} = P_{gi} + D_i \Delta \omega_i + \frac{dW_{KINi}}{dt} \quad (1)$$

Ahol P_{mi} egy gép mechanikai teljesítménye, P_{gi} egy gépegyeség hatásos villamos teljesítménye, D_i a gépre vonatkozó csillapítási tényező, ω a körfrekvencia, míg W_{kin} a gépegyeségben tárolt kinetikus energia. Az egyenlet kiterjeszhető egy rendszerrészre is, az úgynevezett egység helyettesítőképet alkalmazva. Ilyenkor tehát nem a betáplált és vételezett hatásos teljesítmények egyensúlya bomlik fel, hanem a gépegyeségeket tekintve nem egyezik meg a mechanikai és villamos teljesítmény, a kettő közti különbséget pedig a forgó tömeg biztosítja. (1)-et átalakítva a frekvencia és a hatásos teljesítmények megváltozása közti kapcsolat meghatározható [4] [6]:

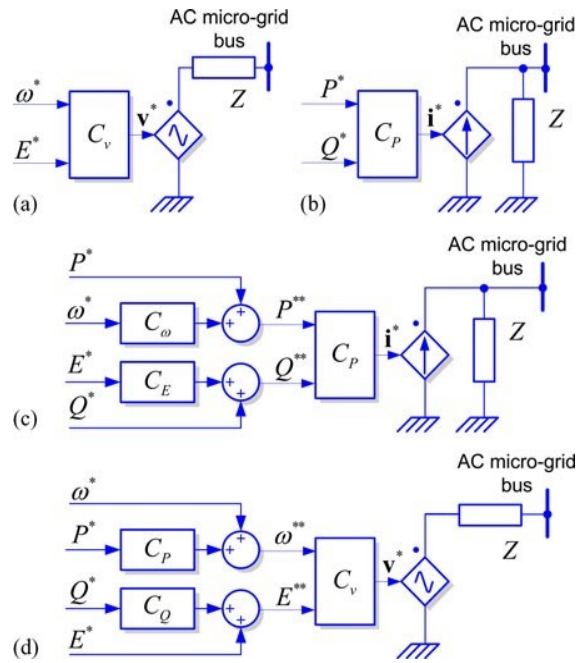
$$\frac{2Hd^2\delta}{\omega_n dt^2} = T_m + T_e - D \left(\frac{\Delta\omega}{\omega_n} \right) \quad (2)$$

Ahol T_m a mechanikai, T_e a villamos nyomaték, ω_0 a névleges körfrekvencia, H az inercia konstans, δ pedig az aktuális szöghelyzet. [4] [6]

3. TELJESÍTMÉNYELEKTRONIKAI ÁTALAKÍTÓK

A teljesítményelektronikai átalakítóknak három fő csoportja különíthető el (3. ábra) [8]:

- Grid forming – hálózatképző
- Grid feeding – hálózatra tápláló
- Grid supporting – hálózattámogató



3. Ábra. Konverter alaptípusok: (a): hálózatképző, (b): hálózatra tápláló, (c): áramforrás típusú hálózattámogató, (d): feszültségforrás típusú hálózattámogató [8]

A hálózatképző átalakítók feszültségforrásként képezhetők le, kis kimeneti impedanciával. A feszültség E amplitúdóját és ω körfrekvenciáját a megadott alapjelekre szabályozva állítják elő, így szigetüzemű működésre alkalmasak. Együttműködés esetén kimeneti impedanciájuk határozza meg a terheléelosztást. Szünetmentes energiaellátó rendszerekben alkalmazzák széles körben a technológiát. [8]

A hálózatra tápláló konverterek ezzel szemben már energizált rendszerbe táplálnak be egy meghatározott teljesítményt. Áramforrásként képezhetők le, nagy kimeneti impedanciával. P^* és Q^* teljesítmény alapjeleket követnek, a hálózatra valamilyen módon (például fáziszárt hurok segítségével) szinkronizálnak, ezáltal jól alkalmazhatók más átalakítókkal való párhuzamos működésre. A hálózattámogatókon működő napelemes rendszerek napjainkban jellemzően ilyen kialakításúak. [8]

A hálózattámogató konverterek kialakítás és megvalósítandó célfüggvény alapján lehetnek akár áram- akár feszültségforrás típusúak is. A hálózaton mérhető feszültség- és frekvenciaértékek alapján állítják be az aktuális munkapontjukat. Elterjedt hálózattámogató típus az arányos szabályozó (P típusú, droop controller). Számos komplexebb szabályozási célfüggvény is létezik, ilyen például a virtuális impedancia, a szinkronverter, vagy a virtuális oszcillátor. [8]

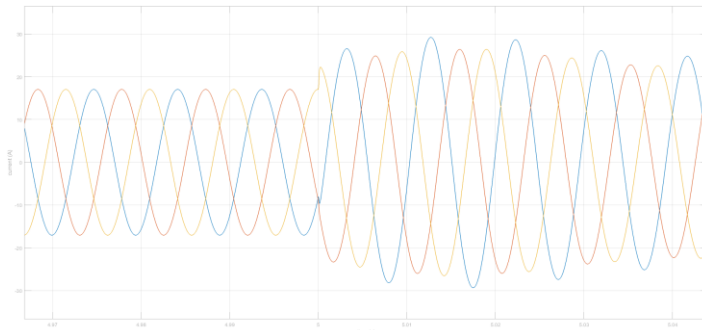
A virtuális inercia képző szabályozó célja, hogy a konvencionális szinkrongenerátorok forgó tömegét emulálja, szabályozástechnikai úton megvalósítsa.

4. MODELLEZÉS MATLAB KÖRNYEZETBEN

A MATLAB környezetben megvalósított inverter modellek és a beépített generátor típus alkalmas összehasonlító elemzés készítésére. A munkacsoportban feladatom a generátor elemzése és a virtuális inercia képzés megvalósítása volt, így ezek összehasonlíthatók a kollégák által fejlesztett és tesztelt inverter modellel kapott eredményekkel.

4.1. Hatásos teljesítmény ugrásszerű változása

A szinkrongenerátor fázisáramainak időfüggvényét egy aszimmetrikus terhelésugrás esetén a 4. ábra szemlélteti. 5 másodpercnél egy jól látható kezdeti tranzienst követően a generátor képes az aszimmetrikus terhelés kielégítésére is. A generátor működése közben a turbínaszabályozó nagy időállandóval rendelkezik, ezáltal a dinamikai folyamatokban közvetlenül a forgó tömeg hatása figyelhető meg a szimulációs eredményekben. A generátor szabályozásának működését jelen cikk nem taglalja részletesen, azonban az összehasonlításhoz megjelenítése fontos szempont volt.



4. Ábra. Generátor áramának változása aszimmetrikus terhelésváltozás esetén

4.2. Virtuális inercia képzés átalakítóval

Az inercia hatásának emulálására alkalmas szabályozástechnikai megoldások kutatása az elmúlt 10 évben jelent meg a nemzetközi szakirodalomban. Elsőként Beck és Hesse használta a kifejezést 2007-ben. [9] A különböző szabályozó topológiákra jó összefoglalást ad [1] és [10] irodalom. A lengési egyenleten alapuló megoldások mellett elterjedt a szinkrongépek matematikai modelljéből kiinduló „szinkronverter” típus, valamint a gyors reagálású – a primer szabályozásban megszokott másodperces időállandókhöz képest egy nagyságrenddel gyorsabb - hatásos teljesítmény – frekvencia arányos szabályozást megvalósító típusok. [1]

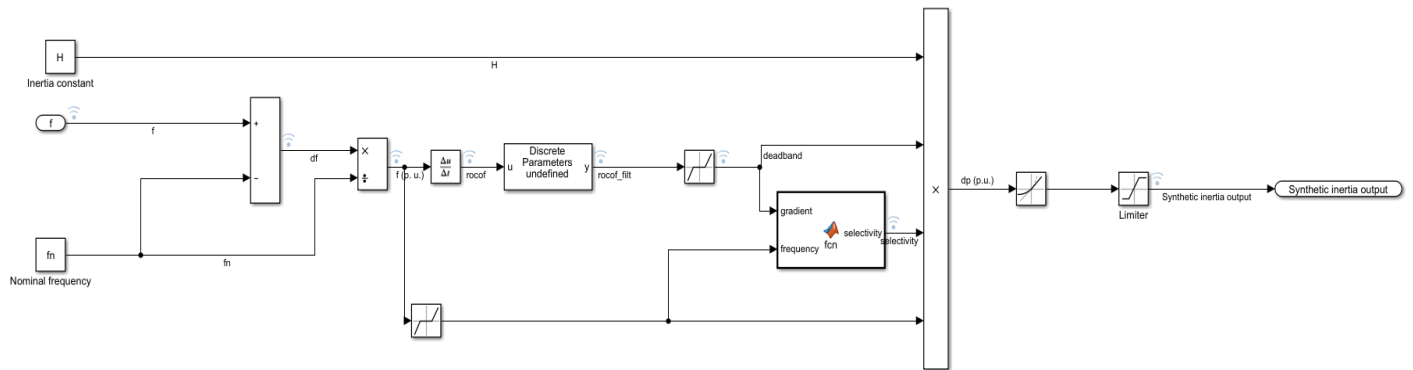
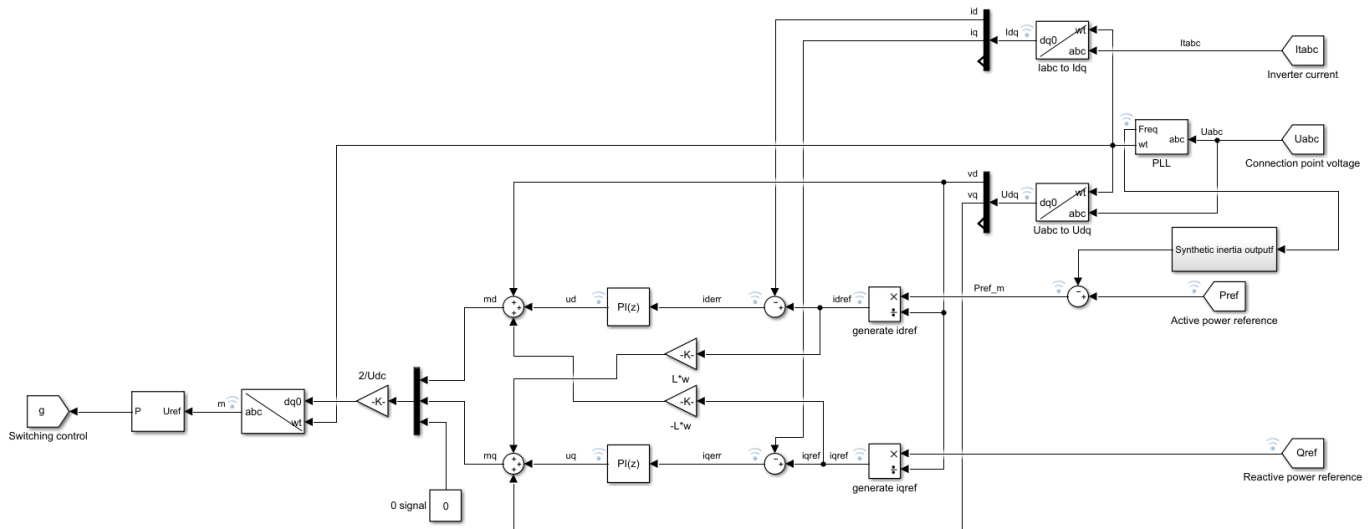
A 9. ábra mutatja be a virtuális inercia képző egyik lehetséges elrendezését. A bemenő paraméterként átvett hálózati frekvencia mellett kiinduló érték az

emulált inercia konstans (H), illetve a rendszer névleges frekvenciája (f_{nom}). A fáziszárt huroktól átvett frekvenciát első lépésben viszonylagos egységben megfogalmazott frekvenciaeltéréssé kell konvertálni, mely a névleges frekvenciaérték ismeretében elvégezhető.

Ezzel előáll a viszonylagos egységekben megfogalmazott frekvenciaeltérés, mint hibajel. Ennek deriváltja lesz a frekvenciagradiens (rate of change of frequency, rocof), melyet egy deriváló blokk képez. A deriváló blokk után egy diszkrét átviteli függvény blokk található, mely egy elsőfokú aluláteresztő szűrő 0,1s-os időállandóval [12]. Ez a blokk azért szükséges, mert a rocof jel igen zajos, a szükségtelen aktivációk elkerüléséhez szűrni szükséges. A rocof és a frekvencia jel esetén is alkalmazható egy holsáv elem. Ez szükséges a szelektivitás biztosításához: az aktiváció ugyanis csak bizonyos rocof határ felett (például 0,5 Hz/s), illetve akár bizonyos frekvenciaeltérés esetén (pl. 49,8 Hz alatt) aktiválható. Ezzel biztosítható az, hogy a rendszerirányítás támogatása mellett a szabályozást biztosító eszköz nem aktiválódik folyton, szükségtelenül. A holsáv paraméterek beállítását a rendszer irányítója meghatározhatja (akár üzemállapotfüggően is) a stabilitás megőrzésének érdekében.

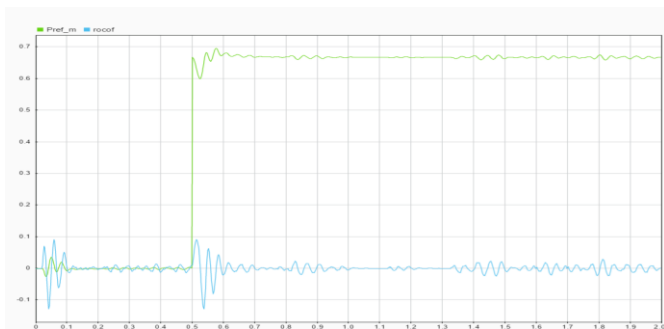
A MATLAB függvény blokk a szabályozó irányérzékeny tételére ad lehetőséget. A teljesítményelektronikai átalakítók elválasztják a villamosenergia-termelést és a hálózati paramétereket, így lehetőség adódik arra is, hogy – amennyiben a rendszer éppen a normál állapotába tér vissza – ezt a hatást kihasználjuk. Nem szükséges ugyanis virtuális inercia aktiváció, amennyiben a megfelelő munkapont felé közeledik a rendszer a szabályozás nélkül is: ez a megoldás ilyen formájában kizárólag a veszélyes tranziensek esetén biztosít stabilitásmegőrző funkciót.

A szorzó blokk ezután előállítja a lengési egyenletnek megfelelő teljesítményválaszt viszonylagos egységben a H konstans, az aktuális frekvenciaérték, a rocof, és az irányérzékeny aktivációs engedélyező jel (selectivity) szorzataként. A kimeneti jel ebből egy gradiens, illetve egy abszolút érték limitálás után áll elő. Erre azért van szükség, hogy a modellezésben a teljesítményelektronikai átalakítók képességeinek határát beállíthassuk, illetve a különböző technológiákhoz való illesztést is elősegítheti a későbbiek során. Például szélenergia esetében nem nyerhető ki a névleges teljesítmény 10%-nál nagyobb többleteljesítmény stabilitásmegőrzéshez sem, mert ez túl nagy mechanikai stresszt jelent a forgó alkatrészekre. A gradiens korlát szintén szélenergia esetében pedig 1 v.e/s, így ezeket a dinamikai korlátokat – bár adott esetben az átalakító lehetővé tenné – a beépített blokkokkal meg lehet valósítani.



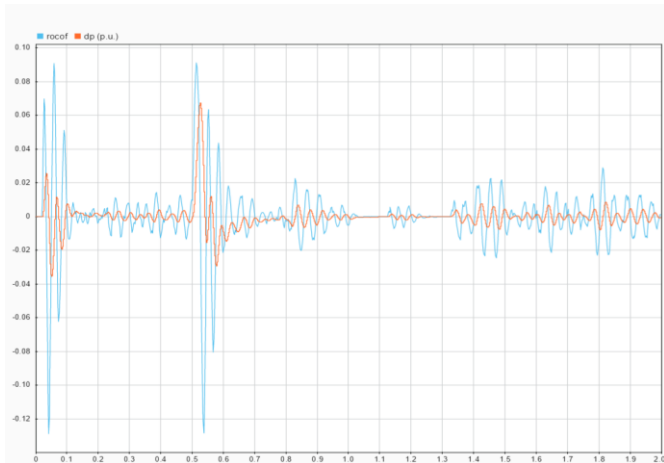
5. Ábra. Virtuális inercia képző a hálózattámogató átalakító vezérlésében (felül), lengési egyenlet megvalósításának blokkvázlata

A 6. ábra szemlélteti a P alapjel megváltozását a rocof hatására. Jól látható, hogy az alapjel biztosítja a lengési egyenlet alapján elvárható, frekvenciagradienssel arányos, ellentétes előjelű változást. Pontos beállításával a szabályozó rendszerirányítói előírásokhoz hangolható, a stabilitásmegőrző funkció tervezhető.



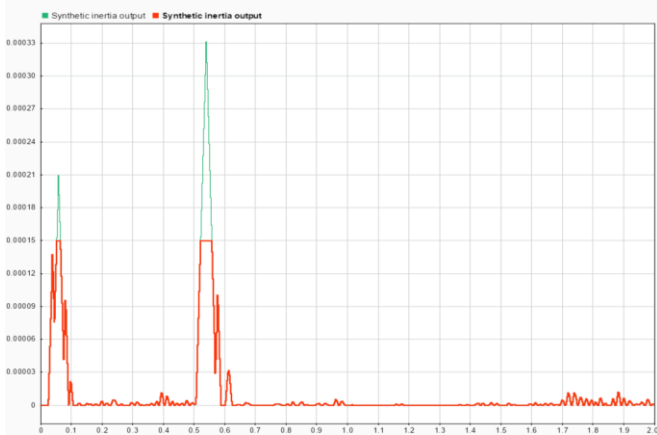
6. Ábra. A határos teljesítmény alapjel (zöld görbe) változása egy bemeneti rocof (kék görbe) értékre

A 7. ábra szemlélteti a szabályozó egy lehetséges dinamikáját. Fontos kiemelni, hogy a virtuális inercia képző teljes inverter szabályozási körbe illesztése miatt a frekvenciagradienssel arányos, és azzal megegyező előjelű kimenetet ad. Ezt a kimeneti jelet a határos teljesítmény alapjelből kivonva a lengési egyenlet által meghatározott választ kapjuk az inverter kimenetén. A 7-8. ábrán a virtuális inercia képző kimeneti jele emiatt ellentétes előjelű az egyenlethez képest. Ezt egyrészt a frekvenciagradiens szűrése, másrészt a kimenetre ható limiterek állítják elő. A paraméterek ilyen jellegű befolyásolásával biztosítható, hogy a szabályozó a valós körülmények közt működő technológiát is képes legyen emulálni. Ez például végezhető valós mérési adatok alapján. A bemutatott szimulációs vizsgálatok során a tranzien eseményeket az inverter határos teljesítmény alapjelenek megváltozása okozza. A terhelést egy mögöttes hálózat jellegű elem szolgáltatja, mint egy szokványos egy gép – nagy hálózat modellben. A mögöttes hálózat háromfázisú zárlati teljesítménye 600 kVA, X/R aránya 7.



7. Ábra. A szabályozó dinamikájának szemléltetése

A 8. ábra a kimenő jel abszolút értékének és felfutásának korlátozását egyaránt jól szemlélteti. A korábbiakhoz képest csökkentett meredekség, illetve a piros görbe abszolút korlátossága a szabályozó dinamikai határait jelenti.



8. Ábra. Gradiens és abszolútérték limit szemléltetése

5. KONKLÚZIÓ

A kutatás folyamán munkacsoportunk célja a teljesítményelektronikai átalakítók működésének feltérképezése, a modellezési és szimulációs képesség megteremtése. Erre támaszkodva az egyetemi laborinfrastruktúrába a projekt keretében bekerülő valós idejű szimulátor (Real Time Simulator, RTS) segítségével a hálózattámogató funkciókat komplex keretrendszerben tesztelhetjük, új algoritmusokat fejleszthetünk.

A cikk összefoglalja a szinkrongenerátoros és forgó tömeg nélküli villamosenergia-termelők karakterisztikus tulajdonságait, modellezési kérdéseinek alapjait. MATLAB környezetben a munkacsoport által fejlesztett inverter modellek kerülnek összehasonlításra a beépített szinkrongenerátoros típussal. A virtuális inercia, mint hálózattámogató funkció megvalósításával az átalakító képes a stabilitásmegőrzés támogatására. A bemutatott lengési egyenlet alapú szabályozó széles körű szelektivitással és összetetten hangolható

paraméterkészlettel bír, mellyel hozzájárulhat a hatékony stabilitásmegőrzés tervezéshez, a rendszerirányítói igények definiálásához szükséges műszaki számítások elvégzéséhez (például határértékek meghatározása, dinamikai paraméterhangolás, üzemállapotfüggés-vizsgálat). A szabályozó a tesztek során stabilan, az elvárt funkciókat kielégítve működött. A kutatás folytatásaként további hálózattámogató funkciók megvalósítása várható.

Összességében kijelenthető, hogy az átalakítók adata műszaki lehetőségek új szolgáltatások definiálását teszik lehetővé. Szabályozhatóságuk révén ezek az eszközök képesek a hálózattámogató funkciók megvalósítására, a minőségi szolgáltatás, ellátásbiztonság és rendszerszintű költséghatékonyság támogatására.

Köszönetnyilvánítás

A cikkben bemutatott kutatás a FIEK_16-1-2016-0007 számú projekt keretében a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból biztosított támogatással, a "Felsőoktatási és Ipari Együttműködési Központ – Kutatási infrastruktúra fejlesztése" (FIEK_16) pályázati program finanszírozásában, az Integrált, Intelligens Technológiák Kutatóközpontban, a BME és a Magyar Villamos Művek Zrt. együttműködésében valósult meg.

A projekt megvalósulásáért köszönet illeti Bertalan Zsoltot, a projekt ötletgazdáját, Dr. Gróf Gyula és Dr. Raisz Dávid szakmai vezetőket.

Irodalomjegyzék

- [1] Tamrakar U., Shrestha D. 1, Maharjan M., Bishnu P. B., Hansen T.M., Tonkoski R.: *Virtual Inertia: Current Trends and Future Directions, Applied Sciences* 7. évfolyam 654. szám, 2017.
- [2] Tielens, P.: *Operation and Control of Power Systems with Low Synchronous Inertia, Doktori Disszertáció (KU Leuven, Belgium).* 2017.
- [3] Retter Gy.: *Villamosenergia-átalakítók, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 1986.*
- [4] Kundur T.: *Power System Stability and Control, The EPRI Power System Engineering Series, 1994.*
- [5] Divényi D.: *Generátormodellek: terhelés és terhelési szög, egyszerűsített Up-Xd modell, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2017.*
- [6] Faludi Andor, Szabó László: *Villamosenergia-rendszer üzeme és irányítása oktatási segédanyagok, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2012.*
- [7] Dessaint, L-A., Champagne R.: *MathWorks MATLAB R2018a documentation: Synchronous machine, Ecole de Technologie Supérieure, Montreal, 2018.*
- [8] Rocabert J., Luna A., Blaabjerg F., Rodríguez P. - *Control of Power Converters in AC Microgrids - IEEE Transactions on Power Electronics, 27. évfolyam 11. szám, 2012.*
- [9] Beck, H.P.; Hesse, R. *Virtual synchronous machine. In Proceedings of the 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, Barcelona, Spain, 9–11 October 2007; pp. 1–6.*
- [10] D'Arco S, Suul J.A.: *Virtual synchronous machines — Classification of implementations and analysis of equivalence to droop controllers for microgrids," 2013 IEEE Grenoble Conference, Grenoble, 2013, pp. 1-7.*