

Elektrotechnika

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

■ ALAPÍTVÁ: 1908
■ FOUNDED: 1908



TRENDEK ÉS KIHÍVÁSOK A MESTERSÉGES INTELLIGENCIÁVAL TÁMOGATOTT VILLAMOS HAJTÁSRENDSZEREK KUTATÁSA ÉS FEJLESZTÉSE TERÜLETÉN

Egyenfeszültségű,
forgórendszerű leválasztó
kapcsolók napelemes
rendszerekhez



Transzformátor zaj-
és rezgésvizsgálata
szimulációval



DIY elektromos
versenymotor motorvezérlő
paraméterezés



Előírás változások
a villamos
biztonságtechnikában



Új korszak kezdődött
a magyarországi
járműgyártásban

114. ÉVFOLYAM

2021/9-10

www.mee.hu



#MEEnet

Magyar Elektrotechnikai Egyesület

SZAKMAI PÁRBESZÉDRE FEL
ELŐRE A DIGITÁLIS ÚTON

A #MEEnet platformot azért hoztuk létre, hogy lehetőséget adjunk az iparág szereplőinek az interaktív kommunikációra, legyen szó tudásmegosztásról, szakmai kapcsolatépitésről vagy tudományos érdekképviselésről.

120 ÉVE HAGYOMÁNY **AZ INNOVÁCIÓ**

A MAGYAR ELEKTROTECHNIKAI EGYESÜLET 120 ÉVES FENNÁLLÁSA ÓTA A MEGBÍZHATÓ VILLAMOSENERGIA-ELLÁTÁS ÉS -FELHASZNÁLÁS SZÍNVONALÁNAK EMELÉSE ÉS HATÉKONYSÁGÁNAK JAVÍTÁSA ÉRDEKÉBEN TEVÉKENYKEDIK, MINDEKÖZBEN PEDIG A FOLYAMATOS MEGÚJULÁS ÉS FEJLŐDÉS MELLETT KÖTELEZTE EL MAGÁT.

Legújabb törekvésünk, hogy lépést tartva az online világgal, könnyen hozzáférhető, a hatékony kommunikációt lehetővé tevő digitális felületet nyújtsunk mindazon szereplőknek, akik valamilyen formában részt vesznek a villamosenergia-ipar működésében, hagyományainak és értékeinek ápolásában, valamint gyakorlati fejlesztésében. A #MEEnet felületén megosztásra kerülnek a fizikailag vagy online módon megvalósuló rendezvényeink keretében elhangzott előadások és további anyagok. Ugyanitt az előadók és a résztvevők számára esetenként lehetőséget nyújtunk az egyes témák további megvitatására, szakmai eszmecserére is, hogy Egyesületünk ebben a formában is valódi motorja lehessen a hazai villamosenergia-iparnak. A Magyar Elektrotechnikai Egyesület évente megrendezésre kerülő három rendezvénye és a hozzá tartozó szakmai tudásanyag az idei évben részben vagy egészében az online térbe költözik. Terveink szerint az online megjelenéseket, digitális formát később is megőrizzük, ezzel több platformon is találkozási helyet biztosítva a szakmának. Eseményeinkről, bővebb információért keresse fel weboldalunkat: www.mee.hu/meenet



MAGYAR
ELEKTROTECHNIKAI
EGYESÜLET

1075 Budapest,
Madách Imre út 5. III. emelet
mee@mee.hu
www.mee.hu



#MEEnet
Magyar Elektrotechnikai Egyesület

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, Táczai István

Témafelelősök:
Energetika, atomenergia: Hárfás Zsolt
Energetikai informatika:
Karacsi 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. Marcsa Dániel
Tiszteltbeli 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 őrünk 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
HU ISSN: 0367-0708



IMEDIA

Hirdetőink / Advertisers

- Hyundai Technologies Center Hungary Kft.
- Schneider Electric Zrt.

TARTALOMJEGYZÉK 2021/9-10

Dr. Madarász György Attila: Előszó 4

INNOVÁCIÓ

Szilágyi Richárd, Zsuga Ádám, Dr. Dineva Adrienn: Trendek és kihívások a Mesterséges Intelligenciával támogatott villamos hajtásrendszerek kutatása és fejlesztése területén 5

Lieli György: Egyenfeszültségű, forgórendszerű leválasztó kapcsolók napelemes rendszerekhez 9

Dr. Marcsa Dániel: Transzformátor zaj- és rezgésvizsgálata szimulációval 14

Soós Bence, Tímári Attila: DIY elektromos versenymotor motorvezérlő paraméterezés 18

VILLAMOS GÉPEK

Dr. Koller László: Indukciós olvasztókemencék modellmérései 22

BIZTONSÁGTECHNIKA

Dr. Novothny Ferenc, Arató Csaba: Villamos biztonsági szakági műszaki előírás (SZME-VB 2021 – 2. rész) 28

Dr. Novothny Ferenc: Előírás változások a villamos biztonságtechnikában 30

Arató Csaba, Rajkai Ferenc, Dr. Novothny Ferenc: Emlékeztető az Érintésvédelmi Munkabizottság 2021. június 2-i ONLINE üléséről II. rész 33

ÚJ GENERÁCIÓ

Békési Gergő Bendegúz: Elosztóhálózati állapotbecslő algoritmus fejlesztése 38

EGYESÜLETI ÉLET

Lieli György:
VGKB szakosztály szakmai nap 42
Egynapos tanulmányút három helyre 44

NEKROLÓG 46

HÍREK

Óriás akkumulátorgyár épül a magyar határhoz közel az EIT InnoEnergy támogatásával 8

Világpremier: A DB és a Siemens bemutatják az első önvezető vonatot 13

Nagy bejelentést tett az OTP és az ITM: magyarul beszélő szuperszámítógépet épít Magyarország 27

Dánia harmadik legnagyobb távhőszolgáltatójának szállít transzformátort a Ganz 29

Új korszak kezdődött a magyarországi járműgyártásban 37

Autonóm töltőállomás 44

CONTENTS 9-10/2021

Dr. György Attila Madarász: Foreword

INNOVATION

Richárd Szilágyi, Ádám Zsuga, Dr. Adrienn Dineva: Trends and challenges in research and development of electric drive systems supported by Artificial Intelligence

György Lieli: DC rotary isolating switches for solar PV systems

Dr. Dániel Marcsa: Transformer noise and vibration analysis by simulation

Bence Soós, Attila Tímári: DIY electric racing engine motor control parameter settings

ELECTRICAL MACHINERY

Dr László Koller: Model measurements for induction melting furnaces

SECURITY TECHNOLOGY

Dr. Ferenc Novothny, Csaba Arató: Technical specification for electrical safety (SZME-VB 2021 - Part 2)

Dr. Ferenc Novothny: Prescriptive changes in electrical safety engineering

Csaba Arató, Ferenc Rajkai, Dr. Ferenc Novothny: Reminder of the ONLINE meeting of the Working Committee on Contact Protection, 2 June 2021, Part II

NEW GENERATION

Gergő Bendegúz Békési: Development of a distribution network health estimation algorithm

ASSOCIATION LIFE

György Lieli:
VGKB department professional day
One-day study trip to three places

NECROLOGY

NEWS

Giant battery factory to be built near the Hungarian border with EIT InnoEnergy support
World premiere: DB and Siemens present the first self-driving train

Big announcement by OTP and ITM: Hungary to build a Hungarian-speaking supercomputer

Ganz supplies transformer to Denmark's third largest district heating supplier

A new era in Hungarian vehicle manufacturing has begun

Autonomous charging station

Kedves Olvasó!

Mikor e bevezetőt elkezdtem fogalmazni, kinézve az ablakon, egy ismert Petőfi-versrészlet jutott az eszembe: „Még nyílnak a völgyben a kerti virágok, Még zöldel a nyárfa az ablak előtt, De látod amottan a téli világot? Már hó takarja el a bérci tetőt.” Az akkori időjárási állapot mellett az életünket manapság erősen befolyásoló pandémiahelyzetre is asszociáltam. És valóban, Kedves Olvasó, amikor az újság jelenlegi számát lapozza, e vonatkozásban is elérkezett a „téli világ” és közeledünk a „bérci tető”-höz.

Az elmúlt másfél év során az egyesületi életben a szakmai információcsere formái és lehetőségei is módosultak. Az írott sajtót talán csak a leendő szerzők egészségi állapotán és alkotói hangulatán keresztül befolyásolta a vírushelyzet. Voltak cikkek, amelyek megszületése kifejezetten a bezártságnak volt köszönhető, míg mások a szándékok szintjén maradtak.

A szakmai találkozások, előadások fizikai létrejöttének akadályai elősegítették az online kapcsolatok kialakulását. Kezdetben csak online konferenciákra, tanácskozásokra volt lehetőség. A korlátozások feloldása után ezek okafogyottá váltak, mégis az igény,



a fizikai mellett az online jelenlétre, fennmaradt. Érdekes módon a találkozásokhoz bekapcsolódó hallgatóság összlétszáma megnövekedett. Így érdemesnek tűnik a jövőben ezt a „hibrid” rendszert fenntartani.

Felmerül a kérdés, hogy a nyomtatott sajtóban várhatók-e hasonló változások. A lehetőség ma is megvan az online olvasásra a papír alapú tartalom mellett, vagy helyette. Úgy gondolom, az egyéni ízléstől, fogadókészségtől függenek az arányok. Jelenleg

a papír alapú tartalomra van nagyobb igény, bár ez költségesebb. A tagdíjban egyelőre ez a különbség nem jelentkezik.

Ezek után kívánok hasznos, szórakoztató időtöltést cikkeink olvasásával, akár az újságot lapozgatva, akár a képernyőn olvasgatva.

Dr. Madarász György Attila
a Villamos Gép, Készülék
és Berendezés Szakosztály
elnöke

A Magyar Elektrotechnikai Egyesület kiemelt támogatói:



Békési Gergő Bendegúz

Elosztóhálózati állapotbecslő algoritmus fejlesztése

Szakdolgozat összefoglaló

A koncentrált energiatermelés szerepe napjaink villamosenergia-rendszerében csökken, ezáltal az elosztóhálózatok leterheltsége nő. Így a valós idejű monitorozás igénye itt is megjelenik, amiben segíthet egy jó állapotbecslő algoritmus. Jelen összefoglaló munkámban a Gauss–Newton-módszeren alapuló, továbbfejlesztett állapotbecslő szoftverem mutatom be, illetve ismertetem alkalmazásainak eredményeit. A CIGRÉ, az IEEE és a JRC teszhálózatain végeztem futtatásokat és fontos eredményeket értem el több jellegzetes kisfeszültségű állapotbecslési kihívás terén is. A nagy R/X arány, a változó irányú energiaáramlás és kevés rendelkezésre álló valós idejű mérési adat sem okozott jelentős hibákat becsléseimben.

Nowadays, distributed generation is developing fast, thus the distribution network of the power system is getting more loaded. So, the demand, of real-time monitoring arises, that can be satisfied with a well-functioning state estimation algorithm. In this work summary my state estimation software is presented, that is based on my improved version of Gauss-Newton algorithm. I also show the results of estimations that were being run on the test networks of CIGRÉ, IEEE and JRC. In this paper several significant successes in various low-voltage state estimation challenges are introduced. I found solution for problems of high R/X ratio, varying power flow direction and few real-time measurements.

1. BEVEZETÉS

Témaválasztásom fő motivációja az volt, hogy az elosztóhálózatok napjaink villamosenergia-rendszerének egyik legkritikusabb pontját képezik. Ez többek között a villamos autók elterjedésének és a háztartási méretű kiserőművek egyre népszerűbbé válásának köszönhető.

Ezek a tendenciák több problémát is felvetnek. Jellemzően elosztóhálózatokon

- kevés mérési adat áll rendelkezésre,
 - sugaras topológia jellemző,
 - nagy az R/X arány,
 - illetve előfordulhat változó irányú energiaáramlás,
- szemben a lényegesen könnyebben megfigyelhető átviteli hálózatokra jellemző
- sok mérési adattal,
 - hurkolt topológiával,
 - kis R/X aránnyal
 - és jellemzően állandó irányú energiaáramlással. [1]

Így az elosztóhálózatok egyik nagy kihívása a *hatékony hálózati monitorozás*. A koncentrált energiatermelés szerepének csökkenésével ugyanis az elosztóhálózatok leterheltsége folyamatosan nő és ezáltal megjelenik a *valós idejű monitorozás* igénye. Ebben a monitorozásban segíthet egy jó állapotbecslő algoritmus. [2]

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

Az 1. fejezetben tárgyaltak okán az elmúlt 4-5 évben számos nemzetközi munkában került középpontba az állapotbecslés, azon belül is az elosztóhálózati állapotbecslés.

[3] például a legújabb állapotbecslési technikákról és algoritmus típusokról nyújt áttekintést. Ebben a cikkben, részletesen tárgyaltak az egyes esetlegesen használható algoritmusok legfontosabb tulajdonságai, köztük az ebben a munkában is implementált legkisebb négyzetes hiba elvén alapuló algoritmus jellemzői. Más tanulmányokban [4] több száz alkalmazást vizsgálnak kisfeszültségű állapotbecsléssel kapcsolatban, olyan lényeges dolgokra kitérve, mint a terhelés- és termelésprofil alkotás, elosztott energiatermelés hálózati menedzselése, vagy a hálózati aktív elemek kezelése. Mindezek mellett jellemző még, hogy zárlatok esetén [5] is használható az állapotbecslés mint funkció, vagy éppen leállások [6] esetében. Alkalmazható hálózati hibakeresésre is az állapotbecslés elosztóhálózatokon [7-11] vagy szolgáltatásminőségi mutatók becslései [12][13] is végezhetőek vele. Szintén érdekes még a pszeudomérések [14-17] témaköre. Ezek olyan generált adatok, amelyekkel a valós idejű mérések hiányát hivatottak pótolni. Mesterséges neurális hálózatokkal, tanuló algoritmusokkal olyan becslést próbálnak találni egy adott hálózathoz, ami alkalmassá teszi azt állapotbecslésre.

Az itt említett cikkek, munkák, előadások, valamint a későbbiekben hivatkozott szakirodalmak jelentős része az elosztóhálózati állapotbecslés gyakorlati alkalmazási lehetőségeivel és korlátaival foglalkozik más-más szempontokból. Az elosztóhálózatok 1. fejezetben ismertetett problémáinak megoldására egy versenyképes alternatíva lehet az állapotbecslés, mint intelligens hálózati funkció [18], amennyiben az megkapja a megfelelő informatikai támogatást. Ugyanis a kisfeszültségű hálózatok megfigyelhetőségének gyakorlati alapja, hogy olyan adatokat kell megismerni, amelyek valós időben nem mértek [19][20]. Ezek az információk neurális hálózatok segítségével szerezhetőek meg, ahogy azt korábban is említettem. Az elmélet gyakorlatba ültetésének legkritikusabb pontja a vizsgált hálózatrész megfigyelhetősége, a gazdasági optimum pedig vélhetőleg nem több mérőberendezés telepítésével, hanem intelligensebb hálózatmonitorozással érhető el.

3. ALGORITMUSFEJLESZTÉS ÉS MEGVALÓSÍTÁS MATEMATIKAI ÉS FIZIKAI ALAPJAI

Ebben a fejezetben az ismert Gauss–Newton-algoritmus megvalósítását és továbbfejlesztését tárgyalom. Illetve az ehhez szükséges fizikai összefüggéseket foglalom össze.

3.1 Elosztóhálózatokat jellemző fizikai mennyiségek

Az állapotbecslő algoritmus fizikai hátterének megértéséhez elengedhetetlen ismerni a villamosenergia-rendszerek számításainál jellemzően használt módszereket, összefüggéseket. Ennek megfelelően a következő egyenletek a teljesítményáramlás számításához szükséges gyűjtősin-vezetékgyűjtősin rendszert írják le.

$$P_{km} = U_k^2 g_{km} - U_k U_m g_{km} \cos(\theta_{km}) - U_k U_m b_{km} \sin(\theta_{km}) \quad (1)$$

$$Q_{km} = -U_k^2 b_{km} + U_k U_m b_{km} \cos(\theta_{km}) - U_k U_m g_{km} \sin(\theta_{km}) \quad (2)$$

ahol,

P_{km}	a hatásos teljesítményáramlás k sínről m sínre;
Q_{km}	a meddő teljesítményáramlás k sínről m sínre;
U_k	a k sín feszültsége;
U_m	az m sín feszültsége;
g_{km}	a k és m sínek közötti konduktancia;

b_{km} a k és m sínek közötti szuszceptancia;
továbbá

$$\Theta_{km} = \Theta_k - \Theta_m \quad (3)$$

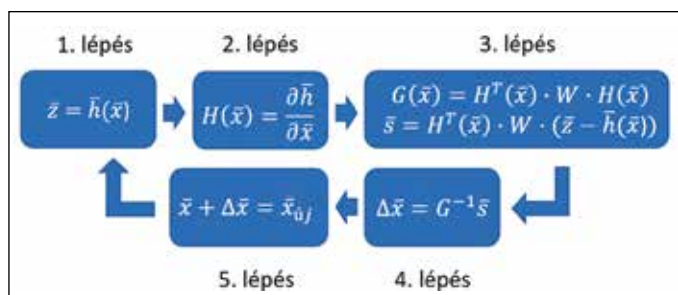
ahol,
 Θ_{km} a k és m sín feszültségszögeinek különbsége;
 Θ_k a k sín feszültségszöge a referenciához képest;
 Θ_m az m sín feszültségszöge a referenciához képest.

3.2 Az állapotbecslés matematikai alapjai

Szaktervezésben az egyes hálózatokat gráfszerűen képeztük le. Ennek megfelelően az egyes élek a vezetékeknek és kábeleknak, az egyes csúcsok pedig a síneknek feleltethetők meg. Itt az állapotbecslés lényegében egy matematikai modellel leírt rendszer valós idejű analízisét segítő folyamat. Ennek segítségével lehetséges egy bizonyos mennyiségű, általában mérések által meghatározott, rendelkezésre álló paraméterhalmaz alapján, bizonyos pontosságú becslést adni a rendszer állapotára. Ezek a mért mennyiségek általában az egyes áramló hatásos- és meddő teljesítmények. Az állapotváltozók pedig az egyes síneken megjelenő feszültségamplitúdók és terhelési szögek. Emiatt kell igazán nagy hangsúlyt fektetni az állapotbecslésre a villamos energetikában, ugyanis valós rendszerek esetében különböző műszaki megfontolások miatt nem ezeket szokás mérni. Valamilyen módon számítani, meghatározni, becsülni kell őket, ehhez használható állapotbecslő algoritmus.

3.3 Az állapotbecslés folyamata

A korábban említett mérhető adatok (z) és az állapotváltozók (x) között az 1. ábrán jelölt első lépésbe foglalt egyenlet teremt kapcsolatot.



1. ábra Gauss-Newton-folyamatábra

Ezt deriválva a 2. lépésben a H Jacobi érzékenységi mátrix adódik, amelynek segítségével már kiszámítható a G Gain-mátrix és az s segédvektor a 3. lépésben. Ehhez még szükséges a W súlyozó mátrix, amely diagonális és főátlójában az egyes varianciareciprokok szerepelnek, ezzel lehetővé téve a mérési eredmények pontosságára szerinti súlyozást. Ezt követően már a 4. lépésben számítható a korrigáló vektor, amivel az 5. lépésben meghatározható az új becslő állapot és újraindítható a ciklus. Megjegyzendő, hogy a 4. lépés kritikus, mivel a Gain-mátrix invertálása nagy numerikus instabilitást hordozhat magában. Éppen ezért ezt célszerű Cholesky-felbontással végrehajtani.

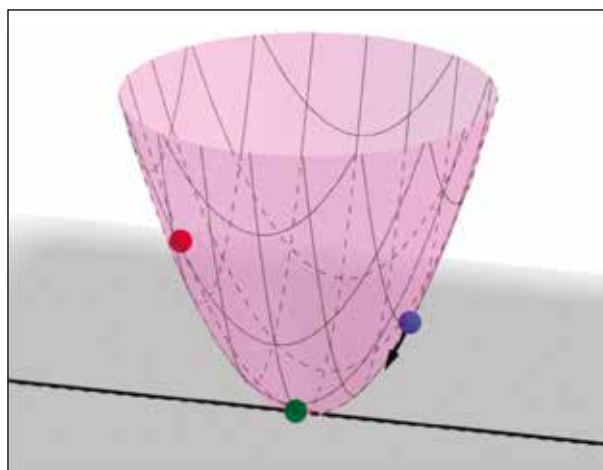
3.4 A megvalósított algoritmus struktúrája, megállási feltétele

Ebben a fejezetben ismertettem további fejlesztéseimet, szoftverem szerkezetét.

Moduláris felépítés. A teljes algoritmust Python 3 nyelven valósítottam meg egy hierarchikus struktúrát felépítve. A teljes folyamatot a főmodul irányítja, amely a modellezett há-

lózatból az egyes mért adatokat és topológia paramétereit az állapotbecslő algoritmus moduljának küldi. Ez elvégzi az állapotbecslést, továbbítja a becsült állapotokat az Excel kiértékelő moduljának, ami relatív hibákat tud számolni és ezt küldeni a kimenetre.

Stabilitás kezelése. Algoritmusfejlesztésem egyik legfontosabb pontja a megállási feltétel módosítása. Ugyanis, ha egy hálózaton magas az R/X arány, mint az elosztóhálózaton, akkor egyes deriváltak értékei igen nagyok lehetnek. Ennek következtében az 1. ábra 4. lépésének számításakor olyan korrigáló vektor kapható, ami „túllendíti” a becslést a helyes eredmények tartományán. Ennek következtében olyan helyre érkezik az állapotbecslés, ahol a négyzetes eltérések nagyobbak, mint az előző helyen. A Jacobi-mátrixot úgy érdemes elképzelni, mint érzékenységi mátrixot, azaz tulajdonképpen egy többdimenziós vektorfüggvénynek mutatja meg egy pontban azt a tulajdonságát, amit egyváltozós esetben meredekségnek hívunk. Ebből kifolyólag, a korrigáló vektor csökkentésével, lehetséges olyan becslést kapni, ami jobb, nem pedig rosszabb.



2. ábra 3D-s szemléltetés

A 2. ábra egy háromdimenziós szemléltetése a $2n$ állapotváltozó miatt $2n+1$ dimenziós problémának. A kék pontban meghatározott korrekciós vektor a levetített egyenes mentén vinne, ami helyes is, azonban túllendíti a minimumon és így nagyobb eltérés kapható a piros pontban. Éppen ezért a 0,5-szeresét veszem a korrekciós vektornak, és így már helyesebb eredményt kapok. Ha így is helytelenül kapnék, ismét elvégzem a szorzást, és így tovább. Felmerülhet a kérdés, hogy miért pont 0,5 a szorzó, amivel a korrekciós vektort ellátom. Tulajdonképpen ennek indoklása, egyszerű matematikai alapokon nyugszik. Igazából a becsléssel egy $2n$ dimenzióban húzott szakaszon mozgok, amelynek hosszúsága az egyszerűség kedvéért vehető 1 egységnek. Ekkor, ha a szakasz aktuális végéről a másikra ugrok, túllendülést érzékelek, tehát nem ugrok oda, hanem csak a szakasz k -ad nagyságú részéig mozdulok el, azaz $1/k$ lesz az ugrás hossza. A cél az, hogy minél jobb becslést adjak a rendszerre, azaz igyekszem minél kisebb intervallumot meghatározni, amiben benne van a helyes érték. Így, hogy k -ad részéig ugrottam a szakasznak, kaptam egy $1/k$ és egy $(k-1)/k$ hosszúságú szakaszt. Mivel ezek együttes hossza 1, így annak valószínűsége, hogy tartalmazza a keresett pontot, megegyezik a hosszukkal. Ebből kifolyólag a pontot tartalmazó szakasz hosszának várható értéke:

$$E(k) = |I_1| P(\min \in I_1) + |I_2| P(\min \in I_2) \quad (4)$$

ahol,

I_1 az egyik szakasz;

I_2 a másik szakasz;

azaz

$$E(k) = 1/k \cdot 1/k + k^{-1}/k \cdot k^{-1}/k \quad (5)$$

Aminek a tényleges minimuma $k = 2$ esetén adódik, tehát a szakaszfelezés a legmegfelelőbb módszer.

4. TESZTHÁLÓZATOK MODELLEZÉSE, TESZTEK FUTTATÁSA

4.1 Modellezett hálózatok

Hálózatmodellezést Neplan és Digsilent Powerfactory szoftverben is végeztem, hogy minél többféleképpen kipróbálhassam algoritmusomat. Egyszerű, változtatható paraméterű hálózatot készítettem Neplan segítségével és teljes értékű mintahálózatokat modelleztem Powerfactory-val. A mintahálózatok kiválasztásának fő szempontja az volt, hogy olyan hálózatokat válasszak, amelyek már több hazai és nemzetközi munkában is referenciaként szerepeltek. Így esett választásom a CIGRÉ párizsi központú mérnöki szervezet, alapvetően megújuló energiaforrásokra alapuló kisfeszültségű hálózatára, az IEEE legnagyobb villamosmérnököket egyesítő nemzetközi szervezet kisfeszültségű hálózatára és a JRC európai Közös Kutatóközpont városi és félig városi hálózataira. Minden esetben a feszültségreferenciákat a transzformátorok szekunder oldalaira állítottam be, innen indítottam becsléseimet.

4.2 Modellezés és tesztelés folyamata

A következő modellezés és tesztelés folyamat átfogóan jellemzi a 4.1 fejezetben felsorolt hálózatokkal kapcsolatban elvégzett munkámat.

Minden esetben a villamosenergia-rendszert egyértelműen definiáló információkból modellezem az adott hálózatot, futtatok rajta egy Load flow-t és ezzel az egyes teljesítményáramlások és állapotváltozók bejuttathatók az állapotbecslő szoftverembe. A szoftver megkapja a modellezett hálózat topológia adatait is, és ezzel képes állapotbecslést végezni. Ez a becslés továbbítható a kiértékelő Excel moduljába, ami megkapva a korábbi Load flow futtatás eredményeként az állapotváltozókat, ellenőrizni tudja algoritmusom pontosságát. Szakdolgozatomban ezek a folyamatok mind részletesen dokumentálva vannak, a visszaellenőrizhetőség céljából. A relatív hibákat a következők alapján számítottam a feszültségamplitúdók és a terhelési szögek esetén:

$$\Delta U\% = (U_{\text{becsült}} - U_{\text{load flow által validált}}) / U_{\text{load flow által validált}} \quad (6)$$

$$\Delta \delta\% = (\delta_{\text{becsült}} - \delta_{\text{load flow által validált}}) / \delta_{\text{load flow által validált}} \quad (7)$$

5. EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE

Az algoritmus pontosságának R/X aránytól való függését, a határozatlanság miatti pontatlanságát és a sínszám miatti bizonytalanságát első lépésként leellenőriztem az egyszerű Neplan modellen. Ezt követően pedig futtatásokat végeztem a nemzetközileg is elismert mintahálózatokon.

5.1 Neplan futtatások

Mivel az állapotbecslő algoritmus kifejezetten elosztóhálózatokra készült, így érdemes ehhez megfelelő R/X arányt választani. Ez az arány [1] alapján $r = 0,36 \text{ ohm/km}$, illetve $x = 0,387 \text{ ohm/km}$ figyelembevételével 0,93. Egy kezdetben elkészített 4, majd egy később hozzácsatolt 3 sínből álló fogyasztórendszert kötöttem sugarasan a tápponthez, majd ezen 3 sínés fogyasztórendszer másolatát kötöttem be újra és

újra $P/Q = 3$ értékek mellett. Ezt a növelést végül, a táppontot is számítva egészen 44 sínig tettem.

Eredmények. Szakdolgozatomban minden eredmény részletesen dokumentált, itt csupán főbb eredményeimre térnek ki.

Nagy sínszámok esetében is közel állandó értéken tudtam tartani a becslés pontosságát, 0,02% átlagos összesített relatív hibát értem el.

Sikerült referenciaértéket beállítani az egyes becsült feszültségamplitúdóknak és szögeknek, az átviteli hálózatra csatlakozó pont értékeinek figyelembevételével.

Csupán lineáris relatív hibanövekedés jelentkezett a rendszer határozatlanságának növelésével. A határozott rendszer 0,02% értékéről 3,5% értékre növekedett az átlagos összesített relatív hiba 25%-os határozatlanság esetén.

Vizsgáltam az R és X értékek változtatásának hatását is. A kifejlesztett, lépéshossz korrekcióval ellátott algoritmus esetében már nem az R/X arány jelenti a legkomolyabb problémát, hanem az, ha rossz kezdeti értékkel indítom a becslést. Ugyanis a nagyobb R értékek esetében kapott nagyobb hiba magyarázata az, hogy ekkor nagyobb a feszültségesés is a vezetékeken. Ezt igazolja az is, hogy amikor jelentősen nő az R/X arány, de az impedancia abszolút változása csekély, nem figyelhető meg érdemi változás a relatív hibában. Összességében tehát az impedancia a fő befolyásoló tényező.

5.2 Digsilent Powerfactory futtatások

A CIGRÉ, IEEE és JRC hálózatainak automatizált állapotbecslés futtatása és hibaszámítások gördülékeny feldolgozása egy-egy módon történt meg. Minden esetben külön vizsgáltam a feszültségamplitúdó és terhelési szög értékek relatív hibáit, valamint az IEEE és a JRC esetében a nagyobb hálózatméretek miatt foglalkoztam köztes referenciapont beállítással is.

A CIGRÉ European LV benchmark esetében lehetséges úgy vizsgálni a becslést, hogy megkülönböztetem a fogyasztói leágazásokat valóságos elhelyezkedésük szerint. Ez annyit jelent, hogy nem biztos, hogy ugyanolyan lesz a becslés pontossága akkor, amikor közvetlenül az ismert sín melletti hálózatrészeket becsülöm, és amikor egy távoli fogyasztóról szeretnék mondani valamit.

Összességében elmondható, hogy jól vizsgáztam itt is a program, külön-külön végeztem becsléseket a hálózat R, I és C körzeteire és rendre 9, 8 és 9 iterációs ciklus alatt a határozott rendszer 1,6%-os átlagos összesített relatív hibát produkált.

Az IEEE European Low Voltage Test Feeder állapotbecslés szempontjából négy különböző részre osztható fel.

- Egy olyan részre, ahol a kisebb fajlagos impedanciájú 4c_70 típusú vezetékek jellemzőek.
- Egy olyanra, ahol a nagyobb fajlagos impedanciájú 2c_16 típusú vezetékek jellemzőek.
- Valamint egy olyan többféle vezeték is tartalmazó részre, amihez nincs beállítva plusz referencia.
- És végül egy olyan többféle vezeték tartalmazó részre, amihez van beállítva plusz referencia.

A tápponttól távolodva külön-külön a relatív hiba minden vezetéken lineárisan növekszik. A 4c_70 típusú vezetékek lényegesen hosszabbak a 2c_16 típusúaknál, így bár a fajlagos impedanciájuk nem, de az impedanciájuk nagyobb lesz. Ennek megfelelően esetükben nagyobb a növekedés meredeksége, azaz egy, a mögöttes hálózathoz közelebbi sínről egy szomszédos távolabbi sínre mozdulva, jobban nő a relatív hiba átlagosan. Továbbá fontos még, hogy a vegyes vezetékezésű hálózatrészek relatív hiba növekmény mere-

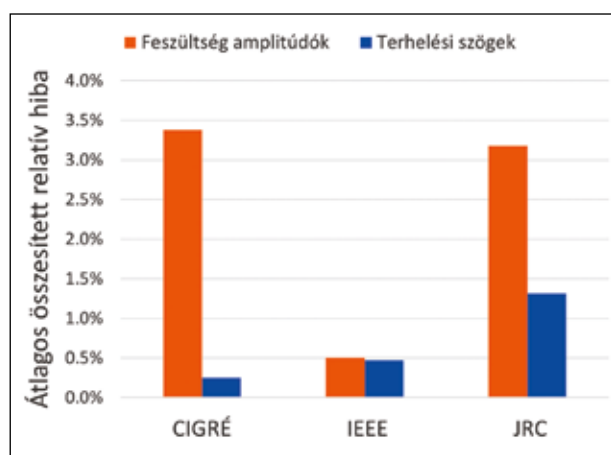
deksége megegyezik. Azonban, ahol gyakorlati megfontolásoknak megfelelően közbenső feszültségmérési pontok ismertek, ott a szoftver új referenciát tud beállítani és ismét kicsiny relatív hibáról indítani az állapotbecslést. Összességében elmondható, hogy itt is minden állapotbecslés, alacsonyban mondható, mindössze 0,49%-os átlagos összesített relatív hibával bírt.

JRC Urban low voltage network, JRC Semi-Urban low voltage network. Az európai Közös Kutatóközpont városi és félig városi kisfeszültségű hálózatát is górcső alá vettem. Ezek az elosztóhálózati funkcióval bíró rendszerek az előbbiekhöz hasonlóan több hazai és nemzetközi munkának is referenciaként szolgáltak már, így mindenképp releváns részét képezik a dolgozatnak. A korábbiakhoz hasonló eredményekre jutok ezeken a hálózatokon is. Elsőként a városi típusú hálózattal foglalkoztam, amely sinszámban leginkább a CIGRÉ hálózathoz esik közel. Itt a kicsiny méretnek köszönhetően kevesebb mint 0,1%-os relatív hibákat tapasztaltam. Ezt követően a félig városi hálózat esetében az IEEE-hez hasonló referenciabeállítást alkalmazhattam hasonló eredménnyel. Itt az átlagos összesített relatív hiba a nagyobb hálózatméretnek köszönhetően 2,25%-os volt.

Összesített eredmények. Az 1. fejezetben említett problémákra talált megoldásaimat az alábbiakban ismertetem.

Azt a problémát, hogy például egy háztartási méretű kiserőmű miatt megfordulhat az energiaáramlás a hálózaton, az algoritmusom tökéletesen kezeli. A gráfként felépített hálózaton a vezetékeknek, kábeleknél megfelelő kódban létrehozott élek képesek előjeles adatok feldolgozására, így bármilyen energiaáramlási irány esetén megfelelően működik az algoritmus.

A magas R/X arány sem okoz problémát a fejlesztett szoftvernek, a 2. ábra szerint bemutatott módszernek köszönhetően. A hagyományos Gauss-Newton-algoritmus gyakorlatba illeszthetősége érdekében kibővítettem azt. Amennyiben a magas R/X arányok miatti nagy értékű deriváltaknak és a véges számítási kapacitásnak köszönhetően nem találja a megfelelő minimumot az alap algoritmus, akkor a bővítmény valószínűségi alapon pontosít a becslésen.



3. ábra CIGRÉ, IEEE és JRC eredményei

Kevés mérési adat és sugaras topológia problémája összefügg, ugyanis, ha egy sugaras topológia esetén kevés mérési adat áll rendelkezésre, akkor az állapotbecslő számára kialakulnak olyan hálózatrészek, melyek kevésbé megfigyelhetők. Itt azt sikerült elérni, hogy csupán lineáris hibanövekmény jöjjön létre, a hálózat egyenletes mérési pont elhagyásainak

függvényében. Ez az eredmény minden bizonnyal javítható a feldolgozott szakirodalmak alapján [19][20] például neurális hálózatokkal. Tudniillik, ha jobb kiindulási értékkel indítjuk az állapotbecslést, pontosabb eredményekre juthatunk.

Irodalomjegyzék

- [1] **Villamosművek Tanszék:** Villamos energetika I. rész Budapest Műszaki Egyetem, Villamosmérnöki kar, Budapest, 2000
- [2] **Sinkovics B., Hartmann B.:** Elosztóhálózati állapotbecslés gyakorlati implementálásának kérdései, X. Mechwart András Ifjúsági Találkozó, 2020
- [3] **Primadianto, A., Lu, C. N.:** A Review on Distribution System State Estimation, IEEE Trans. Power Syst., vol. 32, no. 5, pp. 3875–3883, 2017
- [4] **Pilo, F., Lama, R., Valtora, G.:** Low voltage supervision system: technology, applications, use cases and deployment, 25th International Conference on Electricity Distribution, pp. 1–5, 2019
- [5] **Antoine, Q., Uytterhoeven, S., Pellichero, L.:** Applications of phasor measurement units in distribution grids - practical return of experience, 25th International Conference on Electricity Distribution, pp. 1–5, 2019
- [6] **Mingotti, A., Peretto, L.:** 1550 – Online Monitoring Leads To Improve the Reliability and Sustainability of Power, 25th International Conference on Electricity Distribution, 2020
- [7] **Jamali, S., Bahmanyar, A.:** A new fault location method for distribution networks using sparse measurements, Int. J. Electr. Power Energy Syst., pp. 459–468, 2016
- [8] **Jamali, S., Bahmanyar, A., Bompard, E.:** Fault location method for distribution networks using smart meters, Appl. Energy, vol. 256, 2017
- [9] **Liu, L., and He, J. H.:** Application of weighted least square algorithm in distribution network state estimation with finite measurement information, in 2014 International Conference on Power System Technology, Powercon, pp. 134–138, 2014
- [10] **Margossian, H., Sayed, M. A., Fawaz, W., Nakad, Z.:** Partial grid false data injection attacks against state estimation, Int. J. Electr. Power Energy Syst., pp. 623–629, 2019
- [11] **Pau, M., Ponci, F., Monti, A., Sulis, S., Muscas, C., Pegoraro, P. A.:** An Efficient and Accurate Solution for Distribution System State Estimation with Multiarea Architecture, IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 66, no. 5, pp. 910–919, 2017
- [12] **Melo, I. D., Pereira, J. L. R., Ribeiro, P. F., Variz, A. M., Oliveira, B. C.:** Harmonic state estimation for distribution systems based on optimization models considering daily load profiles, Electr. Power Syst. Res., vol. 170, pp. 303–316, May 2019
- [13] **Ye, G., Nijhuis, M., Cuk, V., Cobben, J. F. G.:** Incorporating network uncertainties in voltage dip state estimation, Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 113, pp. 888–896, Dec. 2019
- [14] **Cramer, M., Goergens, P., Potratz, F., Schnettler, A., Willing, S.:** Impact of three-phase pseudomeasurement generation from smart meter data on distribution grid state estimation, in 23rd International Conference on Electricity Distribution, pp. 1–5, 2015
- [15] **Teixeira, H., Pereira, J., Barbeiro, P. N. P., Messias, A. A., Lopes, D. A., Matos, P. G.:** Using LV realtime data for pseudo-measurements generation in MV distribution networks, in 23rd International Conference on Electricity Distribution, pp. 1–5, 2015
- [16] **Abdel-Majeed, A., Kattmann, C., Tenbohlen, S., Saur, R.:** Usage of Artificial Neural Networks for pseudo measurement modeling in low voltage distribution systems, in 2014 IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition, pp. 1–5, 2014
- [17] **Alves, J., Pereira, J.:** Pseudo-Measurements Generation Using Energy Values from Smart Metering Devices, in CIRED Workshop, pp. 1–4, 2016
- [18] **Zhang, L., Wang, G., Giannakis, G. B.:** Real-Time Power System State Estimation and Forecasting via Deep Unrolled Neural Networks, IEEE Trans. Signal Process., vol. 67, no. 15, pp. 4069–4077, 2019
- [19] **Menke, J. H., Bornhorst, N., Braun, M.:** Distribution system monitoring for smart power grids with distributed generation using artificial neural networks, Int. J. Electr. Power Energy Syst., pp. 472–480, 2019
- [20] **Mestav, K. R., Luengo-Rozas, J., Tong, L.:** State Estimation for Unobservable Distribution Systems via Deep Neural Networks, in IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), 2018



Békési Gergő Bendegúz

bekesigergobendeguz@gmail.com