



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Villamos Energetika Tanszék

Táczai István

A szintetikus inercia szerepe a jövő villamosenergia-rendszerének stabilitás- megőrzésében

Országos Tudományos Diákköri Konferencia Dolgozat

KONZULENS

Dr. Vokony István

BUDAPEST, 2016.



AZ EMBERI ERŐFORRÁSOK MINISZTERIUMA ÚNKP-16-2-I. KÓDSZÁMÚ ÚJ NEMZETI KIVÁLÓSÁG PROGRAMJÁNAK

TÁMOGATÁSÁVAL KÉSZÜLT

Összefoglaló

True stability results when presumed order and presumed disorder are balanced. A truly stable system expects the unexpected, is prepared to be disrupted, waits to be transformed.

(Tim Robbins)

A megújuló energiaforrások térnyerése alapjaiban véve változtatja meg a villamosenergia-rendszerről kialakított képünket. A célok egyértelműek, a folyamatok és hatásaik pedig már ma is észlelhetők. Az elosztott struktúra megjelenésével a szabályozás kérdésében is számos új műszaki kihívással találkozunk a rendszer üzemeltetői. Az egyik leginkább égető kérdés az inercia változása. A hagyományos, együttműködő villamosenergia-rendszerek esetén a frekvencia névleges (illetve ehhez nagyon közeli) értéken tartása a rendszer üzemeltetésének legfőbb feladata. A villamos hálózat által összekapcsolt szinkrongenerátorok együttműködő, szinkronjáró rendszert alkotnak, amelyben állandósult állapotban csak egyetlen hálózati (szinkron) frekvencia lehetséges. A frekvencia változását a termelt és fogyasztott hatásos teljesítmény közti egyenlőtlenség és a hálózat fizikai jellege határozza meg. Ezen folyamatok során a legfontosabb, hogy nagy tömegű gépek forgásukból kifolyólag hatalmas mennyiségű kinetikus energiát tartalmaznak (inercia), mely a frekvencia megváltozásakor közvetlenül hat a rendszerre, ez pedig az elektromechanikus tranziens folyamatokban elengedhetetlen szerepet játszik. A termelésben megjelenő új technológiák komoly hányada teljesítményelektronikai átalakítókön keresztül csatlakozik a hálózatra, a közvetlen összeköttetés hiánya pedig a konvencionális rendszereknél automatikusan aktiválódó, stabilitást megőrző hatás csökkenését eredményezi. A mögöttes forgótömeg – mint egy kinetikus energiatartalék a stabilitás megőrzésére - frekvenciaváltozásokkal szemben ellenálló képességgel rendelkezik a hatásos teljesítmények egyensúlyának felbomlásánál. Az új típusú termelők esetében érdemes megfontolni az eszközök vezérlésének megváltoztatását a fizikai folyamat emulálására: ezt szintetikus inercia képzésnek nevezzük.

Dolgozatomban feltérképezem a stabilitás kérdéskörét, értelmezem a frekvenciaszabályozási eljárásokat a növekvő megújuló penetráció fényében. Szakirodalmi kutatások alapján megkeresem a szintetikus inercia képzés potenciális lehetőségeit. Ezen információk alapján szabályozási köröket tervezek a fizikai folyamat emulálására. A felépítés és paraméterbecslés során bemutatom a valós fizikai folyamatok leképezési lehetőségeit, a gyakorlati alkalmazhatóságra és az elérhető szakmai kutatásoknál pontosabb leképezésre való törekvéseim eredményességét. Az elkészített szabályozási köröket valós átviteli- és elosztóhálózatok modelljein tesztelem a DigSilent Power Factory program segítségével. A munka eredménye a szabályozási struktúrák tervezése, paraméterezése, implementálása, valamint a stabilitás megőrzésére vonatkozó előírások megfogalmazása.

Abstract

The growing share of renewable energy sources leads system operators to previously-unknown challenges. Beside the well-known issues of balancing and capacity adequacy, the security of supply, reliability and stability are 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 have to be augmented with synthetic inertia to provide such a useful function otherwise stability issues, load shedding and outages will occur. The questions are so current that ENTSO-E listed this problem as one of three main focus topics in their research and development plan from 2015 to 2017 so the transmission system operators across Europe are all thinking about the possibilities.

Tartalomjegyzék

Összefoglaló	i
Abstract	ii
Tartalomjegyzék	iii
Ábrajegyzék	vi
Egyenletjegyzék	viii
Táblázatjegyzék	ix
1 Az átalakuló villamosenergia-rendszer dióhéjban	1
1.1 Úton a decentralizáció felé: kérdések és kihívások	1
1.2 A dolgozat tárgya: megújulók és stabilitás	3
1.3 Ausztráliai rendszerösszeomlás: intő jelek a való világából [36]	4
2 A rendszerstabilitás kérdései	7
2.1 A stabilitás tipizálása	7
2.2 Szögstabilitás	8
2.2.1 Kisjelű szögstabilitás	8
2.2.2 Tranziens stabilitás	9
2.3 Feszültségstabilitás	9
2.3.1 Nagyléptékű feszültségstabilitás	9
2.3.2 Kis léptékű feszültségstabilitás	10
2.3.3 Csoportosítás a folyamatok időtartama alapján	10
2.3.4 Frekvenciastabilitás	10
3 Az inercia szerepe és emulálási lehetőségei	11
3.1 ENTSO-E irányelvek a teljesítményelektronikai berendezéseken keresztül a hálózatra csatlakozó termelőegységek stabilitásra gyakorolt hatásának elemzésére [28][30]	11
3.1.1 Vizsgálandó folyamatok és paraméterek	11
3.1.2 Kiértékelési lehetőségek	14
3.2 A szintetikus inercia technológiai lehetőségei és paraméterei	14

3.2.1	Szélerőművek	15
3.2.2	Energiatároló berendezések	19
3.2.3	Egyenáramú/hibrid hálózatok	20
4	Szintetikus inercia képzése elméletben és gyakorlatban	21
4.1	Szintetikus inercia képzésre alkalmas szabályozási körök	21
4.1.1	Folytonos üzemű szintetikus inercia képző.....	21
4.1.2	Holtsávval ellátott szintetikus inercia képző.....	24
4.1.3	Frekvenciaérték korláttal kiegészített szintetikus inercia képző.....	26
4.1.4	Fix teljesítményváltozást biztosító szintetikus inercia képző	28
4.1.5	Alacsony frekvenciaérték esetén támogató üzem	30
4.2	Szélerőmű kiegészítő szintetikus inercia szabályozója.....	31
4.3	Energiatároló leképezése	32
4.4	Az inercia középpont számítása és felhasználása bemenetként	33
5	A szintetikus inercia rendszerre gyakorolt hatása	36
5.1	Szimulációs környezet	36
5.2	Vizsgálati scénáriók és kiértékelési metódus	36
5.2.1	A szintetikus inercia hatásának elbírálására alkalmas paraméterek	36
5.2.2	Normatív terhelésnövekedések definiálása.....	37
5.3	Mosonmagyaróvári modell.....	38
5.3.1	Szintetikus inercia képzés a stabilitás megőrzésére.....	41
5.3.2	Felfutási meredekség növelése.....	44
5.3.3	Energiatároló alkalmazása	45
5.3.4	Frekvencia alapú szelektivitás hatása	47
5.4	IEEE 9-Bus System.....	49
5.4.1	Szintetikus inercia képzés	50
6	Összefoglalás és konklúziók.....	53
7	Irodalomjegyzék	55
	Függelék	1

F1	A frekvenciaszabályozás elemei	2
F2	Fizikai háttér: a P-f összefüggés és az inercia fogalma.....	4
F3	Szimulációs vizsgálatok során felhasznált modellek paraméterei	6
F3.1	Mosonmagyaróvár modellje.....	6
F3.2	IEEE 9-bus system	9
F4	Kiegészítő szimulációs eredmények	15

Ábrajegyzék

1. ábra: OECD államok megújuló alapú villamosenergia-termelés részesedése 1990-2015 közt [35].....	1
2. ábra: Napelemek által megtermelt energia alakulása a vezető országokban 1990-2015 közt [35].....	2
3. ábra: rendelkezésre álló inercia az egyes országokban [IEEE PES].....	4
4. ábra: feszültségek alakulása a kérdéses időszak alatt [36]	5
5. ábra: frekvenciakép a kérdéses időszak alatt [36]	6
6. ábra: a stabilitás tipizálása [3]	8
7. ábra: ENTSO-E összesítés a frekvenciaváltozást befolyásoló tényezőkről [28]	12
8. ábra: szélerőmű szintetikus inercia képzésének elvi sémája [7]	15
9. ábra: szélturbina szabályozó vázlata	16
10. ábra: szélerőmű teljesítményszabályozójának blokkvázlata.....	17
11. ábra: szélerőmű áramvektor szabályozója	18
12. ábra: szélerőmű hatásos teljesítmény korlátozó blokkvázlata	18
13. ábra: folytonos üzemű szintetikus inercia szabályozó blokkvázlata	22
14. ábra: a szűrőparaméter hatása a frekvenciaváltozás jelre ($T=0,1$ s és $T=0,25$ s)	23
15. ábra: eltérő felfutás és lefutás szemléltetése	24
16. ábra: holtávval ellátott szintetikus inercia szabályozó blokkvázlata	25
17. ábra: holtávelem működése	26
18. ábra: frekvenciaértékre reagáló szintetikus inercia szabályozó blokkvázlata	27
19. ábra: frekvencia abszolútérték holtáv működésének szemléltetése	28
20. ábra: állandó kimeneti teljesítményű szintetikus inercia szabályozó blokkvázlata.....	29
21. ábra: tiltás és engedélyezés működése	30
22. ábra: állandó kimenetű, alacsony frekvenciára reagáló szabályozó blokkvázlata	31
23. ábra: energiatároló elem szabályozási vázlata	32
24. ábra: FCOI számítás vázlata 3 gépre	34
25. ábra: FCOI számítás blokkvázlata 3 gépes esetben.....	35
26. ábra: a mosonmagyaróvári körzet modellje	39
27. ábra: frekvenciaváltozási sebességek normáltjai a mosonmagyaróvári modellben	40
28. ábra: a normatív terhelésnövekedések hatása a frekvenciára az inercia konstans függvényében – Mosonmagyaróvár	41
29. ábra: paraméterbeállítás frekvenciaváltozás alapú szelektivitással rendelkező szintetikus inercia képző esetén	42
30. ábra: szintetikus inercia képző kimenete és a kialakuló frekvenciakép	43
31. ábra: szintetikus inercia okozta legkisebb frekvenciaérték megemelkedése	43

32. ábra: teljesítménygradiens növelése	44
33. ábra: energiatároló teljesítménye és a kialakuló frekvenciagörbe	46
34. ábra: energiatároló szintetikus inercia képzőjének paraméterezése	46
35. ábra: az abszolútérték szelektivitás okozta frekvencia csökkenés az egyszerű holtávós vezérléshez viszonyítva.....	48
36. ábra: IEEE 9 buszos rendszerének topológiája.....	49
37. ábra: normatív terhelésnövekedések hatása a frekvenciára az inercia konstans függvényében – IEEE 9 buszos rendszer.....	50
38. ábra: frekvenciaváltozás szelektivitással rendelkező szabályozó paraméterezése.....	51
39. ábra: a szintetikus inercia képzés hatása a kialakuló legalacsonyabb frekvenciára	52
40. ábra: frekvenciaszabályozás lépései [1].....	3
41. ábra: a frekvenciaszabályozás szintjei és kapcsolatok	3
42. ábra: a modellhez csatolt turbinaszabályozó blokkvázlata [33].....	7
43. ábra: a gerjesztésszabályozó blokkvázlata.....	7
44. ábra: gov_BPA_GG beépített turbinaszabályozó típus	9
45. ábra: IEEE X1 gerjesztésszabályozó blokkvázlata	10
46. ábra: IEEE T1 gerjesztésszabályozó blokkvázlata	10
47. ábra: frekvencia szelektivitással rendelkező szintetikus inercia képző paraméterezése	17

Egyenletjegyzék

3-1. egyenlet: a minimális inercia követelmény megfogalmazása [28]	14
4-1. egyenlet: az inerciális válasz.....	21
4-2. egyenlet: az inerciaközéppont frekvenciájának definíciója	33
5-1. egyenlet: mögöttes hálózatra redukálás	38
7-1. egyenlet: a villamos teljesítmények egyensúlya.....	4
7-2. egyenlet: statikus teljesítmény-egyensúly	4
7-3. egyenlet: dinamikus teljesítmény-egyensúly (lengési egyenlet)	4
7-4. egyenlet: az inercia származtatása a kinetikus energiából	4
7-5. egyenlet: perdület kifejezése az inercia konstanssal.....	5
7-6. egyenlet: az inerciaközéppont definíciója	5
7-7. egyenlet: az inerciaközéppont definíciója	5

Táblázatjegyzék

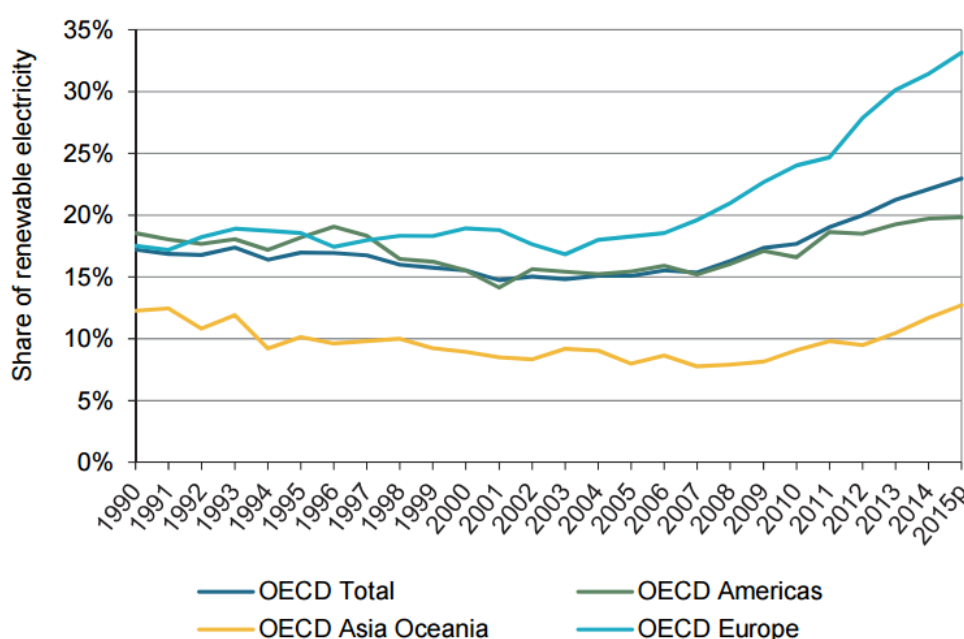
1. táblázat: szélerőmű technológiai paraméterei [37].....	19
2. táblázat: normatív terhelésnövekedés és megújuló penetráció.....	38
3. táblázat: normatív terhelésnövekedések hatása	40
4. táblázat: a szintetikus inercia vezérléssel támogatott eset	42
5. táblázat: gradiens növeléssel megvalósított FTK elkerülés.....	45
6. táblázat: energiatároló alkalmazással megvalósított FTK elkerülés.....	47
7. táblázat: kiinduló állapot: a normatív terhelésnövekedések hatása a frekvenciára a mögöttes hálózat inercia konstansának függvényében	50
8. táblázat: a szintetikus inercia képzés hatása	51
9. táblázat: gerjesztésszabályozó adatok a Mosonmagyaróvár modellhez [34][33].....	8
10. táblázat: turbinaszabályozó adatok a Mosonmagyaróvár modellhez [34][33]	8
11. táblázat: szinkrongenerátor adatok az IEEE 9 buszos rendszerében	11
12. táblázat: IEEE 9 gyűjtősínes rendszerének gerjesztésszabályozó adatai.....	13
13. táblázat: IEEE 9 gyűjtősínes rendszerének turbinaszabályozó adatai	14
14. táblázat : folytonos üzemű szintetikus inercia képző hatása a mosonmagyaróvári modellen	15
15. táblázat: alacsony frekvenciás triggerrel ellátott szintetikus inercia képző hatása	16
16. táblázat: fix teljesítménytöbbletet biztosító szabályozó hatása	17
17. táblázat: IEEE 9 buszos rendszeren elért frekvenciaminimum emelkedés szintetikus inercia képzés esetén	18

1 Az átalakuló villamosenergia-rendszer dióhéjban

A villamosenergia-rendszer hatalmas átalakuláson megy át napjainkban, és a változás csak egyre gyorsabb lesz. A környezetvédelmi és klímapolitikai célok mára már konkrét előírásokban, cselekvési tervekben és célszámokban jelennek meg. Az elköteleződés tehát immáron nem kérdés, a rendszer üzemeltetőinek és irányítóinak fel kell készülniük az eddig ismeretlen körülményekre, és biztosítani kell a megszokott biztonságot. A megváltozott környezet azonban proaktív tervezést, innovatív hozzáállást igényel. A megoldandó műszaki kérdések számos új technológiának és eljárásnak utat nyithatnak, mely egy komoly mozgatója lehet a modernebb, fenntarthatóbb és okosabb hálózat kiépülésének.

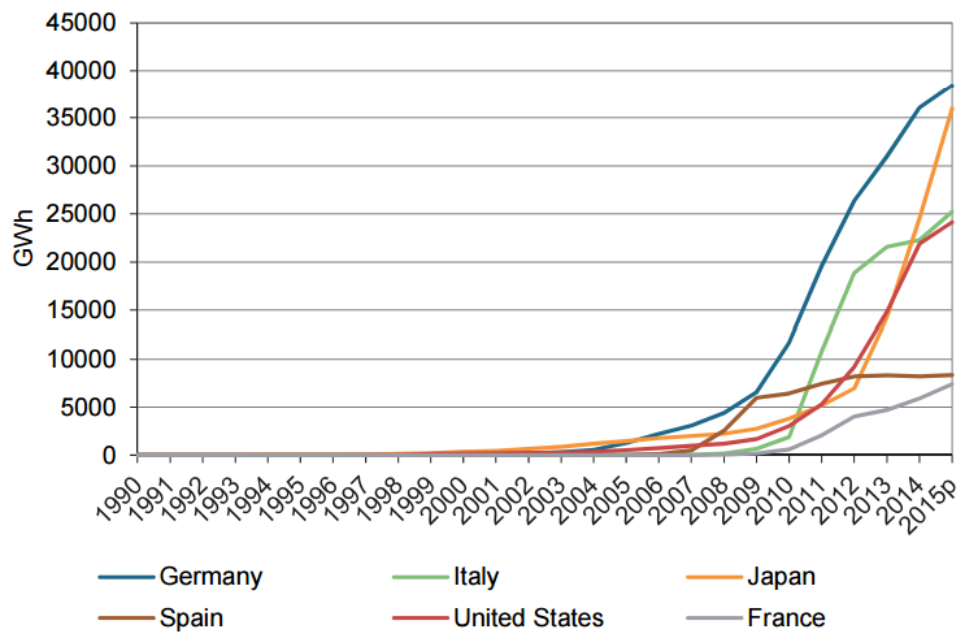
1.1 Úton a decentralizáció felé: kérdések és kihívások

A villamosenergia-termelés összetétele belátható időn belül alapjaiban is másképp fest majd. A korábban jellemző nagy teljesítményű, fosszilis és fisszilis energiahordozókra támaszkodó erőművek teljesen visszaszorulnak globálisan. Felváltja őket a háztartási méretű kiserőművek (HMKE) hada, valamint a nagyobb napelem parkok és szélerőművek. Ezzel a folyamattal teljesen elrugaszkodunk attól a struktúrától, melyre a hálózatot tervezték: meghatározott pontokon nagy teljesítmények fogadása, nagyfeszültségen hurkolt szerkezettel biztonság megadása, később a fogyasztóhoz közeledve sugarasodás definiált áramlási iránnyal. A világ számos pontján már át is vette az uralmat a decentralizált termelés, mely merőben más igényeket fogalmaz meg az átvitellel és elosztással szemben. Ezekre a kihívásokra a teljes rendszer megfelelő adaptálásával kell válaszolni, jól átgondolva a következményeket.



1. ábra: OECD államok megújuló alapú villamosenergia-termelés részesedése 1990-2015 közt [35]

A Nemzetközi Energiaügynökség (International Energy Agency, IEA) 2016-ban publikált adatain az elmúlt 15 évre vetítve jól látszik, hogy az elmúlt időszak robbanásszerű folyamatokkal jellemezhető a megújulók terén. A Gazdasági Együttműködési és Fejlesztési Szervezet (Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD) országaiban a megújuló alapú villamosenergia-termelés felfutását az első ábra szemlélteti.



2. ábra: Napelemek által megtermelt energia alakulása a vezető országokban 1990-2015 közt [35]

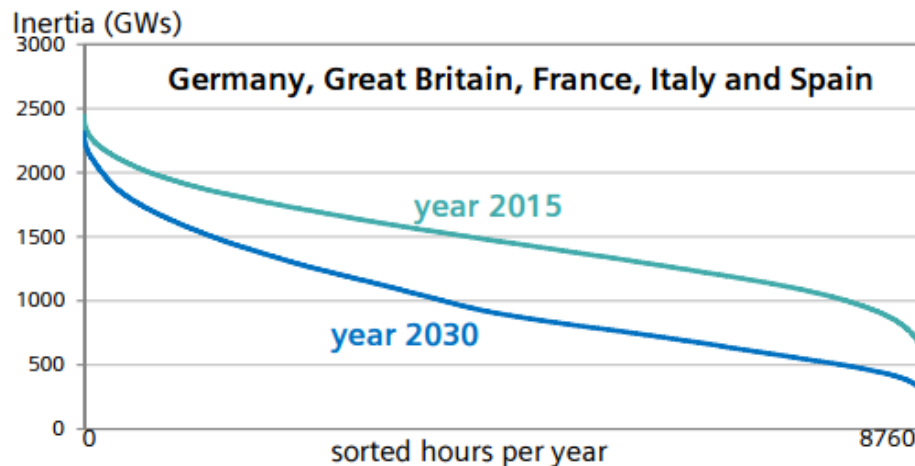
A 2. ábrán a fotovoltaikus energiatermelés térnyerése figyelhető meg az élenjáró országokban. A hatalmas növekedés egyértelműen a klímapolitikai célok eléréséhez alkalmazott ösztönzőknek köszönhető, amelyek azonban lehetővé tették a technológiai innovációt. Ennek hatására a megújuló alapú energiatermelés és az energiátároló technológiák versenypiaci körülmények közt is versenyképes megoldásai az ajtón kopogtatnak. Az IEA piacelemzése alapján például az akkumulátoros technológiák költsége az elmúlt nyolc évben negyedére csökkent, napelemek bekerülési költsége pedig 80%-al zuhant. A folyamatok a prognózisok szerint továbbra sem lassulnak, a rendszerintegráció pedig kulcskérdéssé változik: többek közt az úttörő Németország is korlátozásokat vezet be a támogatásokban a hálózatfejlesztések realizálhatósága végett.

A rendszerszabályozás kialakítása illeszkedik a korábbi igényekhez. A sztochasztikusan változó (de különböző eljárásokkal becsülhető) terhelések lekövetését a megfelelő változtatási képességgel rendelkező termelőkkel végzik, a cél minden pillanatban a két oldal egyensúlyban tartása. Az energiátárolás szerepe a költségeken és technológiai lehetőségeken túl azért is maradt viszonylag limitált, mert ez az elv tökéletesen megfelelt az elvárásoknak. Az időjárásfüggő termelés megjelenésével azonban félő, hogy a rendszer

szabályozása nem végezhető el sikeresen minden üzemállapotban. Az intermittens termelés rövidtávra nézve a kiegyenlítő energiák piacát forgatja majd fel, felértékelve ezzel minden olyan megoldást, mely rugalmasságot (teljesítményváltoztatási tartomány az idő és a rendszerparaméterek függvényében) képes biztosítani a rendszer számára. Hosszútávon pedig az adekvát kapacitáskezelés lesz a kulcs, hiszen az energiaipar számára az ilyen típusú tervezés is elengedhetetlen a beruházások miatt. A rövid és hosszútávú ellátás biztosításán túl is számos hatást kell majd figyelembe venni, például a piactorzító jelenségeket is ki kell küszöbölni a rendszerből.

1.2 A dolgozat tárgya: megújulók és stabilitás

Egy igen komoly kérdése lesz a közeli jövőnek a frekvenciaszabályozás azon vetülete, melyet a rendszer inherens módon szolgáltat számunkra. Jelenleg élvezzük pozitív hatásait, azonban a jövőben nem áll majd rendelkezésre. A centrális energiatermelés egy fontos tulajdonsága, hogy hatalmas forgótömegű, hálózatra közvetlenül csatlakozó szinkrongépekkel történik a villamosenergia-termelés. Ez a megoldás szolgáltatja a hatásos teljesítmény és a frekvencia ismert kapcsolatát (F2 fejezet): amennyiben a fogyasztás hirtelen megnő, az a generátorok oldaláról többlet villamos teljesítmény igényként jelenik meg, ezt pedig a generátor közvetlen fizikai kapcsolata révén a forgási sebességének csökkenéséből (egyfajta kinetikus energiátároló módjára) fedezheti. Ez a folyamat pillanatszerűen megy végbe a fizikai kényszer hatására. A forgó tömeg szögsebességének csökkenése miatt a rendszer frekvenciája csökken, ennek meredeksége jól jellemzi a frekvenciastabilitás mértékét. Ezt a meredekséget alapvetően a szinkrongépek inercia állandójával jellemezhetjük. Ez a mennyiség megmutatja, hogy az adott gépet a névleges látszólagos teljesítményével megegyező hatásos teljesítménnyel gyorsítva mennyi idő alatt érne el a névleges fordulatszámát, tehát idő dimenziójú. A frekvenciaváltozás meredeksége azért fontos, mert még a leggyorsabb beavatkozónak is van egy reakció ideje, amely leteltéig a rendszer önmagában néz szembe a zavarral. A hatalmas csatlakozó forgó tömegek a különböző fluktuációkat lassítják, alkalmassá téve a szabályozó eszközöket a működésre. Mi történik azonban, ha a hálózatra közvetlenül csatlakozó szinkrongenerátorok helyett olyan termelők lesznek túlsúlyban, amelyek teljesítményelektronikai átalakítókon keresztül csatlakoznak a hálózatra? Ezek a berendezések ugyanis nem rendelkeznek közvetlen fizikai válasszal. Az egyik út lehet a forgó tömegek külön implementálása a rendszerhez szinkronizálva, ez azonban nem tűnik túlzottan rentábilis megoldásnak. A teljesítményelektronikai berendezések azonban kitűnően és gyorsan vezérelhetők, így adódik a lehetőség, hogy emuláljuk a fizikai folyamatot, azaz hozzunk létre szintetikus (vagy virtuális, mesterséges) inerciát. Ez azt jelenti, hogy a termelőegység figyeli a rendszer állapotát és szükség esetén a szinkrongépekhez hasonló hatást fejt ki a hálózatra, ezzel támogatva a stabilitás megőrzését.



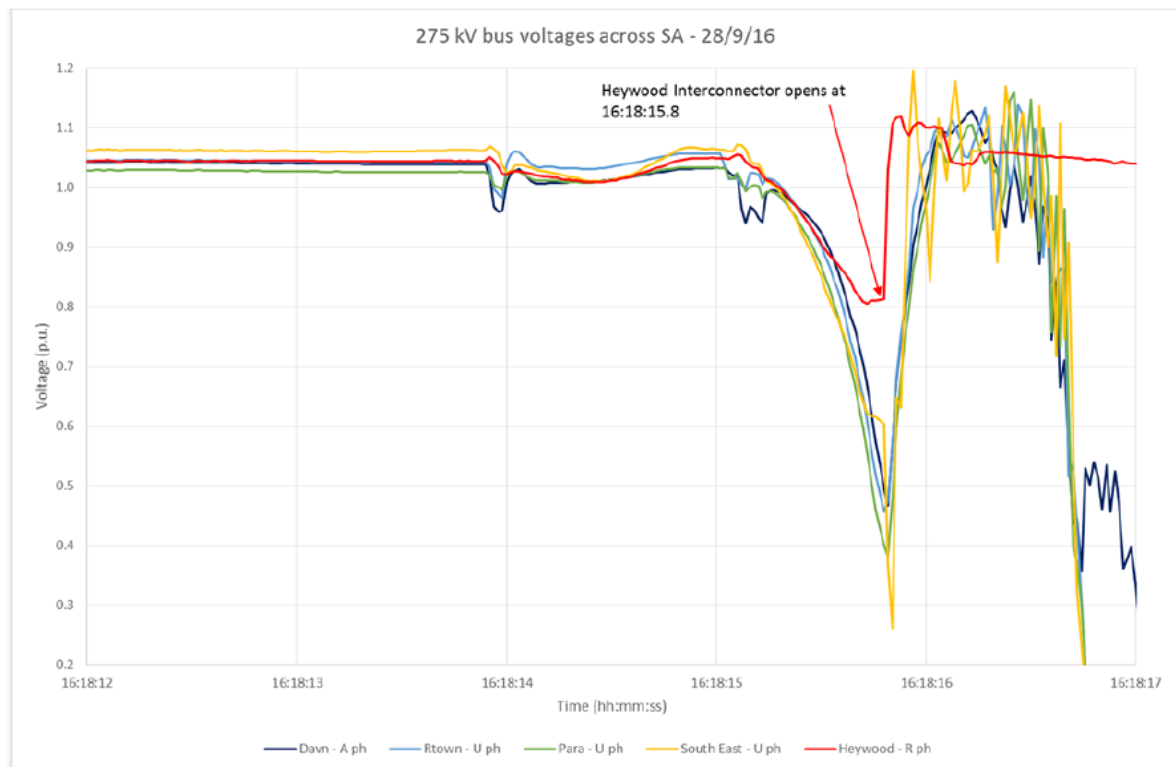
3. ábra: rendelkezésre álló inercia az egyes országokban [IEEE PES]

A 3. ábra megmutatja, hogy 2030-ra milyen mértékben fog csökkenni a hálózat mögöttes kinetikus energiája. Jól látható, hogy az év nagy részében szignifikánsan kevesebb lesz ez a frekvenciastabilitási tartalék, ennek hatására pedig komoly problémák alakulhatnak ki.

1.3 Ausztráliai rendszerösszeomlás: intő jelek a való világból [36]

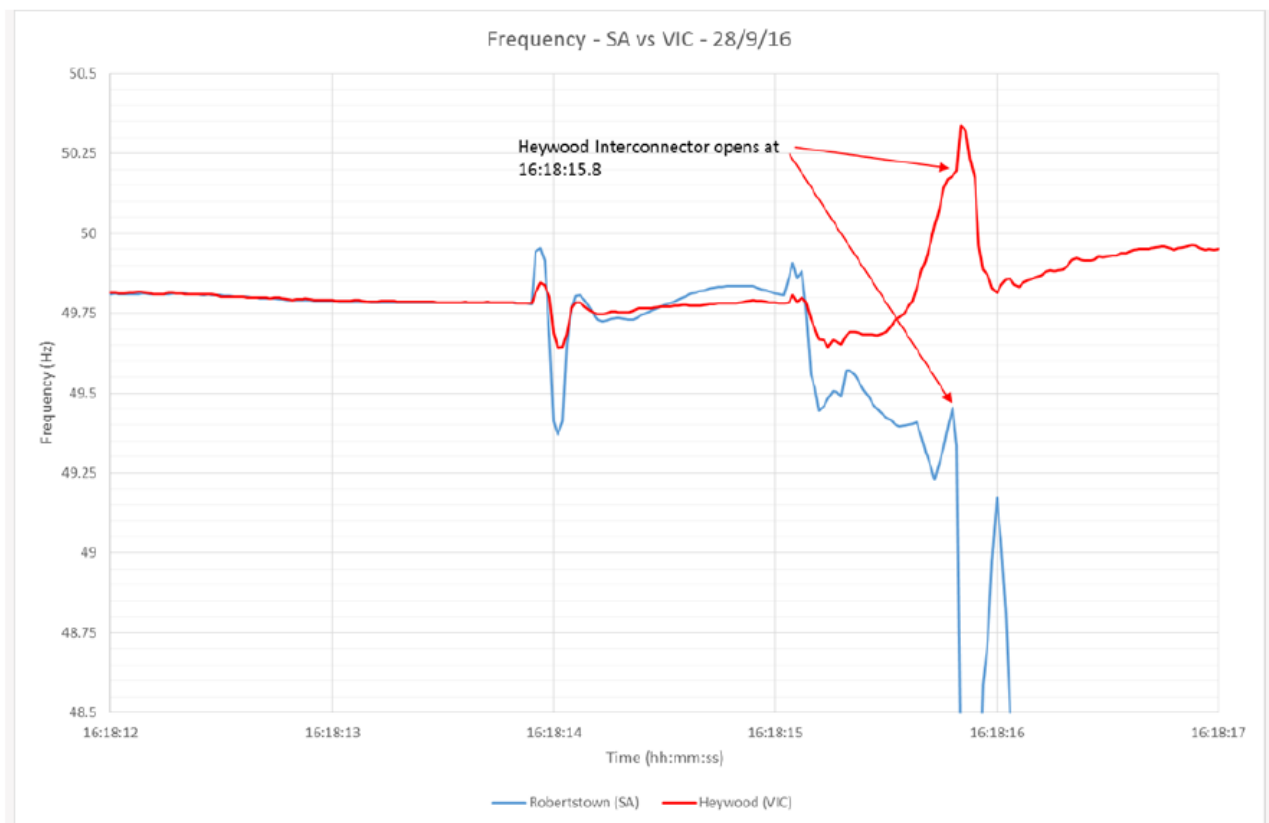
2016. szeptember 28-án Ausztrália déli részén egy hatalmas vihar következtében számos hiba alakult ki a villamosenergia-rendszerben, melynek sorozata a rendszer összeomlásához vezetett. A rendszerrész 883 MW szélenergia betáplálással, 330 MW gázturbinás termeléssel és 613 MW szomszédos tartományból jövő importtal látta el a 850 000 fogyasztóját a területen az események kezdetekor. Az üzemirányítás napközben a megszokott módon zajlott, a beérkező időjárási adatok alapján elemzések készültek, melyek nem állapítottak meg túlzott veszélyhelyzetet, de kiemelték, hogy a villámcsapások magas valószínűségére tekintettel kell lenni. A szélesebbesség előrejelzések 120 km/h maximum értéket jósoltak, melynek a rendszer normál esetben ellenáll. A délután folyamán azonban a vihar következtében meghibásodások láncreakciója indult be.

Elsőként a vihar hatására 5 zárlat keletkezett, melyek elhárítása közben 3 távvezeték tartósan kiesett. Emiatt 6 jól megfigyelhető feszültségstabilitási probléma jelentkezett, melyet a szélgenerátorok nem tudtak áthidalni, 445 MW teljesítmény kiesett a rendszerből (a mérési adatokban megjelenik további 39 MW tranziens teljesítménycsökkenés, melyet normál esetben várnánk a zárlati áthidaló folyamatból (Fault Ride Through Capability, FRTC)). A teljesítményhiányt ekkor a kritikus távvezeték, a Heywood Interconnector volt hivatott pótolni, mely korlátainál fogva erre nem volt képes, így gyakorlatilag 900 MW esett ki pillanatszerűen. A fennmaradó termelés már képtelen volt a terhelés kiegyenlítésére, hovatovább a frekvenciaváltozás olyan meredek volt, hogy a fogyasztói terheléskorlátozás nem aktiválódott, így a rendszerrész összeomlott.



4. ábra: feszültségek alakulása a kérdéses időszak alatt [36]

A 4. ábrán látható a feszültségek változása, melyen jól megfigyelhető az összeomlás folyamata: a kezdeti kis mértékű zavarok még nem jelentettek problémát, a szélérőművek és a távvezeték kiesése viszont jól láthatóan túlmutatott a rendszer integritásmegőrző képességén. A mért feszültségek a rendszer kulcsfontosságú 275 kV-os pontjait mutatják be. A rendszer gyakori mintavételezéssel figyeli a feszültségértékeket, így az öt hibahely az eset után jól behatárolható volt, mely 6 feszültségzavarként jelentkezett a mérésekben.



5. ábra: frekvenciakép a kérdéses időszak alatt [36]

Az 5. ábrán a frekvenciakép látható a távvezeték két oldalán (Robertstown az összeomló rendszerrészben, Heywood a leválasztódó exportáló területen). A leválás után a két rendszer frekvenciája a vártaknak megfelelően divergál egymástól, Heywood területén a túltermelést visszazabályozzák, míg a dél- ausztrál terület összeomlik. Az alacsony frekvenciaértékek esetén aktiválódó FTK (frekvenciafüggő terheléskorlátozás) rendszer 49 Hz-től kezdve kapcsolási műveleteket kellett volna, hogy végrehajtson az integritás megőrzése érdekében, azonban a hatalmas frekvenciaváltozási sebesség túlmutatott a védelem képességein. A teljes folyamat mindössze 88 másodperc alatt lezajlott, tehát jól érzékelhető, hogy a dinamikus folyamatok során nincs idő hosszú tervezési folyamatok elvégzésére az optimális beavatkozás meghatározásához. A proaktív tervezés tehát elengedhetetlennek tűnik.

A mai szélenergia-rendszerek rendelkeznek jól definiált zárlati áthidalóképességgel, melynek eredményeképp képesek a feszültség visszaállításában aktív részt vállalni. A jelen levő szélparkból azonban mindössze 4 tett eleget ennek a kötelezettségének ebben az esetben. Ezt számos beállítás befolyásolja, mely ebben az esetben jól láthatóan nem volt megfelelő a veszély elhárítására. A folyamat pontos leírását és az okfeltárást nem kívántam tovább részletezni a dolgozatban, azonban a problémát kiváló példának találtam arra, hogy a megújuló energiaforrások stabilitásra gyakorolt hatása mennyire nyitott és aktuális probléma.

2 A rendszerstabilitás kérdései

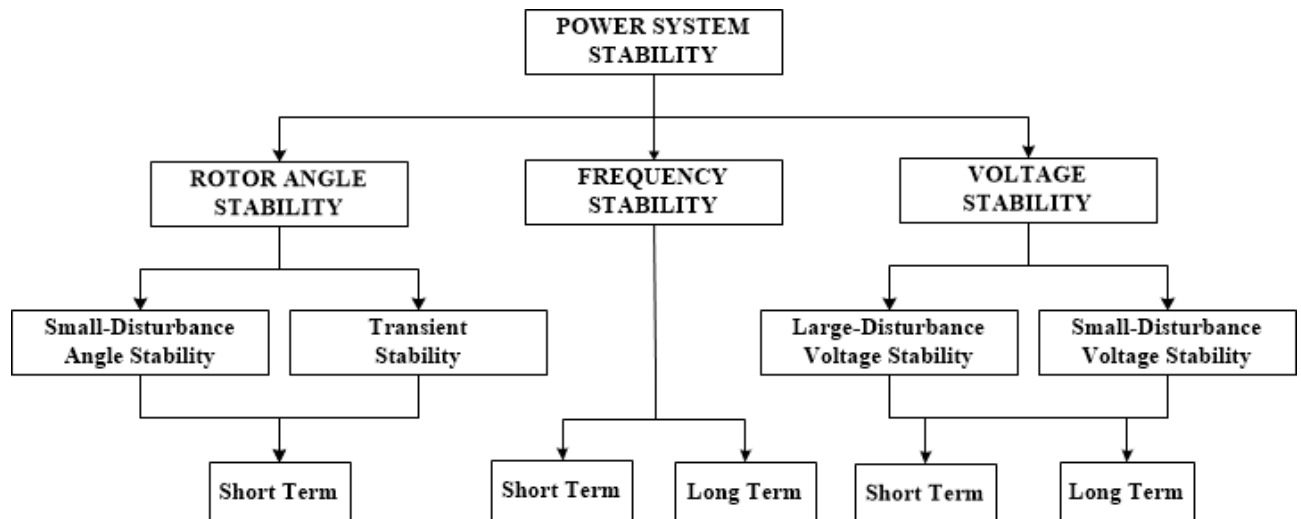
A villamosenergia-rendszer stabilitása alatt azt a képességet értjük, hogy a rendszer egy –állandósultnak tekinthető – kiinduló üzemállapotából képes visszatérni egyensúlyi helyzetébe miután valamilyen változás (terhelésnövekedés vagy csökkenés, hálózati hiba stb.) befolyásolta a működését, valamint ezen folyamat során a rendszer integritása nem sérül. [3]

A definíció rendszerszemléletet alkalmazva tekint a stabilitás kérdésére, de a fogalom értelmezhető akár egyetlen termelőegységre, vagy csatlakozó berendezések halmazára is. Előfordulhat ugyanis, hogy egy generátor kiesik a szinkron üzeméből, de ez nem okoz instabil állapotot rendszerszinten. A villamosenergia-rendszer jellemző paraméterei a tranzien্স folyamatok során nemlineáris karakterisztika szerint változnak, a kiinduló állapot és a zavar jellege egyaránt komoly hatást gyakorol rájuk. A stabilitás tehát gyakorlatilag egy nyugalmi állapot (a rendszerre ható folyamatok által meghatározott körülmény, melyben a paraméterek tervezett határokon belül maradnak) pillanatnyi fennállása, vagy egy ciklikusan visszatérő állapot, mely során a paraméterek nem lépik át a meghatározott tűréshatárokat. Megjegyzendő, hogy a lassú, folyamatosan jelentkező változások jellemzően a kisebb terhelésváltozások vagy aperiodikus folyamatok következményei. A rendszerre ható zavarok igen sokrétűek lehetnek: a normál terhelésváltozás okozta kismértékű zavarok esetén a stabilitás megőrzése nem jelent kihívást, a komolyabb meghibásodások (zárlatok, generátor kiesések) esetén azonban előfordulhatnak problémák. [1][2][3]

2.1 A stabilitás tipizálása

A villamosenergia-rendszer magasabb rendű, többváltozós folyamatokat tartalmaz, melyek nagyszámú eszköz interakciójaként állnak össze. Az instabilitás nehezen kezelhető uniform módon hatékonyan, ezért szükség van egy általános tipizáló eljárásra, mely után az egyes esetekben egyértelműen kiválasztható a szükséges rendszermodell és analitikus eljárás. Ezen folyamatokra azonban általánosan jellemző a komplexitás, így gyakran találunk ok-okozati összefüggést (vagy párhuzamos megjelenést) az egyes típusok közt. A 6. ábrán látható csoportosítás a gyakorlati tapasztalatok alapján készült és a következő elveken alapul:

- Az instabilitás egy fő paraméter fizikai viselkedésében mindig jól megfigyelhető
- A zavar jellege és nagysága fontos szempont, a számítási módszert alapjában meghatározza
- Az eszközök, folyamatok és az időtartam, amely feltétlenül szükséges a pontos leíráshoz [3]



6. ábra: a stabilitás tipizálása [3]

A 3 paraméter alapján történő csoportosítás (szög, frekvencia, feszültség) a zavar kis és nagyléptékű elkülönítése, illetve az időtartam 2 léptékre választása már kellően definiálja a szükséges további lépéseket. A zavar mértékének növekedése általában a paraméterek nemlineáris változásának figyelembe vételét vonja maga után, az időlépték növekedése pedig a számítási módszer bonyolultságát csökkenti, hogy az eredményekhez hozzájuthassunk kívárható időn belül. [3]

2.2 Szögstabilitás

A szögstabilitás gyakorlatilag az összekapcsolt szinkrongépek azon képessége, hogy zavar esetén képesek a szinkronjáró állapotba visszatérni. A gépek forgási sebességének változása során sok esetben komoly szög és teljesítménylengések alakulhatnak ki, melyek veszélyeztetik a rendszer integritását, a szinkron járás fennállását. Függ az elektromágneses és elektromechanikai nyomatékok megőrzési és visszanyerési képességétől és a gépek mechanikai tulajdonságaitól is. A leadott teljesítmény a szögváltozás következtében módosul, így a dinamikus egyensúlyt leíró lengési egyenlet alapján számíthatjuk a gép paramétereinek aktuális értékét.

Kétgépes rendszert feltételezve a szögeltérés huzamosabb idejű fennállása esetén teljesítményáramlás indul a gyorsabb egységtől a lassabb felé a különbség csökkentésére. A teljesítmény-szöghelyzet összefüggés azonban sokszor erősen nemlineáris jellegű. Instabilitás akkor lép fel, ha a rendszer már nem tud kinetikus energiát elvenni a forgótömegektől a kiegyenlítés folytatására. [3]

2.2.1 Kisjelű szögstabilitás

Kisjelű vagy kis zavar esetén fellépő szögstabilitás módszertana alkalmazható olyan esetekben, amikor a zavar olyan apró, hogy a rendszeregyenletek linearizálása nem okoz jelentős hibát a számítások során. A folyamatot ekkor leginkább a kiinduló állapot határozza meg. Az instabilitás megjelenhet növekvő

szögkülönbségben (aperiodikus jelleg, ma már nem jellemző köszönhetően a generátorok gerjesztés szabályozásának), a szinkronozó nyomaték hiányában, illetve növekvő amplitúdójú szöglengésekben, ha nem áll rendelkezésre elégségesen nagy csillapító nyomaték. [3]

2.2.2 Tranziens stabilitás

Nagyobb zavar (pl. átviteli hálózaton keletkezett zárlat) során nagy amplitúdójú lengések alakulnak ki a szögekben is, amelyek nemlineáris teljesítmény-szögeltérés összefüggéssel írhatók le. Ebben az esetben a linearizált közelítés nem célravezető, és a zavar jellege sem elhanyagolható a számítások során. Az instabilitást leginkább jellemző mennyiség ebben az esetben az első lengés, amely a szinkronozó nyomaték hiányából kialakul. Mindazonáltal nagy kiterjedésű rendszerek esetén ez a lengés nem feltétlen az időben első lengés, a rendszerszintű egymásra hatás több lépésben tovább erősítheti azt. A lényeges időtartam a hiba bekövetkezését követő 3-5 másodperc, nagy rendszerek esetén 10-20 másodperc, ha a belső kölcsönhatásokból következő lengéserősítés a meghatározó. [3]

2.3 Feszültségstabilitás

A feszültségstabilitás a villamosenergia-rendszer azon jellemzője, hogy mennyire képes a névleges értéken tartani a feszültség nagyságát az egyes gyűjtősíneken. Főként a hiba bekövetkezése után kialakuló teljesítményviszonyoktól függ. A feszültségérték tűréshatárokon túli növekedése/csökkenése védelmi működéshez vezethet, mely lekapcsolja az adott elemet (hálózatrészt) a rendszerről. Ez a folyamat könnyen vezethet sorozatos lekapcsolásokhoz láncreakciószerű terjedéshez és rendszerösszeomláshoz.

A feszültségekre nézve instabil helyzetek kialakulásának fő mozgatórugója a terhelések változása. A zavar utáni fogyasztás kielégítésére a motorok slipváltoztatása, elosztóhálózati feszültség szabályozók, változtatható áttételű transzformátorok alkalmazhatók. A visszatérő terhelések azonban olykor megterhelik az átviteli hálózatot meddőteljesítmény-igényükkel, ezáltal további feszültségesést okozva. A visszaállítás ezen hatás miatt körütekintő tevékenységet igényel. A folyamatok hasonlóak a szögstabilitás kérdéséhez, a legfőbb különbséget – mely egyben a szétválasztás oka is – az egyensúlyt teremtő erőhatások (rendszerparaméter) adják. Fontos figyelembe venni a fogyasztói dinamizmust is, melynek értelmében az aktuális terhelés függ a hálózati feszültségtől és frekvenciától is. [3]

2.3.1 Nagyléptékű feszültségstabilitás

Rendszerszinten is releváns nagyságú hibák esetén a rendszer és a terhelés karakterisztikái, valamint a védelmek játszanak kulcsszerepet a feszültségérték tűréshatáron belül tartásában. Néhány másodperctől a 10 perces nagyságrendig változhat a vizsgálandó időtartam, és az erősen nemlineáris folyamatokat figyelembe kell venni. [3]

2.3.2 Kis léptékű feszültségstabilitás

Kisebb perturbációk esetén a terhelés és a szabályozások/védelmek karakterisztikái determinálják a kialakuló problémákat. Linearizálható az egyenletrendszerek egy része, azonban néhány nemlineáris hatás nem kiküszöbölhető (pl. fokozatváltás vezérlése). [3]

2.3.3 Csoportosítás a folyamatok időtartama alapján

A feszültségstabilitás kérdésekor elkülönítünk rövid és hosszú idejű folyamatokat, ahogy az a 6. ábrán is megjelenik. Rövid idő alatt jellemzően a teljesítményelektronikai vezérléssel ellátott eszközök terhelésváltozását értjük (másodperces nagyságrend a vízvásztó). Hosszabb idő alatt például a transzformátorok fokozatváltásának hatásait érthetjük, vagy a hőmérséklettel összefüggő terheléseket. A vizsgálati módszerek a feszültségstabilitás esetében jellemzően dinamikus modelleket igényelnek. Statikus szimuláció segítségével esetlegesen határértékek megszabását és a változások közelítő leírását tehetjük meg olyan esetekben, amikor a szimulációk darabszáma alapján reprezentatív adat nyerhető. [3]

2.3.4 Frekvenciastabilitás

A frekvenciastabilitás a rendszer azon jellemzője, hogy milyen mértékben képes a névleges érték közelében tartani a frekvenciát zavarhelyzet esetén. A fő meghatározó változó a betáplálások és terhelések közti egyensúly és az attól való eltérés mértéke. Az instabilitás frekvencialengések formájában jelenik meg, mely a hálózatra csatlakozó eszközök szinkron üzeméből való kieséséhez, megszűnéséhez vezethet. Néhány meghibásodás olyan nagymértékű változásokhoz vezethet a paraméterekben, melyek az előző két csoportban ismertetett modellezés esetén nem kerülnek a rendszerbe. Bizonyos folyamatok ezek közül igen lassúak is lehetnek (pl. hőtárolós berendezések teljesítményváltozása). Nagy kiterjedésű együttműködő rendszerek esetén szigetekre szakadás jelentkezik. Leginkább hálózatra csatlakozó eszközök nem megfelelő beállítása, hibás koordináció és vezérlés, vagy a forgótartalékok hiánya eredményezi. [3]

2.3.4.1 Csoportosítás a folyamatok időtartama alapján

Az eszközök működése frekvenciaváltozáskor néhány másodperctől néhány percre terjedhet (fogyasztói terheléskorlátozások, primer tartalék beléptetése). Mindazonáltal a frekvenciastabilitás is felbontható időben hosszabb és rövidebb típusra. Rövid idejű típus lehet például egy olyan szigetüzemben levő, forgó tömeggel alig rendelkező hálózatrész, melyben a fogyasztói terheléskorlátozás nem elégséges a rendszer integritásának megőrzésére. Ekkor a hálózaton teljes kiesés is keletkezhet néhány másodpercen belül. Hosszabb időtartamú hatás például egy gázturbina túlságos felszabályozása, mely kisebb méretű hálózaton a 10 másodperces nagyságrendtől a néhány perces nagyságrendig jelentkezik frekvenciaváltozás formájában. [14]

3 Az inercia szerepe és emulálási lehetőségei

A villamosenergia-rendszer stabilitásának kérdésköre igen összetett, vizsgálata komoly elméleti háttértudást igényel. Munkám során a frekvenciastabilitás folyamataira koncentráltam, azon belül is az egyensúly felbomlása utáni közvetlen néhány másodpercre. Ez az az időszak, mely során a rendszer még a beépített szabályozói nélkül néz szembe a zavarokkal. Az ez után érvénybe lépő folyamatok definícióját a F1 fejezetben ismertetem. A folyamat, melyet figyelemmel kísértem, a hatásos teljesítmény és frekvencia közötti összefüggés. Ezen fejezet célja a modellezésemhez használt bemenetek indoklása és a gondolkodásom alapelveinek bemutatása. A folyamatok képzéséhez és értékeléséhez a 3.1-ben leírt nemzetközi iránymutatás szolgálta a kiinduló pontot, míg a technológiai lehetőségeket az elérhető szakirodalom és a tudományos kutatások aktuális eredményei alapján tipizáltam és paramétereztem.

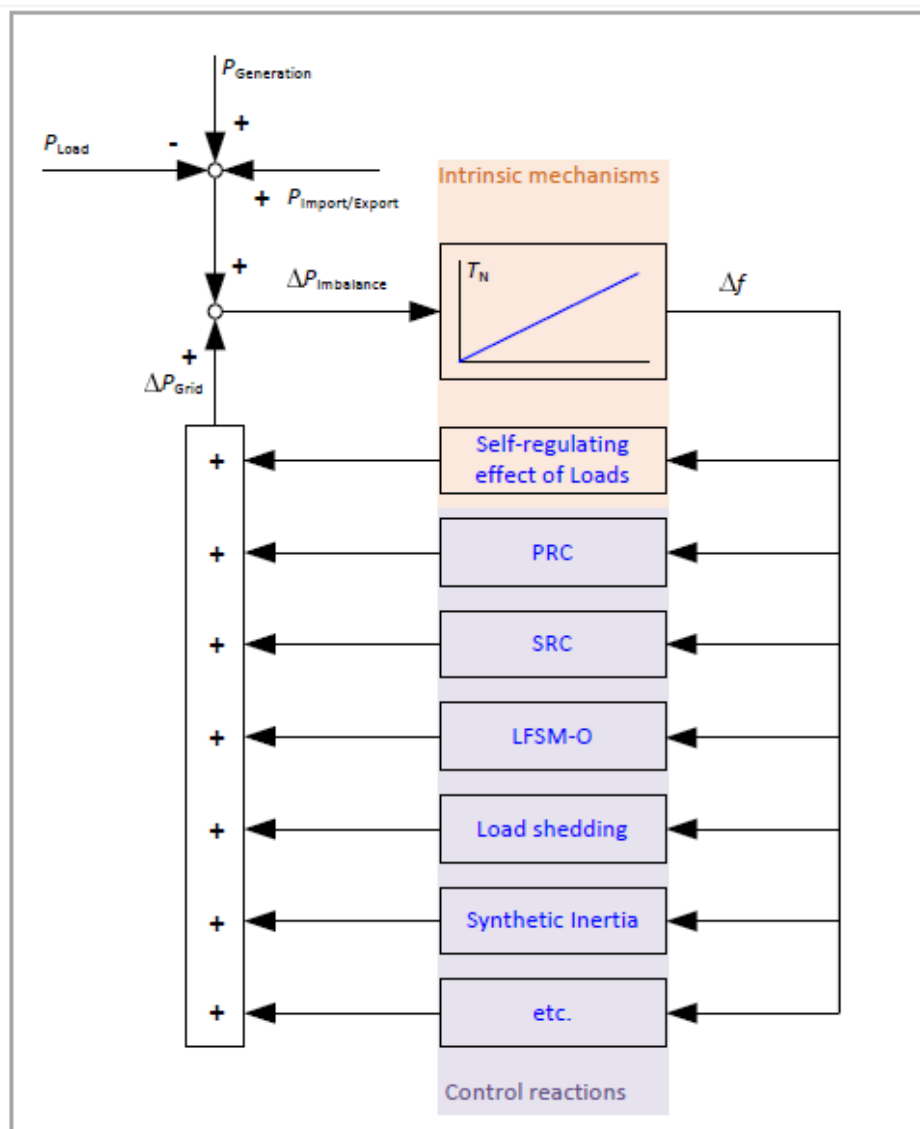
3.1 ENTSO-E irányelvek a teljesítményelektronikai berendezéseken keresztül a hálózatra csatlakozó termelőegységek stabilitásra gyakorolt hatásának elemzésére [28][30]

A probléma aktualitását jól mutatja, hogy az ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators of Electricity) a három kiemelt témájának egyikeként felvette a kutatás-fejlesztési tervébe a 2015-17-es időszakban. Számításaik az összekapcsolt európai rendszerre nézve értékelték a jövőbeni hatásokat. Röviden összefoglalva, amennyiben a rendszer teljes egészében szinkron jár, ellenálló képessége hatalmas és nem jelentkezhetsz probléma még kiemelkedően magas megújuló penetráció esetén sem. Azonban az integritás sérülése esetén a részrendszerek már komoly veszélyben vannak.

3.1.1 Vizsgálandó folyamatok és paraméterek

Általánosságban a nagy rendszerre vonatkozóan jelenleg a 20%-os „teljesítmény kiegyensúlyozatlanság” mellett 0,5-1 Hz/s-os frekvenciaváltozások megfigyelhetők és kezelhetők a meglévő szabályozási eszközökkel, e felett viszont az integritás megőrzése nem vehető biztosra. A jövőben azonban a teljesítmények közti eltérés akár 40% is lehet, a változási sebesség pedig 2 Hz/s-ra nőhet. Az inercia szerepe tehát kritikussá válik, mint a változási sebességet meghatározó tényező, mérőszáma a rendszer ellenállóságának. Mivel a konvencionális primer szabályozás beavatkozási ideje ilyen esetekben akár túl lassú is lehet, az inercia megőrzése és mesterséges növelése fontos feladat. A teljesítményelektronikai berendezéseken keresztül hálózatra csatlakozó eszközök azonban nem rendelkeznek ilyen közvetlen fizikai válasszal, így amennyiben a körülmények megkívánják, ennek pótlására valamilyen vezérlési algoritmust vagy eszközt kell segítségül hívni. A frekvencia névlegeshez viszonyított +/- 200 mHz-en belüli sávon tartása a cél, mely a normál üzemállapotot jellemzi. A 47,5 Hz alatti vagy 51,5 Hz fölötti esetekben kijelenthető, hogy a rendszer bizonyos részeinek összeomlása szinte elkerülhetetlen. A kontinentális (európai

összekapcsolt) rendszer vizsgálatára a referencia hiba 3 GW mértékű, az ENTSO-E elemzései alapján azonban kijelenthető, hogy ilyen nagy szinkron járó rendszer esetén kevésbé jelentkezik a vizsgált probléma, az eredményeik során az FTK működés belépési szintjét (49 Hz) sosem érte el a frekvencia. A nagy rendszer frekvenciaváltozással szembeni ellenállósága 10 s feletti inercia konstanssal jellemezhető, a vizsgálatokban 2,3 s esetén is 49,2 Hz volt a frekvencia minimuma a referencia hiba esetén, tehát az inercia csökkenése nem okoz fejfájást a rendszerirányító számára. Felhívják a figyelmet azonban arra, hogy ha a rendszerrészek szétválnak, a helyzet merőben másképp fest. Ebből kifolyólag kisebb rendszerrészeket kiemelve elemzem majd a hatásokat és ellenőrzöm az előírt határoknak való megfelelést alapesetben, illetve a szintetikus inercia képzés esetén. Fontos megjegyezni, hogy a tanulmányban ismertetett szimulációk koncentrált modellen készültek (azaz a teljes rendszer egyetlen forgó tömegként reagál, nincsenek lokális eltérések és interakciók a rendszerrészek közt).



7. ábra: ENTSO-E összesítés a frekvenciaváltozást befolyásoló tényezőkről [28]

A 7. ábrán látható a frekvenciaváltozást befolyásoló folyamatok és szabályozások összessége. A statikus egyensúly esetén a termelés és fogyasztás egyensúlyban van (import/export folyamatokat is beleértve), ekkora a $\Delta P_{\text{imbalance}} = 0$, tehát nincs szükség korrekcióra. Ellenkező esetben a teljesítmény eltérés a rendszerjellemzők alapján valamilyen frekvencia megváltozást produkál (itt jön a képbe az inercia), amely alapján a különböző szabályozó mechanizmusok működésbe lépnek. A fogyasztók feszültség- és frekvenciafüggése egy inherens, de fontos folyamat. Legrosszabb esetet vizsgáló gondolkodás miatt nem vettem figyelembe a hatásait modellben, de a munka folytatásában feltétlenül megvizsgálom a hatását.

A termelőegységek szabályozása hazánkban:

- Primer szabályozás (Primary Reserve Control, PRC) vagy az új megfogalmazásban a frekvenciatartó (Frequency Containment Reserve, FCR) szabályozás. A modellezés során a szinkrongenerátorok primer szabályozása fontos szerepet fog játszani, minden modellemben implementálásra kerül.
- Szekunder szabályozás (Secondary Reserve Control, SRC/Frequency Restoration Process, FRR) a névleges értékre visszatérésért felel. Mivel nem közvetlen a meghibásodás elhárítására, hanem a normál üzemhez visszatéréskor alkalmazzák, így nem kerül leképezésre.
- Teljesítményelektronikával rendelkező termelők frekvencia alapú szabályozása (Limited Frequency System Mode, LFSM, két típusa, a felső/over és alsó/under, LFSM-O, LFSM-U) veszélyhelyzet elhárítására alkalmazható szabályozási eljárás. Jelen van a modelleimben a szélérőmű modelljéhez, de nem aktiválódik.

Az FTK (Automatic Load Shedding, ALS) a rendszer integritásának megőrzéséért hasznos eszköz, azonban működése szembe megy a villamosenergia-rendszer fő céljával, a fogyasztók ellátásával, így alkalmazása csak ténylegesen olyan esetekben javasolt, amikor katasztrófát kerülhetünk el vele. Jellemzően 49 Hz értéknél lép működésbe és több lépcsőben választ le fogyasztói csoportokat a rendszerről. A megvalósított szabályozásokkal való interakciója – csak úgy, mint önmagában az FTK adaptívabbá tétele – a jövő frekvenciaszabályozásának fontos kérdése, konkrét vizsgálatokat azonban csak munkám későbbi fázisában tervezek, így a modelleken bár implementáltam az FTK védelmet, nem lesznek aktívak.

A szintetikus inercia képzése a dolgozat fő tárgya, a teljesítményelektronikai berendezések frekvenciaváltozásra adott teljesítményváltozását hivatott biztosítani, mely segítségével a nem megengedhető paraméterértékekre kerülés – ezáltal pedig az FTK alkalmazás vagy a rendszerösszeomlás - elkerülhetővé válik.

További hatások alatt érthetjük a hosszabb távon aktiválódó szabályozásokat és az egyéb eddig nem tárgyalt folyamatokat, ezeket a modellezésem során elhanyagolom.

3.1.2 Kiértékelési lehetőségek

Az elemzések alapján kiderült, hogy a tervezés során figyelembe kell venni a rendszerrészekre maximális megengedhető frekvenciaváltozást (közvetve a minimális szükséges inerciát), és a teljesítmény eltérés maximális százalékos értékét. A feltételezések alapján az inercia csak a szinkrongenerátorok működéséből származik, így minden teljesítményelektronikán keresztül csatlakozó betáplálás 0 inerciával rendelkezik. A rendszerre nézve a mögöttes kinetikus energia tartalék kiszámítása ad jól értelmezhető adatot. A legrosszabb esetek számítása során a terhelés önszabályozó folyamata elhanyagolásra kerülhet (a későbbi modellezés során vizsgálat tárgyát képezi majd a hatása).

A követelmények megfogalmazását a F2-ben ismertetett fizikai háttér alapján rendszerszinten a következőképp fogalmazhatjuk meg:

$$H_{R,min} = \frac{\Delta P}{P_{terhelés}} * \frac{f_n}{ROCOF_{max}}$$

3-1. egyenlet: a minimális inercia követelmény megfogalmazása [28]

Az 3-1. egyenletben látható, hogy amennyiben meghatározzuk, hogy a rendszer mekkora kiegyenlítetlenséget (ΔP) és frekvenciaváltozási sebességet ($ROCOF_{max}$) köteles elviselni, akkor ez alapján megfogalmazható a minimális szükséges inercia mértéke ($H_{R,min}$) (természetesen bármely 2 paraméter meghatározottsága determinálja a harmadikat, így egyéb megközelítések is alkalmazhatóak). Mivel az ENTSO-E 40% teljesítmény eltérést és 2 Hz/s-os frekvenciaváltozást írt elő, az egyenlet alkalmas a szimulációs eredmények elbírálására. Amennyiben külön nem emelem ki az aktuális vizsgálat során, a [28]-ben leírt módszertan és bemenő adatok képezik számomra a referenciát. Mivel (F2 alapján) a rendszer mögöttes kinetikus energiája egyszerű összeadással meghatározható, esetenként ezt is felhasználom majd, azaz a forgó tömegek energiájára teszek egy minimális követelményt. A kialakuló frekvencia legalacsonyabb értékét az FTK elkerülésének céljából 49 Hz-nek veszem.

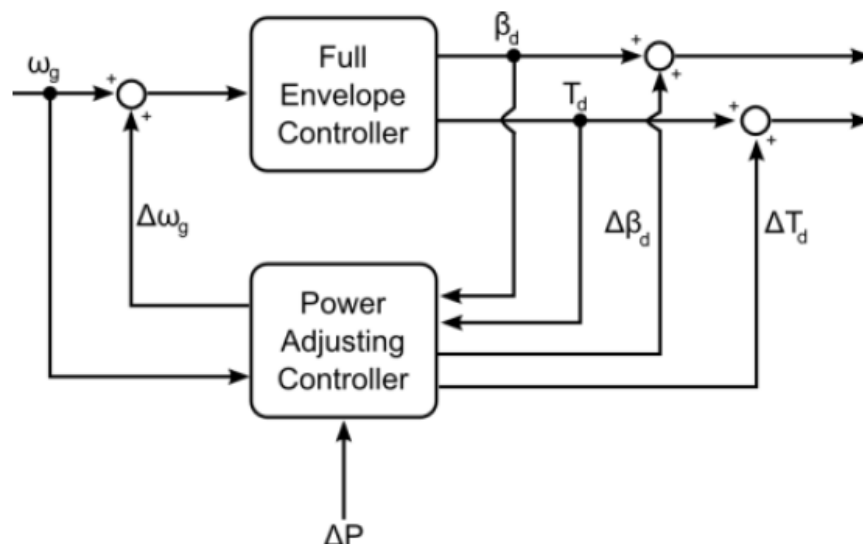
3.2 A szintetikus inercia technológiai lehetőségei és paraméterei

A teljesítményelektronikai berendezéseken keresztül a hálózatra csatlakozó eszközök el vannak választva a rendszerparaméterek változásától, ennél fogva nincsen közvetlen fizikai válaszuk, minden ilyen megvalósítás valamilyen mérés, feldolgozás és beavatkozás eredménye. Ennél fogva a hálózatmodellezésnél az ilyen berendezések valamilyen feszültség- vagy áramforrásként kerülnek leképezésre és nem játszanak szerepet a lengési egyenletben sem. A vezérelhetőség azonban széleskörű lehetőségeket kínál a fizikai hatások emulálására, például szintetikus (virtuális, mesterséges) inercia képzésére, mely a frekvenciaváltozás alapján adott teljesítményválasz. Szakirodalmi áttekintésem során három fő csapásirányt ismertem fel, melyek közül végül kettővel foglalkoztam részletesen.

3.2.1 Szélerőművek

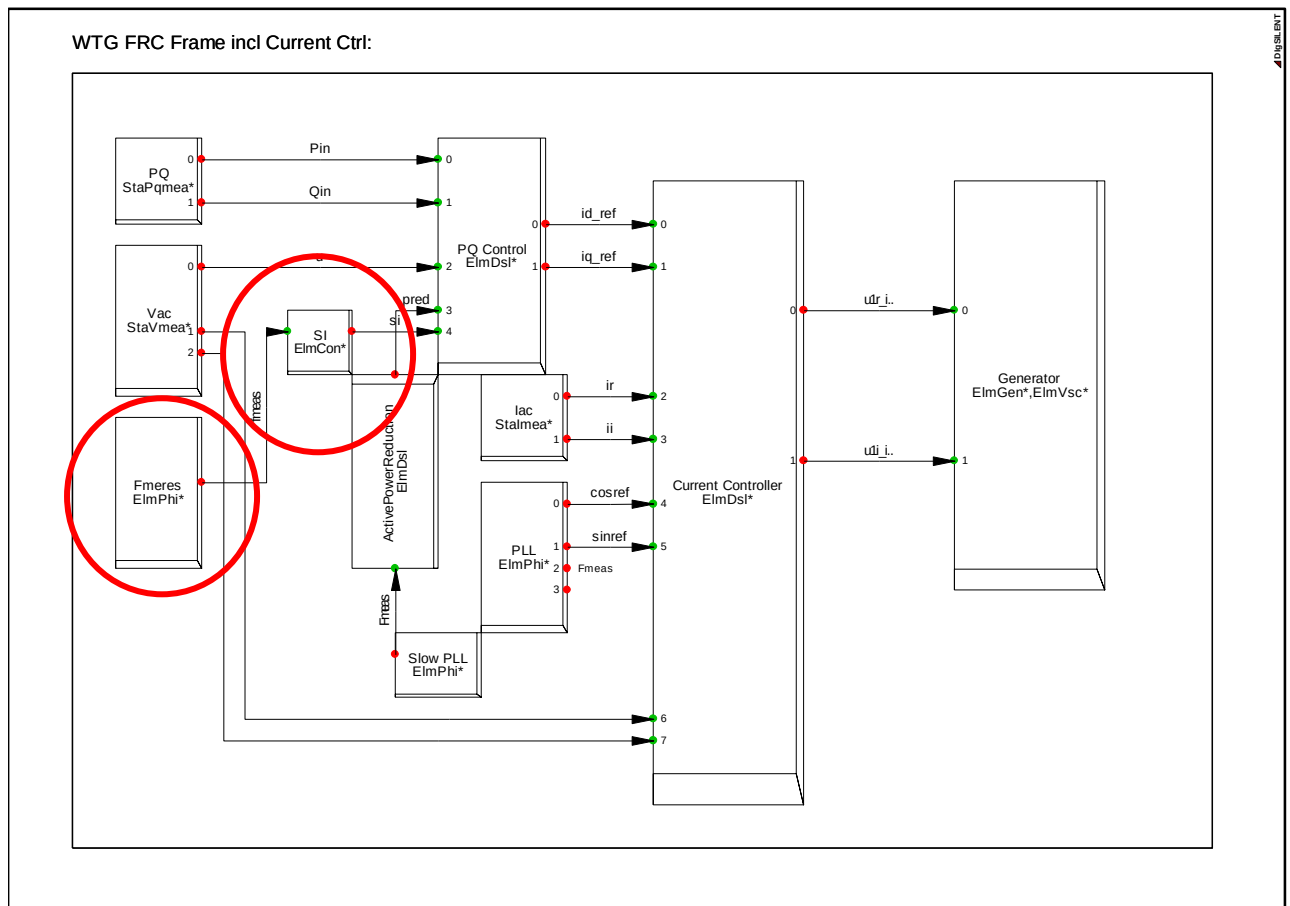
A négy eltérő szélerőmű alaptípus közül kettő terjedt el széles körben, melynek oka a szabályozhatóság: a kétoldalról táplált aszinkron gépes (doubly fed induction machine, DFIG) és a full konverteres (FC) típusok felelnek meg az energiatermeléssel szemben támasztott igényeknek. Ezen technológiai megoldásokat már számos aspektusból részletesen elemezték, például zárlati áthidaló képesség, vagy feszültség-meddőteljesítmény szabályozás tekintetében, így a vezérlő szerkezetek kellően részletesen megismerhetők.

A szélerőművek esetében az inercia nem is olyan elrugaskodott gondolat, a forgó lapátokban rejlő kinetikus energia kiaknázásához a már üzemben levő vezérlés kiegészítése szükséges. Ezt legegyszerűbben egy párhuzamos hurok beiktatásával valósítják meg, mely módosítja a szélerőmű kimeneti teljesítményét a hálózati frekvencia függvényében (8. ábra). Ennek lényege, hogy a frekvenciaváltozás sebessége alapján számíthatunk egy ΔP „hamis” teljesítményt, melyet egy bizonyos értékű inerciával rendelkező szinkrongép szolgáltatna az adott helyzetben. Figyelni kell azonban arra, hogy a szélerőmű alap szabályozója ezt a plusz hurkot az optimálistól eltérő hatásnak észleli, így ki akarná küszöbölni. Ennek elkerülésére kell előállítani egy plusz szögsebesség jelet, mellyel a szintetikus inercia aktív állapota esetén „becsapjuk” a szabályozót, így az nem fogja kiküszöbölni a szükséges változtatást. Mivel ekkor a gépből plusz nyomatékot veszünk fel, a rotor lassulni fog, ez adja a szintetikus inercia szolgáltatásának elvi időtartománybeli határát, viszont az átmeneti időszakban a villamos teljesítmény növelhető. A veszély elhárítása után a belső szabályozó visszaveszi az irányítást, visszanyeri az optimális forgási sebességet és bizonyos idő elteltével visszaáll normál üzemébe. Fontos figyelembe venni a leszabályozás és a primer szabályozás interakcióját.



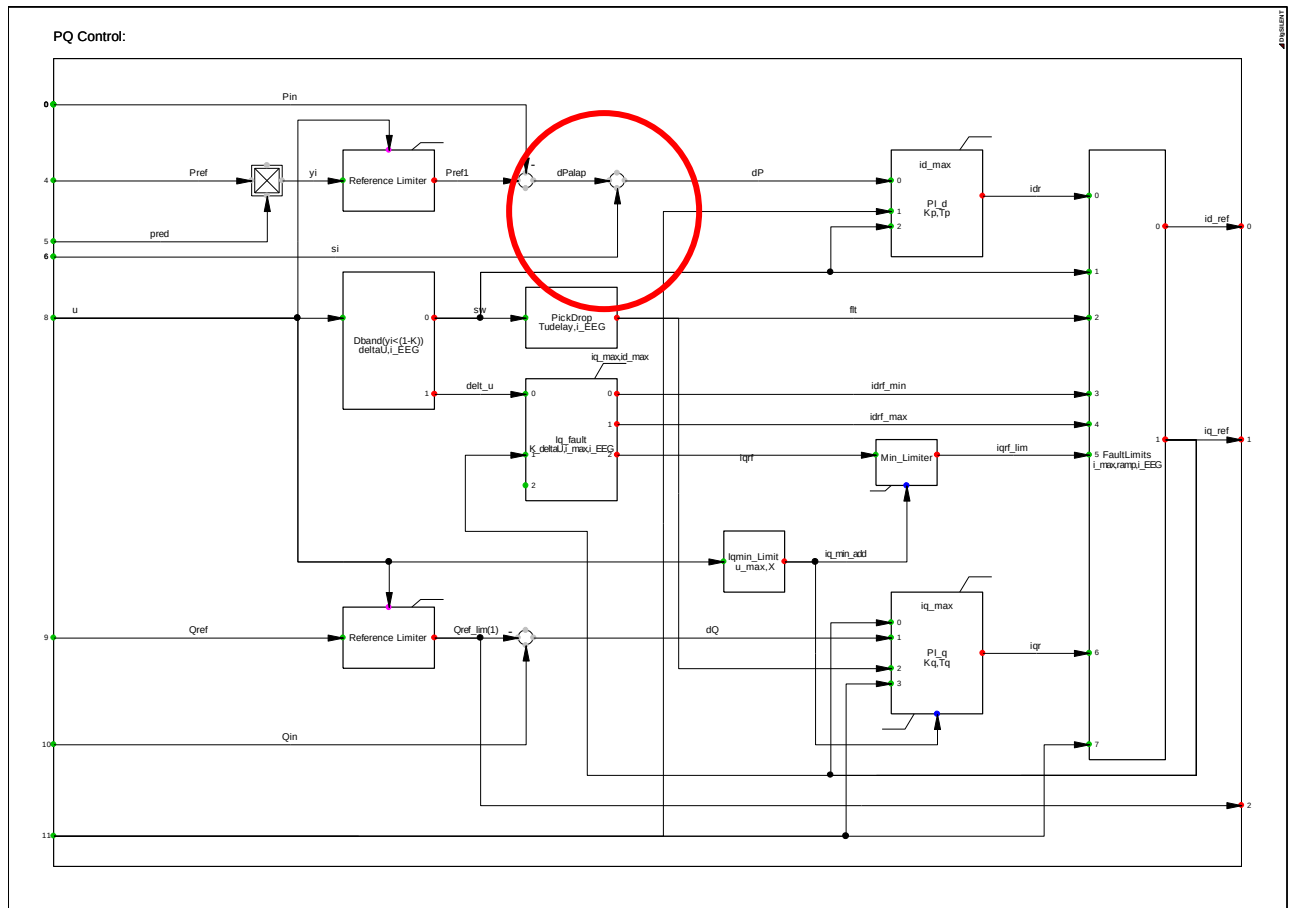
8. ábra: szélerőmű szintetikus inercia képzésének elvi sémája [7]

A részletes kialakítás és a paraméterek felhasználása mindig az adott környezettől függ. A lényeg azonban, hogy a szélerőmű alap vezérlését nem sértjük meg vagy cseréljük le, csak kiegészítjük egy párhuzamos hurokkal. Az ilyen vezérlés a teljes működési tartományban használható, generikus, beépített védelmeket tartalmaz a nem megengedett állapotok elkerülésére.



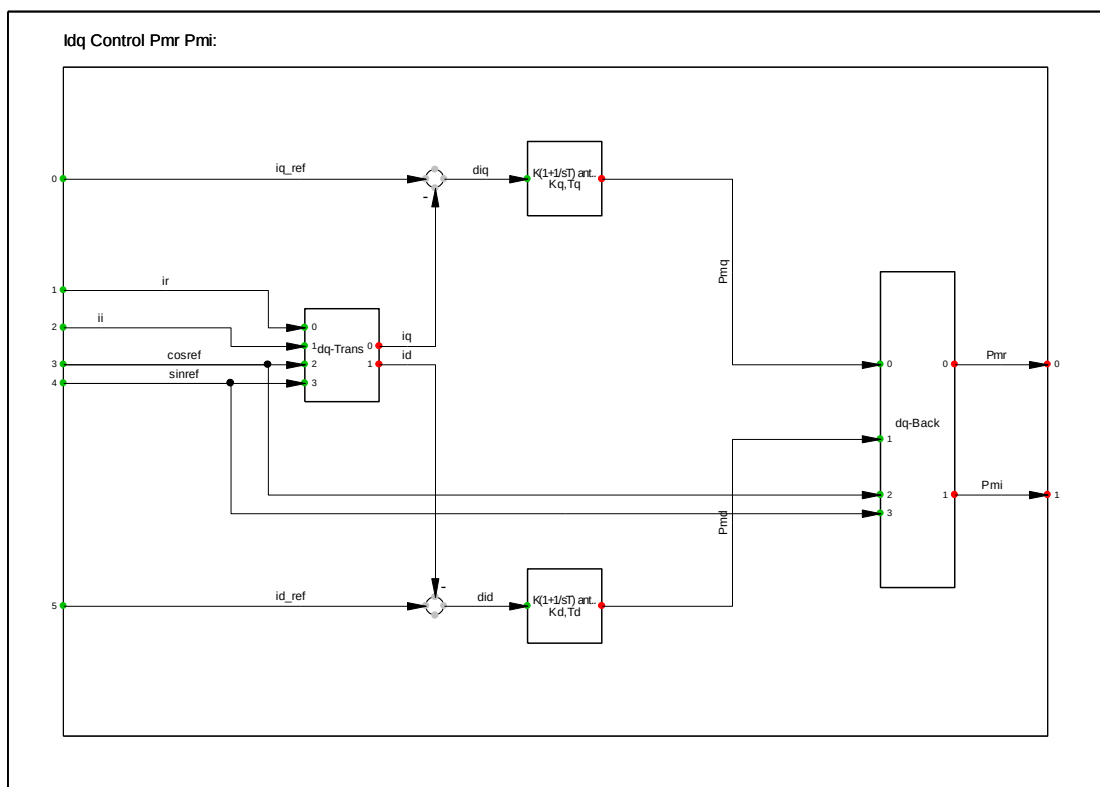
9. ábra: szélturbina szabályozó vázlata

A 9. ábrán a DigSilent Power Factory program egyik példájában fellelhető szélerőmű szabályozó blokkvázlata látható. A pirossal kiemelt 2 blokkot adtam a szabályozó rendszerhez. Az „Fmeres” jelű blokk szolgáltatja a szintetikus inercia szabályozók bemeneti változóját, a mért frekvenciát. Az SI blokk tartalmazza a szintetikus inercia vezérlést, mely előállít egy szükséges teljesítmény jelet (4. fejezetben részletesen bemutatásra kerül), amely a szabályozó teljesítménybeállító egységébe megy és a fentebb leírt módon beavatkozik. A jelen részletességű szabályozás nem igényli a szögsebesség eltérés kiküszöbölését, a szélerőmű működésének ezen vetületét elhanyagolom a vizsgálatok során. Mindez azt feltételezi, hogy a szélesebbesség az aktuális munkaponton állandó marad a folyamatok során, mely néhány másodpercet ölel fel.



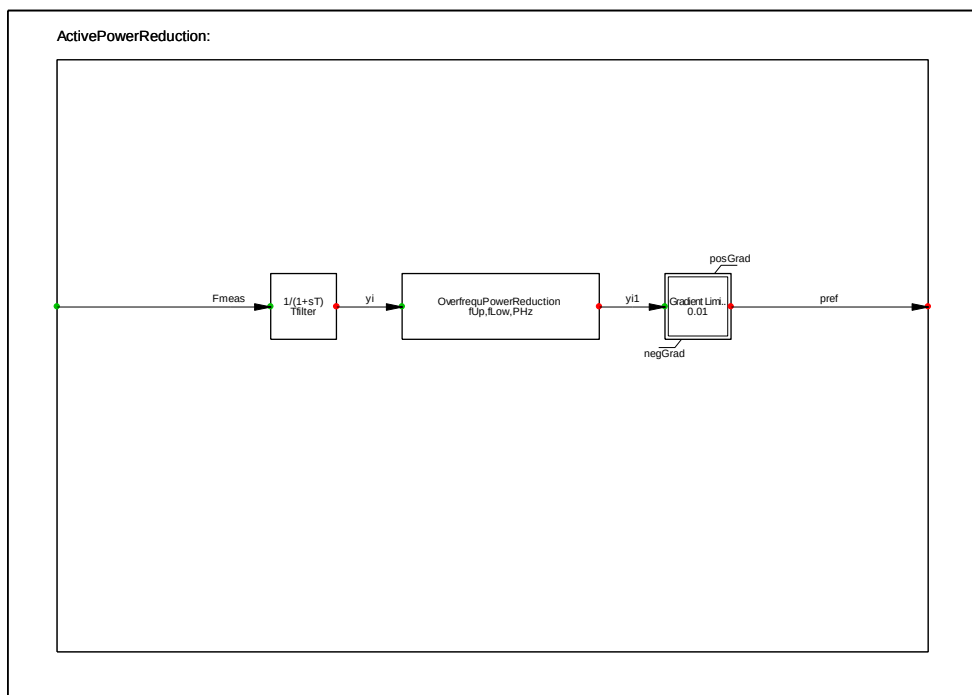
10. ábra: szélérőmű teljesítményszabályozójának blokkvázlata

A 10. ábrán látható a teljesítményszabályozó blokkvázlata. Mivel a szabályozó a referencia teljesítménytől való eltérés alapján működik (eltérés esetén a hibajel alapján állítja be az aktuális értékeket, majd a visszacsatoláson keresztül sikeres beavatkozás esetén eltűnik a hibajel), így az „si” jel, mely a szükséges teljesítményváltoztatás mértékét hordozza, párhuzamosan adódik a mért és a referencia jel aktuális különbségéhez. Ezzel a megoldással pont a vártaknak megfelelő hatást érjük el, hiszen a mért teljesítmény magában hordozza a szintetikus inercia előző mintavételi idejében alkalmazott hatását, ezt az eltérést pedig az aktuálissal felülírjuk, eredményképpen mindig a megfelelő kimenetet kapva. Mivel a dolgozatban a hatásos teljesítmény és a frekvencia kapcsolatát vizsgálom, így a meddőteljesítmény szabályozásába nem avatkozom bele, ennek vezérlése a beépített módon a feszültség alapján alakul ki. A szélérőmű így a rendszer kívánt feszültségének megtartásáért is felel majd.



11. ábra: szélerőmű áramvektor szabályozója

A 11. ábra a szélerőmű áramvektor szabályozóját ábrázolja. A P-Q szabályozóban előállított jelek - melyek tartalmazzák a szintetikus inercia hatását – itt alakulnak a teljesítményelektronikai berendezés számára értelmezhető jelekké.



12. ábra: szélerőmű hatásos teljesítmény korlátozó blokkvázlata

A 12. ábrán a szélerőmű kimenetét túl magas frekvenciaértékek esetén – mely a túltermelés jele – a frekvencia abszolút eltérés alapján csökkentő szabályozó eleme látható. A megoldás lényege, hogy a lassú fáziszárt hurok (PLL, 9. ábra), mely kisebb mintavételezéssel figyeli a rendszert (másodperces nagyságrendű, beállítható periódusidővel), küld egy frekvencia jelet, amely megfelelő szűrés után bekerül egy logikai kiértékelőbe. Ha ez az érték meghalad egy bizonyos előre beállított határt (például 50,2 Hz-et), akkor egy előre beállított statizmus alapján a kimenő teljesítmény redukálható. Ez a primer szabályozáshoz hasonló elven működik, viszont az időjárás függőség miatt csak leszabályozásra alkalmazható.

A szélerőművek szintetikus inerciát megvalósító vezérlésének technológiai korlátait az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat: szélerőmű technológiai paraméterei [37]

Paraméter	Érték
Minimális forgási sebesség	0,53 v.e.
Maximális teljesítmény túlterhelés	1,1 v.e.
Maximális nyomaték túlterhelés	1,2 v.e.
Minimum teljesítmény kimenet	0 v.e.
Maximális teljesítményváltozási sebesség	1 v.e./s
Maximális forgási sebesség (dinamikus állapot)	1,1 v.e.
Maximális túlterhelési idő ¹	10 s
Felépülési idő ²	20 s

3.2.2 Energiatároló berendezések

A szélerőművekkel ellentétben a napelemes rendszerek például nem rendelkeznek semmilyen mögöttes kinetikus energiatárolással. Adódik tehát a megoldás, hogy egészítsük ki az ilyen termelőegységeket a stabilitás megőrzésének céljából, vagy helyezzünk el a rendszerben energiatároló berendezéseket ilyen célfüggvény megvalósítására.

Az energiatároló berendezések karakterisztikus jellegük – gyors válaszidő, széles spektrumú kimeneti teljesítmény – miatt kerülhetnek szóba a szintetikus inercia kérdéskörében. Az inercia dedikáltan kinetikus energiatárolás, ezen megoldások viszont általánosan kezelik a tárolási technológiákat a frekvenciaszabályozás megvalósítására. A méretezési eljárások és a megfelelő technológia meglehetősen üzem specifikus, de szintetikus inercia biztosítására egyértelműen egy teljesítményüzemű megoldás

¹ Az az időtartam, mely során a szélerőmű képes többlet nyomaték leadására.

² Az az időtartam, amely során a lelassult, vagy túlságosan felgyorsult rotor visszanyeri az optimális forgási sebességét. A mechanikai terhelhetőség függvényében határozandó meg.

keresése javallott, hiszen gyorsan, de rövid ideig kell biztosítani viszonylag magas teljesítményértékeket. A feltöltés tervezése történhet menetrendszerűen valamely termelőegység tervezett felszabályozásával. Mivel a stabilitásmegőrző tartalékképzés viszonylag ritkán szükséges, így a berendezés alkalmazható más célfüggvények megvalósítására is aggregát üzemben, ezzel javítva a beruházás megtérülését.

Az energiatároló technológiák közül a szivattyúzott vizes és sűrített levegős (és hidrogén) tárolóknak például van közvetlen forgótömegből adódó válasza, ha a hálózatra csatlakozik. Ezek a konvencionális energiatermeléshez hasonló működésűek, nem szükséges a szintetikus inercia képzés szempontjából vizsgálni őket. Viszont érdemes megjegyezni pozitív hatásukat ebben a tekintetben is.

Az akkumulátoros rendszerek remek dinamikus tulajdonságokkal rendelkeznek. Akár 20-50 ms alatt elérhető a szükséges teljesítményváltoztatás, ezáltal kiválóan alkalmasak szintetikus inercia képzésre. Ez a megoldás a frekvenciaszabályozásban már számos helyen alkalmazott a világban, így a rendelkezésre álló adatok miatt kitűnő példa a dolgozatban vizsgálandó megoldások leképzésére.

A lendkerék egy kinetikus energiatároló berendezés, tehát gyakorlatilag az inerciával megegyező elven működik, működési tulajdonságai alkalmassá teszik a felhasználásra. Alkalmazható lokálisan közvetlenül inerciaképzésre és frekvenciaszabályozásra.

További technológiák, mint például a szuperkapacitás vagy a szupravezetős energiatárolás rendelkeznek néhány karakterisztikus tulajdonsággal, azonban egyéb tulajdonságaik (tárolási idő, hőmérsékletigények) jelenleg körülményessé teszik alkalmazásukat.

3.2.3 Egyenáramú/hibrid hálózatok

A hibrid rendszer gondolata nem újkeletű, a teljesítményelektronika fejlődésével az egyenáramú hálózatok előnyei kidomborodni látszanak a korábbiakhoz képest. A stabilitás szempontjából pedig felmerül a kérdés, hogy az átalakítók valamilyen együttes vezérlése esetén kialakítható-e olyan új megközelítés, mely a megújuló energiaforrások részarányának növekedésével effektív módon tud szerepet játszani a rendszerszintű szabályozásban.

A nagyfeszültségű egyenáramú hálózatok (High Voltage Direct Current, HVDC) is kínálnak lehetőségeket. A csatlakozási ponton a frekvencia függvényében vezérelt teljesítményátalakítással, a kapacitásokat felhasználva. A HVDC szabályozója így széles spektrumú inercia konstansnak megfelelő választ lehet képes szolgáltatni a rendszer számára.

Az egyenáramú és hibrid hálózatok nyújtotta lehetőségeket jelen dolgozatban nem modelleztem, vizsgálata az egyik lehetséges továbblepési irány.

4 Szintetikus inercia képzése elméletben és gyakorlatban

A szintetikus inercia képzéséhez a szakirodalmi kutatás alapján saját szabályozó köröket terveztem. A célom az volt, hogy a szintetikus inercia létrehozását végző vezérlés illeszthető legyen minden szükséges megoldáshoz, így bár olykor feleslegesen bonyolultnak tűnik a kialakítás, minden paraméter szükséges valamely speciális esetben. Ennek hatására a gyakorlatias kezelhetőség is adott, hiszen a DigSilent Power Factory program környezetében alkalmazott hierarchiákhoz igazodik. A 4.1. fejezetben bemutatom az egyes szintetikus inercia képző szabályozókat, majd a 4.2 és 4.3 fejezetben specifikusan a szélérőművekre és energiatárolókra jellemző paraméterválasztást és keretrendszert.

A szinkrongépek inerciális válaszát a következőképp fogalmazhatjuk meg:

$$\Delta p = 2Hf_R \frac{df_R}{dt}$$

4-1. egyenlet: az inerciális válasz

ahol Δp a teljesítményváltozás, H az emulált inercia konstans, f_R a rendszer aktuális frekvenciája. A vezérléssel történő aktiváció során tehát ezt a teljesítménytöbbletet szeretnénk kinyerni a felhasznált forrásunkból a hálózati frekvenciamérés alapján. A bemenő jel egy fáziszárt hurok hálózati frekvenciaméréséből származik, viszonylagos egységben értendő. A szintetikus inercia szabályozót alapvetően relatív egységekben gondolkodva terveztem, azonban a rendszerbe illesztés során néhányszor már MW alapú jelekre van szükség: ennek előállítására egy külön erősítő került a struktúrákba.

A bemenő frekvencia jelet minden esetben szűrőn keresztül vizsgálom, erre azért van szükség, mert a frekvencia alapvetően egy zajos jel, így pedig biztosítható, hogy csak a szükséges változásokra reagáljon a szabályozó, valamint az esetleges lengési problémák is kiküszöbölhetőek. Az aluláteresztő szűrő időállandójának megfelelő megválasztásával a terhelésnövekedés kiinduló pontja jól meghatározható.

4.1 Szintetikus inercia képzésre alkalmas szabályozási körök

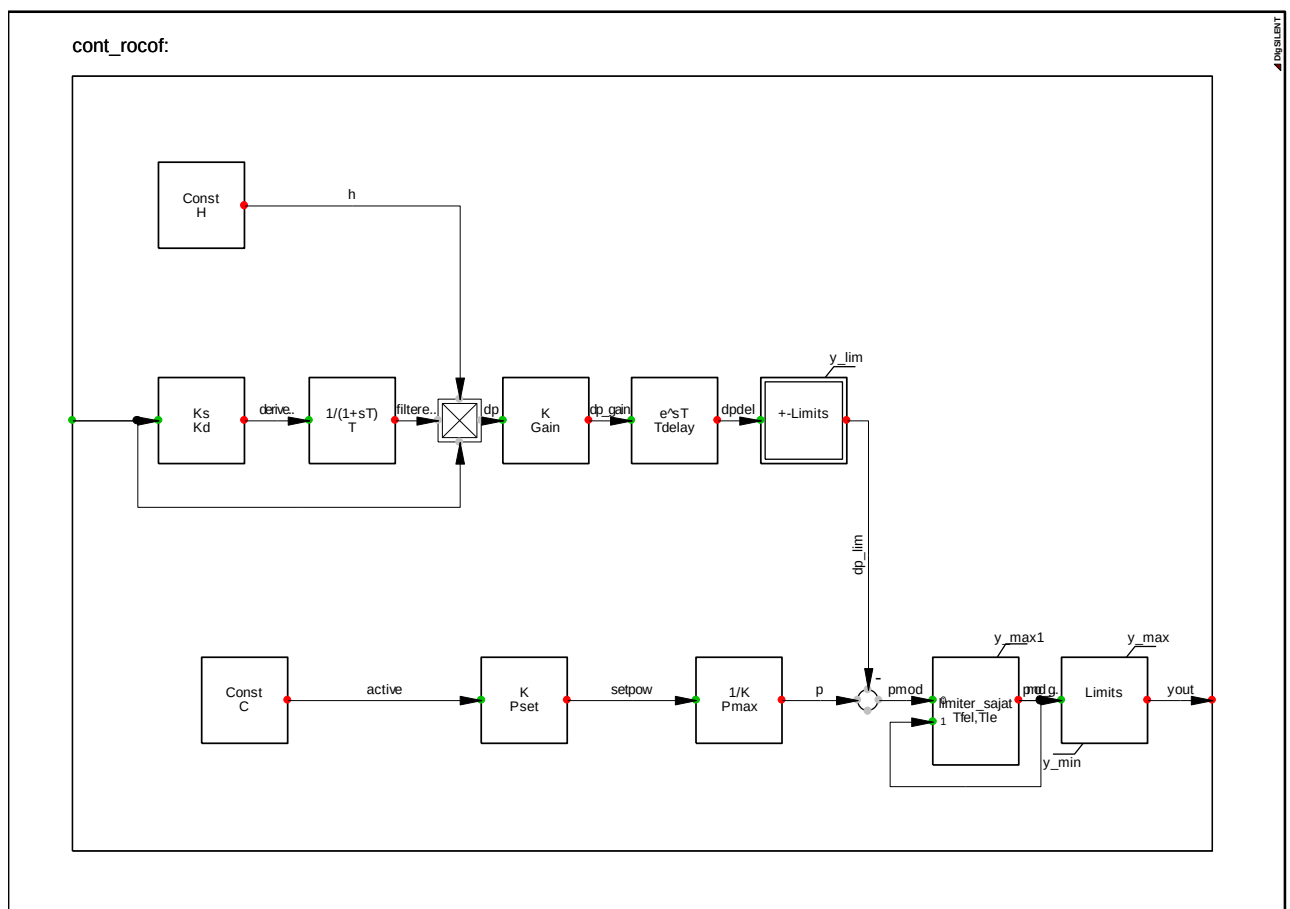
Több, különböző funkciókkal rendelkező szabályozót valósítottam meg, melyek eltérő esetekben alkalmazhatóak sikeresen. Továbbá az egyes körök esetén speciális, a gyakorlati alkalmazhatóság vizsgálatára kifejezetten alkalmassá tevő lehetőséget is megvizsgálók (dinamikus viselkedés). A szabályozási körök bizonyos mértékben épülnek egymásra, így amennyiben nem emelem ki a változtatást vagy kiegészítést, a korábban ismertetett funkcionalitás érvényes marad.

4.1.1 Folytonos üzemű szintetikus inercia képző

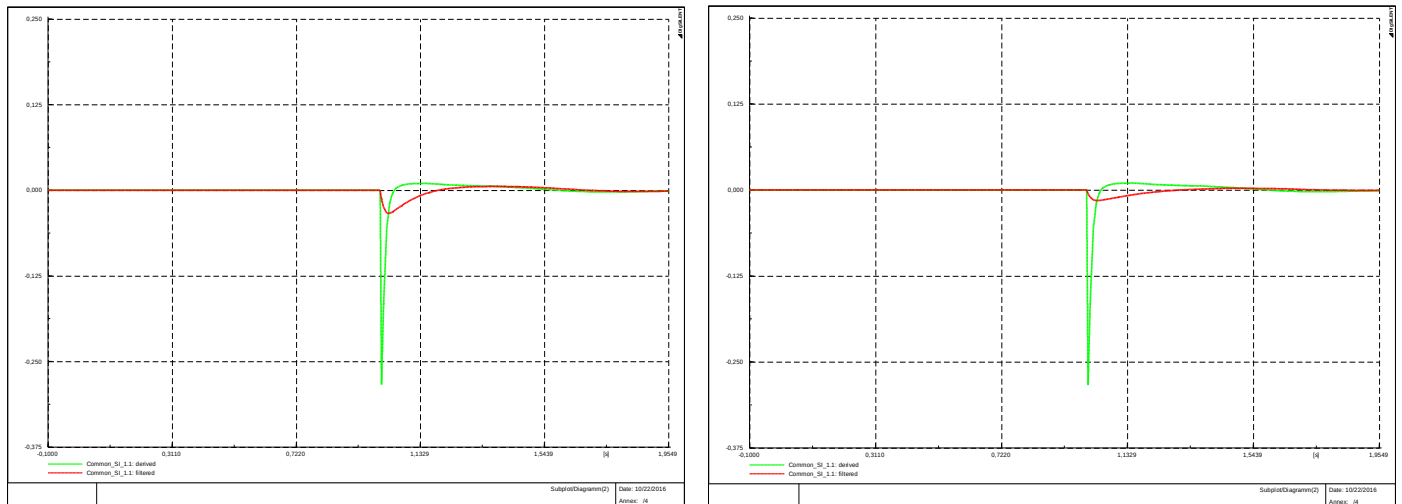
A legelső megvalósítás (13. ábra) pusztán a 4-1. egyenletben leírt aktivációt hajtja végre időben folytonosan. A szabályozóimnak alapvetően két ága van, az ábrán felül levő soros rész a szintetikus

inerciából származó aktuális teljesítményváltozást képezi, míg az alsó egy munkapont beállító. A munkapont beállítás során körültekintően kell eljárni, hiszen a szélérőművek és energiatárolók esete merőben más: ha a szélérőműveknél beállítunk nem nulla munkapontot, az folytonos teljesítmény hibajeleket fog adni az áramvektor szabályozóra, ami miatt az nem megengedett működési tartományba kerül.

A szintetikus inercia szabályozó bemeneti paramétere egy fáziszárt hurok által mért frekvencia viszonylagos egységekben. Mivel az inerciális válasz a frekvenciaváltozásra történik, így a jelet először deriválni kell, erre egy beépített deriváló elemet alkalmaztam, mely 10 ms időablakkal végzi a differenciálást (elektromechanikus tranziens vizsgálat időlépése). A frekvenciaváltozást ekkor egy aluláteresztő szűrőn vezettem keresztül. A szűrőparamétert a források alapján 0,1 s-nak választottam a vizsgálatokban, a 14. ábrán látható a $T=0,1$ s és $T=0,25$ s eset (teljes szimulációs idő itt 2 s volt, a hiba 1 s-nál keletkezik ugrásszerű terhelésnövekedésben). A nagyfrekvenciás változások ekkor már a szűrőn sem jutnak keresztül, de a szabályozó realisztikus dinamikájának megteremtéséhez később külön elemeket is felvettem. Az amplitúdó különbség, melyet a szűrés okoz, nem jelent problémát, hiszen ha a változás nem szűnne meg nagyon gyorsan, a szűrt jel amplitúdója is nőne.



13. ábra: folytonos üzemű szintetikus inercia szabályozó blokkvázlata

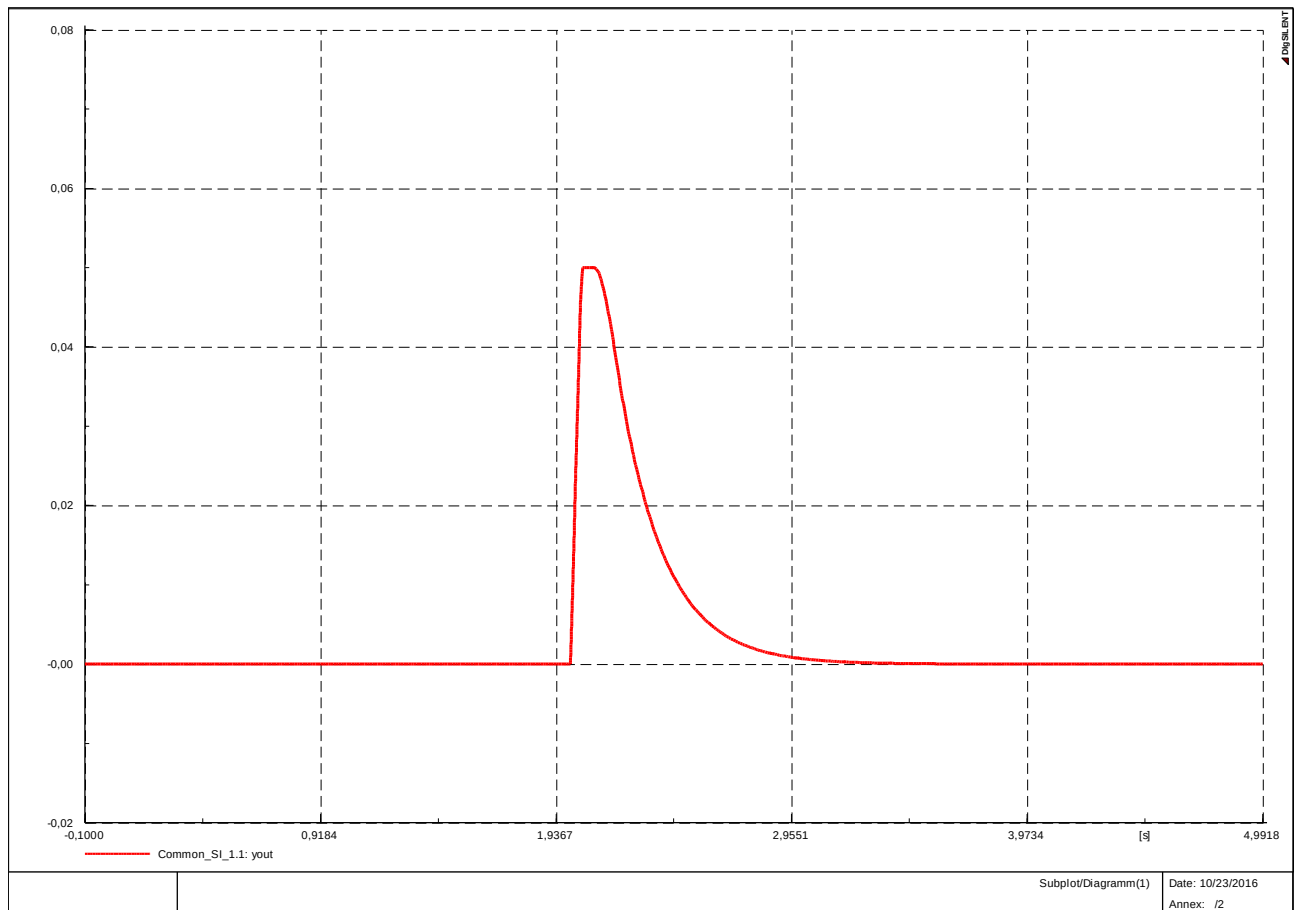


14. ábra: a szűrőparaméter hatása a frekvenciaváltozás jelre ($T=0,1$ s és $T=0,25$ s)

Tovább haladva a jel útján látható, hogy a szűrt jel szorozódik az inerciával (H konstansként van jelölve, de a valóságos inercia konstans kétszerese a 4-1. alapján) valamint a rendszerfrekvencia aktuális értékével, mely szintén szűrhető például a deriválttal azonos időállandóval. Az így képződő jel maga a szintetikus inercia válasz. Ezt szükség esetén lehet erősíteni (K konstans szorzás) a mértékegység problémák kezelésére. A késleltető szolgál a mérési és feldolgozási idő reprezentálására. Ennek ideje 10 ms lesz a szimulációk során. [13] Az ág végén található limiter hivatott a szintetikus inercia jel korlátozására, mely a technológiai korlátokból adódik (pl. szélérőművek 10% túlterhelést viselnek el 10 s ideig).

Az alsó ágban a C konstans egy aktivátor, mellyel külső eseményként ki lehet kapcsolni a munkapontot szükség esetén. A P_{set} az aktuális munkaponti teljesítmény, a P_{max} a maximális teljesítmény, a három blokk soros kapcsolásával beáll az aktuális munkapont. Az értékek megválasztásához ismerni kell a befolyásolt technológiát és a mértékegységet.

A munkaponti teljesítményjel és a szintetikus inercia jel összege két további limiteren keresztül csatlakozik a vezérelt eszközhöz. Először egy saját készítésű állapotteres gradiens limiter hivatott megadni a szintetikus inercia szabályozás dinamikáját: időállandójával beállítható a felfutás és lefutás meredeksége. Az irodalomkutatás alapján a szintetikus inercia vezérlések 20-50 ms idő alatt képesek végérték felvételére, a felfutási meredekségek így választandók meg, a késleltetés 10 ms-a alapján 30 ms alatt engedi a jelet exponenciálisan a végértékéhez. Azért volt szükség saját típus létrehozására, mert a szintetikus inercia képzés során a gyors felfutás után a visszaállást egy nagyobb időállandóval jó végezni, ezzel átadva a helyet a primer szabályozó beavatkozónak. Működésének szemléltetése a 15. ábrán látható. A végső limiter pedig az eszköz működési teljesítménytartományának betartatására szolgál.

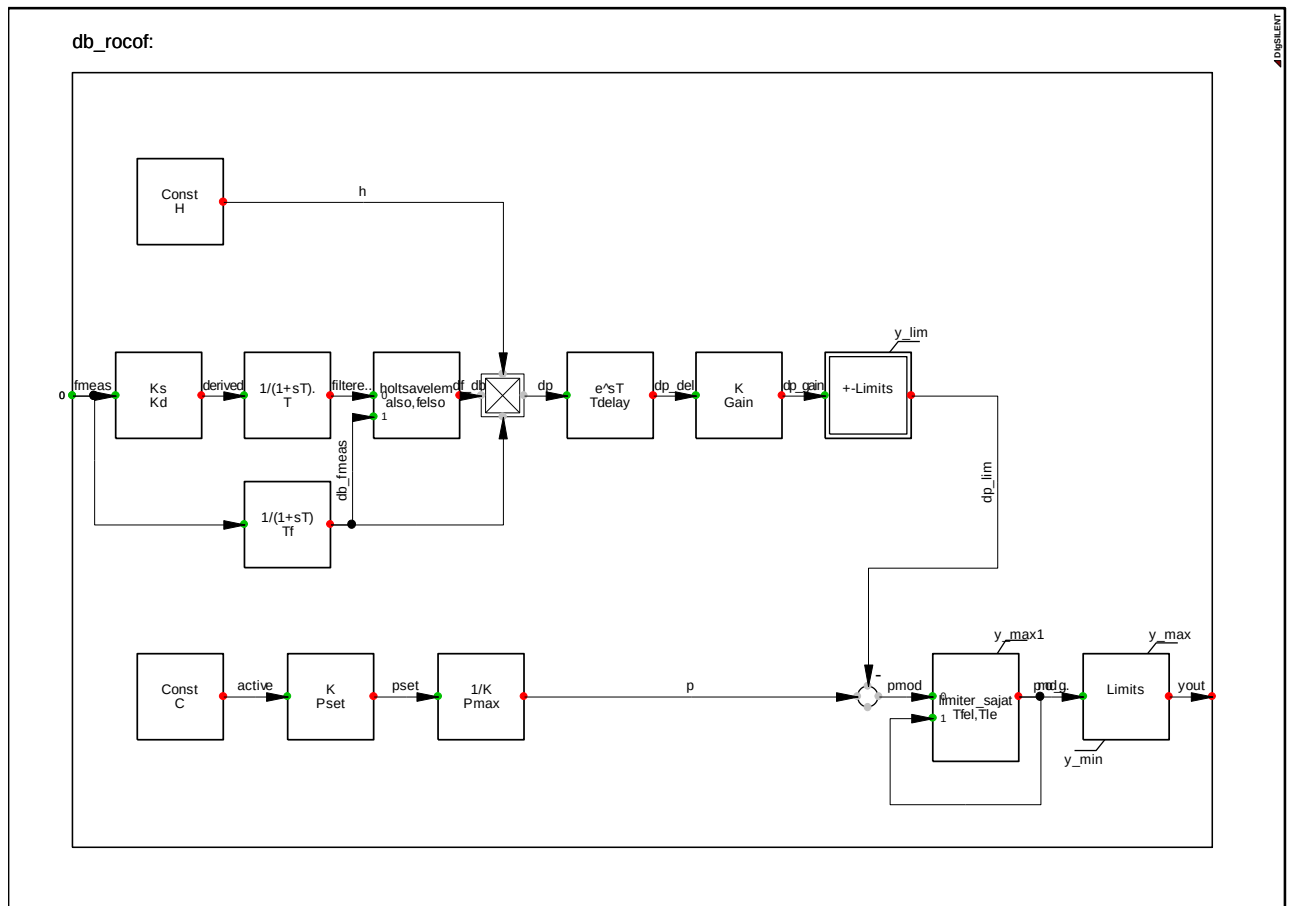


15. ábra: eltérő felfutás és lefutás szemléltetése

A folytonos működés nyilvánvaló problémája az, hogy egyedül a szűrőparaméter az, ami kiküszöböli a felesleges megszólalást, ennek hatására indokolatlan mechanikai igénybevételt eredményez, illetve felesleges kapcsolásokat hoz létre.

4.1.2 Holtsávval ellátott szintetikus inercia képző

Adódik tehát az ötlet, hogy lássuk el egy holtsávval az előzőekben bemutatott szabályozót. A 16. ábrán látható blokkvázlat egyetlen ponton különbözik a folytonos üzemtől, ez pedig a „holtsavelem”. Ezt a blokkot magam alkottam meg a megfelelő beállítás érdekében.



16. ábra: holtsávval ellátott szintetikus inercia szabályozó blokkvázlata

A holtsáv elem azonban nem csupán arra képes, hogy a kellően kicsi értékeket figyelmen kívül hagyja. Tesztelésem során megfigyeltem, hogy a szabályozó a terhelésnövekedést a vártaknak megfelelően kompenzálni igyekszik, azonban amikor a rendszerszabályozás visszatérítést kezdeményez, a szintetikus inercia képzés ennek ellenállni próbált, mivel önmagában a változás ellen dolgozik. Felvetődött tehát az igény, hogy a gépi válasszal szemben a szintetikus inercia legyen képes felismerni, hogy a változás a rendszer számára kedvező-e vagy nem. Ezért a „holtsavelem” nevű blokk 2 bemenettel rendelkezik, melyeket a következőképp dolgoz fel:

```
yo=select(fs>1,select(yi>felso,yi,0),select(yi<also,yi,0));
```

piros: f>névleges, pozitív meredekség --> szintetikus inercia kell, jel mehet tovább

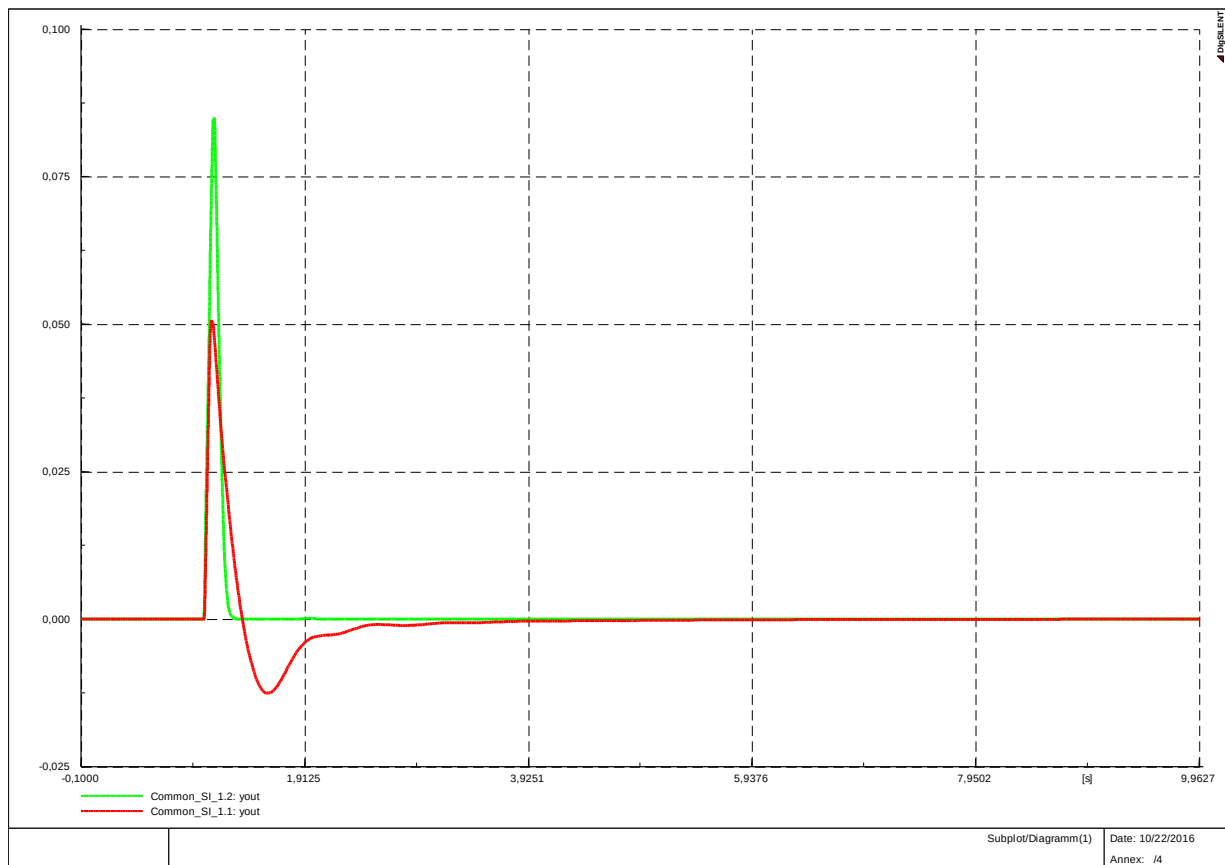
fekete: f>névleges, negatív meredekség --> jó irányba megy (vagy legalábbis áll), 0 a kimenet

zöld: f<névleges, negatív meredekség --> szintetikus inercia kell, jel mehet tovább

kék: f<névleges, pozitív meredekség --> jó irányba megy (vagy legalábbis áll), 0 a kimenet

„yi” a frekvencia deriváltjának szűrt értéke, „also” és „felso” pedig a beállítható érzékelési határérték. Ennek hatására a szabályozó csak akkor szólal meg, ha a változás a névlegestől távolabb viszi a frekvenciát,

ahogy az a 17. ábrán látható (az amplitúdó eltérést a szűrőparaméterekkel képeztem a láthatóság kedvéért).

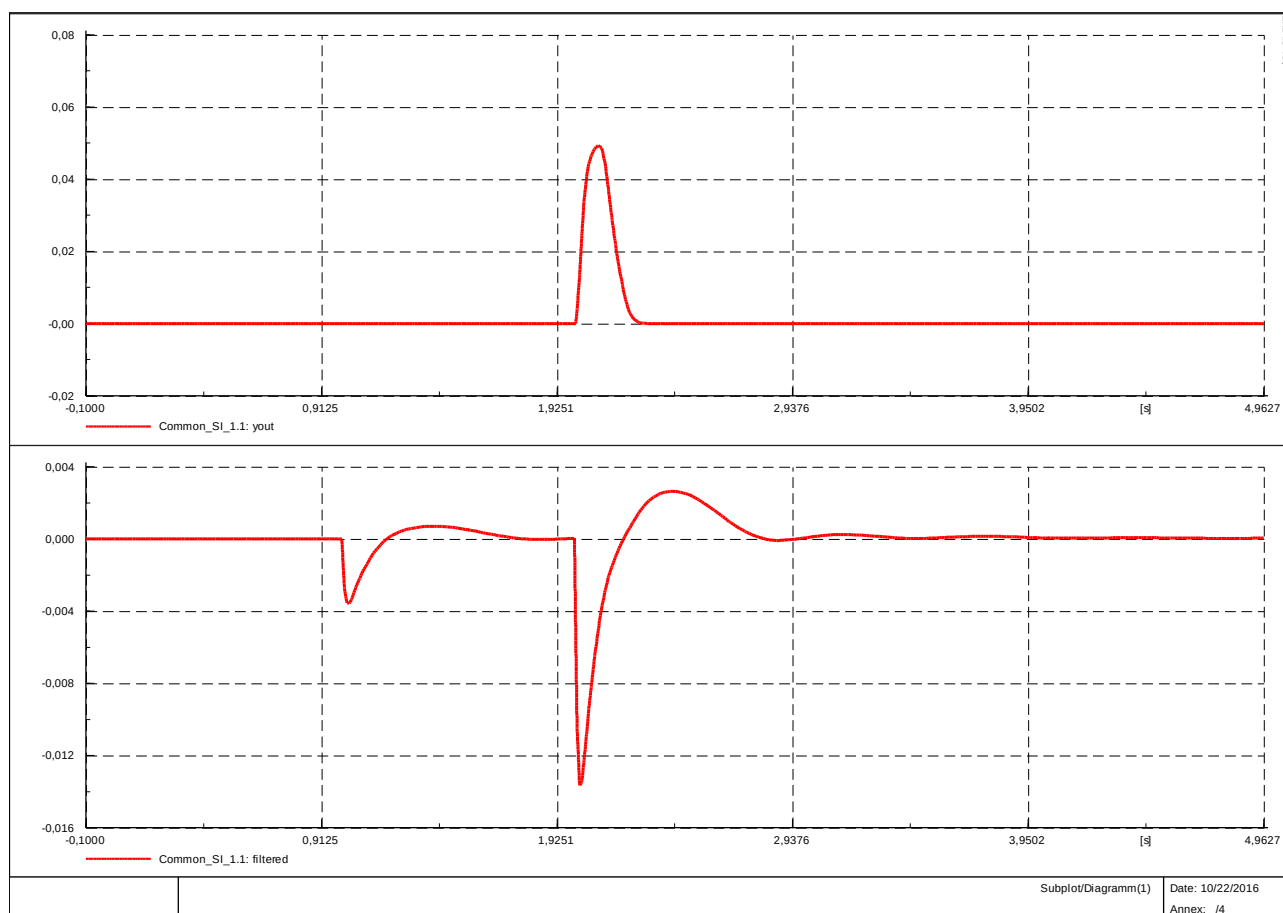


17. ábra: holtsavelem működése

Ez a szabályozó alapvetően rendelkezik minden képességgel, hogy szintetikus inercia képzésre alkalmas legyen. Dinamikailag jól paraméterezhető kialakítású még szabályozástechnikai ismeretek nélkül is, valamint illeszthető a különböző megoldásokhoz.

4.1.3 Frekvenciaérték korláttal kiegészített szintetikus inercia képző

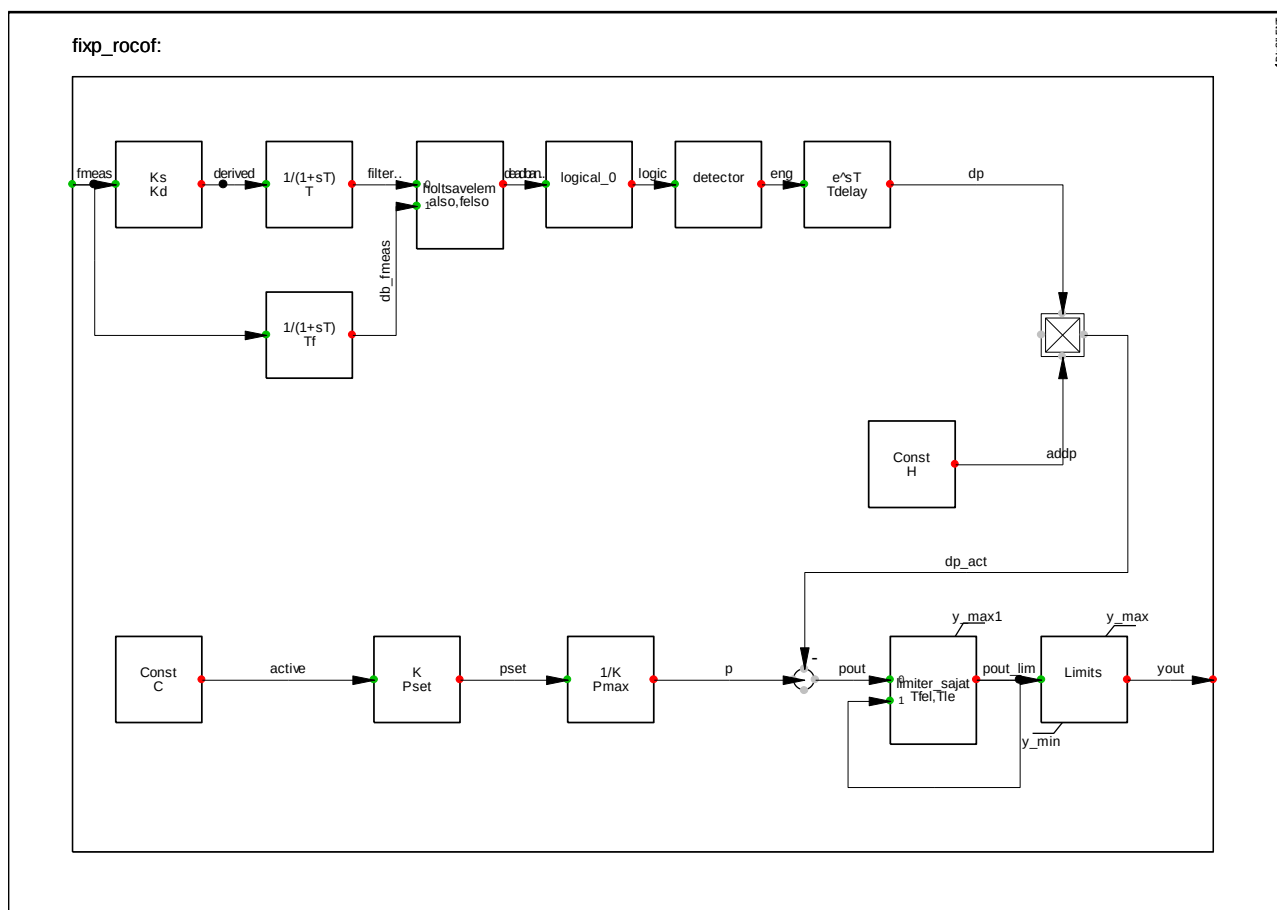
Az első kérdés, amely felmerült a holtáv bevezetése után az volt, hogy szükséges-e a névleges frekvenciaértéken belül maradó változásokra is reagálni. Az optimális paraméterválasztással már az előzőekben is jól támogatható a villamosenergia-rendszer, azonban a szabályozás szelektivitásának növekedése jó hatással lehet az alkalmazásra. Ezen gondolatmenet alapján fejlesztettem tovább a „holtsavelem” blokkomat úgy, hogy a frekvencia aktuális értéke alapján nem csak irányérzékeny lesz, hanem határértékek is beállíthatóak. Ezen működés lényege, hogy egy bizonyos tartományon belül (± 200 mHz) a szabályozó érzéketlen marad. A szabályozó blokkvázlata nem különbözik az egyszerű holtávós megoldástól, mindössze a saját blokk lett felruházva egy fejlettebb döntési algoritmussal (blokkvázlat a 18. ábrán).



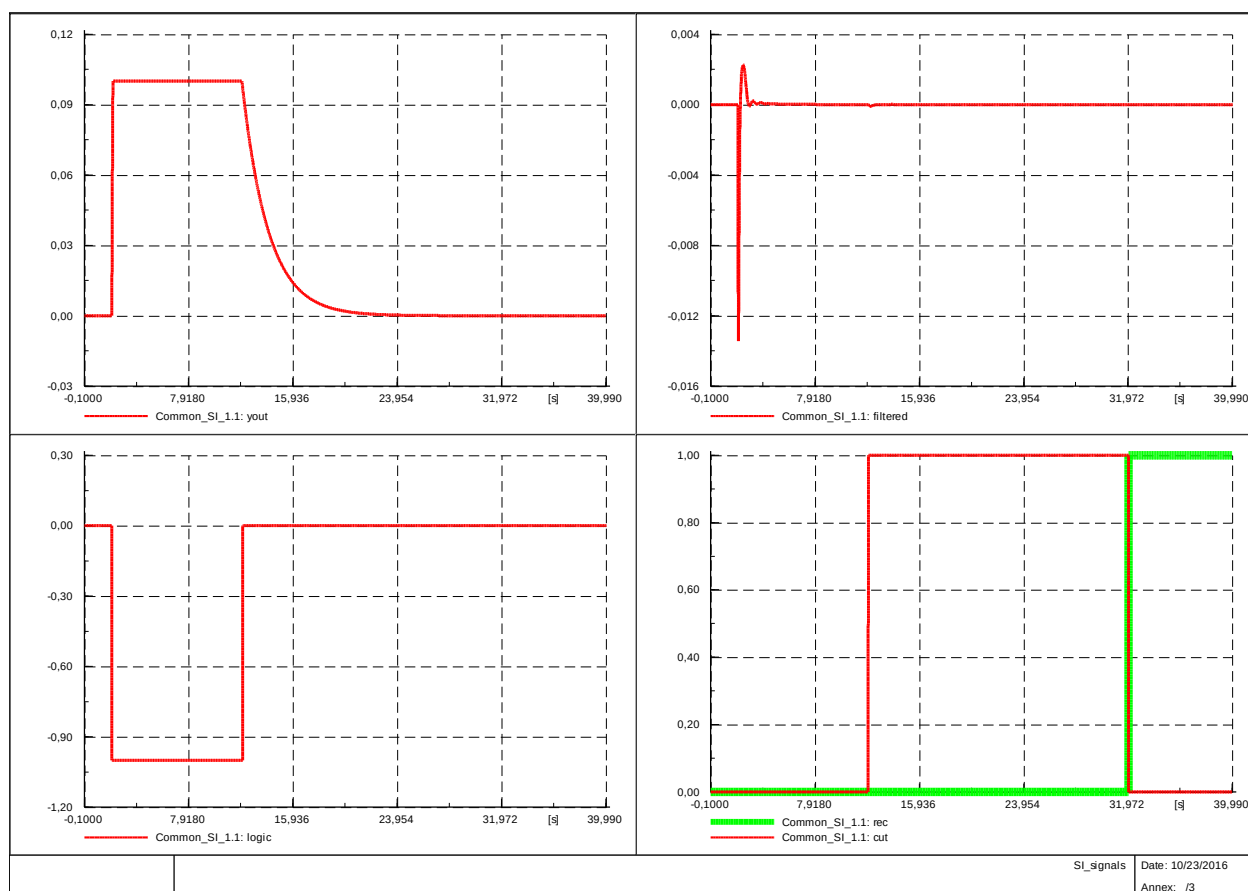
19. ábra: frekvencia abszolútérték holtáv működésének szemléltetése

4.1.4 Fix teljesítményváltozást biztosító szintetikus inercia képző

A fix teljesítményválaszt biztosító megoldások blokkvázlata némileg eltér az eddig alkalmazott sémától, így újból ismertetem a teljes felépítést. A fáziszárt hurok által szolgáltatott frekvenciamérés egy deriváló és szűrő elemen keresztül halad (a frekvenciajel szűrt értéke vele párhuzamosan), majd a megszokott holtáv képzés következik. Ez a jel egy logikai blokkba fut: ennek célja a következő elemekkel való kompatibilitás megteremtése, szükségességét pusztán csak a saját technikai megoldásom igényli. Célja, hogy bármilyen a holtávon kívüli változásra -1-et ad ki a kimenetén. A következő elem („detector”) felel az időintervallum beállításáért: mivel például a szélerőművekre ható mechanikai terhelés nem lehet túl nagy, így fontos ennek optimális beállíthatósága. A lényeg, hogy adott egy „cut” változó, mely bizonyos idő elteltével jelzi a leszabályozási igényt (ennek dinamikáját a későbbi soros elemek szabják meg), valamint egy „rec” változó, mely jelzi, hogy ha az eszköz újra készen áll az esetleges teljesítményváltoztatás biztosítására. Ezután a késleltető elem, majd a konstans beállítására szolgáló paraméter (H-val jelölve, bár ez már elvileg nem az szintetikus inercia képzése) következik. A munkapont beállítás után a már korábban ismertetett limiter pár biztosítja a dinamikai tulajdonságokat.



20. ábra: állandó kimeneti teljesítményű szintetikus inercia szabályozó blokkvázlata

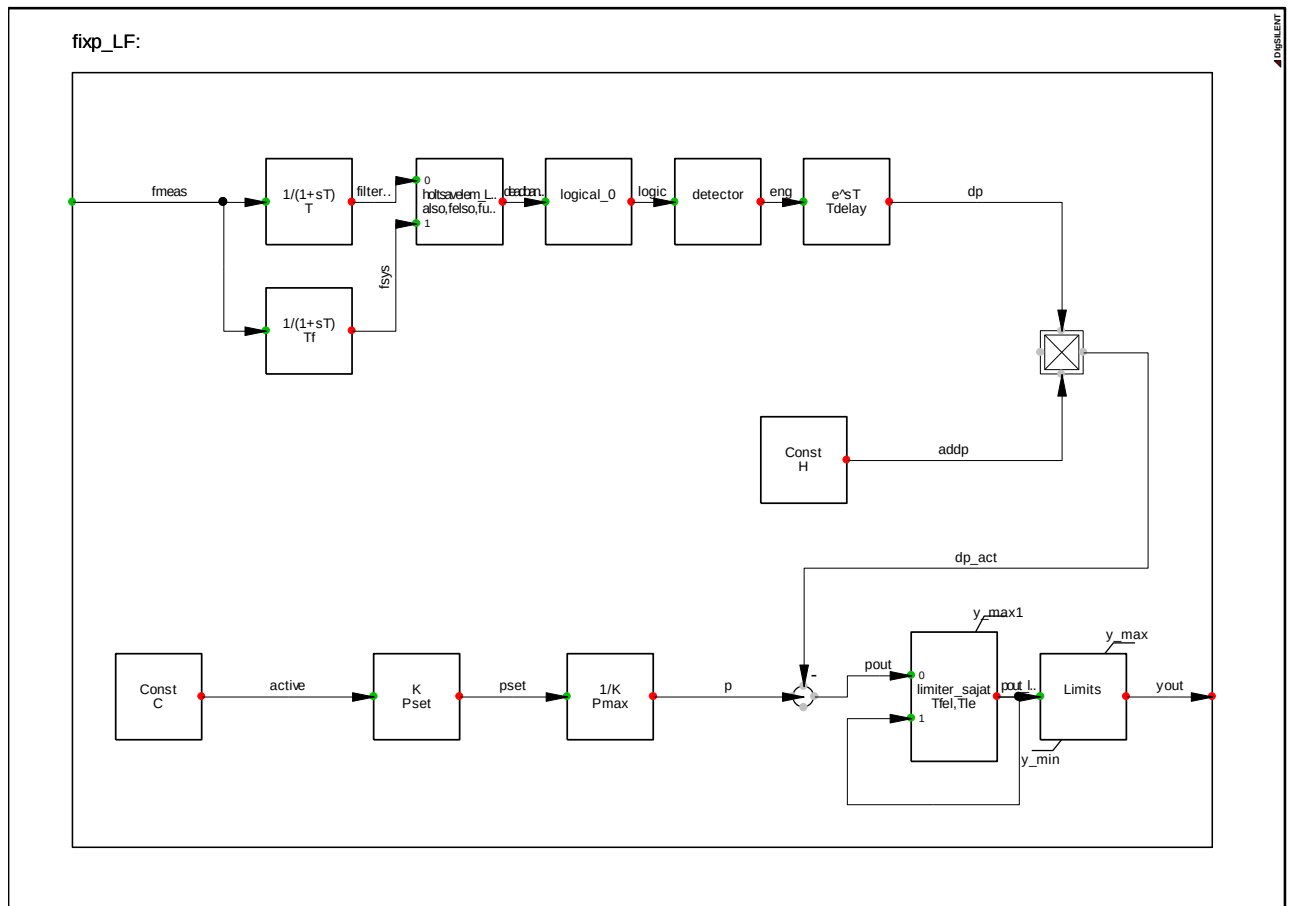


21. ábra: tiltás és engedélyezés működése

A 21. ábrán látható a koncepció működése. Bal felső ábrán a szabályozó kimenete, a jobb felsőn pedig a bemenő frekvencia látható. A bal alsó ábrán a logika kimenete figyelhető meg, mely jelzi a teljesítmény igényt. A jobb alsó ábra a tiltó és a felépülés megtörténtét jelző jeleket tartalmazza (az egybeesés miatt a „rec” görbét megvastagítva ábrázoltam). Az ilyen típusú megoldások kiválóan összehangolhatóak lehetnek a primer szabályozókkal.

4.1.5 Alacsony frekvenciaérték esetén támogató üzem

Utolsó megoldásként egy kissé elrugaszkodtam a szintetikus inerciától, és a legutóbbi megoldásból kiindulva egy olyan szabályozót valósítottam meg, mely fix teljesítményválaszt ad alacsony frekvenciaérték esetén. Ez gyakorlatilag statizmussal ellátva a primer szabályozás elvét alkalmazná, de jelen dolgozatomban nem kívántam a teljesítményelektronikai berendezéseket ilyen működésben vizsgálni. A felépítést a 22. ábra mutatja, alapvetően a 4.1.4-el analóg a megvalósítás, csak a trigger feltétel eltérő.



22. ábra: állandó kimenetű, alacsony frekvenciára reagáló szabályozó blokkvázlata

Összességében az általam létrehozott szabályozási struktúrák alkalmasak hálózati frekvenciamérés alapján teljesítményváltoztatás elvégzésére. Általános kialakításuk révén kiválóan bővíthetők és integrálhatók a DigSilent Power Factory környezetében adott modellezési keretekbe. A tervezés során a saját blokkok fejlesztésekor felmerült ötletek alapján többféle megoldást is elkészítettem, amelyek rendszerre gyakorolt hatásának elemzésével a későbbiekben a frekvenciaszabályozás teljes újragondolásához képezhetek bemenő adatot.

A szabályozási körök készítésekor fontos szempont volt a valósághű leképezés, hogy a berendezések jól paraméterezhető dinamikával rendelkeznek, ezáltal az eredmények megfelelő információ rendelkezésre állása esetén jól leképezhetik a valóságot.

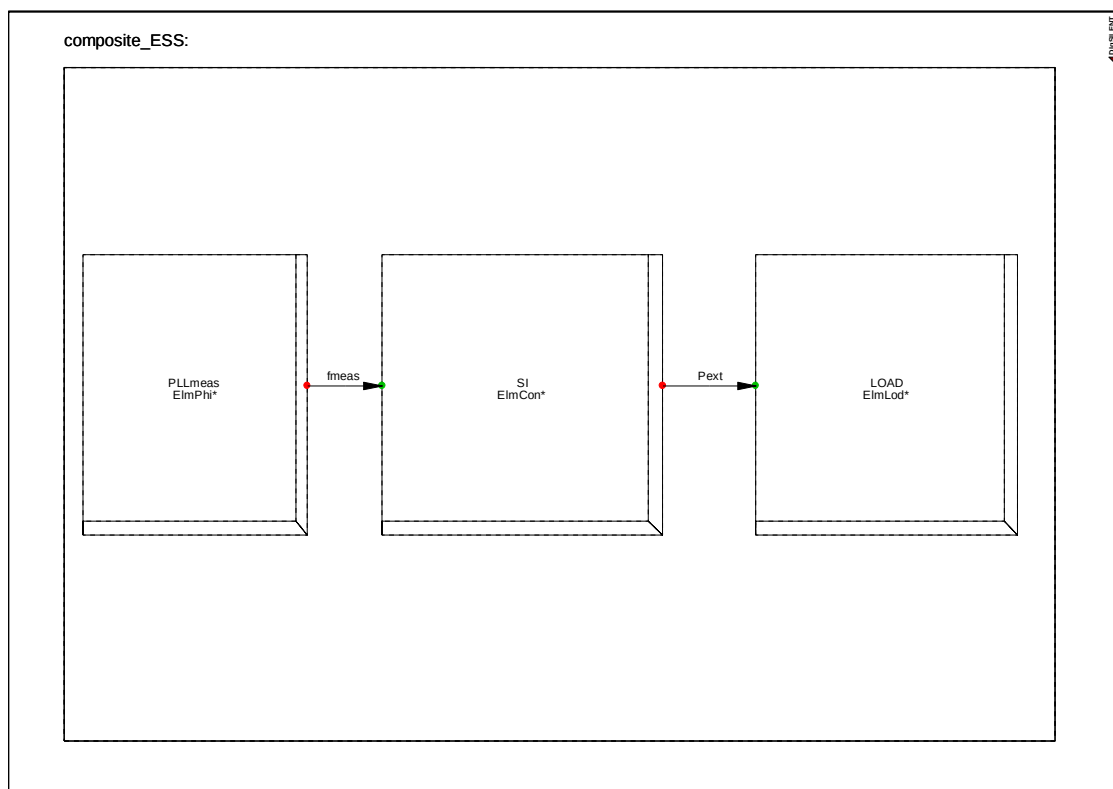
4.2 Szélerőmű kiegészítő szintetikus inercia szabályozója

Az első befolyásolandó eszköz a szélerőmű, mely esetén a szabályozó keretét a 3. fejezetben ismertetett beépített típus tartalmazza. A megvalósítás előnye, hogy a modellezés során az eszköz ténylegesen a teljesítményelektronikai eszközön keresztüli csatlakozásával kerül leképezésre. A keret alapján más áramvektor szabályozóval ellátott berendezések modellezésére is adott a lehetőség. A 4.1-ben ismertetett

szabályozók rendszerbe illesztését a 3. fejezet 9-10. ábrája tartalmazza, míg a technológiai paraméterek szélsőértékei az 1. táblázatban és a [2][9][13] hivatkozott irodalmakban lelhetők fel.

4.3 Energiatároló leképezése

Az energiatároló berendezések leképezésére a szimulációs környezet adta legegyszerűbb lehetőséget választottam. Egy statikus terhelés fogja reprezentálni az energiatárolót, melynek teljesítményértékét a szabályozó beállíthatja. A 23. ábrán látható a szabályozás vázlata: a fáziszárt hurok szolgáltatja a hálózati frekvenciamérést, az SI blokkban találhatóak az előzőekben ismertetett szabályozók, míg a terhelés bemenetként kapja meg az előállított teljesítményjelet. Ebben az esetben lesz komoly szerepe a munkapont beállításnak, hiszen a terhelés mindig az aktuális teljesítményértéket kapja majd meg. A dinamikai tulajdonságok az előzőeknek megfelelően beállíthatóak. A kisütés negatív teljesítményű terhelést fog jelenteni. A feltöltések ütemezéséhez hosszabb időintervallumú vizsgálatok és a szintetikus inercia szükségességének gyakorisága lenne szükséges, jelen dolgozat tárgyát ilyen jellegű vizsgálatok nem képezik, de egy gyakorlatias továbblépési irány lehet a tárolók aggregát üzemének megtervezése.



23. ábra: energiatároló elem szabályozási vázlata

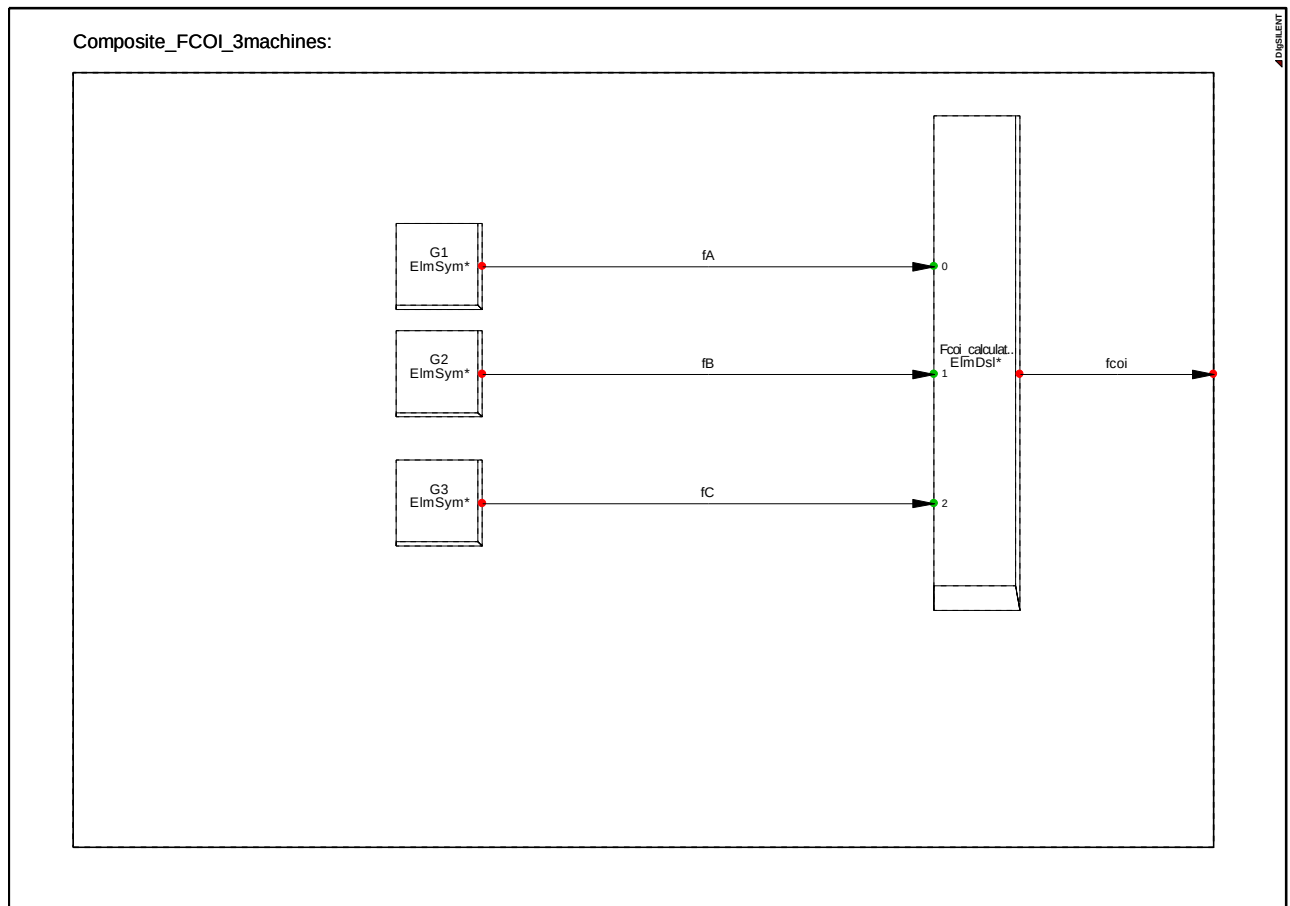
4.4 Az inercia középpont számítása és felhasználása bemenetként

Nagy rendszerek esetén felmerülő probléma, hogy a frekvencia nem azonos a rendszer különböző pontjain. Ennek kiküszöbölésére az ENTSO-E több módszertant is megvizsgált, melyek közül a leghatékonyabb a rendszer inercia középpontjának (a lengő rendszer tömegközéppontja) meghatározása, és ezen frekvencia alapul vétele a szabályozások során. Az F2-ben ismertetett módszertan alapján az inercia középpont frekvenciája számítható az egyes gépek inercia konstansának és forgási sebességének ismeretében:

$$f_{COI} = \frac{\sum H_i f_i}{\sum H_i}$$

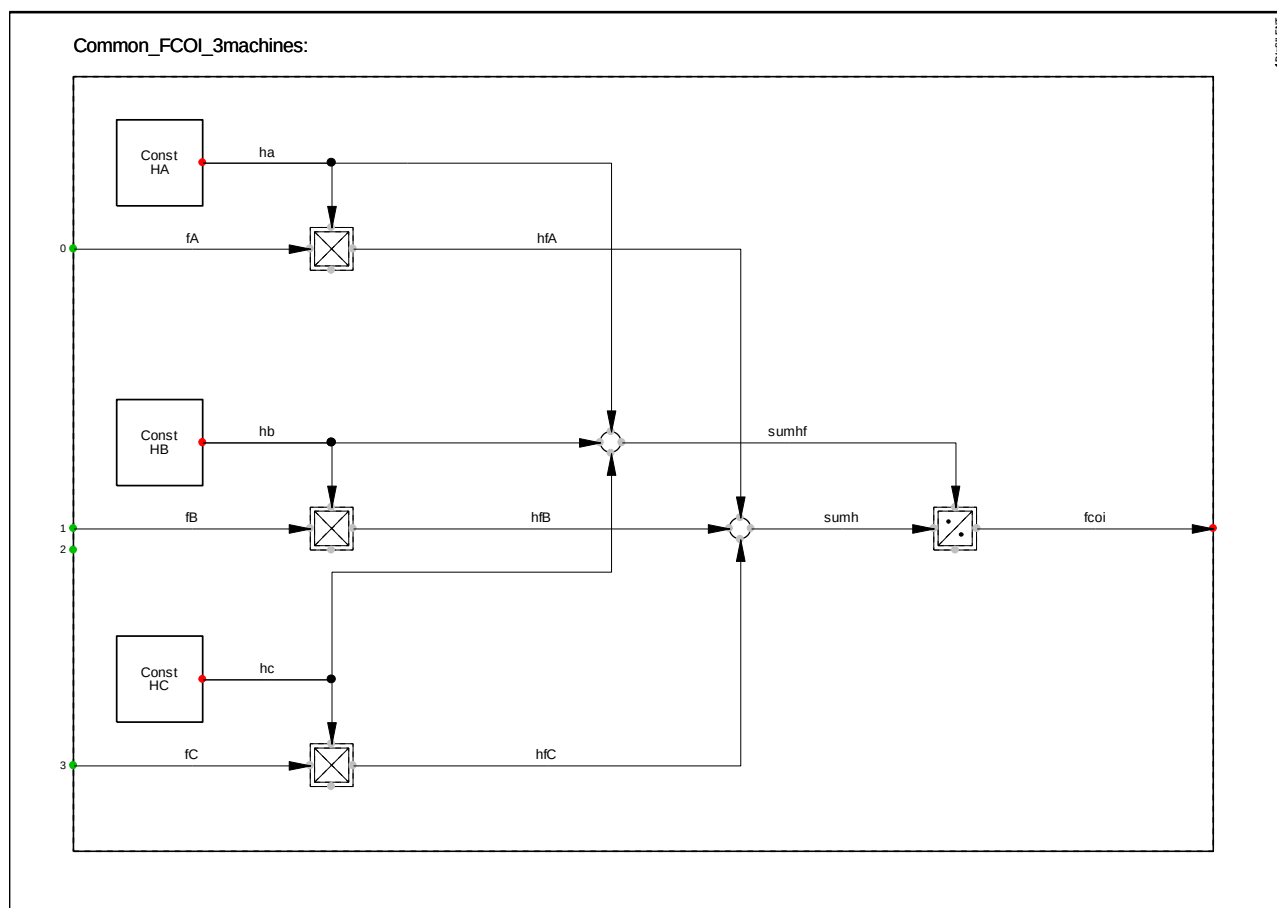
4-2. egyenlet: az inerciaközéppont frekvenciájának definíciója

Az egyenlet alapján viszonylagos egységekben a generátorok forgási sebességének és inerciájának ismeretében az inercia középpont frekvenciája megadható. A számítást végző blokkot elkészítettem az IEEE 9 buszos rendszeréhez, azonban ez viszonylag kis kiterjedésű rendszer, így nem tapasztalunk jelentős eltérést a frekvenciaértékek közt. Az inercia középpont frekvenciáját bemeneti jelként használhatjuk fel a szintetikus inercia megvalósításához, mely így rendszerszinten hatékonyabbá tehető. Fontos azonban figyelembe venni, hogy ehhez nem csak helyi mérésekre támaszkodunk, mely főleg nagyméretű rendszerek esetén hordoz magában kérdéseket.



24. ábra: FCOI számítás vázlata 3 gépre

A 24. ábra a 3 gépes középponti frekvenciaszámító vázlata látható. Az aktuális frekvencia egy logikán belül képződik a 4-2. egyenlet alapján. A megoldás lényege, hogy a lengési egyenlet rendszerszintű megoldásában a szinkrongenerátorok jelentik a forgó tömeget, azonban fontos megemlíteni, hogy a terheléseknek is lehet inerciális válaszuk, hiszen számos forgógépes fogyasztó is csatlakozik a hálózatra. A nem szinkrongépekből származó inercia vizsgálata szintén érdekes kutatási terület lehet, kérdés, hogy elhanyagolásával (melyet a szakirodalom és az elérhető tudományos kutatások konszenzusszerűen elfogadnak) milyen mértékű valós elhanyagolást teszünk.



25. ábra: FCOI számítás blokkvázlata 3 gépes esetben

A 25. ábra a logikán belüli számítást mutatja be, mely a 4-2. egyenletre támaszkodik. A megvalósítás teszteléséhez a későbbiekben nagyobb kiterjedésű rendszereken végzett vizsgálatokat tervezek végrehajtani.

5 A szintetikus inercia rendszerre gyakorolt hatása

5.1 Szimulációs környezet

A modellezést és szimulációs vizsgálatokat a DigSilent Power Factory 15.1 szoftver segítségével végeztem. A hálózat paramétereinek beállítására és változtatására létrehoztam egy scriptet, mely a kérdéses esetekben releváns változókat kezeli és ki is jelzi a felhasználó felé, biztosítva a gyorsabb munkát. A szimulációk típusa „balanced RMS”, amely a hálózat elektromechanikai tranziens folyamatainak leírására optimális. Figyelembe veszi az ehhez tartozó dinamikai paramétereket, szabályozó entitásokat és a termikus hatásokat.

A létrehozható változások:

- Generátor/motor indítása, kiesése
- Terhelésváltozás ugrásszerűen és felfutással
- Távvezeték és transzformátor kapcsolás/leválás
- Szimmetrikus zárlatok
- Hálózati elemek beillesztése
- Erőművek kiesése
- Szabályozó paraméter változások
- Rendszerparaméter változások

A vizsgálatokat az F3-ban részletesen ismertetett paraméterű példahálózatokon végeztem. Mivel egy hálózati frekvenciamérés alapján változtatjuk egy generátor (vagy tároló) hatásos villamos teljesítményét, így a szabályozott folyamat gyakorlatilag a villamosenergia-rendszer, beavatkozónk pedig maga az eszköz, a visszacsatolás pedig a paramétereken keresztül tartalmazza az inherens folyamatokat is.

5.2 Vizsgálati scénáriók és kiértékelési metódus

5.2.1 A szintetikus inercia hatásának elbírálására alkalmas paraméterek

A hatásvizsgálathoz ki kell jelölni azokat a változókat, amelyekben a vezérlések által kifejtett pozitív hatást szeretnénk megfigyelni. A definiált paraméterekre előzetesen az üzemirányítás tapasztalatai alapján előírhatók határértékek a különböző üzemállapotok elkülönítésére. Az ENTSO-E vizsgálatait voltak iránymutatóak a kialakításban, ez alapján a következőket választottam:

- Minimális (maximális) frekvenciaérték: a folyamat során kialakuló legalacsonyabb (legmagasabb) frekvencia
 - 49,8 Hz felett az állapot tökéletesen megfelel az elvárásoknak
 - 49 Hz felett elkerülhető a FTK aktiváció
 - 47,5 Hz alatt gyakorlatilag elkerülhetetlen a rendszerösszeomlás
- Maximális frekvenciaváltozási sebesség (rate of change of frequency, ROCOF)
 - az ENTSO-E tanulmánya alapján 0,5-2 Hz/s nagy rendszerek esetén (lokálisan lehet magasabb érték is)
- Teljesítmény eltérés: a hiba során beállított terhelésnövekmény (terheléscsökkenés)
 - %-os értékben 10 %-os léptékkal haladva jól mérhető eredményt ad
- Minimális mögöttes kinetikus energia, minimális inercia,maximális megújuló penetráció: a korlátok betartásához szükséges mögöttes forgótömeg
 - A kinetikus energia additivitását kihasználva a GWs érték egyszerűen számítható.
 - A megújuló penetráció %-os aránya is hasonlóan jól jellemzi a kérdést, de jelentéstartalmában nem tér el az inercia követelményektől

5.2.2 Normatív terhelésnövekedések definiálása

A vizsgálatok során több különböző értékű terhelésnövekedést vizsgálok meg eltérő megújuló penetráció függvényében két különböző modellen. A kezdeti állapot, azaz a szintetikus inercia nélküli helyzet elemzése szolgáltatja majd a referencia adathalmazt a vizsgálatokhoz. A terhelésnövekedéseket a hálózat összes csatlakoztatott fogyasztójára azonos pontban ugrásszerűen definiálom. A szimulációim alapesetben 10 másodpercet ölelnek fel, a terhelésnövekedés időpontja mindig 5 s.

Mivel a beépített típusú szélérőmű, amelyhez a vezérlést módosítottam, 2,8 MVA névleges teljesítménnyel bír, így általánosan 2 MW aktuális termelés munkapontját választottam. Természetesen ettől függetlenül legfeljebb 10% eltérést engedélyezek, hiszen feltételezzük, hogy az aktuális szélsősebesség mellett optimális a beállítás, így a többletnyomaték időszakos kinyerése csak ezen feltétel betartása mellett reális (a 2 MW kiválasztása a skálázhatóság miatt előnyös). A különböző lokális penetráció mérték egyszerű beállítására a DigSilent a párhuzamos gépek csatlakoztatásának lehetőségét biztosítja. A rendszerszintű helyzet leképzéséhez a [28] irodalom alapján abból indultam ki, hogy a teljesítményelektronikán keresztül csatlakozó termelők nem járulnak hozzá a rendszer kinetikus energiájához, viszont annak rendszerszintű összegezettsége továbbra is igaz. Így a mögöttes hálózatot egy szinkrongépre redukálva annak inercia konstansa a megújuló penetráció növekedésével arányosan csökken. Bár a kérdéses termelők kihasználtsági arányuk miatt nagyobb beépített teljesítménnyel rendelkeznek, az aktuális állapotban a

hálózatra táplálási arányt véve a megfelelő leképezéshez jutunk, mely fizikailag megfelelően reprezentálja a vizsgálat tárgyát.

$$\sum S_i H_i = \sum (S_{szinkron,i} H_i + S_{telj.el,i} * 0) = S_{mögöttes} * H_{mögöttes}$$

$$H_{mögöttes,új} \approx \frac{S_{mögöttes} - S_{telj.el,össz}}{S_{mögöttes}} * H_{mögöttes,alap}$$

5-1. egyenlet: mögöttes hálózatra redukálás

Ahol az új mögöttes hálózat inercia konstansa az adott megújuló penetrációra jellemző érték, az alap inercia konstans a teljesen forgógépes ellátású hálózatot mögöttes hálózattá redukáló eljárással nyerhető inercia konstans (~10 s nagy rendszerekre [28]). A megoldás egyezik az ENTSO-E által alkalmazott módszerrel, mely így a megújuló penetrációt rendszerszinten kezeli.

2. táblázat: normatív terhelésnövekedés és megújuló penetráció

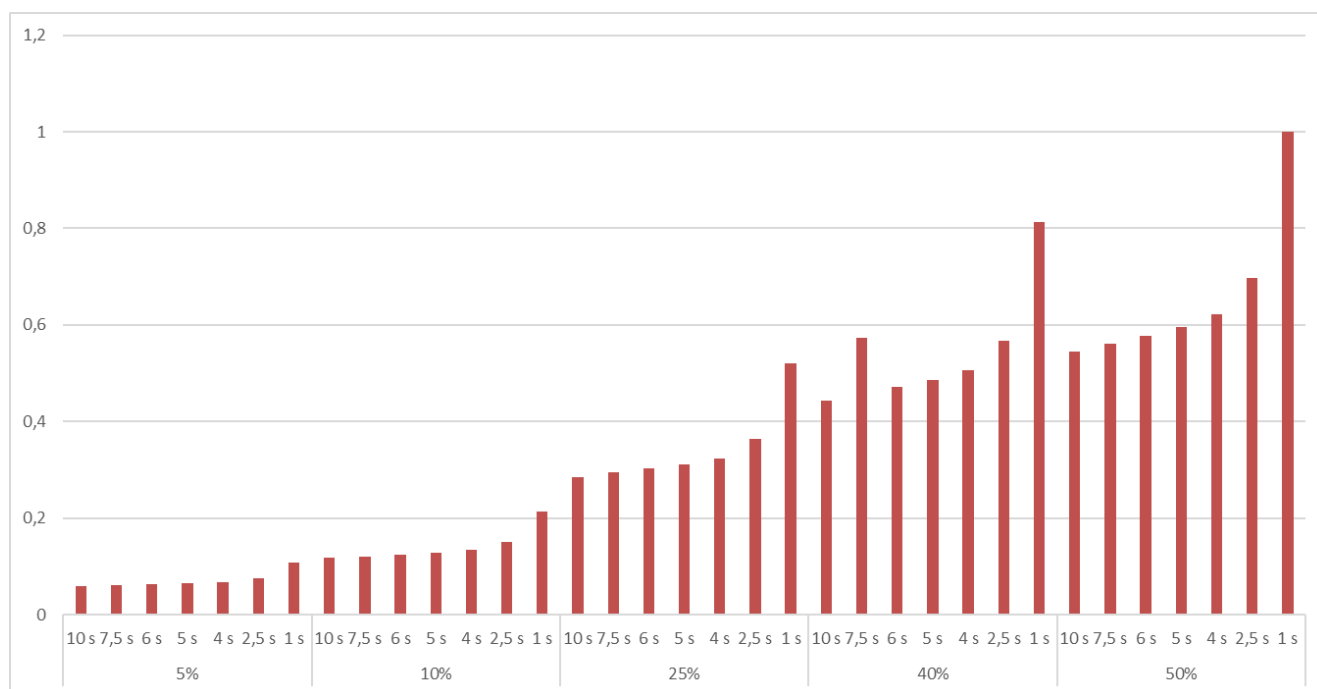
Normatív terhelésnövekedés mértékek (%)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Megújuló penetráció (%)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

A 2. táblázat összegzi a terhelésnövekedéseket és a különböző megújuló penetrációt, az egyes vizsgálatok ezen paraméter beállítások lineáris kombinációiként állnak elő. Ez összesen 100 darab szimulációs vizsgálatot jelent minden egyes szcenárió teljes vizsgálatára.

A koncepcióm a vizsgálatok során az volt, hogy egy tetszőlegesen választott szabályozóval tesztelem a rendszerrészre gyakorolt hatást, majd az eredményesség függvényében további variánsokat tesztelek. A cél az FTK aktiváció elkerülése és a lehető legkevesebb veszélyes üzemállapot megjelenése. Emiatt az elsődlegesen vizsgált paraméterem a minimális kialakuló frekvencia. Emellett a dinamikai paraméterváltoztatás és a szelektivitás vizsgálata is kiemelt szerepet kap.

5.3 Mosonmagyaróvári modell

A 26. ábrán látható a mosonmagyaróvári hálózat modellje (részletes információ F3-ban). A rendszer frekvenciáját az MO1 központi sínen követem figyelemmel. A lokális rendszerek kidolgozottságának előnye a vezérelt gép mögöttes hálózatra redukált villamosenergia-rendszerre csatlakozásával szemben a további fejleszthetőség. A témában szeretnék foglalkozni szigetüzembe kerülő kis rendszerrészekkel is, melyhez elengedhetetlen a dinamikus modellezésben szerzett tapasztalat.



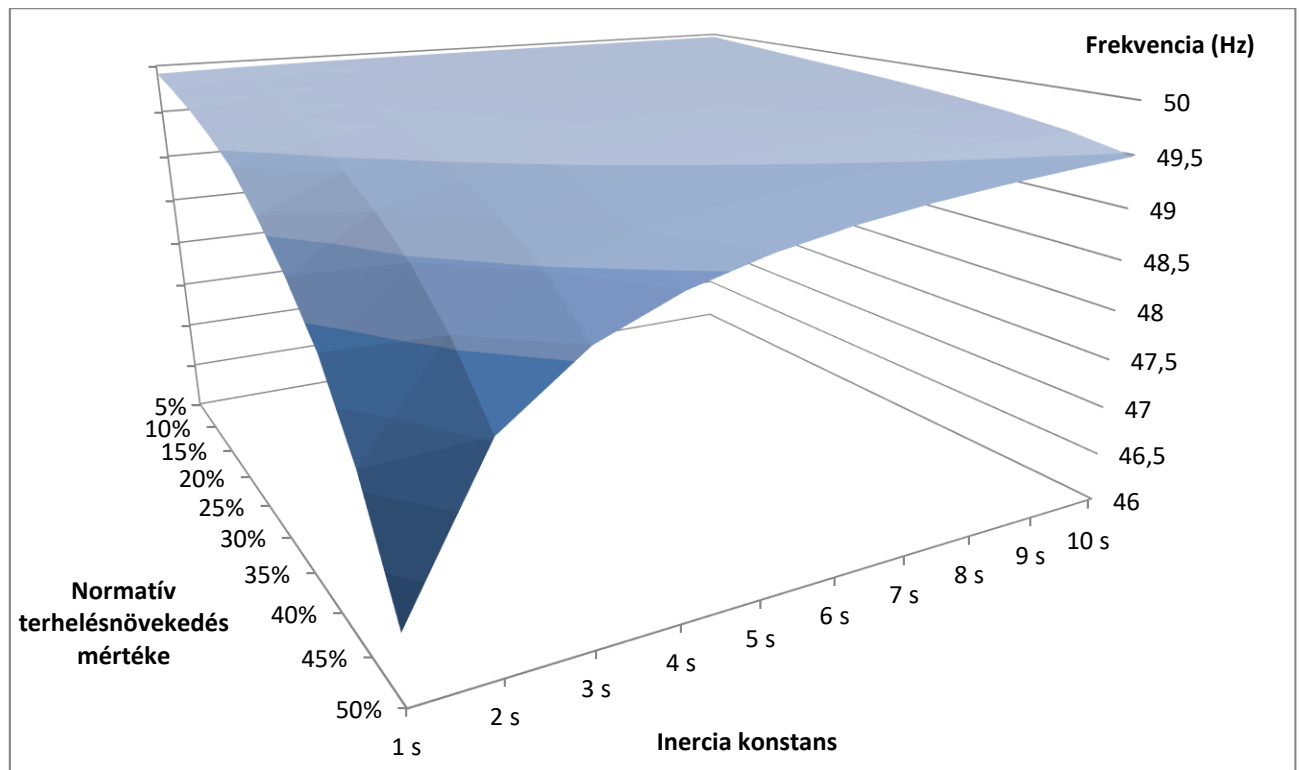
27. ábra: frekvenciaváltozási sebességek normáltjai a mosonmagyaróvári modellben

3. táblázat: normatív terhelésnövekedések hatása

H(s)\dP(%)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
1	49,912	49,823	49,716	49,581	49,410	49,120	48,768	48,334	47,644	46,648
2	49,931	49,862	49,790	49,698	49,581	49,428	49,228	48,967	48,586	48,037
3	49,941	49,882	49,823	49,755	49,669	49,560	49,422	49,237	48,978	48,600
4	49,948	49,895	49,843	49,788	49,720	49,636	49,529	49,386	49,189	48,903
5	49,952	49,905	49,857	49,809	49,754	49,684	49,597	49,481	49,322	49,093
6	49,956	49,912	49,868	49,825	49,777	49,718	49,643	49,546	49,414	49,222
7	49,959	49,918	49,878	49,837	49,794	49,743	49,677	49,593	49,480	49,315
8	49,961	49,923	49,885	49,846	49,808	49,762	49,703	49,629	49,531	49,387
9	49,963	49,927	49,890	49,854	49,817	49,776	49,723	49,658	49,570	49,442
10	49,965	49,930	49,895	49,860	49,825	49,787	49,740	49,681	49,602	49,487

A 3. táblázatban és a 28. ábrán jól megfigyelhető a normatív terhelésnövekedések hatása a megújuló penetráció függvényében. Az 5-10%-os terhelésnövekedés egyik esetben sem jelent problémát, e felett azonban a kevesebb mögöttes kinetikus energiával rendelkező hálózatok veszélyeztetett üzemállapotokban kerülhetnek. A 40%-os penetráció elérésétől kezdve a kiugróan magas teljesítményugrások már FTK beavatkozáshoz is vezetnek. Sőt, a vizsgált modell a legszélsőségesebb esetben jól láthatóan eléri a 47,5 Hz alatti tartományt, mely esetén a rendszerösszeomlás gyakorlatilag elkerülhetetlen. A szintetikus inercia

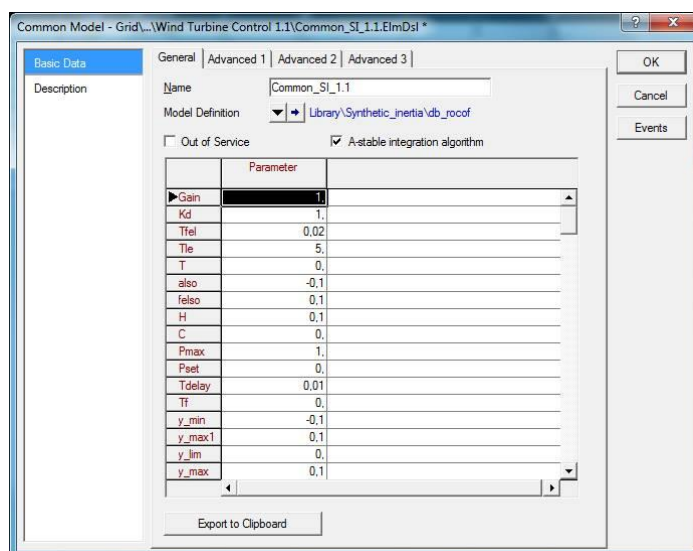
képzésének célja, hogy a veszélyeztetett, illetve még inkább az FTK és blackout esetek elkerülése. A kiinduló helyzet elemzés alapján elmondható, hogy a rendszer alkalmas a kiválasztott hatásvizsgálat teljes körű alkalmazására.



28. ábra: a normatív terhelésnövekedések hatása a frekvenciára az inercia konstans függvényében – Mosonmagyaróvár

5.3.1 Szintetikus inercia képzés a stabilitás megőrzésére

Ebben a scenárióban a frekvenciaváltozás sebességén alapuló szelektivitást kihasználva igyekeztem stabilitástámogató üzemet létrehozni a szélerőművekkel. A paraméter beállítás a 29. ábrán látható. A frekvenciaváltozási meredekség érzékenysége úgy lett megválasztva, hogy a kiinduló állapotban normál üzemet fenntartó esetekben ne történjen aktiváció. Mivel szélerőművet szabályozunk, így nincs alapjel. A lefutás kellően lassú tempójú ahhoz, hogy a rendszer primer szabályozása átvegye a szintetikus inercia által felvett terhelést úgy, hogy az ne okozzon frekvenciacsökkenést. A turbinák mechanikus túlterhelésének elkerülésére a változtatás meredekségét a maximális elviselhető érték 10%-nak választottam.

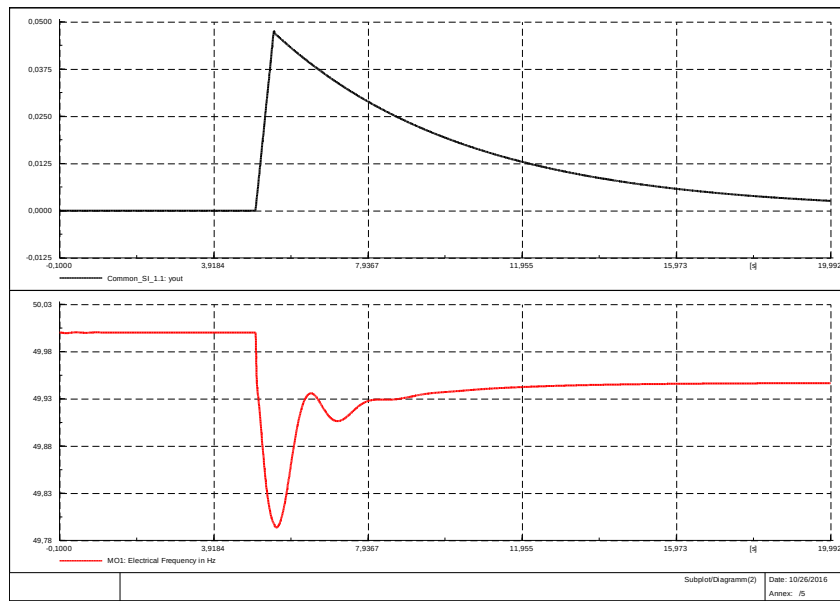


29. ábra: paraméterbeállítás frekvenciaváltozás alapú szelektivitással rendelkező szintetikus inercia képző esetén

A frekvenciaváltozás alapú szelektivitásnál a zölddel jelölt normált üzemállapotú esetekben nincs aktiváció. A többi esetet a 4. táblázat összegzi. Jól látható (félkövérrel kiemelve), hogy több esetben is sikerült átlépni (vagy 2 tizedesjegy pontossággal megközelíteni, ezeket is elérsnek vettem) a jobb üzemállapotot. Kiemelkedően pozitív hatást tapasztalhatunk a kiindulási esetben erősen instabil állapotokban: ezek közös jellemzője a hatalmas frekvenciaváltozási sebesség, mely az ebben a scenárióban használt szabályozóból nagyobb amplitúdójú teljesítményválaszt vált ki. Ennek hatására például az alapesetben reménytelennek tűnő 46,648 Hz-ből 47,46 Hz lett, mely ugyan még mindig a szinte biztos rendszerösszeomlás határán belül van, de már megközelítette a stabil állapot visszanyerésének lehetőségét. A 49 Hz alatti kiinduló esetekben legalább fokozatelkerülés (ha 0,2 Hz-es lépésközü FTK-ra gondolunk) létrejön, de több esetben is sikeresen elkerülhető a terheléskorlátozás, melynek pozitív hatását nem lehet eléggé hangsúlyozni.

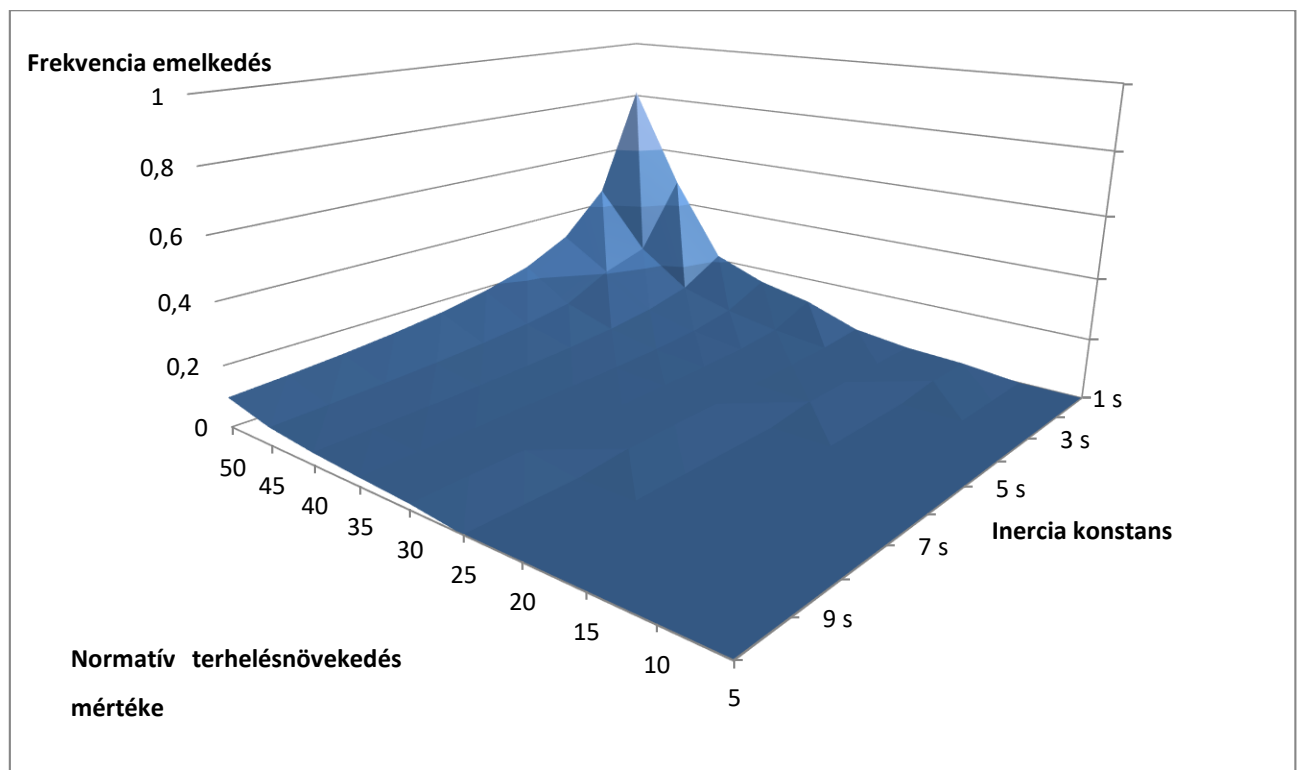
4. táblázat: a szintetikus inercia vezérléssel támogatott eset

H(s)\dP(%)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
1	49,912	49,823	49,736	49,609	49,460	49,233	48,918	48,550	48,123	47,460
2	49,931	49,862	49,807	49,724	49,618	49,485	49,315	49,102	48,838	48,488
3	49,941	49,882	49,823	49,778	49,699	49,602	49,483	49,336	49,183	48,906
4	49,948	49,895	49,843	49,808	49,746	49,670	49,578	49,465	49,320	49,135
5	49,952	49,905	49,857	49,809	49,777	49,715	49,640	49,546	49,429	49,281
6	49,956	49,912	49,868	49,825	49,799	49,746	49,682	49,603	49,504	49,379
7	49,959	49,918	49,878	49,837	49,810	49,769	49,713	49,644	49,558	49,451
8	49,961	49,923	49,885	49,846	49,808	49,786	49,735	49,675	49,600	49,506
9	49,963	49,927	49,890	49,854	49,817	49,798	49,753	49,700	49,633	49,549
10	49,965	49,930	49,895	49,860	49,825	49,806	49,768	49,720	49,660	49,584



30. ábra: szintetikus inercia képző kimenete és a kialakuló frekvenciakép

A 30. ábrán jól megfigyelhető a folyamat hatása. A frekvenciaváltozás megindulásakor a szabályozó kimeneti jele felfut, majd a legalacsonyabb pont elérése után az állapotteres gradiens limiter beállításának függvényében lecseng. Ez a megvalósítás adaptív, tehát az aktuális beállított inercia konstansnak megfelelő választ produkálja (amely ez esetben 10 s).

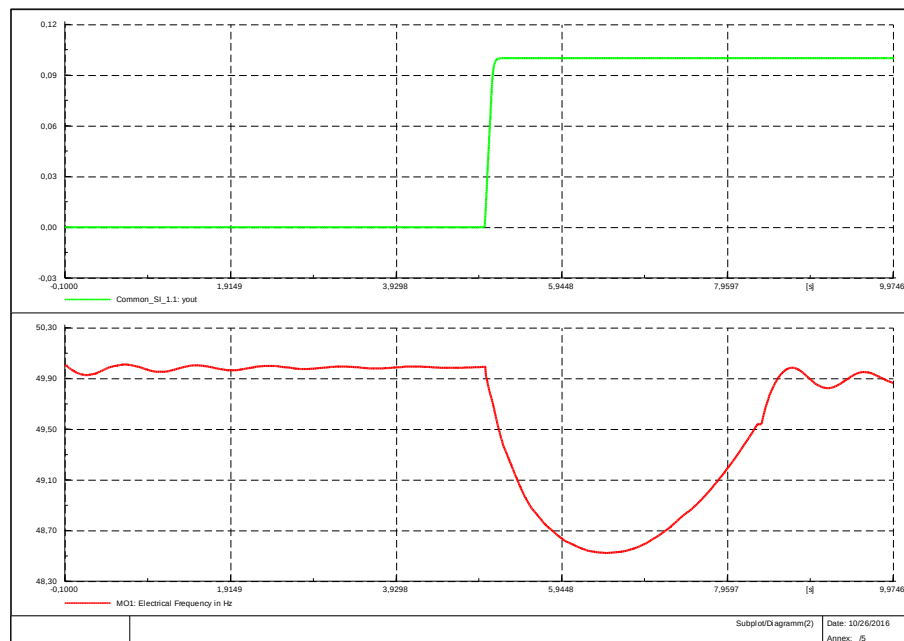


31. ábra: szintetikus inercia okozta legkisebb frekvenciaérték megemelkedése

A 31. ábra érzékelteti a legkisebb frekvenciaérték emelkedésének mértékét. Jól látható, hogy a kiemelkedően kritikus esetekben 0,5-1 Hz különbséget is sikerült elérni a szabályozó segítségével. A szintetikus inercia képző vezérlések rendszerszintű összehangolásával és további megoldások – például energiatároló berendezés – alkalmazásával tehát feltételezhetően elkerülhető az FTK alkalmazása. Viszont továbbra is azt tapasztaljuk, hogy kialakulnak nem megfelelő üzemállapotok. Erre alapvetően 2 megoldást tudunk kínálni: növeljük az inercia konstans, vagy a mechanikai védelem biztonsági tényezőjét csökkentjük (3. fejezetben szereplő 1. táblázat). A jeleket megvizsgálva a korlátot nem az inercia konstans, hanem a felfutás jelenti, így a 10%-os érték megemelése javallott. A fix teljesítményű kimenet alkalmazása gyakorlatilag csak kisebb terhelésnövekedések esetén rendelkezik hozzáadott értékkel (hiszen nem veszi figyelembe ezeket a körülményeket), az inercia konstans növelésével elérhető lenne az adaptív megoldás esetén is az általa biztosított előny.

5.3.2 Felfutási meredekség növelése

Mivel a hálózat a szimulációk során továbbra is kritikus üzemállapotokra kerül, így megkerestem azokat a szélsőséges megoldásokat, melyek ezekre megfelelő válaszként szolgálnak. Elsőként a felfutási meredekségre szabott 10%-os korlátomat növeltem egészen a maximális elviselhetőig. A 32. ábrán látható az 1 viszonylagos egységgel való növekedés másodpercenként, melynek hatására 3 újabb üzemállapot került a kritikus (FTK alkalmazás) tartományból a veszélyesbe. (5. táblázat). A megoldás bemutatását a fix teljesítményű szabályozó variánsán keresztül valósítottam meg a változatosság érdekében, a meredekség maximumát korlátozó változón kívül egyéb beállítást nem változtattam.



32. ábra: teljesítménygradiens növelése

5. táblázat: gradiens növeléssel megvalósított FTK elkerülés

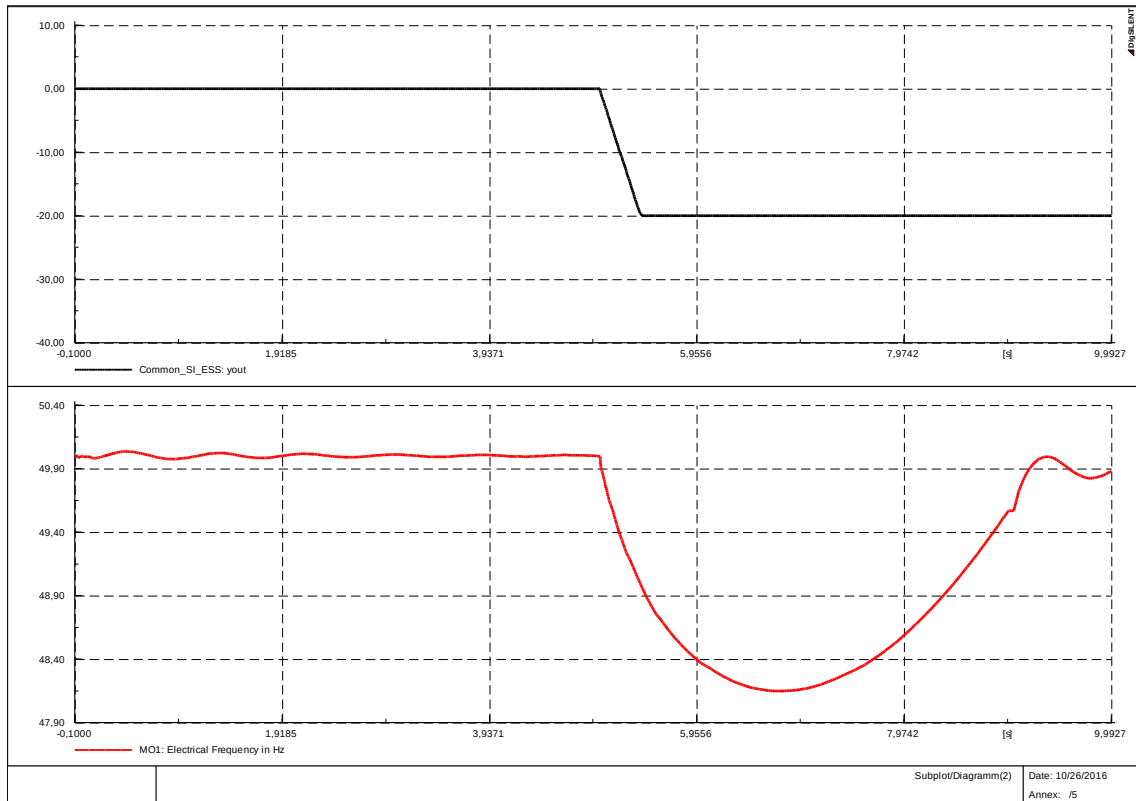
Inercia konstans (s)	Terhelésnövekedés mértéke (%)	Minimális frekvencia (Hz)
1 s	35 %	49,07
2 s	45 %	49,061
3 s	50 %	49,077

A 6. táblázatban felsorolt üzemállapotokon túl azonban további 3 esetben a szélerőművek szabályozási támogatása elégtelen az FTK elkerüléséhez. A probléma megoldására egy 20 MW-os energiatároló berendezést hívtam segítségül.

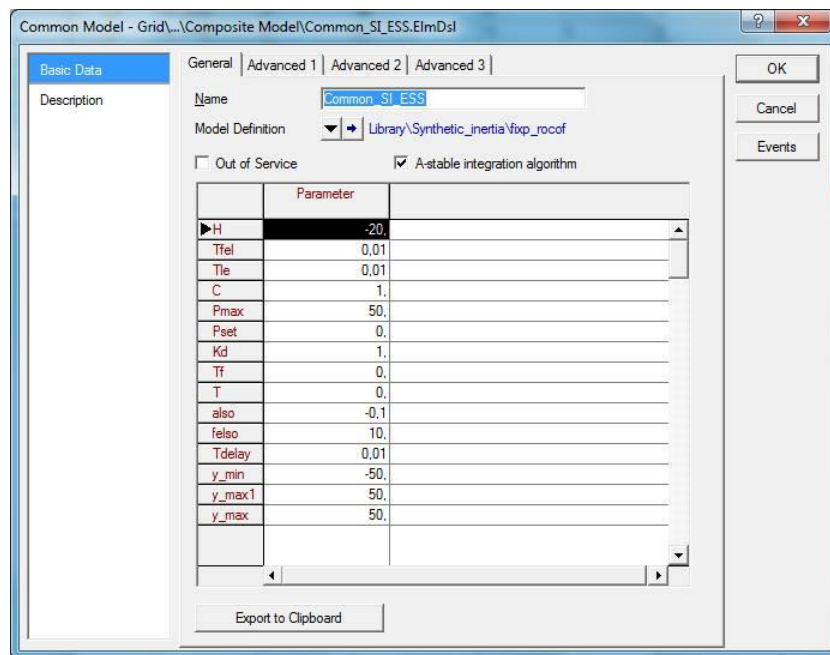
5.3.3 Energiatároló alkalmazása

Az energiatároló berendezés alkalmazása frekvenciaszabályozásra nem újkeletű gondolat, sőt: a világ számos országában találkozhatunk friss pilot projektekkel, melyek a 10 MW-os nagyságrendű akkumulátor telepek rendszerre gyakorolt pozitív hatását példázzák.

Az energiatároló elem leképezését egy terheléssel végeztem, melynek negatív teljesítménye jelenti a kisütési állapotot. A megoldás így a teljesítményelektronikai berendezések hálózati paraméterektől független voltát teljesíti, de a hatásos teljesítmény jel közvetlenül csatlakoztatható az elemhez a szimulációk során. Ennek továbbfejlesztésére a jövőben a teljes teljesítményelektronikai kapcsolást modelleznem kell majd, de ezen dolgozatomban csak a szükséges tároló névleges teljesítmények meghatározására törekedtem a szélerőművekkel nem megoldható üzemzavarok elkerülésére.



33. ábra: energiatároló teljesítménye és a kialakuló frekvenciagörbe



34. ábra: energiatároló szintetikus inercia képzőjének paraméterezése

A 33. ábrán látható az energiatároló berendezés teljesítménygörbéje (fekete) és a kialakuló frekvencia (piros). A többletteljesítmény hatására a fennmaradó négy FTK aktiváció is elkerülhetővé vált, ahogy azt a 6. táblázat mutatja. A 20 MW-os szintetikus inercia képző akkumulátor telep tehát képes arra, hogy biztosítsa az összes vizsgált üzemállapotban a FTK elkerülhetőségét, ezáltal hozzájárulva a villamosenergia-rendszer

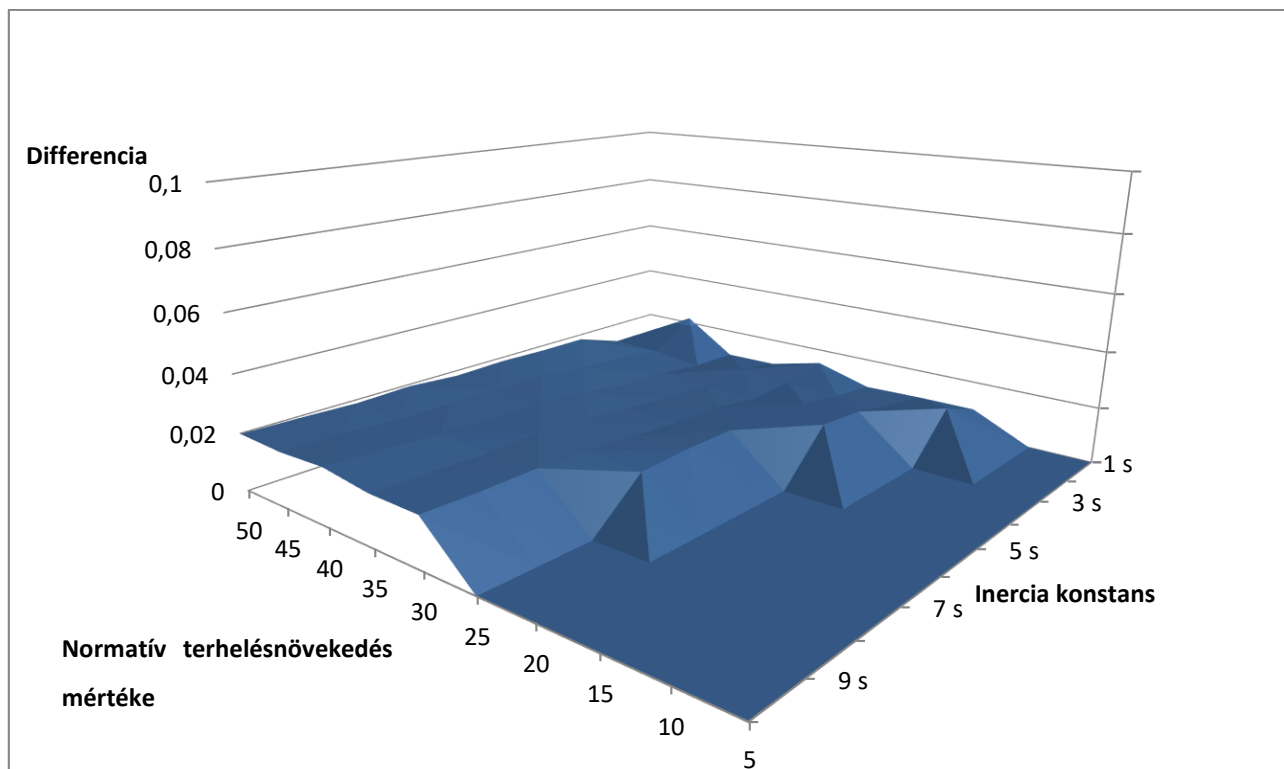
céljának megvalósításához, a minőségi energiaellátás zavartalan működéséhez. A 34 ábrán látható paraméterezésben egy 50 MW teljesítményű tároló beállítása látható, a rendszer igénye 20 MW volt szélsőértékben. A téma feldolgozásának későbbi fázisában a rendszerirányító frekvenciaadatai alapján a kapacitásméretezés is elvégezhető, mely alapján kiválasztható az optimális tároló berendezés a szintetikus inercia képzéséhez (természetesen a dinamikus és egyéb paraméterek figyelembe vételével).

6. táblázat: energiatároló alkalmazással megvalósított FTK elkerülés

Inercia konstans (s)	Terhelésnövekedés mértéke (%)	Minimális frekvencia (Hz)
1 s	40 %	49,524
1 s	45 %	49,327
1 s	50 %	49,001
2 s	50	49,36

5.3.4 Frekvencia alapú szelektivitás hatása

A frekvencia alapú szelektivitás vizsgálatok az a fő érv, hogy tovább csökkentsük a mechanikai stresszt az eszközön úgy, hogy ne csak a változási meredekségre, hanem a frekvencia aktuális értékére is reagáljon a vezérlés. A 35. ábrán összegeztem az egyszerű holtáv és a frekvencia szelektív vezérlés közti különbséget, melyből levonható az a konklúzió, hogy a 200 mHz-es frekvenciaérzéketlenség nincs komoly negatív hatással a szintetikus inercia képzésére, 0,03 Hz alatt marad a különbség.



35. ábra: az abszolútérték szelektivitás okozta frekvencia csökkenés az egyszerű holtcsávós vezérléshez viszonyítva

Ennek leginkább abban lehet jelentőséget tulajdonítani, hogy a kezdeti szabályozásban a változási sebességet korlátozva igyekeztem védeni a szélerőműveket a túlzott igénybevételtől, ez viszont elégtelen működést eredményez. A frekvencia abszolút értéke alapján megvalósított szelektivitás ennél kisebb védelmet biztosít ugyan – pont az erős stressz esetén nem érvényesül – de mégis jobban illeszkedik a stabilitás megőrzésének céljához.

Összességként elmondható, hogy a vizsgált rendszerrész esetén a szélerőművek maximális terhelhetőségét figyelembe véve 4 esetben nem lehetett elkerülni az FTK aktivációt. Ezeket egy 20 MW teljesítményű akkumulátoros energiatároló alkalmazásával lehetett sikeresen támogatni.

5.4 IEEE 9-Bus System

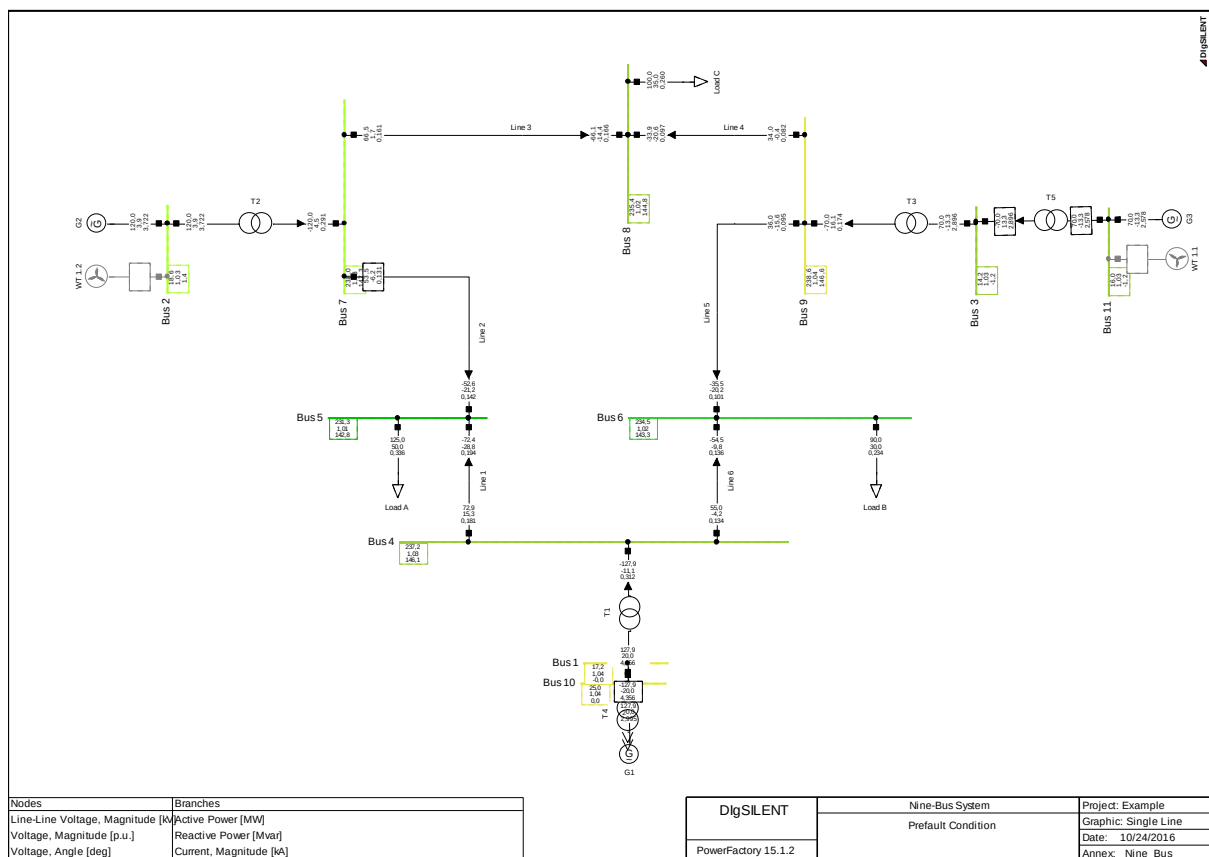
A 36. ábrán látható az IEEE 9 buszos rendszerének modellje. Mivel a modell számos korábbi dinamikus vizsgálat tárgyát képezte, remek referenciarendszernek gondoltam a megoldásaim mélyebb megismeréséhez. A stabilitás vizsgálatom során a mosonmagyaróvári modellben részletesen tárgyalt módszert követtem.

A rendszer karakterisztikus adatai:

Teljes terhelés:

$P=315 \text{ MW}$

$Q= 115 \text{ Mvar}$



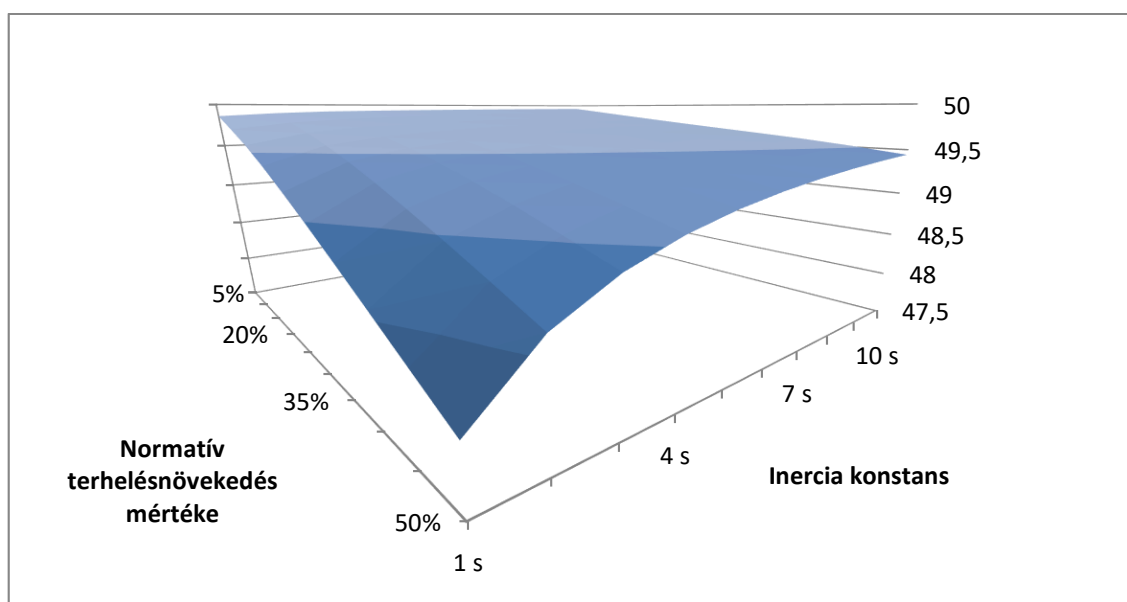
36. ábra: IEEE 9 buszos rendszerének topológiája

A rendszer több veszélyes állapottal rendelkezik a mosonmagyaróvárinál (49,8-49 Hz közötti állapotok), viszont nincs kiugróan alacsony, gyakorlatilag biztos rendszerösszeomlással fenyegető eredmény. A mögöttes hálózat ebben az esetben a G1 generátor.

A 7. táblázat jól mutatja, hogy több terheléskorlátozás aktiváció történik, mint a mosonmagyaróvári körzetben.

7. táblázat: kiinduló állapot: a normatív terhelésnövekedések hatása a frekvenciára a mögöttes hálózat inercia konstansának függvényében

H(s)\dP(%)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
1	49,860	49,715	49,565	49,388	49,192	48,986	48,770	48,549	48,325	48,100
2	49,892	49,784	49,679	49,569	49,439	49,293	49,136	48,970	48,795	48,614
3	49,912	49,817	49,728	49,640	49,546	49,437	49,316	49,182	49,034	48,887
4	49,921	49,838	49,758	49,680	49,604	49,518	49,420	49,310	49,189	49,058
5	49,927	49,852	49,779	49,709	49,640	49,569	49,486	49,393	49,289	49,175
6	49,932	49,863	49,796	49,730	49,666	49,603	49,532	49,452	49,361	49,259
7	49,936	49,871	49,808	49,747	49,686	49,627	49,566	49,495	49,414	49,322
8	49,939	49,878	49,818	49,760	49,702	49,647	49,591	49,528	49,455	49,371
9	49,942	49,883	49,826	49,771	49,716	49,663	49,611	49,554	49,488	49,411
10	49,943	49,888	49,833	49,780	49,727	49,676	49,626	49,575	49,514	49,443



37. ábra: normatív terhelésnövekedések hatása a frekvenciára az inercia konstans függvényében – IEEE 9 buszos rendszer

5.4.1 Szintetikus inercia képzés

A hálózat az aktuális üzemben 150 MW szélerőművi penetrációval működik, melyből 100 MW rendelkezik szintetikus inerciával (csak az egyik gépmodellre implementáltam saját vezérlést, a másik az alap szabályozó alapján működik). A holtávval ellátott frekvenciaváltozás sebességre szelektív szabályozót alkalmaztam.

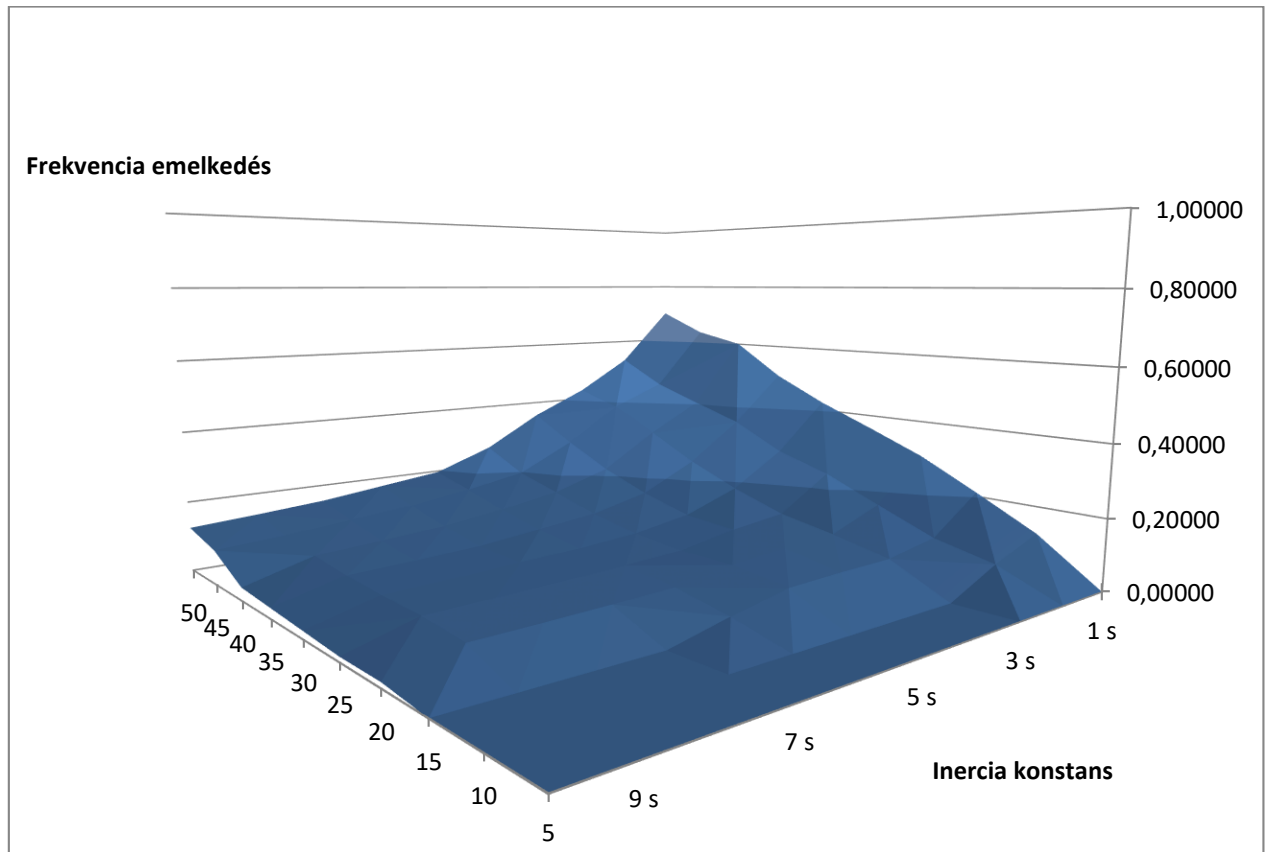
38. ábra: frekvenciaváltozás szelektitíással rendelkező szabályozó paraméterezése

A beállított paraméterek a 38. ábrán láthatók. A szimulációs folyamatban a megengedhető 1 viszonylagos egység meredekséget engedélyeztem másodpercenként, mely a képen szereplő „y_max1” változó 1 értékre állításában különbözik. Az eredményeket a 8. táblázat tartalmazza: félkövérrel jelöltem a kedvezőbb üzemállapotba kerülést. Jól látható, hogy a szélerőművek segítségével 7 esetben elkerülhetővé vált a terheléskorlátozás, mindössze 2 esetben nem, de ezek is a második fokozat megszólalásának határa fölé kerültek.

8. táblázat: a szintetikus inercia képzés hatása

H(s)\dP(%)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
1	49,860	49,838	49,776	49,683	49,553	49,411	49,270	49,150	48,960	48,800
2	49,892	49,853	49,784	49,738	49,674	49,575	49,493	49,375	49,250	49,145
3	49,912	49,817	49,806	49,751	49,683	49,622	49,560	49,500	49,422	49,318
4	49,921	49,838	49,834	49,783	49,722	49,646	49,585	49,525	49,470	49,414
5	49,927	49,852	49,850	49,798	49,729	49,670	49,613	49,556	49,487	49,434
6	49,932	49,863	49,834	49,796	49,747	49,692	49,640	49,586	49,527	49,455
7	49,936	49,871	49,808	49,807	49,761	49,710	49,656	49,607	49,555	49,496
8	49,939	49,878	49,818	49,816	49,772	49,720	49,673	49,627	49,580	49,523
9	49,942	49,883	49,826	49,824	49,781	49,731	49,686	49,642	49,596	49,548
10	49,943	49,888	49,833	49,830	49,794	49,740	49,697	49,655	49,611	49,568

A 39. ábra összegzi a szabályozás eredményeit. A kérdéses 2 FTK aktiváció elkerülésére újra az energiatárolót hívtam segítségül, ebben az esetben a szükséges teljesítmény 6 MW volt szélsőséges esetben. A különbség a kiinduló állapot (nincs szabályozás) és a szélérőművi szintetikus inercia képzés között a folyamatok során kialakuló minimális frekvenciaértékek közti különbséget jelenti.



39. ábra: a szintetikus inercia képzés hatása a kialakuló legalacsonyabb frekvenciára

Összességében megállapítható, hogy a szintetikus inercia képzése nélküli esetekben 60%-os penetráció esetén már előfordul terheléskorlátozó beavatkozását igénylő üzemállapot. A magasabb megújuló részarány esetén már egészen reális terhelésnövekedések esetén is problémákba ütközhetünk.

6 Összefoglalás és konklúziók

A dolgozatomban a szintetikus inercia rendszerre gyakorolt hatásait vizsgáltam meg, széleskörűen értelmezve a lehetséges szerepet, a rendszerszintű integráció megteremtéséhez elengedhetetlen folyamatokat és paramétereket.

Az első fejezet a motiváció bemutatását célozza. A probléma aktualitását a termelés összetételében tapasztalható gyors és nagyléptékű változások okozzák. Elhelyeztem a problémát a villamos energetikán belül és egy esettanulmánnyal támasztottam alá a fontosságot.

A második fejezet a problémát a mérnöki kutatói munka mélységében hivatott besorolni. Bemutattam a stabilitás kérdéskörét, majd szűkítettem a képet a téma szempontjából releváns részegységekre. A függelékekben leírt szabályozási elvek és fizikai folyamatok csatolásával kívántam teljes képet adni és a holisztikus megközelítést alkalmazhatóvá tenni.

A harmadik fejezet a modellezési eljárásomhoz használt módszertan és paraméterek indoklását és az elmélethez illesztését tartalmazza. A kérdéskör vizsgálatához az ENTSO-E elemzését és aktuális tudományos eredményeket vettem alapul. Bemutattam továbbá a szintetikus inercia képzésére alkalmas technológiákat és az ezekhez tartozó műszaki adatokat.

A negyedik fejezetben a szabályozási körök tervezésének tapasztalatait, illetve az egyes részelemek működésének részleteit ismertettem. A folyamat során bemutattam a saját készítésű blokkok működési elvét és a valós válasz dinamikai tulajdonságainak megteremthetőségére szolgáló eszközöket. 5 különböző típusú szabályozási köröm kompatibilis a szoftver nyújtotta típusokkal. A dinamikai beállításokkal előkészítettem a frekvenciaszabályozás összehangolására irányuló törekvéseket a szintetikus inercia lefutásának és a primer szabályozásnak az ütemezhetőségével.

Az ötödik fejezetben a szintetikus inercia képzés hálózati hatásait vizsgáltam. Először is a korábban leírtak alapján alakítottam ki egy elbírálási elvet, felvettem a normatív terhelésnövekedéseket és a különböző üzemállapotokat. A 2 vizsgált rendszer szintetikus inercia támogatás nélküli állapota után a különböző szabályozások által elért pozitív hatást szemléltettem és számszerűsítettem. A hatásvizsgálatot egy olyan gondolatmenetre fűztem fel, amely során egyre hatékonyabb eszközök alkalmazásával igyekeztem a frekvenciafüggő fogyasztói terheléskorlátozás elkerülését biztosítani. A hálózatok akkumulátoros szintetikus inercia képzővel ellátva még 90%-os megújuló penetráció mellett is képesek voltak 50%-os terhelésnövekedés kezelésére. A különböző paraméterek rendszerhatásait széleskörűen és részletekbe menően ismertettem. Igyekeztem általános és a későbbiekben jól fejleszthető megoldásokat választani a lehetőségekhez mérten.

Összegzésként kijelenthető, hogy a jövő villamosenergia-rendszerében kiemelt figyelmet kell fordítani a stabilitás biztosítására. Az irodalmi vizsgálatokat saját modellezésem és szimulációim is alátámasztották, a rendszer dinamikus viselkedése merőben átalakul a növekvő megújuló penetráció hatására. A megvalósított szintetikus inercia képzők hasznosnak bizonyultak, alkalmasak lehetnek a terheléskorlátozások és szükségtelenül nagy mögöttes forgótartalékok kiváltására. Különös figyelmet fordítottam a paraméterváltozások hatásaira és a különböző szelektivitások elvi elhelyezésére. Az általam alkalmazott kiértékelési eljárás hasznos gondolatokat adhat egy standard eljárás fejlesztéséhez, a dinamikai tulajdonságok hangolására.

A vizsgálatok alapján megállapítható, hogy a szintetikus inercia képzése nélküli esetekben 60%-os penetráció mellett előfordul terheléskorlátozó beavatkozását igénylő üzemállapot. A magasabb megújuló részarány esetén már egészen reális terhelésnövekedések esetén is problémákba ütközhetünk. A szélerőművek a vizsgált 200 kiinduló esetből (modellenként 100 vizsgált üzemállapot) 6 alkalommal nem tudták biztosítani az FTK elkerüléséhez szükséges aktivációt, erre különböző méretű energiatárolók alkalmazását találtam megfelelőnek. Ezek bevonását az is szükségessé teszi, hogy nem mindig fúj a szél, vagy épp a szintetikus inerciát biztosító egység esik ki. A szám adatok természetesen erősen függenek a modelltől, de mindenesetre számos érdekes konklúziót sikerült levonni a vizsgálatok során.

A továbbiakban a hatásvizsgálat során nyert információk alapján szeretnék továbblépni mind a nagy rendszerek kérdéseire (inercia középpont szabályozás), mind pedig a mikrogridek stabilitásvizsgálatára, ezekhez pedig az eddigi munkám során számos előkészítő feladatot végeztem el.

7 Irodalomjegyzék

- [1] Trent Ratzlaff: Effects Future Renewable Installations will have on System Synchronous and Synthetic Inertia (Master Thesis), 2012.
- [2] Johan Björnstedt: Integration of Non-Synchronous Generation (Doctoral Dissertation), 2012.
- [3] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions: Definition and Classification of Power System Stability (IEEE Transactions on Power Systems), 2004.
- [4] F. Gonzalez-Longatt, E. Chikuni, E. Rashayi: Effects of the Synthetic Inertia from Wind Power on the Total System Inertia after a Frequency Disturbance
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Andreas Ulbrig, Theodor S. Borsche and Göran Andersson: Impact on Low Rotational Inertia on Power System Stability and Operation, 2014.
- [8] 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.
- [9] Gonzalez Longatt: Activation schemes of synthetic inertia controller on full converter type wind turbine (type 4) (Loughborough University Institutional Repository), 2015.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] H.R. Chamorro, M. Ghandhari, R. Eriksson: Wind Power Impact on Power System Frequency Response (North American Power Symposium), 2013.
- [13] Slavomir Seman, Raimo Sakki (ABB): Inertial response – generators and the power electronics
- [14] Adam Stock, William Leithead (University of Strathclyde): Providing Grid Frequency Support Using Variable Speed Wind Turbines with Augmented Control, 2012
- [15] Lisias V. L. Abreu, Mohammad Shahidehpour: Wind Energy and Power System Inertia (IEEE PES General Meeting), 2006..
- [16] 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.

- [17] 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)
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] DigSILENT Power Factory User Manual for version 14.2, 15.1., DigSilent GMBH
- [22] Frei Teng, Goran Strabac: Evaluation of Synthetic Inertia Provision from Wind Plants (IEEE PES General Meeting), 2015.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E): Future System Inertia (Nordic Report)
- [27] E. Ela, V. Gevorgian, P. Fleming, Y. C. Zhang, M. Singh, E. Muljadi, A. Scholbrook (NREL), J. Aho, A. Buckspan, L. Pao (University of Colorado), V. Singhvi, A. Tuohy, P. Pourbeik, D. Brooks, N. Bhatt (EPRI) Active Power Controls from Wind Power: Bridging the Gaps, 2014.
- [28] European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E): Frequency Stability Evaluation Criteria for the Synchronous Zone of Continental Europe – Requirements and impacting factors, 2016.
- [29] European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E): Technical Background for the Low Frequency Demand Disconnection Requirements, 2014.
- [30] European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E): The Impact of Dispersed Generation on Continental Europe's Security of Supply, 2014.
- [31] Faludi Andor, Szabó László: Villamosenergia-rendszer üze me és irányítása oktatási segédanyagok
- [32] Vokony István: Villamosenergia-rendszer stabilitásvizsgálata közvetlen módszerrel, 2007.

- [33] Vokony István: Smart gridek rendszerintegrációs feltételei: (stabilitás vizsgálat, rendszer helyreállítás-szinkronozás, feszültség-meddőteljesítmény szabályozás, 2012.
- [34] Hartmann Bálint: Szélérőművek integrálása a villamosenergia-rendszerbe, 2012.
- [35] International Energy Agency: Key Renewable Trends: Excerpt from Renewable Energy Information, 2016.
- [36] Australian Energy Market Operator: Update Report: Black System Event in South Australia on 28th September 2016.: An update to the preliminary operating incident report for the National Electricity Market data analysis, 2016.
- [37] Germán Claudio Tarnowski: Coordinated Frequency Control of Wind Turbines with High Wind Penetration, 2012.

Függelék

F1 A frekvenciaszabályozás elemei

A rendszerirányítók feladata az üzemeltetés során a feszültség és frekvencia előírt keretek közt tartása. Jelenleg 3 fő kategóriába soroljuk a szabályozási eljárásokat válaszüjünk alapján, emellett kiemelt figyelmet érdemes szentelni a kezdeti pillanatokat meghatározó fizikai folyamatoknak is (40. ábra).

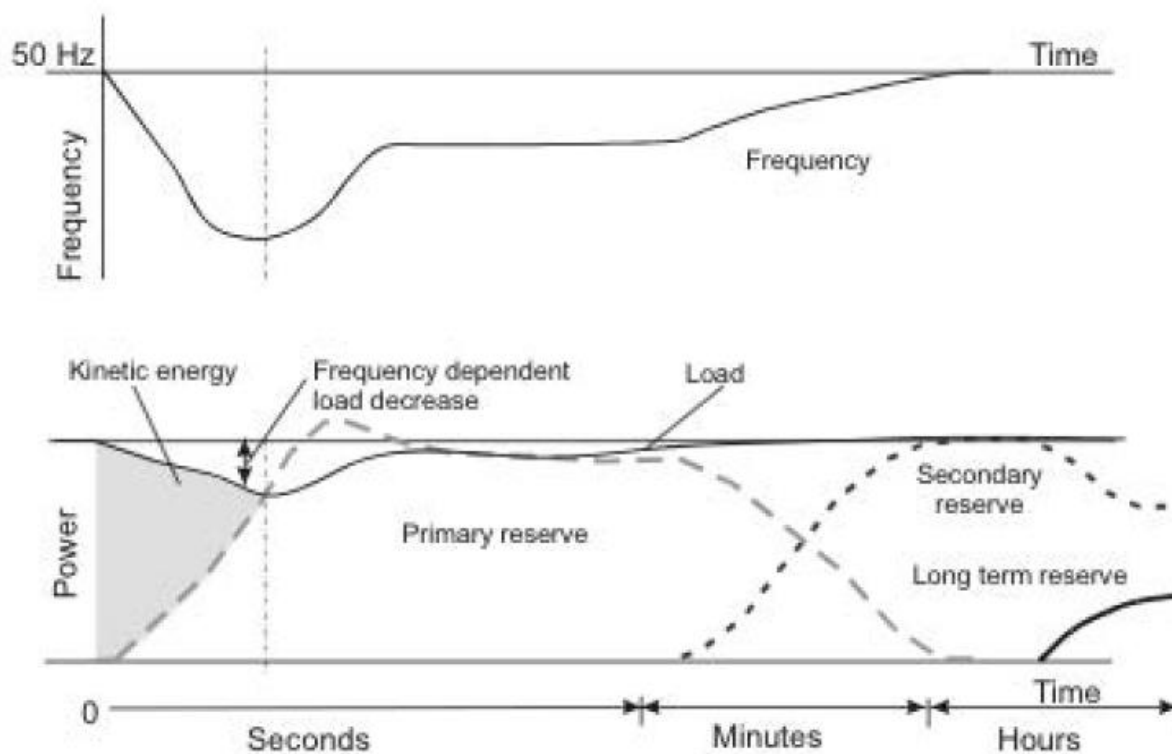
Az első szint a forgógépek közvetlen fizikai válasza, mely a bennük tárolt kinetikus energia rendszerre gyakorolt hatásából fakad. Stabilitás szempontjából kritikus jellemző. Minél nagyobb egy rendszer inerciája (meghatározás az F2 fejezetben), annál stabilabbnak tekinthető, azaz kisebb a teljesítmények kiegyenlítetlenségéből fakadó frekvenciaváltozás (Rate Of Change Of Frequency, ROCOF). A hálózatra csatlakozó forgógépek - nagy tömegű forgórészükből adódóan - gyakorlatilag kinetikus energiát tárolnak, mely közvetlen kapcsolatban van a hálózattal a tengelyen keresztül. Ez az energiamennyiség a forgórész tehetetlenségi nyomatékából és forgási sebességéből számítható. A teljesítmények egyenlőtlensége esetén ez a kinetikus energia közvetlenül hatással van a rendszerre.

A primer szabályozás a frekvenciaváltozás minimalizálására törekszik (frekvenciatartás, frequency containment), helyi érzékelésű és automatikus működésű. Reakcióideje néhány másodperc, hatását a perces nagyságrendig vehetjük figyelembe. Nagyrészü arányos tag (P típusú) szabályozó, a frekvencia névleges értéktől való eltérése következtében aktiválódik, a turbinaszabályozóhoz rendelt primer szabályozó statizmusnak (jele R, mértékegysége MW/Hz) megfelelően.

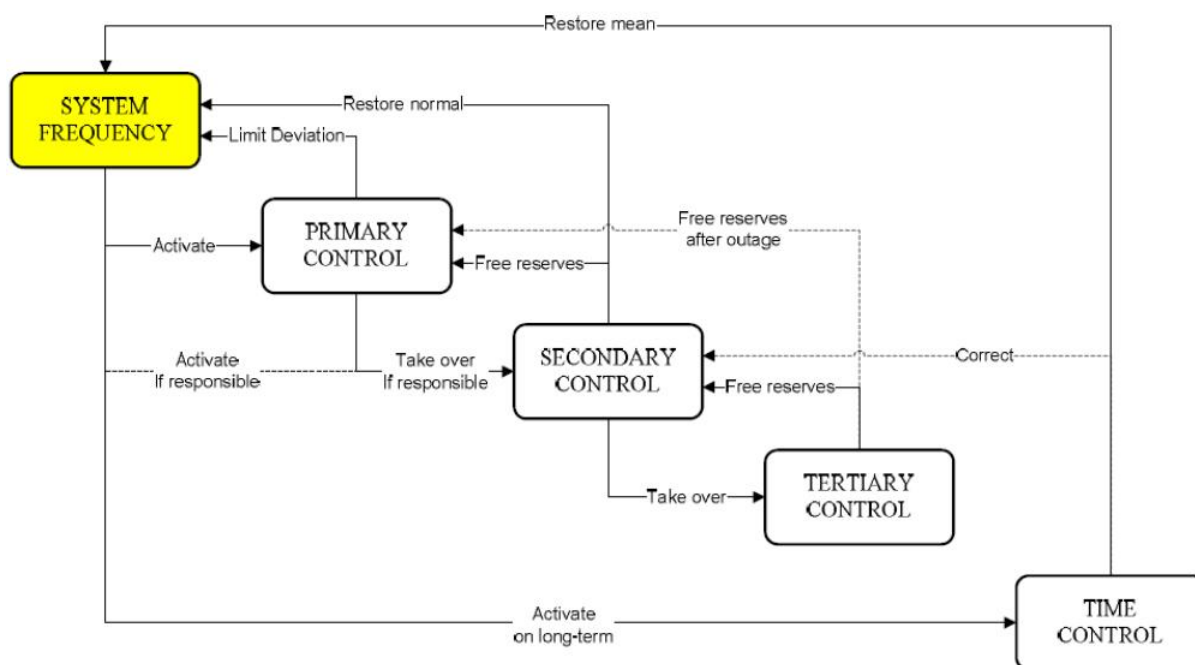
A szekunder szabályozás (Frequency Restoration Process, FRP) a frekvenciatartás mellett menetrendtartásért felel. Később reagál, de hosszabb időtávon is fenntartható a szabályozás által megkívánt új alapjel. A névleges frekvenciaértékre való visszatérést célozza, mivel a primer szabályozás eredményeképp attól eltérő értéken alakul ki munkapont. A frekvencia névleges értékhez közelítése során (a frekvenciaeltérés csökkenésével) a primer szabályozás automatikusan kiiktatódik.

A tercier szabályozás (Reserve Replacement Process, RRP) hosszabb időtávokon hivatott az egyensúly biztosítására és a gazdaságos teherelosztás megteremtésére, továbbá az igénybe vett szekunder szabályozási tartalék helyettesítésére.

Az egyes szabályozási szintek ENTSO-E által leírt kapcsolatát a 41. ábrán figyelhetjük meg.



40. ábra: frekvenciaszabályozás lépései [1]



41. ábra: a frekvenciaszabályozás szintjei és kapcsolatok

F2 Fizikai háttér: a P-f összefüggés és az inercia fogalma

Az F1 fejezetben tárgyalt frekvenciára ható szabályozások közül a leggyorsabb, hálózatra közvetlenül csatlakozó forgógépek tehetetlenségéből fakadó rendszerhatás a stabilitás szempontjából kritikus. A fogalom fizikai háttérének megértéséhez és számszerűsítéséhez érdemes a rendszer teljesítményviszonyait vizsgálni.

A villamosenergia-rendszer teljesítményeinek egyensúlyát megfogalmazhatjuk a rendszer állandósult állapotára (statikus egyensúlyára), illetve a dinamikus állapotokra is a megfelelő hatások figyelembe vételével.

A villamosteljesítmény-egyensúly, azaz a:

$$P_G = P_F + P_V$$

7-1. egyenlet: a villamos teljesítmények egyensúlya

egyenlet mindig teljesül, ahol P_G a generátorkapcsokon kiadott teljes villamos teljesítmény, P_F a teljes fogyasztás, P_V pedig a veszteségek összessége.

A rendszer állandósult üzemállapotában a generátorok tengelyére jutó mechanikai teljesítmény (P_M) és a kapcsain kiadott villamos teljesítmény megegyezik, tehát:

$$P_M = P_F + P_V$$

7-2. egyenlet: statikus teljesítmény-egyensúly

Ez azonban állandó frekvenciaértéket feltételez, ezért statikus egyensúlynak nevezzük.

Ha a frekvencia nem állandó, akkor (i az egy gépre vonatkoztatott index, M a teljes rendszer):

$$P_{mi} = P_{gi} + D_i * \Delta\omega_i + \frac{dW_{KINi}}{dt}$$

7-3. egyenlet: dinamikus teljesítmény-egyensúly (lengési egyenlet)

$D_i * \Delta\omega_i$ a generátor forgórészében a szögsebesség-eltérés miatt keletkező csillapító teljesítmény

W_{KIN} a gépegység forgórészében tárolt kinetikus energia. A gépegység tömegének jellemzésére szolgáló H inercia konstans pedig:

$$\frac{1}{2} \theta * \omega_n^2 = H_i * S_i$$

7-4. egyenlet: az inercia származtatása a kinetikus energiából

Az inercia állandó idődimenziójú. Jelentéstartalma gyakorlatilag az, hogy az adott gépegység ennyi időn keresztül képes ellátni a névleges teljesítményével megegyező fogyasztót a forgási energiájának hasznosításával. Az inercia segítségével számítható az egyes gépeink perdülete, amelyből származtatható a rendszer-körfrekvencia, mint az egyes forgó tömegek szögsebességeinek perdületekkel súlyozott átlaga (COI: center of inertia, inercia középpont):

$$M_i = \frac{H_i * S_i}{\Pi * f_n}$$

7-5. egyenlet: perdület kifejezése az inercia konstanssal

$$\omega_R = \frac{\sum M_i * \omega_i}{M_R}$$

7-6. egyenlet: az inerciaközéppont definíciója

A mozgási energia idő szerinti deriváltja akkor pozitív, ha a hajtó mechanikai teljesítmény nagyobb, mint a forgórészt fékező villamos teljesítmény, ekkor a forgó tömeg gyorsul, fordított esetben, amikor a generátor a kapcsain nagyobb villamos teljesítményt táplál a hálózatba, mint a tengelyén felvett mechanikai teljesítmény, a mozgási energia idő szerinti deriváltja negatív és a forgó tömeg lassul. Másképp fogalmazva: a generátor akkor adhat ki a kapcsain a mechanikai teljesítménynél nagyobb villamos teljesítményt, ha a forgórészből a lassulás következtében mozgási energia szabadul fel, ami fedezi a villamos teljesítmény-többlet kitáplálását. [15][16]

A rendszer mögöttes kinetikus energiája a névleges frekvencián kiszámítható a gépek névleges értékeiből:

$$E_{kin,összes} = \sum H_i S_i$$

7-7. egyenlet: az inerciaközéppont definíciója

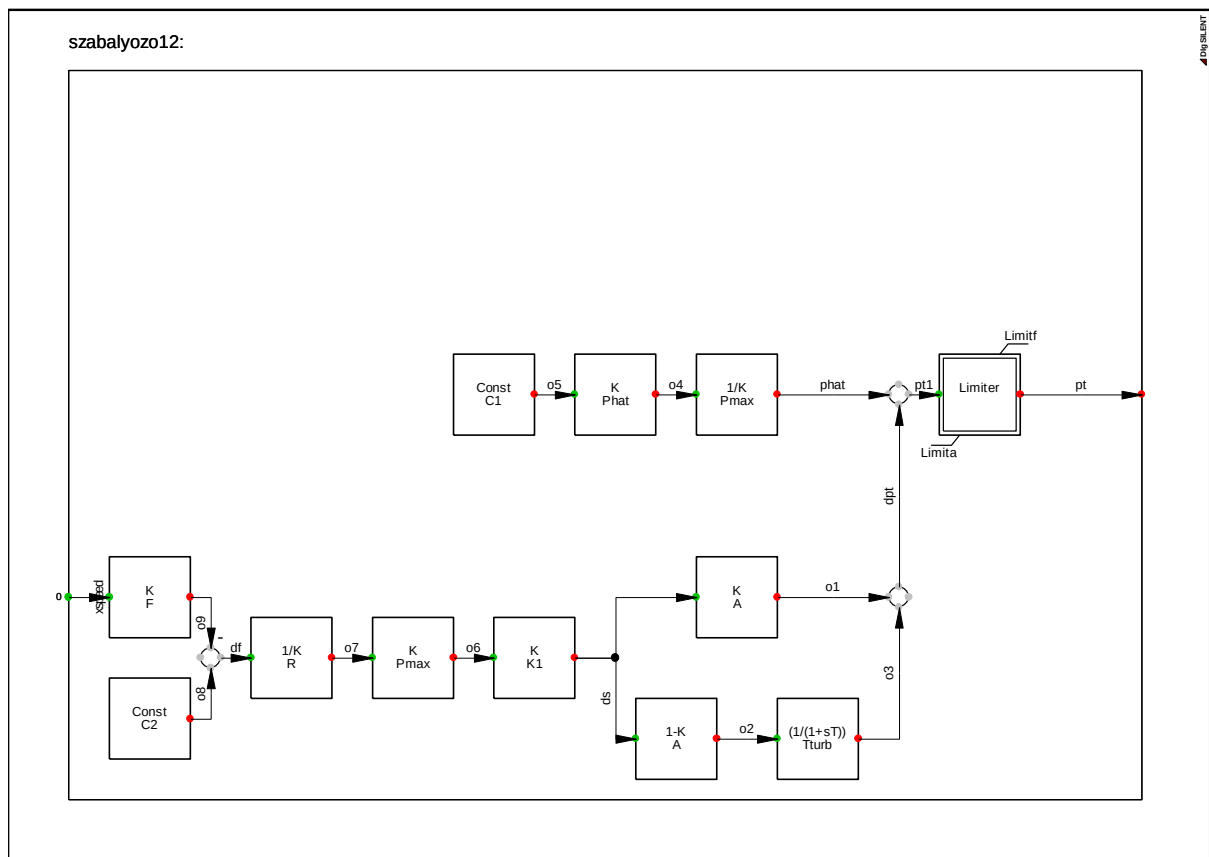
A látszólagos teljesítmények és az inercia konstansok gépenkénti szorzata tehát jó becslést ad a kinetikus energiára ([E]=GWs).

F3 Szimulációs vizsgálatok során felhasznált modellek paraméterei

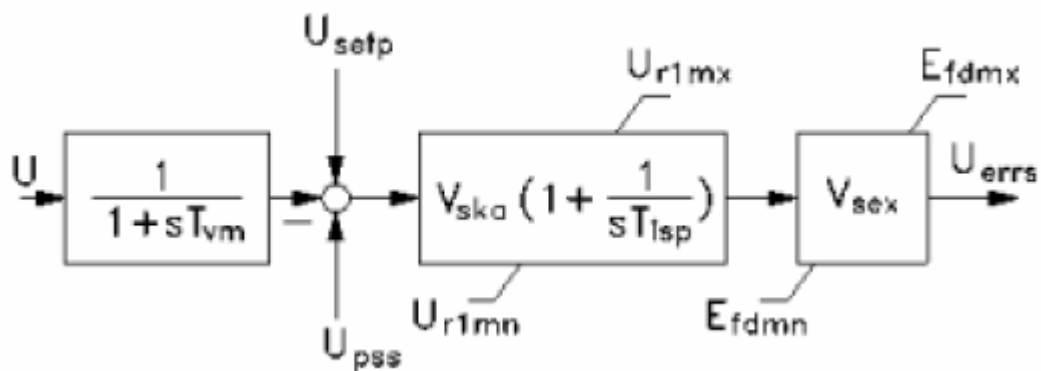
A felhasznált rendszerek topológiáját az 5. fejezet tartalmazza. Ezen fejezet célja az egyes rendszerek fő paramétereinek és az alkalmazott szabályozóknak a bemutatása. Saját készítésű modell felépítése nem volt része a dolgozatnak, de a rendelkezésemre álló rendszerek kitűnő példaként szolgálnak, és rendkívül széleskörű adattal rendelkeznek.

F3.1 Mosonmagyaróvár modellje

A mosonmagyaróvári körzet modelljét konzulensem bocsátotta rendelkezésemre, [33], [34] irodalmakban a felépítése részletesen megismerhető. A körzetben jelentős a szélenergia betáplálás hazai viszonylatban, így kiváló terepet biztosít a vizsgálatokhoz. A vizsgált topológia közel áll a valósághoz, tartalmaz azonban néhány összevonást és egyszerűsítést a kezelhetőség érdekében. Mivel korábbi vizsgálatokban szigetüzemű működését, feszültség szabályozási lehetőségeit is vizsgálták, látható néhány inaktív elem az ábrán. Esetemben a mögöttes hálózatot egy szinkrongenerátor képezi le. A korábbi tanulmányok részeként a szerzők kifejlesztettek egy saját primer szabályozó egységet, így a paraméter beállítások illeszkednek a rendszerrész igényeihez. Ennek blokkvázlata a 42. látható. [33][34]



42. ábra: a modellhez csatolt turbinaszabályozó blokkvázlata [33]



43. ábra: a gerjesztésszabályozó blokkvázlata

A generátorok gerjesztésszabályozására beépített modellt alkalmaztak (30. ábra), a szabályozó paramétereit a 9. táblázat tartalmazza.

A G4 csatlakozási pontja megfeleltethető a győri 400 kV-os gyűjtősinnek, ahova a határkeresztelő távvezetékek is befutnak. A rendszer így 400-120-20-10 kV-os feszültség szinteket tartalmaz, rendelkezik párhuzamos távvezetékekkel és transzformátorokkal, valamint a fogyasztói adatok is hiteles mérések alapján kerültek beállításra. A mosonmagyaróvári városi kábelhálózat a MO10, a környékbeli települések szabadvezetékes hálózata a MO20 gyűjtősinre csatlakoznak. Az egyéb ipari

fogyasztók az MO1 és K1 sínhez csatlakoznak. Az MO1G gázturbina szintén az ismertetett szabályozókkal ellátva működik az elektromechanikus tranziens vizsgálatok folyamán.

9. táblázat: gerjesztésszabályozó adatok a Mosonmagyaróvár modellhez [34][33]

		G4 generátor	MO1G generátor
Paraméter jelentése	Paraméter neve	Gerjesztésszabályozó	Gerjesztésszabályozó
Regulator input filter time constant (s)	tvm	0,02	0,02
Regulator time constant (p.u.)	vska	20	20
Regulator integration time constant (s)	tisp	0,3	0,3
Internal voltage regulator signal max. limitation (p.u.)	ur1mx	5	5
Internal voltage regulator signal min. limitation (p.u.)	ur1mn	-5	-5
Exciter constant (p.u.)	vsex	1	1
Max. value of field voltage (p.u.)	efdmx	5	5
Min. value of field voltage (p.u.)	efdmn	-5	-5

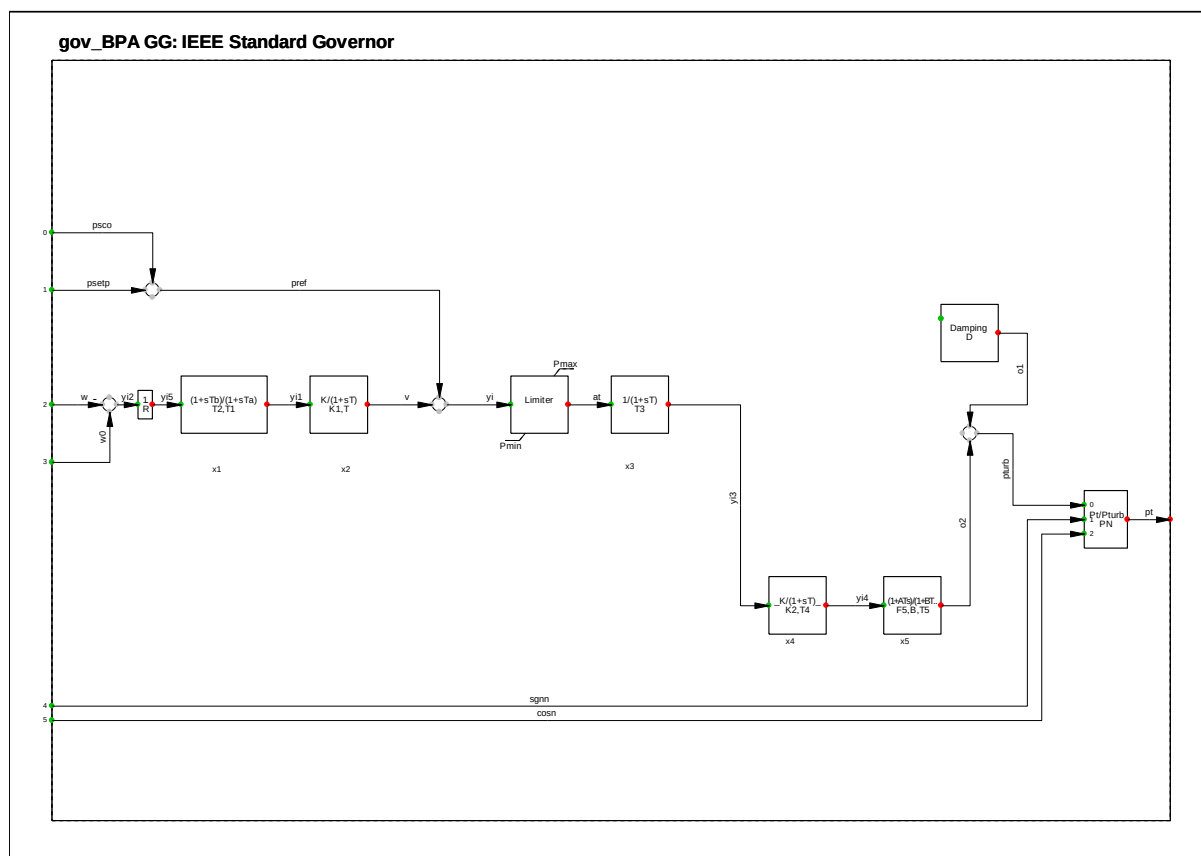
10. táblázat: turbinaszabályozó adatok a Mosonmagyaróvár modellhez [34][33]

		G4 generátor	MO1G generátor
Paraméter jelentése	Paraméter neve	Turbinaszabályozó	Turbinaszabályozó
Konstans	F	50	50
Frekvencia alapjel	C2	50	50
Erősítés	A	0,3	0,3
Maximális teljesítmény	Pmax	208,25	4,999
Statizmus	R	6,67	0,667
Konstans	K1	2	-
Hatásos teljesítmény	Phat	98,6	4,999

		G4 generátor	MO1G generátor
Paraméter jelentése	Paraméter neve	Turbinaszabályozó	Turbinaszabályozó
Turbina szabályozási idő	Tturb	2,5	2,5
Turbina teljesítmény minimuma	Limita	0	0
Turbina teljesítmény maximuma	Limitf	1,1	1,1

F3.2 IEEE 9-bus system

Az IEEE kilenc gyűjtősinés rendszere egy gyakorta alkalmazott példája a villamosenergia-rendszer vizsgálatoknak. 3 szinkrongép, 12 gyűjtősin (3 erőművi sín jön a 9 alapsínhez), 6 távvezeték, 6 transzformátor és 3 impedanciatartó terhelésből áll. A teljes fogyasztás 315 MW és 115 MVar. A 44-46. ábrán látható a beépített típusú turbina- és gerjesztésszabályozó, melyek névleges adatait a 11-13. táblázatok tartalmazzák.



44. ábra: gov_BPA_GG beépített turbinaszabályozó típus

11. táblázat: szinkrongenerátor adatok az IEEE 9 buszos rendszerében

		G1 generátor	G2 generátor	G3 generátor
Paraméter jelentése	Paraméter neve			
Látszólagos teljesítmény	S	512	270	125
Feszültségszint	U	24	18	15,5
Teljesítménytényező	Pf	0,9	0,85	0,85
Inercia (s)	H	2,6312	4,1296	4,768
Csillapítási együttható (p.u.)	D	2	2	2
Armatúra ellenállás (p.u.)	r_a	0,004	0,0016	0,004
d irányú szinkron reaktancia (p.u.)	x_d	1,7	1,7	1,22
q irányú szinkron reaktancia (p.u.)	x_q	1,65	1,62	1,16
d irányú tranziens reaktancia (p.u.)	x'_d	0,27	0,256	0,174
q irányú tranziens reaktancia (p.u.)	x'_q	0,47	0,245	0,25
d irányú szubtranzien reaktancia (p.u.)	x''_d	0,2	0,185	0,134
q irányú szubtranzien reaktancia (p.u.)	x''_q	0,2	0,185	0,134
Szivárgási reaktancia (p.u.)	x_l vagy x_p	0,16	0,155	0,0078
d irányú tranziens időállandó	T'_{d0}	3,8	4,8	8,97
q irányú tranziens időállandó	T'_{q0}	0,48	0,5	0,5
d irányú szubtranzien időállandó	T''_{d0}	0,01	0,01	0,033
q irányú szubtranzien	T''_{q0}	0,0007	0,0007	0,07

		G1 generátor	G2 generátor	G3 generátor
Paraméter jelentése	Paraméter neve			
Látszólagos teljesítmény	S	512	270	125
Feszültség szint	U	24	18	15,5
Teljesítménytényező	Pf	0,9	0,85	0,85
Inercia (s)	H	2,6312	4,1296	4,768
Csillapítási együttható (p.u.)	D	2	2	2
Armatúra ellenállás (p.u.)	r_a	0,004	0,0016	0,004
d irányú szinkron reaktancia (p.u.)	x_d	1,7	1,7	1,22
q irányú szinkron reaktancia (p.u.)	x_q	1,65	1,62	1,16
d irányú tranziens reaktancia (p.u.)	x'_d	0,27	0,256	0,174
q irányú tranziens reaktancia (p.u.)	x'_q	0,47	0,245	0,25
d irányú szubtranzien reaktancia (p.u.)	x''_d	0,2	0,185	0,134
q irányú szubtranzien reaktancia (p.u.)	x''_q	0,2	0,185	0,134
Szivárgási reaktancia (p.u.)	x_l vagy x_p	0,16	0,155	0,0078
időálló				
Szaturáció 1 p.u. feszültségen	S(1.0)	0,09	0,125	0,1026
Szaturáció 1,2 p.u. feszültségen	S(1.2)	0,4	0,45	0,432

12. táblázat: IEEE 9 gyűjtőszínes rendszerének gerjesztésszabályozó adatai

		G1 generátor	G2 generátor	G3 generátor
Paraméter jelentése	Paraméter neve	gerjesztésszabályozó	gerjesztésszabályozó	gerjesztésszabályozó
Regulator input filter time constant (s)	T_r	0	0	0,06
Regulator gain (p.u.)	K_a	200	30	25
Regulator time constant (s)	T_a	0,395	0,4	0,2
Maximum regulator output (p.u.)	V_{Rmax}	3,84	4,59	1
Minimum regulator output (p.u.)	V_{Rmin}	-3,84	-4,59	-1
Exciter self-excitation (p.u.)	K_e	1	-0,02	-0,0601
Exciter time constant (s)	T_e	0	0,56	0,6758
Regulator stabilizing circuit gain (p.u.)	K_f	0,0635	0,05	0,108
Regulator stabilizing time constant (s)	T_f	1	1,3	0,35
Field voltage 1 (p.u.)	E_1	2,88	2,5875	2,4975
Saturation factor 1 (p.u.)	$SE(E_1)$	0	0,7298	0,0949
Field voltage 2	E_2	3,84	3,45	3,33
Saturation factor 2 (p.u.)	$SE(E_2)$	0	1,3496	0,37026

13. táblázat: IEEE 9 gyűjtőszínes rendszerének turbinaszabályozó adatai

		G1 generátor	G2 generátor	G3 generátor
Paraméter jelentése	Paraméter neve	turbinaszabályozó	turbinaszabályozó	turbinaszabályozó
Maximum turbine output (p.u.)	$P_{\max}$	0,8984	0,8518	1,056
Turbine droop (p.u.)	R	0,00976	0,01852	0,04
Control time constant (delay) (s)	T_1	0,15	0,1	0,083
Hydro reset time constant (s)	T_2	0,05	0	0
Servo time constant (s)	T_3	0,3	0,259	0,2
Steam valve bowl time constant (s)	T_4	0,26	0,1	0,05
Steam reheat time constant (s)	T_5	8	10	5
Shaft output ahead of reheater (p.u.)	F	0,27	0,272	0,28

F4 Kiegészítő szimulációs eredmények

14. táblázat : folytonos üzemű szintetikus inercia képző hatása a mosonmagyaróvári modellen

H(s)\dP(%)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
1	49,912	49,823	49,716	49,581	49,410	49,120	48,768	48,334	47,644	46,648
2	49,931	49,862	49,790	49,698	49,581	49,428	49,228	48,967	48,586	48,037
3	49,941	49,882	49,823	49,755	49,669	49,560	49,422	49,237	48,978	48,600
4	49,948	49,895	49,843	49,788	49,720	49,636	49,529	49,386	49,189	48,903
5	49,952	49,905	49,857	49,809	49,754	49,684	49,597	49,481	49,322	49,093
6	49,956	49,912	49,868	49,825	49,777	49,718	49,643	49,546	49,414	49,222
7	49,959	49,918	49,878	49,837	49,794	49,743	49,677	49,593	49,480	49,315
8	49,961	49,923	49,885	49,846	49,808	49,762	49,703	49,629	49,531	49,387
9	49,963	49,927	49,890	49,854	49,817	49,776	49,723	49,658	49,570	49,442
10	49,965	49,930	49,895	49,860	49,825	49,787	49,740	49,681	49,602	49,487
H(s)\dP(%)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
1	49,912	49,823	49,735	49,608	49,460	49,223	48,917	48,549	48,118	47,463
2	49,931	49,862	49,810	49,725	49,619	49,486	49,315	49,104	48,842	48,491
3	49,941	49,882	49,823	49,778	49,700	49,603	49,484	49,337	49,150	48,908
4	49,948	49,895	49,843	49,809	49,747	49,671	49,580	49,466	49,321	49,137
5	49,952	49,905	49,857	49,809	49,778	49,715	49,640	49,547	49,430	49,282
6	49,956	49,912	49,868	49,825	49,800	49,747	49,683	49,604	49,504	49,381
7	49,959	49,918	49,878	49,837	49,816	49,770	49,714	49,645	49,560	49,453
8	49,961	49,923	49,885	49,846	49,808	49,787	49,738	49,676	49,601	49,509
9	49,963	49,927	49,890	49,854	49,817	49,801	49,756	49,701	49,634	49,552
10	49,965	49,930	49,895	49,860	49,825	49,813	49,771	49,721	49,660	49,587
H(s)\dP(%)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
1	0,000	0,000	-0,019	-0,027	-0,050	-0,103	-0,149	-0,215	-0,474	-0,815
2	0,000	0,000	-0,020	-0,027	-0,038	-0,058	-0,087	-0,137	-0,256	-0,454
3	0,000	0,000	0,000	-0,023	-0,031	-0,043	-0,062	-0,100	-0,173	-0,308
4	0,000	0,000	0,000	-0,021	-0,027	-0,035	-0,051	-0,080	-0,132	-0,234
5	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,024	-0,031	-0,043	-0,067	-0,108	-0,189
6	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,023	-0,029	-0,039	-0,058	-0,090	-0,159
7	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,022	-0,027	-0,037	-0,052	-0,080	-0,138
8	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,026	-0,035	-0,047	-0,070	-0,122
9	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,025	-0,033	-0,043	-0,063	-0,110
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,025	-0,031	-0,040	-0,058	-0,100

A táblázat tartalmazza a kiinduló állapotot, a vezérlések hatását és a kettő közti különbséget. a 49,8 Hz felett maradó üzemállapotok esetén nem futtattam le a szintetikus inercia képzést. Ez a szabályozó gyakorlati alkalmazásra nem javasolt, hiszen nem rendelkezik szelektivitással.

15. táblázat: alacsony frekvenciás triggerrel ellátott szintetikus inercia képző hatása

H(s)\dP(%)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
1	49,912	49,823	49,716	49,581	49,410	49,120	48,768	48,334	47,644	46,648
2	49,931	49,862	49,790	49,698	49,581	49,428	49,228	48,967	48,586	48,037
3	49,941	49,882	49,823	49,755	49,669	49,560	49,422	49,237	48,978	48,600
4	49,948	49,895	49,843	49,788	49,720	49,636	49,529	49,386	49,189	48,903
5	49,952	49,905	49,857	49,809	49,754	49,684	49,597	49,481	49,322	49,093
6	49,956	49,912	49,868	49,825	49,777	49,718	49,643	49,546	49,414	49,222
7	49,959	49,918	49,878	49,837	49,794	49,743	49,677	49,593	49,480	49,315
8	49,961	49,923	49,885	49,846	49,808	49,762	49,703	49,629	49,531	49,387
9	49,963	49,927	49,890	49,854	49,817	49,776	49,723	49,658	49,570	49,442
10	49,965	49,930	49,895	49,860	49,825	49,787	49,740	49,681	49,602	49,487
H(s)\dP(%)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
1	49,912	49,823	49,726	49,599	49,451	49,218	48,908	48,540	48,091	47,454
2	49,931	49,862	49,791	49,712	49,607	49,473	49,302	49,092	48,826	48,476
3	49,941	49,882	49,823	49,762	49,685	49,591	49,472	49,324	49,136	48,888
4	49,948	49,895	49,843	49,791	49,731	49,657	49,566	49,452	49,305	49,117
5	49,952	49,905	49,857	49,809	49,761	49,701	49,626	49,531	49,412	49,262
6	49,956	49,912	49,868	49,825	49,783	49,731	49,666	49,586	49,487	49,361
7	49,959	49,918	49,878	49,837	49,795	49,753	49,696	49,627	49,541	49,432
8	49,961	49,923	49,885	49,846	49,808	49,769	49,719	49,657	49,583	49,487
9	49,963	49,927	49,890	49,854	49,817	49,781	49,736	49,681	49,614	49,530
10	49,965	49,930	49,895	49,860	49,825	49,789	49,750	49,700	49,640	49,564
H(s)\dP(%)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
1	0,000	0,000	-0,010	-0,018	-0,041	-0,099	-0,140	-0,206	-0,447	-0,806
2	0,000	0,000	-0,001	-0,014	-0,026	-0,045	-0,074	-0,125	-0,240	-0,439
3	0,000	0,000	0,000	-0,007	-0,016	-0,031	-0,050	-0,087	-0,158	-0,288
4	0,000	0,000	0,000	-0,003	-0,011	-0,021	-0,037	-0,066	-0,116	-0,214
5	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,008	-0,017	-0,029	-0,050	-0,089	-0,169
6	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,006	-0,013	-0,023	-0,040	-0,073	-0,139
7	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,001	-0,010	-0,019	-0,034	-0,061	-0,117
8	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,007	-0,015	-0,028	-0,052	-0,101
9	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,005	-0,013	-0,023	-0,044	-0,087
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,001	-0,010	-0,019	-0,038	-0,077

Az előzőhöz hasonlóan az alacsony frekvenciás szelektivitás is a kiinduló állapot, hatás és különbözet sorrendben kerül itt bemutatásra. Az egyező értékek azonban ez esetben a szelektivitás eredményei, mely a szabályozó variáns hozzáadott értéke.

	Parameter	
►Gain	1,	
Kd	1,	
Tfel	0,01	
Tle	5,	
T	0,1	
also	-0,001	
felso	0,001	
fup	1,004	
fdown	0,996	
H	20,	
C	0,	
Pmax	1,	
Pset	0,	
Tdelay	0,01	
Tf	0,	
y_min	-0,1	
y_max1	0,1	

47. ábra: frekvencia szelektivitással rendelkező szintetikus inercia képző paraméterezése

A fix teljesítményeket leadó szabályozó esetében több érdekes konklúzió is levonható. Az első mindjárt az adaptív eseténél kisebb értékek magyarázata: a holsáv beállítása a vizsgált esetben 10%-os felfutásnál nagyobb eltérést okoz (egy nagyságrendnyi különbség volt a beállításban, ennek hatására a fix teljesítménytöbblet később aktiválódott), mint az konkrét frekvenciaváltozási sebesség figyelembe vétele. Mivel a kettő iránya ellentétes, egy érdekes paraméterválasztási konklúzióhoz juthatunk. A frekvenciaváltozási sebességek oly mértékűek a rendszerrészen, hogy a fix teljesítménytöbblet biztosítása nem jár előnnyel a vizsgált esetekben.

16. táblázat: fix teljesítménytöbbletet biztosító szabályozó hatása

H(s)\dP(%)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
1	49,912	49,823	49,733	49,606	49,457	49,227	48,913	48,550	48,123	47,465
2	49,931	49,862	49,806	49,721	49,616	49,482	49,312	49,102	48,840	48,488
3	49,941	49,882	49,823	49,774	49,697	49,601	49,483	49,336	49,150	48,908
4	49,948	49,895	49,843	49,806	49,745	49,670	49,578	49,465	49,320	49,136
5	49,952	49,905	49,857	49,809	49,776	49,714	49,639	49,546	49,428	49,281
6	49,956	49,912	49,868	49,825	49,798	49,746	49,682	49,603	49,503	49,380
7	49,959	49,918	49,878	49,837	49,815	49,769	49,714	49,644	49,558	49,453
8	49,961	49,923	49,885	49,846	49,808	49,787	49,737	49,676	49,600	49,510
9	49,963	49,927	49,890	49,854	49,817	49,801	49,756	49,700	49,633	49,552
10	49,965	49,930	49,895	49,860	49,825	49,818	49,770	49,720	49,660	49,587

Összevetve az azonos holsávú adaptív megoldással a tézis, mely szerint a kisebb frekvenciaváltozások esetén magasabb végső legkisebb frekvenciaérték érhető el a megoldással igazolódott. Amikor azonban a frekvenciaváltozás sebessége olyan nagy, hogy az adaptív szabályozó kimenete szélsőértékre kerül, a kettő közt a vártak szerint nem tapasztalható különbség.

17. táblázat: IEEE 9 buszos rendszeren elért frekvenciaminimum emelkedés szintetikus inercia képzés esetén

H(s)\dP(%)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
1	0,000	-0,123	-0,211	-0,295	-0,361	-0,425	-0,500	-0,601	-0,635	-0,700
2	0,000	-0,070	-0,105	-0,169	-0,235	-0,282	-0,357	-0,405	-0,455	-0,531
3	0,000	0,000	-0,078	-0,111	-0,137	-0,185	-0,245	-0,318	-0,388	-0,431
4	0,000	0,000	-0,076	-0,103	-0,118	-0,128	-0,166	-0,215	-0,281	-0,356
5	0,000	0,000	-0,071	-0,089	-0,090	-0,102	-0,127	-0,163	-0,198	-0,259
6	0,000	0,000	-0,038	-0,066	-0,081	-0,089	-0,108	-0,134	-0,166	-0,196
7	0,000	0,000	0,000	-0,061	-0,075	-0,083	-0,090	-0,112	-0,141	-0,174
8	0,000	0,000	0,000	-0,056	-0,070	-0,073	-0,081	-0,099	-0,125	-0,152
9	0,000	0,000	0,000	-0,053	-0,065	-0,068	-0,075	-0,088	-0,108	-0,137
10	0,000	0,000	0,000	-0,014	-0,013	-0,021	-0,029	-0,036	-0,097	-0,125