XI. Mechwart András Ifjúsági Találkozó

ABSZTRAKT- ÉS KIADVÁNYKÖTET

XI. MAIT

2021

XI. Mechwart András Ifjúsági Találkozó

Szerkesztette:
Dr. Mohos András
Táczi István
Dr. Tóth Zoltán

A kötetben megjelent előadások szakmai bírálói:

Dr. Balogh Attila	műszaki projektvezető	E.ON Észak-dunántúli Áramhálózati Zrt.
Dr. Divényi Dániel	egyetemi docens	Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Dr. Hartmann Bálint	egyetemi docens	Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Kazsoki Attila	doktorandusz	Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Pintér Tamás	okl. villamosmérnök	
Dr. Raisz Dávid	projektvezető	KKS-Energy Kft.
Szabó Gergely	doktorandusz	Budapesti Műszaki és gazdaságtudományi Egyetem
Dr. Ladányi József	egyetemi docens	Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Dr. Tóth Zoltán	tudományos segédmunkatárs	Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
	egyetemi tanársegéd	Semmelweis Egyetem
Prof. Dr. Varjú György	professzor emeritus	Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Dr. Vokony István	egyetemi docens	Budapesti Műszaki és gazdaságtudományi Egyetem
Veres Dániel	okl. villamosmérnök	MAVIR Zrt.
Zentai Péter	okl. villamosmérnök	

ISBN 978-963-9299-43-6
DOI: 10.54232/MAIT.2021

Kiadó:
Magyar Elektrotechnikai Egyesület – Mechwart András Ifjúsági Társaság,
Budapest

2021
© Minden jog fenntartva.

Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék 4
Előszó 5
Megújuló energiák, avagy átviteli hálózati veszteség előrejelzésének nehézségei 6
Rugalmassági szolgáltatások igénybevételének műszaki szempontjai 7
Elosztott termelők által támasztott kihívások az elosztóhálózati engedélyes szemszögéből 8
Az Active Network Management for All projekt (ANM4L) előrehaladása 9
Pszeudo adatok hatásának vizsgálata az állapotbecslés pontosságára 10
Hazai villamosenergia-rendszer nyílt forrású adatainak vizualizációja 18
Anomáliadetekció a villamosenergia-piaci adatokon 19
Csalásfelderítés az energetikában adatbányászati módszerekkel 31
Napelemparkok termeléselőrejelzése gépi tanulással 40
Csőszerű vezetők felületi impedanciáinak meghatározása a 2–150 kHz frekvenciatartományban 50
Kiserőműves tendenciák az E.ON Észak-dúnántúli elosztóhálózatán 62
Aszinkron gépek tenzor szorzat elvű modellezése 63
Flexibilis tartaléktervezési módszertan bemutatása az időjárásfüggő termelők figyelembevételével 75
Modern irányításelméleti lehetőségek az inverteres termelőegységek szabályozásában 76
Modell alapú prediktív szabályozás mikrogridek tranziens stabilitásának eléréséhez 91
Konverter-alapú lineáris rendszerdinamika vizsgálata 92
Elosztóhálózati energiatároló megoldás a napelemes energiatermelés hatásainak kezelésére 103
Különleges villámvédelmi kérdések 116
Zánkai energiatároló feszültségesésre gyakorolt hatása 117
DAB teljesítmény átalakító alkalmazása a BME Moduláris Hibrid Hajtáslánc laboratóriumában 118

Előszó

Tisztelt Olvasó!

A Magyar Elektrotechnikai Egyesület Mechwart András Ifjúsági Társasága minden évben konferenciát szervez fiatal kutatók, pályakezdő mérnökök és egyetemi hallgatók számára. A 2021. évi, immáron XI. Konferencia egyfajta mérföldkő is számunkra. A pandémia következtében tavaly online események sorát szervezte az Egyesület, idén azonban első ízben vált a Vándorgyűlés Konferencia és Kiállítás szerves részévé az Ifjúsági Találkozó is. A szakmai közösség érdeklődését mi sem mutatja jobban, mint a 70 feletti regisztráló résztvevő, mely bőven meghaladja a korábbi évek látogatói számát. A rekordszámú 23 előadás és a duális képzésről szóló kerekasztal-beszélgetés a teljes napra kitűnő szakmai programot nyújtott, melyről számos pozitív visszajelzést kaptunk. Az aktuális elektrotechnikai trendeknek megfelelően a kutatási témák, ipari projektek a hagyományos területek mellett a megújuló energiaforrásokkal és azok rendszerintegrációjával, energiapiaci fejlesztésekkel, adatalapú megoldásokkal foglalkoztak.

A személyes találkozás ismét előtérbe helyezte a Találkozó egyik fő értékét, a kapcsolatépítési lehetőségeket. Társaságunk célja segíteni a fiatalok bekapcsolódását az Egyesület mindennapjaiba, bemutatni a lehetőségeket a szakmai szervezeten belüli együttműködésekre. A korábbi éveknek megfelelően nem csak egyetemi hallgatók, fiatal kutatók szerepeltek előadóként, hanem a nagyobb iparági vállalatok munkatársai is ismertették a nemzetközi projektekben, vállalati fejlesztésekben elért eredményeiket. A konferencián elhangzott előadások mellett ismét lehetőséget biztosítottunk a résztvevők számára rövid összefoglaló, illetve teljes kézirat megjelenítésére is. Ezeket az anyagokat a Magyar Elektrotechnikai Egyesület szakmai színvonalát erősítve szakértői bírálattal segítettük, a szerzők számára így a szakértők értékes visszajelzéseket adhattak. Kiadványainkat a megszokott módon ISBN és DOI számmal is ellátjuk a szélesebb körű elérhetőség biztosításához.

Mindeközben társaságunk már a jövő évi konferencia újdonságain dolgozik. Az eredmények és az elismerő vissza-jelzések csak növelik a motivációt egy még jobb, még hasznosabb rendezvény megvalósításához. Ezúton is bíztatnék mindenkit, hogy vigye az Ifjúsági Találkozó hírét, vegyen részt az eseményen jövőre a Vándorgyűlés 0. napján, akár a hallgatóságban, akár előadóként. Bízom benne, hogy a kiadvány számos új ötlettel, érdekes eredménnyel gazdagít minden olvasót!

Táczi István
elnök
MEE MAIT

Anga Zsolt
MAVIR Zrt.

Megújuló energiák, avagy átviteli hálózati veszteség előrejelzésének nehézségei

1. Miért szükséges ÁHV menetrendet adni?

Az átviteli hálózati hatásos teljesítmény veszteség menetrendjét a Rendszerirányító készíti, a becsült rendszerterhelés, a mérlegkör-menetrendek, az ismert tranzit szállítások és a tervezett üzemállapotra vonatkozó üzem-előkészítő számítások alapján.

2. ÁHV becslési módszertanok

a. műszaki modell

b. statisztikai modell

A meglévő módszertanok egyre nehezebben mutatják előre a veszteség adatok tényleges alakulását, így azok felülvizsgálata megkezdődött.

3. Az előrejelzési eljárás pontosságának javítását kiváltó okok

a. A piacon beszerzett és a tényadatok alapján elszámolt energia közti eltérés kiegyenlítő energia díja jelentős költségeket jelentett a MAVIR-nak a közelmúltban. A fennálló, jelenlegi eljárás a jövőben is okozhat hasonló mértékű költségeket, melyek a gazdasági tervezhetőség szempontjából rendkívül kockázatosak.

b. A MEKH ÁHV elismerési módszertana megváltozott 2021-től, a veszteség beszerzésének módját ehhez szükséges alakítani.

c. A PV penetráció- és a hálózatra csatlakozó HMKE számosságának növekedése, mely az átviteli hálózat üzemére és az ÁHV értékeire jelentős hatással bír.

4. Konklúzió, mik az elvárt előrelépések a módszertan pontosításában

a. A becslési hibák lehetséges okainak feltárása.

b. A becslést befolyásoló tényezők pontosabb leírása.

c. Javító intézkedések az ÁHV beszerzés költségeinek csökkentése érdekében.

Bereczki Bence
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Villamos Energetika Tanszék

Rugalmassági szolgáltatások igénybevételének műszaki szempontjai

Az elosztott energiatermelő és -tároló egységek beépített kapacitásában megfigyelhető exponenciális növekedés, valamint a DSM és az e-mobilitás terjedésével egyre nagyobb jelentőséggel bíró aktív fogyasztói jelenlét több kérdést is felvet a villamosenergia-rendszer üzemeltetői felé. Tanulmányunkban számítógépes szimuláció segítségével megmutatjuk, hogy milyen hatással van a középfeszültségű elosztóhálózatra az elosztott energiatermelők és az aktív fogyasztók nagy mértékű jelenléte, majd use case-eket definiálunk a jelentkező feszültségproblémák megoldására. A definiált használati eseteket sztochasztikus szimuláció segítségével validáljuk, és hasonlítjuk össze.

The exponential growth in the installed capacity of distributed generation and storage units and the increasing presence of DSM and e-mobility, which are becoming increasingly important for consumers, raise a number of issues for power system operators. In our study using computer simulation, we show the impact of the large presence of distributed energy producers and active consumers on the medium-voltage distribution network, and then define different use cases as possible solutions for the presented voltage problems. We validate and compare the defined use cases using stochastic simulation.

Borovics Bálint
E.ON Észak-dunántúli Áramhálózati Zrt.

Elosztott termelők által támasztott kihívások az elosztóhálózati engedélyes szemszögéből

Az elosztott energiatermelés megjelenésének és terjedésének elmúlt évekbeli trendje jelentős kihívások elé állítja az elosztóhálózat üzemeltetőit. A korábban jellemzően dedikált teljesítmény iránnyal rendelkező hálózatok megbízható és költséghatékony üzemeltetése, új működési alternatívák keresésére készteti a DSO-t.

Az Elosztói Engedélyes a problémák megoldására megerősítheti hálózatát, vonali feszültségszabályzókat, terhelés alatt szabályozható transzformátorokat és energiatárolókat telepíthet, vagy beavatkozhat a hatásos és meddő teljesítmények eloszlásába. A mai modern inverterek már számos lehetőséget biztosítanak a teljesítmény szabályozására, melyet több európai ország előírt szabványok alapján a gyakorlatban is kihasznál (például Ausztria, Belgium, Németország, Szlovénia). Ilyen gyakorlatok többek között a hatásos teljesítménytől függő leszabályozás, illetve a teljesítménytényező megváltoztatása is lehetséges, ezen felül a betáplált hatásos teljesítmény maximumának korlátozása egy adott csatlakozási ponton.

Az elmúlt években és jelenleg is folynak olyan projektek, melyek az elosztott termelők által okozott nehézségek elhárítására keresik a megoldást úgy, hogy közben a hálózati megújuló felvevőképesség tovább nőjön.

A közelmúltban lezárult gönyűi „PV500” nevű pilot projekt az inverterek szabályzásával elérhető hatást vizsgálta. Az erőműparkban megvalósított méréseket és azok eredményeit is bemutatnám előadásomban. A jelenleg is zajló Flex.ON és Active Network Management for All a korábbi eredményeket is felhasználva törekszik rendszerszintű megoldások kialakítására hazai és nemzetközi együttműködések keretében.

Előadásomban szeretném bemutatni az elosztott termelői trendeket és kihívásokat, amire a DSO -nak fel kell készülnie, ezen kívül a már lezárt projekt eredményeit és azt, hogy a jelenleg is futók milyen eredményeket várunk.

Csőre Máté
E.ON Észak-dunántúli Áramhálózati Zrt.

Az Active Network Management for All projekt (ANM4L) előrehaladása

Inverterszabályozási lehetőségek a magyar elosztóhálózaton

Az ANM4L projekt egy 8 tagú nemzetközi konzorcium keretében kerül megvalósításra, amely projekt 2019-ben ERA-NET pályázati forrást nyert el. Magyarországról az E.ON Észak-dunántúli Áramhálózati Zrt. vesz részt a konzorciumban, amelyre a hazai forrásokat a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal biztosítja.

A projekt célja, hogy demonstrálja miként képesek az innovatív, aktív hálózati vezérlésre szolgáló megoldások hatékonyan és hatásosan növelni az elosztó hálózatra csatlakoztatható megújuló energiaforrások mértékét. A kidolgozott megoldások figyelembe veszik mind a hatásos-, mind a meddőteljesítmény-áramlás befolyásolására alkalmas lokális flexibilitási tartalékokat (pl. fogyasztói befolyásolás, energiatárolás, integrált energiarendszerek). Mindezt annak érdekében, hogy elkerüljék a hálózati túlterhelődések, vagy feszültséghatárérték-sértések bekövetkezését, illetve minimalizálják az energiatermelés mértékére vonatkozó korlátozásokat mindamellett, hogy növelik a hálózatra csatlakoztatható energiatermelők számát, abban az esetben is amikor a hálózat elérte az elméleti tervezési határértékeit.

Előadásomban szeretném bemutatni a projekt elmúlt másfél évben felmerülő feladatait, és vizsgálataink eredményeit. A 2021-es évben megkezdődött a magyarországi és a svédországi demonstráció megtervezése és összeállítása. Ennek keretében különböző vizsgálatokat folytattunk a megújulóenergia-források okozta hálózati problémák megismerésére. A vizsgálatok magukban foglalták a jelenlegi hálózati csatlakozási feltételek, folyamatok és hálózatfejlesztési eszköztárak felmérését, és kitekintést adtak az időjárásfüggő energiatermelők szabályozhatóságára, illetve beavatkozási képességeire.

Danka Csongor, Sinkovics Bálint, Dr. Hartmann Bálint
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Villamos Energetika Tanszék

Pszeudo adatok hatásának vizsgálata az állapotbecslés pontosságára

Manapság megfigyelhető egy olyan jelenség, hogy a megújulók térnyerésével a közép-és kisfeszültségen is termelők jelennek meg, ennek a decentralizációnak a következtében az elosztó hálózaton előfordulható üzemállapotok száma is növekszik. A sugaras topológiájú elosztó hálózaton a volatilis termelés miatt a villamos jellemzők értékei nagyobb tartományban vesznek fel értéket a korábbiakhoz képest, illetve szélsőséges esetekben a teljesítmény áramlás is megfordulhat. Az átalakuló termelői szerkezet hatására jelentkező elosztóhálózati változások egy aktív, valós idejű hálózati üzemállapotokra közvetlenül reagálni képes üzemvitel szükségességét vetíti előre. Ehhez jó az állapotbecslés, mert segít hiteles képet kapni a hálózati viszonyokról akár limitált számú mérési adat ismeretében is. Ez azért fontos, mert a kisfeszültségű hálózaton a mérési infrastruktúra nem teszi lehetővé, hogy minden pontban valós idejű mérést végezzünk, ezért a pontos állapotbecslés eléréséhez elengedhetetlen a pontos pszeudo adatok generálása.
A kutatásom célja, hogy feltárjam az összefüggéseket a pszeudo adatok minősége, illetve az állapotbecslés pontossága között. Munkám során egy szlovén kis településen, Besnicán belül vizsgáltam egy tíz háztartásból álló leágazást, ahol tényleges mérési adatok álltak rendelkezésre. Vizsgálat alá vettem, hogy egy fogyasztói adattorzítással történő pszeudo adat generálás milyen hatással van az állapotbecslő pontosságára, a lecserélt adatsorok helyétől és annak minőségétől függően.

Nowadays, a phenomenon can be observed that with the rise of renewable producers of both medium and low voltage. As a result of the decentralization of electricity generation, the number of potential operating conditions in the distribution network is also increasing. Due to the volatile production in the distribution network with radial topology, the values of the electrical characteristics take on a larger range than before, and in extreme cases the power flow can also be reversed. The changes in the distribution network due to the changing production structure foresee the need for an operation that can react directly to real-time network operating conditions. The distribution system state estimation is suitable for this, because it helps to get a picture of the system states, even with limited amount of measurement data. This is important because the measurement infrastructure on a low-voltage network does not allow real-time measurements to be made at all points, so it is essential to generate accurate pseudo-data to achieve accurate state estimation.
The aim of my research is to explore the relationships between the quality of pseudo-data and the accuracy of state estimation. In the course of my work, I examined a branch of ten households within a small Slovenian settlement, Besnica, where actual measurement data were available. The effect of generating pseudo data with a data distortion substitution on the accuracy of the status estimator was examined, depending on the location and quality of the replaced data sets.

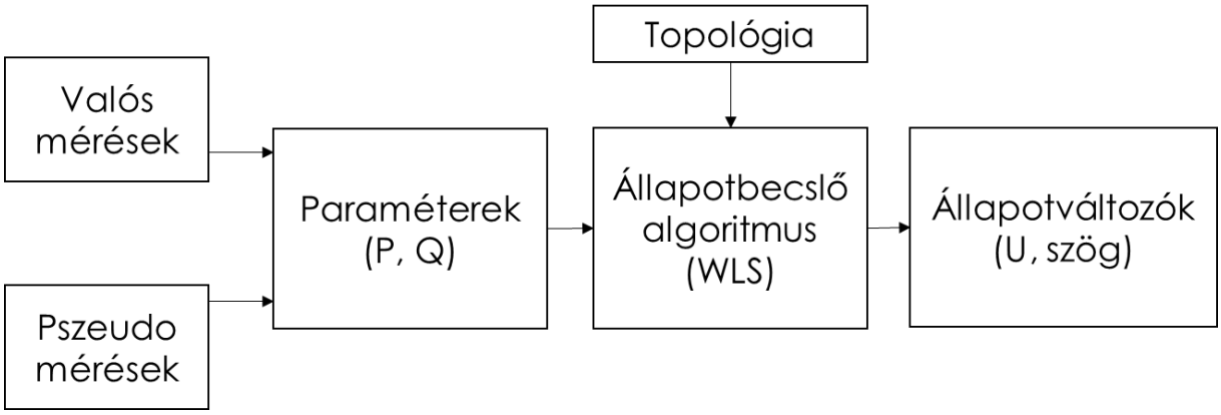
Kulcsszavak: pszuedo adatgenerálás, állapotbecslés, kisfeszültségű elosztóhálózat

1. BEVEZETÉS

Az állapotbecslés fontosságát és a pszeudo adatgenerálás szerepét a kisfeszültségű elosztóhálózat jellemzői adják. A kisfeszültségű elosztóhálózat strukturális sajátosságai közé tartozik, hogy a hálózatrész automatizáltsága alacsony, illetve az átviteli hálózathoz képest hiányos a mérési infrastruktúra és a csomópontok többségén nincs valós idejű mérés. Az elosztóhálózat termelői struktúráját a manapság robbanásszerű terjedéssel jellemezhető idősoros mérés és menetrend nélküli háztartási méretű kiserőművek (HMKE) változtatják meg. Ezen felül a háztartások elektrifikációja és az e-mobilitás elterjedésének köszönhetően a kisfeszültségű hálózatrészen a fogyasztás mértéke és annak időbeli lefolyása is változik. Ezeknek a sajátosságoknak és folyamatoknak a következményeképpen a kisfeszültségű elosztóhálózaton több probléma is megjelenik. Ennek köszönhetően a korábbiakhoz képest megnövekedett a lehetséges üzemállapotok száma. Ezáltal az energia minőségét jellemző mérőszámok határértéken kívülre kerülhetnek. A teljesítményáramlás iránya a termelés megjelenésének köszönhetően az időben változhat, míg eddig ez egy állandó irány volt, az átviteli hálózat felől folyt a háztartások felé. A rendszer eltérhet az optimális működésétől. ezek a problémák szükségessé tesznek a kisfeszültségű elosztóhálózaton is egy aktív hálózati üzemvitelt, amihez elengedhetetlen, hogy ismerjük a hálózat valós idejű állapotát. Ennek érdekében szükség van egy úgynevezett állapotbecslő algoritmus létrehozására. [1][4]

Az állapotbecslő algoritmus célja a villamosenergia rendszer legvalószínűbb állapotának meghatározása, a SCADA (felügyeleti és adatgyűjtő rendszer) által gyűjtött mérési adatokból. Az algoritmus bemenetei az úgynevezett paraméterek, amelyek maguk a mérési adatok. Ezek általában hatásos és meddő teljesítmények vagy energiafogyasztások, a hálózat minden csomópontján. A hálózat kiterjedése miatt nincs lehetőség minden csomópontban mérőműszert elhelyezni. A hiányos infrastruktúra miatt azonban nincs minden csomópontra mért érték, ezért a mérési adatok mellett szükség van a villamos paraméterek becslésére is. Ez a folyamat a pszeudo adatgenerálás, ami elengedhetetlen az állapotbecslés lefuttatásához, de ezzel hiba kerül az algoritmusba. A paraméterekből az állapotbecslő algoritmus meghatározza az állapotváltozók legvalószínűbb értékét. Az állapotváltozók azok a mennyiségek, amelyek egyértelműen meghatározzák a hálózat üzemi állapotát. Az állapotváltozók minél pontosabb meghatározásának érdekében szükség van egy minél pontosabb pszeudo adatgeneráló módszerre. Az 1. ábra az állapotbecslés egyszerűsített vázlatát mutatja be. [2-6]

Manapság pszeudo adatokat különböző módszerekkel próbálják minél pontosabban meghatározni. Két fő típusa a statisztikai modelleken és a mesterséges intelligencián alapuló adatgenerálás. Az előbbibe tartoznak a teljesség igénye nélkül a fogyasztók profillal való helyettesítése, a korrelációra épülő modellek és a különböző valószínűségi eloszlásokon alapuló módszerek. Míg az utóbbi kategóriában a leggyakrabban a mesterséges neurális hálózatokat használják. Természetesen a két típust egymással vegyítve, hibrid módszerként is használják. [7-11]



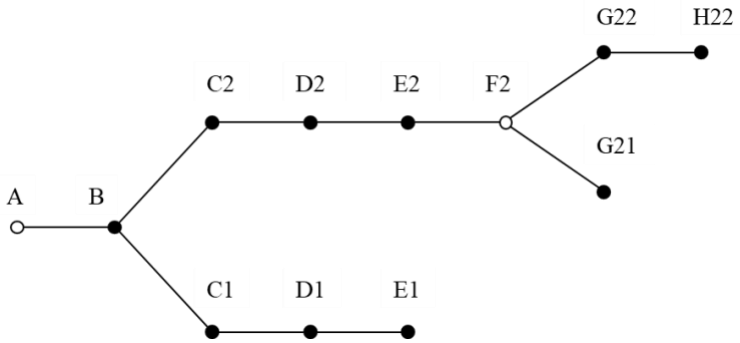
1. ábra: Az állapotbecslés egyszerűsített vázlata.

A pszeudo adatok bevezetésével a paraméterkészletbe hiba kerül azáltal, hogy nem lehet pontosan meghatározni az álmérendő mennyiség valódi értékét. A vizsgálatok során az volt a cél, hogy megfigyelhető legyen, hogy a pszeudo adatgenerálás által bevitt hiba helye és mértéke milyen hatással van az állapotbecslés pontosságára a hálózat különböző pontjain. A 2. fejezetben a vizsgálatok alapjai, forgatókönyvei és módszertana kerül röviden bemutatásra, a 3. fejezetben a vizsgálatok eredményei és a 4. fejezetben az eredményekből levonható konklúziók kerülnek összefoglalása.

2. MÉRÉSI MÓDSZERTAN

2.1. A vizsgált hálózat és az állapotbecslő

A felhasznált hálózat egy szlovén falu, Besnica kisfeszültségű hálózatának az egyik leágazása. Az elosztóhálózatokra jellemző sugaras topológiát egy fagráfként lehet felrajzolni, azaz minden csomópontot csakis egy út köt össze egy másik csomóponttal. A vizsgált leágazáson a 2. ábrán jelölt „A” pontban KöF/KiF transzformátor és tíz háztartás található. A hálózat felépítését a 2. ábra mutatja be, a telített körrel jelzett csomópontokon egy-egy háztartás található. A betűk a táptranszformátortól való távolságot míg a számok a különböző leágazásokat jelölik.



2. ábra: A vizsgált hálózat topológiája

A vizsgálatokhoz az MTA BME FASTER Célzott Lendület projekt által fejlesztett állapotbecslő algoritmus került felhasználásra. Az algoritmus a leggyakrabban használt legkisebb négyzetes hiba, azaz röviden WLS módszer alapján működik. Bemeneti paraméterei a háztartások hatásos és meddő energiafogyasztásai. Állapotváltozóként a csomópontok feszültségét viszonylagos

egységben és a hatásos teljesítményét, illetve a távvezeték szakaszokon folyó áramot és az áramló teljesítményt adja meg. Mivel az állapotbecslés során mért és becsült értékek is felhasználásra kerülnek, az algoritmusban szükség van egy bizonytalansági faktor meghatározására is. Ez a mérési adatok hibáinak szórásáról ad információt és segítséget nyújt az algoritmusnak az idősorok priorizálásában.

A vizsgálatokhoz minden fogyasztóhoz rendelkezésre állt a tényleges hatásos és meddő energiafogyasztásai egy tíz napos időszakra, 2020. december 28. és 2021. január 6. között, negyedórás felbontásban. Így egy referencia állapotbecslés után egy-egy csomópont mérési adatainak helyettesítésével lehetőség van vizsgálni a pszeudo adatgenerálás hatását az állapotbecslő algoritmus pontosságára. A továbbiakban minden futtatás esetén egy-egy háztartás valós mérési adatai kerültek lecserélésre pszeudo adatokra.

A vizsgálatok célja nem az, hogy meghatározásra kerüljön egy konkrét pszeudo adatgeneráló módszer pontosságának hatása, hanem az álmérések által az algoritmus bemeneti paramétereibe kerülő hiba milyen hatással van az állapotbecslés pontosságára, és az abban megfigyelhető trendek felírása. Ezért pszeudo adatgenerálás gyanánt csak minden esetben egy konstans többletfogyasztással kerültek torzítása az idősorok.

2.2. Mérési forgatókönyvek

A mérési forgatókönyvek meghatározása három különböző szempont figyelembevételével történt:

- Az első a pszeudo adathelyettesítés helye. A vizsgálatok során a „G21’, a „D2”, a „B” és az „E1” csomópontok fogyasztóinál történt adattorzítás és minden esetben kizárólag egy fogyasztónál.
- A második a pszeudo adathelyettesítéssel bevitt torzítás mértéke. Minden esetben 1 vagy 3 kWh és kvarh konstans fogyasztástöbblettel került torzításra az eredeti mérési adat.
- A harmadik a mérési sor bizonytalanságának mértéke, amivel az állapotbecslő algoritmus számol. Ez a szám egy szórás érték, így mértékegysége megegyezik a vizsgált mennyiségek mértékegységével és azt adja meg, hogy a mennyiség várhatóan mennyivel tér el a várható értéktől.

A fenti szempontok figyelembevételével 8 különböző szcenárió mentén készültek a vizsgálatok, amelyeket az **1. táblázat** tartalmaz.

1. táblázat: A mérési forgatókönyvek

#	Csomópont	Torzítás mértéke (kWh;kVArh)	Bizonytalansági fok (kWh, kVArh)
1.	G21	1	1
2.	G21	3	1
3.	G21	3	0,3
4.	D2	1	0,3

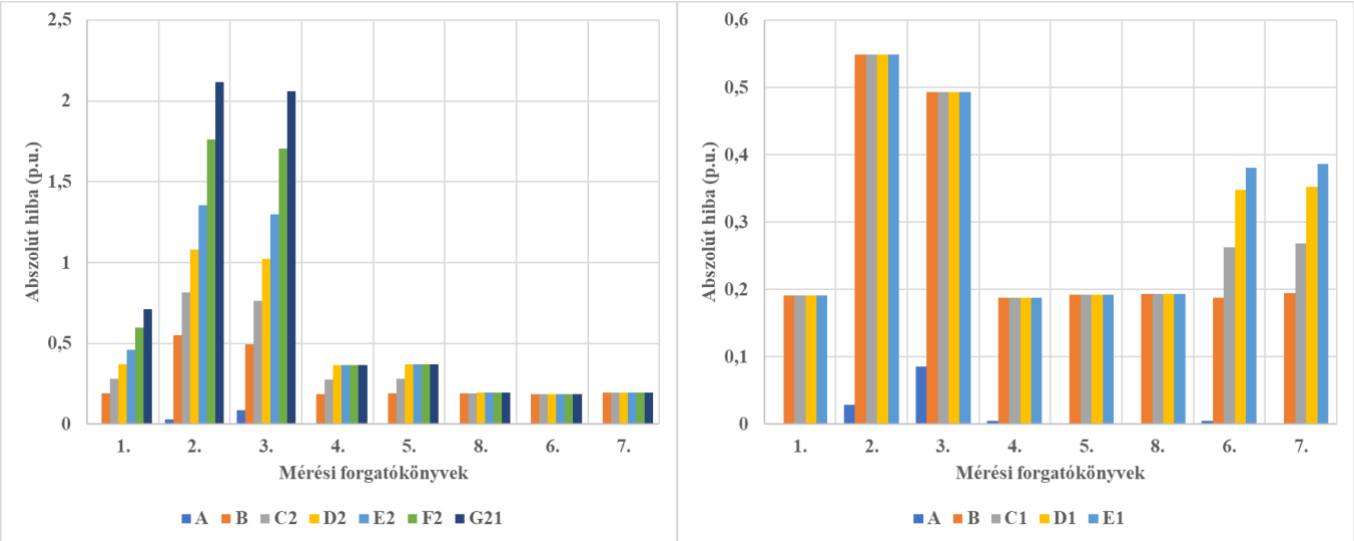
#	Csomópont	Torzítás mértéke (kWh;kVArh)	Bizonytalansági fok (kWh, kVArh)
5.	D2	1	1
6.	E1	1	0,3
7.	E1	1	2
8.	B	1	0,3

Minden forgatókönyv esetén két hálózatrészen került vizsgálatra a hibaterjedés. Az „A” és a „G21” csomópontot, illetve az „A” és az „E1” csomópontot összekötő úton voltak elemezve az állapotbecslés eredményei.

3. EREDMÉNYEK

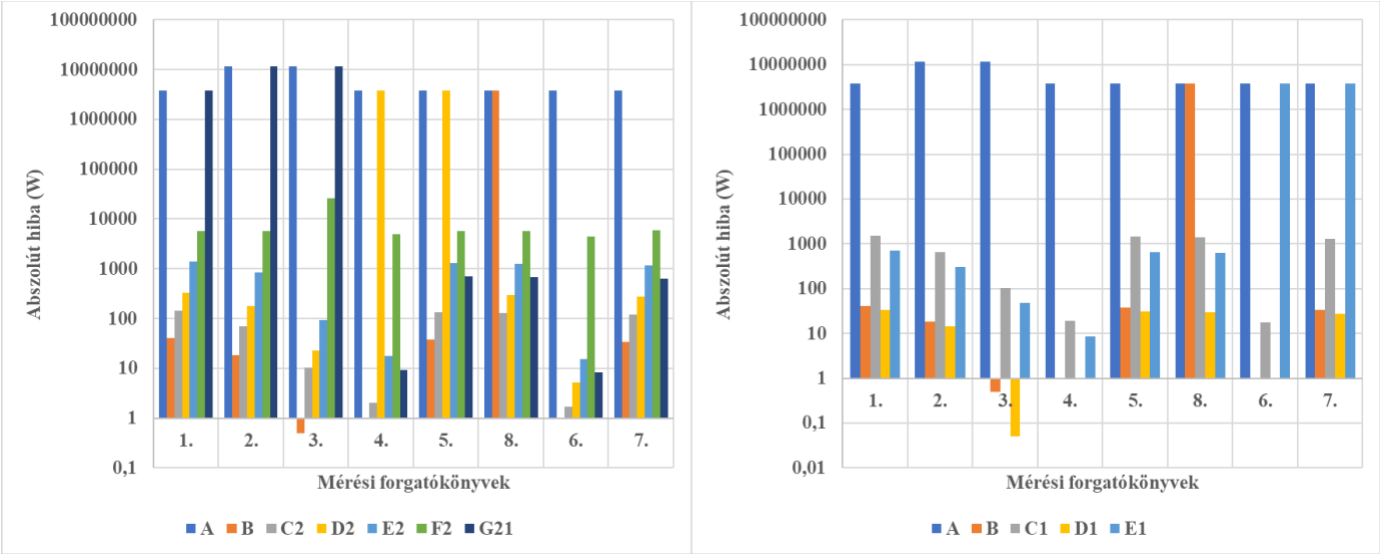
Az eredmények kiértékelése során érdemes az abszolút hibákat figyelni, ugyanis azokból következtetni lehet a hibák nagyságrendjére és a lejátszódó trendek is egyértelműen megfigyelhetőek. A 3.–6. ábrán a négy vizsgált állapotváltozó abszolút hibái kerültek ábrázolásra a nyolc lefuttatott szcenárióban. Az átláthatóság kedvéért a két vizsgált hálózatág külön grafikonon van ábrázolva. A forgatókönyveken belül a táptranszformátor csomópontjától a végső pontig balról jobbra kerültek megjelenítésre az abszolút hibák.

A 3. ábra a csomóponti feszültségek abszolút hibáit ábrázolja. Megfigyelhető, hogy nagyságrendileg a legnagyobb mértékű hiba mindig abban a pontban volt, ahol a bemeneti fogyasztásadatok torzításra kerültek, tehát az 1.-3. szcenárióban a „G21”, a 4. és 5. forgatókönyvnél a „D2”, a 6. és 7. becslésnél az „E1”, míg a 8. esetben a „B” csomópontban jelent meg a legnagyobb abszolút hiba. Ezek a hibák azok, amelyek terjednek, illetve gyengülnek a többi pontra. Látszik, hogy a hibahelytől a táppont fele haladva a becsült csomóponti feszültség hibájának abszolút értéke csökken, míg ellenkező irányba haladva az abszolút hiba konstans és megegyezik a torzított pont abszolút hibájával. A hibamentes leágazásokat, azaz az 1.-5. esetben az „A” – „E1” ágat, a 6. és 7. forgatókönyvnél az „A” – „G21” ágat, míg a 8. szcenárióban mindkét leágazást vizsgálva látszik, hogy azokon az ágakon, ahol nincs hiba a csomóponti feszültségek abszolút hibája az elágazási pont feszültségének hibájával nagyságrendileg megegyezik. Az 1. és a 2. becslés hibáinak összehasonlítása során kimondható, hogy a pszeudo adatgenerálás abszolút hibájának változása arányos az állapotbecslő abszolút hibájával. A 2. és 3., a 4. és 5., illetve a 6. és 7. forgatókönyvek esetén kapott hibaértékek egymással való összehasonlítása során levonható az a következtetés, hogy a csomóponti feszültségek értékének becslése egy háztartás fogyasztásának torzítása esetén nem függ a bizonytalansági tényezőtől.



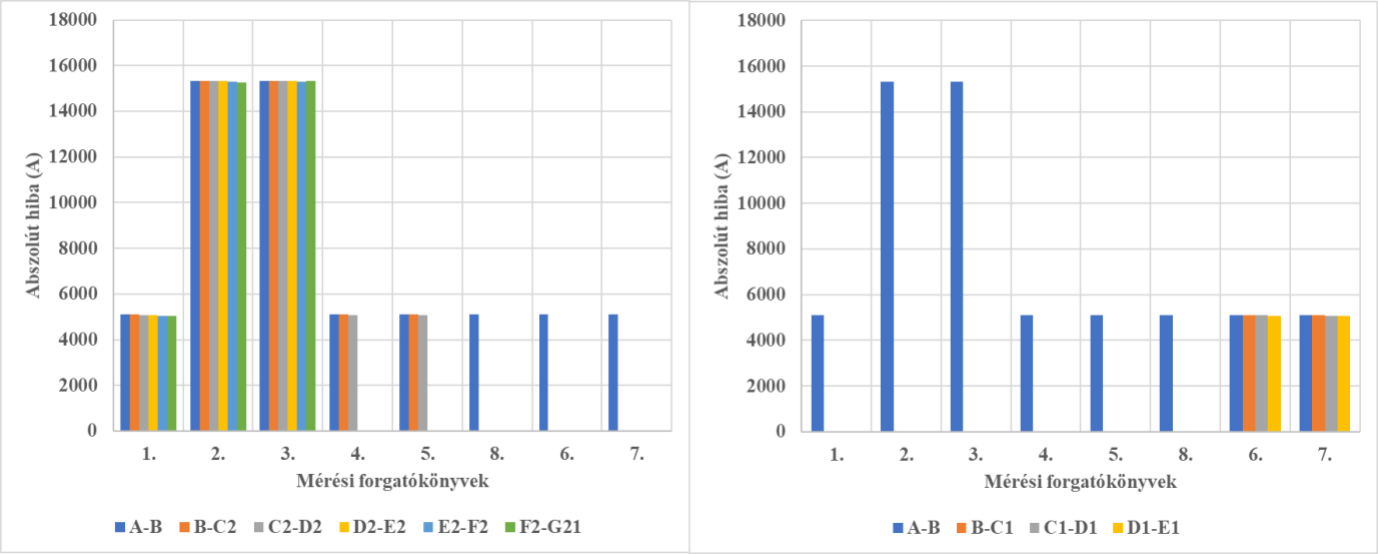
3. ábra: A csomóponti feszültség abszolút hibái az „A” – „E1” és az „A” – „G21” hálózatágon

A csomóponti teljesítmény hibáit a 4. ábra mutatja be, logaritmus skálán ábrázolva. A csomóponti feszültséghez hasonlóan itt is megfigyelhető, hogy a legnagyobb abszolút hibája annak a háztartásnak lesz, amelynek a mért fogyasztás adatai torzításra kerültek. Azonban a hiba terjedése a csomóponti teljesítményeknél már nem ugyanazt a trendet mutatja, mint a feszültségnél. A táppontban, azaz az „A” csomópontban az abszolút hiba a hibahelyi eltéréssel van azonos nagyságrendben, míg a logaritmikus ábrázolás miatt a hálózat többi részében több nagyságrenddel kisebb abszolút hiba jelenik meg az állapotbecslés során. A pszeudo adatgenerálás abszolút hibájának megnövelése egyértelműen növeli az állapotbecslés során becsült csomóponti teljesítmény abszolút hibáját. Míg a bizonytalansági tényező javítása ebben az esetben sem mutat nagyságrendi javulást az állapotbecslésben.

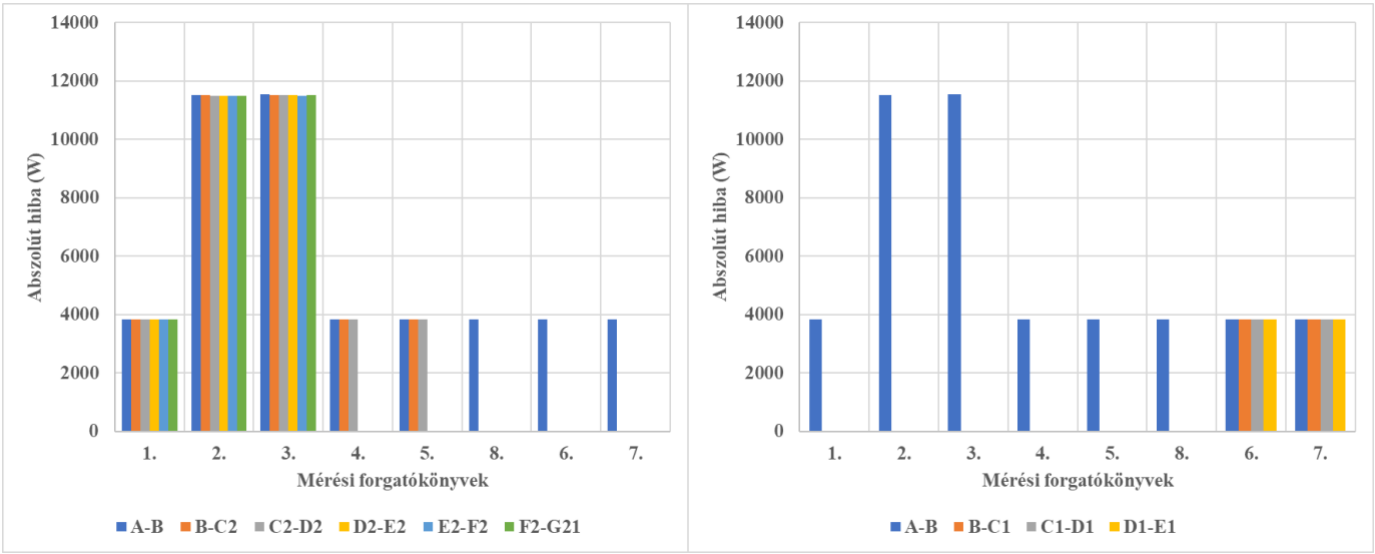


4. ábra: A csomóponti teljesítmény abszolút hibái az „A” – „E1” és az „A” – „G21” hálózatágon

Az 4. ábra5. ábra és a 6. ábra a távvezeték szakaszok áramainak és teljesítményeinek abszolút hibáit ábrázolja, amelyeken ugyanazok a trendek figyelhetőek meg. Mindkét esetben a pszeudo adatgenerálás által bevitt hiba helyén megjelenik egy abszolút hiba az állapotbecslésben. A vizsgált csomópontot és a táppontot összekötő szakaszon elhelyezkedő csomópontoknál konstans ez a hiba jelenik meg, míg a többi csomópontban nincs hiba az állapotbecslésben. A torzítás mértékével arányosan az áram és az áramló teljesítmény abszolút hibája is változik, míg a bizonytalansági tényező nem befolyásolja az állapotbecslés eredményét.



5. ábra: A távvezeték szakasz áram abszolút hibái az „A” – „E1” és az „A” – „G21” hálózatágon



6. ábra: A távvezeték szakasz teljesítmény abszolút hibái az „A” – „E1” és az „A” – „G21” hálózatágon

4. KONKLÚZIÓ

Az eredmények összevetésével egyértelműen kijelenthető, hogy a vizsgált három aspektusból kettő egyértelműen befolyásolja az állapotbecslést. A pszeudo adatgenerálás helye, illetve a hibájának

mértéke hatást gyakorol az algoritmus során kapott csomóponti feszültség és teljesítmény, illetve a távvezeték szakasz áram és az azon áramló teljesítmény pontosságára helyi, illetve hálózat szinten is, míg a bizonytalansági tényező változtatására az állapotbecslő algoritmus pontossága számottevően nem változott a vizsgált mérési forgatókönyvekben.

Az állapotbecslés során mind a négy állapotváltozó értékeiben abban a pontban jelenik meg hiba, ahol a pszeudo adatgenerálás miatt a bemeneti paraméterekben is eltérés volt a valós értékekhez képest. Ez a hiba az, ami tovább terjed gyengítetlenül vagy gyengülve a hálózat további részeire, aminek lefutása már függ a vizsgált fizikai mennyiség jellegétől. A csomóponti feszültség abszolút hibája a torzított ponttól a táppont fele csökken, míg a hálózat végpontja felé haladva konstans értékként terjed. Az ép hálózatágon az elágazási csomópont abszolút hibája terjed végig. A csomóponti teljesítmény esetén a pszeudo adatgenerálással helyettesített háztartás csomópontjának és a táppontnak az abszolút hibájához képest a hálózat többi részén megjelenő hiba elhanyagolhatóan alacsony. A távvezeték szakasz áramok és teljesítmények esetén a torzított ponton megjelenő hiba gyengítetlenül terjed a táppont felé.

A vizsgálatok során megfigyelt tendenciák segítségével megfogalmazhatóak olyan elvárások, hogy az állapotbecslő pontosságában milyen trendek lehetnek abban az esetben, amikor a hálózaton több háztartás fogyasztása is pszeudo adatgenerálással kerül helyettesítésre. A továbbiakban érdemes megvizsgálni mérésekkel, hogy ezek a felvetések valóban így vannak.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatás az MTA-BME FASTER Célzott Lendület projekt keretében a Magyar Tudományos Akadémia, az Eötvös Lóránd Kutatási Hálózat és az E.ON Hungária Zrt. támogatásával valósult meg.

6. HIVATKOZÁSOK

[1] Faludi Andor, Szabó László: Villamosenergia-rendszer üzeme és irányítása, Budapest Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2012
[2] Miakich András: Elosztóhálózati állapotbecslő funkció fejlesztése, Budapest Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, 2018
[3] Dr. Hartmann Bálint, Pintér László: Állapotbecslés a kisfeszültségű elosztóhálózaton, Energetikai Szakkollégium előadása, 2021. április 8.
[4] Sinkovics Bálint, Dr. Hartmann Bálint: Elosztóhálózati állapotbecslés gyakorlati implementálásának kérdései, X. Mechwart András Ifjúsági Találkozó, 2020. szeptember 15.
[5] Anggoro Primadianto, Chan-Nan Lu: A Review on Distribution System State Estimation, IEEE, 2017
[6] Táczi, B. Sinkovics, I. Vokony, B. Hartmann: Partical Application Oriented Review of Distribution System State Estimation, 2020
[7] M. D. Nimrihter, R. M. Ciric, A. Slijepcevic: Measurements and Pseudo-Measurements in Distribution Networks, IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Budapest, 2001
[8] E. Manitsas, R. Singh, B. Pal, G. Strbac: Modelling of Pseudo-measuremnets for Distribution Syste State Estimator, CIRED Seminar, Frankfurt, 2008
[9] J. Alves, J. Pereira: Pseudo-measurments Generation Using Energy Values From Smart Metering Devices, CIRED Workshop, Helsinki, 2016
[10] E. Manitsas, R. Singh, B. C. Pal, G. Strbac: Distribution System State Estimation Usingan Artificial Neural Network Approach for Pseudo Measurement Modeling, 2012
[11] Abdel-Majeed, C. Kattmann, S. Tenbohlen, R. Saur: Usage of Artificial Neural Networks for Pseudo Measurement Modeling in Low Voltage Distribution Systems, 2014

Kertész Dávid, Dr. Vokony István

Hazai villamosenergia-rendszer nyílt forrású adatainak vizualizációja

A vállalatok, köztük az energetikai cégek, fokozatosan építik be a működésükbe az adatalapú gondolkodásmódot. Ez azt jelenti, hogy egyrészt a generálódó adatokat folyamatosan gyűjtik és rendszerezett formában tárolják. Ezen adatokra számos üzleti megoldás épül, melyek eredményeként pedig adatalapú döntéshozatal mentén történik a vállalat irányítása.
Ezen fejlődési folyamatnak számos lépése van, melyek között csak fokozatosan lehet előre lepni. Az első lépcsőfok a leíró szemlélet, mely azt a célt szolgálja, hogy bemutassa mi történik a gyűjtött adatok alapján. Ezen szinten számos adat vizualizációs technikát alkalmaznak, melyek az adatok egyszerű kommunikálást teszi lehetővé riportok, dashboardok, vagy monitoring rendszereken keresztül.
A kutatás célja, hogy adatvizualizációs technikák segítségével a hazai villamosenergia-rendszert a nyilvánosan közzétett adatok segítségével egy dashboardon keresztül bemutassuk. A cikkben felvázolásra kerül, hogy milyen adatok kerültek felhasználásra a vizualizáció során, milyen adattranszformációs lépéseket kellett elvégezni a megfelelő adatbázisba rendezéshez. Ezeken felül elemzésre kerültek az egyes vizualizációs platformok (Tableau, Power BI és nyílt forráskódú megoldások), hogy a feladat szempontjából a megfelelő eszköz legyen alkalmazható. Végezetül bemutatásra kerül maga a dashboard és annak funkciói, valamint ismertetésre kerülnek az ábrázolások segítségével levonható összefüggések és következtetések is.

Kovács Bálint Artúr[1)], Kertész Dávid[2)]
[1)]Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kar
[2)]Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Villamos Energetika Tanszék

Anomáliadetekció a villamosenergia-piaci adatokon

A liberizált villamosenergia-kereskedelem a modern energiaszektor egyik új vívmánya, amely szabadpiaci elvek mellett biztosítja az alapvető szükségletnek számító villamosenergia-kereskedését. A liberális piaci elvek bevezetésével az országok megnyitották egymás előtt a kereskedelmüket és létrejöttek az összekapcsolt villamosenergia-piacok. Ebben az új környezetben a piac számos új külső hatásnak került a hatása alá, mint a megújulók elterjedése, vagy a kvótarendszer. Az így kapott piaci adatok számos információt tartalmaznak az őket befolyásoló tényezőkről. Ezek a tényezők ma már nem csupán nemzeti szinten, hanem nemzetközi szinten is hatást gyakorolnak az országok villamosenergia-kereskedelmére. Ezeket az információkat felhasználva alkottam meg egy adatelemzési eljárást, amelyben nem felügyelt gépi tanulási módszerek segítségével kutattam anomáliák után. Anomáliának olyan adatpontokat tekinthetőek, amelyek tulajdonságaiban eltérnek a normálistól. A villamosenergia-piac esetében ezt tekinthetjük ártüskéknek vagy akár árvölgyeknek. A kapott statisztikai eredmények közül néhányat fizikai háttérfeltáró vizsgálat alá vetettem annak érdekében, hogy adatelemzési eredményeimet fizikai tényekkel is alátámasszam.

The data needed to operate a liberalised electricity market provide a wealth amount of information. This information has been used to create a data analysis method that uses unsupervised machine learning models to identify the data points when anomalies have occurred in the market. Anomalies are defined as data points that deviate from the norm in their properties. In the case of the electricity market, this can be considered price spikes or even price troughs. In addition, some of the statistical results obtained have been subjected to a physical background investigation to support the data analysis results with facts.

Kulcsszavak: villamosenergia-piac, gépi tanulás, anomália detekció

1. BEVEZETÉS

A villamos energia megjelenése óta gyökeresen átformálta az emberi civilizációt. A kezdeti egyszerű, egysugaras villamosenergia-rendszerek (VER) több ezer kilométeres, bonyolult és szofisztikált hálózatokká nőtték ki magukat, amelyek országhatárokon átívelve teremtenek kapcsolatot a nemzeti energetikai rendszerek között. Ez az összekapcsoltság teremtette meg a lehetőséget a monopol, tröszt szereplős villamosenergia-kereskedelem leváltására, amelyet felváltott a mai liberalizált, összekapcsolt piac. Ez a napjainkban is formálódó rendszer felel a biztonságos és állandó villamosenergia-ellátásért, az igazságos versenypiaci környezet biztosítása mellett. Ám egyre több kihívással kell szembenéznie lokális és globális szinten egyaránt. A villamos energia, mint piaci termék, rendkívül nagy átalakulásokon megy végbe, amelyek nagy hatást gyakorolnak a piaci szereplőkre. Elsősorban az intenzív megújuló energiaforrás alapú fejlesztések elterjedése és az

ehhez kapcsolódó finanszírozási rendszerek bevezetése alakították át a piaci körülményeket az elmúlt években.

Ebben a folyamatosan fejlődő környezetben egyre gyakrabban alakulnak ki olyan időszakok, amikor az árak szokatlanul magasan vagy alacsonyan alakulnak. Az ilyen normálistól eltérő viselkedést kutatva villamosenergia-piaci adatokon, nem felügyelt gépi tanulási módszerek segítségével hajtottam végre során anomália detekciót.

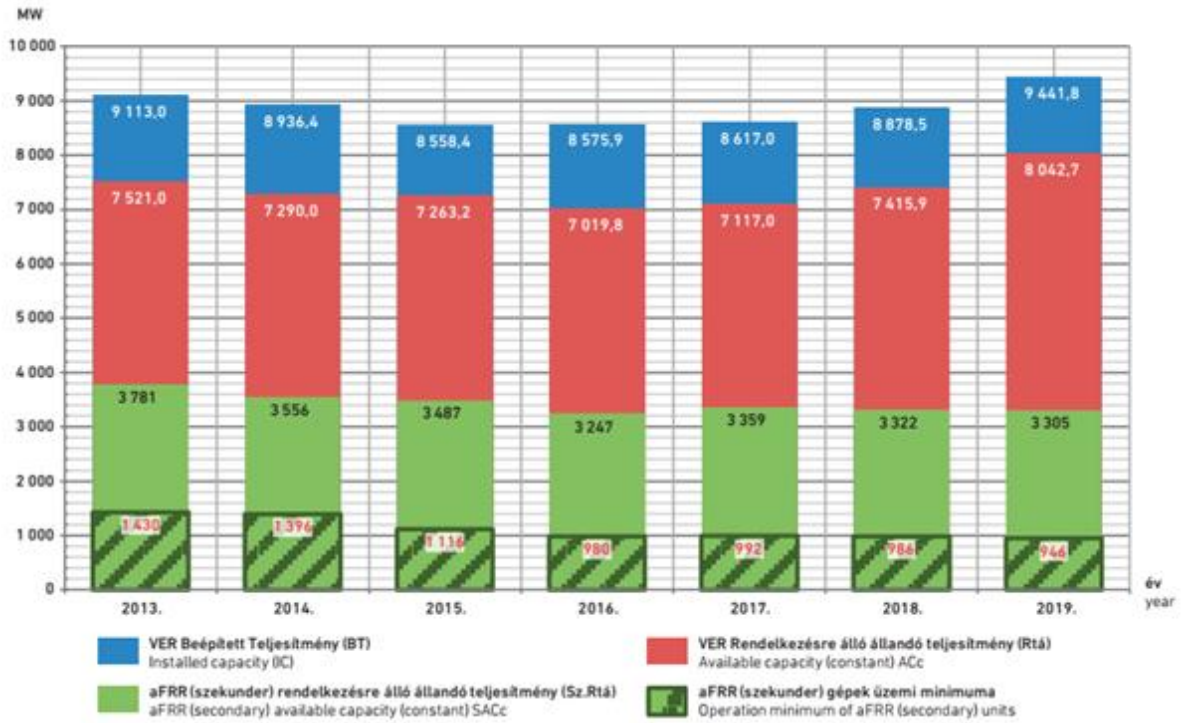
A következőkben röviden szeretném bemutatni a cikk tartalmát, amely villamosenergia-piaci adatok elemzéséből állt. Az elemzés tárgya az anomália detekció volt, amelyet nem felügyelt gépi tanulási módszerek segítségével egy általam kifejlesztett eljárásmódot követve hajtottam végre. A statisztikai eredmények közül néhányat fizikai, háttérfeltáró vizsgálat alá vetettem.

2. A MAGYAR VILLAMOSENERGIA-RENDSZER ÁTTEKINTÉSE

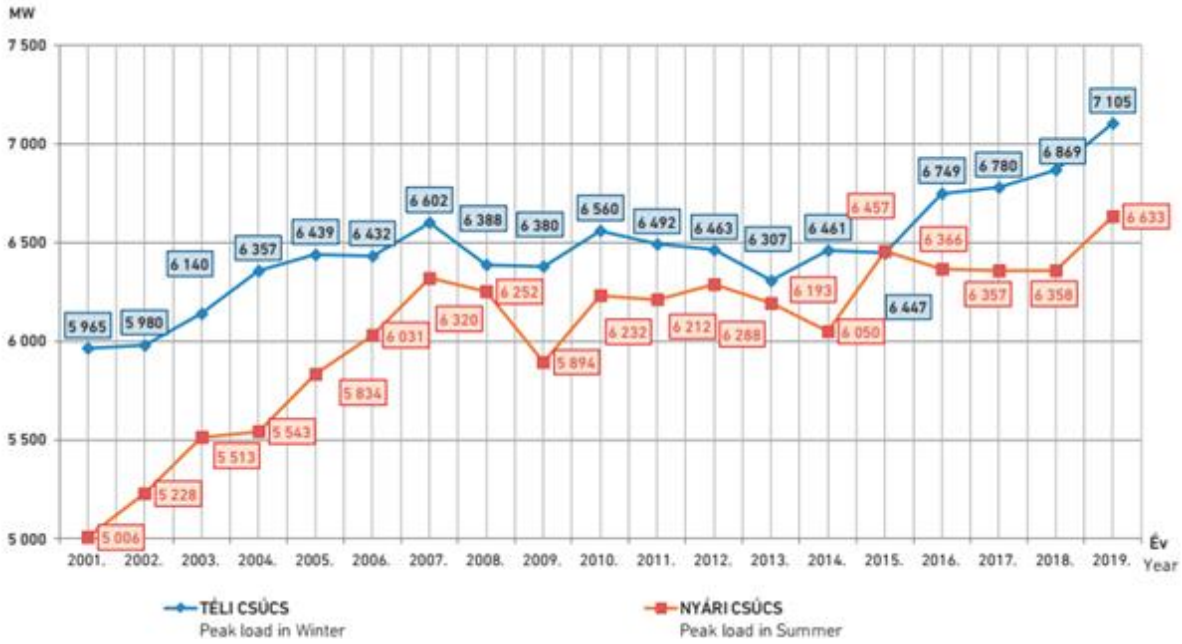
A villamosenergia-rendszernek a hagyományos működése szerint csupán a kívánt villamosenergia-igényt kellett fedeznie és eljuttatnia a centralizált, nagyteljesítményű erőművekből a fogyasztókig. A piac-liberalizáció által azonban ez az egyszerű működés elavulttá vált, és számos új szereplő jelent meg, akik egymással versenyezve piaci alapon igyekeznek kielégíteni az igényeket. Mindeközben a háztartási fogyasztók is egyre aktívabb szereplőkké válnak. A villamos energia, szemben más tőzsdei termékekkel, például a pénzzel szemben, azonban mindig is elsősorban a fizika törvényeinek fog engedelmeskedni. Az egyensúly fenntartása az egyik legfontosabb mind közül a rendszer szempontjából, vagyis az, hogy a termelés és a fogyasztás mértéke minden időpillanatban megegyezzen egymással. Ennek az egyensúlynak a fenntartása vált egy sokkal nagyobb kihívássá többek között hazánkban is, miután 2015 óta tízszeresére nőttek az időjárásfüggő naperőművi kapacitások hazánkban.[1] Mindemellett a magyar VER erőművi összetétele a napenergiát leszámítva számottevően nem változott, ahogy ezt az 1. ábra is mutatja.

Az 1. ábra alapján megállapítható, hogy az ilyen ütemben növekvő időjárásfüggő, megújuló energiatermelő-kapacitások mellett a VER jelenlegi állapota rugalmatlan és komoly rendszerirányítási problémákat eredményezhet.

Magyarország átlagos villamosenergia igénye meghaladja a hazai termelő erőművek kapacitásait, így az európai szinkronrendszer és az ország szomszédjainak segítségével importál viszonylag nagy mennyiségben: 2019-ben az import részaránya 27,6 % körül alakult. Ez a részarány 2010-hez képest több mint 17%-os emelkedést mutat, és habár az elmúlt években csökkent, ez szinte kizárólag a növekvő naperőművi kapacitásoknak köszönhető. Az import-export szaldó szélső értékeinek különbsége viszont megnőtt, 2019-ben már -321 MW és 3187 MW között alakultak. A téli és nyári csúcsidőszakokban kifejezetten fontos szerepe van az importnak és a rugalmas termelői kapacitásoknak. Évről évre dőlnek meg napi, téli és nyári rendszerterhelési csúcsok (1. ábra). [2]



1.ábra: A magyar VER erőművi összetétele 2013-2019 [2]



2. ábra: A nyári és téli rendszerterhelési csúcsok [2]

Ebben a piaci és műszaki környezetben vizsgáltam nem felügyelt tanulási módszerek segítségével a villamosenergia-piaci adatokon az anomália detekció lehetőségét.

3. ALKALMAZOTT TANÍTÁSI MÓDSZEREK

A cikkben elsősorban a magyar piacon vizsgáltam az anomáliák detekálását. Anomáliának tekintjük azokat az adatmintákat, amelyek tulajdonságaikban eltérnek a normális esettől. A mindennapi

életben számos területen alkalmaznak anomália detekciót. Bankkártya tranzakciók és mobil adatforgalom megfigyelése során, annak érdekében, hogy kiszűrhessék a különböző csalási kísérleteteket. Anomáliákat keresnek a szívműködésben a különböző szívritmus és szívizom működés figyelő vizsgálatok során is mint az EKG. Mindezek a folyamatok hatalmas adatmennyiség kezelését igénylik, amelyre már az emberi agy nem képes, és ezért alkalmaznak sok esetben adatbányászati és azon belül is gépi tanulási módszereket. [3]

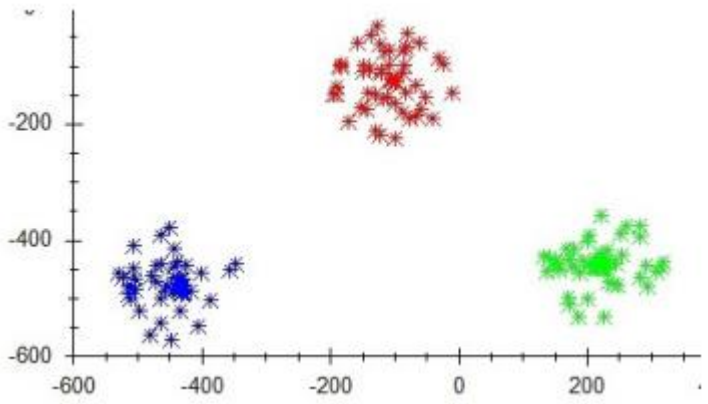
A gépi tanulás, angolul Machine Learning, olyan algoritmusok és módszerek összessége, amelyek egy adathalmazból tanulva egy modellt alkotnak, ami alapján predikciót, következtetést végeznek. Ezeket a módszereket sorolhatjuk két nagy kategóriába: felügyelt és nem felügyelt módszerek.

A felügyelt tanulási módszerek esetében rendelkezünk olyan előzetes információval, amelyek segítségével egy osztályozási feladat során előre meghatározott címkéket, angolul “label”-eket lehet megadni, és utána ezekbe sorolni az adatpontokat. Ennek szemléltetésére egy egyszerű példát lehet felhozni. Egy csavar gyártó üzemben a gyártósoron előre meghatározott fizikai tulajdonságok alapján megkülönböztetnek selejt és nem selejt termékeket. Minden egyes csavart megvizsgálnak a futószalagról való leérkezés után, és a modell eldönti, hogy selejt vagy nem selejt osztályba sorolja-e. Ám nagymennyiségű adathalmazban csupán elenyésző arányban fordul elő anomália, amit így kisebb eséllyel talál meg, így ez egy hátrány abban az alkalmazási környezetben, amire nekem volt szükségem, valamint ismeretlen tulajdonságú anomáliákat nem tud kezelni. [4]

A nagy adatmennyiség kezelésére alkalmasak a nem felügyelt módszerek. Ezek esetében nem áll rendelkezésre ilyen előzetes célváltozó (termék selejt vagy sem), csupán egy “train”, tanuló adathalmaz. Ezen az adathalmazon az algoritmus a felhasználó által beállított paraméterek szerint “megtanulja” az adatpontok különböző tulajdonságait és ezáltal az azonos és hasonló tulajdonságúakat egy csoportba rendezi. Épp ezért ezt az eljárást már nem osztályozási, hanem csoportosítási, vagy klaszterező feladatnak nevezik. [4]

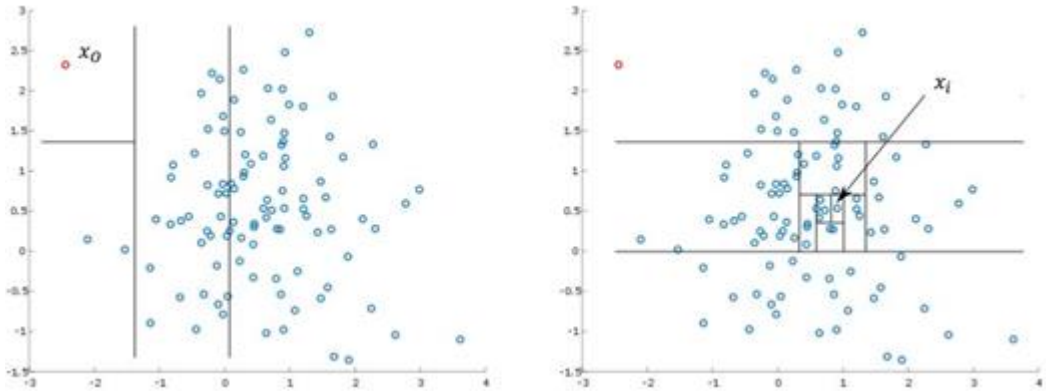
Ilyen csoportosító, nem felügyelt algoritmusokat alkalmaztam a kutatásom írása során. A nagyobb pontosság és megbízhatóság érdekében két különböző algoritmust is használtam, amelyeknek az eredményeit összehasonlítottam.

A K-közép (2. ábra), amely az egyik legismertebb ilyen csoportosítási feladatra alkalmas algoritmus, az egyik az általam alkalmazottak közül. Működési elve az adatpontok bizonyos centroidtoktól, középpontoktól való távolságán alapszik. Először kiválaszthatjuk, hogy hány csoportot szeretnénk definiálni, feltéve, ha ezt tudjuk, majd utána véletlenszerű módon az algoritmus kiválaszt a megadott csoportszámnak megfelelő számú centroidot, amelyekhez hozzárendeli az adatpontokat, attól függően, hogy melyikhez van közelebb az adott adatpont. Majd az algoritmus magától kiválaszt újabb centroidokat és újból elvégzi a hozzárendelést. Mindezt addig iterálja, még a centroid és a hozzárendelt pontok négyzetes távolsága el nem éri a minimumot, tehát minden hozzárendelt ponthoz egyszerre van a legközelebb. [4]



2. ábra: A K-közép algoritmus klaszterező eljárása [4]

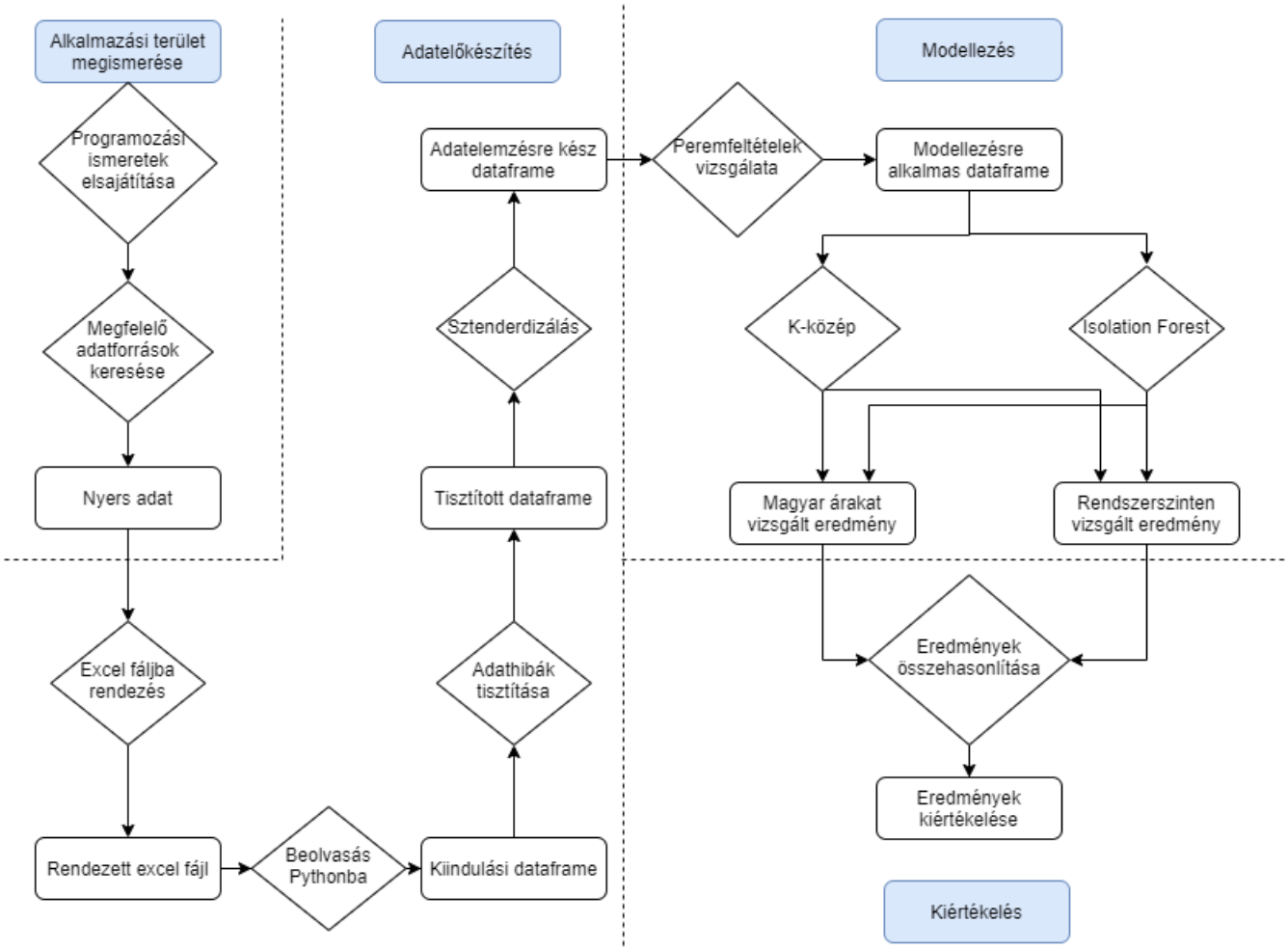
Az Isolation Forest egy modernebb megoldás, amely egyre nagyobb népszerűségnek örvend. Ezt annak köszönheti, hogy a K-középhez képest lényegesen egyszerűbb, és kevesebb számítási igényt szükségel. Lényegében az adathalmaz pontjaira egyenként megvizsgálja, hogy hány lépésben képes elkülöníteni azt a többitől. Egy anomália pontot, amely távol esik a többi ponttól lényegesen kevesebb lépésből, mint egy belső, „normális” pontot. Ennek szemléltetésére a 3. ábra szolgál, amin az X0 egy anomália még az X1 egy normál belső pontot jelöl. [4]



3. ábra: Az Isolation Forest algoritmus működése [5]

4. ADATELEMZÉSI ELJÁRÁS

A következőkben kitérek arra a módszertanra, amelyet az adatelemzéshez alkottam meg és követtem végig. A saját módszertanom alapját egy, az iparban és széleskörűen használt CRISP-DM nevezetű eljárásmód adta. Lényegében ez az eljárás világos elkülöníthető lépésekre osztja az adatelemzés folyamatát, úgy, hogy az egymásra következő lépések az előző eredményeire épülnek. Az általam készített és követett módszertan elvi felépítése a 4. ábrán látható.

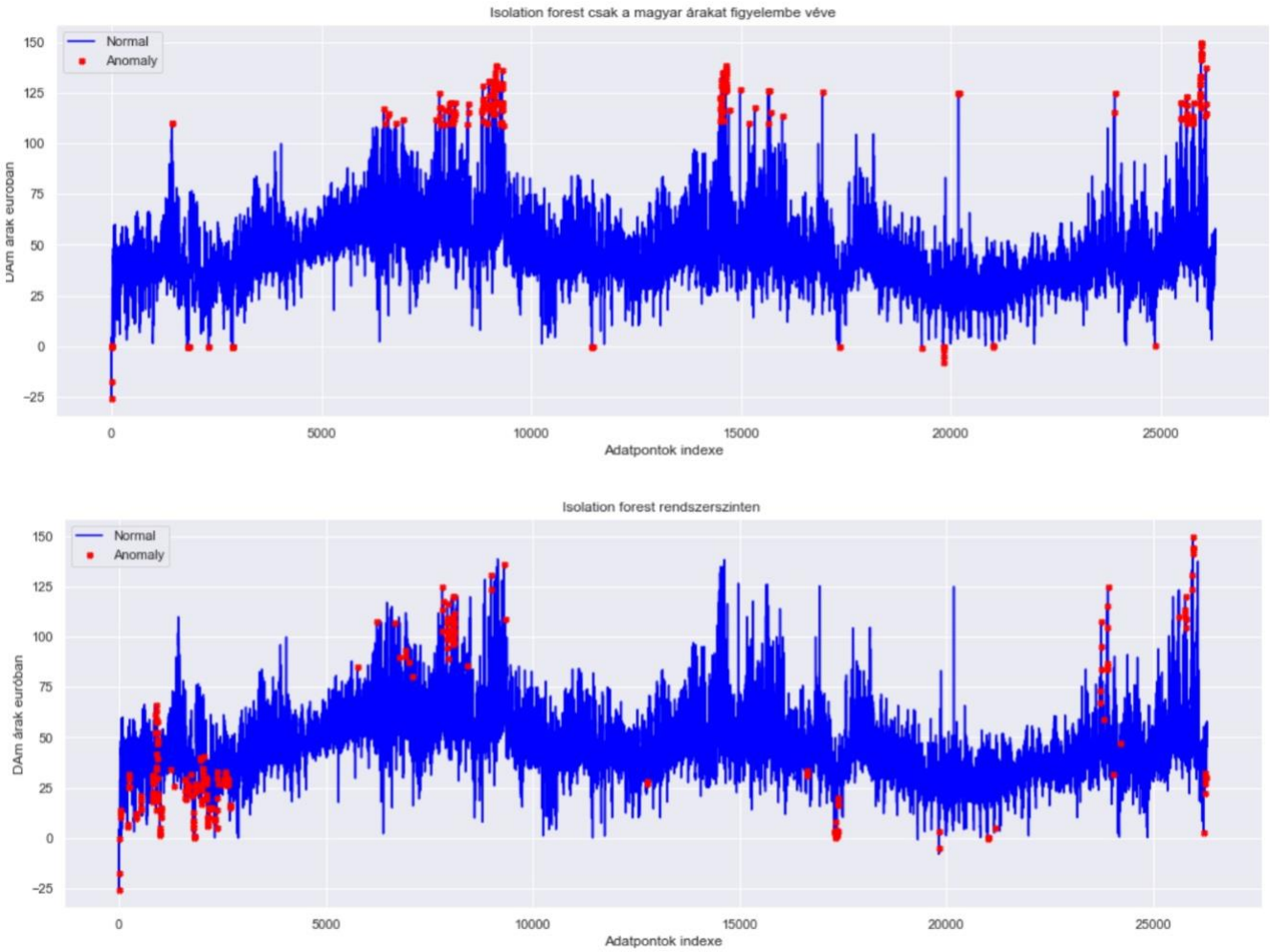


4.ábra: A saját módszertan felépítése

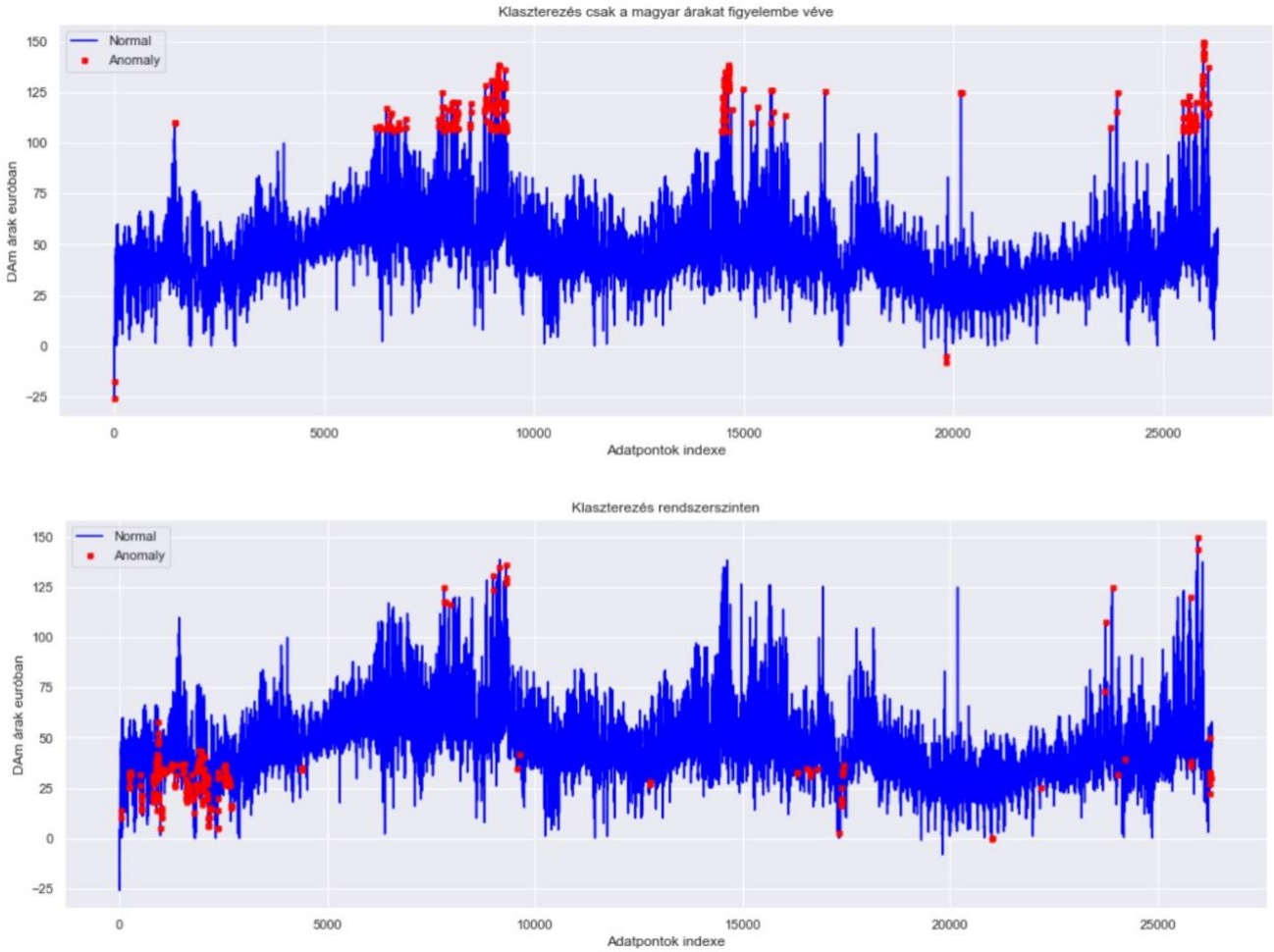
A különböző lépések négy fő elembe sorolhatóak. Az alkalmazási terület megértése alkotta az egész alapját a szükséges háttérismeretek megszerzését. Ezt követte az adatelőkészítés, amely nagyon fontos állomás az adatelemzés folyamatában. Ebben az elemben a lépések által az adathalmazt olyan formába kell hozni, ami mentes a hibáktól és felesleges információktól, valamint az algoritmus számára felismerhető és olvasható. A vizsgált időszak 2018-2020 minden órája volt, ezáltal hatalmas mennyiségű adatot kellett kezelni. Az vizsgált adatok egyik sajátossága volt, hogy az árak és a határkeresztező kapacitások mértékegysége és nagyságrendje teljesen eltérő volt. Mivel távolságalapú algoritmusokat alkalmaztam fontos volt, hogy ezt az értéktartományon belüli, nagyságrendi eltérést kiküszöböljem, ezért sztenderdizálást alkalmaztam. Ennek a segítségével minden értéket egy 0 körüli értékkel tudtam helyettesíteni anélkül, hogy információt vesztettem volna. Ezt követően megkezdhettem a modellezést, amelyben elsőként a peremfeltételeket kellett vizsgálnom. Mivel a piaci adatok sztochasztikus idősoros adatok, ezért annak érdekében, hogy statisztikai vizsgálatok alá vehessem őket meg kellett vizsgálnom az stacionaritást és az autokorrelációt. [5,6]

Mivel ezek a peremfeltételek teljesültek, tehát az idősor stacioner volt és nem korreláltak az adatai önmagukkal, így elvégezhettem az algoritmusok futtatását. A futtatást négyszer, két különböző

szempont szerint végeztem. Az egyik szempont szerint kizárólag a magyar piaci árakat vettem figyelembe. A másik szempont szerint a 4M MC tagjainak, vagyis Csehország, Románia, Szlovákia és Magyarország másnapi piaci árait és határkeresztező kapacitásait vizsgáltam. Ennek oka az volt, hogy a két szempont eredményeit összehasonlítva olyan következtésre akartam jutni, hogy azok a detekció során anomáliának titulált adatpontok, amelyek mind magyar és mind rendszer szinten egyaránt kiadódtak, azokat a pontokat mindenképp érdemes volt feltáró vizsgálat alá vetni, hiszen feltehetően valamilyen az egész régióra hatást gyakorló esemény következményei lehettek. Az ábrákon látható kékkel a magyar másnapi piaci árak 2018-2020 között, még pirossal kerültek jelölésre a statisztikailag anomáliának tekintett adatpontok.



5.ábra: Az Isolation Forest eredményei



6.ábra: A K-közép eredményei

Mivel két algoritmus szerint is vizsgáltam az adathalmazt, így azok eredményeit is össze tudtam hasonlítani a két szempont szerint. Így az alábbi táblázatban olvasható egyezéseket kaptam.

1. táblázat – A két algoritmus eredményeinek egyezései

	Egyezés a két algoritmus eredményei között [db]	**K-közép összes találatából [db]**	**Isolation Forest összes találatóból [db]**
Magyar szintű	208	78,5 %	82,2%
Rendszer szintű	148	56,3%	

A táblázat szerint a két algoritmus eredményeit öszehasonlítva a Magyar szempont szerint 78,5 % a K-közép esetében, és 82,2%-os egyezés mutatkozott. Az eltérés abból fakad, hogy a K-közép több anomáliát találta, mint az Isolation Forest. Ugyan ez az átfedés rendszer szinten már kisebb, 56,3 % volt.

5. EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE

A kapott eredményekből ezután leszűrtem azokat, amelyek mindkét szempont, és mindkét algoritmus eredményeiben megtalálhatóak voltak. Így megkaptam azt a 10 találatot, amelyek tehát statisztikailag anomália pontoknak tekinthetőek az adatelemzés szerint. Ezek közül az adatpontok közül kiválasztottam egy időszakot, 2020. december 17 12:00-13:00 és 16:00-17:00 közötti időpontokkal, amikor két igen magas, 143,93 €/MWh és 150,2 €/MWh mértékű ártüske alakult ki a magyar másnapi piacon. Ennek a kiválasztásnak az oka, hogy erről az időszakról fellelhető egy MEKH riport is [7], aminek segítségével validálni tudtam a találataimat. Ezt a riportot kizárólag arra használtam, hogy tényszerű alátámasztást biztosítsak az általam elkészített modell eredményeire. Ezen felül két negatív árakat mutató időszakot is feltáró vizsgálat alá vetettem, hogy a kutatásom ne csupán ártüskéket, hanem ár-völgyidőszakot is figyelembe vegyen.

5.1. 2020 decemberi ártüskék vizsgálata

A feltáró vizsgálat során szintén egy saját szempontrendszert követtem, amelyben hazai és nemzetközi tényezőket egyaránt figyelembe vettem. Először lokálisan vizsgáltam meg a hazai tényezőket a MAVIR adatpublikációi segítségével. Ezek a tényezők elsősorban a magyar erőművi rendszer termelése és rendelkezésre állása, valamint a határkeresztező kapacitások voltak, és másodsorban az adott órában kereskedett villamos energia mennyisége. A határkeresztező kapacitások közül Magyarország szempontjából kiemelt fontosságúak az északi kapcsolataink, vagyis a szlovák és osztrák metszékek. Ebből az irányból érkezik nagymennyiségű import az országba. A déli szomszédaink, mint Horvátország, Szerbia és ide sorolható még Románia is, nagy részben hazánkon keresztül importálnak az európai szinkronrendszerből, így ebbe az irányba Magyarország az év túlnyomó részében villamos energia exportőr.

A nemzetközi tényezőket az ENTSO-E [8] adatai segítségével vizsgáltam. Ezek között külön figyelmet szenteltem a német és a Balkán erőművi termelés összetételének, valamint a tervezett és tényleges rendszerterhelésnek. Ezeken kívül a többi szomszédos ország nagyerőművi kieséseit is vizsgáltam, amennyiben találtam ilyet. A nemzetközi helyzethez hozzátartozik még a pandémia hatása is. 2020. márciusában hazánkat is elérte az új COVID-19 vírusjárvány, amely hosszú hónapokra lezárásba kényszerítette az országot. Ez a villamosenergia-kereskedelmen is meglátszott. A 2010-es nagy gazdasági világválság szintjére zuhant vissza a villamosenergia-kereslet, amely 2020. év végére kezdett lassú helyreállásba. A piaci szereplők így számítottak áremelkedésre a téli hónapokban, de elvárásaikat magasan felülmúlták a tények.

2020. decemberében szokatlanul magasan alakultak a HUPX DAM árai [9], amelynek egyik kicsúcsosodásai december 17-én a H13 és H17 termékek áraiban is megfigyelhetőek. Elsőként a lokális, hazai tényezőket vizsgáltam. A rendszerterhelésben és a villamosenergia-piacon a keresletben sem történt nagy eltérés a korábbi hetek azonos napjaihoz képest. Ebből kifolyólag kínálati oldalon kutattam tovább. A nagyerőművek rendelkezésre állását vizsgálva arra jutottam, hogy összesen közel 1000 MW kapacitás hiányzott az országban. A Paksi Atomerőmű decemberben számos alkalommal előre bejelentve karbantartás alatt állt., és december 16-án bejelentették, hogy nem várt leállást kell végrehajtaniuk másnap, 17-én az egyik blokkban. A gáztüzelésű erőművek közül a Dunamenti Erőműben a G3 és G2 blokkok is, valamint a Kelenföldi Erőmű kombinált ciklusú

gépegységei is karbantartás alatt álltak. Mindemellett az időjárás sem volt kedvező a megújulók számára, mert se nap se szélenergiából nem származott számottevő villamos energia. [7]

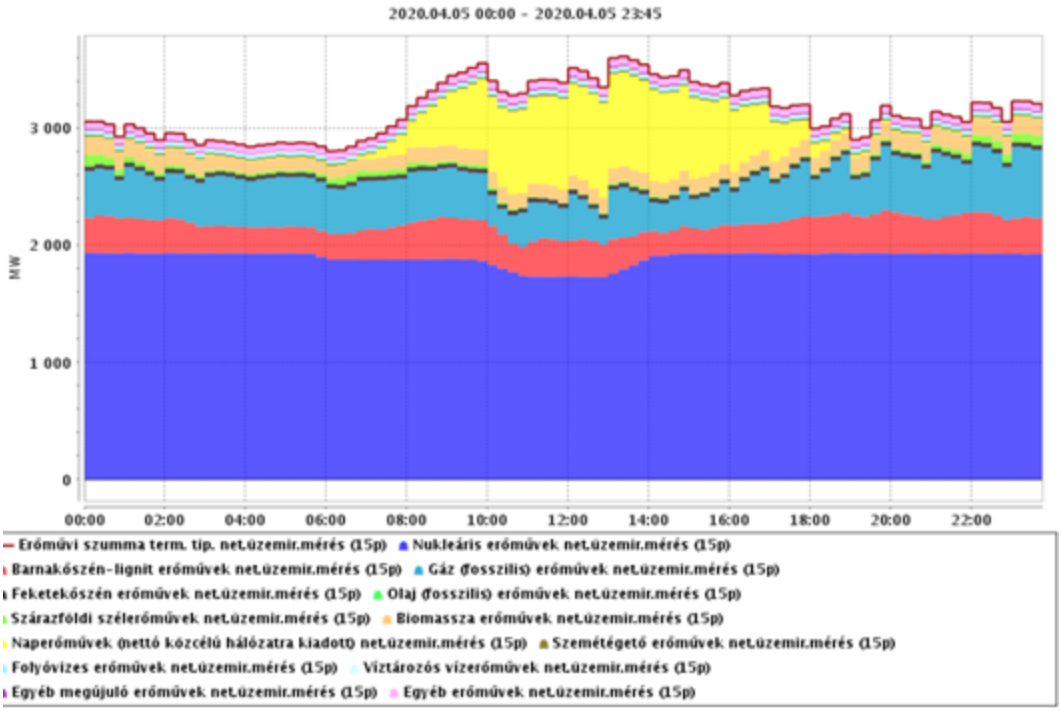
A lokális tényezőkön túlmenően a nemzetközi helyzet is hozzájárult a magas árak kialakulásához. Az egész térségre jellemzőek voltak a rossz időjárási körülmények, így sem olcsó nap-, sem olcsó szélenergia-termelés nem volt a jelen a piacon. Ez különösen fontos tényező volt a román és horvát piacon, ugyanis ezekben az országokban igen nagymennyiségű beépített szélerőművi kapacitások vannak. Tehát Magyarországon belül egy kínálati hiány alakult ki, amit kizárólag import segítségével tudtak ellensúlyozni. A megelőző napokban mind az osztrák, mind a szlovák határmetszéken csökkentették a felkínált kapacitásokat így leszűkítve ezt az importcsatornát az országba. Épp ezért alakulhatott ki az a szokatlan helyzet, hogy hazánk a kritikus időszakban déli irányból importált energiát, olcsó szélerőművi termelés hiányában igen drágán az országba.

Ez a drága termelés annak köszönhető, hogy az év ezen szakaszában folyamatosan nőttek a fosszilis termelők határköltségei, Ez a növekedés elsősorban a tényezőárak, mint a gáz, és szén árak, valamint a CO2 kvóta drágulásának köszönhető. Ezek a következtetések összhangban állnak a MEKH által készített riport eredményeivel. Az ott vizsgált további események, a december 21-22-i időszakot a detekciós modell szintén megtalálta, ehhez viszont változtatni kellett a modell keresési paramétereit.

5.2. További találatok elemzése

További találatokat is vizsgálat alá vetettem, méghozzá negatív árakat, annak ellenőrzésére, hogy a detekció sikeres volt-e a negatív tartományokban is. Így választottam ki 2018. január 1-jét és 2020. április 5-ét. 2018. január 1-jén szilveszter hajnalán a villamosenergia-igény igen alacsony volt a térségben. Az időjárás ezzel szemben nagyon kedvezett a szélerőműveknek, így hatalmas mennyiségű olcsó szélenergia áramlott be, elsősorban Németország és Ausztria irányából hazánkba. Ennek köszönhetően a magyar, cseh és szlovák piacon is tartósan negatív árak alakultak ki, a legalacsonyabb árak hajnali ötkor adódtak: -17,6 €/MWh, -34 €/MWh, -34 €/MWh. Hazánkban még nukleáris kapacitás csökkentést is igénybe kellett venni az egyensúly fenntartása érdekében.

2020. április 5-én nagyon hasonló okokból alakultak a másnapi piaci árak a negatív tartományban. A rendkívüli azonban az volt, hogy a HUPX történetében először alakultak így az árak napközben, és nem a hajnali völgyidőszakban. Ebben az esetben a kedvező napos időjárásnak köszönhető nagymennyiségű naperőművi termelése okozta az árzuhanást. Hasonlóan a 2018. január 1-jei eseményekhez ezen a napon is nukleáris kapacitáscsökkentést kellett végre hajtani a Paksi blokkokban.



7.ábra: A nukleáris kapacitás csökkentés a nagymennyiségű napenergia miatt [1]

Mindez remekül jellemzi azokat a komoly rendszerirányítási kihívásokat, amelyek a növekvő megújuló energiaforrások penetrációjának köszönhetőek.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A kutatás célja egy sikeres anomália detekció lefolytatása volt villamosenergia-piaci adatokon. A szükséges villamosenergia-kereskedelmi és adatelemzési háttér tudás elsajátítása után Python programozási nyelvben, nem felügyelt tanulási módszerek segítségével hajtottam végre anomália detekciót a HUPX historikus adatain. Ezek az adatok a 4M MC másnapi piaci allokációs együttműködés országainak, Magyarország, Románia, Csehország és Szlovákia másnapi órás piaci árait és határkeresztező kapacitásait tartalmazta 3 évre, 2018-2020 között. Az adatelemzéshez megalkottam egy saját eljárásmódot, amit követve sikeresen végrehajtottam a modellezést és statisztikailag anomáliának detektált adatpontokat kaptam. Ezeket két algoritmus, a K-közép és az Isolation Forest futtatásával kaptam meg két szempont szerint: csak a magyar árakat vizsgálva és az egész rendszert vizsgálva beleértve a többi ország árait és határkeresztező kapacitásait. Az így kapott eredményeket a két szempont szerint összehasonlítottam és az egyezések közül 2020. december 17-i időpontot kiemelve azt részletes háttérfeltáró vizsgálat alá vetettem. Ebből a vizsgálatból beigazolódott, hogy a detektált adatpont mögött valós fizikai események álltak, amelyek a rendkívüli ártüskéket okozták azon a napon. Ezek az ártüskék elsősorban az olcsó megújuló termelés teljes hiányára, a fosszilis erőművek határköltségeinek kitolódására, valamint a hagyományos nagyerőművi kiesésekre és azok pótlására bevethető tartalékok hiányosságaira vezethetők vissza. Számos negatív áras időszakot is sikerült detektálni, amelyek közül kettőt 2018. januárt 1-jét és 2020. április 5-ét szintén feltáró vizsgálat alá vetettem. Lényegében elmondható, hogy ezek a völgyidőszakok is elsősorban a túltermelő megújuló kapacitásokra és a rendszer kellő

rugalmasságának hiányára vezethetők vissza. Ezeket a következtetéseket alátámasztja a MEKH által készített piacelemzési riport [8], amely 2020 decemberi magas áralakulások hátterét tárta fel. Ezek a vizsgált esetek bizonyítják, hogy az általam alkalmazott eljárás alkalmazható anomália detektálásra.

Az anomália detekciós eljárásmód egy szofisztikált módszert kínál több éves, nagymennyiségű villamosenergia-piaci adat elemzésére. A vizsgálati kritériumok és bemeneti paraméterek pontosításával magasabb pontosság érhető el, amely jövőbeli célkitűzése a kutatásnak. Ez alatt olyan paraméterek bevezetését lehet érteni, amelyek pontosabban definiálják az anomáliát és ezáltal pontosítják az eredményeket.

7. HIVATKOZÁSOK

[1] MAVIR adatpublikáció hivatalos honlapja (2021.05.12.), elérhető: https://www.mavir.hu/web/mavir/aktualis-ver-adatok

[2] A magyar villamosenergia-rendszer 2019.évi adatai, MAVIR, 2021.01.04. (2021.05.12.) elérhető: https://www.mavir.hu/web/mavir/mavir-mekh-ver-adatai,

[3] K. Golmohammadi, O. R. Zaiane, Time Series Contextual Anomaly Detection for Detecting Market Manipulation in Stock Market, in 2015 IEEE International Conference on Data Science and Advanced Analytics (DSAA), Párizs, 2015

[4] Zs. Ilonczai, Klaszter-analízis és alkalmazásai, Programtervező informatikus Msc, ELTE, Budapest, 2014

[5] Gian Antonio et al., 2017: Anomaly Detection through online Isolation Forest: an Application to Plasma Etching, IEEE

[6] T. Ferenczi, A sztochasztikus idősorelemzés alapjai, Budapest, 2013.

[7] L. Fábián, : Idősorelemzési módszertanok összehasonlítása statisztikai tanuló algoritmusok segítségével, Debrecen, 2008

[8] MEKH piacmonitoring riport , A HUPX DAM piacán december folyamán kialakult magas árak vizsgálata, Elemzési és modellezési Főosztály, 2021.02.05, elérhető: (http://www.mekh.hu/a-hupx-dam-piacan-december-folyaman-kialakult-magas-arak-vizsgalata), 2021.05.12.

[9] ENTSO-E hivatalos honlapja, elérhető: https://transparency.entsoe.eu/dashboard/show

[10] HUPX másnapi piaci adatok, aggregált és historikus adatok:, elérhető: https://hupx.hu/hu/piaci-adatok/dam/historikus-adatok#, https://hupx.hu/hu/piaci-adatok/dam/aggregalt-adatok 2021.05.12.

Kovács Levente, Kertész Dávid, Dr. Vokony István
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Villamos Energetika Tanszék

Csalásfelderítés az energetikában adatbányászati módszerekkel

A villamosenergiával történő visszaélések a világ számos pontján, köztük Magyarországon is komoly problémát jelent. Ezen visszaélések nem csak a villamosenergetikai-rendszer (VER) üzemeltetőit érintik hátrányosan, hanem a szabályosan vételező fogyasztókat is. A főként smart mérők által begyűjtött hatalmas adattömeg számos energetikai területen rejthet kiaknázatlan lehetőségeket régebben ismeretlen módszerek felhasználásával. Ezen módszerek összefoglaló néven adatbányászatként egy különálló szakterületté nőtték ki magát. Ennek oka, hogy segítségükkel hatásosan megoldások találhatóak olyan problémakörökben, amelyek használatuk nélkül közel megoldhatatlanok lennének. Egy ilyen problémakör a villamosenergiával történő visszaélések témaköre is.
A cikkben bemutatásra kerül, hogy az adatbányászatban rejlő lehetőségeket miként lehet felhasználni a villamosenergia-visszaélések felkutatásában. A cikk célja továbbá, hogy bemutassa egy, a gyakorlatban is hasznos modell megalkotásának módszertanát.

Electricity theft is a serious problem in many parts of the world, including Hungary. This misbehaviour adversely affects not only electricity operators but also regular customers. The enormous amount of data collected, mainly by smart meters, hides great untapped potential in several research fields by using previously unknown methods. These methods, collectively known as data mining, have grown into a separate field of science. The main reason behind this is that these methods can be used to effectively find solutions to problems that would be nearly unsolvable otherwise. One such problem is detecting electricity theft
This paper presents ways in which the potential in data mining can be used to detect electricity theft. The paper also aims to present a methodology for creating a model that can be used in practice.

Kulcsszavak: adatbányászat, adatelemzés, csalásfelderítés, modellezés

1. BEVEZETÉS

Korunkban, a rohamosan fejlődő internetnek és számítógépes technológiáknak köszönhetően, egyre kedvezőbbek a lehetőségeink adatok eltárolására. Ezzel a fejlődéssel egyetemben nő az igény az eltárolt adatok feldolgozására is. Különböző matematikai területek fejlődése az 1980-as évekre lehetőre tette ezen nagy mennyiségű adat előtte ismeretlen módszerekkel történő feldolgozását. Úgynevezett adatbányászati algoritmusokkal lehetőségünk van meglévő adatbázisokból, adattárházakból eddig ismeretlen összefüggéseket feltárni. Fontos megjegyezni, hogy a modern idők technológiai fejlődése nem csak az adatbányászatban indított el nagymértékű fejlődést, hanem az energiaszektort is alapjaiban megváltoztatta.

Az utóbbi években hazánkban is rohamosan tör utat a megújuló alapú termelés, beleérve a háztartási méretű kiserőművek (HMKE) térhódítását is. Ezek az új technológiák kihívásokat is

rejtenek hálózatüzemeltetési szempontból. Mellettük az okos megoldások elterjedését is szolgálják, hiszen a HMKE-k telepítésével együtt a háztartásoknak smart mérőket is telepíteniük kell. Ennek köszönhetően a hálózat üzemeltetőinél is egyre nagyobb adattömeg halmozódik fel a mérésekből. Ezeknek a kihasználása kardinális kérdés lesz az energetikát érintő kihívások megoldása végett.

2. A CRISP-DM MÓDSZERTAN

1996-ra néhány adatelemzési cég – a DaimlerChrysler, az SPSS és az NCR [1] – több sikertelen adatbányászati projekten után lefektettek egy szabványt, amely útmutatást ad jövőbeli projektekhez. Meghatározták, hogy miként célszerű eljárni adatbányászati projektek során, valamint meghatározták a potenciális kimeneteleket, veszélyeket is. A szabvány 1999-re készült el, CRISP-DM néven (CRoss Industry Standard Process for Data Mining). A CRISP-DM szabvány a projektet egy hat fázisból álló iteratív folyamatként értelmezi, esetleges visszacsatolásokkal az egyes lépések között:

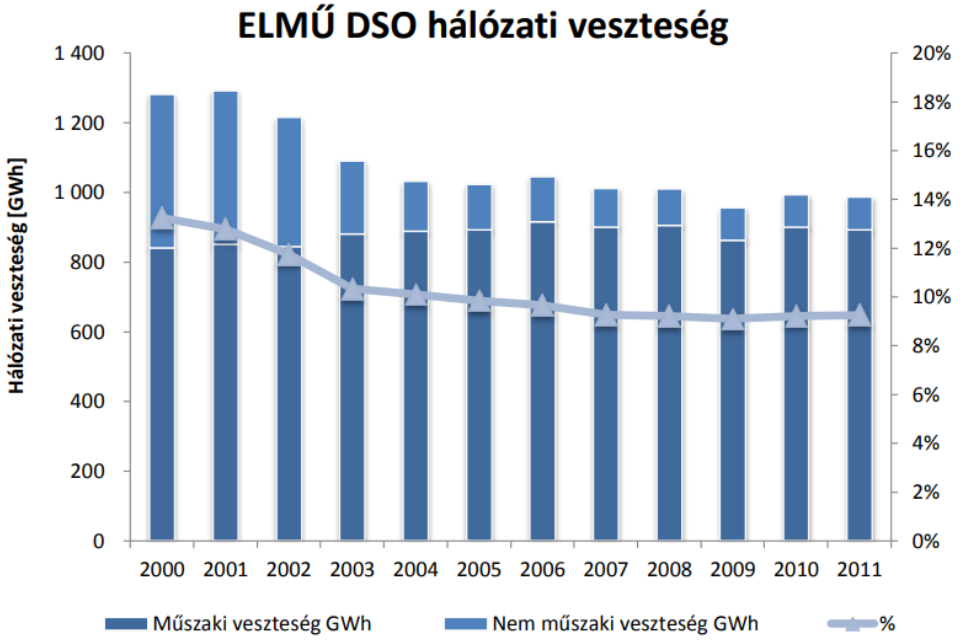
- Üzleti célok megértése (Business Understanding)
- Adatok megértése (Data Understanding)
- Adatok előkészítése (Data Preparation)
- Modellezés (Modeling)
- Üzleti kiértékelés (Evaluation)

A CRISP-DM módszertan ezen felül átfogóan megfogalmazza, hogy milyen feladatokat szükséges elvégezni az egyes lépésekben.

3. A PROBLÉMAKÖR

Ahogy azt a CRISP-DM módszertan első lépése is ajánlja, annak érdekében, hogy a későbbiekben csalási tevékenységeket felismerhető legyen a vizsgált adathalmazban, elengedhetetlen körbejárni a villamosenergiával történő visszaélések (a köznyelvben áramlopás) témakörét. Magyarországon az elosztóhálózaton fellépő veszteség mértéke nagyjából a hálózatba betáplált villamosenergia 6-9%-a. Az 1. ábra a hálózati veszteségek alakulását mutatja az ELMŰ hálózatán [2] (ld. 1. ábra).

Ezen veszteségi értékek a vidéki elosztóhálózati engedélyeseknél rendszerint valamivel kisebb értéket vesznek fel, mint az ELMŰ hálózatán, így adódik az országos átlagra 6-9%-os érték. A veszteségeket két nagy csoportba szokás sorolni: műszaki és kereskedelmi veszteségek. A műszaki veszteségek nagyjából az összes veszteség 70-80%-át teszik ki, ide soroljuk többek közt a vezetékeken eldisszipált teljesítmény, a transzformátorok rézvesztesége, valamint a párhuzamos veszteségek (önfogyasztás, levezetés stb.). A műszaki veszteségek hálózatfejlesztések nyomán csökkenteni lehet.



1. ábra: hálózati veszteség az ELMŰ-nél [2]

Ezzel szemben a kereskedelmi veszteségek alá soroljuk a hibás mérésekből származó veszteségeket, számlázási hibákat, valamint a csalási tevékenységeket is. A kereskedelmi veszteségek a betáplált energia 20-30%-át teszik ki, ennek Magyarországon nagyjából további 20-30%-a különböző csalási tevékenységekből származik. Ez az érték egyes fejlettebb országokban (pl. Németország, Franciaország, Japán, stb.) alacsonyabb, 5% körül mozog, míg fejlődő országokban (India, Dél-Afrika) pedig magasabb, 30-35% körüli értéket vesz fel. Összességében elmondható, hogy Magyarországon az elosztóhálózatba táplált energia nagyjából 0,5-1%-a visszaélés útján kerül ki a hálózatból. A csalási tevékenységeknek azonban lehetnek további negatív hatásai is a ki nem fizetett villamos energián túl, ugyanis a megváltozott fogyasztás miatt kár érheti a lopás nélküli értékekre méretezett elosztóhálózati berendezéseket. Ezen károk hatására villamosenergia-ellátás nélkül maradhatnak az érintett fogyasztók (az csalási tevékenységben részt nem vevők is), valamint megjavításuk további erőforrásokat igényel az elosztóhálózati engedélyes részéről. Pontosan tehát nem könnyű megbecsülni a csalási tevékenységek okozta kárt, az viszont bizonyos, hogy még ma is komoly gondot jelentenek a villamosenergia-visszaélések Magyarországon.

4. VIZSGÁLAT ELŐKÉSZÍTÉSE

A vizsgálat alapjául szolgáló adatstruktúra vizsgálata előtt, az a vizsgálatok eredményességére való tekintettel több különböző felépítésű adatstruktúra elemzése indokolt lehet. Ezt a lépést elengedhetetlen kellő pontossággal elvégezni, valamint szem előtt kell tartani a modellezéskor fontos részleteket is. Az adatkeresés során ez egyik legfontosabb szempont az, hogy a kapott eredmények a későbbiekben értékelhetőek legyenek. Ez egy elkészült, gyakorlati modellnél visszaméréssel megtehető, azonban jelen feladat folyamán erre nincs lehetőség, így a célváltozó

rendelkezésre állása (azaz, hogy valóban történt-e az adott fogyasztónál visszaélés, a cél ezen változó megtippelése) fontos szempont. A vizsgált adatstruktúrák két csoportba sorolhatók:

4.1. Smart mérő adatsorok:

Ezen adathalmazok általában negyedórás villamosenergia-mérési adatokat tartalmaznak, számos fogyasztóra. Emellett esetenként egyéb információval is kiegészítették az egyes adathalmazokat. A legígéretesebbnek egy londoni háztartásokba felszerelt smart mérők adatait összesítő adatstruktúrát ítéltem [3]. A smart mérőktől származó adatstruktúrák között nem volt olyan, ahol korábbi csalási tevékenység is jelezve lenne.

4.2. Visszaélési adatokkal ellátott adatsorok:

Számos területen alkalmaznak adatbányászatot csalásfelderítésre (pl. hitelbírálat), ilyen feladatokra alkalmas adatstruktúra az energetikában is létezik. A projektben végül kiválasztásra egy, a kínai áramszolgáltató cég (State Grid Corporation of China - SGCC) által közzétett adatsor került [4]. Ezen adathalmazban 42372 fogyasztóra vannak egynapos villamosenergia-mérési adataink a 2014 január 1, és 2016 október 31 közötti intervallumon. Az adathalmazban minden egyes fogyasztóhoz tartozó adatsor el van látva egy flag-gel, ami korábbi villamosenergia-visszaélést mutat. Csalási tevékenyéget végző fogyasztókból az adatstruktúrában 3615 darab van.

5. ADATOK ELŐKÉSZÍTÉSE

Az adatelőkészítés célja, hogy rendezett, az algoritmusok számára is használható formátumba hozzunk a használni kívánt adatstruktúrát. A folyamat szétválasztásra került több független részfolyamatra. A CRISP-DM módszertanban lévő visszacsatolásra való tekintettel nagyban megkönnyítheti a későbbi munkát ezen részfolyamatok esetleges hiányosságainak elemzése. A tárgyalt részfolyamatok sorrendben a következők:

- Hiányzó adatok kezelése
- Adattér csökkentése
- Kiugró értékek kezelése
- Adatok normalizálása

5.1. Hiányzó adatok kezelése

A használt adatstruktúrában, ha bármilyen okból kimaradt egy idősoros adat, annak értéke *nan* lesz. A hiányzó adatok kezelése alatt tehát jelen esetben azt a feladatot értjük, hogy az ilyen *nan* értékeket helyettesítsük egy olyan számértékkel, ami jól becsüli az adott fogyasztó aznapi fogyasztását. Ez az (1) egyenlet segítségével került megvalósításra:

$$f(x_i) = \begin{cases} \frac{x_{i-1} - x_{i+1}}{2} & , ha\ x_i = nan, \text{és}\ x_{i-1}, x_{i+1} \neq nan \\ 0 & , ha\ x_i = nan, \text{és}\ x_{i-1}\ vagy\ x_{i+1} = nan \\ x_i & , ha\ x_i \neq nan, \end{cases} \tag{1}$$

,ahol x jelöli egy adott fogyasztó összes fogyasztási adatának halmazát, így x_i pedig az adott fogyasztó vizsgálatban szereplő i-edik napjának fogyasztását.

5.2. Adattér csökkentése

Ezen lépés során egyrészt olyan fogyasztókat kerültek kiszűrésre a vizsgálatból, amelyek annyira hiányosak, hogy szinte nem rendelkeznek mérési adattal, így lényeges információt nem hordoznak. Ezen kívül az egyes fogyasztóknak is elhagyásra kerültek azon adataik, amelyeket a modellezés során vélhetően nem lehet majd hasznosítani.

5.3. Kiugró értékek kezelése

Elképzelhető, hogy az egyes adatsorokban szerepelnek kiugró, a többitől jóval nagyobb fogyasztási adatok. Amennyiben csak néhány ilyen adat szerepel, a normalizálás előtt célszerű ezeket az adatokat valamilyen módon kezelni, hogy ezen fogyasztási adatok a modellező algoritmusok számára ne jelentsenek problémát. Szükséges tehát tárgyalni, hogy mikor tekintünk egy értéket kiugrónak, valamint, ha egy értéket kiugrónak ítélünk, miként kezeljük ezt.

A kiugró értékekre döntést például a 68-95-99,7 szabály felhasználásával hozhatunk: eszerint x_i értéket akkor tekintjük kiugrónak, ha $x_i > \mu + 2\sigma$, ahol μ az adatsor átlaga, σ pedig a szórása [5]. Ha ezt az értéket meghaladja egy fogyasztási adat, erre az értékre fogjuk lecsökkenteni. Tehát a következő függvény került alkalmazásra az adatsorok minden elemén:

$$f(x_i) = \begin{cases} \mu(x) + 2\sigma(x) & , ha\ x_i > \mu(x) + 2\sigma(x) \\ x_i & egyébként \end{cases}, \tag{2}$$

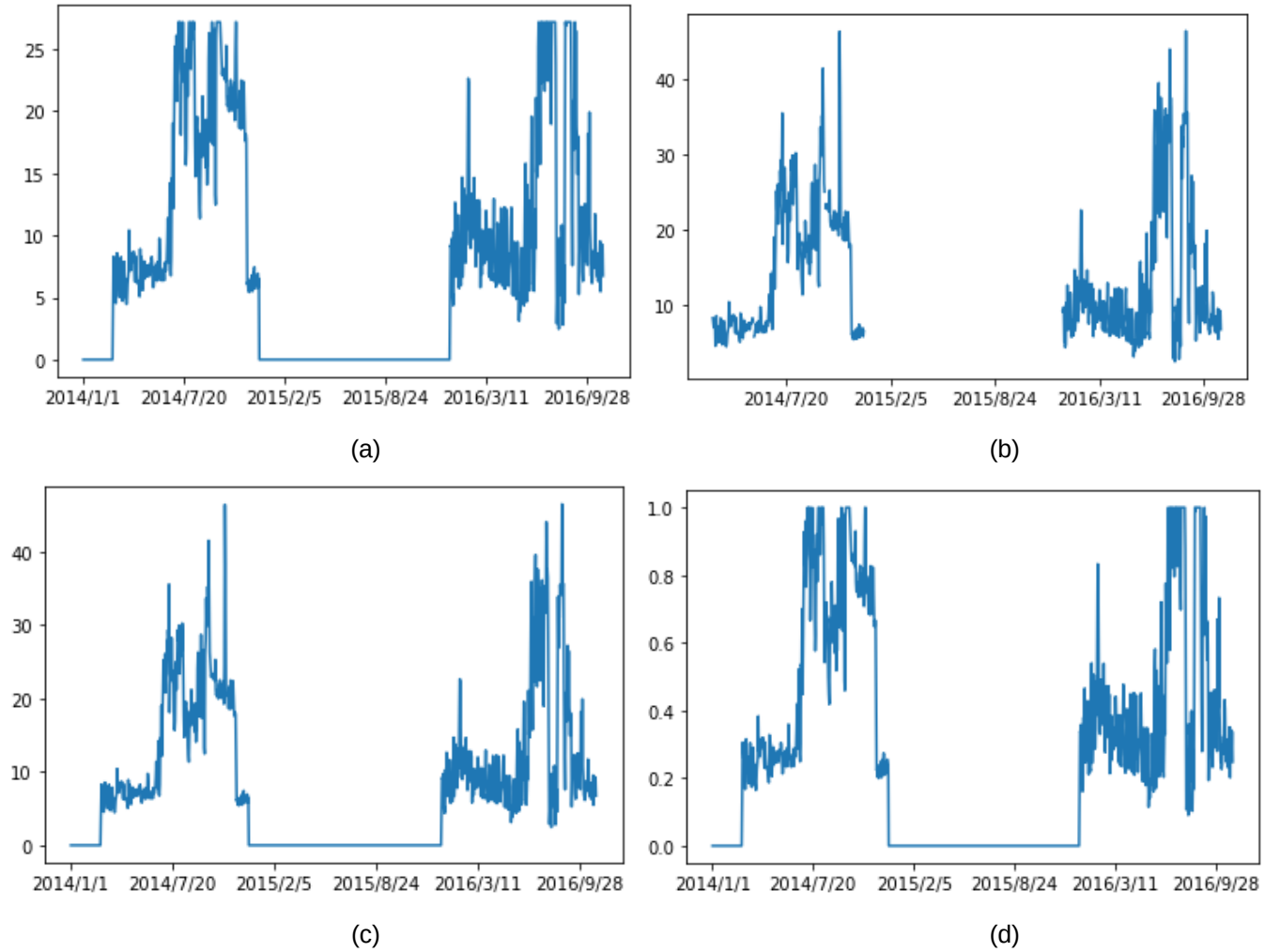
ahol x ismét egy adott fogyasztó összes mérési adatának sorozatát jelöli, x_i pedig ennek a sorozatnak az i-edik elemét. Fontos megjegyezni, hogy $x_i > |\mu(x) + 2\sigma(x)|$-nak kellene a logikai vizsgálat helyén állnia, de az abszolút érték elhagyható, ugyanis az adatsorok minden egyes mérési adata pozitív.

5.4. Adatok normalizálása

Végül elvégzendő az adatok normalizálása, azaz a mérési adatok 0 és 1 közé skálázása. Erre azért van szükség, mert egyes algoritmusok érzékenyek a nagy mértékben eltérő adatokra. Ezt minden fogyasztóra külön el kell végezni, azaz egy adatsor maximuma minden fogyasztó esetén 1, minimuma pedig 0 értéket fog felvenni. Ezzel azonban elveszítjük a fogyasztás tényleges mértékét. Amennyiben szükség van rá, lehetőség van eltárolni az előző pontban kiszámolt átlag-, és szórás értékeket. Ezek addíciójával már nem történik adatvesztés a normalizálás során. Az egyes fogyasztási adatokon a következő műveletet lett elvégezve:

$$f(x_i) = \frac{x_i - \min(x)}{\max(x) - \min(x)}, \tag{3}$$

ahol $\min(x)$ egy adott x adatsor minimum-, $\max(x)$ pedig a maximum értéke. Az adatelőkészítési folyamat egészét egy kiválasztott fogyasztón lépésenként végigkövetve a 2. ábrán látható.



***2*. ábra: egy fogyasztó fogyasztási grafikonjai (a) alapállapotban, (b) hiányzó értékek kezelése után, (c) kiugró értékek kezelése után, (d) normalizálás után**

6. MODELLEZÉS ÉS KIÉRTÉKELÉS

Energetikai területen csalásfelderítés megvalósítására számos eltérő megoldás született. A korábbi eredményeken kívül a modellválasztásnál fontos szempontot játszanak a modellezőalgoritmusok működési elvei, így ezek elemzése is elengedhetetlen [6].

A cél, hogy az adatstruktúrában, amely az egyes háztartások villamosenergia fogyasztási adatait tárolja, olyan entitásokat (fogyasztókat) keressünk, amelyek a többitől nagyban eltérő fogyasztási szokásokkal rendelkeznek. Azaz a feladat az adatstruktúra anomáliáinak identifikálása. Természetesen nem minden szokatlan fogyasztási görbe lesz szándékos visszaélés eredménye, elképzelhető, hogy pl. meghibásodott berendezések, mérőórák eredményeznek szokatlan adatokat. Így esetleg az anomáliák között is szükséges lehet szelektálni a későbbiekben. Az anomália detekció szoros kapcsolatban áll a klaszterezéssel. Egy klaszterező algoritmus feladata csoportokba sorolni az objektumokat. Azokat az objektumokat hívjuk anomáliáknak, amelyek annyira különböznek a többitől, hogy az algoritmus nem képes besorolni azokat egyik ilyen módon létrejött csoportba sem. Egy másik megközelítés, hogy egy kétosztályos osztályozási feladatként képzeljük el az

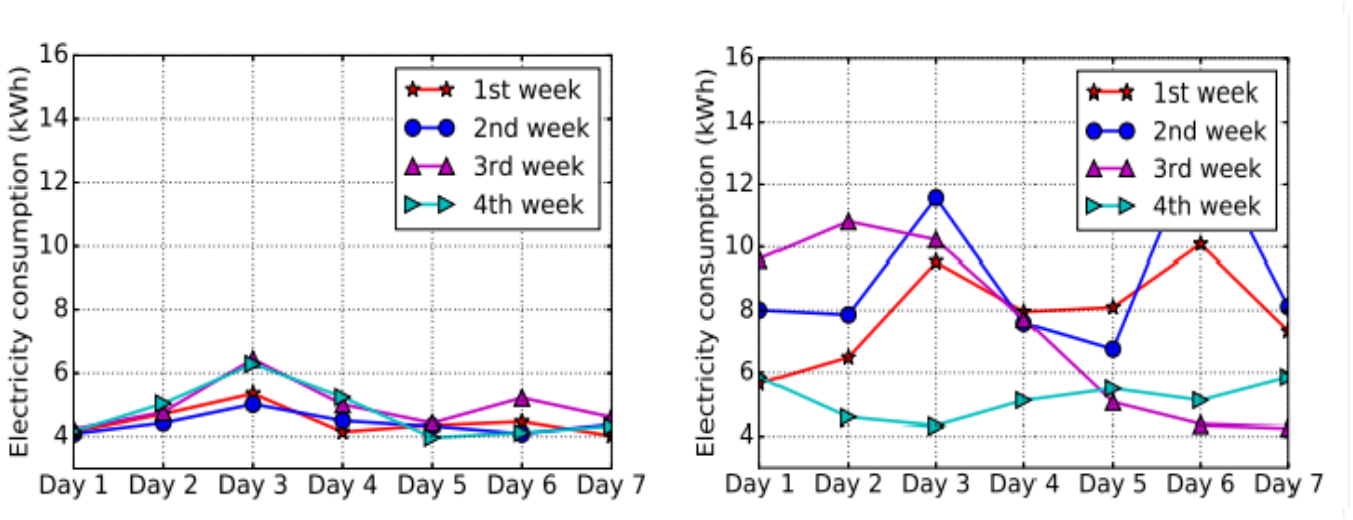
anomáliakeresést, az objektum lévén vagy anomália, vagy nem. Ez egy erősen kiegyensúlyozatlan osztályozási feladatot eredményezne, de ilyen megközelítéssel lehetőségünk van pl. regressziós algoritmusokat is alkalmazni [6].

Az alkalmazott modell kimenete egy predikcióvektor, amely eldönti az egyes fogyasztókról, hogy végeznek-e csalási tevékenyéget. Ezt összehasonlítva az adathalmazban rendelkezésre álló flaggel adódik a modell pontossága. A kiértékelési módszer nagyban függ a bemenő adatok tulajdonságaitól. A projektben felhasznált adathalmazban a fogyasztók nagyjából 9%-a végez csalási tevékenységet, így a modellezés egy igen kiegyensúlyozatlan osztályozási feladatnak feleltethető meg. Ilyen esetekben a helyes predikciók arányát mutató *accuracy score* információtartalma csekély. Ezen megfontolásból helyette inkább a helyes predikciókat súlyozó *f1 score*, és a valós-, és fals pozitív predikciók arányából képezhető görbét alkalmazó *AUC score* került alkalmazásra.

Az egydimenziós modellek esetén a legjobb eredményt úgy adódott, hogy az adathalmaz 70%-át a modell tanítására, 30%-át pedig alkalmazására került elkülönítésre. Ilyen módon a legjobb eredmény, 61%-os AUC (Area Under the ROC Curve) érték, logisztikus regresszióval adódott. Az f1 score érték azonban minden alkalmazott modell (LR (Logistic Regression) és SVM (Support Vector Machine) modellek [6]) esetén igen alacsony, az említett legkedvezőbb AUC értékkel rendelkező esetben 41%. Ez annak köszönhető, hogy míg a modell nagy pontossággal meg tudja határozni a szabályos fogyasztókat, a csalási tevékenységek felderítésénél jóval nagyobb arányban hibázik. Ez ismételten a kiegyensúlyozatlan adathalmaz eredménye. Ha például egyes fogyasztók vizsgálatból való kihagyásával kiegyenlítjük a szabályos-, és csalási tevékenységet végző fogyasztók arányát, jobb eredményhez jutunk (auc = 63%, f1 = 65%), de ilyen esetben nagy mértékben torzítjuk a bemenő adatokat. Ez azt jelenti, hogy ezen feladat megvalósítható így, de más bemenő adatok esetén érdemes lehet a modellen változtatni, vagy valamilyen mintavételezési eljárást alkalmazni a bemenő adathalmazon, ezzel csökkentve a kiegyensúlyazatlanságot.

7. KÉTDIMENZIÓS MODELLEK

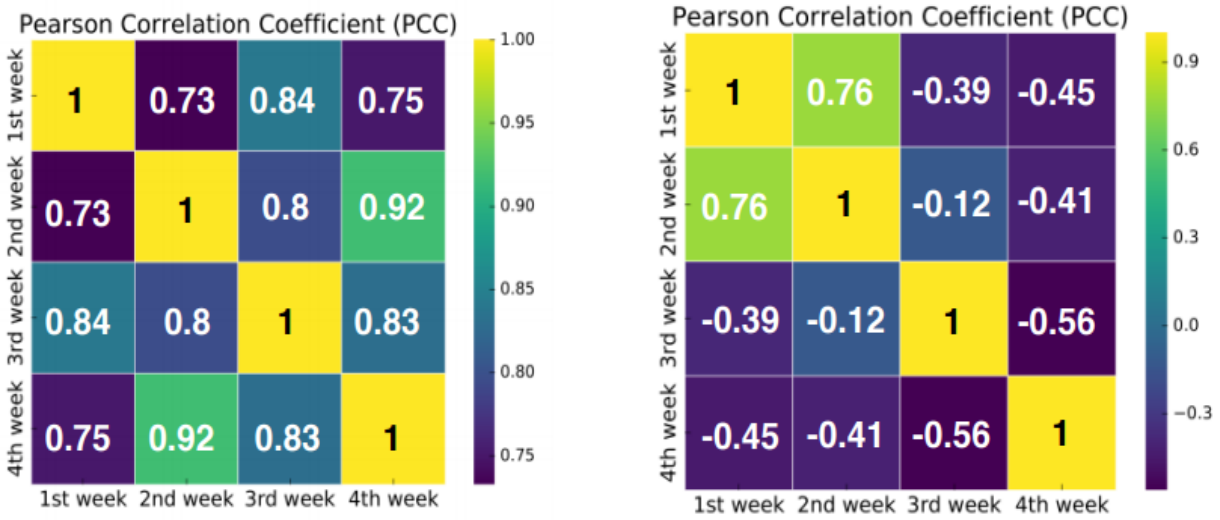
A regresszió, és a hozzá hasonló egydimenziós idősoros adatokat feldolgozó algoritmusok egynapos felbontás esetén nem feltétlenül szolgáltatnak elégséges eredményt. Kínai kutatók megmutatták, hogy ilyen felbontású adatokat alkalmazva lehetőségünk van az egymást követő hetek fogyasztásainak összehasonlításával tetten érhetünk csalási tevékenységeket [7]. Ilyen módon azt tapasztalták, hogy a szabályosan vételező fogyasztók egyes heti adatsorai között jóval nagyobb a hasonlóság, mint a csalási tevékenyéget végzőkénél, ezt a 3. ábra szemlélteti.



(a) (b)

3. ábra: egyes hetek villamosenergia-fogyasztása (a) szabályosan fogyasztó és (b) villamosenergiával visszaélő fogyasztókra [7]

Ezt a periodicitást a matematikában korrelációval szokás jellemezni: várhatóan nagyobb korrelációs érték adódik szabályosan vételező fogyasztók esetén (4. ábra).



(a) (b)

4. ábra: korrelációs együtthatók (a) szabályosan fogyasztó és (b) villamosenergiával visszaélő fogyasztókra [7]

A projekt következő, még megvalósítás alatt álló lépése a fentebb ismertetetthez hasonló kétdimenziós modell megvalósítása. Ilyen módon a fentebb említett kínai kutatók akár 78%-os AUC értéket is el tudtak érni [5], ez az egydimenziós modellekkel kapott eredményekhez képest jelentős javulás.

8. ÖSSZEFOGLALÁS

A vizsgált adathalmaz 42372 háztartás egynapi felbontású villamosenergia-fogyasztási adatait tárolja egy közel hároméves időintervallumon. A feladat során előfeldolgozás után ezen adathalmazon kiértékelésre került több egydimenziós modell, ezek közül a legjobb eredményt a logisztikus regresszió hozta, 62%-os AUC értékkel. Bemutatásra került továbbá egy kétdimenziós modell elméleti alapja, amely segítségével kutatók ezen AUC értéket 78%-ra tudták növelni. A projekt következő szakaszában a cél egy kétdimenziós modell felállítása lesz.

Természetesen az adatelemzés során megalkotott modelleinktől tökéletes pontosságot természetesen nem várhatunk, a visszaélések felderítésére ráfordítandó energia nagyban lecsökkenthető a segítségével. Érdemes kiemelni, hogy a bemutatott módszertan azonban túlmutat a visszaélések felderítésén: a bemutatotthoz hasonló módon készíthető modell számos energetikai terület problémáinak megoldására, mint a piaci árak-, vagy fogyasztás előrejelzése, veszteségek csökkentése, és számos más.

9. IRODALOMJEGYZÉK

[1] Nagy-Rácz István – CRISP-DM módszertan – Mi az és hogyan használd? - https://dmlab.hu/blog/crisp-dm-modszertan-mi-az-es-hogyan-hasznald/ Ellenőrizve: 2021. augusztus 10.

[2] Polgári Beáta: „Smart” mérők alkalmazási lehetőségei, különös tekintettel a szabálytalanul vételező fogyasztók kiszűrésére, diplomaterv 2012

[3] Smart meters in London – https://www.kaggle.com/jeanmidev/smart-meters-in-london Ellenőrizve: 2021. augusztus 10.

[4] https://github.com/henryRDlab/ElectricityTheftDetection/blob/master/README.md Ellenőrizve: 2021. augusztus 10.

[5] https://towardsdatascience.com/understanding-the-68-95-99-7-rule-for-a-normal-distribution-b7b7cbf760c2 Ellenőrizve: 2021. szeptember 15.

[6] Bodon Ferenc, Buza Krisztián: Adatbányászat, 2014

[7] Zheng, Z., Yang, Y., Niu, X., Dai, H.-N., & Zhou, Y. – Wide & Deep Convolutional Neural Networks for Electricity-Theft Detection to Secure Smart Grids, 2018

Markovics Dávid, Dr. Mayer Martin János
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék

Napelemparkok termeléselőrejelzése gépi tanulással

A kutatásom során napelemparkok termelés előrejelzésének lehetőségeit vizsgáltam, amely a jelenleg tapasztalható intenzív beépítések mellett egy fontos kihívást jelent. Az előrejelzési módszerek közül szűkebben statisztikai alapú, azon belül is gépi tanulási algoritmusokra koncentráltam, amelyek már üzemelő erőművek historikus termelési adataiból és a hozzá tartozó meteorológiai előrejelzésekből képesek későbbi időjárás előrejelzésből explicit módon menetrendet adni.
Országszerte számos erőmű adataiból dolgozva teszteltem algoritmusokat, melynek eredményei segíthetnek az ezzel foglalkozó tulajdonosoknak, menetrendező cégeknek kiválasztani a megfelelő módszert. Az egyes módszereket teszteltem különböző bemeneti adatokkal, illetve hiperparaméter hangolással és alap, vagy csak a kiritikus fontosságú beállítások megválasztásával, ezáltal bemutatva a különböző optimalizálási potenciálokat.
Az eredmények több szempontból értkelve lesznek bemutatva, kiemelve az energetikai és felhasználói szempontból releváns aspektusokat, problémákat.

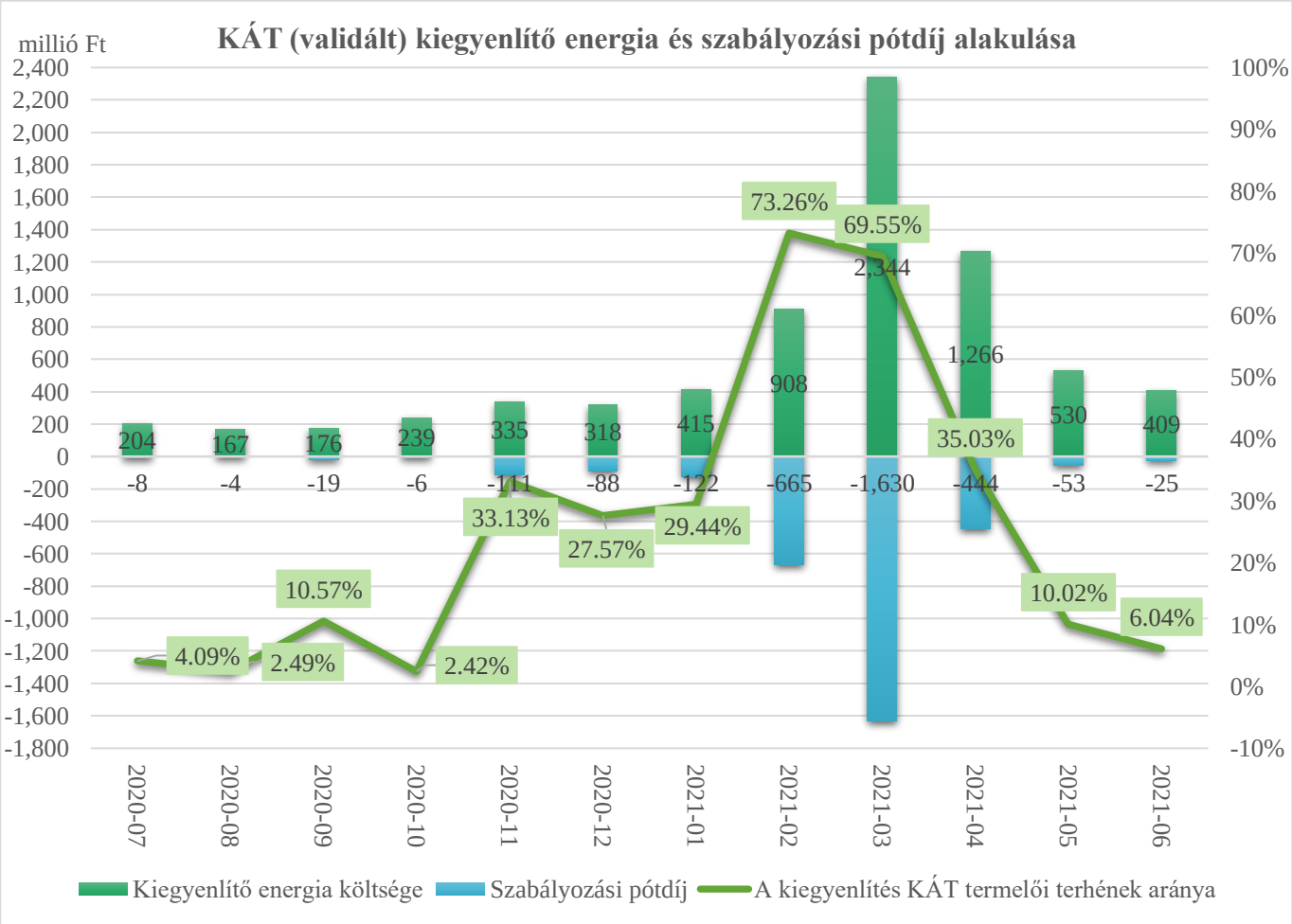
Photovoltaic power forecasting became a highlighted topic due to the fast growing installed capacity in the past years, with challenges to both the system operators and power plant owners. From the possible forecasting methods, this paper is focused on statistical-based techniques and within that, machine learning algorithms, which are capable of converting meteorological forecasts to delightful power schedules trained on historical weather prognosis and actual output power.
Based on the data of 16 power plants, scattered around Hungary, were the algorithms tested, resulting useful information about model selection for owners and scheduling companies. Beside comparing models, the simulations were conducted with and without hyperparameter tuning, using different combinations of input variables, to show the potential of optimization. The investigation also covered the effect of forecasting horizon, comparing the results of scheduling based on day-ahead and intraday UTC 0 weather prognosis queries.
The results and experiences are shown from a user-relevance oriented approach in the followings.

Kulcsszavak: napelempark termelés előrejelzés; menetrendezés; gépi tanulás.

1. BEVEZETÉS

A napenergia az elmúlt években az egyik legdinamikusabban fejlődő energiaforrás volt a világ jelentős részén. A technológia folyamatos fejlődése és a támogató szabályozási környezet lehetővé tette a beépített kapacitás folyamatos, intenzív növekedését [1]. Az időjárásfüggő energiatermelés említett tendenciájának, illetve az energiastratégiákban megnevezett jövőbeni szerepük hatására jelentős igény keletkezett a termelés előrejelzés lehetőségeinek vizsgálatára. A hazai Nemzeti Energia és Klíma Tervben foglalt szcenáriók [2] alapján 2040-re akár 12 000 MW közeli beépített

teljesítményű naperőmű állomány várható Magyarországon, amelynek már egy tizede is komoly kihívást tud jelenteni a termelésingadozás kiegyenlítését illetően. Ezzel kapcsolatban érdemes megvizsgálni a MAVIR Zrt. KÁT és prémium támogatással kapcsolatos, havi rendszerességű kiadványának [3] idei verzióit. Az 1. ábrán látható júniusi kimutatásból jól látszik, hogy a 2021-es év első felében a KÁT-os napelemparkok kiegyenlítő energia díja drasztikusan megnőtt. A csúcs 2021 márciusában volt, amikor a teljes mérlegköri szabályozási pótdíj 1 630 millió Ft nagyságrendű volt, amelynek jelentős része a napelemparkokat terhelte.



1. ábra – KÁT (validált) kiegyenlítő energia és szabályozási pótdíj alakulása 2020 július és 2021 június között.

Ezeket a jelenségeket enyhítendő, a rendszerirányító 2021 május 1-től a korábbi rendszerre jellemző sávos büntetési tényezőt nullára redukálta, így a jelenlegi képlet, a piaci árakat leszámítva szimmetrikus, a hiba méretétől független költségeket prognosztizál. Az elszámolási rendszerrel azért fontos tisztában lenni, mivel ez alapján lehet megválasztani a kiértékeléshez használt legfőbb mutatószámokat, így ez a későbbiekben még fontos lesz.

A naperőművek energiatermelésének előrejelzésére rengeteg módszertan létezik, amelyek elsősorban két fő kategóriába sorolhatóak. A fizikai modellek az erőművek műszaki egységeit leíró összefüggések sorából épülnek fel, ezáltal a meteorológiai szolgálattól szerzett előrejelzésből

kiindulva több lépésben meghatározható a várható teljesítmény. Ezzel szemben, a másik kategória a statisztikai alapú előrejelzés, amely esetén az ismert, korábbi működés során mért adatokból és a dokumentált időjárás előrejelzésből, különböző elvek, algoritmusok segítségével adható becslés a várható termelésre. Tehát praktikus szempontból az egyik legnagyobb különbség az, hogy a fizikaihoz képest a statisztikai modellek esetén nem szükséges ismerni az erőmű pontos műszaki adatait, elhelyezkedését, tájolását, azonban kiemelten fontos, hogy megfelelő mennyiségű és minőségű adat álljon rendelkezésre.

Az elmúlt évtizedben egyre több tudományos elemzés született a témában, megközelítve a szél és fogyasztás előrejelzéssel foglalkozó publikációk számát [4]. J. Antonanzas 2016-ban végzett kutatásában [5] összefoglalta az addig publikált elemzéseket. Kutatásából kiderült, hogy már addigra is a statisztikai alapú termelés előrejelzés volt a leggyakoribb, megelőzve a fizikai modelleket. Azonban a publikációk számának növekedése ellenére még messze nem egy kiforrott terület, ugyanis az elemzések nehezen megismételhetők és összehasonlíthatóak, a különböző földrajzi elhelyezkedés, technológia, illetve eltérő mérőszámok használata miatt [6].

A továbbiakban egy 2020 tavasza óta tartó fokozatos kutatás eredményeinek egy része kerül bemutatásra. A teljes munkának az átfogó célja a napelemparkok menetrendezésével kapcsolatos lehető legtöbb aspektus vizsgálata, amelyből jelen esetben 16 napelemparkra tesztelt 7 algoritmus eredményei, illetve az ezzel kapcsolatos észrevételek, módszertani javaslatok kerülnek bemutatásra. Gyakorlati szempontból úgy érdemes értékelni az elemzés eredményeit, hogy azok egy valós körülmények között is alkalmazható rendszer teszteléséről szólnak. Általánosabban pedig az az elv, hogy a jó előrejelzés jó tervezhetőséget jelent, alacsonyabb kockázati szinten. A jó tervezhetőség költség optimalizálást jelent, hogy ezt miként használja ki egy vállalat azt a döntéshozói stratégiája határozza meg. Tehát az anyag elsődlegesen egy döntés-előkészítő lehetőségelemzés, amely a jobb kiszámíthatóság mellett alacsonyabb kockázatot kínál.

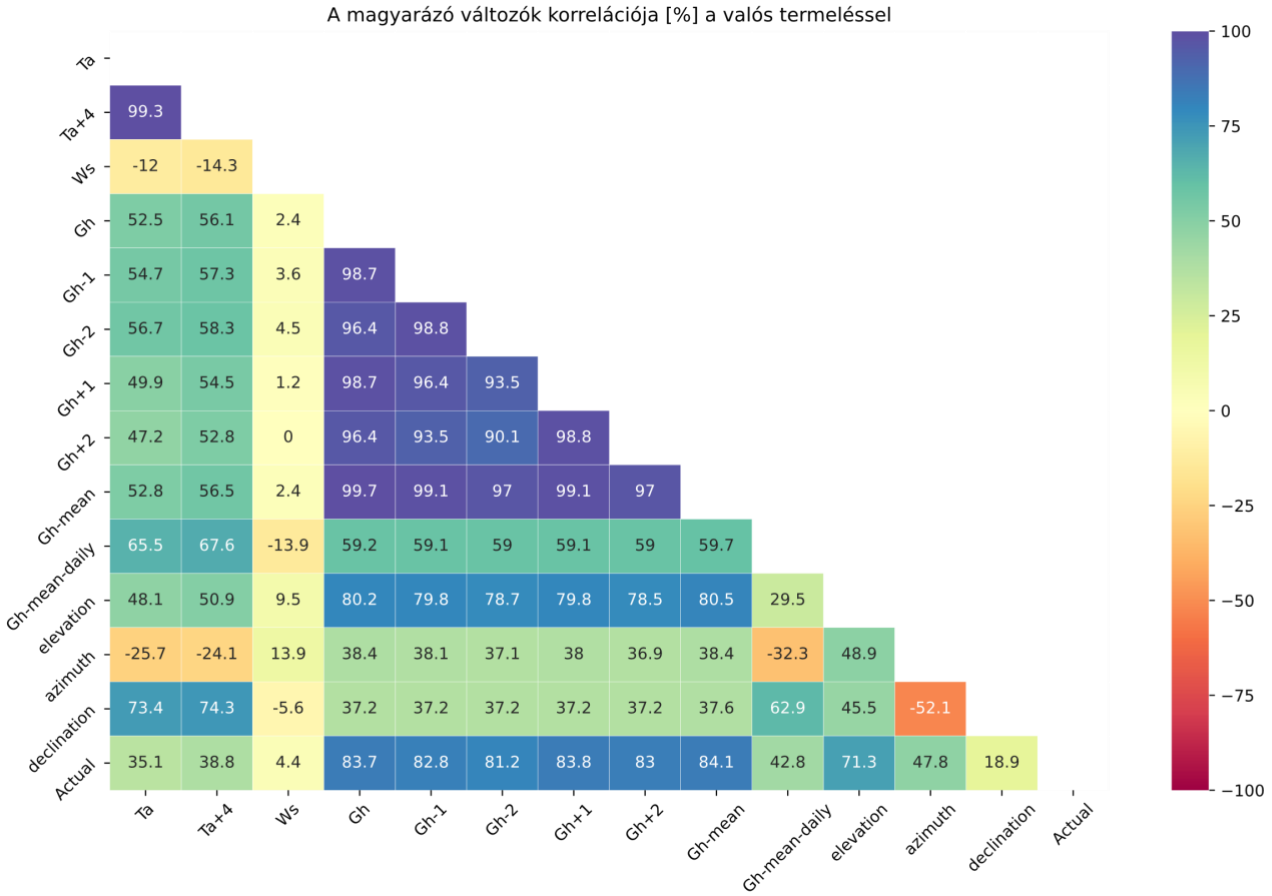
2. MÓDSZERTAN

A gépi tanulás egy hatalmas eszköztár, rengeteg algoritmussal, amelyek lényege általánosságban az, hogy a megoldandó problémának magyarázó (prediktor) és magyarázott változói közti kapcsolatot egy adott modellre próbálják iteratív úton ráilleszteni. Az algoritmusokban szereplő modellek belső paraméterei a tanulás fázisban kerülnek beállításra, míg bizonyos, ún. hiperparaméterek megválasztása előzetesen manuálisan, vagy gépi optimalizálással történik. Utóbbi alapvetően arra nyújt lehetőséget, hogy az illesztendő modellt bizonyos szintig a problémához lehessen igazítani még a tanulás előtt. A felhasznált adatok, algoritmusok és a választott prediktor kombinációk a következőkben kerülnek részletezésre.

2.1. Adatok

Az elemzésekhez az OMSZ-től származó 2 évnyi, UTC 0-s aznapi (ID), és másnapi (DA) sugárzás (Gh), szélsebesség (Ws) és felszíni hőmérséklet (Ta) előrejelzései kerültek alkalmazásra, az MVM Zrt. 16 napelemparkjának vonatkozásában, azok termelés adatai mellett. Az előrejelzésekben szereplő tulajdonságok mellett nappozíció algoritmusból (SPA) származó számított értékek is felhasználásra kerültek, név szerint a negyedórás időintervallumokhoz tartozó deklinációs,

magassági és azimut szögek. Az alábbi ábrán látható a prediktorként használt mennyiségek Pearson-féle korrelációs tényezője a valós termeléssel százalékos formában.



2. ábra – Pearson-féle korreláció a bemeneti adatok és a valós termelés között százalékos formában.

Ezek alapján került megválasztásra három különböző prediktor kombináció az alábbi módon:

1. Egyszerű – a leggyakrabban használt napsugárzás, szélsebesség és felszíni hőmérséklet.
2. Komplex – az adott negyedóra környezetében lévő napsugárzás értékek, azok átlaga, illetve a napi átlagos besugárzás kiegészítve az egy órával későbbi felszíni hőmérséklettel, valamint a számított a nappálya értékek.
3. Kis felbontású – kizárólag nagy felbontású (negyedórás) előrejelzést nem igénylő adatok: a napi átlagos sugárzás előrejelzés, illetve a számított nappálya értékek.

2.2. Algoritmusok

Az elemzésekhez használt 7 db tanuló algoritmus a Python programnyelv Scikit-learn nevű könyvtárában megtalálható. Ezek nyílt forráskódú módszerek, bárki által ingyenesen letölthetőek és alkalmazhatóak, ezért is örvend maga a programnyelv, illetve külön a Scikit-learn könyvtár komoly népszerűségnek. Az elemzés során kapott eredmények kétszeri keresztvalidációt alkalmazva

értendőek, tehát az algoritmusokat a 2019-es adatokon betanítva a 2020-as időszakra tesztelve, valamint az ennek fordítottjával kapott hibák átlagát jelentik.

Az alábbi táblázatban találhatóak az algoritmusok rövidítései, az azonosítójuk a Python dokumentációkból, a hangolt hiperparaméterek, illetve a mélyebb megértést segítő cikkekhez való hivatkozások.

1. táblázat – Áttekintés a használt algoritmusokról

ID	Név a Python dokumentácókban	Hangolt hiperparaméterek	Javasolt irodalom
lr	LinearRegression	normalize	
kr	KernelRidge	kernel	[7]
svm	SupportVectorRegression	kernel, epsilon, C	[8]
knn	KNeighborsRegressor	n_neighbors	[9]
rf	RandomForestRegressor	n_estimators, max_depth, min_samples_leaf, max_features	[10]
gbr	GradientBoostingRegressor	alpha, criterion, n_estimators, loss	[11]
mlp	MLPRegressor	hidden_layer_sizes, alpha	[12]

2.3. Kiértékelés

Az előrejelzések kiértékeléséhez használt mutatószámok számítása az alábbi képletek mentén történt:

$$nMAE = \frac{\sum_{i=1}^{N} |y_i - P_i|}{\sum_{i=1}^{N} P_i} \cdot 100\ [\%] \tag{1}$$

$$nRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^{N} (y_i - P_i)^2}}{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^{N} P_i} \cdot 100\ [\%] \tag{2}$$

$$Corr = \frac{Cov(P_i, y_i)}{\sigma_{P_i} \cdot \sigma_{y_i}} \cdot 100\ [\%] \tag{3}$$

$$Skill = \left(1 - \frac{nRMSE}{nRMSE_{perzisztencia}}\right) \cdot 100\ [\%] \tag{4}$$

Ahol:

- P_i: valós termelés az i-edik munkapontban
- y_i: vizsgált mennyiség az i-edik munkapontban (hibaszámítás esetén becsült termelés temelés)
- *Cov*: kovariancia
- P_i: valós termelés az i-edik munkapontban
- $\sigma_{P_i}, \sigma_{y_i}$: a valós termelés és a vizsgált mennyiség szórása

- N: napsütéses negyedórák száma a vizsgált időszakban

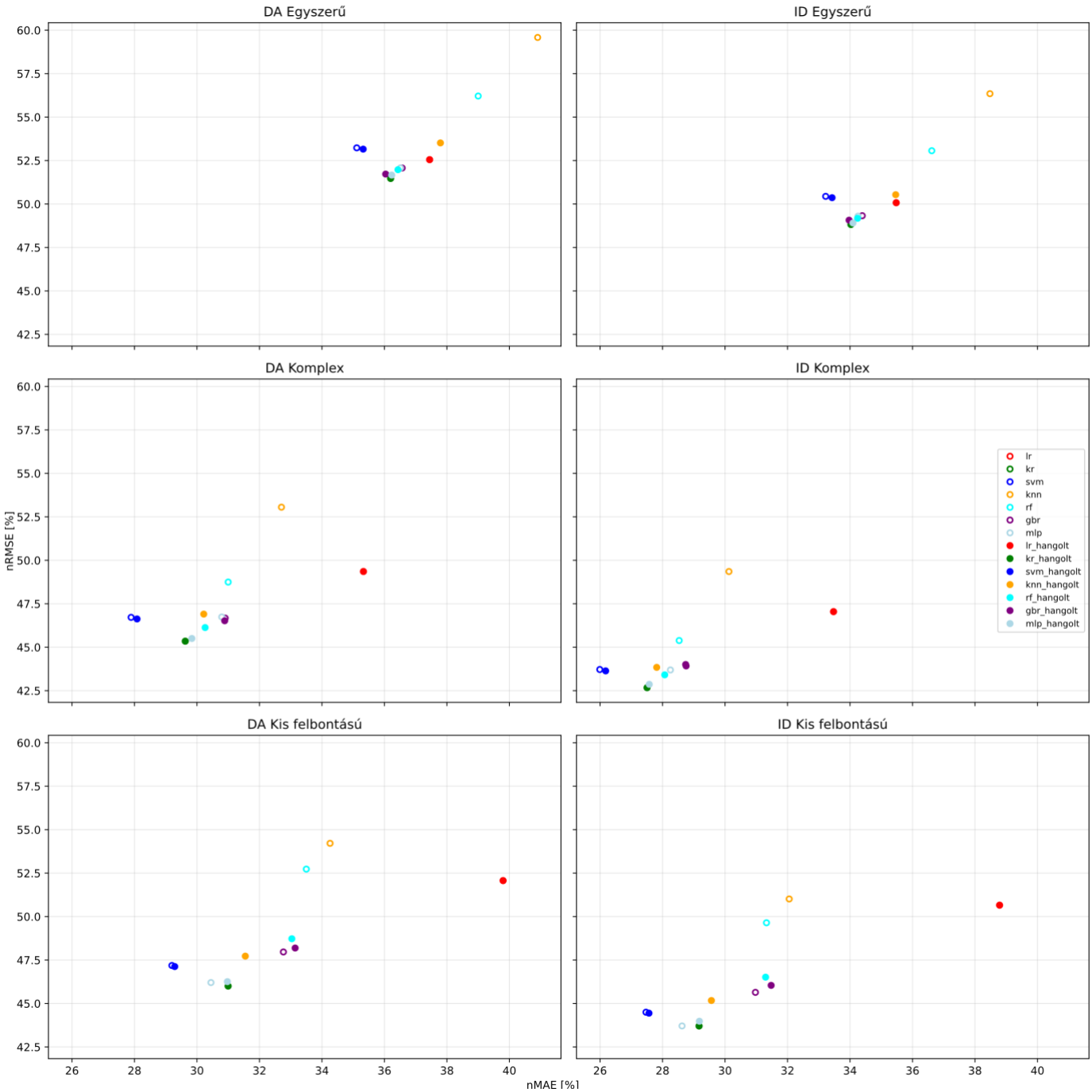
Az „n” betű a MAE (Mean Absolute Error) és RMSE (Root Mean Square Error) előtt a normalizálásra utal, amelynek alapjául a pozitív becsült teljesítménnyel bíró negyedórák átlagos termelése szolgált. Ezáltal az nMAE érték megadja, hogy egységnyi termelt villamosenergiára átlagosan mekkora menetrendezési hiba jut, amely az energetikai szemléletben fontos kimutatás. Az nRMSE a képletében látható négyzetre emelés miatt az nMAE-hez hasonlóan érzéketlen az eltérések irányára, ugyanakkor erősebben bünteti a nagyobb eltéréseket. Itt érdemes visszacsatolni a bevezetésben említett módszertanra, amely immáron nem tartalmaz sávos büntetési tényezőt, ugyanakkor az nRMSE relevanciája továbbra is jelentős, hiszen a szabályozó energiát a fedezeti sorrendbe (merit order listába) rendezett tartalék erőművek szolgáltatják, így vélhetően a volumen igények növekedésével az egységárak is növekednek.

A Skill score azt mutatja meg, hogy az előrejelzés nélkül, könnyen kiszámítható perzisztencia modellhez képest mekkora relatív javulás érhető el az adott módszerrel. DA esetben a 48, ID esetben pedig a 24 órás perzisztenciával kerültek összehasonlításra az eredmények, amely azt jelenti, hogy előbbi esetén az n-edik napra az n-2-ik nap valós termelése a menetrend, utóbbi esetén pedig az n-1-ik. Ez a mutató gyakorlati szempontból azért releváns, mivel a perzisztencia a legalsó szint, ahonnan kiindulva előrejelzési szolgáltatás vásárlásával, adatelemzéssel vagy más módon csökkenteni lehet a menetrendezési hibát, illetve ezáltal a kiegyenlítőenergia pótdíjat, amely a bevezetésben említett módon az elmúlt időszakban jelentős tétellé vált a erőművek kiadásai között. Tehát arra a kérdésre próbál válaszolni, hogy az adott szolgáltatásra való beruházással várhatóan mekkora fajlagos költségcsökkentést lehet elérni. A menetrendezési hiba nem váltható át egyszerűen költségként a piac változékonysága miatt, azonban a korábban említett megfontolásból az RMSE alapú viszonyítás a preferált, ahogyan a Skill score képletében is látható.

3. EREDMÉNYEK

A következőkben az elemzések eredményei kerülnek bemutatásra a használt algoritmusok, prediktor kombinációk, illetve egyéb szempontok szerint.

A 3. ábrán láthatóak a 12 különböző esetben kapott eredményei a vizsgált algoritmusoknak. Az ábrák bal alsó sarka felé haladva tekinthető át, hogy melyik algoritmus bizonyult a legjobbnak. Látható azonban, hogy egyik esetben sincs olyan módszer, amely egyértelműen kiemelkedne, hiszen a két hibaszámítási módszer eltérő sorrendet ad. Az első sorban láthatóak az Egyszerű prediktorokkal kapott eredmények, amelyhez képest láthatóan, a második sorban lévő komplex előrejelzésekkel jelentős, több mint 10 %-os javulás érhető el. Ehhez képest a harmadik sorban található Kis felbontású prediktor típus csak alig bizonyult gyengébbnek, amely érdekes megfigyelés, hiszen ebben az esetben nem került alkalmazásra negyedórás bontású időjárás előrejelzés. Az, hogy ilyen kevés különbség adódott, arra ad következtetést, hogy az időjárási adatok és kiemelten a jelen esetben legfontosabb globálsugárzás értékek negyedórás szinten nem jól becsülhetőek, mivel az előrejelzés hozzáadott értéke viszonylag kevés. Ugyanakkor ez a tapasztalat jó lehetőséget ad alacsonyabb költségű, komolyabb beruházást nem igénylő menetrendezésre.



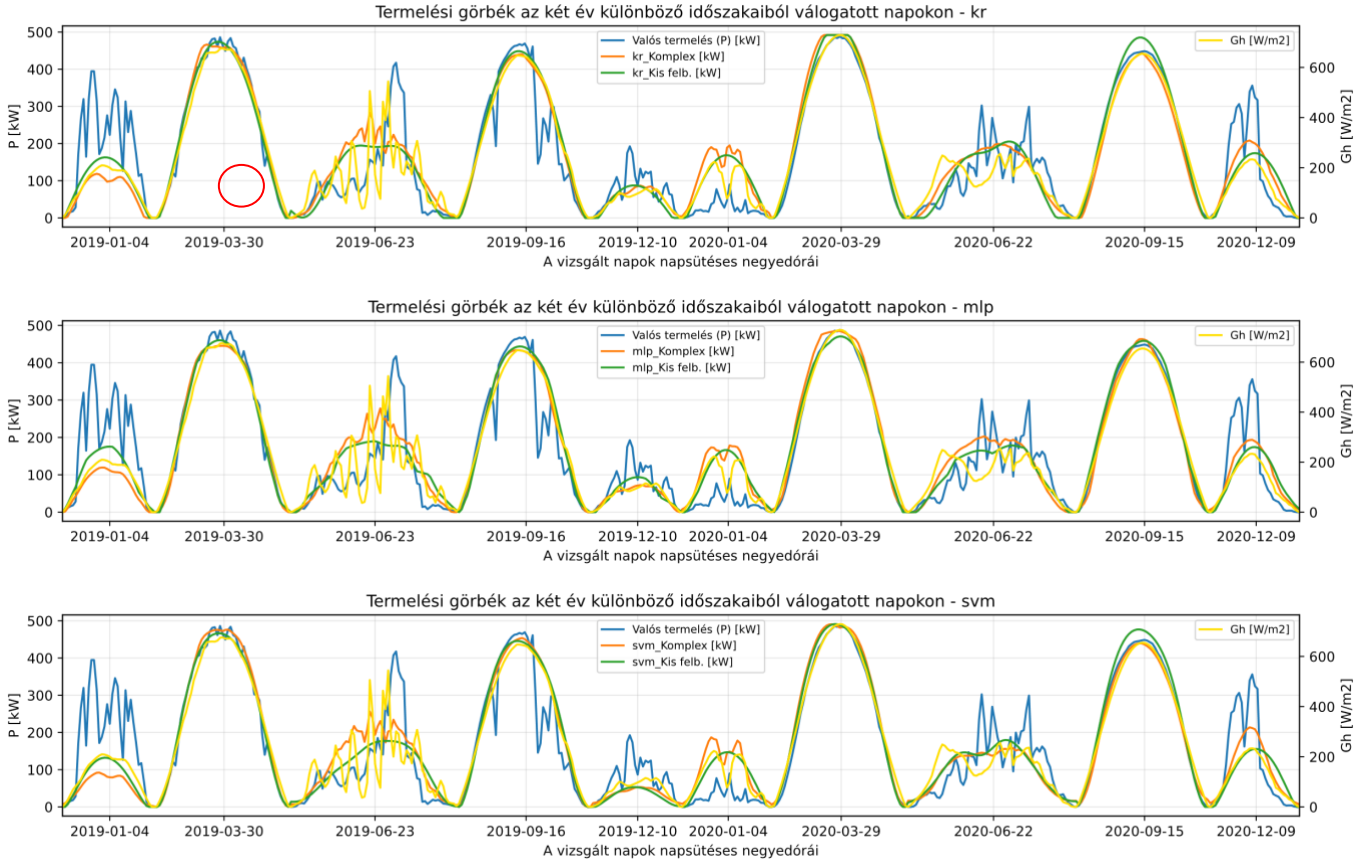
3. ábra – nRMSE és nMAE eredmények a vizsgált algoritmusokra és esetekre.

Az időhorizont kapcsán látható, hogy soronként hasonló, 5-10%-os javulás érhető el a 24 órával későbbi UTC 0-ás lekérdezésből származó időjárás előrejelzés alkalmazásával. Ennek értelmében tehát javasolt ID menetrend módosítást végezni, illetve érdemes lehet vizsgálni, hogy napi többszöri lekérdezéssel mekkora javulás érhető el.

3.1. Legjobb algoritmusok

Az előző pontban tárgyalt 3. ábra alapján látható, hogy az algoritmusok közül kiemelkedett a *kr*, és *mlp* főként nRMSE alapján, illetve az *svm* nMAE szerint. Utóbbi esetén láthatóan hiperparaméter

hangolás rontotta az nMAE értékét, hiszen az ideális beállítás keresése RMSE alapon történt. Az alábbi 4. ábrán ezen három módszer Komplex és Kis felbontású prediktorokkal képzett előrejelzései és a hozzá tartozó sugárzás, illetve valós termelési adatok láthatóak, a két év különböző időszakaiból kiragadott ugyanazon tíz napra.



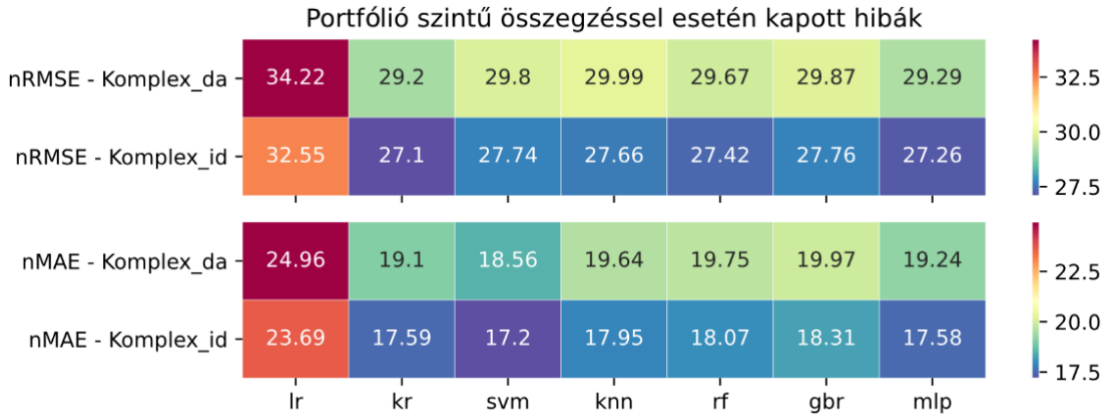
4. ábra – nRMSE és nMAE eredmények a vizsgált algoritmusokra és esetekre

Valamelyest érzékelhetőek a különbségek az egyes algoritmusok között is a változékonyabb időjárással bíró napokat összehasonlítva, de ennél jóval látványosabb a két prediktor kombináció közötti, hiszen az időjárás előrejelzésből származó fluktuáció sokkal kevésbé jelenik meg a Kis felbontású verzióban. Szintén kiemelendő, hogy a vizuális elemzés alapján érdemes a napkelte, illetve napnyugta környéki előrejelzéseket felülvizsgálni és korrigálni, mivel ezeken a részeken előfordulhatnak kisebb túlillesztési problémák, ahogy az felső diagramon szereplő második és harmadik nap közti völgyben látható.

3.2. Portólió hatás

Több napelempark egyidejű menetrendezése felmerülhet, hogy az együttes, eredő hibák hogyan alakulnak az parkonkénti eredő pontatlansághoz. Jelen esetben, a tesztek azt mutatták, hogy az egyes parkok előrejelzéseinek és valós termelési adatainak összegei közti nRMSE nagysárendileg 35-40% kisebb, mint az individuális hibák átlaga. A kijelentéshez hozzátartozik, hogy az erőművek között szerepelnek 500 kW alatti, illetve több MW beépített teljesítményű napelemparkok is, amely differencia vélhetően visszafogja a területi eloszlásból adódó portfólió hatást. Az alábbi ábrán

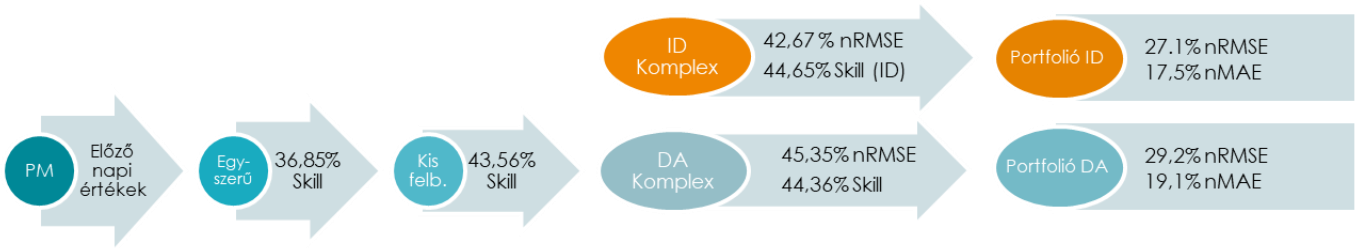
láthatóak a konkrét eredmények a két vizsgált időhorizonton, Komplex prediktorokkal, hangolt hiperparaméterek mellett.



5. ábra – nRMSE és nMAE eredmények a Komplex hangolt esetekben a teljes 16 parkból álló erőműcsoportra.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Az előzőekben részleteiben ismertetett vizsgált a lehetőségeket, különböző eseteket, és a bennük rejlő potenciált a legegyszerűbb perzisztencia alapú előrejelzéstől indulva, a 6. ábrán látható folyamatábra mutatja be szemléletesen. Látható, hogy a legjobb prediktor kombinációval 44,36%-os javulás (Skill score) érhető el a perzisztencia modellhez képest DA esetben, illetve hasonló tapasztalható ID esetben is, 5%-kal kisebb abszolút hiba mellett. Utóbbi a későbbi, vélhetően pontosabb időjárás előrejelzésből adódik. Mindez portfolió szinten vizsgálva a menetrendezést, a korábban említett 35-40%-kal kisebb hibákat eredményez.



6. ábra – Szemléltető folyamatábra az előrejelzés hibáinak alakulásáról, csökkenő sorrendben haladva.

Ezek alapján a következőkben kiemelt javaslatok kerültek megfogalmazásra.

- A legjobb előrejelzés a Komplex prediktor variációval érhető el.
- A nappálya értékeken, és napi átlagos sugárzás előrejelzésen alapuló menetrendezés erős alternativája lehet a negyedórás felbontású meteorológiai prognózisokon alapuló módszereknek.
- Javasolt a Kernel Ridge, a Support Vector Machines, illetve a Multi-Layer Perception algoritmusok alkalmazása.

- Érdemes a hiperparaméterek hangolását elvégezni, illetve az ID menetrend módosítási lehetőségekkel élni.
- Több napelempark egyidejű menetrendezése kisebb relatív hibával jár, ezért érdemes lehet törekedni ezen szolgáltatás kiterjesztésére.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönöm az Országos Meteorológiai Szolgálatnak az időjárás előrejelzéseket, illetve a Magyar Villamos Művek Zrt.-nek a termelési adatokat.

A kutatás az Innovációs és Technológiai Minisztérium ÚNKP-21-2 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal

Új Nemzeti Kiválóság Program

6. HIVATKOZÁSOK

[1] International Energy Agency, “Renewables 2020 – Analysis - IEA,” Iea, 2020.
[2] Innovációs és Technológiai Minisztérium, Nemzeti Energia-és Klímaterv. 2020.
[3] “Prémium adatpublikáció - MAVIR - Magyar Villamosenergia-ipari Átviteli Rendszerirányító Zrt.” https://www.mavir.hu/web/mavir/premium-adatpublikacio (accessed Aug. 09, 2021).
[4] T. Hong, P. Pinson, Y. Wang, R. Weron, D. Yang, and H. Zareipour, “Energy Forecasting: A Review and Outlook,” Ieee Open Access Journal of Power and Energy, vol. 7, pp. 376–388, Oct. 2020, doi: 10.1109/OAJPE.2020.3029979.
[5] J. Antonanzas, N. Osorio, R. Escobar, R. Urraca, F. J. Martinez-de-Pison, and F. Antonanzas-Torres, “Review of photovoltaic power forecasting,” Solar Energy, vol. 136, pp. 78–111, 2016, doi: 10.1016/j.solener.2016.06.069.
[6] D. Yang, J. Kleissl, C. A. Gueymard, H. T. C. Pedro, and C. F. M. Coimbra, “History and trends in solar irradiance and PV power forecasting: A preliminary assessment and review using text mining,” Solar Energy, vol. 168, pp. 60–101, Jul. 2018, doi: 10.1016/J.SOLENER.2017.11.023.
[7] V. Vovk, “Kernel Ridge Regression,” in Empirical Inference: Festschrift in Honor of Vladimir N. Vapnik, B. Schölkopf, Z. Luo, and V. Vovk, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 105–116. doi: 10.1007/978-3-642-41136-6_11.
[8] C.-C. Chang and C.-J. Lin, “LIBSVM: A Library for Support Vector Machines,” 2001. Accessed: Apr. 07, 2021. [Online]. Available: www.csie.ntu.edu.tw/
[9] O. Kramer, “K-Nearest Neighbors,” in Dimensionality Reduction with Unsupervised Nearest Neighbors, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 13–23. doi: 10.1007/978-3-642-38652-7_2.
[10] L. Breiman, “Random Forests,” 2001.
[11] J. H. Friedman, “Greedy function approximation: A gradient boosting machine,” Annals of Statistics, vol. 29, no. 5, pp. 1189–1232, 2001, doi: 10.1214/aos/1013203451.
[12] D. P. Kingma and J. Lei Ba, “ADAM: A METHOD FOR STOCHASTIC OPTIMIZATION,” 2015.

Dr. Mohos András, Dr. Ladányi József, Divényi Dániel
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Villamos Energetika Tanszék

Csőszerű vezetők felületi impedanciáinak meghatározása a 2–150 kHz frekvenciatartományban

A 2–150 kHz frekvenciatartomány elektromágneses összeférhetőség szempontjából egészen az utóbbi évtizedig egy szabályozatlan sáv volt, amely számos elektromágneses interferenciát okozott. Az utóbbi évtized törekvéseinek köszönhetően a szabványosítás helyzete sokat javult, azonban néhány kardinális kérdés (pl. vizsgálati módszerek, összeférhetőségi tartományok stb.) kezelésében továbbra sincs egyetértés, így az elektromágneses összeférhetőség nem valósul meg. Cikkünk a fenti problémakör megoldásához kíván hozzájárulni azzal, hogy a 2–150 kHz frekvenciatartomány zavarkibocsátó és zavarnyelő berendezései közt lévő csatolási útként szolgáló vezetők felületi impedanciáit vizsgálja. Amíg korábbi publikációink a sodronyok vizsgálatát mutatták be, addig jelen cikkünk fókusza a csőszerű vezetők vizsgálata. Ezek felületi impedanciáit laboratóriumi méréssel, valamint numerikus és analitikus számításokkal is meghatároztuk.

The 2–150 kHz frequency range was unregulated until the last decade in the electromagnetic compatibility point of view, which caused several interferences. Thanks to the endeavour of last decade the state of standardization has improved much. However, in some cardinal questions there is still no agreement (e.g. test methods, compatibility range). Our paper intends to contribute to this issue with the investigation of surface impedance of coupling path between emitters and victims in the 2–150 kHz frequency range. While our previous papers dealt with stranded conductors, this paper focuses on cylindrical conductors. The surface impedance of a cylindrical conductor was determined by laboratory measurements, furthermore by numerical and analytical calculations.

Kulcsszavak: **elektromágneses összeférhetőség; felületi impedancia; csőszerű vezető**

1. BEVEZETÉS

A hagyományos villamosenergia-rendszer a különböző technológiák fejlődésének köszönhetően jelentős átalakulás előtt áll. Az ún. *prosumer*ek (olyan felhasználók, akik fogyasztók és termelők is lehetnek, pl. napelemes rendszerrel rendelkező háztartások) megjelenése új kihívásokat hozott a villamosenergia-rendszer üzemeltetői oldalán. Az egyirányú energiaáramlás kétirányúvá válik, amely kiegészül a készülékek közti kommunikációval is, így kialakítva az okos hálózatot, vagy idegen terminológia szerint a *smart grid*et. Az okos hálózatok kialakulásának folyamata számos műszaki problémát vet fel.

Ilyen például az elektromágneses összeférhetőség (EMC) biztosítása, különös tekintettel a 2–150 kHz frekvenciatartományra, amelynek oka elsősorban a megfelelő szabványok hiánya. A nemzetközi publikációk alapvetően három kardinális pontot tártak fel, amelyek következtében az összeférhetőség jelenleg sok esetben nem valósul meg [1]: egyrészt a megszokott

frekvenciatartomány-alapú zavartűrés vizsgálatok helyett szükség lehet időtartomány-alapú vizsgálatok bevezetésére, amely figyelembe veszi a zavarok időbeli varianciáját, a kialakuló feszültség- és áramfelfutásokat. Másrészt harmonizálni kell a mérési összeállításokkal kapcsolatos előírásokat, mert jelenleg a különböző szabványok eltérő értékeket írnak elő például az alkalmazandó műhálózatra vonatkozóan. Végül a zavarkibocsátási és zavartűrési határértékeket, valamint az összeférhetőségi szinteket a többi releváns szabvány határértékeit figyelembe véve kell megválasztani.

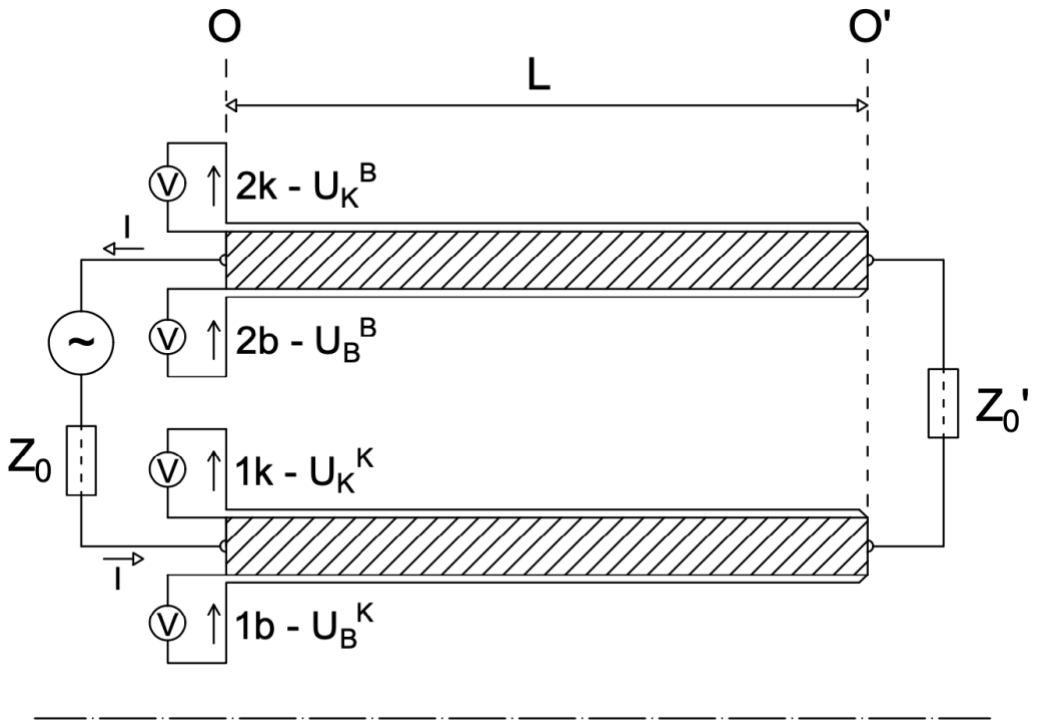
Amint azt a témában egyik legjobb összefoglaló irodalom [2] is feltárta, a szabványosítás csak a megfelelő fizikai folyamatok feltárásával és megértésével zárulhat eredményesen. Ennek egyik sarkalatos pontja a zavarkibocsátók és zavartűrők közti csatolási út ismerete, amely jelen esetben a közép- és kifeszültségű elosztóhálózat elemeinek frekvenciafüggő átviteli jellemzőit foglalja magába. Különösen fontos ezen elemek frekvenciafüggő ellenállásának ismerete, mivel rezonanciajelenségek esetén ez határozza meg a csillapítást. Korábbi cikkeink a sodronyok frekvenciafüggő jellemzőinek vizsgálatával foglalkoztak, jelen cikkünk a csőszerű vezetők felületi impedanciájának (ellenállásának) vizsgálatát tűzte ki célul. A csőszerű vezetők vizsgálata szintén fontos, mivel sok hálózati konfigurációban találkozhatunk csőszerű vezetőkkel (pl. védőcsőbe húzott kábelek, de az erőátviteli és távközlő kábelek köpenyszerkezete is több, önmagában homogén anyagú csőszerű vezető réteget is tartalmaz).

Cikkünk felépítése a következő: a jelen bevezető fejezetet követően a második fejezet a vizsgált felületi impedancia definícióját mutatja be. Ezt követően a felületi impedancia meghatározásának módjait ismertetjük röviden: a harmadik fejezetben laboratóriumi méréssel, a negyedik fejezetben numerikus számításokkal, végül az ötödik fejezetben analitikus összefüggések segítségével. A hatodik pontban az egyes módszerekkel kapott eredményeket mutatjuk be.

2. FELÜLETI IMPEDANCIA DEFINÍCIÓJA

Egy tömör vezető impedanciáján általában a külső felületi impedanciáját értjük külső áram-visszavezetéssel. A felületi impedancia általános definíciója [3] irodalomban található, az ezzel kapcsolatos gyakorlati alkalmazások a [4] irodalomban olvashatók. A felületi impedanciák értelmezéséhez segítséget ad az 1. ábra, amely két koaxiális véges falvastagsággal rendelkező cső felső részének a metszetét ábrázolja. Az ábrán a pontozott szaggatott vonal jelöli a szimmetriatengelyt.

Egy csőszerű vezető esetén négy felületi impedancia értelmezhető annak függvényében, hogy külső (1k, 2k) vagy belső felületi impedanciáról (1b, 2b) beszélünk, illetve az áramvisszavezetés a cső belsejében (2k, 2b) vagy a csövön kívül (1k, 1b) valósul meg. A felületi impedancia a cső fala mentén elhelyezett, ahhoz teljesen hozzásimuló, de attól elszigetelt vezető segítségével mérhető és értelmezhető. A felületi impedanciát a megfelelő felületen mért feszültség és a cső visszavezetéssel megjelölt áramának hányadosaként kapjuk meg. Például az 1 cső esetén a külső felületi impedancia külső visszavezetéssel (1k eset) az 1. összefüggéssel számítható.



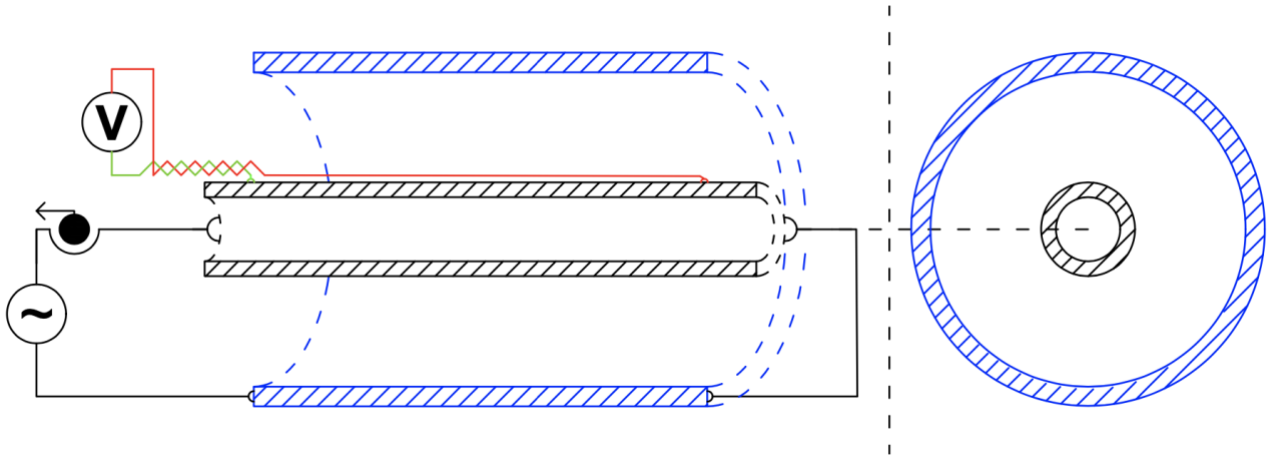
1. ábra – Felületi impedanciák értelmezése

$$Z_k^k = \frac{U_k^k}{I} \tag{1}$$

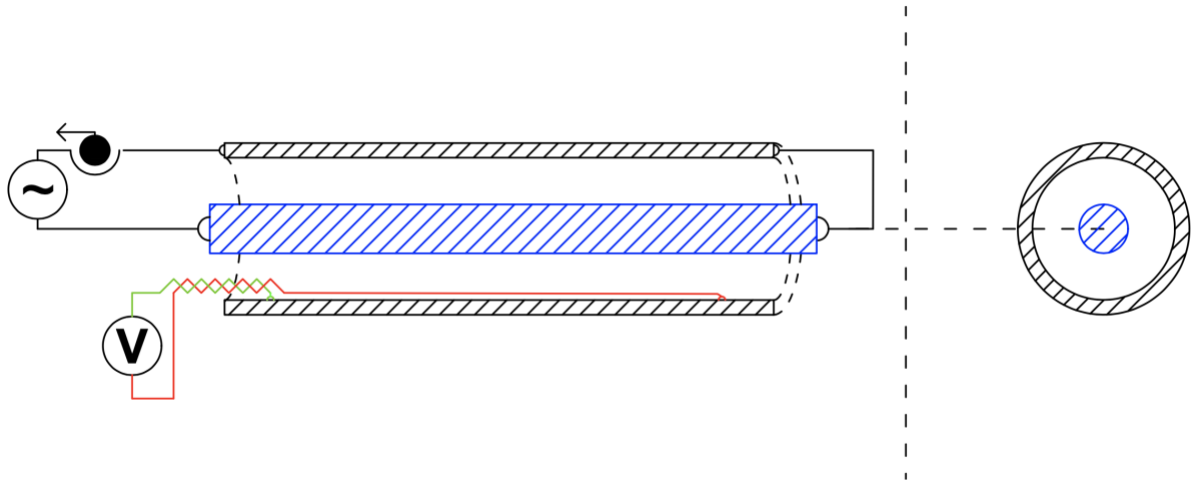
Ahol az alsó index a felületi feszültség mérésének felületre, még a felső index az áramvisszavezetés helyére utal. A többi felületi impedancia az 1. összefüggésbe a megfelelő felületen mérhető feszültség behelyettesítésével adódik.

3. LABORATÓRIUMI MÉRÉS

A csőszerű vezetők felületi impedanciáit laboratóriumi mérésekkel meg lehet állapítani. A 25, 50, 95 mm^2 AASC sodronyokra vonatkozó mérési eredményeinket már korábban megjelentettük [5]. Jelen mérések nagyban építenek az előzmény publikációban leírtakra. Mint azt már korábban említettük, egy csőszerű vezető esetén négy felületi impedancia értelmezhető. Ezek közül a 2. és 3. ábra bemutatja az azonos indexű Z_k^k és Z_b^b felületi impedanciák mérésének sémáját. Az ábrákon a fekete sraffozott objektum a vizsgált csőszerű vezetőt, még a kék színű az áramvisszavezetést jelöli. Ez külső visszavezetés esetén egy 45 cm átmérőjű, 4 mm falvastagságú csövet jelent, még belső visszavezetés esetén egy 10 mm átmérőjű tömör vezetőt.



2. ábra – Elvi séma a fekete vonalkázású cső Z_k^k impedanciájának méréséhez külső áramvisszavezetéssel



3. ábra – Elvi séma a fekete vonalkázású cső Z_b^b impedanciájának méréséhez belső áramvisszavezetéssel.

A mérés elve, hogy a vezetőn egy ismert frekvenciájú és nagyságú I áramot hajtunk át, majd a megfelelő felületen elhelyezett felületi vezető (piros színnel jelölve) segítségével mérjük a mintadarab egy bizonyos hosszán kialakuló megfelelő V felületi feszültségesést. A felületi feszültség és az áram hányadosa – megfelelő korrekciók végzése után – a definíciónak megfelelően a felületi impedanciát adja.

A következőkben röviden összefoglaljuk, milyen problémák merültek fel a mérés során, és azokat hogyan kezeltük. Az azonos indexű felületi impedanciák (Z_k^k és Z_b^b) mérésénél jellemző probléma, hogy a felületi vezető az oda- és visszavezetés közti fluxussal átjárt térrészben helyezkedik el. Ez a vizsgált cső felülete, valamint a felületi vezető közti légrés méretétől függő külső járulékos induktív reaktanciát eredményez, amely a méréskor hozzáadódik a felületi impedancia értékéhez. Nagyobb frekvenciákon ez még akkor is jelentős hibalehetőséget hordoz magában, ha csak a felületi impedancia valós részére vagyunk kíváncsiak, mivel a 90°-hoz közeli mért fázisszögből az ellenállás

kiszámítása jelentős hibával járhat. Ezt a jelenséget két módon orvosoltuk: egyrészt a felületi vezetőt a cső falán, szorosan helyeztük el, ezzel csökkentve a járulékos reaktancia értékét. Másrészt a kiértékelést egy MATLAB alapú módszerrel végeztük, amely szöghiba kompenzációt is tartalmaz.

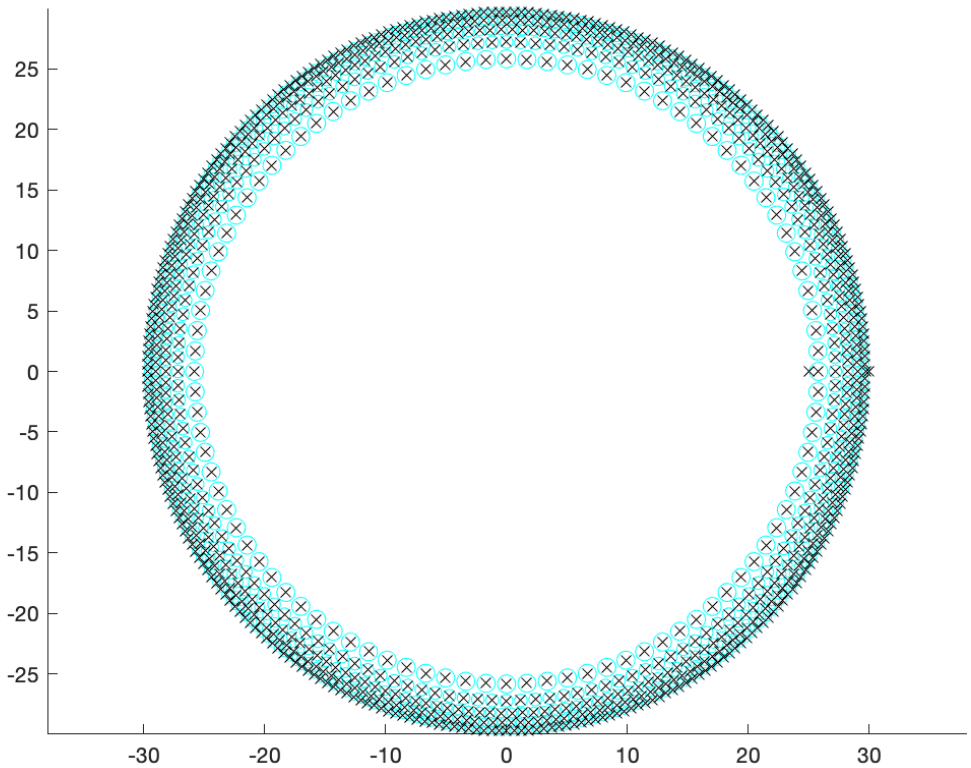
A vegyes indexű felületi impedanciákat (Z_b^k és Z_k^b) csak 8179 Hz-ig tudtuk mérni, amelynek két oka van: egyrészt ez a legnagyobb frekvencia, amit a nagyobb teljesítményű, 30 A értékű áramgenerátoros táplálást biztosító generátorunkkal ki tudtunk adni. Az ennél nagyobb frekvenciákon használt tápegység kimeneti árama legfeljebb 5 A, azonban ezt gyakorlatilag már 10 kHz-en sem képes biztosítani, 150 kHz-en pedig jellemzően csak 1 A áramot tud áthajtani az áramkörön. A felületi feszültség a frekvencia növelésével (az áram csökkenésével) tehát egyre kisebb lesz. A másik ok, hogy a vegyes indexű felületi impedanciák esetén az áramkiszorítás jelensége – az azonos indexű impedanciáktól eltérően – fordítva érvényesül. Külső visszavezetés esetén a cső belső falán, míg belső visszavezetés esetén a cső külső falán mérendő a felületi feszültség értéke. Ezek a feszültségek a fenti két hatás miatt 10 kHz-en már az általunk használt oszcilloszkóp zavarszintjébe estek, az eredmények így csak a 40–8179 Hz tartományban voltak értékelhetők. Ez a mérés tehát jobb zavarszűrés és nagyobb gerjesztőáram együttes alkalmazásával lenne megvalósítható.

4. NUMERIKUS SZÁMÍTÁSOK

A numerikus számításokat az elemi-vezetőkre bontással (filament technikával) végeztük. Mivel a módszer egy korábbi Elektrotechnika számban [6] általánosan, továbbá általunk egyszerű sodronyokra vonatkozóan [7] már bemutatásra került, így ezt a jelen cikkben csak röviden tesszük meg. Cikkünk célja alapvetően a csőszerű vezetők felbontására vonatkozó specialitások kiemelése.

A filament technikát az 1970-es években alkalmazták először energia-átviteli kábelek termikus szimulációjára, továbbá kábelekben fellépő belső erők vizsgálatára. A módszer első lépése – az elemi vezetők módszeréhez hasonlóan – a vizsgált vezetőrendszer elemi szálakra bontása. Az egyes elemi szálak alakja és mérete különbözhet egymástól, azonban az elemi szálakat úgy kell kialakítani, hogy azokban az áramkiszorítás jelenség elhanyagolható legyen, azaz az áramsűrűség állandónak legyen tekinthető.

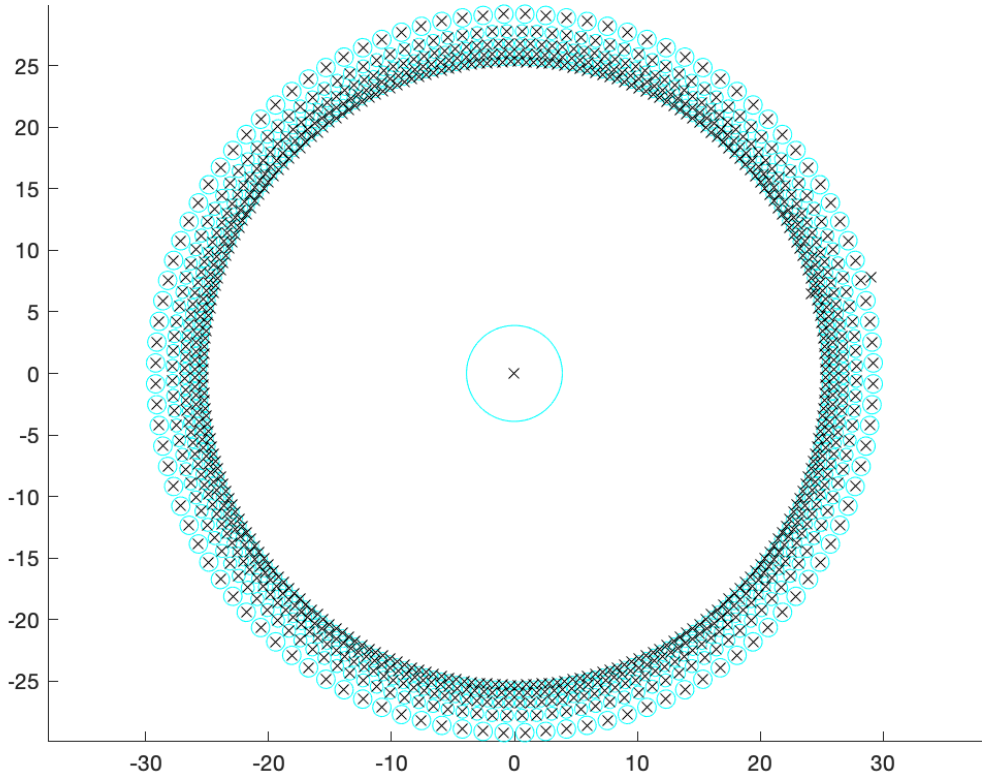
A fentiek alapján látható, hogy a különböző felületi impedanciák vizsgálata különböző felbontást igényel. A Z_k^k felületi impedancia vizsgálata esetén a felbontási mód megegyezik a korábban tömör vezetőknél is használt felbontási metódussal: a csőszerű vezetőt először sugárirány mentén öt körgyűrűre bontjuk úgy, hogy az egyes körgyűrűk árama megegyezzen egymással (ez a skin hatás miatt kintről befele egyre vastagabb körgyűrűket eredményez), majd a körgyűrűket sugárirányú egyenesekkel is felosztjuk. Így összességében olyan körcikk alakú elemi vezetők jönnek létre, amelyeket két sugárirányú egyenes és két körív határol. Megjegyzendő, hogy a visszavezetés leképzésére nincs szükség, mivel a koncentrikus külső visszavezetés nem okoz közelségi hatást a mért vezetőben ezért megfeleltethető a távoli földvisszavezetés esetének. Végül meg kell határozni az így kapott elemi vezetők redukált sugarát. Példaként a 4. ábra bemutatja a felbontást 400 Hz frekvencián. Az ábra nem magukat az elemi vezetőket, hanem azok redukált sugarát és középpontját tünteti fel, amelyek a további számítások bemenő adatai.



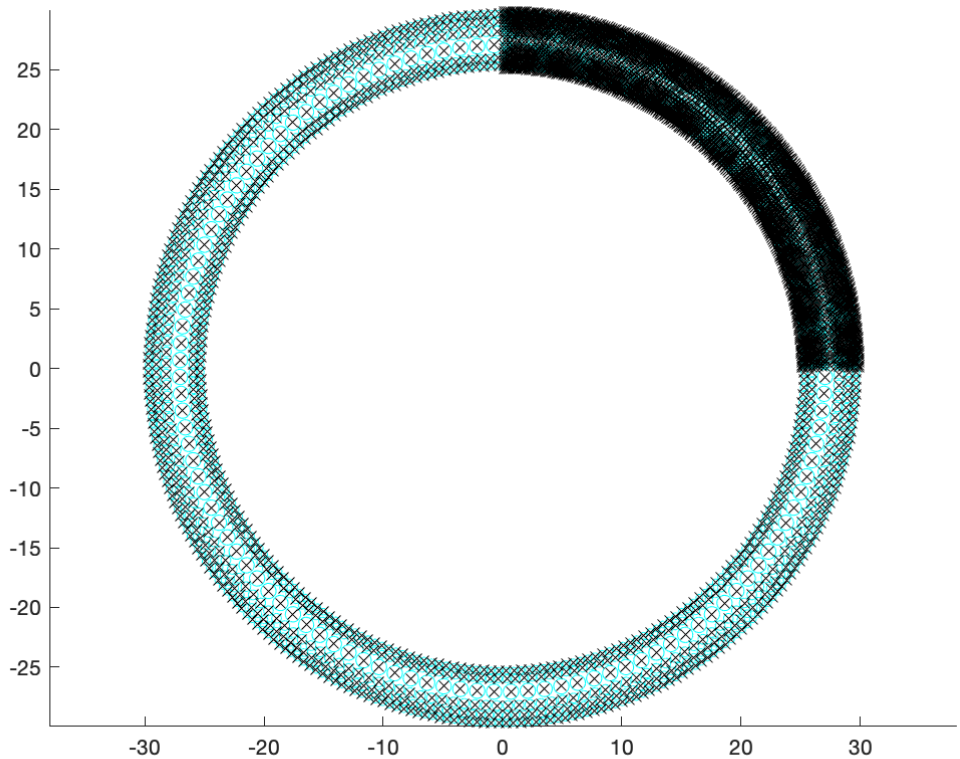
4. ábra – Alumíniumcső felbontása elemi vezetőkre Z_k^k meghatározásához (a távolságok mm-ben értendők)

Z_b^b esetén az árameloszlás a Z_k^k esetén tapasztalt áram-kiszorítással ellentétes, „árambeszorítás” jellegű lesz. Ugyanis egy áramkört képező hurok vezetőiben kialakuló áramelosztás az I^2Z energia minimum elérése szerint alakul. Ennek megfelelően az impedanciaminimum elvét követi. Ebből adódóan belső áram-visszavezetés esetén a közelségi hatásban megnyilvánuló áramkiszorítás jelensége a cső belső falán eredményez nagyobb áramsűrűséget. A felbontást tehát fordítva kell elvégezni, az elemi szálaknak a cső belső felületén kell kisebbeknek lenniük. A korábbiakhoz hasonlóan itt is öt elemi vezető réteget hoztunk létre, a felbontásra példaként az 5. ábrán ismét a 400 Hz frekvenciás felbontást láthatjuk.

A vegyes indexű (Z_k^b és Z_b^k) felületi impedanciákra kézenfekvő lenne a korábban látott, visszavezetés típusának megfelelő felbontás alkalmazása, ez azonban nem vezet jó eredményre. Ennek oka, hogy a felületi vezetőt leképező ún. *mérőfilament* ilyenkor a cső nagyobb elemi szálakra bontott oldalán található. Ez az árameloszlás szempontjából ugyan megfelelő lenne, azonban a mérőfilamenthez közel eső filamentek „elnagyolása” hibás eredményhez vezet. Ezt kiküszöbölve a mérőfilament közvetlen közelében lévő 3/12-ed nagyságú csődarabot még részletesebben, tizenöt elemi vezető rétegre bontottuk fel. A mérőfilamentet ennek szimmetriatengelyén helyeztük el. A vegyes indexű felületi impedanciák meghatározásához alkalmazott felbontás a 6. ábrán látható.



5. ábra – Alumíniumcső felbontása elemi vezetőkre Z_b^b meghatározásához (a távolságok mm-ben értendők)



6. ábra – Alumíniumcső felbontása elemi vezetőkre Z_k^b és Z_b^k meghatározásához (a távolságok mm-ben értendők)

A felbontást követően a számítási metódus már megegyezik a [7] cikkben bemutatott eljárással. Az első feladat az elemi vezetők ön- és kölcsönös impedanciái által alkotott impedancia mátrix meghatározása, amely például a Carson-Clem összefüggésekkel lehetséges. Ezt követően invertálni kell az impedanciamátrixot, majd az így kapott admittancia mátrixon el kell végezni mindkét irányú redukciót. Végül a felületen kialakított mérőfilament áramának és egyenáramú ellenállásának szorzataként adódó felületi feszültség és a vezető teljes áramának hányadosaként adódik a felület impedancia a 2. összefüggés szerint.

$$Z_b = \frac{\rho I_s}{A_S I} \tag{2}$$

Ahol ρ/A a mérőfilament hosszegységre eső egyenáramú ellenállása, I_s a mérőfilament árama, I a cső teljes árama.

5. ANALITIKUS ÖSSZEFÜGGÉSEK

A nem ferromágneses anyagú hengeres vezetők felületi impedanciája meghatározható analitikus összefüggések segítségével is [3],[4]. A következőkben megadjuk az összefüggéseket, majd az utolsó egyenlet alatt a jelölések magyarázatát.

A külső felületi impedancia külső visszavezetéssel a 3. összefüggéssel számítható.

$$Z_k^k = \frac{1}{2\pi r_k \mathrm{D}} \sqrt{\frac{j\omega\mu_0}{\sigma}} \left[\mathbf{I_0}(\gamma r_k)\mathbf{K_1}(\gamma r_b) + \mathbf{K_0}(\gamma r_k)\mathbf{I_1}(\gamma r_b)\right] \tag{3}$$

A belső felületi impedancia belső visszavezetéssel a 4. összefüggés szerint adódik.

$$Z_b^b = \frac{1}{2\pi r_b D} \sqrt{\frac{j\omega\mu_0}{\sigma}} \left[\boldsymbol{I_0}(\gamma r_b)\boldsymbol{K_1}(\gamma r_k) + \boldsymbol{K_0}(\gamma r_b)\boldsymbol{I_1}(\gamma r_k)\right] \tag{4}$$

Végül a külső felület impedancia belső visszavezetéssel, továbbá a belső felületi impedancia külső visszavezetéssel hengeres vezetők esetén egymással megegyezik, és az 5. összefüggéssel számítható.

$$Z_b^k = \frac{1}{2\pi r_k \mathrm{D}} \sqrt{\frac{j\omega\mu_0}{\sigma}} \left[\mathbf{I_0}(\gamma r_b)\mathbf{K_1}(\gamma r_b) + \mathbf{K_0}(\gamma r_b)\mathbf{I_1}(\gamma r_b)\right] \tag{5}$$

A 3-5. összefüggésekben szereplő terjedési együttható (γ) a kapacitások elhanyagolásával a 6, míg D értéke a 7. összefüggéssel határozható meg.

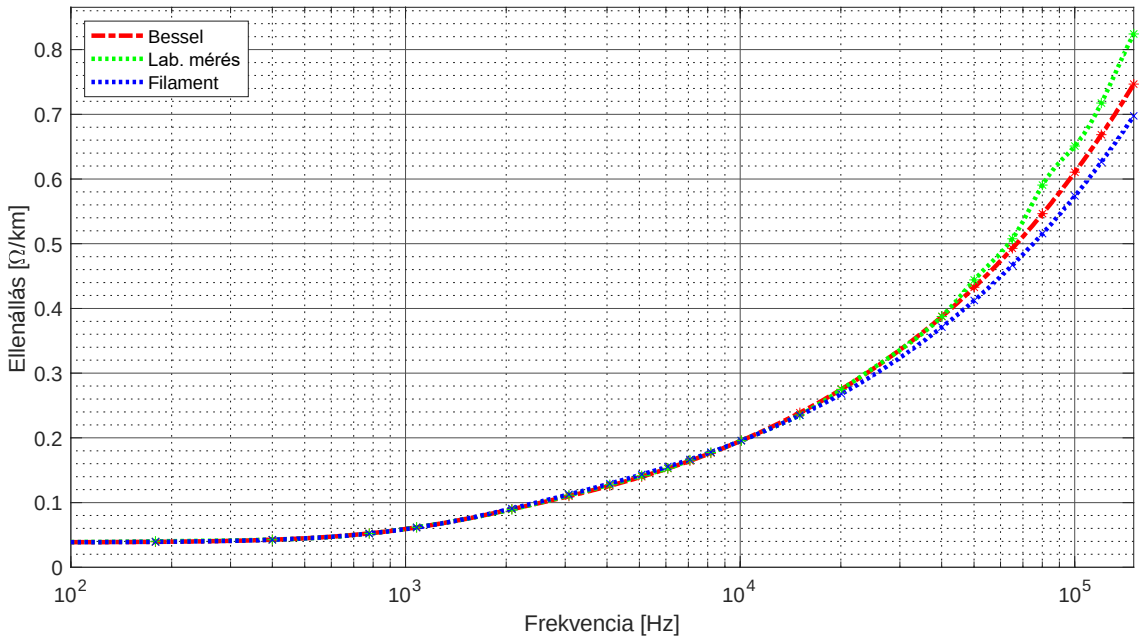
$$\gamma = \sqrt{j\omega\mu_0\sigma} \tag{6}$$

$$\mathrm{D} = \mathbf{I_1}(\gamma r_k)\mathbf{K_1}(\gamma r_b) + \mathbf{I_1}(\gamma r_b)\mathbf{K_1}(\gamma r_k) \tag{7}$$

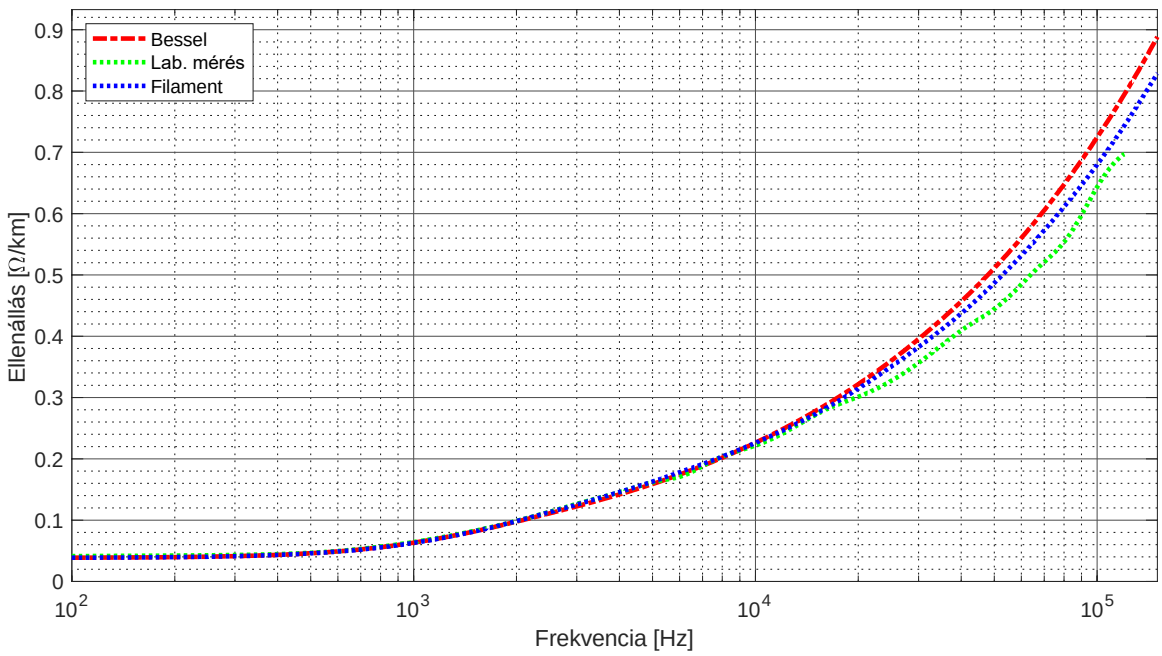
A fenti összefüggésekben $\mathbf{I_\alpha}(x)$ az elsőfajú *x* képzetes argumentumú α indexű módosított Bessel-függvény; $\mathbf{J_\alpha}(x)$ az elsőfajú *x* képzetes argumentumú α indexű Bessel-függvény; $\mathbf{K_\alpha}(x)$ a másodfajú *x* képzetes argumentumú módosított α indexű Bessel-függvény; ω a körfrekvencia; μ_0 a vákuum permeabilitása; σ a vezetőképesség; r_b a cső belső sugara, r_k a cső külső sugara.

6. EREDMÉNYEK ÉS KÖVETKEZTETÉSEK

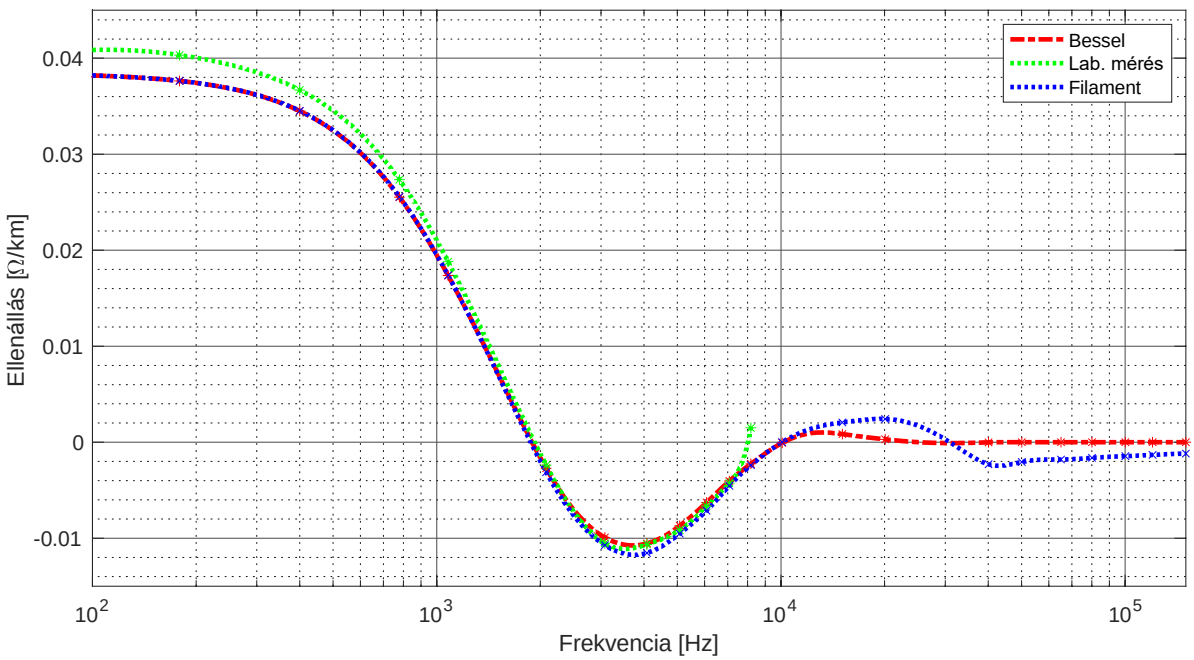
A 2–4. fejezetekben bemutattuk, milyen módszerekkel lehet meghatározni a csőszerű vezetők felületi impedanciáit. A jelen fejezetben ismertetjük az általunk vizsgált 60/55 mm átmérőjű, alumínium csőre kapott eredményeket. Az egyes felületi impedanciák valós részei a 7-10. ábrákon láthatók. Vizsgálataink csak az ellenállások meghatározására korlátozódtak, mivel egy valós áramköri elrendezésben a reaktív komponens nagyságát leginkább az elrendezésből adódó külső reaktancia fogja meghatározni.



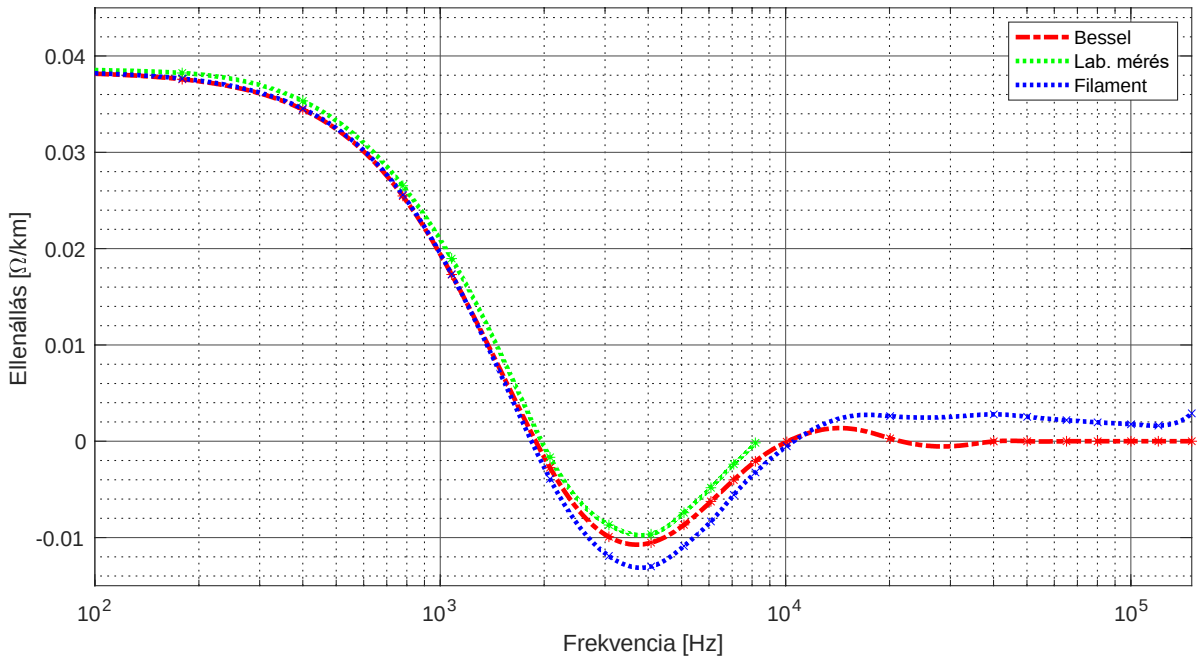
7. ábra – Külső felületi ellenállás külső visszavezetéssel (R_k^k)



8. ábra – Belső felületi ellenállás belső visszavezetéssel (R_b^b)



9. ábra – Külső felületi ellenállás belső visszavezetéssel (R_k^b)



10. ábra – Belső felületi ellenállás külső visszavezetéssel (R_b^k)

Szembetűnő, hogy az azonos indexű felületi impedanciák közül R_k^k értéke minden frekvencián kisebb, mint R_b^b. Ennek oka, hogy míg R_k^k esetén – a koaxiális visszavezetés miatt – csak a skin-hatás érvényesül, addig R_b^b esetén a skin- és a belső áramvisszavezetés közelségi hatása is szerepet játszik. A két hatás összességében nagyobb veszteséget hoz létre, amely a megnövekedett ellenállásban is követhető.

A vegyes indexű impedanciák (különösen az ellenállás) számítása és mérése is nehéz feladat. A frekvencia növelésével a felületi vezetőben mérhető feszültség egyre kisebb. Ennek pontos meghatározását mérés esetén a mérési zaj, számítások esetén a felbontási kapacitás és a numerikus instabilitás nehezíti. Ez utóbbi mindkét vegyes indexű ellenállás eredményén jól látszik, ahol a 20 kHz és 40 kHz-en számított szomszédos pontokban akár még hirtelen előjelváltás is bekövetkezhet.

7. HIVATKOZÁSOK

[1] CIGRÉ, „Assessment of conducted disturbances above 2 kHz in MV and LV power systems”. Reference: 799, April, 2020

[2] Rönnberg, S.K., Bollen, M.H.J., Amaris, H., Chang, G.W., Irene, Y.H.G., Kocewiak, L.H., Meyer, J., Olofsson, M., Ribeiro, P.F., Desmet, J., „On waveform distortion in the frequency range of 2 kHz–150 kHz –Review and research challenges”. Electric Power Systems Research 150, 2017

[3] ITU-T DIRECTIVES, „Concerning the protection of telecommunication lines against harmful effects from electric power and electrified railway lines – Volume III: Capacitive, Inductive, and Conductive Coupling: Physical Theory and Calculation Methods”. 1989, ISBN 92-61-04041-1

[4] ITU-T DIRECTIVES, „Concerning the protection of telecommunication lines against harmful effects from electric power and electrified railway lines – Volume II: Calculating Induced Voltages and Currents in Practical Cases”. 1989, ISBN 92-61-04041-1

[5] Mohos A., „Sodronyok frekvenciafüggő átviteli jellemzőinek vizsgálata a 2 – 150 kHz tartományban”. Mechwart András Ifjúsági Találkozó, 2017

[6] Török B, Varjú Gy., „Tetszőleges alakú vezetőrendszer impedanciájának meghatározása az elemi vezetők módszerével”. Elektrotechnika, 72. évf. 1. sz., 1979

[7] Mohos A., Ladányi J., Divényi D., „Sodronyok impedanciájának meghatározása az elemi vezetők módszerével”. Mechwart András Ifjúsági Találkozó, 2018.

Németh Ádám
E.ON Észak-dunántúli Áramhálózati Zrt.

Kiserőműves tendenciák az E.ON Észak-dúnántúli elosztóhálózatán

Az elmúlt évek során rendkívül nagymértékben megnövekedett a kiserőműves igény létesítésére vonatkozó igény az Elosztói engedélyesekhez, melyek nagy kihí- vások elé állították az engedélyeseket.
Az előadás célja, hogy az érdeklődők betekintést nyerjenek az elmúlt évek kiserőműves irányvonalaiba. Hogyan változtatták a különböző támogatási rendszerek és jogszabályok az erőműves piac mozgását és ennek hatása miképp jelentkezett az Elosztói engedélyesnél. Az erőműves teljesítmények miképp alakultak az elmúlt néhány év során mind igény és mind a hálózatra kapcsolt erőművek tekintetében.
Miképp változott meg a megújuló és nem megújuló energiaforrást hasznosító erőművek aránya. Az elmúlt időszakban hálózatra kapcsolt, egyre meredekebben növekvő mennyiségű – és teljesítményű - termelők megjelenése miképp hat az elosztóhálózatra. A már üzemelő kiserőművek általi levonható tapasztalatok.
Kitekintés, hogy az előttünk álló időszakban milyen új kihívások várhatóak a téma tekintetében. A jogszabályváltozások, klímastratégia, megújuló támogatási rendszerek változtatási hatásai. Az egyre növekvő teljesítményű - főként naperőmű – termelők elosztóhálózatra gyakorolt következményei.

Németh Zoltán, Dr. Kuczmann Miklós
Széchenyi István Egyetem Automatizálási Tanszék

Aszinkron gépek tenzor szorzat elvű modellezése

A cikk célja röviden ismertetni az aszinkron gépek matematikai modellezését, melynek egyik módja az állapotváltozós leírás alkalmazása. Modellezése során a nemlineáris tagokat is figyelembe vevő tenzorszorzat modellezés kerül bemutatásra egy kiválasztott motorhoz, aminek köszönhetően nagyobb pontosság és jobb dinamikus tulajdonságokkal rendelkező szabályozó tervezhető. A mezőorientált szabályozást realizáló rendszerben összehasonlítjuk a klasszikus PI áramszabályozó és egy új, lineáris mátrixegyenlőtlenségen alapuló szabályozó statikus és dinamikus tulajdonságait. A szimulációs eredmények bemutatása során figyelmet szentelünk terhelésváltás okozta jelalakváltozásokra normális-eloszlású zajfüggvények alkalmazása mellett. Paraméterbizonytalansági vizsgálatot elvégezve konklúziókat vonunk le az adott szabályozók működéséről.

The aim of this article is to briefly describe the mathematical modelling of induction machines, here, state space modelling theory is shown. Tensor Product (TP) transformation based have been introduced in order to handle the nonlinear system, which resulted higher accuracy and better dynamic performance from controller point of view. Field Oriented Control (FOC) scheme has been applied in order to compare the classic PI current control and the newly introduced Linear Matrix Inequality (LMI) based controller behaviour.
During the controller examination, load torque has been taken into account while applying normal-distributed noise function for the measured values. Conclusions has been made about the robustness of the controllers by performing parameter uncertainty investigations

Kulcsszavak: aszinkron gép; tenzorszorzat modell; mezőorientált szabályozás; robusztus szabályozás

1. BEVEZETÉS

A villamos gépek egyre széleskörűbb használata, kutatása és fejlesztése jól megfigyelhető napjainkban, köszönhetően akár a robbanásszerű ipari fejlődésnek, akár az eMobilitás nagyléptékű térnyerésének. A két leginkább közlekedésben elterjedt motortípus az aszinkron, illetve az állandó mágneses szinkron motor, legyen szó akár tisztán elektromos, vagy hibrid járműről.

Munkám során elsősorban az aszinkron motorokkal, azok modellezésével, illetve hajtásszabályozásával foglalkozom. Az elektronika fejlődésének egyik következménye, hogy a villamos hajtások, mint kutatási terület, ismét reneszánszát éli, rengeteg új tanulmány jelenik meg, amely a hajtások energiafelhasználásának optimalizálásával, vagy akár szenzor nélküli irányításával foglalkozik.

A motorok nemlineáris matematikai leírásai rámutatnak az irányíthatóságban rejlő nehézségekre. Ezeket a nemlinearitásokat a klasszikus PI áramszabályozók tervezésénél elhanyagolva egy jól

bevált megoldást kaphatunk. Egy újabb megközelítés, amikor a nemlinearitást okozó tagokat modellezés során lineáris és időfüggő paraméterként veszünk figyelembe. Ezt a megközelítést nevezzük lineáris paraméter változójú (Linear Parameter Varying, LPV) modellezésnek.

Aszinkron motorok irányítása során a mezőorientált (Field Oriented Control, FOC) [1], és a közvetlen nyomaték (Direct Torque Control, DTC) szabályozás [2] a legelterjedtebb. Ebben a cikkben tárgyalt valamennyi szabályozó mezőorintált szabályozást realizál.

Cikkünk felépítése a következő: bevezetést követően az egyenletekben szereplő jelölésrendszert, majd az aszinkron gép modelleket mutatjuk be. A negyedik fejezet a szabályozó tervezését részletezi, majd az ötödik fejezetben a szimulációs eredmények kerülnek bemutatásra. Az utolsó fejezet az elért eredményeket foglalja össze és értékeli.

2. JELÖLÉSRENDSZER

A nagymennyiségű változó és könnyebb átláthatóság érdekében a változókat nem az egyenletek után, hanem ebben a fejezetben definiáljuk.

R_s	állórész ellenállás;
R_r	forgórész ellenállás;
L_s	állórész induktivitás;
L_r	forgórész induktivitás;
L_m	kölcsönös induktivitás;
i_{ds}	d-irányú állórész áram;
i_{qs}	q-irányú állórész áram;
v_{ds}	d-irányú állórész feszültség;
v_{qs}	q-irányú állórész feszültség;
ψ_{dr}	d-irányú forgórész fluxus;
ω_r	elektromos szögsebesség;
N	póluspár szám;
J	tehetetlenségi nyomaték;
D_f	súrlódási együttható;
T_L	terhelő nyomaték;
$\mathbf{x}$	állapotvektor;
$\mathbf{v}$	beavatkozó jel vektor;
$\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$	állapotváltozós leírás mátrixai;
$p_1 \dots p_4$	időfüggő paraméterek
$I_1 \dots I_4$	szinguláris értékek száma
w_{n,i_n}	súlyfüggvények
$\mathbf{S}$	rendszermátrix;
$\mathbf{K}, \mathbf{K_r}$	körerősítés mátrixok;

3. ASZINKRON MOTOR MODELLEK

3.1. Állapottér modell

Aszinkron gépek modellezésére több bevált módszer is létezik [3], attól függően, hogy mi az elsődleges célunk, illetve milyen információk állnak rendelkezésre. Munkánk során minden esetben a forgórész fluxushoz rögzített koordináta rendszerben felírt összefüggésekkel számoltunk, amit 3 fázisú egyenleteken végrehajtott Clark és Park transzformációkkal kapunk meg. Ezen felül lehetőség van a 4 állapotváltozó $\mathbf{x} = \left(i_{ds}\, i_{qs}\, \psi_{dr}\, \omega_r\right)^T$ mellé továbbiakat felvenni, amitől jelen esetben eltekintünk. Mellőzve valamennyi levezetést, a következő állapottér modell áll elő [4].

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s\sigma} - \frac{R_r L_m^2}{L_s L_r^2 \sigma} & \frac{R_r L_m}{L_r}\frac{i_{qs}}{\psi_{dr}} & \frac{R_r L_m}{L_s L_r^2 \sigma} & i_{qs} \\ -\omega_r - \frac{R_r L_m}{L_r}\frac{i_{qs}}{\psi_{dr}} & -\frac{R_s}{L_s\sigma} - \frac{R_r L_m^2}{L_s L_r^2 \sigma} & -\frac{L_m}{L_s L_r \sigma}\omega_r & 0 \\ \frac{R_r L_m}{L_r} & 0 & -\frac{R_r}{L_r} & 0 \\ 0 & \frac{3N^2 L_m}{2JL_r}\psi_{dr} & 0 & -\frac{D_f}{J} \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s\sigma} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s\sigma} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix}, \tag{1}$$

ahol $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$.

A következő, (1) összefüggésben található nemlinearitást okozó tagokat kell időfüggő paraméterekkel helyettesíteni.

$$\frac{i_{qs}^2}{\psi_{dr}} \tag{2}$$

$$i_{qs}\omega_r$$

(3)

$$-i_{ds}\omega_r \tag{4}$$

$$\frac{i_{ds}i_{qs}}{\psi_{dr}} \tag{5}$$

$$-\psi_{dr}\omega_r \tag{6}$$

$$i_{qs}\psi_{dr} \tag{7}$$

Eliminálni (2)-(7) tagokat legkevesebb 3 paraméterrel lehet, azonban korábbi kutatásunk [5], [6] már bebizonyította, hogy egy további paraméter bevezetése leegyszerűsíti a modellt és robusztusabb működést biztosít a szabályozó számára. Bevezetve $p_1 \dots p_4$ paramétereket, a következő állapottér modellt kapjuk

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s\sigma} - \frac{R_r L_m^2}{L_s L_r^2 \sigma} & \frac{R_r L_m}{L_r} p_1 p_4 & \frac{R_r L_m}{L_s L_r^2 \sigma} & p_1 \\ -p_3 - \frac{R_r L_m}{L_r} p_1 p_4 & -\frac{R_s}{L_s\sigma} - \frac{R_r L_m^2}{L_s L_r^2 \sigma} & -\frac{L_m}{L_s L_r \sigma} p_3 & 0 \\ \frac{R_r L_m}{L_r} & 0 & -\frac{R_r}{L_r} & 0 \\ 0 & \frac{3N^2 L_m}{2JL_r} p_2 & 0 & -\frac{D_f}{J} \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s\sigma} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s\sigma} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix}, \tag{8}$$

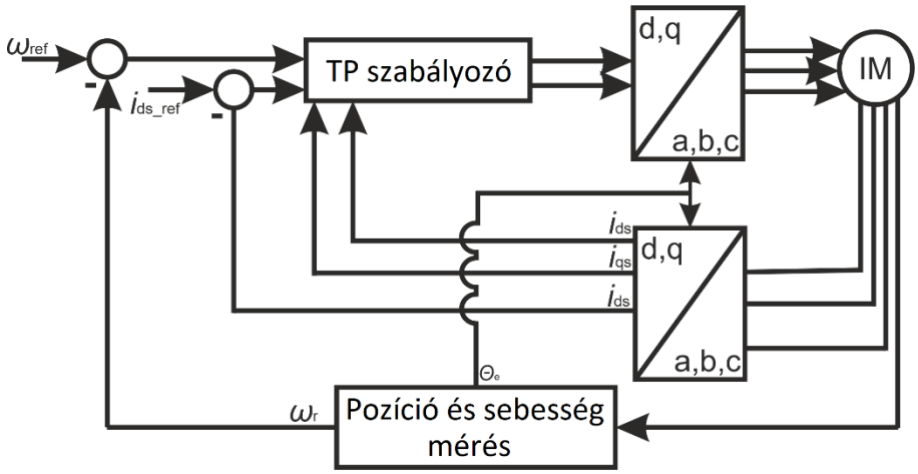
ahol

$$p_1 = i_{qs}, p_2 = \psi_{dr}, p_3 = \omega_r, p_4 = \frac{1}{\psi_{dr}}. \tag{9}$$

Ezen felül, pontosan működő szabályozó eléréséhez további két állapotváltozót kell bevezetni, hogy állapottér modell alapú integráló szabályozást valósítsunk meg. Ezáltal az állapotvektor sebességszabályozás esetén a következő lesz.

$$\mathbf{x} = \left(i_{ds}\ i_{qs}\ \psi_{dr}\ \omega_r\ sum_{id}\ sum_{omega}\right)^T \tag{10}$$

Mezőorientált szabályozást megvalósítva minden esetben szükséges egy visszacsatoló ág definiálása is. A visszacsatolt jellemzőt azonban sok esetben nem lehet mérni, mert nincsen fizikai tartalma. Ebben az esetben az állapottér modellből számolt értéket tudjuk felhasználni, vagy tervezhetünk külön erre a célra megfigyelőt is. Ebben a példában még az állapottér modellből visszacsatolt értékekkel fogok számolni, megfigyelő tervezése a jövőbeni terveim között szerepel. Visszacsatolásnál szükség van az i_{ds} és ω_r jellemzőkre, amit a $\mathbf{C}$ visszacsatoló mátrix segítségével kapunk meg. A mezőorientált szabályozás blokkdiagramja az 1. ábrán látható.



1. ábra – Mezőorientált szabályozás elvi felépítése.

A kibővített állapotváltozójú modell a következő kompakt alakban adható meg

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} \\ \mathbf{C} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{v}, \tag{11}$$

ahol $\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$.

Az aszinkron motor paramétereit az 1. táblázatban foglaltuk össze.

1. táblázat – Aszinkron motor paraméterek [7].

Motor paraméterek	Értékek
R_s	4,7Ω
R_r	5,2 Ω
L_m	0,169 H
L_s	0,1788 H
L_r	0,1790 H
J	0,00108 kg· m^2
D_f	0,00475 Nm·s
N	2

3.2. Tenzorszorzat modell

A tenzorszorzat (Tensor Product, TP) elvű modellezés alapvető célja, hogy az A és B mátrixokban található nemlinearitásokat több lineáris alrendszerre bontjuk szét, ahol a különböző alrendszereket bizonyos súlyokkal vesszük figyelembe üzemállapottól függően. Ennek megfelelően (8) a következő alakot fogja felvenni [8]

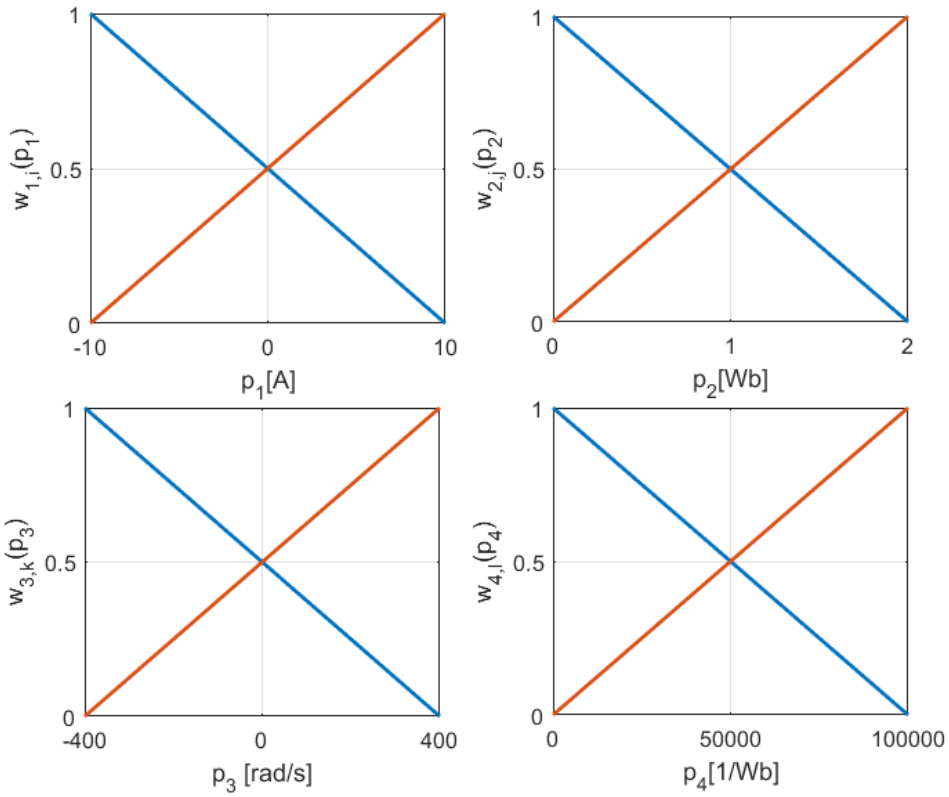
$$\dot{\mathbf{x}} \cong \sum_{i_1=1}^{I_1} \sum_{i_2=1}^{I_2} \sum_{i_3=1}^{I_3} \sum_{i_4=1}^{I_4} \prod_{n=1}^{4} w_{n,i_n}(x_n) \left(\mathbf{A}_{i_1,i_2,i_3,i_4} \mathbf{x} + \mathbf{B}_{i_1,i_2,i_3,i_4} \mathbf{v} \right). \tag{12}$$

Modell előkészítésének első lépéseként meg kell adni a (9) összefüggésben definiált paraméterek intervallumát, melyek minden esetben a motorra jellemző fizikai korlátok, jelen esetben $p_1: [-10,10]$, $p_2: [0,2]$, $p_3: [-400,400]$, $p_4: [0,100000]$. Ezeket az intervallumokat felbontva 20-20 egyenlő részre

megkapjuk az $\Omega \in \mathbf{R}^{20\times20\times20\times20}$ teret. A diszkretizált rendszer tenzor megadható a (14) és Ω felhasználásával.

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{20\times20\times20\times20\times6\times8} \tag{13}$$

Magasabb rendű szinguláris értékekre bontva (Higher Order Singular Value Decomposition, HOSVD) [9] az $\mathbf{S}$ tenzor első négy dimenzióját, kapunk paraméterenként kettő nagy értékű szinguláris értéket. Felhasználva ezeket a szinguláris értékeket előállíthatók a CNO típusú súlyfüggvények, amely a 2. ábrán látható. Részletes leírás a HOSVD műveletről, a szinguláris értékek használatáról és a súlyfüggvény típusokról megtalálhatók előző kutatásainkban [5], [6].

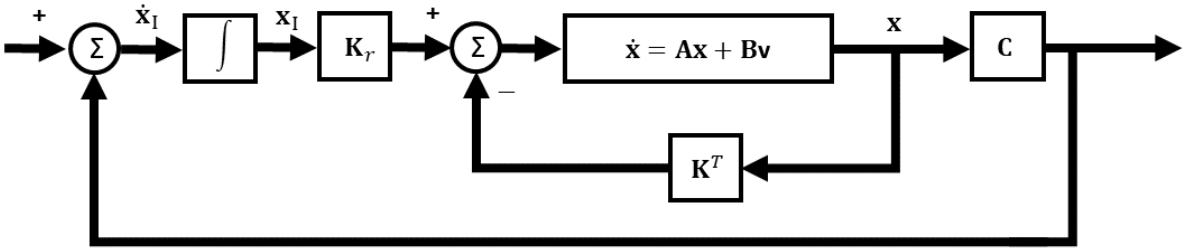


2. ábra – A TP modell CNO típusú súlyfüggvényei.

4. SZABÁLYOZÓ TERVEZÉSE

Állapotvisszacsatoláson alapuló szabályozó tervezésének blokkdiagrammja a 3. ábrán látható, ahol a beavatkozó jelet a következő összefüggéssel lehet megadni

$$\mathbf{v} = -[\mathbf{K} \quad \mathbf{K}_\mathrm{r}]\mathbf{x}. \tag{14}$$



3. ábra –Állapotvisszacsatolt szabályozó tervezése.

A $\mathbf{K}$ és $\mathbf{K}_\mathrm{r}$ körerősítések szétválasztása azért indokolt, mert így külön tervezhető a körerősítés értéke az állapottér modellnél, illetve az integráló szabályozás megvalósítása során. Fontos megjegyezni, hogy ezek a körerősítések a hiba mértékétől és az üzemállapottól egyaránt függnek, értéke minden egyes időpillanatban változhat, amíg el nem éri az állandósult állapotot. Körerősítések meghatározásához szükség van az $\mathbf{S}$ tenzor és a 2. ábrán bemutatott súlyfüggvények Lineáris Mátrixegyenlőtlenség (Linear Matrix Inequality, LMI) elvű struktúrába történő szervezésére.

Szabályozó tervezése során alapvető elvárás az aszimptotikus stabilitás megléte, azonban emellett még további, szigorúbb feltételeket is tudunk definiálni, mint például a beavatkozó jel maximalizálása. Ezen feltételek teljesüléséhez a következő LMI-k megoldása szükséges.

$$\mathbf{X}\mathbf{A}_r^\mathrm{T} + \mathbf{A}_r\mathbf{X} - \mathbf{B}_r\mathbf{M}_\mathrm{r} - \mathbf{M}_r^\mathrm{T}\mathbf{B}_r^\mathrm{T} + 2\alpha\mathbf{X} < 0, \tag{15}$$

$$\mathbf{X}\mathbf{A}_r^\mathrm{T} + \mathbf{A}_r\mathbf{X} + \mathbf{X}\mathbf{A}_s^\mathrm{T} + \mathbf{A}_s\mathbf{X} - \mathbf{B}_r\mathbf{M}_s - \mathbf{M}_s^\mathrm{T}\mathbf{B}_r^\mathrm{T} - \mathbf{B}_s\mathbf{M}_r - \mathbf{M}_r^\mathrm{T}\mathbf{B}_s^\mathrm{T} + 4\alpha\mathbf{X} < 0, \tag{16}$$

$$\mathbf{K}_\mathrm{r} = \mathbf{M}_r\mathbf{X}^{-1}, \tag{17}$$

$$\phi^2\mathbf{I} < \mathbf{X}, \begin{bmatrix} \mathbf{X} & \mathbf{M}^\mathrm{T} \\ \mathbf{M} & v_{\max}^2\mathbf{I} \end{bmatrix}, \tag{18}$$

miközben az $\mathbf{X} > 0$ reláció minden esetben teljesül. Az így előállított visszacsatoló tenzor alapján kerülnek meghatározásra $\mathbf{K}$ és $\mathbf{K}_\mathrm{r}$ értékek munkaponttól függően.

5. SZIMULÁCIÓS EREDMÉNYEK

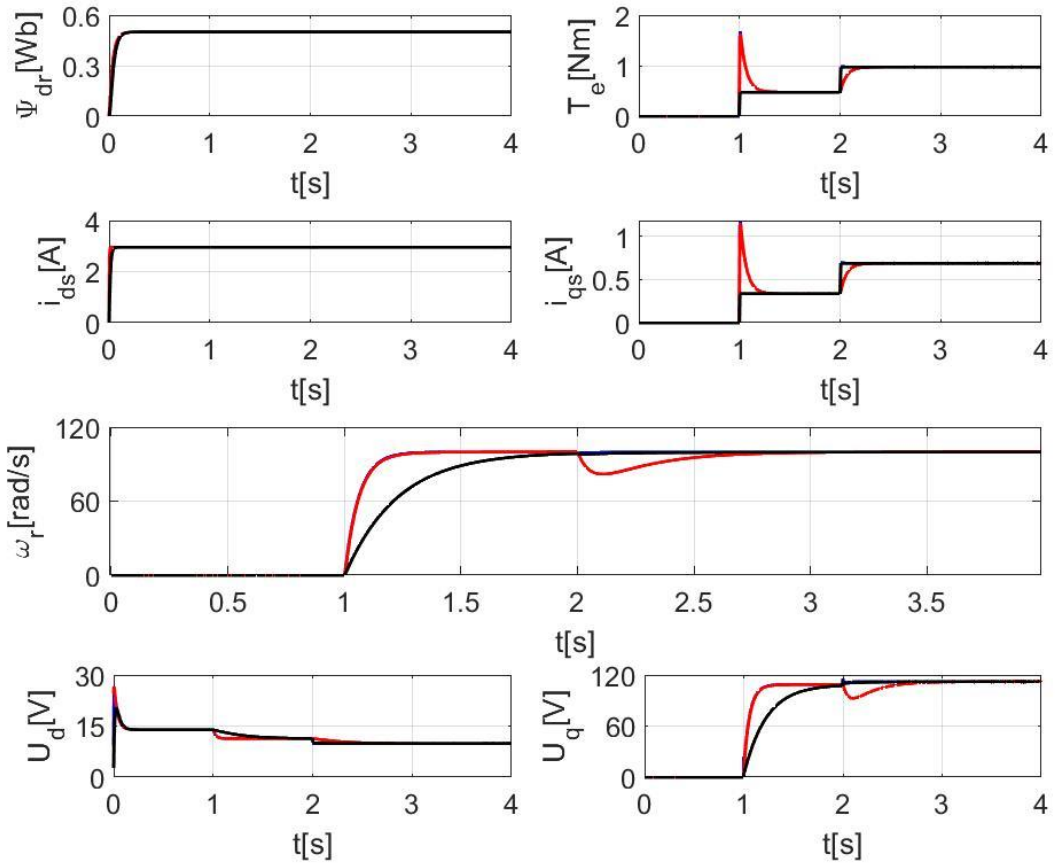
Az itt bemutatott eredmények kizárólag MATLAB-Simulink szimulációs eredmények, valós mérési környezet kialakítása és szabályozó tesztelése még folyamatban van. Mivel az általunk használt modellezés és szabályozó tervezés teljesen újkeletű, ezért logikusnak gondoljuk összehasonlítani az elért eredményeket klasszikus PI-del megvalósított áramszabályozókkal. Az inicializálás, illetve az előző fejezetben bemutatott TP modellezés és számítások MATLAB környezetben vannak realizálva. A szimulációs környezet viszont Simulink környezetben került megvalósításra, ahol a szabályozó és motor modellek, valamint a koordináta-transzformációk is implementálásra kerültek.

Szimulációs környezetbe két motor modell került be. Az egyik modellt a szabályozó használja, ami tartalmazza az 1. táblázatban szereplő névleges értékeket, amik nem változnak működés közben. A második modell a tényleges motor, aminek üzemmódtól függően változhatnak a paraméterei, ezzel is közelítve a szimulációs eredményeket a valósághoz. Ennek az összeállításnak köszönhetően lehetőségünk van paraméterbizonytalansági vizsgálatok elvégzésére is. Az itt

bemutatott eredmények minden esetben sebesség és fluxus szabályozást tartalmaznak, ahol a fluxus referencia értéke 0,5 Wb a nulladik időpillanattól, míg a sebesség referencia értéke 0 rad/s az első másodpercig.

5.1. PI és TP szabályozó terhelésvizsgálat

A PI szabályozónál egyetlen munkapontot állítottunk be, mint referencia, majd a TP szabályozót ennek megfelelően hangoltuk. TP szabályozó egyik legnagyobb előnye, hogy könnyen hangolható és konfigurálható az elérni kívánt célnak megfelelően. Első esetben a TP szabályozó beállítása közben az azonos sebességfüggvény 2%-os beállási idő elérése volt a cél, ami mindkét esetben 255 ms. Amennyiben az adott applikáció nem, vagy csak minimálisan engedi meg az áramok, illetve a nyomaték túllövését, erre is van lehetőség a dinamikus viselkedés részbeni megtartásával. Ebben az esetben a beállási idő 980 ms-ra nő. Az első szimuláció összesített eredménye a 4. ábrán látható. A $t = 2$ s időpillanatban egy 0,5 Nm nagyságú terhelést alkalmazunk, piros színnel a PI, kék színnel a túllövést megengedő TP, míg feketével a túllövést meg nem engedő TP szabályozó viselkedése látható.

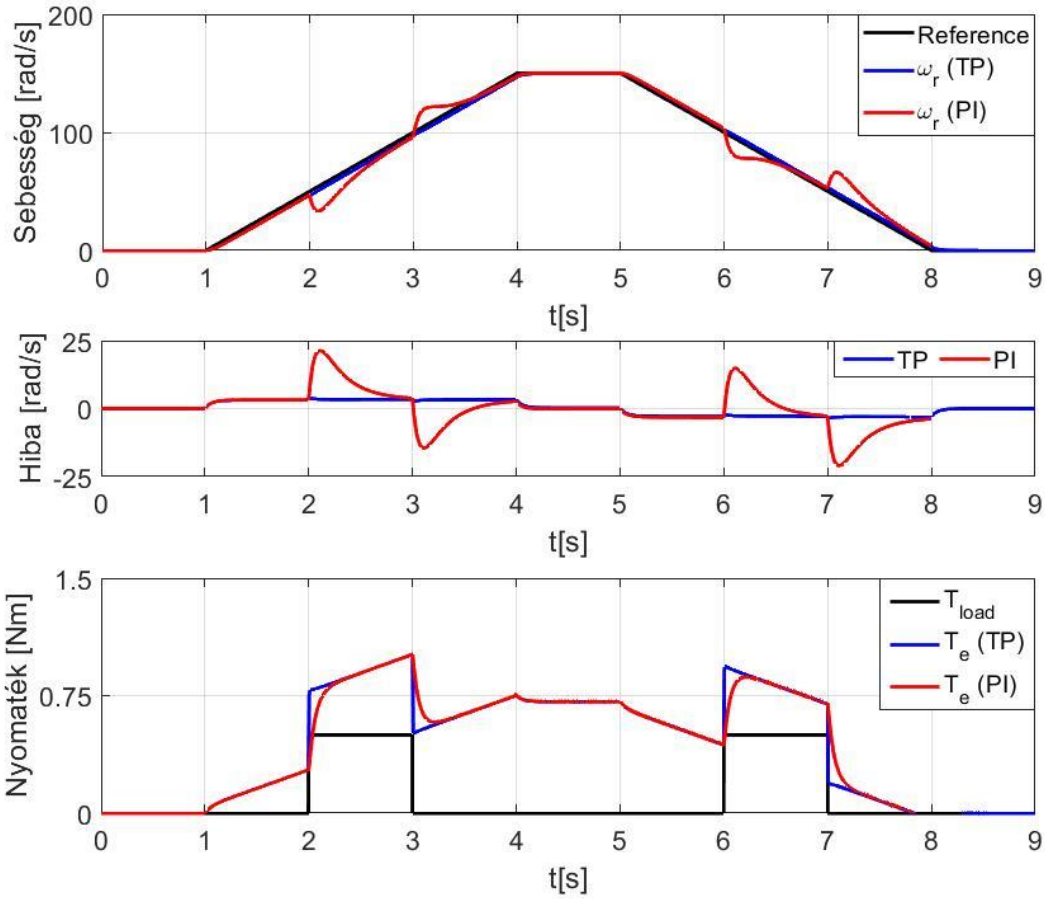


4. ábra – PI (piros) és TP (kék és fekete) szabályozó terhelésugrás vizsgálata.

Mindkét szabályozónál (piros és kék) hasonló dinamikus viselkedés figyelhető meg fluxus és fordulatszám szabályozás esetén is a referencia jel bekapcsolása után, amennyiben megengedett a túllövés. Szembetűnő különbség ugrásszerű terhelés alkalmazása esetén tapasztalható. Míg PI

szabályozó esetén a fordulatszám a 100 rad/s-os referenciáról leesik 81,89 rad/s-ig, addig mindkét TP szabályozónál elhanyagolható 0,91 és 2,09 rad/s-os esés következik be. Ez a különbség természetesen visszavezethető a q-irányú áram, ezáltal a nyomaték sokkal gyorsabb reagálási képességére.

Szabályozók tervezése során bizonyos esetekben fontos a dinamikus hiba mértéke is, ezért megvizsgáltuk a PI és TP szabályozó viselkedését rámpa sebesség referencia alkalmazásával. $t = 1 \dots 4$ másodperc között 50 rad/s, míg $t = 5 \dots 8$ másodperc között -50 rad/s meredekségű rámpát alkalmaztunk, emellett vizsgáltuk a terhelésváltás hatását is az előzőkhez hasonlóan. Ezen tényezők hatása látható együttesen az 5. ábrán.



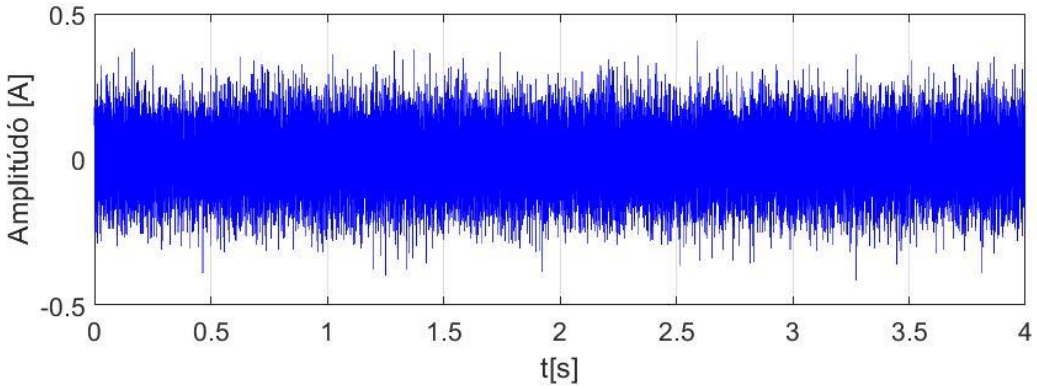
5. ábra – PI (piros) és TP (kék) szabályozó vizsgálata változó sebesség referenciával.

Mindkét szabályozóról elmondható, hogy csak állandó hibával képes lekövetni a folyamatosan változó referenciát, mindkét esetben 3,25 rad/s a dinamikus hiba pozitív és negatív irányba is, mindaddig, amíg terhelést nem alkalmazunk. Terhelés alkalmazása esetén az előzőkhez hasonló eredményt kapunk, a PI szabályozó érzékeny az ilyen típusú zajokra, míg TP szabályozónál alig észrevehető hatása van csak a sebességfüggvényen.

5.2. PI és TP szabályozó zajtűrés

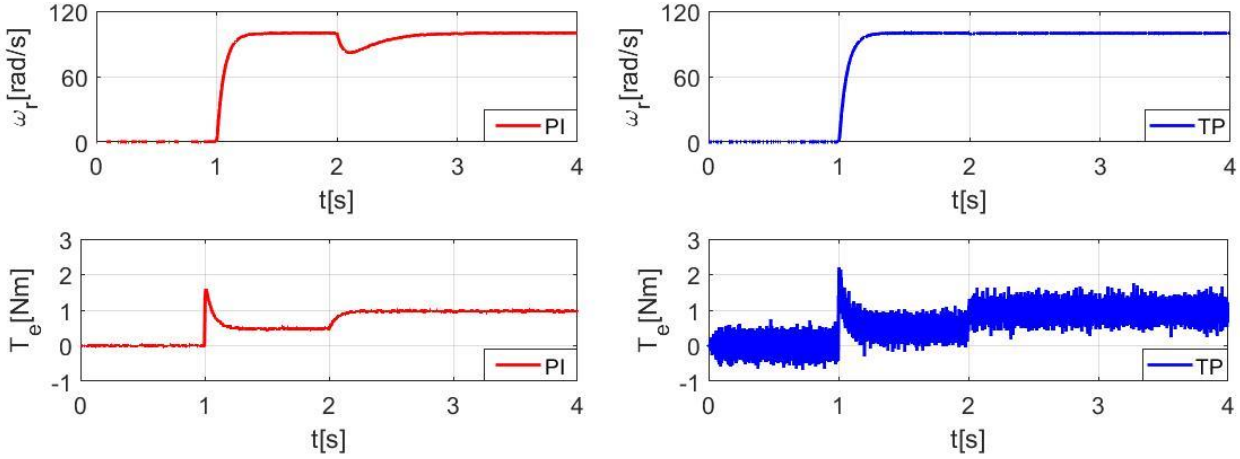
A valóságban is jól használható szabályozó egyik alapvető követelménye, hogy a zajtűrőképessége minél jobb legyen, ezért minden esetben célszerű már szimulációk során megvizsgálni a szabályozó

működését ilyen szempontból is. Szimulációk során Gauss-eloszlású zajfüggvényt alkalmaztunk, amit a mért fázisáramra ültettünk rá. Ez a zajfüggvény látható a 6. ábrán.



6. ábra –Mért jellemzőkre ültetett Gauss-eloszlású zajfüggvény.

Egyéb beállításokat tekintve változtatás nem történt az előző fejezethez képest, referenciák és terhelések teljes mértékben megegyeznek. A két szabályozó zajtűrőképességének különbsége a 7. ábrán látható.



7. ábra –PI és TP szabályozó vizsgálata zajjal terhelt jelek esetén.

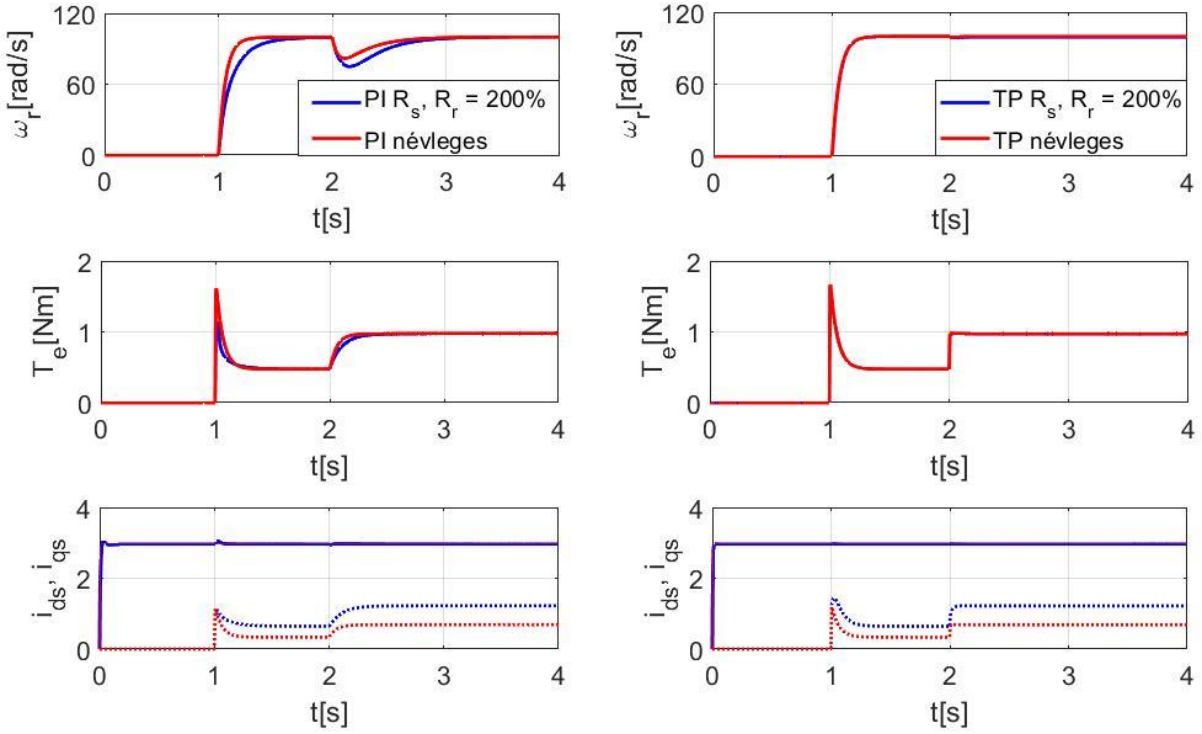
Mindkét szabályozó esetén elmondható, hogy erősen zajjal terhelt környezetben is képes stabilan és pontosan működni. PI szabályozó esetén a nyomaték lengése nagyságrenddel kisebb, robusztusabb megoldásnak tekinthető zajtűrés szempontjából, azonban a terhelésváltásoknál a sebesség átmeneti beesése továbbra is jól megfigyelhető. Jövőben mindenképpen célszerű lesz a TP szabályozó zajtűrőképességének javítását megvizsgálni és megpróbálni kiküszöbölni.

5.3. PI és TP szabályozó paraméterbizonytalanság-vizsgálat

Ahogyan az már a bevezetésnél is ki lett emelve, a két különálló modell előnye (szabályozó és motor), hogy képesek vagyunk az ellenállások, induktivitások, inercia, súrlódási együttható változásának hatását vizsgálni. Ezek a változók a legritkább esetben mérhetők, működés közben, csak minimális információval tudunk róla szolgálni nagy energiabefektetés árán is, gondoljunk csak a plusz szenzorokra, vagy további bonyolult matematikai műveletekre. Éppen ezért célszerű a

szabályozót úgy megtervezni, hogy a valóságban előforduló legnagyobb paraméterváltozásokat is képes legyen megfelelően kezelni, biztosítva a stabil működést [10].

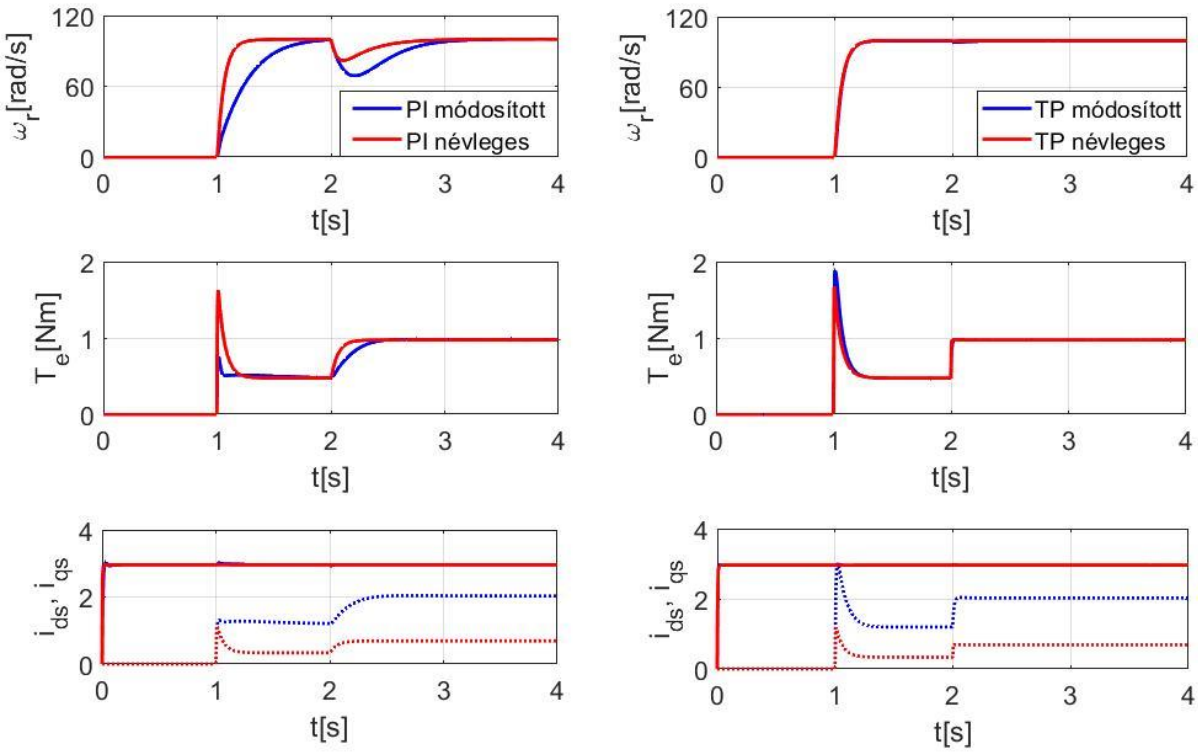
Első esetben megvizsgáltuk az ellenállás értékváltozások hatását, ami egyértelmű következménye lehet a villamos gép melegedésének, ennek eredménye látható a 8. ábrán.



8. ábra –PI (bal oldal) és TP (jobb oldal) szabályozó paraméterbizonytalanság-vizsgálat.

Ahogyan arra számítani lehetett, 200%-os ellenállásváltozás kompenzálásához nagyobb q-irányú áramokra (szaggatott vonal) van szükség mindkét szabályozó esetén, míg a d-irányú áramok (folytonos vonal) nem változtak ebben az esetben. PI szabályozó esetén kizárólag dinamikus viselkedésben vehető észre különbség, lassul a szabályozó, kisebb nyomatékkal kalkulál, ami a sebesség lassabb beállásához, illetve nagyobb beeséséhez vezet terhelésváltáskor. TP szabályozó használatával ezt a problémát ki tudjuk küszöbölni, nagyobb q- irányú áramokkal képes előállítani ugyan azt a nyomaték profilt, amivel a névleges értékek esetén is számolt.

Az előzőekhez hasonlóan megvizsgáltuk a szabályozók működését szélsőséges paraméterváltozások mellett, számszerűen: $R_s = 200\%, R_r = 200\%, L_s = 70\%, L_r = 70\%, L_m = 70\%,$ $J = 130\%$, melynek eredménye a 9. ábrán látható.



9. ábra –PI (bal oldal) és TP (jobb oldal) szabályozó paraméterbizonytalanság-vizsgálat.

A kapott eredmények egybevágnak az előző vizsgálat tapasztalataival, csak ebben az esetben még nagyobb a különbség. PI szabályozó a nagyobb q-irányú (szaggatott vonal) áram ellenére sem képes elegendő nyomatékot előállítani, ami tovább lassítja a sebességszabályozást. TP szabályozó esetén nyomatéknál szintén keletkezik kisebb eltérés, annak érdekében, hogy az inerciaváltozás hatását kompenzálni tudja sebességszabályozás során.

Az itt bemutatott szimulációs eredmények alapján elmondható, hogy paraméterbizonytalansági szempontból a TP szabályozó előnyösebb dinamikus viselkedést produkál. Amennyiben kizárólag a statikus tulajdonságokat vizsgáljuk, akkor mindkét szabályozó megfelelő választás lehet.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

Az elkészült cikk egy átfogó képet ad egy nemlineáris rendszer tenzorszorzat elvű modellezéséhez egy konkrét aszinkron gép modellen keresztül, majd bemutatja a TP szabályozó előnyeit és hátrányait a hagyományos PI szabályozóval összehasonlítva. A szabályozók vizsgálata során látható volt, hogy a TP szabályozó használata a valóságban is jó választás lehet. Jól kezeli a dinamikus terhelésváltásokat, pontos marad a működése mérési zajjal terhelt környezetben is és rendkívül stabil működést biztosít változó paraméterű modell esetén is.

Jelen szimulációs környezetet azonban mindenképpen ki kell egészíteni megfigyelőkkel, amik a valóságban nem mérhetők, vagy valóságtartalommal nem rendelkező változókat valós időben számolni tudják. További terveink között szerepel, hogy komplexebb szabályozó algoritmusokkal, vagy más LPV technikákkal is összehasonlítsuk az elkészült TP szabályozó működését.

7. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Az Innovációs és Technológiai Minisztérium ÚNKP-20-3 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

8. IRODALOMJEGYZÉK

[1] K. S. Gaeid, H. W. Ping, and H. A. F. Mohamed, Simulink representation of induction motor reference frames, International Conference for Technical Postgraduates (TECHPOS), Kuala Lumpur, Malaysia, 2009, pp. 1–4.

[2] Rasmussen H. Self-tuning torque control of Induction motors for high performance application, PhD Thesis, Aalborg University, Denmark, 1995.

[3] H. Tajima and Y. Hori, Speed sensorless field-orientation control of the induction machine, IEEE Trans. Indust. Appl. 29 (1993), no. 1, 175–180.

[4] K. Horvath and M. Kuslits, Dynamic performance of estimatorbased speed sensorless control of induction machines using extended and unscented Kalman filters, Power Electr. Drives 3 (2018), 129–144. https://doi.org/10.2478/pead-2018-0003

[5] Németh, Z, Kuczmann, M. Tensor product transformation-based modeling of an induction machine. Asian J Control. 2020; 1– 10. https://doi.org/10.1002/asjc.2468

[6] Z. Németh and M. Kuczmann, "Tensor Product Transformation Based Robust Control of Induction Machine," 2020 2nd IEEE International Conference on Gridding and Polytope Based Modelling and Control (GPMC), 2020, pp. 39-44, doi: 10.1109/GPMC50267.2020.9333812.

[7] K. Horvath and M. Kuslits, Model-based development of induction motor control algorithms with modular architecture, IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), Varna, Bulgaria, 2016, pp. 133–138.

[8] P. Baranyi et al., Definition of the HOSVD based canonical form of polytopic dynamic models, Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Mechatronics, Luoyang, Henan, China, Vol. 2006, 2006, pp. 660–665.

[9] L. Szeidl and P. Varlaki, HOSVD based canonical form for polytopic models of dynamic systems, J. Adv. Comput. Intell. Intell. Inf. 13 (2009), no. 1, 52–60.

[10] K. Zeb et al., Dynamic simulations of adaptive design approaches to control the speed of an induction machine considering parameter uncertainties and external perturbations, Energies 11 (2018), 2339.

Sinkovics Bálint, Dr. Hartmann Bálint
Eötvös Lóránd Kutatási Hálózat Energiatudományi Kutatóközpont

Flexibilis tartaléktervezési módszertan bemutatása az időjárásfüggő termelők figyelembevételével

Esettanulmány

A Harmadik Energiacsomagban megfogalmazott irányelvek mentén az Európai Uniós szabályozás 2017-től kezdve már a szabályozási tartalékokat is érintik. Az Electricity Balancing (EB GL) illetve System Operation Regulation (SO GL) Network Code-ok definiálják az új tartalékpiaci alapfogalmakat, illetve adnak iránymutatást azok lekötött mennyiségéről. A végső cél a rendszerszintű szolgáltatások ezen monopszon részpiacának egységesítése, kiterjesztése, szabályozási területeken túlmutató tenderek megvalósítása mely a kontinentális villamosenergia-piac egységesítésének újabb lépéseként értelmezhető.
Az új tartalékpiaci reguláció újdonságtartalma nem csak új alapfogalmakban (FCR, aFRR, mFRR, RR), sokkal inkább azok allokálásában fog megjelenni. Az eddig bemutatott statikusnak nevezhető számítási módszereket kiegészítik sztochasztikus elemekkel is, melyek a hirtelen gradiensváltozásokból adódó teljesítményváltozások hatását kívánják a tartalékok méretezésében megjeleníteni. Ezen változásokhoz kapcsolódó aktivációs igények eloszlásfüggvényének 70, 95, valamint 99%-os értékeihez kerülnek tartaléklekötési kapacitás értékek meghatározásra. Továbbá változik az egyes tartaléktípusok közötti viszonyok, illetve a fel-, és leszabályozási termékek módszertana is elválik egymástól.
Az egyes teljesítmény-frekvencia szabályozási területekre (LFC) történő implementáció új tartaléktervezési módszertan bevezetését igényli, mely kihívás elé állítja a rendszerirányítókat. A bemutatásra kerülő kutatás célja bekapcsolódni a felvázolt nemzetközi irányelvek hazai implementálásának folyamatába, konkrét tartalékpiac méretezési javaslatok és számítási modell megalkotásával. Ennek kidolgozása során figyelembevételre kerülnek a hazai sajátosságok (erőművi portfolió, importfüggőség stb.), illetve az irányelveknek megfelelően a fotovillamos erőművek penetrációjának növekedésével jelentkező gradiensváltozások hatása, historikus termelési adatsorok felhasználásával.

Sütő Bence, Dr. Divényi Dániel
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Villamos Energetika Tanszék

Modern irányításelméleti lehetőségek az inverteres termelőegységek szabályozásában

Cikkünkben a nemzetközi szakirodalomban publikált kaszkád PI szabályozók, és állapotvisszacsatolást megvalósító szabályozók egy-egy lehetséges változatának rekonstrukcióját és összehasonlítását végezzük el MATLAB/Simscape környezetben. Először a szabályozott szakasz, illetve a kétféle szabályozó modelljét, egyenleteit ismertetjük, majd a szabályozók hangolására térünk ki részletesebben, különös tekintettel az állapotvisszacsatolásos irányítás esetére. Ezt követően szoftveres szimulációkat végezve, villamos értelemben azonos körülmények (konverter felépítés, szűrő, terhelés) között hasonlítjuk össze a két modellt. A vizsgálat tapasztalatait levonva megállapítjuk, hogy a PI szabályozókhoz képest milyen előnyökkel és hátrányokkal járhat az állapotvisszacsatoló irányítás alkalmazása a teljesítményátalakítókban.

Abstract – This article compares a state feedback controller and a cascade PI controller in the case of voltage regulation in the islanding mode of a power converter. First, the converter model, the plant equations, and the tuning method of the two controllers are all presented. The emphasis lies on the state feedback control tuning, for which no internationally published and/or accepted tuning method currently exists. Both controllers are implemented in MATLAB/Simscape in which comparative examinations are carried out using the same electrical circumstances (converter structure, filter parameters, load). The results of the simulations are used to analyze and grade the dynamic performance and parameter sensitivity of the two closed-loop systems.

Kulcsszavak: **állapotvisszacsatolás; teljesítményátalakító; szabályozástechnika.**

1. BEVEZETÉS

Napjaink villamosenergia-rendszerében egyre nagyobb arányban találhatók meg a teljesítményelektronikai interfészen keresztül csatlakozó termelőegységek. Ezen eszközök működésének alapját a többnyire egyszerű elvek szerint, vagy akár tapasztalati alapon is hangolható PI szabályozók biztosítják, melyek népszerűsége már közel 70 éve töretlen. Az irányításelmélet fejlődésének köszönhetően olyan szofisztikáltabb megoldások jelentek meg, mint az állapottérben történő szabályozás állapotvisszacsatolással, illetve a modell prediktív irányítás (MPC). Az újabb algoritmusok jobb szabályozási tulajdonságokat (fejlettebb dinamika és tranziens viselkedés) ígérnek, viszont ezzel együtt a konstrukció bonyolultsága is növekszik. A mai technikai fejlettség és számítási kapacitás birtokában azonban előtérbe kerülhetnek a modern irányítási megoldások, amelyek életképes alternatívát jelenthetnek a PI szabályozó mellett.

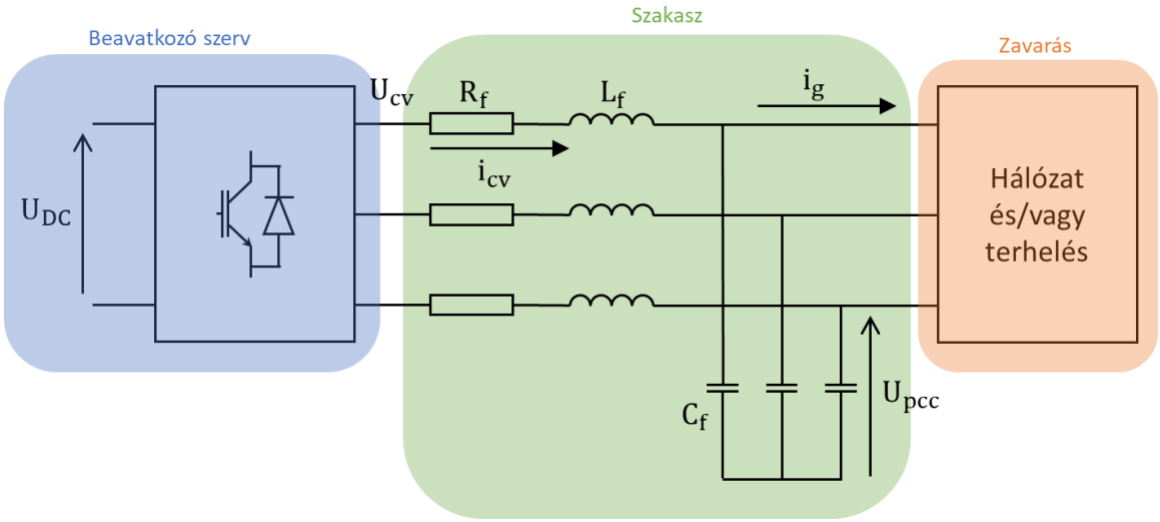
Ez a cikk a modern irányítások közül az állapottérben megvalósítható állapotvisszacsatoló szabályozóra fókuszál. A 2. fejezetben részletesen bemutatjuk a konverter részegységeinek

modelljét, külön kitérve az állapotvisszacsatolás hangolásának módszerére, amelyet a szakirodalom általában nem részletez (vagy empirikus eljárásra hivatkozik). A 3. fejezetben az állapotvisszacsatolást a kaszkád PI szabályozóval hasonlítjuk össze, melynek két fő pontja a zárt körben létrejövő póluseloszlások vizsgálata a rendszerdinamikai különbségek kimutatására, illetve a szoftveres szimulációk elvégzése a szabályozók paraméterérzékenységének szemléltetésére. Zárásként a 4. fejezetben összefoglaljuk munkánkat és ismertetjük a témában releváns továbblépési lehetőségeket.

A cikkben ismertetett kutatás a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Felsőoktatási és Ipari Együttműködési Központ (BME-FIEK) inverterek szabályozástechnikájával foglalkozó munkacsoportjának keretei között valósult meg.

2. A SZABÁLYOZÁSI KÖR MODELLJÉNEK FELÉPÍTÉSE

A munkánk során használt rendszert az 1. ábra mutatja. Ebben megtalálható az inverter, mint beavatkozó szerv, a kimeneten elhelyezkedő LC szűrő, mint szabályozott szakasz, illetve a szűrőn túl a mögöttes hálózat, és esetleges terhelések, melyek szabályozástechnikai szempontból zavarásnak tekinthetők. Az általunk megvalósítani kívánt szabályozás a beavatkozó szerven keresztül befolyásolja a rendszer működését.



7. ábra: A rendszer összeállítása és szabályozástechnikai csoportosítása

Az 1. ábrán jelölt értékek jelentése:

- U_{DC} – az inverter DC sínfeszültsége
- U_{cv} – az inverter kapcsain mérhető feszültség Park-vektora
- U_{pcc} – a szűrő kapcsain mérhető feszültség Park-vektora
- i_{cv} – a szűrő induktivitás áramának (konverter áram) Park-vektora
- i_g – a hálózat/terhelés felé folyó áram Park-vektora
- R_f, L_f, C_f – a szűrő fizikai paraméterei.

A további alfejezetekben az egyes elemek leírását adjuk meg, majd pedig a szabályozó tervezés lépéseire térünk ki. Mivel az irányítást minden esetben ω szögsebességgel forgó, d-q koordináta-rendszerben végezzük, ezért a modelleket is ebben a térben tárgyaljuk. A forgó koordináta-rendszerben értelmezett jeleket alsó indexszel jelöljük az alábbiak szerint (például feszültség esetén):

$$U_{dq} = U_d + jU_q \tag{1}$$

2.1. Szakasz és zavarás modellje

A rendszerelméletben több módja is van annak, hogy egy adott egységet leírjunk. Az időtartományban az állapotegyenlet adja meg a rendszer viselkedését, míg komplex frekvenciatartományra áttérve az átviteli függvény jellemzi a rendszer bemenete és kimenete közötti kapcsolatot. Az állapotvisszacsatolás megtervezéséhez az előbbire, míg a PI szabályozók hangolásához az utóbbira van szükség, így a következőkben mindkét opciót ismertetjük a szakaszra nézve.

2.1.1. Állapotteres leírás

Kiindulásként a szűrőkörre felírható két differenciálegyenlet, melyek az alapvető fizikai működést reprezentálják.

$$L_f \frac{di_{cv,dq}}{dt} = U_{cv,dq} - U_{pcc,dq} - R_f i_{cv,dq} - j\omega L_f i_{cv,dq} \tag{2}$$

$$C_f \frac{dU_{pcc,dq}}{dt} = i_{cv,dq} - i_{g,dq} - j\omega C_f U_{pcc,dq} \tag{3}$$

Ebből a leírásból a szűrő fizikai jellemzőit (i_{cv}, U_{pcc}) a továbbiakban állapotváltozóknak tekintjük, míg az U_{cv} (beavatkozó szerv kimenete) jelenti a beavatkozó jelet. A zavarásként jelen lévő hálózati oldal a szűrőből kifolyó áramként (i_g) jelenik meg az egyenletekben. Ezen elnevezések szerinti átrendezéssel az (2)-(3) egyenletekből valós-, illetve képzetes rész képzéssel származtatható a szakasz állapotváltozós leírása, melynek általános alakját (lineáris, időinvariáns rendszer esetén, zavarással kiegészítve) (4) adja meg.

$$\frac{dx}{dt} = Ax + B_u u + B_d d, y = Cx \tag{4}$$

$$x = \begin{bmatrix} i_{cv,d} \\ i_{cv,q} \\ U_{pcc,d} \\ U_{pcc,q} \end{bmatrix}, u = \begin{bmatrix} U_{cv,d} \\ U_{cv,q} \end{bmatrix}, d = \begin{bmatrix} i_{g,d} \\ i_{g,q} \end{bmatrix} \; y = \begin{bmatrix} U_{pcc,d} \\ U_{pcc,q} \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_f}{L_f} & \omega & -1/L_f & 0 \\ -\omega & -\frac{R_f}{L_f} & 0 & -1/L_f \\ 1/C_f & 0 & 0 & \omega \\ 0 & 1/C_f & -\omega & 0 \end{bmatrix}, B_u = \begin{bmatrix} 1/L_f & 0 \\ 0 & 1/L_f \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$
$$B_d = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -1/C_f & 0 \\ 0 & -1/C_f \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{6}$$

Az eddig közölt egyenletrendszer a szakaszt folytonos időben reprezentálja, azonban a korszerű szabályozók digitális megvalósítása miatt szükséges az irányítandó egységet diszkrét időben kezelni. A transzformációt különböző közelítésekkel szokás elvégezni, melyek közül a (7)-(9) egyenletek az úgynevezett egységugrás-ekvivalenciát biztosítják. A szakasz reprezentációja során érdemes ezt a diszkretizáló eljárást választani, mert a fizikai jeleket általában nulladrendű tartószerv (vagy azt közelítő módszer) segítségével mintavételezzük, ami visszavezet az egységugrás-ekvivalenciához [1].

$$A_d = e^{AT_s} \tag{7}$$

$$B_d = \int_0^{T_s} e^{A\tau} d\tau \, B \tag{8}$$

$$C_d = C \tag{9}$$

A beavatkozó szerv jelen esetben az inverter, amiről a továbbiakban feltételezzük, hogy a szabályozó kimeneti jeleként adódó feszültség értékét nem befolyásolja, azaz átvitele konstans 1. Azonban a konverter ezt impulzusszélesség-modulációs eljárással hozza létre, amelyet összességében egy mintavételnyi késleltetéssel szokás modellezni [2]. Ezt írja le a (10) egyenlet, amelyben k a diszkrét időpontot jelöli, és amely alapján az eddigi beavatkozó jel is állapotváltozónak lép elő. Így adódik a szakasz módosított, diszkrét idejű állapotváltozós leírása (11).

$$U_{cv}(k) = U_{cv,ref}(k-1) \tag{10}$$

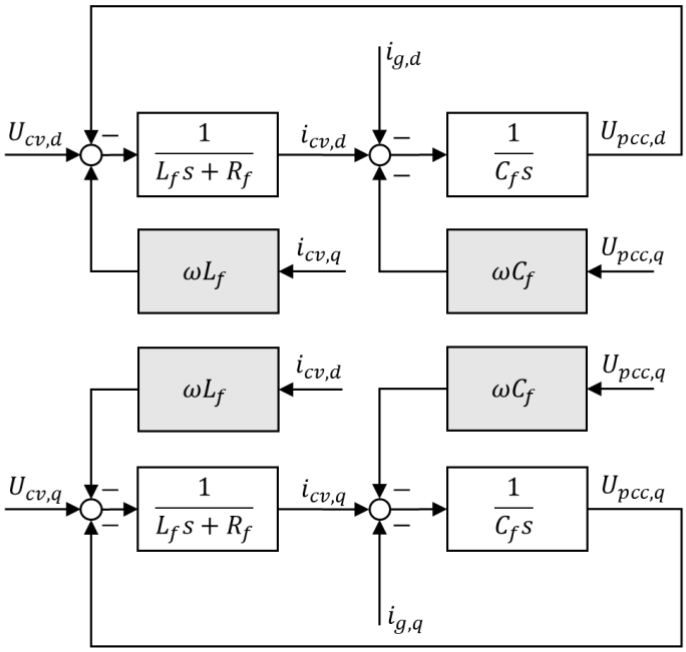
$$A'_d = \begin{bmatrix} A_d & B_d \\ 0_{2\times4} & 0_{2\times2} \end{bmatrix}, B'_{u,d} = \begin{bmatrix} 0_{4\times2} \\ I_{2\times2} \end{bmatrix}, C'_d = [C_d \quad 0_{2\times2}] \tag{11}$$

2.1.2. Átviteli függvény

Egy rendszer átviteli függvénye csak a bemenet és a kimenet közötti összefüggést mutatja, így információtartalma valamivel kevesebb. Emiatt azonban az állapotteres leírásból származtatható a (12) egyenlet szerint.

$$W_P(s) = C(sI - A)^{-1}B \tag{12}$$

A (12) kifejezés valójában egy egyenletrendszert reprezentál, hiszen a d-q koordináta-rendszer miatt egy 2 bemenetű és 2 kimenetű rendszert vizsgálunk. A konkrét összefüggések megjelenítése helyett tekintsük a szakasz (és zavarás) blokkvázlatát a 2. ábrán, amely alapján az egyenletek is rekonstruálhatók.



2. ábra: A szakasz átviteli függvényének blokkdiagramja (a keresztcsatolás szürkével)

A 2. ábra azt is megmutatja, hogy a keresztcsatoló tagok elhagyásával a szakasz d és q irányú alrendszere megegyezik. Ezt a tulajdonságot a PI szabályozók tervezésénél kihasználjuk.

2.2. PI szabályozók tervezése

A célunk a szűrő kapcsain lévő U_{pcc} feszültség szabályozása. Ehhez a szakirodalomban két, sorbakötött (más néven kaszkád) PI szabályozót használnak [3]. Ezeket folytonos időben tervezik meg, és a paraméterek meghatározása során a 2. ábrán szürkével jelölt keresztcsatolást elhanyagolják.

A kaszkád szabályozó „belső” PI tagja a konverter kiadott áramát (i_{cv}) határozza meg. Ennek beállítását általában a póluskiejtés elve alapján végzik el, amely szerint a szakasz L_f és R_f paraméterei által meghatározott pólusára állítják a szabályozó zérusát [4]. A tervezési paraméter a létrejövő zárt áramszabályozási kör időállandója, melyet τ jelöl. A szabályozó beállítási egyenletei:

$$k_{p,c} = \frac{L_f}{\tau} \tag{13}$$

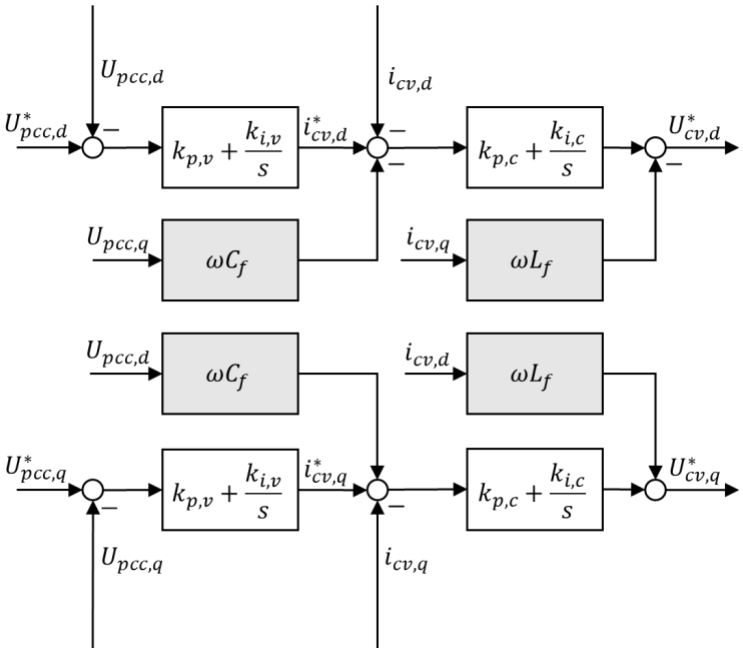
$$k_{i,c} = \frac{R_f}{\tau} \tag{14}$$

Az áramszabályozás alá van rendelve a feszültségszabályozásnak, amelyet a „külső” PI tagok látnak el. Ezek esetében a tervezés a szimmetrikus optimum elvét követi, mellyel a zárt kör póluselrendezése határozható meg a beállítani kívánt fázistartalék függvényében [5]. A tervezési paraméter a fázistartalékkal arányos a paraméter.

$$k_{p,v} = \frac{C_f}{a\tau} \tag{15}$$

$$k_{i,v} = \frac{C_f}{a^3\tau^2} \tag{16}$$

A megtervezett szabályozók a 3. ábra szerint kapcsolhatók össze. A teljes, szakaszt is tartalmazó zárt kör a 3. ábra modelljének a 2. ábra szakasza elé kötésével kapható meg az azonos nevű jelek összeillesztése mentén.



3. ábra: A kaszkád szabályozó blokkdiagramja (a keresztcsatolás kompenzálása szürkével)

Említettük, hogy a PI szabályozó tervezésénél a d-q keresztcsatolások hatását elhanyagoljuk. Ezzel a teljes zárt rendszer átvitelét tekintve egy közelítő megoldást kapunk, amely mind d, mind q irányban érvényes. A keresztcsatolás utólagos kompenzálása érdekében a szakaszban fizikailag jelen lévő tagokat a szabályozóban ellentétes előjellel kell implementálni. Ez ugyan nem jelent tökéletes semlegesítést, azonban segít a dinamikai tulajdonságok javításában.

A kaszkád szabályozóval megvalósított teljes zárt kör átviteli függvénye levezethető a 2. és 3. ábra alapján. A végeredmény a következőként alakul (a keresztcsatolások elhanyagolásával):

$$W_{CL}(s) = \frac{k_{p,c}k_{p,v}s^2 + \left(k_{p,c}k_{i,v} + k_{p,v}k_{i,c}\right)s + k_{i,v}k_{i,c}}{L_fC_fs^4 + \left(R_fC_f + k_{p,c}C_f\right)s^3 + \left(k_{i,c} + 1 + k_{p,c}k_{p,v}\right)s^2 + \left(k_{p,c}k_{i,v} + k_{p,v}k_{i,c}\right)s + k_{i,v}k_{i,c}} \tag{17}$$

A PI szabályozó tervezése során a [5] beállítási paramétereit használtuk fel, melyek az alábbiak:

$$\tau = 0{,}2\ \mathrm{ms}, \qquad a = 2 \tag{18}$$

2.3. Állapotvisszacsatolás állapottérben

Az állapotvisszacsatoló szabályozó tervezését diszkrét időben végezzük, melyhez természetesen a szakasz állapotteres leírására van szükségünk. A szabályozó meghatározására két lehetőség is rendelkezésre áll:

- A teljes zárt rendszer (állapotvisszacsatolás és szakasz) pólusainak előírása
- LQ (lineáris-kvadratikus) optimális szabályozás tervezése.

Az első lehetőség alkalmazása teljesítményátalakítós környezetben ritka, mert a póluseloszlás tudatos tervezése nehézkes [6]. A továbbiakban elsősorban az LQ optimális irányításra fókuszálunk. Ennek lényege, hogy a szabályozó tervezését egy optimalizálási feladatként fogjuk fel, amelyben lineáris korlátokat, és egy kvadratikus költségfüggvényt állítunk fel. Jelen rendszerünkben a korlátokat alkotó lineáris egyenletrendszert az állapotváltozós leírás adja, míg a célfüggvényt az állapotváltozók és a beavatkozó jel súlyozott összegéből állítjuk elő.

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \tag{19}$$

$$J(x,u) = \frac{1}{2}\sum_{k=0}^{N-1}\langle Qx(k), x(k) + Ru(k), u(k)\rangle + \frac{1}{2}\langle Q_N x(N), x(N)\rangle \tag{20}$$

ahol

Q - pozitív szemidefinit súlyozó mátrix,
R - pozitív definit súlyozó mátrix,
$\langle\ \ \rangle$ - skalárszorzás jelölése.

Az LQ optimális szabályozó egy konstans K paramétervektoron keresztül csatolja vissza a mért állapotváltozókat. Ennek meghatározását a [7] irodalom részletesen taglalja. Végeredményben a probléma az úgynevezett diszkrét algebrai Riccati-egyenletre vezet, melynek megoldásából származtatható a visszacsatolás értéke is. A hangoláshoz felhasználható, tervező által beállítandó paraméterek a súlyozó mátrixok értékei.

$$P = Q + A^T PA - A^T PB(B^T PB + R)^{-1}B^T PA \tag{21}$$

$$K = (B^T PB + R)^{-1}B^T PA \tag{22}$$

Ezzel a felírással a rendszer nem vesz figyelembe külső alapjelet, így a szabályozás célja most a zárt kör (állapotváltozói, válasza) nullába vezérlése. Az alapjelkövetés megvalósítása további tagok hozzáadásával érhető el, amit [1] alapján végeztünk el.

Feltételezzük, hogy végtelen idő elteltével a rendszer válasza megegyezik az alapjellel. Ezt úgy érjük el, hogy az alapjel konstansszorosát alkalmazzuk beavatkozó jelként, amely hasonlóan konstans állapotváltozókat eredményez a (23)-(24) egyenletek szerint. Lineáris átalakítások segítségével kifejezhetők a konstansok (25).

$$u_\infty = N_u r \tag{23}$$

$$x_\infty = N_x r \tag{24}$$

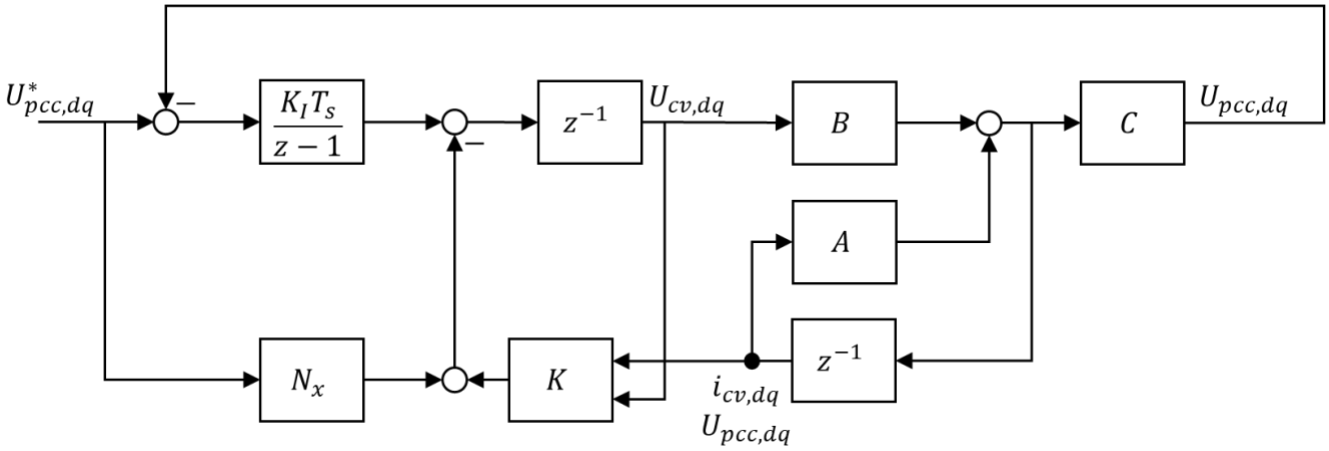
$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A'_d - I & B'_d \\ C'_d & 0_{2\times2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0_{6\times2} \\ I_{2\times2} \end{bmatrix} \tag{25}$$

A zavarokra való érzéketlenség eléréséhez az N_u paraméterrel történő előrecsatolás helyett egy integrátort helyezünk el a szabályozóban, amelyre a válaszjel és a referenciajel különbségeként adódó hibajelet vezetjük. Emiatt ki kell egészíteni az eddig ismertetett állapotváltozós leírást a (26)-(27) egyenletek szerint.

$$x_I = \int y\,dt = \int Cx\,dt \rightarrow \frac{dx_I(k)}{dt} = x_I(k) + T_s Cx(k) \tag{26}$$

$$A'_{di} = \begin{bmatrix} A'_d & 0_{6\times2} \\ T_s C'_d & I_{2\times2} \end{bmatrix}, B'_{di} = \begin{bmatrix} B'_d \\ 0_{2\times2} \end{bmatrix}, C'_{di} = [C'_d \quad 0_{2\times2}] \tag{27}$$

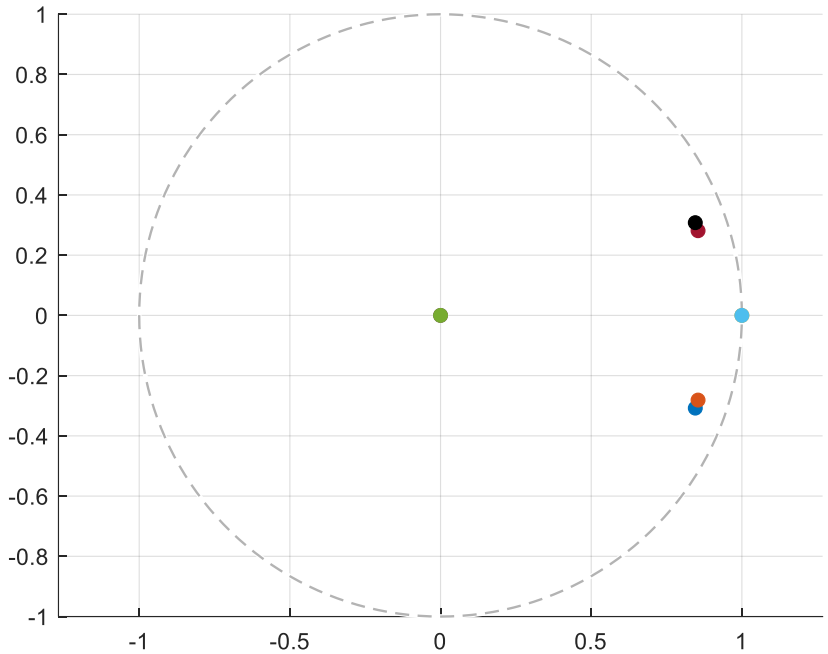
A teljes rendszer állapotteres modelljét a 4. ábra mutatja.



4. ábra: Az állapotvisszacsatolásos szabályozóval alkotott zárt kör modellje

2.4. Az állapotvisszacsatolásos szabályozó hangolása

Az optimalizálás segítségével megtervezendő irányítás konfigurálható értékei a Q, illetve R súlyozó mátrixok. Ezek beállítására a szakirodalomban nincs explicit szabály, így a hangolást a zárt rendszer pólusaira gyakorolt hatások alapján végeztük el. Kiindulásként mind a Q, mind az R mátrixot egységmátrixnak vettük, így az 5. ábra szerinti póluseloszlás alakul ki a diszkrét komplex frekvenciasíkon.

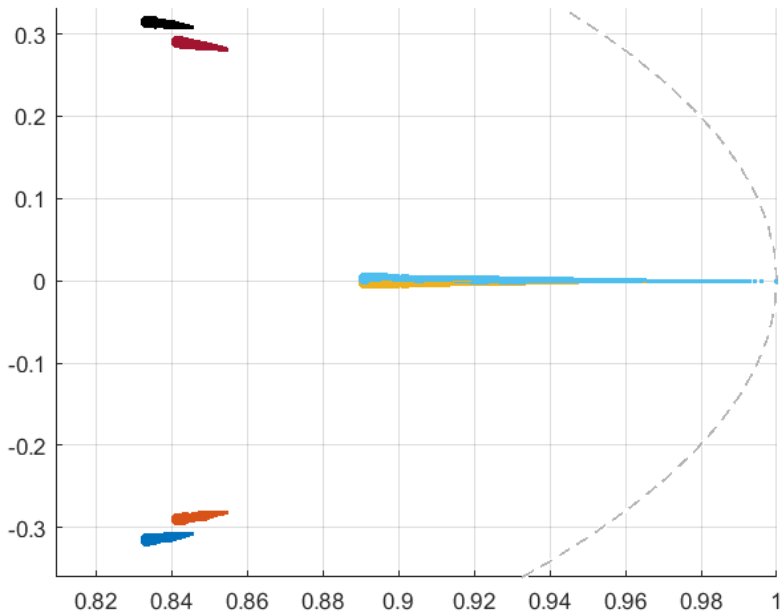


5. ábra: Póluseloszlás identitás súlyozó mátrixok esetén (a szaggatott vonal a stabilitási határt jelöli)

Az 5. ábra alapján elmondható, hogy a rendszer domináns pólusai a stabilitási határ közelében helyezkednek el. A célunk a hangolás során az, hogy a mátrixok segítségével a pólusokat az origó felé mozdítsuk el. A súlyozást ehhez összetartozó állapotváltozónként vizsgáltuk, ahol egy adott fizikai mennyiséghez tartozó d és q irányú állapotváltozók mindig azonos súlyt kaptak. Ennek kvalitatív eredményeit az 1. táblázat foglalja össze.

1. táblázat: Az egyes állapotváltozó-párokhoz tartozó súlyok növelésének hatása

Állapotváltozók	**Eredmény**
$i_{cv,d}, i_{cv,q}$	A paraméterek súlyozása a zárt rendszer „középgyors” pólusaira van hatással, az 5. ábra narancs-vörös póluspárját gyorsítja (az origó felé mozdítja), a kék-fekete póluspárját tovább lassítja. A domináns pólusok nem változnak számottevően.
$U_{pcc,d}, U_{pcc,q}$	A paraméterek súlyozása szintén a zárt rendszer „középgyors” pólusaira van hatással. Számottevő változás, hogy az 5. ábra kék-fekete póluspárja a negatív félsíkra kerül át, ahol a súlyok növelésével az egységsugarú kör felé halad. A domináns pólusok nem változnak számottevően.
$U_{cv,d}, U_{cv,q}$	A súlyozás növelése az origóban elhelyezkedő pólusokat leszámítva minden pólust az egységsugarú kör felé mozdít.
$x_{I,d}, x_{I,q}$	A vonatkozó súlyozás erősítése a domináns pólusokat gyorsítja, így a rendszer a stabilitás irányába változik. Emellett, a pólusok képzetes része enyhén növekszik. A 6. ábra ezt a folyamatot mutatja be a pozitív félsíkon elhelyezkedő pólusokra koncentrálva (az origóban lévő pólus nem változik). Itt a nagyobb súlyok mellett adódó pólusokat nagyobb körök reprezentálják.



6. ábra: Póluseloszlás változása x_I súlyozásának növelése mellett

További vizsgálat végezhető R változtatásával (és ezáltal a beavatkozó jel súlyozásával), ez azonban hasonló eredményre vezet, mint U_{cv} esete (1. táblázat 3. sora), így a további tárgyalásától eltekintünk.

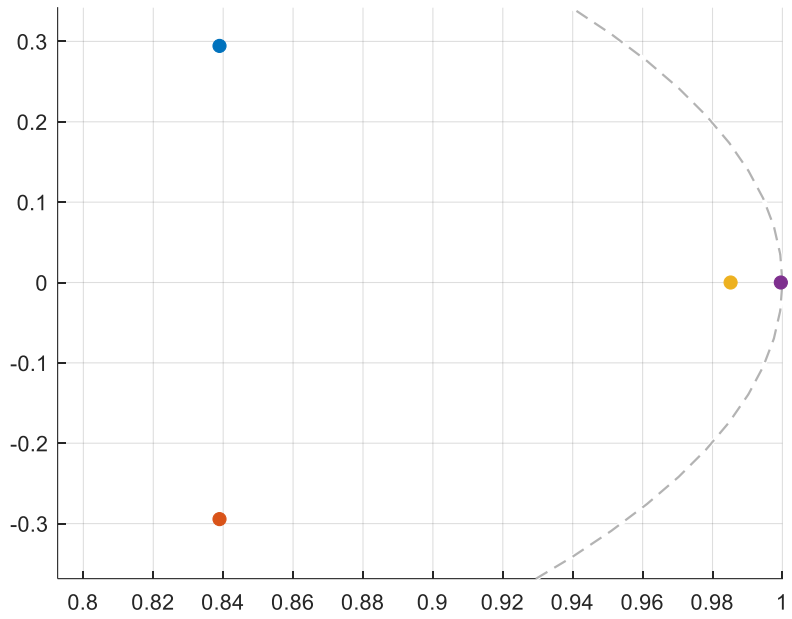
Az 1. táblázat és a 6. ábra alapján levonható a következtetés, hogy az újonnan bevezetett x_I állapotváltozók súlyát érdemes növelni a Q mátrixban, hiszen ezzel érhetők el a korábban megfogalmazott célok (gyorsabb, stabilabb rendszer). Egy bizonyos érték fölött a 6. ábra világoskék-sárga póluspárja megszűnik dominánsnak lenni, mivel az abszolút értékek kisebbé válnak, mint a 6. ábra másik 4 pólusa esetén. Azért, hogy az eredeti zárt rendszer viselkedését meghatározó domináns póluspárt megtartsuk, annak abszolút értékét 0,9-ig csökkentettük. Így a kérdéses mátrixokra adódó beállításaink (a diag operátor a benne foglalt vektor elemeit egy egységmátrix főátlójába helyezi):

$$Q = \mathrm{diag}(1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1{,}54 \cdot 10^7 \quad 1{,}54 \cdot 10^7), R = I_{2\times 2} \tag{28}$$

3. SZABÁLYOZÓK KOMPARATÍV ANALÍZISE

3.1. Elméleti megközelítés – pólusok elhelyezkedése

A szabályozók összehasonlításához tekintsük először a kaszkád szabályozót tartalmazó zárt kör póluseloszlását, amely a (17) egyenlet alapján meghatározható. Az összehasonlíthatóság kedvéért ezeket diszkrét időben tünteti fel a 7. ábra.



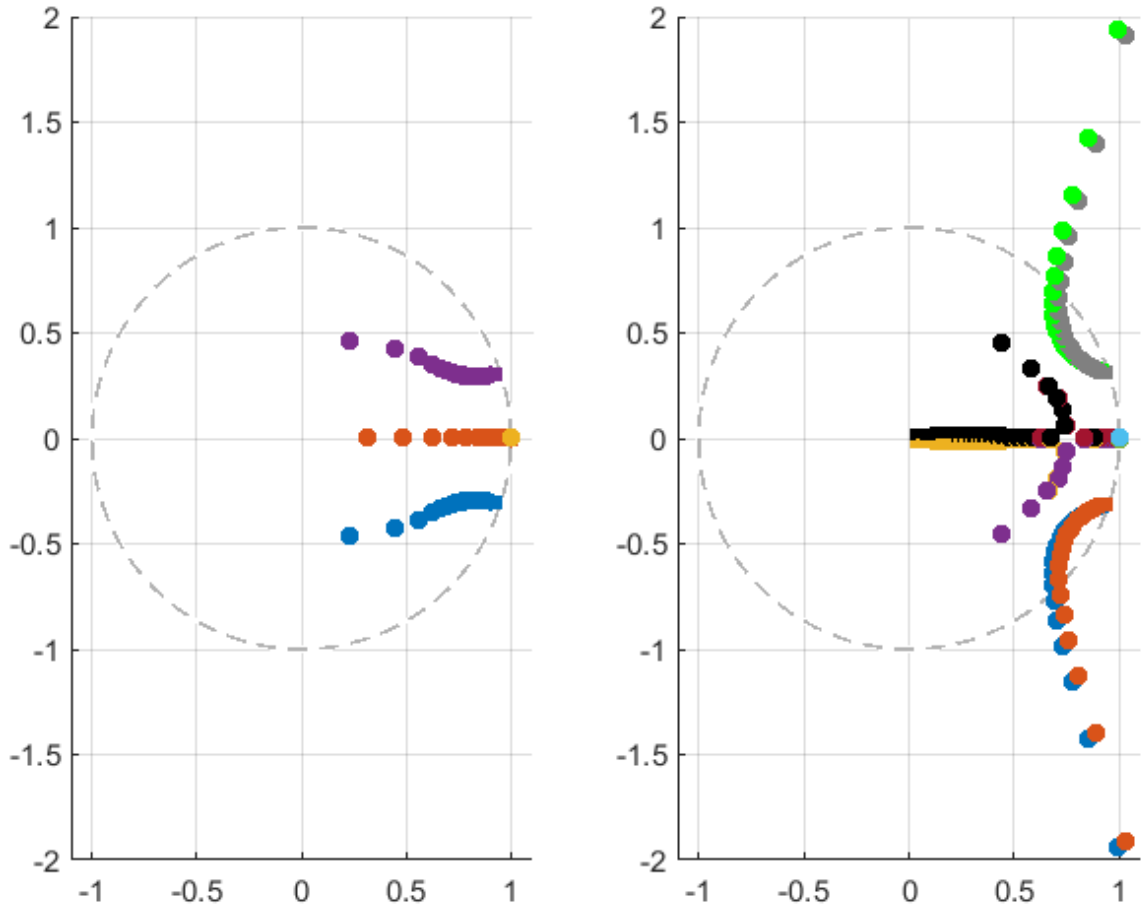
7. ábra: A kaszkád szabályozót tartalmazó zárt kör becsült póluseloszlása

A 7. ábrán látható, hogy a domináns lila pólus most is a stabilitás határán helyezkedik el (már behangolt szabályozó mellett). Ez azonban a rendszer dinamikájában kevéssé fejti ki hatását, mivel a tervezés során ezt a pólust kompenzáljuk az áramszabályozó zérusával. Megjegyzendő, hogy a 2.2-ben leírt póluskiejtés pontosan csak az önmagában alkalmazott áramszabályozó esetén teljesülne, a kaszkád struktúra pólusai és zérusai ehhez képest kis mértékben eltolódva helyezkednek el.

A dominánsnak tekinthető sárga pólus azonban szintén lassú, így várhatóan a rendszer dinamikája rosszabb lesz, mint az állapotvisszacsatolás alkalmazása mellett.

Ezen szabályozó esetén két paraméter hangolható:

- Az a paraméter csökkentésével a rendszert az instabilitás irányába mozdítjuk, míg növelésével a fentebb említett póluskiejtés romlik el. Emiatt a rendszert a-n keresztül nem érdemes áthangolni.
- A τ paraméter a belső, áramszabályozó kör időállandója. Növelésével a rendszer értelemszerűen lassul, azonban a csökkentése ígéretes lehetne. Az utóbbit mutatja be a 8. ábra.



8. ábra: A (17) alapján becsült és a valós rendszer póluseloszlása τ csökkentése mellett

A 8. ábra baloldalán a (17) egyenletből adódó pólusok mozgása látszik. A τ paraméter csökkentését 2 ms-tól 20 µs-ig végeztük el, amelyek mellett egyre nagyobb körökkel ábrázoltuk a vonatkozó pólusokat. Az ábra jobb oldalán szintén a kaszkád szabályozós rendszer póluseloszlása látható, azonban itt nincs elhanyagolva a keresztcsatolás hatása, illetve az impulzusszélesség-modulációból adódó késleltetés. Ez alapján elmondható, hogy kis τ mellett a tervezés során alkalmazott elhanyagolások nem tehetők meg. Emellett megállapítható az is, hogy a PI szabályozókhoz nem határozható meg (18) helyett olyan paraméter kombináció, ami lényegesen jobb dinamikát eredményezne.

3.2. Szimulációs eredmények

A szabályozók szimulációját összetételükből adódóan önálló szigetüzemben működve, 100 Ω, tisztán rezisztív terhelés mellett végeztük. (A hálózatra kapcsoláshoz legalább egy külső teljesítményszabályozó kör kialakítása szükséges.) Az itt bemutatott eredmények célja egyrészt illusztrálni az előző fejezetben ismertetett dinamikai különbségeket, másrészt képet adni a két konstrukció paraméterérzékenységéről.

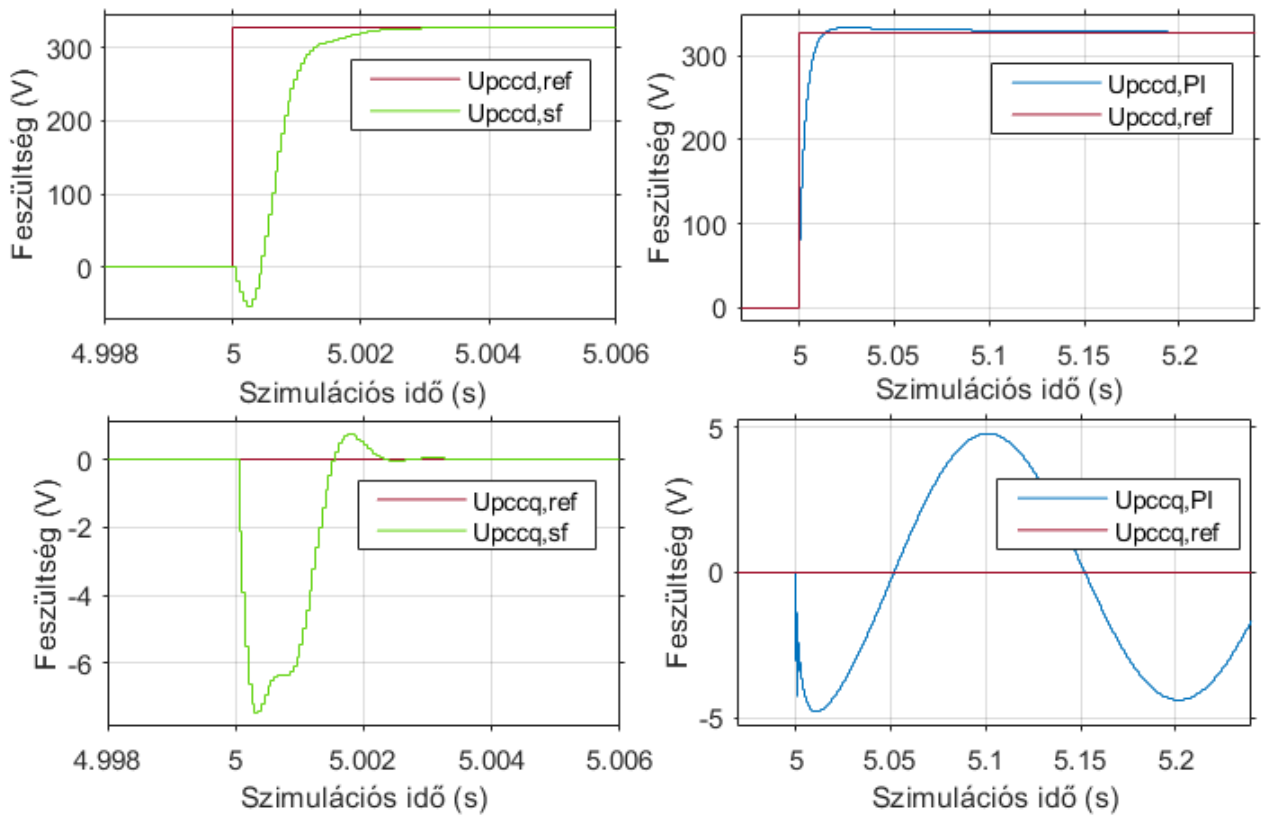
A vizsgálat során felhasznált paraméterek értékét a 2. táblázat tartalmazza.

2. táblázat: A modell paramétereinek értékei

L_f	2,5 mH		U_{DC}	700 V
R_f	22 mΩ		T_s	50 µs
C_f	10 µF		ω	$2\pi \cdot 50$ rad/s

4. ALAPJELKÖVETÉS

A munkánk során a cél a feszültség szabályozása volt, így célszerű ezen alapjelre adott választ vizsgálni. A 9. ábra egy olyan esetet mutat, amikor a konvertert egységugrásszerűen 0 V-ról 231 V fázis RMS értékre vezéreljük.



9. ábra: Egységugrás-alapjel követése (bal: állapotvisszacsatolás, jobb: kaszkád szabályozó)

A 9. ábra bal oldalán az állapotvisszacsatolt rendszer válasza látható d (fent) és q (lent) irányokra. Megfigyelhető, hogy a szabályozás rendkívül gyors, 4 ms alatt tökéletes alapjelkövetés valósul meg. Emellett a konstrukcióra jellemző kezdeti alullövés is megjelenik, ami a rendszer gyorsaságából, illetve a d-q mennyiségek egymásrahatásából adódik.

A 9. ábra jobb oldalán a kaszkád PI szabályozott rendszer válaszát ábrázoltuk hasonlóan az előzőekhez. Itt a szabályozás sokkal lassabb, a válaszjel a végértékre csak közelítőleg 150 ms eltelte után áll be (a nem tökéletes póluskiejtés miatt kisebb eltérés még 300 ms után is tapasztalható). A

keresztcsatolásnak köszönhetően a q irányban fellép egy hasonlóan gyengén csillapított lengés, ami a jobb alsó ábrán látható nagyítva.

A fentiek alapján tehát elmondható, hogy a 2.4 szerint meghatározott állapotvisszacsatolás valóban sokkal jobb dinamikájú rendszert eredményez, mivel a PI szabályozók esetén fennáll a 8. ábrán bemutatott tulajdonság, miszerint a stabilitás megtartása mellett a kaszkád szabályozót nem lehetséges gyorsabb beállításra hangolni.

4.1.1. Paraméterérzékenység

Mindkét szabályozó tervezése során figyelembe vettük a szakasz paramétereit, azaz a szűrő induktivitását és kapacitását. Érdemes tehát megvizsgálni, hogy hogyan reagálnak az egyes rendszerek, ha a valós szűrő a tervezési értékektől eltér. Az itt végzett szimulációkban szintén az előző fejezet alapjelugrásaira adott válaszokat rögzítettük, azonban a szakasz valós paramétereit perturbáltuk.

A feszültségek jelalakjait tekintve jellegbeli különbség nem alakult ki egyik szabályozó esetén sem, mindössze az állapotvisszacsatoló szabályozónál tapasztalható az allullövés és túllövés értékek változása (PI mellett ezek az értékek is szinte változatlanok). Ezen vizsgálat eredményeit a 3. táblázat tartalmazza.

3. táblázat: Az állapotvisszacsatolásos szabályozó minimális és maximális feszültségértékei különböző szűrőparaméterek mellett

L_f, C_f szorzó	0,1	0,5	1,1	1,5	2	3
$\mathbf{min}\{U_{pcc,d}\}$ (V)	-158,6	-76,4	-49,2	-37,7	-28,4	-17,3
$\mathbf{max}\{U_{pcc,d}\}$ (V)	-	-	-	355,6	405,3	481,6
$\mathbf{min}\{U_{pcc,q}\}$ (V)	-18	-10,1	-7,6	-14,8	-26,1	-70,4
$\mathbf{max}\{U_{pcc,q}\}$ (V)	3,6	1	1,4	7,3	22,2	73,6

Összességében megállapítható, hogy a PI szabályozók kevésbé érzékenyek a szűrőparaméterek perturbációjára. Az állapotvisszacsatolás esetén instabilitás alakul ki, ha a 3. táblázat szorzóját 5 fölé emeljük, azonban a valóságban ilyen mértékű bizonytalanság valószínűtlen. A 3. táblázat tapasztalatait azonban érdemes lehet a tervezési folyamatban alkalmazni, azaz, paraméterbizonytalanság és kis túllövés igénye esetén érdemes inkább túlbecsülni a szűrőparamétereket (vagy alullövés esetén alulbecsülni).

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A jelen cikkben bemutattuk az állapotteres szabályozó, mint modern irányításelméleti megoldás, alkalmazását teljesítményelektronikai környezetben, valamint a szabályozó tervezését is elvégeztük a teljes rendszer póluseloszlásának vizsgálatával. A későbbiekben ezt a konstrukciót a kaszkád PI

feszültségszabályozóval állítottuk párhuzamba, és ahhoz viszonyítva vizsgáltuk az irányítás dinamikáját és paraméterérzékenységét. Megállapítottuk, hogy az alapjelkövetés (illetve általánosan a szabályozás) gyorsaságában lényeges előnye van az állapotteres szabályozónak, míg a robosztusság szempontjából a PI szabályozó valamivel kedvezőbb választás. Stabilitási problémákat a szimulációk során azonban csak nagy paraméter-eltéréseknél tapasztaltunk, így kijelenthető, hogy az állapotvisszacsatoló szabályozó képes átvenni a kaszkád szabályozó szerepét a modern konverterekben.

Munkánk folytatásaként vizsgálni fogunk fejlettebb, valamivel könnyebben hangolható állapotvisszacsatoló szabályozókat is, ahol a költségfüggvényben az állapotváltozók helyett a hibajel nagysága súlyozható [8]. Ezen felül érdemes az itt bemutatott összehasonlító vizsgálatokat bővíteni, és tényleges fizikai környezetben, valós idejű szimulátor segítségével elvégezni. Végül céljaink között szerepel további fejlett algoritmusok (például a korábban említett MPC) megvalósítása, valamint tulajdonságainak összemérése az itt elemzett szabályozókkal.

6. HIVATKOZÁSOK

[1] B. Lantos, Irányítási rendszerek elmélete és tervezése I., vol. I. Budapest: Akadémiai Kiadó, 2016.

[2] M. Lu, X. Wang, P. C. Loh, F. Blaabjerg, and T. Dragicevic, “Graphical Evaluation of Time-Delay Compensation Techniques for Digitally Controlled Converters,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 33, no. 3, pp. 2601–2614, Mar. 2018, doi: 10.1109/TPEL.2017.2691062.

[3] J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg, and P. Rodríguez, “Control of Power Converters in AC Microgrids,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 27, no. 11, pp. 4734–4749, Nov. 2012, doi: 10.1109/TPEL.2012.2199334.

[4] A. Yazdani and R. Iravani, Voltage-Sourced Converters in Power Systems. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2010.

[5] S. D’Arco, J. A. Suul, and O. B. Fosso, “Control system tuning and stability analysis of Virtual Synchronous Machines,” in 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Sep. 2013, pp. 2664–2671, doi: 10.1109/ECCE.2013.6647045.

[6] J. Dannehl, F. W. Fuchs, and P. B. Thøgersen, “PI state space current control of grid-connected PWM converters with LCL filters,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 25, no. 9, pp. 2320–2330, 2010, doi: 10.1109/TPEL.2010.2047408.

[7] B. Lantos, Irányítási rendszerekBudapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Villamos Energetika Tanszék elmélete és tervezése II., vol. II. Budapest: Akadémiai Kiadó, 2016.

[8] J. F. Patarroyo-Montenegro, J. D. Vasquez-Plaza, F. Andrade, and L. Fan, “An optimal power control strategy for grid-following inverters in a synchronous frame,” Appl. Sci., vol. 10, no. 19, pp. 1–17, 2020, doi: 10.3390/app10196730.

Szathmári Gábor, Dr. Josevsky Martina
??

Modell alapú prediktív szabályozás mikrogridek tranziens stabilitásának eléréséhez

A villamosenergia-rendszerünk működésének egyik legalapvetőbb feltétele a termelt és az elfogyasztott energia mennyiségének folyamatos egyensúlya. Hagyományosan ennek elérése a hálózatra csatlakozott generátorok primer-szekunder-tercier szabályozásával valósult meg, amik emellett forgótömegüknek köszönhetően fizikailag is korlátozzák a hálózati frekvencia változásának dinamikus ingadozását. Az utóbbi években azonban a hálózatra elszórtan, teljesítményelektronikával csatlakozó, általában nem, vagy csak korlátozottan szabályozható, megújuló termelők térnyerésével a hálózat inerciája és szabályozóképessége is csökkent, így egyre nagyobb figyelmet kapott a különböző újszerű szabályozási módszerek kutatása és fejlesztése. Az egyik, ezzel kapcsolatban egyre gyakrabban hallható fogalom a mikrogridek megjelenése volt, ami elsősorban azzal áll kapcsolatban, hogy a kisebb, elszórva elhelyezett termelőket is képessé kel tenni a szabályozásában való részvételre, majd a hálózat egyes részeit a szigetszerű önellátásra, így a hálózat esetleges problémája esetén azok képesek lesznek önmagukat a hálózatról ideiglenesen leválasztani és önállóan, szigetüzemben működni. Egy ilyen szigetüzemben működő hálózaton azonban várhatóan drasztikusan, akár nullára is csökkenhet az inercia értéke, így a szabályozási folyamatainkat is dinamikusabb frekvenciaváltozásokhoz kell majd igazítani, fontosabb szerepet kap majd a tranziens stabilitás kérdése.

Egy új, szigetüzemre is képes, a tranziens stabilitás biztosításához is használható szabályozás módszer, a címben is említett úgynevezett modell alapú prediktív szabályozás (model predictive control). Ebben nem csak a hálózat jelenlegi állapotát vesszük alapul, hanem a hálózat topológiájának ismeretében, annak viselkedést modellezve optimalizáljuk a jelen és jövőbeli szabályozási folyamatot.

Előadásomban a modell alapú prediktív szabályozás alapjait és energetikai jelentőségét mutatom be, majd egy gyakorlati példán demonstrálom a működését egy fotovoltaikus termelőkkel ellátott szigetüzemű hálózat esetében.

Szirbik Bence, Dr. Raisz Dávid
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Villamos Energetika Tanszék

Konverter-alapú lineáris rendszerdinamika vizsgálata

A cikkben bemutatása kerül egy újfajta inverter szabályozási módszer, amely lényeges előnyökkel szolgálhat a jövőben. A lineáris rendszerdinamika (LSD) célja, hogy egységes dinamikát biztosítson a hálózatra csatlakoztatott invertereknek a teljes működési tartományban. Az elméleti levezetés után felsorolásra kerül néhány megvalósítási lehetőség. Munkámnak kiemelt célja, hogy a számítógépes szimulációkon túl valódi eszközökön teszteljem a szabályozást. Az elméleti eredmények validálása power hardware-in-the-loop (PHIL), vagyis erősáramú laboratóriumi környezetben történik, amiből ismertetésre kerülnek a felhasznált programozható inverterek és valós idejű vezérlőegység.

Abstract – In this paper, a new type of inverter control method is presented which may offer significant advantages for the future. Linear system dynamics (LSD) aims to provide uniform dynamics for grid-connected inverters over the entire operating range. After the theoretical derivation, some possible implementations are listed. The main goal of my work is to test the control on real devices after the computer simulations. The theoretical results will be validated in a power hardware-in-the-loop (PHIL) laboratory environment, from which the programmable inverters and real-time control unit used will be described.

Kulcsszavak: inverter, szabályozástechnika; lineáris rendszerdinamika; PHIL teszt

1. BEVEZETÉS

A villamosenergia-rendszer mind termelői, mind fogyasztói oldalon átalakulóban van. A környezetvédelmi célok elérése érdekében a megújuló energiát hasznosító erőművek telepítése elengedhetetlen. Mérnöki szempontból a decentralizált energiatermelésben résztvevő új kapacitások hálózatba integrálása nagy feladatot jelent az elkövetkezendő évekre.

A modern teljesítményelektronika fejlődése elősegíti a váltakozó áram és egyenáram közötti átalakítást (akár) mindkét irányba. Mindezt megfizethető piaci áron és jó hatásfokkal. Alkalmazásukkal az egyenfeszültséget előállító napelemes termelők és az egyenáramot tároló akkumulátorok is jól beilleszthetővé váltak a váltakozó áramú villamosenergia-rendszerbe. A konverterek nagyszámú elterjedése azonban csökkenti a rendszernek stabilitást biztosító forgótömeget, ezért újfajta szabályozási eljárások kidolgozása szükséges. Konverter-alapú hálózat üzembiztos fenntartásához az új termelőknek hozzá kell járulniuk a feszültségtartáshoz, hibák elhárításához és inerciát biztosítani a frekvenciastabilitáshoz. [1]

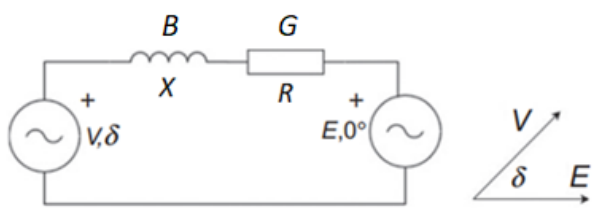
Az új kihívások mellett látnunk kell a digitális eszközökben rejlő lehetőségeket, hiszen jól alkalmazható rugalmasságot ad a villamosenergia kezeléséhez minden területen. Az előállítás oldalon egyre több a kis egységteljesítményű inverteres termelő, amelyeket egyesével kezelni szinte lehetetlen feladat lenne, ehelyett lokálisan, önmagukban kell elég fejlettnek lenniük hálózattámogató funkciók eléréséhez.

2. LINEÁRIS RENDSZERDINAMIKA ELMÉLETE

Modern fejlesztésekben elterjedt szemlélet, hogy olyan szabályozási köröket alakítsunk ki az inverterekben, amelyek a hagyományos szinkrongépek viselkedését követik a stabilitás fenntartásának érdekében (virtuális szinkrongép szemlélet - VSM). Így érhető el az, hogy az teljesítményelektronikai átalakítókkal csatlakozó eszközök nagyszámban integrálhatók legyenek meglévő szinkrongép-alapú rendszerbe.

A virtuális inercia alkalmazásán túl az inverterek szabályozásában több lehetőség is rejlik ennél, mivel nincs mögöttük a forgógépek fizikai kialakításából fakadó korlátozó tényező. A lineáris rendszerdinamika (LSD) elmélete fordítva közelíti meg a problémát. Az elvárható legjobb tulajdonságok között szerepel az, hogy a termelő egység az aktuális munkapontjától független dinamikával rendelkezzen. Ennek megvalósításával a rendszer stabilitása könnyebben vizsgálható anélkül, hogy egyesével elemeznénk az üzemállapotokat, ami több ezer invertert tartalmazó rendszerben hamar kezelhetetlenné válik. Az elméleti összefoglaló forrása Converter-Based Dynamics and Control of Modern Power Systems című könyv 9. fejezete. [2]

2.1. Lengési egyenletek



1. ábra Egygépes rendszer ábrája [3]

Az egyenleteket egy egygépes rendszerre mutatjuk be (SMIB- Single Machine Infinite Bus), ahol a végtelen erős mögöttes hálózat helyettesítő képében az E konstans feszültségforrást jelent. A rendszer dinamikáját az (1)-(2)-ben felírtak szerint működik, a távvezetéken átvitt teljesítményt a (3)-as adja meg [3]:

$$\dot{\omega} = \frac{1}{M}(P_{ref} - P - D \cdot \dot{\delta}) \tag{5}$$

$$\dot{\delta} = \omega - \omega_n \tag{6}$$

$$P = V^2 G - EV(B \sin\delta + G \cos\delta) \tag{7}$$

ahol az M az inercia konstans, a D csillapítási állandó, az ω a forgógép aktuális körfrekvenciája, ω_n névleges körfrekvencia, P_{ref} jelöli a referencia teljesítményt (mechanikai), P az aktuális átvitt teljesítmény, $Y = G + jB$ a helyettesítő kép admittanciája, a V a szinkrongép kapocsfeszültsége, és δ a E és a V közötti szögkülönbséget jelenti.

A továbbiakban a rezisztív tagot annak érdekében hanyagoljuk el ($R \approx 0, B = {}^{1}/_{X}$), hogy a példák lengései szembetűnőbbek, könnyebben elemezhetők legyenek. A (1)-es egyenletbe helyettesíthetve a következőt kapjuk:

$$\dot{\omega} = \frac{1}{M}(P_{ref} - \frac{EV}{X} \cdot sin\delta - D \cdot \dot{\delta}) \tag{8}$$

A (4) és a (2) egyenletek felhasználásával az alábbi differenciálegyenlet-rendszerbe összefoglalhatók az eddigiek. A $sin\delta$ szorzó miatt az látható, hogy a változók közötti összefüggés a szinusz miatt nemlineáris, a δ miatt munkapontfüggő.

$$\begin{bmatrix}\dot{\delta}\\ \dot{\omega}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & \omega\\ -\frac{EV}{MX}sin\delta & -\frac{D}{M}\omega\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1\\1\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0 & -1\\ \frac{1}{M} & -\frac{D}{M}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}P_{ref}\\ \omega_n\end{bmatrix} \tag{9}$$

A mátrixos alak a (9) esetén még kevésbé indokolt (nincs szorzás az első tagnál), de a linearizált esetben már értelmet nyer, és így könnyebben összehasonlíthatók. Ha kiválasztunk egy δ_0 tetszőleges munkapontot a stabil $\delta < 90°$ tartományról, akkor a lengési egyenlet a kisjelű változásokra linearizálható. A (11) felírás egy állapotteres leírásra emlékeztet, ahol állapotváltozók (x vektor) Δ-val jelölt szög- és frekvenciaváltozások (a választott munkaponthoz képest). A bal oldalon az idő szerinti deriváltjuk szerepel, (t) időfüggés jelölés elhagyva.

$$x=\begin{bmatrix}\Delta\delta\\ \Delta\omega\end{bmatrix}, u=\begin{bmatrix}P_{ref}\\ \omega_n\end{bmatrix} \tag{10}$$

$$\begin{bmatrix}\dot{\Delta\delta}\\ \dot{\Delta\omega}\end{bmatrix}\approx\begin{bmatrix}0 & 1\\ -\frac{EV}{MX}cos\delta_0 & -\frac{D}{M}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\delta\\ \Delta\omega\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0 & -1\\ \frac{1}{M} & -\frac{D}{M}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta P_{ref}\\ \Delta\omega_n\end{bmatrix} \tag{11}$$

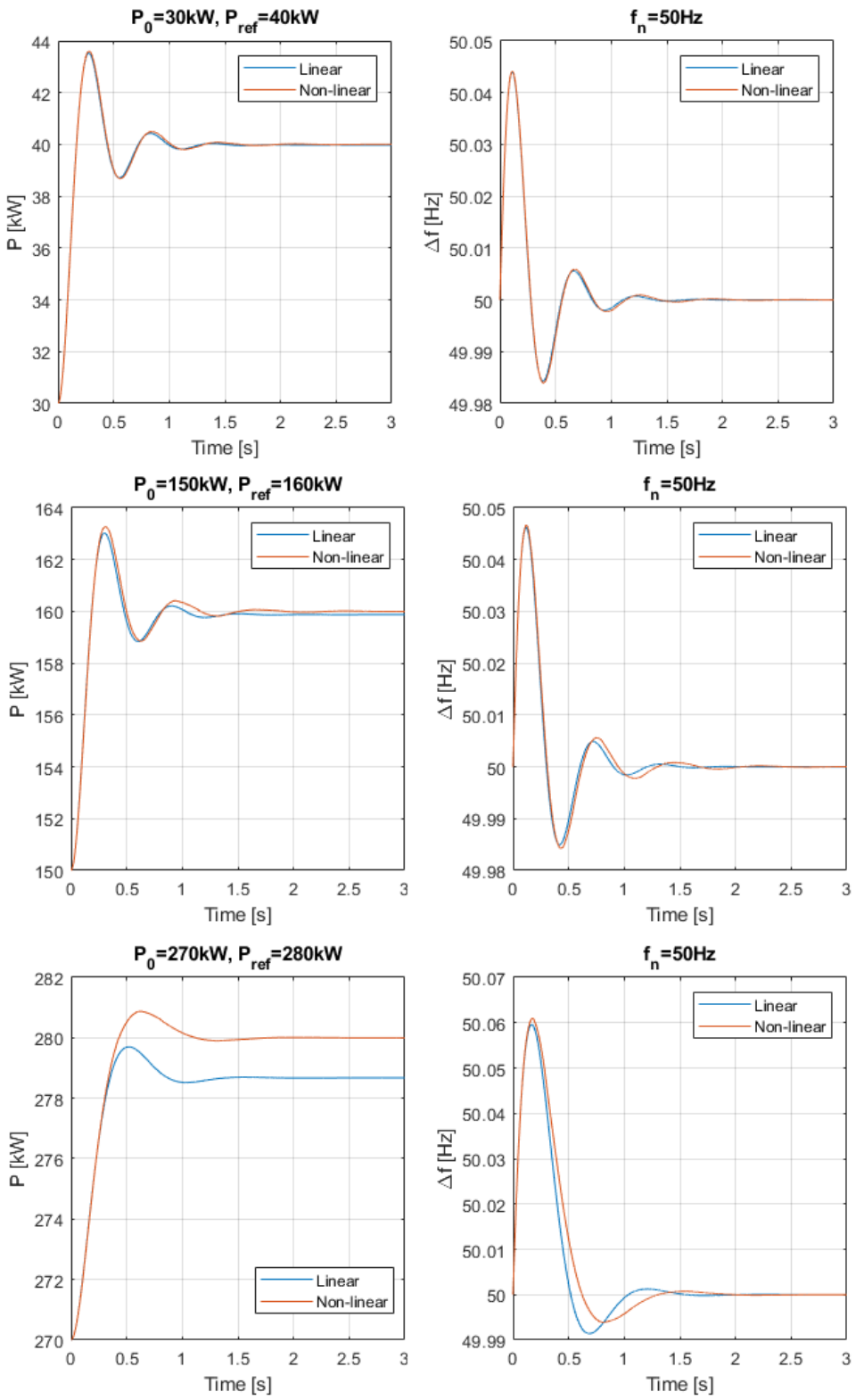
Az x vektor előtti 2x2-es mátrixot szokás A-val jelölni, ez adja meg a kapcsolatot $\dot{x}$ $és$ x között. Az A mátrix a rendszer dinamikáját foglalja magában, a sajátértékei elárulják milyen viselkedést várhatuk tőle.

$$\lambda^2+\lambda\cdot\frac{D}{M}-\frac{EV}{M}\cdot B\cdot cos\delta_0=0 \tag{12}$$

$$\lambda_{1,2}=-\frac{D}{2M}\pm\sqrt{\left(\frac{D}{2M}\right)^2+\frac{EV}{MX}\cdot cos\delta_0} \tag{13}$$

Továbbra is látszik, hogy a δ_0 szög szerepel a kifejezésekben, megmondja melyik munkapont körül végezzük a linearizálást. Előny, hogy ezzel már egy konstans A mátrixot kapunk, ami nem változik a megoldás alatt, ezért a rendszer időinvariáns, használhatunk állapotteres leírást.

Felmerülhet a kérdés, hogy mekkora hibát vétünk a linearizálással. Az eredeti nemlineáris és a linearizált egyenleteket hivatott összehasonlítani a következő szimuláció, amelyek egy kisfeszültségű hálózatra jellemző értékekkel lettek kiszámolva. A 2. ábra három különböző munkapontban mutatja az azonos $\Delta P_{ref}=10\ kW$-nyi teljesítményalapjel-ugrásra adott választ ($P_0=30,160,270\ \mathrm{kW}$).



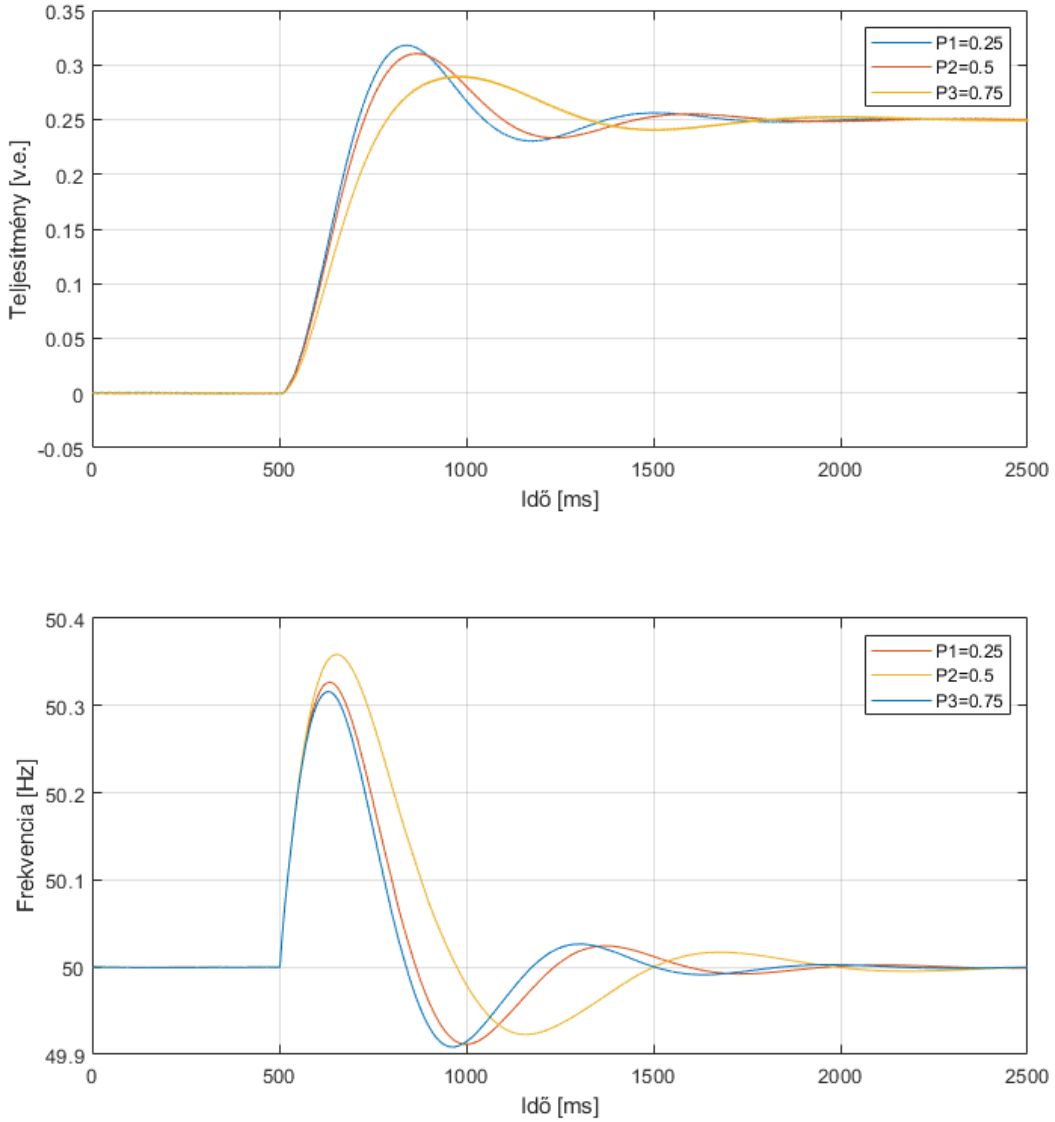
2. ábra Nemlineáris és lineáris egyenletek összehasonlítása azonos ΔP_{ref} esetén

A kétféle egyenlet jó közelítéssel ugyanazt az eredményt mutatja szögkitérítésben és frekvenciában is, így felhasználható a további számításokban. Egyedül a 3. estben figyelhető meg köztük

számottevő eltérés. A szögkitérés 1 fokkal kisebb a lineáris esetben, ami azzal magyarázható, hogy a $P_{ref} = 280kW$ teljesítménnyel már elértünk a maximálisan átvihető $P_{max} = \frac{EV}{X} = 288.44kW$-hoz.

2.2. Alap szimuláció LSD nélkül

A probléma bemutatásához megvizsgáltam azt az esetet, amikor nem alkalmazunk LSD módszert. Ebben a szimulációban az inverter egy gyengített hálózatra csatlakozott, ahol a távvezetéken átvihető maximális teljesítmény közel volt az inverter névleges teljesítményéhez, $S_n = 10\ kW$. Három, $\Delta P = 0.25$ viszonylagos egységnyi ugrással változott a teljesítmény-alapjel 0.75-ig, és ezek lengéseit hasonlítja össze a következő ábra. Látható, hogy a lengések túllövése és csillapodása különbözik, a lineáris rendszerdinamika alkalmazása ezt hivatott kiegyenlíteni.



3. ábra Lengések bemutatása LSD alkalmazása nélkül

2.3. LSD módszerek

A lineáris rendszerdinamika célja, hogy azonos választ vár el a teljes működési tartományban az alapjel-változtatás és a külső zavarások esetén is. A fizikai korlátok miatt rendszer alapvetően nem így működik. Ahhoz, hogy ezt elérjük valamelyik paramétert manipulálnunk kell oly módon, hogy működés közben a lengések sajátértékei állandóak maradjanak. Erre több választási lehetőség is adódik. Az előző fejezet egyenleteit véve azt mondhatjuk, hogy az A mátrix 2. sorának 1. helyére olyan kifejezést kell írnunk, ami sehogy sem tartalmazza az aktuális munkapontot jellemző δ-t (vagy P-t).

2.3.1. Feszültség-alapú módszer

Újra tisztán induktív hálózatot feltételezünk, és a (10)-es összefüggést igyekszünk lineáris alakra hozni. A mögöttes hálózat feszültségét (*E*) és a távvezeték jellemzőit (*X, B*) állandónak tekintjük. A képletből így csak a $V \cdot \sin\delta$ szorzat marad. Az elosztói előírásoknak megfelelően a hálózati névleges feszültséghez képest *V*-tegy adott, ε toleranciasávon belül kell maradjon, ami általában 10% alatti érték, ezért alkalmazható a $V = (1-\varepsilon)\cdot E$ helyettesítés. A linearizálás lépése itt a $sin\delta = \delta'$ helyettesítéssel történik meg, amivel eljutunk a (11)-es kifejezésig.

$$P = \frac{EV}{X}\sin\delta = \frac{E\cdot(1-\varepsilon)E}{X}\cdot\delta' \tag{14}$$

$$\delta'(P) = \frac{P\cdot X}{(1-\varepsilon)\cdot E^2} \tag{15}$$

Ezzel visszahelyettesítve az eredeti feltevésünkbe kapjuk meg a feszültségszabályozó egyenletét, aminek a felhasználása a 2.4 fejezetben van bemutatva

$$V^*(\delta') = \frac{(1-\varepsilon)\cdot E}{\sin\delta'}\delta \tag{16}$$

2.3.2. Adaptív dinamika módszere

Térjünk vissza a (9)-hez egyenlethez. A sajátértékek kifejezésében a D és M konstansok, mint szabad paraméterek szerepelnek. Szinkrongép esetén ezek adott gépparaméterek, de az inverterek szabályozásában megválaszthatjuk őket a kívánt dinamika eléréséhez, sőt működés közben is változtathatók. Bevezetjük a γ $és$ Ω nemnegatív paramétereket a sajátértékek leírásához úgy, hogy γ jelölje az első tagot, Ω a második tag gyök alatti részét. Felhasználva őket és a (9)-es egyenletet a következő kifejezésekre jutunk:

$$\lambda_{1,2} = -\gamma \pm \sqrt{\Omega} \tag{17}$$

$$M = \frac{EV}{(\Omega-\gamma^2)X}\cdot\cos\delta_0 \tag{18}$$

$$D = 2M\gamma \tag{19}$$

2.3.3. Delta-alapú módszer

Hasonlóan az előző módszerhez, itt is fix sajátértékek felírásából indulunk ki, de nem csak a paramétereket változtatjuk meg, hanem az egész lengési egyenletet újra definiáljuk. Felhasználva a (13)-as kifejezést a (7) egyenletben szereplő A mátrixot átírhatjuk:

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{EV}{MX}cos\delta_0 & -\frac{D}{M} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -(\gamma^2+\Omega) & 2\gamma \end{bmatrix} \tag{20}$$

Majd a (20) szerint immár a sajátértékek paramétereivel átírható a linearizált kisjelű modell. Itt M és D már nem szerepelnek direkt módon, így elvonatkoztathatunk tőlük.

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\delta} \\ \Delta\dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -(\gamma^2+\Omega) & -2\gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\omega \end{bmatrix} \tag{21}$$

A kisjelű modellt visszavezetve kapjuk az a differenciálegyenletet, amely pontosan meghatározza ezt a kívánt dinamikát.

$$\dot{\omega} = (\gamma^2+\Omega)\left(\delta_{ref}-\delta\right) - 2\gamma\dot{\delta} \tag{22}$$

$$\dot{\delta} = \omega - \omega_n \tag{23}$$

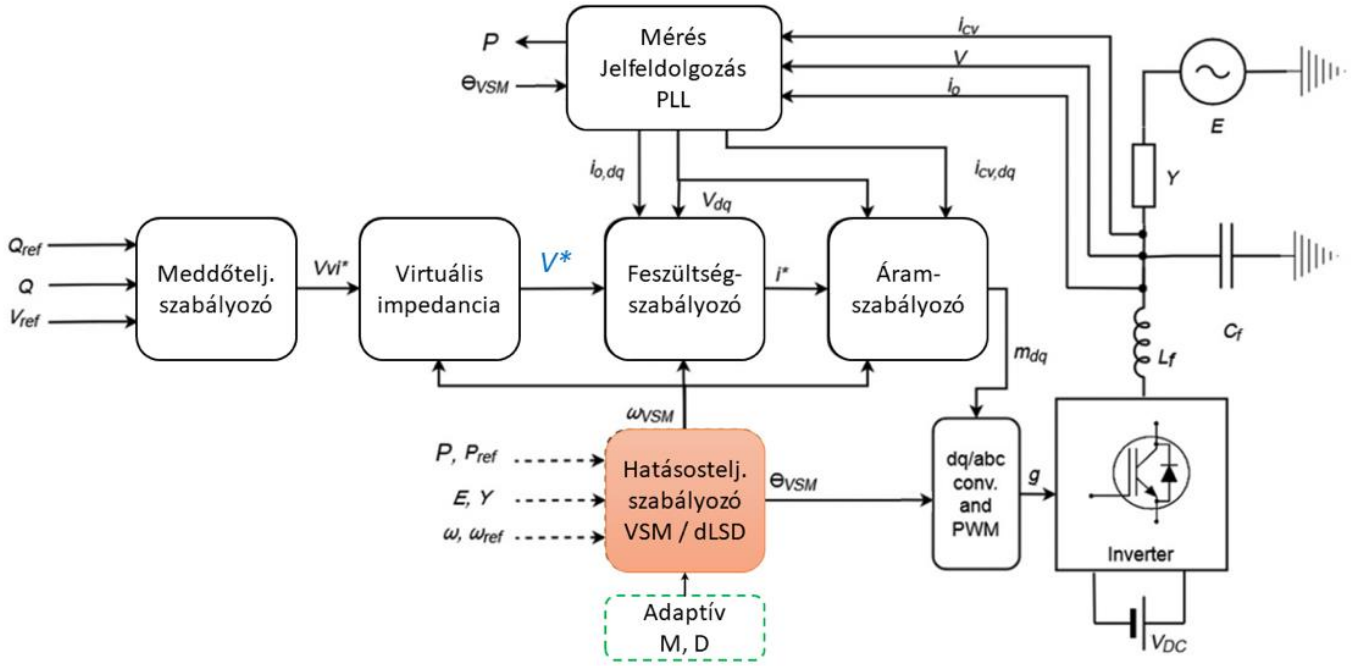
A (22)-est delta alapú lengési egyenletnek (dLSD) nevezzük, és *P* teljesítmények helyett δ terhelési szöget tartalmazza. Így szabályozáshoz szükség van δ_{ref} meghatározására az adott P_{ref} függvényében, pl. (3) alapján. Ez a lépés kulcsfontosságú annak érdekében, hogy eliminálni lehessen a teljesítmény-átvitelből adódó nemlineáris kapcsolatot. Megmutatható, hogy állandósult állapotban $\delta = \delta_{ref}, \omega = \omega_n$ teljesülnek. Az összes módszer esetében az okozza nehézséget, hogy szükség van az aktuális terhelési szög becslésére.

2.4. Implementálás a szabályozásba

A szinkrongépekre jellemző fizikai egyenletek adják az alapját virtuális inercia létrehozásának a modern inverter szabályozó logikákban, azonban ennek formája és részletessége eltérő lehet. [4] Hagyományos felépítésben a villamos mennyiségek kézben tartásához két szabályozókör követi egymást kaszkád csatolásban: a legbelső, egyben leggyorsabb kör az áramot állítja be, a másik a feszültséget. Ezek köré épülnek azon blokkok, amelyek a teljesítmény-alapjel követéséért felelnek és magukba foglalják a dinamikai tulajdonságokat, mint az beállási idő, a stabilitás és az inercia.

A 3. ábra összefoglaló módon mutatja az alap virtuális inerciát (VSM) alkalmazó struktúra továbbfejlesztésének lehetőségeit különböző színnel jelölve az egyes LSD módszereket.

Amennyiben feszültség alapú LSD-t használnánk, akkor a kék színű V^* alapjelet a (12) szerint kell számolnunk (az előtte lévő blokkok elhagyhatók). Ha az adaptív módszerrel dolgozunk, akkor a VSM blokkhoz kell bekötni a M és D változókat (szaggatott zöld keret), amelyeket működés közben a (14) és (15) egyenletekből kapunk meg. Végül a delta alapú LSD-hez a teljes narancssárga blokkot le kell cserélni.



4. ábra Virtuális inercia és lineáris rendszerdinamika szabályozást alkalmazó szabályozókörök. [2]

3. TESZTKÖRNYEZET

Az offline, számítógépen végzett MATLAB/Simulink alapú szimulációkon mellett a szabályozási technikák tesztelése valós környezetben is zajlik, a BME FIEK (Felsőoktatási és Ipari Együttműködési Központ) projektben megvalósuló MVM Smart Power Laboratóriumban. Az itteni eszközökből felépített rendszer elemeit mutatja be ez a fejezet. A moduláris inverter összeállítás lehetőséget ad többféle áramkör megépítésére és a modellek gyors tesztelésére. (rapid-prototyping).

3.1. Teljesítményelektronika

A teszteléshez szükség volt egy olyan inverterre, amelynek a tranzisztorai hozzáférhetők és így egy vezérlőegységgel irányítani lehet a kiadott feszültségét. A kereskedelemben kapható inverterek gyári felszereltséggel ezt nem tudják biztosítani. A Danfoss FC302-es családjából származó frekvenciaváltókhoz elérhetők olyan kiegészítők az eredeti kezelőpaneljük helyett, amelyek a kívánt lehetőségekkel szolgálnak. Felépítésük a közbenső egyenfeszültségű teljesítmény-átalakító eszközökhöz megszokottan alakul. Az egyenfeszültség előállítására két lehetőség is van: vagy háromfázisú táplálásról egyenirányító hídon keresztül, vagy közvetlenül az eszköz kivezetett DC sínjére csatlakozunk valamilyen egyenfeszültségű forrást és csak a váltóirányító (inverter) oldalt használjuk.

5. ábra Danfoss inverterek módosított vezérlőpanellel

3.2. Vezérlőegység

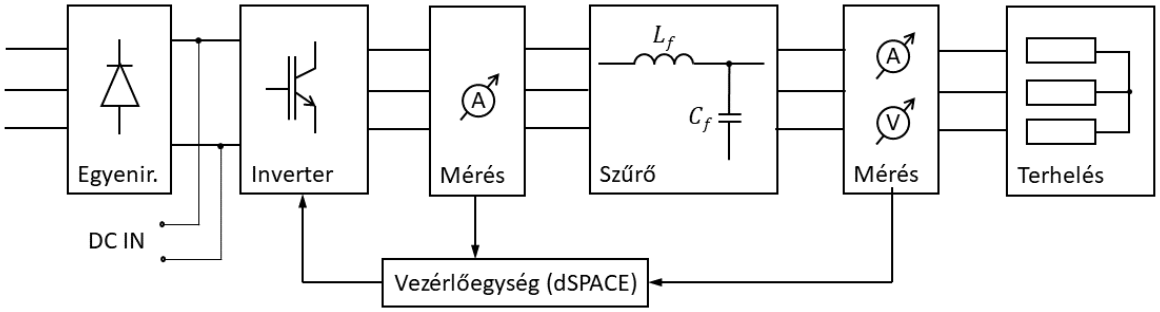
A dSPACE MicroLabBox (6. ábra) egy valós idejű számítógép, gyors FPGA számítóegységgel felszerelve, ami 48 db analóg és 60 db digitális ki- és bemenet tud egyszerre kezelni. A szoftvereinek telepítésével több új MATLAB/Simulink Toolbox válik elérhetővé, amelyek biztosítják a MicroLabBox be- és kimeneteihez való hozzáférést. A Simulinkben jól működő modellből kódot generálunk, amely feltölthető MicroLabBox memóriájába és egyből futtatható.

6. ábra dSPACE MicroLabBox előlapja DB50-es és DB9-es csatlakozókkal

3.3. Rendszer összeállítása

Az inverter kimenetére soros induktivitásból és párhuzamosan kötött kapacitásból álló szűrőt kötünk. A szabályozás visszacsatoló ágához áram- és feszültségszenzorokat szereltük fel, összesen 9 darabot. Annak érdekében, hogy a három fázisban azonos pontossággal mérjenek, előzetesen

oszcilloszkóppal kalibrációt végeztem rajtuk. A mért jeleket közvetlenül kötjük rá a vezérlőegység bemenetére, ahol 10 kHz-es mintavételi frekvenciával rögzítjük és szoftveresen kezeljük azokat, hogy megfelelő értékkel kerüljenek a szabályozókörökbe. A vezérlőjelek bekötése az inverterbe optikai kábelekkel történik.



7. ábra Rendszer felépítése

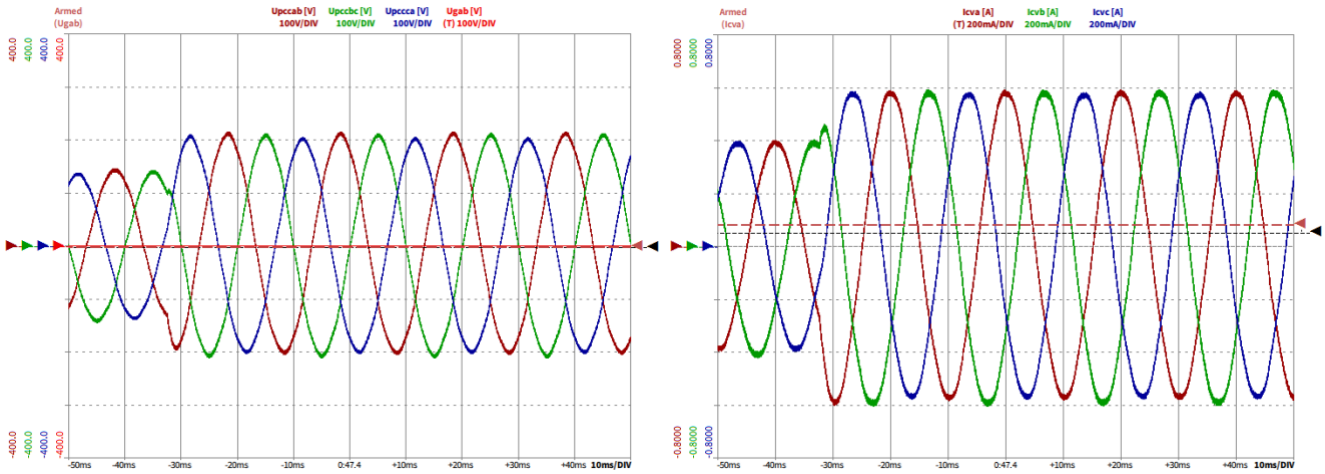
A bemutatott újfajta szabályozások kipróbálásáig több lépcsőt kell bejárni, a leírt eredményeket egyszerűsített modellek futtatásával értem el. Eddigi tesztek során a terhelés oldalára csak ellenállások lettek kötve. A hálózatra csatlakoztatáshoz szükség van még egy kapcsoló relére, amely szerelése folyamatban van, illetve meg kell oldani a relé összekötését a vezérlőegységgel. A szoftverben szinkronozó funkció fogja ellenőrizni feszültség-amplitúdó, szöghelyzet és frekvencia alapján, hogy teljesülnek-e az összekapcsolás feltételei.

1. táblázat – Rendszer paraméterei

Paraméter	Érték
Névleges feszültség	$400V$
Névleges teljesítmény	$3/5/11\ kW$
Névleges frekvencia	$50\ Hz$
Kapcsolási frekvencia	$10\ kHz$

Paraméter	Érték
Szűrő induktivitás L_f	$2{,}5\ mH$
Szűrő kapacitása C_f	$10\ \mu F$
Terhelés R	$200\ \Omega$

Szigetüzemű tesztek eredményét mutatják az alábbi képek, amelyek nagy felbontású oszcilloszkóppal lettek felvéve 2 MHz-en. A szabályozó ún. *grid-forming* üzemet valósított meg. Ilyenkor az inverter határozza meg a feszültség nagyságát és frekvenciáját csatlakozási pontján, és nem csak betáplál a hálózatba. Ebben az összeállításban a feszültség beállítása után a fix ellenállásokon azonnal kiadódik a teljesítmény, ezért még nem megfigyelhető a virtuális inercia funkciója. Ehhez a terhelés oldalon kell változást előidézni például egy másik ellenállás bekapcsolásával vagy hálózatra csatlakozás esetén a betáplált hatásos teljesítmény ugratásával. A mérés alapján elmondható, hogy a szabályozó működése stabil és a felvétel elején látható alapjel-változtatást is jól leköveti.



88. ábra Feszültség és áram diagram grid-forming üzemmódban

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen cikk elméleti és gyakorlati oldalról is betekintést nyújt egy új szabályozási eljárás kezdetektől való kidolgozásához, amely hálózatra csatlakozó inverterekre alkalmazható. A szoftveres és hardveres fejlesztés és tesztelés egymással párhuzamosan zajlott és folytatódik tovább. A felépített hardver környezet programozható invertere révén alkalmas arra, hogy tetszőleges szabályozási algoritmust valós környezetben tesztelni lehessen. Következő munkám során szeretnék eljutni oda, hogy a lineáris rendszerdinamika módszerei is működjenek rajta.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A FIEK_16-1-2016-0007 számú projekt a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból biztosított támogatással, a Felsőoktatási és Ipari Együttműködési Központ - Kutatási Infrastruktúra Fejlesztése (FIEK_16) pályázati program finanszírozásában valósult meg.

6. HIVATKOZÁSOK

[1] ENTSO-e, “European Network of Transmission System Operators for Electricity Grid-Forming Capabilities: Towards System Level Integration About ENTSO-E,” 2021. Accessed: Jul. 26, 2021. [Online]. https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/RDC%20documents/210331_Grid%20Forming%20Capabilities.pdf

[2] Antonello Monti, Federico Milano, Ettore Bompard, and Xavier Guillaud, Converter-Based Dynamics and Control of Modern Power Systems. Elsevier, 2021., ISBN: 9780128184912

[3] David Raisz, D. Deepak, F. Ponci, and A. Monti, “Linear and uniform swing dynamics in multimachine converter-based power systems,” International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 125, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106475.

[4] Salvatore D'Arco and Jon Are Suul, "Virtual synchronous machines — Classification of implementations and analysis of equivalence to droop controllers for microgrids," in IEEE GrenoblConference, Grenoble, France, 2013, DOI: 10.1109/PTC.2013.6652456

Török Ákos

Elosztóhálózati energiatároló megoldás a napelemes energiatermelés hatásainak kezelésére

Az IElectrix (Indian and European Local Energy CommuniTies for Renewable Integration and the Energy Transition) egy nemzetközi együttműködés keretében megvalósuló Európai Uniós projekt. A projekt fő célja, hogy egyrészt elősegítse az energiaközösségek létrejöttét, azon energiaközösségekét, melyek kiemelt szereppel bírnak a Negyedik Energiacsomagban, másrészt, hogy hozzájáruljon a megújulók minél gyorsabb és költséghatékonyabb hálózatra csatlakoztatásához, amely elengedhetetlen ahhoz, hogy az EU 2050-re karbonsemlegessé váljon.
A projektben összesen 4 demonstrációs helyszínen telepítenek elosztói engedélyesek akkumulátoros energiatároló rendszereket, a 4 helyszín Ausztriában, Németországban, Magyarországon és Indiában található. A négy országban a megújulók elterjedése különböző stádiumban van, ezáltal a projekt keretei között lehetőség lesz bemutatni, hogy különböző esetekben, milyen módon járul hozzá az energiatárolás a projekt céljainak elérésében.
A magyarországi demonstráció két helyszínen valósul meg. A zánkai pilot esetén a megoldandó műszaki problémát a nagy nyári szezonális terhelés és az ehhez kapcsolódó, helyenként az 5%-ot is meghaladó feszültségesés jelenti. A projekt keretei között egy középfeszültségű hálózatra csatlakozó energiatárolót és továbbfejlesztett vezérelt fogyasztói rendszert együttesen alkalmazva vizsgáljuk a megoldás eredményességét.
A dúzsi pilot esetén a jelenleg csatlakoztatott naperőművek mellett már nincs lehetőség további naperőmű csatlakozási igény fogadására, azonban a jövőben arra számítunk, hogy további csatlakozási igény fog megjelenni az adott vonal közelében. Egy optimális méretű energiatároló és továbbfejlesztett fogyasztóoldali befolyásolási rendszer együttes alkalmazásával kompenzálható a napelemek feszültségemelő hatása.
Előadásomban a két és fél éve zajló projekt dúzsi helyszínén elért eredményekről, kihívásokról és az előttünk álló feladatokról kívánok röviden beszámolni.

Abstract - The Hungarian National Energy Strategy defines an ambitious goal, according to this goal is to reach 6400 MW of installed photovoltaic power plant capacity by 2030. By comparison and based on historical data, the highest measured peak load was 7119 MW in Hungary (February 11, 2021, 17:45 PM). Based on those values it can be said that weather-dependent generators will need more flexibility from the grid, which can be achieved by traditional network upgrade or alternative flexible solutions. The article presents a battery energy storage and a specific application example from the point of view of the distribution system of operators (DSO) in the area of E.ON Dél-dunántúli Áramhálózati Zrt, in Dúzs. The primary objective function of the energy storage is to handle the voltage effects of photovoltaic power plants which are connected to the medium voltage network.
The first part of the article presents the grid topology, battery location and their parameters. The focus of the article is to demonstrate the effect of energy storage on the grid parameters using

network modeling software (Neplan). After choosing a possible control logic the results are demonstrated.

Kulcsszavak: Energiatároló; modellezés; elosztó hálózat; középfeszültség, feszültség szabályozás; napelem; flexibilitás; flexibilis hálózat

1. BEVEZETÉS

Az IElectrix Horizon 2020 Európai Uniós támogatású projekt összesen 5 demonstrációs helyszínen Ausztriában, Németországban, Indiában és köztük Magyarországon kettő helyszínen telepít energiatároló berendezéseket. A fő céljai közé tartozik a H2020-es projektnek, hogy elősegítse a helyi energiaközösségek létrejöttét és megtalálja az időjárásfüggő energiatermelők integrációjának a korlátait, majd vizsgálja azok megoldási lehetőségeit, köztük az energiatárolókkal. Az első demonstrációnak Zánka adott helyet, míg a cikkben is részletezett második demonstrációs helyszínnek Dúzs ad helyet.

Az elosztói engedélyes elsődleges feladatai közé tartozik a fogyasztók számára a szabványban és garantálsz szolgáltatásokban előírt megfelelő minőségű villamosenergia-ellátás biztosítása. A hálózat villamos paramétereinek megfelelő határokon belül tartásához a középfeszültségű hálózatra csatlakoztatandó erőművek teljesítményét vizsgálni szükséges és csak akkora mennyiségű kapacitás engedhető fel, adott középfeszültségű hálózatra, mely nem sérti a hálózati paramétereket. A dúzsi energiatároló elsődleges célja a napelemes energiatermelők hatásainak mérséklése elősegítve újabb napelemes energiatermelők integrációját a hálózatba.

A továbbiakban a projekt keretén belül demonstrálandó energiatároló hatásait és működését szemléltetem grafikus eszközökkel. A vizsgálatot a Neplan hálózatmodellező szoftver segítségével folytattam, mely később mérésekkel validálható lesz, az akkumulátoros rendszer beüzemelését követően.

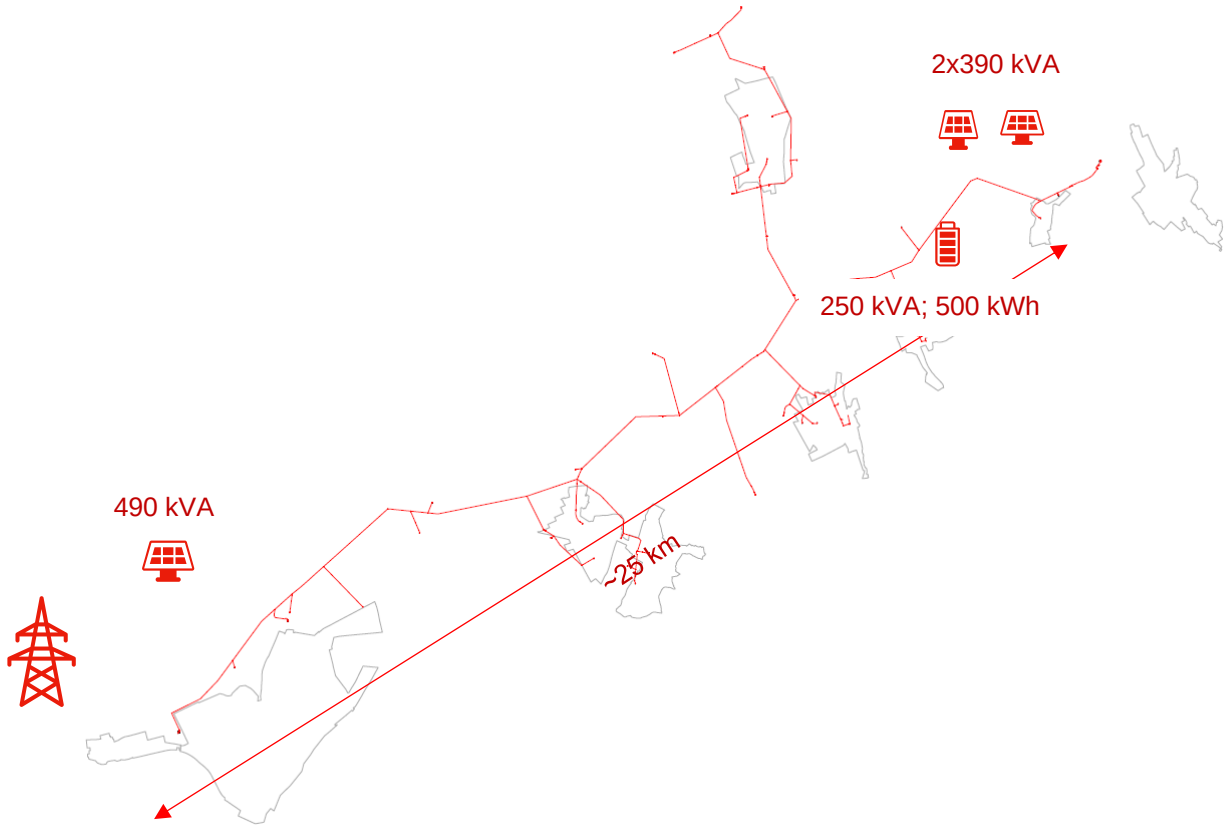
2. VIZSGÁLT 22 KV-OS VONAL TOPOLÓGIÁJA

Az energiatároló elsődleges célja, hogy a jelenlegi KöF hálózatra csatlakozó napelemes energiatermelők hálózatra gyakorolt hatásait mérsékeljük és ezzel javítsuk a hálózat feszültség profilját. A hálózati feszültségprofil javításával lehetőségünk nyílik új szabad erőműves kapacitás kiígérésére a hálózaton.

A projekt keretén belül kijelölt KöF hálózatra jelenleg 3 db naperőmű csatlakozik. A 22 kV-os hálózatrész táplálása, azaz a NaF alállomás az 1. ábra bal szélén található. A 132/22 kV-os alállomástól nem messze található egy 490 kVA névleges teljesítményű napelemes kiserőmű. A vonal végén pedig még található 2 db 390 kVA-es naperőmű. Az utóbbi kettő kiserőmű a vizsgálatok alapján a hálózat egyik nagy impedanciás pontjára csatlakozik, így a feszültséget befolyásoló hatásuk is jelentős. Ezen megfontolás alapján telepítettük az energiatárolót a két napelemes kiserőmű közvetlen környezetébe.

A hálózat 22 kV-os része, illetve az összes érintett 22/0,42 kV-os transzformátor le lett képezve egy modellezési eljárással, mely esetében a Neplan szimulációs szoftvert használtuk. A NaF hálózat egy mögöttes hálózatként van felvéve a modellbe.

A telepített energiatároló teljesítménye 250 kVA, míg kapacitása 500 kWh és a lokációját az 1. ábra mutatja. Az energiatároló villamos paraméterinek indoklásához a cikk későbbi részeiben fogok kitérni.



1. ábra – Dúzsi energiatároló elhelyezkedése a középfeszültségű vonalon

3. FESZÜLTSÉGÉRZÉKENYSÉGI TÉNYEZŐ RELEVANCIÁJA A PROJEKTBEN

Az energiatároló inverter tulajdonságai közé tartozik az, hogy képes meddő teljesítményt is előállítani a hatásos teljesítmény mellett. Ez azért is egy fontos összetevő, mert a középfeszültségű szabadvezetékes hálózat R/X aránya (ohmos és induktív fizikai jellemzőinek hányadosa) közel van az 1-hez. Ez alapján lehetőség adódik mind a hatásos teljesítménnyel, mind a meddő teljesítménnyel történő feszültségszabályozásra. A feszültségcsökkentő hatás maximális eléréséhez vizsgáltam az energiatárolót különböző üzemállapotokban.

Ebben a fejezetben a vizsgálathoz bevezettem a feszültségérzékenységi tényezőt, mely egyszerűsíteni fogja a hálózatra gyakorolt hatás modellezését és jövőbeli validálását. Továbbá összehasonlíthatóvá teszi a hatásos és meddő teljesítményeknek a hálózati feszültségre gyakorolt hatását.

A hálózati feszültség és terhelés közötti összefüggés elméleti háttere komplex, kapcsolatuk nemlineáris többváltozós függvénnyel lehetne leírni. A feszültségérzékenységi tényező bizonyos elhanyagolások mellett - mint feszültség-változás keresztirányú összetevője, aminek a feszültség

abszolút értékére nincs nagy hatása - egy jó közelítést ad arra, hogy egységnyi teljesítmény változásnak, mekkora hatása van a hálózat bármely pontjában mérhető feszültségére.

A következő egyenlet a hálózat „Y” pontjára adja meg a feszültség változást, ahol a hálózat „X” pontján a hatásos teljesítményre adott válasza $\frac{\delta|U_y|}{\delta P_x}$, míg a meddő teljesítményre $\frac{\delta|U_y|}{\delta Q_x}$. A ΔP_x pedig az „X” ponton a hatásos teljesítmény változás, a ΔQ_x pedig, az „X” ponton a meddő teljesítmény változás. A mi esetünkben, azon a ponton figyeljük a hatást, ahol be is avatkozunk, ezért az X és az Y pont ebben az esetben ugyanaz [3].

$$\Delta|U_y| = \sum_x \frac{\delta|U_y|}{\delta P_x} \cdot \Delta P_x + \frac{\delta|U_y|}{\delta Q_x} \cdot \Delta Q_x \tag{1}$$

Az (1) egyenlet tehát azt mutatja meg, hogy a hálózat egy adott pontján 1 kW vagy 1 kvar betáplálás/fogyasztás hatására a feszültség abszolút értéke a hálózat egy másik vagy ugyanazon pontjában mekkorát változik. Ez a fajta megközelítés egy egyszerű módja a hálózat adott pontjában a feszültségek kisebb változásainak megfigyelésére.

A feszültségérzékenységek további előnye, hogy azonnal összehasonlíthatóak egymással és eldönthető, hogy a hatásos vagy a meddő összetevőnek van jelentősebb befolyása a hálózat adott pontjára.

A másik előnye, hogy amennyiben a feszültségszabályozás az elsődleges célunk, az érzékenységi tényezők és a kívánt kiszabályozandó feszültségből méretezhető a berendezésünk. Az 1. egyenletből kifejezhető a 2. egyenlet, így megkapható az adott feszültségváltozáshoz szükséges hatásos vagy meddő teljesítmény mértéke.

$$\Delta P_x = \frac{\Delta|U_{cél}|}{\frac{\delta|U_y|}{\delta P_x}} \qquad \Delta Q_x = \frac{\Delta|U_{cél}|}{\frac{\delta|U_y|}{\delta Q_x}} \tag{2}$$

4. AZ ENERGIATÁROLÓ NÉVLEGES TELJESÍTMÉNYÉNEK KIVÁLASZTÁSA A HÁLÓZAT ÉRZÉKENYSÉGÉNEK MEGFELELŐEN LOAD-FLOW SZIMULÁCIÓ SEGÍTSÉGÉVEL

Az energiatároló névleges teljesítményének a kiválasztásához tudnunk kellett, hogy mekkora feszültségingadozást szeretnénk a KöF hálózaton csökkenteni és mekkora a hálózat feszültségérzékenységi tényezője ott, ahol a napelemes energiatermelők is vannak (végpont, mint nagy impedanciás pont, ezért feltételezhető. hogy itt a legnagyobb a feszültségre történő hatás). A célunk, hogy a feszültség csúcsait csökkentsük, míg lehetőségünk szerint a feszültség völgyeit növeljük.

Amennyiben a napon belüli volatilitás csökkentése a cél akkor, nem kell a teljes minimum és maximum feszültség különbséggel kalkulálnunk. Egy példánál maradva, amennyiben a feszültség napon belüli ingadozása a KöF hálózaton 400 V-os sávot jár be, abban az esetben célszerű úgy megválasztani a teljesítményt, hogy a felső sávból 200 V-ot tudjon levágni, míg az alsó sávból 200 V-ot emelni, így a tároló teljesítményét nem a 400 V-nak megfelelően kell megválasztani, hanem a 200 V-nak.

A projekt elsődleges célja, hogy ~1%-al tudjuk csökkenteni a feszültség maximumot napközben. A névleges teljesítmény számításához tehát tudnunk kell, hogy mekkora a feszültségérzékenységi tényező a hálózat azon pontján, ahova mi telepíteni fogjuk az energiatárolót.

Egyes vizsgálatoknál egyidejűleg az energiatároló egy fajta teljesítménnyel (pl.: csak töltés) avatkozott be, így ha a 4 térnegyedet végig jártjuk négyfajta feszültségérzékenységi tényezőt kapunk. A vizsgálatban több egységteljesítményt is kipróbáltam (100, 250, 500 kW és kvar), mely során azt a következtetést vontam le, hogy az érzékenységi tényezőkben nincs jelentős eltérés. A szimulációk eredményt a következő táblázatban látható, mely kifejezetten a tároló csatlakozási pontján mutatja a feszültség érzékenységi tényezőket.

1. táblázat – Feszültségérzékenységi tényezők a tároló 22kV-os oldalán

V/kW; V/kvar	Töltés (+P)	Kisütés (-P)	Induktív (+Q)	Kapacitív (-Q)
	22 kV	22 kV	22 kV	22 kV
Átlag	-0,6338	0,5832	-0,5833	0,5334

Megfigyelhető, hogy a töltés és kisütés érzékenységi tényező abszolút értéke kis mértékben eltér és ez szintén elmondható az induktív és kapacitív érzékenységi tényezőkre. Ebből is látszik, hogy a hálózatot nem teljesen lehet leírni lineáris paraméterekkel. Ezt később bizonyíthatjuk a visszamérésekkel is az energiatároló üzembe helyezését követően. Mivel az eltérés nem jelentős, a következőkben tekintsünk el ettől.

A feszültségre gyakorolt hatás maximuma egy olyan teljesítmény tényezővel tudjuk elérni, ami a hatásos és meddő teljesítmény (+P és +Q) kombinációja. A feszültség érzékenységi tényezők alapján kiszámítható, hogy melyik az a teljesítménytényező (cos φ), amellyel a legnagyobb feszültségváltoztató hatást lehet elérni. Az arctg függvény adja a teljesítmény háromszögben az átfogó és a befogó közötti szöget. A φ_-- al jelöltem, azt az állapotot, mely alkalmazásával a maximális feszültségcsökkentés érhető el és a φ_+-al a maximális feszültségemelés érhető el.

$$\varphi_- = arctg\ \frac{+Q}{+P} = arctg\ \frac{-0{,}583}{-0{,}6338} = arctg\ 0{,}92 = 42{,}61° \tag{3}$$

$$\varphi_+ = arctg\ \frac{-Q}{-P} = arctg\ \frac{0{,}5334}{0{,}5832} = arctg\ 1{,}0937 = 42{,}44 \tag{4}$$

A két szög koszinusza a következőként alakul, amiknek a különbsége egymáshoz képest elenyésző.

$$cos\varphi_- = \cos 42.61 = 0{,}7359 \tag{5}$$

$$cos\varphi_+ = \cos 42.44 = 0{,}7379 \tag{6}$$

Elmondható a számítások alapján, hogy közel cos45°-nál van a feszültség csökkentő és növelő hatás maximuma. A maximális hatás a szabadvezetékes hálózat tulajdonságára következtethető vissza. A KöF szabadvezetékes hálózat helyettesítő kapcsolásában a soros elemek ohmos és induktív aránya közel 1, ennek megfelelően a hatásos és meddő teljesítményeknek hasonló hatásuk van a feszültség abszolút értékére. A teljesítmények ilyen módú variálásával tehát elérhetjük a maximális feszültségemelő vagy csökkentő hatást a tároló csatlakozási pontjánál.

A fenti 2. egyenlet egyikébe, a hatásos teljesítmény változás számításba, ha behelyettesítünk 1%-os KöF feszültség változást (220V) és a fenti hatásos érzékenységi tényező egyikét (~0,6 V/kW), akkor 366,6 kW-ot fogunk kapni.

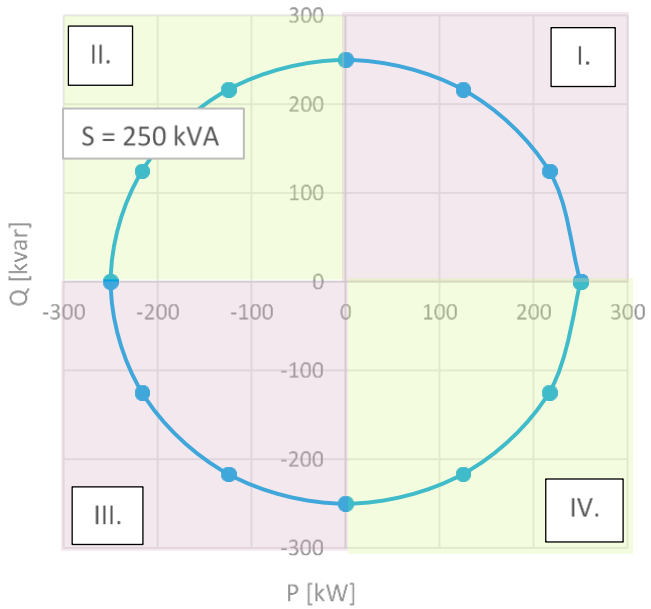
Az 1. egyenlet szerint a hatások összeadódnak, így amennyiben a legnagyobb hatást akarjuk kifejteni a legkisebb egység teljesítménnyel, akkor a tárolót cos45°-nál kell üzemeltetni. Ezért az 1%-os KöF feszültség csökkentéshez szükséges teljesítmény kisebb lesz, mint 366 kW. Ezt iteráltan is megtehetjük és kiszámíthatjuk, hogy kb. 250 kVA teljesítményű energiatárolóval ezt eltudjuk érni.

A következő részben azokat a feltételezéseket, hogy a hatásos és meddő teljesítmények hatása előjelhelyesen összeadódik és valóban a cos45°-nál található a maximuma, a szimuláció másfajta aspektusával szeretném bemutatni.

5. FESZÜLTSÉGRE GYAKOROLT HATÁS SZIMULÁCIÓJA

Az előző vizsgálat konkrétan a feszültségérzékenységi tényezők meghatározására hajazott. Ebben a fejezetben az energiatároló névleges teljesítményét egy bázis paraméternek tekintem, és amellett változtatom az inverter munkapontját a négy villamos térnegyedben. Reményeink szerint az előzőekben kiszámolt maximális teljesítménytényezőt, ahol az energiatárolónak maximális hatása van, itt is megfogjuk találni

A 2. ábra az inverter négy térnegyedét szimbolizálja. Minden térnegyedben több pontot választottam ki, hogy megmutassam az energiatároló különböző munkapontjából adódó feszültség változtató képességét. A térnegyedek magyarázó része az ábra alatt található.



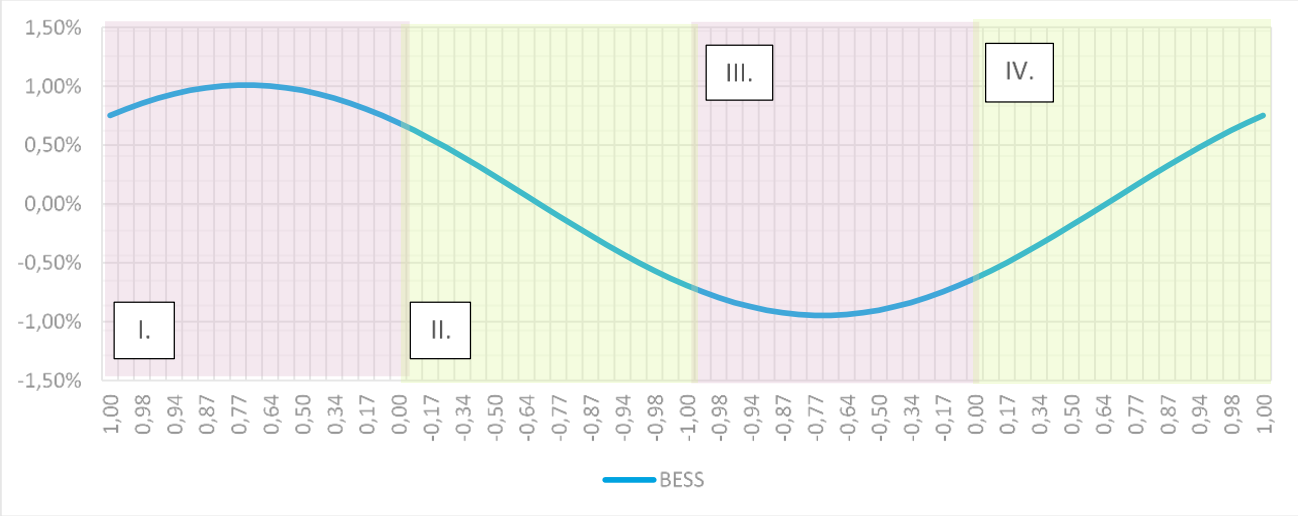
2. ábra – Dúzs - vizsgált négynegyedes inverter működés

Az I. térnegyed: Az energiatároló hatásos teljesítményt fogyaszt (terhelés) és induktív meddő teljesítményt hoz létre. (+P/+Q)

A II. térnegyed: Az energiatároló hatásos teljesítményt injektál (termel) és induktív meddő teljesítményt hoz létre. (-P/+Q)

A III. térnegyed: Az energiatároló hatásos teljesítményt injektál (termel) és kapacitív meddő teljesítményt hoz létre. (-P/-Q)

A IV. térnegyed: Az energiatároló hatásos teljesítményt fogyaszt (terhelés) kapacitív meddő teljesítményt hoz létre. (+P/-Q)



3. ábra – Vizsgált négynegyedes inverter hatása a hálózati feszültségre

Az eredményeket a 3. ábra tartalmazza. A diagram vízszintes tengelyén a teljesítménytényező látható. A függőleges tengelyen pedig az energiatároló nélküli állapot feszültsége (U_0) és a különböző üzemállapotok során létrejövő feszültség (U_1) különbsége, viszonyítva az eredeti feszültséghez ($\frac{U_0-U_1}{U_0}$). A pozitív százalékos érték feszültségcsökkentést jelent, míg a negatív százalékos érték feszültségemelést.

A szimuláció során a látszólagos teljesítmény egy állandó paraméter, melyet nem változtattam. A tároló teljesítménytényezőhöz tartozó φ szöget változtattam 30 fokonként, így végig járva a teljes kört. A visszamért feszültségváltoztató hatásról ekkor még nem gondoltam, hogy koszinusz függvényhez nagyon hasonlító függvény lesz. A különbség, hogy itt a függvénynek nem φ=0-nál van a maximuma.

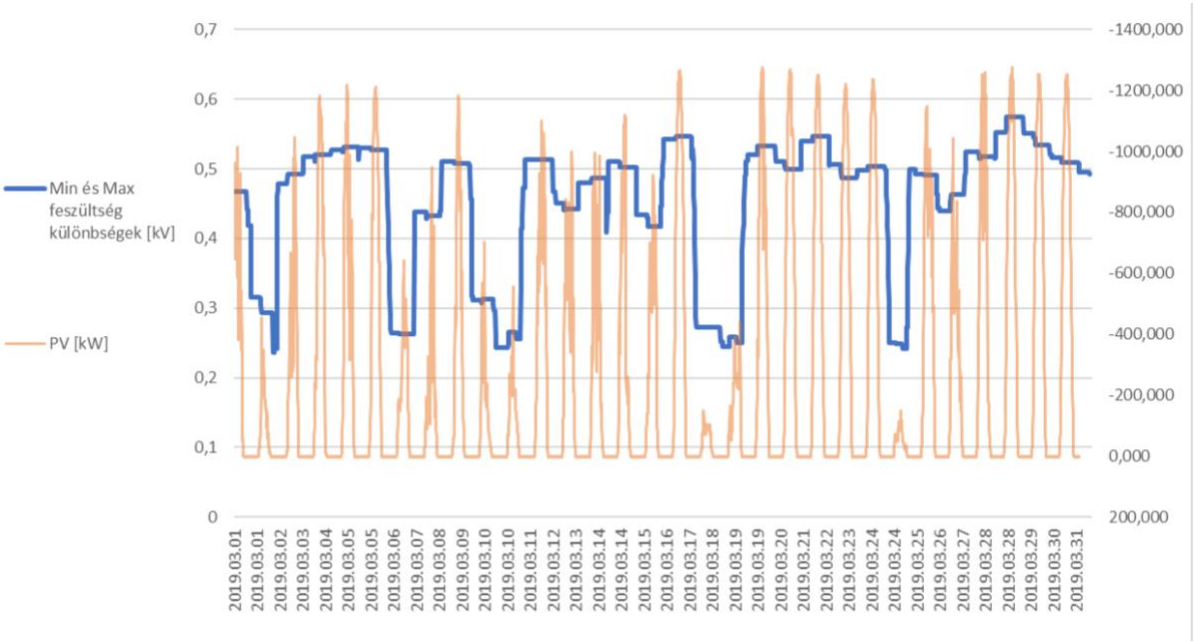
A négy térnegyedet végig járva több megállapítást tehetünk. Az egyik az, hogy valóban az előző fejezetben feszültségérzékenységi tényezőkből számolt függvény maximum és minimum a körülbelüli φ=45 és 225 foknál található. Továbbá a hatásos és a meddő teljesítmény hatások összeadódnak és a 250 kVA-es energiatárolóval valóban kialakul az ~1%-os feszültség változás, ami számszerűsítve 220 V a KöF hálózaton. A következő megállapítás, hogy az inverternek vannak olyan üzemállapotai, mikor a feszültségre nem vagyunk hatással. Ez a II. és a IV. térnegyedben tapasztalható, mikor a tárolóval hatásos teljesítmény injektálunk és induktív meddőt hozunk létre (és fordítva). Ez azt is jelenti, hogy az energiatárolónak a bizonyos töltöttségi állapotát úgyis elérhetjük, hogy tulajdonképpen nem okozunk feszültség változást a hálózaton. Ez egy hasznos megállapítás, melyet később akár fel is lehet használni.

A modellezésnél nem csak az energiatárolót kellett megvizsgálni, hanem az ott lévő naperőmű parkot, mivel az általa okozott feszültségemelést szeretnénk csökkenteni. A vizsgálat során a naperőműpark kb. 500 V-os feszültségemelkedést okoz, amennyiben névleges teljesítménnyel termel (2x390kVA). A szimulációk alapján megállapítható, hogy ezen 250 kVA-es energiatároló alkalmazásával a vonal végére telepített napelemes kiserőművi hatásnak kicsit kevesebb, mint a felét tudjuk hatástalanítani. Az energiatároló működésének kialakításához ezen szempont figyelembevétele az egyik legmeghatározóbb.

6. LEHETSÉGES MŰKÖDÉSI MODELLEK

A megújulók által okozott hálózati problémák közül az egyik legjelentősebb a feszültségemelő hatás, amelyet mérsékelni szeretnénk. A probléma azért jelentkezik, mert többnyire a környező fogyasztás abban az időpontban, mikor a termelés történik jóval kevesebb, így nincs mi ezt a hatást ellensúlyozza. A probléma másik forrása az elosztóhálózaton fellelhető hosszú középfeszültségű szabadvezetékes hálózatból következik. A hosszú vezeték, nagy impedanciát is jelent egyúttal, ezért a felvehető erőművi kapacitást korlátozni szükséges, hogy ne sértsük a hálózat villamos paramétereit. Ez azt jelenti, hogy bizonyos erőművi penetráció után, hagyományos hálózatfejlesztés nélkül nem érhető el új kapacitás. Az energiatárolóval ezen erőművi kapacitás korláton szeretnénk javítani.

A működéshez több modellt is felállíthatunk. Az alábbi ábra alapján igazoltnak tekinthető, hogy az érintett középfeszültségű vonal erőművi csatlakozási pontján üzemállapottól függetlenül elsősorban a napelemes teljesítmény betáplálás határozza meg a feszültségingadozás mértékét (4. ábra).



4. ábra – Napon belüli feszültség volatilitás és a napelemes termelés kapcsolata

A napi feszültségingadozás mértéke jelentősen megnő, amennyiben a napelemes termelők a vonal végén termelnek. Ez még akkor is igaz, mikor a NaF/KöF alállomásban található transzformátor fokozatváltó kapcsol, mivel a fokozatváltó 1%-ot változtat a hálózat feszültségén. Az itt fellépő

feszültségemelő hatás, amit a napelemek okoznak pedig több, mint 2%. Ez két további lehetőséggel bővíti a lehetséges működési modellünk megalkotását:

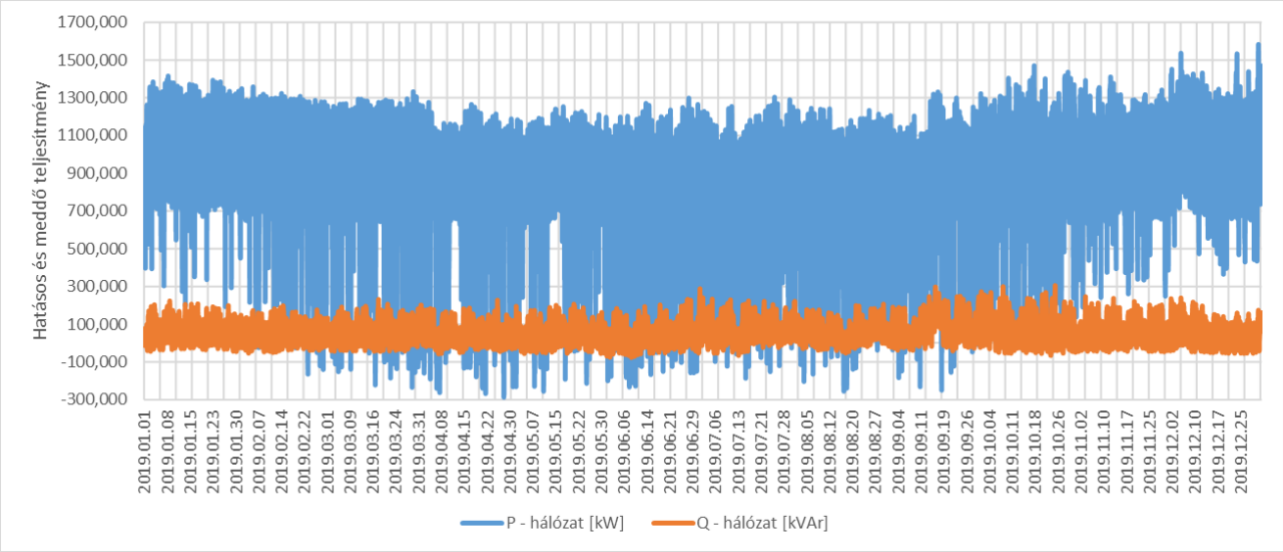
- Az egyik ilyen, hogy az energiatárolót akkor üzemeltetjük, mikor a napelemes energiatermelők termelnek, így egy olyan jelet juttatunk az energiatároló konténer vezérlőjébe, ami az adott termelésre vonatkozó információkat hordozza. Ez egy távoli jelnek a továbbítását jelenti az energiatároló felé.
- A másik ilyen működési modell, hogy az energiatárolót a helyi feszültség alapján vezéreljük. A fenti **Error! Reference source not found.** azt mutatja, hogy lehetőségünk van megállapítani a feszültségmérésből, hogy a termelők termelnek-e.

Amennyiben az előzőekben felvázolt hatás kevesebb lenne, mint 1%, akkor a helyi feszültségekből nem lehetne következtetni egyértelműen a napelemes termelésre, mivel előfordulhatnak olyan időpontok is, mikor a feszültségváltozást nem a termelő, hanem a tr. fokozatszabályzója okozza. A projektben megvan a lehetőségünk mindkét stratégia kipróbálására, melyet meg is szeretnénk tenni. A cikk terjedelem korlátai miatt a következő részben az első ilyen, tehát a távoli napelemes termelési jelre történő működést fogom bemutatni.

7. ENERGIATÁROLÓ HATÁSA A HÁLÓZAT VILLAMOS PARAMÉTEREIRE

A modellezés egyszerűségéért az energiatárolónak egy a napelemes termelésre reagáló működését fogom szemléltetni, így a napelemes termelés függvényében fogjuk feltölteni az energiatárolót és egy előre meghatározott csúcs időszakban kisütni.

A vonal éves teljesítményáramlását mutatja az 5. ábra. Megfigyelhető, hogy számos időszakban a hálózati tápponti teljesítményigénye lecsökkent, és akár meg is fordul. A meddőteljesítmény-igény ebben az esetben is induktív jellegű, mely viszonylag folyamatosan jelentkezik.

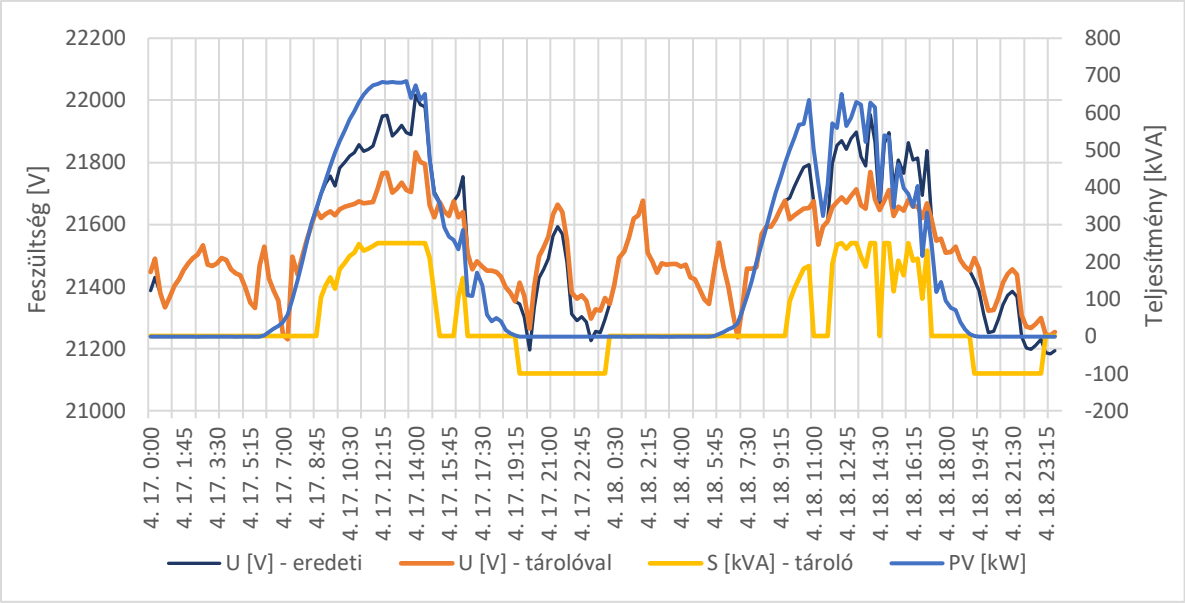


5. ábra – Dúzsi vonal aggregált fogyasztási adata

A következő ábra (6. ábra) az energiatárolónak egy napon belüli szimulált működését látjuk. Az energiatárolót a termelés függvényében napközben töltjük fel, egy előre beállított karakterisztika

alapján. A kisütését a várható csúcs időszakra tesszük és az aktuális töltöttség függvényében osztjuk el 19:00-24:00-ig. A 6. ábra szimuláción keresztül mutatja be az energiatároló KöF csatlakozási pontján feszültséget, az energiatároló működése nélkül és a működéssel. A szimuláció során az energiatároló teljesítményét, az előzőekben kiszámított 250 kVA-nek vettük. A kapacitásának megválasztását több tényező is alakította, köztük a projekt költségvetése, így az 500 kWh kapacitás mellett döntöttünk.

Az energiatároló kapacitásának hatékony kihasználása érdekében az optimálisnál alacsonyabb teljesítménytényező érték került kiválasztására. Az indoka, hogy a tároló kapacitása korlátozott. Érdemes még megjegyezni, hogy az energiatároló akkumulátor részét csakis a hatásos teljesítmény veszi igénybe, a meddő energia előállításához nem szükséges DC oldali teljesítményre, csak az inverterek veszteségét kell fedezni. Az optimális munkapontnak az eltérése egy kényszer jelen esetben, viszont nem sokkal kevesebb a feszültségre gyakorolt hatásunk.



6. ábra – Dúzsi energiatároló KöF csatlakozási pontjánál a feszültség a tárolót működtetve és nélküle

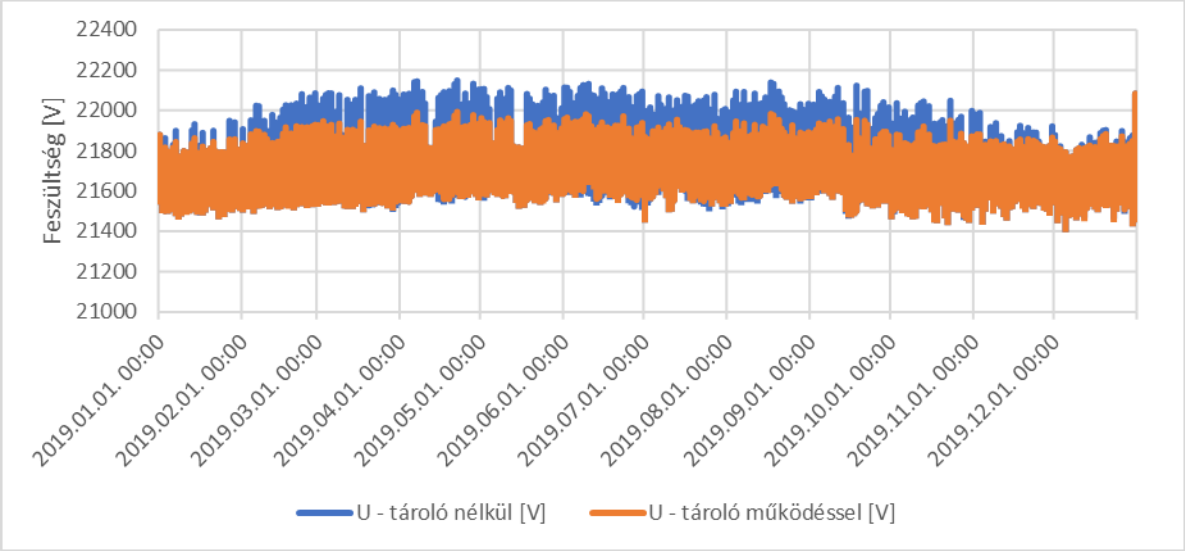
Az energiatároló ezen feszültségemelést tudja korlátozni a csatlakozási ponton és a hálózat közvetlen környezetében. Azért is a közvetlen környezetében, mert a tápponthoz közeledve egyre merevebb a hálózat.

A tároló egy másik előnye, hogy a hálózat maximális hatásosteljesítmény igénye az esti csúcs időben történő kisütéssel csökkenthető. A jól időzített esti kisütés miatt - mely esetében elsődlegesen nem szükséges meddő teljesítményt létre hozni, működhet az energiatároló cosφ=1-el – csökken a hálózat csúcs terhelése is.

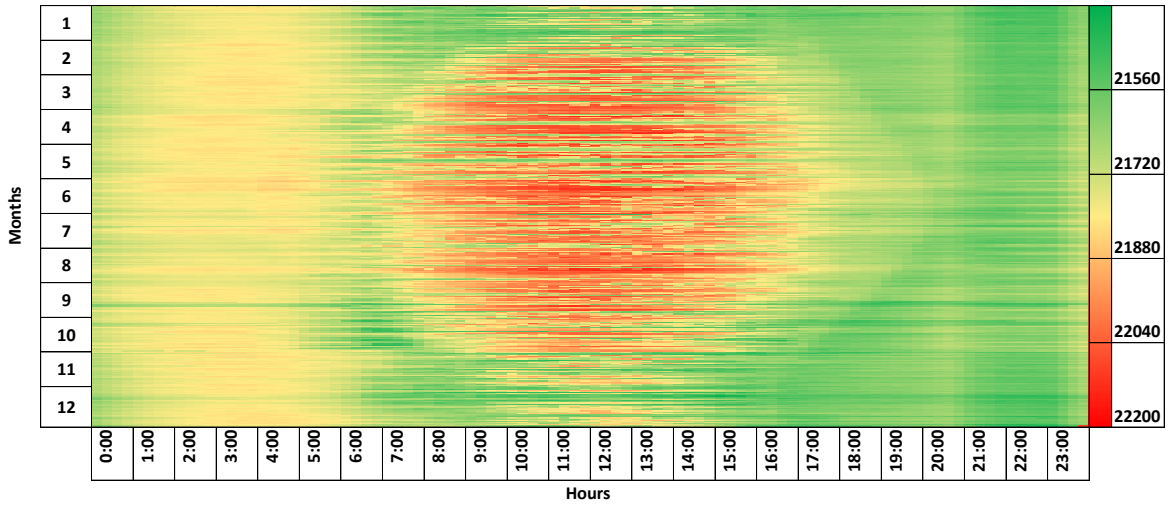
Az egyik megjegyzendő pontja az induktív meddő teljesítmény létrehozásnak, hogy a hálózat alap esetben is folyamatosan meddő teljesítményt igényel, így napközbeni induktív meddő létrehozás

nem javít a tápponti induktív meddő igényen. A hálózat számára ez némi többletveszteséget jelent, viszont semmiképp nem számottevő ebben a példában.

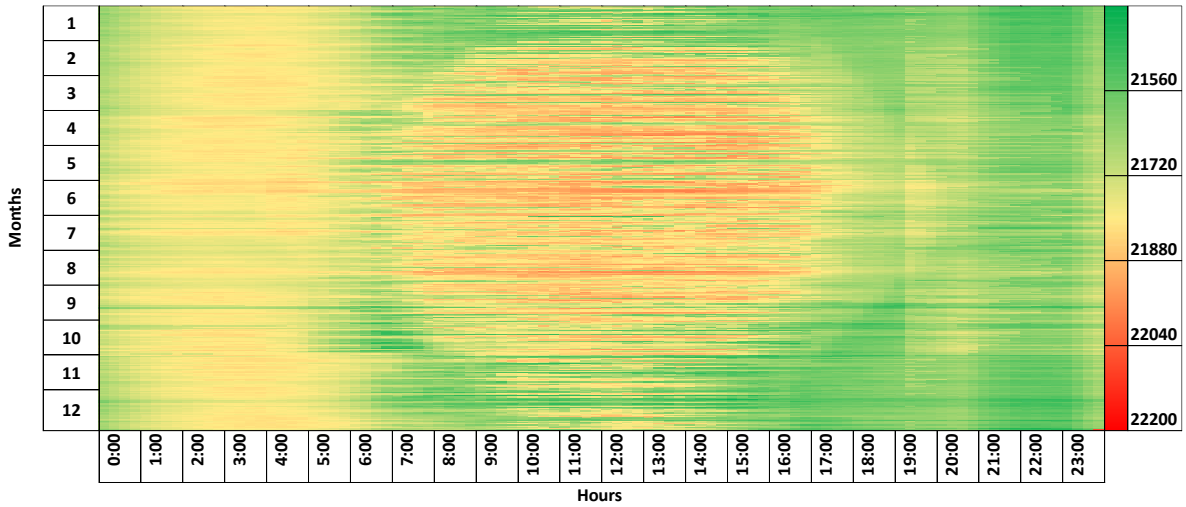
A 7., 8. és a 9. ábra az energiatároló csatlakozási pontján mutatja a feszültség effektív értékének éves lefutását két különböző ábrázolási módszerrel. Érdemi 1%-os éves feszültség csökkenést mutatnak az ábrák.



7. ábra – A dúzsi energiatároló csatlakozási pontján a feszültség effektív értékének éves lefutása két esetben



8. ábra – A dúzsi tároló csatlakozási pontján a feszültség effektív értékének éves lefutása energiatároló alkalmazás nélkül



9. ábra – A dúzsi tároló csatlakozási pontján a feszültség effektív értékének éves lefutása tároló alkalmazással

8. ÖSSZEFOGLALÁS

A dúzsi energiatároló elsődleges célja egy napelemes termelőhálózatra gyakorolt hatásának mérséklése, amely hatás az előzetes szimulációk alapján jól kimutatható. A hálózat felvevőképességét jellemzően a feszültség tartási korlátokra vezethető vissza, mely mögöttes oka a hálózat fizikai tulajdonsága (szabadvezetékes, hosszú hálózat). Így a naperőművek feszültségemelő hatása elsődleges korlátot jelent az erőművi kapacitások hálózatra csatlakozásnak szempontjából. Ennek vizsgálati módszertanát az Elosztói Szabályzat taglalja [4]. Amennyiben a feszültségemelő hatást tudjuk mérsékelni, abban az esetben további napelemes kapacitás csatlakoztatható a hálózatra. A projekt keretében ezen vizsgált energiatárolóval elérhető, hogy újabb valamivel kevesebb, mint ~390 kVA teljesítményű erőmű csatlakozzon a hálózatra.

Az energiatároló alkalmazásával összeségében a következők jelenthetők ki, mely első kettő egy pozitívumként emelhető ki, míg harmadik pontja negatívum:

- Feszültségmaximumok csökkennek. Javul a hálózat feszültségprofilja.
- A hálózat csúcs terhelése csökken. Jobb hálózat kihasználtág a csúcs és a völgy időszakok között. Mindazonáltal csökkenthető a NaF/KöF transzformátor maximális kiterheltsége.
- A hálózat folyamatos induktív meddő jellegét fokozza a napközbeni induktív meddő energia létrehozása.

A munka következő szakaszában értékeljük a csatlakozási pont feszültségére történő szabályozást, ami lehetővé tesz a kétfajta vezérlési koncepció összehasonlítását és segít a végleges vezérlési stratégia kidolgozásában.

9. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

EU H2020 kutatási és innovációs programja által támogatott projekt.
Támogatási szerződés száma: 824392

10. HIVATKOZÁSOK

[1] Innovációs és Technológiai Minisztérium, „Nemzeti Energiastratégia 2030," 2020.
[2] MAVIR weboldal. Available: https://www.mavir.hu/. [Hozzáférés dátuma: 26 08 2021].
[3] F. T. a. P. Ciufo, „A Sensitivity Analysis Toolkit for the Simplification of MV Distribution Network Voltage Management," IEEE, 2014.
[4] „Elosztói szabályzat mellékletei," 2019.

Kálecz György, Dr. Tóth Zoltán, Dr. Németh Bálint

Különleges villámvédelmi kérdések

A villamosenergia termelésben egyre fontosabb szerepet kapnak a megújuló erőművek. Ennek oka egyrészt természetesen a környezet terhelésének csökkentése, másrészt a fenntarthatóság növelése, áttérés a fosszilis energiaforrásokról. Ennek megfelelően egyre több nap- és szélerőmű létesül. Villámvédelem szempontjából ezek eltérő kihívásokat rejtenek magukban a geometriai paramétereik miatt. A fotovoltaikus erőművek esetében a nagy vízszintes kiterjedés, amely ráadásul a kimeneti teljesítmény emelésével tovább növekszik, okozza a megnövekedett figyelmet primer és szekunder villámvédelem szempontjából egyaránt. A primer védelem kiépítése a jelenleg hatályos szabványok alapján általános, nem veszi figyelembe egy adott erőmű geometriai sajátosságait. Ezt kihasználva egy gazdaságosabb felfogórendszer hozható létre, amelyet bemutatok az előadásomban. A szélerőművek esetén pedig a környezetből történő kiemelkedés, amely lényeges az erőmű működését tekintve és szintén fokozódik a teljesítmény növekedésével, indokolja a villámfizikai vizsgálatot. A megfelelő primer védelemnek meg kell védenie a szerkezetet a fizikai károsodástól, figyelembe véve az esetlegesen megnövekedett villámszámot is, amely egyrészt a kiemelkedés, másrészt az ebből következően fokozódó valószínűséggel kialakuló felfelé meginduló (föld-felhő) villámok miatt is nagyobb fontossággal bír. Ezeken felül az előadásban szó esik a preventív villámvédelemről is, amely a villám káros hatásainak minimalizálására használható megelőző intézkedések segítségével. Erre egy megfelelő példa az egyre terjedő tetőteraszok villámvédelme. A kérdéskör fontosságát indokolja a tény, miszerint nem létezik teljesen hatékony villámvédelem, ezért az ilyen, villámcsapás szempontjából hangsúlyosabb, frekventált helyszíneken a károkozás létrejöttének lehetőségét intézkedések bevezetésével hatékonyan lehet csökkenteni. Ezen intézkedések hasonlóan a klasszikus villámvédelemhez gazdasági, illetve megtérülési vizsgálatot igényelnek.

Kulcsszavak: **villámvédelem; PV; megújuló energiatermelés.**

Varga Viktória Alexandra

Zánkai energiatároló feszültségesésre gyakorolt hatása

Az IElectrix projekt

Az IElectrix (Indian and European Local Energy CommuniTies for Renewable Integration and the Energy Transition) egy nemzetközi együttműködés keretében megvalósuló Európai Uniós projekt. A projekt fő célja, hogy egyrészt elősegítse az energiaközösségek létrejöttét, azon energiaközösségekét, melyek kiemelt szereppel bírnak a Negyedik Energiacsomagban, másrészt, hogy hozzájáruljon a megújulók minél gyorsabb és költséghatékonyabb hálózatra csatlakoztatásához, amely elengedhetetlen ahhoz, hogy az EU 2050-re karbonsemlegessé váljon.
A projektben összesen 4 demonstrációs helyszínen telepítenek elosztói engedélyesek akkumulátoros energiatároló rendszereket, a 4 helyszín Ausztriában, Németországban, Magyarországon és Indiában található. A négy országban a megújulók elterjedése különböző stádiumban van, ezáltal a projekt keretei között lehetőség lesz bemutatni, hogy különböző esetekben, milyen módon járul hozzá az energiatárolás a projekt céljainak elérésében.
A magyarországi demonstráció két helyszínen valósul meg. A zánkai pilot esetén a megoldandó műszaki problémát a nagy nyári szezonális terhelés és az ehhez kapcsolódó, helyenként az 5%-ot is meghaladó feszültségesés jelenti. A projekt keretei között egy középfeszültségű hálózatra csatlakozó energiatárolót és továbbfejlesztett vezérelt fogyasztói rendszert együttesen alkalmazva vizsgáljuk a megoldás eredményességét.
A dúzsi pilot esetén a jelenleg csatlakoztatott naperőművek mellett már nincs lehetőség további naperőmű csatlakozási igény fogadására, azonban a jövőben arra számítunk, hogy további csatlakozási igény fog megjelenni az adott vonal közelében. Egy optimális méretű energiatároló és továbbfejlesztett fogyasztóoldali befolyásolási rendszer együttes alkalmazásával kompenzálható a napelemek feszültségemelő hatása.
Előadásomban a két és fél éve zajló projekt zánkai helyszínén elért eredményekről, kihívásokról és az előttünk álló feladatokról kívánok röviden beszámolni.

Veréb Szabolcs, Dr. Varjasi István

DAB teljesítmény átalakító alkalmazása a BME Moduláris Hibrid Hajtáslánc laboratóriumában

Napjainkban az e-mobilitás témaköre töretlen népszerűségnek örvend, csaknem minden gépjármű gyártó vállalat kínál részben vagy teljesen villamos hajtású járműveket. A fejlesztés során elengedhetetlen a hajtáslánc tesztelése, különös tekintettel a szigorú autóipari szabványoknak való megfelelőség ellenőrzésére. Ezen igények kielégítésére épült a BME és a Siemens együttműködésében, a Rolls-Royce Hungary-vel közös tulajdonú Moduláris Hibrid Hajtáslánc laboratórium. Különlegessége, hogy a beépített teljesítmény átalakítók hardvere és szoftvere is az egyetemen került fejlesztésre a PROCON Kft közreműködésével, így könnyen a megrendelő igényire szabhatóak. Ebben a cikkben ismertetésre kerül a laboratóriumba beépített 360kW névleges teljesítményű DAB DC/DC konverter különleges felépítése, paraméterei, valamint kiemelkedő dinamikával rendelkező szabályozási struktúrája, amely mérések és HIL szimuláció segítségével összehasonlításra kerül a konvencionális fáziseltolásos vezérlési móddal.

Nowadays e-mobility is still gaining popularity, most of the car manufacturers are offering hybrid or full electric vehicles. The extensive testing of the drivetrain is essential during development, especially for strict automotive standard compliance validation. With the cooperation of Siemens and BME, as an answer to this demand, the Modular Hybrid Drive System Laboratory (MHDS) was built, which is co-owned with Rolls-Royce Hungary. The hardware and the controlling software were developed by the university with cooperation of PROCON, which allows the functionalities to be tailored to the customer needs. A 360kW nominal power DAB DC/DC converter is built into the laboratory, which has a unique structure. In this paper this converter will be presented together with its novel control algorithm, which achieves excellent dynamic performance. This behavior is compared to the traditional phase shift control based on measurement and HIL simulation data.

Kulcsszavak: **hajtáslabor; DAB; DC/DC konverter**

1. BEVEZETÉS

Napjainkban az eladott hibrid és teljesen villamos járművek száma évről évre növekszik [1]. A hajtáslánc elemei lényegesen kevesebb mozgó alkatrészt tartalmaznak, mint belső égésű motorok esetén, amely a karbantartás szempontjából előnyös tulajdonság.

Általában valamilyen akkumulátor tölti be az energiaforrás szerepét. Manapság a lítium-ion cellák használata a tipikus, azonban ezek érzékenyek a túltöltésre, mélykisütésre, valamint a hőmérsékletre. Az akkumulátor csomag állapotát egy BMS (Battery Management System) áramkör felügyeli, biztosítja az üzemi körülményeket és kommunikál a jármű más részegységeivel. A vonóerőt valamilyen villanymotor állítja elő, az azonos teljesítményhez tartozó kisebb tömeg és méret miatt nagy fordulatszámú megoldás a tipikus. A hajtáslánc elengedhetetlen része az inverter, amely az akkumulátor DC feszültségéből állít elő több fázisú AC feszültséget, olyan módon, hogy a

kívánt nyomaték ébredjen a motor tengelyén. A modern járművekben az inverter és a motor egy közös egységben foglalnak helyet (integrált hajtás).

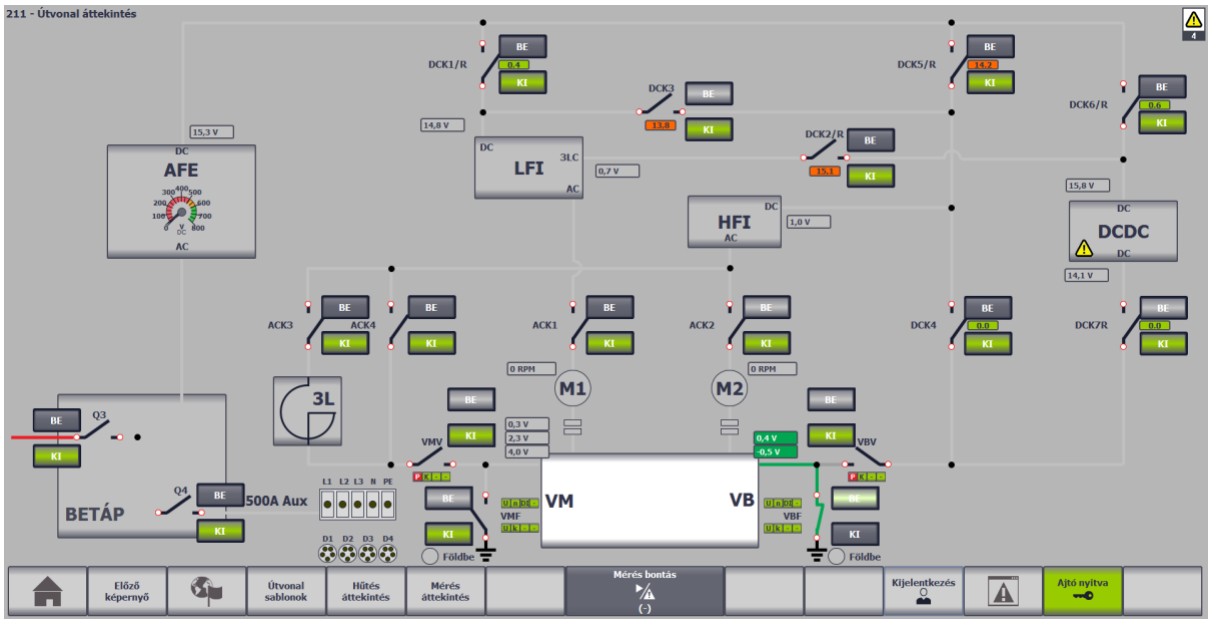
Látható, hogy a kevés mozgó alkatrész ellenére igencsak kifinomult hajtásrendszerről van szó. A gépészeti alkatrészek mellett a villamos egységek is meghatározóak, melyeknek hardveres és szoftveres komponensei is vannak. Ennek megfelelően egy villamos járműben, a belsőégésű társaikhoz képest, további szabványok írják elő az elvárt működést, felépítést és ezek tesztelésének módjait. Magyarországon jelentős számú vállalat foglalkozik a járműipari berendezések fejlesztésével, mely során a teljesítmény szintű tesztelés elkerülhetetlen. Ezen igények kielégítésére épült meg a BME és a Siemens együttműködésében, a Rolls-Royce Hungary-vel közös tulajdonú Moduláris Hibrid Hajtáslánc laboratórium, mely lehetőséget nyújt a hibrid és villamos hajtáslánc minden elemének különálló és egyidejű tesztelésére is.

2. A LABORATÓRIUM FELÉPÍTÉSE

A két pneumatikus vízszintezővel rendelkező mérőpadon (lásd 1. ábra) 350 kW-os, 1500 Nm-es és 5000 RPM-es fordulatszámú gépek tesztelését tudjuk elvégezni. Egy speciális áttétel segítségével a fordulatszám tartomány 20000 RPM-re kitolható. A tesztelendő gép számára a folyadék és léghűtést is biztosított.

1. ábra – Az MHDS laboratórium látképe.

A szekrényekben több teljesítmény átalakító berendezés kapott helyet, amelyeket többféle konfigurációban, rugalmasan lehet összekapcsolni a motorokkal és a tesztelendő berendezéssel, ahogyan az a 2. ábrán is látható.



2. ábra – Képernyőkép a központi vezérlő manuális felületéről, melyen jól láthatóak a teljesítményátalakítók lehetséges összekapcsolási módjai.

Az aktív egyenirányító (AFE, Active Front End) közvetlenül kapcsolódik a labor melletti KÖF/KIF transzformátorhoz, a 3x400 V-os váltakozó feszültségből 600-800 V között állítható DC feszültséget állít elő. Kétirányú, maximum 300 kW-os teljesítményáramlásra képes, így energiatárolós rendszereket is tudunk tesztelni a hálózatra való visszatáplálás segítségével.

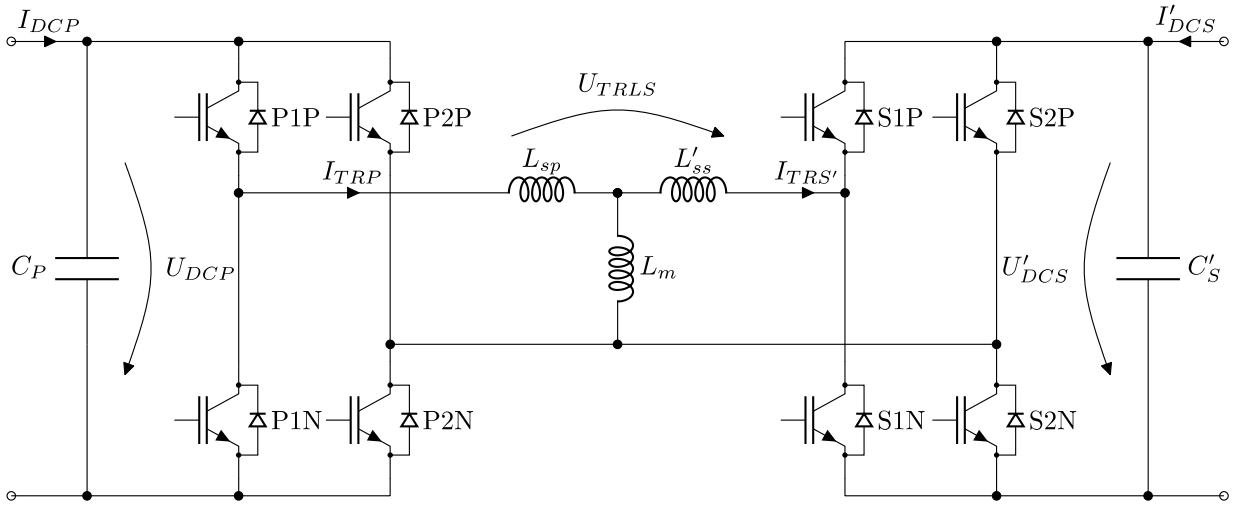
A háromfázisú, kétszintű, kisfrekvenciás inverter (LFI, Low Frequency Inverter) 5 kHz kapcsolási frekvenciával üzemel. Képes mezőorientált hajtásként, nyomaték, illetve fordulatszám szabályozott módban működni. A laborban található aszinkron terhelőgép kapcsolható hozzá. Másrészt, a beépített szűrőkörök segítségével, egy feszültségcsökkentő DC/DC átalakítóként is tud funkcionálni, feszültség és áramszabályozott módon egyaránt. 1200 V-os feszültséggel és 1000 A-es áramerősséggel, de maximum 350 kW teljesítménnyel terhelhető.

A laboratórium legösszetettebb berendezése, a háromfázisú, hétszintű, nagyfrekvenciás inverter (HFI, High Frequency Inverter). Minden fázis 3 párhuzamosan kapcsolt háromszintű hídágból épül fel, így eredőben egy hétszintű, akár 100 kHz-es látszólagos kapcsolási frekvenciájú invertert kapunk. Ez a berendezés képes aszinkron vagy állandómágneses motor meghajtására 1 kHz alapharmonikus frekvenciáig, akár a laborban levő terhelőgépről, akár külső forgógépről is legyen szó. A másik érdekesebb felhasználási területe, amikor PHIL (Power Hardware-in-the-Loop) szimulátorként működik (például egy inverter tesztelése során egy motor emulálását végzi). Ez a berendezés 1200 V, 1000 A, 350 kW limitációkkal rendelkezik.

Bizonyos mérési elrendezéseknél elengedhetetlen a teljesítmény szintű galvanikus leválasztás biztosítása. Ezt a funkcionalitást valósítja meg a 350kW-os, DAB (Dual Active Bridge) topológiájú DCDC átalakító.

3. A DAB KONVERTER PARAMÉTEREI

A DCDC főkörének vázlatos felépítése a 3. ábrán látható. Gyakorlatilag két darab kétszintű inverter kapcsolódik egy transzformátorhoz. Az MHDS laboratóriumban a transzformátor több áttétel konfigurációval rendelkezik, ahogyan ez az 1. táblázatban is látható. A konverter elindítása előtt ki kell választani a használni kívánt áttétel értékét, amely alapján a központi vezérlő mágneskapcsolók segítségével a transzformátor megfelelő megcsapolásait az inverterekhez kapcsolja.



3. ábra – A DAB topológia főkörének vázlatos felépítése.

1. táblázat – A transzformátor paraméterei.

Áttétel	L_{sp}	L'_{ss}	L_m
1,5 és 0,75	17,0µH	17,0µH	5,0mH
1,2 és 0,6	25,3µH	25,3µH	7,9mH
1,0 és 0,5	28,2µH	28,2µH	11,1mH

A hídágak Mitsubishi CM1000DUC-34SA típusú 1700V/1000A [2] IGBT modulokból állnak egyedi gate meghajtó áramkörrel, melyeket a Texas Instruments TMS320F28075 DSP alapú központi áramkör vezérel üvegszálas kapcsolaton keresztül. A védelmekhez és a szabályozáshoz elengedhetetlen a különféle hőmérsékletek, a DC köri feszültségek és áramok, valamint a transzformátor áramainak mérése.

Az átalakító fő feladata az áttételnek megfelelő feszültségarány megőrzése a primer és szekunder DC buszokon. Mivel a laboratóriumban teljesítményelektronikai eszközök tesztelése zajlik, ezért előre nem látható tranziensek várhatóak a mérések során (gyors terhelés változás, terhelés ledobás). Ez azt jelenti, hogy a DCDC átalakító szabályozásának jó dinamikus tulajdonságokkal kell rendelkeznie. Ezt tipikusan nagy kapcsolási frekvenciával és/vagy DC köri kondenzátor kapacitással lehet egyszerűen elérni, azonban mindkettő költségekkel jár. Nagyfrekvenciás ferrit vasmagot ekkora teljesítményre csak több kisebb magból, ragasztással lehetne előállítani vagy több kisebb teljesítményű konvertert kellene párhuzamosan kapcsolni. Költséghatékonysági okokból 400Hz-es lemezelt vasmagú transzformátort alkalmaztunk és a dinamikát egy különleges szabályozási móddal érjük el.

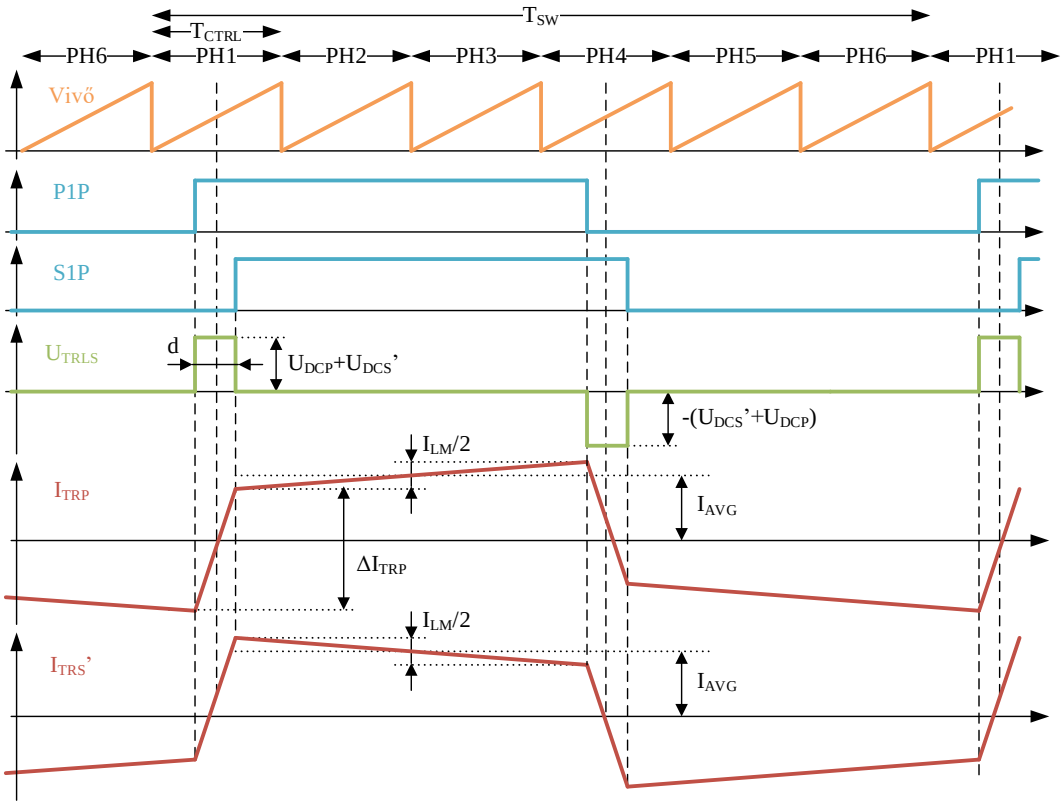
4. ábra – A DAB DCDC konverter részei az MHDS laboratórium szekrényei mögött. Primer inverter (bal oldalon); transzformátor, mágneskapcsolók, vezérlés (középen); szekunder inverter (jobb oldalon).

4. CP-SPS SZABÁLYOZÁS

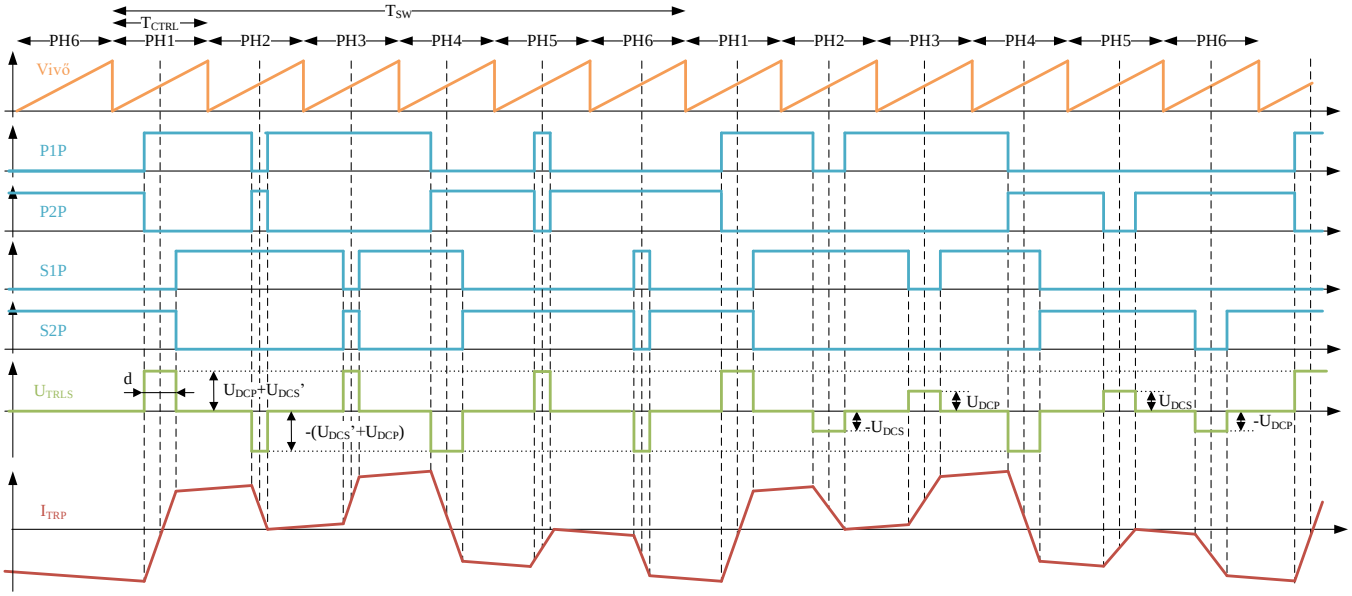
A DAB topológiát először 1991-ben publikálták [3] és szabadalmaztatták [4]. A legegyszerűbb és gyakran használt fázistolásos (SPS, Single Phase Shift) szabályozás jellegzetes jelalakjai az 5. ábrán láthatóak. A két inverterrel egy 50% kitöltési tényezőjű, $\pm U_{DCP}$ és $\pm\, U_{DCS}$ között változó négyszögjelet állítunk elő a transzformátor primer és szekunder tekercseire. Ha a két négyszögjel között d ideig tartó fázistolást képezünk, akkor ezen idő alatt a transzformátor szórási induktivitására $\pm(U_{DCP} + U'_{DCS})$ nagyságú feszültség jut, ami az induktivitás értékének megfelelően a transzformátoron áramváltozást fog eredményezni. Egy áramszabályozó implementáláshoz a kapcsolási esemény előtti transzformátor áramok, az induktivitások és a feszültségek ismeretében a szükséges fázistolási idő egyszerűen kiszámítható [5]. A kapcsolási periódus további részében az áram csak kis mértékben változik, hiszen a jól méretezett DAB konverter transzformátorban a mágnesező induktivitás értéke kellően nagy.

Az MHDS laborban a 400Hz-es transzformátorral a kapcsolási frekvencia is 400Hz-re korlátozódik, különben a vasveszteség kezelhetetlen mértékű lenne. Ez azt is jelenti, hogy a szabályozó csak $1{,}25ms$ időközönként tud a működésbe beavatkozni, ami a beépített kapacitás mennyiséggel és a várható tranziens események kezeléséhez nem elegendő.

A megoldást a fázistolásos periódus közbeni beavatkozású szabályozási mód jelenti (CP-SPS, Cross-Period Single Phase Shift), jellegzetes hullámformái a 6. ábrán láthatóak [5]. A T_{SW} kapcsolási periódusidőt hat T_{CTRL} hosszú fázisokra bontjuk (PH1-PH6). Az 1. és 4. fázisban a klasszikus SPS szabályozásnak megfelelően avatkozunk be. Más fázisokban, amennyiben szükséges, rövid kapcsolási impulzusokkal a transzformátor szórására feszültséget tudunk kapcsolni, ami a transzformátor áramát megváltoztatja. Minden fázisban a primer vagy szekunder tekercs feszültségének invertálásával vagy rövidre zárásával tudunk beavatkozni, az aktuális fázistól függően ezeknek áram növelő vagy csökkentő hatása lesz, ahogyan az a 6. ábrán is látható.



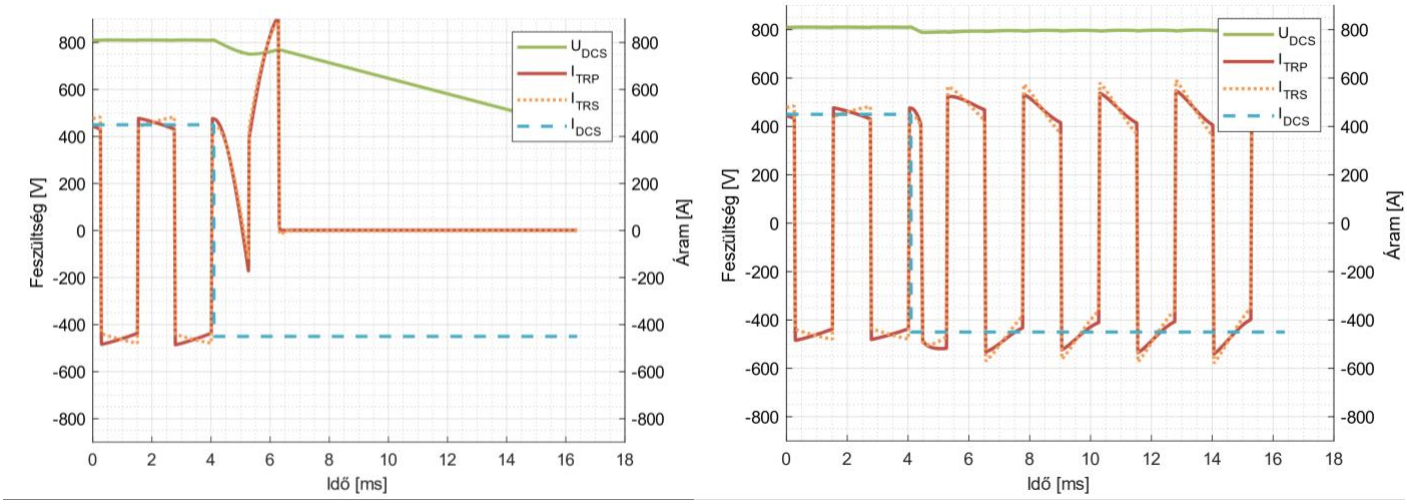
5. ábra – A közönséges fázistolásos szabályozás jelalakjai.



6. ábra – A CP-SPS szabályozás lehetséges kapcsolási jelalakjai.

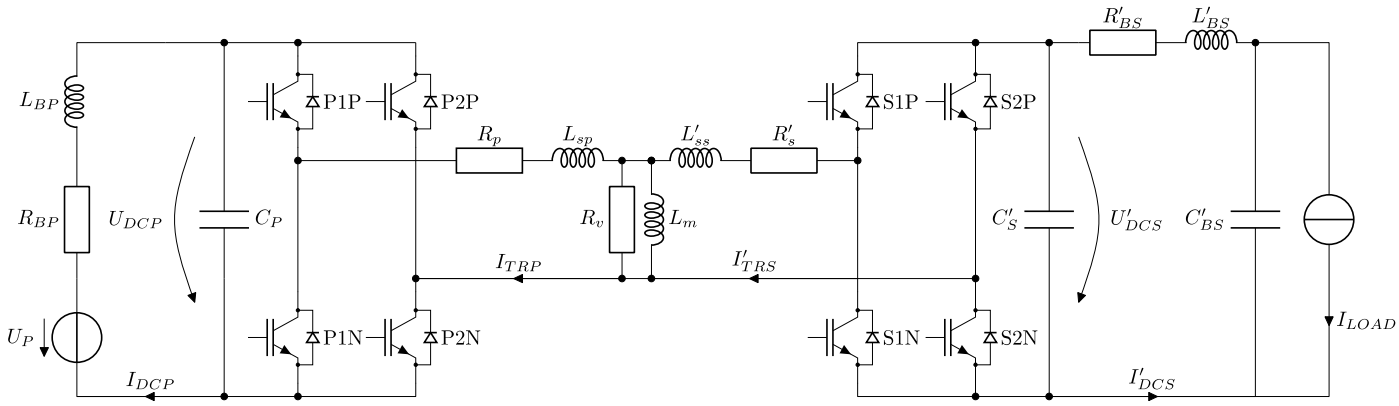
HIL szimulációval validáltuk a módszer hatékonyságát. A konverter szekunder oldalán 1-es áttételű üzemmódban 450A/-450A terhelésugrást hoztunk létre. A tranziens hatására kialakult transzformátor áram és a DC busz feszültség a 7. ábrán látható. A klasszikus megoldással a szekunder oldali DC feszültség olyannyira beesik, hogy a transzformátor árama a leoldási határt eléri

és így a konverter túláram hibával leáll. Ezzel szemben a CP-SPS szabályozással gyakorlatilag egy kapcsolási eseménnyel a transzformátor árama a kívánt értékre áll be, köszönhetően a periódus közbeni beavatkozásnak.



7. ábra – A DAB konverter néhány villamos paramétere 450A-ről -450A-ra történő terhelésugrás esetén (HIL szimuláció). Bal oldalon SPS, jobb oldalon CP-SPS szabályozás.

Az IGBT-k kapcsolási holtideje jelentős mértékben befolyásolja a szabályozás működését, azonban a rendszer paramétereinek ismeretében számításokkal [6] és egy adaptív algoritmussal [7] kiküszöbölhető a hatása.



8. ábra – DAB konverter főkörének kapcsolási rajza a hozzávezetés impedanciákkal.

5. HOZZÁVEZETÉSEK HATÁSAI

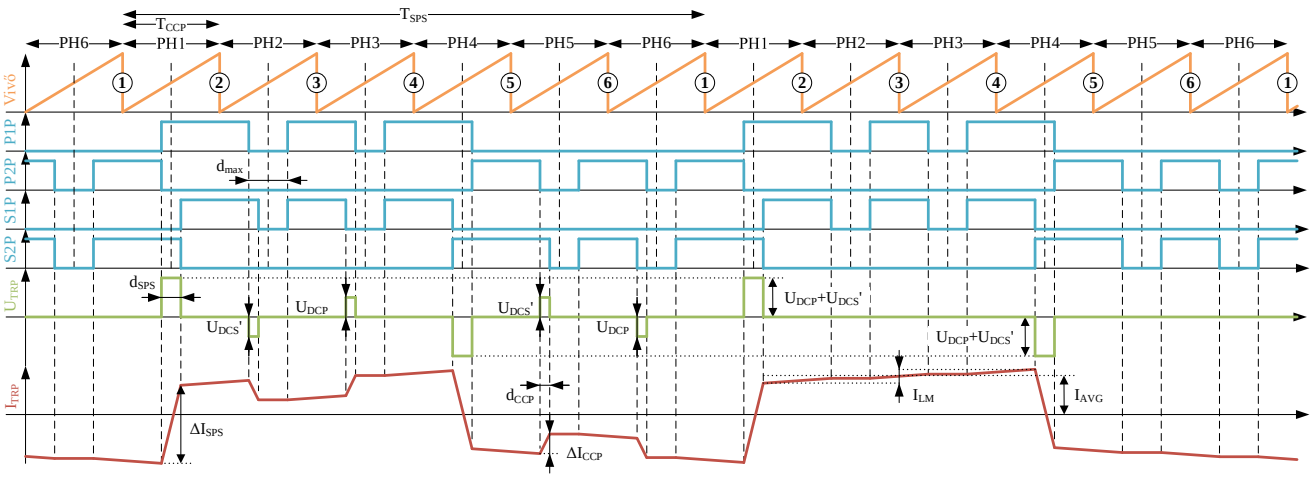
A CP-SPS szabályozási körében a terhelőáramot előrecsatolásként használjuk [5], ami tulajdonképpen, üzemállapottól függően, a primer vagy szekunder áramot jelenti. Ezzel olyan esetben lehet probléma, ha egy kapacitív terhelés hosszú, számottevő induktivitású kábelezéssel kapcsolódik a konverterhez és az így létrejövő rezgőkör rezonancia frekvenciája a kapcsolási frekvencia közelébe vagy fölé kerül. A probléma szemléltetésére a 8. ábrán felrajzoltuk a főkör hozzávezetési impedanciákkal kiegészített kapcsolási rajzát. Sajnálatos módon az MHDS laboratóriumban a DCDC konverterhez más, nagy lokális kapacitásbankkal rendelkező teljesítmény

átalakítók kapcsolódnak relatíve nagy induktivitással, a kialakított kábelezéssel a 400Hz-es kapcsolási frekvenciához közeli rezonancia frekvenciák adódnak.

6. CCP-SPS SZABÁLYOZÁS

A rezonancia okozta szabályozási problémát az előrecsatolás megszűntetésével lehet orvosolni, azonban a CP-SPS algoritmusában szükség van rá, hiszen a periódus közbeni beavatkozás szükségességét a PI szabályozó kimeneti értéke alapján döntjük el. Előrecsatolás nélkül folyamatos lenne a beavatkozás, ami kis áramerősségnél mikroszekundum alatti impulzusokat eredményez, ez pedig a kapcsolási holtidőkkel összemérhető.

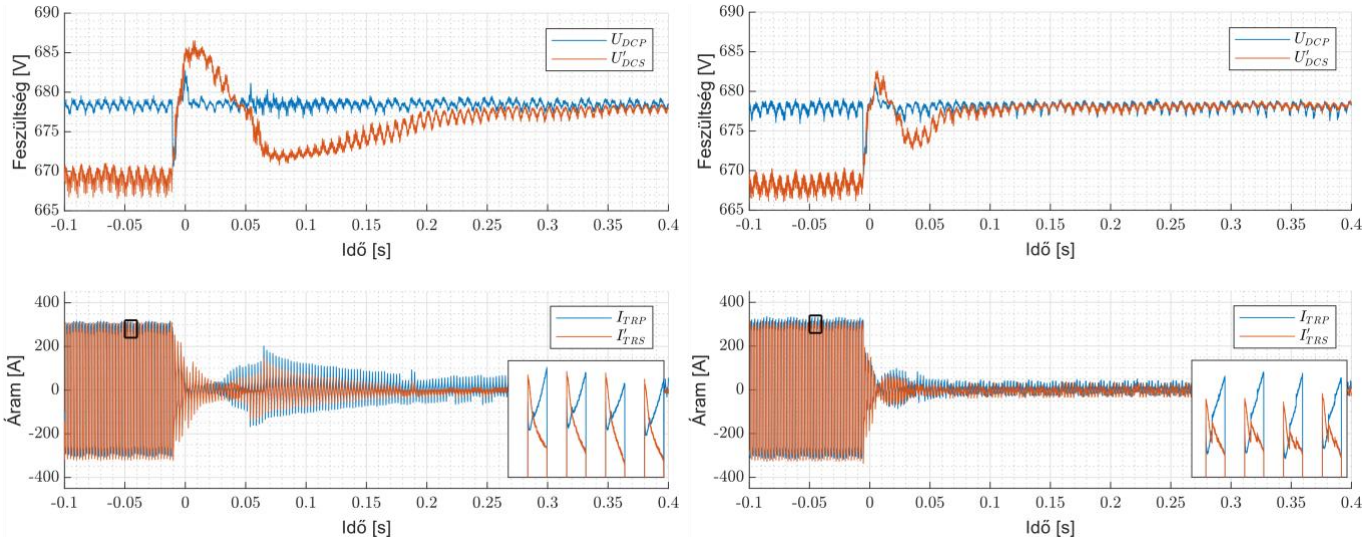
A problémára megoldására kidolgoztuk a fázistolásos folyamatos periódus közbeni beavatkozású szabályozási módot (CCP-SPS, Continuous Cross-Period Single Phase Shift) [8], jellemző kapcsolási hullámformái a 9. ábrán láthatóak. Az alapelv itt is az, hogy megőrizzük a fázistolásokat a PH1 és PH4 fázisokban, a kapcsolási periódus közben pedig a transzformátor tekercs rövidzárásával a szórási induktivitás áramát tudjuk tovább változtatni. A különbség az IGBT kapcsolgatási módjában és a folyamatos beavatkozásban van. Nézzük meg közelebbről a második PH2 fázist, ahol a szabályozó nem szeretné megváltoztatni a transzformátor áramát. Itt egy konstans d_{max} ideig a negatív sínhez kapcsoljuk a P1 és S1 hídágakat, vagyis a primer és szekunder tekercsfeszültség is nulla lesz. Ha meg akarjuk változtatni az áramot, akkor csak annyi a teendőnk, hogy az egyik kapcsolást késleltetjük a másikhoz képest, ahogyan az az első PH2 fázisban látható. Tulajdonképpen d_{max} ideig a transzformátor mindkét tekercsét rövidre zárjuk, de ha áramot kell módosítani, akkor az egyik oldalt csak rövidebb ideig. A módszer előnye, hogy megfelelően nagy d_{max} értékkel nem alakulnak ki rövid impulzusok, így a holtidő kompenzálása lehetővé válik. Ez lehetővé teszi a folyamatos működést és az előrecsatolást el lehet hagyni a szabályozási körből [8].



9. ábra – A CCP-SPS szabályozás lehetséges kapcsolási jelalakjai.

Az MHDS laborban, a valós berendezésen méréseket végeztünk az SPS és a CCP-SPS szabályozás összehasonlításához. Az AFE-vel 680 V feszültséget állítottunk elő, melyet az LFI 3LC kapcsaira és a DCDC primer oldalára kapcsoltunk. A DCDC szekunder oldalát az LFI DC bemenetére kötöttük. Az LFI áramszabályozott módban üzemelt, így képesek voltunk 1ms alatt 250 A-ről 0 A-ra változtatni a DCDC terhelését. A mérési eredményeket a 10. ábra mutatja meg. Jól

látható, hogy a feszültség tranziens sokkal rövidebb idő alatt lejátszódik, illetve az amplitúdója sokkal kisebb CCP-SPS-el. Kijelenthető, hogy a bemutatott szabályozási mód jobb dinamikus tulajdonságokkal rendelkezik.



10. ábra – A DAB konverter néhány villamos paramétere 250A-ről 0A-ra, 1ms alatt történő terhelésváltozás esetén (MHDS labor mérés). Bal oldalon SPS, jobb oldalon CCP-SPS szabályozás.

7. ÖSSZEFOGLALÁS

Ebben a cikkben bemutattuk a BME Moduláris Hibrid Hajtáslánc laboratóriumának felépítését, az egyes teljesítményátalakító berendezések főbb paramétereit és funkcióit. Szemügyre vettük a DAB konverter főbb tulajdonságait és bemutattunk két szabályozási módot, melyek a szokásos fázistolásos szabályozáshoz képest jobb dinamikus tulajdonsággal rendelkezik. A működést HIL szimulációval és valós körülmények közötti méréssel is alátámasztottuk.

8. HIVATKOZÁSOK

[1] “Global EV Sales for 2021 H1.” Aug. 2021. [Online]. Available: https://www.ev-volumes.com/country/total-world-plug-in-vehicle-volumes/

[2] “Mitsubishi Electric CM1000DUC-34SA datasheet.” [Online]. Available: https://www.mitsubishielectric-mesh.com/products/pdf/CM1000DUC-34SA_n1.pdf

[3] R. W. A. A. DeDoncker, D. M. Divan, and M. H. Kheraluwala, “A three-phase soft-switched high-power-density DC/DC converter for high-power applications,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 27, no. 1, pp. 63–73, Jan. 1991.

[4] R. W. DeDoncker, M. H. Kheraluwala, and D. M. Divan, “Power Conversion Apparatus For DC/DC Conversion Using Dual Active Bridges,” no. US5027264A. 1991. [Online]. Available: https://patents.google.com/patent/US5027264A/en

[5] S. Veréb, A. Futó, Z. Sütő, A. Balogh, and I. Varjasi, “Cross-Period Single Phase Shift Control Technique for High Power and Low Frequency Dual Active Bridge Converters,” in 2019 International Conference on Electrical Drives & Power Electronics (EDPE), 2019, pp. 385–390. doi: 10.1109/EDPE.2019.8883906.

[6] S. Veréb, “Deadtime Effects on In-Period Switching Actions in Cross-Period Single Phase Shift Control of Dual Active Bridge Converters,” 2021.

[7] S. Veréb, A. Futó, Z. Sütő, A. Balogh, and I. Varjasi, “Adaptive Dead Time Compensation for Cross-Period Single Phase Shift Control of Dual Active Bridge Converters,” Renewable Energy & Power Quality Journal (RE&PQJ), vol. 18, pp. 327–332, Jun. 2020, doi: 10.24084/repqj18.31.

[8] S. Veréb, A. Futó, Z. Sütő, A. Balogh, and I. Varjasi, “Continuous Cross-Period Single Phase Shift Control for Dual Active Bridge Converters,” in 19th International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ21), 2021, p. 262.

ISBN 978-963-9299-43-6