

# XIII. Mechwart András Ifjúsági Találkozó



**KÖTET**

**XIII. MAIT**

**SIÓFOK**

**2023**



## XII. Mechwart András Ifjúsági Találkozó

### **Szerkesztette:**

Dr. Mohos András  
Dr. Táci István  
Dr. Tóth Zoltán

### **Tördelte:**

Tóth Anett

### **A kötetben megjelent előadások szakmai bírálói:**

Dr. Holcsik Péter	egyetemi adjunktus	ÓE Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar
Füzesi János Dániel	vezető tervező	Robert Bosch Kft.
Gregus Zoltán	szakmai irányító	MAVIR Zrt.
Pintér László	inn. igazgató	OPUS TIGÁZ Zrt.
Horváth Csongor	adjunktus	Robert Bosch Kft.
Farkas Csaba	adjunktus	BME Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Dr. Pócsi Gergely	adjunktus	Protecta Kft.
Stranyóczki László	doktorandusz	BME Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Kárász Zoltán	senior AI expert	Robert Bosch Kft.
Markovics Dávid	doktorandusz	BME Gépészmérnöki Kar
Bánhegyi György	műanyag- és vegyipari szakértő	Medicontur Orvostechnikai Kft.
Varga Viktória Alexandra	hálózati innovációs kiemelt szakértő	E.ON Észak-dunántúli Áramhálózati Zrt.
Török Ákos	hálózati innovációs szakértő	E.ON Észak-dunántúli Áramhálózati Zrt.

ISBN 978-963-9299-51-1

DOI: 10.54232/MAIT.2023

Kiadó:

Magyar Elektrotechnikai Egyesület – Mechwart András Ifjúsági Társaság,  
Budapest

2023

© Minden jog fenntartva.



# Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék .....	4
Előszó .....	5
Fotovillamos termelésbecslés támogatása multimodális neurális háló segítségével égboltkameraképek és különböző konfigurációjú időjárési adatok alapján 10.54232/MAIT.2023_1 .....	7
Elosztóhálózati soros és sönt feszültségszabályozás inverteres eszközökkel 10.54232/MAIT.2023_2 .....	20
3D nyomtatott toroid tekercs vasveszteségének analízise 10.54232/MAIT.2023_3 .....	42
Mit tudhatunk meg a kisfeszültségű hálózatokról mérő- és szenzorberendezések telepítésével? 10.54232/MAIT.2023_4 .....	52
Inerciacsökkenés vizsgálata: A fogyasztói oldal hatáselemzése 10.54232/MAIT.2023_5 .....	68
Villamos gépek a körforgásos gazdasági modellben 10.54232/MAIT.2023_6 .....	82
Publikus villamosautó-töltőállomások területi elemzése 10.54232/MAIT.2023_7 .....	89
Elektrosztatikus szállkémzési technológia működési paramétereinek vizsgálata 10.54232/MAIT.2023_8 .....	97
Interfész algoritmusok vizsgálata Power-Hardware-in-the-Loop szimulációs környezetben 10.54232/MAIT.2023_9 .....	106
Nátrium-kén akkumulátor, mint hálózati energiatároló 10.54232/MAIT.2023_10 .....	119
Inverter alapú mikrogridek hálózati reszinkronizációjának vizsgálata 10.54232/MAIT.2023_11 .....	129
Elosztóhálózati megújuló kapacitás vizsgálata 10.54232/MAIT.2023_12 .....	142
Elosztóhálózati soros és sönt feszültségszabályozás inverteres eszközökkel 10.54232/MAIT.2023_13 .....	155
Gépi Tanuló modell implementációk a villamos járműhajtások beágyazott rendszereiben: áttekintés a technika mai állásáról 10.54232/MAIT.2023_14 .....	171



# Előszó



Tisztelt Olvasó!

Ismét eltelt egy év, így a Magyar Elektrotechnikai Egyesület Mechwart András Ifjúsági Társasága megszervezte rendes éves konferenciáját fiatal kutatók, pályakezdő mérnökök és egyetemi hallgatók számára. A konferencia jövője szempontjából pozitívum, hogy a szervezésben aktívan résztvevők száma a tavalyi évhez képest megduplázódott, ami erősíti a fenntarthatóságot. Konferenciánkra az idei évben több, mint 100 fő regisztrált, amely szintén stabilnak mondható.

A 2023. évi XIII. Konferencián számos korábban alkalmazott jó gyakorlatot sikerült megtartanunk, valamint újításokat bevezetnünk. A nagy előadói jelentkezésszám idén először döntési kényszer elé állított minket. A rendelkezésre álló időkeretet csak párhuzamos szekciókkal vagy poszterszekcióval tudtuk volna tartani. Voksunkat végül utóbbi mellett tettük le, ami maximálisan beváltotta hozzá fűzött reményeket. A posztterek körül kisebb tömeg alakult ki, ahol összetalálkozhattak a területet művelő szakemberek.

A témákat tekintve ismét az elektrotechnika és energetika legkülönbözőbb területeibe nyerhettünk betekintést: a kiefeszültségű hálózatok és mikrogridok világába, az elosztóhálózati feszültségszabályozásba, energiatárolásba, villamos gépek fejlesztési irányába. A témák egytől egyig napjaink kurrens problémáit dolgozták fel. Előadóink sorában tudhattuk az ország számos képzőhelyének mérnök hallgatóit, illetve nagyvállalatok alkalmazottait is. A konferencián elhangzott előadásokból idén is biztosítottuk a résztvevők számára a rövid összefoglaló, illetve a teljes kézirat megjelenítését. Ezeket az anyagokat a Magyar Elektrotechnikai Egyesület szakmai színvonalát biztosítva szakértői bírálattal segítettük, a szerzők számára így értékes véleményeket adva. Kiadványainkat a korábbi gyakorlatnak megfelelően ISBN és DOI számmal is ellátjuk a szélesebb körű elérhetőség biztosításához.

Bízunk benne, hogy kiadványunk olvasásával idén is kellemes perceket szerzünk Olvasóinknak!

Dr. Mohos András  
alelnök  
MEE MAIT

# **XIII. Mechwart András Ifjúsági Találkozó**

## **Kéziratok**

Barancsuk Lilla, Günter Dalma<sup>1)</sup>, Oláhné Dr. Groma Veronika, Dr. Hartmann Bálint

<sup>1)</sup>gunter.dalma@ek-cer.hu

Energiatudományi Kutatóközpont, Környezetfizikai Laboratórium

## Fotovillamos termelésbecslés támogatása multimodális neurális háló segítségével égboltkameraképek és különböző konfigurációjú időjárási adatok alapján

**Absztrakt** – Az elmúlt évtizedben a villamosenergia-rendszert érintő változásoknak, köztük a megújuló energiaforrások dinamikus terjedésének köszönhetően az időjárásfüggő villamosenergia-termelés terén a különféle előrejelző algoritmusok használata a napi üzemelőkészítés és erőmű menetrendezés folyamataiban jelentősen felértékelődött. Bár a napsugárzás előrejelzésének mára kiemelt jelentősége van a napenergián alapuló rendszerek integrációjában, ugyanakkor a szabálytalan felhőmozgás megnehezíti annak pontos megvalósítását. A legmegbízhatóbb sugárzásbecslés meteorológiai paraméterek és felhőzetről rendelkezésre álló információk, például az égboltról készült felvételek kombinált elemzésével valósítható meg. Ebben a cikkben bemutatunk egy többmódusú mélyneurális háló alapú rendszert, amely ezen adatok fúziójával végzi a sugárzásbecslést. A képek feldolgozását state-of-the-art vision transformer háló, a meteorológiai adatok elemzését pedig egy multilayer perceptron háló valósítja meg. Több meteorológiai adat-kombinációt hasonlítottunk össze a becslés pontossága szempontjából a legjobb adatösszeállítás kiválasztására, valamint bemutatjuk az Energiatudományi Kutatóközpontban kidolgozott sugárzásbecslő keretrendszert.

**Abstract** – Over the last decade, transformations within the electricity sector, notably the rapid growth of renewable energy sources, have underscored the importance of employing diverse forecasting algorithms in the realm of weather-dependent electricity generation. These algorithms play a crucial role in daily operational planning and scheduling for power plants. While ultra-short-term solar radiation forecasting is crucial for the integration of solar energy-based systems, the irregular cloud movement hinders accurate prediction. The most reliable radiation estimation can be achieved through the combined analysis of meteorological parameters and cloud cover information, such as those obtained from all-sky camera images. In this paper, we introduce a multi-modal deep neural network-based system that performs irradiation estimation utilizing late-level data fusion. The image processing is carried out by a state-of-the-art vision transformer network, while the analysis of meteorological data is realized through a multi-layer perceptron network. We investigate multiple combinations of meteorological data to determine the configuration that maximizes

*estimation accuracy. Additionally, we present the irradiation estimation framework developed at the Centre for Energy Research.*

**Címszavak: meteorológiai adatok, napelem, neurális háló, termelés-előrejelzés, hibrid modell**

## 1. BEVEZETÉS

Magyarország Nemzeti energia- és klímaterve [1], valamint az Európai Unió Megújulóenergia-irányelve [2] által ösztönözve, hazánk napenergia kapacitása jelentősen bővült az elmúlt néhány évben. A hazai ipari és háztartási méretű napelemes rendszerek összes beépített kapacitása idén átlépte az 5000 MW-ot [3]. A fotovillamos termelés drasztikus terjedése a teljes villamosenergia-rendszerre hatást gyakorol, rendszerszinten befolyásolja annak stabilitását, lokálisan pedig a feszültségviszonyokat és a teljesítményáramlást. Ennek köszönhetően a fotovillamos termelés előrejelzése napjainkra gazdasági és stratégiai jelentőségű témává lépett elő. A fotovillamos villamosenergia-termelés egyik legfőbb jellemzője a változékonyság, amely oka, hogy egyes légköri paraméterek – elsősorban az égbolt felhőzettsége – közvetlen hatást gyakorolnak rá. A felhők rendszertelen és gyors mozgásának köszönhetően néhány másodperc leforgása alatt teljesen átalakulhat az égbolt képe, lényegesen megváltoztatva a fotovillamos termelést [4].

A fotovillamos villamosenergia-termelés rövidtávú üzemelőkészítésének és menetrendezésének alapja a termelést közvetlenül meghatározó globálsugárzás előrejelzése. Mivel a sugárzást a felhőmozgások és a légköri állapotváltozók együttesen befolyásolják, ezért a legnagyobb pontosságú modellek mindkét adattípust figyelembe veszik [5]. Ehhez azonban szükség van a légköri paraméterek és az égbolt felhőzettségének folyamatos és pontos nyomon követésére, illetve ezen adatok közös előrejelző modellbe integrálására. Korábbi kutatások megállapították, hogy a mélyneurális háló alapú modellek nagy pontossággal becsülik meg a globálsugárzás értékét [6]. Ugyanakkor kevésbé vizsgált terület, hogy a becsléshez felhasznált egyes meteorológiai állapotváltozók milyen mértékben járulnak hozzá a becslés pontosságához. Jelen kutatás során több meteorológiaiadat-kombinációt hasonlítottunk össze az elérhető becslési pontosság szempontjából. Emellett ismertetjük az általunk alkalmazott mélytanulás alapú modellt, amely égboltkamera képek és meteorológiai mérések együttes feldolgozásával, többmódusú háló segítségével állítja elő a globálsugárzás becsült értékét.

## 2. ADATALAPÚ GLOBÁLSUGÁRZÁS-BECSLÉS

A globálsugárzás a naptól érkező közvetlen és szórt sugárzás összessége [7]. Értéke arányos a fotovillamos termeléssel, így a technológiafüggetlen termelésbecslési eljárások a globálsugárzás megállapítására fókuszálnak [8]. A globálsugárzás becsléséhez számos ipari és tudományos megközelítés áll rendelkezésre, ideértve az összetett kereskedelmi rendszereket, amelyek felhőkamerák és szenzorok kombinációjából származó adatokat dolgoznak fel, emellett elérhetők nagy területet lefedő, műholdfelvételek elemzésére támaszkodó szolgáltatások is [9,10].

A korábbi kutatások és a kereskedelemben elérhető rendszerek főként hagyományos képfeldolgozási, fizikai formalizáción alapuló vagy statisztikai idősor-elemzési módszereket alkalmaznak [11]. Azonban a tudományos közösségben egyre népszerűbbek a gépi tanulási modellek, mivel hatékonyan kezelik a szenzorok, kamerák és időjárás adatbázisok által generált nagy mennyiségű adatot [12]. Az adatalapú megközelítés számos előnnyel rendelkezik más,



hagyományos módszerekkel szemben. Az operatív fizikai modellek ugyanis gyakran egyszerűsített formalizációkat alkalmaznak a felhőmozgás és a sugárzásváltás kapcsolatának leírására [13], a hagyományos képfeldolgozási és statisztikai modellek esetén pedig a különböző típusú adatforrások összehangolása és kölcsönhatásaik feltárása jelent kihívást. Ezzel ellentétben a mélytanulás alapú megközelítések jellegükből adódóan többféle adattípus szinergikus összekapcsolását teszik lehetővé. A feladatra változatos háló architektúrák elérhetőek, mint a teljesen összekapcsolt neurális hálózatok az időjárás adatok feldolgozására [14], konvolúciós neurális hálózatok az égboltkamera-felvételek vagy műholdképek elemzésére [15], illetve az ún. Long Short-Term Memory (LSTM) hálózatok [16], amelyek a felhőmozgás rövid és hosszú távú időbeli összefüggéseinek mintázatait tárják fel az előrejelzéshez.

A felsorolt architektúrák mellett az új típusú Transformer Hálózatok is igen ígéretesek a sugárzásbecslés terén [21]. Ez a mélyneurális háló modell eredetileg természetes nyelvfeldolgozási feladatok megoldására készült [17], fő előnye, hogy képes logikai kapcsolatokat felfedezni a távoli adatelemek között, és nagy potenciállal rendelkezik többféle adattípus együttes feldolgozására is [18]. Ezek a tulajdonságok jelentős előnyt biztosítanak a sugárzásbecslésben, mivel az égboltkamera felvételek és az időjárás adatok összekapcsolásából a sugárzással összefüggő többletinformáció nyerhető ki. Ilyen például a földfelszíni szélereősség és a felhőmozgások közötti kapcsolat, vagy a felhők és a nap helyzetéből adódó felhők felszínéről történő reflexió [19].

Jelen munkánkban bemutatjuk az Energetikai Kutatóközpont (EK) Környezetfizikai Laboratóriumában kidolgozott mélyneurális háló modellt, amely az égboltkamera által rögzített perces felbontású képeket a Vision Transformer architektúra segítségével, valamint az időjárás-állomás adatait teljesen összekapcsolt hálózattal dolgozza fel. Az összes rendelkezésre álló adat felhasználásával, a végső globálsugárzás becslést a két modell kimenetének fúziója adja. A további fejezetekben részletezzük a rendszer felépítését és működését.

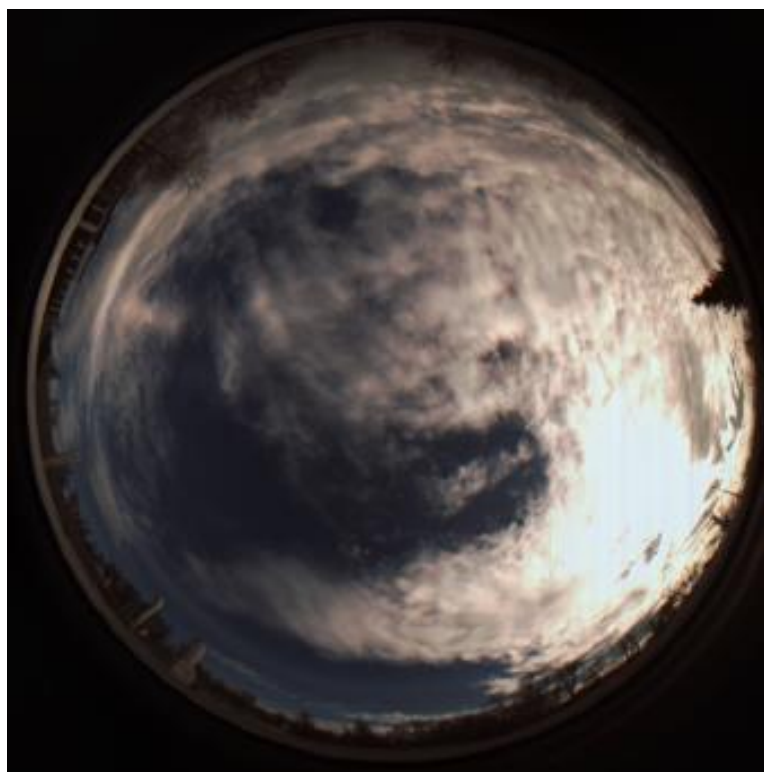
### **3. MÓDSZERTAN**

## **4. MÉRŐÁLLOMÁS ÉS KAMERARENDSZER**

Az EK 29-es épületén található a napelemek és az időjárás-monitoring rendszer kombinációjából álló mérőállomás (1. ábra). A monitoring rendszer részét képezi egy Starlight Xpress Oculus típusú nagy felbontású, 180°-os látószögű színes égboltkamera, amelynek tengelye függőlegesen felfelé néz. A kamera percenként felvételt készít az égboltról (képe a 2. ábrán látható). A kamera vezérléséhez saját fejlesztésű szoftver készült, amely alkalmazkodik az adatfeldolgozás egyedi követelményeihez, lehetőséget nyújtva a fényképezés gyakoriságának és az expozíciós idő beállításának tetszőleges módosítására. A szoftver 2021 novembere óta a nappali időszakban folyamatosan rögzíti az égboltfelvételeket.

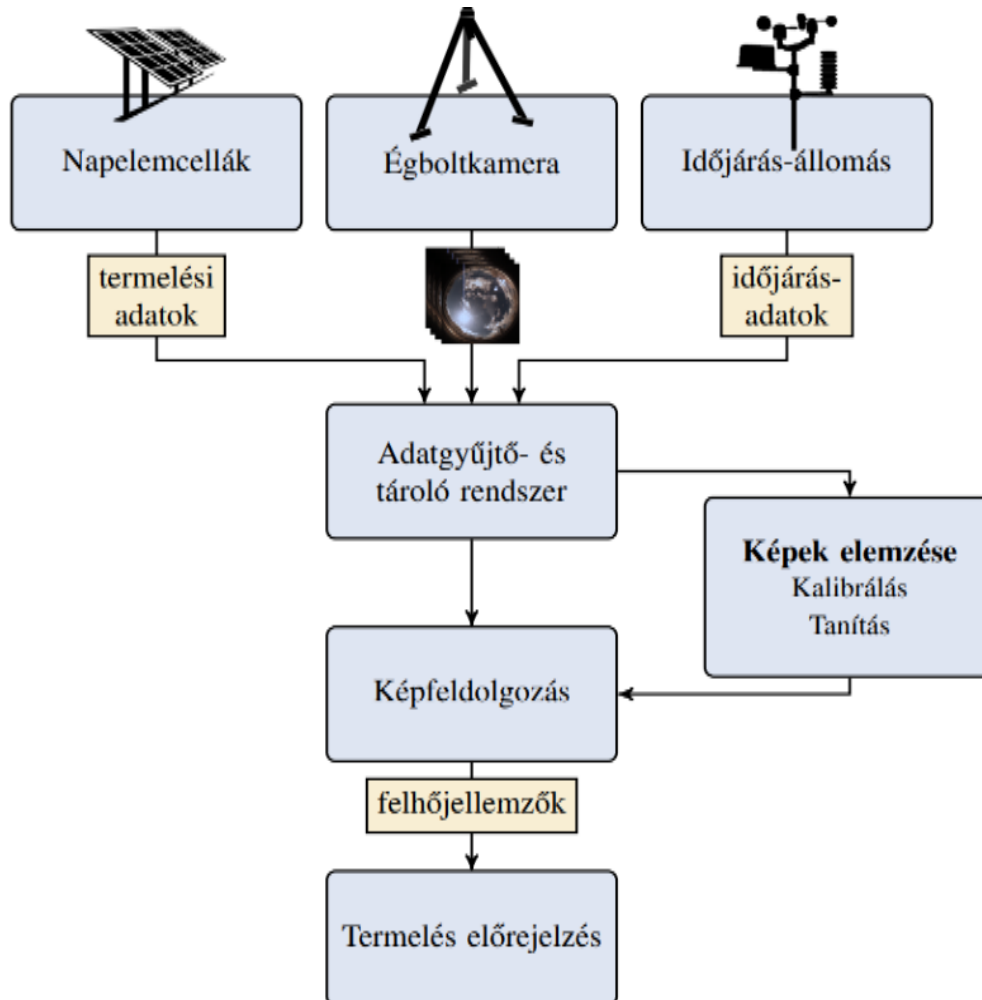


1. Ábra – Starlight Xpress Oculus típusú égbolt kamera az EK telephelyén.



2. Ábra – Felhőkamerakép. A nagy látószögű kamera a teljes égboltról készít felvételt.

A kamera közvetlen szomszédságában elhelyezett időjárás-monitoring rendszer számos meteorológiai adatot mér. Percről percre rögzíti a levegő hőmérséklet, a szélesség, az atmoszférikus nyomás, a páratartalom, valamint a napelemek termelését közvetlenül meghatározó globálsugárzás perces átlagértékét, illetve valamennyi mért paraméter egyperces szórását. A képeket és adatokat egy-egy adatbázisban tároljuk további feldolgozásra. A rendszer felépítése a 3. ábrán látható. Az összegyűjtött adatok a mélyneurális hálós feldolgozás mellett széleskörűen felhasználhatóak további elemzésekhez is.



3. Ábra – Az időjárás monitoring rendszer felépítése és az adatfeldolgozás folyamata

## 5. AZ ADATOK ELŐFELDOLGOZÁSA

A sugárzásbecslést az égboltkamera által készített képek, az időjárás állomás által mért adatok, valamint a tiszta (felhőtlen) égbolthoz tartozó, rendelkezésünkre álló sugárzásértékek alapján végeztük. Az adatokat 2022. és 2023. évi mérésekből állítottuk össze, hozzávetőlegesen összesen 170 000 egyperces mintapont áll rendelkezésünkre.

A mérési adatok feldolgozása során az időjárás esetenkénti gyors változása problémát okozott, ugyanis a perces bontású méréseknél észrevehető problémákat lehet felfedezni a perc elején

készített kép és a perc végén rögzített átlagérték között. Az eltérések korrigálására a képeken és az időjárási adatokon időbeni illesztést végeztünk, valamint az úgynevezett Clear Sky adatsort is időben illesztettük a mintákhoz, mely során a téli-nyári időszámítást is figyelembe vettük. A Clearsky sugárzásérték a felhőtlen, tiszta égbolt esetére modellezett pillanatnyi, adott földrajzi helyszínre vonatkozó globálsugárzás érték, amely ideális körülmények között meghatározza a fotovillamos termelést. Ehhez egyperces felbontású McClear típusú Clearsky adatsort használtunk [20].

A hibás mérési adatokat, például az eredményeket torzító negatív páratartalom értékeket eltávolítottuk, illetve szűrtük a kiugró mérési eredményeket is (alsó és felső 5%) az adatok közül.

Az adatsornak csak azt a részét használtuk fel, amely kellően világos időszakra korlátozódott, ahol ténylegesen történik villamosenergia-termelés. Ehhez az időjárás állomás szürkületérzékelőjének segítségével távolítottuk el a nem megfelelő adatpontokat.

Hozzáadtuk az adatsorhoz továbbá a rögzítés dátumát és időpontját is. Ezeket a körkörös reprezentációra alakítottuk át, hogy a hálózat könnyebben felismerhesse az azonos időszakokat különböző napokon és az év során.

A tanító adathalmaz kiegyenlítettége érdekében a különböző globálsugárzás értékeket közel azonos gyakorisággal szerepeltettük a tanító adatok között. A hatékony tanításhoz a teljes adatsorból véletlenszerűen 10 000 adatpontot választottunk ki. Az így kapott adathalmazt 0,8-0,15-0,05 arányban tanító, validáló és teszt adatsorokra választottuk szét. A tanító adatok értékeit átskáláztuk, hogy 0 középvértékű, 1 szórású eloszlást kapjunk minden időjárási adat esetén. A validáló és teszt adatsort a tanító adatoknak megfelelően skáláztuk át. Az égboltképeket bilineáris transzformációval 370×370-es felbontásról 224×224-es felbontására konvertáltuk, valamint a pixelértékeket a 0-255 értéktartományból a 0-1 értéktartományba skáláztuk át.

## 6. IDŐJÁRÁSI SZCENÁRIÓK

Mivel célunk a globálsugárzás becslés pontosságának vizsgálata a meteorológiai információk függvényében, ezért a felépített neurális hálózat hatékonyságát a rendelkezésre álló mérési adatokból szisztematikusan válogatott meteorológiai paraméterek alapján vizsgáltuk. E forgatókönyvek kidolgozásakor két kulcsfontosságú szempontot helyeztünk előtérbe: egyrészt a pontos globálsugárzás értékek becsléséhez nélkülözhetetlen paraméterek azonosítását, másrészt annak felmérését, hogy lehetséges-e kizárni bizonyos paramétereket, amelyek ismert fizikai törvényszerűségnek (például a légkör állapotegyenlete) köszönhetően többletinformációval nem rendelkeznek. Az időbélyeg és az égbolt kamera által szolgáltatott képek mellett a különböző meteorológiai paraméterek figyelembevételével négy különböző scenáriót foglalmaztunk meg: (1) valamennyi általunk mért meteorológiai paraméter (hőmérséklet, légnyomás, páratartalom, szélesség) egyperces átlagértékei, valamint ClearSky sugárzásértékek; (2) valamennyi általunk mért meteorológiai paraméter egyperces átlagértékei és szórás értékei, valamint Clearsky sugárzásértékek; (3) három összefüggő légköri állapotjelző (hőmérséklet, légnyomás, páratartalom) egyperces átlagértékei; (4) két független állapotjelző (hőmérséklet és légnyomás) egyperces átlagértékei. Az időjárási scenáriókat a 1. táblázat foglalja össze.



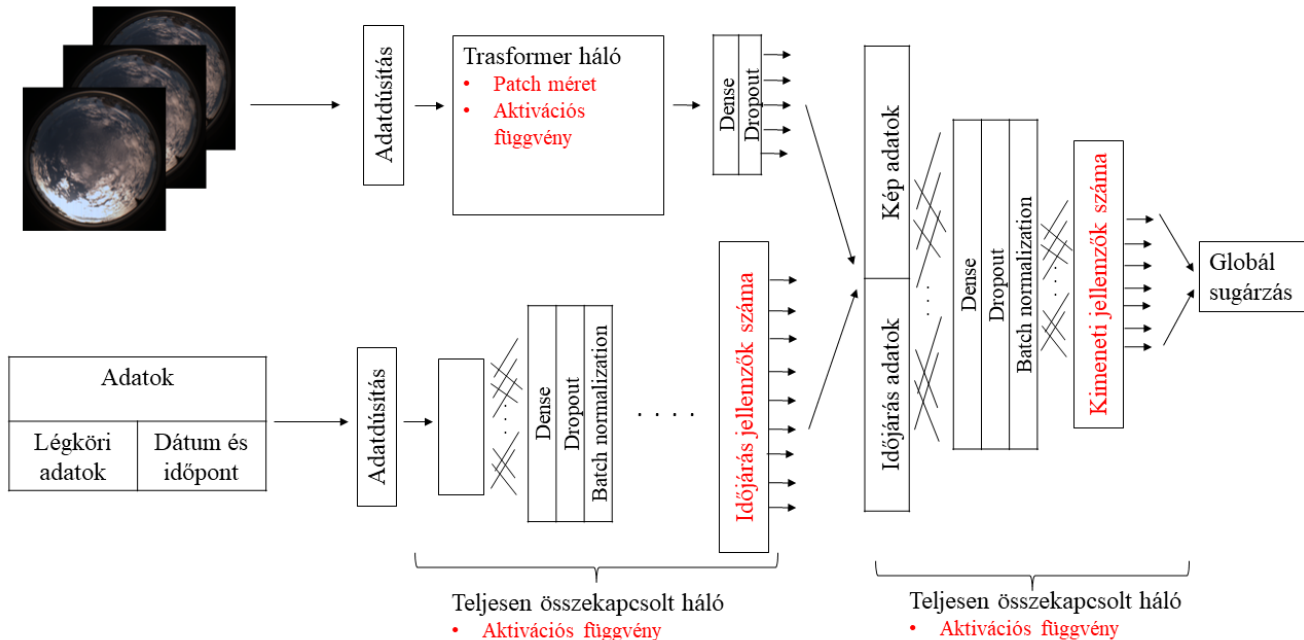
1. táblázat – A vizsgált időjárási scenáriók, és a hozzájuk tartozó adatok

Szenárió	Felhasznált egyperces átlagértékek	Felhasznált szórásértékek	Clearsky adatsor
1. Teljes adatkészlet szórás nélkül	Hőmérséklet, légnyomás, páratartalom, szélesebesség	-	Igen
2. Teljes adatkészlet szórással	Hőmérséklet, légnyomás, páratartalom, szélesebesség	Hőmérséklet, légnyomás, páratartalom, szélesebesség	Igen
3. Összefüggő légköri állapotjelzők	Hőmérséklet, légnyomás, páratartalom	-	Nem
4. Független légköri állapotjelzők	Hőmérséklet, légnyomás	-	Nem

## 7. TÖBBMÓDUSÚ MÉLYNEURÁLIS HÁLÓ MODELL

A becslés kivitelezéséhez egy olyan mélyneurális háló modellt hoztunk létre, ami képes több különböző adatformátum egyidejű feldolgozására (többszörös módusú háló). A hálózat a késői fúzió elve alapján működik, ami azt jelenti, hogy az eltérő formátumú bemeneti adatokat először külön-külön specializált modellekkel dolgozzuk fel, majd az így kapott jellemzővektorokat egyetlen hálózat egységes formátumban kapja meg további feldolgozásra, ennek a hálónak kimenetén áll elő a végső becslés.

A modell három fő részből áll. A képeket egy Vision Transformer (ViT) architektúra dolgozza fel, amely egy kifejezetten képfeldolgozásra tervezett Transformer hálózat. A mi modellünkben egy kisebb ViT modellt alkalmaztunk [22], amely hatékonyan használható korlátos erőforrású környezetekben is. A gyorsabb tanulás érdekében az ImageNet általános célú képadatbázison előtanított ViT hálót alkalmaztunk. Ezzel párhuzamosan az időjárási adatsort egy teljesen összekapcsolt hálózattal dolgozzuk fel. A két modul kimenetén előálló jellemzővektorokat összeillesztjük, majd egy második teljesen összekapcsolt hálózattal feldolgozzuk, amelynek kimenete a globálsugárzás becsült értéke. A háló vázlatos felépítése a 4. ábrán látható. A teljes hálózatot az időjárásállomás által mért, perces globálsugárzási értékkel csatoltuk vissza, és backpropagation módszerrel tanítottuk. A tanítás során a hibát a becsült és mért globálsugárzás különbségének átlagos négyzetes középértékeként (root mean square error vagy RMSE) definiáltuk, optimalizáló algoritmusnak a változatos körülmények között is igen robusztus Adam algoritmust választottuk.



4. Ábra – A többmódusú neurális háló vázlata

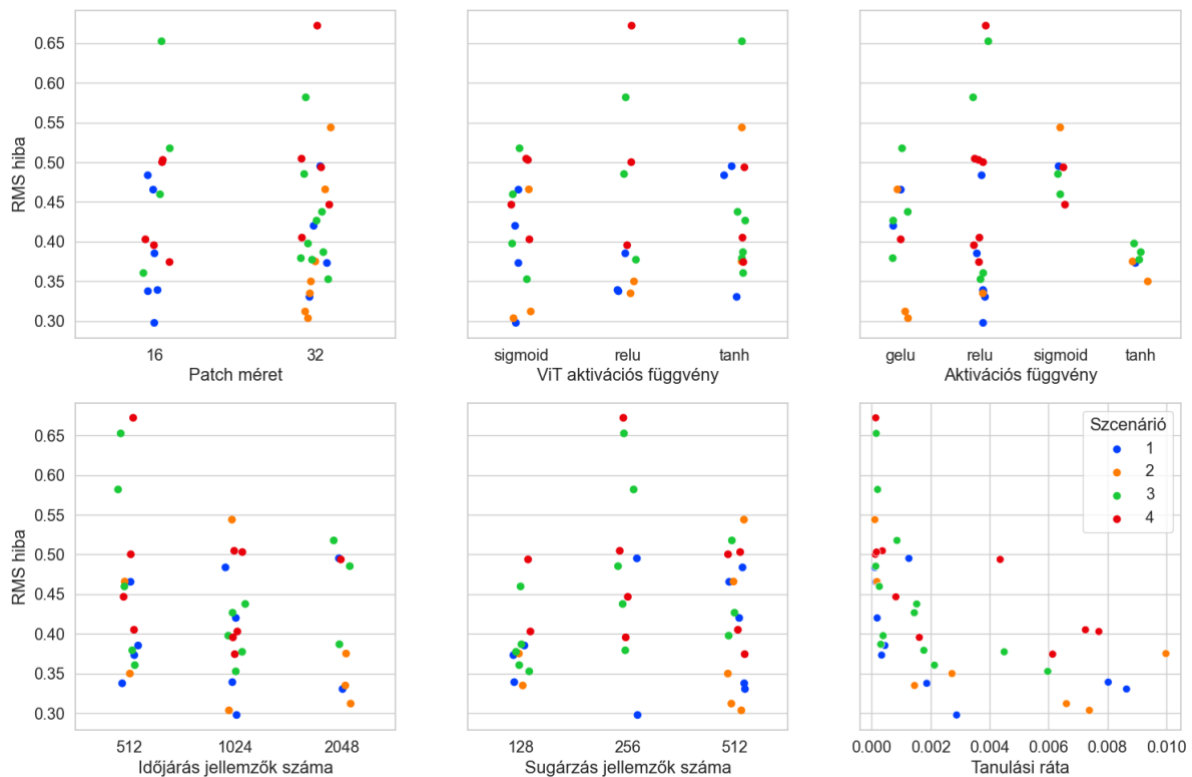
A modell hiperparamétereit Bayesi optimalizálással finomhangoltuk. A hangolt hiperparaméterek a ViT háló patch mérete és aktivációs függvénye, a teljesen összekapcsolt hálók aktivációs függvénye, az időjárás adatokhoz tartozó jellemzővektor mérete, a kiemeneti jellemzővektor mérete és az Adam becslő tanítási rátáját (learning rate) voltak. Az optimalizált paramétereket, és azok lehetséges értékeit a 2. táblázat foglalja össze. A finomhangolás során minden időjárási scenárióhoz 10 különböző hiperparaméter-kombinációt vizsgáltunk. Minden kombinációt 3 epoch tanítási cikluson keresztül tanítottuk, a kísérletek sikerét a tanítás végén előállt validálási RMS hibaértékkel jellemeztük. A 10 próbálkozás során elért legkisebb hibamértéket elérő modellt 100 epochon keresztül továbbtanítottuk, így kapva a végső, becslési pontosság meghatározására szolgáló hálóarchitektúrát.

2. táblázat – Hiperparaméterek és lehetséges értékeik

Hiperparaméter neve	Leírás	Lehetséges értékek
Tanulási ráta	A teljes modell optimalizálásához használt Adam algoritmus tanulási rátája.	0,0001–0,01
Teljesen összekapcsolt háló aktivációs függvénye	Mindkét teljesen összekapcsolt háló modul aktivációs függvénye; minden réteg kimenetén egységesen.	tanh, sigmoid, relu, gelu
ViT modell aktivációs függvénye	Csak a ViT modell aktivációs függvénye, minden réteg kimenetén egységesen.	tanh, sigmoid, relu
Időjárás jellemzők száma	Az időjárás adatokat feldolgozó teljesen összekapcsolt háló kiemeneti rétegének neuronok száma.	512, 1024, 2048
Kimeneti jellemzők száma	A kiemenet előállító teljesen összekapcsolt háló kiemeneti rétegének neuronok száma. A neuronok kiementének súlyozott összegeként áll elő a becslési globálsugárzás.	128, 256, 512
ViT modell patch mérete	A ViT modell bemenetén kapott képrészletek mérete pixelben.	16, 32

A hiperparaméter-kombinációkhoz tartozó hibaértékeket minden paraméterre időjárási scenáriókra bontva ábrázoltuk (5. ábra). Összességében, ha több bemeneti időjárási adat és Clearsky adatsor

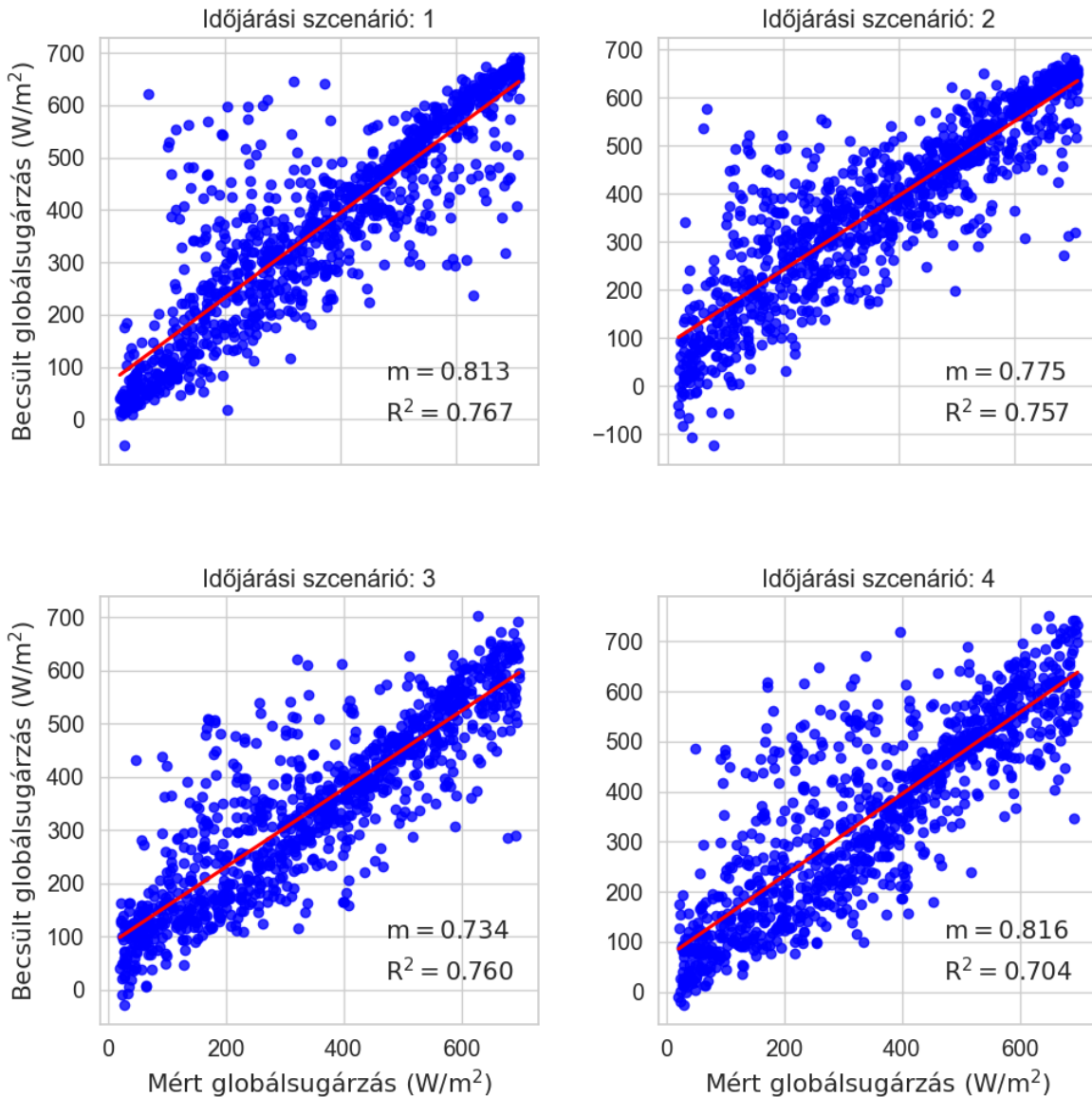
is rendelkezésre áll, jobb becslési pontosság érhető el függetlenül a háló felépítésétől. A pontossághoz minden időjárási scenárió esetén a közepes tanulási ráta és nagyobb patch méret járul hozzá. Az időjárási jellemzők nagyobb száma a két független időjárási adat mellett jobb pontosságot biztosít, míg a három összefüggő időjárási adatbemenethez kisebb időjárási adatjellemző elég a legjobb pontosság eléréséhez. A sigmoid és tanh aktivációs függvények adják a legjobb eredményeket a ViT háló esetében, míg a teljesen összekapcsolt modulok relu és gelu aktivációs függvények mellett teljesítenek a lejobban.



5. Ábra – A hálózat validálási vesztesége különböző hiperparaméter kombinációk mellett.

## 8. EREDMÉNYEK

Az optimalizált, majd tovább tanított hálók becslési pontosságát 1000 független mintából (azaz egy adott mérési pontban rögzített meteorológiai- és képinformációk) álló tesztadatsorral értékeltük a különböző időjárási scenáriók esetén. A teszteredményeket a 6. ábrán ábrázoltuk. A háló kimenetét minden tesztpontban a becslés és mért adatok megjelenítésével ábrázoltuk. A két adat közötti lineáris kapcsolatot a lineáris regresszió R négyzet paraméterével jellemeztük. Ez a paraméter kifejezi a becslés és mért adatok közötti összefüggés erősségét és a modell becslési pontosságát. Az eredmények azt mutatják, hogy a becslés pontossága magasabb az első két scenárióban, ahol a Clearsky adatsor is része a bemeneti időjárási adatoknak. Emellett megfigyelhető, hogy a közepes globálsugárzás esetén jelen lévő nagyobb becslési bizonytalanság is csökken, ha a meteorológiai adatok mellett a Clearsky adatsort is biztosítjuk a háló bemeneteként.

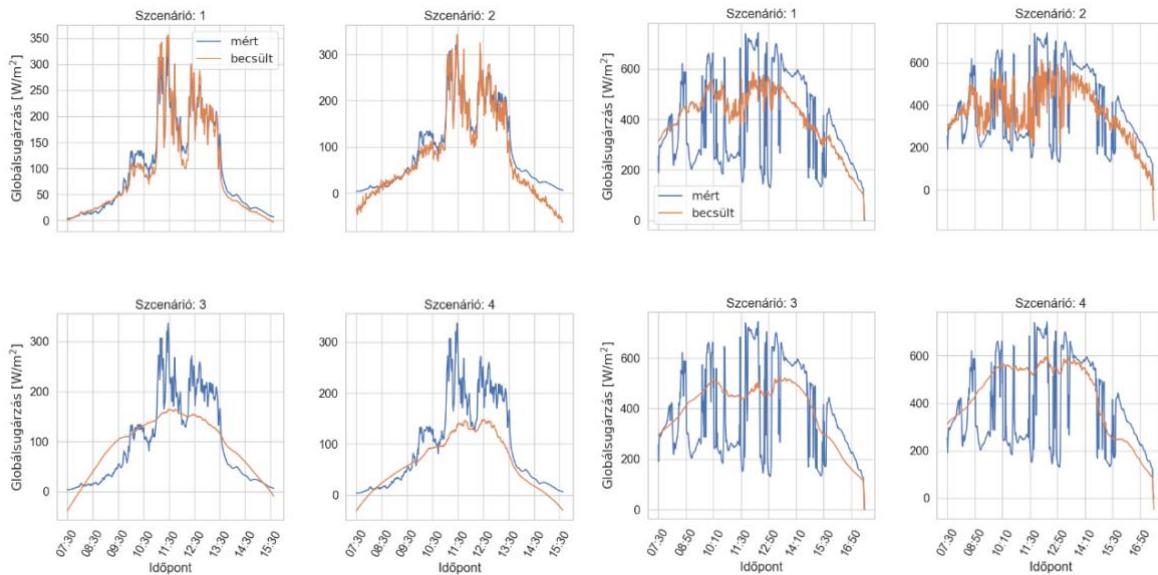


**6. Ábra – A tesztadatsor különböző időjárási szenáriók esetén. Megfigyelhető, hogy a hálók időnként hibásan negatív értékeket becsülnek, amely logaritmikus becslés alkalmazásával vagy a negatív értékek nullára korrigálásával javítható a későbbiekben.**

Különböző időjárási szenáriókhöz kapcsolódóan ábrázoltuk a becsült globálisugárzás értékeket a mért adatok mellett a 7. (a)-(d) ábrákon. Az ábrázolt napok sorban: tiszta égbolt, változó felhőzetű égbolt, teljesen felhős nap és ködös nap. Az ábrázolt eredményeken szembevető különbségek fedezhetők fel a hálók működésében. Az 1. és 2. szenárióhoz tartozó hálók, amelyek a Clearsky adatsort használják, komplex összefüggéseket is felismertek a bemeneti adatok és a globálisugárzás értéke között. Ennek köszönhetően ezek a hálók jól kezelik a változó felhőzettel járó időjárási körülményeket is. Másrészt a 3. és 4. szenárióhoz tartozó hálók általában rosszabbul teljesítenek a hirtelen globálisugárzásváltozások, különösen a változó felhős időszakok esetén. Ezek a hálók tendenciózan egy Clearsky-jellegű görbét követnek minden időjárási körülmény mellett, amely arra utal, hogy a jelenleg használt tanítási adatsor alapján nem sikerült felismerniük a felhőzet, a globálisugárzás és az időjárásparaméterek közötti összefüggést.

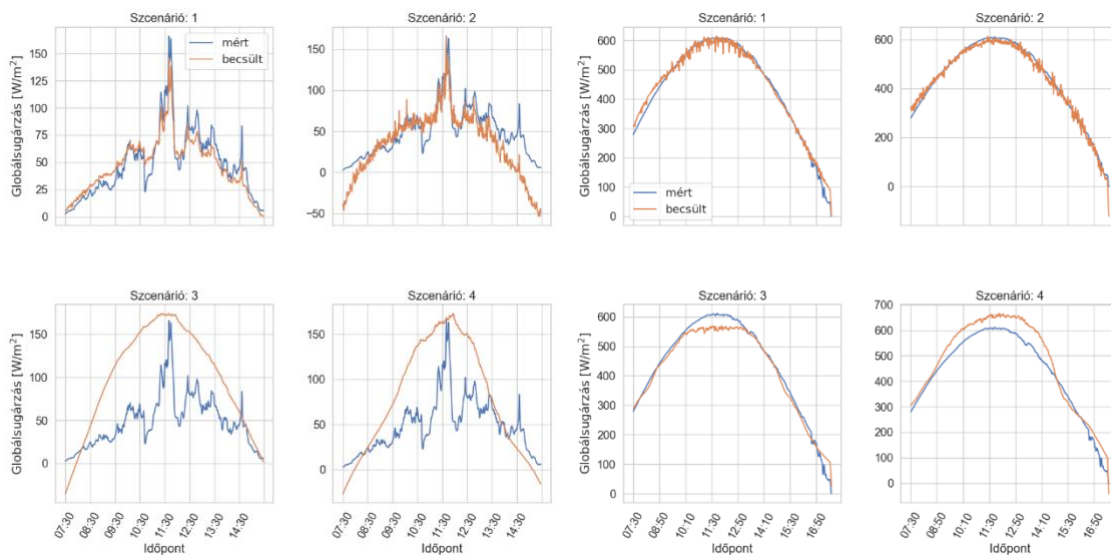


Ismert, hogy a neurális háló tanítási ideje jelentősen csökkenthető, ha előre feldolgozott adatokat használunk, amelyek tartalmaznak a modellezni kívánt összefüggésekkel kapcsolatos *a priori* információkat. Ez a hatás itt is megfigyelhető, hangsúlyozva az előfeldolgozott adatok (például a Clearsky adatsor) fontosságát a háló bemenetei között. A 3. és 4. scenáriók eredményei azt sugallják, hogy az összefüggések felismerése már elkezdődött, és nem zárható ki, hogy ezeknél a scenárióknál további tanítás során a háló képesek lesznek felismerni bonyolultabb összefüggéseket is. Ennek elérése valószínűleg nagyobb hálóméretet és a hiperparaméter-optimalizáció továbbfuttatását igényli, valamint esetleg más tanítási megközelítéseket is, mint például az ún. Physics informed neural network elv alkalmazását.



7.a. ábra – Teljesen felhővel borított égbolt

7.b. ábra – Változó felhőzettség



7.c. ábra – Ködös nap

7.d. ábra – Tiszta égbolt

**7. Ábra – A becslés eredménye négy különböző időjárású nap esetén: tiszta égbolt egész nap, változó felhőzettség napközben, teljesen felhővel borított égbolt egész nap, ködös nap.**

## 9. ÖSSZEFOGLALÁS

Kutatásunk fő célkitűzése a fotovillamos rendszerek termelését közvetlenül befolyásoló globálsugárzás becslése volt. E cél érdekében időjárási adatokat és égboltkamera felvételeket többmódusú mélyneurális háló modellel dolgoztunk fel, mely hatékonyan kezeli a nagy mennyiségű bemeneti adatot és képes felismerni olyan összefüggéseket, melyek hagyományos módszerekkel nehezen detektálhatók. A hálót különböző meteorológiai adatkombinációk mellett optimalizáltuk és teszteltük. A kísérletek során elemeztük az időjárásparaméterek becslés pontosságára gyakorolt hatását. Az eredmények egyértelműen rámutattak arra, hogy több időjárási paraméter és a Clearsky adatsor alkalmazása jelentősen javítja a modell pontosságát, valamint lehetővé teszi a komplexebb időjárási körülmények felismerését.

Terveink között szerepel az eredmények alapján a modell továbbfejlesztése további előfeldolgozott adatok felhasználásával, mint amilyen az égboltképek alapján kinyert felhőjellemezők vagy a légköri aeroszolok sugárzásra gyakorolt hatása. Emellett terveink közé tartozik egy előrejelző modell kidolgozása a hálók visszacsatolásával. A becslési bizonytalanságot különböző időjárási körülmények között szeretnénk számszerűsíteni, hogy teljesebb képet kapjunk a hálók előrejelzési képességeiről.

## 10. HIVATKOZÁSOK

- [1] „Magyarország Nemzeti Energia- és Klímaterve 2023. évben felülvizsgált változat,” Magyarország Kormánya [Online], 2023. augusztus 20. Elérhető: <https://kormany.hu/dokumentumtar/magyarország-nemzeti-energia-es-klimaterve-felulvizsgalt-valtozat-tars-egy>
- [2] „Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast),” Official Journal of the European Union [Online], 2023. augusztus 20. Elérhető: [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L\\_.2018.328.01.0082.01.ENG&toc=OJ:L:2018:328:TOC](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2018.328.01.0082.01.ENG&toc=OJ:L:2018:328:TOC)
- [3] MAVIR „Naptermelés becslés és tény adatok,” MAVIR [Online], 2023. augusztus 20. Elérhető: <https://mavir.hu/web/mavir/naptermeles-becsles-es-teny-adatok>
- [4] B. Turóczy, B. Hartmann, A. S. Kazsoki, „Felhőátvonulások hatása az elosztóhálózat feszültségére,” Elektrotechnika, vol. 114(03) 0367-0708, pp.14-16, 2021.
- [5] A. Mellit, A. Massi Pavan, E. Ogliaari, S. Leva, and V. Lughi, “Advanced Methods for Photovoltaic Output Power Forecasting: A Review,” Applied Sciences, vol. 10, no. 2, p. 487, Jan. 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/app10020487>.
- [6] R. Ahmed, V. Sreeram, Y. Mishra, and M. D. Arif, “A review and evaluation of the state-of-the-art in PV solar power forecasting: Techniques and optimization,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 124, p. 109792, May 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109792>.
- [7] Albert and van Ulden, “A Simple Scheme for Daytime Estimates of the Surface Fluxes from Routine Weather Data,” Journal of climate and applied meteorology, vol. 22, no. 4, pp. 517–529, Apr. 1983, doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1983\)022%3C0517:assfde%3E2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1983)022%3C0517:assfde%3E2.0.co;2).
- [8] F. Barbieri, S. Rajakaruna, and A. Ghosh, “Very short-term photovoltaic power forecasting with cloud modeling: A review,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 75, pp. 242–263, Aug. 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.068>.
- [9] „24/7 cloud observations with Sky InSight™ all-sky imager,” Reuniwatt [Online], 2023. augusztus 21. Elérhető <https://reuniwatt.com/en/247-all-sky-observation-sky-insight>.
- [10] „How Solcast generates irradiance and weather data,” Solcast [Online], 2023. augusztus 21. Elérhető <https://solcast.com/irradiance-data-methodology>.

- [11] B. Juncklaus Martins et al., “Systematic review of nowcasting approaches for solar energy production based upon ground-based cloud imaging,” *Solar Energy Advances*, vol. 2, p. 100019, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seja.2022.100019>.
- [12] P. Kumari and D. Toshniwal, “Deep learning models for solar irradiance forecasting: A comprehensive review,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 318, p. 128566, Oct. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128566>.
- [13] J. Xu, S. Yoo, D. Yu, D. Huang, J. Heiser, and P. D. Kalb, “Solar irradiance forecasting using multi-layer cloud tracking and numerical weather prediction,” Apr. 2015, doi: <https://doi.org/10.1145/2695664.2695812>.
- [14] Y. Chu, H. T. C. Pedro, M. Li, and C. F. M. Coimbra, “Real-time forecasting of solar irradiance ramps with smart image processing,” *Solar Energy*, vol. 114, pp. 91–104, Apr. 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.01.024>.
- [15] Y. Lin et al., “Transfer Learning on the Feature Extractions of Sky Images for Solar Power Production,” *IEEE Xplore [Online]*, 2019. augusztus 1. Elérhető: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8973423/>
- [16] J. Zhang, R. Verschae, S. Nobuhara, and J.-F. Lalonde, “Deep photovoltaic nowcasting,” *Solar Energy*, vol. 176, pp. 267–276, Dec. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.10.024>.
- [17] A. Vaswani et al., „Attention is all you need,” *Advances in neural information processing systems*, pp.5998-6008, 2017.
- [18] P. Xu, X. Zhu, and D. A. Clifton, “Multimodal Learning With Transformers: A Survey,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, pp. 1–20, 2023, doi: <https://doi.org/10.1109/tpami.2023.3275156>.
- [19] P. Tzoumanikas, E. Nikitidou, A. F. Bais, and A. Kazantzidis, “The effect of clouds on surface solar irradiance, based on data from an all-sky imaging system,” *Renewable Energy*, vol. 95, pp. 314–322, Sep. 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.04.026>.
- [20] M. Lefèvre et al., “McClear: a new model estimating downwelling solar radiation at ground level in clear-sky conditions,” *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 6, no. 9, pp. 2403–2418, Sep. 2013, doi: <https://doi.org/10.5194/amt-6-2403-2013>.
- [21] J. Liu, H. Zang, L. Cheng, T. Ding, Z. Wei, and G. Sun, “A Transformer-based multimodal-learning framework using sky images for ultra-short-term solar irradiance forecasting,” vol. 342, pp. 121160–121160, Jul. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121160>.
- [22] A. Dosovitskiy et al., “An Image is Worth 16x16 Words: Transformers for Image Recognition at Scale,” *arXiv:2010.11929 [cs]*, 2020. október Elérhető: <https://arxiv.org/abs/2010.11929>.

Guth Tamás  
tamasguth@edu.bme.hu  
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Villamos Energetika Tanszék  
MVM Smart Power Laboratórium

## Elosztóhálózati soros és sönt feszültségszabályozás inverteres eszközökkel

**Absztrakt** – Az elmúlt évtizedek során az energiaellátás minőségéhez és hiányához kapcsolódó problémák fontos kérdéssé váltak világszerte. Erre megoldást jelenthet a villamosenergia-hálózatra csatlakozó teljesítményelektronikát tartalmazó feszültségszabályozó eszközök számának növelése. A feszültségszabályozó eszközöket megkülönböztetjük aszerint, hogy soros vagy sönt elemként csatlakoznak a hálózatra. A cikk további részében bemutatásra kerül egy soros, illetve egy párhuzamos feszültségszabályozó, melyek a Dynamic Voltage Restorer és a Static Compensator. A kiválasztott FACTs (Flexible AC Transmission) eszközök Matlab Simulink szoftverben kerültek megvalósításra és tesztelésre. A cikk célja bemutatni, hogy különböző kialakítású feszültségszabályozók segítségével hogyan, és milyen mértékben javítható az energiaminőség az elosztóhálózaton.

**Abstract** – Over the past decades, problems related to the quality and scarcity of energy supply have become a major issue worldwide. One solution is to increase the number of voltage regulating devices with power electronics connected to the electricity grid. Voltage regulating devices are distinguished according to whether they are connected to the grid as a series or shunt element. In the remainder of the paper, a series and a parallel voltage regulator are presented, namely the Dynamic Voltage Restorer and the Static Compensator. The selected FACTs (Flexible AC Transmission) devices have been implemented and tested in Matlab Simulink software. The aim of this paper is to show how and to what extent power quality can be improved in the distribution network by using different designs of voltage regulators.

**Címszavak:** villamosenergia-hálózat, Dynamic Voltage Restorer, DVR, Static Compensator, STATCOM, meddőkompenzálás, feszültségszabályozás, compensation, reactive power, transmission system

### 1. BEVEZETÉS

A megújuló energiaforrásokat kiaknázó erőművek energiatermelésének, valamint a hálózat korlátos befogadóképességének köszönhetően egyre gyakoribbá válnak a feszültségcsökkenések, feszültségemelkedések és pillanatszerű szolgáltatáskiesések, melyek az energiaellátásban fellépő problémák nagy részét képezik. Az ilyen módon kialakuló problémák adódhatnak egyaránt hibákból



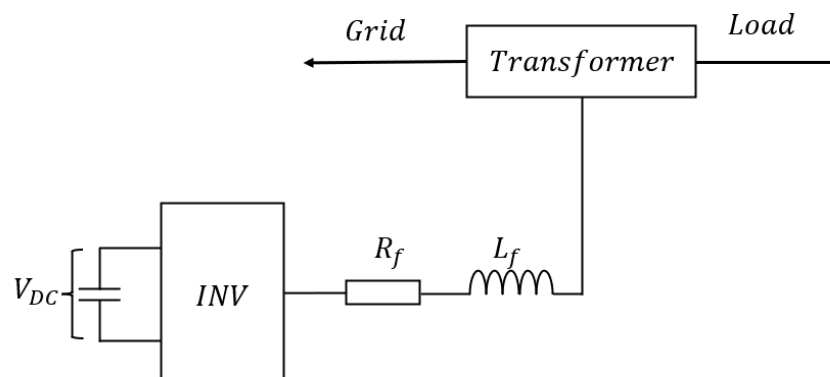
(zárlatok), megújuló energiaforrásokhoz kapcsolódó túlzott termelésből, de akár aszimmetrikus fogyasztásból vagy termelésből is. Az ilyen nem kívánt állapotokra jelenthetnek megoldást a soros és sőt feszültségszabályozó eszközök.

A teljesítményelektronikai eszközök hatalmas potenciállal rendelkeznek a villamosenergia-rendszer (VER) szabályozásában. A VER előírt üzemállapotban tartása elengedhetetlen a mindennapokban, mivel szinte minden háztartás, középület és más létesítmények ezen keresztül vételezik a működésükhöz szükséges villamosenergiát.

Feszültségszabályozó eszközök alkalmazásával korlátozható a hálózati feszültség csökkenésének és feszültségnövekedésének mértéke. Emellett fenntartható szimmetrikus üzemállapot alakítható ki, azokban az esetekben, mikor hiba, vagy az előírt értéknél nagyobb aszimmetria következik be a hálózaton.

## 2. DYNAMIC VOLTAGE RESTORER – DVR

Az elosztóhálózatokon fellépő feszültségcsökkenés kompenzálásának céljából egyre elterjedtebb a soros feszültségszabályozók (DVR) alkalmazása. Ezen eszközök elemei a konverter és az ahhoz tartozó szűrő, a konverter DC oldali forrása és egy, a hálózatra soros csatlakozó transzformátor. A DVR felépítését a 1. ábra szemlélteti.

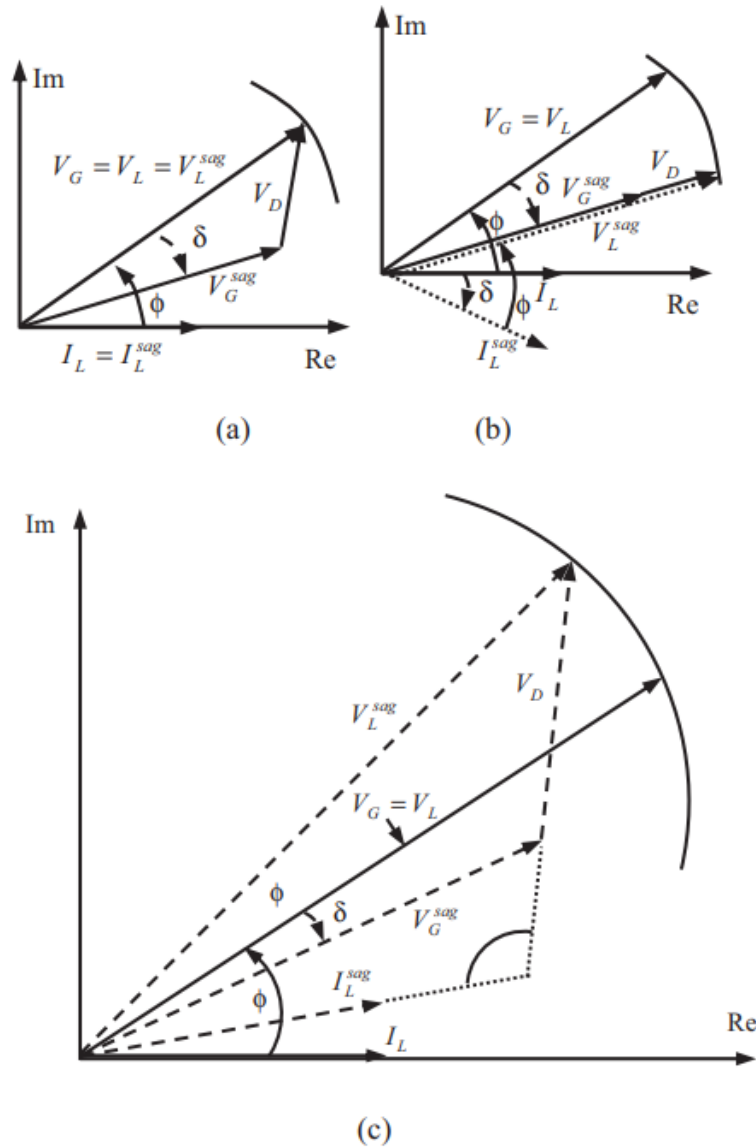


1. ábra: DVR felépítése

A soros feszültségszabályozókat a [1] szakirodalom két nagy csoportra osztja: energiatároló nélküli és energiatárolóval rendelkező szabályozókra.

Működési elv alapján megkülönböztethetünk négy féle kompenzálási stratégiát, melyek az In-Phase, Pre-Sag, Minimal Energy és az ezeket ötvöző Kombinált szabályozási stratégia.[1]

A kompenzálási stratégiák vektorábrája a 2. ábrán látható.



2. ábra: Kompenzációs stratégiák vektor diagramja  
 a) Pre-sag kompenzáció, (b) In-phase kompenzáció, (c) Minimális energia kompenzáció [1]

A továbbiakban az In-Phase stratégia elvén működő DVR kerül bemutatásra

### 3. IN-PHASE KOMPENZÁCIÓS STRATÉGIA

Ezen kompenzáció során az injektált feszültség ( $V_D$ ) fázisban van a fennmaradó hálózati feszültséggel ( $V_G$ ). A stratégia előnye, hogy az injektált feszültség amplitúdója minimális, ezért a DVR névleges teljesítménye minimálisra csökken a meglévő áram és a csatlakozó tápfeszültség mellett. Hátránya, hogy nem tudja visszaállítani a terhelés fázishelyzetét, ami érzékeny fogyasztók esetén káros lehet.

## 4. ALKALMAZOTT JELTRANSZFORMÁCIÓK

Az In-Phase kompenzációs stratégia megvalósításához szükség van a megfelelő szabályozásra, ami többfázisú rendszerek, valamint szinuszos jelek esetén bonyolult.

Egy szimmetrikus háromfázisú feszültségrendszer fázisai forgóvektorokkal reprezentálhatóak. A teljesítményátalakítók irányításánál kézenfekvő ezt matematikai úton úgy alakítani, hogy a szabályozhatóság szempontjából könnyebben kezelhető rendszerhez jussunk. A szimmetrikus háromfázisú rendszert a Clarke-transzformáció segítségével fel tudjuk írni, az (1) szerint.

$$\vec{f}(t) = \frac{2}{3} [e^{j0} f_a(t) + e^{j\frac{2\pi}{3}} f_b(t) + e^{j\frac{4\pi}{3}} f_c(t)] \quad (1)$$

Ez az átalakítás átvezet az  $\alpha\beta$ -koordináta-rendszerbe, ahol most már elegendő két, időben változó vektor, a villamos mennyiségek jellemzésére.

$$\vec{f}(t) = f_\alpha(t) + jf_\beta(t) = \widehat{f}(t) \cdot e^{j[\theta_0 + \int \omega(\tau) d\tau]} \quad (2)$$

Célunk, hogy olyan mennyiségekkel tudjuk jellemezni a szabályozandó mennyiségeket, amelyek ideális esetben DC jellegű, oszcillációtól mentes jelek, mert azokat a PI szabályozó maradó hiba nélkül tudja kezelni. Az  $\alpha\beta$ -síkból a Park transzformáció vezet át a dq koordináta-rendszerbe, amely esetén a koordináta-rendszer és a vektorok együtt forognak  $\omega$  szögsebességgel, ezzel statikus jeleket elérve.

$$f_d + jf_q = (f_\alpha + jf_\beta) \cdot e^{-j\epsilon(t)} \quad (3)$$

A Clarke és Park transzformációk együttes elvégzésével egyetlen lépésben eljuthatunk háromfázisú szimmetrikus rendszer vektoroktól dq vektorokhoz.

## 5. SZABÁLYOZÁSI KÖRÖK

A megvalósított szabályozó egy belső (áramszabályozó) és egy külső (feszültség szabályozó) hurokból áll, amely előállítja a hálózatba injektálandó feszültséget eredményező invertert vezérlő jelet.

### 5.1. Áramszabályozó

Az általunk szabályozni kívánt mennyiség az inverterre csatolt induktivitás árama. Ehhez tekintsük a 3. ábrát szabályozástechnikai szempontból. Az ábra egy félhídkapcsolást (beavatkozó szerv) egy RL tagot (szabályozott szakasz) tartalmaz. A szakasz áramának szabályozásához fel kell írni a rá vonatkozó differenciálegyenletet (4).[2]

$$L \frac{di}{dt} + Ri = U_{ki} - U_b \quad (4)$$

Komplex frekvenciatartományra való áttérést követően az áramra rendezett egyenlet a (5) szerint alakul.

$$i = \frac{U_{ki} - U_b}{Ls + R} \quad (5)$$

Célunk tehát, hogy olyan jelet állítsuk elő, ami teljesíti a (6) egyenletet.

$$i_{ref} - i = 0 \quad (6)$$

A szakasz és PI szabályozó együttes átviteli függvényét a (7) egyenlet adja meg.

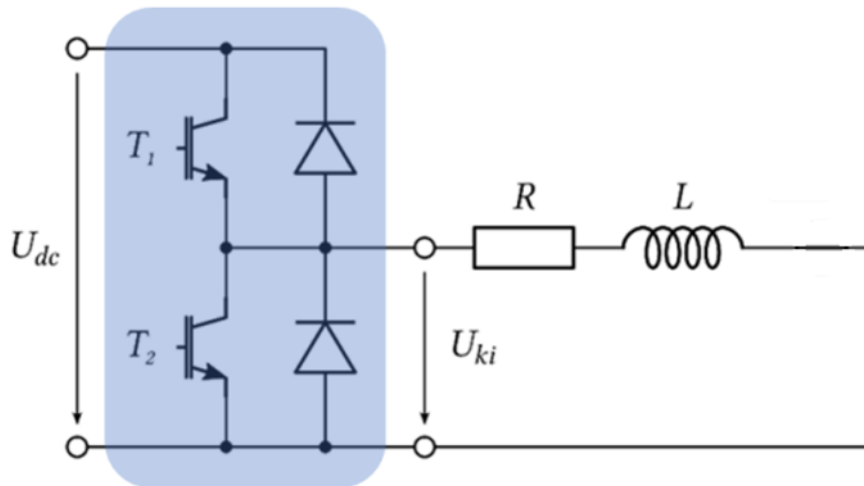
$$L(s) = \frac{k_p s + \frac{k_i}{k_p}}{Ls \left( s + \frac{R}{L} \right)} \quad (7)$$

Látható, hogy  $k_i/k_p = R/L$  teljesülésével pólus ejthető ki, melynek következtében a zárt kör átviteli függvényét a (8) írja le.

$$CL(s) = \frac{\frac{k_p}{Ls}}{1 + \frac{k_p}{Ls}} = \frac{1}{\frac{L}{k_p} s + 1} \quad (8)$$

A behelyettesítést elvégezve a zárt kör időállandója kifejezhető (9) szerint, ami meghatározza a teljes rendszer gyorsaságát.

$$\tau = \frac{L}{k_p} \quad (9)$$

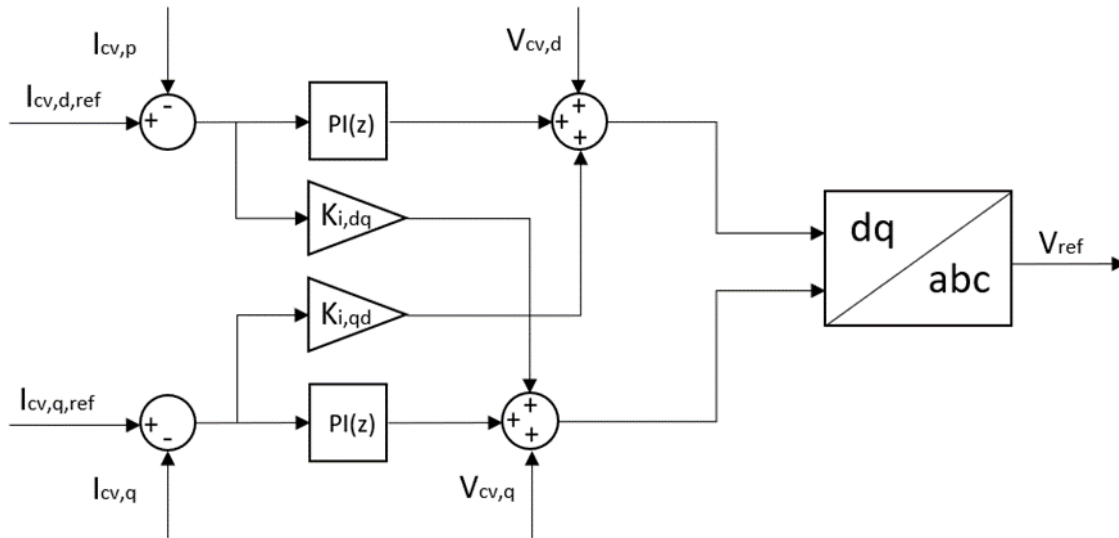


3. ábra: Félhídkapcsolás megvalósítása szűrővel

A belső hurok felépítése a 4. ábrán látható. A PI szabályozó paraméterei a (7)-(9) egyenletekből meghatározható. Az áramszabályozóban található  $K_{i,dq}$ ,  $K_{i,qd}$  keresztcsatolások végzik a dq komponensek egymásról való leválasztását, mivel azok egymás rezonáns komponenseit is tartalmazzák. értékeiket a (10)-(11) egyenletek írják le.[2]

$$K_{i,dq} = 2\pi f \cdot L_{filter} \quad (10)$$

$$K_{i,qd} = -2\pi f \cdot L_{filter} \quad (11)$$



4. ábra: Áramszabályozó blokkvázlatos felépítése

## 5.2. Feszültségszabályozó

A külső szabályozási hurkot fázistartalékra tervezik, amit a későbbi számításokban az  $a$  paraméter ír le. A feszültségszabályozó által előállított jel szolgáltatja az előző fejezetben taglalt áramszabályozó referencia jelét. Felépítése az 5. ábrán látható.

A feszültségszabályozóban található PI szabályozó paramétereinek meghatározását a (12)-(13) egyenletek szerint történik.

$$k_p = \frac{C_{filter}}{a \cdot \tau_{cc}} \quad (12)$$

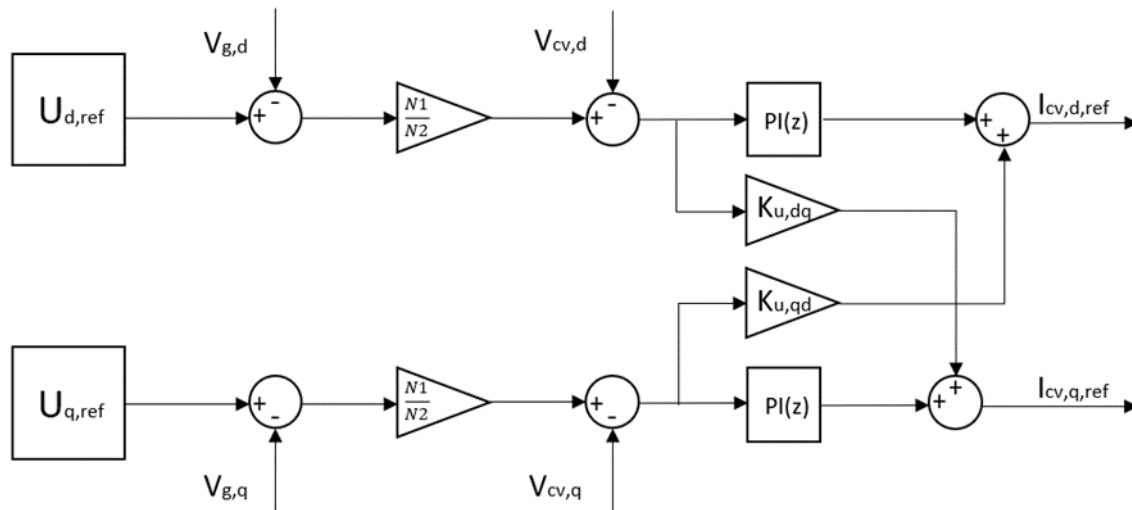
$$k_i = \frac{P}{a^2 \cdot \tau_{cc}} \quad (13)$$

A keresztcsatolások értékei (14)-(15).

$$K_{u,dq} = 2\pi f \cdot C_{filter} \quad (14)$$

$$K_{u,qd} = -2\pi f \cdot C_{filter} \quad (15)$$





5. ábra: Feszültszabályozó blokkvázlatos felépítése

## 6. SORRENDI MENNYISÉGEK ELŐÁLLÍTÁSA

A DVR kiválasztott szabályozási stratégiája a sorrendi mennyiségek szabályozásának elvén alapszik, melyhez a pozitív-, és negatívrendű összetevők szétválasztása elengedhetetlen. Erre azért van szükség, mivel célunk a normál üzemállapot visszaállítása. Ezt úgy tudjuk elérni, hogy a sorrendi mennyiségeket különböző referencia értékek alapján szabályozzuk, melynek következtében tisztán pozitív sorrendű összetevőt tartalmazó üzemállapotot kapunk.

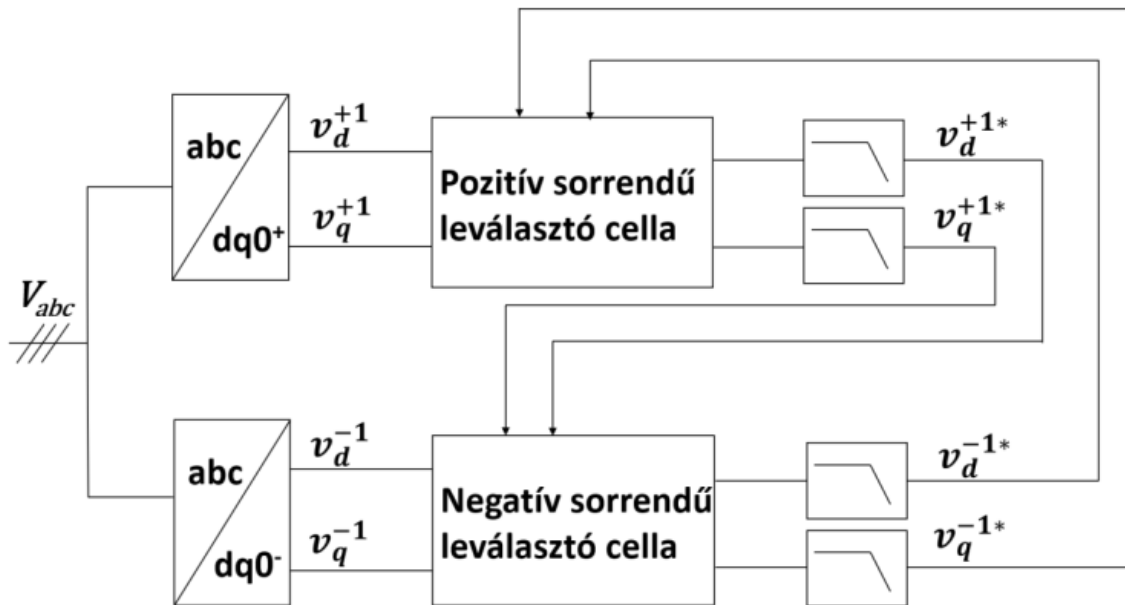
Az eszköz pontos működésének érdekében, a lehető legkisebb hibát eredményező, gyors szétválasztási módszer implementálása elengedhetetlen. Ennek érdekében a továbbiakban összehasonlításra kerül négy módszer, melyek közül az eredmények alapján kiválasztásra kerül a legígéretesebb szétválasztási módszer.

### 6.1. DDSRF - (Decoupled Double Synchronous Reference Frame)

Célja az egyes fázis feszültségek amplitúdójának és fázishelyzetének megváltozásából eredő aszimmetrikus hálózati feszültségviszonyok esetén fellépő helytelen működést megszüntetni. Amennyiben a háromfázisú feszültségrendszer aszimmetrikus, a pozitív és negatív sorrendű összetevők egymásra hatnak. A pozitív sorrendű feszültség egy, a névleges frekvencia kétszeresének megfelelő oszcillációs tagot ad hozzá a negatív sorrendű taghoz, a negatív sorrendű pedig ennek megfelelően a pozitívhoz. A DDSRF egy a sorrendi mennyiségekben megjelenő nem kívánatos oszcilláció hatását kompenzáló alrendszert tartalmaz, ami a két sorrend egymásra gyakorolt hatását hivatott leválasztani. Az alap gondolat az, hogy létrehozunk két dq koordináta-rendszert, egyik a pozitív irányba forog (az óramutató járásával ellentétesen)  $\omega$  szögsebességgel, a másik pedig a negatív irányba (az óramutató járásával megegyezően)  $\omega$  szögsebességgel. A DDSRF felépítése a 6. ábrán látható.

A két leválasztó cella kimeneteként megjelenő  $V_{dq+1}$  feszültségvektorok DC komponense arányos az általa a  $V_{dq-1}$  feszültségvektorokban keltett oszcilláció mértékével és  $V_{dq-1}$  DC komponense a

Vd+1 feszültségvektorokban keltett oszcillációival. A DC jelek előállítását az ábrán látható aluláteresztő szűrők végzik.[3]



6. ábra: DDSRF felépítése

## 6.2. Notch Filter

A Notch filter képes kiszűrni egy adott frekvenciájú komponenst, annak megfelelő paraméterezése esetén, sávszűrőként viselkedik a megválasztott frekvencián a (16) szerint,

$$[NF] \equiv \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + \sigma s + \omega_c^2} \quad (16)$$

ahol  $\omega_c$  a szűrni kívánt frekvenciához tartozó körfrekvencia,  $\sigma$  a szűrő sáv szélessége.

## 6.3. SOGI – (Second Order Generalized Integrator)

Integrátort tartalmazó blokk, melynek átviteli függvénye megegyezik egy szinuszos függvény Laplace-transzformációjával, azaz egy rezonátor, "amplitúdó-integrátorként" fog működni a bemenetére alkalmazott szinuszos jelre.

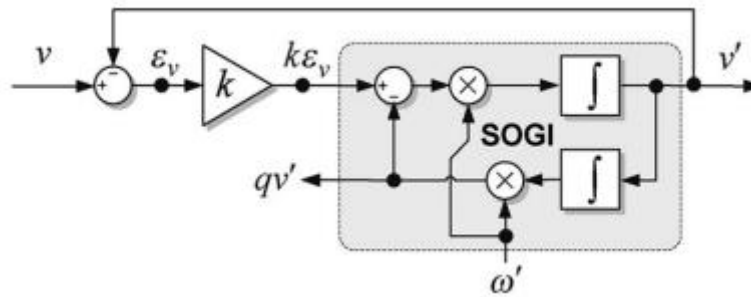
A SOGI-alapú kvadraturális-jelgenerátor (QSG) használatával, szűrhetővé és előállíthatóvá válnak  $90^\circ$ -kal eltolt változatok az  $\alpha\beta$  feszültségekből. Ezek a jelek szolgálnak bemenetként a pozitív-, és negatív sorrendű komponensek előállítására.

A 7.ábra szemlélteti a SOGI-QSG felépítését, ahol  $\omega'$  a SOGI rezonanciafrekvenciája, egy külső változó,  $v'$  és  $qv'$  kimeneti jelek, melyekre a SOGI átviteli függvénye a következők.[4]

$$D(s) = \frac{k\omega's}{s^2 + k\omega's + \omega'^2} \quad (17)$$

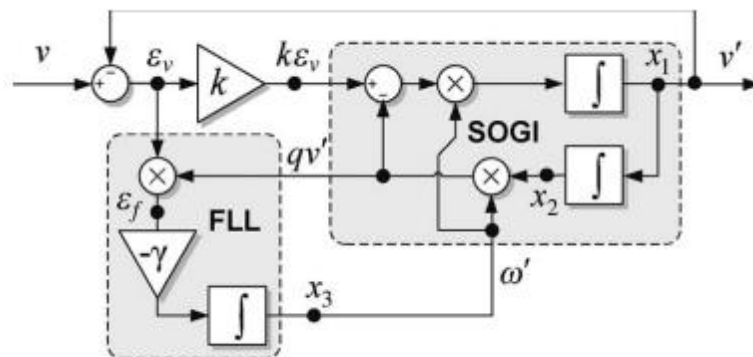
$$Q(s) = \frac{k\omega'^2}{s^2 + k\omega's + \omega'^2} \quad (18)$$

Az (17) képletből megállapítható, hogy a sáváteresztőszűrő sáv szélessége a  $k$  értékétől függ, és független annak középfrekvenciájától. Hasonló figyelhető meg az aluláteresztő-szűrőn, melynek erősítése függ a  $k$ -tól, melyet a (18) összefüggés ír le.



7. ábra: SOGI-QSG felépítése[4]

A SOGI rezonanciafrekvenciájának előállítására egy Frequency Locked Loop alkalmazása jelent lehetőséget. Erre azért van szükség, hogy változó hálózati frekvencia esetén képesek legyünk a sorrendi mennyiségek pontos szétválasztására, amennyiben a frekvencia eltér a névleges értéktől.



8. ábra: SOGI-FLL felépítése[4]

A 8. ábrán látható FLL működését a [4] mutatja be.

#### 6.4. Két frekvencia gyors szétválasztása - Fast Filter

A Fast Filter egy saját (kollégától származó) fejlesztésű, nem szakirodalmakból rekonstruált szétválasztási módszer. Megértéséhez tekintsünk egy kétfrekvenciás rendszert, pozitív sorrendű alapharmonikus, negatív sorrendű harmonikus frekvenciákkal. Igazolható, hogy ideális esetben két mintavétel alapján előállíthatók a komponensek, de zavar hatására ez rendkívül érzékeny. A zavarok csökkentésének céljából végezzünk súlyozott átlagolást az utolsó  $N$  mintavétel adataira ( $S$ ), majd ezt hasonlítsuk össze az aktuálissal.

Elsőként írjuk fel az  $\alpha\beta$  koordináta rendszerben található áramot vagy feszültséget komplex vektorként. Az így kapott forgó vektor felírható a két, eltérő frekvenciakomponens segítségével (19).

$$\bar{x}(t) = \bar{x}_1 e^{-j\omega_1 t} + \bar{x}_2 e^{-j\omega_2 t} \quad (19)$$

Ha  $\omega_1$ -hez tartozó komponenst szeretnénk kiejteni, akkor forgassuk a mintavételezésnek és a névleges frekvenciának megfelelően az elmúlt  $N$  komplex vektort, majd átlagoljuk (20).

$$S(t) = \bar{x}(t) - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \bar{x}(t - kT_s) e^{j\omega_1 kT_s} \quad (20)$$

Ideális esetben ekkor két frekvenciakomponense van az így kapott vektornak, melynél az  $\omega_1$ -hez tartozó megegyezik az aktuális pillanat megfelelő tagjával. Különbséget képezve csak az  $\omega_2$  komponens marad meg (21), melyet megfelelő konstanssal szorozva előáll a szűrni kívánt komplex vektor (22).

$$S(t) = K_{fs} \bar{x}_2 e^{-j\omega_2 t} \quad (21)$$

$$K_{fs} = 1 - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e^{j\omega_2 kT_s} e^{j\omega_1 kT_s} \quad (22)$$

## 6.5. Zérussorrendű összetevő előállítás

A zérussorrendű összetevő előállítható a három fázismennyiség ismeretében (16) szerint.

$$V_0 = \frac{V_a + V_b + V_c}{3} \quad (23)$$

A (16) alapján kapott szinuszos jelet tekintettük, egy az  $\alpha\beta$  koordinátarendszerben forgó jel  $\alpha$  komponensének, melyből deriválással és megfelelő konstanssal való szorzással előállítható az annak megfelelő  $\beta$  komponens. Erre azért van szükség, hogy a zérus sorrendű összetevőre is alkalmazható legyen a korábbiakban feltüntetett szabályozó.

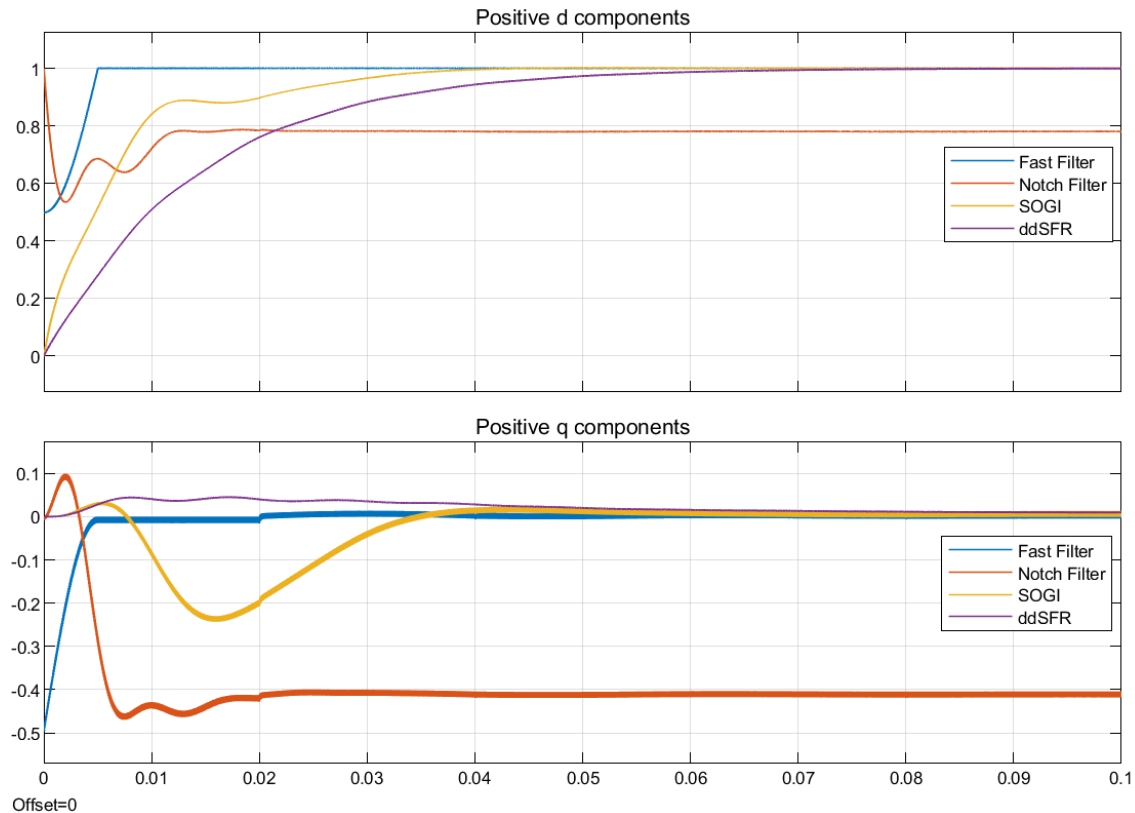
## 7. SORRENDI MENNYISÉGEKET SZÉTVÁLASZTÓ MÓDSZEREK ÖSSZEHASONLÍTÁSA

A szimulációk során mind a négy szétválasztási módszer tesztelve lett az összes esetben, melyek a következőkben kerülnek részletezésre. A vizsgálathoz egy feszültséggenerátorból, és egy vele párhuzamosan kapcsolt ellenállásból álló egyszerű hálózat biztosított zavaroktól mentes szimulációs körülményeket. A csak a feszültség d-q komponenseinek szétválasztásának sikeressége kerül összehasonlításra.

Viszonyítási alapot jelent, hogy egy dq koordinátarendszerben forgó mennyiségek d komponense, szinuszos jel esetén a fázis csúcsertékét veszi fel, míg szimmetrikus esetben a q komponens értéke nulla.

## 7.1. Szimmetrikus eset vizsgálata

Ebben az esetben a teszhálózat csak pozitív sorrendű komponenset tartalmazott, melynek meghatározása 9. ábrán látható.



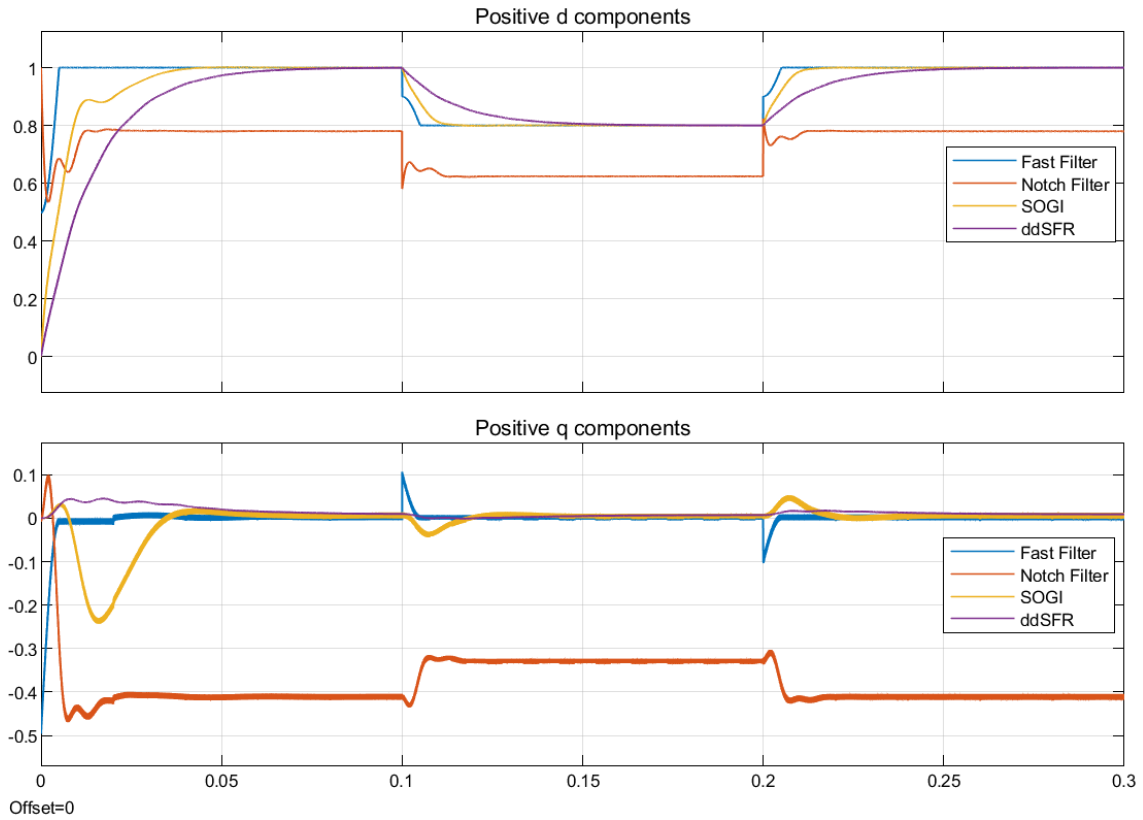
9. ábra: Pozitív sorrend meghatározása szimmetrikus hálózat esetén

A Fast Filter, SOGI, ddSFR módszerek pontos amplitúdó értéket vettek fel pozitív sorrendű komponensek meghatározásakor, azonban a Notch több 20%-os eltéréssel dolgozott. A vizsgálat során a SOGI, valamint ddSRF bizonyult a leglassabbnak, melyek megközelítőleg 3ms és 5ms alatt érték el állandósult értéküket.

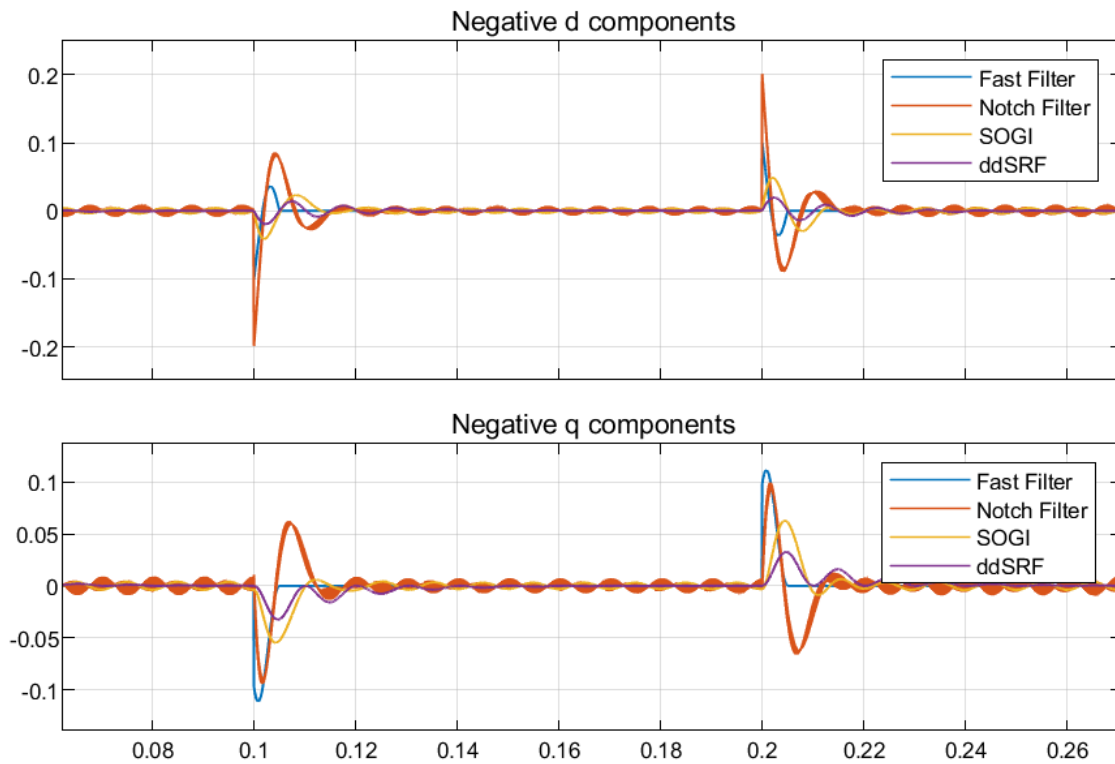
## 7.2. Amplitúdóváltozás szimmetrikus hálózat esetén

A vizsgálat során 0,1 másodpercnél a hálózat feszültség 80%-ra csökken, majd 0,2 másodpercnél visszaugrik 100%-ra. Az eredmények a 10.-11. ábrák mutatják.





10. ábra: Pozitív sorrendű komponens meghatározása hirtelen feszültségváltozás esetén

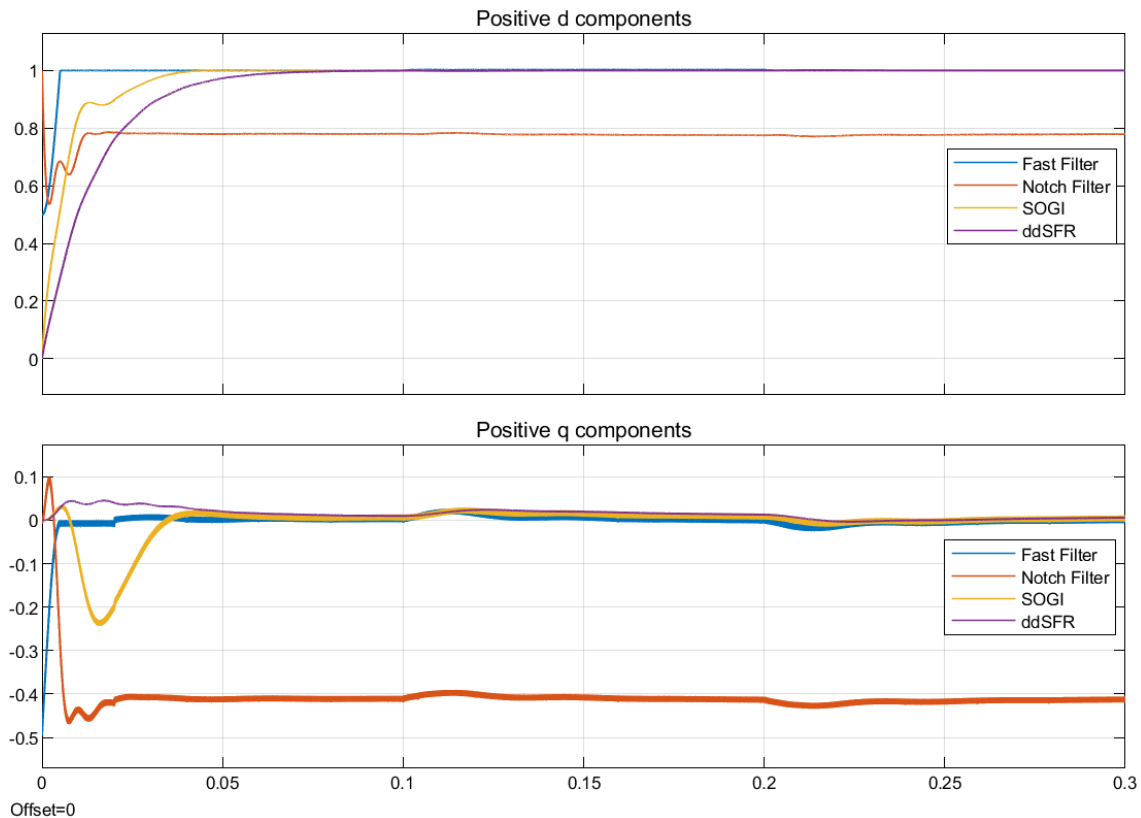


11. ábra: Negatív sorrendű komponens meghatározása hirtelen feszültségváltozás esetén

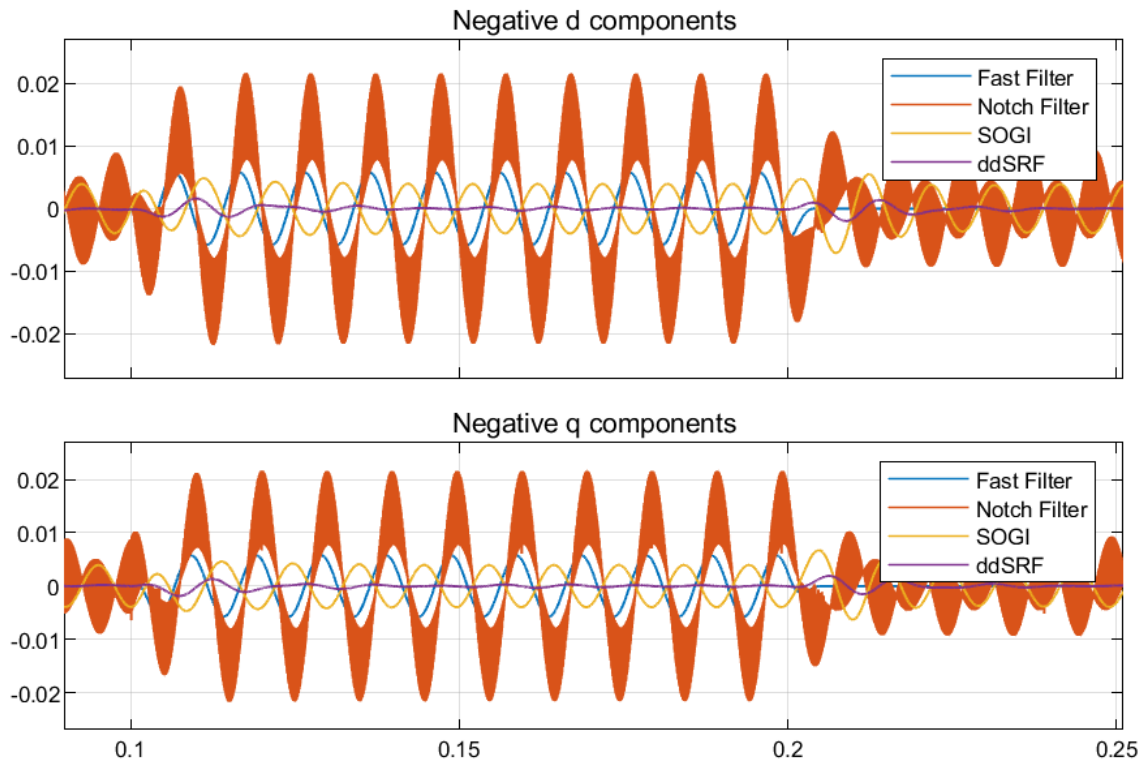
A pozitív sorrendű mennyiségektől eltérően a Notch Filternek is sikerült a sorrendi mennyiség közel pontos értékének meghatározása, azonban ez lassú lengéssel valósult meg. Ebben az esetben a Fast Filter bizonyult a leggyorsabbnak és pontosabbnak.

### 7.3. Frekvenciaváltozás vizsgálata

A szimuláció során 0,1 másodpercnél 0,5Hz-es frekvenciacsökkenés következik be, majd 0,2 másodpercnél a frekvencia visszaáll az 50Hz-es névleges értékre. Az eredmények a 12.-13. ábrák szerint alakultak.



12. ábra: Pozitív sorrendű komponens vizsgálata frekvenciaváltozás hatása



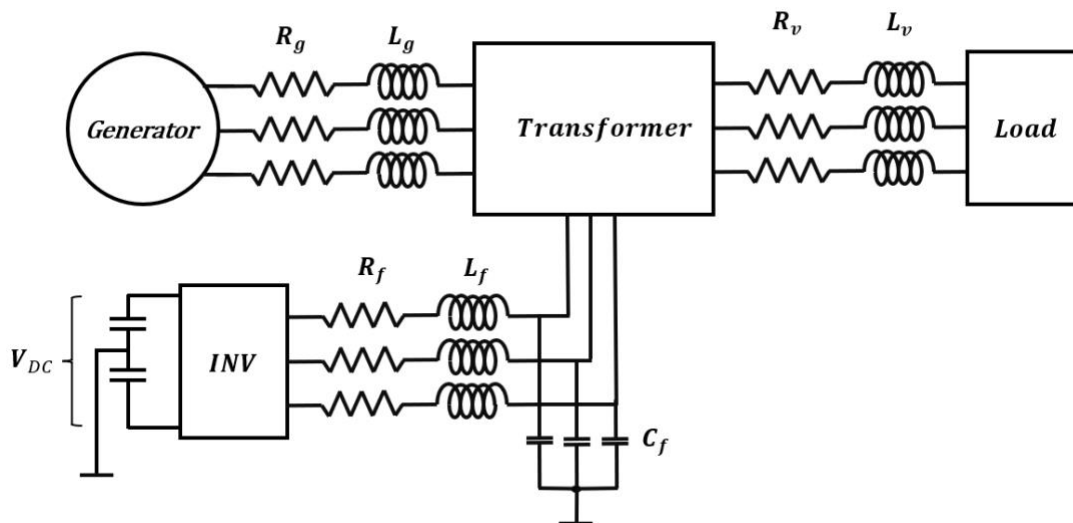
**13. ábra: Negatív sorrendű komponens vizsgálata frekvenciaváltozás hatása**

A frekvenciaugrásra hasonlóan reagáltak a módszerek, mindenhol lengés alakult ki, aminek a ddSRF módszernél volt a legkisebb az amplitúdója. Ez azonban a módszer lassúságának tudható be, mivel nem tudta elérni a kívánt amplitúdóértéket, annak rövid idő alatt végbemenő változása miatt. A különbség nagyobb frekvenciaváltozáskor tapasztalható leginkább, azonban ekkora változás nem léphet fel elosztóhálózaton.

A vizsgálatok során a Fast Filter bizonyult a legpontosabbnak és leggyorsabbnak, így a következőkben bemutatásra kerülő hálózati szimulációk során ez a szétválasztási módszer kerül alkalmazásra.

## 8. A HÁLÓZAT MODELLJE

A szimulációk során tesztelt DVR modell a 14. ábrán látható.



14. ábra: DVR hálózat modellje

A hálózat paramétereit az 1. táblázat foglalja össze.

1. Táblázat: Soros feszültszabályozó modell paramétereit

Név	Jelölés	Érték
Mögöttes hálózat névleges feszültség (vonali)	$U_{grid}$	400V
Mögöttes hálózat névleges zárlati teljesítménye	$S_z$	2,5MVA
Mögöttes hálózat impedanciája	$R_g$	0,585m $\Omega$
Mögöttes hálózat reaktanciája	$L_g$	0,195mH
Konverter DC feszültsége	$U_{dc}$	1,4kV
Távvezeték ellenállása	$R_v$	0,3 $\Omega$ /km
Távvezeték induktivitása	$L_v$	0,25mH/km
Hálózati frekvencia	$f$	50Hz
Szűrő ellenállása	$R_{filter}$	22m $\Omega$
Szűrő induktivitása	$L_{filter}$	2,5mH
Szűrő kapacitása	$C_{filter}$	10 $\mu$ F
Terhelés ellenállása	$R_{load}$	5k $\Omega$
Transzformátor áttétele	$N_2/N_1$	0,0160
Mintavételezési idő	$T_{pi}$	50 $\mu$ s

A szimulációk során a transzformátor primer oldala a hálózatra, szekunder oldala az inverter szűrőjére csatlakozott.

## 9. SZIMULÁCIÓS EREDMÉNYEK

A DVR működése szimmetrikus és aszimmetrikus zárlatok esetén tesztelésre került, ezzel vizsgálva a sorrendi mennyiségek szabályozását.

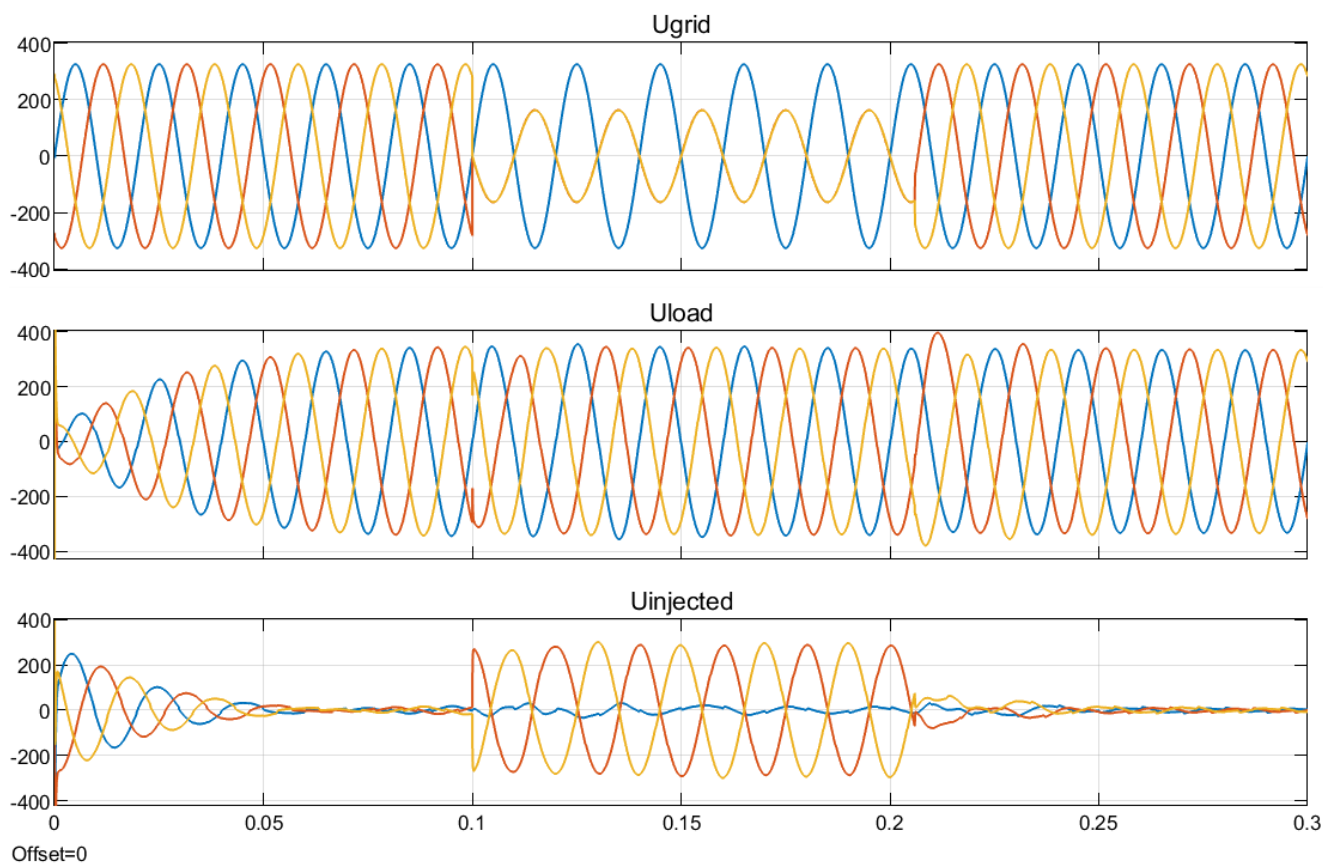
## 9.1. Hálózati oldalon fellépő zárlat esetén

A már említett módon, a DVR működését szimmetrikus (2F) és aszimmetrikus (1FN) zárlatok esetén tesztelésre került. A működés sikeresnek mondható, ha fogyasztói oldalról nézve nem történik nagymértékű feszültségcsökkenés és a feszültség névleges érték közelében marad.

A szimulációk során a zárlatok 0,1 másodpercnél következtek be és 0,2 másodpercnél múltak el.

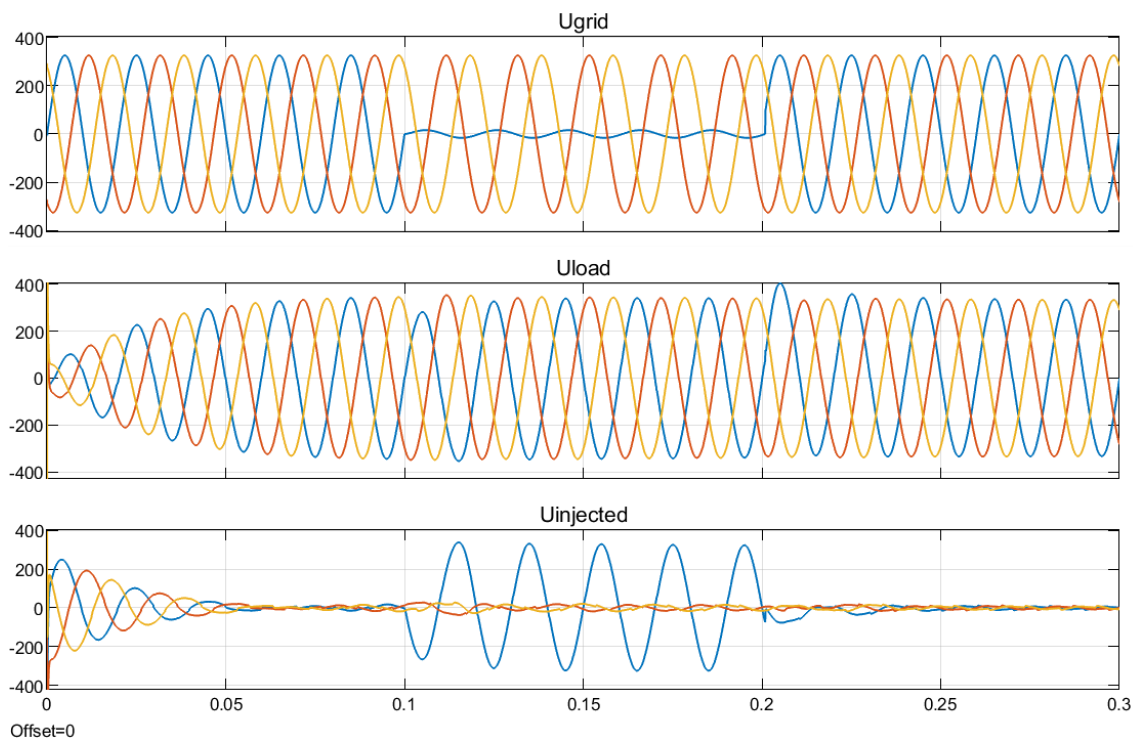
Az eredmények a 15.-16. ábrákon látható.

Mindkét esetben sikerült a fogyasztó feszültségét névleges értéken tartani és a hiba keletkezésekor fellépő tranzienseket gyorsan kompenzálni, így a DVR működése megfelel az elvártaknak.



15. ábra: Hálózati oldalon fellépő 2F zárlat kompenzálása





16. ábra: Hálózati oldalon fellépő 1FN zárlat kompenzálása

## 10. ÖSSZEGRÉS

A Dynamic Voltage Restorer segítségével a fogyasztók feszültsége névleges értéken tartható, ha feszültségcsökkenés vagy feszültségemelkedés következik be a hálózaton, továbbá zárlatok alatt is fenntarthatóvá válik a normál üzemállapot. Megjegyzendő, hogy a bemutatott szimulációs eredmények végtelen hálózatot feltételezve és 1/1 áttételű transzformátorral történtek. A valóságban a transzformátor és a DC forrás teljesítménye is korlátozott, így az injektált feszültség korlátozott.

Kialakításának hátránya, hogy a fogyasztói oldalon fellépő aszimmetriákat nem képes kompenzálni. Emiatt szükség van egy olyan eszközre, ami képes fogyasztóoldali aszimmetriák kezelésére.

### Static Compensator - STATCOM

A teljesítményelektronikai átalakítók aktívan részt vesznek a villamosenergia-hálózat számos részében aktív teljesítményszűrőként és/vagy FACTs (Flexible AC Transmission) berendezésként. Ezek az eszközök alkalmasak az elosztóhálózati feszültség és a rajta folyó áram szabályozására. A továbbiakban, egy az erre a célra alkalmas berendezés, a Static Compensator kerül részletezésre.[5]

### 10.1. Meddőkompenzálás

Ebben az esetben a konverter által előállított áram eltérően áll elő, mint a DVR esetén. Elsődleges szempont a hálózatra csatlakozó fogyasztó által felvett meddőteliesség meghatározása, mivel ezt szeretnénk a hálózatba táplálni a konverterrel. Ehhez szükség van a terhelés áramának és

feszültségének mérésére. A hálózatba injektálandó meddőteljesítményt és hozzá szükség áramot a (24)-(25) egyenletek írják le.[2]

$$Q_{load} = \frac{3}{2} (V_{load,q,p} \cdot I_{load,d,p} - V_{load,d,p} \cdot I_{load,q,p}) \quad (24)$$

$$I_{cv,q,p,ref} = -\frac{2}{3} \frac{Q_{load}}{U_{load,d,p}} \quad (25)$$

Az előbbi összefüggésekben szereplő d,q indexek jelölik a d-q koordinátarendszerben forgó komponenseket, a p index jelöli a pozitív sorrendű jelleget.

A referenciaáram d komponense 0-nak lett választva, mivel ez a konverter DC oldali feszültségének kompenzálására ad lehetőséget. A megvalósításban a konverter DC oldali forrása egy „végtelen” akkumulátor. Amennyiben a valóságban alkalmazott kialakításnak megfelelően a DC forrás kapacitás, akkor feszültségének szabályozása is szükséges, ami a referenciaáram d komponensének szabályozásával érhető el, azonban ehhez további PI szabályozót kell alkalmazása.

A STATCOM meddőteljesítmény-kompenzálásáért felelős áramszabályozó felépítése a 4.ábrán látható, amelynek felépítése megegyezik a DVR-nál használt áramszabályozóéval.

## 10.2. Negatív sorrendű komponens eliminálása

A hálózaton jelenlévő negatív sorrendű komponens eliminálására ebben az esetben a közcélú hálózattal szemben támasztott követelmények betartása miatt van szükség, nem pedig a fogyasztók megóvását tartjuk szem előtt. Ebből következik, hogy cél a hálózat áramának szimmetrikus állapotra történő szabályozása. Fontos megjegyezni, hogy a fogyasztó áramát nem is lehet szimmetrikus állapotra hozni, mivel annak természetét nem tudjuk megváltoztatni. Azonban képesek vagyunk a STATCOM szempontjából fogyasztói oldalon kialakuló negatív sorrendű komponensek kompenzálására.

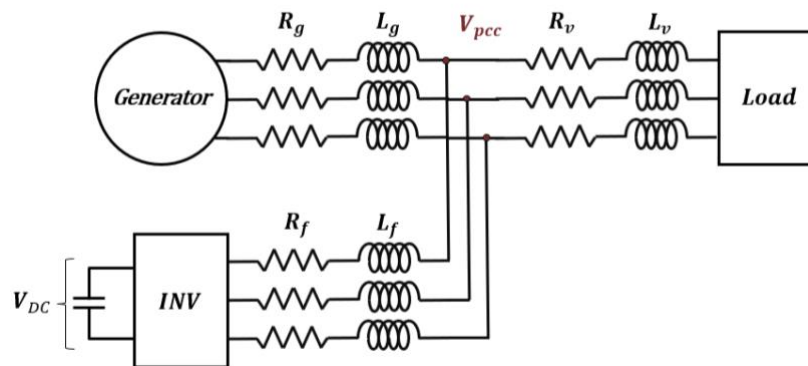
A negatív sorrendű komponens eliminálásáért felelős szabályozó az előző esethez hasonlóan, szintén csak referenciajelben tér el a DVR-nál használt negatív sorrendű áramszabályozótól, melyeket a (16)-(27).

$$I_{cv,d,n,ref} = I_{load,d,n} \quad (26)$$

$$I_{cv,q,n,ref} = I_{load,q,n} \quad (27)$$

### 3.3 A hálózat modellje

A szimulációk során tesztelt STATCOM modell a 17. ábrán látható.



17. ábra: STATCOM hálózat modellje

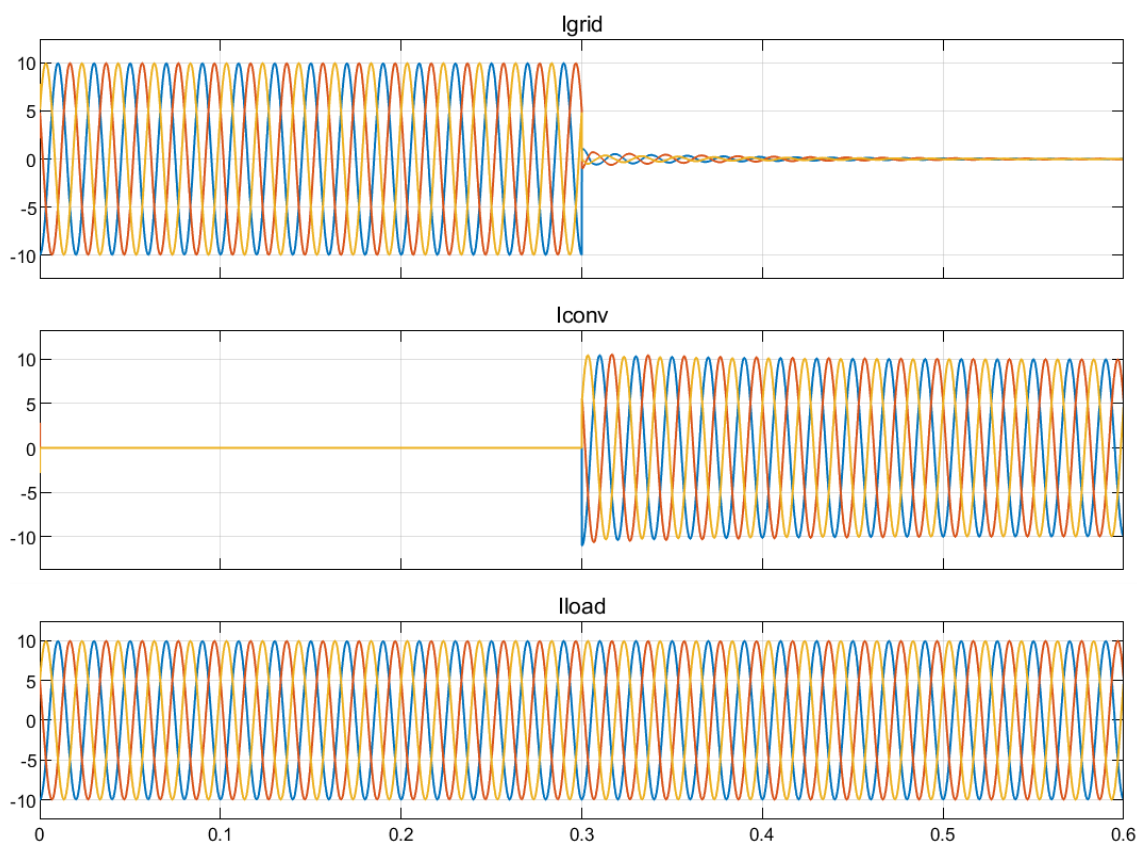
A hálózat paramétereit az 1. táblázat foglalja össze.

### 3.4 Szimulációs eredmények

A szimulációk során a meddőteljesítmény kompenzálás, a hálózaton folyó áram negatív sorrendű komponensének eliminálása, valamint a két feladatkör együttes működése került tesztelésre.

## 10.3. Meddőteljesítmény kompenzálás

A szimuláció során a terhelés tisztán induktívra lett megválasztva, így felvett teljesítménye tisztán meddő. A szimuláció eredménye a 18. ábrán látható.



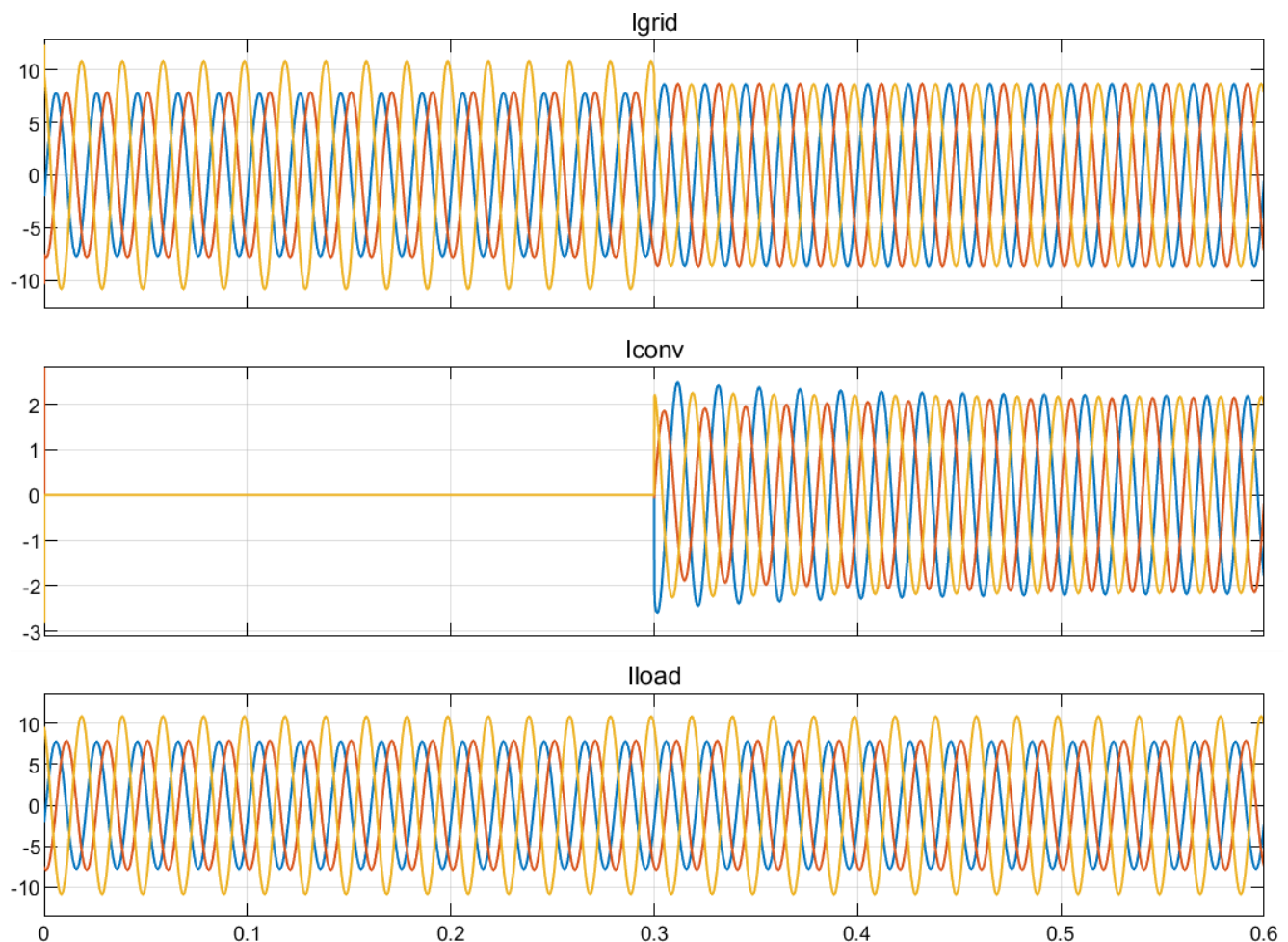
18. ábra: Meddőteljesítmény kompenzálás induktív terhelés esetén

Látható, hogy 0,3s-nál, amint a STATCOM-ban található inverter bekapcsol, a hálózat árama közel nullára csökken és elkezd a megfelelő nagyságú áramot szolgáltatni a fogyasztó számára.

#### 10.4. Negatív sorrendű komponens eliminálása

Ebben az esetben a fogyasztó tisztán rezisztív taggal lett képezve, annak érdekében, hogy ezt a funkciót is teljesen szeparáltan lehessen vizsgálni. A negatív sorrendű komponens fázisonként eltérő értékű ellenállások hálózatra való csatlakoztatásával lett megvalósítva.

A zérus sorrend elkerülésének érdekében a fogyasztók szigetelt csillagpontban kerültek összeköttetésre. Az eredmény a 19. ábrán látható.



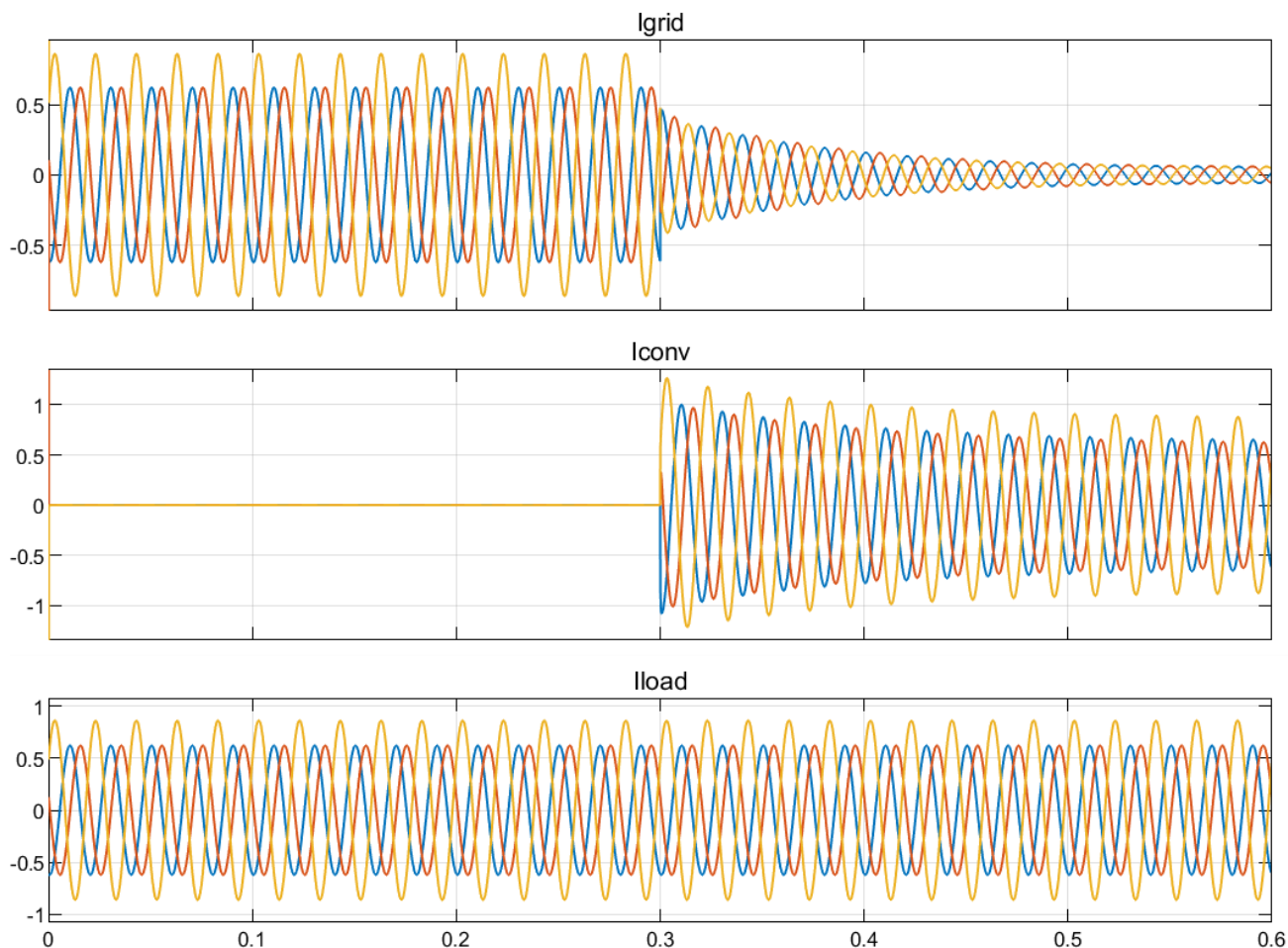
19. ábra: Negatív sorrendű komponens eliminálása

Megállapítható, hogy az inverter bekapcsolását követően az eszköz a hálózatba injektálja a negatív sorrendű összetevőt, ezzel teljesen szimmetrikus hálózati áramképet alkotva.

#### 10.5. Meddőkompenzálás és negatív sorrend eliminálás

Ebben az esetben a fogyasztó egy sorosan kapcsolt RL tag képezi, így meddőkompenzációra van szükség az induktív rész miatt. A negatív sorrendű komponens ebben az esetben is eltérő értékű

impedanciák képzik. Az asszimetria mértéke nem változott az előző fejezethez képest. A szimuláció eredményét a 20. ábra mutatja.



**20. ábra: Meddőkompenzálás és negatív sorrend eliminálása**

Az inverter a bekapcsolás pillanatától elvégzi mind a meddőkompenzációt és a negatív sorrend eliminálását, ezzel kijelenthető, hogy a STATCOM minden funkcióját képes ellátni.

## 11. ÖSSZEGZÉS

A Static Compensatorral való szabályozás rugalmas megoldást nyújt a hálózaton folyó áram negatív sorrendű komponensének eliminálására, valamint a fogyasztók meddőteljesítmény igényének kielégítésére. Működése során hálózati- és fogyasztói oldalon kialakuló aszimmetriák kompenzálására is lehetőség nyílik, ami számos alkalmazási lehetőséget biztosíthat elosztóhálózatokon.

A bemutatott két feszültségszabályozó kialakításából eredendően együttesalkalmazása is lehetséges, ezzel egy UPQC (Unified Power Quality Conditioner) eszközt kialakítva, ami továbblépési lehetőséget jelenthet a fejlesztés során.



## 12. HIVATKOZÁSOK

- [1] [1] M. Farhadi-Kangarlu, E. Babaei, and F. Blaabjerg, "A comprehensive review of dynamic voltage restorers," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 92. Elsevier Ltd, pp. 136–155, Nov. 01, 2017. doi: 10.1016/j.ijepes.2017.04.013.
- [2] [2] A. Yazdani and R. Iravani, *Voltage-sourced converters in power systems : modeling, control, and applications*. IEEE Press/John Wiley, 2010.
- [3] [3] T. Balázs and S. KONZULENS Divényi Dániel, "Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Villamosmérnöki és Informatikai Kar Villamos Energetika Tanszék PLL MEGOLDÁSOK HARDVERES IMPLEMENTÁLÁSA ÉS ELEMZÉSE," 2021.
- [4] [4] P. Rodríguez, A. Luna, I. Candela, R. Mujal, R. Teodorescu, and F. Blaabjerg, "Multiresonant frequency-locked loop for grid synchronization of power converters under distorted grid conditions," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 1, pp. 127–138, Jan. 2011, doi: 10.1109/TIE.2010.2042420.
- [5] [5] N. Farokhnia, M. Mohammad, I. R. Gatabi, and M. Ehsani, "Unbalance, flicker, harmonic, voltage and reactive power compensation of the distribution grid using a universal STATOM," in *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2014, pp. 682–687. doi: 10.1109/ISIE.2014.6864694.

Horváth Tamás; Dr. Orosz Tamás  
h.tamas109@gmail.com

Széchenyi István Egyetem, Teljesítményelektronikai és Villamos Hajtások Tanszék

## 3D nyomtatott toroid tekercs vasveszteségének analízise

**Absztrakt** – A villamos gépek vesztesége és teljesítménye jelentősen függ az alkalmazott vasmagtól. A vasmag tulajdonságait az anyagösszetétel, valamint a gyártási folyamat határozza meg. A vasmag minőségét az anyag összetétel fejlesztésével csak bizonyos mértékig lehet növelni, ezért jelentős fejlődést a gyártási folyamat javítása hozhat. Az utóbbi évtizedekben az additív gyártási folyamatok (3D nyomtatás) rengeteget fejlődtek, segítségükkel gyors prototípusok, illetve a lemezeléses módszerrel megvalósíthatatlan topológiák készíthetők.

A vasveszteségek modellezése a jelenleg alkalmazott végeelemes megoldókban egy utófeldolgozási folyamatot jelent. Ezek a modellek jó eredményeket adnak lemezelt vasmagok esetén, a teljes gépre, de lokálisan nézve alul, vagy felül becslik a vasveszteség értékét. Kérdéses, hogy ezek a formulák milyen eredményekkel alkalmazhatóak 3D nyomtatott anyagok esetén.

A cikk elején bemutatom a végeelem számítás esetén használt főbb veszteségmodelleket, majd két 3D nyomtatott toroid minta histerézis karakterisztikájának és veszteségeinek mérését, mérési értékek segítségével alkotott Preisach modelljét.

**Abstract** – *The performance of electric machines is significantly influenced by their iron core. The properties of the iron core are determined by the material composition and the manufacturing process. While advancements in material composition can enhance the quality to some extent, achieving substantial progress necessitates improvements in the manufacturing process as well. Over the last decades, additive manufacturing (3D printing) has witnessed substantial developments, and they offer a multitude of advantages. For example, the rapid production of prototypes and the creation of intricate topologies that were previously unattainable using laminated techniques.*

*Modeling iron losses involves a post-processing step in the currently employed finite element solvers. These models yield good results for laminated iron cores when considering the entire machine. However, when examined locally, they tend to underestimate or overestimate the iron loss values. It is uncertain how well these formulas can be applied to 3D printed materials.*

*At the beginning of the paper, I will introduce the main loss models used in finite element simulations. Then, I will present the Preisach model constructed based on measurement values for the hysteresis characteristics and losses of two 3D printed toroid samples.*

**Címszavak: vasveszteség; 3D nyomtatás, toroid mag, veszteség modell, villamos gép**

## 1. BEVEZETÉS

Az additív gyártási módszerek (3D nyomtatás) az elmúlt évtizedek során jelentős fejlődésen mentek keresztül és bár jelenleg a hagyományos gyártási módszerek megbízhatósága és hatékonysága nem elérhető, a módszer segítségével a lemezelt vasmagok minőségét megközelítő és akár meg is haladó vasmagok hozhatók létre [1]. Emellett az additív gyártási módszerek számos előnyt nyújthatnak a villamos gépek vasmagjának gyártása terén, például a hagyományos módszerekkel nem elkészíthető topológiák megvalósításával, a topológia optimalizálási szoftverek alkalmazásával, vagy a prototípus gyártás megkönnyítésével.

A cikkben röviden bemutatom a vasvesztést okozó jelenségeket, a vasmaganyagok mérési módszerét, a vasvesztés modellezésére alkalmazott modelleket, végül a 3D nyomtatott FeCo (vas-kobalt) toroid minták analízisét. A minták vesztését számítógép vezérelt mérőrendszer segítségével vizsgálom, majd megvalósítom a hiszterézis karakterisztika Preisach-modellel való közelítését.

## 2. VASVESZTESÉG

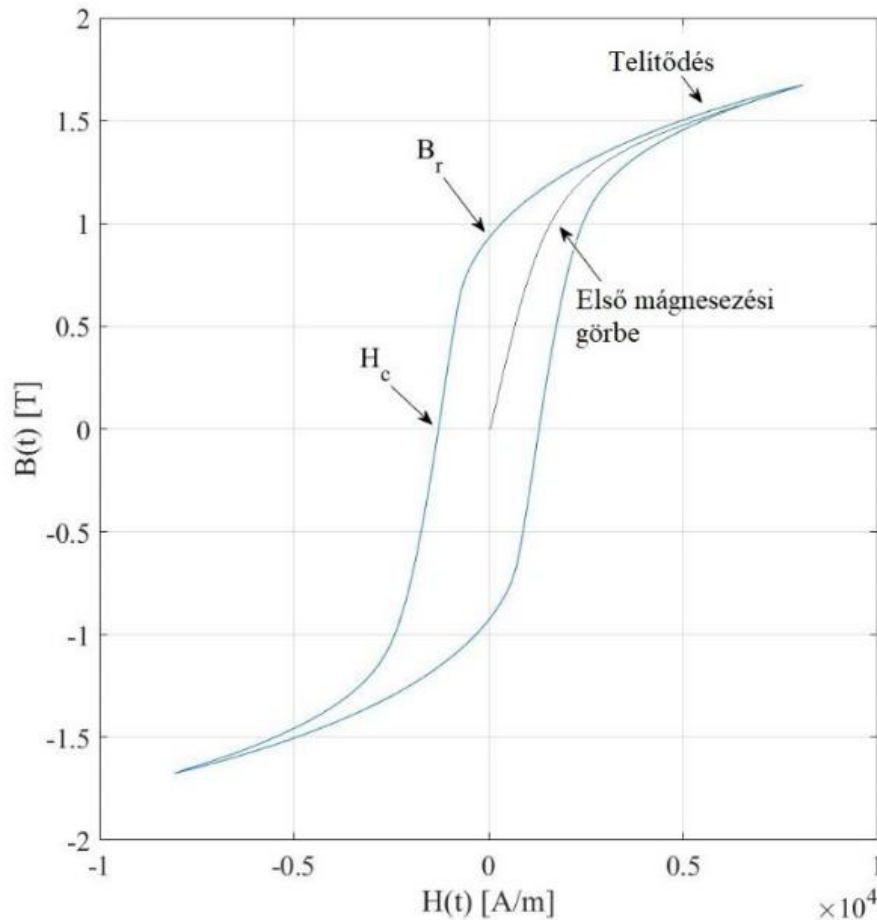
A villamos gépek hatékony működéséhez a gépek tekercse által keltett mágneses teret koncentrálni és irányítani kell, ezzel biztosítva, hogy a lehető legnagyobb mértékű energiaátvitel jöjjön létre az alkatrészek között. Ezt a célt szolgálja a vasmag. A villamos gépek vasmagja nagy permeabilitású, ferromágneses anyagokból, különféle fémek ötvözetéből készül. Az iparban leggyakrabban használt ötvözetek a FeSi, FeNi, és FeCo. Az alkalmazott nagy permeabilitású anyagok, nagy energiasűrűség elérését teszik lehetővé, azonban paramétereik a villamos gépek vesztését is nagyban befolyásolják.

### 2.1. Hiszterézis vesztés

A tekercs által létrehozott  $H$  mágneses térerősség és a gépben létrejövő  $B$  mágneses indukció között az anyag hiszterézis karakterisztikája tesz kapcsolatot (lásd 1. ábra).

A vasmaganyag hiszterézise a villamos gépek üresjárati vesztésnek jelentős részéért felelős. Az anyag fel- és lemágnesezéséhez, a domének elmozdításához energiabefektetésre van szükség, ami a hiszterézis görbe integráljaként határozható meg:

$$W_h = \int_{B_{min}}^{B_{max}} H dB. \quad (1)$$



1. ábra - Példa egy 3D nyomtatott FeCo toroid hiszterézis karakterisztikájára [25].

## 2.2. Örvényáramú veszteségek

Mivel a villamos gépek változó mágneses térben üzemelnek, a vasmagban örvényáramú veszteség is létrejön. A Faraday-féle indukciós törvény értelmében,

$$\nabla \times \mathbf{E} = \frac{-\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (2)$$

a vasmagban létrejövő változó fluxus körül örvényes  $E$  elektromos térerősség jelenik meg, ami a vasmagban  $J$  örvényáramot indít,

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}, \quad (3)$$

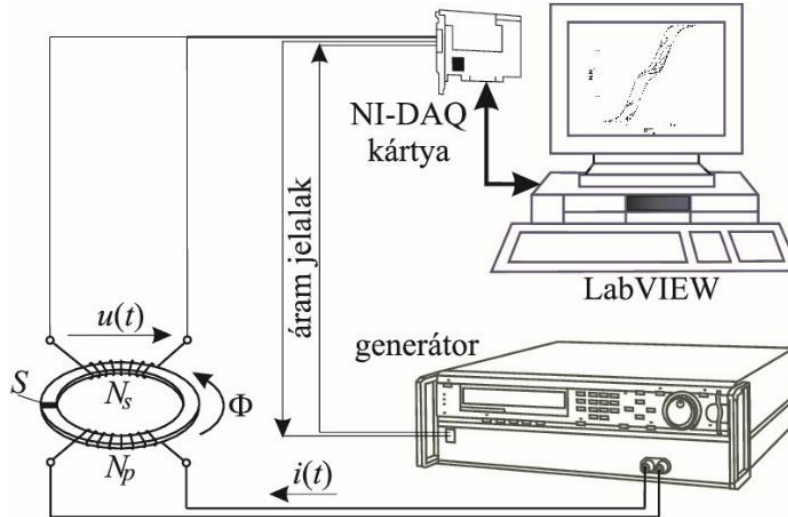
ahol  $\sigma$  az anyag fajlagos vezetőképessége. Az örvényáram a vasmagot melegíti és hőveszteségként jelentkezik. Az örvényáramú veszteség értéke a következő egyenlettel fejezhető ki, [2]

$$W_{ed} = \frac{\sigma d^2}{12\rho} \left( \frac{dB(t)}{dt} \right)^2, \quad (4)$$

ahol  $\rho$  a vasmag fajsúlya, és  $da$  mágneslemez vastagsága. A vasmag veszteségét a hiszterézis veszteség és az örvényáramú veszteség együttesen határozzák meg.

### 3. MÉRÉSI MÓDSZER

A mérésre használt elrendezés a 2.ábrán látható. A méréshez a mintára egy primer  $N_1$  és egy szekunder  $N_2$  tekercset helyeztem el. A primer tekercs gerjesztése egy programozható áramgenerátor segítségével történt. A szekunder kör terheletlen állapotban kialakuló feszültségét, valamint a primer kör áramát pedig egy NI-DAQ adatgyűjtő kártyával mértem. A mérés LABVIEW szoftver segítségével teljes egészében számítógép vezérelt, így a mért feszültség és áram jelalakok feldolgozása, valamint a gerjesztő áram jelalak meghatározása is annak segítségével történt.



2. ábra - A mérési eljárás blokkvázlata [8].

A mért  $i$  áram- és  $u$  feszültségjelalak felhasználásával kiszámítható a mágneses térerősség, a mágneses indukció, és a  $p_s$  veszteségi teljesítmény a következő egyenletek segítségével,

$$H = \frac{N_1}{l_{eff}} i(t), \quad (5)$$

$$B = \frac{1}{N_2 A} \int_0^t u(\tau) d\tau, \quad (6)$$

$$p_s = \frac{f N_1}{N_2 m} \int_0^T i(t) u(t) dt, \quad (7)$$

ahol  $N_1$  a primer tekercselés menetszáma,  $N_2$  a szekunder tekercselés menetszáma,  $m$  a minta tömege,  $l_{eff}$  a mágneses térerősség effektív hossza,  $A$  a minta keresztmetszete,  $f$  a gerjesztés frekvenciája,  $T$  pedig a periódus idő.

### 4. A VIZSGÁLT TOROID MINTÁK

Kutatásom során különféle 3D nyomtatott toroid magokat vizsgáltam. A nemzetközi szabványok szerint a toroid mintás módszerrel speciális ötvözetek, amorf és nanokristályos anyagok, préselt és szinterelt anyagok, fröccsöntött és öntött anyagok, valamint lágymágneses kompozit anyagok vizsgálhatók, így a 3D nyomtatott vasmagok esetében is megfelelő módszernek bizonyul. A kutatás során L-PBF (Laser-Powder Bed Fusion) módszerrel készült FeCo, FeNi és FeSi toroid mintákat

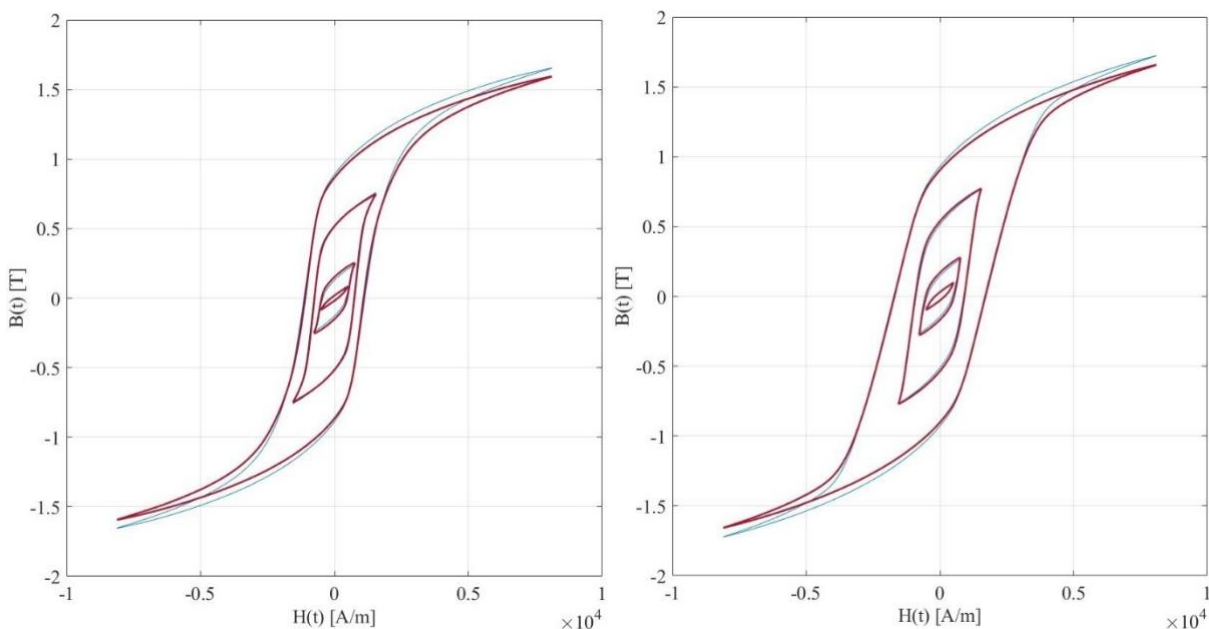
vizsgáltam, a cikkben azonban csak két  $0^\circ$ -os nyomtatási szöggel készített FeCo mintát szemléltetek. A 3. ábraán a két minta a látható.



3. ábra - A két  $0^\circ$ -os nyomtatási szöggel készült FeCo toroid minta [25].

A minták belső átmérője 6,8 mm, külső átmérője 11,96 mm, magassága pedig 5,2 mm. Ezek alapján meghatározható, hogy az  $l_{eff}$  effektív hossz 29,4681 mm és a toroid keresztmetszetének  $A$  felülete 13,416 mm<sup>2</sup>. A mintákra 31 menetes primer tekercselést és 12 menetes szekunder tekercselést helyeztem el.

A mérést szinuszos gerjesztő áram mellett, szinuszos térerősséggel végeztem 1,5,10 és 50 Hz-en, a térerősség amplitúdójának 500-8000 A/m közötti változtatása mellett. A 4. ábraán a két minta 1 és 10 Hz-es hiszterézis görbéi figyelhetők meg.



4. ábra – A két minta mért hiszterézis görbéi 1 Hz-es (bal) és 10 Hz-es (jobb) gerjesztés mellett [25].

Az 1 Hz-es és 10 Hz-es görbék összehasonlításával megfigyelhető az örvényáram hatása a vasvesztésre, míg az 1 Hz-es méréssel a kvázi statikus hiszterézis karakterisztikák vizsgálhatók,



10 Hz-en az örvényáram megjelenése miatt a hiszterézis karakterisztikák kiszélesednek és a veszteség nő. Megfigyelhető, hogy a minták viszonylag nagy (~1,5 T) indukció érték mellett kezdenek telítődni, azonban nagy veszteséggel rendelkeznek (1 Hz-en, 8000 A/m-es térerősség mellett ~5600 J/m<sup>3</sup>). Fontos kiemelni, hogy a mintákat hőkezelés nélkül vizsgáltam. Hőkezelés alkalmazásával tulajdonságaik lényegesen javulnak, mivel a gyártás során az anyagban keletkező belső feszültségek megszűnnek [9].

## 5. A VASVESZTESÉG MODELLEZÉSÉRE HASZNÁLT MÓDSZEREK

A vasveszteség modellezésére használt módszerek számos módon csoportosíthatók [10], [11]. A következő három alfejezetben, az egyik leggyakrabban alkalmazott csoportosítás szerint mutatom be a módszereket. Az első és második alfejezetben a kevésbé pontos, de gyors, Steinmetz-egyenleten és a veszteségek szétválasztásán alapuló módszereket mutatom be, majd a mágnesezési görbe nemlinearitását is figyelembe vevő matematikai módszereket.

### 5.1. Steinmetz-egyenleten alapuló módszerek

A polinom illesztést alkalmazó módszerek alapjául a Steinmetz egyenlet szolgál [12],

$$P = C f^\alpha B^\beta, \quad (8)$$

ahol  $P$  a számított veszteség,  $f$  a gerjesztés frekvenciája,  $B$  pedig a mágneses indukció amplitúdója, a  $C$ ,  $\alpha$  és  $\beta$  konstansokat pedig a mérési eredmények alapján kell megválasztani. A konstansok frekvencia függőek, így a modell csak az identifikálás során alkalmazott frekvenciák körüli szűk tartományban pontos, emellett a modellhez tisztán szinuszos indukció szükséges, ami azonban a vasmag telítődése és a szinuszosztól eltérő gerjesztés miatt a valóságban rendszerint nem áll rendelkezésre. A modell kiterjeszhető nem szinuszos mágneses indukció esetére is [13]. Ez a módszer a vasmagok nemlineáris viselkedésének modellezésére nem alkalmas. Ezt küszöböli ki a módosított Steinmetz egyenletet (MSE), amelynek alapja, hogy a pillanatnyi vasveszteség egyenesen arányos az indukció idő szerinti deriváltjával, annak jelalakjától függetlenül [14]. Alacsony főmódusú gerjesztés esetén azonban pontatlan és a DC eltolást sem veszi figyelembe [15]. Ezeket a problémákat próbálja megoldani, az általánosított Steinmetz egyenlet (GSE) és a fejlesztett általánosított Steinmetz egyenletek (iGSE, NSE [16], [17], [18], [19], DNSE [20]).

### 5.2. A veszteség szétválasztásán alapuló módszerek

Jordan szétbontotta a vasveszteség számítását két komponensre, a statikus hiszterézis veszteség és az örvényáramú veszteség összegére [21]:

$$P = P_h + P_{\text{öv}} = C_h f B^2 + C_{\text{öv}} f^2 B^2, \quad (9)$$

ahol a  $C_h$  és  $C_{\text{öv}}$  konstansok segítségével a modell a mérési eredményekhez illeszthető. A statikus hiszterézis veszteség a doménfalak mozgásához szükséges energiával arányos. Az örvényáramú veszteség komponens a Maxwell egyenletek alapján a  $W_{ed} = \frac{\sigma d^2}{12\rho} \left(\frac{dB(t)}{dt}\right)^2$ , (4) egyenlet segítségével határozható meg. Bertotti egy harmadik taggal egészítette ki a veszteség szétválasztási modellt,

mert a fenti egyenlettel számolt veszteség pl. a villamos gépekben is alkalmazott szemcseorientált anyagok esetén szignifikánsan eltért a mért értékektől:

$$P = P_h + P_{\text{öv}} + P_{\text{jár}} = C_h f B^2 + C_{\text{öv}} f^2 B^2 + C_{\text{jár}} f^{1,5} B^{1,5}, \quad (10)$$

ahol  $P_{\text{jár}}$  a járulákos veszteség számítására egy matematikai statisztika alapú módszert vezetett be. ennek a módszernek számos továbbfejlesztése létezik, például a [2] cikkben bemutatott modell segítségével a vasveszteség hőmérsékletfüggése is figyelembe vehető.

### 5.3. Matematikai hiszterézis modellek

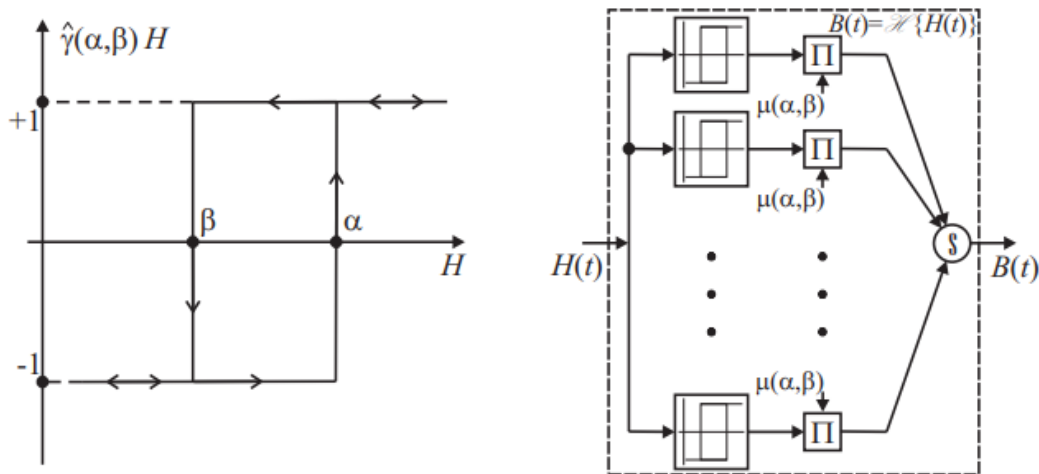
Ezek a módszerek a hiszterézisgörbe alakjának közelítéséből indulnak ki, a vasveszteség a modellezett hiszterézis karakterisztika területének számításával adódik  $Wh = \int_{B_{\min}}^{B_{\max}} H dB$ . (1).

Számos hiszterézis közelítő módszer létezik, fizikai alapú modell a Jiles-Atherton modell [22], a Preisach modell [23], vagy a matematikai statisztikán alapuló illesztett felületet alkalmazó modellek [24].

Kutatásom során a skalár Preisach modellt alkalmaztam a toroidok veszteségének közelítésére. A modell szerint az eredő hiszterézis karakterisztikát végtelen számú elemi hiszteron kimenetének súlyozott összege adja, ami a következő kettős integrál formulával írható le [8]:

$$B(t) = \mathcal{H}\{B\} = \iint_{\alpha \geq \beta} \mu(\alpha, \beta) \hat{\gamma}(\alpha, \beta) H(t) d\alpha d\beta, \quad (11)$$

ahol  $\hat{\gamma}(\alpha, \beta)$  az egyes hiszteronok kimenete a hozzájuk tartozó  $\alpha, \beta$  értékekkel. Egy hiszteron karakterisztikája az 5. ábrán látható. A  $\mu(\alpha, \beta)$  tag pedig a Preisach-eloszlásfüggvény, ami az egyes hiszteronok kimenetét súlyozza.

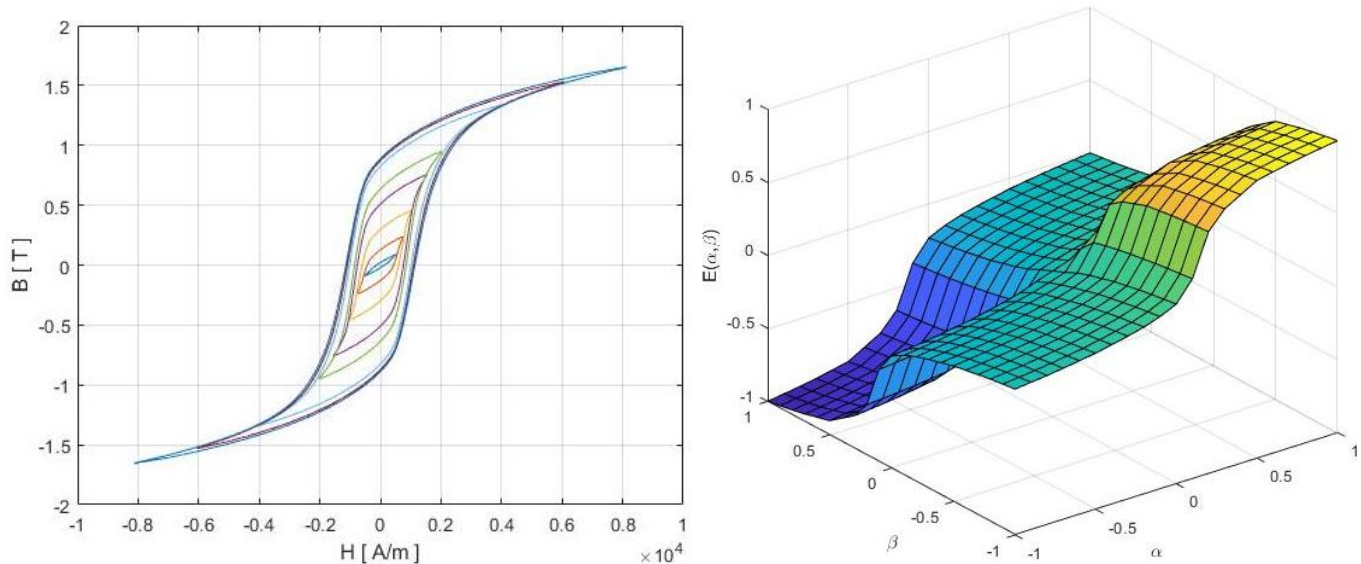


5. ábra - Egy hiszteron kimenete (a) és az egyes hiszteronok eredőjeként alkotott hiszterézis modell (b) [8].

$B(t) = \mathcal{H}\{B\} = \iint_{\alpha \geq \beta} \mu(\alpha, \beta) \hat{\gamma}(\alpha, \beta) H(t) d\alpha d\beta$ , (11) egyenlet számítására többféle módszer létezik az irodalomban, A dolgozatban egy az  $E(\alpha, \beta)$  Everett-függvény megoldásán alapuló módszert mutatunk be [8]. Az Everett-függvény ismeretében a modell a következő alakra egyszerűsödik:

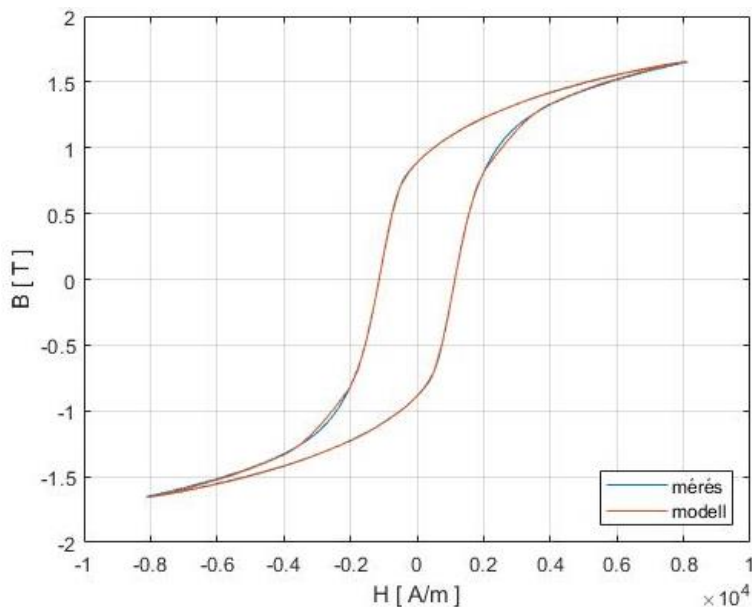
$$B(t) = -E(\alpha_0, \beta_0) + 2 \sum_{k=1}^K [E(\alpha_k, \beta_{k-1}) - E(\alpha_k, \beta_k)], \quad (12)$$

ahol  $K$  a lépcsőgörbe által tárolt sarkok számát jelöli. Az Everett függvény további előnye, hogy kapcsolatban áll a mérési eredményekkel és a vasmag koncentrikus hiszterézis görbéinek mérése segítségével meghatározható [8]. Az egyes számú vizsgált FeCo toroid minta koncentrikus hiszterézis görbéi és az azokból meghatározott Everett függvény a 6. ábrán látható.



**6. ábra – Az egyes számú vizsgált FeCo minta koncentrikus hiszterézis görbéi (a) és az azokból meghatározott Everett-függvény (b).**

Az identifikált Everett függvény segítségével a minta hiszterézis karakterisztikája a Preisach modell segítségével közelíthető, ennek ellenőrzése céljából a mért hiszterézis görbéket a modell segítségével közelítettem. A 7. ábrán a 8000 A/m-es amplitúdójú, 1 Hz-es térerősség mellett mért hiszterézis görbe hasonlítható össze a modell segítségével meghatározott görbével. Megfigyelhető, hogy a modell jó pontossággal közelíti a mért hiszterézis karakterisztikát



7. ábra – Az egyes számú FeCo minta 8000 A/m-es 1Hz-es térerősség mellett mért hiszterézis karakterisztikájának közelítése a Preisach modell segítségével.

## 6. KONKLÚZIÓ

A cikkben bemutattam a villamos gépek vasvesztését okozó jelenségeket, a vasmagok anyagának vizsgálatára alkalmazott mérési eljárásokat, a vasvesztés modellezésére használt módszereket, valamint a kutatás során vizsgált 3D nyomtatott FeCo toroid minták vizsgálatát és hiszterézis karakterisztikájának modellezését a skalár Preisach modell segítségével.

Megállapítható, hogy a Preisach módszer jó pontossággal képes modellezni a minták hiszterézis karakterisztikáját, így ez a módszer alkalmazható a 3D nyomtatott vasmaganyagok modellezésére. További kérdés, hogy a cikkben bemutatott egyéb modellek mekkora pontosságra képesek.

Az is megfigyelhető volt, hogy a két azonos gyártási módszerrel készített minta között számottevő eltérés volt. Ennek további vizsgálatára egy több mintát tartalmazó mérés elvégzése a cél.

## 7. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerzők köszönetüket fejezik ki a mérésre kapott 3D nyomtatott toroid mintákért Kocsis Bencének a Széchenyi István Egyetem Anyagtudományi és Technológiai Tanszék egyetemi tanársegédjének.

## 8. HIVATKOZÁSOK

- [1] H. Tiismus, A. Kallaste, T. Vaimann, and A. Rassõlkin, "State of the art of additively manufactured electromagnetic materials for topology optimized electrical machines," *Addit Manuf*, vol. 55, p. 102778, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102778>.
- [2] M. Kuczmann and T. Orosz, "Temperature-Dependent Ferromagnetic Loss Approximation of an Induction Machine Stator Core Material Based on Laboratory Test Measurements," *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 3, 2023, doi: 10.3390/en16031116.

- [3] G. Bramerdorfer, M. Kitzberger, D. Wöckinger, B. Koprivica, and S. Zurek, "State-of-the-art and future trends in soft magnetic materials characterization with focus on electric machine design – Part 1," *tm - Technisches Messen*, vol. 86, no. 10, pp. 540–552, 2019, doi: doi:10.1515/teme-2019-0065.
- [4] E. Antonelli, E. Cardelli, and A. Faba, "Epstein frame: how and when it can be really representative about the magnetic behavior of laminated magnetic steels," *IEEE Trans Magn*, vol. 41, no. 5, pp. 1516–1519, May 2005, doi: 10.1109/TMAG.2005.845072.
- [5] T. Yamamoto and Y. Ohya, "Single sheet tester for measuring core losses and permeabilities in a silicon steel sheet," *IEEE Trans Magn*, vol. 10, no. 2, pp. 157–159, Jun. 1974, doi: 10.1109/TMAG.1974.1058306.
- [6] A. Selema et al., "Evaluation of 3D-Printed Magnetic Materials For Additively-Manufactured Electrical Machines," *J Magn Magn Mater*, vol. 569, p. 170426, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.jmmm.2023.170426.
- [7] H. and K. A. and B. A. and V. T. and R. A. and L. D. Tiismus, "Hysteresis measurements and numerical losses segregation of additively manufactured silicon steel for 3D printing electrical machines," *Applied Sciences*, vol. 10, 2020.
- [8] K. Miklós, "Ferromágneses Hízterézis Az Elektromágneses Tézrszámításban," MTA Doktori értekezés, 2014, [Online]. Available: [http://real-d.mtak.hu/730/7/KuczmannMiklos\\_doktori\\_mu.pdf](http://real-d.mtak.hu/730/7/KuczmannMiklos_doktori_mu.pdf)
- [9] S. Lammers et al., "Additive Manufacturing of a lightweight rotor for a permanent magnet synchronous machine," 2016 6th International Electric Drives Production Conference (EDPC), pp. 41–45, 2016, doi: 10.1109/EDPC.2016.7851312.
- [10] A. Krings, S. Nategh, A. Stening, H. Grop, O. Wallmark, and J. Soulard, "Measurement and Modeling of Iron Losses in Electrical Machines," Aug. 2012, pp. 101–119.
- [11] D. Rodriguez-Sotelo, M. A. Rodriguez-Licea, I. Araujo-Vargas, J. Prado-Olivarez, A.-I. Barranco-Gutiérrez, and F. J. Perez-Pinal, "Power Losses Models for Magnetic Cores: A Review," *Micromachines (Basel)*, vol. 13, no. 3, p. 418, Mar. 2022, doi: 10.3390/mi13030418.
- [12] S. C. Proteus, "On the law of hysteresis," *IEEE Proceedin*, vol. 72, pp. 197–221, 1984.
- [13] R. Severns, "HF-core losses for nonsinusoidal waveforms," in *Proc. HFPC*, 1991, pp. 140–148.
- [14] J. Reinert, A. Brockmeyer, and R. W. A. A. De Doncker, "Calculation of losses in ferro-and ferrimagnetic materials based on the modified Steinmetz equation," *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 37, no. 4, pp. 1055–1061, 2001.
- [15] Jieli Li, T. Abdallah, and C. R. Sullivan, "Improved calculation of core loss with nonsinusoidal waveforms," in *Conference Record of the 2001 IEEE Industry Applications Conference. 36th IAS Annual Meeting (Cat. No.01CH37248)*, IEEE, pp. 2203–2210. doi: 10.1109/IAS.2001.955931.
- [16] K. Venkatachalam, C. R. Sullivan, T. Abdallah, and H. Tacca, "Accurate prediction of ferrite core loss with nonsinusoidal waveforms using only Steinmetz parameters," in *2002 IEEE Workshop on Computers in Power Electronics, 2002. Proceedings.*, IEEE, pp. 36–41. doi: 10.1109/CIPE.2002.1196712.
- [17] J. Muhlethaler, J. Biela, J. W. Kolar, and A. Ecklebe, "Improved Core-Loss Calculation for Magnetic Components Employed in Power Electronic Systems," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 27, no. 2, pp. 964–973, Feb. 2012, doi: 10.1109/TPEL.2011.2162252.
- [18] V. C. do Nascimento and S. D. Sudhoff, "Continuous Time Formulation for Magnetic Relaxation Using the Steinmetz Equation," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 33, no. 3, pp. 1098–1107, Sep. 2018, doi: 10.1109/TEC.2018.2821599.
- [19] C. R. Sullivan, "High frequency core and winding loss modeling," in *2013 International Electric Machines & Drives Conference*, IEEE, May 2013, pp. 1482–1499. doi: 10.1109/IEMDC.2013.6556339.
- [20] A. P. Van den Bossche, D. M. Van de Sype, and V. C. Valchev, "Ferrite Loss Measurement and Models in Half Bridge and Full Bridge Waveforms," in *IEEE 36th Conference on Power Electronics Specialists, 2005.*, IEEE, pp. 1535–1539. doi: 10.1109/PESC.2005.1581834.
- [21] H. Jordan, "Die ferromagnetischen Konstanten für schwache Wechselfelder," *Elektr. Nach. Techn*, vol. 1, no. 8, 1924.
- [22] D. C. Jiles and D. L. Atherton, "Theory of ferromagnetic hysteresis," *J Magn Magn Mater*, vol. 61, no. 1–2, pp. 48–60, Sep. 1986, doi: 10.1016/0304-8853(86)90066-1.
- [23] I. D. Mayergoyz and G. Friedman, "Generalized Preisach model of hysteresis," *IEEE Trans Magn*, vol. 24, no. 1, pp. 212–217, 1988, doi: 10.1109/20.43892.
- [24] G. Bramerdorfer and D. Andessner, "Accurate and Easy-to-Obtain Iron Loss Model for Electric Machine Design," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 3, pp. 2530–2537, Mar. 2017, doi: 10.1109/TIE.2016.2583402.
- [25] H. Tamás, O. Tamás, "3D nyomtatott toroid tekercs vasveszteségének analízise," *Tudományos és Művészeti Diákköri Konferencia dolgozat, Széchenyi István Egyetem, Győr, 2023.*



Juhász Kristóf Péter; Dr. Hartmann Bálint  
kristof.juhasz@f4ster.hu  
F4ster Zrt.

Budapest Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Villamosmérnöki és Informatikai Kar

## Mit tudhatunk meg a kisfeszültségű hálózatokról mérő- és szenzorberendezések telepítésével?

**Absztrakt** – Napjainkban az elosztott energiatermelés strukturális változást eredményez a villamosenergia-rendszerben. A centrális erőművek felváltásával az elosztóhálózat „aktívvá válik”, elszórtan megjelennek rajta termelő egységek is. Ennek eredményeképp a ma alkalmazott tervezési elvek (pl. feszültségcsökkentésre méretezés) nem fedik le az előforduló üzemállapotokat, a kisfeszültségű hálózat végpontjára csatlakozó háztartási méretű kiserőművek (HMKE) termelésének feszültségemelő hatása akár túl magas feszültségértékeket is eredményezhet. A rendszer egyes részein használt különböző számításokat, üzemeltetési módszereket, fejlesztési alternatívákat felül kell vizsgálni ahhoz, hogy az elosztóhálózati engedélyesek képesek legyenek a legkisebb költség elve mentén fenntartani szolgáltatásaik színvonalát, kiszolgálhassák az ügyfeleiket. Az aktív elosztóhálózat egyik sarokpontja a megfigyelhetőség kérdése. Adatokra van szükség a hálózat üzemeltetéséhez, melyhez mérő- és szenzorinfrastruktúrát kell kiépíteni. A Flex.ON projekt keretében az E.ON 4 db kisfeszültségű körzet felműszerezését végezte el, mind a négy vizsgált hálózatrészen jelen volt háztartási méretű kiserőműves energiatermelés és vezérelt fogyasztás is. A különböző feszültség- és árammérőműszerek felszerelésre kerültek, melyek első hónapos adatokat már szolgáltatottak is. Ezen adatokat elemeztük különböző szempontrendszer alapján és következtetéseket vontunk le a vizsgált vonalakra.

**Abstract** – Nowadays, distributed generation brings structural changes to the power system. With the replacement of centralised power plants, the distribution network is becoming "active", with distributed generation units. As a result, the design principles used today (e.g. voltage drop sizing) do not cover the operating conditions that may occur, and the voltage raising effect of the generation of small household-scale power plants connected to the end point of the low-voltage network may even result in excessively high voltage levels. In some parts of the system, different calculations, operating methods and development alternatives need to be reviewed in order to enable DSOs to maintain their level of service and serve their customers at least cost. One of the cornerstones of an active distribution network is the issue of observability. Data is needed to operate the network, which requires the deployment of metering and sensor infrastructure. In the framework of the Flex.ON project, E.ON has carried out the monitoring of 4 low-voltage areas. In all four network sections examined, both small household power generation and controlled



*consumption were present. Different voltage and current meters were installed and have already provided data for the first month.*

**Címszavak: mérő- és szenzorberendezések; esettanulmány; idősoros mérések.**

## 1. BEVEZETÉS

A Flex.ON projekt keretében az E.ON 4 db kisfeszültségű körzet felműszerezését végezte el azzal a céllal, hogy megvizsgálják azt, hogy a mérőszenzorok által szolgáltatott idősoros adatokból milyen eredmények mutathatók ki. Mind a négy vizsgált helyszínen jelen volt napelemes elosztott termelés és vezérelt fogyasztás is. A mérőinfrastruktúra perces felbontásban szolgáltatott tápponti feszültség és áram, valamint végponti feszültség értékeket. A kapott értékeket megvizsgálva azt az eredményt kaptuk, hogy az egyes vonalakon jelentős fázisaszimmetria lépett fel, valamint azt, hogy a napelemes betáplálásnak hála az egyes vonalakon tapasztalható feszültségesés negatív értékeket vett fel a napsütötte órákban. Ezen feszültségemelkedés a leágazásokban eltérően jelent meg fázisonként nem „egyenletesen”. Elfordultak olyan leágazások, amelyeknél az egyik fázis esetén feszültségemelkedés, a másik fázis esetén inkább feszültségesés volt tapasztalható a vizsgált hónapokban.

## 2. HELYSZÍN BEMUTATÁS

A Flex.ON projekt keretében az E.ON 4 db kisfeszültségű körzet felműszerezését végezte el, melyeket A-D betűkkel jelöltünk. A kiválasztott helyszíneket az E.ON a tanulmánytól függetlenül jelölte ki, ezért azok okfejtését, hogy miért az egyes helyszínekre kerültek a mérőszenzorok ez a cikk nem tartalmazza.

### 2.1. „A” Helyszín

Az első helyszín, ahova a mérőszenzorok felkerültek egy 400 fős község volt. Az általunk vizsgált 22/0,4 kV-os transzformátorkörzethez öt áramkör tartozott. A körzetben a hálózatra csatlakozó fogyasztók száma 218, melyek éves fogyasztása 313 MWh. Ez 1910 kWh átlag fogyasztást jelentet a körzetben fogyasztónként. A hálózatrész rendelkezett továbbá vezérelt fogyasztókkal is, melyek száma 68 és éves összes fogyasztásuk 52,2 MWh. A körzetben a hálózatra csatlakozó HMKE-k száma 3, melyek beépített teljesítménye rendre 3, 3, és 5 kW.

### 2.2. „B” Helyszín

A második helyszín, ahova a mérőszenzorok felkerültek egy 3400 fős község volt. Az általunk vizsgált 22/0,4 kV-os transzformátorkörzethez két áramkör tartozott. A hálózatra csatlakozó fogyasztók száma a körzetben 87, melyek éves összes fogyasztása 325,4 MWh. Ez 3968 kWh átlag fogyasztást jelentet a körzetben fogyasztónként. A hálózatrész rendelkezett vezérelt fogyasztókkal is, melyek száma 38 és éves összes fogyasztásuk 35,0 MWh. A körzetben a hálózatra csatlakozó HMKE-k száma 8, melyek beépített összteljesítménye 84,5 kW.

### 2.3. „C” Helyszín

A harmadik helyszín, ahova a mérőszenzorok felkerültek egy nagy város volt. Az általunk vizsgált 11/0,42 kV -os transzformátorkörzethez tizenegy áramkör tartozott. A körzetben a hálózatra csatlakozó fogyasztók száma 2145, melyek éves fogyasztása 1077,6 MWh. Ez 2431 kWh átlag fogyasztást jelentet a körzetben fogyasztókként. A hálózatrész rendelkezett vezérelt fogyasztókkal is, melyek száma 138 és éves összes fogyasztásuk 118,3 MWh. A körzetben a hálózatra csatlakozó HMKE-k száma 27, melyek beépített összteljesítménye 203,46 kW. A legnagyobb termelőegység 68 kW-os értékkel rendelkezett.

### 2.4. „D” Helyszín

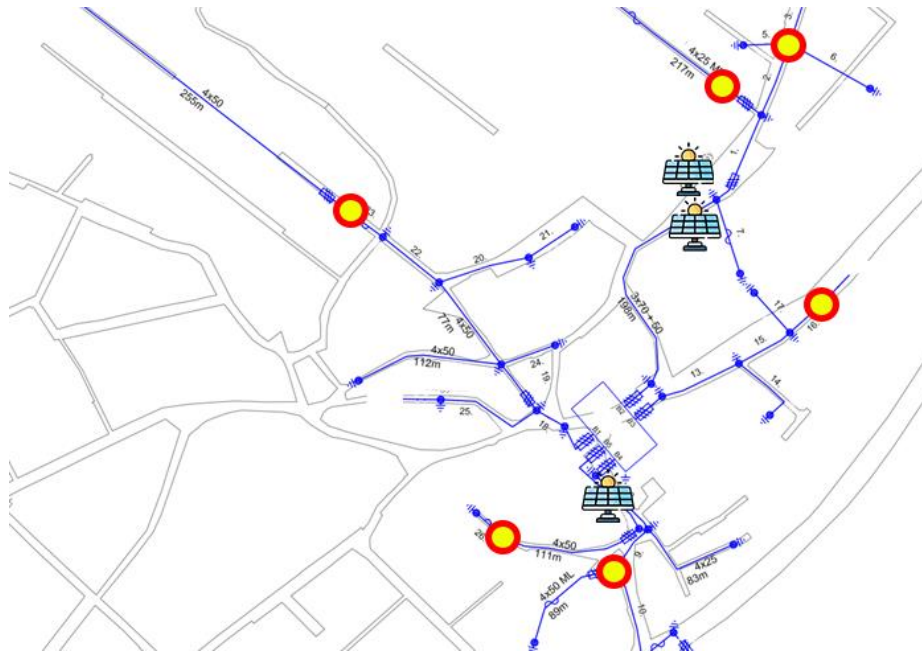
A negyedik helyszín, ahova a mérőszenzorok felkerültek egy kis 700 fős falu volt. Az általunk vizsgált 22/0,4 kV-os transzformátorkörzethez négy áramkör tartozott. A körzetben a hálózatra csatlakozó fogyasztók száma 181, melyek éves fogyasztása 541,4 MWh. Ez 3024 kWh átlag fogyasztást jelent a körzetben fogyasztókként. A hálózatrész rendelkezett vezérelt fogyasztókkal is, melyek száma 116 és éves összes fogyasztásuk 166,5 MWh. A körzetben a hálózatra csatlakozó HMKE-k száma 9, melyek beépített összteljesítménye 48,5 kW.

### 2.5. Helyszínek összehasonlítása

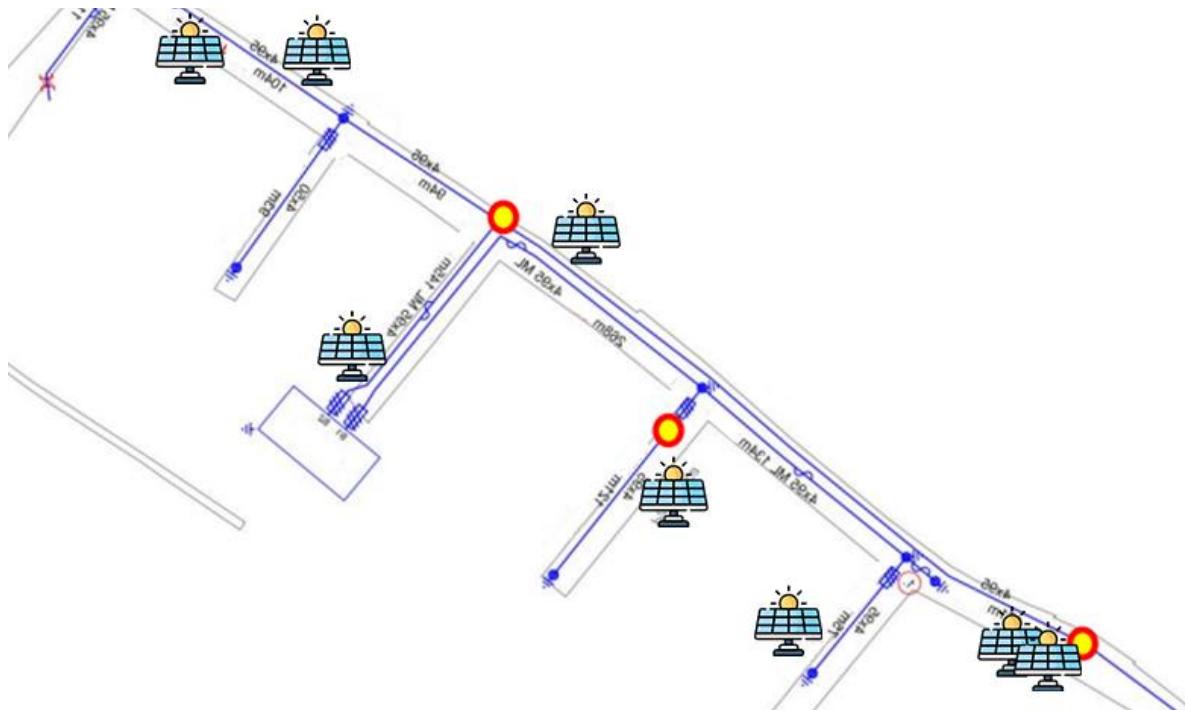
A négy helyszín eltérő jellegű volt, melyekhez különböző napelemes penetráció tartozott. Ezen adatok összegzéséről ad képet a 1.táblázat.

1. táblázat – Helyszínek összehasonlítása

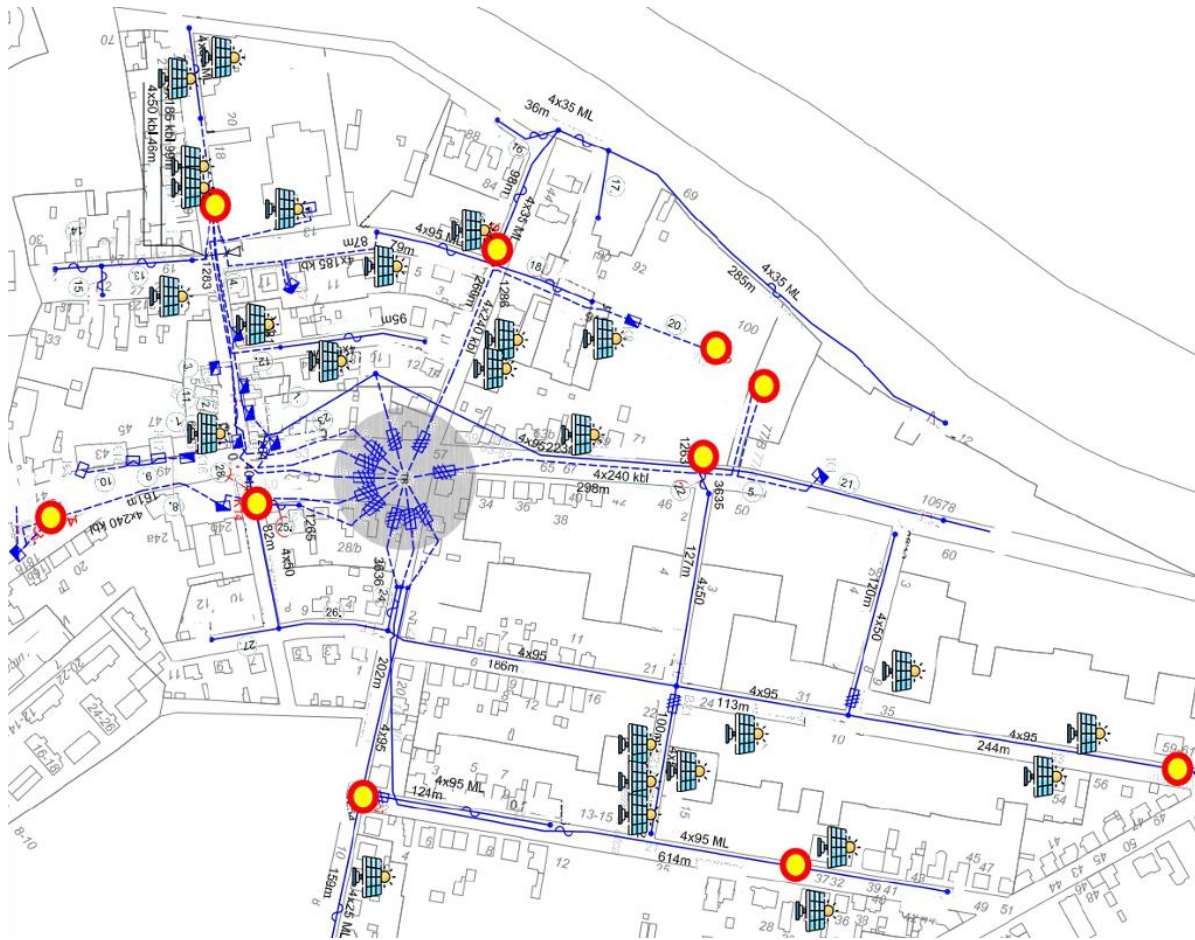
#	Jelleg	Áramkörök száma	Fogyasztók száma	HMKE-k száma	Napelem/Fogyasztók aránya [db/db]
A	Község	5	218	3	1,4%
B	Község	2	87	8	9,2%
C	Város	11	2145	27	1,3%
D	Falu	4	181	9	5,0%



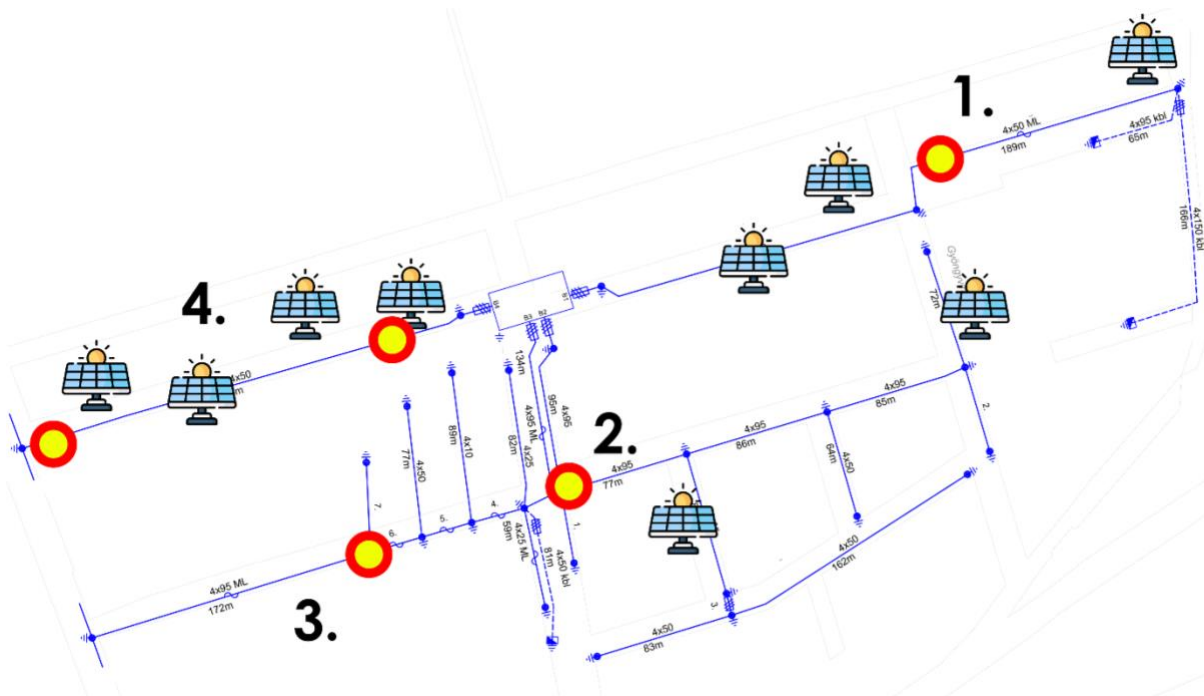
1. ábra – „A” Helyszín áramkörei a mérők felszerelési helyeivel



2. ábra – „B” Helyszín áramkörei a mérők felszerelési helyeivel



3. ábra – „C” Helyszín áramkörei a mérők felszerelési helyeivel.



4. ábra – „D” Helyszín áramkörei a mérők felszerelési helyeivel

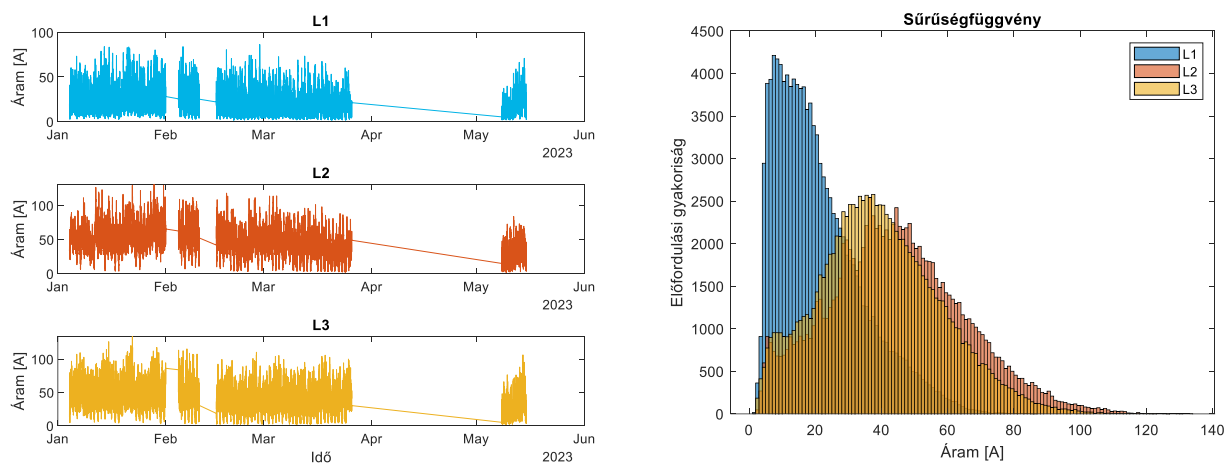
### 3. MÉRÉSI EREDMÉNYEK BEMUTATÁSA

#### 3.1. Mérőberendezések

A villamosenergia-rendszer napjainkban is tartó átalakulása megköveteli a hálózati állapot azonnali jelzését, valamint előre jelezhetőségének biztosítását. Ennek megfelelően az E-ON a KÖF/KIF transzformátorállomásait mérőrendszerrel kívánja felszerelni, mely képes a körzeten belüli kommunikációs és információcserét igénylő feladatok ellátására is. A jelen tanulmányban csak a tápponti mérőmodul és végponti mérőmodul által szolgáltatott adatokat vizsgáltuk a teljes rendszer további elemeit, vezérlő modul, körzeti és távoli kommunikációs modul működését és feladatait nem. A tápponti mérőmodul a kiefeszültségű elosztó gyűjtősín RMS feszültségét és áramát mindhárom fázisban 1 percre átlagolva mérte. A végponti mérőmodul a KIF hálózat köztes vagy végpontján elhelyezett hálózati mérőmodul, amely a KIF hálózat RMS feszültségét mindhárom fázisban 1 percre átlagolva mérte.

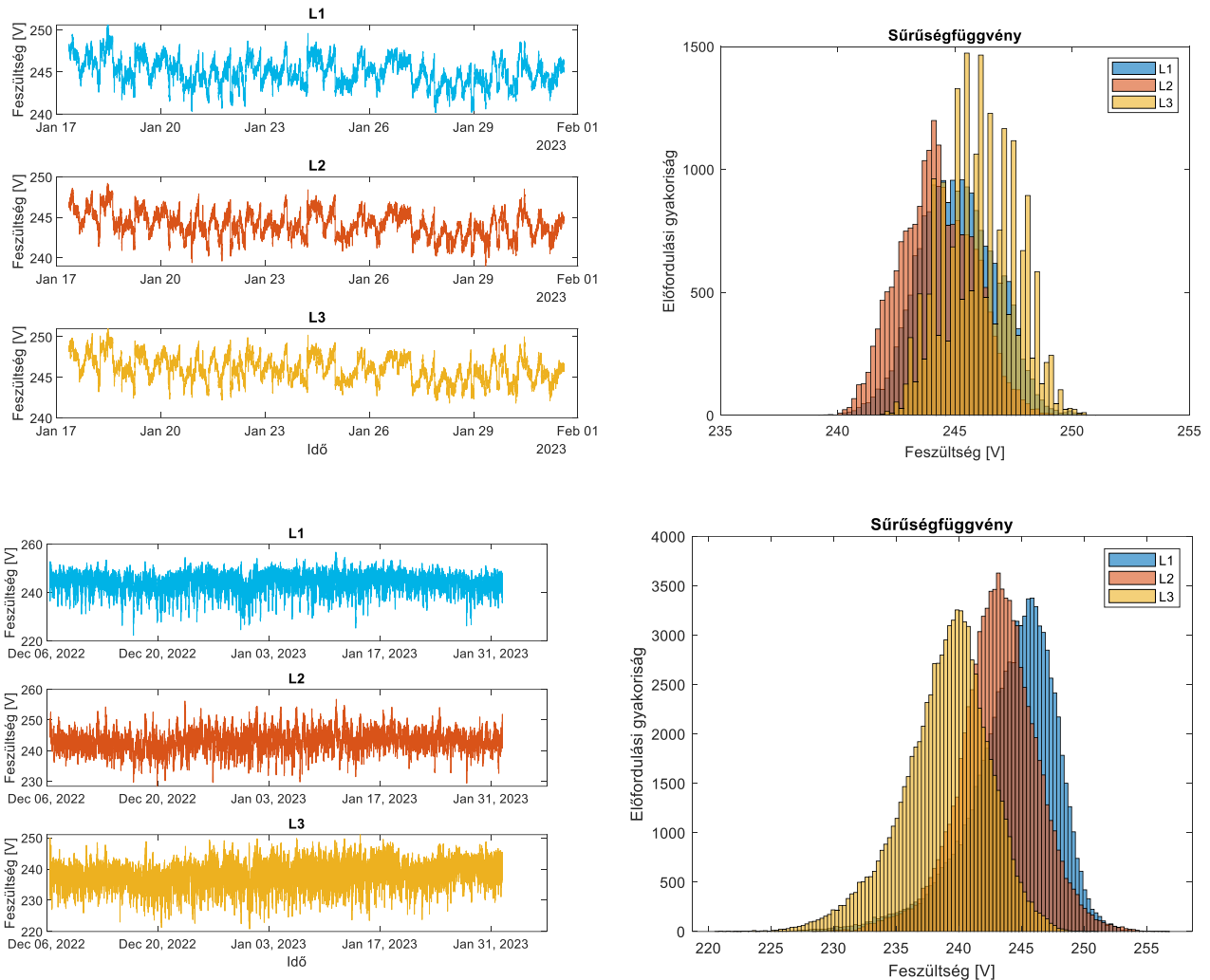
#### 3.2. Szolgáltatott adatok

A mérőberendezések felhelyezése a 2022-2023-as évben nem egyszerre történt, ezért a négy helyszínen vizsgált adatok időablakai nem egyeznek meg. A szolgáltatott adatokra az volt jellemző, hogy a pontos mérési időszakot megelőzte egy próba üzem, amely értékeit elvettük az általunk vizsgált adathalmazból. Jellemzően a vizsgált adatok 2023 január közepétől 2023 március/májusáig voltak mérve. Az 5. ábra az árammérés eredményeit mutatja „D” helyszínen az idő függvényében és hisztogramos formában, a 6. ábra meg a feszültségmérés eredményeit mutatja „A” helyszínen az idő függvényében és hisztogramos formában.



5. ábra – Árammérési eredmények





6. ábra – Tápponti és Végponti feszültségmérés eredmények

## 4. SZÁMÍTOTT ÉRTÉKEK

### 4.1. Feszültségesés

A tápponti és végponti feszültségértékekből könnyen számolható a vonalakra jellemző feszültségesés az (1) -es képlet segítségével.

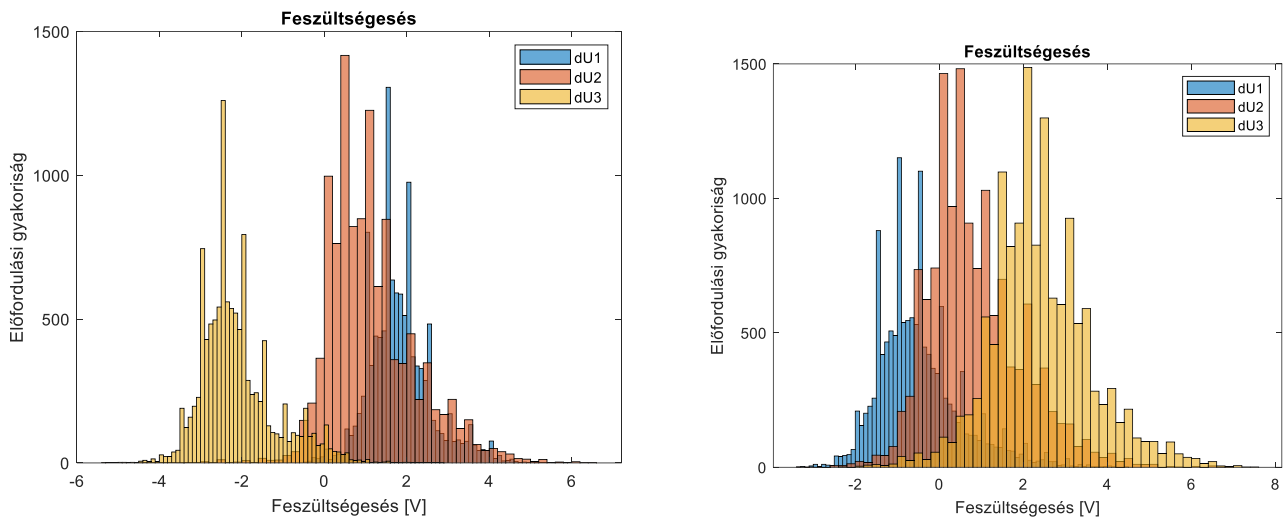
$$\Delta U = U_{\text{tápponti}} - U_{\text{végponti}} \quad (1)$$

Fontos megjegyezni azt, hogy ez a végpont nem a pontos áramköri végpontot jelentette, hanem azt az áramköri pontot, ahova a feszültségmérők elhelyezésre kerültek. Ezeknek a pontos helye megfigyelhető az 1-4 ábrán. Fontos továbbá megjegyezni azt, hogy a tápponti és végponti mérések külön-külön történtek, nem egymással időszinkronban. Az adott időpillanatokhoz tartozó feszültségesést utólag párosítottuk össze a regisztrált időbélyegek segítségével.

A feszültségesések vizsgálatokor több helyszín áramkörében lehetett teljesen eltérő viselkedést tapasztalni a három fázisban. Ez azt jelentette, hogy volt olyan eset, amikor az áramkör egyik



fázisára feszültségesés, míg másik fázisára feszültségemelkedés és harmadik fázisára mindkettő volt jellemző. Erre hoz példákat az 7. ábra.

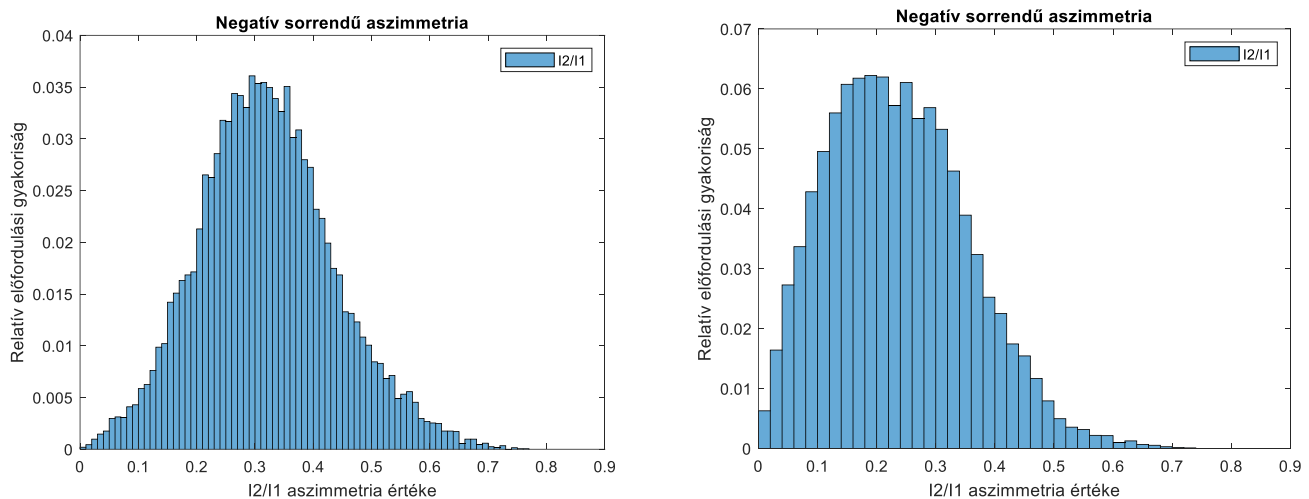


7. ábra – Feszültségesések hisztogramjai (bal fent – „A” helyszínen, jobb fent – „C” helyszínen)

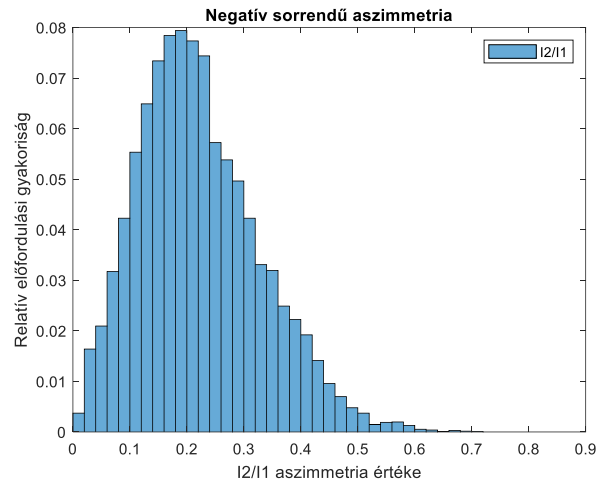
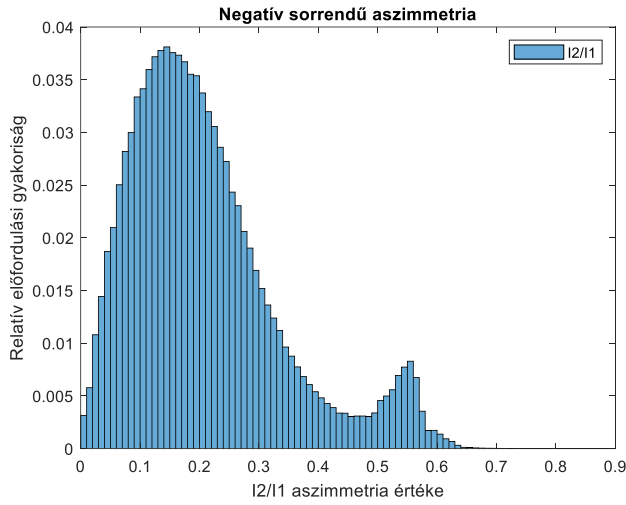
## 4.2. Aszimmetria

A három fázisú tápponti árammérések segítségével megállapítható az adott leágazásokra jellemző aszimmetria.

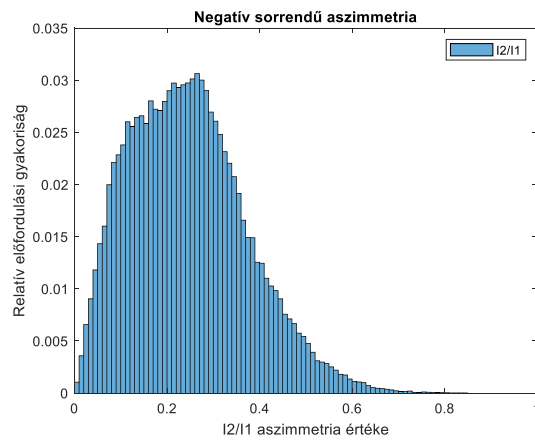
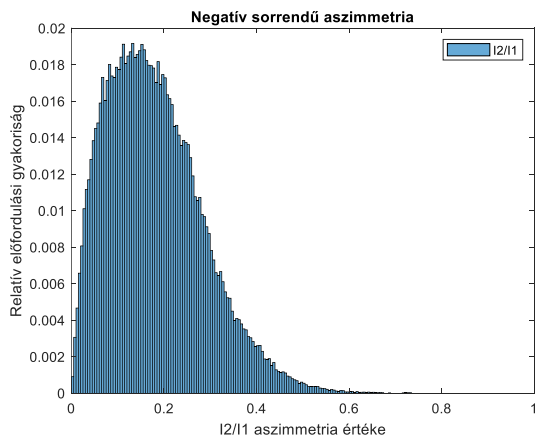
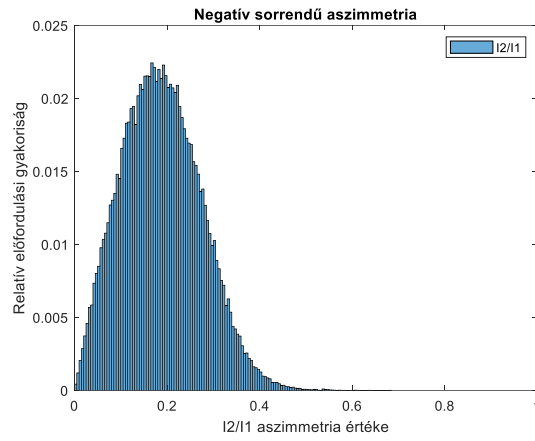
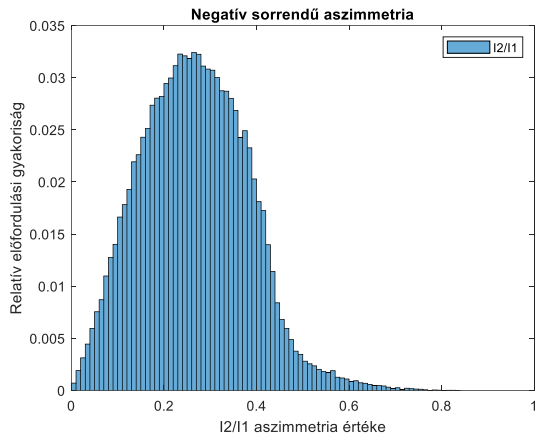
A négy helyszínen vizsgált leágazásokon különböző aszimmetria tapasztalható, amelyről az eltérő fogyasztói szokások, fáziskiosztás és eltérő HMKE-s elterjedtség tehet. Az „A” és „B” helyszínek esetén ez jól látszódik, azonban a „D” helyszínen esetében, ahol a legtöbb mérési eredmény lett szolgáltatva (111972 db mérés ~ 2,5 hónap), a két leágazás aszimmetriája közel azonos.



9. ábra – „A” helyszínen két áramkörének aszimmetriája



10. ábra – „B” helyszín áramköreinek aszimmetriája



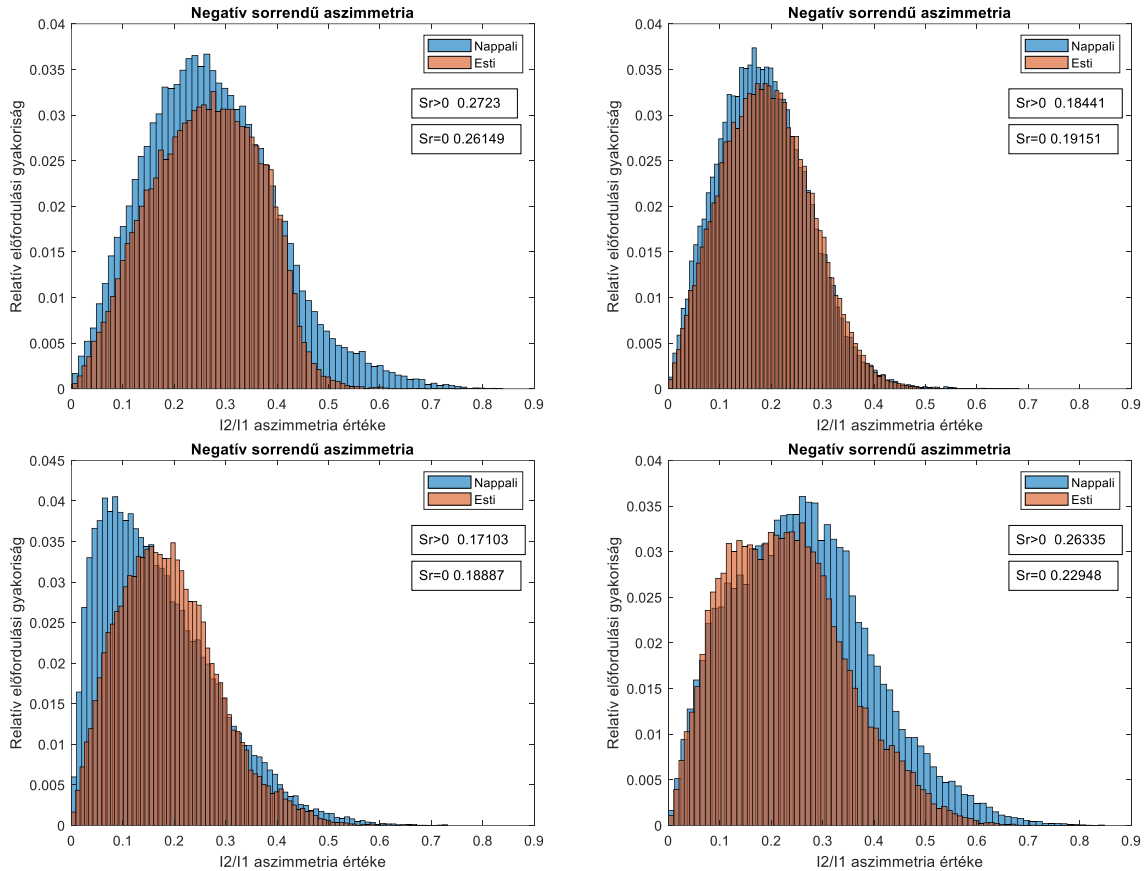
11. ábra – „D” helyszín áramköreinek aszimmetriája

## 5. MÉRÉSI EREDMÉNYEK TOVÁBBI FELHASZNÁLÁSÁNAK LEHETŐSÉGE

### 5.1. Besugárzás és aszimmetria viszonya

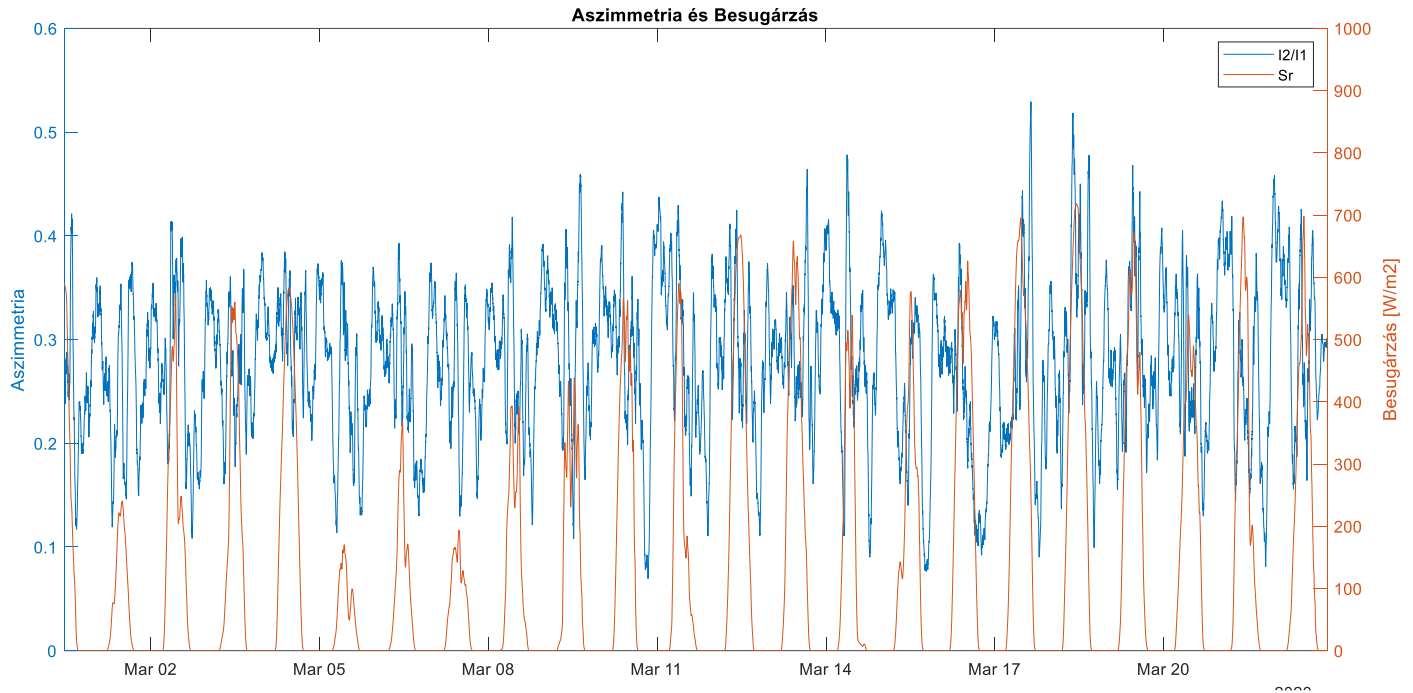
A kiefeszültségű hálózaton megjelenő napelemes termelés befolyásolja az aszimmetriát. Erre az eredményre jutott a [1] [2] [3] és [4] tanulmányban is. Az [1] forrásban az elosztott termelés hatását vizsgálták a gyenge elosztóhálózatokra. A vizsgálatok során különböző teljesítményű egy- és háromfázisú PV paneleket helyeztek el a vonalak mentén és azt az eredményt kapták, hogy míg a harmonikus torzítás és a feszültségprofil javul a vonalakon, addig a feszültség aszimmetriája növekedett a napelemek hatására. A [3] tanulmány a görögországi kiefeszültségű elosztóhálózatra csatlakoztatott 20 kWp teljesítményű PV-rendszer harmonikus hatását vizsgálta. A PV-erőmű harmonikus viselkedését a napsugárzás függvényében elemezték több időjárási körülmények között. A szimulációs eredmények azt mutatták, hogy a nemzetközi szabványok által előírt felharmonikus határértékek nem sérültek a kiefeszültségű hálózatra kapcsolt napelemes termelők hatására.

Ebben a tanulmányban, a mérő- és szenzorinfrastruktúra által szolgáltatott adatok alapján próbáltunk meg kapcsolatot teremteni a besugárzás és a vonalakon megjelenő aszimmetria értéke között. A vizsgálatokhoz a „D” helyszín eredményeit választottuk, mivel ebben az esetben állt rendelkezésünkre a legtöbb adat. A vizsgálatokhoz az adott helyszíneken tapasztalható besugárzási adatokat az OMSZ adatbázisa biztosította, amelyeket hozzárendeltük az adott pillanatokba tapasztalható aszimmetria mértékéhez. Megkülönböztettünk nappali, azaz  $S_r > 0$  ( $S_r$ : besugárzás) és esti  $S_r = 0$  állapotokat. A kapott aszimmetria értékeket hisztogramos formában a 12. ábra mutatja a „D” helyszín esetében.

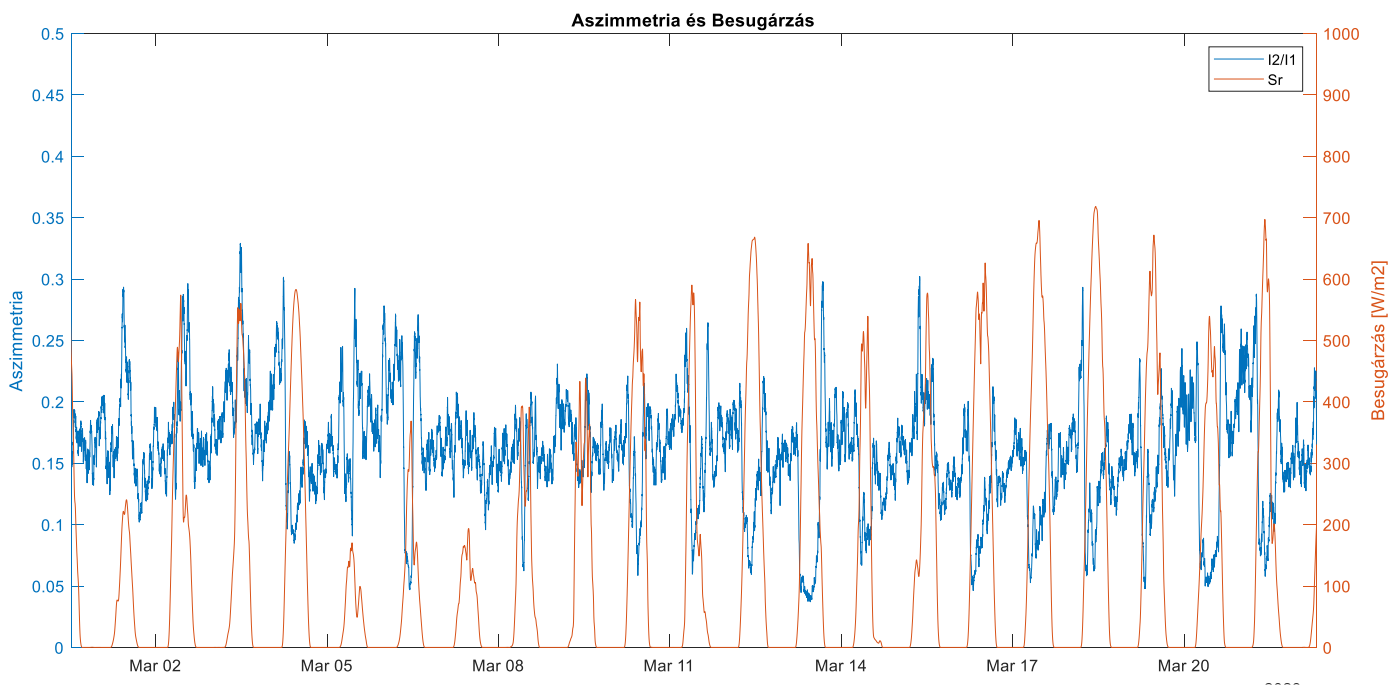


12. ábra – „D” helysín áramkörein aszimmetriája figyelembe véve a besugárzást ( $Sr$ )

Az 12. ábrán mutatott négy áramkör közül jól ketté válik kettő, az 1 és 4, valamint a 2 és 3 áramkör. Ha megvizsgáljuk a 4. ábrát, amely a „D” helysín képét mutatja a hálózaton található napelemekkel, belátható az, hogy a 1 és 4-es áramkörök esetében a napelemes behatás nagy, míg a 2 és 3 esetében elenyésző. A 13. és 14. ábra a „D” helysín két áramkörében (1-es és 3-as) tapasztalható aszimmetria mértékét mutatja és az adott időpillanatokra jellemző besugárzást. Az látható, hogy a napelemes energiatermeléssel terhelt áramkörben (1-es) nagyobb aszimmetria tapasztalható. Azonban, ha a besugárzási profilokat is nézzük azt láthatjuk, hogy nem tapasztalható nagyobb korreláció az 1-es áramkör esetében, mint azt ahogy várnánk. Érdekes eredmény viszont az, hogy a 3-as áramkör esetében, ahol a két adatsornak függetlennek kellene lennie, egy negatív korreláció fedezhető fel, különösen látványos ez a reggeli felfutás időszakában.



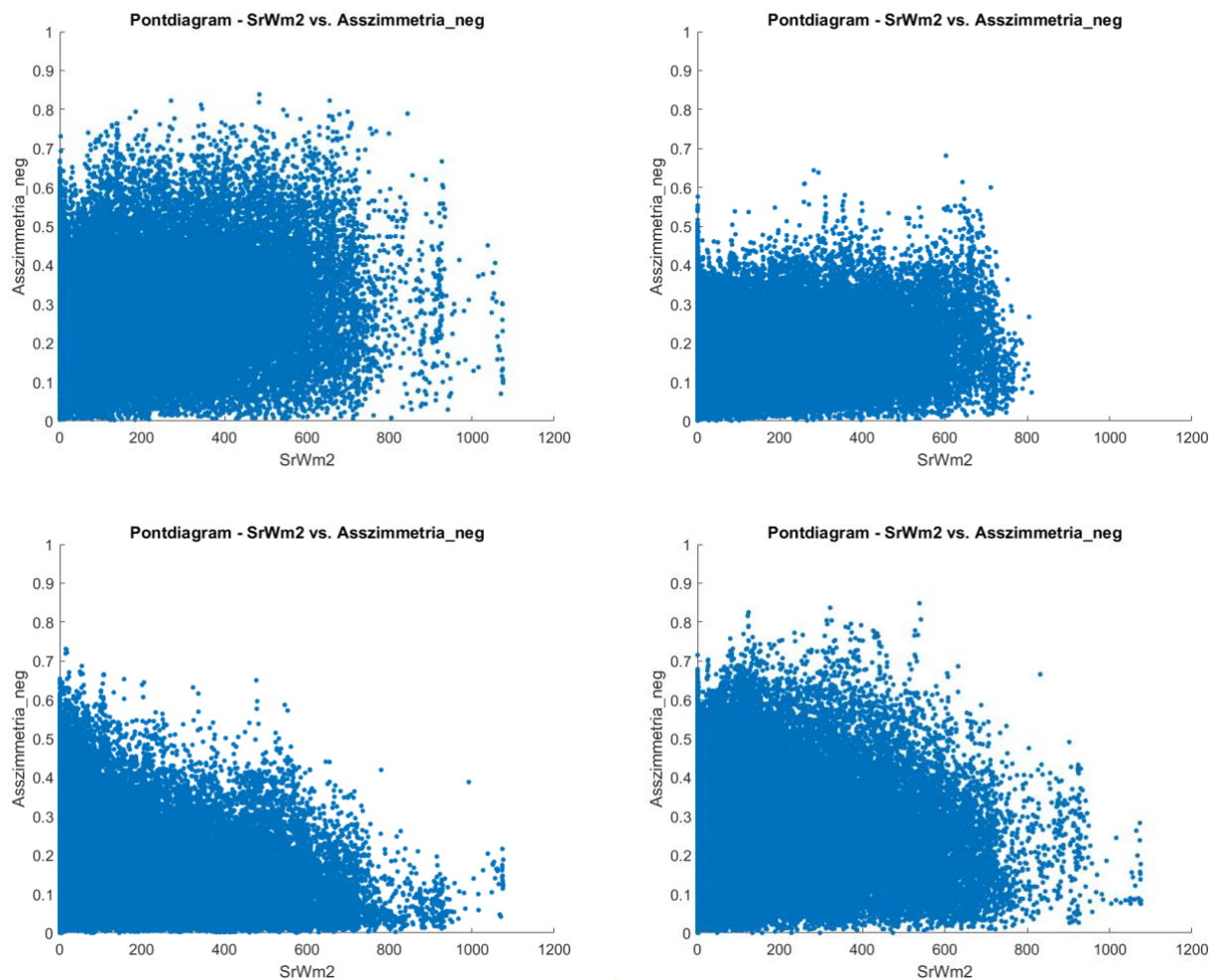
13. ábra – „D” helyszín 1-es áramkörének besugárzás és aszimmetriája



14. ábra – „D” helyszín 3-es áramkörének besugárzás és aszimmetriája

Az összehasonlíthatóság érdekében egy Pearson korrelációs együtthatót is kiszámoltunk az áramkörökhöz, ahol azt tapasztaltuk, hogy a négy áramkör Pearson korrelációs együtthatója rendre: 0.15, 0.04, -0.23 és 0.05. Ha Pearson korrelációs együttható értéke közel van -1 vagy 1-hez, akkor erős korreláció van, míg, ha közel van 0-hoz, akkor nincs, vagy csak gyenge korreláció van. A

korreláció értelmezése szerint a „legerősebb” kapcsolat a „D” helyszín esetében a 3-as áramkörnél tapasztalható, amely nem rendelkezett napelemes behatással. Ez az összefüggés hiányára enged következtetni.



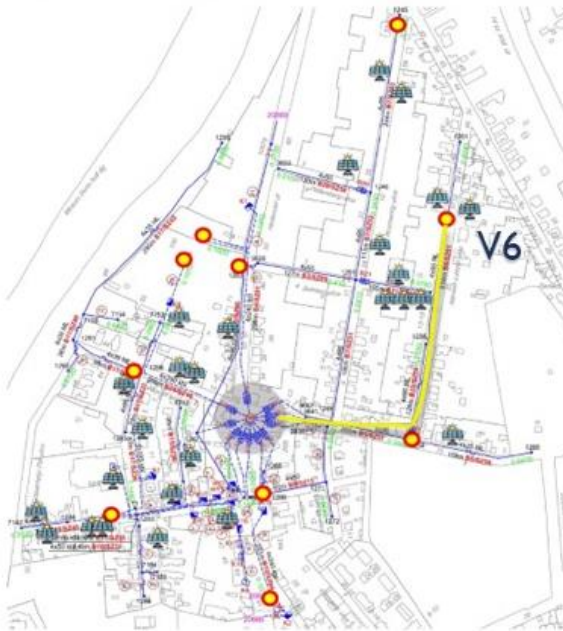
**15. ábra – „D” helyszín áramkörei (bal fent:1-es; jobb lent:4-es) besugárzás és aszimmetria értékei pontdiagramon**

Ezen vizsgálati eredmények alapján nem látható kapcsolat az aszimmetria és a besugárzás között, amely azzal magyarázható, hogy a napelemes elterjedtség a „D” helyszín esetében csak 5%-ra tehető, amely elterjedtség nem elegendő ahhoz, hogy következtetéseket vonjunk le.

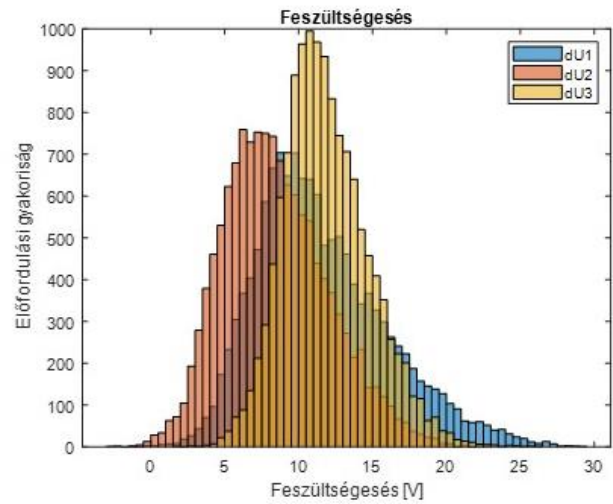
## 5.2. Vonalakra jellemző feszültségesésben felfedezett érdekességek

A feszültségesések vizsgálatakor több esetben is találtunk nem egyértelmű jelenségeket.





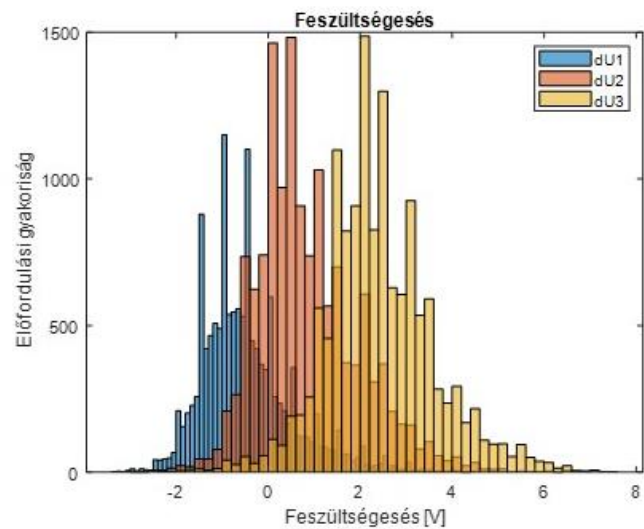
16. ábra – „C” helyszín V6 áramkörének feszültségesése



A „C” helyszínél előfordul olyan eset, hogy a hosszabb, nagyobb napelemes elterjedtségű V6-os áramkör (16.ábra) esetében a feszültségesés értéke kevesebb alkalommal ment át negatív értékbe (feszültségemelkedésbe), mint a V2-es rövidebb, kisebb napelemes behatású áramkör (17.ábra) esetében.



17. ábra – „C” helyszín V2 áramkörének feszültségesése



Az első szembejövő lehetséges magyarázat a vonalakra jellemző eltérő fogyasztói szokások, vagy eltérő fogyasztók száma. Ezekről a tanulmány készítése pillanatában azonban nem állt

rendelkezésre adat. Egy másik lehetséges elképzelés a vonalakra jellemző eltérő impedancia viszony lehet, ugyanis a V2 és V6 áramkörökben nem azonos vezetékek voltak jelen. A V6-os áramkör esetében a vonal keresztmetszete 95mm<sup>2</sup>, míg a V2-es áramkör esetében 50mm<sup>2</sup> keresztmetszetű szabadvezeték volt. Ez egy lehetséges magyarázat lehet az ebben az esetben tapasztalt jelenségre.

### 5.3. MÉRŐ- és szenzorinfrastruktúra által nyújtott lehetőségek

A MÉRŐ- és szenzorberendezések az okos hálózatok elengedhetetlen részét képezik. A MÉRŐ- és szenzorberendezések lehetővé teszik a kiefeszültségű hálózat megfigyelését, ezáltal láthatóságot biztosítva a rendszerüzemeltetőnek, továbbá lehetővé teszik a KIF üzemzavarok jelzését, a hibás üzemiállapotok felismerését. A mérőberendezéseknek hála a vonalokon jelentkező feszültségproblémákat fel tudjuk ismerni és újabb feszültségszabályozási eljárásokat tudunk használni (OLTC-vel felszerelt transzformátor / IVR hangolása végponti feszültségmérés alapján). A szolgáltatott mérési adatoknak hála az állapotbecslő algoritmusok tovább javíthatók, valamint lehetővé válik az adatalapú hálózatfejlesztési döntések meghozatala, a hálózat elöregedésének előrejelzése és a KIFÜR [5] fejlesztésének lehetősége is.

## 6. KONKLÚZIÓ

Az elosztóhálózatokon változás játszódott le az elmúlt években, amely nem csak a KÖF vonalokon megjelenő elosztott termelőknél merül ki. A kiefeszültségű áramkörökre csatlakozó háztartásokban megjelenő új elemek (villamos autók, HMKE-k stb.) számos kihívás elé állítják a rendszerüzemeltetőket, amely leküzdése érdekében új okos megoldásokat kell igénybe venni. A különböző okos eszközök, például terhelés alatt változtatható áttételű transzformátor (OLTC), vonali feszültség szabályozó (IVR) a hálózatról szolgáltatott információk alapján hoznak döntéseket, amelyekhez az adatokat egy stabilan és megbízhatóan működő mérőszensor infrastruktúrának kell szolgáltatnia.

Ebben a cikkben megvizsgáltuk azt, hogy a valóságban megvalósított mérőszensor infrastruktúrákkal milyen villamos paraméterek mérhetőek és ezek alapján milyen következtetések vonhatóak le az adott vonalakra. Azt tapasztaltuk, hogy az áram és feszültségméréseknek köszönhetően pontosan meg tudtuk mondani azt, hogy az egyes áramkörökre jellemző aszimmetria értéke milyen, valamint a vonalokon eső feszültségből láthattuk azt, hogy az egyes áramkörökben megjelenő napelemeknek mekkora feszültségemelő hatása van.

A vizsgálatok során tapasztaltunk anomáliákat, láttunk olyan áramkörben negatív feszültségességet, amely nem rendelkezett HMKE-val, valamint találtunk olyan áramméréseket is, ahol a korábbi értékek több százszorosa látszódott. Mindent összegezve érdemes megjegyezni, hogy ahhoz, hogy meg tudjunk oldani egy problémát először azonosítani és megérteni kell azt. Ezen felfedezésekben segíthet nekünk az okos mérés, amely a jövő villamosenergia-rendszerében kulcsfontosságú szerepet fog játszani.

## 7. HIVATKOZÁSOK

- [1] Miron, A. Cziker, M. Chindriş and D. Sacerdotianu, "Impact of distributed generation on weak distribution networks. study case on a Romanian microgrid," 2016 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE), Craiova, Romania, 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICATE.2016.7754627.
- [2] F. Xue et al., "Unbalanced three-phase distribution system power flow with distributed generation using affine arithmetic," 2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), Changsha, China, 2015, pp. 822-829, doi: 10.1109/DRPT.2015.7432341.
- [3] I. T. Papaioannou, A. S. Bouhouras, A. G. Marinopoulos, M. C. Alexiadis, C. S. Demoulias and D. P. Labridis, "Harmonic impact of small photovoltaic systems connected to the LV distribution network," 2008 5th International Conference on the European Electricity Market, Lisboa, Portugal, 2008, pp. 1-6, doi: 10.1109/EEM.2008.4579061.
- [4] Hartmann Bálint, Dán András, "*Harmonic Source Identification of a Distributed Generator, and Compensation of the Voltage Change Caused by Changing Generation*", In: Manual, Perez Donsion (szerk.) International Conference on Renewable Energies and Power Quality 2008 (ICREPQ2008), Fiera di Primiero, Nemzetközi : [s. n.] (2008) pp. 1-6. , 6 p.
- [5] Ferenczi Mózes, ELMŰ Hálózati Kft, Az aktív (okos) hálózatok építőkövei az E.ON elosztóhálózatán, 68. Vándorgyűlés, KIF hálózati technológiák, műszaki megoldások szekció

Juhász Kristóf Péter<sup>1)</sup>; Táci István<sup>1)</sup>; Sztráda Gyula<sup>2)</sup>  
juhasz.kristof6@gmail.com

<sup>1)</sup>Budapest Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Villamosmérnöki és Informatikai Kar  
<sup>2)</sup>MAVIR Zrt.

## Inerciacsökkenés vizsgálata: A fogyasztói oldal hatáselemzése

**Absztrakt** – Az inercia, avagy tehetetlenség lényeges szerepet játszik a villamosenergia-rendszer frekvenciastabilitásában. A tehetetlenség alapvetően korlátozza a zavarok hatására fellépő nagy frekvenciaváltozásokat, ezzel stabilitást adva a rendszernek. A jelenlegi villamosenergia-rendszer termelői összetételében változások játszódnak le, amelynek köszönhetően a rendszer inerciája csökken. Az inercia kritikus szerepet játszik a rendszer stabilitásában, azonban a rendszer inerciájának hozzájárulásában nem csak a termelők forgó tömege jelenik meg, hanem például a fogyasztóoldali frekvenciaérzékenység is. A fogyasztók a frekvenciaérzékenységük függvényében különböző mértékben járulnak hozzá a rendszer stabilitásához, melynek szerepe a csökkenő forgó tömeg miatt a jövőben még jelentősebb lesz.

A frekvenciafüggő terheléskorlátozás az utolsó védelmi lépcső, amelynek feladata megakadályozni a rendszerösszeomlást. A működési elv az, hogy adott frekvenciahatár elérésekor fogyasztókat csatlakoztatunk le a hálózatról, ezzel stabilizálva a rendszert. A kutatásban részletezett vizsgálatok során láthattuk azt, hogy a leválasztott fogyasztók típusai miként befolyásolhatják a frekvenciát. Azt az eredményt kaptuk, hogy a leválasztandó fogyasztók helyes megválasztása esetén, nagy üzemzavarok alatt, kevesebb fokozat kioldásával, azaz kevesebb fogyasztó leválasztásával is képesek vagyunk megállítani a frekvenciacsökkenést, ezáltal egy minőségibb és megbízhatóbb villamosenergia-rendszert kapva.

**Abstract** – *Inertia plays an essential role in the frequency stability. Inertia inherently limits the large frequency fluctuations caused by disturbances, thus providing stability to the system. Changes are taking place in the generation mix of the current power system, which reduce the inertia of the system. Inertia plays a critical role in system stability, but the contribution to system inertia is not only due to the rotating mass of the generators, but also to the frequency sensitivity at the load side. Loads contribute to the stability of the system to varying degrees depending on their frequency sensitivity, which will become even more important in the future due to the decreasing rotating mass.*

*Underfrequency load shedding is the last protection element to prevent system collapse. The principle of operation is to disconnect loads from the grid when a given frequency threshold is reached, thus stabilizing the system. Our research has detailed how the types of disconnected loads can affect frequency. The results show that, with the right choice of disconnected loads, we can stop the frequency drop with lower amount of disconnected loads, thus obtaining a higher quality and more reliable electricity system.*

**Címszavak: inercia; frekvenciafüggő terheléskorlátozás; adaptív FTK.**

## 1. BEVEZETÉS [1]

A villamosenergia-rendszer termelői összetétele változásokon megy keresztül, amely számos rendszerstabilitásbeli kérdést felvet. A jelenlegi tendenciák, Nemzeti Energiastratégia [2] és Nemzeti Energia- és Klímaterv [3] mind azt mutatja, hogy jelentős megújuló termelőt fog a magyar, valamint európai rendszerbe települni. Hazai szinten ez 2030-ra 6500 MW, 2040-re 11000 MW beépített napelemes kapacitást jelent.

Létesítéskor a hálózatot központosított termelésre tervezték, ahol az energiát nagyerművekben állítják elő szinkrongenerátorokkal. A megváltozott termelői összetétel számos stabilitási és rendszerirányítási problémát felvet, mivel a napelemes termelők teljesítményelektronikán keresztül csatlakoznak a hálózatra és nem rendelkeznek tehetetlenséggel, mint a fizikai forgó tömeggel rendelkező nagy gépek. A forgó tömeg hiánya következtében a rendszerben problémák léphetnek fel többek közt a frekvenciastabilitásban, villamosenergia-minőségben, védelmek tekintetében és feszültség-meddőteljesítmény egyensúlyának viszonyában [4].

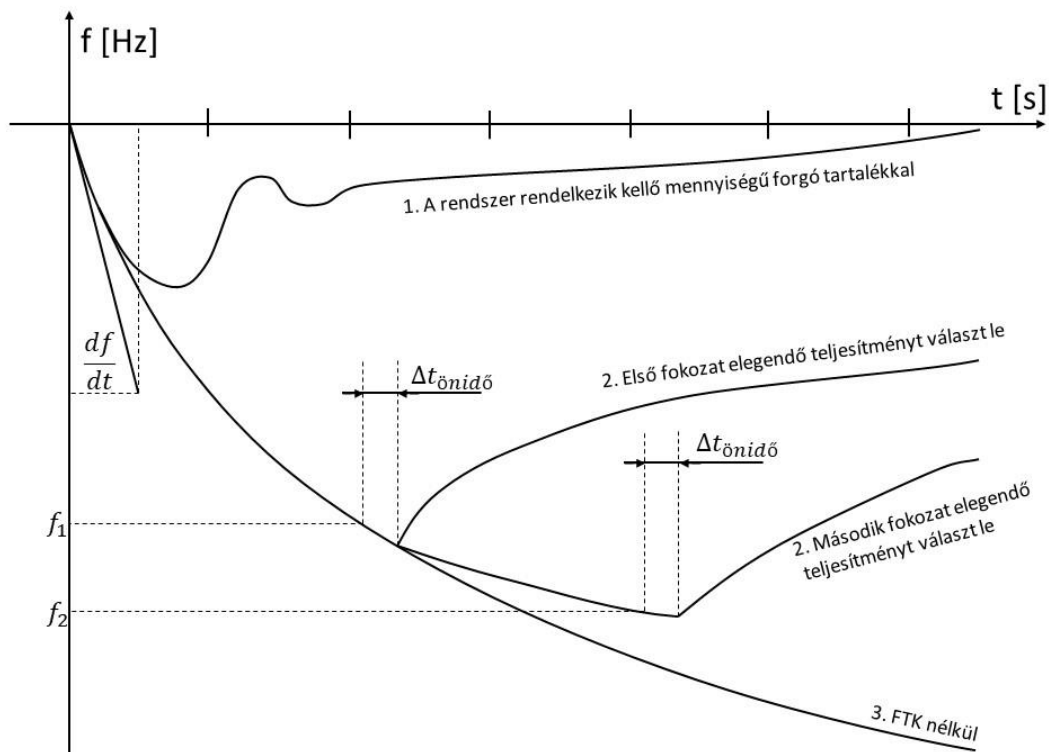
Ebben a kutatásban az inercia csökkenés miatt feltételezett szélsőséges állapotokban vizsgáltuk az FTK működését, valamint egy általunk definiált adaptív FTK lehetőségét vizsgáltuk és a jelenleg működő magyar FTK fényében javaslatokatt fogalmaztunk meg.

## 2. FREKVENCIAFÜGGŐ TERHELÉSKORLÁTOZÁS (FTK)

Abban az esetben, ha a fogyasztó oldali teljesítményigény meghaladja a termelés oldali teljesítőképesség maximumát, akkor a rendszer frekvenciája csökkeni fog. Ha ez a frekvencia 47,5 Hz-es érték alá csökkenne, akkor a rendszer-összeomlás veszélye fennáll. Ezen kritikus helyzet elkerülése érdekében a frekvencia függvényében a fogyasztást korlátozni kell. [5]

### 2.1. A magyar rendszer frekvenciafüggő terheléskorlátozása

A magyar rendszerirányító (MAVIR Zrt.) által előírt frekvenciafüggő terheléskorlátozás a mindenkori fogyasztás 45%-át képes leválasztani összesen 6 különböző fokozatban (2. és 3. ábra). Ezt a mindenkori fogyasztást januári OTM (országos terhelési mérés) időpontjában határozzák meg leágazásonként. Ez egy „fiktív” MW-os érték, amely az év folyamán nem minden időpillanatban mutatja a valós fogyasztási értéket, ezáltal a lekapcsolandó fogyasztási érték is egy becsült érték. A hat fokozat közül az első fokozat 5%-át tudja leválasztani a mindenkori rendszerterhelésnek, a maradék öt további 8-8%-ot. Az első fokozat akkor indul, ha a rendszerfrekvencia eléri a 49 Hz-et. Amennyiben az első fokozat által leválasztott terhelés hatására a frekvencia továbbra is csökken, akkor a 48,8 Hz-es értéket elérve a második fokozat FTK rendszerautomatikája további 8%-nyi terhelést választ le. Ez 200 mHz-es lépcsőként folytatódik egészen a 48 Hz-es frekvencia értékig. A MAVIR a Magyarországon működő elosztói engedélyesek (Distribution System Operator, DSO) számára az ellátott fogyasztók terhelésével arányosan írja elő, hogy mekkora leágazási teljesítményt kell bevonni az adott fokozatokba.

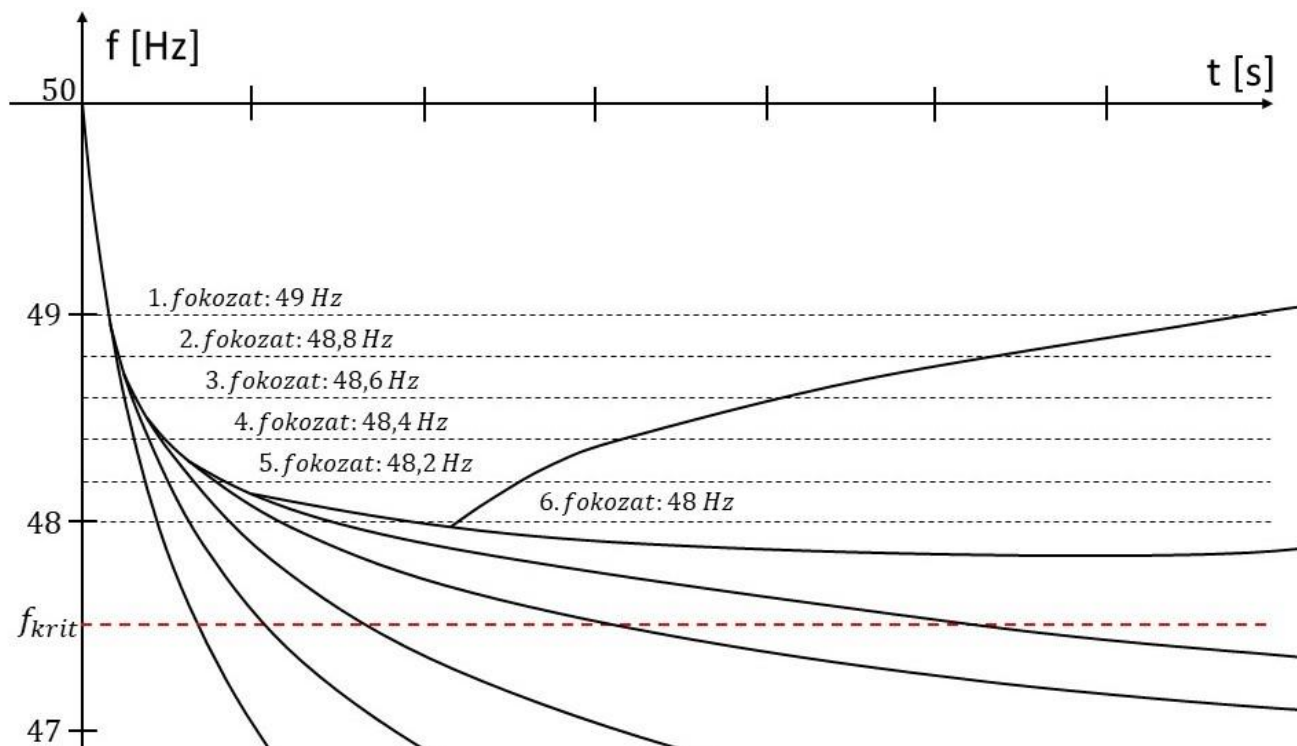


1. ábra – Forráskiesést követő rendszerfrekvencia- változás időfüggvények.

Elosztói engedélyes	FTK fokozatok					
	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.
	49 Hz (5%)	48,8 Hz (8%)	48,6 Hz (8%)	48,4 Hz (8%)	48,2 Hz (8%)	48 Hz (8%)
Engedélyes 1	71,5	114,4	114,4	114,4	114,4	114,4
Engedélyes 2	36,0	57,6	57,6	57,6	57,6	57,6
Engedélyes 3	49,8	79,7	79,7	79,7	79,7	79,7
Engedélyes 4	36,4	58,2	58,2	58,2	58,2	58,2
Engedélyes 5	38,0	60,8	60,8	60,8	60,8	60,8
Engedélyes 6	99,6	159,3	159,3	159,3	159,3	159,3
összesen	331	530	530	530	530	530

2. ábra – 2019-es FTK táblázat



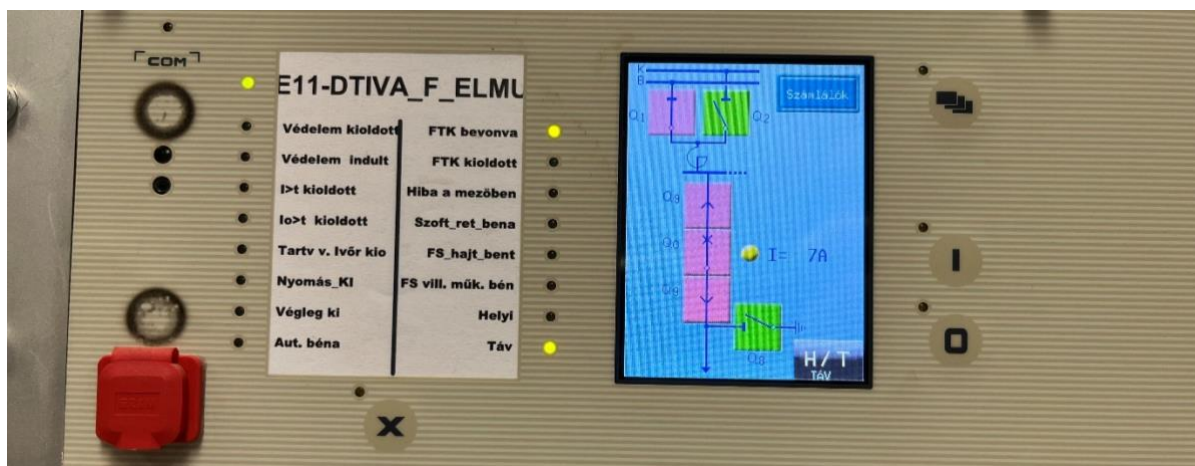


3. ábra – Magyar FTK működésének sematikus ábrája

Az egyes DSO-k a leválasztási fokozatokba közép feszültségű vonalakat rendelnek, amelyek elosztói alállomásokban vannak jelen. Az FTK táblázat kialakítása, azaz a fokozatok kiosztására 3 évente kerül sor. A fokozatok kialakításánál egy alállomás leágazásait egy fokozatba rendelik az egyszerűség kedvéért. Az FTK-hoz használt frekvencia értéket helyben számolják transzformátor közép feszültségű (KÖF) oldalán mért egyik fázis vonali feszültségéből. Az indulási frekvencia értéket online felületen állítják be a Protecta által gyártott DTIVA védelemhez.



4. ábra – Elosztói bejárat alállomás fogyasztói leágazásai



5. ábra – FTK működésért felelős védelem

### 3. ADAPTÍV FTK VIZSGÁLATA

A frekvenciafüggő terheléskorlátozás az utolsó védelemi elem a rendszerösszeomlás előtt. Az eljárás alapja az, hogy fogyasztókat választunk le a hálózatról előre elrendelt determinisztikus módon. Az FTK-védelemnek különböző fajtái léteznek: hagyományos, félig adaptív és adaptív,

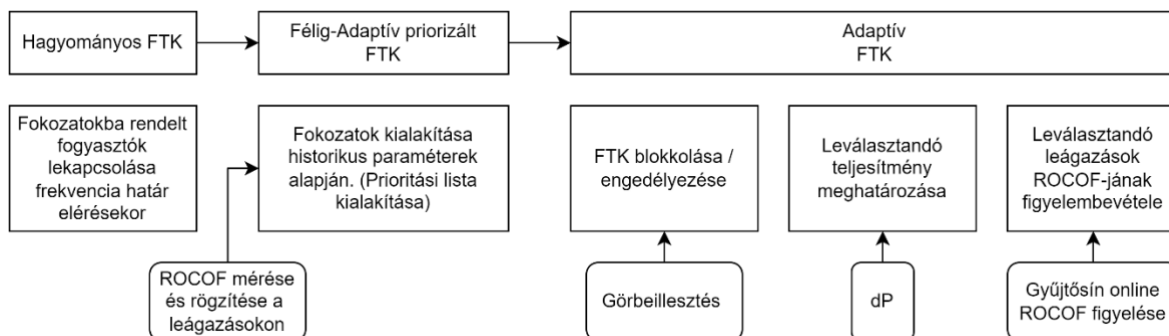
melyek a leválasztandó fogyasztók kiválasztásában térnek el. A teljesen adaptív FTK rendszereknek két alapvető lépése van:

- a rendszerben lévő teljesítményhiány kiszámítása
- ennek több terheléscsökkentési fokozatra való felosztása

Az adaptivitásnak több lehetséges megoldása is létezik. A [6] kutatásban egy topológia alapú adaptív FTK-t vizsgáltak, ahol a rendszerbomlási vonalakat határozták meg előre és ez alapján döntötték el, hogy mely fogyasztókat kell leválasztani és mely fogyasztókat nem a rendszerből. Másik [7][8] tanulmányokban a fogyasztók frekvenciaérzékenységén alapuló FTK-t definiáltak, ahol a hatásos teljesítményáramlás nyomon követésén alapuló adaptív FTK módszert vizsgáltak. Az alap elgondolás az volt, hogy a kisebb frekvenciaérzékenységi tényezővel rendelkező terheléseket előbb kapcsolják le rendszerből, mint a nagyobb frekvenciaérzékenységgel rendelkező fogyasztókat. A [9] és [10] tanulmányokban a gyűjtősíneken mérhető frekvenciaváltozás (Rate of change of frequency, ROCOF) és a leágazásoknál tapasztalható első frekvencia-derivált alapján hoztak döntéseket és javaslatokat az FTK működéséhez.

### 3.1. FTK algoritmus felépítése

A teljes adaptivitáshoz szükséges lépéseket a 5. ábra mutatja. A hagyományos FTK-tól indulva folyamatos új paraméterek bevezetésével képesek vagyunk eljutni az adaptív FTK-ig. A teljes adaptivitásnak hála ismerni tudjuk, hogy pontosan mekkora teljesítményt szükséges leválasztanunk, képesek vagyunk kevesebb fogyasztással nagyobb hatást kifejteni a frekvenciatranziensre és végezetül képesek vagyunk előre becsülni azt, hogy egyáltalán szükség lesz-e fogyasztói korlátozásra. Kutatásunkban először egy semi-adaptív, majd egy teljesen adaptív eljárást is vizsgáltunk, de jelen cikkben csak a félig adaptív, historikus adatokon alapuló FTK-val foglalkozunk.

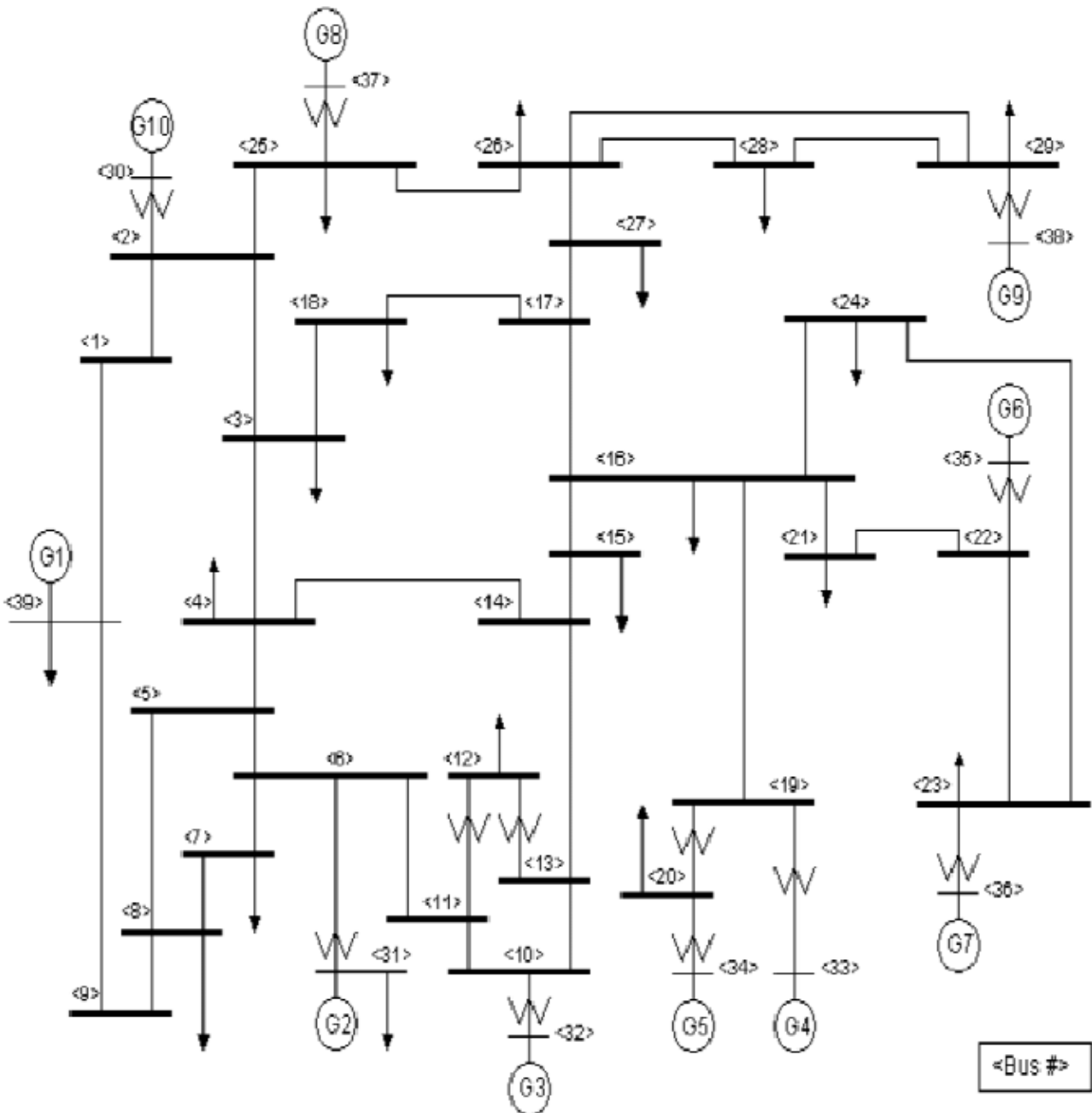


5. ábra – Hagyományos FTK-tól az adaptív FTK-ig

### 3.2. Szimulációhoz használt modell

A kutatás során a vizsgálatokat DigSILENT PowerFactory környezetben végeztük el az IEEE 39 gyűjtősínes modelljében. A 39 gyűjtősínes New England Rendszert (6. ábra) a [11] modell leírás tartalmazza, amely az Egyesült Államok északkeleti részén (New England területén) található nagyfeszültségű átviteli rendszer egyszerűsített modellje. A New England átviteli rendszer névleges frekvenciája 60 Hz, a hálózati feszültség szint pedig 345 kV (névleges feszültség). A hálózat 39

gyűjtősínnel, 10 generátorral, 19 fogyasztóval, 12 transzformátorral és 34 vezetékkel rendelkezett. A fogyasztók összteljesítmény igénye kb. 7000 MW volt. Azért ezt a rendszert választottuk a szimulációkhoz, mert az általa leképzett koncentrált 39 GYS-es hálózat terhelése közel azonos, a magyar rendszerével, továbbá FTK működésének vizsgálatához rendelkezett kellő mennyiségű fogyasztóval is, amelyeket eltérő viselkedésűvé választhattunk.



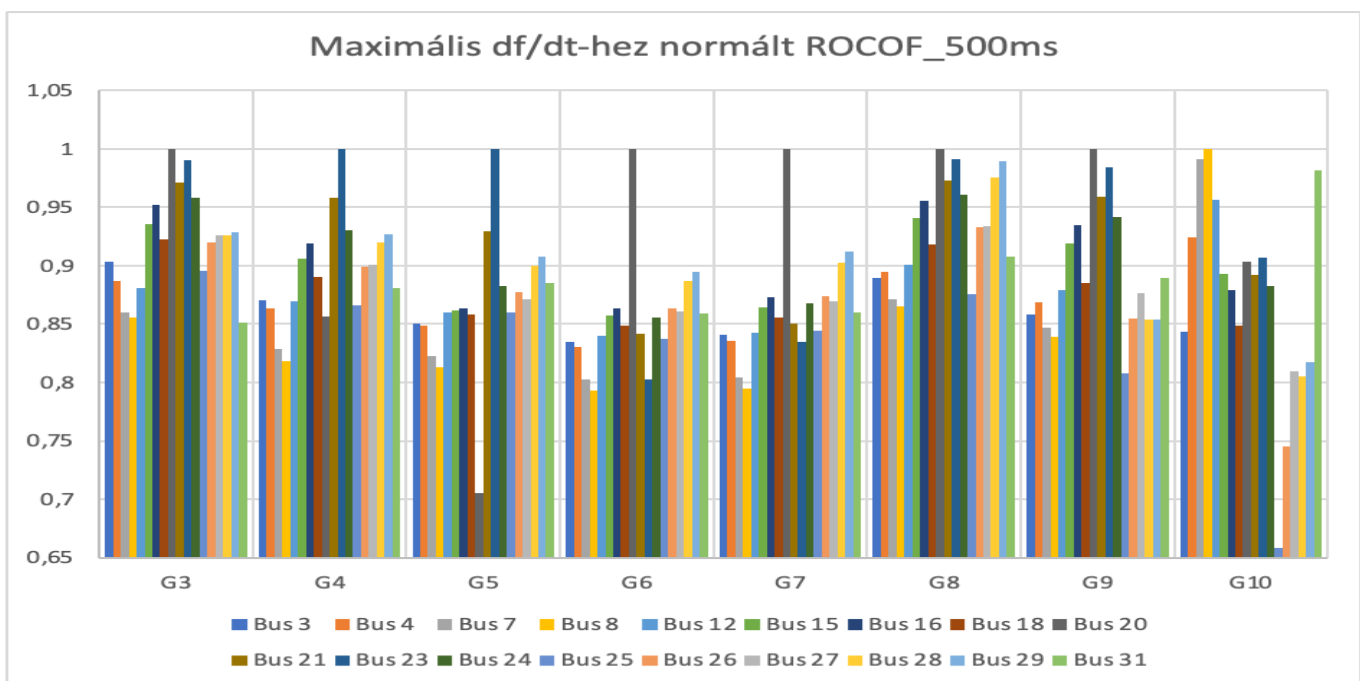
6. ábra – Az IEEE 39 gyűjtősínes modell topológiája [11]

### 3.3. Historikus frekvenciaváltozás (ROCOF) adatok használata

Elektromechanikus tranziens során a hálózat különböző pontjain eltérő frekvenciaértéket tapasztalunk. Jelen kutatásban azt feltételeztük, hogy a különböző leágazások gyűjtősínjein bekövetkező lokális frekvenciaváltozás összefüggésben van a leágazások frekvenciaérzékenységeivel, azaz azon KÖF vonalak, amelynek lokális frekvenciaváltozása lassabb, kisebb ROCOF-fal rendelkezik. Kisebb frekvencia gradienssel rendelkező leágazásokban nagyobb a frekvencia visszahatás, stabilitás szempontjából a „tehetetlenségükkel” javítják a rendszert.

Ezen okokból egy fokozat újra kiosztás a FTK-nál a KÖF leágazások tehetetlensége alapján indokolt lehet, amely eljárás tovább növelheti a rendszer stabilitását jelentős tranziens esetén. A historikus adatokon alapuló FTK esetében különböző zavarok mellett rögzítettük az egyes fogyasztói leágazások gyűjtősínének frekvencia értékeit a szimulációkban és azok alapján prioritizálási listát készítettünk aszerint, hogy statisztikailag mely ROCOF-ok voltak a legkisebbek és legnagyobbak.

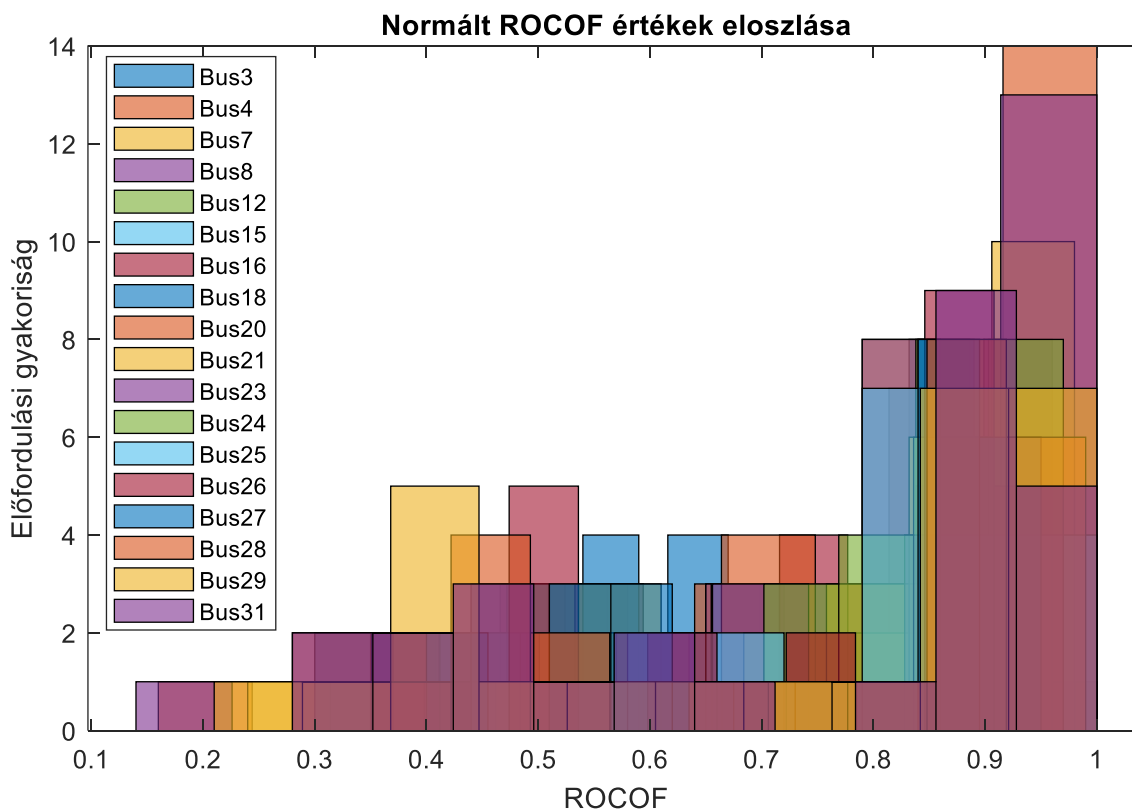
A szimuláció során minden fogyasztó azonos impedanciatartó 100%.ban dinamikus fogyasztó volt, azonban a hozzájuk tartozó  $k_f$  érték véletlenszerűen került kiosztásra 0 és 5 %/%-os tartományban, ezzel eltérőnek tekintve az egyes leágazások inerciáját. A zavarok az egyes generátorok (G3-G10) leválását jelentette a hálózatról. A ROCOF-ok alakulását a 7. ábra mutatja az egyes zavarok fényében. A ROCOF értékek az ábrán a maximális értékhez vannak viszonyítva, azaz mindegyik zavar esetében a legnagyobb érték 1 és a többi ehhez az értékhez van normálva. Erre azért van szükség, mert az egyes leváló generátorok nem azonos teljesítménnyel táplálnak be a rendszerbe, ezzel eltérő abszolút frekvenciaváltozást idézve elő. Ezen okból kifolyólag a „statisztikai” értékeléshez ezeket relatív alakba kellett hozni.



7. ábra – Fogyasztói leágazások frekvenciaváltozásának változása a leváló generátorok függvényében

1. táblázat – Normalizált ROCOF-ok átlagértékei

#	k_f	Bus. No	P MW	200ms	500ms	Átlag
1.	1,4	Bus 20	628	76,06%	94,63%	85,35%
2.	0	Bus 23	247,5	72,22%	94,37%	83,30%
3.	0	Bus 21	274	69,76%	92,90%	81,33%
4.	0	Bus 24	308,6	68,38%	91,87%	80,12%
5.	1	Bus 16	329	66,41%	91,44%	78,93%
6.	5	Bus 15	320	64,83%	90,79%	77,81%
7.	1	Bus 18	158	63,87%	88,89%	76,38%
8.	5	Bus 27	281	62,49%	89,21%	75,85%
9.	1	Bus 25	224	64,56%	84,70%	74,63%
10.	0	Bus 3	322	61,93%	87,13%	74,53%
11.	0	Bus 26	139	60,56%	88,41%	74,49%
12.	1,4	Bus 31	9,2	55,67%	89,81%	72,74%
13.	1,4	Bus 4	500	57,71%	87,76%	72,74%
14.	1	Bus 28	206	54,37%	90,63%	72,50%
15.	1,4	Bus 12	7,5	55,54%	88,65%	72,09%
16.	5	Bus 29	283,5	52,41%	91,31%	71,86%
17.	5	Bus 7	233,8	52,81%	85,97%	69,39%
18.	1	Bus 8	522	52,07%	85,33%	68,70%



8. ábra – Normált ROCOF értékek eloszlása



Az átlagértékekből számolt sorrend alakulását az 1. táblázat mutatja. A táblázatban a  $k_f$  tényező azt mutatja, hogy a véletlen kiosztás folyamán az adott leágazás fogyasztóihoz milyen érték társult. A  $k_f=1,4$  azt jelenti, hogy a frekvencia 1%-os változásához a fogyasztó 1,4%-kal képes változtatni a fogyasztását. A vizsgálat során a 500ms-es és 200ms-es időablakban is számítottuk a különböző zavarok esetén fellépő ROCOF-okat. A 8.ábrán megfigyelhető az, hogy egyértelműen vannak olyan leágazások, amelyek esetében több, akár 14-13 esetben is hozzájuk tartozott a legnagyobb ROCOF meredekség, azaz vannak egyértelműen olyan leágazások, amelyeket megéri korábbi fokozatba sorolni, mint a többi leágazást.

### 3.3.1. ROCOF alapú prioritizálási sorrend bevezetése

Az előző fejezetben meghatározott lista alapján egy 6 fokozatú FTK-t definiáltunk és vizsgáltuk azt, hogy a hagyományos FTK-hoz ez a historikus adatokon alapuló félig adaptív eljárás milyen eredményeket mutat nagy üzemzavar során. A hagyományos FTK kialakításánál csak arra figyeltünk, hogy a leválasztandó fogyasztói mennyiségek 5 %– 8% – 8% – 8% – 8% – 8%-nyi teljesítményt válasszanak le az összes fogyasztáshoz képest.

2. táblázat – Hagyományos FTK fokozatai

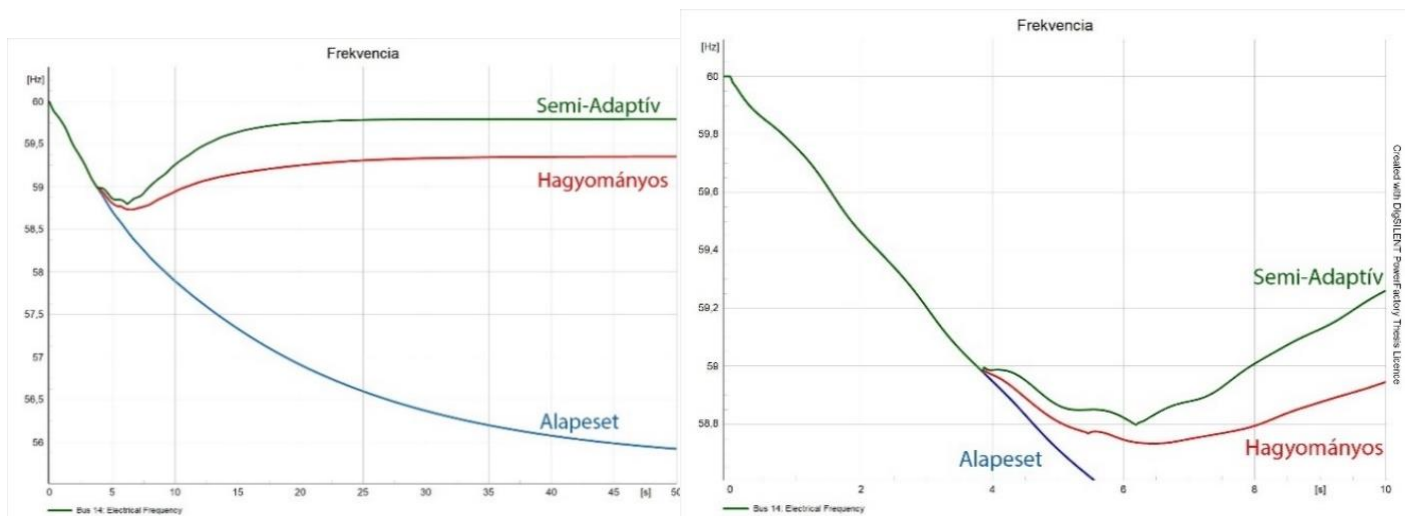
Hagyományos							
Fok. No.	Bus No.	P le [MW]	Q [Mvar]	%	Fok le	Szum le	Frek. [Hz]
1.Fok	Bus 3	322	2,4	5,3%	5,3%	5,3%	59
2.Fok	Bus 25	224	47,2	3,7%	7,8%	13,1%	58,8
	Bus 7	233,8	84	3,8%			
	Bus 31	9,2	4,6	0,2%			
	Bus 12	7,5	88	0,1%			
3.Fok	Bus 28	206	27,6	3,4%	8,0%	21,1%	58,6
	Bus 29	283,5	26,9	4,6%			
4.Fok	Bus 4	500	184	8,2%	8,2%	29,3%	58,4
5.Fok	Bus 29	283,5	26,9	4,6%	7,2%	36,5%	58,2
	Bus 18	158	30	2,6%			
6.Fok	Bus 8	522	176	8,6%	8,6%	45,1%	58

A vizsgált nagy üzemzavarok, amelyek FTK működést eredményeztek a következők voltak:

- 9-es és 10-es generátor kiesése  $\Delta P_{levált} = 1080$  MW (18%)
- 8, 9, 10-es generátor kiesése  $\Delta P_{levált} = 1620$  MW (27%)
- 7, 8, 9 és 10-es generátor kiesése  $\Delta P_{levált} = 2180$  MW (36%)
- Az első scenárióban az volt látható, hogy az első és második fokozat is működésbe lépett mind a hagyományos, mind az adaptív esetben, azonban, amikor a semi-adaptív FTK működött, a rendszerben kialakuló stabil frekvencia értéke magasabb volt és a zavarok lassabban játszódtak le a rendszerben.

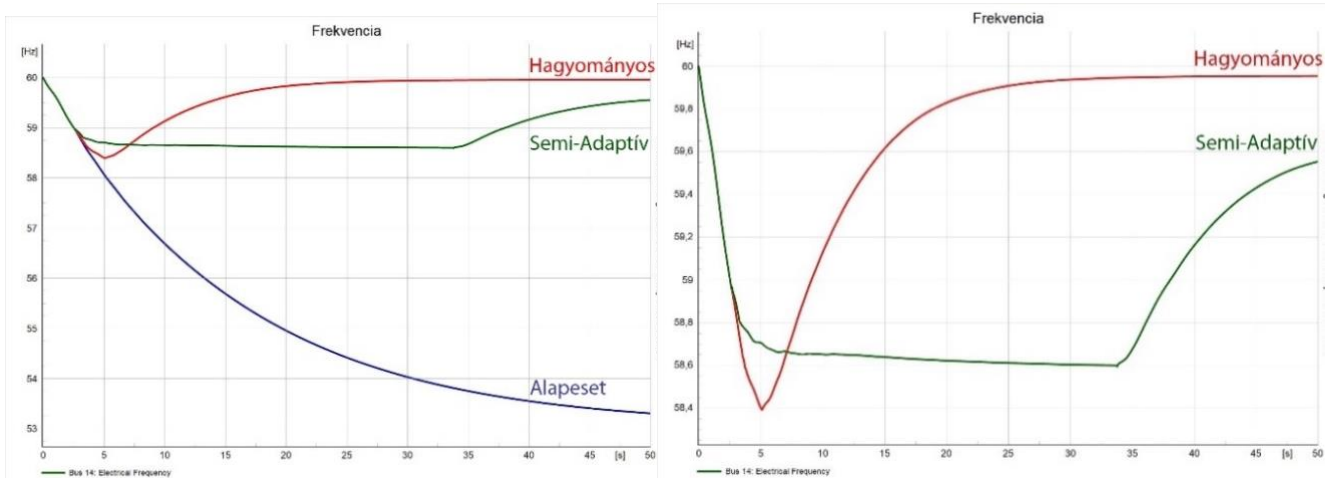
3. táblázat – Semi -Adaptív FTK fokozatai

Félig Adaptív - ROCOF alapján							
Fok. No.	Bus No.	P le [MW]	Q [Mvar]	%	Fok le	Szum le	Megjegyzés
1.Fok	Bus 24	308,6	-92,2	5,1%	5,1%	5,1%	
2.Fok	Bus 23	247,5	84,6	4,1%	8,6%	13,6%	
	Bus 21	274	115	4,5%			
3.Fok	Bus 15	320	153	5,2%	7,5%	21,1%	
	Bus 26	139	17	2,3%			
4.Fok	Bus 20	502,4	103	8,2%	8,2%	29,4%	80%-ka P_20
5.Fok	Bus 20	125,6	103	2,1%	7,5%	36,8%	20%-ka P_20
	Bus 16	329	32,3	5,4%			
6.Fok	Bus 18	158	30	2,6%	8,1%	45,0%	
	Bus 3	322	2,4	5,3%			
	Bus 12	7,5	88	0,1%			
	Bus 31	9,2	4,6	0,2%			



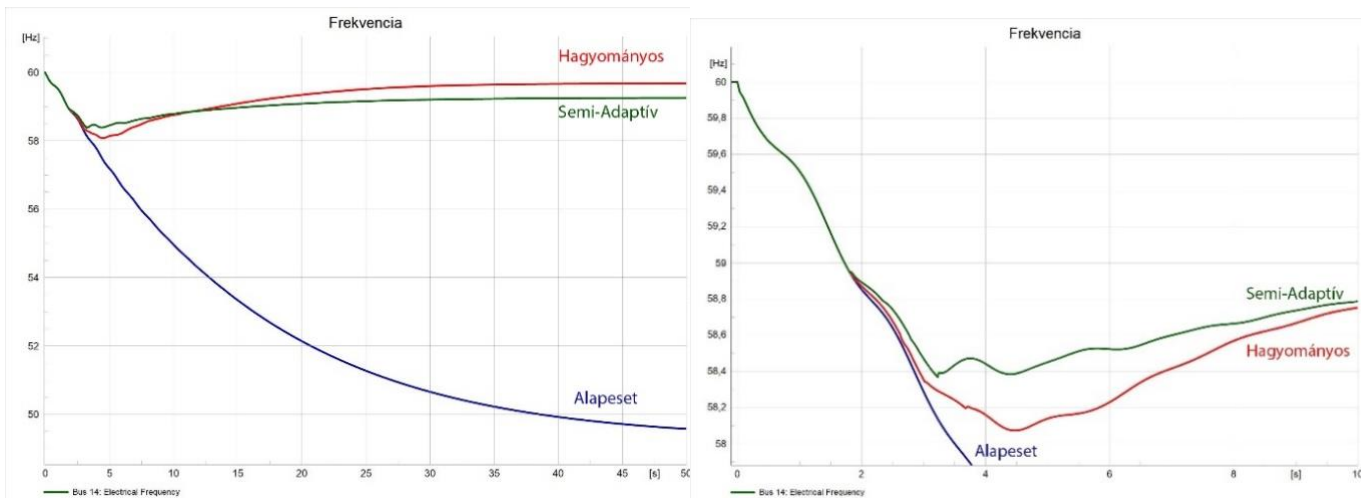
9. ábra – G9 és G10-es generátor leválásakor létrejövő frekvencia értéke 50 másodperces (bal oldal) és 10 másodperces (jobb oldal) időtartamban

Második scenárióban már a lekapcsolt teljesítmény nagyobb volt. Ennek eredményeit a 10. ábra mutatja. Ebben az esetben már az állandósult frekvencia értéke a hagyományos FTK működés mellett a nagyobb. Ez azzal magyarázható, hogy a hagyományos FTK beállításai mellett több fokozatnak kellett működésbe lépni, a negyedik fokozatban lévő 8%-nyi terhelés is leválasztásra került a hálózatról. Ennek ellenére a semi-adaptív esetben csak 3 fokozat lépett működésbe azért, hogy megelőzze a rendszerösszeomlást, ez azt jelenti, hogy az semi-adaptív FTK működéssel 502,4 MW fogyasztót „mentettünk meg” a lekapcsolódástól. Megfigyelhető továbbá az is, hogy a semi-adaptív esetben a második fokozat leválasztásakor a frekvencia értéke minimálisan csökken, szinte megáll, a minimális frekvenciacsökkenés miatt azonban 30 másodperc elteltével elérjük a harmadik fokozat indulási frekvenciáját.



**10. ábra – G8, G9 és G10-es generátor leválásakor létrejövő frekvencia értéke 50 másodperces (bal oldal) és 10 másodperces (jobb oldal) időtartamban**

Az utolsó scenárióban került leválasztására a legnagyobb termelői teljesítmény, amely a 7, 8, 9 és 10-es generátor leválásakor jött létre. Az eredményeket a 11. ábra mutatja. Az előző scenárióhoz hasonlóan alakultak az eredmények. A semi-adaptív FTK esetében a változások lassabban játszódtak le, valamint eggyel kevesebb fokozatnak kellett működnie, mint hagyományos esetben.



**11. ábra – G7, G8, G9 és G10-es generátor leválásakor létrejövő frekvencia értéke 50 másodperces (bal oldal) és 10 másodperces (jobb oldal) időtartamban**

Mindent összegezve belátható az, hogy a historikus ROCOF adatokon alapuló FTK rendszer használata esetén a rendszerben lejátszódó frekvenciaváltozás lassabb, valamint az FTK rendszerautomatikának kevesebb fogyasztót kell lekapcsolni a rendszerből a stabil állapot elérése érdekében.

## 4. KONKLÚZIÓ

### 4.1. Összefoglalás

A konvencionális forgó tömeggel rendelkező erőművek részarányának csökkenésével és a napelemes energiatermelés növekedésének köszönhetően a rendszer inerciája csökken. Megállapítható az, hogy az inercia csökkenés hatására a frekvencia gradiens növekedni fog és a legkisebb felvett frekvencia érték pedig csökkenni, ezzel kiszolgáltatottabbá téve a rendszert a különböző üzemzavaroknak.

Az FTK az utolsó védelmi elem, amelynek feladata megelőzni a rendszerösszeomlást. Az eljárás alapja az, hogy a frekvencia függvényében fogyasztókat választunk le a hálózatról, ezzel csökkentve a hiányzó teljesítmény mértékét a rendszerből. Az FTK-védelemnek különböző fajtái léteznek: hagyományos, félig adaptív és adaptív, melyek a leválasztandó fogyasztók kiválasztásában különböznek. A jelenleg életben lévő FTK rendszerautomatika KÖF vonalakat választ le a hálózatról a rendszer stabilitásának megőrzése érdekében, amelyben nincs figyelembe sem a leágazásban lévő fogyasztók visszahatása, sem a KÖF vonalra jellemző PV penetráció.

Ebben a tanulmányban IEEE 39 gyűjtősinmodellen vizsgáltunk egy félig-adaptív historikus ROCOF adatokon alapuló FTK működését és azt tapasztaltuk, hogy a hagyományos FTK-hoz képes azonos mértékű üzemzavarokat a semi-adaptív eljárás kevesebb fogyasztó leválasztásával orvosolt, azaz egyel/kettővel kevesebb fokozatnak kellett működnie megfelelő eredmény elérése érdekében. Továbbá azt tapasztaltuk, hogy a rendszerben maradó plusz inercia miatt a zavarok lassabban játszódtak le, amely szintén fontos eredmény.

### 4.2. Javaslatétel

A historikus FTK fokozatkiosztási tábla kialakításához, a rendszerben lejátszódott üzemzavarok hatására kialakuló lengések alatt tapasztalható lokális frekvenciaváltozási értékeket vizsgáltuk, majd hasonlítottuk össze. Ehhez azt feltételeztük, hogy az adott FTK bevont leágazások esetében lehetőség van a frekvencia értékének mérésére és rögzítésére. Ez, ha ma nem is leágazásonként, de állomásomként mérhető és el is menthető a feszültség jelalakjának képében. A valóságban történő adaptív-FTK megvalósításhoz csak bizonyos időpillanatok által rögzített frekvencia jelekre lenne szükségünk. A bizonyos időpillanatok, valamilyen frekvenciacsökkenési eseményt jelentenek, amelynek kellő nagysága (mekkora csökkenés szükséges) még általunk nem vizsgált. Erre további elemzések elvégzése indokolt lehet. Természetesen a rövid időn belül ismétlődő tranzienst jelenségek, egy nagy tehetetlenségű berendezést a védelem kivesz, visszatesz, majd megint kivesz zavarokat idézhetnek elő ebben a frekvencia kiértékelésben, amely miatt téves döntéseket hozhatunk.

## 5. HIVATKOZÁSOK

- [1] Juhász Kristóf Péter, Táci István, Sztráda Gyula, „Adaptív frekvenciafüggő terheléskorlátozás a csökkenő inerciájú villamosenergia-rendszerben” KLENEN 2023 konferencia, Energiagazdálkodás 64.évfolyam 2023. KLENEN különszám pp. 87-91, ISSN 0021-0757
- [2] Nemzeti energiastratégia 2030, (hozzáférés:2022. 04. 18. 15:15)  
[https://www.enhat.mekh.hu/s/nemzeti\\_energiastrategia\\_2030.zip](https://www.enhat.mekh.hu/s/nemzeti_energiastrategia_2030.zip)

- [3] Nemzeti Energia- és Klímaterv (hozzáférés: 2022. 04. 18. 15:18)  
[https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/hu\\_final\\_necp\\_main\\_hu.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/hu_final_necp_main_hu.pdf)
- [4] Tielens, Pieter. Operation and Control of Power Systems with Low Synchronous Inertia. 2017.
- [5] Faludi Andor, Szabó László: Villamosenergia-rendszer üzeme és irányítása egyetemi jegyzet, 2011.
- [6] D. T. Duong and K. Uhlen, "A topology-based scheme for adaptive underfrequency load shedding," 2017 IEEE Manchester PowerTech, 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/PTC.2017.7980854.
- [7] J. Yan, C. Li and Y. Liu, "Adaptive load shedding method based on power imbalance estimated by ANN," TENCON 2017 - 2017 IEEE Region 10 Conference, 2017, pp. 2996-2999, doi: 10.1109/TENCON.2017.8228375.
- [8] L. Shun, L. Qingfen and W. Jiali, "Dynamic optimization of adaptive under-frequency load shedding based on WAMS," 2016 IEEE Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference, 2016, pp. 920-926, doi: 10.1109/ITNEC.2016.7560496.
- [9] Amin Mokari-Bolhasan, Heresh Seyedi, Behnam Mohammadi-ivatloo, Saeed Abapour, Saeed Ghasemzadeh, „Modified centralized ROCOF based load shedding scheme in an islanded distribution network”, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 62, 2014, Pages 806-815, ISSN 0142-0615, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.05.029>.
- [10] U. Rudez and R. Mihalic, "Monitoring the First Frequency Derivative to Improve Adaptive Underfrequency Load-Shedding Schemes," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 26, no. 2, pp. 839-846, May 2011, doi: 10.1109/TPWRS.2010.2059715.
- [11] 39 Bus New England System DlgSILENT PowerFactory [online] <https://pdfcoffee.com/39-bus-new-england-system-pdf-free.html>

Katona Mihály<sup>1)</sup> és Dr. Orosz Tamás<sup>1)</sup>  
katona.mihaly@sze.hu

<sup>1)</sup>Teljesítményelektronika és Villamos Hajtások Tanszék, Széchenyi István Egyetem

## Villamos gépek a körforgásos gazdasági modellben

**Absztrakt** – A gyártók számára már nem csak a törvényhozói intézkedések, hanem a vásárlók igényei is nyomást gyakorolnak a fenntarthatósági intézkedések realizálására. A kutatási munka célja meghatározni a körforgásos gazdasági modellben alkalmazott fenntarthatósági szempontok figyelembevételének hatását a villamos gépek teljes életciklusára. Az elemzés szakirodalmi áttekintés nyújt az ipar és az akadémia jelenlegi álláspontjáról a fenntarthatósági kérdések témakörében villamos gépek szempontjából. Az eddig alkalmazott lineáris gazdasági modell nem adta szükségességét annak, hogy a termék megvalósítása során annak utóélete is tervezési szempont legyen. A körforgásos gazdasági modellben a villamos gép szétszerelhetősége annak életciklusa végén egy meghatározó szempont. Továbbá olyan alapanyagok és komponensek alkalmazása is elvárás, amelyek a villamos gép teljes életciklusára vetítve alacsony környezeti terheléssel bírnak, és újrahasznosításuk megoldott vagy tervezett. A hajtáslánc hatásfokának növelése továbbra is egy meghatározó szempont a használatból adódó villamosenergia-felhasználás csökkentésére, de a teljes életciklusra vetített környezeti terhelés csökkentése meghatározó szerepet fog betölteni az iparágban.

**Abstract** – *Manufacturers are under pressure to implement sustainability measures from the political side and customer demands. This research aims to determine the impact of sustainability considerations in the circular economy model on the life cycle of electrical machines. The analysis provides a literature review of the current position of industry and academia on sustainability issues of electrical machines. The linear economy model used so far does not include the need to consider the after-life of the product in its design. In the circular economy model, dismantling an electrical machine at the end of its life cycle is a key consideration. It also requires using materials and components that have a low environmental impact over the entire life cycle of the electrical machine and that are recyclable or designed for recycling. Increasing the efficiency of the drive chain will remain a key aspect in reducing the electricity consumption resulting from its use, but reducing the whole life cycle environmental burden will play a key role in the industry.*

**Címszavak: körforgásos gazdasági modell, villamos forgógépek**

### 1. BEVEZETÉS

A közlekedési szektor környezeti terhelésének jelentős csökkentése a személygépkocsik fenntartható villamosításával lehetséges. Mivel a személygépjárművek fejlesztési ideje és



élettartama rövidebb, mint a haszongépjárművéké vagy a tömegközlekedési eszközöké, ezért az újszerű tervezési megoldásokból adódó innovatív termékek rövid távon jelentős piaci térnyerésre tehetnek szert az e-mobilitás területén [1]. Fogyasztói oldalról a Deloitte multinacionális vállalat készített egy tanulmányt 2021-ben a megfigyelhető elektromobilitással kapcsolatos trendekről, amelyben Kína, Németország, India, Japán, Koreai Köztársaság és az Egyesült Államok fogyasztóinak igényeit mérték fel régióként 597 és 906 közötti főt számláló mintaszámmal [2]. Hazai viszonylatban hasonló kutatást a Jövő Mobilitása Szövetség készített 704 fő mintaszámmal ugyanabban az évben [3]. Az eredmények alapján a kitöltők minden esetben a magas vételárat, a töltési infrastruktúra hiányát és a járművek alacsony hatótávolságát jelölték meg, mint a legnagyobb aggodalmak a teljesen elektromos járművekkel kapcsolatban, ahogyan azt az 1. táblázat is mutatja.

**1. táblázat – Aggodalmak az elektromos autókkal szemben**

	Egyesült Államok	Németország	Japán	India	Magyarország
Hatótáv	28%	28%	22%	13%	15%
Töltési infrastruktúra hiánya	25%	22%	29%	26%	16%
Ár-érték arány	20%	16%	23%	16%	39%
Töltési idő hossza	13%	13%	15%	14%	15%
Biztonság	8%	12%	10%	25%	4%
Szűk kínálat	4%	5%	1%	6%	10%
Egyéb	2%	4%	0%	0%	1%

A Jövő Mobilitása Szövetség készített kutatásban szerepel egy a teljesen elektromos járművek mellett szóló érvek felsorolása, amelyben a kitöltők főleg a légszennyezettség csökkentésével kapcsolatos aspektusokat és az alacsonyabb üzemeltetési költséget jelölték meg. A Deloitte által 2023-ban készített ugyanazon felmérésben az alacsony üzemeltetési költségek továbbra is minden esetben megelőzték a fenntarthatósági aspektusokat a megkérdezettek prioritási listájában [4]. A fenntarthatósági kérdések hátrébb sorolása – Németország kivételével – korrelációban állhat a Covid járvány és az Orosz-Ukrán háború által okozott gazdasági recesszió hatásaival.

**2. táblázat – Aggodalmak az elektromos autókkal szemben**

Tényező	Egyesült Államok	Németország	Japán	India	Magyarország
Üzemeltetési költség	1	1	1	1	3
Vezetési élmény	2	4	3	2	2
Fenntarthatóság	3	2	5	4	4
Karbantartási költség	4	5	4	3	5
Állami támogatások	5	3	2	5	6
Légszennyezettség csökkentése	6	6	6	6	1

A magyarországi elektromobilitási stratégiát a Jedlik Ányos terv foglalja össze, amelynek felülvizsgálatát Magyarország Kormánya a 1445/2019. (VII. 26.) Kormány határozatban fogadta el [5]. A dokumentum célja többek között a hazai járműipar innovációs potenciáljának erősítése és az elektromos járművek elterjedésének támogatása a szakpolitikai keret meghatározásával. Az Európai Bizottság részéről a Fenntartható és intelligens mobilitási stratégia fogalmazza meg az elektromobilitással kapcsolatos fenntarthatósági irányelveket [6]. A dokumentum említést tesz a körforgásos gazdasági modell bevezetésének ösztönzéséről. Továbbá a dokumentum

megfogalmazza, hogy az elektromos járművek környezeti terhelésének csökkentéséhez a teljes életciklusra vett követelmények meghatározása szükséges, ideértve a nyersanyagok etikus és fenntartható beszerzését [7].

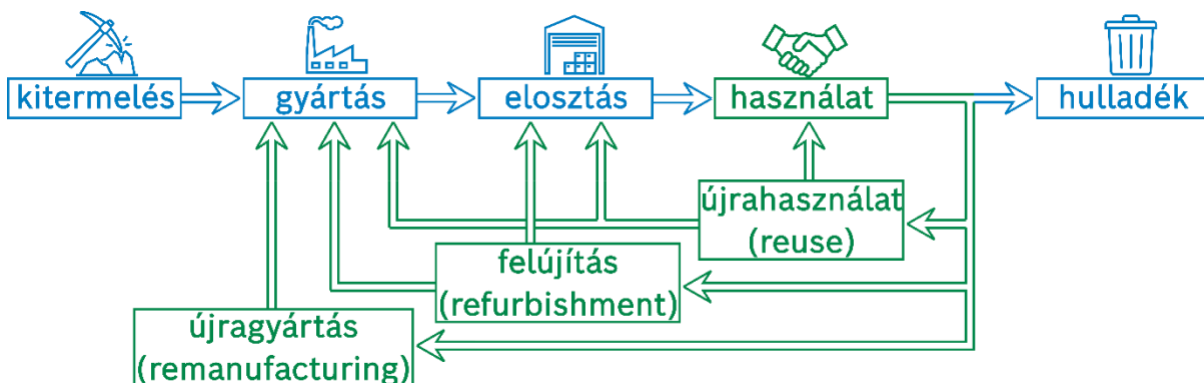
Jelen publikáció a körforgásos gazdasági modell követelményeinek hatását vizsgálja a villamos gépek tervezési folyamataira és a termék életciklusának végén eszközölhető újrahasznosítási folyamatokra. A második fejezetben a körforgásos gazdasági modell és annak kritikája kerül bemutatásra. A harmadik fejezet pedig a villamosgép tervezés aspektusait veszi számon.

## 2. A KÖRFORGÁSOS GAZDASÁGI MODELL BEMUTATÁSA ÉS KRITIKÁJA

A lineáris gazdasági modell „legyárt, felhasznál és kidob” gondolatmenetével szemben a körforgásos gazdasági modell azt mondja ki: „Használd újra, amit tudsz; Amit nem lehet hasznosítani újra; Javítsd meg, ami elromlott; Amit nem lehet megjavítani, azt gyárts újra” [8]. A körforgásos gazdasági modell olyan regeneratív rendszer, amelyben az erőforrásbevitel, a hulladék termelés és a környezetszennyezés csökkentése a cél zárt folyamatok kialakításával. A koncepció az elmúlt évtizedben kezdett egyre nagyobb figyelmet kapni. A körforgásos gazdaság gyűjtőnév az akadémiában és az iparban egyaránt fogalmi kavargódáshoz vezetett, amely feloldására Kirchherr et al. tett kísérletet [9]. A kutatás során 114 különböző definíciót vizsgáltak meg, melynek eredményeképpen megállapították, hogy nincs sem ipari, sem akadémiai szintű egyetértés, és ez a tetszőleges fogalmi meghatározás hátráltatja a terület fejlődését. Ennek okán a modellt több kritika érte, amelyet Corvellec et al. [10] gyűjtött össze és elemzett ki. A tanulmány alapján megállapítható, hogy a körforgásos gazdasági modell az 1990-es és 2000-es években népszerűen alkalmazott „fenntartható fejlődés” és „fenntartható növekedés” alatt értett és ahhoz kapcsolódó koncepciókat kapcsolja össze.



1. ábra – A lineáris gazdasági modell vázlata



2. ábra – A körforgásos gazdasági modell vázlata

Kiemelt kritika, hogy a „körforgásos” kifejezés félrevezető lehet, hiszen az ideális körforgásos gazdasági modellben nem létezik hulladék, mivel minden folyamat zárt, de gyakorlati szempontból lehetetlen minden anyagot többször újrahasznosítani. Az újrahasznosítási folyamat nem veszteségmentes. Például a mechanikus szétválasztás során a hasznos anyag egy része a szűrőn fennakadhat, keveredve szűrendő anyagokkal, továbbá a kémiai folyamatok során is keletkezhet hasznosíthatatlan vegyület. A koncepció nem veszi figyelembe a hulladékfeldolgozás komplexitását. Egy másik kritika a gyakorlati megvalósításra kidolgozott folyamatok hiánya. Törvényhozói szinten az érdekelt felek, nagyrészt az ipari szereplők bevonásának hiányát emelik ki a szerzők. Szervezeti szinten a megtérülés kiszámíthatóságának hiányát emelik ki, hiszen a lineáris gazdasági modell esetén egy termék eladása jelentheti annak sikerét, amíg a körforgásos gazdasági modell esetén ez a termék életciklusa végén határozható meg. Reagálva gyártói felelősség teljes életciklusra vett kiterjesztésére, egy lehetséges ajánlás a fogyasztó felhasználói szerepének megerősítése a tulajdonjog csökkentésével, ezzel elősegítve fogyasztói szinten a zárt folyamatok stabilitásának megőrzését. Ez a konvencionális tulajdonosi gondolkodásmóddhoz képest nagy mértékben eltérő, amely változás ellenállást vált ki a fogyasztókból. Végső soron kevés olyan termék van forgalomban jelenleg is, amely ugyanazon régióban gyártott, eladott, felhasznált és újrahasznosított vagy hulladékként kezelt. Ennek okán a termékek szállítása is szignifikáns energiafelhasználás növekedéshez vezethet [10]. A kritikák ellenére a Cambridge Econometrics et al. [11] tanulmánya szerint az Európai Bizottság által megnevezett körforgásos gazdasági modell bevezetését megcélzó intézkedések [6] implementálása 2030-ig további 0,5 %-kal növelheti az EU bruttó hazai termék (GDP) mutatóját, és mintegy 700000 új munkahelyet teremthet. Emellett 600 milliárd eurós megtakarítást jelenthet az európai vállalkozások számára. Továbbá termelékenység 30 %-os növekedését és az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkenését vetíti előre [12].

### **3. A KÖRFORGÁSOS GAZDASÁGI MODELL VILLAMOS GÉPEK ESETÉN**

Az Európai Környezetvédelmi Ügynökség 2018-ban készített egy tanulmányt az elektromos autók teljes életciklusának vizsgálatáról és a körforgásos gazdasági modell ráhatásáról. A tanulmány az alábbi változókat nevezte meg, amelyek befolyásolják az elektromos autók előnyeit a belső égésű motorral rendelkező társaikhoz képest: a felhasználáshoz megfelelő jármű választása, a felhasználási szokások, a villamosenergia előállításának módja, az újrahasznosíthatóság és jármű komponenseinek műszaki paraméterei. Az életciklusra vetített környezeti terhelés csökkentésének fő lehetőségeként az élethosszig tartó futásteljesítmény növelését nevezik meg a szerzők. Továbbá a gyártói törekvés az elektromos autók zero kilométerre vetített, vagyis a felhasználás előtti, a gyártás során fellépő környezeti terhelésének csökkentése [13]. Ennek előnye, hogy a teljes életciklusra vetített kibocsátási cél elérése kedvezőbb értékről valósítható meg, csökkentve a felhasználásból eredő töltési és vezetési stílus béli bizonytalanságok hatását. A másik kiemelt szempont az, hogy a terméket úgy tervezzék meg, hogy annak már a kialakítása során az újrahasznosítási lehetőségek figyelembe legyenek véve [14].

Jelenleg a szakirodalomban nem található olyan esettanulmány vagy útmutató, amely ezt a területet lefedné. Ennek oka valószínűsíthető, hogy a kiforrott újrahasznosítási technológiák hiányában rejlik. A villamos gépek komplexitása és változatossága kis mértékű automatizálásra ad lehetőséget, amely alacsony termelékenységhöz és kevésbé egységes folyamatokhoz vezet, csökkentve a termék minőségét. Továbbá kevés adat áll rendelkezésre a használt termékekről, és hiányoznak

kidolgozott módszertanok annak meghatározására, hogy melyik a legjobb alkalmazandó folyamat a villamos gépek életciklusa végén [14].

Az életciklus végén alkalmazható folyamatok megvalósításáról ezzel szemben, az elmúlt években több szakirodalmi áttekintés és esettanulmány is született. Villamos gépek esetén a legtöbbször alkalmazott életciklus végi stratégiák az alábbiak: az újrafelhasználás a villamos gép komponenseinek tisztítását, vizsgálatát és azok új termékbe való beépítését jelenti. Az újragyártás és a felújítás viszont összetettebb élettartam-hosszabbítási stratégiák. Mindkét stratégia a használt termék alkatrészsztintű helyreállítására összpontosít. A felújítás célja a termék eredeti állapotának visszaállítása a specifikációk megtartása mellett. Az újragyártás ezzel szemben technológiailag fejlettebb komponensek beépítését jelenti az eredeti specifikációknak való megfelelés vagy új követelmények elérése érdekében. Az újragyártásnak magasabb követelményeket kell teljesítenie, mint a felújításnak. Az újragyártott termék minőségének el kell érnie az új termék minőségét. Az újrahaznosítás az előbbiekkal ellentétben nem élettartam-meghosszabbító stratégia, hanem a termék életciklusának végén, annak komponenseinek kezelése nyersanyag szinten [15].

Egy kiemelkedő esettanulmány Li et al. [16] munkássága, amely aszinkron gép állandó mágneses szinkrongéppé történő újragyártásának folyamatát mutatja be a körforgásos gazdasági modell szerint. A tanulmány egy elavult, nagy teljesítményű (110 kW) ipari aszinkron gép újragyártását mutatja be annak cseréje helyett. Az alacsony hatásfokú és hibás elektromos gép szétszerelése után az eredeti gép használható alkatrészeinek újrafelhasználásával és például a csapágyak, a tekercselés és a rotor cseréjével, továbbá a legújabb vagy fejlett gyártási technológiák alkalmazásával megvalósítható egy nagy hatásfokú villamos gép újragyártása. A nagy teljesítményű alkalmazások esetében a gép újragyártása jelentősen kevesebbe kerülhet, mint egy új terméké, miközben a gyártási folyamat környezeti terhelése minimálisra csökkenthető. Az újragyártott villamos gépek előnye, hogy olcsóbbak, mint egy új termék, nincs szükség új illesztésre azonos hasznosítás esetén, és az energiamegtakarítás nagyobb, mint eredetileg. A felsorolt előnyök tovább növelhetők egy adott termék nagy darabszámú újragyártásának esetén. Különböző termékek kis darabszámú újragyártása ellenben lényegesen komplexebb feladat eszközpark, személyzet és módszertan szempontjából is.

A folyamat roncsoló és roncsolásmentes eljárásokra osztható. Roncsolásos eljárás esetén a komponens nem képes ellátni eredeti funkcióját, így annak újrahaznosítása lehetséges. Roncsolásmentes eljárások esetén a megfelelő állapotban lévő komponens képes ellátni eredeti funkcióját, így az újrafelhasználható. A szerzők ajánlást tesznek arra az esetre, amennyiben a villamos gép állandósult üzemben vagy változó terhelés mellett üzemel. Mindkét esetben kiemelik a csapágyak cseréjét, a hűtés korszerűsítését és a tekercselés korszerűsítését, amíg az utóbbiban a rotor cseréjét javasolják a hatásfok és a teljesítménytényező javítása érdekében. Az újragyártás eredménye egy csökkentett veszteségek mellett üzemelő villamos gép, amely az adott időpontban történt számítások alapján évi 18000 \$ megtakarítást eredményez a felhasználó számára, amely összemérhető az új rotor anyagköltségével [16].

## 4. KONKLÚZIÓ

A körforgásos gazdasági modell elvárásainak magasszintű megfogalmazása az elmúlt évek során megtörtént az Európai Unió felelős szervezetei által. Ezen elvárások implementálása az ipari gyakorlatba jelenleg is kidolgozás alatt van. A körforgásos gazdasági modellt érő kritikák nagy része a megvalósítás nehézségeit emelik ki. Az elektromobilitás elterjedésével az igény a villamos gépek iránt tovább növekszik. Mivel az ágazat nem rendelkezik kiforrott technológiákkal, ennek okán a körforgásos gazdasági modell elvárásait – mint az életciklus végén alkalmazandó stratégiák figyelembevételére már a tervezés során – be lehetséges építeni az ipari folyamatokba. Jelenleg a szakirodalomban nem található olyan esettanulmányok vagy módszertanok, amelyek ilyen jellegű tervezési folyamatot írnak le. Ennek lehetséges okai az automatizált szétszerelésre alkalmas robotokkal felszerelt gépsorok és az életciklus végén alkalmazandó stratégiák kiválasztási metodikájának hiánya. Várhatóan mind a tervezési és mind az életciklus végi folyamatok népszerű kutatási területté fognak válni.

## 5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-23-3-I-SZE-4 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

## 6. HIVATKOZÁSOK

- [1] European Environment Agency, Electric vehicles from life cycle and circular economy perspectives: TERM 2018: Transport and Environment Reporting Mechanism (TERM) report. Publications Office, 2018. doi: 10.2800/77428
- [2] Deloitte, Global Automotive Consumer Study, 2021. [Online] Available: <https://www2.deloitte.com/in/en/pages/consumer-business/articles/global-automotive-trends-millennials-consumer-study1.html>, Accessed: 2023.08.01
- [3] Jövő Mobilitása Szövetség, 2021. [Online] Available: <https://www.jovomobilitasa.hu/kutatas-elektromos-jarmuvek>, Accessed: 2023.08.01.
- [4] Deloitte, Global Automotive Consumer Study, 2023. [Online] Available: <https://www2.deloitte.com/us/en/pages/consumer-business/articles/global-automotive-consumer-study.html>, Accessed: 2023.08.01
- [5] Innovációs és Technológiai Minisztérium, Hazai Elektromobilitási Stratégia, 2019. [Online] Available: [https://www.jovomobilitasa.hu/\\_upload/editor/Strategiak/Hazai\\_elektromobilitasi\\_strategia.pdf](https://www.jovomobilitasa.hu/_upload/editor/Strategiak/Hazai_elektromobilitasi_strategia.pdf), Accessed: 2023.08.01.
- [6] Európai Bizottság, Fenntartható és intelligens mobilitási stratégia – az európai közlekedés időtálló pályára állítása, 2020. [Online] Available: [https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/mobility-strategy\\_en](https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/mobility-strategy_en), Accessed: 2023.08.01.
- [7] T. Vajsz, Cs. Horváth, A. Geleta, V. Wendler, R. P. Bálint, M. Neumayer, D. Z. Varga, "An investigation of sustainable technologies in the field of electric mobility," 2022 IEEE 1st International Conference on Cognitive Mobility (CogMob), Budapest, Hungary, 2022, pp. 000057-000066, doi: 10.1109/CogMob55547.2022.10118323.
- [8] W. R. Stahel, "The circular economy," Nature, vol. 531, no. 7595, pp. 435–438, Mar. 2016, doi: 10.1038/531435a
- [9] J. Kirchherr, D. Reike, and M. Hekkert, "Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions," Resources, Conservation and Recycling, vol. 127, pp. 221–232, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>.
- [10] H. Corvellec, A. F. Stowell, and N. Johansson, "Critiques of the circular economy," Journal of Industrial Ecology, vol. 26, no. 2, pp. 421–432, 2022, doi: <https://doi.org/10.1111/jiec.13187>.
- [11] Cambridge Econometrics, Trinomics and ICF, Impacts of circular economy policies on the labour market, 2018 [Online] Available: <https://circulareconomy.europa.eu/platform/en/knowledge/impacts-circular-economy-policies-labour-market>, Accessed: 2023.08.04.

- [12] Y. Kalmykova, M. Sadagopan, and L. Rosado, "Circular economy – From review of theories and practices to development of implementation tools," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 135, pp. 190–201, 2018, doi: 10.1016/j.resconrec.2017.10.034.
- [13] Cs. Horváth, The Current Situation of the Rare-Earth Material Usage in the Field of Electromobility. In: Jármái, K., Cservenák, Á. (eds) *Vehicle and Automotive Engineering 4. VAE 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. 2022, [https://doi.org/10.1007/978-3-031-15211-5\\_41](https://doi.org/10.1007/978-3-031-15211-5_41)
- [14] D. Tiwari, J. Miscandlon, A. Tiwari, and G. W. Jewell, "A Review of Circular Economy Research for Electric Motors and the Role of Industry 4.0 Technologies," *Sustainability*, vol. 13, no. 17, 2021, doi: 10.3390/su13179668
- [15] Y. Chen and F. Chen, "On the Competition between Two Modes of Product Recovery: Remanufacturing and Refurbishing," *Production and Operations Management*, vol. 28, no. 12, pp. 2983–3001, 2019, doi: <https://doi.org/10.1111/poms.13082>.
- [16] Z. Li, S. Che, P. Wang, S. Du, Y. Zhao, H. Sun and Y. Li, "Implementation and analysis of remanufacturing large-scale asynchronous motor to permanent magnet motor under circular economy conditions," *Journal of Cleaner Production*, vol. 294, p. 126233, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126233.



Ludman Levente<sup>1)</sup>; Dr. Mátrai Tamás<sup>2)</sup>; Dr. Hartmann Bálint<sup>3)</sup>

levente.ludmann@gmail.com

<sup>1)</sup>BME Villamos Energetika Tanszék

<sup>2)</sup>Mobility Energy Innovations Kft.

<sup>3)</sup>BME Villamos Energetika Tanszék

## Publikus villamosautó-töltőállomások területi elemzése

**Absztrakt** – Kutatásunkban egy új megközelítés alapján vizsgáljuk a már meglévő publikus töltőpontokat, melynek alapjául a töltőpontot körülvevő terület szocio-ökonómiai paraméterei szolgálnak. Ehhez először a nemzetközi szakirodalomban kezdtük meg a keresést. Itt nem találtunk hasonló problémafelvetést, ezért a témához leginkább közel álló tanulmányok feldolgozásával gyűjtöttünk olyan szocio-ökonómiai és földrajzi paramétereket, melyek alapján jellemezhető egy publikus töltőállomás két legfontosabb paramétere, a töltési idő és a leadott töltési energia. Következő lépésként kijelöltük, mely paraméterek felhasználásával érdemes vizsgálni a hazai publikus töltőállomásokat. Két nagy csoportot különböztettünk meg, lakossági statisztikákat, valamint épülettípus jellemzőket, melyekkel a töltő körüli épített környezetet van lehetőségünk jellemezni. Végül megalkottuk lineáris regressziós modellünket. Ennek első lépéseként egy töltési eseményeket tartalmazó adatbázis rendezése volt a feladat, majd a rendelkezésre álló töltési adatok és térképes adatbázis alapján a jellemezhető töltőállomások kiválasztása. Az így létrehozott modell segítségével lehetőség nyílik ajánlást adni a jövőben telepítendő töltőállomások méretezésére, mely hasznos információ lehet az illetékes elosztóhálózat-üzemeltető számára a tervezések során.

**Abstract** – *In our research, we use a new approach to investigate existing public charging points based on the socio-economic parameters of the area surrounding the charging point. We first started our search in the international literature. We did not find a similar problem definition, so we collected socio-economic and geographical parameters that characterise the two most important parameters of a public charging station, the charging time and the charging energy delivered, by working through the studies that are closest to the subject. Next, we identified the parameters that should be used to study domestic public charging stations. We distinguished between two broad groups, population statistics and building type characteristics, which allow us to characterise the built environment around the charging station. Finally, we constructed our linear regression model. The first step was to sort a database of filling events and then to select the filling stations that could be characterised based on the available filling data and the map database. The resulting model will allow to recommend the sizing of future charging stations to be installed, which will be useful information for the responsible distribution network operator during the planning process.*

**Címszavak:** modellezés, töltőinfrastruktúra, villamos autó

## 1. BEVEZETÉS

Annak ellenére, hogy a villamos autók száma nőtt a piacon az elmúlt évtizedben, a technológia mégsem az előzetesen jóslott ütemben terjed. Ezen a ponton érdemes megvizsgálni a technológiai elfogadást motiváló és akadályozó tényezőket [1]. 2013-ban [2] kutatás arra a következtetésre jutott, hogy ezen technológiák még mindig nem olyan jól megalapozottak, mint a hagyományosak, elsősorban a fogyasztói aggályok miatt, melyek legfőképp a függetlenséggel és az újratöltési korlátozásokkal kapcsolatosak. Továbbá [3] kutatás kijelenti, hogy mivel a villamos autók hatótávja alacsonyabb, mint a hagyományos belső égésű motorral (Internal Combustion Engine - ICE) szerelt autóké, a töltési idő és a töltő elérhetősége is akadályozza a villamos autók elterjedését.

Az európai elektromos járműflotta gyors bővülése megköveteli a meglévő infrastrukturális képességek részletes tanulmányozását, ami kulcsfontosságú a piac jövőbeli fejlődése szempontjából. Ebben az iparágban az infrastruktúra elsősorban a töltőállomások hálózatát jelenti, melytől nagyban függ az e-mobilitás is [4]. Figyelembe véve, hogy a töltő infrastruktúra jelentős akadálya a villamos autók nagyobb arányú piaci elterjedésének, valamint jelentős aggodalmat okoz a fogyasztóknak, amikor preferenciáik megváltoztatásáról van szó, a fenti követelmény különösen érvényes.

2018-ban [5] kutatás szerzői egy vegyes felhasználói egyensúlyi (Mixed User Equilibrium - MUE) modellt javasoltak cikkükben – amely magában foglalja a töltési viselkedést és a töltőállomásokat is – annak érdekében, hogy megvizsgálják a villamos autók alkalmazásának optimális stratégiáit. Eszerint a töltést igénylő villamos autóknak át kell haladniuk egy töltőállomáson az ingázási útvonalukon, és a legalacsonyabb kombinált utazási és töltési költségekkel jellemezhető útvonalakat kell választaniuk. Ezzel szemben a belső égésű motorral szerelt járművek, illetve a töltési igénnyel nem rendelkező villamos autók egyszerűen a legalacsonyabb utazási költségekkel járó útvonalakat választják. Az eredmények azt mutatják, hogy a tisztán villamos autók (BEV) vezetőinek útvonalát és töltési preferenciáit befolyásolják az útvonal jellemzői, a villamos autóval kapcsolatos változók, a töltési jellemzők, továbbá szocio-ökonómiai tényezők. A hagyományos útvonaljellemzők, mint az útvonal utazási ideje és költsége, valamint a gyors töltéssel kapcsolatos változók, mint a töltési idő és a várakozási idő, meghatározó tényezők abban az értelemben, hogy bármelyik paraméter növekedése egy adott útvonalon negatívan befolyásolja az útvonalválasztás valószínűségét [6].

Egy másik fontos kérdés a töltőinfrastruktúra elhelyezkedése. A lakásban élő villamosautó-tulajdonosok nagyobb mértékben támaszkodnak a munkahelyi illetve publikus töltőpontokra, mint azon felhasználók, akik családi házban élnek, hiszen ezekben gyakran található privát töltő. Így egy lehetséges stratégia a lakásban élő potenciális villamosautó-vásárlók bevonására, ha egyre több töltőt helyeznek el olyan területeken, ahova viszonylag nagyszámú munkavállaló jár be dolgozni, illetve belvárosi lakóövezetekben [7],[8]. A töltésigény fennmaradó része, melyet az otthoni vagy munkahelyi töltés nem képes kielégíteni, jelentős mértékben fedezhető céltöltéssel, ahol a villamos autók a legtöbb időt töltik. Ilyen célhelyszínek közé tartoznak például a bevásárlóközpontok, szórakozóhelyek, illetve sportlétesítmények. Számításba véve az átlagos időt, amit egy autó ezen helyszíneken tölt egy hét alatt, reálisan megvalósítható a villamos autó egész hétre elegendő töltése, csupán az említett helyszíneken [9].

## 2. A POTENCIÁLIS PARAMÉTEREK MEGHATÁROZÁSA

A fejezetben megvizsgáljuk, milyen paraméterekkel jellemezhetők a töltőpontok. Ezeket két csoportra osztva, lakossági statisztikák, illetve az épülettípusokra vonatkozó adatsorok mentén tárgyaljuk. Az elemzést a geoindex internetes térképes adatbázis [10] segítségével végezzük.

### 2.1. Lakossági statisztikák

A lakossági statisztikák a sűrűn lakott, városi területek vizsgálatakor hasznosak, hiszen azon villamosautó-tulajok, akik nem rendelkeznek privát töltővel otthon, ugyanakkor lakhelyük közelében is szeretnék tölteni autójukat, feltehetően ilyen töltőponton fognak tölteni. A Bolzano városában készült esettanulmány [11] kiemeli ezen adatok lehető legnagyobb felbontásban való szerepeltetését a további vizsgálatokban.

A geoindex térképes adatbázis segítségével megvizsgáltuk az egy főre jutó éves nettó jövedelem nagyságát, a diplomások arányát, illetve a népsűrűség nagyságát Budapest térségében. Ezen kívül a lakókörnyezet indexet is ebbe a csoportba sorolhatjuk, lévén a későbbiekben egyedül a kor szerinti megoszlást vizsgáljuk ezen kategória segítségével.

A lakókörnyezet index egy összetett paraméter, melyet három paraméter együttes vizsgálatából származtattak a készítők. Ezek rendre a pénzügyi helyzet (jövedelem), lakókörnyezet fajtája (beépítés jellege) és a kor. Mivel az első két paramétert jó közelítéssel önmagában, függetlenül is bevonjuk a vizsgálatba, a lakókörnyezet típusok esetén úgy döntöttünk, egyedül a kor paraméterre fókuszálunk, melyet ebből a paraméterből származtatunk.

### 2.2. Épülettípusok

A lakossági statisztikák mellett a második, elemzés szempontjából nélkülözhetetlen adatsor a különböző épületek csoportosítása rendeltetésük szerint. Az, hogy a felhasználók milyen típusú épület közelében, mikor és mennyi ideig hagyják villamos autóikat tölteni egyértelműen segít majd a különböző profilok meghatározásában.

Az épülettípusok kategóriából négy kategóriát vontunk be a számításba, a városközpont indexet, a területre jellemző beépítés jellegét, illetve két, a töltőállomás elhelyezkedésére vonatkozó jellemzőt. Ezen paraméterek segítségével lehetőségünk nyílt jellemezni a töltőt körülvevő épített környezetet, s ez alapján következtetni a későbbiekben a várható töltési paraméterekre.

A városközponti funkció meghatározása során figyelembe vették a kereskedelmi, oktatási, egészségügyi, közlekedési és pénzügyi szolgáltatások, valamint turisztikai célpontok létesítményeinek elhelyezkedését [12].

A beépítés jellege megmutatja az adott területre leginkább jellemző lakóépülettípust. Ezt a paramétert már láttuk megjelenni a lakókörnyezet index kapcsán, ott azért is éltünk az egyszerűsítés lehetőségével, és szorítkoztunk egyedül a korra, mert itt külön vizsgáljuk a beépítéseket.

Az utolsó két paraméter a töltők földrajzi elhelyezkedését jellemzi. A Töltőhely elhelyezkedés (mikro) olyan paraméter, mellyel azon földrajzi elhelyezkedését jellemezzük a töltőpontonak, hogy milyen településen helyezkedik el, míg a Töltőhely elhelyezkedés (makro) olyan paraméter, mellyel azon

földrajzi elhelyezkedését jellemezzük a töltőpontnak, hogy milyen, településen belüli lokáción helyezkedik el.

### 3. MODELLALKOTÁS

A kiinduló adatbázis az E.ON által üzemeltetett 118 publikus töltőállomás 129 109 töltési eseményét tartalmazta, 2020.04.20-a és 2022.02.13-a között. Az adatbázist a következő kritériumok alapján egyszerűsítettük a feldolgozás előtt. Mivel az ingázás tekintetében végezzük a vizsgálatot, egyedül a hétköznapokon bekövetkező töltési eseményeket vizsgáltuk. Kiszűrtük továbbá az ünnepnapokon bekövetkező töltési eseményeket is. Egyedül a 21-22 kW-os AC töltők csoportját vizsgáltuk, lévén ezek a leggyakoribb típusok, illetve új töltő elhelyezése kapcsán a nagyteljesítményű DC gyorstöltők továbbra is kis számban vannak jelen, hála a hálózati korlátoknak. A töltési események közül csak azokat vettük figyelembe, melyek átlagos töltési teljesítménye az 1 000-22 170 W intervallumba estek, valamint a töltési idő legalább 300 s, azaz 5 perc. Továbbá kizárólag a 2021-es év töltési eseményeit vizsgáltuk. Ennek oka, hogy ez az egyetlen olyan év, amiről teljes egészében rendelkezésünkre állt adat, illetve feltételezzük, hogy a járvány hatása már kisebb befolyásoló tényezőt jelentett, mint a 2020-as évben. A 2022-es évből pedig csak nagyon kevés, bő két hónapnyi időtáv állt rendelkezésünkre. Továbbá csak olyan töltőpontot vizsgáltunk, ahol legalább 20 töltési esemény megfelelt a fenti kritériumoknak.

További kizáró ok volt az analízisből a töltőpontot jellemző bemenő paraméterek hiányos száma. Ezeket az adatokat a geindex térkép [10] alapján határoztuk meg, oly módon, hogy megvizsgáltuk a töltőpont négyzete körüli 5x5-ös, 25 kis négyzetet tartalmazó négyzetet (egy négyzet mérete a valóságban 100 m·100 m). Az itt található, számmal jellemezhető értékeket átlagoltuk, majd ezzel jellemeztük a töltőpontot. Azon paraméterek esetén, ahol nem számmal fejeztük ki az egyes kategóriákat, az adatsor móduszával, tehát leggyakoribb elemével jellemeztük a töltőt. A feltétel ebben az esetben az volt, hogy a 25 négyzetből legalább 10 négyzet tartalmazzon adatot.

Mindezen kritériumokat figyelembe véve az adatbázis, melyen a vizsgálatot végeztük 9 373 töltési eseményt és 64 különböző töltőállomást tartalmazott.

#### 3.1. A töltőket leíró adatbázis létrehozása

Az adatbázist a bemenő, magyarázó változók és a kimenő, magyarázott célváltozók alkotják. Előbbiek számát a vizsgálat során határoztuk meg, míg célváltozóink ismertek, ezek a napi átlagos töltési idő és leadott energia. Ezek meghatározását tekintjük át a következőkben.

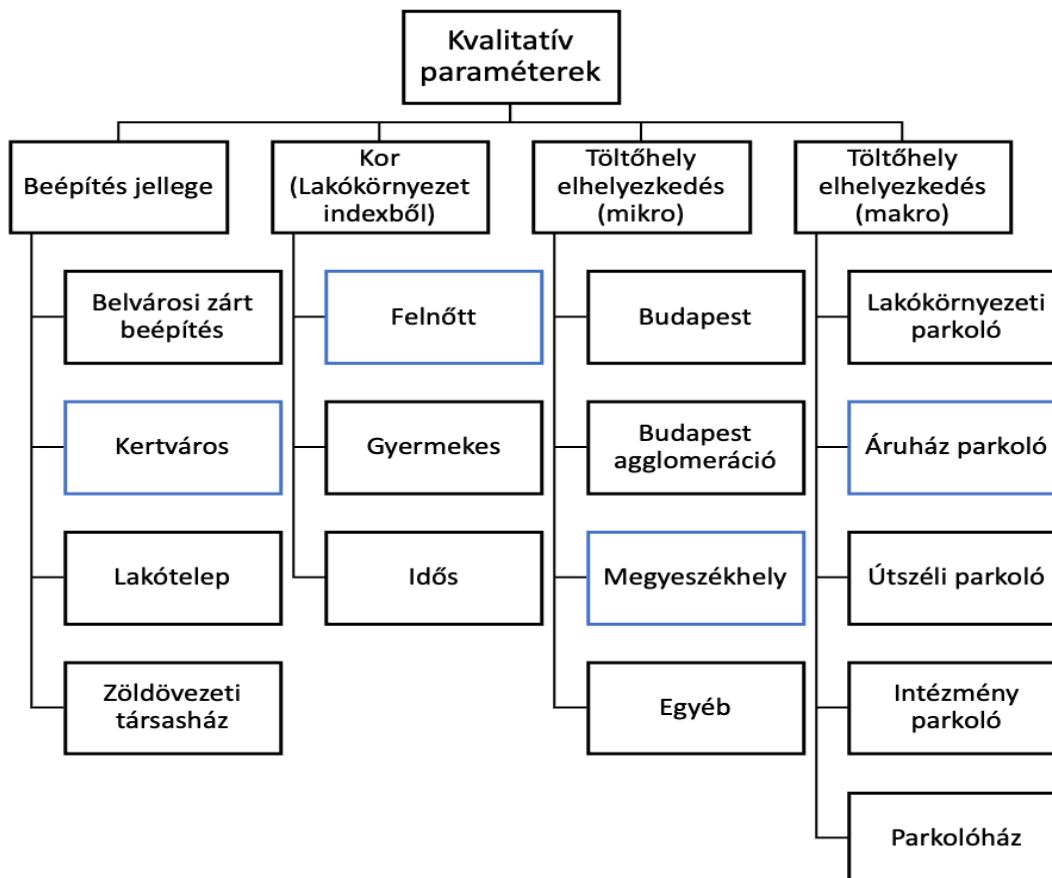
##### 3.1.1. Magyarázó változók

A kritériumok alapján tehát 64 eltérő töltőpont került be a vizsgálatba. Ezekhez először meghatároztuk a bemenő változókat. A kvantitatív jellegű, szám jellegű paraméterekkel nincs különösebb feladat, ezek már önmagukban használhatók a regresszióban. Ilyen változók a jövedelem, a népsűrűség, a városközpont index és a diplomások aránya (1. ábra).



1. ábra – Kvantitatív paraméterek

Más a helyzet a kvalitatív jellegű magyarázó változókkal. Ezekből a regresszió számára ún. dummy változókat hoztunk létre. Ez azt jelenti, hogy minden egyes,  $k$  értéket felvenni képes változót  $k$  darab különböző bináris változóval helyettesítjük a regresszióban. Egy kis egyszerűsítésre van lehetőség olyan módon, hogy a  $k$  darab új változó helyett csupán  $k-1$ -et hozunk létre, s a kimaradó egy értéket tekintjük az általános esetnek. Éppen ezért érdemes a legtöbbször előforduló értéket választani ennek. Ilyen kvalitatív jellegű változóink a lakókörnyezet index, a beépítés jellege, valamint a töltőhely elhelyezkedések. Mint már említettük, a lakókörnyezet index paramétert csak a kor jellemzésére használjuk, így a továbbiakban így hivatkozunk rá. A fentieket foglalja össze a 2. ábra. Kék kerettel jelöltük azon értékeket, melyek a leggyakrabban előforduló értékek a vizsgált 64 töltő esetén, így a regresszió során ezen paramétereket nem vezettük be külön.



2. ábra – Kvalitatív paraméterek

### 3.2. Célváltozók

A két célváltozó tekintetében a következőképp jártunk el. Minden egyes töltőre külön összegeztük, mekkora energiát adott le a vizsgált időszakban, majd ezt elosztottuk a vizsgált időszakot jelentő napok számával. Fontos kiemelni, hogy ezt az időszakot nem a teljes év, hanem az első töltési esemény és az utolsó töltési esemény közti időszak, és ott is kizárólag a hétköznapi munkanapok jelentik. Ennek oka, hogy némely töltő csak a 2021-es év közben került beüzemelésre. Hasonlóan jártunk el a töltési idők kapcsán. Ebben az esetben annyival volt bonyolultabb a számítás, hogy egy-egy töltőpont általában legalább két töltőfejjel rendelkezik, így a töltési események ideje sokszor átfedésben lehet, erre ezek összegzésekor különös figyelmet szenteltünk, lévén számunkra csupán a töltőállomás töltési ideje releváns, nem az egyes töltőfejeké.

### 3.3. Lineáris regressziós modell megalkotása, futtatása

A modellezési probléma első kihívása a feladathoz, adatokhoz leginkább megfelelő modell kiválasztása. Dolgozatomban lineáris regressziós modellt használunk, hogy megvizsgáljuk, van-e korreláció, és ha van, milyen jellegű az előbbieken bemutatott magyarázó változók és a becslni kívánt töltési energia- és időértékek között.

A lineáris regressziós modellezést MATLAB-ban végeztük, az alábbi módon. A stepwiselm() függvény létrehozza a lineáris modellt, oly módon, hogy a kritérium alapján hozzávesz a modellhez vagy eliminál abból egy változót. Ezt a kritériumot mi az Akaike információs kritériumnak (AIC) választottuk. Ezen kívül megadtuk, melyek a dummy változók a modellben. A szimuláció eredményét az alábbi két táblázat (**Error! Reference source not found., Error! Reference source not found.**), míg a változók elnevezésének feloldását és típusát a 3. táblázat mutatja.

1. táblázat – A releváns bemenő változók a leadott töltési energia, mint célváltozó esetén

	Koefficiensek	Standard hiba	t érték	p-érték
Tengelymetszet	-14,589	8,609	-1,695	0,0956
loctypeBpagglo	17,984	9,823	1,831	0,0724
loctypeEgyeb	11,807	7,466	1,582	0,1193
beepjellbelvarosizartbeep	14,628	7,643	1,914	0,0607
diplomasokaranya	0,7096	0,295	2,402	0,0196
chargerlocut	45,307	12,036	3,764	0,0004
chargerlocintezmeny	28,103	15,939	1,763	0,0832

2. táblázat – A releváns bemenő változók a töltési idő, mint célváltozó esetén

	Koefficiensek	Standard hiba	t érték	p-érték
Tengelymetszet	-0,964	0,623	-1,547	0,1275
varoskornyezetindex	0,0567	0,027	2,104	0,0399
loctypeBpagglo	1,402	0,688	2,037	0,0464
loctypeEgyeb	0,719	0,537	1,340	0,1858
beepjellzoldovezetitarsashaz	1,737	1,103	1,574	0,1212
diplomasokaranya	0,037	0,022	1,691	0,0964
chargerlocut	2,708	0,843	3,213	0,0022
chargerlocintezmeny	2,478	1,116	2,222	0,0303



3. táblázat: A modellekben használt változók magyarázata

Változó elnevezés	Jelentés	Változó típusa
beepjellbelvzartbeep	Beépítés jellege, belvárosi zárt beépítés	dummy (0/1)
beepjellzoldovtarshaz	Beépítés jellege, zöldövezeti társasház	dummy (0/1)
chargerlocintezmeny	Töltőhely elhelyezkedés (makro), intézményi parkoló	dummy (0/1)
chargerlocut	Töltőhely elhelyezkedés (makro), útszéli parkoló	dummy (0/1)
diplomasokaranya	Diplomások aránya	folytonos
loctypeBpagglo	Töltőhely elhelyezkedés (mikro), Budapest agglomeráció	dummy (0/1)
loctypeegyeb	Töltőhely elhelyezkedés (mikro), Egyéb	dummy (0/1)
varoskornyezetindex	Városkörnyezet index	folytonos

Az, hogy a töltőhely elhelyezkedés és beépítés jelleg kategóriák többi dummy változója nem került be a modellbe azt jelenti, hogy nincs szignifikáns eltérés a kezdeti modellfeltevéstől (Áruház/Bevásárlóközpont parkoló – Megyeszékhely- Kertváros). Hasonlóan megjelent mindkét összefüggésben a diplomások aránya, úgy tűnik, ez a paraméter szorosan összefügg a töltőállomások jellemzésével (0,0196-os és 0,0964-es p-értékek).

Mindkét esetben elmondható, hogy a p-értékek viszonylag magas értékek - tehát a változók kevésbé szignifikánsak a modellben – valamint az R2 értékek alacsonyok (0,4 és 0,418) a két modell esetén, ami a modell és az adatok közötti alacsonyabb illesztettségre utal. Ugyanakkor bármely, a modellben felhasznált változó elhagyása információvesztéssel járna, ezt a használt Akaike információs kritérium garantálja. Szintén erős korlátot ad a regresszióknak a kevés megfigyelés, tehát esetünkben a töltőpontok alacsony száma, ami 64 darab csupán. Ezt a számot a későbbiekben mindenképp érdemes lenne növelni, hiszen alapvetően befolyásolja az elérhető pontosságát a becslésnek.

Mindezek alapján a következő egyenleteket írhatjuk fel a töltési energiára (1.egyenlet) és a töltési időre (2.egyenlet).

$$\begin{aligned}
 charging_{kWh} = & -14,589 + 17,984 \cdot loctype_{Bpagglo} + \\
 & + 11,807 \cdot loctype_{egyeb} + +14,628 \cdot beepjell_{belvzartbeep} + \\
 & + 0,7096 \cdot diplomasokaranya + 45,307 \cdot chargerloc_{ut} + \\
 & + 28,103 \cdot chargerloc_{intezmeny}
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 charging_h = & -0,964 + 0,057 \cdot varoskozpontindex + \\
 & + 1,402 \cdot loctype_{Bpagglo} + 0,719 \cdot loctype_{egyeb} + \\
 & + 1,737 \cdot beepjell_{zoldovtarshaz} + 0,037 \cdot diplomasokaranya + \\
 & + 2,708 \cdot chargerloc_{ut} + 2,478 \cdot chargerloc_{intezmeny}
 \end{aligned} \tag{2}$$

## 4. KONKLÚZIÓ

Kutatásunkban megalkottuk lineáris regressziós modellünket. Modellünk segítségével becsülhető egy tervezett töltőállomás átlagos napi töltési ideje és leadott energiája, pusztán a töltőállomás elhelyezkedése és az azt jellemző paraméterek alapján.

A kutatás további irányainak a következőket látjuk. Az egyik ilyen a töltőállomások számának bővítése a modellezés során. Ezzel várakozásaink szerint jóval pontosabb modell megalkotása lesz lehetséges, illetve lehetőség nyílhat a modell valós adatokon való tesztelésére is. Ehhez elsődlegesen további publikus töltőállomásokat leíró adatbázisok feldolgozására lenne szükség.

További fejlesztési lehetőség a meglévő magyarázó változók pontosítása, illetve újabbak keresése, hogy a lehető legpontosabban tudjuk leírni a keresett két célváltozót a vizsgálatban. Végül érdemes lehet scenárió elemzéseket végezni olyan területeken, melyek valamilyen szempontból már most, vagy a jövőben kritikussá válhatnak az elosztóhálózat-üzemeltetők számára, amivel így jelentős megtakarításokat érhetnek el.

Köszönetnyilvánítás: A kutatás az MTA-BME Lendület FASTER Kutatócsoport keretében a Magyar Tudomány Akadémia, az Eötvös Loránd Kutatási Hálózat és az E.ON Hungária Zrt. támogatásával valósult meg.

## 5. HIVATKOZÁSOK

- [1] M. E. Biresselioglu, M. Demirbag Kaplan, és B. K. Yilmaz, „Electric mobility in Europe: A comprehensive review of motivators and barriers in decision making processes”, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 109. kötet, 1–13. oldal, 2018, doi: 10.1016/j.tra.2018.01.017.
- [2] O. Egbue és S. Long, „Barriers to widespread adoption of electric vehicles: An analysis of consumer attitudes and perceptions”, *Energy Policy*, 48. kötet, 717–729. oldal, 2012, doi: 10.1016/j.enpol.2012.06.009.
- [3] S. Enyedi, „Electric cars — Challenges and trends”, 2018 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR), Kolozsvár, 1–8. oldal, 2018, doi: 10.1109/AQTR.2018.8402776.
- [4] Dr. Hartmann Bálint, Pintér László: *Állapotbecslés a kisfeszültségű elosztóhálózaton*, Energetikai Szakkollégium, 2021.
- [5] Cen, X., Lo, H.K., Li, L. és Lee, E. (2018) ‘Modeling electric vehicles adoption for urban commute trips’, *Transportation Research Part B: Methodological*, 117. kötet, 431–454. oldal, doi: 10.1016/j.trb.2018.09.003.
- [6] P. Ashkrof, G. Homem de Almeida Correia, és B. van Arem, „Analysis of the effect of charging needs on battery electric vehicle drivers’ route choice behaviour: A case study in the Netherlands”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 78. kötet, 102206 számú cikk, 2020, doi: 10.1016/j.trd.2019.102206.
- [7] D. Chakraborty, D. S. Bunch, J. H. Lee, és G. Tal, „Demand drivers for charging infrastructure-charging behavior of plug-in electric vehicle commuters”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 76. kötet, 255–272. oldal, 2019, doi: 10.1016/j.trd.2019.09.015.
- [8] J. H. Lee, D. Chakraborty, S. J. Hardman, és G. Tal, „Exploring electric vehicle charging patterns: Mixed usage of charging infrastructure”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 79. kötet, 102249 számú cikk, 2020, doi: 10.1016/j.trd.2020.102249.
- A. Thingvad, P. B. Andersen, T. Unterluggauer, C. Træholt, és M. Marinelli, „Electrification of personal vehicle travels in cities - Quantifying the public charging demand”, *eTransportation*, 9. kötet, 100125 számú cikk, 2021, doi: 10.1016/j.etrans.2021.100125.
- [9] GEOX Kft., „100x100 adatbázis,” CARTO. [https://geoxmap.carto.com/viz/fc6f49ac-d288-11e6-9805-0ee66e2c9693/public\\_map](https://geoxmap.carto.com/viz/fc6f49ac-d288-11e6-9805-0ee66e2c9693/public_map) (Utolsó elérés: 2023.08.18.)
- [10] Gkatzoflias D, Drossinos I, Zubaryeva A, Zambelli P, Dilara P and Thiel C. Optimal allocation of electric vehicle charging infrastructure in cities and regions. EUR 27894. Luxembourg (Luxembourg): Publications Office of the European Union; 2016. JRC101040
- [11] GEOX Kft., „100x100 Geo-demográfiai térkép”, GeoX. <https://geox.hu/terinformatikai-uzleti-megoldasok/uzleti-adatbazisok/100x100-geo-demografiai-terkep/> (Utolsó elérés: 2023.08.18.)

Pózmán Réka Alexandra<sup>\*</sup>; Dr. Cselkó Richárd; Székely László  
reka.pozman@gmail.com

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Villamos Energetika Tanszék

## Elektrosztatikus szálképzési technológia működési paramétereinek vizsgálata

**Absztrakt** – Az elektrosztatikus szálképzés egy nagyfeszültséget alkalmazó speciális eljárás ultravékony szálak előállítására. A technológia nehezen leküzdhető hátránya az alacsony termelékenység, amire már számos innovatív megoldás született. Kutatásunk célja, hogy egy saját készítésű szálképző berendezésen vizsgáljuk ezen módszereket.

Kutatásunk során a technológiát jellemző fizikai és kémiai folyamatokat jobban megismerve egy-tűs elrendezést vizsgáltunk. Egyenfeszültséget alkalmazva teszteltünk különböző feszültség szint és elektródtávolság hatását, valamint a szálképzés polaritásfüggését. AC, majd DC feszültséggel eltolt AC feszültséggel táplált elrendezésen végeztünk méréseket, mely során vizsgáltuk a szálképzett réteg átmérőjét és a maximális cseppmentes hozamot.

A mérések során azt tapasztaltuk, hogy a váltakozófeszültség pozitív hatással van a szálképződésre, egyenletesebb, nagyobb területet lefedő réteg érhető el vele végeredményként, ami számos alkalmazási terület hasznára válhat, a legjobb eredményeket viszont DC feszültséggel eltolt AC feszültség alkalmazásával érték el. Több tűt és egyenfeszültséget alkalmazva a folyamat szintén működőképes, ipari környezetben kiváló opció lehet, azonban kis terület lefedésére a kialakuló tértorzulás miatt nem megfelelő.

**Abstract** – *Electrospinning is a special technology for producing ultrathin fibres using high voltage. The main difficulty of this technology is its low productivity, for which a number of innovative solutions have been developed. The aim of our research is to investigate these methods on a self-built electrospinning device.*

*In our research, we have made attempts to improve productivity by further understanding the physical and chemical processes that characterise the technology. We have investigated arrangement using DC voltage, measurements were carried out to test different voltage level, electrode distance, and the polarity dependence of the fibre formation. Measurements were performed on AC and then AC voltage with DC offset, where the diameter of the formed fibre layer and the maximum droplet-free rate of flow were investigated.*

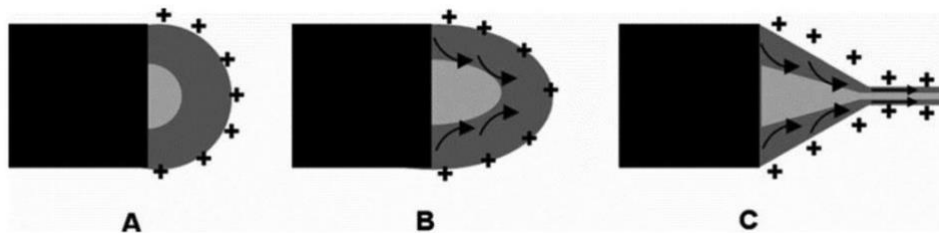
*During the measurements, we found that AC voltage has a positive effect on fibre formation, resulting in a more homogenous layer covering a larger area, which can benefit many applications, but the best results were obtained using AC voltage with DC offset. Using multiple needles and DC voltage, the process is also functional and can be an excellent option in industrial applications, but is not suitable for small area coverage due to the resulting electric field distortion.*

## Címszavak: elektrosztatika, nagyfeszültség, electrospinning

### 1. BEVEZETÉS

Az elektrosztatikus szálképzés, azaz electrospinning során az oldatból kialakuló szálak átmérője akár néhány nanométer is lehet, így rendkívül rugalmas, légáteresztő szerkezetet hozhatunk létre. Ezen tulajdonságok miatt manapság már széles körben alkalmazzák a technológiát különböző területeken, például az orvostudományban, energetikában és különböző szűrőberendezésekben [1][2]. A módszer előnye még, hogy lehetővé teszi a szálak egyedi tulajdonságainak, például összetételének és szerkezetének finomhangolását, ezzel az adott iparági igényekhez igazítva a végeredményt. Emellett a technológia rugalmasságának és az innovatív megoldásoknak köszönhetően lehetővé vált a termelés kis mennyiségektől egészen ipari szintig.

A szálképzéshez egy egyszerű elemekből készült elrendezés szükséges, ami egy polimer oldattal töltött, adagolóra csatlakoztatott tüelektródból, egy nagyfeszültségű feszültségforrásból és egy szálgyűjtő felületről áll [3]. A folyamat során a feszültség hatására töltések jelennek meg az oldatban, amik fontos szerepet játszanak a folyamatban, ugyanis a feszültség hatására létrejövő villamos térerősség befolyásolja ezek eloszlását és kölcsönhatását a rendszerben, ami a szálak és a szálképződési folyamat romlásához vezethet. Ez a probléma elkerülhető a megfelelő vezetőképességű és viszkozitású oldat alkalmazásával, a feszültség szint optimalizálásával, valamint a megfelelő geometria kialakításával [4]. A töltések az elrendezésben a legnagyobb térerősség-gradiens felé indulnak, azaz a szálképzési folyamat során a folyadék felszínével lépnek kölcsönhatásba, így a tű csúcsán lévő csepp felszíne alatt kialakul egy elektrosztatikus töltéshalmaz. Ahogy a töltéshalmaz növekszik, a folyadék csepp megnyúlik és kúp formát vesz fel, amit Taylor-kúpnak nevezünk [5]. Ennek csúcsából indul el a szál, egyenesen a gyűjtő felé. A kialakulás folyamatát szemlélteti az 1. ábra.



21. ábra: A Taylor-kúp kialakulásának folyamata [6]

A térerősség gyorsító hatása miatt a szál nagy sebességgel „húzódik” ki az oldatból, aminek következtében megnyúlik és elvékonyodik, amit az oldószer intenzív párolgása is elősegít. A szál az instabilitás szakaszába lépve az egyenes mozgás helyett spirálisan, rendezetlenül kezd el szóródni [7], ebben a szakaszban tovább vékonyodik, szétszakadzik és megkezdődik a szilárdulás folyamata. Az anyag a földelt gyűjtőre érve a maradék töltését levezeti, és az oldószer elpárolgásával kialakul a nanoszálakból álló réteg.

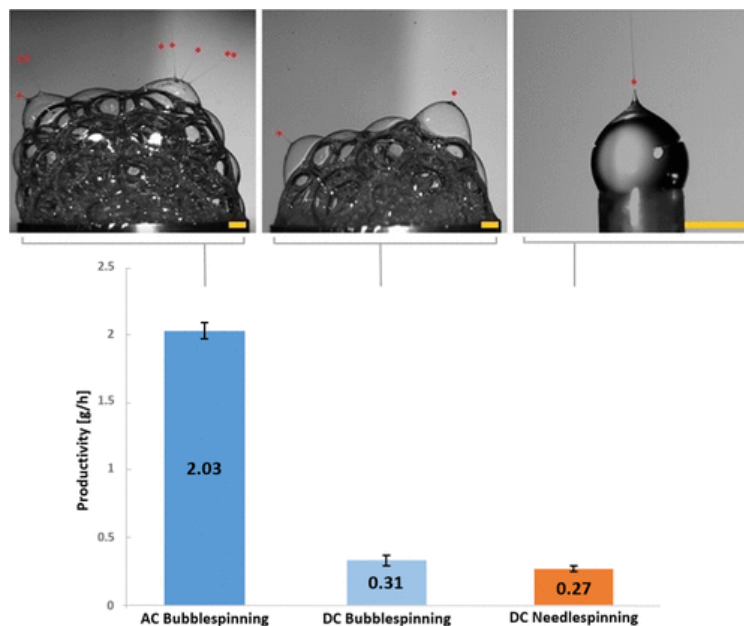
## 2. TERMELÉKENYSÉG NÖVELÉSÉNEK MÓDSZEREI

A korábban leírt szálképzés folyamatát nehéz hatékonyabbá tenni, ami a technológia nagy hátránya, azonban az egyszerre kiinduló szálak számát növelhetjük több tűs, forgó elektródos vagy szabad felszínes elrendezéssel [8][9][10]. Szintén megoldás lehet, ha egyenfeszültség helyett váltakozó feszültséget alkalmazunk.

Vizsgálataink során mi is teszteltünk több (öt és két) tűs elrendezéseket, amikhez a berendezés az egy cseppes modell alapján készült. A tesztelés eredményét korábbi cikkeinkben publikáltuk [11][12][13]. A folyamatok során végig PA6 és hangyasav 13 tömegszázalékos oldatával dolgoztunk. A vizsgálatokat követően adagolós megoldással folytattuk további méréseinket.

## 3. ALKALMAZOTT FESZÜLTSG TÍPUSÁNAK VIZSGÁLATA

A következőkben az AC feszültség alkalmazásának hatásait vizsgáltuk, ugyanis kutatások alapján ebben az esetben nagyobb az áramlási sebesség, így egy időben nagyobb mennyiségű anyag képes elhagyni az oldat felszínét, mint egyenfeszültség esetében, ezt szemlélteti a 2. ábra diagramja, amelyen három szálképzési mód összehasonlítását láthatjuk az optimális szálképzéshez szükséges adagolási sebesség alapján [14].



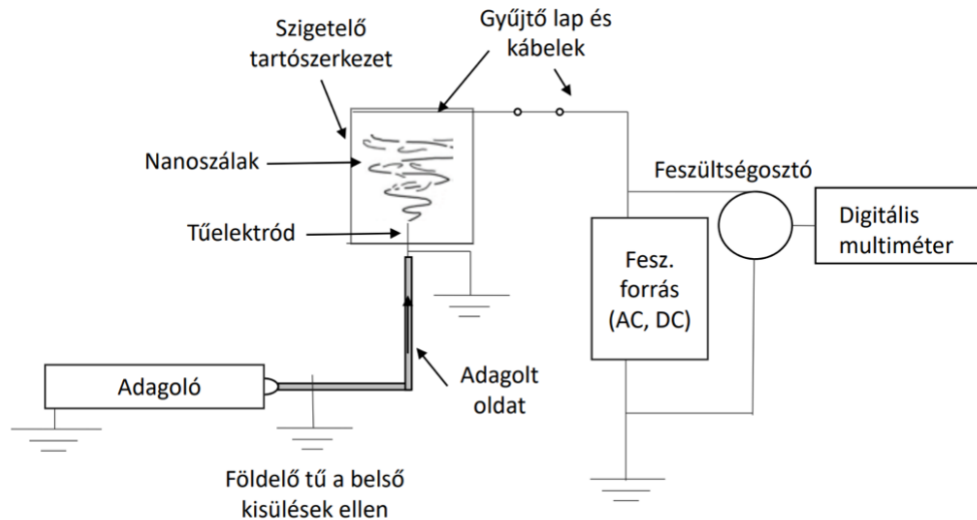
22. ábra: Különböző elektrosztatikus szálképzési módszerek szálképzési sebessége [15]

Az első és második eset a bubble electrospinning módszert szemlélteti AC és DC feszültséggel táplálva, a harmadik eset pedig az eredeti, tűelektródos megoldást DC feszültséggel. Az AC elrendezés láthatóan különbözik a többi esettől, a pirossal jelölt szálak száma jelentősen nagyobb, amiből következik, hogy a szükséges adagolási sebesség is többszöröse, mint a másik két esetben.

A mérések során vizsgáltuk az adott paraméterek mellett létrejövő réteg átmérőjét, ha az elrendezést AC, DC vagy DC feszültséggel eltolt AC feszültséggel tápláltuk [16]. Ezek elvégzéséhez adagolóra



csatlakoztatott tüelektródot használtunk, hogy az oldat adagolási sebessége is vizsgálható legyen. DC feszültséggel eltolt AC méréséhez szükség volt arra, hogy a tüelektród is feszültség alá kerüljön, így ebben az esetben az adagoló és a tű közötti szilikon csövet átszúrva egy földelővel, megoldható volt az adagoló biztonságos védelme. A mérési elrendezés vázlatát szemlélteti a 3. ábra.



23. ábra: Adagolás szálképző elrendezés vázlata

A DC táp maximális kimeneti feszültsége 12 kV, az AC forrásé pedig 20 kV. A kimenő feszültséget digitális multiméterrel mértük 1:1000-es feszültségosztón keresztül.

### 3.1. AC feszültség

Az AC feszültséggel való méréseket 42 milliméteres elektródtávolsággal és 3, 5 és 7 ml/h adagolás mellett végeztük. A távolság végig 42 mm volt, szálképzési idő 120 másodperc. A 4. ábra fotóin két elkészült minta látható.

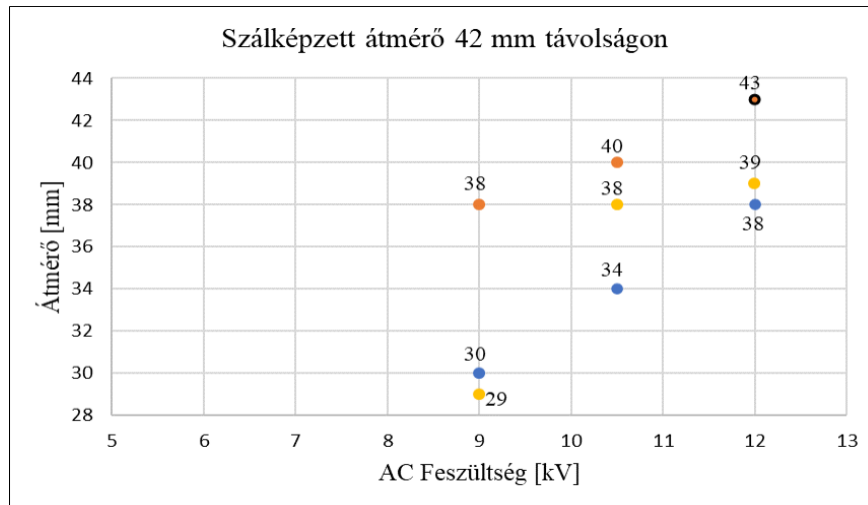


24. ábra: AC feszültségen képzett réteg

Az eredmények közül a 12 kV-on, 3 ml/h adagolási sebességgel készült minta érte volna el a legnagyobb átmérőt, azonban a rétegben már kis mértékben cseppek is jelentek meg, ami a



szükségesnél nagyobb feszültségre utal, így ez az eredmény nem tekinthető sikeresnek. Ebből következően, ha növelnénk a feszültséget, nagyobb átmérő helyett valószínűleg a többi adagolási sebességnél is megjelentek volna a cseppek a gyűjtőn, tehát az adott elrendezésben a mért értékeknél nem érhető el nagyobb átmérő cseppek képződése nélkül. Az 5. ábra diagramján ábrázolva az eredményeket, láthatóak az adagolási sebességekből adódó különbségek is.

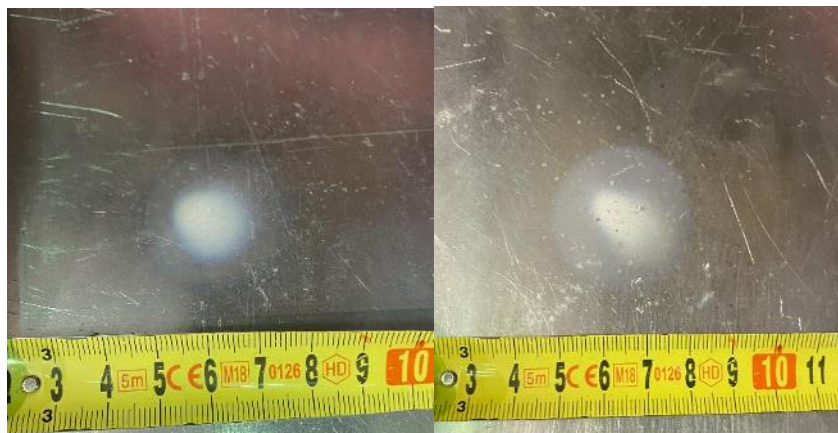


25. ábra: Képzett átmérő az AC feszültség és adagolási sebesség függvényében

A diagramon a narancssárga értékek a 3 ml/h, a citromsárga az 5 ml/h, a kék értékek pedig a 7 ml/h adagolási sebességet jelölik minden esetben. Látható, hogy a legkisebb adagolási sebesség mellett készült minták rendelkeznek a legnagyobb rétegátmérővel, míg a 7 ml/h adagolási sebesség mellett készültek érték el a legkisebbet. A feszültséget másfél kV-onként emelve az átmérő minden esetben nőtt.

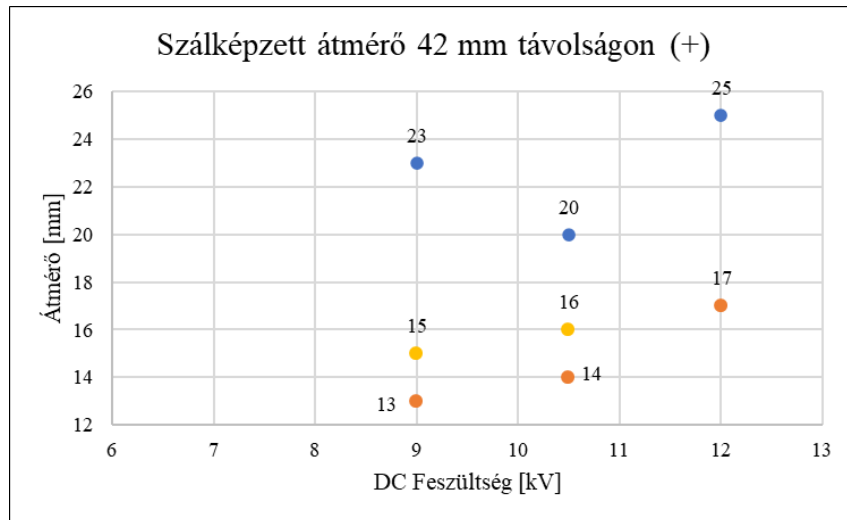
### 3.2. DC feszültség

A mérés során az alkalmazott távolság és az adagolás mértéke változatlan, a vizsgálati paraméterek azonban kiegészültek a polaritás vizsgálatával. A 6. ábra képein két egyenfeszültséggel képzett mintát láthatunk.



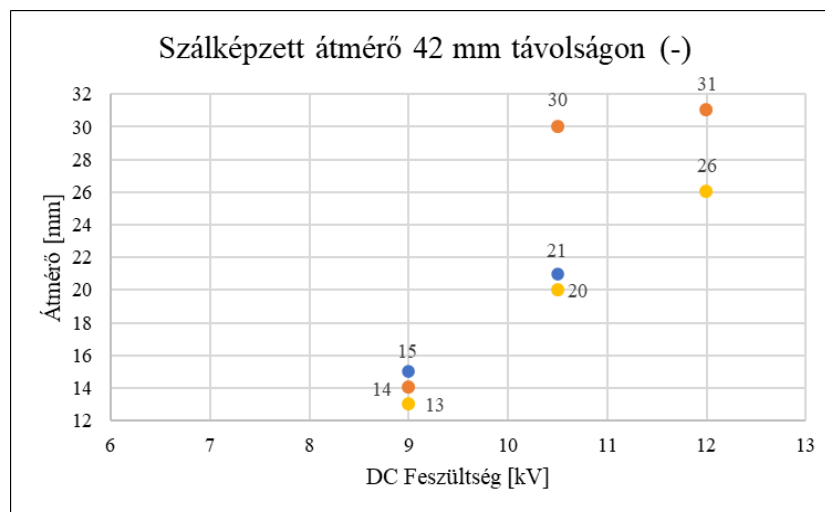
26. ábra: DC feszültségen képzett réteg

Az AC mérésekkel ellentétben DC feszültséget alkalmazva nagyobb adagolási sebesség mellett jelentkeztek a cseppek a gyűjtőn, ami ebben az esetben is a túl nagy alkalmazott feszültségnek tudható be. Összehasonlítva a korábbi eredményekkel, az átmérő jelentősen csökkent minden esetben, valamint a 7. ábra diagramján látható, hogy a szálképzési sebesség tekintetében is eltérnek az eredmények, ugyanis pozitív polaritás mellett a legnagyobb átmérő 7 ml/h adagolási sebesség mellett voltak mérhetőek, míg a legkisebbek 3 ml/h adagolásnál.



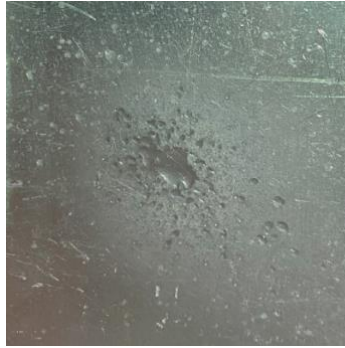
27. ábra: Képzett átmérő a pozitív DC feszültség és adagolási sebesség függvényében

A negatív pólussal mért eredmények a 8. ábra diagramján láthatóak, amin a színjelölések megegyeznek a korábbiakkal.



28. ábra: Képzett átmérő a negatív DC feszültség és adagolási sebesség függvényében

A cseppek megjelenése itt is a nagyobb adagolási sebességnél volt jellemző, 12 kV-on, 7 ml/h adagolás mellett a gyűjtőn szálképzett réteg helyett csupán oldat cseppek jelentek meg, ezt szemlélteti a 9. ábra. A feszültség másfél kV-al való növelése DC esetben is az átmérő növekedéséhez vezetett.



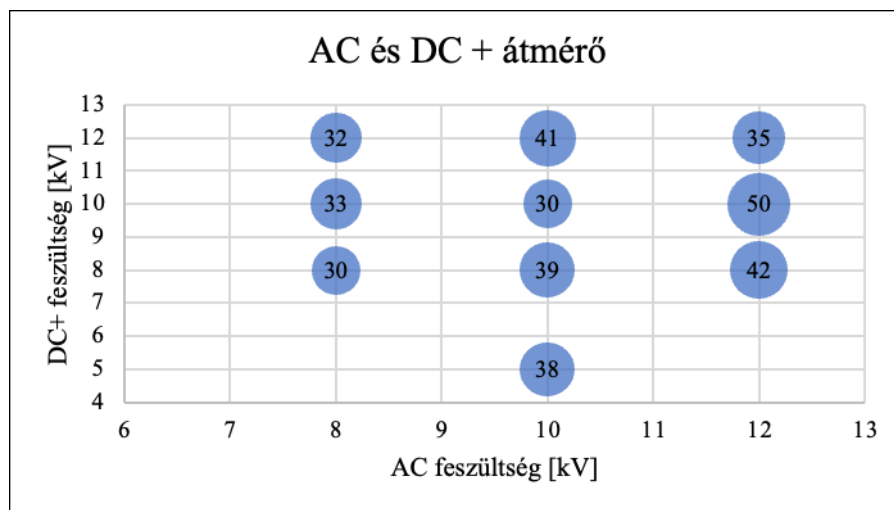
29. ábra: Csepphibák a gyűjtőn

### 3.3. DC feszültséggel eltolt AC feszültség

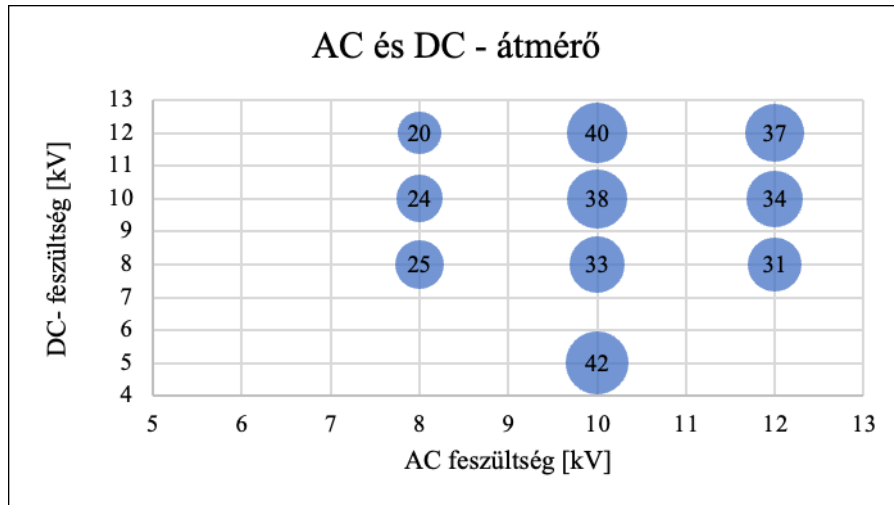
Az eddigi eredmények ismeretében megvizsgáltuk, hogy milyen hatással van a feszültségek együttes alkalmazása a szálképzésre és a szálképzett átmérőre.

A vizsgálat egésze során két perces szálképzési idővel, 42 milliméteres elektródtávolsággal és 3 ml/h adagolási sebességgel dolgoztunk, ugyanis ez bizonyult optimálisnak a korábbi eredmények alapján.

Legkisebb 8 kV AC és 8 kV DC feszültség mellett indult el a folyamat, majd lépésenként növeltük a feszültséget. A vizsgálatot pozitív és negatív polaritás mellett is elvégeztük, az eredményeket diagramon ábrázoltuk. A 10. ábra a pozitív, a 11. ábra a negatív DC feszültséggel végzett mérések eredményeit tartalmazza.



30. ábra: Szálképzett átmérő az AC és DC+ feszültség függvényében



**31. ábra: Számképzett átmérő az AC és DC- feszültség függvényében**

A mérések során felmerült a kérdés, hogy a feszültségek arányát variálva melyik számképzési jelleg dominál, ugyanis láthattuk, hogy AC esetben a lefedett terület egyenletes, míg DC feszültséget alkalmazva a réteg közepre koncentrált. A két feszültség típusal való mérés a DC jelleget nem mutatta abban az esetben sem, amikor 8 kV AC és 12 kV DC feszültséggel végeztük el a mérést. A 12. ábra bal oldalán a 12 kV DC és 8 kV AC mérési eredménye látható, jobb oldalán pedig az 5 kV DC és 10 kV AC, a rétegek jellege a feszültségek arányától függetlenül hasonló.



**32. ábra: DC feszültséggel eltolt AC feszültségen képzett réteg**

## 4. KONKLÚZIÓ

A feszültség típusának vizsgálata során az AC és DC feszültséggel képzett rétegek között jelentősen eltérések alakultak. Változó feszültség alkalmazásával adott távolságon a keletkezett réteg eloszlása egyenletesebb és az átmérője is jelentősen nagyobb. AC esetben 30-40 milliméter közötti képzett átmérő volt a jellemző, míg DC esetén a maximális lefedett terület alig érte el a 30-31 millimétert. Az adagolási sebesség másként hatott a két mérés alkalmával, azonban a jelenség okának kiderítésére további, alaposabb vizsgálatok szükségesek.

Az egyenfeszültség polaritás függése is tapasztalható, pozitív polaritást alkalmazva a szákkal fedett réteg átmérője jellemzően nagyobb volt, mint negatív polaritás esetében.

DC feszültséggel eltolt AC feszültséget alkalmazva a szálképzés egyenletes volt, a képződött réteg is egyenletesen fedte le a területet, nem koncentráltak kis területre a szálak. A képzett réteg átmérője nagy szórást mutat, azonban az esetek nagy részében 30 milliméter feletti átmérő volt jellemző, bizonyos esetben pedig 40-50 milliméteres réteg is képződött cseppek megjelenése nélkül, ami felülmúlja mind az AC és DC esetben kapott eredményeket.

## 5. HIVATKOZÁSOK

- [1] Wang, Y., Yokota, T., & Someya, T. (2021). Electrospun nanofiber-based soft electronics. *NPG Asia Materials*, 13(1), 22.
- [2] Gao, Y., Bach Truong, Y., Zhu, Y., & Louis Kyratzis, I. (2014). Electrospun antibacterial nanofibers: Production, activity, and in vivo applications. *Journal of Applied Polymer Science*, 131(18).
- [3] Mu, X., Zheng, Y., & Xin, B. (2021, February). Effects of the electric field distribution on electrospun PET fibers properties. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1790, No. 1, p. 012059). IOP Publishing.
- [4] Collins, G., Federici, J., Imura, Y., & Catalani, L. H. (2012). Charge generation, charge transport, and residual charge in the electrospinning of polymers: A review of issues and complications. *Journal of Applied Physics*, 111(4), 044701.
- [5] Park, S., Park, K., Yoon, H., Son, J., Min, T., & Kim, G. (2007). Apparatus for preparing electrospun nanofibers: designing an electrospinning process for nanofiber fabrication. *Polymer International*, 56(11), 1361-1366.
- [6] YflowSD. (2013. 07 29). Nanotechnology Solutions. Forrás: <https://nanotechnologiesolutions.wordpress.com/tag/microencapsulation/>
- [7] Reneker, D. H., & Yarin, A. L. (2008). Electrospinning jets and polymer nanofibers. *Polymer*, 49(10), 2387-2425.
- [8] Beaudoin, É. J., Kubaski, M. M., Samara, M., Zednik, R. J., & Demarquette, N. R. (2022). Scaled-up multi-needle electrospinning process using parallel plate auxiliary electrodes. *Nanomaterials*, 12(8), 1356.
- [9] SalehHudin, H. S., Mohamad, E. N., Mahadi, W. N. L., & Muhammad Afifi, A. (2018). Multiple-jet electrospinning methods for nanofiber processing: A review. *Materials and Manufacturing Processes*, 33(5), 479-498.
- [10] Fang, Y., & Xu, L. (2019). Four self-made free surface electrospinning devices for high-throughput preparation of high-quality nanofibers. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 10(1), 2261-2274.
- [11] Pózmán, R. A., Székely, L., & Cselkó, R. (2022, July). Examination of electric field distribution in a laboratory-built electrospinning device. In *2022 8th International Youth Conference on Energy (IYCE)* (pp. 1-4). IEEE.
- [12] Pózmán, R. A., Székely, L., & Cselkó, R. (2022) - Maszkok szűrőképességének növelése electrospinning technológia használatával, *Mechwart András Ifjúsági Találkozó 2022*
- [13] Pózmán, R. A., Székely, L., & Cselkó, R. - Elektrosztatikus szálképző berendezés készítése és a működést befolyásoló paraméterek vizsgálata, *Energiagazdálkodás folyóirat*, 2023. 3-4.lapszám
- [14] He, H., Wang, Y., Farkas, B., Nagy, Z. K., & Molnar, K. (2020). Analysis and prediction of the diameter and orientation of AC electrospun nanofibers by response surface methodology. *Materials & Design*, 194, 108902.
- [15] TEO, W.-E. (2023. 03 14). Alternating Current (AC) Electrospinning. Forrás: <http://electrospintech.com/acelectrospinning.html>
- [16] Cselkó, R., Pózmán, R. A., & Székely, L. (2023, June). Electrospinning with non-DC voltages. In *2023 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)* (pp. 1-4). IEEE.

Rózsa Máté; Dr. Csatár János  
rozsa.mate@edu.bme.hu  
BME Smart Power Laboratórium

## Interfész algoritmusok vizsgálata Power-Hardware-in-the-Loop szimulációs környezetben

**Absztrakt** – A power hardware-in-the-loop (PHIL) szimulációban az interfész algoritmus közvetlenül befolyásolja a pontosságot és a stabilitást, ezért helyes megválasztása elengedhetetlen. A cikkben két interfész algoritmusról: az ideal-transformer-model (ITM) és a transmission-line-model (TLM) algoritmusokról olvashatunk. Kutatásunk során a módszereket valós szimulációs környezetben vizsgáltuk. A szimulációs keretrendszer nemideális, ezért számos hardveres és szoftveres nehézség merült fel a tesztek folyamán. Ezen jelenségek többsége általánosan kiterjeszthető a PHIL szimulációkra. Pontos ismeretük esetén az interfész módszer jobban megválasztható és bizonyos hibák hatásának eliminálására további megoldásokat alkalmazhatunk. Az interfész algoritmus tulajdonságai tovább javíthatóak többszintű interfész kialakításával, ahol a módszerek előnyei egyesíthetők. A cikk második felében CPU és FPGA alapú hardvert egyaránt alkalmazó többszintű megoldást ismertetünk, amely stabilitási feltétele független a szimulációban lévő mögöttes impedancia nagyságától. Végül a két interfész módszer PHIL szimulációs eredményeivel alátámasztjuk az ITM és TLM algoritmusok előnyeit és hátrányait.

**Abstract** – *Choosing the right interface algorithm in power hardware-in-the-loop simulation is essential, because it directly affects the accuracy and stability of the simulation. This paper describes two interface algorithms used in PHIL environments: the ideal-transformer-model (ITM) and the transmission-line-model (TLM) algorithms. In our research, the methods were tested in a real simulation environment. The simulation framework is non-ideal and therefore several hardware and software difficulties were encountered during the tests. Most of these phenomena can be extended to all PHIL simulations. With a precise knowledge of non-idealities, the interface method can be better chosen and additional solutions can be applied to eliminate the effects of errors. The properties of the interface algorithm can be further improved by designing a multi-level interface where the advantages of the methods can be combined. In the second half of the paper, a multi-level solution using both CPU and FPGA based hardware is presented, where the stability is independent of the virtual side impedance. Lastly, the real-time PHIL simulation results are used to demonstrate the advantages and disadvantages of the ITM and TLM algorithms.*

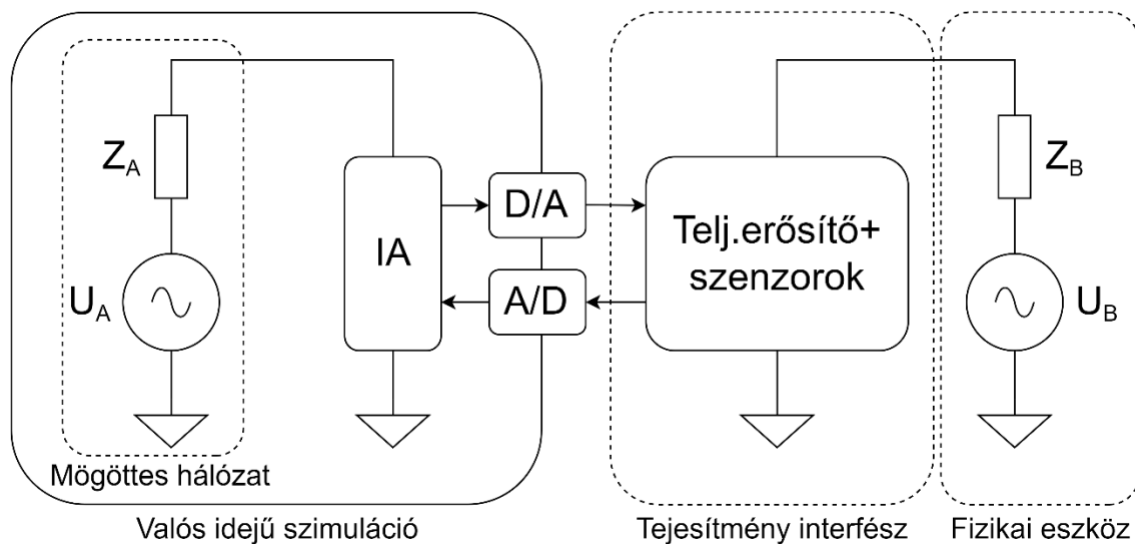


**Címszavak: valós idejű szimuláció (RTS); power hardware-in-the-loop (PHIL); interfész algoritmus (IA); ideal transformer model (ITM); transmission line model (TLM); többszintű interfész algoritmus**

## 1. BEVEZETÉS

Napjainkban a villamosenergia-rendszer eddig nem látott mértékű átalakuláson megy keresztül, amelyet elsősorban a fogyasztói igények megváltozása indukál. A megújuló-elosztott termelés, az elektromobilitás és a növekvő számú villamos energiával üzemeltetett berendezés új kihívások elé állítja a szakembereket. A szakterület specialitása, hogy a villamosenergia-rendszer kiterjedtsége és költségessége egy valós teszrendszer kialakítását nem teszi lehetővé. Ezért a kutatás-fejlesztési folyamatokban a modellezés és a szimulációk használata elengedhetetlen a rugalmas, gyors és hatékony feladatvégzéshez.

A power hardware-in-the-loop (PHIL) a valós idejű szimuláció egy változata, ahol egy fizikai eszközt erősáramú kapcsain keresztül csatlakoztatunk a modellhez. Ezen metódus alkalmazásával a villamos készülékeket (pl.: inverterek, hajtási rendszerek) hatékonyan vizsgálhatjuk tetszőleges körülmények közt, akár automatizáltan az előre elkészített scenáriók alapján. A PHIL szimulációhoz szükséges egy interfész a modell és a fizikai eszköz között, amely a valós idejű szimulátor kisjelű ki- és bemeneteit erősáramú csatlakozási ponttá alakítja. Az interfész megvalósítása közvetlenül befolyásolja a mérési eredményeket, ezért cél azon ideális, de fiktív eset közelítése, amikor a modell és a fizikai eszköz csatlakozási pontjai galvanikus kapcsolatban vannak.



33. ábra: A PHIL szimuláció blokkvázlata [1]

A PHIL szimuláció részletes blokkvázlatát a(z) 33. ábra szemlélteti. A részegységek az alábbiak:

- Valós idejű szimulátor: a modell valós időben fut és rendelkezik gyengeáramú ki- és bemenetekkel a külső egységek csatlakoztatásához.
- Mögöttes hálózat: a modellben leképezett hálózat Thevenin-ekvivalense.

- Fizikai eszköz: a tesztelt erősáramú eszköz Thevenin-ekvivalense.
- Teljesítmény interfész: a gyengeáramú – erősáramú átalakítást végzi, teljesítményerősítőtől és szenzorokból felépülő egység.
- IA – Interfész algoritmus: a visszamért villamos mennyiségek felhasználásával a modellben valóságként emulálja a fizikai eszköz hatását.

A virtuális és valós oldal között kialakított interfész részegységeinek nemidealitásai a szimuláció stabilitását és pontosságát egyaránt befolyásolják. A PHIL blokkvázlatban megfigyelhető, hogy egy adott szimulációs környezetben legegyszerűbben az interfész algoritmus megválasztásával tudjuk a minőségi paramétereket alakítani. Az IA tervezésekor jelentős előny, ha a szimulációs környezetből adódó hibák teljeskörűen ismertek. Az egyes interfész algoritmusok a különböző eredetű hibákra eltérő mértékben érzékenyek, így a szimulációban vizsgálni kívánt paraméterek is nagyban befolyásolják az IA kiválasztását.

A hibákat két nagy csoportba sorolhatjuk: lehet determinisztikus vagy sztochasztikus. Amennyiben a hiba determinisztikus, úgy jó eséllyel alkalmazhatunk korrekciót, például szenzor offset kompenzálást. Ha a hiba sztochasztikus, akkor teljes mértékben még állandósult állapotban sem lehet korrigálni a hibát, például a mintavételi időközök egymástól való eltérése.

A nemzetközi szakirodalomban az interfész algoritmusok 5 alapvető változata taglalt:

- ITM – Ideal Transformer Model
- TLM – Transmission Line Model
- DIM – Damping Impedance Method
- PCD – Partial Circuit Duplication
- TFA – Time-variant First-order Approximation [2].

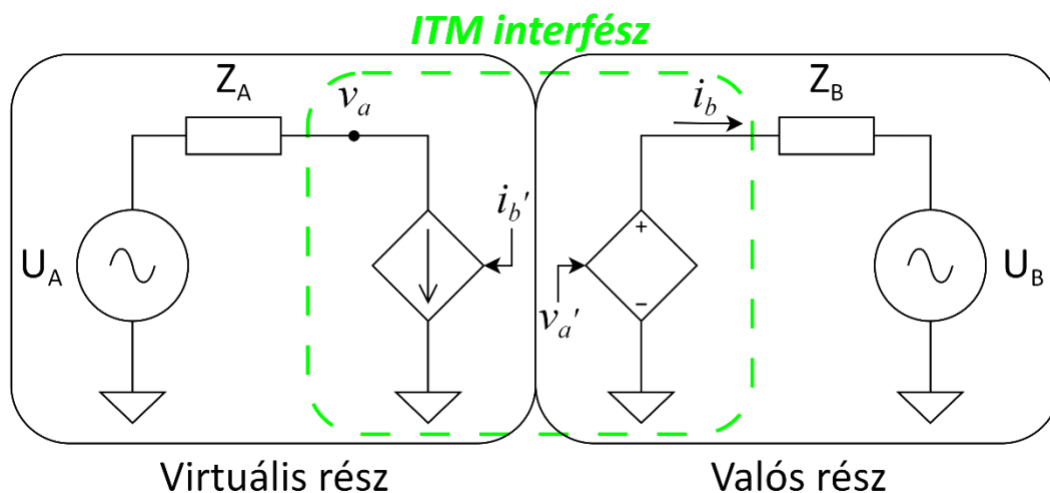
Kutatásunk során két módszert választottunk ki az előzetes irodalomkutatást követően. Előfeltételként fogalmaztuk meg, hogy a rendelkezésre álló szimulációs keretrendszerben megvalósítható interfész szükséges, ezért a valós oldalon feszültséggenerátoros kialakítású módszereket kerestünk. Feltételként szabtuk továbbá azt, hogy a választott megoldás ne legyen idegen a villamosenergia-hálózatok/rendszerek modellezésétől és kezdetben egyszerűen, szubiterációktól mentesen kivitelezhető legyen. Ezért egyik interfész algoritmusként az ITM-et választottuk. A villamosenergia-rendszer pontjait távvezetékek kötik össze. A TLM algoritmus egy távvezeték képez le, így természetes interfészként szolgálhat a megcélzott felhasználási területen. Ezért második interfész algoritmusként a TLM-et választottuk.

Az interfész algoritmusok alkalmazása során offline és valódi PHIL környezetben számos szimulációs keretrendszer okozta probléma merült fel, amelyek nagy része általánosságban is kiterjeszhető a PHIL környezetekre. A hibákra megoldási lehetőségek keresése folyamatosan munkánk részét képezi, amely aktuális állását jelen cikk keretében kívánjuk ismertetni.

A következőkben először a két vizsgált interfész algoritmust ismertetjük. Majd előnyeik és hátrányaik, a szimulációs keretrendszer okozta nehézségek bemutatása olvasható. Ezt követően a többszintű interfész algoritmus koncepciót és a PHIL szimuláció statikus és dinamikus tulajdonságainak ezen kialakítással elérhető javulását taglaljuk. Végül a két alap interfész módszer laborszimulációinak eredményeit prezentáljuk.

## 2. ITM – IDEAL TRANSFORMER MODEL

Az ITM algoritmus kialakítása lehet feszültség- vagy áramgenerátoros. A PHIL szimulációs keretrendszerek teljesítményerősítői általában feszültségforrások, ezért a cikkben a feszültséggenerátoros felépítést ismertetjük. Az ideális transzformátor modell a(z) 34. ábra szerint épül fel. A virtuális oldalon mért feszültséget a valós oldalon egy teljesítményerősítővel alakítjuk erősáramú jellé, majd a valós oldalon mért áram nagyságát visszacsatoljuk a virtuális oldalra. Az ITM algoritmus egyszerű, robusztus, ezért alkalmazása széles körben elterjedt, de kis stabilitási tartománya miatt gyakran kiegészítő módszerek szükségesek [2], [3].



34. ábra: ITM algoritmus felépítése

Az ITM algoritmus stabilitási tartományát két tényező befolyásolja: a virtuális és valós oldali impedanciák aránya és a késleltetések. A nyílt hurkú átviteli függvénye az (1) egyenlet szerinti. Ha az átviteli függvény késleltetés nélküli tagját nézzük, akkor a (2) kritérium teljesülése esetén stabil lesz a rendszer. Ha az interfész nemideális, akkor a késleltető tag rontja a stabilitási tartományt, így a (2) kritérium teljesülése nem elegendő a stabilitáshoz [1], [4].

$$G_{OL} = \frac{Z_A}{Z_B} \cdot e^{-s\Delta t} \quad (1)$$

$$\frac{Z_A}{Z_B} \leq 1 \quad (2)$$

A stabilitás növelésére a szakirodalom kiegészítő módszereket definiál:

- A visszacsatolt áramjel szűrésével a stabilitási tartomány kiterjeszhető: aluláteresztő vagy polinomiális szűrő megfelelő hangolásával. A nagyobb frekvenciák kiszűrésével a vizsgálható frekvenciatartomány csökken, a szűrő amplitúdó- és fázishibája pontatlanságot okoz [1], [3], [5]–[8].
- A valós oldalon soros fizikai induktivitás alkalmazása szintén növeli a stabilitást, azonban fizikai elem lévén drágítja a szimulációt és szintén csökkenti a pontosságot [3].
- A virtuális oldalon sönt ágban elhelyezett kondenzátor hasonló eredménnyel rendelkezik, mint a valós oldali induktivitás, de a módszer gyakorlati alkalmazása nem elterjedt [9].

A kiegészítő módszerek használatával nem növelhető a stabilitási tartomány minden határon túl, mert a pontosság már nem lesz megfelelő. Amennyiben a kiegészített tartomány sem elegendő a szimuláció elvégzéséhez, úgy más interfész módszert kell kidolgozni.

A késleltetés jelentős részét legtöbb esetben a szimulációs időlépcső adja, ehhez adódik hozzá az A/D, D/A konverziós idő, a teljesítményerősítő és szenzorok késleltetése és a jelterjedési idő. A késleltetés fázishibát okoz, amely csökkenti a stabilitási tartományt és a valós és virtuális oldalon mért hatásos és meddő teljesítmény arányokat eltolja. A késleltetések mélyebb ismertetését két részre kell felosztani az implementációs környezet és egyben a szimulációs időlépcső nagysága alapján.

Az univerzális CPU-t használó solverek időlépcsője hardveres korlátok miatt  $T_s \geq 20\mu\text{s}$ . A szimulációs időlépcsőhöz képest a PHIL környezet többi eleme okozta késleltetés elhanyagolható nagyságú, ezért elegendő csak a szimulációs időlépcsőt figyelembe venni. A késleltetés pontos értékének tudatában a fázishiba kompenzálására számos módszer alkalmazható.

- Az áramvisszacsatolásban dq- vagy Fourier-transzformációval eliminálható a fáziskülönbség. Az interfész algoritmus így mindkét esetben csak azon frekvenciákon működik, amelyekre implementálva lett a transzformáció, ezért ettől eltérő frekvenciák nem vizsgálhatóak [10], [11].
- A virtuális oldalon mért feszültség fázishelyzetének befolyásolása (siettetése) után csatoljuk ki a teljesítményerősítőre a jelet. Ez egyrészt Fourier-transzformációval, másrészt Smith-prediktor alkalmazásával is megvalósítható. Mindkét esetben jó szimulációs eredmény érhető el [12]–[15].
- A virtuális oldalon áraminjektálással kompenzálható a teljesítményeltolás, ennek előnye, hogy az interfész dinamikai paramétereit nem befolyásolja a módszer, viszont a kompenzálás csak az implementált frekvenciákon történik.

A kis időállandós rendszerek vizsgálatához előnyös az FPGA alapú szimuláció, amely szimulációs időlépcsője  $T_s \leq 1\mu\text{s}$ . Az FPGA saját programozási nyelvén (általában VHDL) leírt kódok futtatására alkalmas, de ennek alkalmazása szakértelmet igényel. Az Opal-RT Technologies által fejlesztett eFPGASim eHS solver MatLab Simulink környezetben elkészített áramköri modellek szimulálását teszi lehetővé néhány száz nanoszekundumos időlépcsővel. Így nincs szükség speciális tudásra az FPGA adta lehetőségek kiaknázásához. Az eHS solver használatának hátulütője, hogy a be- és

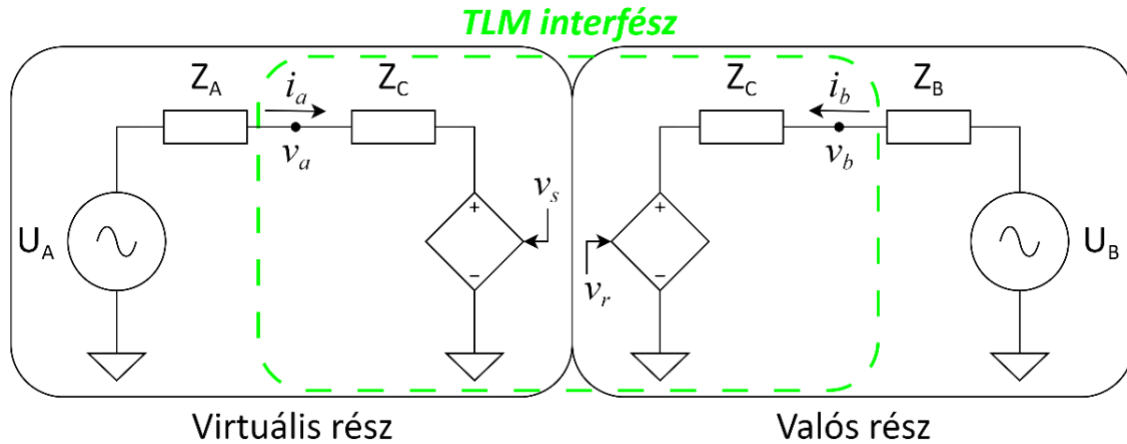
kimenetek nem szinkronizáltak a szimulációs időlépcsőhöz, a mintavételi időközök eltérhetnek és a kimenetre sem egyforma időközönként érkezik az elvárt jel („jitter” jelenség). A kis időlépcső miatt a szimulációs keretrendszer többi elemének késleltetése nem hanyagolható el, amelyek kumulált értékére egy intervallumot tudunk meghatározni. Az összegzett késleltetés nagysága a fentebb említett nehézségek ellenére jóval kisebb, mint a CPU solver-es implementációnál, így a stabilitás növelésére kisebb időállandójú szűrő vagy kisebb fizikai induktivitás is elegendő. A fázishiba a kis késleltetés miatt kevésbé jelentkezik, ezért kompenzálásra általában nincs szükség (és a pontos kompenzálás csak állandó értékű késleltetés esetén lenne lehetséges).

Az interfész pontosságát mindkét implementációs környezetben befolyásolják a virtuális és valós rész közt elhelyezett eszközök tulajdonságai. Az ITM algoritmus a fizikai eszköz hatását nem képes ideálisan leképezni a modellben a pontatlanságok miatt. A szimulációs környezet építőelemeit tekintve a következő konzekvenciák vonhatóak le:

- A/D, D/A konverzió: A többi építőelemhez képest laboratóriumi környezetben elhanyagolható mértékű hibát okoz, nagy sávszélességű és mintavételi frekvenciájú kártyákat alkalmazunk, melyek felbontása is rendkívül jó.
- Lineáris teljesítményerősítő: A teljes kivezérlési tartományban kis mértékű hibával követi a bemeneti jelet. Amennyiben áttétel vagy ofszet hibával rendelkezik a készülék, úgy a hibák ismeretével kompenzálható.
- Áram- és feszültségmérő szenzorok: Általánosan a szenzorok a szimulációs környezet gyengepontjai. Az ofszet- és áttételhiba kompenzálásra szorul, amely további nehézsége ezen értékek hőmérsékletfüggése. A szenzor sávszélessége és egyben az áttétel frekvenciafüggése a gyors jelváltozások esetén csökkenti a pontosságot. A mérési zajok eliminálására hangsúlyt kell fektetni lehetőleg hardver szinten, de szoftveresen megvalósított szűréssel (akár átlagolással) is csökkenthető.
- Solver: A solver algoritmus okozta számítási pontatlanságok elhanyagolható mértékűek, azonban a mintavételi időközök nem egyformák, amely fázishibát okoz. A szimulációs időlépcsőben a mintavételezés pillanatszerű, így a mérési zajok hatása közvetlenül jelentkezik a szimulációban.

### 3. TLM – TRANSMISSION LINE MODEL

A távvezeték modell (TLM) a Bergeron távvezeték modellen alapuló módszer, amely a hullámegyenletekből származtatott sorozatos hullámindításokkal képezi le a távvezeték két vége közti kapcsolatot. A következőekben gyakorlati megfontolásból a TLM feszültséggenerátoros változatát ismertetjük, amelyből analóg módon származik az áramgenerátoros felépítés. A TLM blokkvázlata a(z) 35. ábra szerinti. A virtuális és valós oldalon egy-egy Thevenin-modell kap helyet, amely  $Z_c$  helyettesítő impedanciájának értéke azonos a vezeték karakterisztikus impedanciájával. Veszteségmentes esetben a befutási idő egy szimulációs időlépcső nagyságú. A két feszültségforrás közti csatolást a(z) (3)(4) egyenletek írják le [2].



**35. ábra: TLM algoritmus felépítése**

$$v_r(k) = 2 \cdot v_a(k-1) - v_s(k-1) \quad (3)$$

$$v_s(k) = 2 \cdot v_b(k-1) - v_r(k-1) \quad (4)$$

A TLM nagy stabilitással rendelkezik még tranziensek esetén is, de elvéből kiindulva egy fizikai ellenállás beiktatása szükséges, amely csökkenti a teljesítményerősítő kivezérési tartományát és jelentős veszteséget okoz [16].

A TLM algoritmusnak két megközelítési módja lehetséges:

- Első esetben az interfész algoritmus által leképezett távvezetékot felhasználjuk a modellben a fizikai eszköz és a mögöttes hálózat közti kapcsolat kialakításában. Az interfész paraméterezésekor próbáljuk közelíteni a távvezeték jellemzőit. CPU-t használó implementációs környezetben a szimulációs időlépcső korlátossága miatt rövid távvezeték megvalósítása nem lehetséges.
- Második esetben csak interfész algoritmusként használjuk a TLM-et. A távvezeték jelleg miatt az átvitt teljesítménytől függő meddő teljesítmény termelés/fogyasztás hibát okoz. A távvezeték koncentrált paraméterű helyettesítése egy szűrőként jellemezhető, ezért a nagyobb frekvenciájú jeleket csillapítja.

A módszer PHIL alkalmazáson kívüli vonatkozása az ún. „stubline” modell, amely elve azonos a TLM-vel, de minden része szoftveres környezetben megvalósított. A stubline állapotterek szétcsatolására alkalmazható, így számítási erőforrás spórolható meg a mátrixműveleteken. A [17], [18] cikkek bizonyítják a TLM algoritmus elvének megalapozottságát és jó alkalmazhatóságát teljesen szoftveres környezetben.

A PHIL környezetben fellépő hibák a TLM algoritmus pontosságát csökkentik. A mintavételi időközök eltérése és a hardveres komponensek további késleltetései miatt a távvezeték befutási ideje nem lesz állandó értékű. A modellből indított hullám nem megfelelő időpillanatban érkezik a valós oldalra és a valós oldalon mért értékekből számolt hullám szintén nem lesz ideális. A késleltetés inkonzisztenciája az elvárttól eltérő állandósult állapotot alakít ki. A solver pillanatszerű mintavétele



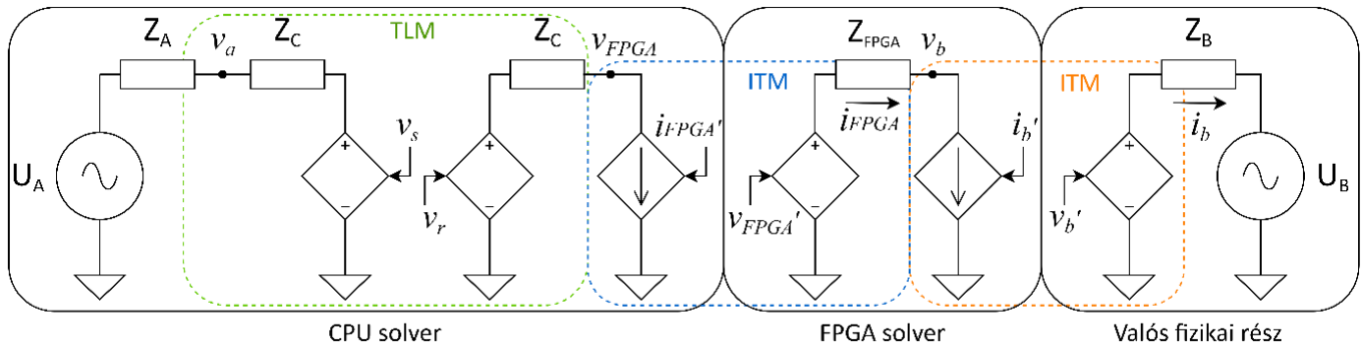
a zajérzékenységet növeli. A szenzorok hibái, a fizikai ellenállás bizonytalansága és hőmérsékletfüggése fokozza a pontatlanságot.

#### 4. TÖBBSZINTŰ INTERFÉSZ ALGORITMUS

Az előző fejezetekben ismertettük az ITM és TLM algoritmusokat. Összegezve az ITM a szimulációs keretrendszer hibáinak ismeretében a kiegészítő és kompenzáló módszerekkel jól alkalmazható. Az FPGA solver-es megvalósítás további javulást biztosít a kis időlépcső által. Hátránya a virtuális és valós oldali impedanciák arányától függő stabilitás, amely még kiegészítő módszerekkel is limitációkat okoz. A TLM algoritmus ezzel szemben bármilyen impedancia viszony mellett stabil, de a késleltetésre, mérési hibára való érzékenység és a fizikai ellenállás miatt alkalmazása nehézkes.

Az interfész algoritmus tulajdonságai tovább javíthatóak több szinten kialakított interfész algoritmusok kombinálásával. Ez lehetővé teszi a módszerek előnyeinek egyesítését, amellyel bizonyítottan jobb eredmény érhető el, mint önálló esetben [19], [20]. Egy adott kialakításhoz használható azonos vagy több típusú interfész algoritmus, amelyek implementációs környezete rugalmasan változtatható. Például kétszintű ITM esetén két különböző szimulációs időlépcsővel futó részre bontjuk az interfész algoritmust. A külső kis időlépcsős általában FPGA-n futó ITM alakítja ki a tesztelt eszközzel a kapcsolatot. A nagyobb időlépcsővel CPU-n futtatott modell és az FPGA modell közé egy további ITM algoritmust helyezünk. Így egyesíteni tudjuk a két implementációs környezet előnyeit: a kis időlépcsős résszel a fizikai eszköz hatását megbízhatóan le tudjuk követni, míg a nagy időlépcsős szimulációban egy kiterjedtebb hálózatrész is leképezhető. A két külön időlépcsővel futtatott modell közt az interfész algoritmus szoftveres kialakítás által jobban tartható, könnyebben és pontosabban lehet korrekciót vagy kompenzálást alkalmazni.

A(z) 36. ábra blokkvázlata több típusú interfész algoritmust kombináló megoldást szemléltet. A valós fizikai rész és az FPGA modell közt egy ITM algoritmust valósítunk meg, amely kis késleltetéssel rendelkezik, ezért a fázishiba hatása kevéssé jelentkezik és a tranziens folyamatok jobban lekövethetőek. A gyors interfész precízebbé teszi a fizikai rész hatásának megjelenítését a szoftveres világban. Az FPGA modellben a mögöttes hálózat impedanciájának egy részét elhelyezhetjük ( $Z_{FPGA}$ ), de érdemes kis értéken tartani a nagy stabilitási tartomány érdekében. A CPU és FPGA solver határán egy második ITM interfész kap helyet. A CPU modellben a mögöttes hálózathoz egy TLM algoritmussal csatlakoztatjuk az FPGA-részt. A TLM teljesen szoftveres megvalósítása miatt a késleltetések és a mérések ideálisak, ezért a távvezeték modell mindig stabil lesz. A létrehozott három szintű interfésszel gyenge mögöttes hálózathoz szimulációk is végezhetőek, amelyek az ITM módszerrel biztosan stabilitási tartományon kívül esnének.



36. ábra: Többszintű interfész algoritmus

Az impedancialapú stabilitási feltétel két részre bontható. A külső ITM algoritmusra a(z) (5) egyenletnek minimálisan teljesülnie kell, továbbá a megjelenő késleltetést számításba kell vegyük, ami rontja a stabilitási tartományt. A belső, CPU-FPGA közti ITM algoritmusra a(z) (6) szerinti feltételnek kell teljesülnie.

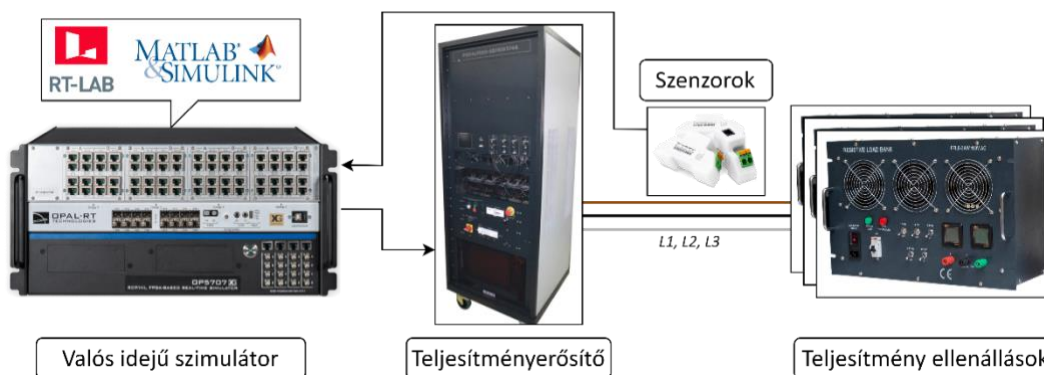
$$Z_{\text{FPGA}} \leq Z_B \quad (5)$$

$$Z_C + Z_{\text{FPGA}} \leq Z_B \quad (6)$$

A TLM algoritmus minden esetben stabil lesz, így a  $Z_A$  mögöttes hálózat impedanciája elhanyagolható a stabilitásvizsgálat során. A  $Z_C$  karakterisztikus impedancia közvetlenül befolyásolja a belső ITM algoritmus stabilitását. Ez limitálja a  $Z_C$  nagyságának szabad megválasztását, így a TLM algoritmus csak korlátozottan alkalmazható távvezeték reprezentálására.

## 5. LABORVIZSGÁLATOK

A laborszimulációk során az ITM és TLM algoritmusok stabilitását és pontosságát vizsgáltuk. A szimulációs keretrendszer blokkvázlatát az 37. ábra szemlélteti. A valós idejű szimulációt egy Opal-RT OP5707XG célhardveren futtattuk, jelen bemutatott eredmények esetében csak CPU alapú solvert használva. A teljesítményinterfészt egy háromfázisú lineáris teljesítményerősítő és Imperix gyártmányú szenzorok alkották. A fizikai eszköz fázisonként egy-egy fokozatonként kapcsolható teljesítményellenállás volt.



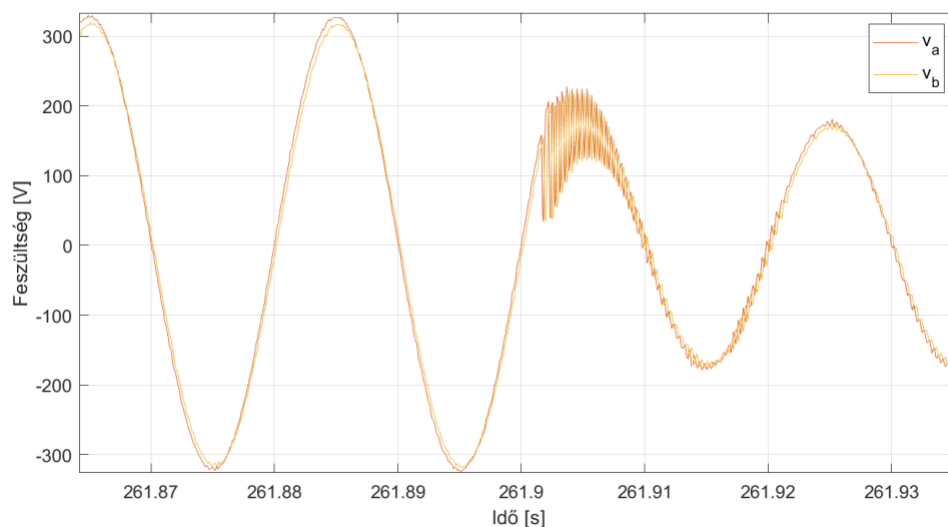
37. ábra: Laborszimulációs elrendezés

A mérési eredményeket az 1. táblázat foglalja össze. A stabilitásvizsgálat során a normál ITM algoritmust referenciaként vettük, így egységnyi stabilitással rendelkezik, amelyhez viszonyítva látható a többi módszer stabilitása. Az ITM kiegészítő módszerek minden esetben növelték a stabilitást, a fizikai induktivitás kisebb, míg az aluláteresztő szűrő és a dq-transzformáció nagyobb mértékben. A TLM algoritmus nem vált instabillá, ezzel igazolva előnyét. Az ITM algoritmusok amplitúdóhibái kis mértékűek, amelyekhez képest a TLM nagyobb pontatlanságot mutatott. A fázishiba az ITM módszereknél a késleltetésből adódik, amelyet az aluláteresztő szűrővel kiegészített esetben az aluláteresztő szűrő időállandója (fázishibája) növel. A TLM algoritmus fázishibája az interfészen átvitt teljesítmény arányában változott, a táblázatban látható eredmény a többi módszerrel azonos üzemállapot mellett adódott.

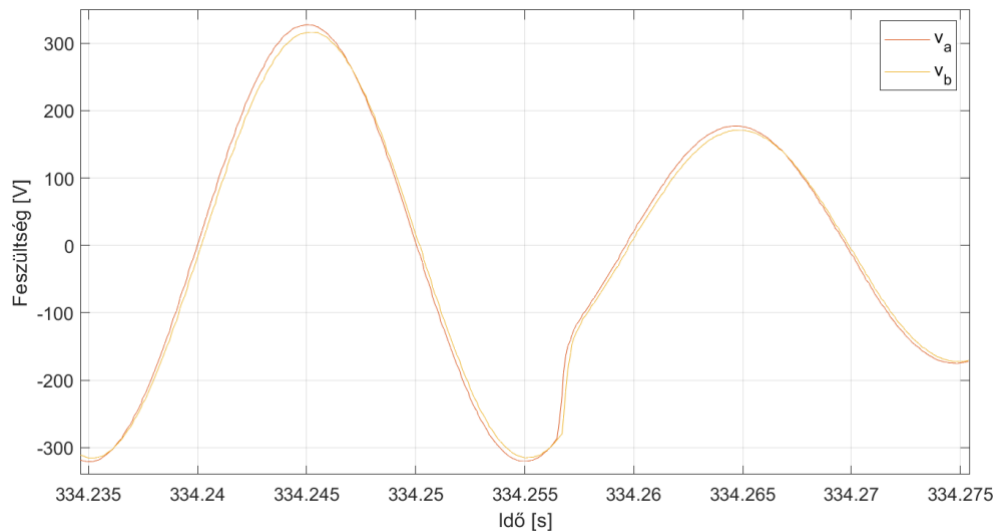
**1. táblázat: Interfész algoritmusok stabilitása és pontossága**

Interfész algoritmus	Stabilitás	Amplitúdóhiba	Fázishiba
ITM	1	1,228%	2,815°
ITM + aluláteresztő szűrő	5,5	0,491%	13,536°
ITM + fizikai induktivitás	1,12	1,242%	2,879°
ITM + dq-transzformáció	>5,5	1,244%	0,000°
TLM	nem vált instabillá	8,300%	10,067°

A stabilitást tranziens esetben is vizsgáltuk, a teljesítményellenállások bekapcsolásával tranziens jelenséget előidézve. A mögöttes hálózatot úgy hangoltuk, hogy stacioner esetben még épp stabil legyen a rendszer. A normál ITM módszert a 38. ábra, az aluláteresztő szűrővel kiegészített ITM algoritmust a 39. ábra szemlélteti. A stabilitást növelő módszer nélküli esetben egy lecsengő tranziens komponens látható, a növelt stabilitású esetben ez nem jelentkezik. Látható az aluláteresztő szűrő stabilitást növelő hatása, de a tranziens folyamatok vizsgálhatósága romlik.



**38. ábra: Bekapcsolási tranziens normál ITM esetén**



39. ábra: Bekapcsolási tranziens aluláteresztő szűrővel kiegészített ITM esetén

## 6. ÖSSZEFOGLALÁS, KONKLÚZIÓ

A PHIL szimulációs környezet számos alkotóelemmel rendelkezik, amelyek hatása együttesen befolyásolja a virtuális és valós rész közt kialakított kapcsolat minőségi mutatóit. Egy adott keretrendszerben az interfész algoritmust úgy kell megválasszuk, hogy a szimulációs követelmények teljesüljenek.

Az ITM egyszerű és robusztus megoldás, amely felhasználhatósága tovább javítható a kiegészítő és kompenzáló módszerekkel. Két implementációs környezetben: a CPU-t vagy FPGA-t használó solverok esetében bemutattuk az interfész kialakítását nehezítő hardveres és szoftveres problémákat. CPU solver esetén a késleltetés és a pillanatszerű mintavétel gondot okoz, amely hatások bizonyos szintig javíthatóak szoftveresen, de tranziens körülmények közt nem feltétlenül adnak jó eredményt. Az FPGA solverben leképezhető modell kiterjedtsége limitált, de a kisebb szimulációs időlépcsővel a tranziens folyamatok jobban lekövethetőek.

A TLM algoritmus numerikus módon reprezentálja a távvezeték működését. A PHIL környezetben való alkalmazásakor több hátránya van. A valós oldalon a fizikai ellenállás csökkenti a teljesítményerősítő kivezérési tartományát és energiát diszipál. A késleltetések inkonzisztenciája miatt a befutási idő változik, amely csökkenti a pontosságot. Végül a mérési zajokra mutatott érzékenysége jelentős. Azonban a távvezeték modell ideális megvalósítása mindig stabil, így szoftveres környezetben jól alkalmazható.

A többszintű interfész koncepció célja a módszerek előnyeinek egyesítése. A bemutatott kialakításban háromszintű interfész algoritmust ismertetünk, amellyel gyenge mögöttes hálózati szimulációk is végezhetőek. A külső interfész kis időlépcsővel jól leképezi a valós részt a szimulációban. Ennek illesztése a nagyobb időlépcsővel futtatott részhez egy ITM és egy TLM algoritmussal történik. A TLM minden része szoftveresen implementált, ezért a stabilitási tartományt nem befolyásolja a mögöttes hálózati impedancia. A cikkben elméleti oldalról ismertettük a

potenciális előnyökkel rendelkező többszintű interfész módszert. Ezzel kapcsolatos előzetes laborvizsgálatok stabilitás és pontosság szempontból is ígéretes eredményekkel szolgáltak, azonban további validáció szükséges. A jövőbeli tesztek során a többszintű struktúrával elért statikus és dinamikus tulajdonságok javulását teljesítményelektronikai berendezések interfész algoritmus szempontú vizsgálatával is szeretnénk alátámasztani.

Végül a valós PHIL szimulációs keretrendszerben elvégzett laborszimulációkkal szemléltettük az ITM és TLM algoritmusok előnyeit és hátrányait. Az ITM önálló és kiegészítő módszerekkel ellátott verziói is vizsgálatunk tárgyát képezte. Látható, hogy az ITM stabilitása limitált, amely kiegészítő módszerekkel bizonyos szintig javítható, de mindegyik kiegészítő módszer további hátrányokkal jár. Az aluláteresztő szűrővel kiegészített ITM fázishibát, a fizikai induktivitás minimális pontosságbeli romlást okoz, a dq-transzformáció pedig az átvitelt egy frekvenciára korlátozza. A TLM nagy fokú stabilitást biztosít, de pontossága elmarad az ITM-hez képest.

## 7. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] T. Hatakeyama, A. Riccobono, and A. Monti, "Stability and accuracy analysis of power hardware in the loop system with different interface algorithms," in 2016 IEEE 17th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), 2016, pp. 1–8. doi: 10.1109/COMPEL.2016.7556671.
- [2] W. Ren, M. Steurer, and T. L. Baldwin, "Improve the Stability and the Accuracy of Power Hardware-in-the-Loop Simulation by Selecting Appropriate Interface Algorithms," in IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, pp. 1286–1294. doi: 10.1109/TIA.2008.926240.
- [3] M. G. Kashani, H. Pulakhandam, S. Bhattacharya, F. Katiraei, and D. Kaiser, "Design considerations and test setup assessment for power hardware in the loop testing," in 2017 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 2017, pp. 1–8. doi: 10.1109/IAS.2017.8101770.
- [4] J. Dolenc, A. Božiček, and B. Blažič, "Stability analysis of an Ideal-Transformer-Model interface algorithm," in 2019 7th International Youth Conference on Energy (IYCE), IEEE, 2019, pp. 1–6. doi: 10.1109/IYCE45807.2019.8991575.
- [5] G. Lauss, F. Lehfuß, A. Viehweider, and T. Strasser, "Power hardware in the loop simulation with feedback current filtering for electric systems," in IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference), 2011, pp. 3725–3730. doi: 10.1109/IECON.2011.6119915.
- [6] A. Markou, V. Kleftakis, P. Kotsampopoulos, and N. Hatziaargyriou, "Improving existing methods for stable and more accurate Power Hardware-in-the-Loop experiments," in IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Aug. 2017, pp. 496–502. doi: 10.1109/ISIE.2017.8001296.
- [7] A. Summers, J. Hernandez-Alvidrez, R. Darbali-Zamora, M. J. Reno, J. Johnson, and N. S. Gurule, "Comparison of Ideal Transformer Method and Damping Impedance Method for PV Power-Hardware-In-The-Loop Experiments," in IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), IEEE, 2019, pp. 2989–2996. doi: 10.1109/PVSC40753.2019.8980690.
- [8] H.-J. Heo, C.-H. Park, and J.-M. Kim, "Modified Interface Algorithm of PHIL Simulator to Improve Harmonic Current Accuracy," in IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW), 2020, pp. 304–308. doi: 10.1109/WoW47795.2020.9291318.
- [9] X. Zha, C. Yin, J. Sun, M. Huang, and Q. Li, "Improving the Stability and Accuracy of Power Hardware-in-the-Loop Simulation Using Virtual Impedance Method," *Energies* (Basel), vol. 9, no. 11, 2016, doi: 10.3390/en9110974.
- [10] A. Castro, P. Zuniga, F. A. Uribe, and E. Barocio, "Phase compensation scheme to improve the accuracy of a power hardware-in-the-loop experiment based on a synchronous generator," in 2015 IEEE Eindhoven PowerTech, 2015, pp. 1–6. doi: 10.1109/PTC.2015.7232517.
- [11] W. Ren, M. Steurer, and S. Woodruff, "Applying Controller and Power Hardware-in-the-Loop Simulation in Designing and Prototyping Apparatuses for Future All Electric Ship," in 2007 IEEE Electric Ship Technologies Symposium, 2007, pp. 443–448. doi: 10.1109/ESTS.2007.372124.
- [12] B. Lundstrom and M. V. Salapaka, "Optimal Power Hardware-in-the-Loop Interfacing: Applying Modern Control for Design and Verification of High-Accuracy Interfaces," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 11, pp. 10388–10399, Nov. 2021, doi: 10.1109/TIE.2020.3032918.

- [13] Z. Feng, R. Pena-Alzola, M. H. Syed, P. J. Norman, and G. M. Burt, "Adaptive Smith Predictor for Enhanced Stability of Power Hardware-in-the-Loop Setups," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 70, no. 10, pp. 10204–10214, Oct. 2023, doi: 10.1109/TIE.2022.3224196.
- [14] E. Guillo-Sansano, A. J. Roscoe, C. E. Jones, and G. M. Burt, "A new control method for the power interface in power hardware-in-the-loop simulation to compensate for the time delay," in *Proceedings of the Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, IEEE Computer Society, Oct. 2014, pp. 1–5. doi: 10.1109/UPEC.2014.6934618.
- [15] E. Guillo-Sansano, A. J. Roscoe, and G. M. Burt, "Harmonic-by-harmonic time delay compensation method for PHIL simulation of low impedance power systems," in *2015 International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST)*, 2015, pp. 560–565. doi: 10.1109/SEDST.2015.7315271.
- [16] O. Tremblay, D. Rimorov, R. Gagnon, and H. Fortin-Blanchette, "A Multi-Time-Step Transmission Line Interface for Power Hardware-in-the-Loop Simulators," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 35, no. 1, pp. 539–548, Mar. 2020, doi: 10.1109/TEC.2019.2941567.
- [17] B. Ahmed, A. Abdelgadir, N. A. Saied, and A. A. Karrar, "A Compensated Distributed-Parameter Line Decoupling Approach for Real Time Applications," *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 12, no. 2, pp. 1761–1771, Mar. 2021, doi: 10.1109/TSG.2020.3033145.
- [18] X. Zhai et al., "Multi-rate real-time simulation of modular multilevel converter for HVDC grids application," in *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2017, pp. 1325–1330. doi: 10.1109/IECON.2017.8216225.
- [19] G. F. Lauss, "Interfacing challenges in PHIL simulations for investigations on P-Q controls of grid connected generation units in electric power systems," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 50, no. 1, pp. 10964–10970, Jul. 2017, doi: 10.1016/j.ifacol.2017.08.2468.
- [20] F. Ashrafidehkordi and G. De Carne, "Improved Accuracy of the Power Hardware-in-the-Loop Modeling using Multirate Discrete Domain," in *IEEE 13th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, 2022, pp. 1–5. doi: 10.1109/PEDG54999.2022.9923128.



Sörös Milán Attila<sup>1)</sup>; Kövesdi Roland; Dr. Hartmann Bálint<sup>2)</sup>  
soresm@edu.bme.hu

<sup>1)</sup> Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Villamosmérnöki és Informatikai Kar

<sup>2)</sup> Energiatudományi Kutatóközpont, Energia- és Környezetbiztonsági Intézet, Környezetfizikai Laboratórium

## Nátrium-kén akkumulátor, mint hálózati energiatároló

**Absztrakt** – Az EU kiemelt célkitűzése, hogy a tagállamok szintjén 2030-ra legalább 40%-kal csökkenjen az üvegházhatású gáz-kibocsátás. Ennek elérése érdekében támogatja a különböző újfajta energiatárolási módokat. Ezek közül vizsgáljuk a Központi Fizikai Kutatóintézet (KFKI)-ban telepítésre kerülő nátrium-kén demonstrációs akkumulátor rendszert.

**Abstract** – One of the emphasized objectives of the EU, to reduce greenhouse gas emission by minimum 40% by 2030. To achieve this goal the EU supports different new methods for energy storage. From these new methods we examine the sodium-sulphur demonstration battery system, that will be installed to KFKI.

**Címszavak:** energiatárolás; nátrium-kén akkumulátor; akkumulátor modellezés

### 1. BEVEZETÉS

Az Energiatudományi Kutatóközpont 2021-ben lehetőséget kapott egy nátrium-kén technológiával működő demonstrációs akkumulátor telepítésére a csillebérci KFKI telephelyen, lásd 1. ábra. Az energiatároló névleges teljesítménye 250 kW, míg az általa tárolt energia 1450 kWh. Az energiatároló a Karbonmentes, többlet villamos energia innovatív elektrokémiai tárolását elősegítő fejlesztések megvalósítása (2021-2.1.1-EK), támogatott projekteken [1] belül a Tesseract Energiatároló (2021-2.1.1-EK-2021-00002) projekt keretében valósul meg [2]. A telepítésre és üzembehelyezésre várhatóan 2024 első felében kerül sor.



40. ábra A KFKI csillebérci telephelye [3]

Hazánkban a megújuló energiatermelők növekvő terjedésével párhuzamosan megindult az energiatároló egységek telepítése is. Ezek mindegyike elektrokémiai energiatároló, azaz akkumulátor, technológiai szempontból pedig túlnyomó többségben vannak a Li-ion akkumulátorok. A tárolókat jellemzően olyan vállalatok telepítették, melyek a villamosenergia-piac valamely szegmensében is aktívak. Nem a Li-ion technológia azonban az egyetlen, amely használható rendszerszintű energia tárolására. A Tesseract projekt célja, hogy bemutassa a Li-ion technológián kívül, a nátrium-kén technológia is valós alternatívaként szolgálhat a hálózati energiatárolás területén.

Ebben a tanulmányban bemutatjuk a projekt keretében megvalósuló hálózatba integrált energiatároló telepítésének lehetőségét, viselkedését. Továbbá vizsgáljuk, hogy a nátrium-kén akkumulátorok használata milyen előnyökkel és hátrányokkal jár a lítium-ion akkumulátorokkal összehasonlítva. Cikkünkben összehasonlítjuk a különböző ún. magas hőmérsékletű akkumulátor technológiákat a lítium-ion akkumulátorokkal. Ezt követően MATLAB Simulink környezetben szimulációk segítségével bemutatjuk, hogy milyen hatása van az akkumulátornak a KFKI telephelyre különböző scenáriók esetén, melyek a lehetséges üzemállapotok a telephelyen, jelentenek-e bármilyen kockázatot az akkumulátor számára.

## 2. NÁTRIUM-KÉN AKKUMULÁTOR TECHNOLÓGIA

A nátrium-kén magashőmérsékletű akkumulátortechnológiát a Ford Motor Company fejlesztett ki még az 1960-as években. [4] A cég eladta a fejlesztést, a japán NGK Insulators Ltd.-nek, és napjainkban is ők az egyetlen cég, akik kereskedelmi forgalomba hoznak nátrium-kén akkumulátort, NAS jelzés alatt. [5][7] Jelenleg a világ számos pontján üzemelnek már nagyméretű nátrium-kén akkumulátorok, lásd a 2. ábrát.

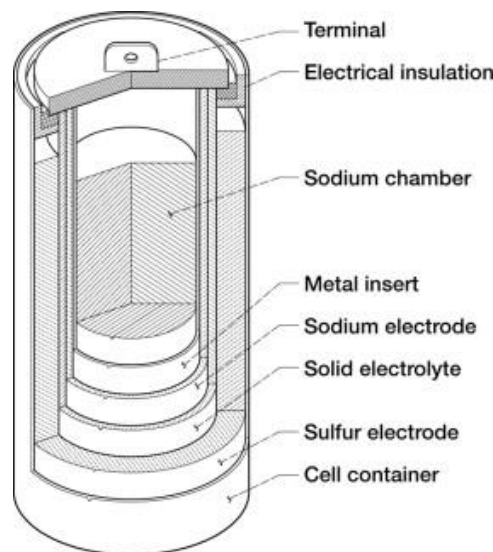


41. ábra Telepített nátrium-kén akkumulátorok a világban [6]

Ezek az akkumulátorok különböző funkciókat töltenek be, ahogy az ábrán is látszik ezek különböző színekkel vannak jelölve. Rózsaszín kör jelöli a megújuló energia termelőket támogató akkumulátorokat. Citromsárga a hálózati funkciót betöltőket, mint például a kiegyenlítő szabályozás. Narancssárga a fogyasztói, vagy inkább kereskedelmi célú akkumulátorokat. Ezek az akkumulátorok iparterületek vagy lakossági területek energiaellátásában vesznek részt, vagy a villamosenergia tőzsdei kereskedésében. Végül a zöld karikával jelöltek olyan mikorgrideket látnak el, melyek távol esnek a hálózattól, vagy teljesen elszigeteltek. Látható, hogy a legnagyobb energiatároló már bőven a GWh tartományban van, de a néhány tíz MWh kapacitású tárolók egyelőre még gyakoribbak.

## 2.1. Nátrium-kén akkumulátor felépítése, működése

Minden akkumulátor alapvetően négy fő részből áll, és az ezeken keresztül vándorló töltéshordozóból. Ezek a fő részek az anód, az elektrolit, a szeparátor és a katód. Az anód szerepét kisütéskor az olvadt nátrium tölti be. Innen indulnak el a  $\text{Na}^+$  ionok a szilárd ún. „ $\beta$ -alumínium-oxid” elektroliton keresztül a katód irányába. A szilárd elektrolit jó ionos vezető, ezenkívül elszeparálja egymástól az anódot és katódot. A katódra érkező nátrium ion reakcióba lép az olvadt kénnel a külső áramkör felől érkező elektron segítségével. Töltéskor fordított irányú reakció játszódik le. [5][7] Egy akkumulátorcella felépítését mutatja be a 3. ábra.



42. ábra Nátrium-kén akkumulátorcella vázlata [7]

Ahhoz, hogy a nátrium és kén is olvadt állapotban legyen az akkumulátorban magas hőmérsékletre van szükség, jellemzően 300 és 350 °C között. Ezért tekintjük a nátrium-kén akkumulátorokat, hagyományosan magas hőmérsékletű akkumulátoroknak, annak ellenére, hogy folyamatosan kísérleteznek szoba hőmérsékletű változatokkal is [8].

## 2.2. Nátrium-kén akkumulátor összehasonlítás más technológiákkal

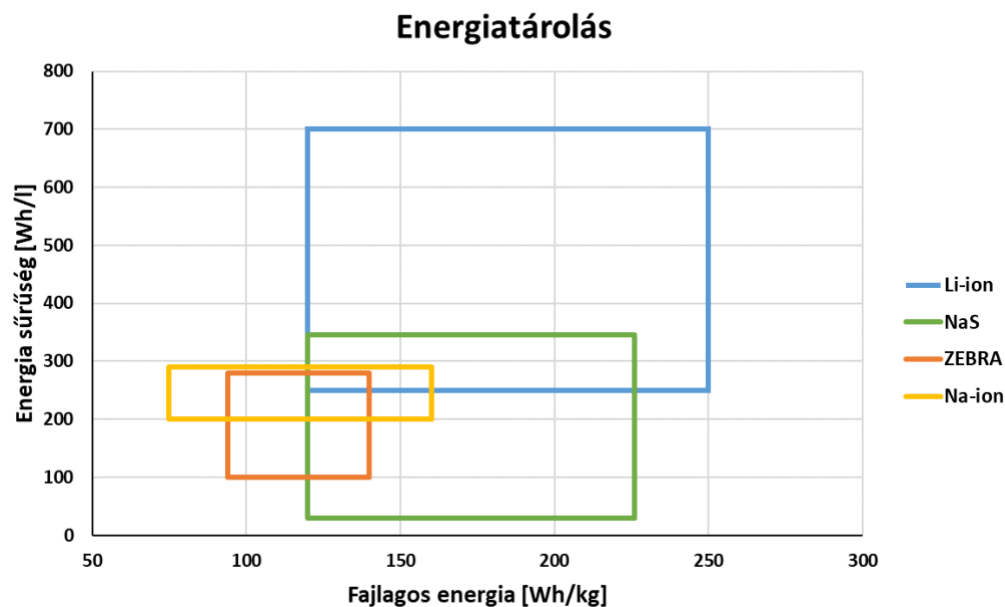
Mint a bevezetőben is említettük hazánkban, de emellett világszinten is [10][11], a lítium-ion akkumulátorok töltik be a vezető szerepet a hálózati energiatárolásban. Viszont maga a lítium-ion

technológia elnevezés számos egymástól nagy mértékben eltérő akkumulátort takar. Itt elsősorban katód anyagok közti különbségekre gondolunk. Mivel ez a cikk nem a lítium-ion akkumulátorok áttekintésével foglalkozik, az összefoglaló táblázatban csak két változattal hasonlítjuk össze a nátrium-kén akkumulátorokat. Ezek a vas-foszfát alapú (LFP, vagy LiFePo jelölésű, a lítium-vas-foszfát angol elnevezéséből) illetve a nikkel-mangán-kobalt (NMC, néha NCM, szintén az angol elnevezés alapján) típusok lesznek.

A másik magas hőmérsékletű akkumulátortípus, amivel összehasonlítjuk a nátrium-kén technológiát az a NaNiCl technológia, melyet szokás a ZEBRA mozaikszóval jelölni. Ez utóbbi mozaikszó a Zeolyte Battery Research Africa projektnéből származik. [12] Ezeket az akkumulátorokat is folyamatosan fejlesztik, viszont olyan nagyságú elterjedésről, mint a nátrium-kén esetében nem beszélhetünk. [13]

Ezeket felül érdekes lehet még az összehasonlítás a nátrium-ion akkumulátorokkal. Ezek az akkumulátorok egyszerre jelenthetnek piaci versenytársat a lítium-ion technológiának az e-mobilitás területén, és mindegyik technológiának a hálózati energiatárolás esetén. [14] Ez a technológia szintén intenzíven kutatott terület, ahogyan azt a nemrég megjelent a kereskedelmi forgalomba került cellával kapcsolatos tanulmány is mutatja. [15]

Az összehasonlításnál érdemes megvizsgálni az energiatárolási képességet. Ezt az energiatárolók fajlagos energiájának (gravimetrikus energiasűrűség) Wh / kg és energiasűrűségének (volumetrikus energiasűrűség) Wh / l összehasonlításával lehet megtenni. A szerzők nem találtak a szakirodalomban olyan változatot, melyben mindegyik technológia szerepelt volna, így a források alapján saját diagramon mutatják be a technológiákat. [16] – [19] Ennek az oka valószínűleg a technológiák erős átfedése, ahogyan az a 4. ábrán is látszik.



43. ábra A technológiákat összehasonlító diagram.

A 4. ábra alapján egyértelműen látszik az oka annak, hogy miért tudtak a Li-ion akkumulátorok az e-mobilitásban elterjedni. Általában elmondható, hogy azonos tömegben vagy térfogatban nagyobb mennyiségű energiát lehet tárolni. Vagy megfordítva azonos energiával rendelkező akkumulátorok könnyebben és kisebbek. Mivel ezek a szempontok a nagyméretű hálózati tárolóknál kevésbé kritikusak, mint mondjuk egy elektromos repülőnél, így ezen a területen a többi technológia hátrányát ellensúlyozni tudják más szempontok, például a költségek. Ezt az összehasonlítást érdemes szintén kWh-ra vetítve elvégezni. A nemzetközi szakirodalom jellemzően USD vagy EUR / kWh értékben adják meg ezeket az értékeket, mi az EUR / kWh-t mutatjuk be az 1. táblázatban.

1. táblázat – Akkumulátor technológiák és telepítési költségeik[13][20]

Technológia	Költség [EUR / kWh]
Na-S	350 – 400
Li-ion	150 – 320
ZEBRA	550 – 700
Na-ion	170 – 220

A ZEBRA akkumulátorok esetén a viszonylag kiugró értéknek az oka, hogy senki nem gyártja őket nagyobb mennyiségben, így egyelőre nem mentek át a többihez hasonló gyártási költség csökkenésen. A Na-S-ra vonatkozó szakirodalmi értékek megegyeznek a Tesseract projektben felmerülő költségekkel.

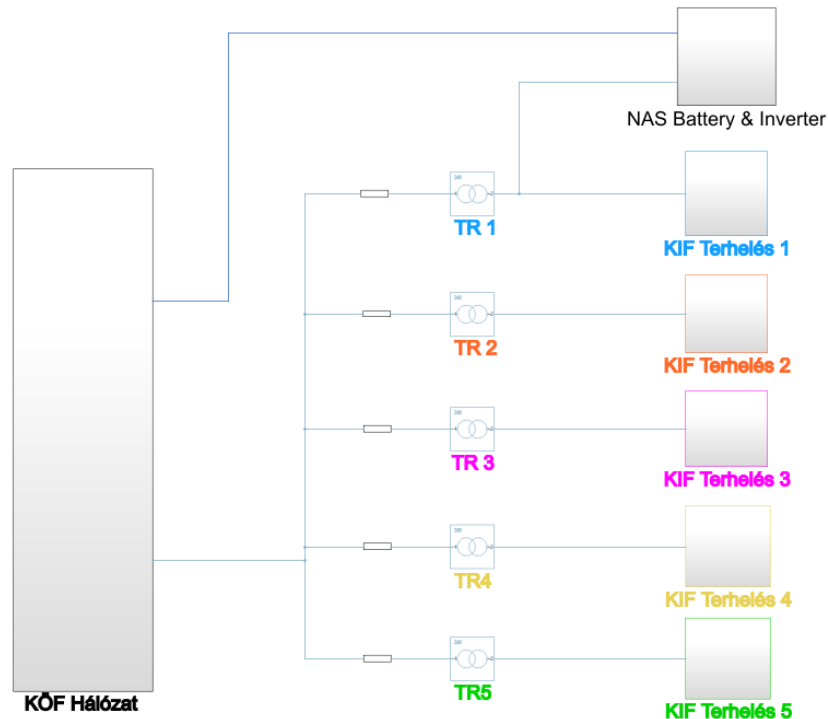
### 3. SZIMULÁCIÓK

A szimulációkat MATLAB/Simulink környezetben végeztük a KFKI telephely általunk létrehozott villamos modelljén. A nátrium-kén akkumulátor modelljét, mivel még nem érkezett be a konkrét eszköz, ezért méréseket sem tudtunk rajta végezni, így szakirodalom segítségével készítettük el.

### 4. TELEPHELY MODELLEZÉSE

A telephely középfeszültségen csatlakozik a külső közcélú hálózatra. A telephelyet belülről több transzformátor körzetre lehet felosztani, melyek mindegyike saját Közép feszültségű (KÖF) / Kisfeszültségű (KIF) transzformátorral rendelkezik. A telephely vázlatos elrendezését mutatja be az 5. ábra Simulink környezetben.





44. ábra Telephelyi KÖF hálózat vázlata

A külső KÖF hálózatot szimulációink során végtelennek tekintjük és egyszerű háromfázisú feszültségforrással modelleztük. Az egyes transzformátor körzeteket különböző színekkel jelöltük. A kisfeszültségű oldalon lévő terheléseket a Simulink beépített ún. „dinamikus háromfázisú terhelésével” vettük figyelembe, a fogyasztók összevonásával. Ez az elem képes kezelni a terhelés változását a szimuláció során.

A „NAS Battery & Inverter” blokk jelöli a telepítendő akkumulátor rendszer helyét a telephelyen belül, az 5. ábrán az 1-es „kék” körzethez csatlakoztatva a KIF oldalon. Az akkumulátor a valóságban nem csatlakozik közvetlenül a KÖF hálózathoz, a blokkok összekötésére csak szimulációs okokból volt szükség.

## 5. AKKUMULÁTOR MODELL

Az akkumulátort egyszerű feszültség generátorral képzetük le, mely egy feszültség forrásból és egy ellenállásból áll sorba kapcsolva. A modellt a következő (1) és (2) egyenletek írják le:

$$u_{BAT}(t) = u_{OCV}(SoC) - R_{BAT}(SoC, T, sgn(i_{BAT})) \cdot i_{BAT}(t) \quad (1)$$

$$SoC(t) = \frac{1}{Q_n} \cdot \int_0^t i_{BAT}(t) dt \quad (2)$$

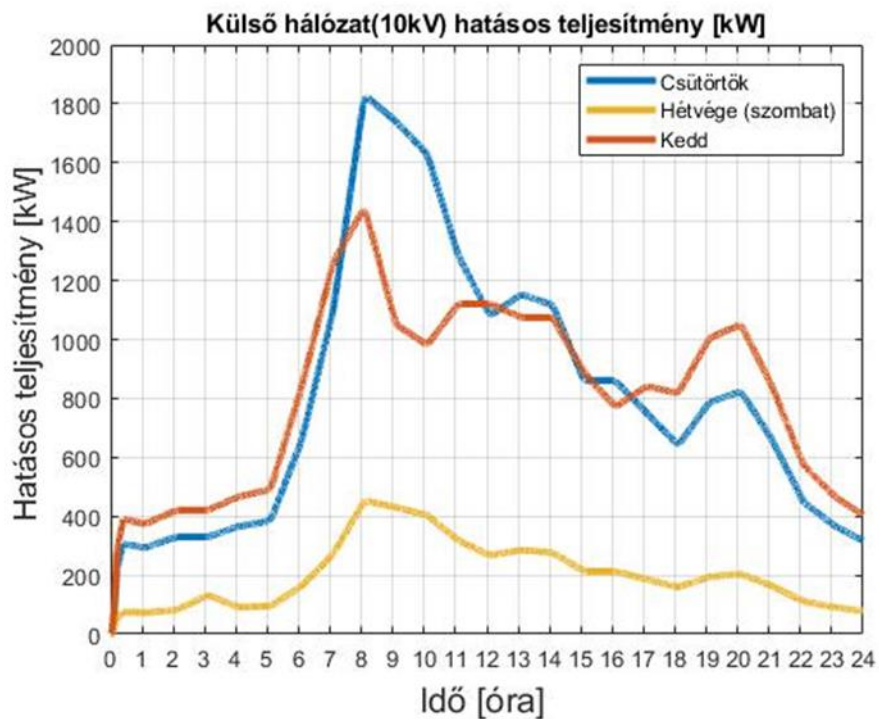
Az első egyenletben a  $u_{BAT}$  az akkumulátor kapocsfeszültsége,  $u_{OCV}$  a terhelésmentes feszültsége (nyíltköri az angol open circuit voltage-ból),  $i_{BAT}$  az árama,  $R_{BAT}$  az ellenállása. Az  $SoC$  a töltöttségi állapot (State-of-Charge),  $T$  a hőmérséklet, a szignum függvény pedig arra utal,



hogy az ellenállás változik a töltési és kisütési irányban, azaz függ az áram előjelétől. Az RBAT és uOCV(SOC) paramétereiket a [21] tanulmány alapján határoztuk meg.

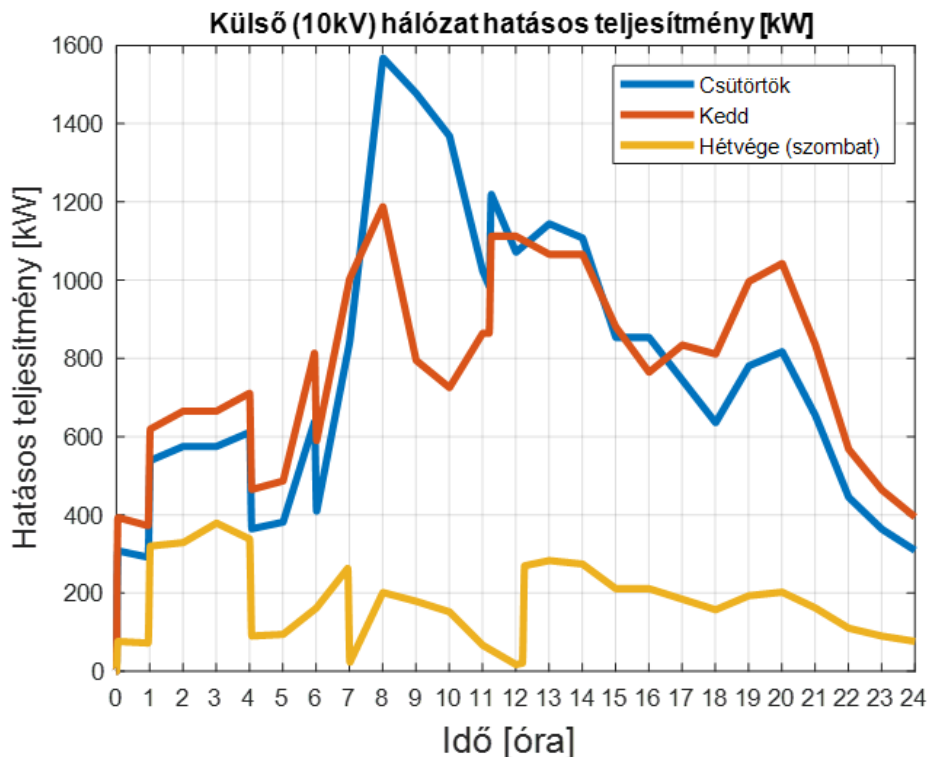
## 6. SZIMULÁCIÓS EREDMÉNYEK

A KFKI telephelyen csak az aggregált fogyasztási adatok voltak ismertek, transzformátor körzetenként havi bontásban, mely önmagában nem tette lehetővé órás vagy nagyobb felbontású szimulációk elkészítését. Ezért a napi terhelésingadozást becsülnünk kellett, egy irodaház fogyasztásának segítségével, melyhez a [22] forrást használtuk fel. A 6. ábrán látható a teljes telephely fogyasztása az akkumulátor bekapcsolása nélkül három különböző tetszőleges áprilisi napon.



45. ábra Telephelyi teljesítményfelvétel a külső hálózatról, akkumulátor nélkül

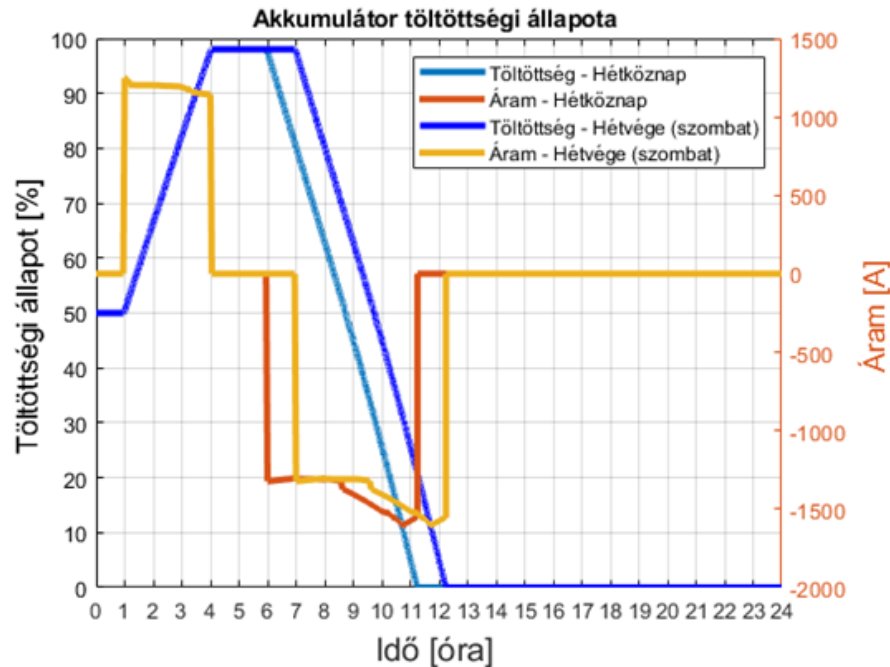
Az ábra alapján jól beazonosíthatók a csúcs és völgyidőszakok, melyek alapvetően jól korrelálnak a munkaidővel. Fontos feltétel az akkumulátor szempontjából, hogy a cél a telephelyi fogyasztók ellátása, tehát, hogy ne történjen kikapcsolás a telephelyről. Mivel az akkumulátor névlegesen 250 kW-ot tud leadni / felvenni, általánosságban ez nem kritikus, kivéve a hétvégi napokon (vagy hajnali órákban), amikor alapvetően kisebb a telephelyi fogyasztás. Továbbá fontos szempont lehet, hogy olyankor töltsük az akkumulátort, amikor kicsi a telephely teljesítmény felvétele. Erre jellemzően a munkaidő elején érdemes sort keríteni. Ezeknek a feltételeknek megfelelően mutatja be a 7. ábra az akkumulátor hatását a telephelyi fogyasztásra.



**46. ábra Telephelyi teljesítményfelvétel a külső hálózatról, akkumulátorral**

A korábban megfogalmazottak szerint hajnali egy és négy óra között töltjük az akkumulátort, majd hétközben hat órákor elkezdjük kisütni, míg hétféjén hét órákor kezdődik meg a kisütés. Ennek hatására a maximális telephelyi fogyasztás lecsökkent 1800 kW-ról, 1600 kW alá a csütörtöki napot vizsgálva, amivel jelentősen csökkentettük a telephelyi hálózat elemeinek terhelését. Ez lényegében egy „peak-shaving” típusú felhasználás.

Az akkumulátor áramát és SoC értékét mutatja be a 8. ábra. Mivel a keddi és csütörtöki, azaz a hétköznapok, tekintetében nincs különbség a töltés és kisütés módjában, ezért az ábrán egy görbét tüntettük fel hétköznap jelöléssel. A hétköznap és hétféje a különbség csak a kisütés kezdetében van. Ezekben a szimulációkban a modell működésének ellenőrzése volt a cél és hálózatra gyakorolt hatások megismerésére, ennek megfelelően maximális terheléssel vizsgáltuk az akkumulátort. Az valós üzemeltetési körülmények mellett az eredmények eltérést fognak mutatni, mert az akkumulátor felüyeleti rendszer hatásait ebben a szimulációban nem vettük figyelembe.



47. ábra Akkumulátor áram és SoC

## 7. ÖSSZEFOGLALÁS

Cikkünkben bemutatuk a KFKI telephelyén futó „Tesseract” projekt legfontosabb elemeit. Összehasonlítottuk a nátrium-kén energiatárolókat más a piacon elérhető hasonló paraméterekkel rendelkező energiatároló egységekkel. Megállapítható, hogy a nátrium-kén akkumulátorok versenyképes alternatívát nyújthatnak a lítium-ion energiatárolókkal szemben a hálózati energiatárolás területén. Ezt az 1. és 2. táblázatokban feltüntetett adatok mellett, az élettartam és várható karbantartási költségek is befolyásolhatják, ezeket azonban csak az üzembehelyezést követően tudjuk összehasonlítani. Szimulációk segítségével megmutattuk, hogy milyen körülmények között lehet optimálisan üzemeltetni az energiatárolót a telephelyen belül, és annak milyen hatásai vannak a telephely teljes fogyasztására. A tanulmányunkból már látható, hogy milyen különböző célok, üzemelési körülmények esetén vizsgáljuk a későbbiekben az ország első nátrium-kén akkumulátora.

## 8. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] NKFIH. (2021.11.22). Támogatott projektek [Online]. Elérhetőség: <https://nkfi.gov.hu/palyazoknak/egyeb-tamogatatas/2021-211-ek-tamogatott-projektek>
- [2] Energiatudományi Kutatóközpont. (2023.06.22). Hírek [Online] Elérhetőség: <https://www.ek-cer.hu/2023/06/22/nas-akkumulator-gyartas-az-eknak/>
- [3] KFKI. Telephelytörténet [Online]. Elérhetőség: <https://www.kfki.hu/>
- [4] S. C. Caroline, S. P. Madhusudan, G. K. Dalapati, S. K. Batabyal, „Energy storage technologies for sustainable development” a Sulfide and Selenide Based Materials for Emerging Applications c. könyvben. Szerkesztők: Dalapati, Wong, Kundu, Chakraborty, Zhuk. Elsevier, 2022, pp. 583-606, ISBN 9780323998604. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99860-4.00004-6>.
- [5] NGK Insulators Ltd. NAS Batteries [Online] Elérhetőség: <https://www.ngk-insulators.com/en/product/nas.html>

- [6] NGK Insulators Ltd. Solutions [Online] Elérhetőség:  
<https://www.ngk-insulators.com/en/product/nas-solutions.html>
- [7] A. Poullikkas: A comparative overview of large-scale battery systems for electricity storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 27, pp. 778-788. 2013. ISSN 1364-0321.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.017>.
- [8] D. Kumar, S. B. Kuhar, D.K. Kanchan: Room temperature sodium-sulfur batteries as emerging energy source. *Journal of Energy Storage*, Vol. 18, pp. 133-148. 2018. ISSN 2352-152X.  
<https://doi.org/10.1016/j.est.2018.04.021>.
- [9] H. D. Yoo, E. Markevich, G. Salitra, D. Sharon, D. Aurbach: On the challenge of developing advanced technologies for electrochemical energy storage and conversion. *Materials Today*, Vol. 17, Issue 3, pp. 110-121. 2014. ISSN 1369-7021.  
<https://doi.org/10.1016/j.mattod.2014.02.014>.
- [10] IRENA (2017), *Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. ISBN 978-92-9260-038-9.  
<https://www.irena.org/publications/2017/oct/electricity-storage-and-renewables-costs-and-markets>
- [11] IRENA (2019), *Innovation landscape brief: Utility-scale batteries*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. ISBN 978-92-9260-139-3  
[https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA\\_Utility-scale-batteries\\_2019.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_Utility-scale-batteries_2019.pdf)
- [12] R. Benato, N. Cosciani, G. Crugnola, S. D. Sessa, G. Lodi, C. Parmeggiani, M. Todeschini: Sodium nickel chloride battery technology for large-scale stationary storage in the high voltage network. *Journal of Power Sources*, Vol. 293 pp. 127-136. 2015. ISSN 0378-7753. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.05.037>.
- [13] M. Armand, N. Ortiz-Vitoriano, J. Olarte, A. Salazar, R. Ferret: Salt Batteries: Opportunities and applications of storage systems based on sodium nickel chloride batteries, Publication for the committee on Industry, Research and Energy (ITRE), Policy Department for Economic, Scientific and Quality of Life Policies, European Parliament, Luxembourg. 2023. ISBN 978-92-848-0155-8. doi: 10.2861/287066
- [14] T. Yu, G. Li, Y. Duan, Y. Wu, T. Zhang, X. Zhao, M. Luo, Y. Liu: The research and industrialization progress and prospects of sodium ion battery. *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 958. 2023. ISSN 0925-8388.  
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.170486>.
- [15] H. Laufen, S. Klick, H. Ditler, K. L. Quade, A. Mikitisin, A. Blömeke, M. Schütte, D. Wasylowski, M. Sonnet, L. Henriche, A. Schwedtd, G. Stahl, F. Ringbeck, J. Mayer, D. Uwe Sauer: Extensive Multi-Method Characterization of a Commercial 1.2 Ah 18650 Sodium-Ion Battery Cell. [Preprint]  
[https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=4542213](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4542213)
- [16] R. Holze: „SECONDARY BATTERIES – HIGH TEMPERATURE SYSTEMS | Sodium–Sulfur” a Encyclopedia of Electrochemical Power Sources c. könyvben. Szerkesztő: Garche. Elsevier, 2009, pp. 302-311. ISBN 9780444527455, <https://doi.org/10.1016/B978-044452745-5.00179-9>
- [17] C.-H. Dustmann: Advances in ZEBRA batteries. *Journal of Power Sources*, Vol. 127, Issues 1–2, pp. 85-92. 2004. ISSN 0378-7753. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2003.09.039>.
- [18] H. Bai, Z. Song: Lithium-ion battery, sodium-ion battery, or redox-flow battery: A comprehensive comparison in renewable energy systems. *Journal of Power Sources*, Vol. 580. 2023. ISSN 0378-7753.  
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233426>
- [19] J. Mitali, S. Dhinakaran, A.A. Mohamad: Energy storage systems: a review, *Energy Storage and Saving*, Vol. 1, Issue 3 pp. 166-216. 2022. ISSN 2772-6835. <https://doi.org/10.1016/j.enss.2022.07.002>.
- [20] L. Zhao, T. Zhang, W. Li, T. Li, L. Zhang, X. Zhang, Z. Wang, *Engineering of Sodium-Ion Batteries: Opportunities and Challenges*. Engineering. 2022. ISSN 2095-8099. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.08.032>.
- [21] E.M.G. Rodrigues, G.J. Osório, R. Godina, A.W. Bizuayehu, J.M. Lujano-Rojas, J.C.O. Matias, J.P.S. Catalão: Modelling and sizing of NaS (sodium sulfur- battery energy storage system for extending wind power performance in Crete Island. *Energy*, Vol. 90, Part 2, pp. 1606-1617. 2015. ISSN 0360-5442.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.116>.
- [22] Dr. Horváth M., Tóth Á., Dr. Csoknyai T.: Középületek üzemeltetésének elemzése okos mérőkkel gyűjtött adatsorok alapján. *Magyar Épületgépészet*, LXVIII. évfolyam, 2019/5. szám. 2019.

Tóth Balázs; Sütő Bence  
tothbalazs@edu.bme.hu  
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Villamos Energetika Tanszék  
Smart Power Laboratórium

## Inverter alapú mikrogriddek hálózati reszinkronizációjának vizsgálata

**Absztrakt** – A megújuló energiatermelés elterjedésével rohamosan nő a teljesítményelektronikán keresztül a hálózatra csatlakozó termelőegységek száma, ami kihívás elé állítja a villamosenergia-rendszert. A megújuló energiaforrások hatékony integrálására kínálnak megoldást a nagy hálózat egy kisebb, de a benne szereplő termelőegységek és fogyasztók szempontjából összetett részét képező mikrogriddek. Az inverterek szabályozása lehetővé teszi, hogy a mikrogriddek képesek legyenek a hálózatról leválva, szigetüzemben is működni, továbbá új intelligens funkciók megvalósításával járuljanak hozzá a villamosenergia-rendszer stabil és megbízható üzeméhez.

Szigetbe kerüléskor a mikrogrid elveszíti a hálózat nyújtotta frekvencia- és feszültségreferenciát, ekkor az úgynevezett grid-forming (GFM) inverterek feladata a lokális hálózat számára a frekvencia- és feszültség alapjel biztosítása. A mikrogriddek szempontjából kritikus a nagy hálózatról történő leválást, illetve az arra történő visszakapcsolódást megelőző és követő pár másodperc, hiszen ekkor nem megfelelő szabályozás mellett pillanatszerűen nagy áramok indulhatnak meg, ami a védelmi eszközök működéséhez, és akár mikrogrid kieséséhez is vezethet.

A munkánk során olyan szabályozási módszereket vizsgáltunk, amelyekkel a szakirodalomban elterjedten alkalmazott GFM szabályozási struktúrák bővíthetőek, ezzel biztosítva a „zökkenőmentes” váltást szigetüzem és hálózati üzem között. A munka keretében bemutatjuk a vizsgált algoritmust és értékeljük a működését szoftveres környezetben végzett szimulációkon keresztül.

**Abstract** – *Microgrids can be the solution for the efficient integration of renewable energy sources. Modern inverter control enables microgrids to operate in islanded mode, as well as to provide ancillary services which contributes to the stable and reliable operation of the electrical grid.*

*When electrically isolated from the rest of the grid, the microgrid loses the frequency and voltage stability provided by the network, so there is a need for so-called grid-forming (GFM) inverters that can provide voltage and frequency reference for the local grid (for example, with the help of droop). The moments after reconnecting to the main grid is crucial for the safe operation of microgrids, since without proper resynchronization high transient currents can appear, which eventually lead to protection tripping.*

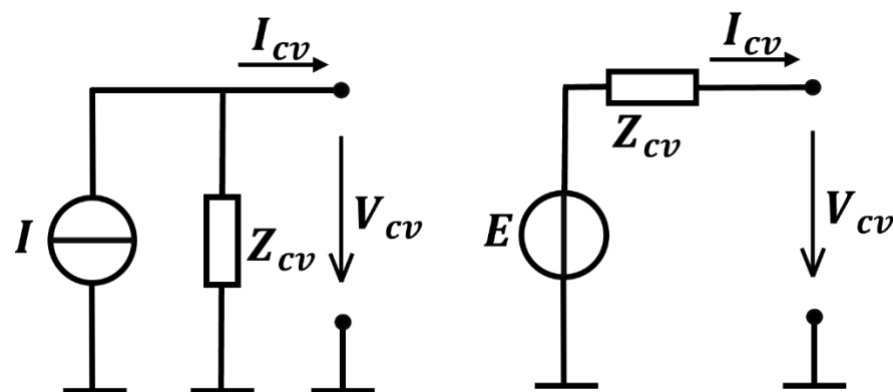
*In this work we summarize at state-of-the-art control methods for microgrid resynchronization, which can be deployed in GFM inverter control, to provide smooth*

*transition between microgrid operation modes. In this paper we present and evaluate a GFM resynchronization method through software simulations.*

**Címszavak: grid-forming, teljesítményátalakítók szabályozása, mikrogrid, reszinkronizáció**

## 1. BEVEZETÉS

Jelenleg a hálózaton már jelenlévő inverteres csatlakozású megújuló energiatermelés közel egésze a grid-following (GFL) inverter vezérlési stratégiát alkalmazza. A GFL inverterek vezérelhető áramforrásként értelmezhetőek a hálózaton. A csatlakozási pontjukon fáziszárt-hurok (Phase-locked Loop, PLL) segítségével mérik a frekvenciát és a fázisszöveget, és külső teljesítményjelekre reagálva injektálnak hatásos és meddő áramot a hálózatba. Hálózati zavarok esetén is arra törekszenek, hogy szinten tartsák (vagy bizonyos karakterisztikák mentén módosítsák) az általuk betáplált teljesítményt. Mivel külső frekvencia- és feszültségreferenciára van szükség a működésükhöz, így nem képesek üzemszerűen szigetben működni, és amennyiben egy részrendszer leválik a hálózatról, akkor az arra csatlakozó GFL invertereknek is le kell kapcsolódnia a hálózatról.



48. ábra: GFL (bal) és GFM (jobb) inverterek egyszerű helyettesítőképei

A grid-forming (GFM) inverterek vezérlési stratégiája alapjaiban különbözik a GFL-től. A szinkrongenerátorokhoz hasonlóan egy vezérelt feszültségforrásként képezhetőek le, ami egy impedancián keresztül csatlakozik a hálózatra. A szabályozási rendszer legtöbbször statizmus alapú (droop) karakterisztikát valósít meg, azaz a betáplált hatásos és meddő teljesítmény változtatásával képes befolyásolni a hálózat frekvenciáját, illetve feszültségét.

Az okos, inverteralapú mikrogridek létesítésekor a hálózat szereplőit olyan vezérléssel kell ellátni, amely biztosítja következőket[1]:

- Hatásos és meddőteljesítmény szabályozás
- Autonóm teljesítménymegosztás
- Zökkenőmentes átmenet az üzemállapotok (hálózatpárhuzamos üzem, szigetüzem) között.

Jelenleg a szakirodalomban fellelhető state-of-the-art megoldások között szerepelnek a GFM invertervezérlési módszerek, a hierarchikus vezérlésen alapuló megoldások [2], illetve azon szabályozású módszerek, amelyek CCM és VCM módok között váltanak [1] (CCM, Current



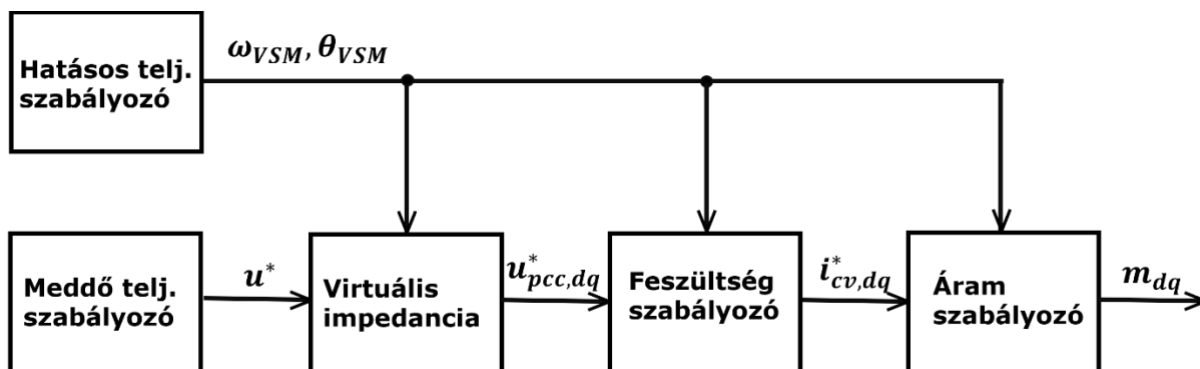
Controlled Mode, VCM, Voltage Controlled Mode). A cikkben a GFM inverterek szinkronizáló képességére fókuszálunk.

A cikk a következőképpen szerveződik: a 2. fejezetben bemutatjuk a mikrogridben kiemelkedő szerepet játszó inverter vezérlés felépítését és működésének alapelveit, a 3. fejezetben a mikrogrid rezinkonizációjának kérdéskörét tárgyaljuk és bemutatunk egy lehetséges szabályozási megoldást, amivel megoldható a mikrogrid rezinkonizációja, végül a negyedik fejezetben szimulációs eredményeken keresztül ismertetjük a felvázolt szabályozás működését.

## 2. GFM INVERTER VEZÉRLÉS

A szakirodalomban a grid-forming vezérlésnek számos fajtája megtalálható: az egyszerű statizmus alapú (droop) szabályozás, a virtuális szinkrongép [3], a szinkronverter [4], a matching control[5] és a virtuális oszcillátor alapú szabályozás [6]. A cikkben bemutatott szabályozás a virtuális szinkrongép egy lehetséges megvalósítása, melyet [7] alapján építettünk meg.

A szabályozást három részre lehet osztani: hatásos teljesítmény kör, meddő teljesítmény kör, illetve a kaszkád feszültség és áramszabályozó kör. A kaszkád feszültség és áramszabályozó az inverter kapcsolódási pontján (PCC – Point of Common Coupling) mérhető feszültséget és az inverterből a hálózat felé folyó áramot szabályozza. Mindkét egység PI szabályozót tartalmaz, így maradandó hiba nélkül képes követni a bemenetet, így érvényre juttatni a teljesítmény referenciák által megkövetelt feszültséget és áramot. A vezérlés szinkron forgó koordináta rendszert alkalmaz, így a referencia jeleket ideálisan tudja követni. A forgó rendszer a virtuális szinkron gép belső körfrekvenciájához van rögzítve, amely a VSM virtuális rotorjának szögsebességeként képzelhető el, ami nem mindig egyezik meg a mikrogrid hálózati csatlakozási pontján mérhető frekvenciával.



49. ábra: A szabályozást alkotó főbb blokkok

### 2.1. Hatásos teljesítmény szabályozás

A hatásos teljesítmény szabályozása a szinkrongépek lengési egyenletének megfelelően történik. A belső körfrekvencia dinamikáját (7) írja le.

$$J \frac{d\omega_{VSM}}{dt} = \frac{p_{ref}}{\omega_{ref}} - \frac{p}{\omega_{ref}} + D_p(\omega_{ref} - \omega_{VSM}) + k_d(\omega_{pll} - \omega_{VSM}) \quad (7)$$

ahol,

- $\omega_{VSM}$  a szabályozás saját körfrekvenciája

- $p$  a háromfázisú, PCC ponton mérhető hatásos teljesítmény
- $D_p$  a frekvencia droop konstans
- $k_d$  a csillapítási tényező
- $J$  az inercia konstans

Az egyenlet utolsó tagja a hagyományos szinkrongépek csillapítását hívatott modellezni. A belső frekvencia és a PCC ponton mérhető frekvencia bár állandósult állapotban megegyezik, a tranzien folyamatok ideje alatt eltérhet egymástól. A csillapítás mértéke  $k_d$  csillapítási tényező értékével állítható be, a nagyobb érték mellé lassabban lejátszódó tranzien és kisebb gradiensű frekvenciaváltozás tartozik.

Az állandósult állapotban kialakuló frekvenciáért az egyenlet jobb oldalának első három tagja felelős. Az egyenlet baloldalán álló tag állandósult állapotban nulla, ekkor a szabályozás belső frekvenciája megegyezik a hálózat frekvenciájával. A leadott hatásos teljesítményt a frekvencia függvényében a P-f droop határozza meg, amelynek meredekségét  $D_p$  paraméter szabja meg.

## 2.2. Meddő teljesítmény szabályozás

A PCC ponti feszültség és a meddő teljesítmény közti összefüggést (8) írja le.

$$u^* = \hat{u}_{ref} + (\hat{u}_{ref} - \hat{u}) - D_q(q_{ref} - q) \quad (8)$$

ahol,

- $u^*$  a kaszkád szabályozónak tovább adott feszültségreferencia
- $\hat{u}$  a PCC ponton mérhető fázisfeszültség csúcsértéke
- $q$  a háromfázisú, PCC ponton mérhető meddő teljesítmény
- $D_q$  a feszültség droop konstans

A kaszkád áramszabályozó bemenetére érkező feszültség referencia értékét két tényező határozza meg: az aktuális feszültségérték eltérése a feszültség amplitúdó referencia jelétől, illetve a meddőteljesítmény-alapjel és a PCC ponton mérhető meddő teljesítmény közötti különbség. Bár a P-f kör esetén is van jelentősége, mégis itt fontos kiemelni, hogy a teljesítmény referencia értékeket a PCC ponton mérhető teljesítményértékekkel hasonlítja össze a szabályozás, így az erősáramú szűrő teljesítményigénye nem játszik szerepet a droop összefüggésekben. Az U-Q droop meredekségét a  $D_q$  paraméter változtatásával lehet állítani.

## 2.3. Virtuális impedancia

A vezérlésben a kaszkád szabályozók és az alapjelképző szabályozók között úgynevezett virtuális impedancia szerepel. A kisfeszültségű hálózat impedanciája többnyire rezisztív, így a hatásos teljesítmény és feszültségamplitúdó, illetve a meddő teljesítmény és frekvenciaközött erős összefüggés áll fent. A virtuális impedanciával ez az összefüggés gyengíthető, hiszen az inverter

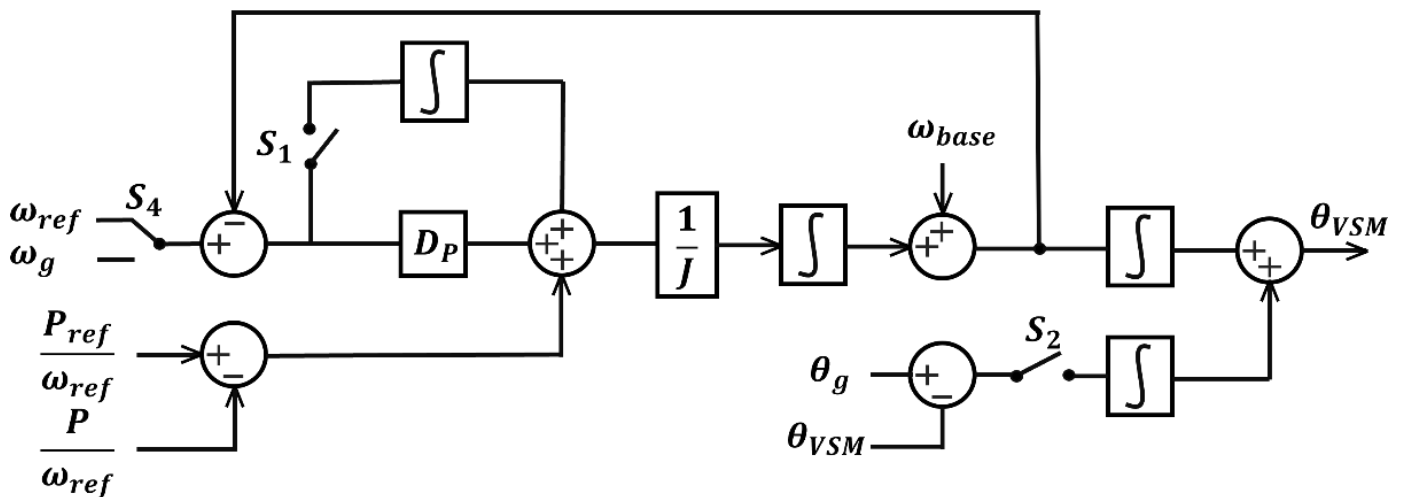
bemenő impedanciája induktív irányba tolódik el. Az induktív jellegből fakadóan a feszültségamplitúdó és a meddő teljesítmény közötti tranziens dinamikát javítja.

Továbbá a virtuális impedancia paraméterei új szabadsági fokot jelentenek a rendszer stabilitását illetően. A GFM inverterekről általánosságban elmondható, hogy a feszültséggenerátoros jellegből fakadóan a gyengébb hálózatokon stabilabbak. A virtuális impedancia a szabályozott feszültségű csatlakozási pont és a mögöttes hálózat közötti impedanciát növelve csökkenti a szabályozás által érzékelt zárlati teljesítményt.

### 3. RESZINKRONIZÁCIÓ MEGVALÓSÍTÁSA VIRTUÁLIS SZINKRONGÉP SEGÍTSÉGÉVEL

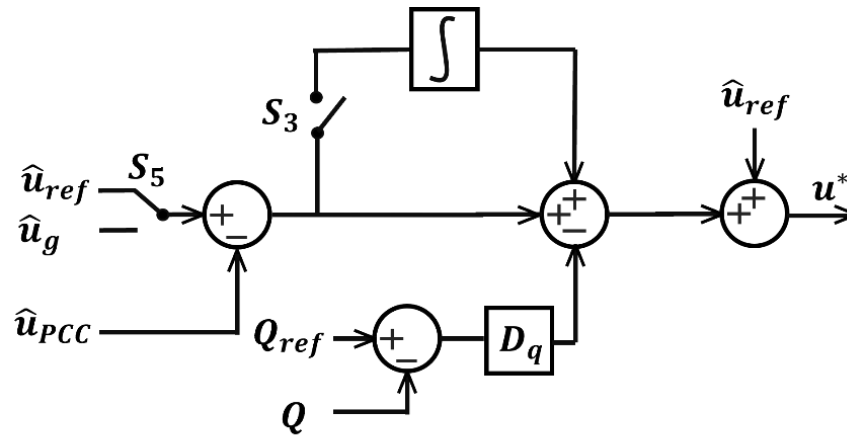
A mikrogrid hálózatra történő visszakapcsolása akkor zökkenőmentes (a hálózat semelyik pontján nem alakul ki határértéket túllépő feszültség, illetve áram), ha a mikrogridet a hálózattól elválasztó megszakító két oldalán mérhető feszültség fázor amplitúdója, frekvenciája és szöghelyzete megegyezik, vagy csak kis mértékben tér el.

A jelen fejezetben bemutatásra kerülő reszinkronizációs algoritmust [7] alapján építettük fel. A stabil reszinkronizációt három új blokk biztosítja, amivel kiegészül az előző fejezetben bemutatott szabályozási struktúra. A hatásos teljesítmény körben az  $\omega_{ref}$  és  $\omega_{VSM}$  frekvencia különbség integrátoron keresztül hozzáadódik a droop értékéhez, illetve a  $\theta_g$  hálózati szöghelyzet és  $\theta_{VSM}$  belső szöghelyzet különbsége ugyancsak integrátoron keresztül hozzáadódik  $\theta_{VSM}$  értékéhez. Az így kapott hatásos teljesítmény-frekvencia kört 50. ábra mutatja.



50. ábra: Szinkronozó blokkokkal kiegészített hatásos teljesítmény szabályozás

A meddő teljesítmény kör is kiegészül: a referencia feszültségamplitúdó és a PCC ponti feszültség mért csúcsértéke közötti különbség integrátoron keresztül hozzáadódik az U-Q droophoz, ezt szemlélteti a 51. ábra.



51. ábra: Szinkronozó blokkok kiegészített meddp teljesítmény szabályozás

Mindhárom integrátor előtt egy kapcsoló helyezkedik el, amely alapértelmezetten ki van kapcsolva mind hálózati szinkron üzemben, mind szigetüzemben.

A mikrogrid és a hálózat további részének határán elhelyezkedő vezérelt megszakító mindkét oldalán elvárás, hogy legyen folyamatos feszültség és árammérés mindhárom fázisban. A mikrogrid oldalán ez jelen cikk esetén úgy egyszerűsödik, hogy ez a pont megegyezik szinkronizációért felelős GFM inverter PCC pontjával.

A szinkronizáció megkezdésekor a szabályozás referencijeleit ( $\omega_{ref}$ ,  $\hat{u}_{ref}$ )  $S_{hál}$  hálózati oldali mért értékeire kell cserélni, ezt további két kapcsoló végzi a szabályozásban ( $S_4, S_5$ ). A szinkronizálás során az integrátorok bekapcsolódnak ( $S_1, S_2, S_3$ ) és ideális, szinuszos jelalakok esetén maradandó hiba nélkül követik a hálózat frekvenciáját, feszültségamplitúdóját és szög helyzetét.

A hálózati vezérelt megszakító bekapcsolásának feltétele, hogy a PCC ponti feszültség és a hálózati feszültség esetén teljesüljön három kritérium: az amplitúdókülönbség legyen kisebb vagy egyenlő, mint  $\hat{u}_{krit}$ , a szögműködés legyen kisebb vagy egyenlő, mint  $\theta_{krit}$  és a frekvenciaváltozás mértéke (Rate of Change of Frequency, RoCoF) legyen kisebb vagy egyenlő, mint  $f_{RoCoF,krit}$ . A szimulációk során alkalmazott kritériumokat az 1. táblázat tartalmazza. A kritériumok értékeinek megválasztásánál figyelembe vettük, hogy a hibajelek a mért jelek bizonytalansága miatt feltehetően sosem érik el a nullát.

2. táblázat: A hálózatra kapcsolás kritériumai

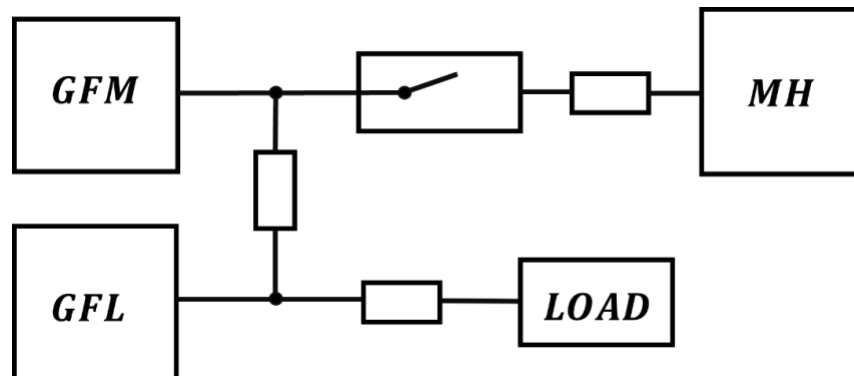
Paraméter	Érték
$\hat{u}_{krit}$	0,02 V ( $6,12 \cdot 10^{-4}$ ve)
$\theta_{krit}$	0,002 rad
$f_{RoCoF,krit}$	$0,1 \frac{Hz}{s}$

A szinkronizációs feltételek teljesülése esetén az  $S_1$ ,  $S_2$  és  $S_3$  kapcsoló visszaváltanak a kiindulási pozícióba, ami a kimeneti érték -1-el szorzott értéke. Ennek hatására az integrátor kimenete idővel eléri a nullát. [7]-ben részletesen vizsgálták a paraméterek hatását a szinkronizáció gyorsaságára és a megszakító bekapcsolása után keletkező áramcsúcsra. A droop karakterisztikák

meredekségének változtatása és a szinkronizációért felelős integrátorok időállandójának változtatása nagy játszanak szerepet a szinkronizáció dinamikájában. A szinkronizációt végző integrátorok időállandójának túl nagy értékénél a szinkronizáció lassú lesz, míg túl kis érték esetén túl nagy túllövással áll be a frekvencia és a feszültségamplitúdó a hálózati értékre.

## 4. SZIMULÁCIÓS TESZTEK

A vezérlést MATLAB/Simulink szoftveres környezetben implementáltam. A szimulációkhoz a szoftverben felépített mikrogridet mutatja az 52. ábra.



52. ábra: A vizsgált mikrogrid felépítése

A mikrogridet három inverteres termelőegység és egy lokális, impedanciatartó fogyasztó alkotja. Az inverterek mindegyike erősáramú szűrőn keresztül kapcsolódik a hálózatra és a PCC pontok közötti RL impedancia jellemzi a vezeték impedanciáját. A mikrogrid elemeinek főbb paramétereit 3. táblázat foglalja össze.

3. táblázat: A szimulációs során alkalmazott paraméterek

Paraméter	Érték	Paraméter	Érték
$L_f$	2,5 mH	$J^{II}$	0,5 s
$C_f$	10 $\mu F$	$D_p^I$	25 W/rad
$R_f$	22 m $\Omega$	$D_p^{II}$	12,5 W/rad
$L_g$	0,76 mH	$k_d$	40 W/rad
$R_g$	477 m $\Omega$	$P_{load}$	3 kW
$D_q^I$	40 VAR/V	$Q_{load}$	0,3 kVAr
$D_q^{II}$	40 VAR/V	$S_{GFL}, S_{GFM}^I$	15 kVA
$J^I$	1 s	$S_{GFM}^{II}$	7,5 kVA

Az egyszerűbb összehasonlítás érdekében a vizsgálatok során a frekvencia, feszültség és teljesítmény mennyiségeket viszonylagos egységben, míg az árammennyiségeket dimenzionálisan tüntettem fel. A viszonylagos egység alapjául a  $GFM^I$  inverter névleges paramétereit szolgáltattam.

### 4.1. Szigetüzem vizsgálata

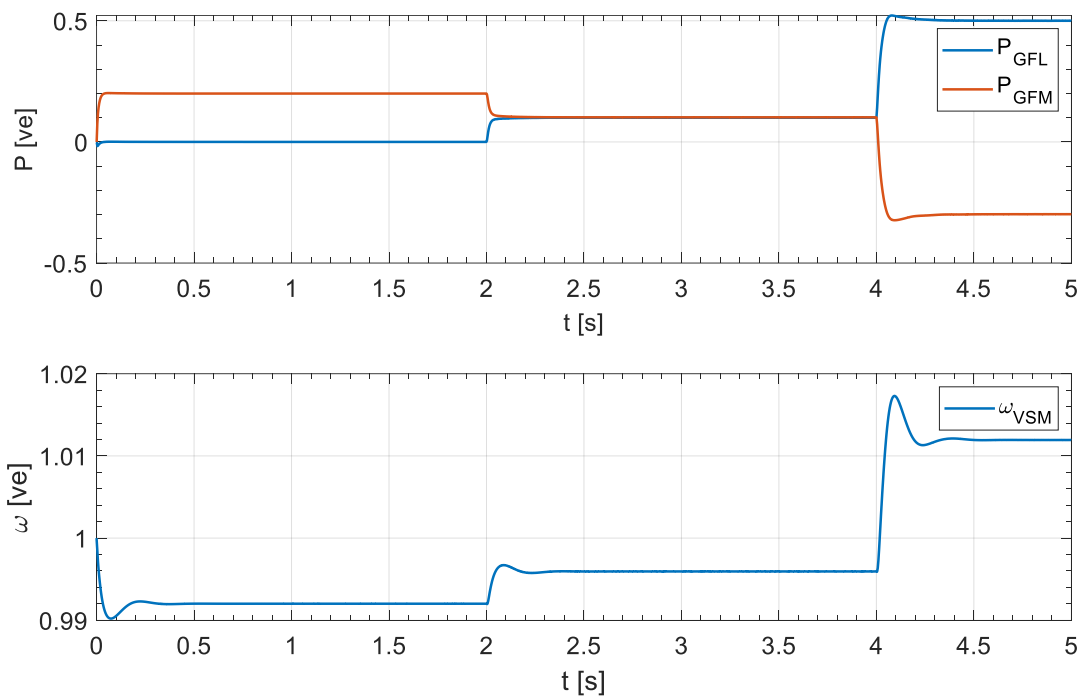
Először tekintsünk egy olyan hálózatot, amelyre egy GFM és egy GFL inverter, illetve egy terhelés kapcsolódik. Továbbá az inverterek csatlakozási pontja és a terhelés csatlakozási pontja között

soros RL impedanciák találhatóak, amelyek a villamos távolságot jellemzik. Ebben az alfejezetben a kialakuló állandósult állapot elemzésével validáljuk a VSM inverter működését.

A szimuláció során kezdetben a GFL inverter alapjele nulla, két másodpercnél 1500 W-ra ugrik, majd négy másodpercnél 7500 W-ra. Mindeközben a GFM inverter teljesítményalapjelei változatlanul nullák. A szimuláció eredményét 53. ábra szemlélteti. Kezdetben a fogyasztót teljes mértékben a GFM inverter szolgálja ki, ekkor a droop karakterisztika szerint az állandósult frekvenciaeltérés (9) szerint adható meg.

$$\Delta\omega = \frac{1}{D_p} \frac{P}{S_{GFM}} = \frac{1}{25} \cdot \frac{3000 \text{ W}}{15000 \text{ W}} = 0,008 \text{ ve} \quad (9)$$

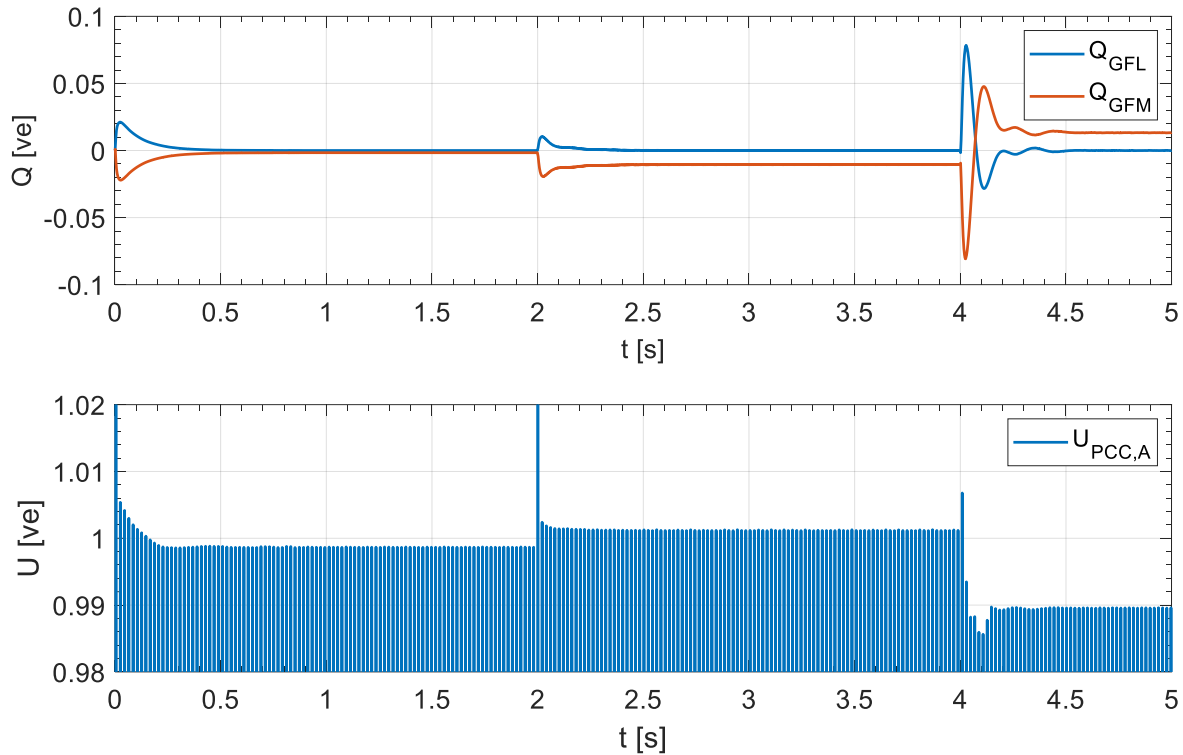
Az első alapjelváltásnál a GFM inverter betáplált hatásos teljesítménye a GFL inverter betáplált teljesítményének megfelelően csökken. Ekkor nő a frekvencia, hiszen kisebb lesz az eltérés az a GFM teljesítmény alapjele, illetve a fogyasztó teljesítményigénye között. A második alapjelváltás után a GFL inverter többet termel, mint amennyit a mikrogrid fogyasztója igényel, így a GFM inverter feladata ennek a teljesítménynek az elnyelése. Ekkor a többletermelés miatt megemelkedik a mikrogrid frekvenciája.



**53. ábra: Szigetüzemi működés vizsgálata I.: GFM és GFL PCC ponton mért hatásos teljesítménye (felül), a mikrogrid körfrekvenciája (alul)**

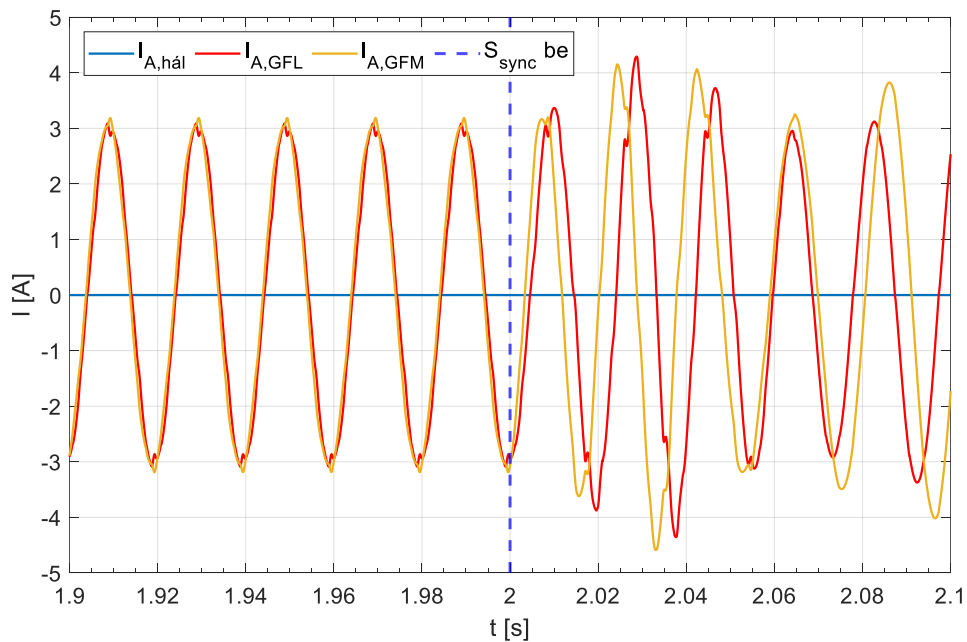
A 54. ábrán látható a Q-U droop karakterisztika működése. Kezdetben a meddő teljesítmények közel nulla összegűek, majd a teljesítményirányoknak megfelelően változik az értékük az alapjelváltások után. A Q-U droop karakterisztika értelmében a meddő teljesítmény változása feszültségamplitúdó változást von maga után.





54. ábra: A Szigetüzemi működés vizsgálata I.: GFM és GFL PCC ponton mért meddő teljesítménye (felül), a GFM inverter PCC pontján mért feszültség jelalakjának részlete (alul)

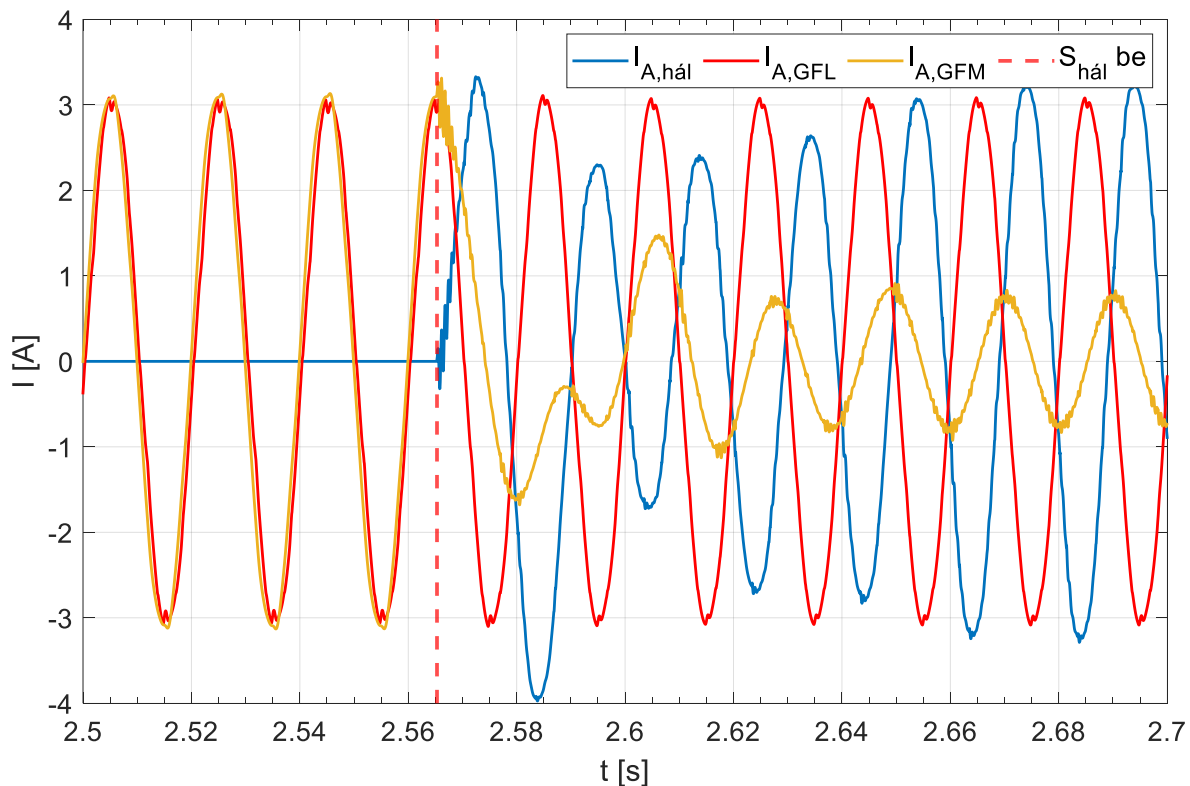
## 4.2. Szinkronizáció vizsgálata két inverter esetén



55. ábra: Az 'A' fázisokban mérhető áram az inverterek betáplálási pontján, illetve a hálózat csatlakozási pontján a szinkronozó parancs kiadásakor

A szinkronizáció bemutatásához tekintsük az előző alfejezetben bemutatott scenárió második és negyedik másodperce közötti állandósult állapotot kiindulásképpen. Két másodpercnél aktivizálódik a szinkronizációs jel, aminek a hatására  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ,  $S_4$ , és  $S_5$  (a továbbiakban ezekre közösen  $S_{sync}$ -ként hivatkozunk) kapcsolók váltanak. A váltás időpontjában ugrásszerűen megváltozik a GFM inverter feszültségamplitúdó- és frekvencia referenciája is. A váltást megelőző és követő állapotot a 55. ábra szemlélteti.

A szinkronizáció megkezdése után a szabályozás folyamatosan ellenőrzi a hálózati megszakító bekapcsolásához szükséges kritériumok teljesülését. Jelen szimuláció során 560 ms szükséges a feltételek kielégítéséhez, ekkor bekapcsol  $S_{hál}$  megszakító. A bekapcsolás után lezajló tranzienst szemlélteti a 56. ábra. A hálózati áram csúcsértéke az állandósuló érték 1,25-szörösére nő meg bekapcsoláskor, egy félperiódus időtartamig. Jelen szimuláció során az inverterek kiterheltsége minimális volt (0,1 ve mind a GFM, mind a GFL inverter esetében).



56. ábra: Az 'A' fázisokban mérhető áram az inverterek betáplálási pontján, illetve a hálózat csatlakozási pontján a hálózati megszakító bekapcsolásakor

Elvégeztünk több szimulációt a lokális terhelés teljesítményének növelésével, hogy megvizsgáljuk, hogyan hat a szinkronizációt végző inverter kiterheltsége a szinkronizációra. A 3. táblázat **Error! Picture switch must be first formatting switch.** összefoglalja az így kapott eredményeket. A tranzienst áramcsúcs értéke minden esetben a három fázis közül a legnagyobb csúcsértéket jelöli, míg az állandósult állapotban a három fázis csúcsértéke megegyezik. A táblázatból kiolvasható, hogy bár a kiterheltség függvényében változik a tranzienst áramcsúcs aránya az állandósult

állapothoz képest, az valószínűleg a hálózat, bekapcsolás pillanatában aktuális szöghelyzetétől függ.

**4. táblázat: A hálózati megszakító bekapcsolásakor jelentkező tranziens áramcsúcsok és az állandósult állapotban mérhető áramcsúcsok összehasonlítása**

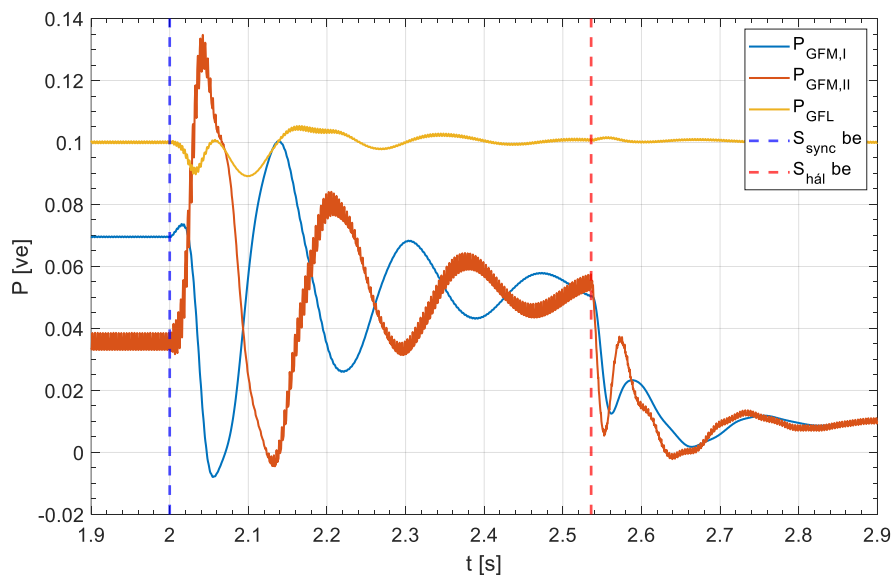
GFM kiterheltség	Tranziens áramcsúcs	Állandósult áramcsúcs	Áramcsúcsok aránya
0,1 ve	4,135 A	3,175 A	1,3
0,3 ve	10,5 A	9,05 A	1,16
0,5 ve	22,45 A	14,53 A	1,54
0,65 ve	29,04	20,41	1,42

Továbbá elmondható, hogy a szinkronizáció során alkalmazott RoCoF kritérium növelte a szinkronizáció időtartamát, viszont nem csökkentette a kialakuló áramcsúcsérték nagyságát, így ezen kritériumot a továbbiakban nem alkalmazzuk.

### 4.3. Szinkronizáció vizsgálata két GFM és egy GFL inverter esetén

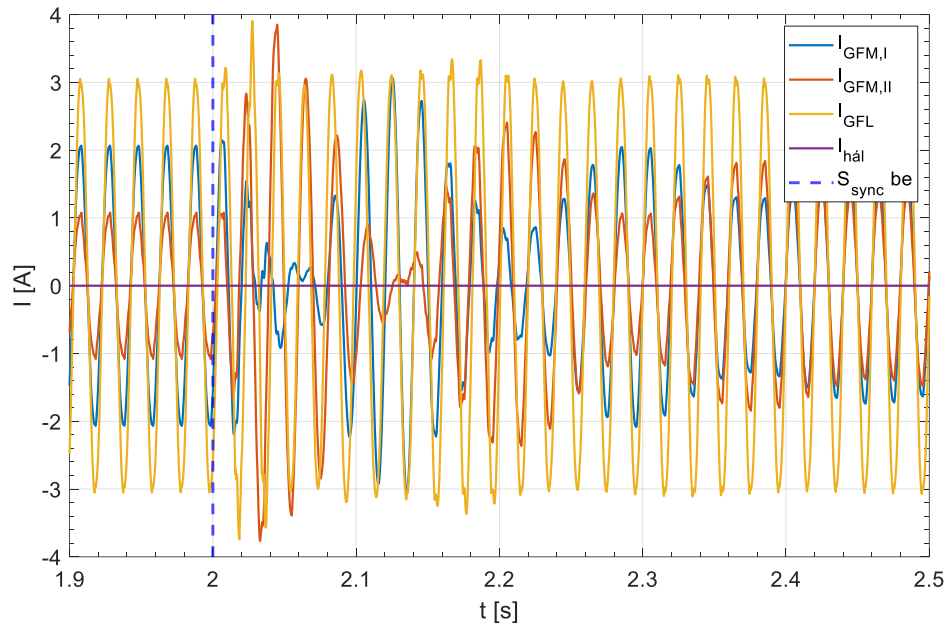
A hálózati csatlakozási ponton egy másik GFM inverterrel egészítettük a korábbi alfejezetekben szimulált hálózatot. Az inverter paramétereit úgy választottuk meg, hogy az fele akkora teljesítménnyel bírjon, mint a korábbi GFM inverter (fele akkora droop konstans és névleges teljesítmény). Ennek következményeképpen a konverterek állandósult állapotban 2:1 arányban osztják meg egymás között a teljesítményt.

A 57. ábrán látható, hogy a szinkronizáció során hogyan változik a két GFM, illetve a GFL inverter teljesítménye. A két GFM inverter teljesítménye a szinkronizáció megkezdésekor elkezd lengeni, először a második GFM felől indul meg nagyobb áram, amit az első GFM nyel el, majd ez elkezd csillapodni. A szinkronizáció során a hálózati alapjelek azt diktálják, hogy mindkét inverter, a méretüktől függetlenül, egyenlő arányban osszák meg a teljesítményt egymás között.



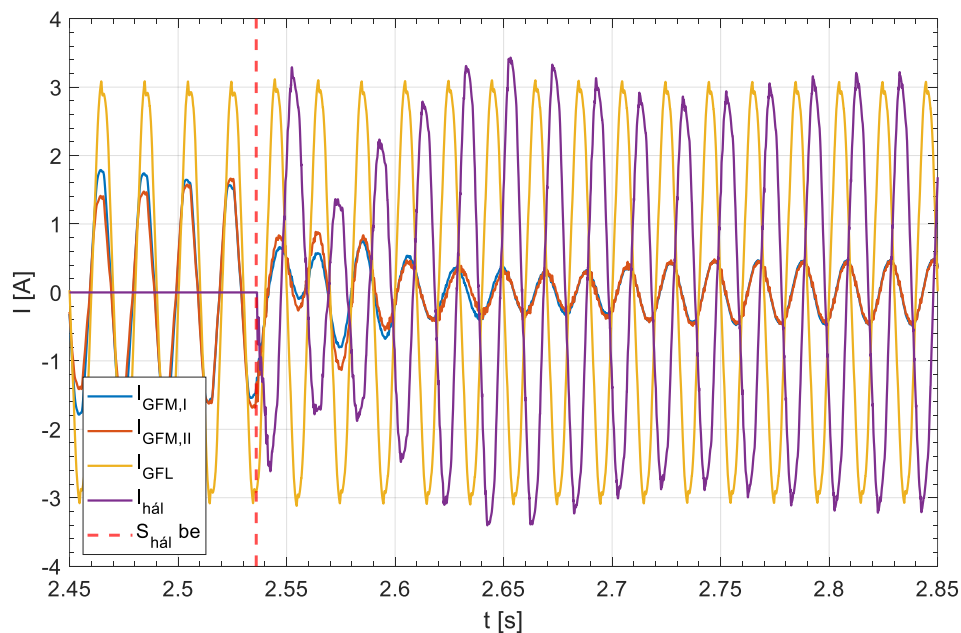
**57. ábra: Teljesítmények alakulása a szinkronizáció során**

A teljesítmény lengések eredményeképpen a szinkronozó parancs kiadása utáni 160 ms-ban a GFM inverterek árama jelentősen torzul, ez látható a 58. ábrán.



58. ábra: Az 'A' fázisokban mérhető áram az inverterek betáplálási pontján, illetve a hálózat csatlakozási pontján a szinkronozó parancs kiadásakor

A hálózati vezérelt megszakító bekapcsolásakor 150 ms után állandósul a GFM inverterek árama, ezután csak meddőteljesítmény áramlik a csatlakozási pontjukon, A két inverter  $D_q$  droop paramétere megegyezik, ezért a két áram fedt egymást.



59. ábra: Az 'A' fázisokban mérhető áram az inverterek betáplálási pontján, illetve a hálózat csatlakozási pontján a hálózati megszakító bekapcsolásakor

## 5. ÖSSZEGZÉS

A cikk során bemutatásra került egy modern invertervezérlési struktúra, illetve az azt kiegészítő szinkronizációs algoritmus. Matlab/Simulink környezetben megépítettük az egyik legígéretesebb grid-forming szabályozási módszert, a virtuális szinkron gépet. Szoftveres szimulációk során először validáltuk a virtuális szinkron gép droop karakterisztika alapú szabályozásának működését, majd a szinkronozó algoritmus működését teszteltük egy GFM-et, illetve több GFM-et tartalmazó mikrogrid esetén. A forrásként használt cikkel ellentétben a szimulációkat összetettebb mikrogriden végeztük, ami GFL invertert és helyi, rezisztív-induktív fogyasztót is tartalmazott. Továbbá, az általánosítás érdekében a hálózati elemek nem egy közös sínre kapcsoltuk, hanem további impedanciákkal (vezetékek modellezéséből) távolítottuk egymástól. A stabilitás biztosításának érdekében a szabályozást virtuális impedanciával egészítettük ki.

Az implementált algoritmus biztosítani tudta a gyors és zökkenőmentes szinkronizációt, a szigorú kritériumok ellenére is. A több, azonos szabályozású GFM inverter egy mikrogridben viszont csak a vizsgálataink során alkalmazott közelítés. Kutatásunkban a továbblépést az algoritmus további vizsgálata és fejlesztése jelenti, hogy általánosabb esetben is biztosítható legyen a mikrogrid szinkronizáció, mint például: más, a szinkronizációban nem résztvevő GFM inverter esetén, vagy a mikrogriden belüli elhelyezkedéstől és az aktuális terhelési állapottól függetlenül.

## 6. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] L. S. Araujo and D. I. Brandao, "Self-adaptive control for grid-forming converter with smooth transition between microgrid operating modes," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 135, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.ijepes.2021.107479.
- [2] O. Palizban and K. Kauhaniemi, "Hierarchical control structure in microgrids with distributed generation: Island and grid-connected mode," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 44, pp. 797–813, Apr. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.01.008.
- [3] S. D'Arco and J. A. Suul, "Virtual synchronous machines - Classification of implementations and analysis of equivalence to droop controllers for microgrids," *2013 IEEE Grenoble Conference PowerTech, POWERTECH 2013*, pp. 1–7, 2013, doi: 10.1109/PTC.2013.6652456.
- [4] Q. C. Zhong and G. Weiss, "Synchronverters: Inverters that mimic synchronous generators," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 4, pp. 1259–1267, Apr. 2011, doi: 10.1109/TIE.2010.2048839.
- [5] C. Arghir and F. Dörfler, "The Electronic Realization of Synchronous Machines: Model Matching, Angle Tracking, and Energy Shaping Techniques," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 35, no. 4, pp. 4398–4410, Apr. 2020, doi: 10.1109/TPEL.2019.2939710.
- [6] M. Lu, V. Purba, S. Dhople, and B. Johnson, "A Grid-compatible Virtual Oscillator Controller: Analysis and Design," 2019.
- [7] L. Meng, C. Su, J. Wu, T. Ren, Z. Wang, and H. Yi, "Design and parameter analysis of an improved pre-synchronization method for multiple inverters based on virtual synchronization generator control in microgrid," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 928–937, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.02.111.

Tózsér Balázs; Táci István

tozser.balazs@edu.bme.hu

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Villamosmérnöki és Informatikai Kar

## Elosztóhálózati megújuló kapacitás vizsgálata

**Absztrakt** – A napelemes termelők rendszerintegrációjára vonatkozó előírásokkal történő lépéstartás napjaink egy intenzíven kutatott, releváns témája. Ezen előírásokban szereplő célszámok elérése komoly kihívás elé állítja az elosztói engedélyeseket (Distribution System Operator, DSO) és átviteli engedélyest (Transmission System Operator, TSO). Ahhoz, hogy az engedélyes ezekkel lépést tudjon tartani és biztosítsa a csatlakozási igények folyamatos engedélyezését, miközben az elosztói szabályzatban a villamosenergia minőségével szemben támasztott követelményeknek megfelelően biztosítja az energiát gyors, hatékony és innovatív megoldásokra van szükség. A hálózati engedélyesek humán erőforráshiánya és időszűke ezeket a problémákat tovább nehezíti, ebből fakadóan a konvencionális hálózatfejlesztési megoldások nem jelentenek minden esetben optimális megoldást. A probléma megoldása, nem kizárólag új eszközökben keresendő. Az elosztói szabályzat erőművi csatlakozására vonatkozó mellékletében megfogalmazott szabályok elavultak, újragondolásra szorulnak, hiszen statikus módon határozzák meg a befogadóképességet. A kéziratomban bemutatott számítási metodika segítségével, amely a hálózat szélsőséges üzemállapotai alapján határozza meg a befogadóképesség, több megújuló termelő engedhető fel a hálózatra. Ahhoz, hogy ezt igazoljam, a kéziratom második felében szimulációs vizsgálatokat végeztem egy magyar közép feszültségű hálózaton, amelyen tapasztalható a termelői jelenléti negatív hatása. A konvencionális számítási mód használata után, konkrét üzemállapotok felhasználásával, determinisztikusan kerül meghatározásra a vonal megújuló befogadóképessége és ezáltal a termelői többlet mértéke.

**Abstract** – *The challenge that comes with the integration of high number of photovoltaic generators is a well-researched, relevant topic. The Distribution System Operators (DSO) and the Transmission System operators (TSO) face tough challenges. To be able to keep up with the ever-growing integration need and provide energy without breaching the limits stated in the energy quality regulations the Operators need fast, effective, and innovative technologies. The shortage in human resources and time makes the challenges even harder, for this reason the conventional grid development technologies can't provide an optimal solution. Beside the assets, other option must be considered as well. The current regulations considering the connection of intermittent generators are outdated. The current methodology uses static calculations based on unrealistic scenarios which results in a safe system, but low hosting capacity (HC). In this paper I present a new method in the calculation of the HC parameter, which enables the connection of more generators compared to the*



*static method. The second part of the paper covers the simulation study, where a mid-voltage system was modelled, and time series simulations were done. The results of these simulation were then used to determine the exact HC parameter of the network, then the difference between the previous and my method, the excess capacity is presented.*

**Címszavak: Elosztóhálózat, Megújuló befogadóképesség, Pandapower, idősoros szimuláció**

## 1. BEVEZETÉS

A karbonsemlegességi törekvéseknek köszönhetően hazánkban egyre nő a napelemes termelők száma. A MAVIR Zrt. statisztikáit áttekintve látható, hogy 2020 és 2022.04.01 között a 2020-as darabszámhoz képest több mint 52%-kal nőtt a napelemes termelők darabszáma [1]. A RepowerEU stratégia keretein belül, mely főként az Oroszországi energiahordozóktól való függetlenséget tűzte ki célul, az Európai Unió tagállamaiban összesen 420 GW fotovillamos kapacitás kiépítését tervezi 2030-ig a meglévő kapacitásokon túl[2]. Ez a Nemzeti Energiastratégia célkitűzéseiben is megjelenik, Magyarországon 2030-ra a fotovillamos kapacitás meghaladja a 6000 MW-ot, valamint 2040-re megközelíti a 12000 MW-ot [3]. Magyarország az Európai Unió tagállamai által lefedett terület kb. 2,2% teszi ki, ehhez képest a 420 GW-ból 1,428%-os napelemes kapacitásvállalást tesz.

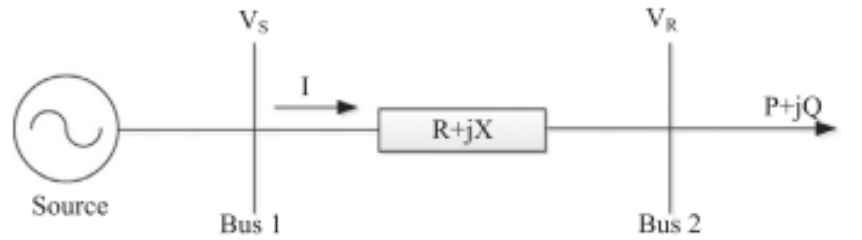
## 2. A JELENTŐS MÉRTÉKŰ ELOSZTOTT ENERGIATERMELŐK RENDSZERINTEGRÁCIÓJÁNAK PROBLÉMÁJA

### 2.1. Bevezetés

A bevezetőben említett klímapolitikai nyomás, a megújuló energiaforrások közkedveltsége és technológiai fejlődése miatt nagy csatlakozási kapacitásigény érkezik az elosztói engedélyesek (Distribution System Operator, DSO) felé. Ahhoz, hogy ezeket a csatlakozási igényeket kielégítsék és emellett az energiát a villamosenergia ellátásra vonatkozó előírásoknak megfelelően biztosítsák, sokszor hálózatfejlesztések szükségesek. A konkrét eszközökön kívül egy további lehetőség az úgynevezett megújuló kapacitás befogadóképesség pontos definiálása. Befogadóképesség alatt az adott vonal olyan számszerűsített tulajdonságát értjük, mely egyértelműen meghatározza a vonalra telepíthető megújuló energiaforrások összteljesítményét anélkül, hogy azok csatlakoztatásával a vonalon szolgáltatott villamosenergia bármilyen minőségi előírást sértene. Ebben a munkában ezen paraméter pontos definíciója kerül bemutatásra- egy konkrét esettanulmányon keresztül, melynek fejlesztésével a későbbiekben eljuthatunk a vonalszerű paraméterhez. Ezen hálózati paraméter pontos definiálásához szükséges néhány hálózattervezéssel és energiaminőséggel szemben támasztott követelmény ismerete.

### 2.2. Hazai elosztóhálózati impedancia jellemzők

A feszültségesés és feszültségemelő hatás megértéséhez tekintsünk egy alap modellt. A lenti 1. ábrán a feszültség paraméter  $V$  betűvel került jelölésre ahogy a hivatkozott szakirodalom tárgyalja [4], szimulációs vizsgálataimnál a  $V$  helyett  $U$  betűjelölést használok.



60. ábra hálózati modell [4]

A modellen a feszültségesés ( $\Delta V$ ) a következő egyenlettel írható fel [4]:

$$\Delta V = I(R + jX) = \frac{(P+jQ)^*}{V_R}(R + jX) = \frac{PR+QX}{V_R} + j \frac{PX-QR}{V_R} \quad (1)$$

A fenti egyenletben látható, hogy a feszültségesés mértéke függ a vételező oldal feszültségétől ( $V_R$ ), a hálózaton áramló határos ( $P$ ), illetve meddőteljesítmény ( $Q$ ) mértékétől, valamint a hálózat impedanciájától ( $Z=R+jX$ , ahol  $R$  az ellenállás,  $X$  pedig a reaktancia).

A különböző feszültszinteken alkalmazott vezetéktípusok más  $\frac{R}{X}$  arányokkal rendelkeznek. Ebből fakadóan, ahhoz, hogy egységnyi feszültségváltozást elérjünk, eltérő nagyságú áramot kell betáplálnunk, attól függően, hogy meddő, vagy határos teljesítményt táplálunk be a hálózatba. A nagyfeszültségű vezetők jellemzően 0,1 körüli  $\frac{R}{X}$  aránnyal rendelkeznek, ebből fakadóan a rezisztív tagok elhagyhatóak az egyenletből [4]:

$$\Delta V = \frac{QX}{V_R} + j \frac{PX}{V_R} \cong \frac{QX}{V_R} \quad (2)$$

A kisfeszültségű elosztóhálózatnál jellemző vezetékek esetén ez az arány nagyobbak adódik, mint átviteli, vagy középfeszültségű hálózatoknál, tehát ebben az esetben a képzetes rész hanyagolható el [4]:

$$|\Delta V| = \frac{PR+QX}{V_R} \quad (3)$$

A középfeszültségű vezetéktípusoknál ez az arány nagyjából 0,8-2,5 között adódik, tehát egyik része sem elhagyható az egyenletnek. Ez azt is jelenti, hogy az elosztóhálózat középfeszültségű részén mind határos, mind meddőteljesítmény betáplálással lehet szabályozni a feszültség értékét.

5. táblázat Tipikus R/X tartományok a villamosenergia-rendszerben

Vezeték típus	R/X tartomány
kisfeszültségű szabadvezeték	1-5
kisfeszültségű kábel	1,6-23
középfeszültségű szabadvezeték	0,8-1,8
középfeszültségű kábel	1,1-2,5

6. táblázat Jellemző vezetékparaméterek az elosztóhálózaton

		Fázisvezető keresztmetszet [mm <sup>2</sup> ]	Rf [ohm/km]	Rn [ohm/km]	Xf [ohm/km]	Xn [ohm/km]	Terhelhetőség [A]
Csupasz SZV (AL,Ald)	4x50	50	0,603	0,603	0,357	0,357	220
AASC 22 kV	3x95	95	0,361	0,361	0,3631	0,3631	330

A fenti táblázatban szereplő példa adatokat az E.ON Észak-dunántúli Áramhálózati Zrt. adatbázisából kaptam, látható, ahogyan a keresztmetszettel csökken az impedancia valós része.

Megállapítható, hogy a kábelek sokkal kisebb reaktanciával rendelkeznek, mint a szabadvezetékek, melyet az alábbi táblázat is jól szemléltet. Megemlítendő, hogy a kábelek terhelhetősége, azaz a maximális áram, ami átfolyhat rajta, kompakt vezetőelrendezéséből fakadó túlmelegedése miatt sokkal, mintegy 35%-kal kisebb.

7. táblázat Szabadvezeték és kábel paramtérösszehasonlítás

		Fázisvezető keresztmetszet [mm <sup>2</sup> ]	Nullavezető keresztmetszet [mm <sup>2</sup> ]	Rf [ohm/km ]	Rn [ohm/km ]	Xf [ohm/km ]	Xn [ohm/km ]	Terhelhetőség [A]
Csupasz SZ	4x50	50	50	0,603	0,603	0,357	0,357	220
Al kábel	4x50 kbl	50	50	0,641	0,641	0,093	0,093	142

### 2.3. Feszültségminőségi paraméterek

A közcélú elosztóhálózatok feszültségértékével szemben támasztott minőségi követelményekről és határértékekről az MSZ EN 50160 szabvány [5] rendelkezik. Feszültségváltozásokkal szemben két elvárás található a szabványban, a tápfeszültség változásaiban és a gyors feszültségváltozás nagyságában.

A tápfeszültség normál üzemi körülmények között a feszültségkimaradásokat figyelmen kívül hagyva, 10 perces átlagos effektív értékei 95%-ának, bármely egyhetes időszakot nézve +-10%-os, illetve kiefeszültségen minden 10 perces átlagos effektív értékének +10% és -15% tartományban kell lennie [5].

A gyors feszültségváltozásokat elsősorban a fogyasztói villamos berendezések terhelésváltozásai vagy a hálózaton történő kapcsolások okozzák. Normál üzemi körülmények között egy gyors feszültségváltozás általában nem haladja meg az Un 4%-át, de bizonyos körülmények között a változás, naponta néhányszor, rövid időre Un 6%-át is elérheti [5].

Az elosztói szabályzat rendelkezik a maximális feszültségesés mértékéről is. Ennek értéke a hálózat kialakításától függően változik. Normál üzemi állapotban a középvezetési feszültségen maximálisan megengedhető feszültségesés értéke [6]:

- Íves hálózaton (bontott állapotban): 5%
- sugaras hálózaton 7,5%

Az elosztóhálózat kifestültségű részére további előírások vonatkoznak, az elosztói engedélyesek egyénileg a szolgáltatásminőséggel szemben is támasztanak előírásokat, ezeket a Garantált szolgáltatások dokumentumban foglalják össze [7]. Ebben a dokumentumban a kifestültségű hálózat feszültségértékeivel szemben a következő előírásokat támasztják:

„A felhasználási hely csatlakozási pontján az Engedélyes a névleges feszültség +/- 7,5% tartományon belül szolgáltatja a villamos energiát normál állapotú egyhetes mérése alatt a nap bármely 10 percre átlagolt értékek 95%-ában. A legnagyobb feszültségnövekedés mértéke a névleges feszültség 115%-át, feszültségcsökkenés mértéke a névleges feszültség 80%-át nem haladhatja meg 1 perces átlagban.”

## 2.4. Csatlakozó erőművek feszültségváltoztató hatásával szemben támasztott követelmények

Az elosztóhálózatra csatlakozni kívánó erőművekkel szemben az elosztói szabályzat 6/A melléklete rendelkezik. Ebben a dokumentumban a jelenleg is érvényes számítási mód is megtalálható, amely alapján pontosan meghatározható az adott vonalra csatlakoztatható erőművi összteljesítmény [6]. A számítási módok ismertetése előtt tekintsük néhány összefüggést a mennyiségek kapcsolatának szemléltetése gyanánt.

Egy villamos hálózat adott csomópontjának zárlati teljesítményét a következő összefüggéssel számíthatjuk ki, ahol  $U$  a névleges feszültség,  $Z$  a csatlakozási pont és táppont között eredő impedancia.

$$S_z = \frac{U^2}{Z} \quad (4)$$

A korábban említett [6]-os melléklet a befogadóképességet (angol terminológiában „Hosting capacity”, továbbiakban: HC) a zárlati teljesítmény százalékos értékével definiálja:

„A kiserőmű maximális csatlakozási összteljesítményét (betáplálható maximális teljesítményét) ( $S_{na}$ ) az elosztói engedélyes állapítja meg. Ezen vizsgálatoknál az elosztóhálózati csatlakozási pontra a létesítendő kiserőmű nélkül számított minimális rövidzárlati teljesítmény ( $S_{zH}$ ) ismeretében az alábbi közelítő összefüggések alapján a kiserőmű csatlakozási összteljesítménye:

- Középfeszültségen:  $S_{na} \leq \frac{0,02 \cdot S_{zH}}{k} = \frac{S_{zH}}{50 \cdot k}$
- Kifestültségen:  $S_{na} \leq \frac{0,03 \cdot S_{zH}}{k} = \frac{S_{zH}}{33 \cdot k}$

Ahol  $k$  az  $I_a$  maximális felvett áram  $I_n$  névleges generátoráramhoz való aránya. Irányértékei:

- $k = 1$  szinkrongenerátorok vagy váltóirányítók esetén;
- $k=2$  olyan aszinkron generátorok esetén, amelyeket szinkronfordulatszámuk 95-105%-nál kapcsolnak be.
- $k = \frac{I_a}{I_n}$  a hálózatról motorként induló aszinkron generátorok esetén;

- $k = 8$  ismeretlen  $I_a$  esetén”

A fentebb látható képletekben szereplő csomóponti zárlati teljesítmény szorosan összefügg az adott csomóponton érzékelhető feszültségemelő hatással is. Következtethető, hogy a 0,02-es szorzó a rendszerbe felvehető napelemes kapacitások képleténél a 2%-os, illetve kifestültségű hálózatoknál a 3%-os feszültségemelő hatásra utal. Ezek a feszültségemelő hatások két üzemállapot különbségeként határozható meg. Az első a vonal terheletlen feszültségkarakterisztikája, amelyhez a terhelés nélküli, termelőkkel ellátott feszültségkarakterisztikát viszonyítjuk. Az összehasonlításnál a generátorok által okozott feszültségemelkedés nem haladhatja meg a már korábban említett 2, illetve 3 %-ot.

A feszültségemelő hatás tárgyalásánál fontos megemlíteni és különbséget tenni a gyors, tranzienst jellegű és lassú ingadozások között. Amíg a lassú változás nem feltétlen jelent gondot egy közepfeszültségű gyártelep üzemeltetésénél, addig egy gyors, ugrásszerű feszültségemelkedés a teljes gyártósor leállítását, meghibásodását is okozhatja, amely komoly anyagi károkat tud okozni az ügyfeleknek.

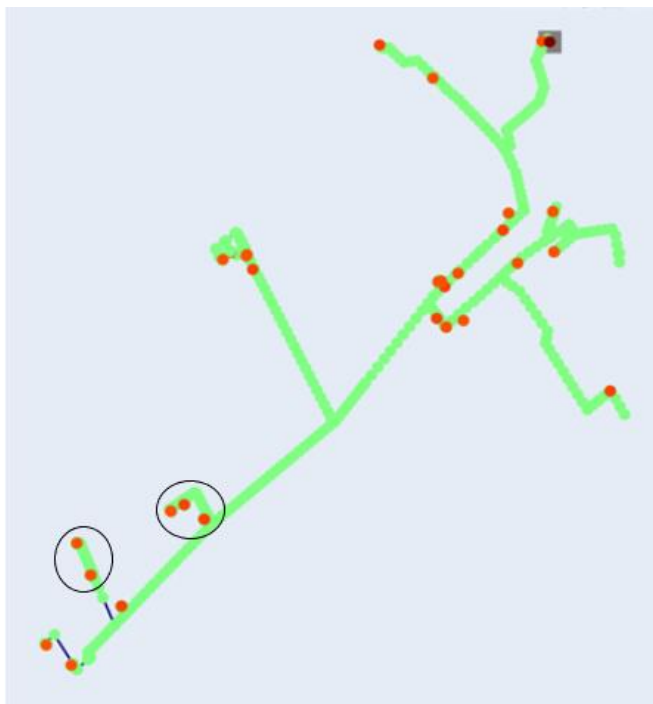
A feszültségre gyakorolt hatáson kívül megemlítendő a soros elemek (jellemzően a transzformátor) túlterhelődési jelensége is, hiszen adódnak esetek, amikor a fogyasztást meghaladva a termelés olyan mértékkel áramlik vissza a transzformátoron keresztül, amely már túllépi a névleges terhelésére vonatkozó előírásokat. Ez a jelenség egy újabb kritérium a HC paraméter vizsgálatánál.

## 2.5. HC definiálás

A korábbi 2.2 fejezetben említett a hazai elosztóhálózati jellemzők miatt kijelenthető, hogy a feszültségszabályozási beavatkozás nélkül a feszültségemelkedés lesz az egyik korlátozó tényező a termelők csatlakoztatásánál. Ezek mellett azonban számottevő arányban jelennek meg transzformátortúlterhelések is. A HC paramétert több, a hálózaton szolgáltatott villamosenergia-minőségre jellemző paraméter összeségéből lehet képezni, mint pl. áramterhelés, transzformátorterhelés és feszültségemelés, stabilitás. Az adott vonal HC paramétere a legszigorúbb feltétel lesz a felsoroltak közül. Ahhoz, hogy az 2.4-es fejezet metodikáiból kritériumokat generáljunk, valamilyen határértékeket kell felállítanunk. Kéziratomban a HC paramétert egy adott vonal determinisztikus megközelítésével számítom ki. A rendelkezésre álló fogyasztói és termelési profilokból és mérésekből idősoros futtatásra alkalmas adatokat képezek, majd ezeken szimmetrikus teljesítményáramlás-számításokat végzek, amelynek eredményeiből következtetni lehet a hálózat konkrét üzemállapotaira. Ezzel a megközelítéssel, összehasonlítva a korábbi statikus, nemlétező szélsőséges üzemállapotokra alapozó metodikával jelentős többletkapacitás érhető el.

## 3. MODELLEZÉS

A Korábban említett probléma kifejtésének és pontos HC értékeke kalkulálásának céljából szimulációs vizsgálatokat végeztem. Ehhez egy Észak-dunántúli 22 kV-os közepfeszültségű vonalat választottam, amelyen nagy mennyiségű széleróműves termelő található.

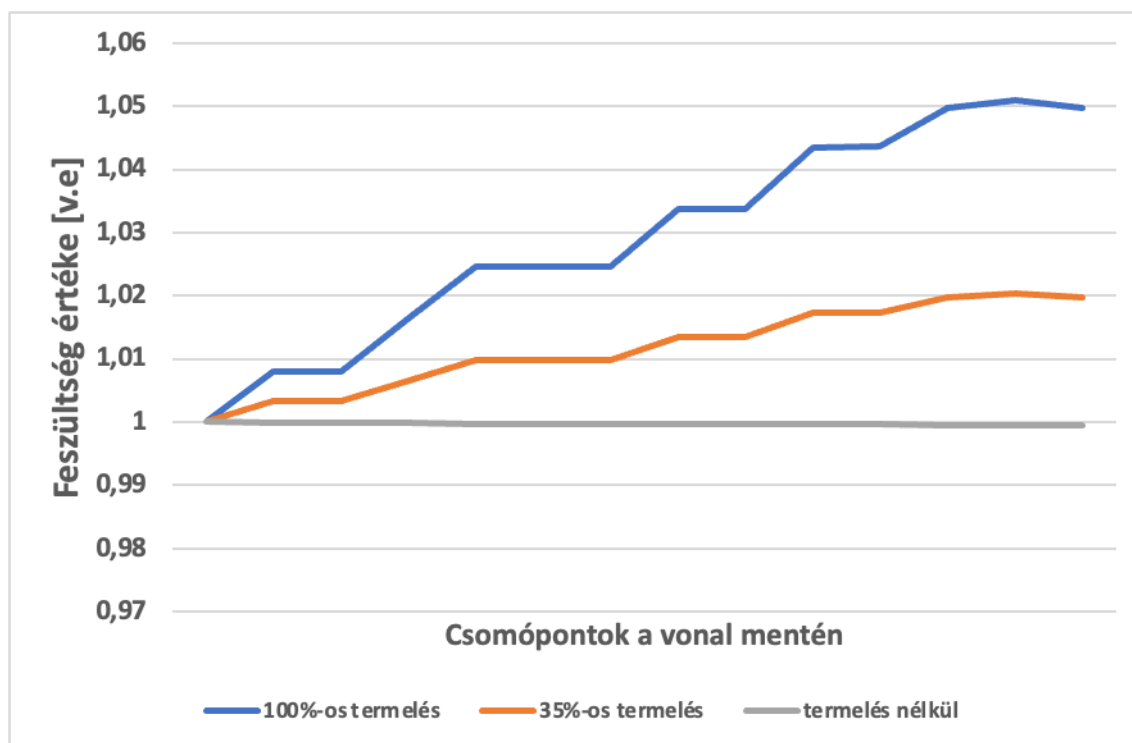


61. ábra-modellezett vonal képe

A fenti ábrán látható a mintahálózat topológiája, a tápponti, nagy/középfeszültségű transzformátor a vonal jobb felső sarkában helyezkedik el (szürke négyzet). Mivel a tápponti transzformátor terhelés alatt változtatható áttétel vezérléssel ellátott, ezért kéziratomban a mögöttes hálózati feszültségingadozásokat elhanyagoltam, a táppontot konstans 1 viszonylagos egységnek vettem. Szimulációs vizsgálataim során a középfeszültségű hálózatra koncentrálok, a kiefeszültségű termeléseket, fogyasztásokat koncentrált fogyasztóként képeztem le a vonalon elhelyezkedő közép/kiefeszültségű transzformátoroknál (piros pont). A fekete karikákkal jelölt helyeken található meg a 6 MW összteljesítményű szélerőműpark [8].

Egyes esetekben az engedélyesek az elosztói szabályzatban megfogalmazottaktól eltérően is dönthetnek. Az általam modellezett vonal jól reprezentál egy ilyen esetet, a 6 MW nagyságú termelés már sokkal nagyobb feszültségemelkedést okoz, mint az érvényes szabályzat szerinti 2%. Ahhoz, hogy meghatározzuk a jelenlegi szabályozásba foglalt metodika alapján a HC paramétert, le kell szabályoznunk az erőműveket. Teszteléssel az erőművek névleges teljesítményéhez képest kb. 35%-os termeléssel a HC paraméter 2,1 MW-nak adódik.

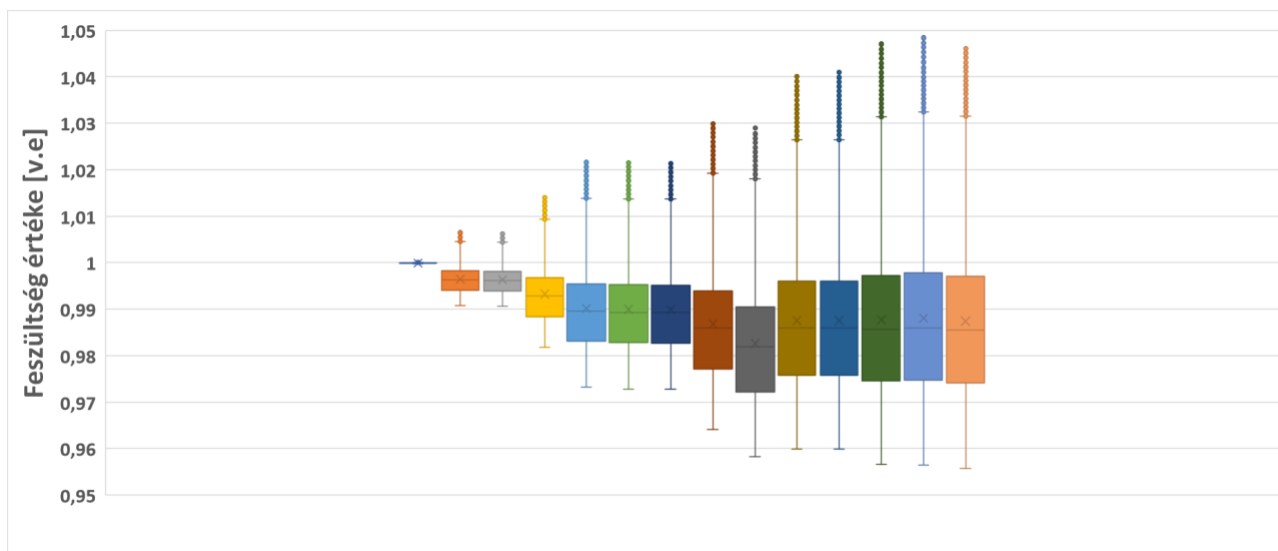




62. ábra Feszültségemelkedés a HC meghatározásához

Az ábrán látható szürkével a kiinduló állapot, a vonal terhelés és termelésmentes görbéje. Kékkel látható a valós termelési adatokból származó feszültségemelés, fogyasztás nélkül. Látható, hogy a vonal végén elhelyezkedő széltermelőparkok a több mint 5%-ot emelnek a névleges feszültséghez képest. Kékkel pedig látható az elosztói szabályzatban leírtaknak megfelelő görbe, a feszültségemelés nem haladja meg a 2%-ot. A 35%-os termelésre szabályozás 2,1 MW termelést jelent.

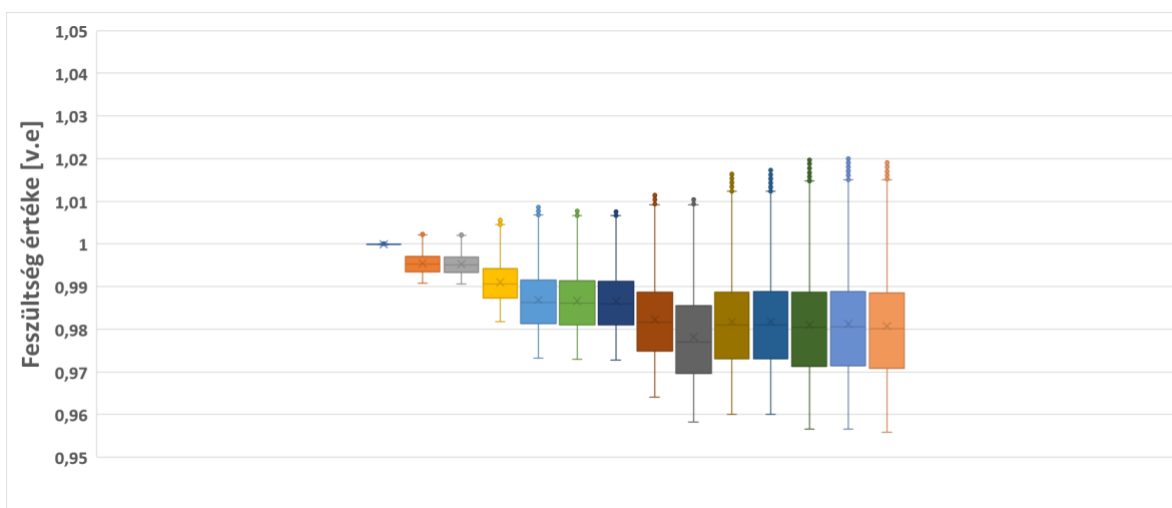
A hálózat tényleges HC értékének meghatározásához szükséges a hálózat szélsőséges üzemállapotainak meghatározása. Ehhez idősoros futtatásokat végeztem egy éves időtávlatban, majd statisztikai eszközökkel vizsgáltam a feszültségemelő hatást a vonalon, illetve a maximális értékeket megkeresve az áram és transzformátorterhelést.



63. ábra Éves feszültségeloszlás 100%-os termelés esetén

A fenti ábra egy box-plot ábra, a feszültségértékek egy éves eloszlásának szemléltetését segíti elő. A grafikon x-tengelyén, balról jobbra találhatóak a NAF/KÖF transzformátortól a vonal végpontjáig a gerinc kiválasztott csomópontjai, az y-tengelyen pedig az ehhez a csomópontokhoz tartozó feszültségértékek viszonylagos egységben. A dobozok az eloszlás középső 50%-át tartalmazzák, a maradék felső és alsó kvartilist a pálcák és pontokkal az extrém értékek jelölik. Az ábrán látható, hogy ugyan a 6MW termelői jelenlét a 2%-os feszültségemelési korlátot megszegi még a fogyasztói jelenléttel is, ugyanakkor az MSZEN50160-as [5] szabványban megfogalmazott  $\pm 10\%$ -os értékeket nem sérti.

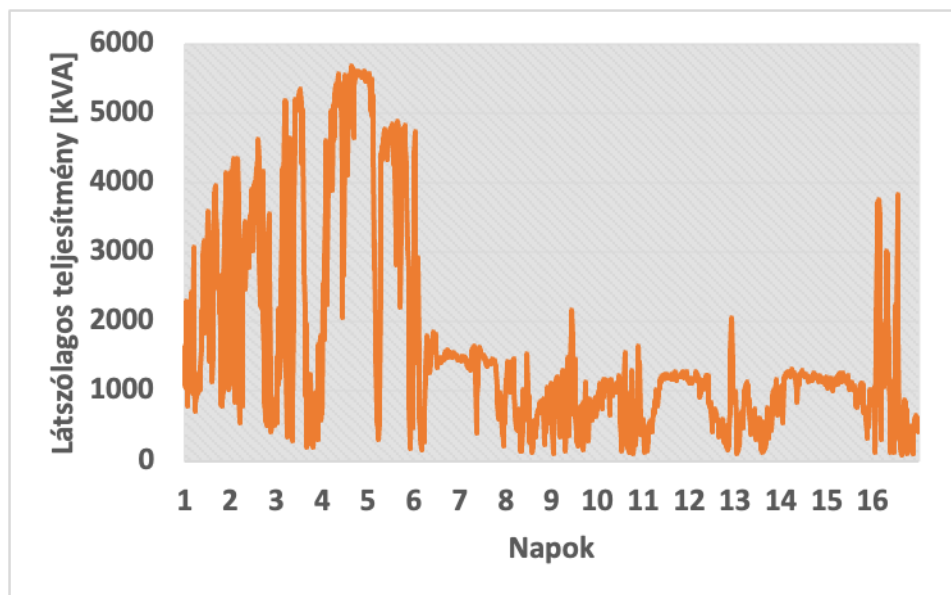
Tekintsük a korábban említett, jelenleg is érvényes 2%-os feszültségemelési határt, mint korlátozó tényező. Ennél a vizsgálatnál, a korábbi esettel ellentétben nem a terheletlen hálózat feszültségemelését vizsgáltam, hanem azt, hogy mikor éri el a fogyasztói jelenléttel az 1 viszonylagos egységhez képest a 2%-os emelkedést.



64. ábra Éves feszültségeloszlás a termelők 50%-os leszállításával

A fenti ábra a termelők 50%-os leszabályozásából következő feszültségeloszlást ábrázolja. Látható, hogy a legnagyobb, extrém esetekben is, amikor a szél erősen fúj és a nagyobb ipari fogyasztók éppen nem fogyasztanak, sem fordul elő 2%-nál nagyobb feszültségemelkedés. A korábbi metodikához képest, amellyel 2,1 MW értéket kaptunk ebben az esetben másfélszer akkora, 3 MW termelői teljesítmény engedhető fel, bármilyen üzembiztonságot veszélyeztető feltétel nélkül. Ez a megközelítés csak egy korlátozó tényező a tényleges befogadóképesség meghatározásában.

A HC paraméter meghatározásához vizsgáljuk meg a további kritériumokat is. A magas megújuló penetráció jelenlétével sok esetben előfordul a nagyfeszültségű transzformátor felé visszaáramló teljesítmény, amely már a transzformátor névleges határértékeit is meghaladhatja. A kiválasztott 22 kV-os helyszínt egy 25 MVA névleges teljesítményű transzformátor látja el, amely három vonalat lát el. Mivel a jelen kéziratomban csak egy vonalat vizsgáltam, egy jó közelítő határértékkel élünk, ha a 25 MVA harmadát, 8,3 MVA értéket veszünk alapul. Az éves futtatások megvizsgálásakor a kritikus, legnagyobb visszaáramló teljesítmény a decemberi hónapban adódott, ezen hónap utolsó 16 napjában a vonal eleji áramlásokat az alábbi ábra szemlélteti.

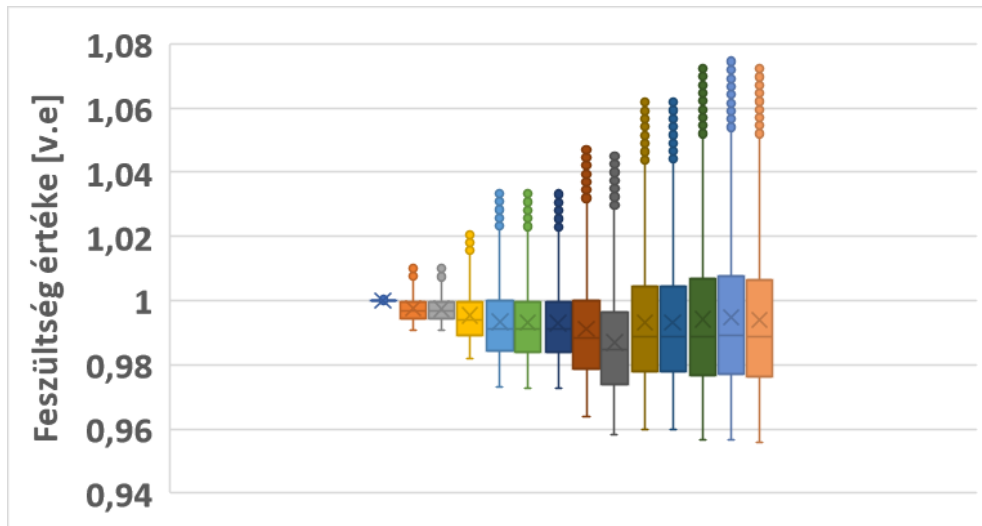


65. ábra december hónap utolsó 16 napi teljesítményáramlása a vonal elején

A 65. ábra jól szemlélteti a teljesítményáramlásokat a vonalon, az y-tengelyen a látszólagos teljesítmény értékét látjuk kVA nagyságban, az x-tengelyen pedig a 16 napos időtávot. Látható, hogy a legnagyobb áramló érték 5700 kVA körül van, ami még mindig nem okoz terhelési problémákat a vonalon.

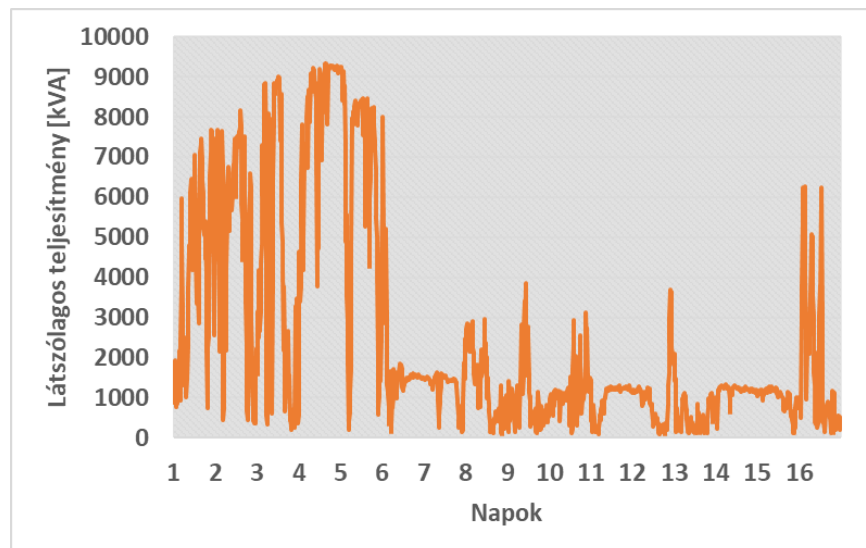
A harmadik kritérium, amit jelen kéziratomban vizsgálok az áramterhelhetőség, ezen paraméter mondható a legtágabbnak a vizsgált topológia esetén. A hálózat legnagyobb áramértékei a vonalon fentebb lévő szélenergia-átalakító leágazásának csatlakozási pontján adódik, 175,44 Amperrel, ugyanakkor mivel a hálózatgerinc, és ezen leágazás is 95 mm<sup>2</sup>-es vezetőkeresztmetszetű, amelynek áramterhelhetősége meghaladja a 300 Ampert, ezen kritérium sértése nem valószínű.

A valódi korlát meghatározásához szükséges a további beépített termelői teljesítmény növelése. A modellezés megkönnyítéséhez a topológiai elhelyezkedést nem változtatom, csupán a betáplált teljesítmény mértékét.



66. ábra Éves feszültségértékek 150%-os termelésnél

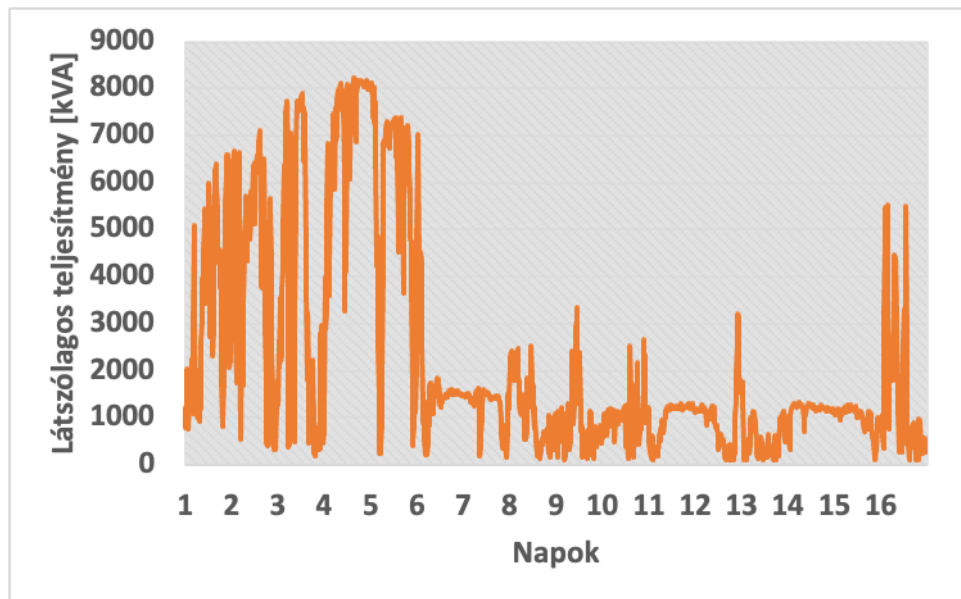
A fenti ábrán látható, hogy ilyen magas termelés mellett sem lép ki a feszültség a szabványban megfogalmazott sávból, azonban a Garantált szolgáltatásokban [7] megfogalmazott felső határértéket ( $1,075 \cdot U_{névleges}$ ), amely a kiefeszültségű hálózatra vonatkozik már eléri. Megemlítendő, hogy a középfeszültségen tapasztalt feszültségvolatilitás a kiefeszültségű hálózatra tovaterjedve tovább növekedhet, ezért a középfeszültségű hálózatok tervezésénél mindenképp figyelembe kell venni a kiefeszültségű oldalon megjelenő ingadozást. Ezen indokból fakadóan a középfeszültségű volatilitás visszaszorítása indokolt, ezzel a kiefeszültségű hálózat tervezésekor nagyobb tervezési szabadság érhető el.



67. ábra Teljesítményáramlás a vonal elején 150%-os termelés mellett december utolsó 16 napján

A fenti ábra szemlélteti a 150%-os teljesítményáramlásokat a vonal elején december utolsó 16 napjában. Mivel a visszaáramlás mértéke már eléri a 25 MVA-es transzformátor teljesítményének harmadát (9200 kVA), kimondható, hogy túlléptük a HC paramétert, ez a termelői teljesítmény már nem engedhető fel a vonalra.

Az előbbi esetből kiindulva csökkenteni kell a termelés nagyságát, több üzemállapotot is megvizsgálva és a korábban is előforduló transzformátor terhelést, mint legszigorúbb kritériumot használva a HC paraméter az eredeti termelés 135%-ra adódott, ami 8,1 MW-ot jelent. Megemlítendő, hogy ez az érték csak ebben a topológiai elhelyezkedésben irányadó, a termelőegységek csatlakozási pontjának változtatásával a HC paraméter is változik.



68. ábra december hónap utolsó 16 napjának teljesítményáramlása 135%-os termeléssel

Ahogy az ábra is mutatja, a visszaáramló teljesítmény mértéke nagyjából 8150 kVA, amely a 25 MVA-os NAF/KÖF transzformátorral és a három ellátási vonallal számolva maximális érték.

#### 4. ÖSSZEGZÉS

A DSO-k jelenleg egy olyan megközelítést alkalmaznak, amely ahhoz, hogy biztosan minden kritériumnak megfeleljenek, szélsőséges, valóságban sosem megjelenő (terhelés nélküli és termelés nélküli) üzemállapotokra alapozza a számításait. A kéziratomban felvetett megközelítéssel, melynél konkrét, valós mérésekből és profilokból előállított üzemállapotokból következtettek a HC paraméterre, jelentős, mintegy másfélszer akkora kapacitás vált elérhetővé a vonalon. Ezen kívül, ha a 2%-os feszültségemelési határ helyett valós, a szabványban megfogalmazott előírásokat és eszközterheléseket vesszük alapul, közel négyszerese a HC paraméter az eredeti metodikával számíthatóhoz képest. Megemlítendő, hogy a tényleges HC paraméter értékéhez a kisfeszültségű hálózatok vizsgálata elengedhetetlen, többek között ezzel folytatom kutatásomat. A téma további lehetőségeket rejt magában, hiszen az innovatív eszközök használata, termelők topológiai elhelyezése mind befolyásolják a vonalra csatlakoztatható termelői összteljesítmény mértékét.

## 5. REFERENCIA

- [1] MAVIR, napelemes termelők statisztikai adatok (2022.04.01), elérhető:  
[https://www.mavir.hu/documents/10258/240611624/PV+STATISZTIKA\\_HU\\_20220401\\_ig.pdf/348129a8-4764-6922-d2e3-4602928a24be?t=1649073715017](https://www.mavir.hu/documents/10258/240611624/PV+STATISZTIKA_HU_20220401_ig.pdf/348129a8-4764-6922-d2e3-4602928a24be?t=1649073715017)
- [2] RepowerEU (2022.03.08) elérhető: [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_22\\_1511](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_1511)
- [3] Nemzeti energiastratégia 2030, kitekintés 2040-ig elérhető (2020.01): <https://zoldbusz.hu/files/NE2030.pdf> (2020.01) (utoljára megnyitva: 2023.06.04)
- [4] Priyanka Chaudhary, M. Rizwan (2018). Voltage regulation mitigation techniques in distribution system with high PV penetration: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews
- [5] Közcélú elosztóhálózatokon szolgáltatott villamos energia feszültségjellemzői, MSZ50160:2001 Magyar szabvány (utoljára megnyitva: 2023.06.04)
- [6] Az elosztó hálózathoz való hozzáférés együttműködési szabályai 19. számú módosítás MELLÉKLETEK 6/A melléklet. . (utoljára megnyitva: 2022.12.09) elérhető:  
<https://www.eon.hu/hu/rolunk/vallalatcsoport/kozlemlenyek/szabalyzatok-jogszabalyok/aram/eloszttoi-szabalyzat.html>
- [7] Garantált szolgáltatások elérhető: <https://www.eon.hu/hu/rolunk/vallalatcsoport/kozlemlenyek/szabalyzatok-jogszabalyok/aram/eon-energiaszolgaltato/garantalt-szolgotatasok.html>
- [8] Tózsér Balázs: Innovatív eszközök vizsgálata a közép feszültségű hálózatfejlesztésben



Turbucz Ákos, Sütő Bence  
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Villamosmérnöki és Informatikai Kar

# Elosztóhálózati soros és sönt feszültségszabályozás inverteres eszközökkel

**Absztrakt** – Cikkem célja a soros és sönt feszültségszabályozó teljesítményelektronikai eszközök elosztóhálózati alkalmazhatóságának vizsgálata Matlab/Simulink környezetben. A soros eszköz egy Dynamic Voltage Restorer (DVR). Ennél az eszköznél a különböző szabályozási stratégiákat vizsgáltam meg, dq-koordináta rendszerben megvalósított szabályozó esetén. A sönt eszköz pedig egy Static VAR Compensator (SVC). Az SVC megvalósításában a meddő kompenzáció tirisztorokkal kapcsolt kondenzátorokkal és tekercsekkel történik, így itt a tirisztorok gyújtási szögének szabályozását oldottam meg a Matlab/Simulink környezetben. A szimulációs eredmények alapján az említett két eszköz képes lehet az elosztó hálózati feszültségproblémákat hatékonyan elhárítani.

**Abstract** – *The aim of my article is to investigate the applicability of series and shunt voltage regulating power electronic devices in a distribution network in Matlab/Simulink environment. The serial device is a Dynamic Voltage Restorer (DVR). For this device, I investigated different control strategies in a dq-coordinate system. And the shunt device is a Static VAR Compensator (SVC). In the SVC implementation, the compensation of the sag is done with capacitors and coils connected to thyristors, so here I solved the control of the firing angle of the thyristors in the Matlab/Simulink environment. Based on the simulation results, the mentioned two devices are able to overcome the distribution network voltage problems efficiently.*

**Címszavak:** Dynamic Voltage Restorer, DVR, Static Var Compensator, SVC, dq-koordináta rendszer, szabályozó tervezés

## 1. DVR (DYNAMIC VOLTAGE RESTORER)

Az elosztóhálózaton fellépő feszültségproblémák miatt, egyre nagyobb figyelmet kap a soros feszültségszabályozók (DVR, SSSVC stb.) alkalmazásának lehetősége.

A soros feszültségszabályozó eszköz az elosztó hálózat és a fogyasztó közé sorosan kapcsolódik be, és vezérelt feszültségforrásként működik a hálózaton. A betáplált feszültség szögének és amplitúdójának szabályozásával képes a hálózaton jelentkező feszültségingadozásokat csökkenteni.

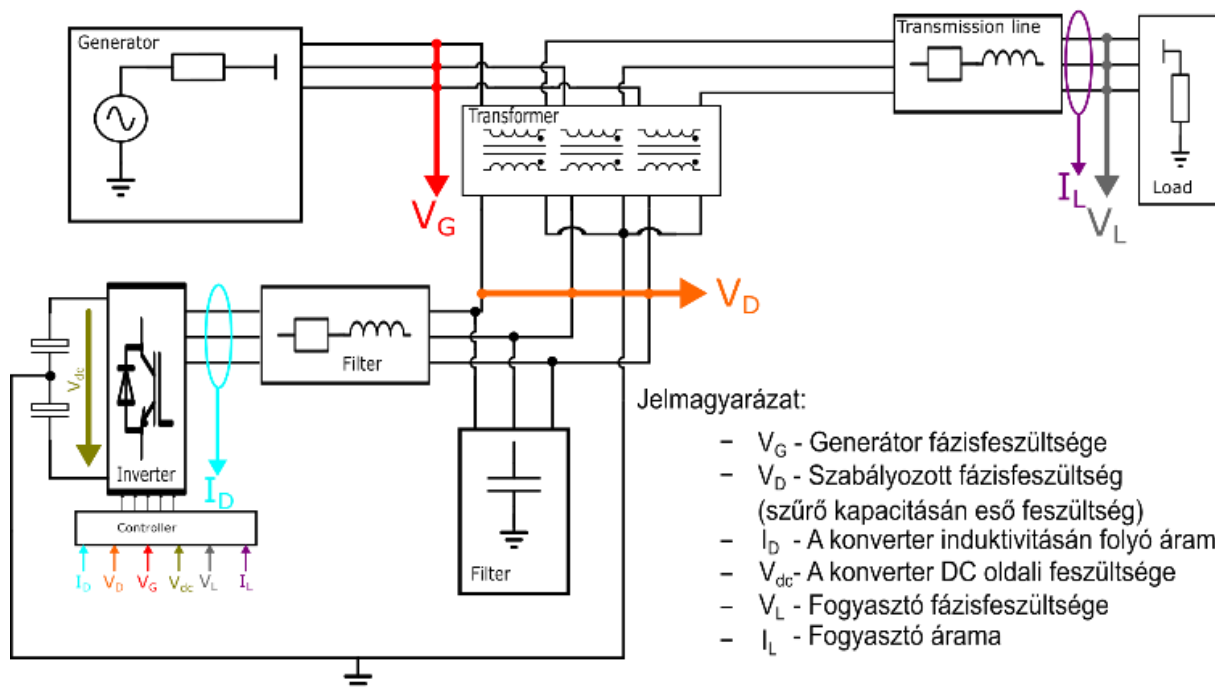
[1] ismerteti a lehetséges DVR megvalósítási struktúrákat és szabályozási stratégiákat, valamint arra is kitér, hogy a soros feszültségszabályozók két nagy csoportra oszthatók: energiatároló nélküli és energiatárolóval rendelkező szabályozókra. Jelen cikkben egy energiatárolóval rendelkező esetet

vizsgáltam. Az alkotott modellben az energiatárolót 2 db végtelen DC forrás képezte le, amely a működés jellegét nem befolyásolja (teljesen feltöltött tárolót feltételezve).

### 1.1. A DVR felépítése és a hálózat modellje

A DVR a hálózatra egy soros transzformátoron keresztül kapcsolódik, melynek különlegessége, hogy tekercei külön vasmagon találhatóak, amely konstrukció kisebb átmágnesezést eredményez DVR feszültség injektálása esetén. A kapcsolást az 69. ábra mutatja. A transzformátor áttétele 22/0,4 kV, a DC források 700 V-osak.

A kapcsolás [1] alapján lett összeállítva.



69. ábra. A hálózat modellje

A modell szabályozója d-q koordinátarendszerben működik. Az abc-dq transzformáció során szükséges volt a fázismennyiségekről sorrendi mennyiségekre áttérni, hogy megfelelően ki lehessen kompenzálni a zárlat során keletkező negatív, illetve zérusrendű összetevőket. A megépített szabályozó egy kaszkád áram- és feszültség szabályozóból épül fel. Munkám során a szabályozó megfelelő irányításával foglalkoztam, pontosabb felépítésével és működésével nem. A szabályozás kapcsán elmondható, hogy a negatív- és zérus sorrendű feszültség komponenseket minden esetben a minimálisra szeretnénk csökkenteni, így ezen ágak referencia értéke 0, a szabályozó negatív- és zérus sorrendű bemenetére a 0 referenciajel és az adott sorrendű generátor oldalán mért  $V_G^{sag}$  feszültség különbségét kapcsoltam minden szabályozási stratégia esetében.

## 1.2. Feszültség kompenzációs stratégiák

A DVR megfelelő működéséhez minden stratégia esetén szükséges meghatározni a betáplálendő feszültség amplitúdóját és fázisát. A nemzetközi szakirodalomban 3 főbb szabályozási stratégia terjedt el, melyek az in-phase, a pre-sag, és a minimum energy stratégiák, melyeket [2] részletesen is ismertet. A d-q koordináta-rendszerben felírt feszültségek minden esetben csúcsértékeket takarnak

### 1.2.1. In-phase kompenzáció

Ezen a kompenzációs stratégia esetén az injektált feszültség (VD) fázisban van a fennmaradó hálózati feszültséggel (VG<sub>sag</sub>). Vagyis az injektált feszültség amplitúdója minimális, viszont nem tudja visszaállítani a terhelés fázishelyzetét, ami érzékeny fogyasztók esetén káros lehet. A stratégia implementálásánál az volt a cél, hogy csak pozitív sorrendű, névleges értékű d komponenszt injektáljunk a hálózatra, így az alapjelek az alábbiak:

$$V_e^d = V_n - V_{Grid}^{d\ sag} \quad (1)$$

$$V_e^q = -V_{Grid}^{q\ sag} \quad (10)$$

ahol

- $V_e^d, V_e^q$  a pozitív sorrendű szabályozó bemenetei,
- $V_n$  a névleges fázisfeszültség csúcsértéke (20 412 V),
- $V_{Grid}^{d\ sag}, V_{Grid}^{q\ sag}$  a feszültségtorzulás alatti generátoroldali feszültség d és q komponensei.

### 1.2.2. Pre-sag kompenzáció

A pre-sag kompenzációs stratégia célja a terhelés feszültségének (VL) tartása a hálózati feszültség (VG) csökkenésének esetén, mind amplitúdó mind szöghelyzet szempontjából, hogy a terhelés ne érzékeljen változást. Ebben az esetben szükség lesz a szabályozáshoz szükséges PLL szinkronizációjára, hogy a fázishelyzet visszaállítható legyen.

Az alábbi egyenlet megadja az injektálandó feszültség nagyságát abc koordináta rendszerben.

$$V_e^q = -V_{Grid}^{q\ sag} \quad (11)$$

$$|V_{DVR,k}| = \sqrt{2} \cdot \sqrt{V_{load}^2 + V_{Grid,k}^2 - 2 \cdot |V_{load}| \cdot |V_{Grid,k}| \cdot \sin \delta_k} \quad (12)$$

ahol

- $|V_{DVR,k}|$  a fázisonként betáplálendő feszültség amplitúdója,
- $V_{load}$  a fogyasztói oldalon tartandó feszültség,
- $V_{Grid,k}$  a generátor oldali feszültség nagysága a feszültségesés alatt fázisonként,
- $\delta_k$  a referencia fázishelyzet és az aktuális generátor oldali feszültség fázishelyzetének a különbsége.

A betáplálendő feszültség szögét pedig az alábbi egyenlet adja meg:

$$\angle V_{DVR,k} = \tan^{-1} \left( \frac{V_{load} \cdot \sin \phi - V_{Grid,k} \cdot \sin(\phi - \delta_k)}{V_{load} \cdot \cos \phi - V_{Grid,k} \cdot \cos(\phi - \delta_k)} \right) \quad (13)$$

A **Error! Reference source not found.**, (13) egyenletek a  $\delta_k$  szögre felírható koszinusztételből adódnak.

A stratégia implementálásához el kell tárolni a hibás állapot előtti fázishelyzetet, ehhez szükség volt valamilyen trigger feltételre.

A modellben egy 50 Hz-es jel fázishelyzetét egy integrátor segítségével állítjuk elő, és a  $V_G$  feszültség fázishelyzetét ezzel a referencia fázishelyzettel hasonlítjuk össze. Mivel a jelek között sokszor időbeli késés is van, így a különbség jel sokszor túlcserél a 0 és  $2\pi$  közötti PLL-működési tartományon. Az ebből adódó gondok elkerülése végett korrekcióra van szükség a fázishelyzetek összehasonlításakor.

A zárlat alatti jelek vizsgálata alapján sikeresen előállítottam egy triggerfeltételt, viszont a sűrű és gyors kapcsolgatás elkerüléséhez ezt diszkrétizálni és rövid ideig (0,1 s) bekapcsolt állapotban is kellett tartani. Ehhez Stateflow (grafikus programozási nyelv) blokkokat használtam, ahol 3 állapot lett definiálva: On, Off, bekapcsolva tartást megvalósító Check állapot.

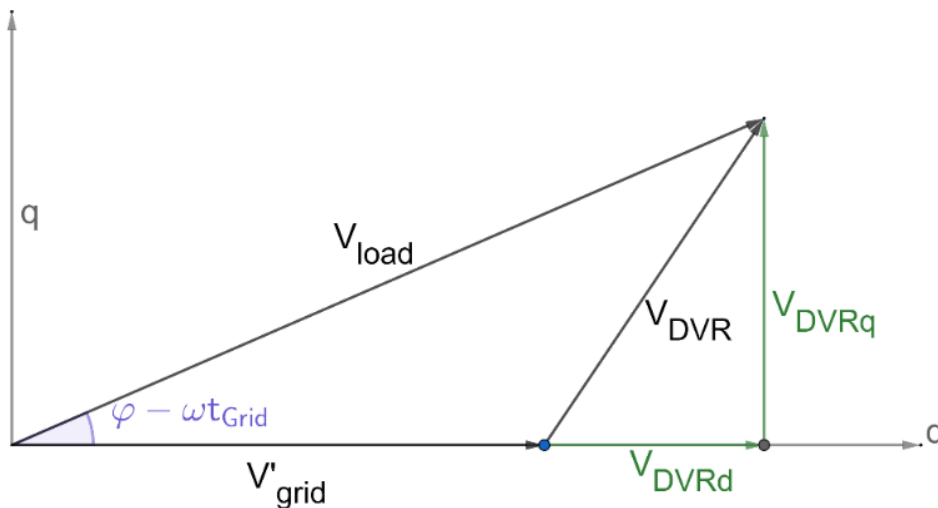
A Pre-sag stratégiához tartozó referencia fázis a triggerfeltétellel és egy resetelhető integrátorral könnyen elmenthető.

Az előállított referencia fázishelyzet és a feszültségtorzulás alatti generátor oldali feszültség fázishelyzetének különbségéként képzett  $\varphi - \omega t_{Grid}$  segítségével könnyen felírható az alábbi két egyenlet, mely megadja a betáplálendő feszültség d- és q- komponenseit:

$$V_{DVR}^d = V_n \cdot \cos(\varphi - \omega t_{Grid}) \quad (14)$$

$$V_{DVR}^q = V_n \cdot \sin(\varphi - \omega t_{Grid}) \quad (15)$$

Ezt szemlélteti a 70. ábra is.

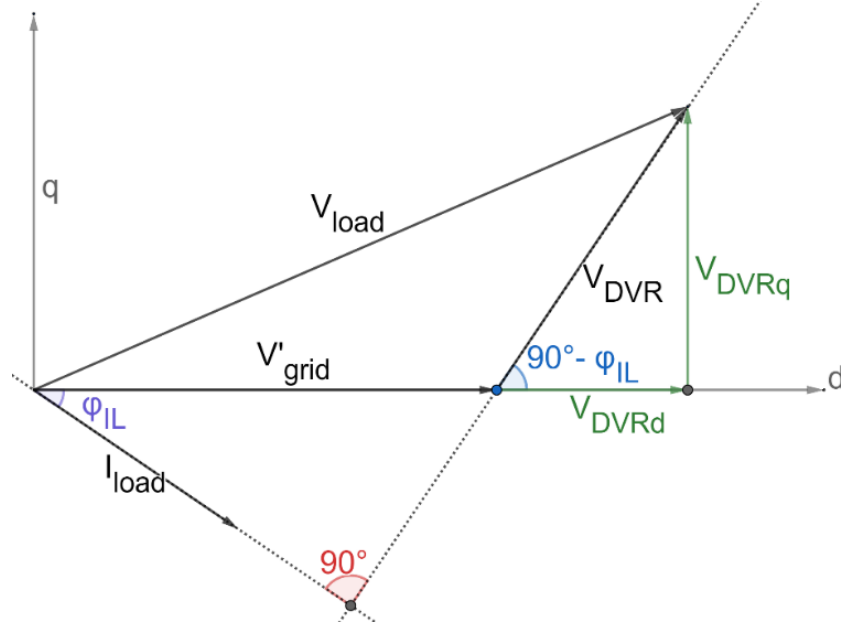


70. ábra. A betáplálendő feszültség d- és q-komponensei Pre-sag stratégia esetén

### 1.2.3. Minimális energia kompenzáció

Ebben a módszerben cél a hálózati feszültségesség amplitúdójának kompenzálása, minél kevesebb hatásos teljesítmény felhasználásával. Vagyis a DVR által betáplált feszültségnek (VD) merőlegesnek kell lennie a terhelés áramára (ILsag).

A [2] által ismertett módszerhez képest némileg eltérő leírást alkalmaztam, hiszen a szabályozási kör egy olyan dq-koordinátarendszerben szabályoz, mely a  $V'_{grid}$  feszültség fázishelyzetéhez van rögzítve. Ezért a módszert ehhez a szabályozóhoz kellett hozzáilleszteni. Ehhez meg kell határozni a betáplálendő feszültség d- és q-komponensét, melyet a 3. ábra szemléltet:



71. ábra. Minimum energy stratégia fázor diagramja d-q koordináta rendszerben

A 3. ábrán jelölt mennyiségek közül ismert a  $V'_{grid}$  amplitúdója és szöge ( $0^\circ$ ), a  $V_{load}$  amplitúdója, az  $I_{load}$  amplitúdója és a szöge is, melyet  $\varphi_{IL}$ ként jelöltem. Az áram szögére lehetőleg merőlegesen szeretnénk feszültséget betáplálni. Ezek alapján megállapítható, hogy a  $V'_{grid}$  és a  $V_{DVR}$  vektorok által bezárt szög  $90^\circ + \varphi_{IL}$  nagyságú. Innen felírható egy koszinusztétel a  $V'_{grid}$ ,  $V_{DVR}$  és  $V_{load}$  vektorok által határolt háromszögre és a  $90^\circ + \varphi_{IL}$  szögre. Ha a felírt koszinusztételt 0-ra rendezzük, a  $V_{DVR}$  vektor egy másodfokú egyenlet megoldóképlettel határozható meg:

$$|V_{DVR_{1,2}}| = -1 \cdot |V'_{grid}| \cdot \cos(\varphi + 90^\circ) \pm \sqrt{|V'_{grid}|^2 \cdot \cos^2(\varphi + 90^\circ) - |V'_{grid}|^2 + |V_{load}|^2} \quad (16)$$

Mivel ez egy háromszög oldala, ezért elegendő csak a pozitív ágat figyelembe venni. Így megkapjuk  $|V_{DVR}|$  amplitúdó értékét, amelyet  $90^\circ - \varphi_{IL}$  nagyságú szögben kell betáplálni. Így a  $V_{DVR}$  d-irányú komponense  $|V_{DVR}| \cdot \cos(90^\circ - \varphi_{IL})$ , q-irányú komponense pedig  $|V_{DVR}| \cdot \sin(90^\circ - \varphi_{IL})$  lesz.

#### 1.2.4. Kombinált kompenzáció

Az optimális szabályozási tulajdonságok (kis amplitúdójú betáplált feszültség, kis fázisugrások) eléréséhez a stratégiák kombinálására lehet szükség.

Kezdetben a terhelés feszültségtorzulásának csökkentése érdekében az injektált feszültséget a pre-sag stratégia szerint érdemes betáplálni, hogy a fogyasztó a feszültségtorzulás előtti fázist és amplitúdót érzékelje. A DC oldali forrás kimerítése miatt ez csak véges ideig tartható fenn. Az in-

phase stratégia ezután a betáplált feszültség fázisát a hálózat feszültségtorzulás alatti fázisához igazítja a kompenzáció idejének növelése érdekében. A stratégiaváltásnak lassan kell megtörténnie, mivel az érzékeny fogyasztók nem tudnak nagymértékű fázisugrást elviselni.

A két stratégia közötti lényeges különbséget a betáplálási szög adja, így egy integrátorral könnyen át tudunk állni az egyik stratégiáról a másikra.

Az integrátor és a pre-sag referencifázis különbségképzésénél itt is szükséges a szöghelyzet kompenzációja.

A szabályozó bemeneti jelei az **Error! Reference source not found.,Error! Reference source not found.** egyenletek szerint állnak elő ennél a stratégiánál is, persze itt a  $\varphi$  fázishelyzet helyett az újonnan előállt  $\omega t_H$  fázishelyzetet használtam.

### 1.3. A szabályozási stratégiák összehasonlítása

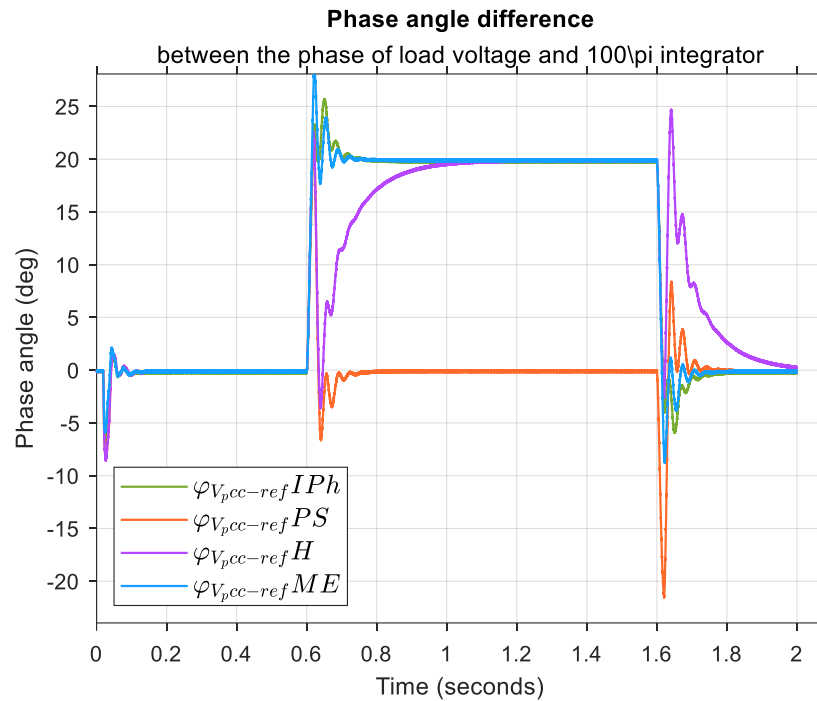
A stratégiákkal kapcsolatban felmerül a kérdés, hogy mikor melyik szabályozási módot érdemes alkalmazni. Az alábbi pontokban összehasonlítom a különböző stratégiákat a következő szempontok szerint:

- A tárolóból felvett teljesítmény
- Fogyasztó oldali fázisugrás

#### 1.3.1. Fázisváltás

Ebben az esetben csak a hálózati feszültség fázisa változik. A fázis 0,6 másodpercnél  $20^\circ$ -ot ugrik, majd 1,6 másodpercnél visszaugrik a fázis az eredeti helyzetébe. A 72. ábra mutatja, hogy a pre-sag stratégia fázisa (narancs jel) a többi jellel ellentétben nem követi a hálózati feszültség fázisát, hanem nagyjából a referencia  $100\pi$ -s integrátorral generált fázishelyzettel közel azonos fázishelyzetet tart az át- és visszakapcsolási tranziensektől eltekintve. A tranziens viselkedés a PLL működésének tudható be, hiszen a PLL-nek érzékelnie kell a fázisugrást és át kell kapcsolni ez alapján a megfelelő fázisra. Az in-phase és minimum energy stratégia (rendre zöld és kék jelek) követik a generátor oldali feszültség fázisát, hiszen ezen stratégiáknál a fázisstartás funkció nem került implementálásra. Hibrid stratégia egy nagyjából 0,2 másodperces fel- és lefutási idővel áll rá a generátor fázisára.



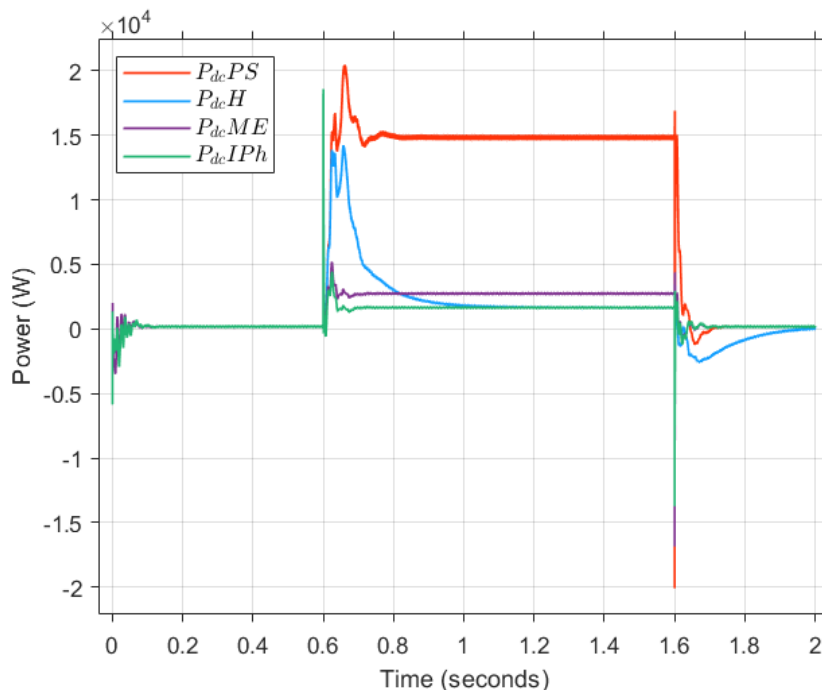


72. ábra. A stratégiák fázisa egy  $100\pi$ -s integrátorhoz képest

### 1.3.2. Amplitúdó és fázisugrás együttes vizsgálata

Az alábbiakban egy szimmetrikus háromfázisú esetet vizsgáltam meg melyben minden fázis feszültsége a névleges érték 90%-ára csökken és a fázishelyzet  $-20$  fokot ugrik. A feszültségtorzulás időtartama 0,6 és 1,6 másodperc között van a hálózaton.

Az in-phase stratégia felvett teljesítménye a legkisebb (73. ábra zöld jel), hiszen ez a stratégia injektálja a hálózatba a legkisebb amplitúdójú feszültséget. A pre-sag stratégia felvett teljesítménye (73. ábra narancs jel) a legnagyobb, mivel ez a stratégia visszaállítja a hálózat feszültségtorzulás előtti feszültségét. A minimum energy stratégia felvett teljesítménye (73. ábra lila jel) nagyobb az in-phase stratégiáénál, mivel itt a hatásoson kívül meddő teljesítményt is injektál a DVR a hálózatba melynek energiaszükségletét ugyanúgy a DC forrás fedezi. A hibrid stratégia a feszültség át- és visszakapcsolásánál nagyobb teljesítményt vesz fel és nyel el, de a fokozatos fázisszinkronizációnak köszönhetően a stratégia később csak az in-phase stratégiáéval megegyező teljesítményt vesz fel a forrásból.



73. ábra. A DVR felvett teljesítménye különböző a stratégiák esetén

## 2. STATIC VAR COMPENSATOR (SVC)

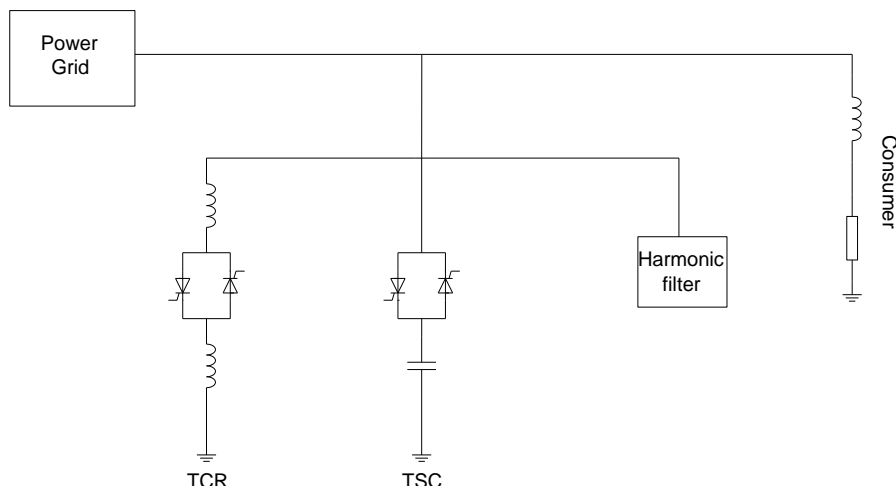
Sőt feszültség szabályozás esetén a teljesítményelektronikai eszközt a hálózattal párhuzamosan kapcsoljuk, és az eszközt egy vezérelhető áramforrásként működtetjük. A hálózat feszültségstabilitása érdekében meddőkompenzációt végzünk, ezáltal megnő az adott távvezetéken átvihető hatásos teljesítmény, de ezzel együtt nő a hálózatrész meddő igénye is [4].

Az SVC a fogyasztók dinamikusan változó meddőenergia igényét igyekszik kielégíteni, ezáltal a hálózati feszültséget képes a névleges érték körül tartani. A feszültség növekedése esetén az SVC meddőt nyel (induktív), csökkenése esetén pedig meddőt termel (kapacitív).

A static szó az eszköz nevében arra utal, hogy nem tartalmaz forgó alkatrészt, ehelyett tirisztorokkal kapcsolt kondenzátorokkal és tekercsekkel szabályoz. A kompenzátornak 3 fő alkotóeleme van, melyek a:

- Thyristor Switched Capacitor (TSC)
- Thyristor-Controlled Reactor (TCR)
- Harmonikus szűrő

A felépítés egyvonalas sémáját a 74. ábra mutatja.



74. ábra. SVC felépítése

## 2.1. Thyristor Switched Capacitor

A TSC esetében a tirisztorok folyamatos szabályozás helyett a megfelelő időpillanatban történő gyors kapcsolásokra használhatóak. Csak akkor tudjuk biztosítani a tranziens nélküli kapcsolást, ha a kondenzátor pozitív vagy negatív csúcsfeszültségre van töltve, ugyanis a kondenzátor árama ekkor nulla. A TSC tranziens viselkedését [3] részletesebben is ismerteti.

## 2.2. Thyristor-Controlled Reactor

A TCR esetében a tirisztorokat, és így a tekercsek áramát folytonosan lehet vezérelni. Ennek köszönhetően az eszköz képes folytonosan változó induktív meddő teljesítményt injektálni a hálózatba. [3]

A TCR árama felírható a gyújtási szög függvényében, mely szöget a feszültség nullátmenetétől mérjük, hiszen a tirisztor begyújtási feltétele a nyitóirányú feszültség. Mivel a tirisztorok ellenpárhuzamosan vannak kapcsolva adott fázison belül, ezért addig nem képes adott fázis ellentétes irányú tirisztorra begyújtani, amíg a másikon áram folyik. Így belátható, hogy az elemek gyújtási szöge  $90^\circ$  és  $180^\circ$  között képes változni. [3]

Ha a gyújtási szög  $90^\circ$  és  $180^\circ$  közötti értéket vesz fel, akkor megjelennek felharmonikus áramok az alábbi egyenlet szerint:

$$n = c \cdot p \pm 1 \quad (17)$$

ahol

- $n$  a harmonikus rendszáma,
- $c = 0,1,2 \dots$  természetes számok,
- $p$  az ütemszám.

$n = c \cdot p + 1$  rendszámú felharmonikusok pozitív, míg  $n = c \cdot p - 1$  rendszámú felharmonikusok negatív sorrendűek. A felharmonikus áramok amplitúdója a rendszámmal fordítottan arányos, ideális esetben:

$$\frac{I_n}{I_1} = \frac{1}{n} \quad (18)$$

Az **Error! Reference source not found.** egyenlet szerint az ütemszám növelésével bizonyos felharmonikusok kiesnek, de a maradó felharmonikusok alapharmonikushoz viszonyított értéke a **Error! Reference source not found.** egyenletnek megfelelően változatlan marad. A valóságban az aszimmetriák miatt az összes, a **Error! Reference source not found.** egyenlet által meghatározott felharmonikusokon kívül az ún. nem karakterisztikus felharmonikusok is megjelennek, de jóval kisebb amplitúdóval.[4]

### 2.3. Az egyfázisú SVC modell működése és a paraméterek hangolása

Az SVC működésének tanulmányozásához először egy egyfázisú modellt készítettem. Az egyfázisú TCR modellben egy kétütemű kapcsolást alkalmaztam, így a **Error! Reference source not found.** egyenlet értelmében minden páratlan felharmonikus megjelenik a **Error! Reference source not found.** egyenlet szerinti mértékben, amelyeket ki kell szűrni a normál működés érdekében. A megvalósításnál fontos szempont lehet az eszköz költsége, ezért az első 3 megjelenő harmonikusra terveztem szűrőt.

A szabályozórendszer első eleme egy feszültségszabályozó, mely előállítja a mért feszültségből a  $B_{SVC}$  szuszceptibilitás jelet.

A szabályozót empirikus módon hangoltam be. A  $K_i$  értékét a 0-1000 tartományon, míg az  $X_s$  visszacsatolást 0,01-0,05 értékek között vizsgáltam ad-hoc módon kombinálva a  $K_i$  és  $X_s$  értékeket. Az így előálló szabályozó paraméterei  $X_s = 0,0176$  és  $K_i = 500$ .

A  $B_{SVC}$  jel oszcillációja miatt volt egy  $B_{svc} = \pm 0.03$  értékű holtávra a szabályozóban. Az oszcillációt az okozta, hogy a TCR lecsökkentette a rendszer feszültségét a névleges szint alá, így a TSC is aktiválódott. Ennek következtében a TCR tirisztorai csak  $156^\circ$ -os gyújtási szögig szabályozhatóak. Így némi szabályozási képességet elveszítünk, a holtáv nélkül, az SVC hálózat feszültségét kilengetné, amely eset kerülendő.

Abban az esetben, amikor a szuszceptibilitás negatív értékeket vesz fel, akkor egy lookup table (LUT) segítségével meghatároztam a szuszceptibilitás értéknek megfelelő  $\alpha$  gyújtási szöget a **Error! Reference source not found.** egyenlet alapján:

$$B = \frac{2 \cdot (\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)}{\pi} pu \quad (19)$$

Látható, hogy a LUT-ra azért van szükségünk, mert a **Error! Reference source not found.** egyenlet egy transzcendens egyenlet.

A feszültség fázishelyzetét egy PLL segítségével mértem, és a tirisztorokat akkor gyújtottam be, amikor a pozitív, illetve a negatív félciklus fázishelyzete megegyezik az  $\alpha$  szöggel. A gyújtó jelet Stateflow blokkok segítségével állítottam elő. A stateflow blokk kimenete a gyújtó jel, bemenetei pedig rendre az SVC kimeneténél mért feszültség, az ebből előálló fázishelyzet, a gyújtási szög és a tirisztor árama. A pozitív félciklusra vonatkozó gyújtó jel kiadásának feltétele, hogy a tirisztorra nyitóirányú (jelen esetben pozitív) feszültség essen, és a fázishelyzet megegyezzen az  $\alpha$  szöggel, illetve kisebb legyen mint  $\pi$ , mivel a PLL miatt a  $\pi$ -nél nagyobb értékek esetén tévesen adnánk gyújtó jelet a tirisztorra. A gyújtójel akkor vált nullába, amikor a tirisztor árama 1 ms időtartamig kisebb, mint

1 mA. A negatív irányú tirisztor gyújtási feltételei a következők: negatív feszültség, a fázishelyzet  $]\pi, 2\pi[$  tartományon van, és megegyezik  $\pi + \alpha$ -szöggel. A negatív logika esetén a fázishelyzet tartománya azért nyílt, mert csak így lehet egyértelműen megkülönböztetni egymástól a 0 és  $2\pi$  állapotokat, és ezáltal minimalizálhatjuk a félregyújtásokat. A gyújtójel az előzőekben ismertetett módon vált egyből nullába.

A TSC egyfázisú modelljének irányításakor a jó ütemben történő gyújtásra kell figyelni, ha a feszültségszabályozó által kiadott  $B_{SVC}$  jel a pozitív tartományba kerül. Mivel a TSC-t csak pozitív- vagy negatív feszültségcsúcsnál lehet ki- vagy bekapcsolni, így a modellen belül is alaphelyzetben csúcsfeszültségre van töltve a kondenzátor. A modell paramétereit az 8. táblázat foglalja össze.

8. táblázat Az egyfázisú SVC paramétereit

$U_g^{\text{fázis}}$	$\frac{20 \text{ kV}}{\sqrt{3}} = 11,547 \text{ kV}$
f	50 Hz
$Q_{TSC}$	$-\frac{5}{3} \text{ MVar}$
$Q_{TRC}$	$\frac{5}{3} \text{ MVar}$
$Q_{\text{filter}}$	$-\frac{2}{3} \text{ MVar}$

[5] harmonikus szűrőkről szóló fejezete alapján a harmonikus szűrőknek összesen legalább 2 MVar meddőtjeljesítményűnek kell lenniük az alapharmonikuson ahhoz, hogy képesek legyenek ellátni a feladatukat. Viszont az irodalom a háromfázisú esetet vizsgálja, tehát ennek a harmada is elegendő az egyfázisú SVC modell helyes működéséhez.

A harmonikus szűrőket az alábbi egyenletek alapján hangoltam be:

$$L_n = \frac{U_{\text{fázis}}^2}{(1-n^2) \cdot \omega \cdot Q_n} \quad (20)$$

$$C_n = \frac{1}{(n \cdot \omega)^2 \cdot L_n} \quad (21)$$

$$Q_n F_n = \frac{1}{C_n \cdot n \cdot \omega \cdot R_n} \quad (22)$$

$$Q_n = \frac{Q_{\text{filter}}}{p} \quad (23)$$

ahol

- $n$  a harmonikus rendszáma,
- $\omega$  az alapharmonikus körfrekvencia,
- $R_n, X_n, L_n, C_n$  a szűrő ellenállása, reaktanciája, induktivitása és kapacitása,
- $Q_n$  az alapharmonikuson termelt meddőtjeljesítmény,

- $U_{fázis}$  a fázisfeszültség,
- $p$  a felharmonikus szűrők száma,
- $QF_n$  adott felharmonikus szűrő jósági tényezője.

Ha a **Error! Reference source not found.,Error! Reference source not found.,Error! Reference source not found.,Error! Reference source not found.** egyenletekbe az ismert paramétereket behelyettesítjük, a **Error! Reference source not found.** egyenletet  $R_n$ -re rendezzük, és a jósági tényezőt 5-nek vesszük, akkor a szűrők paramétereire a 9. táblázatban szereplő  $R, L$  és  $C$  értékek adódnak.

9. táblázat: Az egyfázisú SVC felharmonikus szűrőinek paraméterei

n	R [ $\Omega$ ]	L [mH]	C [ $\mu$ F]
3	45	238,7	7,715
5	25	79,6	5,093
7	17,5	39,8	5,196

Az így behangolt szűrők impedanciája a szűrendő felharmonikus frekvencián a legkisebb, így az adott frekvenciájú felharmonikusot söntölik.

## 2.4. a háromfázisú SVC modell

Az egyfázisú modellhez képest ennél a modellnél mind a TCR, mind a TSC esetében 3 delta kapcsolású ellenpárhuzamos tirisztor párt alkalmazunk a hozzájuk kapcsolódó tekercsekkel és kondenzátorokkal együtt. A delta kapcsolás miatt a tekercsekre és a kondenzátorokra eső maximum feszültség ebben a modellben már nem fázisfeszültség, hanem vonali.

A csillag és delta kapcsolású kondenzátorok meddőteljesítményét felírva könnyen belátható, hogy  $\frac{C_{\Delta}}{C_Y} = \frac{1}{3}$ . Tehát ugyanakkora meddőteljesítmény kompenzálásához delta kapcsolásban a csillag kapcsolásban alkalmazott kapacitás harmada is elegendő. Ha ugyanezt az egyenletrendezést elvégezzük az induktivitásokkal is, akkor  $\frac{L_{\Delta}}{L_Y} = 3$  adódik, hiszen  $X_L$  és  $X_C$  egymás reciprokjai. Ha  $\pm 5 \text{ MVar}$  meddő teljesítményt szeretnénk kompenzálni, akkor az egyfázisú szimulációban alkalmazott kapacitás érték harmada, az egyfázisú induktivitás értékének háromszorosára lesz szükségünk. A modellben alkalmazott induktivitások 763,9 mH, a kapacitások pedig 13,263  $\mu$ F értékűek, fázisonként.

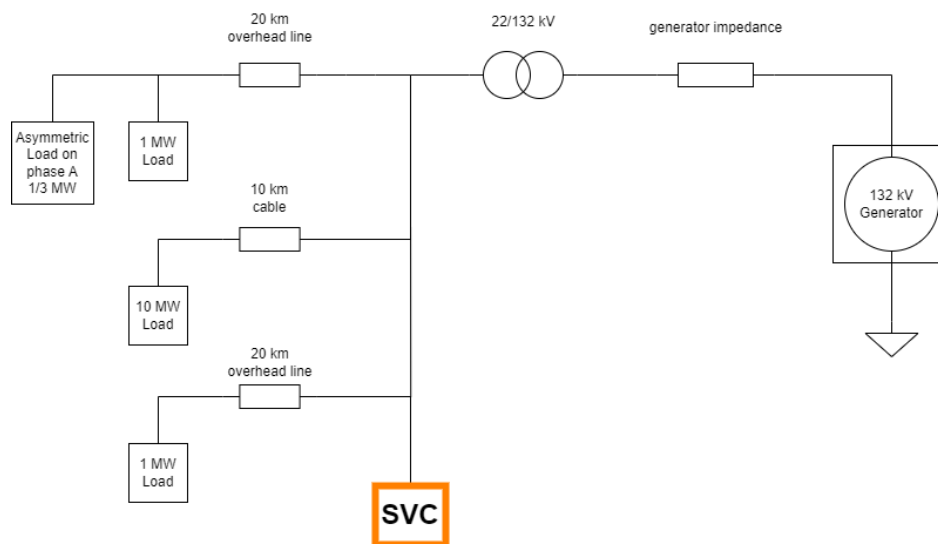
Az egyfázisú modell esetén alkalmazott harmonikus szűrő paramétereit változtatás nélkül átvettem, és három egyfázisú szűrőt kötöttem földelt csillag kapcsolásba. A 3 egyfázisú TCR delta kapcsolásba kötve egy 6 ütemű kapcsolást eredményez. A **Error! Reference source not found.** egyenlet értelmében a hárommal osztható felharmonikusok nem, vagy csak kis mértékben jelennek meg a TCR által kiadott jelben. Ezenkívül a **Error! Reference source not found.** egyenlet értelmében a háromfázisú kapcsolás esetén csak az ötödik- és hetedik felharmonikusokat kell szűrni.



Az egyfázisú szimulációk alapján megállapítottam, hogy feszültségcsökkenés hatására kialakuló feszültségugrások csökkentése érdekében egy -5 MVar meddő teljesítményű 3F TSC helyett érdemes lehet három, összesen -5 MVar meddő teljesítményű 3F TSC-t alkalmazni, amelyeket egymással párhuzamosan kapcsoltam. Így a teljesítmény az eredeti kapcsolás meddő teljesítményével egyezik meg, viszont a feszültség 3 lépcsőben növelhető.

## 2.5. SVC működése elosztóhálózati környezetben

Az elosztóhálózati modell tartalmaz egy 132 kV-os nagyfeszültségű (NAF) generátort, egy 22 kV-os közepfeszültségű (KÖF) elosztó sínt, egy az elosztósínt és a generátort összekötő 132/20 kV-os transzformátort, és az elosztósínre szabadvezetéken (SZV) vagy kábelen keresztül kapcsolódó fogyasztókat. A fogyasztók csatlakozási típusától függetlenül 10 kVar induktív meddő teljesítményt vesznek fel a hálózatról. Alapesetben a hálózatra 2 db egyenként 1 MW hatásos teljesítményű, 20 km hosszú SZV-en keresztül kapcsolódó és egy darab 10 MW hatásos teljesítményű 10 km hosszú kábelen keresztül kapcsolódó fogyasztó található. A vizsgált SVC közvetlenül a KÖF sínre csatlakozik. Az elosztóhálózati elrendezést a 75. ábra mutatja.

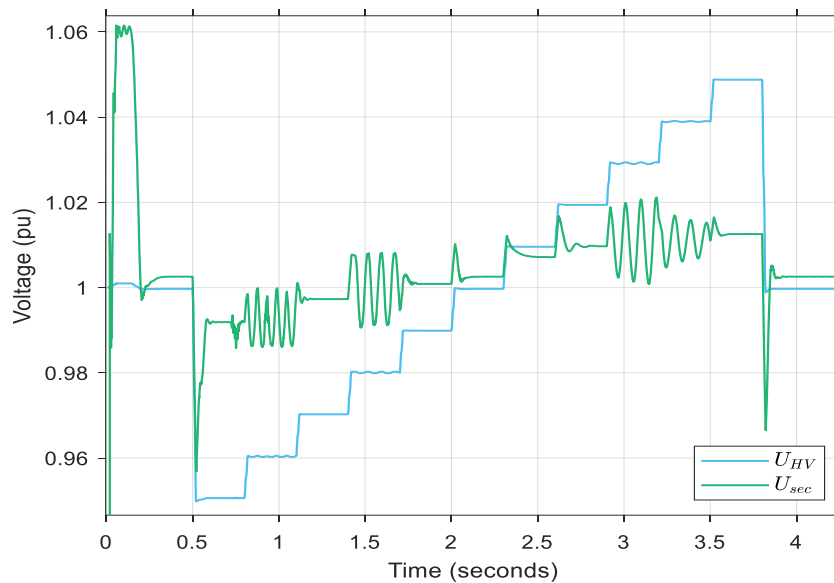


75. ábra. Az SVC szimulációi esetén alkalmazott elosztóhálózati modell [6]

### 2.5.1. Az SVC hatása a KÖF-sín feszültségére változó generátor feszültség mellett

A 8. ábrán a generátor oldali feszültséget a névleges érték 95%-a és 105%-a között léptettem százalékonként 0,5 és 3,8 másodperc között, 0,3 másodperces időlépcsőkben. Látható, hogy az SVC emellett a változás mellett képes volt a KÖF sín feszültségét a névleges érték 99%-101%-os tartományán belül tartani. Megfigyelhető 3 oszcilláció a KÖF sín feszültségében. Az első azért alakult ki, mert itt nagyjából két TSC fokozat közti feszültség növelésre lenne szükség, ezért a szabályozó a harmadik fokozatot ki- és bekapcsolja. A második oszcilláció a 100%-os névleges feszültség érték körül van. Itt is jelen van az egyik TSC-fokozat ki- és bekapcsolása, de mivel 100% fölé nő az utolsó fokozat bekapcsolásakor a feszültség, ezért a TCR szabályozója is bekapcsol, ami lehúzza a feszültséget a névleges érték alá, ezért nagyobb a lengés amplitúdója. A harmadik lengési jelenséget

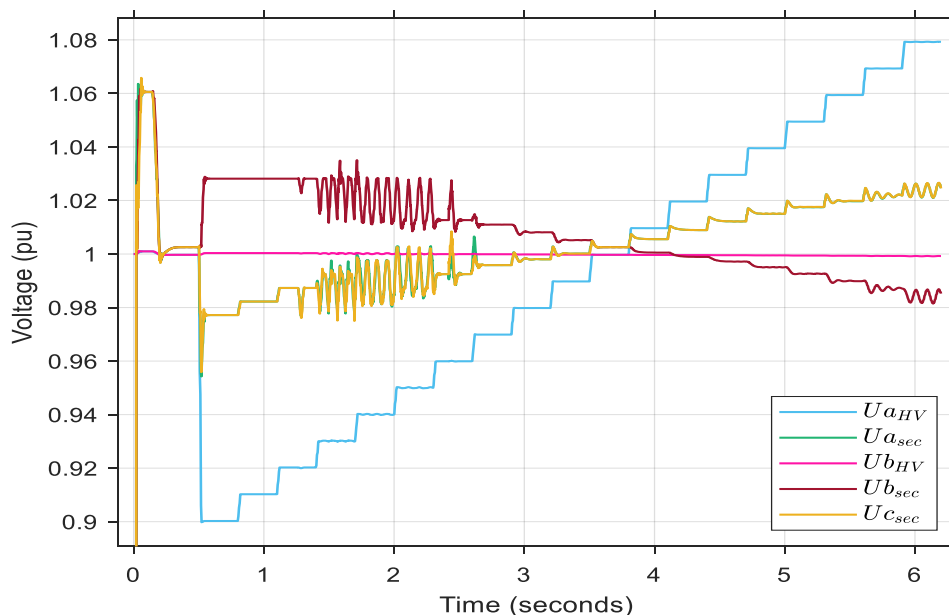
a  $B_{SVC}$  vezérlő jel lengése okozza. Itt az alkalmazott szabályozó a holtsáv miatt nem képes egy folyamatos szinten tartani a kompenzációt, így lengésbe kezd. A feszültség növelésével a lengés megszűnik, és a KÖF sín feszültsége újra egy közel konstans értéket vesz fel. 3,8 másodperc után a generátor feszültsége visszaáll a névleges értékre. A KÖF sín feszültsége a harmonikus szűrők és a tirisztorok snubber kapacitásainak feszültségnövelő hatása, illetve az alkalmazott holtsáv miatt lesz mégis egy kicsit nagyobb a névleges értéknél.



76. ábra. Az SVC hatása a KÖF-sín feszültségére változó generátor feszültség mellett

### 2.5.2. Generátoroldali feszültség aszimmetria

Ebben az esetben a generátor 'A' fázisának feszültségét a névleges érték 90%-a és 110%-a között léptettem százalékonként 0,5 és 6 másodperc között 0,3 másodperces időlépcsőkben. A generátor 'A' fázisának feszültségét a 77. ábra kék színű jele mutatja. A KÖF sínen (77. ábra sec indexű jelei a KÖF sín feszültségei) az 'A' és 'C' fázisok feszültsége ugyanolyan mértékben lecsökken, a 'B' fázis feszültsége pedig megnő. Elmondható, hogy az eszköz képes az aszimmetria hatására a fázisok feszültségét a névleges érték körül tartani, viszont egyfázisú aszimmetria esetén a kompenzáció a nem hibás fázisok feszültségét is eltorzítja. Ezt a torzítást vélhetőleg a komponensek delta kapcsolása okozza.



77. ábra. Az SVC hatása aszimmetria esetén

### 3. ÖSSZEGRZÉS

A DVR esetében a fogyasztók érzékenysége és a hálózati hibák típusa és gyakorisága meghatározza a megfelelő energiastratégia kiválasztását. Hálózati szimulációk kimutatták, hogy a megfelelő stratégia alkalmazása jelentős energiamegtakarítást eredményezhet anélkül, hogy a fogyasztókra negatív hatást gyakorolna. A hibrid stratégia különösen hatékony, kombinálva a pre-sag és in-phase stratégiák előnyeit. Az in-phase stratégia alacsony energiaigényű, míg a pre-sag stratégia fázishelyzet változásra érzékeny fogyasztóknak javasolt. A minimum energy stratégia tároló nélküli környezetben hasznos, amikor a feszültség ingadozás alacsony.

A másik vizsgált eszköz, az SVC is hasznos lehet az elosztóhálózaton, mivel a napelemes termelés mellett is fenntarthatja a feszültséget szűk tartományon belül. Ezenkívül képes meddő kompenzációra és harmonikus szűrésre is, csökkentve a THD-t és az aszimmetriát. A delta kapcsolású SVC csökkentette az aszimmetriát, de hatással volt a nem aszimmetrikus fázisok feszültségére is. Az eszközt csillag topológia mellett is érdemes lehet alkalmazni a feszültség aszimmetria kompenzáció céljából, és további tényezők, mint a hóltsávok és az oszcillációk, mélyreható vizsgálatát célszerű végezni.

### 4. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] M. Farhadi-Kangarlu, E. Babaei, and F. Blaabjerg, "A comprehensive review of dynamic voltage restorers," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 92, pp. 136–155, Nov. 2017, doi: 10.1016/J.IJEPES.2017.04.013.
- [2] A. K. Sadigh and K. M. Smedley, "Review of voltage compensation methods in dynamic voltage restorer (DVR)," in *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2012. doi: 10.1109/PESGM.2012.6345153.
- [3] "CIGRE Green Books Flexible AC Transmission Systems CIGRE Study Committee B4: DC Systems and Power Electronics FACTS." [Online]. Available: <http://www.springer.com/series/15209>
- [4] V. István, B. Attila, F. András, G. Zoltán, H. Imre, and K. Attila, "Elektronika 2 jegyzet," Budapest, 2021.

- [5] C. Bayliss and B. Hardy, "Transmission and Distribution Electrical Engineering, Third edition."
- [6] C. János and R. Dávid, "Szigetüzem elleni védelmek-tanulmány SPL."

Zsuga Ádám<sup>1)</sup>; Dineva Adrienn<sup>2)3)</sup>  
adam.zsuga97@gmail.com

1)Széchenyi István Egyetem, Győr, Magyarország

2) Óbudai Egyetem, Budapest, Magyarország

3)Széchenyi István Egyetem, Győr, Magyarország

## Gépi Tanuló modell implementációk a villamos járműhajtások beágyazott rendszereiben: áttekintés a technika mai állásáról

**Absztrakt** – A Mesterséges Intelligencia (MI)-alapú módszerek elektromos járművekben történő alkalmazása esetén kiemelten fontos, hogy az azt megvalósító rendszer a vizsgált eszközhöz közel, valós időben hajtsa végre a feladatát. Emiatt a gépi tanuló modellek beágyazott processzorban történő kivitelezése hangsúlyozottan fontos lehet a technológia ilyen irányú elterjedésében. Ennek ellenére az MI-modellek implementálása mikrokontrolleres környezetben számos problémát vet fel. Jellemző akadályok lehetnek például a rendelkezésre álló erőforrások korlátozottsága, egységes keretrendszerek hiánya és a különböző processzorokra történő optimalizálás. Ezen kihívásokat figyelembe véve, a munka célja a rendelkezésre álló szakirodalom áttekintése, összegzése és elemzése. A publikációban bemutatásra kerülnek a villamos járművekben potenciálisan alkalmazható MI-megoldások. Továbbá a cikk áttekintést nyújt az MI-modellek processzoros megvalósításához szükséges platformok, eszközök és keretrendszerek jelenlegi állásáról. A szakirodalmi áttekintés a legújabb technológiák kritikai elemzésének eredményei tükrében rávilágít a szakterület legfontosabb kihívásaira, továbbá a várhatóan legdinamikusabban fejlődő trendjeire.

**Abstract** – *In terms of the application of artificial intelligence-based methods in electric vehicles, the real-time operation of such systems, closely integrated with the target device, is of utmost importance. This requires careful consideration of the implementation of machine learning models on embedded processors, which is crucial for the adoption of this technology. However, the integration of AI models in a microcontroller environment presents several complex challenges. The main obstacles include the lack of available resources and the lack of standard frameworks, and the complexity of optimizing AI applications for embedded processors in vehicles also. In essence, optimizing AI applications for embedded processors in vehicles involves a trade-off between model accuracy, computational efficiency, power consumption, and real-time performance. Since, the main goal of this review is to provide a comprehensive overview, concise summary and critical analysis of the existing body of knowledge. Additionally, this paper provides a detailed overview of the current state of the platforms, tools, and frameworks that are essential to effectively implement AI models on processor-centric architectures. Through a close examination of*

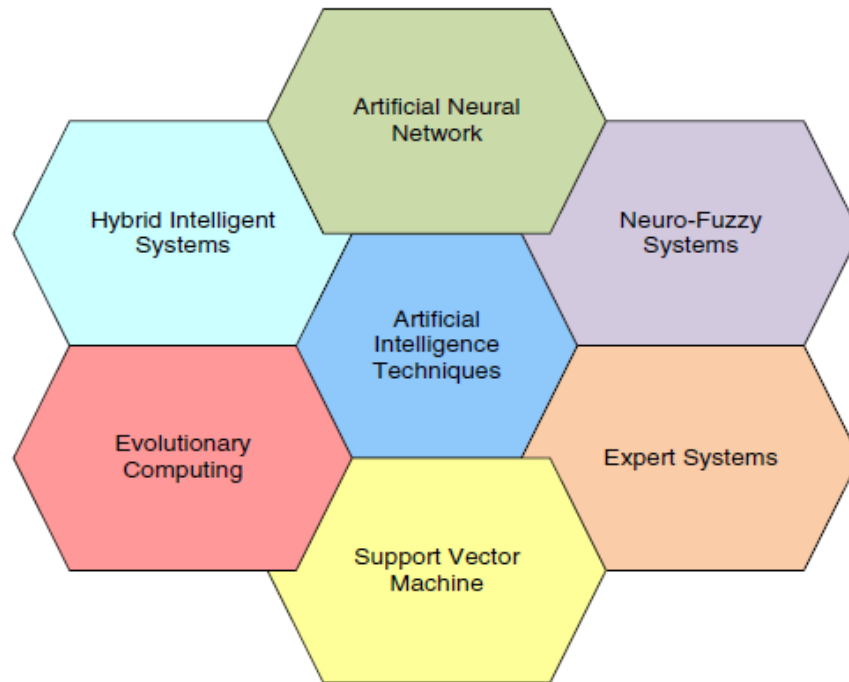
*cutting-edge technologies and their implications, this review illuminates key challenges across the field. Particular emphasis is placed on the complex operation of the implementation of artificial intelligence-driven diagnostic methods on real-time embedded processors in electric vehicles. This exploration highlights not only the most important challenges, but also the prospects of the most dynamic trends that will shape the future of this field.*

**Címszavak: Villamos járművek; Mesterséges Intelligencia; Beágyazott rendszerek**

## 1. BEVEZETÉS

Az elektromos járművek üzembiztos és környezetileg hatékony üzemeltetéséhez a korszerű Mesterséges Intelligencia alapú modellek mind a tervezésben, mind a teljes hajtást felölelő diagnosztikai, akkumulátor menedzsment és intelligens vezérlési feladatokban egyre nagyobb teret nyernek [1]. A trend a villamos gép diagnosztikai alkalmazásoknál is megfigyelhető, ahol egyre nagyobb érdeklődésre tartanak számít az adat-alapú, gépi tanuló modellek [2]. Az autóiparban a hagyományos, modell-alapú megoldások az elterjedtebbek, azonban a munkaponttól, hőmérséklettől és külső környezeti hatásoktól függő paraméterváltozások komplex összefüggéseinek leképezésére,- a járművekben használt processzorok erőforrásainak korlátozottsága miatt,- ezen módszerek kevésbé alkalmazhatók [3]. Az ilyen típusú modellek előnye a modell-alapú hagyományos megoldásokkal szemben, hogy a historikus adatok felhasználásával a vizsgált jelben történő mintázatok alapján döntenek, ezáltal nagymértékben ellenállóak a termikus és munkapontbéli paraméter változásokkal szemben, azonban pontos működésükhöz elengedhetetlen a megfelelő mintaszámmal és minőséggel rendelkező tanító adatkészlet. A fontosabb MI-módszerek megtalálhatók a 1. ábrán. Az elmúlt évtizedekben az MI-alapú alkalmazások a nagy teljesítményű platformokról fokozatosan áttértek a végpontokon történő implementációra. Az MI-alapú módszerek ipari és járműves alkalmazása esetén különösen fontos, hogy az azt megvalósító rendszer a vizsgált eszközhöz közel, valós időben hajtsa végre a feladatát. Emiatt a gépi tanuló modellek beágyazott processzorban történő kivitelezése előtérbe kerül a technológia ilyen irányú elterjedésében. Ennek ellenére az MI-modellek implementálása mikrokontrolleres környezetben számos problémát vet fel. Ilyen akadályok lehetnek például a rendelkezésre álló erőforrások korlátozottsága, egységes keretrendszerek hiánya és a különböző processzorokra történő optimalizálás [4]. Ezen kihívásokat figyelembe véve, a jelen áttekintés célja a rendelkezésre álló szakirodalom feltárása, összegzése és elemzése. Az második fejezetben bemutatásra kerülnek MI-modellek potenciális alkalmazásai az elektromos járművekben, továbbá a harmadik fejezetben az MI-algoritmusok beágyazott rendszerekben történő megvalósítási lehetőségei kerülnek tárgyalásra, majd a tanulmány a szakirodalmi áttekintés fő tanulságainak összegzésével zárul.





1.ábra Fontosabb MI-módszerek és technikák

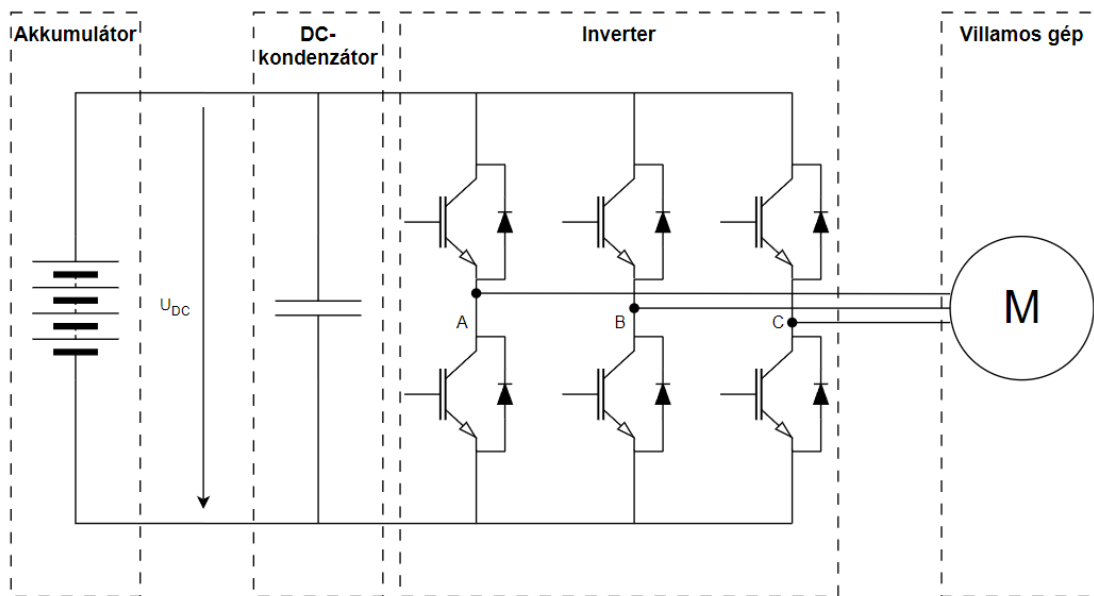
## 1.1. Potenciális MI-alkalmazások a villamos járművekben

A villamos járművek elterjedéséhez kiemelten fontos a hajtáslánc elemeinek (2.ábra) magas fokú integráltsága és együttműködése a minél hosszabb hatótáv, üzembiztonság és energiahatékonyság eléréséhez [4]. A technológia széleskörű feladatokra és célokra használható akár különböző komponensek esetén is. A feldolgozott szakirodalom alapján az egyik legintenzívebben kutatott irány az akkumulátorhoz kapcsolódó MI-alkalmazási lehetőségek vizsgálata mint például hasznos élettartam előrejelzés, töltöttségi és egészségi állapot predikció (SoC, ill. SoH) [6]. A felsoroltak közül az akkumulátor töltöttségi és egészségi állapotának MI-alapú technikák segítségével történő meghatározása egy különösen népszerű kutatási terület [7-10]. A pontos meghatározásához szükséges figyelembe venni, nem csak a fentebb már említett környezeti hatásokat, hanem az akkumulátor anyagtechnológiájának bonyolult kémiai viselkedését is [7]. A korszerű neurális hálózatok a megfelelő számú adatmennyiség esetén képesek az adatok alapján pontos modelleket alkotni, amelyek nem csak fedélzeti alkalmazások esetén hasznosíthatók, hanem a gyártásban és az anyagtulajdonságok modellezésében, ezáltal az adott akkumulátor technológia fejlesztésében is [11].

Az akkumulátorhoz szorosan kapcsolódó hatótáv előrejelzés és optimalizáció az MI-algoritmusok másik fontos alkalmazási területe. A hagyományos hatótáv előrejelző módszerek hátránya, hogy a dinamikusan változó külső környezetet nem veszik figyelembe [3]. Emiatt az előrejelző rendszer akár +/-3 km-es eltérést is adhat a valósághoz képest [12]. Sok dimenziós, vezetői tulajdonságokat és az említett környezeti hőmérsékletet is figyelembe vevő modellek alkalmazásával szignifikáns javulás érhető el, mint például [12]-ben és [13]-ban is megfigyelhető. Szintén a környezeti hatásokkal és munkapont változásokkal összefüggésben található alkalmazási példák a [14]-ben és [15]-ben,

melyekben a hagyományos PID szabályozó paramétereinek automatikus hangolása swarm intelligencia segítségével történik.

Mindezen fentebb tárgyalt funkciók megfelelő működéséhez elengedhetetlen a hajtáslánc elemeinek korszerű, preventív állapotfelügyelete és diagnosztikája. Ezen alkalmazási területen kiemelt jelentőséggel bír a különböző jelfeldolgozási módszerek megválasztása a hiba felismeréséhez szükséges legoptimálisabb tulajdonságvektor előállításához [2]. Ezek az MI-modellekkel kombinált tulajdonságvektorok lehetnek csúcs- és frekvenciatartománybeli értékek [16] vagy akár Park-vektor mintázatok is [17]. Az adat-vezérelt eszközök már fentebb tárgyalt előnyeinek ellenére azonban az MI-alapú diagnosztikai módszerek elterjedését nagy mértékben hátráltatja a rendelkezésre álló tanító adatkészlet hiánya [18].



2.ábra - Konvencionális villamos járműhajtás komponensei

## 1.2. MI-modellek megvalósítási lehetőségei mikrokontrolleres környezetben

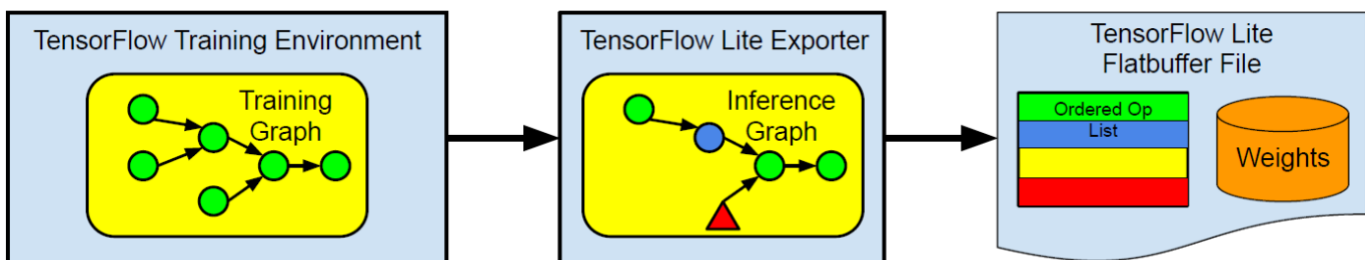
Az MI-modellek megvalósítása a valós idejű beavatkozást szem előtt tartva főként Edge-, és végesszközökön javasolt [18]. Az 5. ábra a MI-alkalmazásokra dedikált hardver platformok előnyeit és hátrányait foglalja össze. Az ASIC-ok és FPGA-k a rugalmasságot figyelembe véve magasabb minőséget képviselnek, továbbá fogyasztásuk is alacsony. Ár-érték arányban azonban az általános célú processzorok és DSP-k is jól használhatók amennyiben az alkalmazás nem támaszt speciális követelményeket. A különböző gyártók, forgalmazók a hardveres megvalósítások mellett a fejlesztői munkát megkönnyítő fejlesztői környezeteket is biztosít. A Xilinx Vitis AI például optimalizálás, fordítási és magas-szintű könyvtárakat (Python, TensorFlow) biztosít a minél könnyebb hardveres megvalósításhoz [19]. A beágyazott rendszerekben is megvalósítható, kis méretű, ún. TinyML (Tiny Machine Learning) modellek alkalmazása és fejlesztése virágzó kutatási irány az utóbbi években [20]. Valós időben történő állapotfelügyeletre, anomáliák felismerésére, képi és szenzor adatok feldolgozására egyaránt alkalmas modellek számos változata áll rendelkezésre. A tanulmányozott

szakirodalmak alapján [4, 20-21] azonban a szakterület számos kihívással néz szembe, melyek a következők:

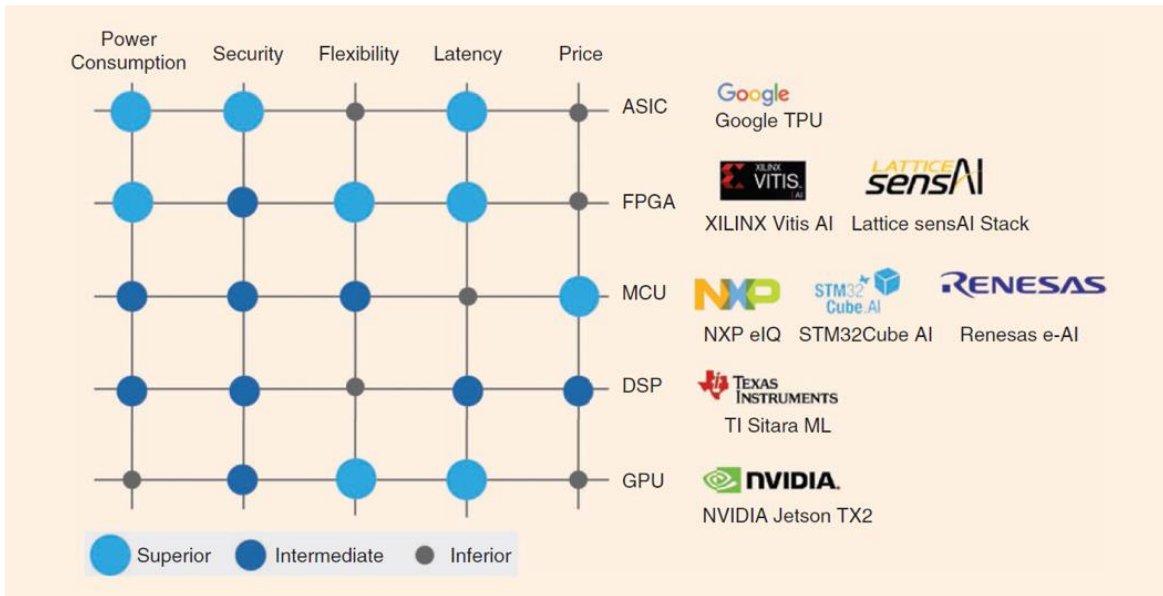
- Egységes több alkalmazást is támogató keretrendszer hiánya.
- Ugyanazon modell más hardveres platformra történő optimalizálásának nehézségei.
- A modellek tanítása továbbra is számításigényes.
- A kisebb méretű neurális hálók megvalósítása is problémákba ütközhet a rendelkezésre álló processzor memória korlátozottsága miatt.

A [4] és [21]-ben is található javaslat ezen problémák kezelésére. Előbbi a TensorFlow könyvtárra épített, mikrokontroller specifikus TensorFlow Lite kifejlesztésével, utóbbi pedig az ún. Transfer Learning módszer használatával segíti az MI-modellek implementálását a céleszközökre. A memóriaigény megoldására található példa a [15]-ben, melyben kis méretű MI-modell architektúra megalkotásával sikerül a hardveres korlátokon belül maradni. A 4. ábrán a TensorFlow Lite-al történő modell implementációs folyamat található, a 6. ábrán pedig a TransferLearning technika figyelhető meg. A szakirodalmi áttekintés alapján általánosságban véve az MI-algoritmusok mikrokontrolleres integrációjának folyamata a következő:

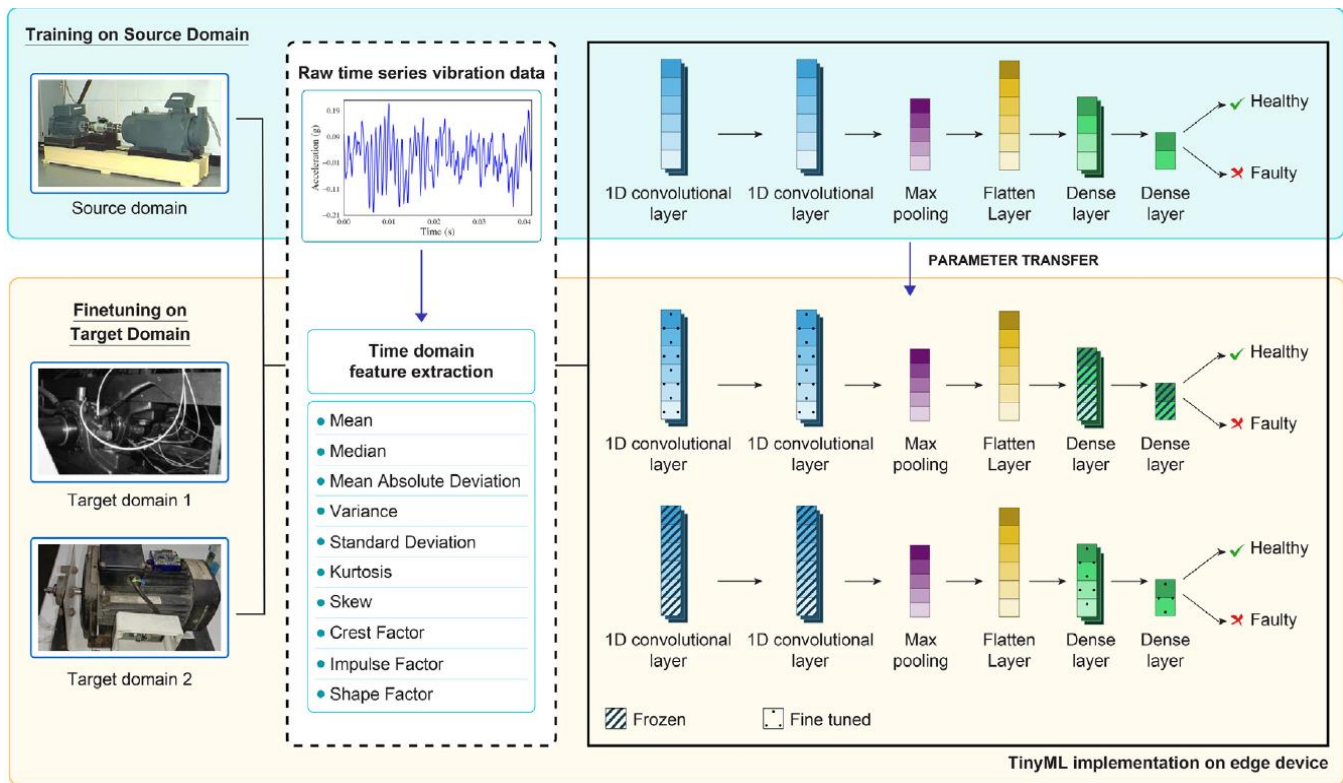
- 1) Adatgyűjtés és adatelőkészítés.
- 2) Modell megvalósítás és tanítás.
- 3) Hardveres optimalizáció: kvantálás, számítási ágak redukálása a memória igények csökkentése érdekében.
- 4) Modell konverzió és kódgenerálás.
- 5) Rendszerintegráció, teszt, finomhangolás.



4.ábra - TensorFlow Lite modell implementáció folyamata [14].



5. ábra – Hardver platformok MI-alkalmazásokra [16].



6. ábra - TensorFlow Lite modell implementáció folyamata [16].

## 2. ÖSSZEGZÉS

A cikkben bemutatásra kerültek a villamos járművekben az MI-módszerek szempontjából legígéretesebb alkalmazási területek. Mivel a villamos járművek működési környezete a külső hatásoknak és tranziens jelenségeknek rendkívül kitett, emiatt a hagyományos modell-alapú

módszerek nem minden körülményben működnek a kívánt pontossággal. A feltárt szakirodalom alapján kijelenthető, hogy a megfelelő MI-modellek és adatok alkalmazásával az említett technikai akadályok feloldhatók. Az algoritmusok beágyazott rendszerekben történő megvalósításához a technológia adott, így a gyakorlatban jól működő infrastrukturális rendszerek kiépítése lehetséges. Az MI-modellek implementálásához a kutatók és mérnökök számára már rendelkezésre állnak különböző keretrendszerek és platformok, amik segítségével szolgálnak a technológia valós idejű, járműiparban is használható elterjedésében, azonban a villamos járművek beágyazott, intelligens diagnosztikai megoldásainak területén még további fejlesztések szükségesek, így számos kutatási irány lehetséges.

### 3. HIVATKOZÁSOK

- [1] Ahmed, Moin & Zheng, Yun & Amine, Anna & Fathiannasab, Hamed & Chen, Zhongwei. (2021). The role of artificial intelligence in the mass adoption of electric vehicles. *Joule*. 5. 10.1016/j.joule.2021.07.012.
- [2] W. Lang, Y. Hu, C. Gong, X. Zhang, H. Xu and J. Deng, "Artificial Intelligence-Based Technique for Fault Detection and Diagnosis of EV Motors: A Review," in *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 8, no. 1, pp. 384-406, March 2022, doi: 10.1109/TTE.2021.3110318.
- [3] S. Zhao, F. Blaabjerg and H. Wang, "An Overview of Artificial Intelligence Applications for Power Electronics," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 4, pp. 4633-4658, April 2021, doi: 10.1109/TPEL.2020.3024914.
- [4] David, R., Duke, J., Jain, A., Reddi, V.J., Jeffries, N., Li, J., Kreeger, N., Nappier, I.A., Natraj, M., Regev, S., Rhodes, R., Wang, T., & Warden, P. (2020). TensorFlow Lite Micro: Embedded Machine Learning on TinyML Systems. *ArXiv*, abs/2010.08678.
- [5] Kumar, M. & Revankar, Shripad. (2016). Development scheme and key technology of an electric vehicle: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 70. 10.1016/j.rser.2016.12.027.
- [6] Yara Khawaja, Nathan Shankar, Issa Qiqieh, Jafar Alzubi, Omar Alzubi, M.K. Nallakaruppan, Sanjeevikumar Padmanaban, "Battery management solutions for li-ion batteries based on artificial intelligence," in *Shams Engineering Journal*, 2023, 102213, ISSN 2090-4479, <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102213>.
- [7] A. Affanni, A. Bellini, C. Concari, G. Franceschini, E. Lorenzani and C. Tassoni, "EV battery state of charge: neural network based estimation," *IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, 2003. IEMDC'03., Madison, WI, USA, 2003, pp. 684-688 vol.2, doi: 10.1109/IEMDC.2003.1210310.
- [8] A. Eddahech, O. Briat and J. M. Vinassa, "Adaptive voltage estimation for EV Li-ion cell based on artificial neural networks state-of-charge meter," *2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Hangzhou, China, 2012, pp. 1318-1324, doi: 10.1109/ISIE.2012.6237281.
- [9] N. Watrin, B. Blunier and A. Miraoui, "Review of adaptive systems for lithium batteries State-of-Charge and State-of-Health estimation," *2012 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, Dearborn, MI, USA, 2012, pp. 1-6, doi: 10.1109/ITEC.2012.6243437.
- [10] M. S. Chitnis, S. P. Pandit and M. N. Shaikh, "Electric Vehicle Li-Ion Battery State of Charge Estimation Using Artificial Neural Network," *2018 International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA)*, Coimbatore, India, 2018, pp. 992-995, doi: 10.1109/ICIRCA.2018.8597234.
- [11] Lombardo, Teo & Duquesnoy, Marc & El-Bouysidy, Hassna & Àren, Fabian & Gallo-Bueno, Alfonso & Jørgensen, Peter & Bhowmik, Arghya & Demortiere, Arnaud & Ayerbe, Elixabete & Alcaide, Francisco & Reynaud, Marine & Carrasco, Javier & Grimaud, Alexis & Zhang, Chao & Vegge, Tejs & Johansson, Patrik & Franco, Alejandro. (2021). Artificial Intelligence Applied to Battery Research: Hype or Reality?. *Chemical Reviews*. XXXX. 10.1021/acs.chemrev.1c00108.
- [12] Shuai Sun, Jun Zhang, Jun Bi, Yongxing Wang, "A Machine Learning Method for Predicting Driving Range of Battery Electric Vehicles", *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2019, Article ID 4109148, 14 pages, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/4109148>
- [13] H.A. Yavasoglu, Y.E. Tetik, K. Gokce, "Implementation of machine learning based real time range estimation method without destination knowledge for BEVs," *Energy*, Volume 172, 2019, Pages 1179-1186, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.032>.
- [14] S. Ekinci, B. Hekimoğlu and S. Kaya, "Tuning of PID Controller for AVR System Using Salp Swarm Algorithm," *2018 International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing (IDAP)*, Malatya, Turkey, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/IDAP.2018.8620809.

- [15] D. A. Ratna Wati, "Performance evaluation of swarm intelligence on model-based PID tuning," 2013 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Cybernetics (CYBERNETICSCOM), Yogyakarta, Indonesia, 2013, pp. 40-44, doi: 10.1109/CyberneticsCom.2013.6865778.
- [16] Zhao R, Yan R, Wang J, Mao K. Learning to Monitor Machine Health with Convolutional Bi-Directional LSTM Networks. *Sensors*. 2017; 17(2):273. <https://doi.org/10.3390/s17020273>
- [17] H. Nejjari and M. E. H. Benbouzid, "Monitoring and diagnosis of induction motors electrical faults using a current Park's vector pattern learning approach," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 36, no. 3, pp. 730-735, May-June 2000, doi: 10.1109/28.845047.
- [18] S. Zhao and H. Wang, "Enabling Data-Driven Condition Monitoring of Power Electronic Systems With Artificial Intelligence: Concepts, Tools, and Developments," in *IEEE Power Electronics Magazine*, vol. 8, no. 1, pp. 18-27, March 2021, doi: 10.1109/MPEL.2020.3047718.
- [19] "Vitis AI", <https://www.xilinx.com/products/design-tools/vitis/vitis-ai.html>. Accessed: 2023-08-20
- [20] Xu, K., Li, Y., Zhang, H., Lai, R., & Gu, L. (2022). EtinyNet: Extremely Tiny Network for TinyML. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 36(4), 4628-4636. <https://doi.org/10.1609/aaai.v36i4.20387>
- [21] Supriya Asutkar, Chaitravi Chalke, Kajal Shivgan, Siddharth Tallur, "TinyML-enabled edge implementation of transfer learning framework for domain generalization in machine fault diagnosis", *Expert Systems with Applications*, Volume 213, Part B, 2023, 119016, ISSN 0957-4174, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.119016>.







ISBN 978-963-9299-51-1