

Elektrotechnika

A MAGYAR ELEKTROTECHNIKAI EGYESÜLET HIVATALOS LAPJA
JOURNAL OF THE HUNGARIAN ELECTROTECHNICAL ASSOCIATION

■ ALAPÍTVÁ: 1908
■ FOUNDED: 1908



OTTHONOD
2000
interior design

Az új atomerőművi
blokkok hálózati
csatlakozása

Energiamegtakarítás
adaptív útvilágítással

Elosztóhálózati
állapotbecslés
támogatása adatalapú
technológiákkal

Csalásfelderítés
villamosenergia-fogyasztók
körében adatbányászati
módszerekkel

Az elosztói rugalmassági
piac jövője
Magyarországon

Felharmonikusok kalickás
forgórészű aszinkron
gépben; analitikus
számítás I.rész

2022

Érték és Minőség Nagydíj

**Elektrotechnikai Egyesület
Különdíj**

www.lakberendezom.eu



116. ÉVFOLYAM

2023/1-2

www.mee.hu

A FÉNY JELENTŐSÉGE A MINDENNAPOKBAN

A Nap fényenergiája a földi élet meghatározója, de ugyanolyan fontos szerepe van a fénynek mindennapi életünkben a lakásokban, zárt terekben, irodákban, közintézményekben. Éppen ezért akár egy lakás, iroda vagy egyéb létesítmény megfelelő világításának megtervezése, komoly kihívást jelent. A tervezőcsapatnak a MEE által odaítélt díja ezt a minőséget értékelte.

Az Otthonod 2000 Interior Design tervezői csapata 2022-ben tervezői munkájával elnyerte az **Érték és Minőség Nagydíj Védjegyét**, valamint a **Magyar Elektrotechnikai Egyesület Különdíját**, amelyet a Parlamenti ünnepségen vette át Németh Gábor, az alkotócsoporthoz tartozó mérnök, a MEE Marketing és Kommunikációs referensétől.

Megbízástól a megvalósításig

„Amikor útnak indulok, bizony szeretem tudni, hogy hová érkezem. Lépcsőről lépésre megtervezem az utazás fontosabb állomásait. Nem volt ez másként, mikor az otthonomat terveztem. Igyekeztem minden tekintetben átgondolni az építkezés, a belső tér kialakításának minden apró részletét. Fontos volt, hogy esztétikus, otthonos, praktikus életteret tudjak kialakítani. Ugyanakkor fontos szempont, hogy mindez az erre szánt költségvetés kereteibe is beleférjen.

Tologattam a kockás papírra felrajzolt alaprajzon a papírbútorokat, számoltam a szükséges burkolatmennyiségeket, gondolkodtam a helyiségek világításán. Így kezdődött a lakberendezői karrierem a 2000-es évek elején. Majd a lakberendezés szenvedélyemmé, később hivatásommá vált. Mára már az **Otthonod 2000 Interior Design** alkotócsapatával tervezzük lépésről lépésre az utazást a belső terek, enteriőrök világában. A kockás papírt 3D belsőépítészeti programra cseréltük, amely lehetőséget ad, hogy a virtuális térben cm-pontosan felépítsük a leendő otthonok modelljét” – mesélte **Gyarmati Viktória, designer és enteriőrtervező, mérnök**.

A **világítás megtervezésére** különös hangsúlyt fektetnek a tervezők. Minden általuk tervezett belső tér esetén fontos szempont, hogy egy jól megvilágított, hangulati fényekkel és helyi megvilágításokkal optimálisan megalkotott élettér jöjjön létre. Ma már idejélműltnek tekinthető az a szemlélet, amikor a helyiség megvilágítását egyetlen, a tér közepén elhelyezett mennyezeti „csillár” biztosítja. A LED-fényforrások nem csak energiatakarékosak, hanem igen sokoldalúan használhatóak. Alkalmazásukkal igazán modern otthon teremthető. A LED-szalagok optimálisan használhatók helyi megvilágításként, általános világításként, de hangulati designelemként is. A dimmelhetőség, vagyis a fényerősség szabályozása szintén jól kihasználható, legyen szó rejtett világításról vagy hangulati fényekről. Az enteriőr hangulatát nagymértékben befolyásolja a fény színhőmérséklete. A napfény, vagyis a természetes fény színhőmérséklete 3500-6500 K. A kereskedelmi forgalomban a természetes vagy középfehér fényforrás általában 4000 K-re gyártják, az ettől kisebb K-érték (vagyis 3500 alatti érték) a meleg fény, a 5500 K feletti érték pedig hidegfény. Ezeket a színhőmérsékleti értékeket mindig feltüntetik a fényforrásokon.

A színhőmérsékletnek épp úgy, mint a színeknek, pszichológiai hatása is jelentős. A színhőmérséklet sok fényforrásnál szabályozható, csakúgy, mint a fényforrás fényárama. Azonos terekben azonban érdemes azonos színhőmérsékletű fényforrásokat alkalmazni. Ledek, LED-szalagok esetében a piacon RGB állítható színű termékek is kaphatóak, melyek fehér, piros, sárga, zöld, kék színekben világítanak, de akár ezek keverésével újabb színek is létrehozhatóak! A bemutatott terveken látható, hogy LED-es világítás felhasználása milliónyi lehetőséget kínál. Rejtett fényként vagy a hideg-melegburkolatba süllyesztve, valamint gipszkartonba építve is igazán jól mutat.



Izgalmas lehetőséget kínál a 3D nyomtatás a világítótestek megalkodásakor, hiszen ezzel a technológiával egyedi, különleges formavilágú vagy méretű lámpatestek és függesztékek is gyárthatóak.

Miért bízson meg lakberendezőt, belsőépítészt, világítási szakembert otthona megtervezésével?

Személyre szabja a legújabb lakástrendeket, stílusirányzatokat, ismeri a piaci kínálatot, az alapanyagokat és forrásait, az esztétikumon túl a praktikumot, fotórealisztikus látványtervek alapján pontos képet ad a megrendelőnek, hogy is fog kinézni az új élettér, mert igazi segítséget kap a megrendelő, hogy a lakása valóban otthonná váljon!

Az Otthonod2000 Interior Design az Érték és Minőség Nagydíj kitüntetés mellett a Magyar Elektrotechnikai Egyesület, a Legrand Magyarország Zrt., a DIAMOND Bt. és a Transilvanium Alapítvány különdíjait is átvehette.

Elérhetőség:
www.lakberendezom.eu
tel.: 06-20-9460180

Elektrotechnika

Felelős kiadó: Veisz Imre

Szerkesztőbizottság elnöke:
Hatvani György

Szerkesztőbizottsági tagok:
Dr. Berta István, Dr. Hatibovic Alen,
Dr. Madarász György, Dr. Nagy László,
Orlay Imre, Dr. Vajk István,
Dr. Varjú György, Vinkovits András,
Béres József, Gelencsér Lajos,
Tillesch Péter, Veisz Imre, Táczy István

Témafelelősök:
Energetika, atomenergia: Hárfás Zsolt
Energetikai informatika:
Karacs Márk

Energetikai hírek: Dr. Bencze János
Oktatás: Dr. Tóth Judit
Szabványosítás: Somorjai Lajos
Szakmai jog: Arató Csaba
Technikatörténet: Dr. Antal Ildikó
Világítástechnika:
Némethné Dr. Vidovszky Ágnes
Villamos fogyasztóberendezések:
Dési Albert
Villamos gépek: Dr. Marcza Dániel
Tiszteletbeli rovatszerkesztő:
Jakabfalvy Gyula

Tudósítók:
Kovács Gábor, Lieli György

Szerkesztőségi titkár:
Andrássy Katalin

Korrektor: Fejér Petra
Grafika: Kószegi Zsolt

Nyomda:
Innovariant Nyomdaipari Kft. Szeged
Szerkesztőség és kiadó:
1075 Budapest, Madách Imre u. 5. III. e.
Telephely:
1075 Budapest, Madách Imre u. 5. III. e.

Telefon: 788-0520
E-mail: mee@mee.hu
Honlap: www.mee.hu

Kiadja és terjeszti:
Magyar Elektrotechnikai Egyesület
Adóigazgatási szám: 19815754-2-42
Előfizethető:
A Magyar Elektrotechnikai Egyesületnél
Előfizetési díj egész évre: 6000 Ft + áfa

Kéziratokat nem őrzünk meg és nem
küldünk vissza.
A szerkesztőség a hirdetések
és a PR-cikkek tartalmáért felelősséget
nem vállal.

Előfizetésben terjeszti a Magyar Posta
Zrt. 1900 Budapest, tel.: 06-1-767-8262

Index: 25 205
HUISSN: 0367-0708

Nyomdába adás: 2023.03.10.



IMEDIA

TARTALOMJEGYZÉK 2023/1-2

Kovács Gábor: Előszó 4

VILLAMOSENERGIA-RENDSZEREK

Pach Péter, Sziklai György, Tari Gábor:
Az új atomerőművi blokkok hálózati
csatlakozása 5

**Békési Gergő Bendegúz, Barancsik Lilla,
Dr. Hartmann Bálint:** Elosztóhálózati
állapotbecslés támogatása adatalapú
technológiákkal 15

VILÁGÍTÁSTECHNIKA

**Dr. Balázs László, Braun Ferenc,
Dr. Lengyel József:** Energiamegtakarítás
adaptív útvilágítással 10

VILLAMOS GÉPEK

Kovács Gábor: Felharmonikusok kalickás
forgórészű aszinkron gépben; analitikus
számítás I.rész 19

ÚJ GENERÁCIÓ

Kovács Levente: Csalásfelderítés
villamosenergia-fogyasztók körében
adatbányászati módszerekkel 27

BIZTONSÁGTECHNIKA

Arató Csaba, Rajkai Ferenc, Dr. Novothny Ferenc:
Emlékeztető a Villamos Biztonsági
Munkabizottság 2022. október 5-i üléséről
III. rész 32

SAKMAI ELŐÍRÁSOK

Nagy Gábor: A 2022. IV. negyedében
közzétett, az elektrotechnika területeit érintő
magyar nemzeti szabványok 39

VÁNDORGYÜLÉSRL

Sipos Márton, Laza Sándor, Varga Benjámin:
Az elosztói rugalmassági piac jövője
Magyarországon 43

Korszerűsítéssel az üzembiztonságért 46

A fiatalok, a jövő fogyasztói! –
Hogyan szólíthatók meg? 47

EGYESÜLETI ÉLET

Évzáró küldöttgyűlés szakmai tájékoztatóval 45

Gothard-díj beszámoló 9 46

TECHNIKATÖRTÉNET

Nekik van, nekünk nincs...
Műszaki Múzeumunk 51

HÍREK

Két új magyarországi naperőmű 14

Napelem újrahaznosítás 26

Siemens megoldások napelemparkokban 31

A jövő villamosenergiarendszerét fejlesztik 38

A Pécsi Tudományegyetem az EDUCATIO 48

Nemzetközi Oktatási Szakkiállítás 48

30 éves a LEGRAND Magyarország 49

Intelligens transzformátorok a Ganztól 53

NEKROLÓG 53

CONTENTS 1-2/2023

Gábor Kovács: Foreword

POWER ENGINEERING

Péter Pach, György Sziklai, Gábor Tari:
Connecting the New Nuclear Power Station Blocks
to the Grid

**Gergő Bendegúz Békési, Lilla Barancsik,
Dr. Bálint Hartmann:** Supporting the Status
Estimation of Distribution Networks by Data-based
Technologies

LIGHTING TECHNOLOGY

**Dr. László Balázs, Ferenc Braun,
Dr. József Lengyel:** Energy Saving by Adaptive
Road Lighting

ELECTRIC MACHINERY

Gábor Kovács: Harmonics in Asynchronous
Machines with Eddy-current Squirrel-cage Rotors;
Analytical Computation Part

THE NEW GENERATION

Levente Kovács: Family Survey Among Electricity
Consumers by Means of Data Fishing Methods

SECURITY TECHNOLOGY

Csaba Arató, Ferenc Rajkai, Dr. Ferenc Novothny:
Memorandum of the Meeting of the Electrical
Safety Work Committee Held on 5th October 2022;
Part 3.

PROFESSIONAL GUIDELINES

Gábor Nagy: Hungarian National Standards
Issued in the Fourth Quarter of 2022 Related to the
Areas of Electrotechnology

TRAVELING-MEETING

Márton Sipos, Sándor Laza, Benjámin Varga:
The Future of the Distributor Flexibility Market in
Hungary

Modernization to Achieve Safety of Operation

Youth, as the Consumers of the Future! – How to
Address Them?

ASSOCIATION RELATED NEWS

Year-end Meeting of Delegates with Professional
Presentation

Report on the Gothard Award

HISTORY OF TECHNOLOGY

They Have It, We Don't...
Our Museum of Technology

NEWS

Two New Solar Power Stations in Hungary

Reuse of Solar Panels

Siemens Solutions for Solar Panel Parks

They Are Developing the Electricity System of the Future
At the University of Pécs 23rd EDUCATIO

International Education Exhibition

LEGRAND Hungary is Now 30 Years Old!

Intelligent Transformers by Ganz

OBITUARY

Kedves Olvasó!

Amikor ezeket a sorokat írom, éppen túl vagyunk az utóbbi évek legpusztítóbb, rendkívüli időjárás következtében keletkezett elosztóhálózati üzemzavarok helyreállítási munkálatain. Ehhez hasonló helyzet utoljára 2013 márciusában volt a Tiszántúlon. Szerencsére, a mostani esetben február 4-i kezdettel „csak” a viharos, helyenként orkánerejű szél tombolt, hó és jéglerakódás nem terhelte a vezetékeket. Ennek ellenére a Dunántúl területén, melyet a – gyakran 100-130 km/h közötti értéket elérő – széllelési adatok alapján a leginkább sújtott a vihar, több mint 300 középvezettségű- és 1500 körüli kisvezettségű hiba keletkezett, és az érintett felhasználók száma meghaladta a 300 ezret. Szerencsére, ma már az elosztóhálózat üzemeltetői jól fel vannak készülve az ilyen havária esetekre, és kollégáink, szerződött alvállalkozóink és társszolgáltatóink megfeszített munkájának köszönhetően az ügyfelek többségénél 12 órán, a kisebb hányadánál 24 órán belül sikerült helyreállítani a jellemzően farádélesek, vezetékszakadások, oszloptörések okozta áramkimadásokat.

De nem csak az elosztóhálózat üzemeltetőinek kell napjainkban megbirkózniuk hasonló súlyú kihívásokkal, hanem az iparág szinte valamennyi szereplőjének, beleértve elsősorban a rendszerirányítót, az új Energiaügyi Minisztériumot, a szabályozó hatóságot, az energiatermelő és egyéb piaci szereplőket. Szerencsére, és nagy elődjainknak hála, a Magyar Elektrotechnikai Egyesület rendelkezésünkre áll, és minden lehetséges fórumon támogatja az iparág szereplőit.

Így tesz az Elektrotechnika idejei első, dupla kiadványa is, mely az ÉDUKO és DÉDUKO közös mentorálása mellett jelenhet meg. A tartalom összeállításánál igyekeztünk e két régió aktuális szakmai fejlesztéseiről, egyesületi életéről szóló cikkeket is bemutatni,



megőrizve a lap évtizedek során kialakított igényes, tudományos, informatív, szakmai tájékoztató, és közösségépítő szerepét.

Kiemelném, hogy ebben a számban betekintést nyerhetünk, hogy az új létesítésű atomerőművi blokkok hálózatra csatlakoztatása során milyen műszaki és rendszerüzemeltetés-biztonsági elvárásoknak kell megfelelni. Megismerhetjük az új blokkok villamosenergia-rendszerbe integrálásához szükséges hálózati csatlakozások topológiai koncepcióját.

A jövő technológiáinak, működésmodelljeinek tudományos vizsgálata elengedhetetlen. Most itt a kalickás aszinkron gép légréseiben keletkező mágneses tér és az azt létrehozó különféle gerjesztések felharmonikusai, valamint az ezzel kapcsolatos légrésszórás, csillapítás, parazita nyomatékok és radiális mágneses erők egységes vizsgálatából adódó következtetéseket olvashatjuk.

Biztos sokak számára érdekes lehet az elosztóhálózat jövőbeni működését meghatározó, tömeges kis és háztartási méretű erőművi betáplálások piaci eszközökkel koordinált, biztonságos együttműködési modelljének vizsgálata.

Megismerhetjük az adatbányászati módszerek alapjait, ennek egy konkrét felhasználási lehetőségét, és visszatérő témáink közül a szabványváltozásokat, vilámos biztonságtechnikai aktualitásokat.

Szakmai feltöltődést, hasznos információszerzést kívánok a cikkek olvasása közben!

Kovács Gábor

A MEE Dél-dunántúli koordinációjának
és pécsi szervezetének elnöke

A Magyar Elektrotechnikai Egyesület kiemelt támogatói:



Békési Gergő Bendegúz, Barancsuk Lilla,
Dr. Hartmann Bálint

Elosztóhálózati állapotbecslés támogatása adataalapú technológiákkal

Napjainkban számos trend jelentős hatást gyakorol az elosztóhálózatra, amellyel kapcsolatban így felmerül a valós idejű monitorozás igénye. Ez támogatható állapotbecslő algoritmussal, ami megvalósítható konvencionális módon iteratív optimalizálás segítségével is, azonban egyre több kutatás fókuszál a mesterségesintelligencia-alapú módszerekre ezen a téren. Jelen munkában egy többrétegű perceptron modellel végzünk állapotbecslést és értékeljük ki azt a CIGRÉ Európai Kisfeszültségű Benchmarkján és Joerg Dickert Kisfeszültségű Teszthálózatán. Bemutatjuk, hogy a Newton-Raphson algoritmushoz képest több mint ezerszeres gyorsítás mellett érdemi pontosságromlás nélkül fut a becslés.

Nowadays, many trends have a significant impact on distribution networks, raising the need for real-time monitoring. This can be supported by a state estimation algorithm, which can be implemented using conventional iterative optimization. However, recent research has focused on using artificial intelligence-based methods in this area. In this work, a multi-layer perceptron model is used for state estimation and is evaluated on the CIGRÉ European Low Voltage Benchmark and the Low Voltage Test Network of Joerg Dickert. It is shown that the model runs more than 1000 times faster than the Newton-Raphson algorithm without a significant decrease in accuracy.

1. AZ ELOSZTÓHÁLÓZATI ÁLLAPOTBECSLÉS AKTUALITÁSA ÉS SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉSE

Az elmúlt évtizedben villamosenergia-rendszerek kapcsán nemzetközi porondon számos alkalommal került közép-pontba az elosztóhálózati állapotbecslés (distribution system state estimation, DSSE) [1]. A téma népszerűségének és aktualitásának oka, hogy napjaink villamos energetikájának fenntarthatósága érdekében érdemes kiemelt figyelmet szentelni az elosztóhálózatok vizsgálatának. Ugyanis a koncentrált energiatermelés szerepének csökkenésével ezek a hálózatrészek kerülnek központi szerepbe, mivel az elosztott energiatermelés térnyerésével összhangban nőhet a terheltségük. Így az állapotbecslés (state estimation, SE) egy kulcsfontosságú funkció az egyes hálózatok modellezéséhez és monitorozásához.

Primadianto és Lu [2] a legújabb DSSE-technikákról és algoritmustípusokról nyújt áttekintést. Majdoub és társai [3] szintén rendszerezik a state-of-the-art DSSE-technikákat, kiemelve egyes nem lineáris optimalizálási sajátosságokat. Dehghanpour és társai [4] SE-DSSE-összevetést készítenek a megfigyelhetőség, a topológia, a mérőelrendezés és a kiberbiztonság szempontjából. Ahmadnak és társainak [5] munkája a DSSE-t más smart grid funkciókkal együtt vizsgálja, míg Wang és társai az aktuális kihívásaival foglalkozik [6].

A pszeudomérések olyan generált adatok, amelyek a valós idejű mérések hiányát hivatottak pótolni. Ezek neurális hálók (artificial neural network, ANN) állíthatók elő az egyes DSSE-algoritmuskhoz [7][8]. Azonban az ANN-technológia nem csupán a pszeudoadatok generálásához használható, hanem állapotbecslésre is. ANN segítségével Menke és társai [9] például nem csupán a feszültségamplitúdók becslését célozzák meg a CIGRÉ közép-feszültségű referenciahálózatán [10], hanem a terhelések becslését is. Mestav és társai [11] Matpower teszthálózatokon [12] végeznek mélytanulási futtatásokat Bayes-optimalizálás támogatása mellett. További megoldás a fix ANN-architektúrákkal és paraméter-optimalizálással végzett DSSE (Mosbah és El-Hawary [13]), amit az IEEE 118 buszos [14] és az IEEE 14 buszos [15] hálózatokon tesztelnek. Zhang és társai [16] szintén az IEEE 118 buszos hálózatán [14] tesztelnek ANN-t és érnek el jobb eredményt a WLS-algoritmushoz. Ők már a lineáris rétegek hiperparamétereit optimalizálják saját, a prox-linear eszközük által adott eredmények megfigyelésével. Továbbá [17] alapján újszerű megoldásnak számít az elosztóhálózatok teljesen összekapcsolt neurális háló-modelljének hiperparaméter-optimalizálása a Fa-struktúrájú Parzen Becslő segítségével.

Ez a munka egy, az idézett szakirodalmakhoz hasonló, ANN-architektúra gyakorlati alkalmazhatóságára fókuszál, mégpedig a futási idő és a pontosság szempontjából. A következő, 2. fejezet bemutatja a fejlesztett ANN-architektúrát, valamint a hozzá szükséges adat-előkészítést, a 3. fejezet pedig a tesztelés alapját képező hálózatokra fókuszál, melyek eredményei a 4. fejezetben találhatók. Végül az 5. fejezet összefoglalja a munkát. Az itt ismertetett munka a Newton-Raphson-algoritmust használja a neurális háló tanító adatainak generálásához, azonban a tanítást követően a háló új, a tanítási adatoktól független adatokon végez becslést önállóan. Így az ilyen architektúrákkal a jelen cikkben ismertetett módszernél lassabb, iteratív algoritmusok az üzemeltetési fázisban teljes mértékben kiválthatók.

2. AZ ANN-ARCHITEKTÚRA ÉS ADATAI, PARAMÉTEREI

A neurális háló alapja a réteg. A háló bemeneti és kimeneti adatai között több réteg végzi a számítást. Ezeket az első és az utolsó kivételével rejtett rétegeknek nevezik. Az első réteg kimenete az (1) egyenlet alapján írható le:

$$out_1 = z \cdot W_1 + b_1 \quad (1)$$

ahol

z a bemeneti adatok vektora;

W_1 a réteg súlyozó mátrixa a bemeneti adatok számával megegyező oszlopszámmal és a következő rejtett réteg méretével megegyező sorszámmal;

b_1 a réteg additív tagja, a következő rejtett réteg méretével megegyező elemszámú vektor;

out_1 pedig a réteg kimenete, a következő rejtett réteg méretével megegyező elemszámú vektor.

Ezt követően a további rétegek az előző rétegek kimenetét nemlinearitással veszik át (2) egyenlet szerint:

$$out_{i+1} = ReLU(out_i) \cdot W_{i+1} + b_{i+1}, \quad (2)$$

ahol

out_i az i -edik réteg kimenete, a réteg méretével megegyező elemszámú vektor;

$ReLU$ az out_i és a vele megegyező méretű nullvektor elemenként számított maximumából előálló vektort számító függvény;

- W_{i+1} az $i+1$ -edik réteg súlyozó mátrixa, az i -edik réteg kimenetének méretével megegyező oszlopszámmal és a következő réteg, vagy az utolsó réteg esetén a kimenet méretével megegyező sorszámmal;
- b_{i+1} az $i+1$ -edik réteg additív tagja, a következő réteg, vagy az utolsó réteg esetén a kimenet méretével megegyező elemszámú vektor;
- out_{i+1} pedig a réteg kimenete, a következő réteg méretével megegyező elemszámú vektor, az utolsó réteg esetén pedig a kimenet.

A konvencionális Newton–Raphson- (NR) algoritmushoz hasonlóan a bemeneti adatok az ANN esetén is az egyes hatásos- és meddőteljesítmény-áramlások, a kimenetek pedig az egyes feszültségamplitúdók és terhelési szögek. Fontos azonban, hogy a tanítási konvergencia elősegítésének érdekében az adatokat a $[0; 1]$ tartományba kell skálázni a (3–8) egyenletek alapján [18]:

$$PQ_{ANN, train} = PQ_{NR, train} \cdot r_{PQ} - m_{PQ} \cdot r_{PQ} \cdot B_{PQ} \quad (3)$$

$$PQ_{ANN, test} = PQ_{NR, test} \cdot r_{PQ} - m_{PQ} \cdot r_{PQ} \cdot PQ \quad (4)$$

$$V_{ANN, train} = V_{NR, train} \cdot r_V - m_V \cdot r_V \cdot B_{V\theta} \quad (5)$$

$$V_{ANN, test} = V_{NR, test} \cdot r_V - m_V \cdot r_V \cdot B_{V\theta} \quad (6)$$

$$\theta_{ANN, train} = \theta_{NR, train} \cdot r_\theta - m_\theta \cdot r_\theta \cdot B_{V\theta} \quad (7)$$

$$\theta_{ANN, test} = \theta_{NR, test} \cdot r_\theta - m_\theta \cdot r_\theta \cdot B_{V\theta} \quad (8)$$

ahol

$PQ/V/\theta_{ANN, train/test}$ az ANN tanító/tesztelő teljesítmény-áramlás/feszültség-amplitúdó/terhelési szög adatainak vektora;

$PQ/V/\theta_{NR, train/test}$ az eredeti tanító/tesztelő teljesítmény-áramlás/feszültség-amplitúdó/terhelési szög adatok vektora;

továbbá:

r_{PQ} a $PQ_{ANN, train}$ maximális és minimális eleme közti különbség reciproka;

m_{PQ} a $PQ_{ANN, train}$ minimális eleme;

r_V a $V_{ANN, train}$ maximális és minimális eleme közti különbség reciproka;

m_V a $V_{ANN, train}$ minimális eleme;

r_θ a $\theta_{ANN, train}$ maximális és minimális eleme közti különbség reciproka;

m_θ a $\theta_{ANN, train}$ minimális eleme;

B_{PQ} a fogyasztószám kétszeresével megegyező dimenziójú tér standard bázisának bázisvektora által alkotott összeg;

$B_{V\theta}$ pedig a sínszámmal megegyező dimenziójú tér standard bázisának bázisvektora által alkotott összeg.

Ahogy az látható, a megawattban és megavarban mért hatásos- és meddőteljesítményáramlás-értékeket célszerű együtt skálázni, hiszen ezek összehasonlítható mennyiségek. Ezzel szemben a voltban és fokban mért feszültségamplitúdók és terhelési szögek jellegre különbözőek, így ezek külön skálázandók.

A neurális háló súlyainak optimalizálása a széles körben alkalmazott és a legtöbbször legjobban működő Adaptív Momentum algoritmuscsalád eredeti Adam algoritmusával történik [19].

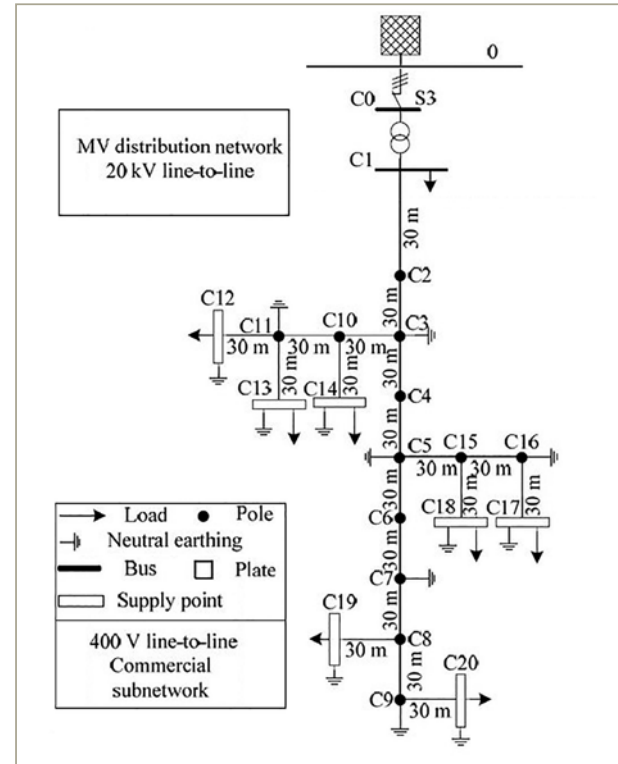
3. A TESZTELÉSRE SZOLGÁLÓ HÁLÓZATOK ÉS JELLEMZŐIK

Az 1. fejezetben említettekkel összhangban a neurális hálós megoldás tesztelésére reprezentatív nemzetközi referencia-hálózatok alkalmazandók. Ezek a hálózatok a CIGRÉ párizsi

központú mérnöki szervezet kisfeszültségű üzleti részhálózata [10] és Joerg Dickert széles körben ismert és hivatkozott kisfeszültségű teszhálózata [20]. A tesztelés célja, hogy bemutassa, hogy milyen pontossággal és milyen sebességgel képes egy iteratív hálózatszámítás-megoldást kiváltani egy neurális háló.

Az 1. ábrán megfigyelhető CIGRÉ European LV benchmark egy 20 kV-os középfeszültségű hálózati pontról táplált rendszer.

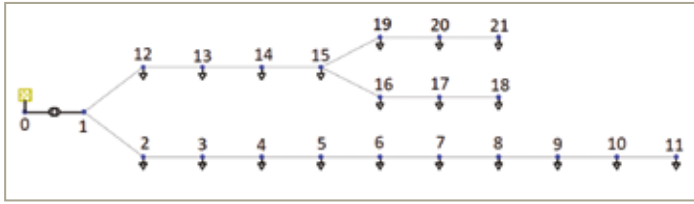
Erre a középfeszültségű pontra csatlakozik három kapcsoló közbeiktatásával három transzformátor, melyek így rendre R0-R1, I0-I1 és C0-C1 sínek között végeznek energiaátalakítást.



1. ábra A CIGRÉ European LV benchmark [10], melynek csak a C (commercial, üzleti) körzete használatos

tást 20 kV-ról 0,4 kV-ra. A transzformátorokra csatlakoztatott fogyasztórendszerek sínjei konzekvensen a saját körzetükbe tartozó betűről, valamint egy sorszámról kapnak nevet. Ezek közül ebben a munkában csak az üzleti fogyasztókat kiszolgáló gyűjtősínek és a hozzájuk tartozó hálózatrész vizsgált. A hálózati táppont háromfázisú, 20 kV-os vonali feszültséggel, 100 MVA rövidzárási teljesítménnyel és azonos nagyságú reaktív és rezisztív résszel rendelkezik. A vizsgált hálózatrész transzformátora 300 kVA-es. Az egyes buszokra csatlakozó fogyasztók névleges maximális hatásos- és meddőteljesítményei a 7,2–108 kW és a 3,784–52,307 kvar tartományokba esnek. A hálózat vezetőkei 30 méter hosszúak, a fajlagos impedancia rezisztív és reaktív komponensének értéke a 0,4917–2,0167 ohm/km és a 0,2847–0,3343 ohm/km intervallumokba esik. A hálózat egyes elemeinek részletesebb adatai fellelhetők az eredeti CIGRÉ [10] dokumentációban.

Joerg Dickert több hálózatalátpust is definiált. Ezek közül ebben a munkában a kábeles, többfogyasztós, kisebb, problémákkal rendelkező altípus képezi a tesztelés alapját, mivel így egy, a 3.1 fejezet szerinti hálózattól lényegesen eltérő hálózaton is tesztelhető az ANN-alapú algoritmus. A rendszer megfigyelhető a 2. ábrán.



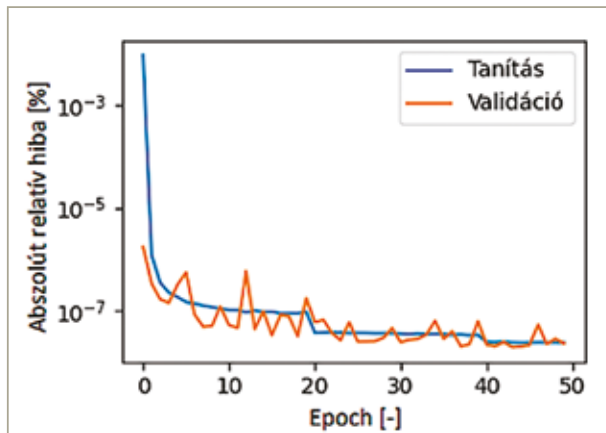
2. ábra Joerg Dickert hálózata

A hálózat a 100 MVA-es mögöttes hálózatról egy 20/0,4-es 400 kVA-es transzformátoron keresztül kap ellátást. Az egyes buszokra csatlakozó fogyasztók névleges maximális hatásos- és meddőteljesítményei 3,654 kW és 1,201 kvar értékűek. A kábeleik hossza 40 m, fajlagos rezisztív ellenállása 0,208 ohm/km, fajlagos reaktív ellenállása 0,08 ohm/km, fajlagos kapacitása 261 nF/km. A hálózat egyes elemeinek részletesebb adatai fellelhetők az eredeti dokumentációban [20].

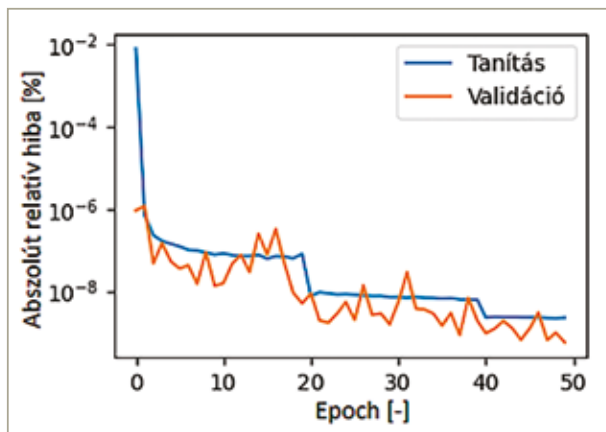
A mintahálózatok validációs teljesítményadatainak generálásához a 2021-es E.ON profilnaptárt [21] használjuk. A CIGRÉ esetén a fogyasztók az üzleti profilekat kapják meg, Joerg Dickert hálózatának esetén pedig mindenki lakossági profil kap. 2021 első 100 negyedórája használandó validálásra, míg a tanításhoz az adott fogyasztókra jellemző (0, maximális fogyasztás) tartományból 1000-szer ennyi véletlen adatot generáltunk egyenletes eloszlás szerint.

4. AZ ANN FUTTATÁSOK ÉS EREDMÉNYEIK

Mindkét hálózat esetében 5 rétegű neurális hálót alkalmazunk, és a négyzetes hiba a vizsgálat alapja. A CIGRÉ-t leképző neurális háló 16 bemenetű és 40 kimenetű, mivel 8 fogyaszt-



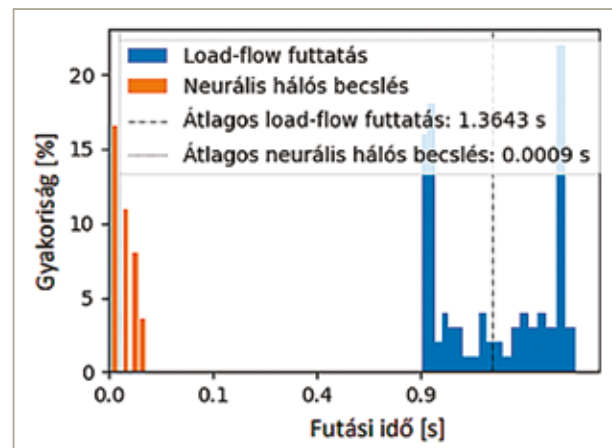
3. ábra A CIGRÉ benchmark tanulási folyamata



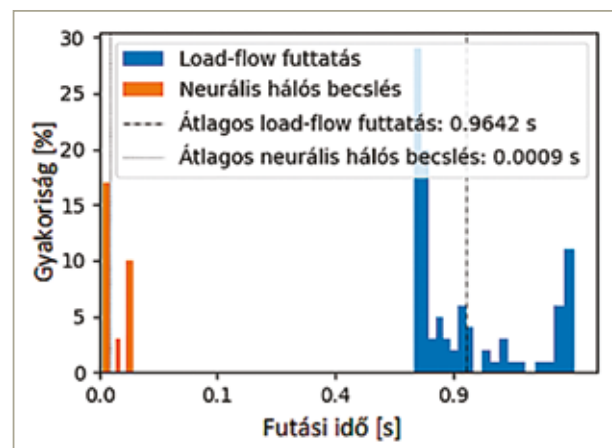
4. ábra Joerg Dickert hálózatának tanulási folyamata

tónak állnak rendelkezésre hatásos és meddő teljesítményei és 20 sín esetében kell meghatározni feszültségamplitúdókat és terhelési szögeket. Hasonló megfontolásokból 40 bemenetű és 42 kimenetű Joerg Dickert hálózatának neurális modellje. A megfelelő komplexitás érdekében a kimeneti méretekkel arányosan 50 a neurális háló rétegmérete, valamint átlagosnak mondható 0,001 a tanulási ráta, 20-as lépésközzel, 0,25-ös csökkenési aránnyal, 16-os batchméret és 50-es epochszám mellett. A tanítás folyamatát és eredményeit a 3–10. ábrák szemléltetik a két referenciahálózat kapcsán.

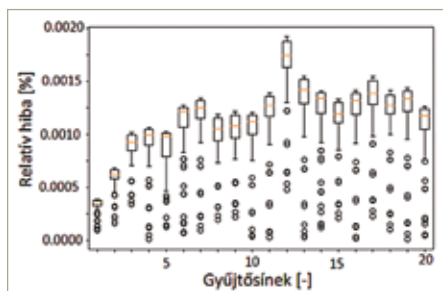
A 3. és 4. ábrákon az epochszám függvényében figyelhető meg a rendszer állapotváltozóinak átlagos abszolút relatív hibája. Látható, hogy sikerült elkerülni a túlillesztés (overfitting) problémáját [22], hiszen nemcsak összemérhető tartományban van a validációs eredmény a tanítási eredménnyel, hanem még jellemzően kisebb is nála. Tehát nem túl nagy a paraméterszám a probléma bonyolultságához képest, de nem is túl kicsi, hiszen kis hibát sikerült elérni. Ezenfelül még az is jól kivehető, ahogy a 20. és 40. epochnál – a 20 értékű lépésköz miatt – a tanulási ráta csökkenése következtében javul a becslés. A futási idő javulása leolvasható az 5. és 6. ábrákról. A CIGRÉ esetén 1516-szoros, míg Joerg Dickert hálózatánál 1071-szeres sebességjavulást sikerült elérni. Ez már önmagában is jelentős eredmény, hiszen, ha jelenleg egy elosztói engedélyes mondjuk egy bizonyos hálózatfejlesztési terv elkészítésére load-flow hálózatszámításokat alkalmaz, amelynek futási ideje 10 óra, akkor ennek a technikának az alkalmazásával innentől a futás akár 1 percesnél kisebb időtartamúra is rövidülhet.



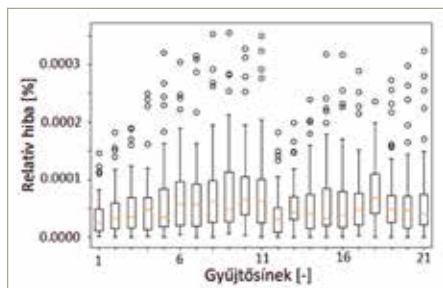
5. ábra A CIGRÉ benchmark sebességjavulása



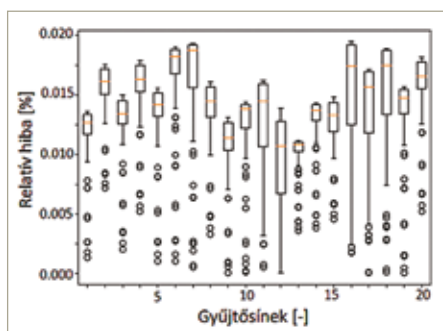
6. ábra Joerg Dickert hálózatának sebességjavulása a neurális hálós megoldás segítségével



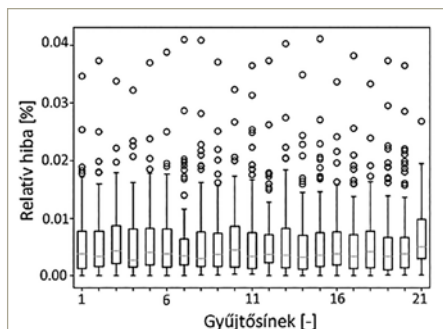
7. ábra A CIGRÉ benchmark feszültségamplitúdó becslésének hibái



8. ábra Joerg Dickert hálózatának feszültségamplitúdó-becslési hibái



9. ábra A CIGRÉ benchmark terhelési szög becslésének hibái



10. ábra Joerg Dickert hálózatának terhelésszög-becslési hibái

Ráadásul ez gyakorlatilag zérus hiba mellett történhet meg. Ezt bizonyítják a 7., 8., 9., 10. ábrák. A feszültségamplitúdó-becslések hibái a CIGRÉ esetén 0,002% alatt maradnak, míg Joerg Dickert hálózatánál nem éri el a 0,00036%-ot. Ez azt jelenti, hogy egy 400 V-os kifizűltességű hálózaton 0,01 V-nál is pontosabb a neurális háló becslés a load-flow számítással való összevetésben. A terhelési szögek esetén pedig a relatív hibák nem érik el a két teszhálózat esetén a 0,02, illetve a 0,045%-ot.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Összességében tehát egy, az iteratív algoritmusoknál lényegesen gyorsabb, és jobb mint 0,1%-os tanulási pontosságú hálózatszámító eszköz készíthető az ebben a munkában bemutatott módszerrel. Továbbá elmondható, hogy hazánkban úttörőként egy olyan intelligens hálózati funkció készült, amely adatvezérelt, mesterséges neurális háló alapú, automatikus hálózatszimulációk elvégzésére képes. A kutatás kiterjeszthető más feszültségszintekre, valamint sinergiát mutat a Monte-Carlo szimulációkat alkalmazó hálózatszámítási folyamatokkal kimagasló sebességnövekedése okán, illetve jó eszköz lehet elosztói engedélyesek számára is,

ha például egyes szimulációk indulófeszültségeinek megtalálása miatt kell sok hálózatszámítást futtatniuk.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Tácsi I, Sinkovics B, Vokony I, Hartmann B.: The Challenges of Low Voltage Distribution System State Estimation - An Application Oriented Review. *Energies*, vol. 14, no. 17, 2021.
- [2] Primadianto, A., Lu, C. N.: A Review on Distribution System State Estimation. *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 32, no. 5, pp. 3875–3883, 2017.
- [3] Majdoub, M., Boukheroua, J., Cheddadi, B., Belfqih, A., Sabri, O., Haidi, T.: A Review on Distribution System State Estimation Techniques. 6th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), pp. 1-6, 2018.
- [4] Dehghanpour, K., Wang, Z., Wang, J., Yuan, Y., Bu, F.: A Survey on State Estimation Techniques and Challenges in Smart Distribution Systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, no. 2, pp. 2312-2322, 2019.

- [5] Ahmad, F., Rasool, A., Ozsoy, E., Sekar, R., Sabanovic, A., Elitaş, M.: Distribution system state estimation - A step towards smart grid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 2659–2671, 2018.
- [6] Wang, G., Giannakis, G. B., Chen, J., Sun, J.: Distribution system state estimation: an overview of recent developments. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, vol. 20, no. 1, pp. 4–17, 2019.
- [7] Abdel-Majeed, A., Kattmann, C., Tenbohlen, S., Saur, R.: Usage of Artificial Neural Networks for pseudo measurement modeling in low voltage distribution systems. *IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition*, pp. 1–5, 2014.
- [8] Pašić, L., Pašić, A., Hartmann, B., Vokony, I.: The Application of Artificial Neural Networks to Pseudo Measurement Modeling in Distribution Networks. *IEEE Madrid PowerTech*, pp. 1-6, 2021.
- [9] Menke, J.-H., Bornhorst, N., Braun, M.: Distribution System Monitoring for Smart Power Grids with Distributed Generation Using Artificial Neural Networks. *arXiv:1801.04705v2*, 2018.
- [10] CIGRE Task Force C6.04.02. Benchmark Systems for Network Integration of Renewable and Distributed Energy Resources. CIGRE publication, 2013.
- [11] Mestav, K. R., Luengo-Rozas, J., Tong, L.: State Estimation for Unobservable Distribution Systems via Deep Neural Networks. *IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, 2018.
- [12] Zimmerman, R. D., Murillo-Sanchez, C. E., Thomas, R. J.: Mat-power: Steady-state operations planning and analysis tools for power systems research and education. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 1, pp. 12-19, 2011.
- [13] Mosbah H. El-Hawary, M. E.: Optimization of neural network parameters by Stochastic Fractal Search for dynamic state estimation under communication failure. *Electric Power Systems Research*, vol. 147, pp. 288–301, 2017.
- [14] Christie, R.: Power Systems Test Case - 118 Bus Power Flow Test Case. 1993. https://labs.ece.uw.edu/pstca/pf118/pg_tca118bus.htm
- [15] Christie, R.: Power Systems Test Case - 14 Bus Power Flow Test Case. 1990. http://labs.ece.uw.edu/pstca/pf14/pg_tca14bus.htm
- [16] Zhang, L., Wang, G., Giannakis, G. B.: Real-Time Power System State Estimation and Forecasting via Deep Unrolled Neural Networks. *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 67, no. 15, pp. 4069–4077, 2019.
- [17] Békési G.: Elosztóhálózati állapotbecslés támogatása adat alapú technológiák segítségével. BME Tudományos Diákköri Konferencia, Energetika szekció, 2022.
- [18] García, S., Ramírez-Gallego, S., Luengo, J., Benítez, J. M., Herrera, F.: Big data preprocessing: methods and prospects. *Big Data Analytics*, vol. 1, pp. 9-30, 2016.
- [19] Kingma, D. P., Ba, J.: Adam: A Method for Stochastic Optimization. *arXiv:1412.6980*, 2014.
- [20] Dickert, J., Domagk, M., Schegner, P.: Benchmark low voltage distribution networks based on cluster analysis of actual grid properties. *IEEE Grenoble Conference*, pp. 1-6, 2013.
- [21] [79] E.ON: Elosztói Szabályzat kizárólag a honlapon publikálandó mellékletei: <https://www.eon.hu/hu/rolunk/vallalatcsoport/kozlemenyek/szabalyzatok-jogszabalyok/aram/eon-eszakdunantuliaramhalozati/elosztói-szabalyzat-kizarolag-honlapon-publikalando-mellekletei.html>
- [22] X. Ying, An overview of overfitting and its solutions. *Journal of physics: Conference series*, vol. 1168, p. 022022, 2019.



Békési Gergő Bendegúz

PhD Hallgató
BME Automatizálási és Alkalmazott
Informatikai Tanszék
MEE-tag
bekesigergobendeguz@edu.bme.hu



Barancsuk Lilla

PhD Hallgató
BME Villamos Energetika Tanszék
barancsuk.lilla@vik.bme.hu



Dr. Hartmann Bálint

Habilitált tudományos főmunkatárs
BME Villamos Energetika Tanszék
MEE-tag
hartmann.balint@vik.bme.hu