X. Mechwart András Ifjúsági Találkozó

KONFERENCIAKÖTET

X. MAIT

#MEEnet
Magyar Elektrotechnikai Egyesület

2020

X. Mechwart András Ifjúsági Találkozó

Szerkesztette:
Mohos András
Táczi István
Tóth Zoltán

A kötetben megjelent cikkek szakmai bírálói:

Pintér László	műszaki projektvezető	E.ON Észak-dunántúli Áramhálózati Zrt.
Dr. Vokony István	egyetemi docens	Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Pintér Tamás	projektvezető	KKS-Energy Kft.
Dr. Iváncsy Tamás	egyetemi docens	Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Dr. Danyek Miklós	EISz elnök	MEE Energetikai Informatika Szakosztály
Péter Gábor Mihály	stratégiai szakreferens	E.ON Észak-dunántúli Áramhálózati Zrt.
Táczi István	doktorandusz	Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Prikler László	egyetemi tanársegéd	Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Dr. Ladányi József	egyetemi docens	Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Dr. Szedenik Norbert	t. egyetemi docens	Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

ISBN 978-963-9299-41-2

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

2020
© Minden jog fenntartva.

MAGYAR ELEKTROTECHNIKAI EGYESÜLET
M EE
1900

MECHWART ANDRÁS IFJÚSÁGI TÁRSASÁG

#MEEnet
Magyar Elektrotechnikai Egyesület

Tartalomjegyzék

Előszó 5

Kazsoki Attila Sándor, Kiss József, Sinkovics Bálint, dr. Talamon Attila, dr. Vokony István
Hazai napelemes kiserőmű repowering lehetőségeinek vizsgálata 6

Szaszkó Soma Antal
A villamos autók elterjedésére ható tényezők vizsgálata többszörös lineáris regresszió segítségével 14

Kazsoki Attila Sándor, dr. Hartmann Bálint
Prosumerek alkotta energiaközösség energiafelhasználásának és napelemes energiatermelés egyidejűség-növelésének lehetőségei 18

Pašić Lejla, dr. Vokony István
Future Stability Challenges: Stability Analysis in Microgrids 25

Bereczki Bence, dr. Hartmann Bálint
Aktív rendszermenedzsment a középfeszültségű elosztóhálózaton 29

Sinkovics Bálint, Táczi István, dr. Vokony István, dr. Hartmann Bálint
Elosztóhálózati állapotbecslés gyakorlati implementálásának kérdései 36

Molnár Martin
Smart villamos hálózatok kiberbiztonsága 41

Tóth Zoltán, dr. Kiss István, Kálecz György, dr. Németh Bálint
A fotovoltaikus, megújuló erőművek primer villámvédelmi kérdései 49

Székely László, dr. Kiss István
Páratartalom növelés hatása az elektrosztatikus porleválasztás folyamataira 54

Szedlák Roland, Mohos András
EMC demonstrációs eszköz fejlesztése hallgatói laboratóriumi méréshez 59

Varga Zoltán Donát
Aszinkron gépek mezőorientált modellezése 64

Palásti Bálint
Laboratóriumi függődaru tervezése 68

Sütő Bence, dr. Farkas Csaba, Arnold Ákos, dr. Divényi Dániel, dr. Raisz Dávid
Hálózattámogató invertermodell implementálása és tesztelése RTS rendszerben 72

Kazsoki Attila Sándor, dr. Hartmann Bálint
Középfeszültségű mintahálózatok létrehozása adatbányászati módszerek felhasználásával 78

Kertész Dávid, dr. Vokony István
Az elosztóhálózati feladatok koncepcionális adatmodellezése 84

Előszó

Tisztelt Olvasó!

A Magyar Elektrotechnikai Egyesület Mechwart András Ifjúsági Társasága minden évben konferenciát szervez fiatal kutatók, pályakezdő mérnökök és egyetemi hallgatók számára. Idén jubilált az esemény, a X. Ifjúsági Találkozó pedig sok szempontból kitűnik és felejthetetlen marad. Az egészségügyi kockázatokat mérlegelve a hazai és nemzetközi trendeknek megfelelően az eseményt online rendeztük meg, amely számos új szervezési kihívást és eltérő előadói felkészülést igényelt. A konferencia egyik fő értéke a személyes kapcsolatépítés, a hagyományosan a Vándorgyűlés helyszínén a 0. napon megrendezett esemény hiánya ellenére számos pozitív visszajelzést kaptunk mind az előadói körtől, mind pedig a hallgatóságtól. A szélesebb körű, online elérés eredményeként az eseményt több, mint 50 résztvevő követte átlagosan, amely rekordszámú a konferencia 10 éves történetében. A 19 szakmai előadás igen széles spektrumot ölelt át: doktoranduszok várható téziseitől kezdve diplomadíjas hallgatók aktuális munkáin keresztül az iparban nemzetközi kutatás-fejlesztési programokban tevékenykedő fiatal szakemberek tapasztalatain át az elektrotechnika, villamos energetika számos területének aktuális kérdéseibe nyerhettünk betekintést.

Napjaink egyik fő kihívása, a megújuló energiatermelés és az e-mobilitás rendszerintegrációja kapcsán műszaki és piacfejlesztési kihívásokat elemezhettünk. Új rendszerirányítási megoldásokat, tervezési és modellezési elveket ismerhettünk meg, amelynek segítségével az elektrotechnikai ipar közelebb kerülhet céljai eléréséhez. Évtizedeken át az ellátásbiztonság, villamosenergia-minőség és költséghatékonyság uralta gondolkodásunkat, míg mára már teljes mértékben a fenntarthatóság, mint negyedik fő cél felé tekintünk, amely az elkészült anyagokból is kirajzolódik. A konferenciához hagyományosan ISBN számos kiadvány is készült, amelyet idén már Digital Object Identifier (DOI) is kiegészít, segítve ezzel a publikálók munkáinak láthatóságát és terjeszthetőségét.

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

Táczi István
elnök
MEE MAIT

Kazsoki Attila Sándor, Kiss József,
Sinkovics Bálint, Dr. Talamon Attila,
Dr. Vokony István

Hazai napelemes kiserőmű repowering lehetőségeinek vizsgálata

Esettanulmány

Napjaink villamosenergia-termelésében egyre nagyobb szerepet kapnak a megújuló energiaforrások, Ezek közül hazai szinten jelentős szerepet kapnak a napelemes rendszerek. Ezen napelemes rendszerek esetén mind a napelemek, mind az inverterek oldalán degradáció figyelhető meg, melynek következtében a megtermelt villamos energia mennyisége csökken. Jelen cikkben a hazai éghajlati körülményekre kialakított lineáris degradációs modell kerül bemutatásra. Emellett bemutatásra kerül egy hazai 498 kVA csatlakozási teljesítményű kieserőmű esetén a napelem és inverter oldalon történő beruházások (csere) időpontjának optimális megválasztása, valamint a beruházások megtérülési ideje is meghatározásra kerül, a kiserőmű üzembehelyezésekor hatályos kötelező átvételi árfolyam alapján. Az eredmények alapján megállapítható, hogy míg inverterek esetén a csere életciklus alatt kifizetődő, addig napelemek esetén jelenleg nem kifizetődő beruházás.

Nowadays, in electricity generation, renewable energy sources tend to play a more and more significant role. From these entities photovoltaic (PV) systems have the most noticeable penetration in Hungary. During operation both on the module- and on the inverter side degradation appears, which has a decreasing impact on electricity production. In this paper temporal changes of system lifetime were modelled by a linear degradation model specified to Hungary. Moreover, a maintenance case study of a power plant with 498 kVA output power is presented. In context of return an optimal maintenance schedule is presented. Regarding the implied investment financial return was determined, based on the exchange rate of electricity. Finally, this paper concludes that in case of inverters the replacement is refunded during their life cycle but not profitable for photovoltaic modules.

Kulcsszavak: **napelemes kiserőmű, repowering.**

1. BEVEZETÉS

Az utóbbi években a nemzetközi trendeknek megfelelően hazánkban is egyre nagyobb mértékben jelentek meg a napelemes rendszerek, melyek teljesítményüket tekintve jellemzően a háztartási méretű kiserőmű, valamint a kiserőmű kategóriába esnek. A szabályozói környezet 2016 év végi változása következtében a befektetési céllal telepített <500 kVA csatlakozási teljesítményű kiserőművel száma jelentősen megugrott. A kiserőműveket üzemeltető beruházók célja, hogy a lehető legtöbb villamos energia értékesítése a kötelező átvételi időszak (vizsgált rendszer esetén 25 év) alatt.

Napelemes rendszerek esetén az idő múlásával, a többi villamosenergia-termelő berendezéshez hasonlóan, szintén egy egyre nagyobb mértékű degradáció és azzal arányos veszteség figyelhető meg. Ezen veszteség minimalizálására a működő rendszerek korszerűsítése és tovább fejlesztése jelent megoldást, melynek jellemzően két színtere van, a napelemek és az inverterek cseréje (illetve ezek lineáris kombinációja).

Napelemek esetén a termékkatalógus az életciklusra vetített fajlagos degradáció mértékét tartalmazza. Ez jellemzően a 25 éves életciklus alatt (80% teljesítménygarancia) évi 0,7% (az első évben 3%). Azonban az inverterek esetén ilyen jellegű katalógusadat nem áll rendelkezésre, pedig az inverterek a teljesítményelektronikai eszközeik nagy kapcsolásszáma és folyamatosan ingadozó hőterhelése miatt szintén veszítenek hatásfokukból.

Mivel a teljes rendszer degradációja katalógusadatokból nem számolható, így ennek meghatározása célszerűen modellezéssel történik. A napelem degradációja a megtermelt villamos energia mennyiségére negatív hatással van. Ezen csökkentő hatás az inverteren megjelenő hőterhelést szintén csökkenti, ezzel növelve annak várhat életciklusát. A két folyamat egymásra gyakorolt ellentétes hatása pontosan csak modellezéssel állapíthatók meg, mely történhet pl. Monte-Carlo szimuláció segítségével is. Jelen cikkben különböző éghajlati körülmények között mért termelési adatok felhasználásával készített szimuláció eredményeiből egy egyszerűsített, lineáris degradációs modell került kialakításra. A modell eredményeként a degradáció mértéke a teljes energiatermelő rendszerre rendelkezésre áll, melyből a napelemek katalógusadatainak felhasználásával az inverter degradációja is meghatározhatóvá válik.

2. REPOWERING

2.1. Erőművi repowering

Az energetikában eddig jellemzően a hőerőművek, szinkrongenerátorok és szélerőművek során használtak ilyen megoldásokat, annak érdekében, hogy idővel megjelenő degradációt, valamint ennek következtében kialakult financiális kiesés csökkenjenek. A repoweringnek sok jelentése van, amelyek a jobb eredmény elérése érdekében a tervezés cseréjére vagy fejlesztésére utal. Például a megújuló energia ágazatában sok szereplő választja a régi turbinák szétszerelését és cseréjét az újokkal a meglévő projekt helyszínein. [1]–[7]

A fotovillamos iparágban az újrahasznosítás ellensúlyozza a régebbi napelemmodulok teljesítményét. A

meglévő fotovillamos üzemek új technológiákat szereznek egy folyamatban, amelyet „utólagos felszerelésnek” is neveznek.

Bármely erőmű élettartama alatt az üzemeltetők gyakran felteszik maguknak a kérdést, hogy új létesítményt építenek-e vagy egyszerűen megújítják azt. A tapasztalatok alapján felfedeztük, hogy ez utóbbi gazdaságos módszer arra, hogy az üzem maximális termelést és hatékonyságot érjen el. Ez gyakran új technológiákkal érhető el, amelyek növelik a kapacitást. [1]–[7]

Ritkán találni 400 MW vagy annál kisebb erőművet hosszú sikeres üzemeltetés mellett. Egy ilyen erőmű akkor is fiatalnak tekinthető, ha csak négy évtizede üzemel. A probléma az, hogy ezek a létesítmények a 60-as években kifejlesztett technológián alapulnak, vagy akörül. A zöld menetrend figyelembevételével soha nem volt nagyobb szükség a fosszilis tüzelőanyaggal működő erőművek működésének javítására. Becslések szerint ez az ágazat az energiával kapcsolatos kibocsátások 39% -át termeli, és ez 2030-ra 42%-ra nő. Nem csoda, hogy a globális energiatermelési ágazat manapság óriási nyomás alatt van. Különféle okokat lehet azonosítani:

- Régi erőművek
- Csökkenő szénminőség
- Növekvő energiaárak és a hozzájuk kapcsolódó társadalmi elégedetlenség
- Generációs kapacitás kihívások
- Megújuló energiaforrások kialakulása és politikai nyomás azok termelésbe való bevonására
- Korlátozott finanszírozás
- Ezen nyomások miatt az energiatermelő ágazatban a kutatás és fejlesztés a szennyezőanyag-kibocsátás minimalizálására és a hatékonyság javítására összpontosít. Szerencsére sok régebbi erőmű még mindig rugalmas kialakítású, amely lehetővé teszi a különböző tüzelőanyagok használatát, különböző terhelési profilokat és így tovább.

Ezen felül továbbra is folyamatban van a szilárd tüzelőanyagok repowering-lehetőségeinek értékelése, például a kazán cseréje, módosítása a légköri fluidágyas égéshez (AFBCR) és a kazán cseréje és hozzáadása a gázosítási kombinált ciklushoz (GCCR) [1]–[7].

A helyszíni javítás érdekében a meglévő üzemet lebontják, és csak a kapcsolótelep és a hűtővíz rendszer marad. Ez különbözik egy új egység külön földterületre történő felépítésétől, így társadalmi-gazdasági szempontból megtakarítások érhetők el, lehetővé téve a folyamatokhoz és az átvitelhez való hozzáférést. Az ilyen típusú projekteknél a tőkeköltség-megtakarítások monumentálisak lehetnek. [1]–[7]

A tápvíz előmelegítő repoweringje (FWHR) magában foglalja az égés turbina kipufogógázának felhasználását a betápláló víz melegítésére egy meglévő Rankine-ciklusú erőműben. A gőzturbina-generátor nagyobb energiaszükséglettel jár a gőz számára, amely általában felmelegíti a betápláló vizet, mindaddig, amíg a tervezési határokat nem lépik túl. Használható gázturbina (CT) teljesítménynövelésre is. A meglévő táplálóvíz-melegítőket meg lehet hagyni, hogy szokásos módon működjenek, ha a CT nem működik.

Az égési levegő előmelegítő repoweringje (HWBR) egy vagy több CT beépítéséről szól a meglévő kazán égési levegő előmelegítőjében. Ideális technológia az újabb vagy nagyobb olaj / gázüzemű létesítményekhez. Néhány előnye a hatásfok 10-20%-kal történő növekedése, a jobb ciklikus képesség, a jobb üzemviteli jellemzők részterhelésen és az elérhető akár 25% hatásos teljesítmény-növekedés. A megnövekedett teljesítmény és a jobb hatékonyság tűnik e megoldás fő előnyeinek.

A kombinált ciklusú újratelepítés magában foglalja a meglévő kazán kicserélését egy turbinával és egy hővisszanyerő gőzgenerátorral (HRSG). Néhány előnye ennek a technológiának a 30–40%-os hőmennyiség csökkentése, az NO_X-kibocsátás csökkentése és a nettó termelőkapacitás 150–200%-os növekedése. Mivel nagy kapacitásnövelés érhető el, e módszer tökéletes olyan hagyományos egységekhez, amelyek 12,4 MPa (1800 psi) és 250 MW alatti gőznyomást termelnek. [1]–[7]

2.2. Repowering lehetőségek

A repowering a napelem modulok vagy inverterek részleges cseréjét, eltávolítását vagy újra-telepítését jelentheti. A rendszer egyéb részeinek teljes vagy részleges cseréjével módosulhatnak a napelemes rendszert tartó szerkezetek, vagy megváltoztathatják a berendezés elektromos konfigurációját is. További lehetséges megoldás a napelemek hatásfokát fokozó utólagos technológiák alkalmazása (például egy 2013 előtt gyártott, bevonat nélküli napelemes modul számára tervezett utólagos bevonat elhelyezése, napelemek „second hand” hasznosítása). Ide sorolható még az energiatároló berendezés integrálása, a rögzített dőlésszög megváltoztatása és a rögzített tartószerkezetek napkövető tartószerkezettel való helyettesítése. Az eredeti költségvetésen belüli ilyen jellegű javulást a beruházási költségek elmúlt 10 évben tapasztalt hirtelen csökkenése tette lehetővé. A fotovoltaikus alkatrészek gyártói számára a „repowering” új piaci profil kialakulását jelentheti.

2.3. Napelem repowering

Az előző szakaszban bemutatott, „hagyományos” technológia mellett egyre nagyobb figyelem hárul az elosztott energiatermelés egyes résztvevőire is, melyek közül Magyarországon a napelemes rendszerek egyeduralkodónak tekinthetők. Ezen rendszerek repowering-je a villamosenergia-termelés növelése, illetve az idő múlása során egyre nagyobb mértékű degradációból következő veszteség minimalizálása céljából, a működő rendszerek korszerűsítésével és tovább fejlesztésével történhet. Ennek jellemzően két színtere van. Az egyik a napelemek cseréje, a másik az inverterek cseréje (illetve ezek lineáris kombinációja).

A napelemek cseréjét három tényező idézheti elő:

- napelemek degradációja
- piacon elérhető termékek hatásfok-növekedése
- nem megfelelő panelek cseréje

Egyrészt a napelemek degradációja, amely éves szinten körülbelül 0,7% lehet a gyártói vállalások szerint (jellemzően 25 éves 80%-os teljesítménygarancia) természetesen évről évre csökkenti a termelést.

Másrészt a piacra dobott napelemek hatásfoka évről-évről lassan nő, így a növekedő hatásfok önmagában indokolhatja a repoweringet, hiszen a hatásfok-növekedésből következő többlet villamosenergia-értékesítés ellensúlyozhatja a pótlólagos beruházási költséget.

Harmadrészt pedig a napelemek cseréjére azért is szükség lehet, mert az erőmű tervezési fázisában olyan típusú panelek kerültek beépítésre, melyek nem az adott éghajlati körülményekhez lettek kialakítva, optimalizálva, illetve a beruházás bekerülési költségének minimalizálását figyelembe véve nem jó minőségű napelemek került beépítésre. Ez a nem megfelelő minőség a sorosan kapcsolt cellák minőségének nagy szórásából, valamint az összeszerelés minőségéből adódnak. Az idő múlásával tönkre menő modulok cseréje sok esetben nem is lehetséges, ha az azokat gyártó cég nem gyártja már azt a típusú napelemet.

Az, hogy a napelemek mikor érik el életciklusuk végét, folyamatos monitoring és mérések segítségével viszonylag könnyen észrevehetők, a hibák viszonylag gyorsan kijavíthatók és így a villamosenergia-termelés szünetelése okozta pénzügyi veszteség is minimalizálható. Ez a folyamat a hőerőművek esetén bevett gyakorlat, mely pozitív hatással van a megbízhatóságra és a jövedelmezőségre. A napelemek repoweringje csak ritkán része a pénzügyi tervezésnek, az esetek nagy részében csak halasztott, szükségszerűen bekövetkező (pl. inverter, napelem modul meghibásodás) karbantartásokkal számolnak.

A folyamat gazdaságilag sokkal vonzóbbá válik, ha a tervező és a beruházó hosszú távon gondolkodik és egy erős infrastruktúrát épít, mellyel a projekt kezdeti élettartama akár megduplázható, vagy még jobban megnövelhető, ezáltal további termelési és pénzügyi előnyöket is elérve. A hosszabb élettartamra való törekvés a beruházási költségeket növeli, de nem egyenes arányosan, ugyanis engedélyek, a terület, a kerítések, az utak, alállomások stb. már megszerezték, megépítették és fizették. Ezzel biztosítható az alacsonyabb fajlagos élettartam-költségeket, és a repowering terv révén a technológiai változások is szem előtt tarthatók (modul tartószerkezethez illesztés, a feszültségének és az áramának változását, az invertrekek feszültségének és méretének változását, valamint számos egyéb megfontolást, amelyeket figyelembe kell venni és módosítani kell.) Előnye, hogy a létesítmény megbízhatóságának, rendelkezésre állásának, karbantarthatóságának, tesztelhetőségének és biztonságának kérdései beépülnek a projektbe. Ennek eredményeként robusztusabb konstrukció hozható létre kisebb többletköltséggel, de eközben jóval nagyobb költségvetési stabilitást is jelent a befektetők számára.

2.4. Inverter repowering

A napelemek degradációjának sebessége a megtermelt villamos energia mellett jelentős hatással van az inverter élettartamára is, különös tekintettel a melegebb éghajlatú elhelyezkedés esetén. Az invereterek várható élettartama jellemzően 15 évre tehető (napelemekétől – 25 év – jelentősen elmarad).

Fotovillamos rendszerek esetén inverterek tekintetében figyelhető meg a legnagyobb hibaarány. Az inverter meghibásodásából származó költségek a teljes rendszer karbantartási költségének akár 50%-át is kitehetik, ezért az inverterek élettartamának előrejelzése jelentős szerepet játszik a működési költségek és a megbízhatóság tekintetében. Az inverterek élettartamát jelentősen befolyásolja a tápegységek hőterhelése, melyre nagy hatással vannak az üzemi körülmények (inverterek eltérő vezérlési stratégiája, valamint a telepítési helyre jellemző besugárzási és hőterhelési profilok).

A [8]-[11] tanulmányok rámutattak arra, hogy a napelemes rendszer telepítésének helye, az erősen változó besugárzási és hőmérsékleti körülmények miatt jelentős hatással van az inverterek megbízhatóságára és élettartamára. Az Egyenlítő közelében (pl. Dél-Amerikában és Afrikában) a besugárzás igen magas, szezonalitásban viszonylag kis különbséget mutat. Ezzel szemben északi országokban (pl. Skandinávia) a télen a napsütötte órák száma viszonylag alacsony, a besugárzási görbe az év folyamán nagy változatosságot mutat [12]. Hasonló tendencia figyelhető meg a környezeti hőmérséklet-profilok esetén is. A napsugárzás és a környezeti hőmérséklet közvetlen hatással van a fotovoltaikus energia előállítására, hozzájárulva az inverter teljesítmény elektronikáján (pl. IGBT tranzisztorok) megnövekedő hőterheléshez, valamint a napelemes rendszer hőterhelésére.

Az inverter élettartama a tervezési fázisban általában az éves terhelési profilból kerül meghatározásra, a rendelkezésre álló adatok felhasználásával, lineáris éves ciklust feltételezve. Gyakorlati alkalmazást tekintve ezen feltételezés nem teljesen helytálló, ugyanis nem számol a napelemek degradációjával mely az inverterek hőterhelését csökkenti, és az életciklus növekedését eredményezi.

A napelemek degradációjában szintén jelentős szerepet játszik az elhelyezkedés klimatikus viszonyai, hőmérséklet, és az időjárás. A napelem degradációjának sebessége a száraz, meleg levegőn nagyobb (kb. 1%/év), mint nedvesebb, hűvös levegő esetén (0,15%). Ebben az esetben egy állandó éves életciklus feltételezése, amely csak a hőterhelést veszi figyelembe az első évben, az inverter élettartamának jelentős alulbecsléséhez vezet. A valós körülményeket jobban közelítő működési körülmények ábrázolása és az inverter élettartam-becslési pontosságának javítása érdekében figyelembe kell venni az egyes területekre jellemző napelem degradáció sebességet [12][13].

A [17] az inverterek élettartamát szimulációval vizsgálja, figyelembe véve a napelem degradációs sebességét, ezzel a hosszú távú inverter-hőterhelés realisztikusabb értelmezését kínálja. Egy dániai és egy arizonai telepítési helyet vizsgálnak meg, amelyek eltérő termelési profillal (célfüggvény) és degradációs jellemzőkkel rendelkeznek. A kialakított modellen Monte Carlo szimuláción alapuló megbízhatósági értékelést végeznek, ahol a paraméterek változásait az élettartam értékelési folyamatában figyelembe veszi, ezzel az inverter életciklusa statisztikai megközelítéssel meghatározható. Az inverterben megfigyelhető hőmérsékletváltozás az erőmű terhelésének következménye. Ebben a tekintetben a napelemek romlásának hatása megfigyelhető a napelemes inverterek hőmérséklet-ingadozásain. Az arizonai magasabb átlagos besugárzási szint miatt az itt üzemelő inverterek átlagos maximális hőmérséklete általában magasabb, mint Dániában. Az arizonai inverterek átlagos csatlakozási teljesítménye azonban öt éves működés után a napelemek degradációjának következtében jelentősen csökken. Hasonlóképpen az inverter hőmérsékletének ciklusamplitúdója szintén jelentősen csökken öt év üzemeltetés után (3 °C/év).

2.5. Fókuszcsoport

Az IHS Markit „PV Installation Tracker" szerint Európában több mint 40 GW teljesítményű, a 100 kVA csatlakozási teljesítményt meghaladó, több mint öt éves napelemes rendszer van, melyeken a következő években javításra, felújításra, cserére szorulnak. Ezeknek a régebbi létesítményeken végzett beavatkozásoknak a legnagyobb hajtóereje a belső megtérülési ráta csökkentése, valamint az alkatrész hibákkal és a berendezés hatásfokának romlásával kapcsolatos további problémák. A repowering lehetőségek nemcsak a leszerelt alkatrészekhez kapcsolódnak, hanem a napelemgyártó cégekhez is, amelyek az elmúlt években kiléptek a piacról. Az eszköz tulajdonosok sok esetben komoly kihívásokkal néznek szembe, mivel a garancia igényeket nem tudják érvényesíteni és a műszaki támogatás sem adott. Ez különösen érvényes az inverterek piacára. A régebbi létesítmények túlnyomó többsége Németországban, Olaszországban, Spanyolországban és Franciaországban koncentrálódik. Az országonkénti koncentráció ellenére a fotovoltaikus vagyon tulajdonjoga továbbra is szétaprózódott, ami csökkenti a nagy portfóliók felújításának esélyét.

2.6. Repowering technológiák

Az kiserőművek felújításának relevanciája az alkatrészek költségeinek elmúlt években tapasztalható drasztikus csökkenése, az új technológiák megjelenése, a hatásfok növekedése jelenti. Az IHS Markit kimutatása szerint a napelem modulok ára 2010 óta több mint 80% -kal esett vissza. Ez az árcsökkenés még nagyobb, ha figyelembe vesszük 2007 és 2009 közti európai átlagárakat. Ebben az időben Dél-Európában nagy telepítéseket hajtottak végre, és az árak meghaladták a 3 $/W-ot. Emellett az átlagos modul hatékonyság is több mint 25% -kal növekedett a 2006. évi szinthez képest. Az inverteres technológia változásai javították a közüzemi telepítések teljesítményét és hatásfokát, míg az árak a 2010-es árhoz képest 75% -kal csökkentek.

2.7. Repowering megfontolások

Elméletileg a meglévő üzemek termelésének magas beviteli tarifákkal történő növelése, az alkatrészeknek a mai árakon és teljesítményen történő cseréjével egyértelmű lehetőségnek tűnik. Ugyanakkor minden napelemes rendszer különbözik, mindegyiken meg kell vizsgálni a konkrét szempontokat, mielőtt felújításról bármilyen döntés születne. Az egyes üzemek sajátos műszaki jellemzői és teljesítménye mellett a beavatkozás előtt döntő fontosságú az aktuális szabályozási rendszer elemzése. Számos technikai akadály nehezítheti a költséghatékony beavatkozást.

Az európai piacok saját szabályokkal rendelkeznek a rendszer beavatkozásaival kapcsolatban. Olaszországban a legrugalmasabb piac, mivel lehetővé teszi a rendszerek fejlesztését, és még a meglévő rendszerek újbóli felújítására vonatkozó irányelveket is tartalmaz. Spanyolország és Németország ezzel szemben szigorúan korlátozzák a megengedett technikai változtatásokat. Mivel a felújítás és a megújítás viszonylag új fogalmak, ezekben az országokban a szabályozási kereteket még mindig újradefiniálják és megváltoztatják. A helyi szabályozás ellenőrzése után a beavatkozások során alkalmazható műszaki megfontolások meghatározzák, hogy a beavatkozás előnyös-e.

A fő kihívások között szerepel az új alkatrészek vásárlásához szükséges kiegészítő beruházás, valamint az új alkatrészek beépítéséhez szükséges PV berendezés tervezése és átszervezése. A villamos berendezések megváltoztatása és korszerűsítése számos problémát idézhet elő a meglévő tanúsításokkal és a napelemes berendezésekre vonatkozó garanciákkal kapcsolatban. A garancián kívüli bármilyen beavatkozás kiegészítő beruházás, ezért az eszköz tulajdonosoknak gondoskodniuk kell arról, hogy azok előnyeit az üzemük élettartama alatt ki lehessen használni.

2.8. Napelemes kiserőmű degradációja

A napelemes rendszer esetén a degradáció pontos meghatározása, annak komplexitása miatt csak részletekbe menő modellezéssel tehető meg. A különböző éghajlati viszonyok és gyártási technológiák különböző meghibásodási módokat eredményezhetnek [14]. Ezen túlmenően, a különböző meghibásodási módok kereszthatásokkal is rendelkezhetnek a többi hiba mechanizmusra, ezzel bonyolultabb rendszert eredményezve. Ennek következtében alkalmatlanná válik hosszú időhorizontú szimuláció (például éves ciklusú) futtatására.

A napelemek degradációs sebessége valós terepi mérések alapján határozható meg. Ebben az esetben általában egy lineáris degradációs jellemzőt feltételezhető,

ahol a degradációs profil a valós mezőben mért adatokból nyerhetők [15][16]. A legtöbb esetben ez alkalmazható, ugyanis a napelemek működés közbeni jellemzése nem bevett módszer. A napelemek kimeneti teljesítményének mérése teljes élettartam alatt általában egyszer történik (STC), korlátozott számú adatpontot eredményezve [14]. A standard test condition (STC) mérési eljárás iparági szinten standardizált mérési procedúrát foglal magában, ezzel biztosítva az új napelempanel kezdő paramétereinek gyártófüggetlen meghatározhatóságát. Az üzemeltetés alatt legrosszabb esetben csak egy mérést hajtanak végre több éves működés után, a teljesítménykülönbség meghatározása céljából, mely során a napelem panelek kimeneti teljesítménye kerül összehasonlításra STC értékeivel. Ebben az esetben a degradációs modellek közül (lineáris, exponenciális, valós mért adatokon alapuló) érdemes a lineáris, egyszerűsített modellt alkalmazni. Ez azonban nagymértékben veszélyezteti a kalkulációs modell pontosságát. Ennek ellenére egy egyszerű, praktikus megoldást kínál a hosszú időhorizontú szimulációk esetén anélkül, hogy nagyméretű mérési adatokra vagy a panelek részletes modelljére szükség lenne. Emellett széles körben alkalmazzák a tervezési szakaszban a hosszú távú villamosenergia-hozam becslésére [17].

3. ADATOK ÉS MÓDSZEREK

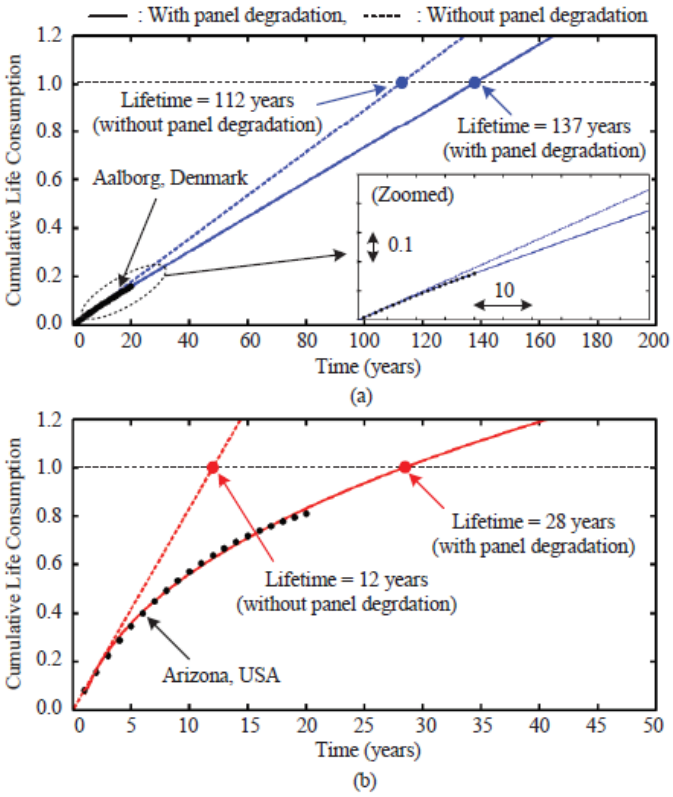
Jelen munka során a Magyarországra jellemző degradáció és berendezés élettartam a Dániában 0,15%/év és Arizonában 1%/év degradációs ráta felhasználásával, lineáris degradációs modell alapján becsülhető [17].

A vizsgált napelemes rendszer esetén a gyártó a napelemekre az 1. évben 3%, a 2. és a 25. év közti időszakra 0,7% degradációs rátát határoz meg (más napeleme esetén jelentősen eltérhet). Ezen érték a napelemes rendszer további elemeinek degradációját is figyelembe véve kis mértékben.

A kiserőmű életciklusát 20 éves működésre számolandó, így az élettartam során megfigyelhető a napelem degradáció hatása is. Ezt figyelembe véve az arizónai napelemes rendszer invertereinek élettartama a kezdeti értékhez viszonyítva 82%-kal csökken (kumulatív életciklus 0-ról 0,82-re nő), ezzel szemben a dániai napelemes rendszer esetén ez a csökkenés csak 20%. Ennek oka a napelemek alacsonyabb degradációs sebessége. Ezen értékek felhasználásával a kumulatív életciklus szintén meghatározható. Az inverter akkor éri el elméleti életciklusának végét, amikor a kumulatív mutató 1 értékű lesz (Dánia 137 év, Arizóna 28 év) [16]. Ennek szemléltetése az 1. Ábrán látható.

Ezen értékek felhasználásával, lineáris degradációs modell alkalmazásával a teljes energiatermelő-rendszer degradációja szintén maghatározásra került. Ez jelen esetben 1,07%-ra adódik, amely napelem degradáció és inverter degradáció részekre bontható.

A vizsgált napelemes rendszer zöldmezős



1. ábra Kumulált életciklus: (a) Hűvös éghajlati körülmények között (vizsgálatban Dánia); (b) melegebb éghajlati körülmények között (vizsgálatban USA, Arizona). Az ábrán feltüntet vonaltípusok: folytonos vonal - napelempanel degradációt figyelembe véve, pontozott vonal - napelem degradáció figyelmen kívül hagyva. [16]

területen megvalósított beruházás, mely 498 kVA csatlakozási teljesítményű fotovoltaikus kiserőmű. A beépített napelem teljesítmény ezt kb. 18,4%-kal meghaladja (589,68 kWp). A napelemes rendszerbe 2184 darab 60 cellás, 270 Wp teljesítményű, Talesun TP660P típusú polikristályos napelem került beépítésre. A napelemek által megtermelt villamos energiát 1 darab Huawei SUN 2000-33KTL-A típusú és 13 darab SUN2000 36KTL típusú inverter alakítja váltakozó áramú energiává. A napelemes rendszer a 22 kV feszültségű, középfeszültségű elosztóhálózatra földkábel segítségével csatlakozik. A napelemek déli tájolású fix tartószerkezeten kerültek elhelyezésre, melynek dőlésszöge 35°. Ezen elrendezés a magyarországi viszonyok esetén ideálisnak tekinthető, ugyanis az éves megtermelt villamos energia mennyisége ilyen telepítési feltételekkel maximalizálható.

A gyártó 25 évre vonatkozóan 0,7%-os lineáris teljesítménygaranciát határoz meg, mely számítások során megfeleltethető a degradációnak is. A napelemekre vonatkozó garancia 10 év, lineáris kimeneti teljesítményre 25 év. A napelem modulban 3 darab by-pass dióda talál-

ható. Eltérő gazdasági megfontolások lehetnek, amelyeket a beruházó mérlegel a napelemes rendszer felújítása során. Ilyen gazdasági tényező például a megnövekedett villamosenergia-termelésből származó bevétel értéke az utólagos felszerelés költségéhez viszonyítva.

Az előzőekben bemutatott adatok alapján megállapítható, hogy a teljes energiatermelő rendszer degradációjának megoszlása (1,07%/év) a napelemek esetén 0,7%/év, és az inverterek esetén 0,37%/év.

4. EREDMÉNYEK ÉS ÖSSZEGZÉS

A napelemes rendszer által megtermelt villamos energia az első évben 597.600 kWh (1.200 kWh/kW). A napelemes rendszer degradációja évente 1,07%, amely a megtermelt villamos energia mennyiségén is meglátszik (lineáris degradációt feltételezve). A degradáció okozta bevételcsökkenés számítása során a villamos energia átvételi ára a 2019 évi KÁT árak alapján nettó 32,56 HUF/kWh-ra adódik.

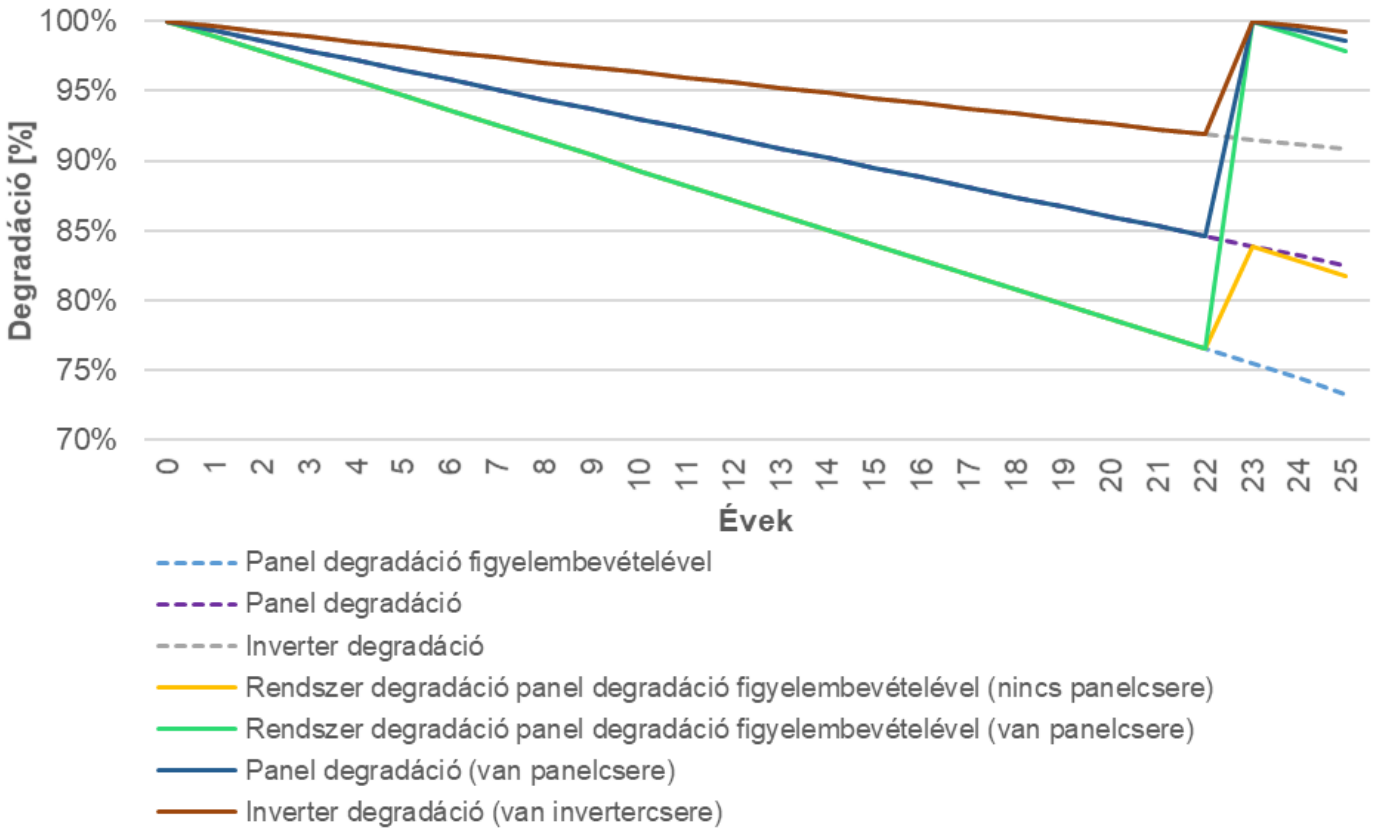
A napelemek bekerülési költsége, a degradációjuk okozta, villamos energia eladásából származó (25. év végén) bevétel kiesést mintegy nettó 74.000.000 forinttal meghaladja. Ezen értékek figyelembevételével megállapítható, hogy a vizsgált napelemes rendszer repoweringje során a napelemeket jelenlegi konstrukció szerint nem érdemes cserélni. Ha a napelemek ára az előző években tapasztalt tendencia alapján csökken, akkor érdemes elgondolkodni rajta, azon a ponton, amikor az inverterek cseréje is megtörténik.

Az inverterek esetén azonban más a helyzet. Ott megfigyelhető, hogy a degradáció okozta kiesés a 24. évben már meghaladja a beruházás költségét. Amennyiben az inverterek erre az időre még nem hibásodnak meg, ténylegesen nem érik el életciklusuk végét, úgy a 23. év végén mind műszakilag, mind gazdaságilag érdemes kicserélni őket.

Az inverterek degradációjának alakulása az inverterek cseréje előtt és után, az eredeti 25 éves életciklusra vetítve, az 2. Ábrán látható.

A repowering során valószínűleg szükség lesz a napelemek és az inverterek újra konfigurációjára, így ezen folyamatok költségit sem szabad szem elől téveszteni. A 23. évben végrehajtott repowering következtében a villamos energia eladásából származó veszteség 25. év végéig nettó 14.344.243,16 HUF-tal csökken, melyből a napelemre eső rész 9.406.803,67 HUF, az inverterre eső rész 4.937.439,49 HUF.

A vizsgált napelemes rendszer esetén megállapítható, hogy az előzetesen becsült életciklus alatt - mely 25 évre lett meghatározva - a napelemek cseréjével megvalósított repowering nem kifizetődő, míg az invertereket a 23. évben érdemes lecserélni. A degradáció és



2. ábra Degradáció alakulása napelemek, illetve inverterek cseréje esetén.

az esetleges hibák okozta veszteségek rendszeres karbantartásokkal, illetve a rendszer folyamatos monitorozásával csökkenthetők. A napelem első oldalára felvitt antirefelexiós réteg nagymértékű kopása a gyártói garancia után valószínűleg felgyorsul, ezzel a degradációs folyamatot gyorsítva. Ennek fékezésére alkalmas lehet az utólag felvihető antrireflexiós réteg, azonban ennek hatásossága kérdéses. Amennyiben a későbbi repowering során a napelem modulok cserére szorulnak, szükséges lesz rendszer villamos sémájának (és kapcsolásának) újrakonfigurálása, mivel a jelenleg beépített 270 Wp teljesítményű napelemek várhatóan már nem lesznek a gyártó portfóliójában.

Ha csak a napelemek degradációját vennénk figyelembe, a vizsgált kiserőmű paneljeinek degradációja 15 év elteltével 28.000.000 HUF veszteséget okoz (ha a KÁT átvételi ár növekedése megegyezik az inflációval). Feltételezzük, hogy a napelemek ára a beszerzéskori ár felére esik, a pótlólagos napelemcsere költsége 60.000.000 HUF lesz. Továbbá feltételezzük, hogy a napelemek hatásfoka a következő 15 évben minimum 20%-kal nő, melynek következtében a 60.000.000 HUF-os beruházással egyrészt évente 40%-kal több villamos energia állítható elő (repowering időpontjában a degradált kiserőművel megtermelt energiához képest képest) és értékesíthető (éves szinten ez 7.800.000 HUF plusz bevétel), mely 10 év alatt kb. 70.000.000 HUF-ra tehető, emellett „megnyerhetjük" a régi panelek 28.000.000 HUF-nyi degradációját. Ilyen körülmények között a beruházási döntésnél megfigyelhető, hogy a csere kifizetődő lehet az aktuális kamatszinttől és tőkeköltségtől függően. A kérdés, hogy az új panelek élettéből hátralévő további 15 év hasznos élettartam milyen beruházással növelhető tovább (ha tartószerkezet még jó állapotban van, akkor invertercserével és transzformátorfelújítással a kiserőmű élettartama akár 15 évvel is kitolható).

Látható tehát, hogy a jelenleg ismert árak és hatásfokok mellett a napelemes repowering nem ésszerű döntés, azonban ezen 10 éves időtávban a technológiai fejlődés és az árak további esése könnyen változtathat.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Napjaink villamosenergia-termelésében egyre nagyobb szerepet kapnak a megújuló energiaforrások. Hazánkban ezek közül jelentős szerepet kapnak a napelemes rendszerek. Ezen energiatermelő rendszerszerek egyre nagyobb népszerűségnek örvendenek mind a lakossági, mind az ipari szektor szereplői körében, ugyanis a kialakítható rendszer széles teljesítmény tartományban mozog.

Jelen cikkben a hazai éghajlati körülményekre kialakított lineáris degradációs modell kerül bemutatásra. Emellett bemutatásra kerül egy hazai 498 kVA csatlakozási teljesítményű kieserőmű esetén a napelem és inverter oldalon történő beruházások (csere) időpontjának optimális megválasztása, valamint a beruházások megtérülési ideje is meghatározásra kerül, a kiserőmű üzembehelyezésekor hatályos kötelező átvételi árfolyam alapján.

A 3. fejezetben bemutatott modell, valamint a 4. fejezetben bemutatott eredmények alapján megállapítható, hogy az előzetesen tervezett élettartam alatt (25 év – a napelemek névleges hatásfokának 80%-a eddig garantált) a napelemek cseréje nem kifizetődő, míg az addig nem cserélt inverterek cseréje több feltétel együttes figyelembevételével a 23. évben kifizetődő lehet. Az inverter életciklusa a rendszeresített karbantartásokkal növelhető, és valószínűsíthetően egy komplett invertercserére a tervezett repowering mellett is szükséges lehet 8-12 év elteltével.

A következő években egyre nagyobb mértékű napelemes penetráció növekedését az árak rohamos csökkenése, a telepítést ösztönző intézkedések meghozatala, valamint a szabályozói környezet folyamatos változása szintén elősegítheti.

6. IRODALOMJEGYZÉK

[1] **L. Delfanti et al.**, "*Solar plants , environmental degradation and local socioeconomic contexts : A case study in a Mediterranean country,"* Environ. Impact Assess. Rev., vol. 61, pp. 88–93, 2016.

[2] **V. João and P. Domingues**, *"Interrelationships between renewable energy and agricultural economics :,"* Energy Strateg. Rev., vol. 22, no. July, pp. 396–409, 2018.

[3] **D. Deb and N. L. Brahmbhatt,** *"Review of yield increase of solar panels through soiling prevention , and a proposed water-free automated cleaning solution,"* Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 82, no. September 2017, pp. 3306–3313, 2018.

[4] **S. Bukhary, S. Ahmad, and J. Batista**, *"Analyzing land and water requirements for solar deployment in the Southwestern United States,"* Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 82, no. September 2017, pp. 3288–3305, 2018.

[5] **M. Goyal**, *"Repowering — Next big thing in India,"* Renew. Sustain. Energy Rev. vol. 14, pp. 1400–1409, 2010.

[6] **A. Colmenar-santos, S. Campíñez-romero, C. Pérez-molina, and F. Mur-pérez,** *"Repowering : An actual possibility for wind energy in Spain in a new scenario without feed-in-tariffs,"* Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 41, pp. 319–337, 2015.

[7] **M. H. Shubbak**, *"Advances in solar photovoltaics : Technology review and patent trends,"* Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 115, no. July, p. 109383, 2019.

[8] **S. E. D. Leon-Aldaco, H. Calleja, F. Chan, and H. R. Jimenez-Grajales**, *"Effect of the mission profile on the reliability of a power converter aimed at photovoltaic applications - a case study,"* IEEE Trans. Power Electron., vol. 28, no. 6, pp. 2998–3007, Jun. 2013.

[9] **N. C. Sintamarean et al.**, *"Reliability oriented design tool for the new generation of grid connected PV inverters,"* IEEE Trans. Power Electron., vol. 30, no. 5, pp. 2635–2644, May 2015.

[10] **A. Anurag, Y. Yang, and F. Blaabjerg,** *"Reliability analysis of singlephase PV inverters with reactive power injection at night considering mission profiles,"* in Proc. of ECCE, pp. 2132–2139, Sep. 2015.

[11] **C. Felgemacher, et al.,** "*Evaluation of cycling stress imposed on IGBT modules in PV central inverters in sunbelt regions,"* in Proc. of CIPS, pp. 1–6 CIPS, Mar. 2016.

[12] **Y. Yang, H. Wang, F. Blaabjerg, and K. Ma**, *"Mission profile based multi-disciplinary analysis of power modules in single-phase transformerless photovoltaic inverters,"* in Proc. of EPE, pp. 1–10, Sep. 2013.

[13] **S.B. Kjaer, J.K. Pedersen, and F. Blaabjerg**, *"A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules,"* IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 41, no. 5, pp. 1292–1306, Sep. 2005

[14] **M. Köntges et al.**, *"Mean degradation rates in pv systems for various kinds of pv module failures,"* in Proc. of EU PVSEC, pp. 1435–1443, Jun. 2016.

[15] **D. C. Jordan, et al.,** *"PV degradation curves: non-linearities and failure modes,"* Progress in Photovoltaics: Res. Appl., pp. 1–9, 2016.

[16] **E. L. Meyer and E. E. van Dyk**, *"Assessing the reliability and degradation of photovoltaic module performance parameters,"* IEEE Trans. Rel., vol. 53, no. 1, pp. 83–92, Mar. 2004.

[17] **A. Sangwongwanich, Y. Yang, D. Sera, and F. Blaabjerg**: *„Lifetime Evaluation of Grid-Connected PV Inverters Considering Panel Degradation Rates and Installation Sites"*, IEEE Trans. on Power Electronics, vol. pp, no. 99, 2017

[18] **Talesun:** *"TP660P - 265 / 270 / 275W Polycrystalline, Solar Module 60-Cell Series"*, 2018 https://www.talesunenergy.com/fileadmin/user_upload/pdf/data_sheets/TP660P.pdf

Szaszkó Soma Antal

A villamos autók elterjedésére ható tényezők vizsgálata többszörös lineáris regresszió segítségével

A lineáris regresszió segítségével vizsgálható, hogy bizonyos tényezők, hogyan hatnak az elektromos autók elterjedésére. Több ország adatainak felhasználásával készült el ez a vizsgálat. Ezeket a befolyásoló tényezőket – függő változókat – tetszőlegesen választottam. Mint kiderül vannak olyanok, amelyek nagy mértékben, illetve vannak olyanok, amelyek kevésbé befolyásolják az elektromos autók elterjedését.

How certain factors affect the spread of the use of electric cars can be examined by linear regression. The present investigation has been conducted based on data from several countries. The influential factors - the dependent variables - of this analysis have been chosen by random selection. The results show that some of them have a major effect on the spread of electric cars while some of them have a slighter influence.

Kulcsszavak: **Elektromos autó, környezetbarát, megújuló energia, piaci részesedés**

1. BEVEZETÉS

Vajon mi az oka, hogy egyre népszerűbbek az elektromos autók? Mik azok a tényezők, amelyek ezt segítik, illetve hátráltatják? Ennek a vizsgálatára célszerű többszörös lineáris regressziót alkalmazni. Az írásom első részében nagy vonalakban bemutatom azt, hogy tulajdonképpen mi is az a többszörös lineáris regresszió. Ezt követően bemutatom, hogy az összegyűjtött adatokon hogyan lehet lineáris regressziót végezni. Majd a regresszió analízis eredményét mutatom be. Ez alapján megállapítható, hogy mely tényezők hogyan befolyásolják az elektromos autók piaci részesedését. Hiszen a piaci részesedés az a változó, amivel lehet mérni az elektromos autók elterjedését. A regresszió kiértékelésén kívül a regresszió megbízhatóságának, pontosságának a megállapítása is a munkám része.

2. TÖBBVÁLTOZÓS LINÁRIS REGRESSZIÓ

2.1. Az elmélet összefoglalása

Többváltozós lineáris regresszió esetén van egy függő, vagy magyarázott változónk, amit független, vagy magyarázó változók segítségével magyarázunk.
A többváltozós lineáris regresszió általános egyenlete:

$$Y = \alpha + \beta_i X_i + e_i, \ ahol\ i = 1, 2, 3 \ldots \quad (1)$$

ahol

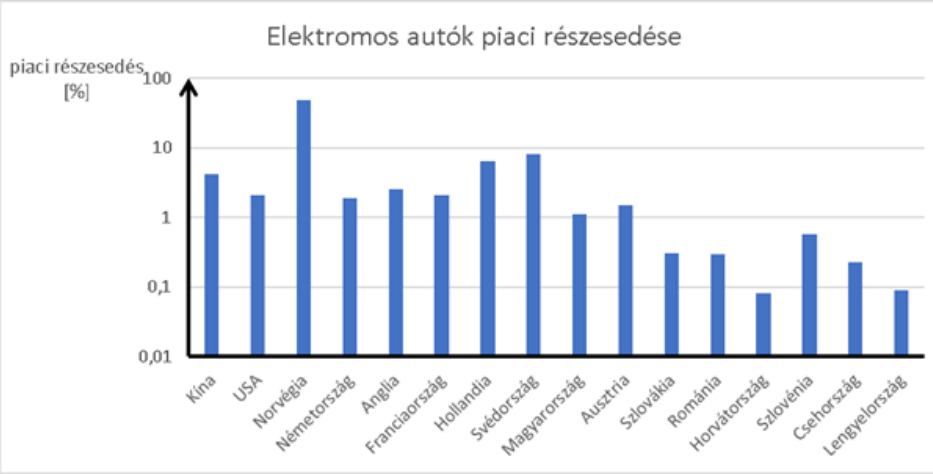
Y, a függő, vagy magyarázott változó;
X_i, a független, vagy magyarázó változók;
$\boldsymbol{\alpha}$ és $\boldsymbol{\beta_i}$ a regresszió paraméterei;
e_i, a maradék, vagy hibatag.

A korreláció erősségétől függ a hibatag nagysága. Annál kisebb, minél erősebb a korreláció. $\boldsymbol{\alpha}$ és $\boldsymbol{\beta}_i$ tapasztalati adatokból becsülhető analitikus regresszió esetén. [1.] [2.] $\boldsymbol{\alpha}$ és $\boldsymbol{\beta}_i$ normálegyenletek segítségével határozható meg.

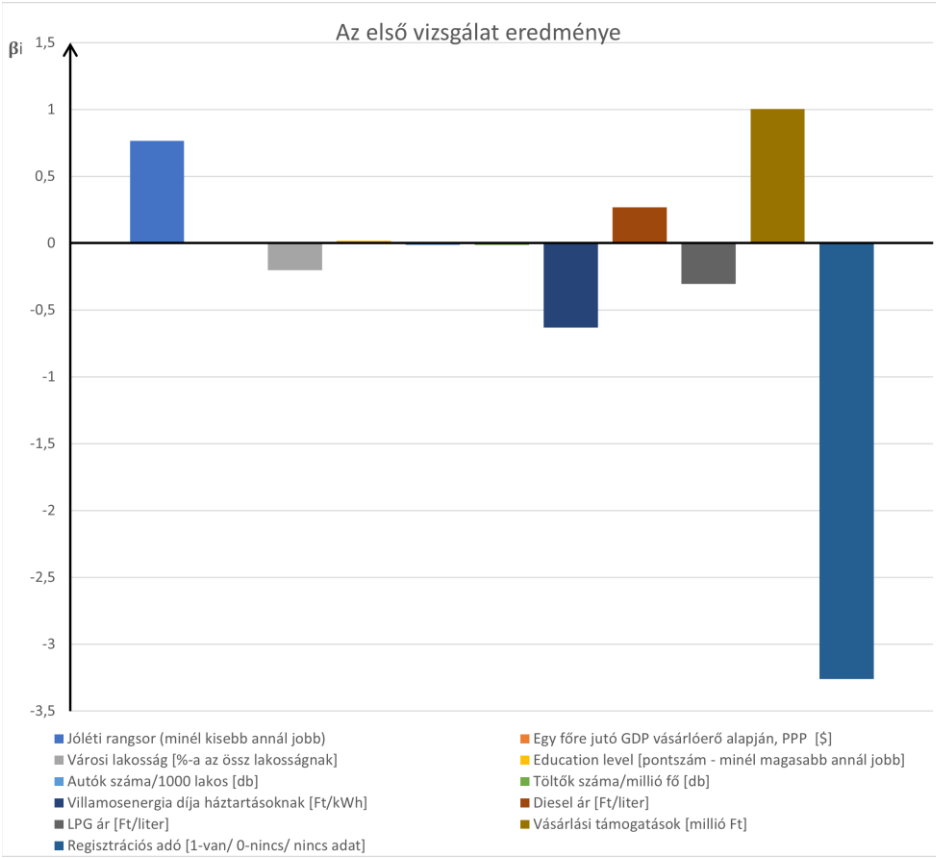
2.2. A függő változó

A vizsgálathoz függő változónak (Y) az elektromos autók országonkénti piaci részesedését választottam. A vizsgált országok a következők: Kína, USA, Norvégia, Németország, Anglia, Franciaország, Hollandia, Magyarország, Ausztria, Szlovákia, Románia, Horvátország, Szlovénia, Csehország és Lengyelország. A vizsgált országok között vannak nagyon fejlett országok is, ahol egész jól elterjedtek az elektromos autók, illetve vannak ezzel ellentétes tendenciát mutatók is. Így talán, ha nem is teljesen valós, de közelítő képet kaphatunk arról, hogy milyen tényezők és hogyan befolyásolják az elektromos autók elterjedését. Az 1. ábra az elektromos autók piaci részesedését mutatja a vizsgált országokban: [4.] [6.] [7.]

Az 1. ábra jól szemlélteti az óriási különbségeket. Figyelem, a függőleges tengely logaritmikus léptékű, hogy jól látszódjanak a kis % értékek is!



1. ábra Elektromos autók piaci részesedése



2. ábra Az első vizsgálat eredménye

2.3. A független változók

A független változók (X_1, X_2…X_{15}) piaci részesedést befolyásoló tényezők. Az adatok gyűjtésénél viszont előfordultak ellentmondások, valamint probléma az adatok frissessége is, amelyek torzíthatják a vizsgálatot.

A független változók (X_1…X_{15}) tehát a következők: jóléti rangsor (minél kisebb annál jobb), egy főre jutó GDP vásárlóerő alapján PPP [$], városi lakosság [%-a az össz lakosságnak], képzettségi szint [pontszám - minél magasabb annál jobb], autók száma/1000 lakos [db], töltők száma/millió fő [db], villamosenergia díja háztartásoknak [Ft/kWh], diesel ár [Ft/liter], LPG ár [Ft/liter], vásárlási támogatások [millió Ft], regisztrációs adó [1-van/ 0-nincs], cégautóadó kedvezmény [1-van/ 0-nincs], éves gépjárműadó [1-van/ 0-nincs], egyéb kedvezmények pl. ingyenes parkolás [1-van/ 0-nincs].

A vizsgált országokban megállapítható, hogy az elektromos autók piaci részesedése Norvégiában (kb. 50%) a legmagasabb és Horvátországban (<0.1%) a legalacsonyabb a vizsgált országok közül. A jóléti rangsor és az egy főre jutó GDP alapján is Norvégia vezet és meglepő módon Kína az utolsó. Az ország lakosságának legnagyobb része Hollandiában (>90%) él városokban, amíg Szlovákiában és Romániában ez az arány csak 54%. A képzettségi szint terén Kína vezet és Románia zárja a sort. A legtöbb autó az USA-ban jut 1000 főre (>900db), és Kínában jut a legkevesebb (<250db). Elektromos autó töltési lehetőség Norvégiában jut a legtöbb 10 millió főre, amíg Kínában a legkevesebb. A villamosenergia díja és a diesel üzemanyag ára Kínában a legalacsonyabb és a legdrágább Németországban, amíg a második legdrágább Norvégiában. Az autógáz terén is hasonló a helyzet, csak itt Lengyelország az első, Kína csak a második, a legdrágább viszont Svédországban. Az elektromos autó állami támogatása, azaz a vásárlási támogatás, a legmagasabb Norvégiában, ezzel szemben Horvátországban, Csehországban és Lengyelországban egyáltalán nincs ilyen jellegű ösztönzés. Regisztrációs adó kedvezmény, cégautóadó kedvezmény, éves gépjárműadó kedvezmény és egyéb kedvezmények is jellemzően azokban az országokban vannak, ahol van valamilyen állami ösztönző erő, vásárlási támogatás a villamos autókra.

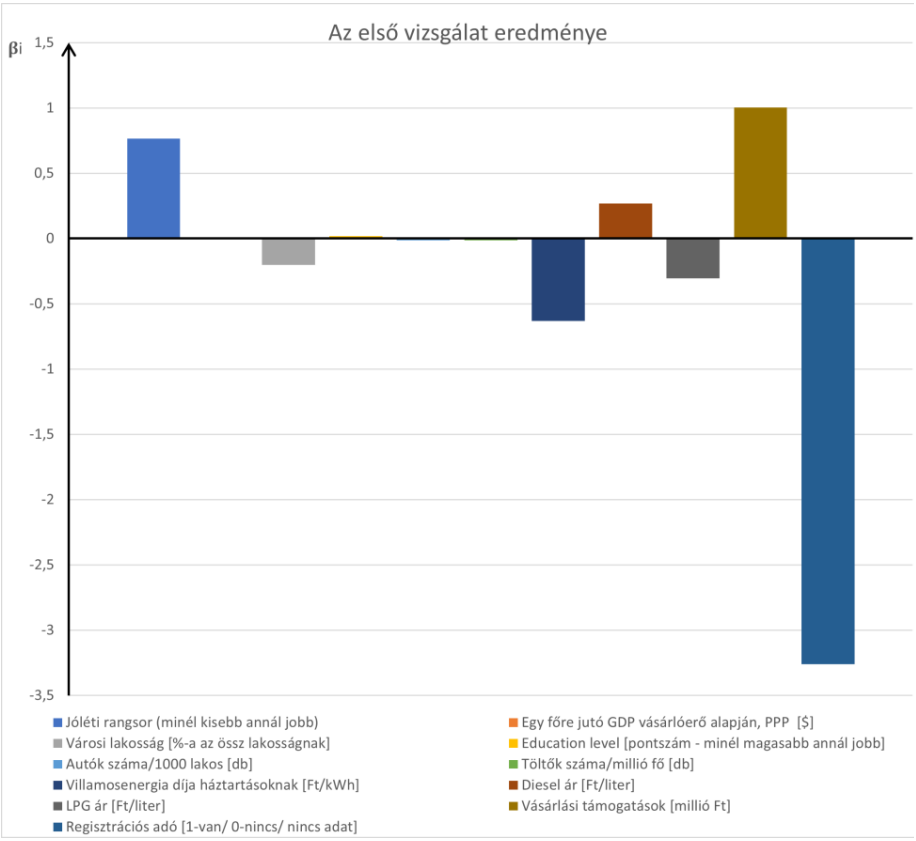
2.4. A regresszióanalízis eredménye és értelmezése

Némely változók nem kerültek be első körben a regresszióanalízisbe a bizonytalanságuk miatt. Tehát most következzen a szűkített vizsgálat eredménye, azaz X_{13}, X_{14} és X_{15} nélkül, amelyet a 2. ábra szemléltet.

A második, bővített vizsgálat – amely eredményét a 3. ábra mutatja –, tartalmazza az előbb kihagyott változókat is.

A jelölések megegyeznek a cikk elején, a lineáris regresszió elméleti bemutatásánál alkalmazott jelölésekkel. $\boldsymbol{\alpha}$ a tengelymetszet, $\boldsymbol{\beta}_i$ (koefficiens) az i-edik független vagy magyarázó változó együtthatója, ahol i=1, 2…15. A vizsgálati eredmény értelmezésekor ez a $\boldsymbol{\beta}_i$ koefficiens a legfontosabb. Ezek láthatóak az előbbi grafikonokon. Ez mutatja meg, hogy az i-edik magyarázó változó, hogyan befolyásolja a magyarázott, vagyis a függő (Y) változó értékét. Ha $\boldsymbol{\beta}_i$ pozitív, akkor az i-edik magyarázó változó növekedése esetén a magyarázott változó (Y) értéke is növekszik. Ha $\boldsymbol{\beta}_i$ negatív, akkor a függő változó (Y) értéke csökken, ezen független i-edik változó értékének növekedése esetén [21.] [23.]

Az első vizsgálat eredménye valószínűleg reális eredményt ad, hiszen csak a „biztos” adatok alapján végeztem el. A második vizsgálat már tartalmazza a „bizonytalan” adatokat is. Ezért ez nem igazán megbízható eredmény. Ezt abból is lehet gondolni, hogy e szerint a cégautó adókedvezmény befolyásolja legjobban a piaci részesedést. Ugyanakkor ennek a magyarázó változónak a legnagyobb a hibája is. Ebből a két vizsgálatból (és még jóval több lefutatott vizsgálatból) kiderül, hogy több



3. ábra A második vizsgálat eredménye

bináris (van/nincs) jellegű független változó alkalmazása nem igazán szerencsés többszörös lineáris regresszió esetén.

A megbízhatóbb vizsgálati eredmények alapján kimondható az, hogy minél nagyobb a vásárlási támogatások összege egy országban, annál „jobban vásárolják" az elektromos autókat. A második legjobban befolyásoló tényező pedig a jóléti index. Ezek nem meglepő eredmények. Ha a diesel ár magasabb, akkor is többen az elektromos autózás felé fordulnak, ugyanakkor a villamosenergia díja pont fordítva befolyásolja az eredményt valószínűleg az otthoni töltési lehetőség miatt. Valamennyire segíti az elektromos autók elterjedését az egy főre jutó GDP növekedése, a képzettségi szint növekedése (ez majdnem közömbös). Az autók száma 1000 lakosra vetítve, a városban élők aránya, nem igazán befolyásolja az eredményeket, holott azt várnánk, hogy ezek is nagyban hozzájárulnak. A töltők száma/millió fő hatása meglepő (és valószínűleg nem reális), hiszen a töltők száma növekedésének az elektromos autók számát is növelnie kéne, és itt majdnem ellentétes tendenciát mutat az eredmény. Ha nincs regisztrációs adó az nagy hatással van a piaci részesedés növekedésére. Azonban azt is figyelembe kell venni, hogy ennek a változónak nagyon nagy a hibája.

Azonban nem csak a koefficiensek a fontosak: Az α-t már megemlítettem az elméleti összefoglalóban. Ez a konstans a lineáris regresszióban, a tengelymetszet. A p-érték az együtthatók (α és β_i) megbízhatóságát mutatja meg. Ha a p-érték egy bizonyos küszöb alatt van, akkor tartjuk eléggé megbízhatónak az adott független változó együtthatóját. Ez a küszöb általában 0,05 és/vagy 0,1. Mindkét vizsgálat esetén vannak olyan együtthatók, amelyek nem felelnek meg ezen követelménynek. A standard hiba (e_i) pedig az egyes változók hibáját mutatja meg. [21.] [22.]

Az R^2 azt mutatja, meg, hogy a függő változót (Y) milyen mértékben magyarázzák a független változók (X_1; X_2…). Ezt általában százalékban értelmezzük. Ez fejezi ki a pontosságát a lineáris regressziónak. Minél közelebb van az R^2 értéke az 1-hez, annál pontosabb a regresszió. Ez alapján a 2. regresszió analízis eredménye pontosabb, hiszen a magyarázott változót kb. 99%-ban magyarázzák a független változók. (Azonban gyanús lehet ez a túl magas érték.) Az F szignifikanciája pedig a megbízhatóságát fejezi ki a regresszió analízisnek, vagyis azt mutatja meg, hogy „mennyire nincs" kapcsolat a független (magyarázó) változók és a függő (magyarázott) változó között. Nyilván minél kisebb ez a számérték annál kisebb a függés az Y és az X-ek között. Ez egy valószínűség, Null Hipotézis eredménye. Ez alapján látható, hogy az elvártnak megfelelően az első vizsgálat a megbízhatóbb abból a szempontból, hogy pontosabbak az adatok. Hiszen az első vizsgálatnál az F szignifikanciája 0,006 55, amíg a második vizsgálatnál ez 0,05. Azt azonban meg kell jegyezni, hogy mind a két érték elég nagy. [21.] [22.]

3. ÖSSZEFOGLALÁS

Az első vizsgálat eredménye alapján láthatjuk, hogy minél magasabbak a vásárlási támogatások annál nagyobb a villamos autók piaci részesedése és ha nincs regisztrációs adó az is nagy mértékben befolyásolja a piaci részesedés növekedését. Viszont az egy főre jutó GDP, az education level, az autók száma/1000 lakos és a töltők száma/millió fő nem igazán befolyásolja a piaci részesedést. Ennek a vizsgálatnak az eredménye hihető, hiszen az F szignifikanciája elég kicsi. Az R^2 értéke is közel van 1-hez, így elég pontos a regresszió, a független változók elég nagy százalékban magyarázzák a függő változót.

A második, kibővített vizsgálatnál a van/nincs jellegű változók hatása szembetűnő az előző fejezetben látható grafikonon. Ez nem is csoda, hiszen csak két értéket a nullát és az egyet vehetik fel. Viszont az adatok bizonytalansága miatt nem eléggé megbízható ez a vizsgálati

eredmény. Ezt mutatja az is, hogy az F szignifikanciája nagyobb számérték, mint az előző esetben.

4. IRODALOMJEGYZÉK

[1.] ***Nagy L., Balogh P.:*** *Ökonometria /Elméleti jegyzet/* 2013, https://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2011-0029_de_okonometria_elmelet/ch04s02.html (2019. október 2.)

[2.] *A többváltozós lineáris regresszió* I., 2018. szeptember 17., http://math.bme.hu/~orlovits/GPK_SZTOCH_EA_REG_1.pdf (2019. október 4.)

[3.] *Statistics How To, Least Squares Regression Line: Ordinary and Partial*, https://www.statisticshowto.datasciencecentral.com/least-squares-regression-line/ (2019. októver 4.)

[4.] ***Phillips, I.:*** *Top 18 Electric Cars Countries in 2019*, 2019 január 15., https://avtowow.com/countries-by-electric-car-use#In-Conclusion (2019. október 15.)

[5.] *Global Petrol Prices,* https://www.globalpetrolprices.com/electricity_prices/ (2019. október 15.)

[6.] ***Ujj P. T.:*** *Az elektromos autók piaci részesedése Európában,* 2019. október 5., https://alapjarat.hu/aktualis/az-elektromos-autok-piaci-reszesedese-europaban (2019. október 19.)

[7.] *Hazai elektromobilitási stratégia Jedlik Ányos terv 2.0, Innovációs és Technológiai Minisztérium*, https://www.kormany.hu/download/f/a9/a1000/Hazai%20elektromobilit%C3%A1si%20strat%C3%A9gia.pdf (2019. november 10.)

[8.] *The Legatum Prosperity Index™*, https://prosperitysite.s3-accelerate.amazonaws.com/7015/4321/8061/Legatum_Prosperity_Index_2018_Rankings_table.pdf (2019. november 10.)

[9.] *GDP per capita, PPP (current international $) World Bank, International Comparison Program database* https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.PP.CD?name_desc=false (2019. november 12.)

[10.] *Urban population (%of total population), United Nations Population Division. World Urbanization Prospects: 2018 Revision.*, https://data.worldbank.org/indicator/SP.URB.TOTL.IN.ZS (2019. november 12.)

[11.] *Education Rankings By Country 2019*, http://worldpopulationreview.com/countries/education-rankings-by-country/ (2019. november 14.)

[12.] *Vehicles Per Capita, by Country*, 2017,https://www.acea.be/statistics/tag/category/vehicles-per-capita-by-country (2019. november 21.)

[13.] *How many cars per capita in the USA, Captirol Tires*, https://capitol-tires.com/how-many-cars-per-capita-in-the-us.html (2019. november 21.)

[14.] *Passenger cars in the EU*, https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Passenger_cars_in_the_EU (2019. november 21.)

[15.] *Open charge map*, https://opencharge-map.org/site/country (2019. november 28.)

[16.] *Chargemap*, https://chargemap.com/about/stats (2019. november 28.)

[17.] ***Wagner, I.:*** *Number of U.S electric vehicle charging stations and outlets 2018.,* 2019 augusztus 9., https://www.statista.com/statistics/416750/number-of-electric-vehicle-charging-stations-outlets-united-states/ (2019. november 28.)

[18.] *EV Charging Statistics*, https://evadoption.com/ev-charging-stations-statistics/ (2019. november 28.)

[19.] *Global Petrol Prices,* https://www.globalpetrolprices.com/diesel_prices/ (2019. december 3.)

[20.] *Global Petrol Prices,* https://www.globalpetrolprices.com/lpg_prices/ (2019. december 3.)

[21.] *Két mennyiség kapcsolatának vizsgálata, korreláció és lineáris regresszió;* http://rs1.szif.hu/~szorenyi/elm/bioselm7.htm (2019. december 7.)

[22.] *Mikor és hogyan alkalmazd a Pearson korreláció-t?* https://spssabc.hu/ketvaltozos-elemzes/korrelacio/ (2019. december 7.)

[23.] ***Simon D.:****, Prediktív analitika alkalmazása Excelben, Lineáris regresszió, 2018. december 12.,* https://www.controllingportal.hu/prediktiv-analitika-alkalmazasa-excelben/ (2019. november 2.)

Kazsoki Attila Sándor, Dr. Hartmann Bálint

Prosumerek alkotta energiaközösség energiafelhasználásának és napelemes energiatermelés egyidejűség-növelésének lehetőségei

Napjaink villamosenergia-felhasználását egyre nagyobb mértékben fedezik napelemes rendszer által termelt villamos energiából, melylakossági felhasználók körében is egyre nagyobb mértékben elterjed. Ezen felhasználókat célszerű csoportosan, energiaközösségekben vizsgálni. Ilyen fogyasztók eseten megállapítható, hogy a napelemes termelés és fogyasztás viszonylag alacsony egyidejűséget mutat. Azonban energiatároló alkalmazása esetén az egyidejűségi értékekben jelentős növekedés tapasztalható (hatása 30%-os penetráció alatt nem értékelhető). A $LiFePO_4$ akkumulátor egyidejűségnövelő hatása a penetráció növekedésével egyre jobban érvényesül. A beruházás gazdasági megtérülését vizsgálva elmondható, hogy a jelenlegi árak mellett az akkumulátor élettartama (10 év) alatt nem térül meg.

Nowadays the electricity consumption is increasingly covered by green energy, generated by photovoltaic systems. This tendency is becoming more widespread among residential consumers. These consumers should be examined in groups, in energy communities. In the case of such consumers, it can be stated that between the photovoltaic production and consumption the simultaneity is relative low, thus significantly affecting the operation of the electricity distribution system. In the case of using energy storage device, the simultaneity values increase significantly (cannot be assessed below a 30% penetration level). The simultaneity enhancing effect of the examined $LiFePO_4$ battery prevails better with increasing penetration. Looking at the financial pay back on the investment, it can be said that at current prices it will not pay back during the predicted lifetime of the battery (10 years).

Kulcsszavak: **energiaközösség, termelés-fogyasztás egyidejűsége, egyidejűségnövelés, energiatárolás**

1. BEVEZETÉS

Az utóbbi években a nemzetközi trendekkel egyetemben Magyarországon is megfigyelhető a fotovillamos penetráció rohamos növekedése. A folyamatot hazai és Európai Unió által finanszírozott, energiahatékonyságot növelő pályázatot ugyancsak erősítik. Ezen napelemes penetráció-növekedés egyik színtere a kisfeszültségű elosztóhálózatra csatlakozó háztartási méretű kiserőművek (<50 kVA) energiatermelése. Hazánkban a Magyar Energetikai és Közmű-szabályozási Hivatal 2019-as statisztikája szerint e rendszerek beépített kapacitása a teljes kapacitás mintegy 45%-a, mely jelentősnek mondható [1][2].

Lakossági prosumerek esetén azonban elmondható, hogy a termelés és a fogyasztás időbeli lefolyása eltérő, azok egyidejűsége alacsony. Annak érdekében, hogy a helyben termelt villamos energia a lehető legjobb hatásfokkal kerüljön felhasználásra, érdemes energiaközösségi szinten gondolkozni, melyben nem feltétlen rendelkezik minden felhasználó napelemes rendszerrel. Jelen munka során olyan szintetikus prosumer került kialakításra (termelés és a fogyasztás éves szinten pontosan megegyezik, 2600 kWh), melyben a termelő és fogyasztó külön választható. Az energiaközösség is ilyen egységmodellek felhasználásával került kialakításra.

Az energiaközösséget alkotó prosumerek jellemzése a 2.1 fejezetben kerül bemutatásra. Ezen prosumer, illetve prosumerek alkotta energiaközösség egyidejűsége a 2.2, valamint a 2.3 fejeztben kerül bemutatásra. Az egyidejűségnövelési lehetőségek a 2.4, az energiatárolási lehetőségek a 2.5, az energiatárolóval történő egyidejűségnövelés eredményei a 3.1, valamint fejezetben kerülnek bemutatásra. Az energiatároló megtérülésének számítását a 3.2 fejezet tartalmazza.

2. ADATOK ÉS MÓDSZEREK

2.1. Alapmodell

A **fogyasztói alapmodell** oly módon lett kialakítva, hogy abban az éves szintű villamosenergia-felhasználás és termelés egymással pontosan megegyezzen. A rendelkezésre álló adatbázisban 1422 darab eltérő energiafelhasználású lakossági fogyasztó 2016 évi villamosenergia-felhasználása található, negyedórás felbontásan. Az egyes felhasználói profilok viszonylag széles spektrumot ölelnek fel, 500 kWh és 9 000 kWh között. Jelen munkában használt fogyasztói profil, ezen profilok átlagolásával került kialakításra. A szintetikusan kialakított fogyasztó éves szinten 2509,27 kWh villamos energiát használt el a 2016-os évben. Ezen fogyasztási érték a magyar átlagtól - mely a szakdolgozatban is felhasználásra kerül - kismértékben eltér, így az adatsor normálása elengedhetetlen.

Megjegyzés: a normálás következtében kismértékben változó fogyasztói görbék a bemutatott módszertant nem befolyásolják.

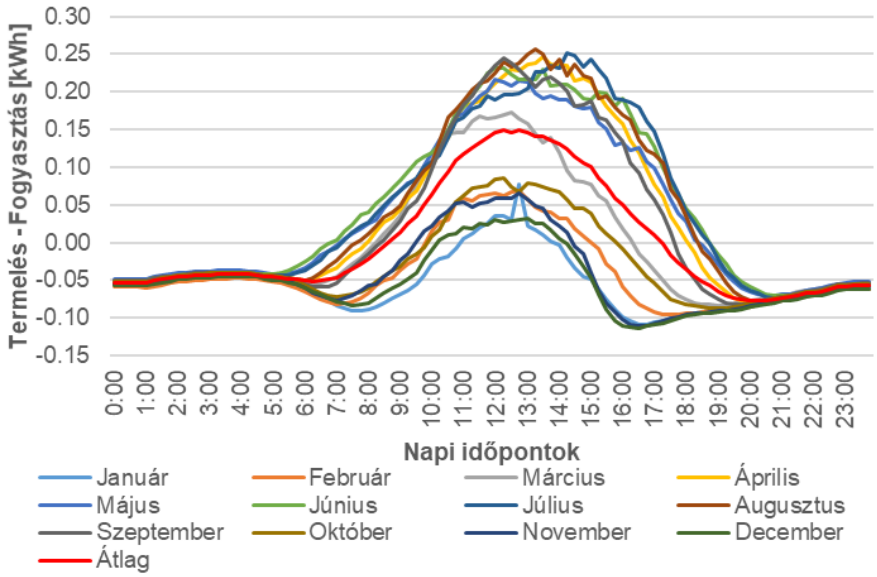
A **termelői alapmodell** a fogyasztói alapmodell éves villamosenergiafelhasználására telepített napelemes rendszer, melyben jelenleg 12 darab, Korax KS 260-P típusú, 260 Wp névleges teljesítményű polikristályos napelem került elhelyezésre. Ezen rendszer névleges telje-

sítménye 3,12 kWp. A napelemes rendszer közel déli tájolású 35°-os dőlésszögű, amely adott helyen, tetőre telepítve is közel ideálisnak tekinthető. A termelési adatokból arra lehet következtetni, hogy egyéb, veszteséget növelő tényezőkkel (magasabb fák, egyéb árnyékhatást növelő tereptárgyak) nem kell számolni. A napelemek által termelt villamos energiát egy 3 kVA látszólagos teljesítményű inverter (SUNNY BOY 3000-TL) alakítja váltakozó áramú energiává. A vizsgált napelemes rendszer éves szinten 3635,98 kWh villamos energiát termel (mért érték 2016-ra vonatkozóan), mely az átlagos magyar lakossági felhasználó fogyasztása felett van. Annak érdekében, hogy az alapmodellben a napelemes rendszer önfogyasztásra termeljen, a termelési adatok normálása szükséges. Ezen redukálás nagy hibát nem okoz, hiszen így egy közel 2,5 kWp teljesítményű napelemes rendszer negyedórás adatai nyerhetők ki. [4-8]

Megjegyzés: a normálás következtében kismértékben változó termelői görbék a bemutatott módszertant nem befolyásolják.

2.2. Egyidejűség

Jelen munkában a termelés és a fogyasztás azon negyedórában tekinthető egyidejűnek, amelyben a megtermelt villamos energia pozitív (van termelés) és az az adott negyedórában felhasználásra is kerül. A termelés és fogyasztás egyidejűsége az alapmodell tekintetében az 1. ábrán látható.

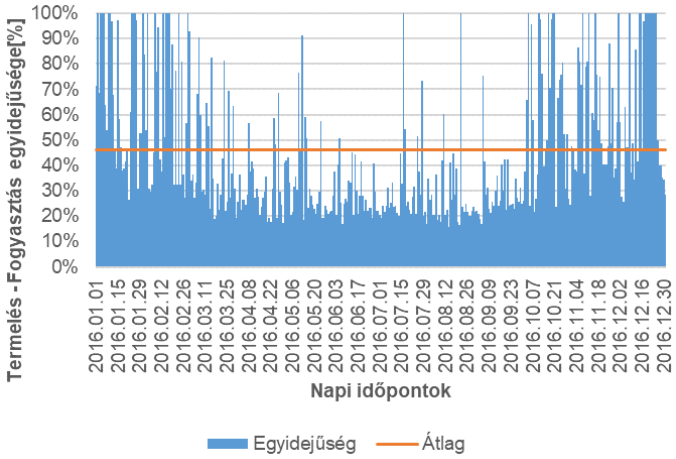


1. ábra Az egyes hónapok átlagos egyidejűsége az alapmodell tekintetében

Azon negyedórákban, ahol a görbe negatív értéket vesz fel, többletfogyasztás van, ahol pozitív értéket, ott többlettermelés van. Mivel az alapmodell esetén a napelemes rendszer önfogyasztásra termel, az átlagos többletfogyasztások és többlettermelések napi összege pontosan megegyezik.

Az 1. ábrán megfigyelhető, hogy a napelemes rendszer tervezése és kialakítása során a fogyasztással egyidejű termelés nem volt szempont, csupán az éves szaldó elszámolásra alapozva, az éves villamosenergia-felhasználás napelemes energiatermeléssel történő fedezés volt a szempont, ezzel is csökkentve fizetendő villamos energia díját.

Az egyidejűség grafikus ábrázolása (2. ábra) mellett az előzőekben bevezetetett definíció alapján az egyidejűség számszerű értéke ismertté válik.



2. ábra Az egyes napok egyidejűsége az alapmodell tekintetében

Az alapmodell tekintetében az egyidejűség 15,79% és 100% között változik, átlagos értéke 45,95%. Megfigyelhető, hogy az átlagos termelés-fogyasztás különbséghez képest az egyes napok különbségi értékeinek szórása jelentős mértékű. Ennek oka a termelésben tapasztalható nagymértékű, a fogyasztásban tapasztalható kismértékű szezonális befolyás.

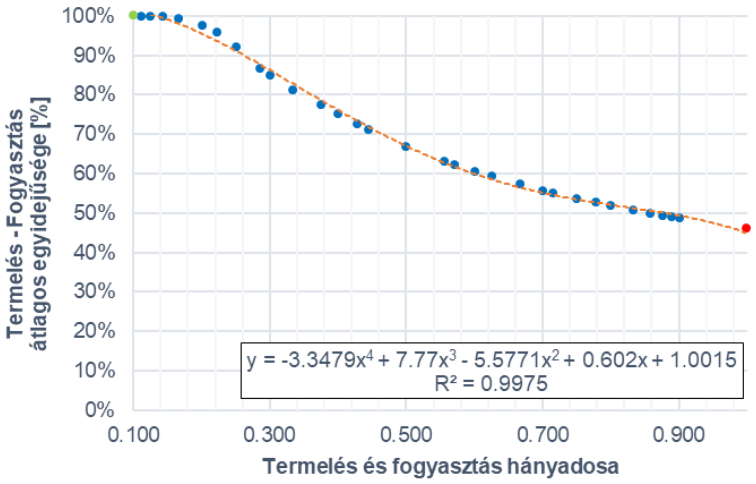
2.3. Energiaközösség

Egyetlen, a 2.2 fejezetben bemutatott alapmodell jelenléte a hálózaton szinte kizárt (minimális annak a valószínűsége, hogy egy kisfeszültségű hálózatrészre egyetlen önfogyasztásra termelő lakossági felhasználó csatlakozik. Ezért a következőkben alapmodellekből felépített energiaközösségek egyidejűsége kerül bemutatásra. Jelen munka során az energiaközösség alatt több termelő és több fogyasztó együttesét jelenti. A napelemes penetráció (alapmodell esetén bemutatott egységtermelők és egységfogyasztók aránya) az egyes esetekben eltérő. Az energiaközösség penetrációs szintje az egyidejűségi értékek minimuma és maximuma között lett vizsgálva.

Megállapítható, hogy a minimális egyidejűség 46,00% (azért nem lehet kisebb, mert a modell alapján a napelemes rendszerek száma nem lehet több mint a fogyasztók száma). Kellően kis napelemes penetráció esetén az egyidejűség elérheti a 100%-os értéket is. 10%-os termelői-fogyasztói arány esetén az egyidejűség 99,98% (6,67%-os penetráció esetén az egyidejűség 100%).

Az egyes elrendezések fogyasztói és termelői összetételét, valamint azok átlagos egyidejűsége a 3. ábrán látható. Megfigyelhető, hogy a két szélső penetrációértékhez (0,1 és 1) tartozó elrendezéshez tartozik a maximális (99,98%) és a minimális (46,00%) egyidejűség.

A termelők és fogyasztók arányának csökkenése és az átlagos egyidejűségi értékek között polinomiális kapcsolat írható fel. Az egyes penetrációértékekhez tartozó egyidejűségek sűrűségfüggvénye egy negyedfokú polinommal közelíthetők, mely egyenlete szintén az 3. Ábrán látható.



3. ábra Az egyes elrendezések egyidejűségének és a fogyasztók és termelők hányadosának kapcsolata

Az ábrán megfigyelhető, hogy a két szélsőérték (az alapmodellhez tartozó érték piros ponttal jelölve, a tíz fogyasztó és egy termelőhöz tartozó érték zöld ponttal jelölve) között az egyes elrendezések esetén kapott egyidejűségek kis szórással (R^2 = 0,9975) rendelkeznek. A legnagyobb egyidejűség a legkisebb penetrációs szinthez tartozik. Ezen értéket akkor kapjuk, amikor csak minden tizedik fogyasztó rendelkezik napelemes rendszerrel. Megfigyelhető, hogy a napelemes penetráció növekedése az egyidejűséget csökkenti.

2.4. Egyidejűségnövelés lehetőségei

Az előző fejezetben láttuk, hogy egy napelemes rendszer egyidejűsége alapmodell esetén igen alacsony, mely az alábbi megoldások segítségével növelhető.

- Energiatároló alkalmazása
- Napelemek tájolásának változtatása
- Fogyasztói befolyásolás (*DSM: Demand Side Management*)

Az *energiatároló*val történő egyidejűségnövelés az egyik legismertebb módszer, melynek lényege, hogy a napelemes rendszer által megtermelt többletenergiát későbbi, többletfogyasztásos időszakban elhasználja.[4]

A *napelemek tájolásának változtatásá*val elérhető, hogy a napközbeni (déli tájolás esetén 12:00-13:00 körüli) termelési maximum ne erre az időszakra koncentrálódjon, hanem a reggeli, valamint délutáni időszakban jelentkező energiaigény nagyobb mértékben fedezhető legyen [4].

A *fogyasztó oldali befolyásolás* során a villamos energia átvételi árának változtatásával ösztönzik a fogyasztót, hogy berendezéseit többlettermeléses időszakban üzemeltesse, ezzel csökkente a fotovillamos termelés elosztóhálózatra gyakorolt hatását [9].

2.5. Energiatároló

Jelen munkában az energiatárolóval történő egyidejűségnövelés kerül bemutatásra, hiszen a jelenlegi technológiai helyzetben a villamos energia tárolása háztartási szinten csak az akkumulátoros energiatárolás tűnik a legpraktikusabbnak, a legmegfelelőbb megoldásnak, annak mérete, kezelhetősége és esztétikai megjelenése nyomán [4]. Az akkumulátoros energiatárolási módszer egyik legnagyobb előnyének tekinthető a kommunális elosztóhálózattól független vagy időszakosan független üzem kialakításának lehetősége, valamint új, vagy már meglévő rendszerbe történő integrálás viszonylagos egyszerűsége, kivitelezhetősége [3].

Az akkumulátorok típusát tekintve a leggyakrabban savas ólom akkumulátorokat, zselés ólom akkumulátorokat, valamint Li-ion akkumulátorokat alkalmaznak. A Li-ion akkumulátoroknál is egyre több technológia áll rendelkezésre. Jelen munka során lítium-vas-foszfát ($LiFePO_4$) akkumulátor került alkalmazásra. Előnye a hagyományos Li-ion akkumulátorral szemben a nagy kisütési áramerősség, a felszabaduló oxigén gáz hiánya, mely a robbanás lehetőségét megszűnteti, gyors töltési idő és a nagyobb teljesítménysűrűség. Az akkumulátor jól tűri a folyamatosan töltött állapotot, így energiatárolásra (napelemes rendszerek mellé is) jól alkalmazható. Hátránya az alacsony cellafeszültségből adódó kapacitáscsökkenés, hideg-és meleg környezet teljesítményére és életciklusa negatívan hat [4][10].

A kiválasztott szolár akkumulátor feszültsége 48 V, kapacitása 150 Ah. Az akkumulátor pontos típusát tekintve egy Relion RB48V150 típusú $LiFePO_4$ típusú, magas ciklusállóságú (akár 8000-1000 ciklus 50% DoD esetén) szolár akkumulátor [11-14]. Az akkumulátor névleges paramétereiből (feszültség, kapacitás) meghatározható annak névleges energiatároló-képessége, mely a kiválasztott akkumulátor esetén 7,680 kWh-ra adódik,

mely a termék katalógusában is feltüntetésre került. Mivel a magas ciklusállóság feltétele csak adott kisütési mélység esetén garantálható, ezért egy kisütési ciklus során nem használható fel a teljes névleges energiamennyiség. A vizsgált akkumulátor tekintetében ez azt jelenti, hogy 50% DoD mellett maximálisan 3,840 kWh villamos energia süthető ki egy ciklusban.

Az akkumulátor kisütési ciklusa során a határkapacitást egy elektronikus töltésszabályozó vezérli, meggátolva a túl nagy kisütési mélységet. Emellett figyelni kell a túltöltés elkerülésére is. Ezen töltésszabályozó megakadályozza töltés névleges érték fölé növekedését. Amennyiben eléri a kapacitás névleges maximumát, az energiatárolót a napelemes rendszerről ideiglenesen leválasztja.

Az akkumulátorok esetén érdemes szót ejteni az önkisülés folyamatáról is. Eszerint a berendezést névleges teljesítményre töltve, és magára hagyva, az egy idő után terhelés jelenléte nélkül is lassan kisül, veszít energiatartalmából. Ez nagyságrendileg több napot is felölelhet, így egy napon belüli töltés-kisütési ciklus esetén a jelenség elhanyagolható.

Az energiatároló alkalmazásának célja, hogy a 2. fejezetben bemutatott termelés-fogyasztás egyidejűségi értékek a lehető legnagyobb mértékben nőjenek, átlagértékük közelítse az ideális 100%-ot. Mivel az alapmodell úgy lett kialakítva, hogy az önfogyasztásra termeljen, így a napközben megfigyelhető többlettermelés az esti időszakban jelentkező többletfogyasztást fedezni tudja, ezzel elérve a 100%-os egyidejűséget. Az akkumulátoros rendszer méretezése is ezen átlagos görbe alapján történik.

2.6. Energiatároló méretezése

Az energiatároló méretezéséhez szükséges a rendszerben megjelenő többlettermelés, valamint a többlettermeléssel kompenzálható többletfogyasztás meghatározása. Az alapmodell tekintetében az átlagos többlettermelés és többletfogyasztás megegyezik, ezek mértéke 3,0855 kWh. Az akkumulátor kisütése során egy ciklus során ekkora energiamennyiséget kell kivenni átlagosan az energiatárolóból. Az energiakivétel mellett figyelni kell arra is, hogy az akkumulátor maradó kapacitása ne csökkenjen a névleges kapacitásának 50% alá. Ez a beépített akkumulátor esetén nem jelent problémát, hiszen a kivett energia nem haladja meg az előzetesen megengedett 3,840 kWh-t.

Az akkumulátor méretezése során a berendezés kapacitása szabadon megválasztható, de egy ciklus alatt lehessen belőle 3,0855 kWh energiát kivenni. Az akkumulátor kiválasztása során figyelembe kell venni, hogy az egy ciklus alatt kiveendő energia kisütése a megengedett kisütési mélységig megoldható legyen. A kiválasztott akkumulátorból így elegendő egyetlen darab. Napi egy töltés-kisütési ciklust feltételezve az akkumulátor névleges életciklusa elérheti a napelemes rendszer névleges életciklusát, azaz 25 évet.

A gyakorlati tapasztalatok nem ezt mutatják, ugyanis ezen megközelítés nem veszi figyelembe az akkumulátor kisütési ciklusszámának és degradációjának (névleges (maradó) kapacitás csökkenés) hatását, valamint azt, hogy nem minden töltési-kisütési ciklus tekinthető ideálisnak. Mindezeket figyelembe véve az akkumulátor kb. 3700 töltés-kisütési ciklus után eléri élettartamának végét. Ezen időtartam kb. 10 évre tehető. Az, hogy az akkumulátorok számának növelése mennyire tűnik műszakilag és gazdaságilag reálisnak, jelen esetben nem releváns, ugyanis a napjainkban tapasztalható folyamatos technológiafejlődés újabb és újabb megoldásokat kínál közép-hosszútávon (10 év) is.

Mindezeket figyelembe véve megállapítható, hogy Relion RB48V150 típusú szolár akkumulátor alkalmazása esetén az egyakkumulátoros rendszer alkalmazása a legkézenfekvőbb.

Az átlagos töltés-kisütési görbe az energiatároló maximális (7,680 kWh, 100%) és átlagos maradó kapacitása (4,5917 kWh, 59,79%) között mozog. Megjegyzendő, hogy a DoD nem éri el az előzetesen megengedett 50%-os értéket, ahol az elektronika a kisütést lekorlátozza. Az egyidejűség értékét vizsgálva megállapítható, hogy a többlettermelés az időben eloszlható oly módon, hogy a többletfogyasztásos negyedórákban a tárolt energia részleges kisütésével a fogyasztás kompenzálható, ezzel elérve a 100%-os egyidejűséget. Az alapmodell tekintetében a termelés és a fogyasztás egyensúlya biztosítható.

Azonban ilyen átlagos napok egy évben igen kis valószínűséggel fordulnak elő, így az egyes napokon elérhető maximális egyidejűségek vizsgálata elengedhetetlen. A képet az is árnyalja, hogy az egyes napok töltés-kisütés görbéire az vizsgált napot megelőző egyidejűségi görbe is hatással van.

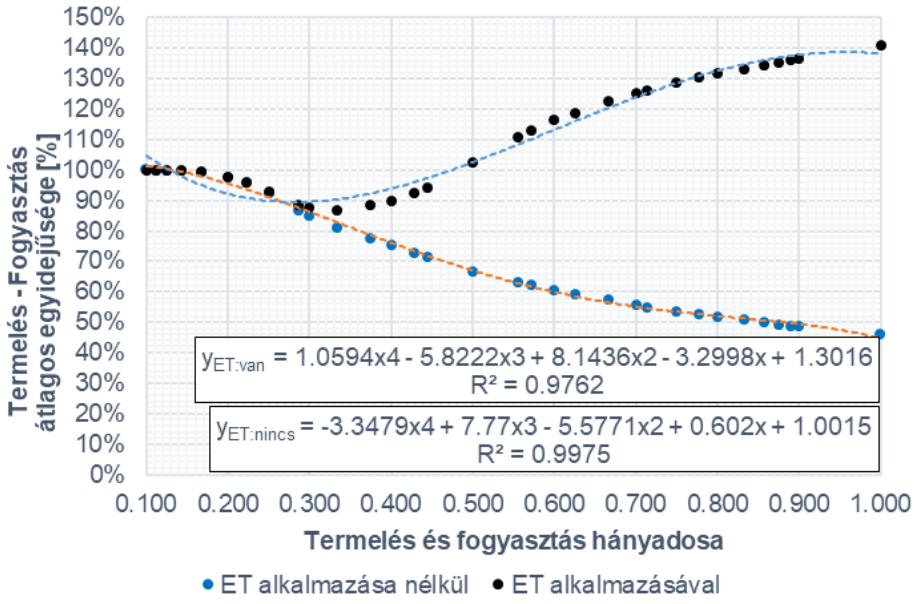
3. EREDMÉNYEK ÉS ÖSSZEGZÉS

3.1. Egyidejűség növelése energiatárolóval

Az energiatárolóval történő egyidejűség meghatározásakor a 2. fejezetben bevezetett definíción módosítani kell. Ennek oka, hogy nagy napelemes penetráció esetén számos napon az egyes negyedórák tárolt többlettermelése képes fedezni azon időszakok fogyasztását, amikor már nincsen napelemes termelés (éjszakai időszak). Az egyes napok egyidejűsége a napelemes termeléssel rendelkező negyedórák és az akkumulátortöltéssel, illetve kisütéssel üzemelő negyedórák számának arányaként lett meghatározva. Azon negyedórákra, amikor a fogyasztást az akkumulátoros rendszer energiája fedezi, virtuális termelési időszakként lehet tekinteni, melyekben a megtermelt villamos energia mennyisége felhasználásra kerül. Azokon a napokon, ahol az egyidejűség az eredeti esetben is 100% volt, az energiatároló rendszer nem tud egyidejűséget növelni.

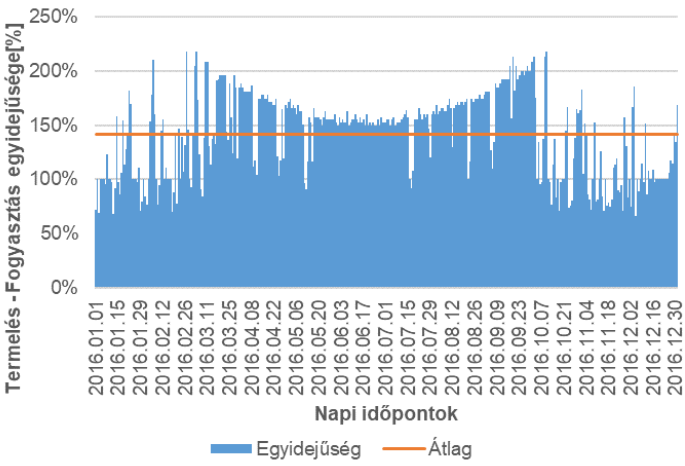
A termelési görbe virtuális kitolásával, valamint az eredeti definíció felhasználásával előáll az a helyzet,

melyben a termelés és fogyasztás átlagos (és napi) egyidejűsége 100%-ot meghaladja. Ez (a 100% fölötti rész) megmutatja, hogy valójában napsütötte negyedórákon felül hány további negyedóra van, melyben az akkumulátoros rendszerrel megvalósított virtuális termelés képes a fogyasztást ellensúlyozni. Ilyen, 100%-ot meghaladó egyidejűség jellemzően a tavaszi nyári, valamint kora őszi időszakban fordul elő.



5. ábra Az egyes elrendezések egyidejűségének (energiatároló nélkül és energiatárolóval) és a fogyasztók és termelők hányadosának kapcsolata

A 100%-os penetrációs szinthez tartozó napi, és átlagos egyidejűségi értékeket a 4. Ábra vizuálisan is szemlélteti.



4. ábra Az egyes napok egyidejűsége az energiatárolóval kiegészített alapmodell tekintetében

A napi egyidejűségi értékeket vizsgálva szórás igen nagy, 65,71% és 141,19% között mozog. Ezt az eredeti elrendezéshez viszonyítva, melyben az egyidejűségek szórása 15,79% és 100% között változik, elmondható, hogy az energiatárolóval történő egyidejűségnövelés a hozzáfűzött reményeket beváltja.

Az egyes penetrációs szintekhez tartozó átlagos egyidejűségi értékek az 5. ábra tartalmazza.

Megfigyelhető, hogy kis penetrációs szint esetén (10% és 25% között) az energiatároló az átlagos egyidejűséget nem képes növelni. Az akkumulátor érzékelhetően 30%-os penetrációs szint felett fejti ki a kívánt hatást. Ekkor egyre több olyan nap van, melyen a beépített napelemes kapacitás által megtermelt villamos energia napközben meghaladja a villamosenergia-felhasználást, lehetővé téve az energiatárolást és annak későbbi felhasználását. A termelők és fogyasztók arányának növekedése és az átlagos, növelt egyidejűségi értékek között az eredeti esettel szinte megegyezően polinomiális kapcsolat figyelhető meg, melyet az 5. Ábra is szemléltet. Az egyes penetrációértékekhez tartozó módosított egyidejűségek sűrűségfüggvénye egy negyedfokú polinommal közelíthetők, mely egyenlete szintén ezen ábrán látható.

Összességében elmondható, hogy lakossági fogyasztókat tartalmazó energiaközösségek esetén a termelés és a fogyasztás egyidejűsége akkumulátoros energiatároló telepítéssel jelentősen növelhető. Azonban megjegyzendő, hogy az eredményes egyidejűségnövelés kb. 30%-ot meghaladó napelemes penetráció esetén valósítható meg. Az eredményeket egyetlen lakossági felhasználóra (alapmodell) vonatkoztatva elmondható, hogy az energiatároló rendszer itt fejti ki legjobban hatását, ugyanis ezen eset felel meg a 100%-os penetrációs szintnek, ahol az egyidejűség a maximum értéket felveszi.

3.2. Energiatároló megtérülés

A beruházás abban az esetben tekinthető megtérülőnek, ha az egyidejűségnövelés költsége a szaldóelszámolás időalapjának (év, félév, negyedév, hónap, nap, negyedóra) megváltoztatásának következtében kialakuló pozitív éves pénzügyi egyenleget nem haladja meg (1. Táblázat), így az egyidejűségnövelés pusztán gazdasági okokból ilyen formában nem kifizetődő.

Amennyiben az energiatárolásra más, alacsonyabb árú technológia kerül beépítésre, például savas, vagy zselés ólom akkumulátor akkor a tervezett életciklus alatt a beruházás nagyobb eséllyel térülne meg ([3]-ban be-

mutatott zselés ólom akkumulátoros energiatárolási technológia bekerülési költsége bruttó 604 520,0 HUF, amely, megtérülési ideje kb. 18 év lenne negyedórás szaldós elszámolás esetén).

A bemutatott energiatárolási technológia jelenleg a legfejlettebbek közé sorolható, így magas ára ellenére is nagy relevanciával bír.

1. Táblázat. Változó elszámolási időalap pénzügyi egyenlegei

	Pénzügyi egyenleg [HUF]	**Ellensúlyozható az akkumulátor éves költsége, mely kb.300 ezer HUF?**
Éves szaldó	0,0	nem
Féleves szaldó	6.252,2	nem
Negyedéves szaldó	16.256,1	nem
Havi szaldó	17.022,8	nem
Negyedórás szaldó	34.417,0	nem

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Az energiaközösségek villamosenergia-felhasználás és napelemes energiatermelés egyidejűsége növekvő fotovillamos penetráció esetén folyamatosan csökken, jelentős hatást gyakorolva a villamosenergia-rendszerre.

Energiatároló alkalmazása esetén azonban jelentős javulás érhető el. Az 3. fejezetben bemutatott definíció alapján az egyidejűség 100% fölé is mehet, maximumát, 141,19%-ot, 100% penetráció esetén éri el. Ezen esetben azonban megfigyelhető, hogy a vizsgált időszakban nagy számban vannak olyan napok, melyeken az egyidejűség az átlagot jóval meghaladja, mutatva, hogy a napi megtermelt energiamennyiség az éjszakai időszak fogyasztását is képes fedezni. Emellett az is megfigyelhető, az akkumulátor a 30%-ot meg nem haladó penetráció esetén, az alacsony termelési mennyiségből adódóan, érzéketlen az egyidejűség értékeire. Megjegyzendő, hogy a szakdolgozatban bemutatott energiaközösség idealizált alapmodellekből épült fel. A szakdolgozat csak az energiaközösség önfogyasztását meg nem haladó energiatermelést mutatja be, a vizsgálatok a túlméretezett napelemek termelésére nem terjednek ki. Ha a napelemes penetráció 100% fölé menne, akkor az átlagos egyidejűség értéke a jelenlegi 141,19%-ról tovább növekedne, elérve maximumát.

Az egyidejűség növelésére telepített $LiFePO_4$ szolár akkumulátor jelenleg az egyik legkorszerűbb technológiának minősül napelemes energiatárolás esetén, és berekülési költsége is viszonylag tetemesnek mondható (a kiválasztott berendezés a napelemes rendszer bekerülési költségének duplája). A beruházás megtérülési ideje a vizsgált penetrációs szintek közül mindenképpen a legnagyobb esetben (100%) van. Ez éves szaldós elszámolás esetén egy soha meg nem térülő befektetés lenne, negyedórás szaldós elszámolás esetén is a 85 évet meghaladja. Jelenleg ilyen beruházást pusztán üzleti megfontolásból nem érdemes telepíteni, azonban a műszaki szempontokat figyelembe véve egyidejűségnövelő képessége mindenképpen releváns intézkedésnek minősíti. Az akkumulátor egyidejűségnövelő hatása mellett a rendszer megtérülése is elemzésre került (a szaldós elszámolás időalapjának változtatásával). Ez eredmények alapján megállapítható, hogy az akkumulátor várható élettartama alatt (10 év) a beruházás nem térül meg.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Jelen munka a VEKOP-2.3.2-16-2016-00011 projekt keretében, az Európai Bizottság és a Magyar Kormány által közösen finanszírozott Európai Strukturális és Befektetési Alapok támogatásával készült.

6. IRODALOMJEGYZÉK

[1] **Whiteman A. et al.,** *"Renewable capacity statistics",* International Renewable Energy Agency (IRENA), 2020.

[2] *"Data of license exemptioned small power plants and household size small power plants between 2008 and 2018",* Hungarian Energy and Public Utility Regulatory Authority, 2019.

[3] https://www.ausnetservices.com.au/Community elérés dátuma: 2020.07.21.

[4] **Kazsoki A. S., "***Lakossági energiafogyasztás és napelemes energiatermelés egyidejűségének növelése energiatároló alkalmazásával",* Diplomaterv 88 p., 2017

[5] **Kazsoki A.S.,** *"Lakossági energiafogyasztás és napelemes energiatermelés egyidejűségének növelése energiatároló alkalmazásával",* Elektrotechnika 110: 10 pp. 34-37., 4 p., 2017

[6] **Kazsoki A. S., Hartmann B.**, *"Villamosenergiafelhasználás és napelemes energiatermelés egyidejűségének növelése energiatároló alkalmazásával",* VII. Mechwart András Ifjúsági Találkozó (MAIT), 2017

[7] **Kazsoki A. S., Hartmann B.**, "*Simultaneity of consumption and solar energy production of a Hungarian household",* Renewable Energy & Power Quality Journal 1: 15 pp. 506-511., 6 p., 2017

[8] **Kazsoki A. S. and Hartmann B.**,*"Simultaneity of consumption and solar energy production of a Hungarian household"*, International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'17), 2017

[9] ***Polgari B., Raisz D. and Hartmann B.,"*** *Overview on Demand Side Management",* 8th International Conference on Deregulated Electricity Market Issues in South Eastern Europe (DEMSEE 2013), 2013

[10] http://www.mnnsz.hu/tanulmany-akkumulatortarozos-napelemes-rendszer-felepitese/ elérés dátuma: 2020.07.21.

[11] **Relion**: *Relion Warranty*, 2018 https://relionbattery.com/resource-center/warranty elérés dátuma: 2020.07.21.

[12] **Relion**: *Charging instructions*, 2018
https://www.coastalclimatecontrol.com/images/PDF/Re-LiON/Relion_Charging_Instructions_v3.pdf
elérés dátuma: 2020.07.21.

[13] **Relion**: *Lithium Ion Phosphate Battery*, 2018
https://www.coastalclimatecontrol.com/images/PDF/Re-LiON/Relion_SafetyLithiumBattery_Coastal_2.pdf
elérés dátuma: 2020.07.21.

[14] **Relion**: *Lithium product specifications*, 2018
https://relionbattery.com/products/lithium/rb20
elérés dátuma: 2020.07.21.

Pašić Lejla, Dr. Vokony István

Future Stability Challenges: Stability Analysis in Microgrids

A mikrohálózatok várhatóan fontos szerepet fognak játszani az intelligens aktív elosztó hálózatokban és a megújuló energiaforrások elosztó rendszerbe történő integrálásában. Az energiahálózat működésének fontos szempontja a rendszer stabilitásának fenntartása. Számos hasonlóság mellet lényeges különbségek vannak a hagyományos közüzemi hálózatok és a mikrohálózatok stabilitása között, melyek többsége a méretbeli és a tehetetlenségbeli eltérésekből, valamint a megújuló energiaforrások integrálásából származnak. Ebben a cikkben bemutatjuk a mikrohálózatok stabilitásának alapvető fogalmait és a stabilitásuk elemzési módszereit, a hagyományos módszerekkel összehasonlítva.

Microgrids are expected to play a large role in smart active distribution grids and also in incorporating renewable energy resources into the distribution system. A very important question of power grid operation is the maintaining of system stability. There are many similarities but also significant differences between the stability of conventional utility grids and microgrids, most of which originate from the difference in size, inertia and penetration of renewable energy sources. In this paper we present the basic concepts of microgrid stability as well as a detailed classification of stability analysis methods in traditional grids and microgrids, according to small signal and large signal stability.

Keywords: **microgrid, stability, small signal stability, large signal stability.**

1. INTRODUCTION

Microgrids can be visualized as small blocks of today's energy grid which are able to disconnect and function separately from the utility grid. Microgrids provide a base for the incorporation of the intermittent renewable energy sources into the energy grid [1]. Aside from the environmental benefits, microgrids can also offer economic and operational benefits such as increased reliability and improved energy economics [2].

Identically with large utility grids, stability is an important question for microgrids, one which researchers both in academia and industry work on relentlessly [2]. However, the differences between microgrids and traditional power grids also change their behavior, which affects their stability. Thus, the stability of microgrids has to be treated differently, and the reexamination as well as adjustment of stability analysis methods is necessary.

In our work we give an overview of the stability analyses in microgrids – compared to the traditional grid – classified based on small signal and large signal stability. We discuss the advantages and disadvantages of the methods, as well as the differences between their applicability to traditional grids and microgrids. Additonaly we will also present some international microgrid examples.

2. BASIC STABILITY CONCEPTS IN MICROGRIDS

In this section we present the main differences between utility grids and microgrids, which lead to the changes in the stability analysis of these systems.

The microgrid is an innovative technology which helps to integrate renewable energy sources into distribution systems [3]. It also provides additional benefits, like reduced peak loading, enhanced flexibility, emission reduction and reliability improvement of the local systems [4] [5].

Unlike the traditional utility grids, microgrids can operate – besides the grid connected mode – in an isolated, so-called islanded mode too. These two operation modes have a great impact on the system's stability. When the microgrid operates in grid connected mode, frequency is determined by the main grid. In this operation mode, the stability problems mainly involve the stability of individual components such as Distributed Energy Resources or local loads [6]. Contrary to that, in microgrids which are operating in isolated mode, the system frequency is no longer kept up by the main grid, so the various DERs (Distributed Energy Resources) must maintain it in a tolerable range. Additionally, in islanded microgrids the relatively low short circuit capacity poses a big concern, because small changes in the configuration can cause large deviations in voltage and frequency in such cases [7]. Hence it can be said that the microgrid operation in islanded mode is even more demanding than operation in traditional power systems.

The stability challenges of microgrids significantly differ from challenges in traditional power systems. One root of these dissimilarities is the considerable difference in size. Additionally, in microgrids the feeders are comparably short and often operated at medium voltage [8]. This results in a lower reactance to resistance ratio in microgrids. Hence, resulting from the dynamic performance and the mathematical relationships between voltages, active and reactive power flows are different than in large utility grids [9].

Microgrids also have a significantly lower inertia because the power is supplied by DERs and comparably small synchronous machines, what makes the question of stability even more complicated. Virtual Inertia is widely studied in order to mitigate these issues - in [9] we can see an example for this.

Besides the considerably lower inertia in microgrids, another important characteristic is the high uncertainty in the microgrid system, which arises because of the small

size of the grid, the lower number of loads and the intermittent and uncertain nature of the RES (Renewable Energy Sources) - such as wind turbines [10].

Possibly the most significant difference concerning stability analysis lies in the loading, since the loading in microgrids is typically unbalanced, while conventional stability analysis techniques and models assume a balanced system [7] [11].

Originating from the structural differences between microgrids and conventional power grids, there are unique stability characteristics which can be observed in microgrids. For example, in conventional power systems, voltage stability problems occur more frequently than frequency troubles, whereas in islanded microgrids, the maintaining of frequency is a major challenge due to the system inertia and RES. There are also certain phenomena in conventional grids, like inter-area oscillation and voltage collapse, which have not been observed in microgrids [7].

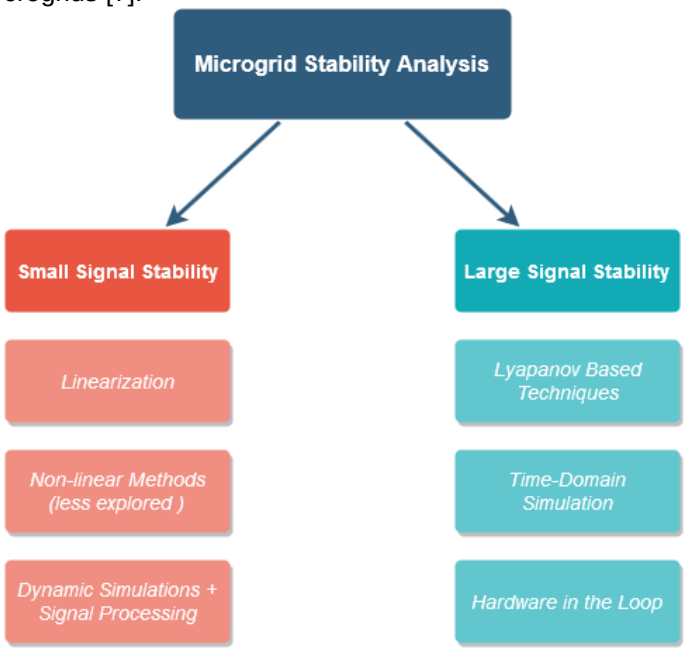


Figure 1. Illustration of the microgrid stability analysis classification

In microgrids, system variables are strongly coupled, resulting in the instability manifesting in all system variables. Because of this strong coupling, it is not practical to label the instability events as “voltage instability” or “frequency instability” based only on one system variable. Instead stability in a microgrid is usually categorized according to the cause of the instability, the size of the perturbance, the physical components that are involved in the process, the time-span of the instability event, and the methodology used for analyzing and predicting the instability [7]. In our work, we chose the classification according to the size of the perturbance into small signal and large signal stability. This provides an opportunity for a better comparison with the conventional stability analysis methods. In Figure 1, we can see an illustration of the categorization of the most common stability analysis types according to small signal and large signal stability.

3. SMALL SIGNAL STABILITY

Small signal stability, also often referred to as steady state stability, deals with stability problems which occur after relatively small disturbances. These kinds of small disturbances are constantly present in electrical power grids, since they can be caused by load fluctuation, switching operations, etc. [12]. In a microgrid, the small signal disturbances are associated with feedback controllers, continuous load switching, the power limit of the micro sources, etc. [13].

Small signal stability in microgrids – just like in the large electric power systems – is mostly analyzed with the help of linearization (Eigenvalue and impedance analysis) but there are also some, for now less explored non-linear methods (e.g. bifurcation theory) [13].

Traditionally, small signal stability can be studied through eigenvalue analysis by developing state space models of the system [7]. It has also been observed that critical low-frequency modes are characterized by the tuning of inverters’ outer power sharing control loops, while critical high-frequency modes are influenced by the inverters’ inner voltage and current control loop [14].

Because microgrids are generally unbalanced networks, the development of state-space models is quite a complex task. This is why, for the steady state stability analysis of microgrids, a combination of dynamic simulations and signal processing methods has proven to be more effective (like for example the Prony method) [9].

Another important difference between the traditional power systems and microgrids is the large inertia and infinite bus of traditional systems, so small disturbances are less likely to substantially perturb the system whereas in microgrids these are more likely to cause significant problems in operation [7].

4. LARGE SIGNAL STABILITY

If we are dealing with system stability problems caused by large disturbances, we are talking about large signal stability issues, also called transient stability problems. Large disturbances in microgrids are mainly linked to short-circuits, unplanned transitions from grid-connected to islanded mode, and loss of generation units. Such disturbances can cause undamped oscillations, power swings, as well as large frequency and voltage excursions in the system [7].

A significant difference between the classical large power systems and microgrids is the possibility of islanding (isolation) in microgrids. If the disturbance causes an islanded mode of the microgrid, the critical clearing time (CCT) can help determine the relative stability. In the classical large power systems, equal area criterion analysis is usually used to determine the CCT. But this technique cannot be used in microgrids, since stability problems in microgrids are not directly linked to synchronism

problems among DERs. If the islanding in the microgrid was planned, it will result in less serious voltage and frequency excursions because the DERs set-points were already calculated and adjusted before the islanding [7].

The transient stability analysis in microgrids can usually be classified into the following three categories: Lyapunov based techniques, time-domain simulations, and hardware in the loop studies [9].

With the Lyapunov based techniques the proper representation of nonlinear system components and the large perturbations sustained by renewable energy sources is possible [9]. Maybe the most fundamental advantage of the Lyapunov based techniques is the possibility to estimate the region of attraction of stable operating points [2]. In the utility grid, the main problem of the Lyapunov based techniques lies in the complexity of the method. However, in microgrids there is a much smaller number of generators and buses which makes the system more manageable in regard of a Lyapunov based stability analysis [2].

Time-Domain simulation based stability analysis has several advantages, including high accuracy and validity (even more than Lyapunov based methods), as well as precise stability boundaries [7]. The disadvantages of the Time-Domain based methods lie in the computational intensity, and usually many such simulations are needed to ensure stability for a wide number of initial conditions and various disturbances [7]. For the time-domain simulations usually Electro-Magnetic Transient (EMT) tools are used, but in large microgirds these tools might prove to be unpractical because of the high computational complexity [9]. Transient Stability (TS) tools, also called electromechanical transient tools, may be an alternative solution for the computational complexity, but they were originally developed for balanced networks, so adjustments are needed to make them suitable for unbalanced microgrid networks (like for example adjustment with dynamic phasors [15]) [7].

Real-time HIL (Hardware in the Loop) simulations are considered to be an advanced and effective tool for stability analysis in microgrids [7]. HIL tools are especially effective in the analysis of DER components and their controls [7]. These tools can be categorized into two groups: Controller Hardware in the Loop (CHIL) and Power Hardware in the Loop (PHIL). With the Controller Hardware in the Loop methods, a hardware controller can be tested while it is connected to a Digital Real Time Simulator (DRTS) simulated microgrid network. The CHIL simulations can show the performance of control algorithms in realistic conditions such as time delays and noise [7]. In Power Hardware in the Loop methods the hardware under test (HuT) is connected to the real-life system simulated by the DRTS wich allows testing under realistic conditions. Because the simulated system can be easily and quickly changed, the hardware's impact on the system under various circumstances can be tested conveniently.

5. MICROGRIDS AROUND THE GLOBE

There are various different microgrid projects all around the globe. We can find them in Europe, China, Japan, USA, Australia, Antarctica etc. Some have real life applications while others are used only for research. Some are established as a plant and some are virtually modelled [17].

Different regions can have different goals and focuses. For example, while in Japan the focus is on the reduction of the environmental impact of the electricity supply, in the USA the focus lies more on the reduction of investment in plant equipment and cost [18]. Microgrids in Asia however are mostly for remote application, where they focus on generating whatever amount of renewable energy is available for a reliable power system while maintaining stability.

To mention some of the bigger projects, we could name the following facilities [17]:

British Columbia Institute of Technology's microgrid testbed which is a scaled down microgrid used to be presented to utility companies and researchers.

Kyoto eco-energy microgrid testbed at Kythnos Island in Japan which is used to aid the existent grid.

The residential microgrid testbed at Albuquerque, New Mexico by Shimizu Institute of Technology which is a joint project of the USA and Japan.

Microgrid testbed in University of Seville, Spain, which is mainly solar energy based and uses an electrolyzer placed in the main power distribution line to overcome the unpredictable nature of the energy source. When more power is generated than needed, it is stored in the form of hydrogen which can be used when necessary [17].

We can see that microgrids around the world are often utilized, but also researched – this is no wonder, since they could very well be the cornerstone of the power distribution grid of the future.

6. SUMMARY

To summarize, there are considerable differences between the traditional and microgrid stability challenges. These mainly arise from the differences in size, inertia, loading and operating modus (grid connected/islanded).

Because of the strong connection between the microgrid variables, a classification into small and large signal stability is preferable for microgrids.

Small signal stability in microgrids as well as in the traditional grids is usually analyzed with the help of linearization. We have to note that small signal stability is more emphasized in microgrids because in these kinds of systems small perturbations are more likely to cause significant problems. Meanwhile, large signal stability analysis in microgrids can be categorized into three groups: Lyapunov based techniques, time-domain simulation-based stability analysis and real-time HIL simulations.

Some traditionally used methods are not suitable to be utilized in microgrids (like equal area criterion)

whereas other methods maybe more effective in microgrids than in traditional grids (like Lyapunov based techniques). This is why microgrid stability is fertile ground for further research.

7. REFERENCES

[1] ***Ilić, M., Rupamathi J., and Xia M.:*** *Modeling and analysis methods for assessing stability of microgrids.* IFAC-PapersOnLine 50.1 (2017): 5448-5455.

[2] ***Kabalan, M., Pritpal S., Dagmar N.:*** *Large signal Lyapunov-based stability studies in microgrids: A review.* IEEE Transactions on Smart Grid 8.5 (2016): 2287-2295.

[3] ***Morris, G. Y., Abbey, C., Joos, G., Marnay, C.:*** *A Framework for the Evaluation of the Cost and Benefits of Microgrids.* No. LBNL-5025E. Lawrence Berkeley National Lab.(LBNL), Berkeley, CA (United States), 2011.

[4] ***Morris, G. Y., Abbey, C., Wong, S., Joós, G.:*** *Evaluation of the costs and benefits of microgrids with consideration of services beyond energy supply.* 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. IEEE, 2012.

[5] ***Jin M., Feng W., Marnay C., & Spanos C.:*** *Microgrid to enable optimal distributed energy retail and end-user demand response.* Applied Energy 210 (2018): 1321-1335.

[6] ***Hatziargyriou, N., Van Cutsem, T., Milanović, J., Pourbeik, P., Vournas, C., Vlachokyriakou, O., Singhvi, V.:*** *Contribution to bulk system control and stability by distributed energy resources connected at distribution network* (No. PES-TR22). IEEE. (2017).

[7] ***Farrokhabadi, M., Cañizares, C. A., Simpson-Porco, J. W., Nasr, E., Fan, L., Mendoza-Araya, P. A., ... & Wies, R. W.:*** *Microgrid stability definitions, analysis, and examples.* IEEE Transactions on Power Systems, 35(1), 13-29, (2019).

[8] ***Li, C., Chaudhary, S. K., Savaghebi, M., Vasquez, J. C., & Guerrero, J. M.:*** *Power flow analysis for low-voltage AC and DC microgrids considering droop control and virtual impedance*. IEEE Transactions on Smart Grid, 8(6), 2754-2764., (2016)

[9] ***Farrokhabadi M., Canizares CA., Simpson-Porco JW., Nasr E., Fan L., Araya PA Mendoza, Tonkoski R., Tamrakar U., Hatziargyriou N., Lago, D., et al.:****. Microgrid stability, definitions, analysis, and modeling.* IEEE Power and Energy Society, Tech. Rep. PES-TR66 (2018).

[10] ***Olivares, D. E., Mehrizi-Sani, A., Etemadi, A. H., Cañizares, C. A., Iravani, R., Kazerani, M., ... & Jiménez-Estévez, G. A.:*** *Trends in microgrid control. IEEE Transactions on smart grid,* 5(4), 1905-1919., (2014).

[11] ***Lidula, N. W. A., & Rajapakse, A. D.:*** *Voltage balancing and synchronization of microgrids with highly unbalanced loads.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 31, 907-920. (2014).

[12] ***Gajduk, A., Todorovski, M., & Kocarev, L.:*** *Stability of power grids: An overview.* The European Physical Journal Special Topics, 223(12), 2387-2409. (2014**).**

[13] ***Wang, S., Su, J., Yang, X., Du, Y., Tu, Y., & Xu, H.:*** *A review on the small signal stability of microgrid.* In 2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia) (pp. 1793-1798). IEEE. (2016).

[14] ***Leitner, S., Yazdanian, M., Mehrizi-Sani, A., & Muetze, A.:*** *Small-Signal Stability Analysis of an Inverter-Based Microgrid with Internal Model-Based Controllers.* IEEE Transactions on Smart Grid 9.5 (2017): 5393-5402.

[15] ***Elizondo, M. A., Tuffner, F. K., & Schneider, K. P.:*** *Simulation of inrush dynamics for unbalanced distribution systems using dynamic-phasor models.* IEEE Transactions on Power Systems, 32(1), 633-642. (2016).

[16] ***Kotsampopoulos, P., Kapetanaki, A., Messinis, G., Kleftakis, V., Hatziargyriou, N.:*** *A power-hardware-in-the-loop facility for microgrids.* Int. J. Distrib. Energy Resour. Technol. Sci. Publishers, 9(1), 89-104 (2013).

[17] ***Hossain, E., Kabalci, E., Bayindir, R., & Perez, R.:*** *Microgrid testbeds around the world: State of art.* Energy Conversion and Management*,* 86*, 132-153.* (2014).

[18] ***Xiao, Z., Wu, J., & Jenkins, N.:*** *An overview of microgrid control.* Intelligent Automation & Soft Computing*,* 16*(2), 199-212.* (2010).

Bereczki Bence, Dr. Hartmann Bálint

Aktív rendszermenedzsment a középfeszültségű elosztóhálózaton

Az elosztott energiatermelő és -tároló egységek beépített kapacitásában megfigyelhető exponenciális növekedés, valamint a DSM és az e-mobilitás terjedésével egyre nagyobb jelentőséggel bíró aktív fogyasztói jelenlét több kérdést is felvet a villamosenergia-rendszer üzemeltetői felé. Tanulmányunkban bemutatjuk az ezen új típusú termelők és fogyasztók integrációját célul kitűző TSO-DSO együttműködés alapkövének számító aktív rendszermenedzsment fogalomkörét, annak főbb eszközeit. Számítógépes szimuláció segítségével megmutatjuk, hogy milyen hatással van a középfeszültségű elosztóhálózatra az elosztott energiatermelők és az aktív fogyasztók nagy mértékű jelenléte, majd definiáljuk a lehetséges megoldásokat a jelentkező feszültségproblémákra.

The exponential growth in the installed capacity of distributed generation and storage units and the increasing presence of DSM and e-mobility, which are becoming increasingly important for consumers, raise a number of issues for power system operators. In our study, we present the concept of active system management, which is the cornerstone of TSO-DSO cooperation and its main tools. Using computer simulation, we show the impact of the large presence of distributed energy producers and active consumers on the medium-voltage distribution network, and then define the possible solutions for the presented voltage problems.

Kulcsszavak: **aktív rendszermenedzsment, megújuló energiaforrások, feszültségszabályozás**

1. BEVEZETÉS

Az elosztott energiatermelő és –tároló egységek rohamosan növekedő beépített kapacitásával teljes átalakuláson megy keresztül a villamosenergia-rendszer. Míg a hagyományos villamosenergia rendszerben a rendszerirányítók (átviteli hálózatok esetében a TSO-k, elosztóhálózatok esetében a DSO-k) különböző módszerekkel (terhelésbecslés, menetrendek, stb.) próbálják megismerni a fogyasztók szokásait, és a lehető legjobban lekövetni azokat a termeléssel, az újonnan megjelenő technológiák, valamint fogyasztási szokások – a háztartási méretű kiserőművek és energiatárolók mellett a fogyasztói oldali befolyásolás, vagyis a demand-side management (DSM) is egyre jelentősebb szerepet kap – megfelelő integrációja új megoldásokért kiált. Az ENTSO-E és az E-DSO közösen készített jelentése ezekre a kihívásokra keresi a választ, és próbálja felvázolni a lehetséges megoldásokat. [1]

Az együttműködés célja, hogy ezeket az úgynevezett elosztott flexibilitási erőforrásokat (distributed flexibility resources, DFR) a TSO-k és DSO-k egy közös beszerzési platformon keresztül használhassák fel saját hálózataik különböző szabályozási-, kiegyenlítési-, terhelésoptimalizálási igényeinek kielégítésére. A megfelelő piaci környezetben ilyen módon felértékelődik a végfelhasználók és a DFR tulajdonosok szerepe. [2]

A villamosenergia-rendszerben a flexibilitás az aktív beavatkozás lehetőségét jelenti. Jelenleg is rengeteg olyan eszköz csatlakozik a TSO-k és DSO-k hálózataira, mely képes flexibilitási szolgáltatásokat kínálni, ezáltal DFR-nek tekinthető: a konvencionális erőművek mellett a DSM-re alkalmas ipari és lakossági fogyasztók, energiatároló egységek, vezérelhető megújuló energiaforrások stb. A felsorolt elosztott flexibilitási erőforrásoknak Magyarországon is nagy szerepe lehet a jövőben, hiszen az elmúlt években tapasztalható exponenciálisan naperőműkapacitás-növekedés nem látszik csillapodni, sőt, a Nemzeti Energia és Klímaterv, valamint a Magyar Energetikai és Közműszabályozási Hivatal (MEKH) modellje szerint 2030-ra a teljes hazai beépített PV kapacitás túllépheti a 7 000 MW-ot. A MEKH 2016-ban – felismerve, hogy a DSO-k előtt álló kihívások egyik leghatékonyabb módja az energiatárolók alkalmazása – engedélyezte az 500 kW alatti csatlakozási teljesítményű elektromos energiatárolók elosztóhálózatra való telepítését. Bár a DSO-k által tulajdonolt energiatárolók a DSO-kra vonatkozó irányelveknek megfelelően csak a műszaki paraméterek javítására alkalmazhatók – a legkisebb költség elve szerint –, az akkumulátoros energiatárolók jelenléte az akkumulátorpiac fellendítése mellett más piaci szereplőket (például ipari fogyasztókat) is ösztönözhet a beruházásra. A megfelelő DFR kapacitások tehát rendelkezésre fognak állni hazánkban is, csupán a megfelelő piaci integrációról kell gondoskodni. [3]

2. ASM

2.1. ASM lehetőségek

Az aktív rendszermenedzsment (Active System Management – ASM) olyan stratégiák és eszközök összessége, melyek segítségével a DSO-k és TSO-k a jövő villamosenergia-rendszerének költséghatékony és biztonságos üzemeltetését biztosíthatják. Ide tartozik többek között az okos- és digitalizált hálózatok fejlesztése és alkalmazása, valamint a különböző időbeli és területi eloszlású rendelkezésre álló kapacitások effektív tervezési és előrejelzési folyamatai. Kulcselem a fogyasztást és termelést befolyásolni képes flexibilitási-eszközök jelenléte, melyek a rendszer megfelelő működését veszélyeztető tényezők kezelésére használhatók, ezáltal biztosítva a megújuló- (Renewable Energy sources – RES) és elosztott energiaforrások (Distributed Energy Resources – DER) megfelelő műszaki, valamint piaci integrációját. [1]

Az utóbbi években megfigyelhető energia-átmenet jelentős mennyiségű volatilis termelésű megújuló energiatermelő egység telepítésével járt, melyek legnagyobb részt a kis- és középfeszültségű elosztóhálózatra csatlakoznak. Ezen termelők hatására a konvencionális, a rendszerek tervezésekor használt energiaáramlási-irányok kedvezőtlen körülmények között megfordulhatnak, míg az elosztóhálózaton megjelenő termelőegységek miatt jelentkező feszültségemelkedés következtében a pozitív és negatív irányú szabványos feszültségszintek átlépése is kritikus lehet egy-egy csatlakozási pont esetében. Az elosztott termelők megjelenése új lehetőségeket kínál az aktív rendszermenedzsment szempontjából az elosztóhálózatokon, míg az ICT-technológiák fejlődése és költségcsökkenése lehetővé teszi a DSO-k számára, hogy jelentősen javítsák hálózataik kommunikációs infrastruktúráját. Ezek a tényezők egyszerre jelentik a hatásos- és meddő teljesítmények elosztóhálózati szabályozásának lehetőségét és szükségességét. Az elosztott termelőknek hasonló lehetőségekkel kell rendelkezniük, mint az átviteli hálózatra csatlakozó egységeknek, hogy az átviteli hálózat szabályozásában, valamint a szűkkeresztmetszet-kezelésében részt véve növeljék értéküket és jövedelmüket. Az európai szabályozásra, valamint a Tiszta Energia Csomagra vonatkozó legfrissebb javaslatok támogatják ezeket az újonnan megjelenő tevékenységeket, ahogy azt is, hogy a DSO-k kiegyenlítési, valamint nem frekvenciaszabályozási célból történő rendszerszintű szolgáltatásokként felhasználják ezeket az elosztott egységeket. A rendszerszintű szolgáltatásokat az alábbiak szerint csoportosíthatjuk:

- frekvenciaszabályozás (szabályozási tartalékok, teljesítmény-frekvencia szabályozás);
- szűkkeresztmetszet-kezelés (congestion management, CM) a határmetszékeken, valamint a TSO-k és DSO-k belső hálózatán;
- nem frekvenciaszabályozási célból történő rendszerszintű szolgáltatások (feszültségszabályozás, black-start, stb.).

Az újonnan megjelenő technológiák az ASM segítségével felhasználhatók ezekre a célokra, amennyiben adottak a megfelelő tervezési folyamatok, a hálózat megfelelő megfigyelhetősége és irányíthatósága, a szükséges adatcsere és a flexibilitási szolgáltatásokat nyújtó piaci szereplőkkel folytatott interakció. [1]

2.2. ASM eszközkészlet

A lehető leghatékonyabb és megfelelően koordinált villamosenergia-rendszer üzemeltetéséhez a DSO-knak és a TSO-knak az alábbiakat magába foglaló ASM eszközkészletre van szüksége:

- Hálózati elemek felhasználása: a hálózati topológia megváltoztatása az energiaáramok (hatásos és meddő) megváltoztatására és ezáltal egy kívánatosabb rendszerállapot elérésére.
- Tarifa megoldások: a piaci tarifák felhasználása az árakra reagálni képes implicit flexibilitás aktiválására. Ezeknek a tarifáknak számos formája lehet, és olyan tényezőket tartalmazhatnak, mint például idő, irány, kapacitás és helyadatok.
- Piaci alapú megoldások: az energiaáramok minden irányú megváltoztatására képes explicit flexibilitási termékek piaci aktivációja.
- Harmadik féllel való megállapodás: megállapodás bizonyos, a hálózatra csatlakozó felhasználókkal az egyes szolgáltatások biztosításáról.
- Szabályozás-alapú megoldások: a végső esetben, illetve vészhelyzetben érvényes műszaki előírásoknak megfelelő szabályozás-alapú megszorítások alkalmazása.

Fontos megjegyezni, hogy a hálózaton jelentkező problémák hagyományos kezelési módja a hálózat megerősítése, melynek továbbra is fontos szerepe lesz, különösen azokban az esetekben, ahol a hálózati elemek élettartama a végéhez közeledik, illetve ahol nagymértékű terhelés-növekedés várható az egyre jelentősebb elektrifikáció következtében. Az optimális megoldás sok tényezőtől függ, így mindig érdemes összevetni a hálózati elemek cseréjének és a topológia megváltoztatásának lehetőségét a hálózaton jelen lévő eszközök flexibilitási potenciáljával. Általánosságban elmondható, hogy az időszakos, rövidebb idejű túlterhelődések kezelése a flexibilitási eszközök aktiválásával, míg a prolongált terhelésnövekedés a hálózat megerősítésével kezelhető hatékonyan. [1]

3. FESZÜLTSÉGPROBLÉMÁK KÖF HÁLÓZATOKON

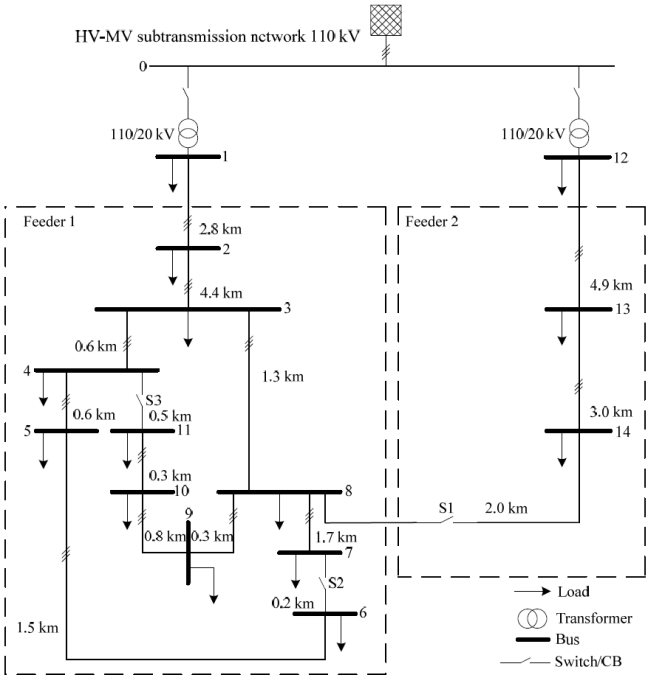
Az elosztói engedélyesek által szolgáltatott villamos energia egyik legfontosabb műszaki paramétere a feszültség amplitúdójának nagysága. Mivel a középfeszültségű, valamint a kisfeszültségű elosztóhálózatok alapesetben sugarasan üzemelnek, így az előírások logikusan a tápponttól legmesszebbi, KiF oldali fogyasztói végpontokra vonatkoznak. A névleges feszültségértéktől való megengedett eltérést több dokumentum szabályozza kisfeszültségű hálózatok esetén, ezek közül a legfontosabb az MSz EN 50160 szabvány, mely szerint normál üzemi körülmények között, a feszültségkimaradásokat figyelmen kívül hagyva, a tápfeszültség 10 perces átlagos effektív értékei 95%-ának bármely egyhetes időszakban az U_n ±10% tartományban, valamint a 100%-ban U_n +10%/-15% tartományban kell lennie. A Magyar Energetikai- és Közműszabályozási Hivatal a szabványhoz képest szigorúbb értékeket, +8/-7,5%-ot határoz meg. [4]

Mivel a KöF/KiF transzformátorok áttétele nem állítható üzem közben, az előírt értékek szempontjából rendkívül fontos, hogy ezen táppontok KöF oldali feszültsége megfelelő értékek közé legyen szabályozva.

Ahhoz, hogy a gyakorlatban is vizsgálni tudjuk a felmerülő a nagy mértékű DER kapacitás hatására jelentkező feszültségproblémákat és a lehetséges beavatko-

zási módokat, számítógépes elosztóhálózati modellt alkottunk. Ennek a modellnek az alapjául a CIGRÉ (Conseil International des Grands Réseaux Électriques, vagyis Nagy Elektromos Rendszerek Nemzetközi Tanácsa) által 2014-ben kiadott Benchmark Systems for Network Integration of Renewable and Distributed Energy Resources című tanulmánya adta. A kiadvány készítői azt vizsgálták, hogy milyen hatással van a nagy mértékű megújuló- és elosztott energiaforrás jelenléte különböző hálózatokon. A tanulmány során nagy-, közép- és kisfeszültségű hálózatokat is vizsgáltak Észak-amerikai és európai konfigurációban egyaránt. Az egyes konfigurációkhoz különböző esettanulmányok is készültek. [5]

Tanulmányunk elkészítéséhez a középfeszültségű európai hálózatmodellt választottuk ki, melyet a dokumentumban megadott hálózati paraméterek alapján DIgSILENT Power Factory szoftverkörnyezetben hoztunk létre.



1. ábra A vizsgált hálózati topológia [5]

4. 4. SZIMULÁCIÓ

A felépített modellen sztochasztikus szimulációk sorozatát futtattuk le. A sztochasztikus szimuláció célja egy projekció létrehozása véletlenszerű változók segítségével, melyeket bizonyos valószínűségi eloszlások jellemeznek. A szimuláció nagyszámban megismételt futtatásával olyan projekció-halmaz áll rendelkezésünkre, melynek eloszlása jól mutatja, hogy bizonyos események milyen valószínűséggel következnek be.

A szimuláció során determinisztikus (hálózati impedanciák, hálózati topológia, fogyasztók és termelők névleges teljesítménye), és sztochasztikus (idősoros feszültség-, fogyasztási- és termelési adatsorok) változók is felhasználásra kerültek.

A modellezés során különböző 24 órás periódusokat vizsgáltunk. Egy darab 24 órás periódusban 96 db load-flow számításra került sor, így mind a bemeneti, mind a kapott eredmények negyedórás bontású profilok voltak. A későbbiekben részletezett valószínűségi változók segítségével 500 db 24 órás periódust szimuláltunk, ami valamivel kevesebb, mint másfél évnyi adatsornak felel meg. Az egyes paraméterek ennek megfelelően az év minden szakaszából egyformán kerültek figyelembevételre.

A szimulációt a DIgSILENT Power Factory saját programozási nyelvén, dpl szkript formájában valósítottuk meg.

4.1. Bemeneti adatok

A szimuláció során alkalmazott feszültség-, valamint fogyasztói- és termelői profilok a legtöbb esetben valós mérési eredmények alapján kerültek meghatározásra.

A modell mögöttes hálózati elemének feszültségét minden load-flow futtatás előtt a feszültség alapjel változtatásával állítottuk. A felhasznált feszültségprofilok valós 120 kV-os főelosztóhálózati mérések közül kerültek kiválasztásra véletlenszerű változók segítségével. A 110 kV-os és 120 kV-os feszültségszintek közti eltérés nem okozott problémát, mivel a feszültség alapjelet viszonylagos egységben adtuk meg.

A lakossági fogyasztók KöF hálózat esetében KöF/KiF transzformátorkörzeteknek feleltethetőek meg. Ennek értelmében a lakossági fogyasztói profilok ilyen, KöF/KiF transzformátor összesített fogyasztási profilok közül kerültek véletlenszerűen kiválasztásra. A profilokat a maximális értékkel normáltuk, az így kapott százalékos értékek, valamint a fogyasztók 1. táblázatban megadott névleges teljesítményei és teljesítménytényezői segítségével pedig megadható volt a lakossági fogyasztók teljesítményfelvétele minden vizsgált negyedórában.

1. táblázat Fogyasztók adatai [5]

Sín	S [kVA]		cosφ	
	Lakossági	Üzleti/ipari	Lakossági	Üzleti/Ipari
1	15300	5100	0,98	0,95
2	-	-	-	-
3	285	265	0,97	0,85
4	445	-	0,97	-
5	750	-	0,97	-
6	565	-	0,97	-
7	-	90	-	0,85
8	605	-	0,97	-
9	-	675	-	0,85
10	490	80	0,97	0,85
11	340	-	0,97	-
12	15300	5280	0,98	0,95
13	-	40	-	0,85
14	215	390	0,97	0,85

Az ipari fogyasztók fogyasztási profiljának meghatározásához az ELMŰ-ÉMÁSZ 2020-as évre kiadott fo-

gyasztói terhelési profiljait használtuk fel. A profilok között A (hétköznap), B (szombat) és C (vasárnap) típusú profilok találhatóak az év minden hónapja esetében. Ennek megfelelően a szimulációhoz két valószínűségi változót határoztunk meg minden szimulált 24 órás periódus elején: egy 1-12 közti random változót, mely az adott hónapot, valamint egy 1-7 közti random változót, mely az adott nap típusát hivatott kijelölni. A profilokat a maximális fogyasztás értékével normáltuk, így minden negyedórára százalékos értéket kaptunk. Ezeket a százalékos értékeket a szimuláció során a 3. táblázatban megadott névleges teljesítménnyel beszorozva megkaptuk az adott negyedórás fogyasztási értékeket. A teljesítménytényező értéke változatlan maradt. Az adathalmaz korlátossága miatt adott napon a modellben minden ipari/üzleti fogyasztóhoz ugyanazt a fogyasztási profilt rendeltük hozzá. [6]

A modellben egy db 1,5 MW teljesítményű szélerőművi, valamint több, kisebb naperőművi csatlakozási pont található. A szélerőmű esetében nem kerültek külön figyelembevételre meteorológiai paraméterek, ehelyett egy több, mint 500 db szélerőművi profilt tartalmazó, különböző időszakokból származó adatbázisból kerültek véletlenszerűen kiválasztásra az egyes profilok. Az adatsorokat ebben az esetben is a maximális értékkel normáltuk.

A naperőművek esetében a korábban bevezetett változók kerültek újból felhasználásra. A termelési profilok két típusú, napos, illetve felhős napokról származó adatsorok közül kerültek véletlenszerűen kiválasztásra. Egy-egy típus több, mint 1500 db normált termelési profilt tartalmaz. Az adott nap típusának meghatározásához a hónap változókat vettük segítségül, feltételezve, hogy jó eséllyel az év április elejétől szeptember végéig tartó szakaszában napos, míg a többi részében borús időjárásra számíthatunk.

A CIGRÉ által a vizsgálatok során használt egyéb elosztott termelők közül egyelőre csak a lakossági üzemanyagcellákat használtuk a modellben. Ezek üzemi termelését konstans névleges teljesítményt vettük fel, de jelenlétük nem változtatja jelentősen a modellben egyébként is uralkodó viszonyokat, hiszen összteljesítményük kevesebb, mint 50 kW. A modellezés során a CHP egységeket (összesen 522 kW), valamint az akkumulátorokat (összesen 800 kW) figyelmen kívül hagytuk. Ezeket az egységeket a későbbiekben fogjuk vizsgálni, mint a feszültségszabályozás lehetséges eszközeit.

2. táblázat Naperőművek adatai

Sín	P_{max} [kW]
3	500
4	500
5	500
6	500
8	500
9	500
10	1500
11	500

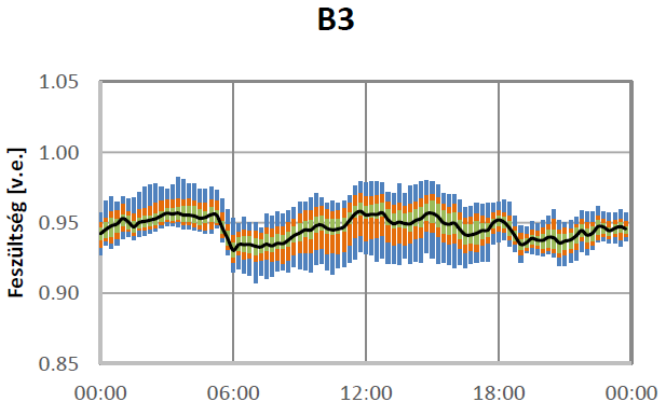
Ahhoz, hogy a beépített kapacitások tekintetében hazai viszonylatban releváns eredményeket kapjunk, a beépített napelemes kapacitás módosítására volt szükség. Ennek meghatározásához egyenes arányosságot alkalmaztunk: az 1. számú transzformátor terhelését megfeleltettük a magyar átviteli hálózat rendszerterhelésének, és a körzetben jelen lévő naperőműves kapacitás ezzel arányosan határoztuk meg. Az így kapott paramétereket a 2. táblázat tartalmazza. [7] [8]

5. SZIMULÁCIÓS EREDMÉNYEK

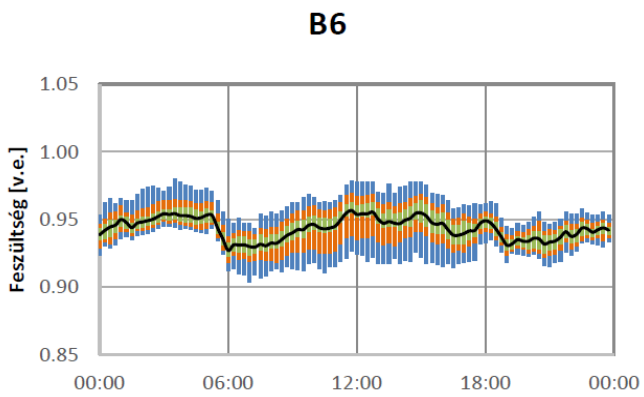
A szimuláció során a gyakorlatoknak megfelelően, valamint a CIGRÉ esettanulmányával megegyezően a gyűrűs kialakítású hálózatot a három bontási pontnál nyitva sugaras üzemben vizsgáltuk. A szimulációt a korábban részletezett módon összesen 500 db 24 órás periódusra végeztük el. A különböző paraméterek eloszlásának ábrázolására különböző eloszlásdiagramokat hoztunk létre, melyek esetén az alábbi színkód a mérvadó: fekete vonal jelöli a kapott eredmények átlagos értékét, míg a zöld sáv az események 50%-át, a narancssárga sáv a 90%-át, a kék sáv pedig 100%-át foglalja magába.

A szimuláció kiértékeléséhez exportáltuk a csomópontok feszültségeinek, valamint a transzformátorok és a fontosabb szakaszok hatásos-, illetve meddő teljesítményáramlásainak eloszlását.

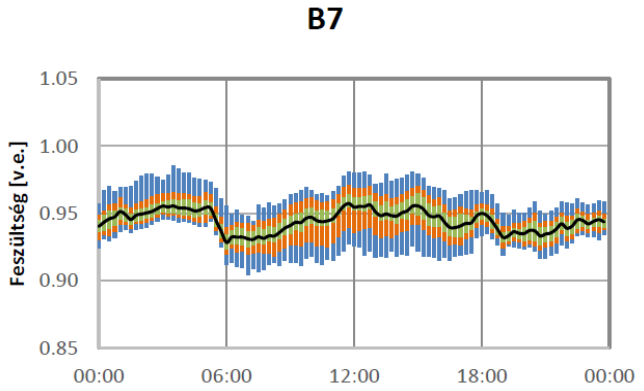
A 2.-5. ábrákon megfigyelhető a sugarasan működő középfeszültségű hálózat 1. transzformátorkörzethez tartozó három áramkörének végpontjainak feszültségeloszlása (B3 sín után két irányba ágazik a hálózat, majd B8 után még egy elágazás következik, így az egyes számú transzformátorhoz összesen három (B6, B7 és B11), vonal végi csomópont tartozik). Megfigyelhető, hogy B3 sínen már az éjjeli órákban is nagyjából 5%-os feszültségesés van jelen az induló feszültséghez képest; ennek oka, hogy a B1 számú sínen összesen nagyjából 20 MVA névleges teljesítményű lakossági és ipari fogyasztó az éjszakai órákban is jelentős mennyiségű teljesítményt vesz fel. A feszültségprofilokon reggel 6 óra körül megfigyelhető újabb feszültségesés a munkaidő kezdetével, valamint a lakossági fogyasztás megnövekedésével magyarázható, míg azt is láthatjuk, hogy az esti órákban újra megnövekszik a feszültség.



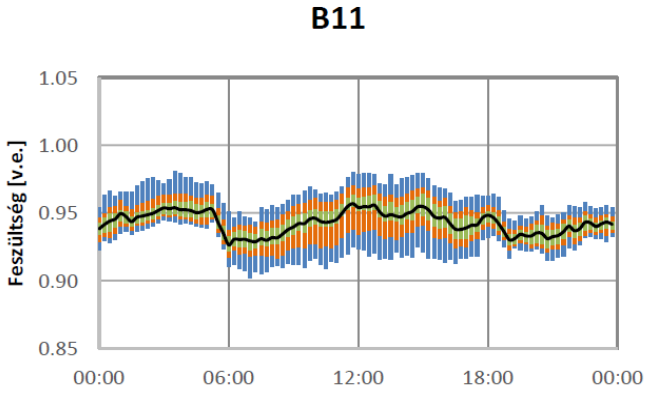
2. ábra B3 sín feszültségének eloszlása



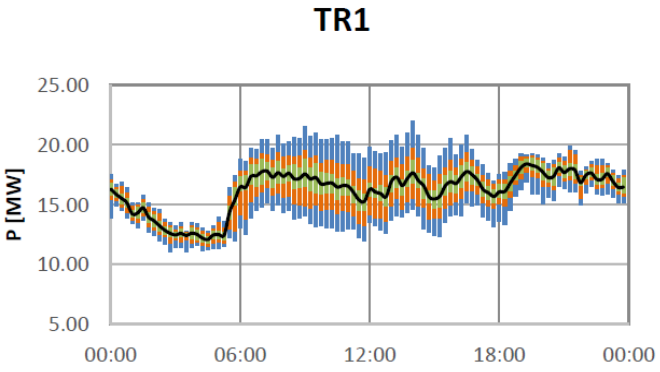
3. ábra B6 sín feszültségének eloszlása



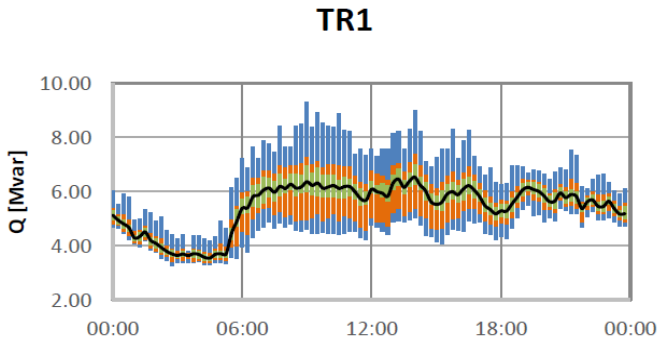
4. ábra B7 sín feszültségének eloszlása



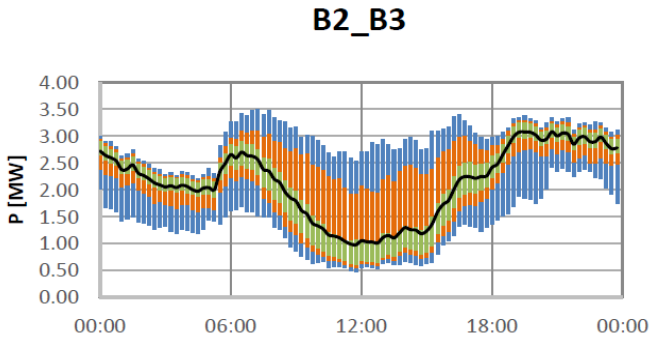
5. ábra B11 sín feszültségének eloszlása



6. ábra Hatásos teljesítmény áramlás TR1



7. ábra Meddőteljesítmény áramlás TR1



8. ábra Hatásos teljesítmény áramlás B2 és B3 sínek között

Ugyanezeket a folyamatokat figyelhetjük meg a 6.-7. ábrákon látható, hatásos- és meddőteljesítmény áramlásokat bemutató diagramokon: a reggeli órákban megnő a fogyasztás, majd az esti órákban fokozatosan újra lecsökken. Ha összehasonlítjuk az egyes számú transzformátor által szolgáltatott teljesítményt a B2 és B3 sínek között áramló teljesítményekkel, láthatjuk, hogy a körzet fogyasztásának mintegy háromnegyede valóban a B1 sínen történik.

A CIGRÉ modelljéhez képest megnövelt naperőművi kapacitás hatása egyértelműen látszik mind a feszültség-, mind a teljesítményprofilokon: a reggeli órákban emelkedik a feszültség, dél körül pedig sok esetben eléri az éjszakai szintet, vagy túl is lépi azt. Az egyes számú transzformátor esetén láthatjuk, hogy a csúcsigény lecsökkent, ami szépen megfigyelhető a B2 és B3 sínek közti szakasz teljesítményeloszlásán is: a nap közepén jelentősen lecsökken a vonal terhelése, az ábrán megjelenik az úgynevezett duck-curve.

6. FESZÜLTSÉGSZABÁLYOZÁSI LEHETŐSÉGEK

A vizsgálatok alapján láthatjuk, hogy a KöF hálózat feszültségszintjei szélsőséges esetekben megközelíthetik az MSZ 50160 szabvány szerinti határértékeket. Mivel a szabvány a fogyasztói végpontokra, tehát KiF csatlakozásokra ad követelményeket, a határértékek átlépésének vizsgálatához hozzá kell számolnunk a transzformátorokon, valamint a KiF hálózatokon eső feszültségeket. Könnyen belátható, hogy a vizsgált hálózat esetén is szükségünk lesz a feszültség szabályozására, melyet

legegyszerűbben a KöF hálózaton tehetünk meg. Az alábbiakban a teljesség igénye nélkül néhány KöF feszültségszabályozási módszer kerül bemutatásra.

6.1. Hagyományos feszültségszabályozási módszerek

A hálózatra kapcsolódó fogyasztók áramfelvétele feszültségesést okoz azok impedanciáján, így már a kezdetektől fogva szükség volt a hálózat feszültségét szabályozó beavatkozásokra.

A hálózatra kapcsolt söntkapacitások meddő teljesítményt injektálnak a hálózatba, így a megfelelő ponton elhelyezett kondenzátortelep csökkenti a feszültségesés nagyságát, csatlakozási pontján megemeli a feszültséget. A betáplált kapacitív meddőteljesítmény csökkenti továbbá az üzemi áramok képzetes részét, így a keletkező veszteséget is. [4]

Az úgynevezett terhelés alatt változtatható áttételű (OLTC – on-load tap-changer) transzformátorok NaF/KöF alállomásokon gyakran alkalmazott berendezések. Működésük alapját speciális fokozatkapcsolójuk adja, mely lehetővé teszi a kikapcsolás nélküli áttétel-változtatást, ezáltal a szekunder oldal feszültségének állítását. Az OLTC transzformátorok hátránya a drága telepítési költség mellett, hogy csak abban az esetben tudják kielégíteni a feszültségszabályozási igényeket, ha a KöF körzet összes egymással párhuzamos, sugarasan üzemelő áramkörén közel azonos a feszültségeltérések értéke, hiszen a fokozat állításával az összes áramkör induló feszültsége megváltozik. [9]

6.2. Meddőteljesítmény-szabályozás

Középfeszültségű hálózatok esetén a feszültségviszonyok jelentősen befolyásolhatóak a meddőteljesítményáramlás szabályozásával, mivel a hálózat impedanciájának nem elhanyagolható része induktív jellegű. Nagy mértékű inverteres csatlakozású elosztott termelői jelenlét esetén ezek a teljesítményelektronikai eszközök célszerűen felhasználhatóak meddőteljesítmény szolgáltatására a teljesítménytényező változtatásával. A teljesítménytényező szabályozásának több módját is megkülönböztetjük. [9]

Konstans teljesítménytényezős szabályozás esetén az inverterek beállított teljesítménytényezője fix érték, vagyis a termelő által szolgáltatott hatásos és meddő teljesítmény egyenes arányban áll egymással. A módszer előnye az egyszerűsége, hátránya, hogy nem történik visszacsatolás, így olyan esetekben is történhet meddőenergia betáplálás, amikor arra nincs szükség.

A teljesítménytényezőt szabályozhatjuk a betáplált hatásos teljesítmény, valamint a csatlakozási ponton mért feszültség függvényében is.

6.3. Hatásos teljesítmény korlátozása

A hatásos teljesítmény korlátozásának célja, hogy az elosztott termelők inverterei csak annyi hatásos teljesítményt táplálhassanak a hálózatra, amennyi nem emeli a csatlakozási pont feszültségét a megengedett értékek felé. Ez a gyakorlatban a legtöbbször azt jelenti, hogy egy előre meghatározott karakterisztika mentén lineárisan csökken a betáplált hatásos teljesítmény értéke a csatlakozási pont feszültségének függvényében. A módszer megítélése nem egyértelműen pozitív: alkalmazása komoly megtérülési problémákat okozhat, mivel az elosztott termelői rendszerek elszámolásának alapját a betáplált energia mennyisége képezi, mely a betáplálás korlátozásával csökken. Gyakori kritika még, hogy az EU energiapolitikai célkitűzéseivel szembemenően a megújuló termelők által termelt zöld energia jelentős része szabályozási célokra kerül felhasználásra. [10]

6.4. FACTS eszközök alkalmazása

A FACTS (Flexible AC Transmission Systems) eszközök olyan teljesítményelektronikai berendezések, melyek segítségével rendkívül gyors és hatékony módon oldhatóak meg meddőteljesítmény-, valamint feszültségszabályozási feladatok mind az átviteli, mint az elosztóhálózaton. [4]

A VSC (Voltage Source Converter, vagyis feszültség forrású konverter) felépítésének alapja egy háromfázisú hídkapcsolású konverter, mely a hálózatra csatlakoztatva tudja változtatni a feszültség amplitúdóját, szögét.

A STATCOM, vagyis statikus kompenzátor egy VSC alapú FACTS eszköz a hálózatra söntként kapcsolva, mely képes a megadott mennyiségű kapacitív-, illetve induktív meddő energia betáplálására. Ezt a kiadott feszültség- és az áramjel eltolásával képes megvalósítani, miközben a benne található kondenzátor-bank töltöttségi szintjét, és ezáltal feszültségét konstans szinten tartja. A kondenzátor-bank feladata, hogy DC oldalon stabilizálja a feszültségszintet. A STATCOM rendkívül gyors reakcióidejű megoldás. [11]

7. KONKLÚZIÓ

Tanulmányunkban ismertettük, hogy milyen kihívások várnak a közeljövőben az átviteli-, valamint elosztóhálózati rendszerirányítókra az elosztott termelőegységek terjedése és a fogyasztói szokások rohamos változása miatt, illetve, hogy milyen módon lehet az újonnan megjelenő technológiákat szolgáltatásokként a hálózatüzemeltetők javára fordítani az aktív rendszermenedzsment eszközeivel.

Ezek után kiválasztásra került egy olyan szolgáltatás, a feszültségszabályozás, melybe könnyedén bevonhatóak a flexibilitási termékek. Az elosztott termelők hatásának vizsgálatához számítógépes elosztóhálózati modellt készítettünk, mely alkalmas a kiválasztott rugalmassági szolgáltatás paramétereinek vizsgálatára. A modellen sztochasztikus szimulációkat végeztünk, hogy feltérképezzük a lehetséges feszültségviszonyokat.

A tanulmány folytatásaként modellezéssel fogjuk vizsgálni, hogy milyen beavatkozási lehetőségeink vannak a hálózaton, ezek külön-külön, illetve együtt milyen megoldásokat nyújthatnak, valamint, hogy térben és időben mi-

lyen prioritási sorrendet érdemes felállítani az egyes eszközök között a TSO-DSO együttműködés irányelvei mentén. A vizsgálatok eredményei alapján különböző use-case leírásokat fogunk készíteni, melyeket nemzetközi tapasztalatokkal fogunk összehasonlítani.

8. 8. IRODALOMJEGYZÉK

[1] TSO – DSO REPORT: *An Integrated Approach To Active System With The Focus On TSO – DSO Coordination In Congestion Management And Balancing*, ENTSO-E, E-DSO jelentés, 2019 április,

[2] *Distributed Flexibility and the value of TSO/DSO cooperation – A working paper for fostering active customer participation*, ENTSO-E kiadvány,

[3] *Magyarország Nemzeti Energia- és Klímaterve* (tervezet), 2018,

[4] **Dr. Dán András, Hartmann Bálint, Kiss Péter:** *Hálózati áramellátás és feszültségminőség*, jegyzet, 2012

[5] **Strunz, K. & Abbasi, Ehsan & Fletcher, Robert & Hatziargyriou, Nikos & Iravani, Reza & Joos, Géza**. (2014). TF C6.04.02: TB 575 - *Benchmark Systems for Network Integration of Renewable and Distributed Energy Resources*.

[6] *Fogyasztói terhelési profilok 2020*, ELMŰ-ÉMÁSZ Kereskedőváltás dokumentumtár

[7] *MAVIR rendszerterhelés adatok 2019. május 19. 0:00 és 2020. május 18. 23:45 között*,

[8] *Nem Engedélyköteles Kiserőművek És Háztartási Méretű Kiserőművek Adatai*, 2019

[9] **S. M. Mirbagheri, D. Falabretti, M. Merlo:** *Voltage Control in Active Distribution Grids: A Review and a New Set-Up Procedure for Local Control Laws*, 2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), Amalfi, 2018, pp. 1203-1208, doi: 10.1109/SPEEDAM.2018.8445387

[10] **T. Stetz, K. Diwold, M. Kraiczy, D. Geibel, S. Schmidt and M. Braun**: *Techno-Economic Assessment of Voltage Control Strategies in Low Voltage Grids*, in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 5, no. 4, pp. 2125-2132, July 2014.

[11] **X. Gao, R. Zhu, G. De Carne, M. Liserre:** *Comparison of voltage support services by means of STATCOM and smart transformer in medium voltage grid*, 2018 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), Wuhan, 2018, pp. 946-951, doi: 10.1109/ICIEA.2018.8397848.

Sinkovics Bálint, Táczi István,
Dr. Vokony István, Dr. Hartmann Bálint

Elosztóhálózati állapotbecslés gyakorlati implementálásának kérdései

A villamosenergia-rendszer állapotbecslésének célja valós mérési adatokon alapulva a pillanatnyi lehetséges üzemállapot leírása, mely hatékonyabb, stabilabb üzemvitelt eredményezhet. Jóllehet, az állapotbecslés alkalmazása az átviteli hálózaton régóta ismert, azonban az elosztóhálózaton annak sajátosságai (pl.: eltérő hálózati topológia, paraméterek, kiterjedés stb.) miatt legfeljebb demonstrációs projektek során került implementálásra. Jelen munka célja bemutatni az állapotbecslés elméleti alapjait, kiemelve az elosztóhálózaton jelentkező mérőszenzor elhelyezés probléma kérdéskörét.

State estimation techniques estimate the actual possible state of the grid based on limited dataset. While transmission system state estimation is a widely used tool in industry, various barriers of distribution system state estimation (DSSE) implementation (e.g. spatial complexity of the network) hinders widespread rollout of the technology. This paper introduces the theoretical basics and main issues of state estimation implementation especially the difficulties of optimal meter placement techniques.

Kulcsszavak: **állapotbecslés, elosztóhálózat, PMU, smart mérő**

1. BEVEZETÉS

Az utóbbi években elindult jelentős léptékű időjárásfüggő kiserőmű telepítési hullám hazánkban is új kihívások elé állítják mind az átviteli rendszerirányítót, mind az elosztóhálózat üzemeltetőit. A lokális energiatermelés megjelenésével a lehetséges üzemállapotok száma nő, mely a korábbi „passzív” hálózatüzemeltetés fejlesztését, annak valós idejű adatokra való helyezését és komplexebb irányítását igényli.

A decentralizált energiatermelés az energiaáramlások irányára, illetve a lokális energiaminőségi mutatókra is jelentős hatással van. Annak érdekében, hogy az átalakulással járó lokális hatások feltárhatóvá és kezelhetővé váljanak, az elosztóhálózatot egy flexibilis üzemvitelt növelő, intelligens megoldásokat alkalmazó hálózattá szükséges fejleszteni. Ennek egyik kulcsfontosságú eleme lehet a jövőben a hálózati állapotbecslés széleskörű alkalmazása. Az állapotbecslés célja hálózati mérési, és becslésekből generált pszeudo (mesterséges) mérési adatok segítségével adott hálózatrész állapotának, villamos jellemzőinek leképezése közel valós időben. Utóbbi, becslésből származó hálózati adatok dominanciája jelentősen rontja az állapotbecslés pontosságát, mely az alacsony automatizáltságú elosztóhálózat felműszerezésének szükségességét vetíti előre a közeljövőben.

A technológia elterjedéséhez napjainkban olyan fázisszög mérő rendszer (Phasor Measurement Unit (PMU)) állnak rendelkezésre, melyek időszinkronban képesek áram, feszültség és fázisszög értékeket nagy pontossággal továbbítani vezetékes kapcsolat nélkül. A mérőeszközök magas egységköltségéből és az elosztóhálózat nagy kiterjedéséből adódóan a megfelelő mérő elhelyezési stratégia megválasztása fontos gazdaságossági szempont.

Jelen munka célja bemutatni az állapotbecslés folyamatát annak funkcionális lépésein keresztül, kiemelve a megfigyelhetőségi (observability) kritérium teljesítéséhez szükséges mérőszenzor elhelyezési stratégiák kérdéskörét különösképpen a sugaras kisfeszültségű (KIF) topológiákra.

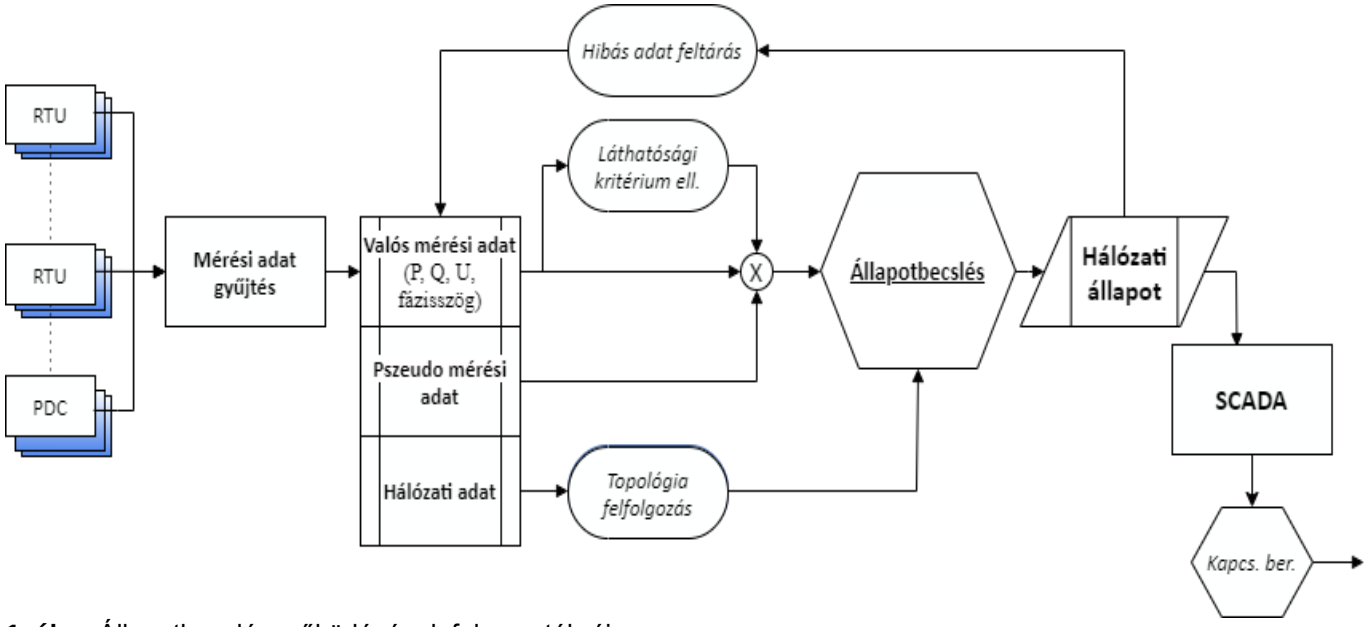
A nemzetközi irodalom áttekintése alapján bemutatásra kerülnek a legfontosabb mérő elhelyezési nehézségek, implementációs lehetőségek és a gyakorlati alkalmazhatóság területei. Ennek értelmében a 2. fejezetben bemutatásra kerül az állapotbecslés strukturális felépítése, az egyes modell elemeknél külön kiemelve az elosztóhálózati implementációs nehézségeket. A 3. fejezetben a nemzetközi irodalomban megjelenő mérő elhelyezési stratégiák és optimalizációs algoritmusok kerülnek ismertetésre, a konklúziók a 4. fejezetben kerülnek levonásra.

2. ÁLLAPOTBECSLÉS FOLYAMATA

A hálózat állapotleíró jellemzőinek megfelelő térbeli és időbeli részletességű ismerete, valamint a villamos törvényszerűségek alapján történő koherens hálózati állapotmodell rekonstruálása a gyakorlatban számtalan nehézségbe ütközik.

Az elosztóhálózat kiterjedéséből adódóan az elégséges szenzorhálózat beruházási költsége gazdaságossági szempontból megkérdőjelezhető lenne, nem említve azok korlátosságait (pontatlanság, rögzített változók kis száma, adatkommunikáció stb.). Az állapotbecslés lényege, hogy egy jellemzően iteratív, hibaminimalizációs folyamat során képes a meglévő, limitált számú adathalmaz alapján a hálózat lehetséges további villamos paramétereit a topológia mentén megbecsülni. A leggyakrabban használt ilyen eljárás a maximum likelihood becslést alkalmazó Weighted Least Squares (WLS) alapú algoritmus. A modell egy állapotvektort használ bemenő adatként, mely az egyes mérési pontok feszültség amplitúdóját és relatív fázisszögét tartalmazza. A kimenő adat hasonló formátumban a nem feltárt hálózatrészek állapotváltozóira tett becslésként értelmezhető.

Az állapotbecslési folyamat hibával terhelt, melynek egyes összetevői az 1. ábrán bemutatott ábra alapján kerülnek bemutatásra.



1. ábra Állapotbecslés működésének folyamatábrája

Az állapotbecslő algoritmus konvergens futásához szükséges adatstruktúra rendelkezésre állásához kezdetben a megfigyelhetőségi kritérium teljesítése szükséges. Amennyiben a helyszíni mérések száma, minősége vagy a redundancia foka nem éri el a konvergens állapotbecsléshez szükséges szintet pszeudo mérési adatok generálására is szükség lehet. Ez a folyamat olyan szintetikus mérési pontok létrehozását jelenti, mely a valós mérések közötti időbeli (pl. historikus adatok) és térbeli összefüggések alapján kerülnek generálásra. Előfordulhat, hogy a mérési adatok hibával terheltek, melyek feltárását a mérési redundancia minél magasabb foka segítheti elő. A cikk további részében ezen potenciális hibaforrások nemzetközi irodalomban megjelent kezelési, modellezési módszereinek áttekintése kerül bemutatásra.

3. ELOSZTÓHÁLÓZATI ÁLLAPOTBECSLÉS ALKALMAZÁSI KÉRDÉSEI

3.1. Mérő elhelyezési eljárások osztályozása

Adott elosztóhálózati terület állapotbecslésbe való bevonásához alacsony műszerezettség esetén a mérőszenzorok elhelyezését tervezni szükséges. Az állapotbecslő algoritmus futásához szükséges megfigyelhetőségi kritérium teljesítése mellett számos gyakorlati szempontból releváns aspektus kerülhet figyelembevételre.

Az optimális PMU elhelyezés meghatározása történhet beruházási költség minimalizálás [1], becslési pontosság maximalizálás [2, 3], fizikai implementációhoz kapcsolódó peremfeltételek [4] vagy ezek kombinációja [5] alapján is a telepítéssel elérendő célok ismeretében.

A szakirodalomban az optimális mérő elhelyezést meghatározó algoritmusok többségében egy lineáris, bináris, vagy vegyes-egészértékű programozási feladatként [6], [7], [8], [9] kerülnek leképezésre, de mohó- [12] és genetikus algoritmusok [10] [11] felhasználására is találhatunk példát.

Az egyes algoritmusok eredményességének validálása jellemzően mintahálózatokon (pl.: IEEE n-bus rendszerek) történik meg, mely a gyakorlati alkalmazhatóság szempontjából kérdéseket vet fel. A mintahálózatok jellemzően amerikai, vagy brit hurkolt hálózati topológiát reprezentálják, elsősorban közép- és nagyfeszültségen. Ezen eredmények a sugaras, így például a hazai kisfeszültségű hálózaton kis eredményességgel ültethetők át. További probléma, hogy a mintahálózatok esetében sok esetben konstans terhelések kerülnek figyelembevételre, illetve a hibás mérések, pszeudo adatok okozta bizonytalanság nem része a mérő elhelyezés algoritmusának.

Ezek mellett kérdéses az egyes optimalizációs célfüggvények közötti eltérések valódi hatásai is. Az 1. táblázat 6 olyan nemzetközi folyóirat cikk eredményét foglalja össze, melyek eltérő célok, de azonos mintahálózatokon (IEEE 14 és 30 bus) mellett határozták meg a mérőszenzorok optimális elhelyezését. A teljesen eltérő optimalizációs szempontok ellenére látható, hogy az eszközök száma és elhelyezkedése hasonló mintázatokat mutat. Továbbá az állapotbecslés futtatásához ezen hálózatokon nagyjából 20%-os fazor mérőszenzor penetrációra volt szükség, hasonló szint elérése az elosztóhálózat esetében rendkívül megnövelné a beruházási költségeket.

3.2. Hibás mérési pont, mérési hiba feltárása

Az állapotbecslési módszerek pontossága nem értékelhető egyetlen szempont (pl. algoritmus pontosság) alapján, a teljes folyamat minden lépése során szükséges a potenciális torzító hatások figyelembevétele. Ennek megfelelően a villamos jellemzők rögzítésének pontosságát térbeli és időbeli síkokon is

érdemes vizsgálni. A megfigyelhetőségi kritérium mindössze az állapotbecslésnek, mint iteratív optimumkeresési eljárásnak a megoldhatóságát garantálja, annak pontosságáról nem ad információt. [13] feltárta, hogy 1%-os standard hiba a mérésekben akár 10%-os standard hibát generálhat az állapotbecslés végeredményében.

1. táblázat PMU elhelyezési stratégiák összevetése IEEE 14 és IEEE 30 busos hálózatokon

Ref	PMU elhelyezési cél	Optim. algoritmus	IEEE 30 test bus	IEEE 14 test bus
[14]	állapotbecslés hiba minimum	Particle Swarm Opt, Artificial Bee Colony	1, 5, 7, 8, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 23, 24, 26, 28, 29, 30	2, 5, 9, 10, 11, 12, 13, 14
[15]	PMU szám minimalizálás	rational random walk	3, 5, 10, 12, 18, 24, 27	2, 6, 9
[16]	Kritikus mérési pontok minimalizálása, maximális redundancia	Unreachability Index (URI) alapján történő optimalizálás	1, 2, 6, 9, 10, 12, 15, 19, 25, 27	2, 6, 7, 9
[17]	Megfigyelhetőségi kritérium teljesítése	fruit fly optimization	2 ,3 ,10, 12, 18, 24, 27	2, 6, 9
[18]	PMU szám minimalizálás	artificial bee colony	1, 5, 10, 11, 12, 19, 23, 25, 27	2, 7, 10, 13
[19]	Redundancia maximalizálás	Integer Linear Programming	2, 4, 6, 9, 10, 12, 15, 18, 25, 27	2, 6, 7, 9

Ezt a feldolgozott tudományos cikkek többségében felismerték, a mérési adatokat jellemzően egy konstans, bizonytalanságot leíró értékkel [20] kvázi véletlenszerűen (pl. 1% mérési hiba) modellezték. A másik elterjedt módszer a mérési hibát egy normál eloszlás görbével írja le minden pontban. [21] Ezen eljárások a már említett, elsősorban mintahálózatokon végzett szimulációk (és nem valós adatrögzítések) esetében jó elméleti közelítését adhatják a mérési hibának, azonban kétséges a valós implementálhatóság. A kevés gyakorlati tapasztalat azt mutatja, hogy PMU-k esetében a mérési pontatlanság rendkívül alacsony, azonban egyes hibásan kalibrált eszközök kiugró egyedi értékeket rögzíthetnek. Ezek kiszűrésére számos irodalomban megjelent eljárás létezik. [25-27]. Az egyik legszélesebb körben megjelenő módszer [28, 29] a hálózat redukált helyettesítő áramkörrel való leírását alkalmazza, ezzel szűkítve a lehetséges mérők számát.

A szinkrofazor technológia újszerűségének köszönhetően releváns probléma a korábbi, nem szinkronjáró mérési egységek adatainak hasznosítása. Kihívást okozhat a kommunikáció kimaradás, késés, mérőváltók korrekciójából adódó torzító hatás, ezeket tételesen [22, 23] vizsgálja. Az utólagos, adatrögzítési kimaradásból adódó hibák kiszűrésére [24] egy sztochasztikus fraktál keresési eljárást mutat be.

3.3. Adatgenerálási technikák pszeudo mérésekhez

Az okos mérési eljárások utóbbi évtizedben tapasztalt terjedése ellenére a közép- és kisfeszültségű elosztóhálózat nagy kiterjedése miatt annak aktuális állapotáról az elosztóhálózati engedélyes jellemzően kevés információval rendelkezik. Emiatt az elosztóhálózati állapotbecslés futtathatóságához ún. pszeudo mérési adatokat generálnak, ezzel biztosítva az elégséges számú mérési adatot az algoritmus számára. Természetesen a folyamat további becslési pontosság romlást eredményez, mely kutatási terület a nemzetközi irodalomban is megjelent. A vizsgált irodalom [30, 31] döntő többsége historikus terhelési adatokból, profilokból indul ki az adott csomópontbeli paraméterek időbeli változásának leírásához.

Az alternatív becslő modellek további szempontokat (pl. a hálózat aktuális állapota, környezeti paraméterek) is figyelembe vesznek, melyekből további leíró jellemzőket képesek levonni [32, 33]. A valódi mérések közötti térbeli- és időbeli kapcsolatokat [34, 35] arra használta fel, hogy a pszeudo adatgenerálási és mérő elhelyezési folyamatot még pontosabbá tegye. Bizonyos esetekben a mérőszenzorok korlátossága (pl.: mérési felbontás, leíró jellemző hiánya, rossz mintavételi frekvencia stb.) igényli pszeudo adatok létrehozását. [36, 37] olyan megoldást mutatott be, mely képes az adott mérőszenzor adatspektrumát bővíteni.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen cikk keretében áttekintésre kerültek a nemzetközi irodalomban megjelenő kutatási irányok az elosztóhálózati állapotbecslés gyakorlati implementálásának kérdéskörében. Az állapotbecslés egy általános folyamatábrájából kiindulva azonosításra kerültek azok a kutatási fókuszterületek (PMU elhelyezés, pszeudo adatgenerálás, hibás adatfeltárás), melyek a megfigyelhetőségi kritérium teljesítéséhez egy valós helyszíni telepítés esetén felmerülhetnek. A mérő elhelyezési eljárások tekintetében kiemelésre kerültek a különböző célfüggvények eredményei közötti redundancia, illetve a szimulációs eredmények gyakorlatba való átültethetőségének korlátai. Az irodalmi áttekintés KIF fókusza ellenére a bemutatott kutatási eredmények többnyire közép- és nagyfeszültségű hurkolt hálózatokon kerültek validálásra.

5. 5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

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

6. 6. IRODALOMJEGYZÉK

[1] Y. Matsukawa, M. Watanabe, Y. Mitani, and M. L. Othman, “Multi-objective PMU placement optimization considering the placement cost including the current channel allocation and state estimation accuracy,” Electr.

Eng. Japan (English Transl. Denki Gakkai Ronbunshi), vol. 207, no. 2, pp. 20–27, 2019.

[2] A. A. M. Raposo, A. B. Rodrigues, and M. da G. da Silva, “Optimal meter placement algorithm for state estimation in power distribution networks,” Electr. Power Syst. Res., vol. 147, pp. 22–30, Jun. 2017.

[3] N. Xie, F. Torelli, E. Bompard, and A. Vaccaro, “A graph theory based methodology for optimal PMUs placement and multiarea power system state estimation,” Electr. Power Syst. Res., vol. 119, pp. 25–33, 2015.

[4] Z. Zhao, H. Yu, P. Li, X. Kong, J. Wu, and C. Wang, “Optimal placement of PMUs and communication links for distributed state estimation in distribution networks,” Appl. Energy, vol. 256, Dec. 2019.

[5] S. V. Kandenkavil and K. Bhattacharya, “Optimization Approaches to Distribution System State Estimation for Optimal Meter Placement,” in 2018 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC), 2018, pp. 1–6.

[6] M. Z. Attar, F. Namdari, and J. Aghaei, “Optimal placement of phasor measurement units in the presence SCADA meters and considering the sensitivity constraints in Khouzestan province network,” in 2015 International Congress on Electric Industry Automation (ICEIA 2015), 2015, no. 2, pp. 21–26.

[7] X. Chen et al., “Optimal Meter Placement for Distribution Network State Estimation: A Circuit Representation Based MILP Approach,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 31, no. 6, pp. 4357–4370, 2016.

[8] A. Almunif and L. Fan, “Optimal PMU placement for modeling power grid observability with mathematical programming methods,” Int. Trans. Electr. Energy Syst., pp. 1–13, 2019.

[9] M. Moradi-Sepahvand, E. Mashhour, and S. S. Mortazavi, “Optimal placement of a combination of single-phase and three-phase μPMUs for observability of smart distribution networks with asymmetrical structure,” Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 105, pp. 592–601, Feb. 2019.

[10] M. S. Shahriar, I. O. Habiballah, and H. Hussein, “Optimization of phasor measurement unit (PMU) placement in supervisory control and data acquisition (SCADA)-based power system for better state-estimation performance,” Energies, vol. 11, no. 3, 2018.

[11] S. Hubschneider, M. Uhrig, M. Suriyah, and T. Leibfried, “Optimized meter placement in low voltage grids based on asymmetric state estimation,” in 2017 52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2017, vol. 2017-Janua, pp. 1–6.

[12] Y. Yao, X. Liu, and Z. Li, “Robust Measurement Placement for Distribution System State Estimation,” IEEE Trans. Sustain. Energy, vol. 10, no. 1, pp. 364–374, 2019.

[13] K. Abdulrezak Al-Anbarri and M. Falih Hasan, “Optimal Placement of Meters for Power System State Estimation by Using Artificial Intellegence Techniques, a Comparative Study,” J. Eng. Sustain. Dev., vol. 2018, no. 02, pp. 15–32, 2018.

[14] M. Parpaei, N. Ghaffarzadeh, and M. Z. Tayar, “Rational random walk-based optimal placement of phasor measurement units to enhance the initializing and guiding the optimization processes,” Int. Trans. Electr. Energy Syst., vol. 27, no. 7, pp. 1–11, 2017.

[15] M. J. Alvarez, F. S. Sellschopp, and E. Vazquez, “A PMUs placement methodology based on inverse of connectivity and critical measurements,” Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 68, pp. 336–344, 2015.

[16] B. Ramachandran and G. Thomas Bellarmine, “Improving observability using optimal placement of phasor measurement units,” Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 56, pp. 55–63, 2014.

[17] M. Shoaib Shahriar, F. A. Ahmad, I. O. Habiballah, M. A. Asif, and S. Mukherjee, “Artificial Bee Colony based Optimal PMU Placement in Power System State Estimation,” 1st Int. Conf. Adv. Inf. Commun. Technol. 2016 (ICAICT 2016), 2016.

[18] N. Xia, H. B. Gooi, S. X. Chen, and M. Q. Wang, “Redundancy based PMU placement in state estimation,” Sustain. Energy, Grids Networks, vol. 2, pp. 23–31, Jun. 2015.

[19] S. Uytterhoeven, K. Hoornaert, and D. Willems, “Benefits of Phasor Measurement Units for Distribution Grid State Estimation : Practical Experience From an Urban Demonstrator,” in 23 rd International Conference on Electricity Distribution, 2015, no. June, pp. 15–18.

[20] Y. Ju, W. Sheng, X. Song, J. Wang, and W. Wu, “Multi-phase distribution state estimation with only direct measurements,” in 2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), 2015, pp. 2690–2694.

[21] N. M. Manousakis and G. N. Korres, “A hybrid power system state estimator using synchronized and unsynchronized sensors,” Int. Trans. Electr. Energy Syst., vol. 28, no. 8, pp. 1–19, 2018.

[22] M. Richter, P. Komarnicki, and I. Hauer, “Improving state estimation in smart distribution grid using synchrophasor technology: A comparison study,” Arch. Electr. Eng., vol. 67, no. 3, pp. 469–483, 2018.

[23] H. Mosbah and M. E. El-Hawary, “Optimization of neural network parameters by Stochastic Fractal Search for dynamic state estimation under communication failure,” Electr. Power Syst. Res., vol. 147, pp. 288–301, Jun. 2017.

[24] M. A. M. Saran and V. Miranda, “State estimation pre-filtering with overlapping tiling of autoencoders,” Electr. Power Syst. Res., vol. 157, pp. 261–271, Apr. 2018.

[25] Y. Guo, Y. Zhang, and A. K. Srivastava, “Data-quality aware state estimation in three-phase unbalanced active distribution system,” 2018 IEEE Ind. Appl. Soc. Annu. Meet. IAS 2018, pp. 1–7, 2018.

[26] D. Waeresch, R. Brandalik, W. H. Wellssow, J. Jordan, R. Bischler, and N. Schneider, “Bad data processing for low voltage state estimation systems based on smart meter data,” in CIRED Workshop 2016, 2016, pp. 1–4.

[27] M. M. Othman, M. H. Ahmed, and M. M. A. Salama, “A novel smart meter technique for voltage and current estimation in active distribution networks,” Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 104, pp. 301–310, Jan. 2019.

[28] H. Su, C. Wang, P. Li, Z. Liu, and J. Wu, “Novel voltage-to-power sensitivity estimation for phasor measurement

unit-unobservable distribution networks based on network equivalent," Appl. Energy, pp. 302–312, Sep. 2019.

[29] M. Cramer, P. Goergens, F. Potratz, A. Schnettler, and S. Willing, "Impact of three-phase pseudo-measurement generation from smart meter data on distribution grid state estimation," in 23rd International Conference on Electricity Distribution, 2015, pp. 1–5.

[30] J. Alves and J. Pereira, "Pseudo-Measurements Generation Using Energy Values from Smart Metering Devices," in CIRED Workshop 2016, 2016, pp. 1–4.

[31] R. Dobbe, D. Arnold, S. Liu, D. Callaway, and C. Tomlin, "Real-Time Distribution Grid State Estimation with Limited Sensors and Load Forecasting," in 2016 ACM/IEEE 7th International Conference on Cyber-Physical Systems (ICCPS), 2016, pp. 1–10.

[32] A. Abur and A. G. Exposito, Power System State Estimation: Theoryand Implementation. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2004.

[33] D. Echternacht et al., "Smart Area Aachen - in field test of meter placement and state estimation algorithms for distribution grids," in 2015 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LATAM), 2015, pp. 435–439.

[34] M. Pau, P. A. Pegoraro, A. Monti, C. Muscas, F. Ponci, and S. Sulis, "Impact of Current and Power Measurements on Distribution System State Estimation Uncertainty," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 68, no. 10, pp. 3992–4002, Oct. 2019.

[35] M. Shafiei, G. Nourbakhsh, A. Arefi, G. Ledwich, and H. Pezeshki, "Single iteration conditional based DSSE considering spatial and temporal correlation," Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 107, pp. 644–655, May 2019.

[36] H. Teixeira, J. Pereira, P. N. P. Barbeiro, A. A. Messias, D. A. Lopes, and P. G. Matos, "Using LV real-time data for pseudo-measurements generation in MV distribution networks," in 23rd International Conference on Electricity Distribution, 2015, pp. 1–5.

[37] A. Abdel-Majeed, C. Kattmann, S. Tenbohlen, and R. Saur, "Usage of Artificial Neural Networks for pseudo measurement modeling in low voltage distribution systems," in 2014 IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition, 2014, vol. 2014-Octob, no. October, pp. 1–5.

Molnár Martin

Smart villamos hálózatok kiberbiztonsága

Támadások hatáselemzése kisfeszültségen

A modern villamosenergia-rendszerekben egyre szélesebb körben alkalamzott távműködtetésű berendezések a hálózati üzem optimálása mellett biztonsági problémákat okozhatnak, hiszen ezen belépési pontokon keresztül rosszindulatú támadások követhetők el. Kutatómunkám során a villamos hálózat kiberbiztonságával foglalkozom; jelen tanulmányom áttekinti a rendszerinyító, illetve az elosztói engedélyes szempontjából releváns kiberveszélyeket, továbbá bemutat egy egy modern eszközökkel felszerelt kisfeszültségű hálózatrészen végzett esettanulmányt is. MATLAB környezetben vizsgáltam két kibertámadás hálózatra való hatását, melynek eredménye szerint a behatolások időzítése, illetve a befolyásolt teljesítmény a teljes hálózat zárlati teljesítményéhez való aránya jelentősen befolyásolhatják a visszahatás mértékét.

Remote control devices are applied all over the modern power grids, but besides providing efficient and automated operation, they are also increasing cyber threats. In this paper a short review is given about the TSO and DSO cybersecurity risks, and a case study is shown about impact analysis of cyber-attacks against the small voltage grid.

Kulcsszavak: **kiberbiztonság, okos hálózat, smart grid, hálózatautomatizálás, rendszerirányító, TSO, elosztói engedélyes DSO, kibertámadás, OLTC transzformátor, smart inverter, PV, HMKE, kisfeszültség, MATLAB, cyber security, impact analysis**

1. BEVEZETÉS

A modern, átalakulás alatt álló villamosenergia-rendszereknek (VER) egyre több komplex kihívással kell szembesülnie, melyek egyik fő okozója az elosztott termelés megjelenése. A tradicionális hálózatban a teljesítményáramlás egyirányú volt, a megújulók integrálása azonban ezt az alapelvet lényegében borítja fel. A növekvő megújuló penetráció által decentralizálódó villamosenergia-termelés új igényeket támaszt a rendszerirányítás felé, így a hálózat korábbi szegmentáltsága folyamatosan csökken. A kritikus infrastruktúrák – mint például a villamosenergia-rendszer – egyik kulcskérdése a biztonság. Az alkalmazott Internet of Things (IoT) eszközök növekvő trendje jól megfigyelhető a kiberfizikai rendszereken, többek között a villamos hálózaton is. A 2010-es Stuxnet és a 2015-ös Black Energy 3 támadások már mutattak néhány elrettentő példát, így nem kétség, hogy a kiberbiztonság kérdésére kiemelt figyelmet kell fordítsunk.

Okos hálózatainkban azonban a kommunikáció nem csupán az interneten keresztül, hanem hagyományos elektromechanikai módon is zajlik, ezen csatornák biztonsága pedig elengedhetetlen fontosságú az üzemirányítás szempontjából. A komplex irányítási rendszer számos pontja lehet kibertámadás potenciális célpontja, ezért a kiberveszélyek és az ellenük alkalmazandó védekezési stratégiák ismerete alapvető fontosságú. A villamos hálózat okos eszközeinek gyarapodása elsősorban az új problémákat megoldó technológiák elterjedésének köszönhető. A megújuló energiaforrások rendszerbe való integrálása mind TSO (Transmission System Operator) – rendszerirányító –, mind DSO (Distribution System Operator) – elosztói engedélyes - szinten kihívást jelentő feladat, hiszen a növekvő elosztott termelés jelentős hatással van a hálózatra minden feszültségszinten. A kialakuló feszültség-, frekvencia- valamint stabilitásproblémák orvoslására szabályozható berendezések kerülnek alkalmazásra, melyek újabb kommunikációs pontokat jelentenek a villamosenergia-rendszerben. A hálózat megújuló felvevőképességének, biztonságának és flexibilitásának fejlesztése és fenntartása érdekében fontos tehát megvizsgálni ezen eszközöket és technológiákat kibervédelmi szempontból elemezni. A támadások által számos fizikai kár is okozható a villamos hálózaton, melyek sokrétű következményekkel járhatnak. A berendezésekben okozott kár hatalmas összegeket emészthet fel, azonban ennél sokkal súlyosabb az okozható szolgáltatásmegszakadás. Ennek eredményeként sok ipari szegmensben következhetnek be leállások, a háztartási fogyasztók sem jutnak villamos energiához, összességében tehát óriási gazdasági és szociális problémák keletkezhetnek. [1]

Munkám során kezdetben a hazai és nemzetközi TSO és DSO szintű kiberbiztonságot érintő szakirodalmat tanulmányoztam át. A leggyakrabban alkalmazott technológiákat és módszereket, a legnagyobb veszélyeket és a legkritikusabb aktuális kérdés- és problémaköröket a 2. fejezet foglalja össze. Az irodalomkutatást és adatgyűjtést követően felépítettem a mintahálózat 3. fejezetben tárgyalt modelljét bizonyos peremfeltételek definiálása mellett, melynek elemei a következők: terhelés alatt szabályozható KöF/KiF tranfszormátor, egyszerű célvezeték, háztartási fogyasztó és inverteren keresztül csatlakozó – fotovillamos (photovoltaic, PV) alapú – háztartási méretű kiserőmű. A számítási és szimulációs módszereket a 4. fejezet foglalja össze, melyben egy általam írt MATLAB script segítségével különböző pontokon elkövetett FDI (False Data Injection) és DoS (Denial of Service) támadásokat szimulálását mutatom be eltérő inverterszabályozási karakterisztikák esetén. Ezek hálózatra gyakorolt hatását kvantitatív formában az 5. fejezet tárgyalja. A 6. fejezetben bemutatott eredmények alapján a támadás okozta kár nagysága a befolyásolt teljesítmény

teljes terheléshez viszonyított nagyságától, illetve a vezeték arányától, így az egységnyi hosszra jutó ΔP és ΔQ teljes terheléshez viszonyított nagyságától is függ. Végül, a 7. fejezetben pedig a kutatás során felhasznált irodalom került összegyűjtésre.

2. AZ ELOSZTÓI ÉS ÁTVITELI VILLAMOS HÁLÓZAT FENYEGETETTSÉGE

Legnagyobb kiberveszélynek a villamosenergia-rendszer kommunikációs infrastruktúrája van kitéve. Ennek oka, hogy az alkalmazott protokollok és szabványok nagyon sokszínűek, és nincsenek egységesítve. Az eltérő használatuk inkonzisztenciát okozhat különböző szegmensek között, ami a kapcsolatuk sérülékenységét eredményezi. Az IoT eszközök sajnos nem minden esetben rendelkeznek megfelelő védelmi funkciókkal az internetes behatolások ellen, ezért ezek is nagy veszélyt jelentenek a hálózatra. Ezek alapján azt a következtetést vonhatjuk le, hogy az adatokért és távvezérlésekért felelős hálózatrészek vannak a legnagyobb fenyegetettségnek kitéve, hiszen a standardizáltság itt a legcsekélyebb, és itt okozhatók a legsúlyosabb károk is a gyenge ellenőrzöttség következtében. Az alábbiakban áttekintésre kerülnek a legkritikusabb kiberveszélyek DSO és TSO oldalról egyaránt.

2.1. Kiberbiztonság a DSO szempontjából

A középfeszültségű hálózat számára a legnagyobb kihívást az elosztott energiatermelés okozza. A DSO-k feladata, hogy a rendszer megújuló-felvevőképességét szükség szerint növeljék annak érdekében, hogy az időjárásfüggő termelés okozta problémákat mérsékeljék vagy eliminálják. A DER-ek (Distributed Energy Resource) üzemirányítási kihívás elé állítják az elosztói engedélyeseket, akik DMS (Distributed Management System) rendszerek alkalmazásával igyekeznek megoldani a feladatot. A NaF/KöF transzformátorok ilyen DMS-en keresztül irányítják az elosztott forrásokat távoli CC-kből (Control Center), melyek privát IP hálózaton csatlakoznak az alállomásokhoz. Szinte minden adatkommunikáció a CC-n zajlik, viszont a periferikusan elhelyezkedő alállomások esetén SAS (Substation Automation System) rendszer létesít kapcsolatot a CC-vel. [2]

A KöF hálózati kapcsolatokat alapvetően az IEC 60150 szabvány zárja keretek közé, az elosztott energiatermelő egységek pedig legtöbbször IEC 61850 szerint kommunikálnak a hálózattal. Engedélyesi szemszögből az elosztóhálózati kommunikáció okozhatja a legnagyobb kihívást, hiszen számos kiberbiztonsági probléma felmerülhet. A DMS és DSO közti kapcsolatba gyakran kerül be harmadik fél – villamosenergia-piac, időjárásfüggő termelés-előrejelzés, rendszerirányító –, amely potenciális behatolási lehetőség lehet egy támadó számára. Továbbá tehát a fentiek alapján a középfeszültségű irányításban a DSO-alállomás kapcsolatba is harmadik félként kerülnek be a DER-ek. Ezen kommunikáció különösen sebezhető, hiszen az elosztott egységek területenként más-más szabvány szerint működhetnek. Különböző DSO-k közötti SAS-okat WAN (Wide Area Network) kapcsolat köt össze, és itt szintén harmadik félként megjelenik a DMS, amely támadható kommunikációt tart fennt. A potenciális következményeket mérlegelve legnagyobb probléma az adatvesztés és adathamisítás lehet az előrejelzésre, piacra, TSO parancsokra, topológiaváltozásokra és DMS üzeminformációkra vonatkozóan. További gondot jelenthet a különböző szabályozási mechanizmusok meghamisítása és befolyásolása is, hiszen ez nem üzemszerű állapotokat is előidézhet. [2]

Egy tanulmányban [2] végzett kockázatelemzés eredményeként DSO szinten legnagyobb hatással járó támadásnak a regulációs adatok meghamisítása bizonyult. Ez TCP/IP alapú kommunikáció esetén a legkritikusabb, hiszen ezen protokoll mellett lehet legnagyobb mértékben befolyásolni a szabályozások bemeneti vagy kimeneti adatait. Tekintettel a TCP/IP alacsony ellenőrzöttségére, egy másik tanulmány [3] szerint az elosztói engedélyeseknek célszerű lehet ModBus kommunikációs protokollt használni IEC 61850 alatt.

2.2. Kiberbiztonság a TSO szempontjából

Az átviteli hálózat irányítását végző TSO szemszögéből vizsgálva a villamosenergia-rendszer kiberveszélyeit azt mondhatjuk, hogy legkritikusabbaknak az alállomások tekinthetők. A nagyfokú sebezhetőséget kihasználva a támadó átveheti az irányítást az beavatkozóegységek, relék, megszakítók és recloserek felett, amely által normáltól eltérő állapotokat idézhet elő. [4] Tovább súlyosbítja a helyzetet, hogy amennyiben a kommunikációs csatornákat is sikeresen támadják, úgy adatveszteséget is okozható, amely pedig a rendszerirányításban nagy károkat tehet. A lehetséges következmények közül a rendszerbiztonság jelentős csökkenése a legkritikusabb, hiszen pl. feszültség- vagy frekvenciastabilitási problémák megváltoztathatják az átviteli hálózat teljesítményviszonyait, melynek hatására jelentős veszteségek léphetnek fel. Ez egyrészt fogyasztói oldalról is probléma, mivel a hálózatból súlyosabb esetekben nem vehető ki a szükséges teljesítmény, illetve egy-egy nagyobb hiba fizikai meghibásodásokat is okozhat a rendszeren, így jelentős költségvonzatai is lehetnek a támadásoknak.

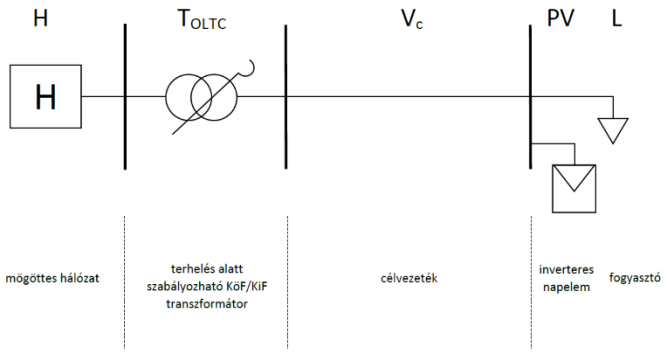
Az elosztott energiatermelő egységek nagyfeszültségen is jól alkalmazhatók, hiszen hatékonyan növelhetik a rendszerbiztonságot az azonnali szabályozhatóság és beavatkozási képesség révén. Ezek biztosítása elektromechanikus helyett digitális kommunikációval történik, így a paraméterek és távoli vezérlőjelek meghamisítása jelentős problémákat okozhat. Egy tanulmányban a gerinchálózattól távolabb lévő nagyfeszültségre csatlakozó PV-ket vizsgáltak, melyek 50%-ban járultak hozzá a teljesítmény biztosításához. Ilyen mértékű penetráció és elhelyezkedés, illetve konstans teljesítménytényezős szabályozás alkalmazása mellett 2,3% teljesítménykiesést produkált egy adott szabályozási iterációt célzó támadás. [5]

3. AZ ESETTANULMÁNY PÉLDAHÁLÓZATA

Láthattuk, hogy a DSO szemszögéből kritikus az elosztóhálózatra csatlakozó elosztott termelőegységek helyzete, hiszen nem csak a hálózatra gyakorolnak hatást, hanem növelik a kiberfenyegetettséget. Kutatásom fókuszában egy egyszerű példahálózat áll, melyen okos hálózati eszközök is megtalálhatóak. A szimuláció során két különböző típusú támadás hatását fogom mérni, különös tekintettel a GSZ által előírt csatlakozási pont feszültségére. A vizsgálat célja, hogy megbizonyosodjunk a DER-ek elleni kibertámadások által KiF-en okozott hatások relevanciájáról, illetve, hogy összevessük az okozott károkat különböző szabályozási módszerek esetén. Amennyiben a kiberbiztonság valós problémának bizonyul, úgy a kutatást egy valódi hálózat modelljére át lehet vezetni, és lehetőség van a szimuláció fejlesztésére bővítésére is.

3.1. A vizsgált hálózatrész

Vizsgálatom fókuszában egy egyszerűsített kisfeszültségű hálózatrész áll, rajta egy terhelés alatt szabályozható KöF/KiF transzformátorral, célvezetékkel, koncentrált háztartási fogyasztóval és smart inverteres PV rendszerrel. A modell egyvonalas rajza az alábbi ábrán látható.



1. ábra A vizsgált hálózat

Az alkalmazott smart berendezéseket röviden a következő alfejeze tárgyalja. A mögöttes hálózat reprezentálja a villamosenergia-rendszer azon részét, melyhez a 160 kVA látszólagos teljesítményű szabályozható 20/0,4 kV transzformátor csatlakozik. A transzformátor szekunder oldalán 231 V induló fázisfeszültség esik szabályozás nélküli esetben. A csatlakozási pontig egy egyszerű 95 mm^2 keresztmetszetű célvezeték húzódik, ennek hossza 500 m, ellenállása 0,155 5 Ω, reaktanciája pedig 0,17 Ω. A vezeték végére csatlakozik egy 50 kVA névleges látszólagos teljesítményű inverteren keresztül a napelem, melynek a valóságban 40 kVA a látszólagos teljesítménye. A PV perces termelési adatait a VER számítógépes analízise nevű tantárgyhoz tartozó profilból importáltam. Ugyan erre a pontra csatlakozik egy koncentrált fogyasztó is, melynek perces fogyasztásai adatainak előállításához szintén a VER számítógépes analízise nevű tantárgyhoz tartozó profilokat használtam. A rendelkezésre álló tipikus perces KiF fogyasztói profilokat átlagoltam, így egy teljesen átlagos fogyasztót állítottam elő. A MEKH és az ELMŰ-ÉMÁSZ adatai szerinti átlagos éves lakossági fogyasztásból számítottam átlagos napi fogyasztást négyfős háztartás esetére. Ebből egy nagyobb teljesítményigényű háztartást, majd abból pedig két eltérő méretű lakóparkot állítottam elő, melyek közül mindig az egyiket vizsgáltam. A mindkét fogyasztó teljesítménytényezőjét 0,95-nek feltételeztem, a kisebbik, 30 háztartásból álló lakópark koncentrált átlagos hatásos teljesítménye 14,4 kW, a nagyobb, 40 háztartásból állóé pedig 19,2 kW.

A GSZ IX. pontjának értelmében a csatlakozási ponton a feszültség névleges értékének +/-7,5%-át kell az elosztói engedélyesnek biztosítania normál üzemállapotú egyhetes mérése alatt a napi bármely 10 percre átlagolt értékek 95%-ában. A csatlakozási pont feszültségét jelen esetben az alábbi módon számíthatjuk:

$$U_{CSP} = U_{TR2} + \frac{R_V(P_{PV} - P_L) + X_V(Q_{PV} - Q_L)}{U_{TR2}} \quad (1)$$

ahol

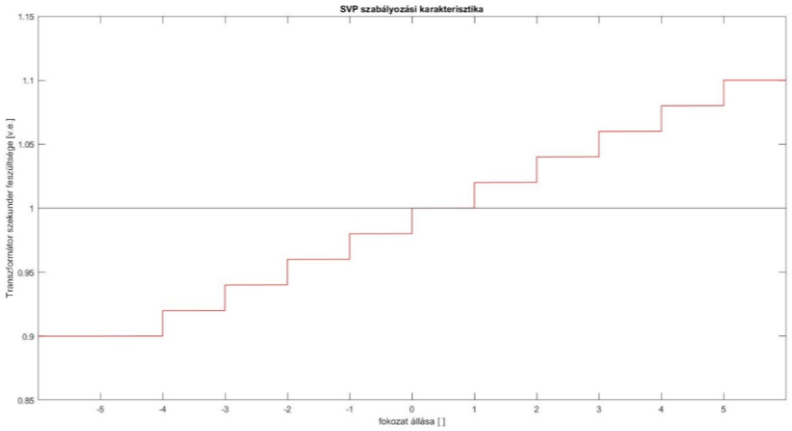
U_{CSP} a csatlakozási pont feszültsége;
U_{TR2} a transzformátor szekunder oldali induló feszültsége;
R_V, X_V vezeték ellenállása és reaktanciája;
P_{PV}, Q_{PV} a napelem hatásos és meddő teljesítménye;
P_L, Q_L a fogyasztó hatásos és meddő teljesítménye.

A vizsgálat során alkalmazott eszközök paraméterei is ezt a GSZ IX. pontját figyelembe véve lettek megválasztva. A szimulációk során szekvenciális szabályozási mechanizmusokat feltételeztem, ennek értelmében a késleltetési időktől eltekintettem. A valóság közelítse érdekében a gyorsabb szabályozás – PV invertere – a folyamatban megelőzte a lassabbat – transzformátor fokozatváltása –, így a hatás nem tér el jelentősen a késleltetéseket is számításba vevő vizsgálattól jelen megközelítésben.

3.2. Alkalmazott okos berendezések

Egyre szélesebb körben terjednek el az okos hálózati megoldások, melyek közül az egyik talán legismertebb berendezés az OLTC (On-Load Tap Changer), azaz feszültség alatt szabályozható transzformátor. A példahálózatban található transzformátor ±5 fokozatba állítható, fokozatonként ±2% változtatással. A szabályozás során ±1,25%-os holtsávot alkalmaztunk. Ezt az SVP (Set Voltage Point) szabályozási karakterisztikát az alábbi ábra illusztrálja.

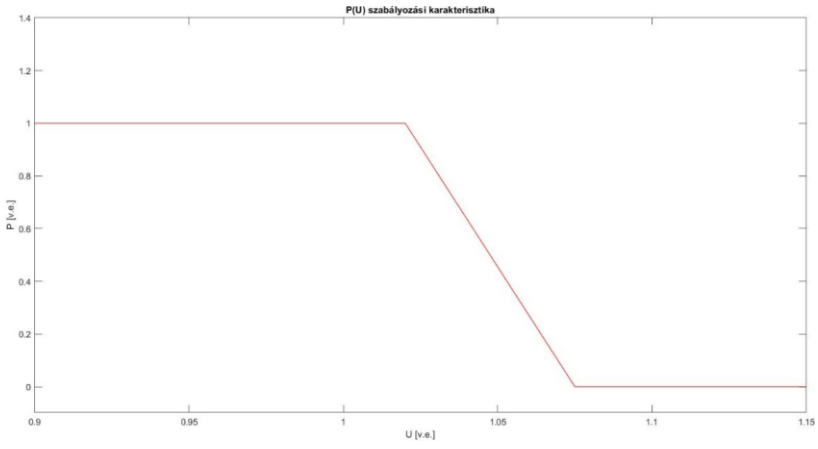
Működésének alapelve, hogy a csatlakozási ponton elhelyezkedő feszültségmérő elküldi a transzformátornak mért fázisfeszültséget, amit a szabályozási algoritmus



2. ábra OLTC SVP szabályozási karakterisztika

vizsgál. Amennyiben ez holtsávon belül van, úgy nem történik fokozatváltás. Ellenkező esetben viszont, ha a feszültség túllépte a megengedett értéket, akkor lefelé vált fokozatot, amennyiben pedig a feszültség túl alacsony, felfelé léptet. A léptetés a valóságban nem pillanatszerű, de a beállított késleltetéstől a vizsgálat során eltekintettem.

A napelemes rendszerek gyakran okoznak feszültségproblémákat a hálózaton, ezért – főleg túlméretezett PV-k esetében – a betáplált (esetleg fogyasztott) teljesítmény szabályozása szükségessé válik. Manapság már szinte kivétel nélkül okos inverterekkel csatlakoztatják a napelemeket a hálózatra, melyek akár többféle szabályozási mód között is képesek váltani, illetve állítható paraméterekkel rendelkeznek. Vizsgálatom során *P(U)*, *Q(U)* és *PF(P)* szabályozásokat alkalmaztam, és feltételeztem, hogy a szabályozás pillanatszerű. A *P(U)* szabályozás során konstans *PF*=1 teljesítménytényező mellett a csatlakozási ponton mért feszültség függvényében változik a betáplált hatásos teljesítmény rögzített zérus meddőteljesítmény mellett. A három alkalmazott szabályozás közül példaként az alábbi ábra illusztrálja a *P(U)* karakterisztikát.



3. ábra P(U) szabályozási karakterisztika

A *Q(U)* szabályozásnál referenciaprofilként *PF*=0,9 teljesítménytényezőjű termelést használtam, és a működés során rögzített hatásos teljesítmény mellett a csatlakozási pont feszültségének függvényében változott a meddőteljesítmény nagysága és iránya – fogyasztás vagy betáplálás. A *PF(P)* szabályozás esetében a teljesítménytényezőt változtatjuk az aktuális hatásos teljesítmény *(P)* függvényében. Referenciaprofilként *PF*=0,9 teljesítményezőjű átlagos termelést használtam, és maximalizáltam az elérhető szabályozott teljesítménytényező abszolútértékét.

4. SZÁMÍTÁSI ÉS SZIMULÁCIÓS MÓDSZEREK

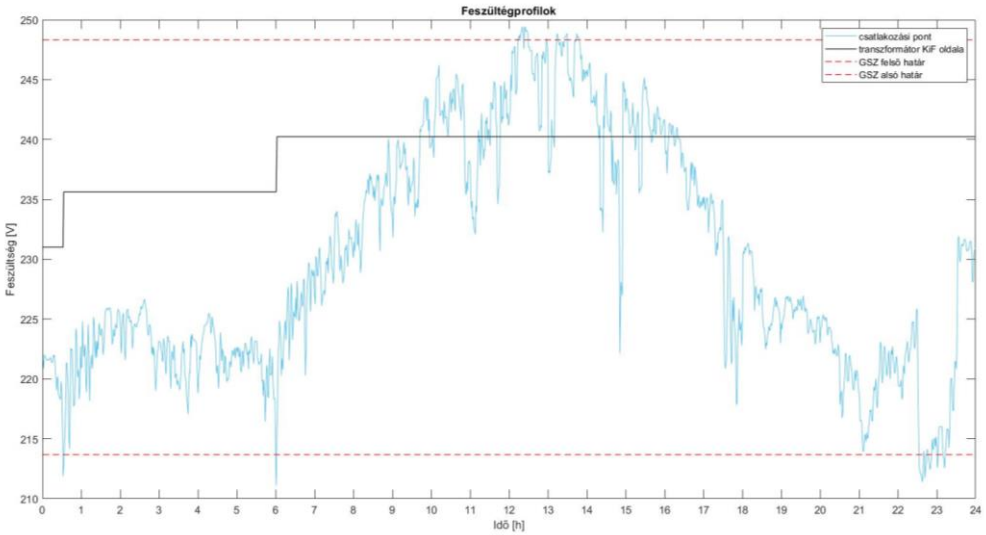
Kutatásom elvégzéséhez a MATLAB környezetet választottam, ahol statikus megközelítést alkalmaztam. Munkám folyamán így egy MATLAB scriptet írtam, melyben létrehoztam a hálózatot, illetve implementáltam a szabályozási algoritmusokat és a támadásokat.

Az elosztott energiatermelő egységek ellen elkövetett támadásoknak számos hálózatra gyakorolt hatása lehet, azonban ezek közül a határértéksértések és az eszközök fizikai károsodása a legsúlyosabb. [5] Ennek ismeretében érdemes megvizsgálni, hogy különböző támadások esetén hogyan alakul a csatlakozási ponton mért feszültség és a transzformátor fokozatváltása. A támadások során feltételezzük, hogy az elkövető az RTU-n keresztül jut be a rendszerbe, és képes a mérőszenzorok adatait, illetve parancsjeleket módosítani.

A mintahálózaton két támadás hatását vizsgáltam, melyből az egyik a DoS támadás volt az okos PV inverter ellen. Sikeres támadás hatására az inverter leválik a hálózatról, tehát nem táplál be teljesítményt a hálózatba. A vizsgálatot elvégeztem mindhárom szabályozás esetében, illetve két időzítési módszert is vizsgáltam. Az egyik szerint a támadó 3 alkalommal egyenként 30 percig próbálkozik DoS végrehajtásával. A három intervallum a PV csúcstermelésének ideje, a késő délutáni lakossági fogyasztásnövekedés ideje, illetve az esti lakossági fogyasztási csúcs. A másik időzítés során kevésbé kifinomult technika került alkalmazásra, ugyanis ekkor a támadó egész nap folyamatosan támadja a napelem inverterét.

A vizsgálat során feltételeztem, hogy a támadó az FDI támadásokat a csatlakozási ponton található okos mérőeszköz ellen követi el. Siker esetén az elkövető bejut a mérőeszközbe, amibe hamis adatokat juttat be. Az OLTC transzformátor ezt követően ezen hamis adatokat fogja megkapni, és

olyan fokozatváltásokat is végrehajthat, amelyekre nincsen szükség. Ennek hatására a hálózat normál üzemű állapota meg is szűnhet, illetve a szükségtelen szabályozás által okozott feszültség- és teljesítményviszonyok szerint az inverter is újra szabályozhat. Négy különböző mértékű hamisítást vizsgált a szimulációk során, melyek egyike az ±5%; ez az eltérés névleges állapotban nem okozna határértéksértést. Éppen a határérték közelébe juttathatja a rendszert a ±7,5%-os eltérítés, és jóval kiviheti az engedélyezett sávból a csatlakozási ponti feszültséget a ±10%-os hamisítás. Ezen esetekben névleges feszültség felett nagyobb, alatta pedig kisebb értéket tápláltunk a vizsgálat során a mérőbe, hiszen ezáltal kerülhetünk közelebb a felső és alsó határértékekhez, ami pedig egy potenciális célja lehet a támadónak. Végül megvizsgáltam, hogy mi történik fordított esetben, amikor névleges feszültség felett -10%, alatta pedig +10% az eltérítés. Az időzítést illetően a DoS támadásnál bemutatott két módszert alkalmaztam; 3x30 percnyi és egész napos támadás.



4. ábra Feszültségek effektív értékeinek alakulása támadás nélküli esetben

Az irodalom alapján a kibertámadások sikeressége egységesen jó közelítéssel 52%-nak tekinthető. [6] Vizsgálatom során a könnyebb kezelhetőség érdekében a siker valószínűségét egységesen 50%-nak feltételeztem, és minden támadás során ezt alkalmaztam. A transzformátor és az inverter szabályozásának késleltetését elhanyagoltam, hiszen szekvenciális folyamatként definiáltam a rendszer állapotának meghatározását. Statikus szimulációt végeztem, melyben perces bontású üzemállapotokat határoztam meg. A valóságban az inverter szabályozási algoritmusa gyorsabb a transzformátor fokozatváltásánál, ezért az alábbi **szekvenciát** definiáltam:

1. az előző üzemállapot értékeinek átvétele,
2. inverter szabályozás,
3. üzemállapot értékeinek újraszámolása,
4. transzformátor szabályozás,
5. üzemállapot értékeinek újraszámolása,
6. inverter szabályozás,
7. üzemállapot értékeinek újraszámolása.

Egy napelemes kisfeszültségű hálózat kiberbiztonságáról szóló tanulmányban több támadás hatása került összehasonlítva, melyek közül legveszélyesebbnek a mérőszenzor elleni FDI bizonyult. [6] Egy másik tanulmány a PV inverterek ellen elkövetett DoS támadásokat vizsgálta, és megállapításra került, hogy a lecsatlakoztatás az napelem közvetlen közelében fejti ki legjobban hatását. Ennek oka, hogy az alállomás robosztussága révén képes fenntartani a transzformátornál a névleges induló feszültséget. Továbbá a tanulmány rámutatott, hogy nagyobb inverter lecsatlakoztatása nagyobb problémához vezet. [7] Ezek ismeretében választottam ki a korábban bemutatott támadási szcenáriókat.

A támadások sikerességének bizonytalanságát a vizsgálat során figyelembe kellett venni. Ehhez a már említett 50%-os sikerességi valószínűséget használtam. A DoS támadás során az inverter lecsatlakozását úgy vettem számításba, hogy az Excelben tárolt perces PV profilok minden adatához generáltam egy random egész számot a [0, 1] intervallumból úgy, hogy p_0=p_1=0,5. Ahol a generált véletlen egész 1 volt, ott az aktuális termelési értékeket zérusra állítottam át, ahol pedig 1, ott maradt változatlan, és ugyan így jártam el a 3x30 perces támadásnál is. Ezt követően ezeket az új profilokat használtam fel a MATLAB számítások során. Az FDI során a scriptben implementált szekvenciális folyamatot egészítettem ki. Az előzőekhez hasonló módon itt is random egész számokat generáltam a 0 és 1 zárt intervallumból,

1. táblázat Feszültséghatár-sértések a csatlakozási ponton

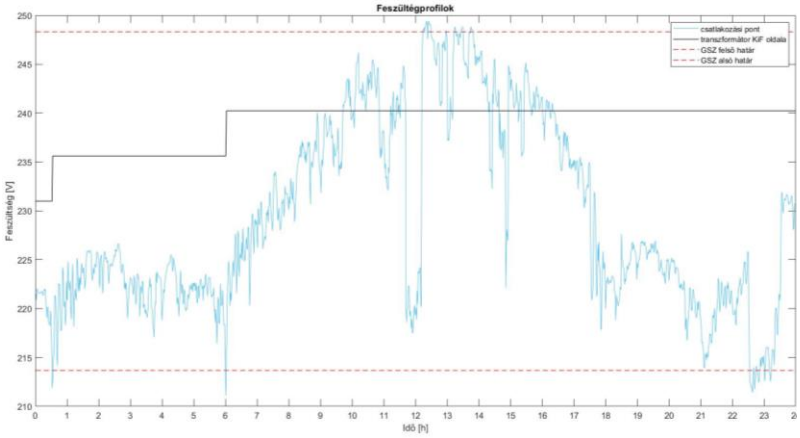
Támadástípus	Időtartam	Eltérés mértéke	14,4 kW			19,2 kW		
			P(U)	Q(U)	PF(U)	P(U)	Q(U)	PF(U)
DoS	3x30 perc	-100%	15	95	61	57	70	97
	24 óra	-100%	21	161	75	18	156	45
FDI	3x30 perc	±5%	***325***	***400***	***425***	***300***	***300***	***400***
		±7%	***370***	***450***	***450***	***315***	***500***	***400***
		±10%	***650***	***675***	***600***	***650***	***650***	***525***
		∓10%	***610***	***950***	***610***	***520***	***820***	***550***
	24 óra	±5%	5	25	5	3	35	5
		±7%	8	30	8	8	45	8
		±10%	65	95	70	70	105	70
		∓10%	500	625	400	600	550	400

napos támadás estén minden perces adathoz, 3x30 perces esetben pedig csak a megfelelő időintervallumokban. A hamis adatokat a transzformátor-szabályozás során úgy vettem figyelembe, hogy nem a csatlakozási ponton mért valós feszültséget vizsgáltam, hanem a befolyásolt adatokat.

5. A TÁMADÁSOK HATÁSÁNAK ELEMZÉSE

Minden alapesetben és támadás során ábrázoltam a lakossági fogyasztást és a napelem termelését egy teljesítmény-idő diagramon, illetve a csatlakozási ponton mért feszültség effektív értékét és a transzformátor szekunder oldali induló feszültséget. A szimulációkat minden esetben 50 alkalommal végeztem el, és vizsgáltam az elkövetett határértéksértések számát.

Vizsgálatom során két különböző támadási szcenáriót vizsgáltam. Az egyik esetben a támadó Denial of Service támadást indít a napelem invertere ellen. Ebben az esetben a behatoló valamely kommunikációs csatornán keresztül blokkolja a vezérlés működését, melynek hatására az inverter lecsatlakozik a hálózatról. A másik esetben a támadó a csatlakozási ponton elhelyezett feszültségmérőt töri fel, és abban hamisítja meg a mérési adatokat. Ezáltal az okos eszköz nem valós adatokat küld az OLTC transzformátornak, amely szükségtelen fokozatváltást végez. A lentebbi diagramokon a *P(U)* inverter-szabályozás esetén bekövetkezett különböző támadások hatásait figyelhetjük meg a csatlakozási ponton mért feszültségre és a transzformátor KiF oldali induló feszültségére, miközben a hálózatra 19,2 kW-os koncentrált fogyasztó csatlakozik. A támadások egy része egész a korábbiakban ismertetett módon egész nap zajlott, míg néhány esetben csupán 3x30 perces intervallumban próbálkozott a fiktív támadó.



5. ábra Feszültségek effektív értékeinek alakulása 3x30 perces DoS támadás esetén

5.1. Támadást szenvedett P(U) szabályozás

Az alapesetben *PF*=1 mellett kialakuló feszültségviszonyokat a 4. ábra szemlélteti. Láthatjuk, hogy a napelem hatására termelési csúcsidőben a csatlakozási pont feszültsége megnövekszik, de a transzformátor fokozatváltásokkal sikeresen tudja követni ezt a változást. Látható, hogy a GSZ határokat viszonylag kevés alkalommal sérti meg a mért feszültség, így a szabályozás sikeresnek mondható.

A kritikus időszakokra időzített DoS támadás az alább (5. ábra) látható módon a napelem által megtermelt energia felhasználását megakadályozza, de megfigyelhetjük, hogy a határsértések számában jelentős növekedés nem következik be.

A korábbitól jelentősen eltérő hatást figyelhetünk azonban meg FDI támadás esetén. Az alább látható ábrán (6. ábra) látható, hogy a meghamisított mérési adatok alapján a transzformátor legtöbbször a szükségessel ellentétes irányba vált fokozatot, így a valódi feszültségproblémákat nem, hogy nem mérsékli, hanem súlyosbítja azokat. A határértéksértések száma ebben az esetben kiugróan magas.

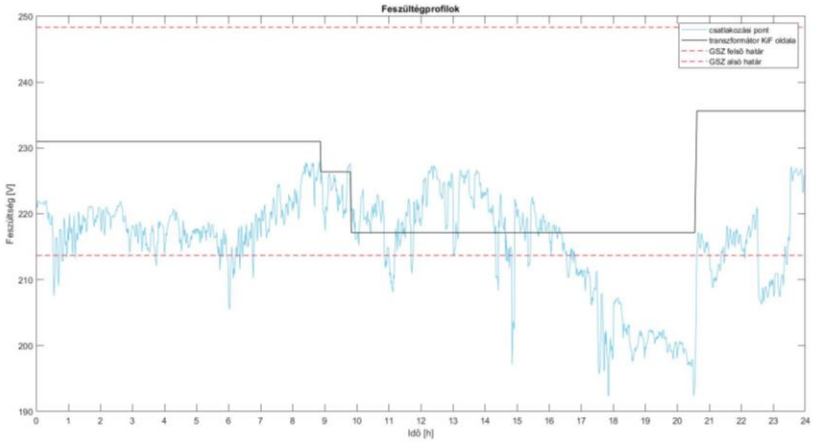
5.2. A károkozások összegzése

Az 1. táblázat tartalmazza a határértéksértések átlagos számát különböző esetekben. A félkövérrel és dőlttel jelölt adatok nagy biztonsággal jellemzik az átlagot, hiszen ezen esetekben a szórás értéke alacsony volt.

Megfigyelhető, hogy DoS támadások okozta határsértések száma nagyságrendileg kisebb az FDI támadások zöménél. A vizsgált forgatókönyvek közül leggyengébb támadásnak a ±5 %-os egész napos FDI bizonyult, míg legveszélyesebbnek a -/+10 %-os 3x30 perces. Ami az inverter szabályozási módokat illeti, legsebezhetőbbnek egyértelmen a *Q(U)* bizonyult. Habár jelentős eltérés a *P(U)* és *PF(P)* szabályozások ellenállóképessége között nincsen, előbbi kevesebb határértéksértést okozott. Ennek oka a meddőteljesítménybetáplálás lehet, amely mind *Q(U)*, mind *PF(U)* szabályozás esetén negatív hatással van a hálózat feszültségére.

Ismert, hogy a feszültségváltozás érzékeny a teljesítményre, így egységnyi ΔP vagy ΔQ a vezetékparaméterek függvényében befolyásolja a feszültséget. Ez a vizsgált vezeték impedanciájától függ, méghozzá az R/X arány szerint. Általánosan tehát fontos vizsgálnunk a teljes terheléshez képesti ΔP és ΔQ változásokat is sikeres támadás esetén, hiszen ezek is befolyásolják a hálózatra gyakorolt visszahatás nagyságát. Jelen vizsgálat eredményéből azt láthatjuk, hogy azonos DER termelés mellett a nagyobb fogyasztó

esetében átlagosan 15-20%-kal kevesebb határértéksértés történt. A kisebb fogyasztó 25%-kal kisebb a 19,2 kW-os társánál, így ezt összevetve az ellenállóképességgel megállapíthatjuk, hogy az ellenállóképességet becsülhetjük a fogyasztó méretével egyenesen arányosnak a vizsgálódás körülményei között. Ebből arra következtethetünk, hogy általánosságban a PV elleni támadások hatásának mértékét a befolyásolt teljesítmény teljes terheléshez és zárlati teljesítményhez viszonyított aránya határozza meg.



6. ábra Feszültségek effektív értékeinek alakulása egész napos ±10%-os FDI támadás esetén

6. ÖSSZEGZÉS

Az irodalmi áttekintés elmondható, hogy a DSO-k számára az elosztott termelés integrálását támogató smart technológiák, és azok standardizálatlansága okozzák a legnagyobb fenyegetettséget, hiszen a gyengén ellenőrzött kommunikációs csatornák feltörése gyakorlott hackerek számára nem jelent nagy kihívást, és hasonlók mondhatók el a TSO-k alállomásokkal való kommunikációról is. Lehetséges következményként mindkét esetben az ellátásbiztonság csökkenését, a hálózati veszteségek növekedését, fizikai károk keletkezését, érzékeny adatok kiszivárgását és meghamisítását, illetve szélsőséges esetben akár blackout bekövetkezését lehet érdemes számításba venni.

Munkám során egy modern kisfeszültségű hálózaton elkövetett támadások hatását vizsgáltam MATLAB környezetben. A terhelés alatt szabályozható transzformátort és okos inverteren kereszült csatlakozó napelemet tartalmazó példahálózaton az inverter elleni Denial of Service, illetve a csatlakozási ponton elhelyezkedő feszültségmérő ellen elkövetett False Data Injection támadások visszahatását vizsgáltam.

A szimuláció során több különböző fogyasztói méret, inverterszabályozás, támadási módszer és időzítés esetén vizsgáltuk a csatlakozási ponton a GSZ határérték megsértéseinek számát. Az eredményből látható, hogy mindhárom előbb felsorolt tényező jelentős hatással van a támadás sikerességére, illetve annak hálózatra gyakorolt hatására. A legfontosabb következtetés mégis az, hogy a visszahatás nagysága függ a vezeték *R/X* arányától, így az egységnyi hosszra jutó ΔP és ΔQ teljes terheléshez viszonyított nagysága befolyásolja a hálózaton támadás hatására bekövetkező feszültségváltozás mértékét. Továbbá arra a következtésre juthatunk, hogy a PV elleni támadások hatását a befolyásolt teljesítmény teljes terheléshez viszonyított aránya határozza meg. Érdemes továbbá megjegyezni, hogy az igencsak népszerű napelemes rendszerek sebezhetősége akár negatív hatással is lehet a piaci keresletükre.

A kutatás folytatásaként a jelenlegi statikus szimulációt szeretném loadflow-alapú számításokra átültetni DigSIlent PowerFactory környezetben, hogy a hálózati viszonyokat minél pontosabban és részletesebben figyelembe lehessen venni. Ezt követően egy valós hálózatrészt elemzésére kerülhet sor az eszközök valós fizikai és specifikációs korlátjainak figyelembevételével. Lehetőség szerint pedig a továbbiakban akár ipari szereplők által alkalmazott smart megoldások ellen elkövetett támadásokat is szeretnék a gyakorlatban vizsgálni.

7. IRODALOMJEGYZÉK

[1] ***Molnár M.:*** *Szimulációs keretrendszer tervezése villamosenergia-rendszer elleni kiberfizikai támadások vizsgálatához,* Tudományos Diákköri Konferencia, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Villamosmérnöki és Informatikai Kar, 2019

[2] ***Dondossola, G., Garrone, F., Proserpio, G. and Tornelli, C.:*** *"Impact of DER integration on the cyber security of SCADA systems — The Medium Voltage regulation case study,"* CIRED 2012 Workshop: Integration of Renewables into the Distribution Grid, Lisbon, 2012, pp. 1-4, doi: 10.1049/cp.2012.0808

[3] ***Morel, Q. and Coste, T.:*** *"IEC 61850 to the service of power system flexibility,"* CIRED - Open Access Proceedings Journal, vol. 2017, no. 1, pp. 1792-1794, 10 2017, doi: 10.1049/oap-cired.2017.0816.

[4] ***Kang, D., Kim, H. and Choi, S.:*** *"Methodology for Quantifying the Economic Impact of Cyberattacks on Bulk Electric Systems,"* 2019 IEEE/IAS 55th Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS), Calgary, AB, Canada, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICPS.2019.8733322

[5] ***Johnson, J., Quiroz, J., Concepcion, R., Wilches-Bernal, F. and Reno, M. J.:*** *"Power system effects and mitigation recommendations for DER cyberattacks,"* IET Cyber-Physical Systems: Theory & Applications, vol. 4, no. 3, pp. 240-249, 9 2019, doi: 10.1049/iet-cps.2018.5014.

[6] ***Teymouri, A., Mehrizi-Sani, A. and Liu, C.:*** *"Cyber Security Risk Assessment of Solar PV Units with Reactive Power Capability,"* IECON 2018 - 44th Annual Confer-

ence of the IEEE Industrial Electronics Society, Washington, DC, 2018, pp. 2872-2877, doi: 10.1109/IECON.2018.8591583.

[7] ***Jacobs, N.:*** *"Analysis of System and Interoperability Impact from Securing Communications for Distributed Energy Resources,"* 2019 IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI), Champaign, IL, USA, 2019, pp. 1-8, doi: 10.1109/PECI.2019.8698915.

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

A fotovoltaikus, megújuló erőművek primer villámvédelmi kérdései

A PV erőművek az IEC 62305 szabvány és a PMAV szempontjából

A megújuló energiák átalakításán alapuló erőművek egyre nagyobb számban vannak jelen Magyarországon is a teljes energiamixet tekintve; ezen belül is a fotovoltaikus (PV) erőművek részaránya növekszik leginkább. A cikkben a PV erőművek villámvédelmi kérdéseit vizsgáljuk az IEC 62305 szabvány alapján. A szabványban a primer villámvédelem szükségessége egyes esetekben a szekunder villámvédelem telepítése esetén indirekt következik. A cikk második felében ennek a feloldását oldjuk meg a PMAV segítségével.

Power plants based on renewable energy sources are increasing also in Hungary in terms of the total energy mix, including the part of photovoltaic (PV) power plants. In this article, the focus is on the lightning protection issues for PV power plants based on the IEC 62305 standard. According to the standard, if secondary lightning protection is installed, then primary protection is a must indirectly in some cases. In the second half of the article, resolving this will be attempted using PMAV.

Kulcsszavak: **Fotovoltaikus erőmű, villámvédelem, PMAV, kockázatelemzés**

1. RÖVIDÍTÉSEK JEGYZÉKE

IEC	International Electrotechnical Commission
LPL	Lightning Protection Level
LPS	Lightning Protection System
P_x	Probability
PMAV	Probability-Modulated Attractive Volume
PV	Photo-Voltaic
R_x	Risk
SPD	Surge Protection Device
SPM	Surge Protection Module
VER	villamosenergia-rendszer

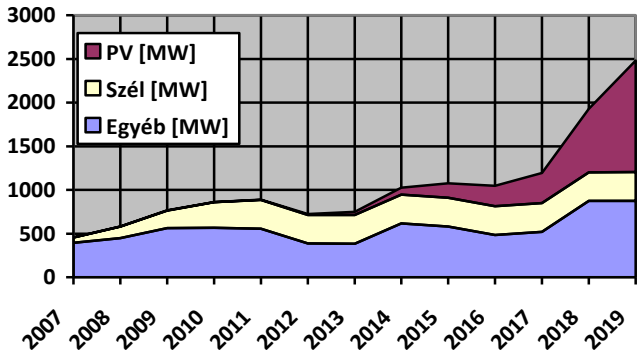
2. BEVEZETÉS

A megújuló energiákat villamos energiává alakító erőműtípusok több fajátja létezik úgy, mint szélerőmű, fotovoltaikus erőmű, geotermikus erőmű vagy biomassza erőmű. Magyarországon a szélerőművi kapacitások az utóbbi években nem növekedtek egy korábbi törvényi korlátozás miatt (ld. 1. ábra). Ezzel szemben a fotovoltaikus kapacitások drasztikusan növelik részarányukat az energiamixben, illetve a magyar villamosenergia-rendszeren (VER) belül (ld. 2. ábra).

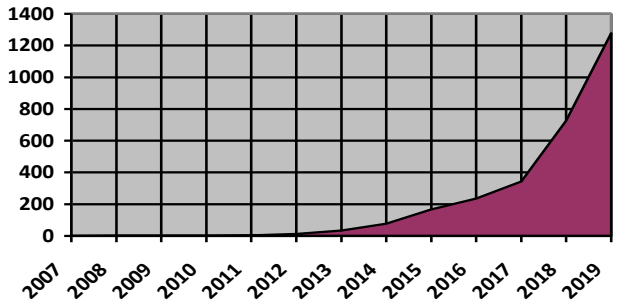
A drasztikus növekedés előtérbe hozza mind a primer, mind a szekunder villámvédelem kiépítésének a kérdéseit, mint hogy:

- kell-e primer villámvédelem?
- kell-e szekunder villámvédelem?
- milyen fokozat szükséges (LPL, SPD)?

A három kérdés közül, a szekunder villámvédelem szükségessége egyértelmű, ugyanis az a kiszolgáló és vezérlő berendezések miatt elengedhetetlen, hogy biztonságosan üzemelhessen a fotovoltaikus park, s annak szükséges szintje (SPD) az IEC 62305 [1] szabványban leírtaknak megfelelően építendő ki.



1. ábra A magyar VER megújuló energiaforrásból származó kapacitása MW-ban éves bontásban [2], [3]



2. ábra A magyar VER fotovoltaikus kapacitása MW-ban éves bontásban [2], [3]

Több irodalomban is találkozhatunk a témával, ahol a primer villámvédelem szükségességét, vagy a leghatékonyabb megoldást boncolgatják. [4]–[6] Többek között ebben a témában jelent meg a szerzők által publikáció és könyvrészlet (folyóiratcikk) is [7], [8]. A problémakört több irányból is megközelíthetjük:

A) mekkora valószínűséggel történik kár és annak milyen hatásai lehetnek; [7], [8]
B) szabványossági szempontból megfelel-e (vagy szükséges annak felülvizsgálata); [9]

C) szekunder hatások és azok generálta károk. [10]–[12]

A cikkben az első, *A)* pontot vesszük figyelembe oly módon, hogy először a várható kockázatot állapítjuk meg a PMAV elmélet [13] alkalmazásával. A cikk végén pedig figyelmet szentelünk a *B)* pontnak is.

A *C)* pontban említett szekunder hatásokat F.A. Qureshi [14] külön taglalja a lehetséges meghibásodások között. Csak párat kiemelve, amelyek számottevően növelik a projekt megtérülési idejét:

- nem megfelelő földelés;
- túl nagy, összefüggő PV modulok egy sztringben;
- tűz tovaterjedése miatti hibaterjedés.

3. A SZÜKSÉGES VÉDELMI SZINT

A fotovoltaikus rendszerek villámvédelmének tervezésére az IEC 62305 szabvány [1] vonatkozik. Ez akkor is igaz, ha esetenként igen nagy kiterjedésű, és nagy teljesítményű fotovoltaikus rendszerről is beszélünk. A szabványból kiindulva vizsgálta meg a kérdést Rousseau [9] is, aki hasonló következtetésre jutott. Szigorúan a szabványra támaszkodva megállapítható egy olyan feltételrendszer, amely alapján a primer védelem szükségessége megkérdőjelezhető. Az alábbi 3. ábra a szabvány logikáját mutatja be. Először kiválasztunk egy védelmi szintet (pl. LPS III), ami szerintünk megfelelő lesz a kockázatszámítás szempontjából, és amennyiben mégsem, úgy a számítást elölről kell kezdeni már egy nagyobb védelmi fokozatra (pl. LPS II). Minezt addig ismételve, amíg a várható kockázat kisebb nem lesz, mint a szabványban előírt érték.

Amennyiben jobban megnézzük ezt, illetve a szabvány további részeit, akkor kiemelve csak egy-egy példát, a P_C érték, ami a káresemény várható bekövetkezésének valószínűségét jelenti egy belső rendszer esetében, illetve a P_B, ami az objektumot közvetlenül érő villám káros hatása következtében bekövetkező kár valószínűségét jelenti. Ezen két esetben egymástól függetlenül az SPM (szekunder villámvédelmi rendszer) és az LPS (primer villámvédelmi rendszer) kockázatát is növelik ezek az értékek. Tehát, ha nincs primer villámvédelem (LPS) kiépítve, úgy a szekunder védelem szükségessége nő.

Illetve fontos megemlíteni, hogy egy további tényező, az R_M, ami a P_M-en keresztül direkt befolyásolja az LPS telepítését. Ez a tényező egy belső rendszer meghibásodásának valószínűségével súlyozza az értékeket. Ezen értékek előre meghatározottak, szabványosítottak. A kockázati tényezők helytelen vagy indokolatlanul szigorúbb felvétele eredményezhet nagyobb LPS szintet.

A szabvány 4 részre bontható aszerint, hogy a védendő objektum milyen célt szolgál és a kiépítendő villámvédelmi rendszer (LPS+SPM) annak fontosságára tekintettel megtérülő legyen. Ennek megfelelően beszélhetünk az alábbiakról:

1) R_1, emberi élet elvesztésének kockázata ($<10^{-5}$)
2) R_2, közszolgáltatás kiesésének kockázata ($<10^{-3}$)
3) R_3, kulturális örökség elvesztésének kockázata ($<10^{-4}$)
4) R_4, gazdasági érték elvesztésének kockázata ($<10^{-3}$).

Az R_1 kockázati tényezőt a vizsgált esetekben rendre figyelembe vették, azonban itt fontos megemlíteni, hogy villámvédelmi szempontból az az eset kockázatos csak, amennyiben kezelőszemélyzet zivataros időben tartózkodhat az erőmű területén. Ennek szabályozása az R_1 kockázati tényező figyelmen kívül hagyását jelenti.

Az R_2 tényező vizsgálata triviálisnak tűnhet, viszont ehhez a hatályos energiaszabályozási előírásokhoz kell nyúlnunk. A hagyományos erőmű típusokhoz képest ezeknek a rendszereknek nem szükséges ugyanolyan szigorú menetrendet követniük, mivel a termelést az időjárás viszontagságai kellően befolyásolják, hogy az közel lehetetlen legyen. Egy esetleges kiesés nem jár akkora következménnyel, méretüknél fogva is, hogy valójában a közműkiesés lehetőségével számolni kelljen.

Az R_3 elhagyható, mivel egy fotovoltaikus erőmű nem számít kulturális örökségnek, illetve várható élettartamuk (30-40 év) utáni leszerelésük után nem maradnak az adott. Ezzel szemben egy igen régi erőmű (pl. a Kelenföldi erőmű) a villamosenergetika szakmatörténeti és építészeti jelentőségű kiemelkedő emlékének számít.

Az R_4 tényező összetettebb, sokrétű gazdasági, mérnöki számítást igényel.

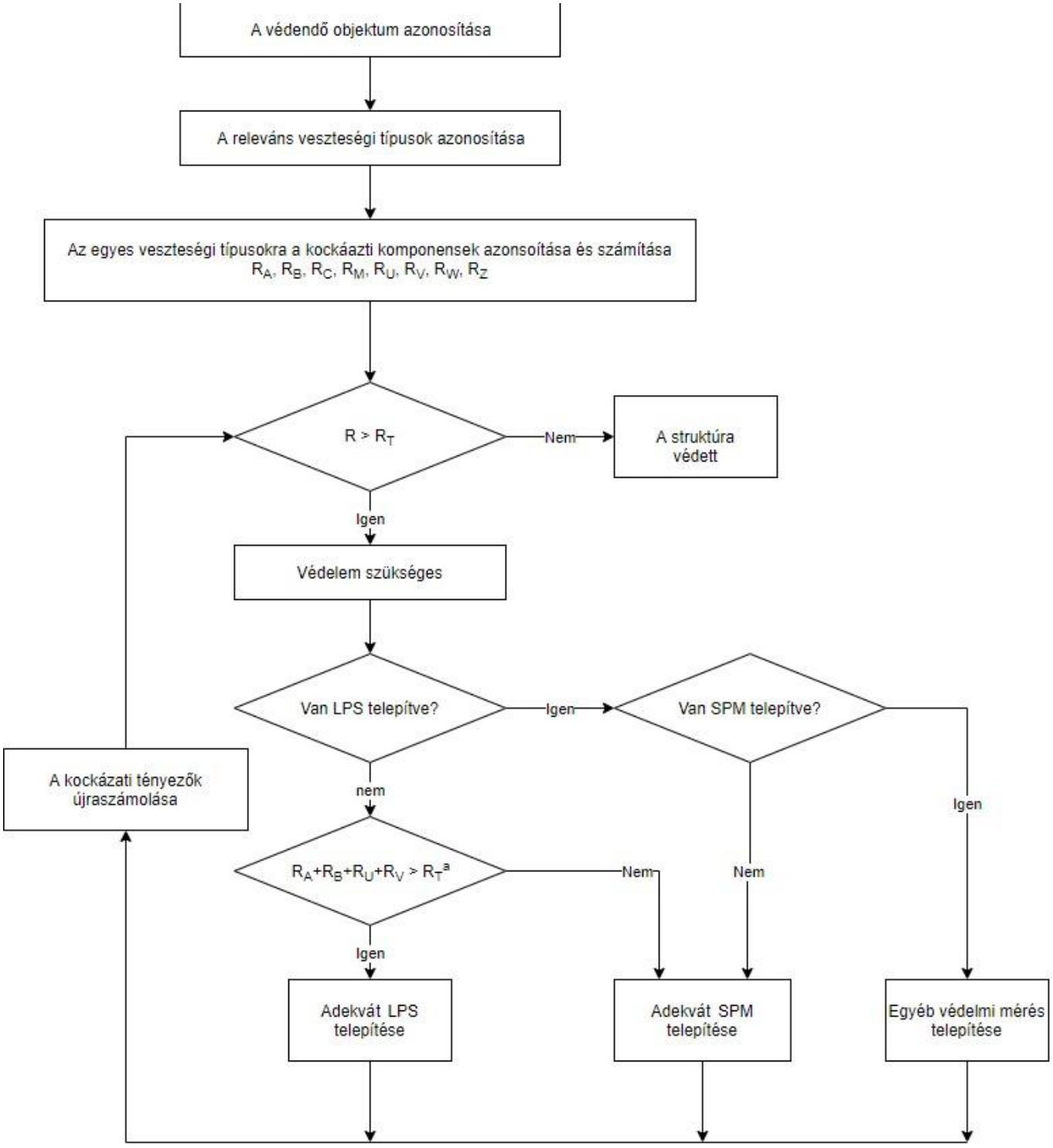
4. FOTOVOLTAIKUS PARK KOCKÁZATELEMZÉSE A PMAV ELMÉLET SEGÍTSÉGÉVEL

A fotovoltaikus erőművek a hagyományos épületek és más épített objektumokhoz képest speciális elrendezésként értelmezhetők. Egyrészt a beépített teljesítménnyel arányosan az elfoglalt alapterület nő, illetve viszonylag alacsony építményről beszélhetünk. Figyelembe kell venni a telepítés során a – sok esetben a nagy kiterjedés miatt változékony – terepviszonyokat, úgy, mint a talaj dőlésszögét, annak anyagát stb., illetve az egyes részobjektumok által vetett (fény)árnyékolás hatását.

Speciális az elrendezés abból a szempontból is, hogy hasonló egységekből épül fel. Ezen egységek alkotnak nagyobb halmazokat, illetve ezek között a korábban felsoroltak miatt változó, de leginkább hasonló távolságok vannak. Ez utóbbi amiatt is fontos, mert összevetve ezeket a távolságokat egy szorosan összefüggő – az egyes napelemtáblák között térközök nélküli – esethez képest elhanyagolható mértékben növelik egy lehetséges villámcsapás bekövetkeztét, mint az a tény, hogy ezen speciális objektumok szélei vannak kitéve leginkább megnövekedett kockázatnak.

4.1. A vagyonvédelmi eszközök mint a villámvédelem részei

Csak szabványosított eljárásokat vizsgálva a primer villámvédelem kiépítésének szükségessége nem kérdőjeleződik meg. Az emiatt telepített villámvédelmi felfogók



3. ábra Az IEC szabvány folyamatábrája a megfelelő védelmi szint kiválasztásához (szabad fordításban)

rendszerét vizsgálják mind az első, mind pedig az időszakos felülvizsgálatok során, amikor arra a kérdésre kell választ adni, hogy a kiépített rendszer megfelelő-e az elvárt védelmi szintet tekintve. Ezen vizsgálatok nem veszik figyelembe a környezetben megtalálható minden egyes objektumot, ahol a vagyonvédelmi kerítés primer villámvédelmi felfogóként kellene figyelembe venni, s ezáltal a kockázati szint csökkenthető.

Ezt támasztja alá a PMAV elmélet [13] alapján végzett kalkuláció is, amely alapján egy módosított számítási metodika választ tud adni arra az adott elrendezésre, hogy szükséges-e primer villámvédelem, illetve, ha igen,

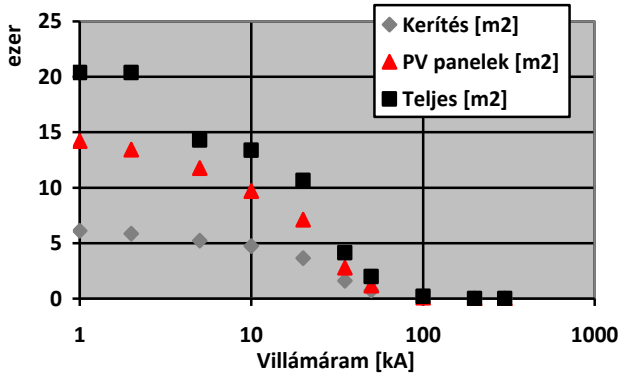
akkor milyen védelmi szintet érdemes alkalmazni esetleg eltérve a szokásos gyakorlattól.

A fotovoltaikus erőművek esetében nem csupán a fotovoltaikus panelek, hanem egyéb, az esetleg fellépő túlfeszültségekre érzékeny rendszerek (elektronikák, védelmek, hajtások és mérőrendszerek) sérülése jelentős járulékos költségeket okozhat. Ezen modulok szekunder villámvédelemmel való ellátása mindenképpen szükséges a biztonságos üzemelés érdekében.

4.2. A PMAV számítás eredményei

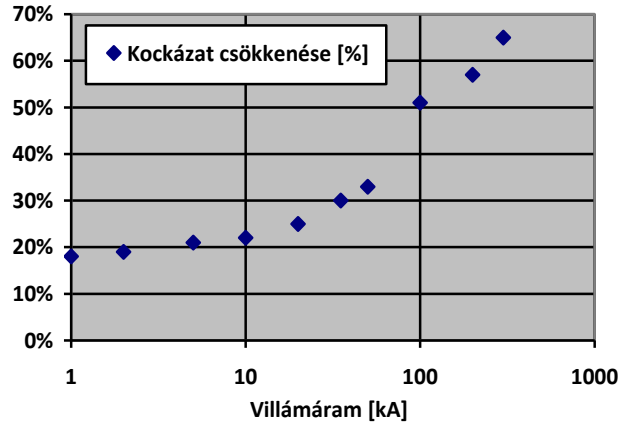
Számításokat végeztünk, hogy kerítéssel és anélkül, mekkora a valószínűsége egy-egy adott áramerősségű villám becsapásának az adott térrészekre. A teret két részre bontottuk:

1) kerítés és
2) PV asztalok (összes).



3. ábra Egy képzeletbeli 8x12 asztalból álló PV parkra a PMAV számítás eredményei

Ennek eredménye a 3. ábrán látható. A számítást úgy is megcsináltuk, hogy a kerítést figyelmen kívül hagytuk, és ehhez hasonlítottuk, hogy mekkora a kettő közötti eltérés (ld. 4. ábra).



4. ábra Egy képzeletbeli 8x12 asztalból álló PV parkra a PMAV számítás eredményei alapján a kockázat csökkenésének százalékos mértéke a kerítés nélküli esethez képest

Jól látható, hogy a két eset között mekkora az eltérés. A kisebb áramértékek esetében is közel 20%-os, de nagyobb áramértékek felé haladva ez az arány 60% fölé emelkedik.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A szabványokban meghatározott számítási módok és megadott értékek, amelyek az alacsony tereptárgyaknál nagy biztonsággal alkalmazhatók, magas, illetve nagy kiterjedésű építmények esetén nem használhatók. [15] Ezekre a korábbiaktól eltérő metódusok kialakítása szükséges.

A fotovoltaikus erőművek alacsony, de nagy kiterjedésű objektumok, amelyeket nagyobb számban a szélein éri villámcsapás. A vagyonvédelmi eszközök figyelembevétele a kockázatszámítás során elengedhetetlen fontosságú.

Abban az esetben, ha a PV park kellően nagy, a széleire telepített vagyonvédelmi kerítés és egyéb terepobjektumok csökkentik annak a lehetőségét, hogy az adott PV panelekbe csap a villám. Egy adott méret felett természetesen a park közepébe kiegészítő, primer villámvédelmi felfogókat szükséges telepíteni.

További vizsgálatok szükségesek, hogy megállapítható lehessen aza határ, amelynél teljesen elhanyagolható, s mely az, amelynél már szükséges kiegészítő primer villámvédelmet telepíteni.

6. TÁMOGATÁS

A kutatás az Innovációs és Technológiai Minisztérium támogatásával, a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal mint Kezelő szerv útján az Új Nemzeti Kiválóság Program keretében készült.

Új Nemzeti Kiválóság Program

Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal

Innovációs és Technológiai Minisztérium

7. IRODALOMJEGYZÉK

[1] ‘IEC/EN 62305:2011 - Lightning Protection’, 2011.
[2] IRENA, ‘Renewable Capacity Statistics 2017’, Abu Dhabi, 2017. [Online]. Available: https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2017.pdf.
[3] IRENA, ‘Renewable Capacity Statistics 2020’, Abu Dhabi, 2020. [Online]. Available: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Mar/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2020.pdf.
[4] C. A. Christodoulou, L. Ekonomou, I. F. Gonos, and N. P. Papanikolaou, ‘Lightning protection of PV systems’, *Energy Syst.*, vol. 7, no. 3, pp. 469–482, Aug. 2016, doi:

10.1007/s12667-015-0176-2.
[5] M. Hannig, V. Hinrichsen, R. Hannig, and R. Brocke, 'An analytical consideration on the striking probability and the total amount of strikes to simple structures according to standardized regulations', in *32nd International Conference on Lightning Protection*, 2014, pp. 1151–1158, doi: 10.1109/ICLP.2014.6973339.
[6] A. Rousseau and P. Gruet, 'Practical High Frequency Measurement of a Lightning Earthing System.', in *27th International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, 2004.
[7] Z. Tóth, I. Kiss, and B. Németh, 'Effect of near wind turbines on the risk of lightning stroke on overhead lines', in *International Colloquium on Lightning and Power Systems*, 2017.
[8] Z. Tóth, I. Kiss, and B. Németh, 'Some Significant Problems of Lightning Protection in Flexible Energy Systems', in *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, vol. 521, 2018, pp. 293–299.
[9] A. Rousseau and M. Guthrie, 'Direct Lightning Withstand of Corrugated Stainless Steel Tubing for Gas', in *31st International Conference on Lightning Protection*, 2012.
[10] C. A. Charalambous, N. D. Kokkinos, and N. Christofides, 'External lightning protection and grounding in large-scale photovoltaic applications', *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 56, no. 2, pp. 427–434, 2014, doi: 10.1109/TEMC.2013.2280027.
[11] E. Salinas, K. Yamamoto, L. Severo, and A. Pinhel, 'Some examples of EMI/EMC in wind power systems and large solar parks', in *IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC/APEMC)*, May 2018, pp. 423–427, doi: 10.1109/ISEMC.2018.8393813.
[12] N. H. Zaini *et al.*, 'On the effect of lightning on a solar photovoltaic system', in *33th International Conference on Lightning Protection*, Sep. 2016, pp. 1–4, doi: 10.1109/ICLP.2016.7791421.
[13] T. Horváth, 'Villámhárítók védőhatásának vizsgálata kismintán', 1960.
[14] F. A. Qureshi, Z. Uddin, M. B. Satti, and M. Ali, 'ICA-based solar photovoltaic fault diagnosis', *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 30, no. 8, pp. 1–26, Aug. 2020, doi: 10.1002/2050-7038.12456.
[15] S. F. Madsen and H. V Erichsen, 'Numerical model to determine lightning attachment point distributions on wind turbines according to the revised IEC 61400-24', in *International Conference on Lightning and Static Electricity (ICOLSE)*, 2009, p. 13.

Székely László, Dr. Kiss István

Páratartalom növelés hatása az elektrosztatikus porleválasztás folyamataira

Az elektrosztatikus porleválasztókat (ESP) széleskörűen használják ipari környezetben a rendkívül nagy leválasztási fokuk miatt (>99%), a kibocsájtott szemcsék mennyiségének határértéken belül tartása érdekében. A problémát a néhány mikronos vagy kisebb átmérőjű szemcsék adják, amelyek nagy mennyiségű áramlásakor a felhalmozódó tértöltés annyira megnőhet, hogy visszaszorítja a korona áramot (corona-quenching).
Néhány esetben a rossz leválasztási fokkal rendelkező porleválasztó berendezés javítása érdekében gőzt juttatnak vissza a leválasztási térbe. A páratartalom növelése számos paramétert megváltoztat, az eredeti elektrosztatikai és áramlástani folyamatokra is nagy hatást gyakorolhat.
Cikkünkben bemutatjuk a „hagyományos" (ESP) és a gőz visszavezetéssel kiegészített elektrosztatikus porleválasztók (Wet ESP) főbb jellemzőit. A kutatás folytatásaként laboratóriumi mérések során portulajdonságokat határoztunk meg, hogy azok bemenő adatként szolgáljanak majd numerikus modellekhez.

Electrostatic precipitators are widely used in industrial environments due to their high collection efficiency (>99%) to keep the amount of particles emitted within their limit. The problem is caused by particles of a few microns or smaller in diameter, when flowing in large volumes, can increase the accumulated space charge so much as to produce corona-quenching.
In some cases, in order to increase the efficiency, steam is returned to the separation space. Increasing the humidity changes several parameters and can also have a major impact on the initial electrostatic and hydrodynamic processes.
In our article, we present the main features of conventional and wet (WESP) electrostatic precipitator. As a continuation of the research, we determined dust properties during laboratory measurements to give as input data for numerical models.

Kulcsszavak: **Elektrosztatikus porleválasztó, ipari elektrosztatika, páratartalom, átlagos szabad úthossz**

1. BEVEZETÉS

Az elektrosztatikai jelenségeket már az ókori Görögországban felismerték, azonban a 18-19. századig háttérbe szorultak, elsősorban különböző játékos kísérleteket valósítottak meg velük. A 19. század második felében alakult ki az elektrosztatika elméleti háttere, de a 20. századi robbanásszerű ipari forradalomban kezdtek el a témával mélyrehatóbban foglalkozni.

Az ipari termelés folyamatosan változott (például műanyagok előállítása), ami miatt a korábbiakhoz képest sok baleset, tűz és robbanás keletkezett, továbbá különböző technológiai problémák adódtak az egyre kisebb elektronikai eszközök gyártásával kapcsolatban. Az előzőekben vázolt pontok miatt a korszakban az elektrosztatikus jelenségektől igyekeztek védeni magukat, a veszélyek ellen felkészülni. Azonban, párhuzamosan a veszélyhelyzetekkel, elkezdték felismerni az elektrosztatikus jelenségeknek pozitív, az ipar számára hasznosítható oldalát is.

2. ELEKTROSZTATIKUS PORLEVÁLASZTÓ

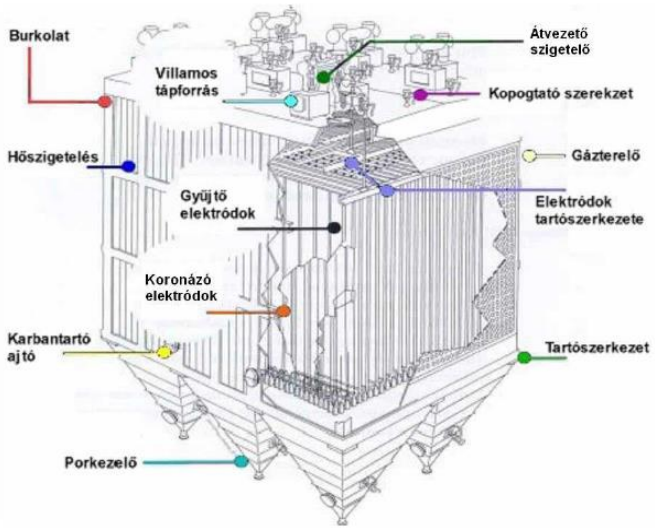
Új technológiák, új iparágak fejlődtek ki, felismerve a lehetőséget a feltöltött anyagok közötti taszítás és vonzás fizikájában. Beszélhetünk különböző festék- és porszórási eljárásokról (elektrosztatikus festék- és porszórás, fénymásolás) de akár nagyobb volumenű, leválasztási technológiába tartozó, a környezetünk tisztaságának megóvása érdekében telepített elektrosztatikus pernye-, csepp- és porleválasztókról. Nagy erőművek, és nagy környezeti terheléssel üzemelő ipari üzemek ma már el sem képzelhetőek valamilyen kibocsájtást szinten tartó vagy csökkentő technológia alkalmazása nélkül.

A porleválasztási technológia lehet száraz és nedves is. Az egyes berendezések témát érintő fő mutató száma a leválasztási fok, amely lehet a teljes leválasztásra vonatkozó (összesített, por tömegre) vagy frakcióportalanítás (bizonyos méretű szemcsék kiválasztása). Az emberi légútra veszélyes frakciók a kis átmérőjű, néhány mikronos és kisebb átmérőjű tartományban levő szemcsék, így célszerű ezeket helyben összegyűjteni, szétterjedésüket és lerakódásukat meggátolni.

Nagy ipari üzemekben és erőművekben széles körben elterjedt az elektrosztatikus porleválasztók használata. A főbb előnyük a többi porleválasztási technológiával szemben, hogy széles hőmérséklet tartományban működnek (35°*C*-800°*C*), nagy por-mennyiséget képesek kiszűrni (néhány 100 $g(m)^{-3}$), nagy áteresztő képességgel rendelkeznek (1500 $m^3(s)^{-1}$, széles szemcseméret tartományban képesek a port 99%-os hatásfokkal leválasztani. A pontos paraméterek értéke a fizikai berendezés előre megtervezett konstrukciójától függ.

2.1. Száraz működésű porleválasztó felépítése

Ezeknek a gigantikus ipari berendezéseknek a felépítése nem túl bonyolult. A porleválasztó kamrában földelt (ún. gyűjtőelektródok) és nagyfeszültségű (koronaelektródok) elektródok találhatók, szigetelések, tartó- és kopogtató szerkezetek, valamint működtető elektronika. Egy elektrosztatikus porleválasztó berendezés felépítését az 1. ábra mutatja be.



1. ábra Száraz elektrosztatikus porleválasztó egy típusának felépítése [1]

A por leválasztását a koronázó elektródból induló kisülések segítik, melyek a belépő levegőmolekulákat ionizálják, és ezek az ionok megtapadva a porszemcsék felületén, a gyűjtőelektród felé sodródnak. A megtapadó szemcsék elvesztik töltésüket, ezt követően vagy lezuhannak a gyűjtőelektródról a gravitáció miatt, vagy kopogtató szerkezet segítségével távolodnak el róla.

A koronaelektródokat gerjesztő tápegység transzformátorból és nagyfeszültségű egyenirányítókból áll. Tapasztalati úton meghatározták, hogy negatív feszültségű táplálással nagyobb koronaáramot lehet elérni, emiatt (habár az ózon kibocsájtás nagyobb) ez a megoldás terjedt el a gyakorlatban. Az elektródok alakja különböző geometriájú lehet. Elterjedt a hengeres cső és rárögzített tüskés megoldás. A térerősség nagy gradiense miatt számolni kell a koronaelektród felületére tapadó porral is (gradiens effektus).

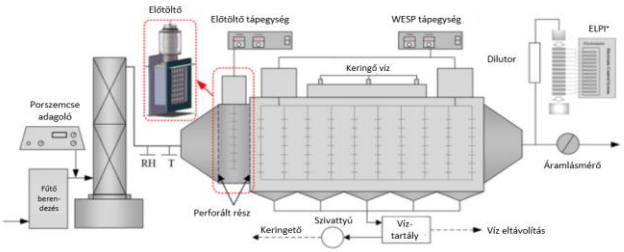
A berendezések típusától függően létezik egyfokozatú vagy többfokozatú. A több fokozat célja a jó leválasztási fok megvalósítása kevesebb olyan kisüléssel, amely nem vesz részt a portértöltés létrehozásában. Az ilyen típusú berendezéseknél az első zónában a por/pernye szemcsék feltöltése zajlik, további szakaszaiban a jelen lévő villamos tér segítségével a leválasztás.

2.2. Nedves működésű porleválasztó felépítése

Már a korai 1910-es években igény jelentkezett új típusú elektrosztatikus porleválasztókra, amikor felismerték a problémát, hogy a nagy ellenállású porok leválasztása kisebb mértékű vagy éppen, ha a leválasztandó anyag gázfázisú magas hőmérsékleten, ezért hűtésre szorul. Bizonyos típusú gázok abszorbeálására igény mutatkozott, hogy a szennyező anyagok egy része kondenzálódjon, mielőtt elérné a füstkivezető kéményt. Így tulajdonképpen cseppleválasztás történik.

A probléma kompenzálására gyártották a nedves típusú elektrosztatikus porleválasztókat, először 1907-ben. További előnye, hogy képes a néhány mikronos és szubmikronos szemcsék nagy leválasztási fokkal való leválasztására [2].

Felépítésük nagyon hasonlít a száraz típusúéhoz, azonban fontos kiegészítő eleme folyadék vagy gőzvisszavezető cső, továbbá, hogy a kopogtatás helyett vízsugárral is eltávolíthatják a megtapadó port.



2. ábra Nedves elektrosztatikus porleválasztó egy típusának felépítése [1]

Annak ellenére, hogy több mint 100 éves múltja van, kevésbé jól ismert technológia.

Alapvetően 3 különböző megvalósítása létezik a porleválasztást illetően. Az első, hogy a gyűjtőelektród felületén folyamatosan áramló vízréteget folyatnak, így a por vagy szennyeződés a vízzel együtt leválik a gyűjtőelektródról. A második, hogy adott időközönként nagynyomású vízsugárral tisztítják meg az elektródok felületét. Végül a harmadik típusú megoldás, hogy kis- és közepes nyomáson állandó vízsugarat/permetet juttatnak a teljes leválasztó térbe. A cikk további részében a harmadik megoldás körülményeit részletezzük.

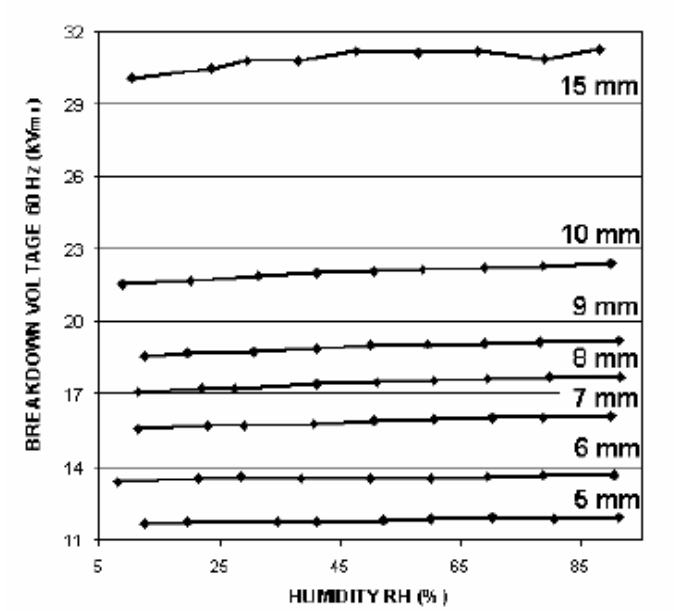
3. PARAMÉTEREK KÖZÖTTI ÖSSZEFÜGGÉSEK

Tapasztalati úton rájöttek arra, hogy folyamatos gőz-hozzávezetéssel nagyobb villamos térerősség jöhet létre anélkül, hogy átütés következne be. Fontos szempont, hogy a porleválasztó berendezés a víz forráspontja felett üzemeljen (a bejuttatott víz se hűtse le túlzott mértékben), különben számolni kell az elektródok gyorsabb korróziójával, ami a gyakori kopogtatás hozzájárulásával hamar mechanikai problémákhoz vezethet. A karbantartási munkálatoknak rendkívül nagy költsége van, valamint hosszadalmas és az ESP kulcsfontosságú szerepe miatt a gyár leállásához vezethet.

3.1. Átütési feszültség

A leválasztást több paraméter befolyásolja. Az egyik, hogy hol történik az átütés. Az átütést az elektronok által megtett átlagos szabad úthossz befolyásolja, mely értékére a páratartalom növelésével módosítható. Átütés szempontjából az elektronok szabad úthosszának csökkentése az átütési feszültség növekedését eredményezi.

A vízgőz nagyobb átütési feszültséget eredményez, mint a levegő, ebből eredően a vízgőz és levegő keveréke (nagyobb páratatalom) nagyobb átütési feszültséggel rendelkezik (3. ábra).



3. ábra Átütési feszültség alakulása különböző elektród távolságok esetén, a páratartalom függvényében [4]

A jelenség azzal magyarázható, hogy a páratartalom növekedésével az aktív zóna kiterjedése csökken. Ezáltal az elektronok szabad úthossza csökken, nagyobb térerősség szükséges az ütközési ionozás létrejöttéhez.

A nagyobb átütési feszültség azt jelenti, hogy a feszültséget növelve egyre nagyobb felületi térerősség jön létre a koronázó elektródokon, azaz nagyobb a koronakisülés intenzitása, és a vele együtt járó koronaáram értéke megemelkedik. Általánosságban elmondható, hogy a nagyobb koronaáram nagyobb leválasztási fokkal jár együtt. Néhány esetben ez nem igaz, hiszen a megnövekedett töltésszám ellenkorona kialakulásához vagy korona „quenching”-hez vezethet. Ezekben az esetekben a leválasztási fok javítása érdekében impulzus üzemű táplálást szoktak használni [5].

4. TÖLTŐDÉS HATÉKONYSÁGA

A töltődés hatékonysága nem csak az átütési feszültségtől függ, hanem az ionok átlagos szabadúthosszától is, azaz, hogy mekkora távolságot tesz meg az (általában negatív oxigén) ion. Fontos különbség az elektronok átlagos szabad úthosszával szemben, hogy jelen esetben nem a koronázó elektródok közvetlen környezetében vizsgáljuk a részecskéket. A vizsgált terület már a koronakisülés úgynevezett aktív zónáján kívüli rész, ahol a lelassuló elektronok negatív ionokat hoznak létre. A legfontosabb kérdés, hogy az ion találkozik-e a szennyeződés (vagy por) részecskéivel vagy sem. A legkedvezőbb eset, ha a por több ionnak tud nekiütközni és így jobban fel tud töltődni.

Az ionok a finom szennyeződést diffúziós töltődés segítségével töltik. Ezt a folyamatot befolyásolja az ionok szabad úthossza.

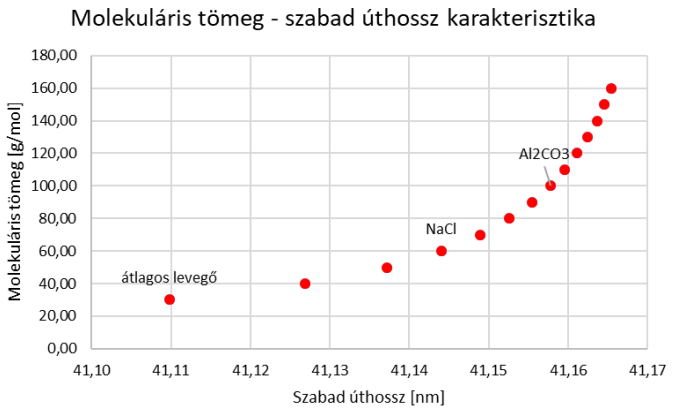
Az ionok átlagos szabad úthossza meghatározható az alábbi képlet alapján [6]:

$$\lambda_{ion} = 1.329 * \frac{Z_{ion}}{e} * \sqrt{\frac{k * T * M_{ion} * M_{levegő}}{(M_{ion} + M_{levegő}) * N_a}} \quad (1)$$

ahol Z_{ion} az ionmozgékonyság, e az elektron töltése, k a Boltzmann állandó, T hőmérséklet, M_{ion} az ion molekuláris tömege, $M_{levegő}$ a levegő moláris tömege és N_a az Avogadro szám. Gyakori eset, hogy a porleválasztó NaCl molekulákat kell leválasszon.

Ha az ionmozgékonyság 1,9*10^{-4} $m^2(Vs)^{-1}$, T=25°C, M_{ion} 58,5 g(mol)$^{-1}$, $M_{levegő}$ pedig az átlagos 29 $g(mol)^{-1}$-nak választjuk, a többi fizikai állandó, akkor az átlagos szabad úthossz 41,1 *nm*.

Az (1) egyenlettel számolva több különböző molekula tömegét figyelembe véve, meghatározható az egyes esetekhez tartozó szabad úthossz, amely a 4. ábrán látható.



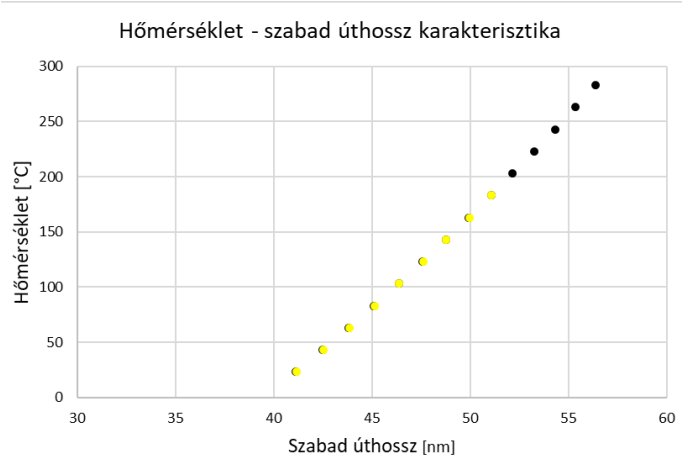
4. ábra Különböző anyagok esetén meghatározott ionokhoz tartozó átlagos szabad úthossz

A számítás során feltételeztem, hogy a porszemcsék között az átlagosnak minősülő levegő kisebb hányadot vesz ki egységnyi térfogatban, túlnyomó részt pedig a vizsgált anyagok (Nátrium-klorid, Alumínium-oxid) töltik ki. A feltételezés csupán az egyszerűsítés kedvéért értelmezhető, a valóságban az anyag maga a porszemcse, viszont két szemcse között lévő távolság mikroszkopikusan nézve hatalmas.

Végeredményként mindenképpen elmondható, hogy csupán a molekulák tömegét figyelembe véve, az átlagos szabad úthossz nem változik számottevően.

A porleválasztó kamrában kialakult nagy hőmérséklet – ahogy az 5. ábrán látszik is -, hatással van az átlagos szabad úthosszra, hőmérsékletskálán emelkedve növekszik.

A vízgőz bejuttatása a leválasztó térben sokszor csökkenti a leválasztó tér hőmérsékletét, így az ionok átlagos szabad úthossza is csökken.

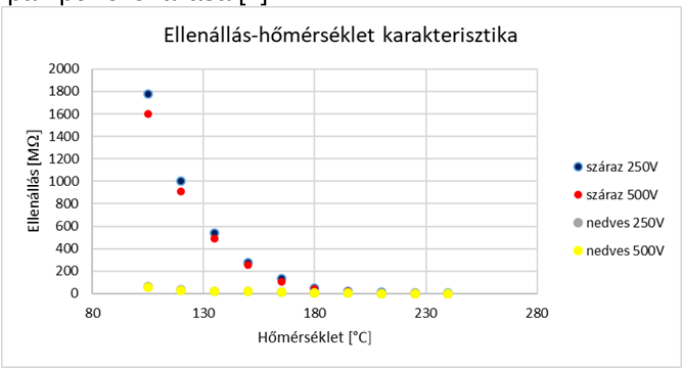


5. ábra Átlagos szabad úthossz hőmérséklet függése

4.1. Por ellenállása

Nagyon nagy fajlagos ellenállású porok esetén a porréteg felületén képes olyan mértékű töltés felhalmozódni, hogy ellenkorona-kisülés alakuljon ki. A nedvesség hatására a porszemcsék hajlamosabbak az összetapadásra, így vastagabb réteg is kialakulhat a gyűjtő elektródokon. Amennyiben a port melegíteni kezdjük a víz forráspontjánál alacsonyabb hőmérsékleten, akkor az ellenállás növekszik (ahogy csökken a por nedvességtartalma; egyben a relatív páratartalom is csökken), azonban egy bizonyos hőmérséklet után az ellenállás csökkenni kezd. Ennek magyarázata, hogy a por már szigetelőanyagként viselkedik, és növekvő hőmérséklet felett szigetelőanyagok karakterisztikájának megfelelően csökken az ellenállása, ami a 6.ábrán is látszik.

A témában korábbi cikk keretein belül számításokat végeztünk, melyben meghatározásra került egy vizsgált ipari por ellenállása [7].



6. ábra Vizsgált ipari por ellenállása a nedvesség és hőmérséklet függvényében, 250V és 500V-os vizsgáló feszültséggel

A por ellenállását 250 V-os és 500 V-os vizsgáló feszültséggel is mértük száraz, illetve nedves (páratartalomban gazdag) környezeti állapotában is. A hőmérséklet függvényében azt állapítottuk meg, hogy 100°C felett a növekvő hőmérséklettel drasztikusan csökken a por ellenállása.

A párás környezet további előnye a kisebb ellenállás mellett, hogy az összetapadt szemcsék nagyobb felületen tudják befogadni az ionokat, nagyobb erő vonzza őket a gyűjtőelektród felé, valamint a gravitáció is nagyobb hatást fejt ki rájuk.

4.2. Relatív permittivitás

A porszemcsék feltöltődésekor két fontos paramétert kell figyelembe venni, a porszemcsék telítési töltését és az ehhez szükséges időfüggvényt. Elemi szinten ezeket mérni szinte lehetetlen, modellekkel követhető nyomon, azonban bonyolultsága miatt gyakran a modellek is gömb alakú szemcsékkel számolnak. A nagy mennyiségben felhalmozódó töltések az átáramló portömegben képesek akkora töltésgócot kialakítani, amely képes visszaszorítani a koronázó elektródon létrejövő koronakisülés intenzitást.

A porleválasztó modellek nagy része a Pautheiner-Moreau-Hanot összefüggést használja a telítési töltés meghatározására:

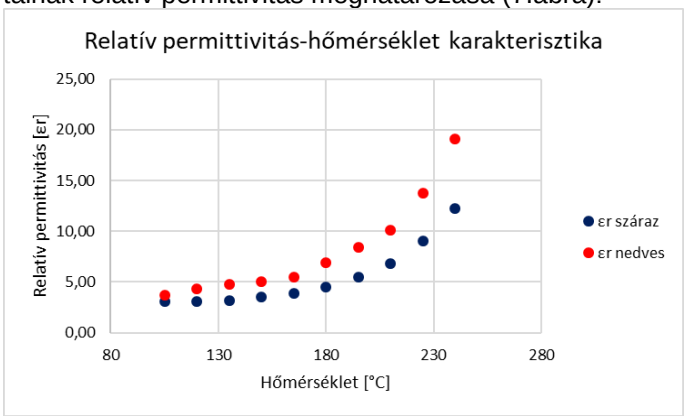
$$Q_t = (12*\pi*r^2*E*\varepsilon_0*\varepsilon_r) / (\varepsilon_r+2) \qquad (2)$$

ahol Q_t a telítési töltés, r a porszemcse sugara, E a porszemcse közvetlen környezetében levő villamos térerősség, ε_0 a vákuum permittivitás és ε_r a por relatív permittivitása.

A relatív permittivitás közvetlenül nem mérhető, azonban a kapacitásokkal kifejezve következtethető:

$$\frac{Cx}{C_0} = \frac{\varepsilon_0 * \varepsilon_{r,x} * \frac{A}{d}}{\varepsilon_0 * \varepsilon_{r,l} * \frac{A}{d}} = \frac{\varepsilon_{r,x}}{\varepsilon_{r,l}} \qquad (3)$$

ahol C_x a szigetelőanyaggal teljesen kitöltött elektródok kapacitása, C_0 az ugyanazon méretű és elrendezésű vákuumban elhelyezett elektródok kapacitása és $\varepsilon_{r,l}$ a levegő permittivitása, ami állandó és értéke 1. Részletesebb kifejtés megtalálható korábbi cikkünkben [7]. A cikk végeredményei között szerepelt, a különböző por állapotainak relatív permittivitás meghatározása (7.ábra):



7. ábra Vizsgált ipari por relatív permittivitása nedvesség és hőmérséklet függvényében

Nagy hőmérsékleten a relatív permittivitás akár többszörös értéket is felvehet alacsonyabb hőmérsékleten üzemelő berendezésekhez képest, ami azt jelenti, hogy a porszemcsék másfélszer annyi töltést képesek befogni. Egyrészt így könnyebben tudnak leválni a nagyobb villamos erőhatás miatt, azonban együtt jár azzal is, hogy a töltésgóc is nagyobb méretű, emiatt a jelenség káros (koronakisülés csökkentő) hatása is megnövekedik. A tértöltés csökkentése érdekében gyakran nem állandó táplálást alkalmaznak, hanem szüneteket iktatnak be (impulzus üzem).

4.3. PARAMÉTERVIZSGÁLAT HASZNÁLHATÓSÁGA, FOLYTATÁS

A témával foglalkozó BME kutatócsoport létrehozott egy numerikus modellt, amelyet az évek során folyamatosan fejlesztenek. A modellel numerikus eljárások segítségével nyomon követhető az egyes folyamatok elektrosztatikai és hidrodinamikai lejátszódása. A szimulációkkal máig több különböző paraméter hatását sikerült modellezni [8],[9].

Minden szimuláció során a peremfeltételeket a száraz porleválasztó tulajdonságai szerint állítottuk be. Jövőbeli célunk, hogy a modell kiterjeszthető legyen nedves porleválasztók modellezésére is, melynek kezdő lépéseként a bemenő paraméter vizsgálatait kezdtük el.

5. IRODALOMJEGYZÉK

[1] **Balogh E**: Elektrosztatikus eredetű veszélyek kezelése, értékelése, Értekezés, Budapest, 2004

[2] **Tzu-Ming Chen, Chuen-Jinn Tsai, Shaw-Yi Yan, Shou-Nan Li:** An efficient wet electrostatic precipitator for removing nanoparticles, submicron and micron-sized particles, Separation and Purification Technology, Volume 136, 2014, Pages 27-35, ISSN 1383-5866,

[3] **M. Radmilović-Radjenović, B. Radjenović, Ž. Nikitović, Š. Matejčik, M. Klas:** The humidity effect on the breakdown voltage characteristics and the transport parameters of air, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, Volume 279, 2012, Pages 103-105,

[4] **D. Rodriguez, R. S. Gorur and P. M. Hansen**, "Effect of humidity on the breakdown characteristics of air in uniform field for the very low frequency (VLF) band," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 16, no. 5, pp. 1397-1403, October 2009,

[5] **A. Zukeran, P.C. Looy, A. Chakrabarti, A.A. Berezin, S. Jayaram, J.D. Cross, T. Ito, Jen-Shih Chang:** Collection efficiency of ultrafine particles by an electrostatic precipitator under DC and pulse operating modes," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 35, no. 5, pp. 1184-1191, Sept.-Oct. 1999, doi: 10.1109/28.793383.

[6] **Ye Zhuang, Yong Jin Kim, Tai Gyu Lee, Pratim Biswas:** Experimental and theoretical studies of ultra-fine particle behavior in electrostatic precipitators, Journal of Electrostatics, Volume 48, Issues 3–4, 2000, Pages 245-260,

[7] **Székely L., Kiss I.:** Porok villamos tulajdonságainak vizsgálata az elektrosztatikus porleválasztás hatékonysága szempontjából, KLENEN konferencia, 2020, Visegrád

[8] **T. Iváncsy, I. Kiss, J. Suda, I. Berta:** Efficiency of the precipitation of fine particles influenced by the ESP supply mode, ICESP IX - Mpumalanga, Krugan National Park, South Africa, 2004

[9] **Tamás Iváncsy, Jenő Miklós Suda:** Behavior of polydisperse dust in electrostatic precipitators, Journal of Electrostatics, Volume 63, Issues 6–10, 2005, Pages 923-927

Szedlák Roland, Mohos András

EMC demonstrációs eszköz fejlesztése hallgatói laboratóriumi méréshez

Cikkünk egy, az elektromágneses terek vizsgálatára alkalmas demonstrációs eszközt mutat be. Az eszköz központi eleme egy acélcső, amelyet különböző konfigurációkban gerjesztve mérhetővé válik a körülötte kialakuló mágneses tér, illetve az acélcső külső és belső felületén folyó áramsűrűség. A demonstrációs eszköz célja, hogy a villamosmérnöki képzésben résztvevő hallgatók mérés keretében is megismerkedhessenek az áramvezetők által keltett elektromágneses terek tulajdonságaival, jelenségeivel, ezzel kiegészítve elméleti tudásukat. Az eszköz előnyei közé tartozik egyszerűsége, sokoldalúsága és a szemléletes mérés lehetősége. A gyakorlati oktatást így egy egyszerű és látványos méréssel bővíthetjük, amely kapcsolódik az elektromágneses kompatibilitás (EMC) témaköréhez.

This paper describes a demonstrator related to the topic of electromagnetic fields. The central part of the demonstrator is a hollow iron tube, which can be connected into different configurations to measure the pattern of the magnetic field outside the tube and the current density at its walls. The main goal is to involve the students into the studies of electromagnetic fields by the use of in-class demonstator, like this one. The benefits of this demonstrator are its simplicity, its versatility and the possibility of a spectacular and starightforward measurement. The demonstrator gives a direct and simple experience of many important concepts related to magnetic fields. It's possible to improve the practical education by a new and simple lab assignment related to EMC studies.

Kulcsszavak: **Elektromágneses terek, elektro-mágneses kompatibilitás, ferromágnesség, skin-hatás, közelségi hatás, demonstrációs eszköz, mérés**

1. BEVEZETÉS

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem villamosmérnöki alapképzésének egyik legnehezebb tantárgya az Elektromágneses terek alapjai, amely szilárd fizikai alapokat és jelentős idő és energiaráfordítást kíván a hallgatóktól. Ennek oka, hogy az itt tanult jelenségek érzékszerveink segítségével közvetlenül nem tapasztalhatók meg. Az eindhoveni egyetem professzorai ezt felismerve fejlesztettek egy demonstrációs eszközt, amelynek célja, hogy a műszaki egyetemeken villamos tanulmányokat folytató hallgatók megismerkedjenek az elektromágneses kompatibilitás témakörével és egy erre irányuló laboratóriumi mérés keretében is tanulmányozhassák az áramvezetők által keltett mágneses terek törvényeit, jelenségeit. A laboratórium során a hallgatók az elrendezéssel többféle konfigurációt is vizsgálhatnak a mérésvezető oktató segítségével, amelyek által megismerik a fellépő jelenségek jelentőségét; a használt acélcső nagy permeabilitására való tekintettel a hálózati, 50 Hz-es frekvencián.

A demonstrációs eszközzel három konfiguráció valósítható meg. Minden egyes elrendezéshez különböző árameloszlás-kép és mágneses erőtér tartozik. Ezek elméleti úton is levezethetők, így a mért és a számolt eredmények összehasonlíthatók. Az elméleti oktatást kiegészítő laboratóriumi gyakorlat során a cél, hogy egyszerű mérések segítségével szemléletesen bemutassuk a fizikai jelenségeket. Ilyen például a skin-hatás, a közelségi hatás vagy az, hogyan alakul a mágneses tér vezető anyag jelenlétében. Az elektromágneses kompatibilitás (EMC) egyes területein, például az átviteli hálózat vezetékeinek, kábeleinek tervezésénél fontos a különböző elektromágneses jelenségek ismerete, és ezek megfelelő helyen történő kezelése annak érdekében, hogy egy másik (pl. távközlő) hálózatra gyakorolt negatív hatásokat elkerüljük.

A cikkben részletezett demonstrációs eszköz lehetőséget ad az említett jelenségek közvetlen megismerésére, tanulmányozására.

2. A MÉRÉSI ÖSSZEÁLLÍTÁS

Az épített eszköz az 1. ábrán látható, ennek főbb részei, valamint az egyéb szükséges készülékek az alábbiak:

- Folytonosan szabályozható (auto)transzformátor
- Állandó áttételű transzformátor (szekunder oldalon min. 120 A terhelhetőség)
- Ferromágneses anyagból (pl. vas) készült cső
- Vezetők (min. 120 A terhelhetőség) – a megfelelő keresztmetszetű vezetők kiválasztása az [1] szerint történt.
- Mérővezetékek
- Árammérő műszer
- 50 Hz-es mágneses indukciót mérő műszer (kb. 0 – 1200 μT mérési tartománnyal)
- Oszcilloszkóp (legalább három jelbemenettel)
- Csavarkötések, rögzítések

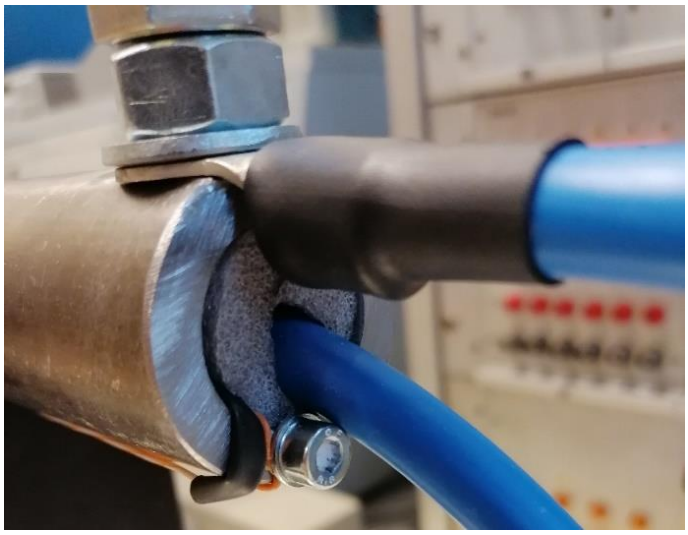
A demonstrációs eszköz központi eleme a ferromágneses anyagból készült cső. A legfontosabb paraméterei a következők:

μ_r relatív mágneses permeabilitás;
σ fajlagos vezetőképesség;
ρ fajlagos ellenállás;
l hossz;
a belső sugár;
b külső sugár;

A cső, valamint a benne található áramvezető egy fából (szigetelőanyag) készült állványon került elhelyezésre. Fontos elem a távoli visszavezetést megvalósító – estünkben nagy keresztmetszetű alumínium – lemez. Ez utóbbi a fa állvány alsó részén került elhelyezésre.

8. ábra Az elkészült demonstrációs eszköz

A demonstrációs eszközzel három különböző konfiguráció vizsgálható, amely a primer elemek (vascső, vascsőben található vezető, nagy keresztmetszetű alumínium visszavezető lap) kapcsolásaival valósítható meg. Ezek a következőkben részletesen bemutatásra kerülnek.

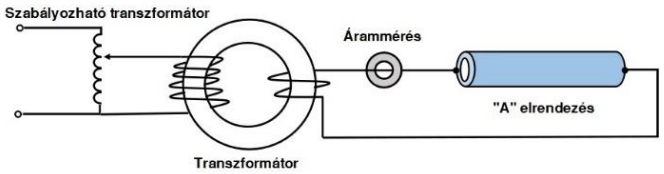


9. ábra A felületi vezetők rögzítése (alul), illetve a csavarkötéssel rögzített 35 mm^2-es vezető

2.1. A konfigurációk

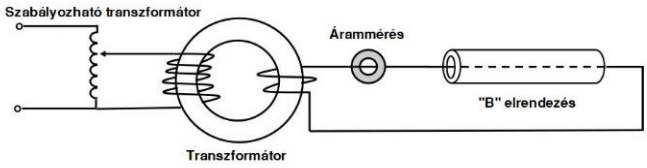
A három különböző összeállítás mindegyike egy-egy elektromágneses jelenséget hivatott szemléltetni. Az összeállítás egyszerűen módosítható, csavarkötések (9. ábra) megbontása után az áramkör tetszőlegesen kapcsolható.

Az „A" konfiguráció (10. ábra) a skin-hatást hivatott bemutatni, méghozzá úgy, hogy a gyűrű keresztmetszetű csövet közvetlenül az áramkörbe kötjük.



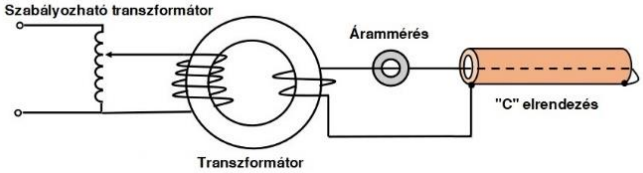
10. ábra Az „A" elrendezést szemléltető áramkör ([2] módosítva)

A „B" konfiguráció (11. ábra) a mágneses térbe helyezett ferromágneses anyagokban indukálódó feszültséget és az ezáltal kialakuló köráramok jelenségét szemlélteti. A cső ebben az esetben nem része az áramkörnek, a csőben koncentrikusan elhelyezett kábel vezeti az áramot.



11. ábra A „B" elrendezést szemléltető áramkör ([2] módosítva)

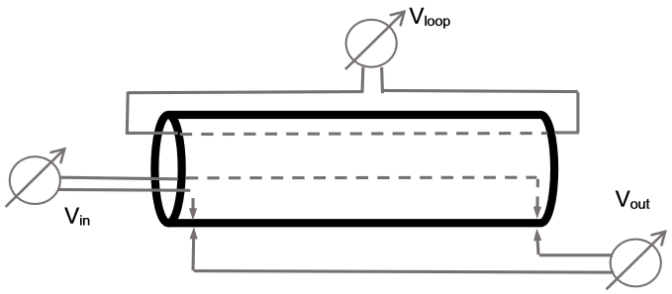
A „C" konfiguráció (12. ábra) az ún. koaxiális elrendezés. Ebben az összeállításban a közelségi hatás válik domináns jelenséggé. Ekkor a második összeállításhoz hasonlóan a csövön belüli vezető viszi az áramot, azonban itt a cső szolgál áramvisszavezetésként.



12. ábra A „C" elrendezést szemléltető áramkör ([2] módosítva)

3. A MÉRÉS

A demonstrációs eszközön két-két mérést tudunk végezni összeállításonként. Lehetőségünk van vizsgálni a cső körül kialakuló mágneses teret egy erre alkalmas indukciómérő műszerrel. Ezen kívül mérhetjük még a külső és belső felületi, illetve hurok- feszültségeket a csövön elhelyezett mérőáramkörök (13. ábra) és egy oszcilloszkóp segítségével.



13. ábra A feszültségmérők elhelyezése [2]

3.1. 3.1 A mágneses térerősség meghatározása

A mérés során vizsgálható a mágneses indukció értéke a cső közepétől való távolság függvényében. A méréshez egy mágneses indukciómérő szükséges, illetve egy távolság mérését megvalósító eszközre. A mágneses indukció és a mágneses térerősség között a permeabilitás teremt kapcsolatot. Ebben az esetben a teljes permeabilitást a levegő relatív permeabilitásának, illetve a vákuum permeabilitásának szorzata adja. Ezzel megszorozva a mért mágneses indukciót megkapjuk a mágneses térerősséget adott távolságban a csőfaltól.

A mérést célszerű nagy áramerősség mellett végezni, hogy az eredmény látványos legyen. A különböző konfigurációk esetében a laboratóriumi gyakorlat során megvitatható, hogy az egyes esetekben, milyen törvényszerűségek érvényesülnek. A csőfaltól bizonyos távolságokban végezett mérések eredménye valós időben ábrázolható és az elméleti összefüggésekből (lásd később) kapott eredményekkel összevethető.

3.2. 3.2 A felületi áramsűrűség meghatározása

Közvetlenül a felületi áramsűrűség mérésére sincs lehetőségünk. A gyakorlat során a csőre megfelelően felhelyezett mérőáramkörök, illetve egy oszcilloszkóp segítségével végezzük ez a mérést. A feszültségmérés bekötése a 13. ábrán látható. Az oszcilloszkóp segítségével három helyen mérünk feszültséget: a cső külső felületén (V_{out}), a cső belső felületén (V_{in}), illetve a csőfalat körülölelő hurokban (V_{loop}). A mérés ez esetben gyakorlatilag csak az oszcilloszkóp leolvasásából áll, azonban az eredmények megvitatása is a laboratóriumi gyakorlat része lehet.

4. 4. ELMÉLETI HÁTTÉR [2]

4.1. 4.1 Mágneses terek

Az áram által keltett mágneses tér az anyagi jellemző szerint két csoportra bontható: a mágneses tér a levegőben, illetve a mágneses tér a vezető csőben. A levegőben kialakuló mágneses tér leírásához az Ampére-törvény végtelen hosszú vezetőkre felírható, jól ismert alakját használhatjuk (1).

$$H_\varphi = \frac{I}{2\pi r} \tag{1}$$

A vezető csőben kialakuló mágneses teret a módosított Bessel-függvények segítségével írhatjuk le. Ebben az esetben is élünk az alábbi közelítésekkel, miszerint a vezetőt „végtelen hosszú”-ként kezeljük, tehát az elektromos térerősség vonalak csak sugárirányba (z), míg a mágneses térerősség görbék kizárólag azimut (φ) irányba mutatnak. Ekkor a mágneses tér leírására alkalmas függvényt a (2) Bessel-egyenlet megoldásával kapjuk:

$$\partial_r{}^2 H_\varphi + \frac{1}{r}\partial_r H_\varphi - \left(p^2 + \frac{1}{r^2}\right) H_\varphi = 0 \tag{2}$$

Az egyenlet általános megoldása a (3) szerinti.

$$H_\varphi(r) = c_0 \boldsymbol{I_1}(pr) + c_1 \boldsymbol{K_1}(pr) \tag{3}$$

ahol,

$\boldsymbol{I_1}$ és $\boldsymbol{K_1}$ az elsőfajú módosított Bessel függvények, n = 1 esetre;

r a sugár;

p $= \sqrt{\frac{-j\omega\mu}{\rho}} = \frac{1-j}{\delta}$, a komplex p-vektor [3];

c_0 és c_1 pedig az $r = a, b$ esetekre felírható peremfeltételekből adódó állandók.

A fenti, általános érvényű egyenletek az egyes elrendezésekhez tartozó peremfeltételekkel kiegészítve megadják az adott elrendezésnél a csőfalban kialakuló árameloszlást és mágneses térerősséget.

4.2. 4.2 Árameloszlás csőfalban

A csövek falában kialakuló árameloszlást is ki tudjuk fejezni a módosított Bessel-függvények segítségével. Meghatározásához ismét az Ampére-törvényt hívjuk segítségül. Ekkor C zárt görbe által körülzárt, a cső keresztmetszetének síkjába eső S felületre integráljuk az áramsűrűség vektort. A (4) összefüggés $r \in [a, b)$ esetén igaz.

$$\oint_C \vec{H} \cdot \overrightarrow{dl} = \iint_S \vec{J} \cdot \overrightarrow{dS} \tag{4}$$

Ebből – néhány átalakítás után – $J_z(r)$-re az (5) egyenletet kapjuk:

$$J_z(r) = c_0 p \boldsymbol{I_0}(pr) - c_1 p \boldsymbol{K_0}(pr) \tag{5}$$

4.3. 4.3 Felületi feszültségek

Ohm törvénye szerint (6):

$$\vec{E} = \frac{1}{\sigma}\vec{J} = \rho\vec{J} \tag{6}$$

A feszültségre pedig a következő (7) összefüggés igaz:

$$V_\alpha = \int_0^l \vec{E}_\alpha \cdot \overrightarrow{dl} \tag{7}$$

amiből az Ohm-törvény felhasználásával és az integrálás elvégzésével a (8) és (9) összefüggéseket kapjuk:

$$V_{in} = l\rho J_z(a) \tag{8}$$

és

$$V_{out} = l\rho J_z(b)\ . \tag{9}$$

Látható tehát, hogy a külső- és belső felületi feszültség mérésével, valamint a cső jellemzőinek (hossz, fajlagos ellenállás) ismeretében a cső külső- és belső felületén kialakuló árameloszlás meghatározható.

4.4. 4.4 Hurokfeszültség

A hurokban indukálódott feszültséget a Faraday-törvény ismeretében kétféle módon is meghatározhatjuk. A törvény bal oldalát felhasználva (10)-hez jutunk:

$$V_{loop} = \oint_C \vec{E} \cdot \overrightarrow{dl} = V_{out} - V_{in} \tag{10}$$

A csőfalat körbevevő *C* görbére integrálunk és feltételezzük, hogy kizárólag sugárirányban vannak elektromos térerősség vonalak, akkor a hurokban indukálódott feszültség a külső és belső falon mérhető feszültségek különbsége lesz.
A V_{loop} kifejezhető a Faraday-törvény jobb oldalából is a (11) alapján:

$$V_{loop} = -j\omega \iint_S \vec{B} \cdot \overrightarrow{dS} \tag{11}$$

ahol az *S* a *C* görbe által közbezárt felület. Ebből átalakítások után a következő, (12) összefüggés adódik:

$$V_{loop} = \frac{j\omega\mu l}{p}\Big(c_0\big(\boldsymbol{I_0}(pb) - \boldsymbol{I_0}(pa)\big) - c_1\big(\boldsymbol{K_0}(pb) - \boldsymbol{K_0}(pa)\big)\Big) \tag{12}$$

Ezek a feszültségértékek közvetlenül is mérhetők, az állandók ismeretében pedig elméleti úton is számíthatók. Az elméleti (számított) értékeket itt is összehasonlíthatjuk a mérés során tapasztaltakkal.

5. 5. PEREMFELTÉTELEK ÉS EREDMÉNYEK [2]

Ebben a fejezetben az egyes konfigurációkra jellemző peremfeltételek és mérési eredmények kerülnek bemutatásra. A peremfeltételek segítségével a csőfalban kialakuló mágneses teret leíró egyenletben szereplő c_0 és c_1 állandók meghatározhatók. Ezek ismeretében egy alkalmas számítógépes program segítségével felrajzolható a mágneses tér a csőfalban és azon kívül, illetve csőfalban kialakuló árameloszlás görbéje.

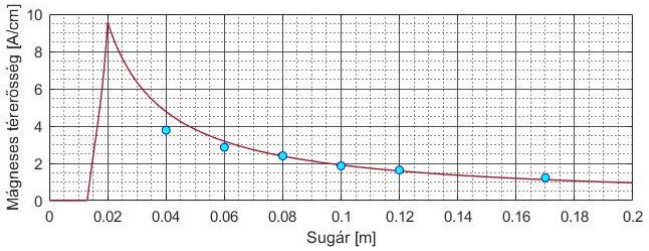
5.1. „A” konfiguráció

Az *I* áram ebben az esetben a cső falában folyik. A peremfeltételek az Ampére-törvényt felhasználva a (13)-nak és (14)-nek megfelelően adódnak:

$$H_\varphi(a) = c_0\boldsymbol{I_1}(pa) + c_1\boldsymbol{K_1}(pa) = 0 \tag{13}$$

$$H_\varphi(b) = c_0\boldsymbol{I_1}(pb) + c_1\boldsymbol{K_1}(pb) = \frac{I}{2\pi b} \tag{14}$$

Ezekből kiszámítható az „A” összeállításra igaz c_0 és c_1 állandó értéke. Erre az elrendezésre igaz mágneses térerősség görbe a 14. ábrán látható, néhány mérési eredménnyel együtt.



14. ábra A mágneses tér alakja a sugár függvényében az „A” elrendezés esetében, mért pontokkal

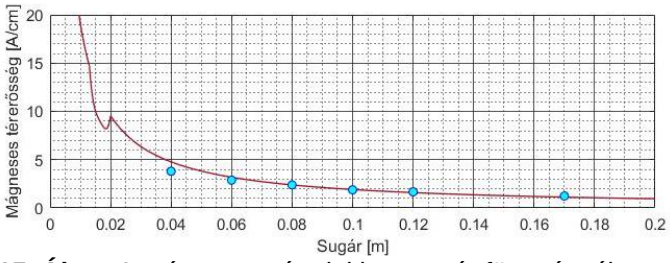
5.2. „B” konfiguráció

Az *I* áram ebben az esetben a csőben koncentrikusan elhelyezett vezetőben folyik. A cső nem része az áramkörnek. A peremfeltételek ebben az esetben a (15) és (16) szerintiek:

$$H_\varphi(a) = c_0\boldsymbol{I_1}(pa) + c_1\boldsymbol{K_1}(pa) = \frac{I}{2\pi a} \tag{15}$$

$$H_\varphi(b) = c_0\boldsymbol{I_1}(pb) + c_1\boldsymbol{K_1}(pb) = \frac{I}{2\pi b} \tag{16}$$

Így kiszámítható a „B” összeállításra igaz c_0 és c_1 állandó értéke és ábrázolható a mágneses térerősség a sugár függvényében (15. ábra).



15. Ábra. A mágneses tér alakja a sugár függvényében a „B” elrendezés esetében, mért pontokkal

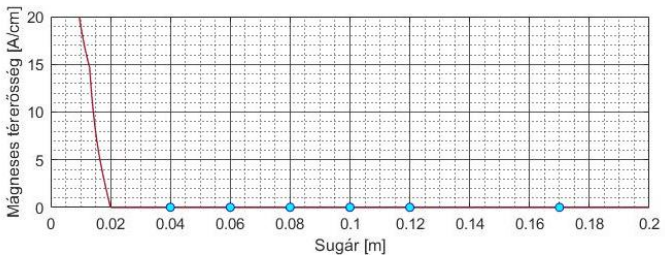
5.3. „C” konfiguráció

Az *I* áram ebben az esetben a csőben koncentrikusan elhelyezett vezetőben folyik. A cső nem része az áramkörnek. A peremfeltételek ebben az esetben a (17) és (18) összefüggések szerint alakulnak:

$$H_\varphi(a) = c_0\boldsymbol{I_1}(pa) + c_1\boldsymbol{K_1}(pa) = \frac{I}{2\pi a} \tag{17}$$

$$H_\varphi(b) = c_0\boldsymbol{I_1}(pb) + c_1\boldsymbol{K_1}(pb) = 0 \tag{18}$$

A „C” összeállításra igaz c_0 és c_1 állandót meghatározva és ábrázolva a függvényt a 16. ábrán látható diagramot kapjuk eredményül.



16. ábra A mágneses tér alakja a sugár függvényében a „C" elrendezés esetében, mért pontokkal

5.4. Áramsűrűség-eloszlás a csőfalban

Mindhárom összeállítás esetén a külső és belső felületi feszültségek méréséből a (8) és (9) összefüggések alapján meghatározhatók a felületi áramsűrűségek. Ezekből közvetlenül következtethetünk arra, hogy mely jelenségek dominálnak az adott elrendezés esetén. A mérési eredményeket az 1. táblázat tartalmazza az egyes elrendezések esetén.

1. táblázat A mért felületi feszültségek és az ebből számolt felületi áramsűrűségek

	A	B	C
I [A]	121	122	116
V_{in} [mV]	5,3	382	370
V_{out} [mV]	271	283	10
V_{loop} [mV]	276	662	379
J_{in} [A/cm^2]	2,8	201,8	195,5
J_{out} [A/cm^2]	143,2	149,5	5,3

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A prototípus megépítésének célja az volt, hogy a felmerülő problémákat elemezzük és lehetőség szerint megoldást találjunk rájuk. A már kész demonstrációs eszköz működésére és a mérések menetére, illetve eredményeire koncentrálva kijelenthetjük, hogy kiválóan alkalmas a jelenségek bemutatására. A hallgatók a mágneses terek alapjait egy érdekes laboratóriumi mérés keretében is megismerhetik elméleti tanulmányaik mellett, ezzel is közelebb kerülve az elektromágneses kompatibilitás témaköréhez.

7. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikkben bemutatott demonstrációs eszköz prototípusát a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen állítottuk össze. Köszönettel tartozunk az egyetem munkatársainak, Feil Zoltánnak és Bodrogi Péternek, akik idejüket nem sajnálva segítettek az eszköz fizikai megvalósításában.

8. IRODALOMJEGYZÉK

[1] ***Magyar Szabványügyi Testület:*** *MSZ 14550-1:1979 - Erősáramú vezetékek megengedett terhelése. Általános rendeltetésű rögzítetten szerelt szigetelt vezetékek.*

[2] ***Ramiro Serra, Lex van Deursen:*** *Currents and magnetic fields in hollow tubes: an in-class experiment and lab demonstrator for EMC education, International Conference and Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe), 2018*

[3] ***Simonyi Károly:*** *Elméleti villamosságtan, Tankönyvkiadó, 1952*

Varga Zoltán Donát

Aszinkron gépek mezőorientált modellezése

A cikk folyamán bemutatom a végzett munkám fő lépéseit. Az állórész melegedésének hatását vizsgáltam a rotorfluxus amplitúdójára üresjárásban. A cikket három nagy részre lehet bontani. Az első részben a modellezés lépéseit mutatom be, a másodikban a csúszógyűrűs aszinkron gép paramétereinek mérését. A harmadik fejezetben a gépmodell verifikálása és az eredmények közlése történik meg. A modellezést és a verifikálást MATLAB Simulink környezetben végeztem.

In this arcticle I am going to demostrate my work. I observed the effect of stator heating on the amplitude of the rotor flux without load. The article can be divided into three major parts. In the first one I am going to show the steps of the modeling. In the second the mesasuring of the machine parameters is placed. In the third chapter, the machine model is verified and the results are reported. The modeling and the verification was made in MATLAB Simulink software.

Kulcsszavak: **aszinkron gép, modellezés, mérés, verifikálás**

1. MODELLEZÉS

A modellezés első lépéseként kiválasztottam a tesztelésre használandó beépített MATLAB aszinkron motormodellt. A megfelelő tápláláshoz összeállítottam egy frekvenciaváltót, melynek kapcsolási frekvenciáját 3 kHz-re állítottam be. Ennek kimeneti feszültségét és frekvenciáját a beépített modell névleges bemeneti értékeihez igazítottam. Az általam készített gépmodell a beépített modell kimeneteiről kapta a szükséges adatokat, állórész oldali feszültség-és áramértékeket. A modell pontosságának teszteléséhez a beépített motor kimeneti rotorfluxusát hasonlítottam össze a megépített modell kimeneti rotorfluxusával. A beépített MATLAB modell minden fluxusváltozót d-q koordináta-rendszerben ad vissza, ezért ezeket Park-transzformáció segítségével az ellenőrzéshez szükséges álló-koordinátarendszerbe transzformáltam. A fluxusokat ebben az álló koordináta-rendszerben, azok α és β komponensei szerint szétbontva, vizsgáltam, a modellek által végzett számítások is ilyen rendszerben hajtódnak végre.

Az első megépített gépmodell a csúszógyűrűs aszinkron gépek azon előnyét használta ki, hogy a rotoráramot mérhető, így a rotor fluxusegyenletét fel lehet használni a fluxus becslésére. A rotoráramok vektorát egy forgatóoperátorral álló koordináta-rendszerbe transzformáltam. A modell eredményei nem tettek eleget a támasztott elvárásaimnak, mert a tranziens folyamatokat nem képezte le megfelelően. Az állandósult állapotban való pontos modellezés viszont nem volt elégséges.

A második megépített gépmodell már kalickás forgórészű indukciós gép modellezésére is alkalmas. Csak sztátor oldali, mérhető mennyiségekkel becsüli meg a rotorfluxust. A modell működéséhez szükség volt a tranziens induktivitás meghatározására [1]. A kezdeti eredmények nagyon bíztatóak voltak, a tranziens folyamatok modellezésekor is jó jelalakokat állított elő gépmodell, de mélyebb vizsgálatok során amplitúdóhibára lettem figyelmes. Ezt a számottevő, 18 százalékos relatív hibát, nem tudtam kiküszöbölni, ezért összeállítottam egy harmadik gépmodellt is.

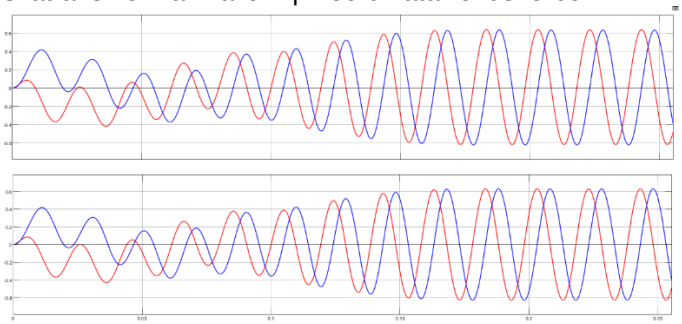
Az elkészített modell az állórész mágnesező áramának felhasználásával határozza meg a forgórész fluxusát. A megfelelő modell kiválasztásánál lényeges feltétel volt, hogy minden paraméter a rendelkezésre álló eszközökkel mérhető és meghatározható legyen. A mágnesező áram kifejezéséhez több matematikai átalakítást is elvégzetem, ezek eredménye álló koordináta-rendszerben a következő egyenlet [2]:

$$\overline{i_{mr}} = \frac{1}{(1-\sigma)L_s}\left(\int\left(\overline{U_s} - R_s\overline{i_s}dt\right) - \sigma L_s\overline{i_s}\right) \quad (1)$$

ahol,

$\overline{i_{mr}}$ a mágnesező áramvektor;
σ a szórási konstans;
L_s az állórész induktivitás;
$\overline{U_s}$ az állórész feszültségvektor;
R_s az állórész ellenállás;
$\overline{i_s}$ az állórész áramvektor.

A mágnesező áramot megszorozva a kölcsönös induktivitással megkapjuk a rotorfluxus vektort. MATLAB Simulink környezetben ezen szorzás elvégzéséhez szükséges volt a mágnesező áramvektort polár koor-dináta-rendszerbe transzformálni, majd a rotorfluxust visszatranszformálni álló α-β koordináta-rendszerbe.

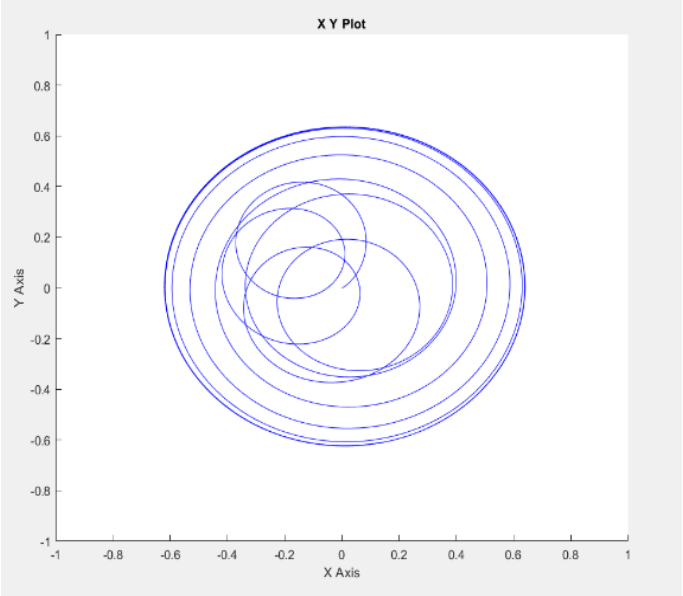


17. ábra A mágnesező áramot felhasználó modell eredményei

A kapott adatok pontosságát a MATLAB Measure funkciójával ellenőriztem. Az elkészített és a beépített modell által becsült amplitúdók között 1,5 százalékos relatív hibát kaptam, de ezt megszüntetni nem tudtam. A jelek frekvenciája teljesen megegyezett.

Az 1-es ábrán a gépmodell tesztelési eredményei láthatóak. Felső vízszintes tengelyen a beépített motor, alsó vízszintes tengelyen az általam elkészített modell forgórészfluxusát ábrázoltam az idő függvényében. A piros színű görbék az α komponens, a kék színű görbék a β komponens értékeit jelenítik meg.

A 2-es ábrán álló koordináta-rendszerben a becsült rotorfluxus vektor bekapcsolási tranziens során felvett végpontjai által kirajzolt görbe látható [3]. Az α tengely értékeit az x tengelyen, a β tengely értékeit az y tengelyen ábrázoltam. Jól látható az ábrán, hogyan áll be állandó állapotra a forgó rész fluxusának amplitúdója.



18. ábra A rotorfluxus vektorának végpontjai

2. 2. MÉRÉSEK [4]

A mérések folyamán a BME Villamos Energetika Tanszék laboratóriumában található négypólusú, csúszógyűrűs aszinkron gép paramétereit határoztam meg. Csillag kapcsolásban a gép névleges feszültsége 400 V, névleges árama 117 A, névleges frekvenciája 50 Hz, névleges teljesítménye 58 kW. A mérések során felvett adatokból a gép állandósult állapotbéli helyettesítő vázlatának paramétereit határoztam meg [5].

2.1. 2.1 Egyenáramú mérés

Az egyenáramú mérés során a csillag kapcsolásban lévő sztátor rezisztív ellenállását határoztam meg. Egyenáramú tápforrással a gép két fázisán 3 A nagyságú mérőáramot folyattam át áramgenerátorosan, és mértem a két fázisellenálláson eső feszültséget. A mérést két digitális multiméter segítségével végeztem el, négy-vezetékes ellenállásmérés konstrukcióját használva [6]. Ezzel a módszerrel ki tudtam szűrni a mérővezetékek ellenállásából fakadó hibákat. Az így kapott ellenállás-értékeket a 20°C-os hőmérsékleten mértem. Az állórész a sztátor-tekercselésen átfolyó áram és a vasveszteség miatt melegszik fel, ennek hatására megváltozik a fázisok ellenállása. A mérések elvégzése előtt a gépet terhelés alatt üzemeltetve felmelegítettem és a korábban említett mérési elrendezésben újból megmértem a fázisok rezisztenciáját. A gép hőmérséklet-változását nem tudtam közvetlenül megmérni, így az ellenállás-változásból határoztam meg a gép üzemi hőmérsékletét. A következő egyenletet a gépben található rézötvözet hőmérsékleti együtthatóját felhasználva, és T hőmér-sékletre rendezve kaptam az 53°*C*-os értéket.

$$R(T) = R_0[1 + \alpha_T(T - T_0)] \quad (2)$$

ahol,

$R(T)$ a T hőmérsékleten mért ellenállás;
R_0 az ellenállás kezdeti értéke;
α_T a rézötvözet hőmérsékleti együtthatója;
T az aktuális hőmérséklet;
T_0 a kezdeti hőmérséklet.

2.2. 2.2 Rövidzárási mérés

A rövidzárási mérés során az aszinkron gép szórási induktivitásait, illetve a rotor ellenállását határoztam meg. A rövidzárási mérés során csökkentett feszültséget kapcsolunk a gép kapcsaira, így annak nyomatéka nem elég nagy ahhoz, hogy a tengely elforduljon. Fontos még megjegyezni, hogy a mért gép áttétele alacsony feszültségen is közelíti az 1-et [7]. A mérés elvégzés-éhez az imc CRONOS*flex* mérőrendszert használtam, így két fázis paramétereit is meg tudtam határozni egy mérés folyamán.

A szükséges paraméterek meghatározásához mérni kell egy fázis feszültségét és áramát. Ezen mennyiségek ismeretében fel tudjuk írni a soros elemek impedanciáját. A mérőrendszer imc Inline FAMOS szoftverében egy függvény meghívásával elő tudtam állítani a hatásos teljesítményt. A hatásos teljesítményből meghatároztam a soros ellenállások összegét, így a rotor ellenállását egy kivonással állapítottam meg, míg impedancia ismeretében már előállt a szórási impedanciák összege. Ezek szétválasztásához a NEMA által létrehozott dizájn besorolások közül a csúszógyűrűs aszinkron gépre vonatkozó közelítő egyenlőséget használtam, ami szerint felezni kell összeget a rotor és a sztátor között.

A mérések elvégzése során két fázis áramát és feszültségét mértem. Az 5-40 V-ig lévő tartományt a rotor névleges árama alapján határoztam meg, melyet 40 V esetén már elértem. A tengely blokkolására nem volt külön szükség, ugyanis ilyen alacsony feszültség mellett nem indult el a forgó mozgás. Az adatok felvétele során csak a frekvenciaváltó feszültségét változtattam, a tápláló jelek frekvenciája mindig 50 Hz volt.

A rövidzárási mérés során felvett feszültség és áram adatokat vizualizáltam és így vizsgáltam tovább őket. Trendvonal illesztése után azt tapasztaltam, hogy az

áram a feszültség függvényében lineárisan változik. Az egy lineáris taggal való közelítés nem valós, ugyanis a rövidzárási impedancia sem állandó. Ennek oka, hogy a szórási fluxusvonalak telítődnek, emiatt romlik a mágneses vezetőképesség.

2.3. Üresjárási mérés

Aszinkron gép üresjárási mérése során a főmező induktivitás és a vasveszteséget reprezentáló ellenállás értékét határozzuk meg. Ezen elemekkel sorosan kapcsolt sztátor ellenállás és szórási induktivitás okozta feszültségesést korrigáltam. A mérés során névleges fordulatszámig emeljük a gép fordulatszámát és azt terhelés nélkül futtatjuk.

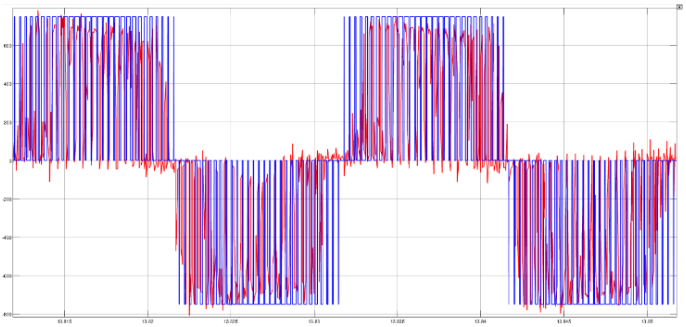
Szükséges mérni egy fázis áramát és feszültségét. Ezen mennyiségek segítségével meg tudtam határozni a felvett meddő teljesítményt. Erre a mérőrendszer imc Inline FAMOS szoftverében lévő függvényt használtam. A főmező induktivitáson és a vasveszteség ellenállásán eső feszültségből és meddő teljesítményből meghatároztam az induktivitás értékét. A mért áramból és feszültségből megállapítottam a keresztág impedanciáját, aminek segítségével már a vasveszteség rezisztenciája is számolható.

A mérés elvégzése során a két fázis keresztágának tagjait határoztam meg. A mért feszültségeket az egyenáramú és rövidzárási mérések adataival korrigál-tam. Az inverter feszültségét eleinte 10, majd 20 V-os lépésközzel állítottam, 50 Hz-es frekvencia mellett. A mérési adatok U-I görbéjét megvizsgáltam a különböző fázisokban. A megfelelő trendgörbe ez esetben a parabola volt. Az üresjárási mérés során a felvett teljesítmények a vasveszteséget, a mechanikai veszte-séget, a pulzációs veszteséget és az alapharmonikus tekercselési veszteséget kell fedeznie [8]. A névleges feszültség környékén a vasveszteség dominál, ezért itt a gép mágnesezési görbéjét kapjuk, mert az üresjárási áramot a gép gerjesztésszükséglete határozza meg.

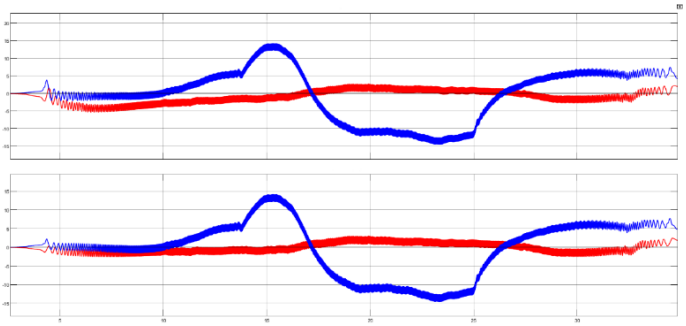
3. VERIFIKÁLÁS

A modell verifikálása során a MATLAB Simulink-ben már megépített és tesztelt gépmodellt töltöttem fel a valós gépen mért adatokkal. A mérőrendszer segítségével lehetőségem volt felvenni a motor kapcsaira jutó feszült-ség és áramkomponenseit, amivel a saját fluxusbecslő modellemet is gerjeszteni tudtam. Az eszközök korlátozott száma miatt két vonali feszültséget és három fázisáramot rögzítettem, a vonali feszültségekből számítással határoztam meg a fázisfeszültségek értékeit. A 3-as ábrán az épített inverter és a valós frekvenciaváltó kimeneti jeleit lehet összehasonlítani.

A szimulációba elhelyeztem a megnövelt ellenállással ellátott gépmodellt is, hogy a becsült fluxusértékeket össze tudjam hasonlítani. A piros színű jel az a komponenst, a kék a b komponenst reprezentálja. Az ábrán felül látható a 20°C-os ellenállással számolt, míg az alsón az 53°C-os ellenállással meghatározott görbe. A kapott eredmények a 4-es ábrán láthatóak. A különbségek megfigyelhetőek, amiket a különböző ellenállás okoz, viszont jelalakok hibásak. Az ellenőrzés-ek során a tápláló jelekben nem találtam hibákat, így a paraméterek maradtak, mint hibaforrások.



19. ábra A mért és szimulált jelek összehasonlítása

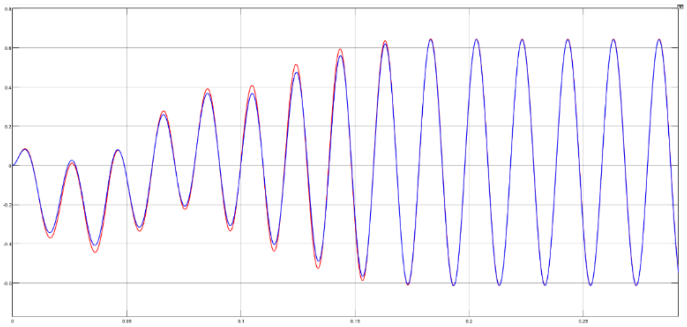


20. ábra A modell eredményei

A mérési eredményeket a panelekről leolvasva jegyeztem fel. Az így fellépő, emberi tényezőből fakadó, hibákat a későbbi számítások során tovább görgettem. A helyettesítő vázlat értékei, így nem tekinthetőek pontosnak, de mérések nagyobb pontosságú elvégzésére már nem volt lehetőségem.

A modell rossz eredményeitől függetlenül szerettem volna megvizsgálni, hogy az ellenállás változása, hogyan hat a forgórész fluxusára. Ehhez a korábban tesztelésre használt összeállítást használtam fel, ahol a beépített modell ellenállását változtattam meg. A leírásban nem volt megadva, hogy milyen hőmérsékleten van az alap ellenállásérték megadva, ezért azt az eredeti 1,2-szeresére változtattam meg. Az α komponensre kapott eredmények az 5-ös ábrán láthatóak, ahol kék színnel jelöltem a megnövelt ellenállásértékű modell kimeneti jelét. A piros színű jel a beépített modell paramétereivel számolt referenciajel. A β komponensben hasonló eredményt kaptam.

Az 5-ös ábrán jól látható, hogy a változás a tranziens folyamatokat befolyásolja nagy mértékben. Az állandósult állapotban a sztátor ellenállásán eső feszültség elhanyagolható a többi elemen eső feszültséghez képest, így a rotor fluxusok is egybe esnek. A tranziens állapotban a két modell között jól látható a különbség. Ennek oka, hogy a tranziens állapotban az áramok lényegesen nagyobbak, mint az állandósult állapotban, így az ellenállásokon eső feszültség is nagyobb.



21. ábra Szimulált eredmények

4. ÖSSZEGZÉS

A munkám során megépítettem három gépmodellt és ezek validálása után kiválasztottam a legpontosabbat. Ezután méréseket végeztem egy indukciós gépen a, mért adatokkal feltöltöttem a modellt. A kapott eredmények alapján megpróbáltam korrigálni a modell hibáit és a melegedéssel kapcsolatos várt eredményeket megközelíteni.

5. IRODALOM

[1] ***Schmidt I, Veszprémi K.:*** *Hajtásszabályozások.* Budapest, 2012.

[2] ***Peter Vas****: Sensorless Vector and Direct Torque Control. Oxford Uni PR*, Oxford, 1998.

[3] ***Diana, G., Harley, R. G.:*** *Transient Behavior of Induction Motor Flux and Torque During Run-Up.* 2015. Available: https://www.researchgate.net/publication/224376868_Transient_Behavior_of_Induction_Motor_Flux_and_Torque_During_Run-Up

[4] ***Istvánfy Gy.:*** *Villamos Gépek Mérése II.rész Váltakozó áramú gépek.* Budapest, 1960.

[5] ***Halász S.:*** *Villamos Hajtások*. Budapest, 1993.

[6] ***Zoltán I.:*** *Méréstechnika.* Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2002.

[7] ***Égető T.:*** *Négynegyedes frekvenciaváltó adaptálása különböző váltakozóáramú hajtásokhoz.* Budapest, 2018.

[8] ***Farkas B.:*** *Aszinkron gép mérése.* Budapest, 2017. Available: https://vet.bme.hu/sites/default/files/tantargyi_fajlok/cs%2C%202017/09/14%20-%2012%3A36/Aszinkron_gep_meres.pdf

Palásti Bálint

Laboratóriumi függődaru tervezése

Cikkem témája egy beltéri laboratóriumi függődaru villamos részeinek tervezése, a felépítő elemeinek rendszerré alakítása és összeépítése. Írásom elején bemutatom a felhasznált eszközöket. A modern hajtáslánc gyakori elemeinek - motor, frekvenciaváltó, PLC - kiválasztását ismertetem. Ezt követően a rendszerbe illesztés folyamata következik, mely során az építés folyamatának megfelelően mutatom be az egyes részelemek feladatait, a daru mozgásában ellátott feladatukat, illetve azok egymáshoz való kapcsolódását.

The aim of my thesis is to select the electrical parts of an indoor laboratory crane, to transform the elements into a system and to assemble them. At the beginning of my writing, I will introduce the selected tools. The selection of common elements of the modern drive train - motor, frequency inverter, PLC - is described. Then, the process of integration into the system follows, in which I will introduce the tasks of the individual components according to the construction process, their task in crane movement and their interconnection.

Kulcsszavak: **daru, PLC, frekvenciaváltó, aszinkron motor**

1. BEVEZETÉS

Igényként jelent meg az egyetem részéről egy beltérben elhelyezhető, laboratóriumi mérésekre alkalmas függődaru megtervezése és kivitelezése. Egy ilyen rendszer lehetőséget ad több tudományág ipari gyakorlatának megismerésére: mechanikai igénybevételekre való méretezés és biztonság kapcsolata; modern hajtáslánc elemeinek működése; rendszerré alakítás és kommunikáció.

2. KIVÁLASZTOTT ESZKÖZÖK

Az alábbi fejezetben bemutatásra kerülnek az elkészített függődarudaru fontosabb elemei. Mivel a laboratóriumi méretek erősen korlátoltak, illetve a daru nem tényleges ipari anyagmozgatási feladatokat fog ellátni, csupán bemutató jelleggel fog üzemelni, így a befoglaló méretek a következők:
2,7 m (hosszúság) x 1,2 m (szélesség) x 2,3 m (magasság)

2.1. Motorok

A daru különböző irányokba való elmozdulása az ipari gyakorlatnak megfelelően aszinkron motorokkal lett megoldva. A főtartó mozgását két darab, egymással szimmetrikusan elhelyezett és egyszerre mozgó motor biztosítja, a keresztbefordulásból adódó megakadás elkerülése miatt. A főtartón lévő futómacskát egy darab motor fogja hajtani, míg az emelésért is egy darab motor lesz a felelős.

A háromdimenziós mozgatás folyamán a legnagyobb teljesítményigénye az emelésnek van. Mivel a daru csak laboratóriumi feladatokat fog ellátni, így nincs szükség nagy terhek mozgatására. Példa: Egy 2 kg-os mintasúly 2 másodperc alatt 1,5 méter magasra való emeléséhez szükséges teljesítmény (P):

$$P = mgh/t = 14{,}715\ W \quad (1)$$

ahol,

m	mintasúly tömege;
g	nehézségi gyorsulás;
h	emelés magassága;
t	emelési idő.

Összehasonlításképp a közelítőleg 50 kg-os főtartó sebességét 1 másodperc alatt álló helyzetből 0,5 m/s-ra (v) való gyorsításhoz

$$P = m.v^2/(2t) = 6{,}25\ W \quad (2)$$

teljesítmény szükséges. Ahogyan az (1) és (2)-ből látszik, még a hatásfokok és az alacsony frekvencián kiadható teljesítmény figyelembevételével sincs nagy teljesítményigény.

Másik fontos szempont volt, hogy a motor fizikailag elférjen a darun. Ez a párhuzamosan futó motorok esetében kapta a legnagyobb hangsúlyt. A motor hossza ebben az esetben nem haladhatta meg a 30 cm-t, mivel így a két motor hátulja összeért volna. Így esett a választás a kapható legkisebb szabványos méretre (63M), mely esetében a tengelyvég a motor végétől csupán 202,5 mm. A másik két alkalmazásban nem volt olyan tényező, mely a motor méretét befolyásolta volna. Az emelő motor a fordulatszámmérő enkóderrel megnyújtva az eredeti 291 mm-ről 360 mm-re nyúlt.

A gyakorlatban használt motorok pólusszáma 2, 4, 6 és 8, ezektől eltérőt csak indokolt esetekben használnak. Adott fordulatszám eléréséhez a megtáplálási frekvencia és a póluspárszám fordítottan arányos, így a nagyobb póluspárszámú motorok (kétpontos U/f vezérlés esetén) nagyobb stabilitással rendelkeznek. A választás során viszont figyelembe kellett venni a nagyobb pólusszámú motorok megnövekedett árát, így a választás minden esetben a négypólusú motorokra esett.

A motorok villamos fékezésére több lehetőség is adódik frekvenciaváltó használatával, azonban az emelés biztonságossá tételéhez szükséges egy olyan fékre, mely hiba esetén is biztonságosan fixálni tudja az alátámasztás nélküli terhet. Erre megoldás az elektromechanikus fék, melynek működésekor a motor házához és

tengelyéhez rögzített féktárcsákat a táplálás megszűnésekor egy rugó egymáshoz nyomja, így fejtve ki a fékhatást.

Mivel az emelési magasságot hagyományos ultrahang vagy egyéb távolságmérő szenzorral nehéz mérni, így az emelést végző motornál szükségünk volt egy fordulatszámmérő enkóderre. A motorhoz választott típusban 2 jeladó szolgál, egymáshoz képest 90 villamos szöggel eltolva, melyek egy fordulat alatt 1024 periódusnyi négyszögjelet szolgáltatnak. Ezek ismeretében nem csupán a motor elfordulását tudjuk érzékelni, hanem annak irányát is.

A motorok főbb paraméterei az 1. táblázatban láthatóak.

1. táblázat Motorok adatai

	Emelő motor	Macska motor	Paralell motorok
Típus	3 fázisú kalickás aszinkron motor		
Teljesítmény	370 W	370 W	2 x 180 W
Póluspár-szám	2	2	2
Feszültség-szint	230V Δ / 400V Y		
Névl. áram	1,08 A	1,08 A	2 x 0,64 A
Névl. fordulatszám	1350 RPM	1350 RPM	1385 RPM
Névl. hatásfok	65 %	65 %	67 %
Motorház méret	71M	71M	63M
Fék	Elektromechanikus	-	-
Fordulatszám-mérő	HTL típusú enkóder	-	-

2.2. Frekvenciaváltók

A daru mozgását minden irányban 1-1 frekvenciaváltó látja el oly módon, hogy a párhuzamosan futó motorokat a mozgás szimmetriája miatt képes egy egység táplálni.
A frekveciaváltókat a normál háromfázisú kisfeszültségű hálózat táplálja meg. Fontos szempont volt a kiválasztás során, hogy a frekvenciaváltók képesek legyenek fedezni a motorok teljesítményigényét (a kereszttartón futó motorok esetében ez a két motor teljesítményének az összege). Így egységesen mindhárom esetben 370 W (0,5 LE) teljesítményű frekvenciaváltóra esett a választás.
Kivitel szempontjából a könyvtípusú a keskeny és mély kivitel jól illeszkedik a villamos szekrénybe, ellenben a hagyományos kivitellel, így ez került beszerzésre.
A frekvenciaváltó amellett, hogy ellátja a gépünket megfelelő nagyságú frekvenciával és feszültséggel, hővédelmet is nyújt számára. Rövid idejű hálózati kimaradásokat is kompenzál, mivel az egyenfeszültségű kör feszültsége nem tud pillanatszerűen változni a beiktatott kondenzátor miatt.

2.3. Programozható logikai kontroller (PLC)

A vezérlés ,,csomópontjaként" működik a programozható logikai kontroller, feladata beérkező jelek feldolgozása, számítások elvégzése és kimenő jelek szolgáltatása. A PLC megtáplálása a 24 V-os egyenfeszültségű hálózatról történik, mely egyben az általa kiadható maximális feszültség nagysága is.

A mai PLC-k moduláris és kompakt kivitelben készülnek. A moduláris felépítésű vezérlők buszára lehet különböző tulajdonságú hardvereket (bővítőkártyákat) csatlakoztatni és ezzel kiszolgálni az egyes feladatok speciális igényeit.

Bővítő kártyák nélkül a kiválasztott PLC csupán egy bites ki- és bemenetekkel rendelkezik, melyekből (ilyen sorrendben) 10 és 14 darab áll rendelkezésre.

Mivel a felépített rendszer egyrészt több be- és kimenetet igényel, illetve más funkciójú elemeket is, így szükségessé vált bővítőkártyák csatlakoztatása a PLC-hez.

Egy 16 bemenetű és egy 16 kimenetű bővítő kártyával lett kiegészítve a PLC. Ezek működésükben hasonlóan diszkrét jeleket érzékelnek, illetve adnak ki.

Az erősáramú védelmekhez hasonlóan a 24 V-os környezetben is szükségünk van hibaállapot kezelésére, melyet a biztonsági modul lát el. A kártya bemenetére két darab NC (negált logikás) vészkapcsot lett sorban kötve. Bármelyiket megnyomva az áramkör szakadásának hatására a biztonsági modul a kimeneteire kötött elemek működését leállítja, amivel biztosítja azok károsodásának elkerülését.

Az analóg jelek feldolgozására két darab bővítő kártya lett választva. Ezek az analóg jel megfelelő előkészítése (erősítés, szűrés) után a jelet digitális jellé alakítják (16 bit), melyet továbbítanak a PLC felé.

2.4. Szenzorok

Minden iparban használt daruval szemben az egyik legalapvetőbb elvárás a horog helyzetének pontos ismerete minden időpillanatban. Ez szolgál alapjául minden vezérlési és szabályozási folyamatnak.

A vízszintes helyzet mérése méteres távolságban történik, és centiméteres pontosságot igényelt, így ultrahang szenzorra esett a választás. A daru méreteihez igazodva hosszirányban egy 8 méter hatótávolságú, keresztirányban egy 2 méteres szenzor lett kiválasztva, vak zónájuk 30, illetve 12 cm. A kimenet mindkét esetben 4 – 20 mA-es analóg jel, melyet a PLC dolgoz fel.

A magasság érzékelésénél is lett volna lehetőség az előző esetben megismert ultrahang szenzor alkalmazására, ez azonban több nehézséget is okozott volna. A szenzor csak a futómacskára szerelhető fel fixen, így viszont csak a pontosan alatta lévő szállítandó teher távolságát tudja meghatározni, kilengés esetén rossz értéket jelez.

A probléma a motorválasztás során lett kiküszöbölve, ugyanis a megrendelt emelő motor rendelkezik egy fordulatszámmérő enkóderrel.

Alapvető biztonsági feltétel, hogy a daru mozgása minden irányból behatárolt legyen. Ez lett megvalósítva a vízszintes irányokban induktív szenzorokkal.

A főtartó és a macska mozgását úgy lett korlátozva, hogy a darupálya végéhez közeledve minden irányban helyet kap két induktív szenzor, egymástól 15 centiméterre olyan helyzetben, hogy érzékelni tudják a feléjük mozgó főtartót. Ezeket elérve a szenzorok logikai kimenete megváltozik. Az első szenzor előtti elhaladás a haladási sebességet egy előre beállított értékre csökkenti, míg a második nullára állítja azt, és csak az ezzel ellentétes irányú elmozdulást engedélyezi.

3. ELEMEK RENDSZERRÉ ALAKÍTÁSA

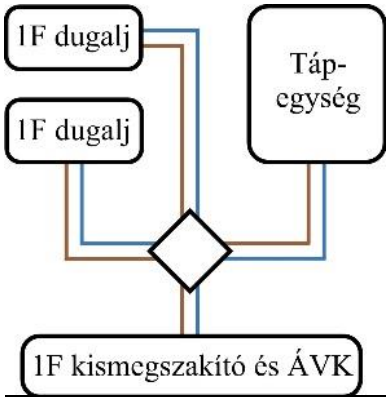
3.1. Háromfázisú rendszer

A daru teljes villamos rendszere egyetlen helyen kapcsolódik a külvilághoz, ez pedig a háromfázisú betáplálás. Ettől eltekintve szigetet alkot, azaz semmilyen más hálózattal nincs kapcsolatban.

A betáplálás három fázisvezetője a hárompólusú kismegszakítóba csatlakozik, így zárlat esetén a védelem a teljes rendszert védi.

A következő elem a háromfázisú áramvédő kapcsoló, melynek bemenetére csatlakozik a 3 fázis. Mivel ez a hálózat nem tartalmaz nullvezetőt, így csupán a három fázisvezető van átvezetve a relén.

Az áramvédő kapcsolóból az L1, L2, L3 fázisvezetőket vezetjük tovább a mágneskapcsolóba, mivel ennek a sornak a végén lévő frekvenciaváltók nem igényelnek nullvezetőt. A mágneskapcsoló normál üzemi körülmények között meg tudja szakítani a három fázis áramát.



1. ábra Egyfázisú hálózat

Ezután sorkapcsok segítségével a három fázist bekötjük az egyes motorvédő kapcsolókba, így biztosítva azt, hogy minden kapcsoló egy irányú mozgásért feleljen.

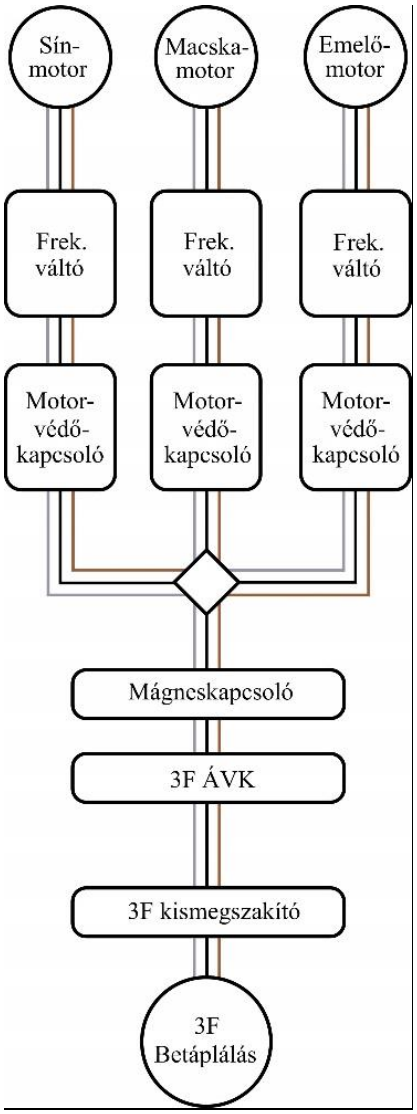
A kimenetről a frekvenciaváltóba kerülnek bekötésre a fázisok. Ez nem igényel külön táplálást a működtető elektronika számára, rendelkezik saját egyenirányító körrel, mely előállítja a működéshez szükséges 24 V-os egyenfeszültséget.

A frekvenciaváltóból már U, V, W jelzéssel lép ki a három fázis, ezzel is jelölve, hogy ezek már közvetlenül kapcsolódnak a rövidrezárt forgórészű aszinkron motorok csillagkapcsolású tekercseihez.

Az elemek kapcsolata grafikusan az 1. ábrán jelenik meg.

3.2. Egyfázisú rendszer

Az egyfázisú hálózat létrehozása a betápláló kábel nullvezetőjének és L1 fázisának segítségével történt. Előbbit közvetlenül használtuk fel, utóbbit a háromfázisú megszakító után lett leválasztva.



2. ábra Háromfázisú hálózat

Egyetlen védelmi elemként foglal helyet közös házban lévő áramvédő kapcsoló és kismegszakító.

Innen két kisfeszültségű eszköz kerül megtáplálásra:

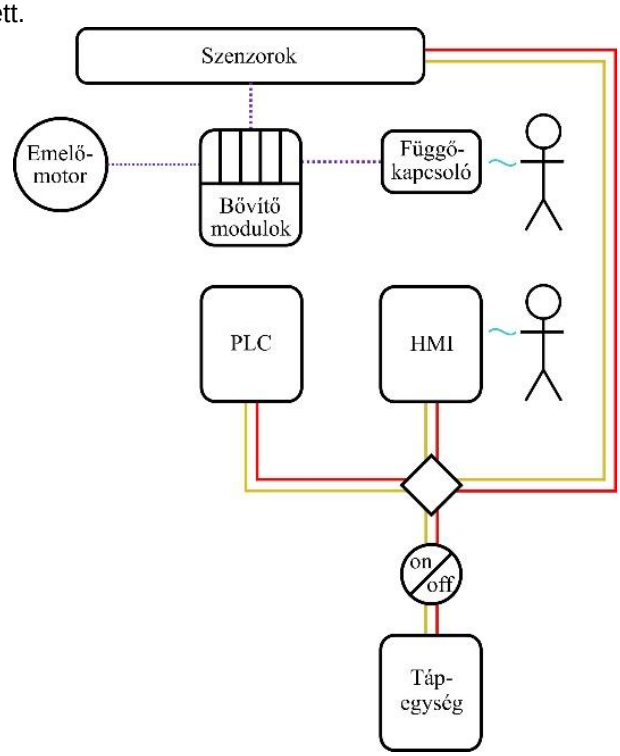
- Az ipari gyakorlatnak megfelelően a szekrényben helyet kap két darab normál egyfázisú dugalj, mely nagyban segítette munkát az összeszerelés folyamata során.
- Az egyenfeszültségű kör tápegysége erről a hálózatról állítja elő a szükséges feszültséget, így

ebbe az eszközbe is be kellett kötni a fázist és nullvezetőt.

A kialakított rendszer a 2. ábrán látható.

3.3. Egyenfeszültségű rendszer

A +24 V-os tápfeszültséget előállító tápegység fedezi a PLC, a HMI (Human-Machine Interface) és a szenzorok energiaigényét. A szenzorok által előállított jelek szintén ezen a jelszinten üzemelnek. Közvetlen emberi beavatkozásra csak ezen a szinten van lehetőség a HMI és a függőkapcsoló segítségével, mely a 3. ábrán is jelölve lett.



2. ábra Egyenfeszültségű hálózat

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Az elkészült függődaru alkalmas egy teljes rendszer bemutatására. Segítségével a hallgatók képesek lesznek megismerni hagyományos és modern alkotóelemeit egy hajtásláncnak, megismerkedni az alapvető védelmi eszközökkel. Ezen kívül a frekvenciaváltós hajtás beavatkozási lehetőségeit is kipróbálhatják a HMI segítségével. Előtérbe kerül még a különböző típusú szenzorok alkalmazása is.

A megvalósított darun lehetséges fejlesztési irány rakodóműveletek automatizálása és teher lengésmentesítés lehet.

5. IRODALOMJEGYZÉK

[1] ***Kulcsár B..:*** Anyagmozgató berendezések. Typotex Kiadó, Budapest, 2012.

[2] ***Dr. Ajtonyi I, Dr. Gyuricza I.:*** *Programozható irányítóberendezések, hálózatok és rendszerek.* Műszaki Könyvkiadó Kft, Budapest, 2010.

Sütő Bence, Dr. Farkas Csaba, Arnold Ákos,
Dr. Divényi Dániel, Dr. Raisz Dávid

Hálózattámogató invertermodell implementálása és tesztelése RTS rendszerben

Cikkünkben egy, a nemzetközi szakirodalomban publikált hálózattámogató funkciókkal (virtuális inercia, droop szabályozások) ellátott invertermodell működését mutatjuk be laborkörülmények között. Először ismertetjük a szabályozás alapelveit és releváns egyenleteit, majd röviden áttekintjük a hangolás eszköztárát, illetve a beállított paramétereket. Ezt követően a modellt az Imperix valós idejű szimulátorában implementáljuk, amely képes a hozzá kapcsolódó invertert a megfelelő fizikai vezérlőjelekkel ellátni. Az így megvalósított konvertert szigetüzemben, és a kisfeszültségű hálózatra csatlakoztatva is teszteljük.

This article introduces an advanced grid-supporting converter model published in the literature, that incorporates virtual inertia, virtual impedance, and droop control. First, the basic concept of operation and control tuning is presented. Then, the corresponding parameters are shown, which determine the behavior of the model. The converter is implemented in the Imperix real-time simulator, through which a hardware representation with measurable physical signals is gained. The model is then tested in both islanded and grid-connected operations, while the process of synchronization is also examined in detail.

Kulcsszavak: **teljesítményátalakító, virtuális szinkron gép, droop szabályozás, virtuális inercia, valós idejű szimuláció**

1. BEVEZETÉS

A jelen kor egyik legnagyobb kihívása a megújuló energiaforrásokon alapuló termelő egységek villamosenergia-rendszerbe való integrálása. Ezek hálózati kapcsolatát túlnyomó részt teljesítményelektronika alkotja, amely alapvetően a konvencionális generátoroktól eltérő működést produkál. Ez a rendszerüzemeltetés szempontjából több lényeges kérdést is felvet, melyek közül cikkünk során a hatásos teljesítmény egyensúlyára fókuszálunk. Az inverteres termelőegységek elterjedésével csökken a forgógépes betáplálás aránya, ezzel együtt pedig kevesebb forgótartalék marad a rendszerben.

Erre potenciális megoldási lehetőséget az inverterek nagymértékű szabályozhatósága adhat. Ezekkel az eszközökkel megvalósítható a szinkron géphez hasonló működés, azaz kialakítható egy úgynevezett virtuális szinkron gép (VSM – virtual synchronous machine). A konkrét implementálásra több koncepció is létezik, például a szinkronverter (szinkron gép – konverter szavakból) modell [1], vagy a jelen cikkben részletesebben tárgyalt, összetettebb VSM modell is. A 2. fejezetben áttekintjük a szabályozási struktúra felépítését, és röviden ismertetjük a kapcsolódó tervezési eljárásokat. A 3. fejezet során ismertetjük az általunk használt hálózati- és modellparamétereket. A 4. fejezetben bemutatjuk az Imperix valós idejű szimulátorával (RTS – real time simulator), és a hozzá kapcsolódó inverterrel végzett hardveres kísérleteinket. Az elvárt működés validálása mellett a nagy kapcsolási frekvenciából adódó sajátságokat is tárgyalunk. Végül, az 5. fejezetben összefoglaljuk munkánkat, és ismertetjük a témában előttünk álló továbblépési lehetőségeket.

A cikkben ismertetett kutatás a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Felsőoktatási és Ipari Együttműködési Központ (BME-FIEK) inverterek szabályozástechnikájával foglalkozó munkacsoportjának keretei között valósult meg. Az itt bemutatott szimulációkat a [2]-ben bemutatott BME FIEK MVM Smart Power Laboratóriumban végeztük.

2. MODELL

Az itt bemutatott modellt [3] alapján rekonstruáltuk, majd a [4]-[6] irodalmak alapján egészítettük ki. A teljes szabályozási struktúra az 1. ábra blokkvázlatán látható. A konverter működése forgó (d-q) koordináta-rendszerben megvalósított kaszkád szabályozón (sorbakötött feszültség és áramszabályozók) alapul, amely a hálózatra csatlakozás pontján (PCC – point of common coupling) mérhető feszültséget, és onnan a hálózat felé folyó áramot kontrollálja. Ezek alapjelét virtuális impedancia alakítja, amely alapvetően a szabályozási kör stabilitását segíti elő. A legkülső szabályozási hurkot a teljesítményszabályozók alkotják, amelyeket a továbbiakban részletesebben tárgyalunk.

2.1. Hatásos teljesítmény szabályozása

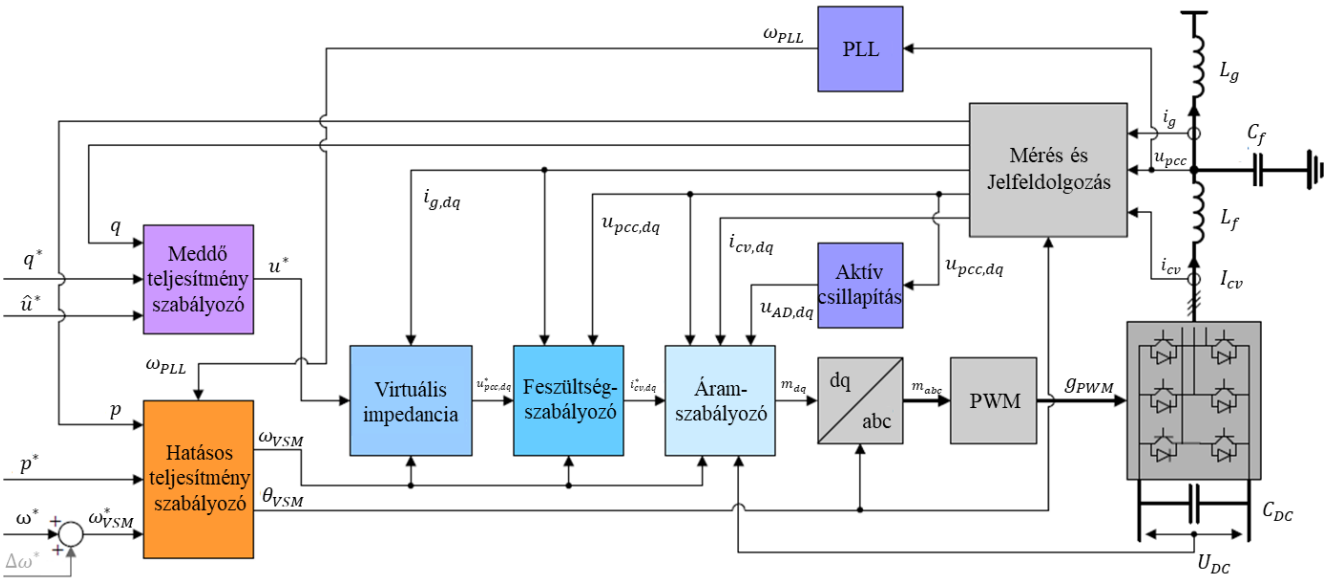
A teljesítményszabályozó a szinkron gép lengési egyenletét valósítja meg három „alapjel” felhasználásával, melyek a következők:

- p^* - teljesítmény alapjel
- ω^* - körfrekvencia alapjel
- ω_{PLL} – a PCC ponton mért körfrekvencia (PLL segítségével).

Fontos megemlíteni, hogy az ω^* alapjel ezesetben a modell saját belső frekvenciájára vonatkozik (analóg a szinkron gép mechanikai szögsebességével), ehhez rögzítjük a szabályozásnál alkalmazott d-q koordináta-rendszert is.

A lengési egyenlet így a következők szerint fogalmazható meg:

$$\frac{d\omega_{VSM}}{dt} = \frac{1}{T_a}[p^* - p - k_d(\omega_{VSM} - \omega_{PLL}) - k_\omega(\omega_{VSM} - \omega^*)] \qquad (1)$$



1. ábra A teljes szabályozási kör blokkvázlata [3

ahol,

p mért háromfázisú hatásos teljesítmény;
ω_{VSM} a szabályozás saját körfrekvenciája;
T_a inercia időállandó (analóg a szinkron gép 2H-val jelölt mennyiségével);
k_d csillapítási tényező;
k_ω hatásos teljesítmény-frekvencia droop.

Megfelelően megválasztott konstansok mellett ez a szabályozó képes hálózatra kapcsolt, és szigetüzemi működésre is anélkül, hogy strukturális változtatásokat hajtanánk végre. Egy esetleges frekvencia-, vagy teljesítményváltozási esemény bekövetkezésekor a saját frekvenciájának megváltoztatásával, inercia jelleggel is reagál. Kiemelendő, hogy az 1. ábrán feltüntetett (és (1) egyenletben szereplő) PLL mindkét üzemállapotban csak a csillapítás megvalósításához szükséges frekvenciamérés feladatát látja el. Elhelyezéséből adódóan ez még nem képes a hálózatra szinkronozást megvalósítani.

A szinkronizációhoz újabb, a külső hálózatra csatlakozó PLL-t is szükséges a rendszerbe iktatni. A frekvencia és szöghelyzet összehangolásának feladata egy kiegészítő, integráló szabályozóra hárul, amelynek két működése két fázisra osztható. Először a szabályozó a (2) egyenlet alapján üzemelve a szigetként működő konverter(ek) frekvenciájának a hálózat frekvenciájától való eltérését küszöböli ki. Amikor ez a hibajel kellően kicsi (<0,01 ve.), az algoritmus a (3) egyenletet alkalmazva a két hálózatrész szögkülönbségét is figyelembe véve szinkronizálja a szigetet a külső hálózattal.

$$\Delta\omega^* = \frac{k_{i,d\omega}}{s}\left(\omega_g - \omega_{PLL}\right) \tag{2}$$

$$\Delta\omega^* = \frac{k_{i,d\omega}}{s}\left[\left(\omega_g - \omega_{PLL}\right) + k_\theta\left(\theta_g - \theta_{PLL}\right)\right] \tag{3}$$

ahol,

$k_{i,d\omega}$ integrátor erősítése;
k_θ szögszabályozás erősítése;
θ_{PLL} szigetüzemű hálózatrész szöge;
θ_g külső hálózat szöge.

Természetesen ezzel csak a szinkronizáció feltételeinek egy része (szöghelyzet, frekvencia kritérium) teljesíthető, a feszültségamplitúdóra vonatkozó követelményeket a következő alfejezetben a meddőteljesítmény-szabályozóval együtt tárgyaljuk.

2.2. Meddő teljesítmény szabályozása

A meddő teljesítmény szabályozása egy egyszerű droop (arányos) taggal történik, mely az alábbi egyenlettel írható le:

$$u^* = \hat{u}^* - k_q(q^* - q) \tag{4}$$

ahol,

u^* virtuális impedanciára adott feszültség alapjel;
$\hat{u}^*$ feszültségamplitúdó alapjel;
q^* háromfázisú meddő teljesítmény alapjel;
q mért meddő teljesítmény;
k_q meddő teljesítmény–feszültség droop.

Ahhoz, hogy a hálózatra kapcsolás elvégezhető legyen, a feszültség alapjelet is módosítani kell úgy, hogy a kapcsolási ponton a két amplitúdó megegyezzen. Ehhez a korábbiakhoz hasonlóan egy integráló szabályozó használható, amely a következő egyszerű egyenlet alapján működik:

$$\Delta\hat{u}^* = k_{i,du}\left(\hat{u}_g - \hat{u}_{pcc}\right) \tag{5}$$

ahol,

$k_{i,du}$ integrátor erősítése;
$\hat{u}_g$ hálózati feszültség amplitúdója;
$\hat{u}_{pcc}$ PCC ponti feszültség amplitúdója.

Az (5) képletben a hálózatoldali és PCC ponti feszültségek amplitúdója helyett azok „d” irányú komponensét felhasználva hasonló eredményt kaphatunk, mivel ezek a szögszinkron beállása után közel egyenlők.

2.3. Szabályozók beállítása

A modellben jelen lévő szabályozók, hangolást igénylő elemek alapvetően két csoportba sorolhatók a beállítások tekintetében:

1) Meghatározott módszerrel, egzakt egyenletek szerint számítható a beállítás.
2) Numerikusan, illetve empirikusan meghatározható a beállítás.

Az 1) csoportba tartoznak a feszültség-, illetve áramszabályozást ellátó PI szabályozók. Az utóbbi hangolása a póluskiejtés módszerével tehető meg, míg az előbbit maximális fázistartalékra szokás tervezni. Ezekhez az eljárásokhoz a rendszer adottságai (szűrő paraméterek, hálózat erőssége stb.) jelentik a bemenetet.

Minden további elem a 2) csoportba tehető. Itt első lépésként a paraméterek egy kezdeti értékének meghatározására van szükség. Ezt követően a konverter kisjelű modellje, valamint az abból adódó póluseloszlás használható a stabilitási kritérium ellenőrzésére, és a rendszer esetleges gyorsítására.

3. PARAMÉTEREK

Az előző fejezetben említettük, hogy a teljes szabályozási struktúra beállítása erősen függ a hálózati adottságoktól és a hardveres tulajdonságoktól. Ezek az esetünkben a következők:

- Hálózat
  - 2 MVA zárlati teljesítmény
  - 400 V névleges feszültség
- Imperix
  - 7,4 kVA névleges teljesítmény fázisonként
  - 2,5 mH szűrő induktivitás
  - 10 µF szűrő kapacitás
  - 22 mΩ ellenállás a szűrőben sorosan
  - 1 Ω ellenállás a kapacitással sorban (Imperix beépített elem).

1. táblázat A konverter elemeinek értékei

Paraméter	Érték	Paraméter	Érték
l_f	$7{,}36 \cdot 10^{-2}$ ve	T_a	2 s
c_f	$3{,}35 \cdot 10^{-2}$ ve	k_d	40 ve
r_{fs}	$2{,}1 \cdot 10^{-3}$ ve	k_ω	5 ve
r_{fp}	$9{,}37 \cdot 10^{-2}$ ve	$k_{i,d\omega}$	0,8 ve
l_g	$8{,}84 \cdot 10^{-4}$ ve	k_θ	$9 \cdot 10^{-4}$ ve
r_g	$5{,}63 \cdot 10^{-4}$ ve	k_{ipll}	4,69 ve
k_q	0,1 ve	k_{ppll}	0,084 ve
$k_{i,du}$	0,9 ve	ω_{pll}	500 rad/s

Az adott paramétereket figyelembevéve a szabályozókat viszonylagos egységekben terveztük és működtetjük. Ehhez az alapmennyiségeket 15 kVA-nek (háromfázisú), illetve 400 V-nak (vonali effektív érték) választottuk. A frekvenciaalap 50 Hz. A tesztelés során alkalmazott beállításokhoz a [5] irodalmat vettük alapul, az ott publikált paraméterhalmazt alakítottuk a labor adottságaihoz. Az 1. táblázat tartalmazza a kisjelű modell alapján stabil munkapontot jelentő paramétereket.

Fontos megemlíteni, hogy a szabályozókat folytonos időben terveztük, azonban a valóságban diszkrét idejű szabályozást végzünk. A szabályozó 10 kHz frekvencián mintavételezi a mért jeleket, és ugyanilyen frekvenciával végzi az inverter hídágak kapcsolását. Ez az érték kellően nagy ahhoz, hogy a folytonos idejű paraméterek jelentős része jól működő szabályozást eredményezzen, mindössze a rendszerben lévő szűrőket kellett diszkrét időbe transzformálni.

4. HARDVERES TESZT

A fentiekben bemutatott modellt szoftveres szimulációban (MATLAB/Simulink) és az Imperix hardverén is validáltuk. A kísérleteink során külön vizsgáltuk a szigetüzemi, és hálózatpárhuzamos működést, illetve a szinkronizáló jel jelenléte mellett végbemenő folyamatokat.

Az invertert az első vizsgálatokhoz 100 V effektív értékű fázisfeszültségen működtettük. Így a későbbiekben a hálózatra kapcsoláshoz egy toroid transzformátort is felhasználtunk, azonban ennek hálózatoldali induktivitást növelő hatásától eltekintettünk.

Kísérleteinkben az 1. ábrán bemutatott elrendezéshez képest további, fázisonként 200 Ω terhelő ellenállást kapcsoltunk a PCC pontra („Ig” mérése után). Ez több előnyt is eredményezett:

- Az inverter kimenetétől a PCC pontig értelmezhető átviteli függvény megváltozott, így a PCC ponton tapasztalt feszültség felharmonikus tartalom kisebb.
- A szabályozáshoz szükséges feszültségek viszonyítási pontja nem egyértelmű. Az ellenállások beiktatásával azok csillagpontját használtuk földpontként.

A továbbiakban az egyes üzemállapotokat elsősorban a hatásos teljesítmény-frekvencia összefüggések szerint tárgyaljuk.

4.1. Szigetüzem

Szigetüzem során az inverter szabja meg a hálózat alapvető jellemzőit, azaz a feszültséget és a frekvenciát. Jelen esetben a konverter a fent említett 200 ohmos ellenállásokat látja el, ami a feszültségtartásból adódóan állandó teljesítményt vesz fel. Ez a teljesítménykényszer visszahat az inverter által tartott frekvenciára, ami végeredményben a droop konstansnak megfelelően tolódik el. Ennek szemléltetésére fejezzük ki az (1) egyenletből a frekvenciát állandósult állapotot feltételezve.

$$\omega_{VSM} = \frac{1}{k_\omega}(p^* - p) + \omega^* \qquad (6)$$

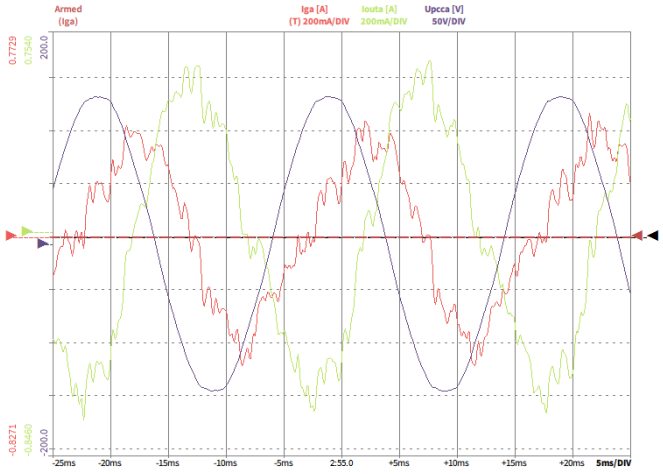
Esetünkben 200 Ω-os ellenállások csatlakoznak 100 V fázisfeszültségre, ami 0,5 A áramot, és összességében 150 W teljesítményfelvételt jelent (viszonylagos egységekben ez az érték $p = 0{,}01$). Feltételezzük, hogy a jelenlegi alapjelek: $p^* = 0, \omega^* = 1$. Ezeket (6)-ba helyettesítve $\omega_{VSM} = 0{,}998$, azaz a frekvenciára 49,9 Hz adódik.

Ezek alapján tehát szigetüzemben az inverter hatásos teljesítmény-, illetve frekvencia alapjelét megváltoztatva is frekvenciabeli eltérést tapasztalhatunk. (Az eredeti, 50 Hz-es cél elérésének legkézenfekvőbb módja, ha a teljesítményalapjelet is 0,01 értékűre állítjuk.)

4.2. Hálózatpárhuzamos üzem

Hálózatra kapcsolás után a konverter P-Q üzemben működik. Ilyenkor a hálózatból adódó frekvenciakényszer érvényesül, amelyre az előző alfejezethez hasonlóan az inverter hatásosteljesítmény-szabályozással tud reagálni. Ennek tudatában rendezzük át a (6) egyenletet:

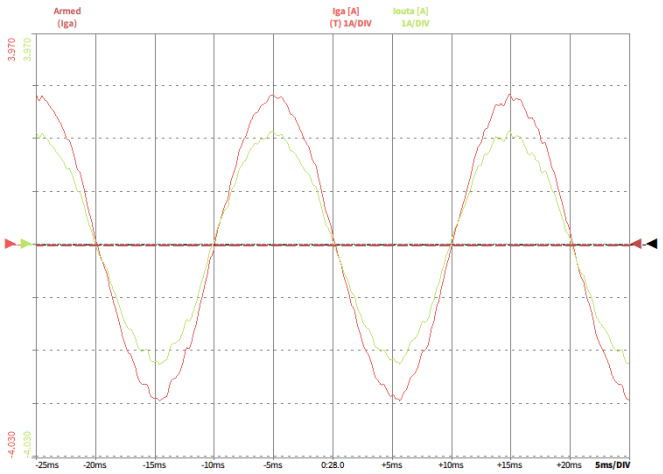
$$p = k_\omega(\omega^* - \omega_{VSM}) + p^* \qquad (7)$$



2. ábra $\omega^* = 1, p^* = 0$ mellett mérhető feszültség (lila), inverter áram (piros) és hálózat felől folyó áram (zöld)

Hálózati üzemben tehát az inverter hatásos teljesítmény, illetve frekvencia alapjelét megváltoztatva is hatásos teljesítménybeli eltérést tapasztalhatunk. Ekkor azonban a konverter kimenete megfelelő frekvencia-alapjel mellett már jól követi a teljesítmény referenciát. Ez azt jelenti, hogy az $\omega^* = 1, p^* = 0$ esetben a korábbi 3x200 ohmos fogyasztót a hálózat látja el. Az ehhez kapcsolódó PCC ponti feszültséget és áramokat a 2. ábra szemlélteti. Látható, hogy a feszültség (lila) és a hálózat felé folyó áram (zöld) ellenfázisban vannak, azaz hatásos teljesítmény áramlik az ellenállás felé. Emellett, az inverterből folyó áram (piros) sem nulla. Ennek hátterében két működési sajátosság állhat. Egyrészt, az alkalmazott kétszintű inverter topológiával pillanatértékben nem lehet nulla fázisfeszültséget kiadni, melynek következtében az áram sem csökken nullára. Másrészt, a 2.2-ben ismertetett meddőteljesítmény-szabályozó továbbra is működik, feszültségeltérés esetén reaktív áramot generál.

A konverter tehát hatásos teljesítményt 0,01 alapjel fölött tud a hálózatba táplálni, és 0 alatt tud a hálózatból felvenni. A $p^* = 0{,}04, \omega^* = 1$ üzemállapotot mutatja a 3. ábra, ahol a két áram különbsége az ellenálláson elfolyó áram (0,5 A effektív érték). A teljesítmény alapjelkövetés időbeli lefolyását a 4-5. ábrák mutatják be. A válaszjel 0,5 másodperc alatt éri el a kijelölt végértéket.



3. ábra A rendszerben folyó áramok $\omega^* = 1, p^* = 0{,}04$ alapjel esetén

4.3. Szinkronizáció

A szinkronizáció engedélyezésével a (8) egyenlet szerint egy új tag adódik a frekvencia alapjelhez ((2) és (3) behelyettesíthető).

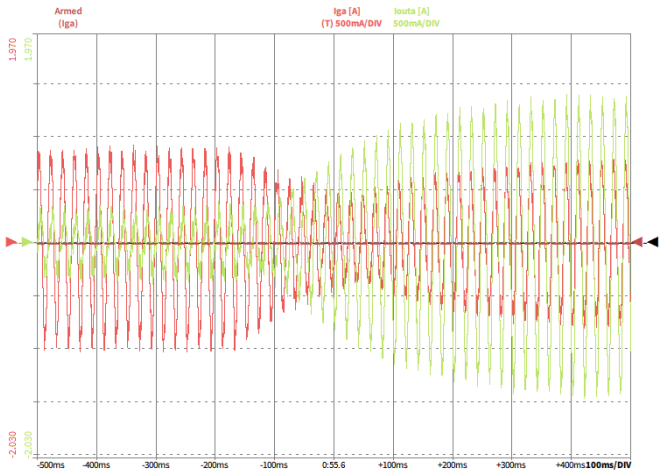
$$\omega_{VSM} - (\omega^* + \Delta\omega^*) = \frac{1}{k_\omega}(p^* - p) \qquad (8)$$

Ez úgy változtatja meg a teljes kifejezést, hogy a konverter frekvenciája és szöghelyzete megegyezzen a hálózatéval. Szigetüzemben ez természetesen a frekvencia változtatásával tehető meg. Ez jelen beállítások mellett közelítőleg 40 másodpercet vesz igénybe, azonban a folyamat nagyobb integrátor erősítés (lazább frekvenciagradiensre vonatkozó feltétel) alkalmazásával gyorsítható. Hálózatra kapcsolódás után pedig a szabályozó továbbra is ugyanazt az üzemállapotot tartja, azaz p=0 mellett is ellátja az ellenállást. Ilyenkor a frekvencia-, vagy hatásos teljesítmény alapjelváltozás ehhez a munkaponthoz képest értelmezendő (a szinkronizáló szabályozó a szigetüzemi munkapontot tartja). A szinkronizációs jel kikapcsolásával lehetséges áttérni a 4.2-ben tárgyalt hálózatpárhuzamos üzemre.

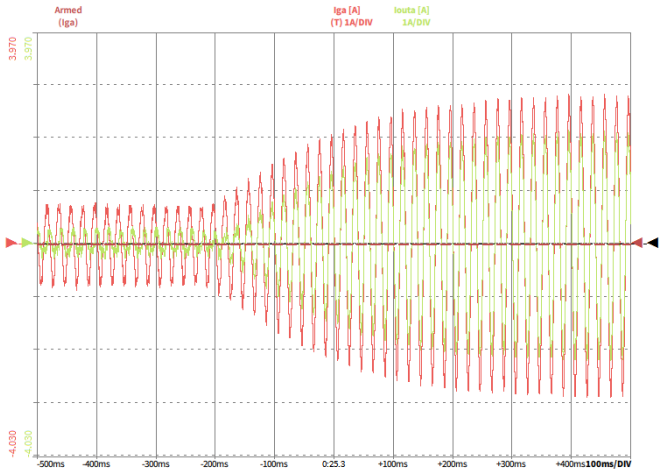
4.4. Jelek 2 MHz-en

Az eddig bemutatott jeleket az Imperix mintavételi frekvenciáját, azaz 10 kHz-et alkalmazva mutattuk be. Azonban a fenti tapasztalatok tovább árnyalhatóak, ha kisebb mintavételi idővel vizsgáljuk a feszültségeket és áramokat. Ehhez az oszcilloszkópon 2 MHz mintavételi frekvenciát állítottunk be. A következőkben két jelenséget

mutatunk be, ami részletesebb felbontás mellett szembetűnő.



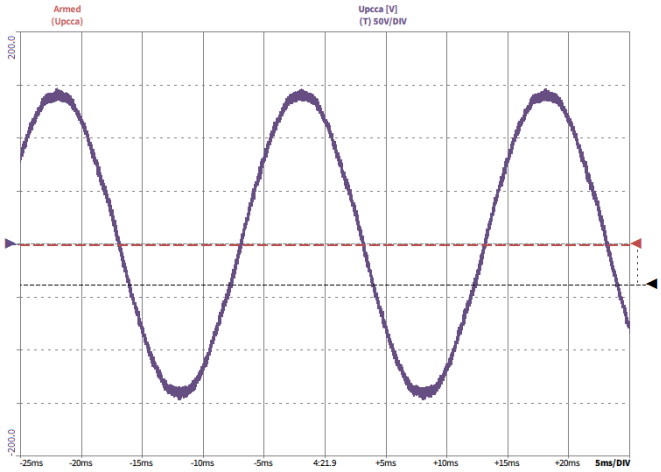
4. ábra Alapjelkövetés $\omega^* = 1$ mellett $p^* = 0{,}01$ üzemállapotból $p^* = -0{,}01$ teljesítményre



5. ábra Alapjelkövetés $\omega^* = 1$ mellett $p^* = 0{,}01$ üzemállapotból $p^* = -0{,}01$ teljesítményre

5. FESZÜLTSÉGMÉRÉS

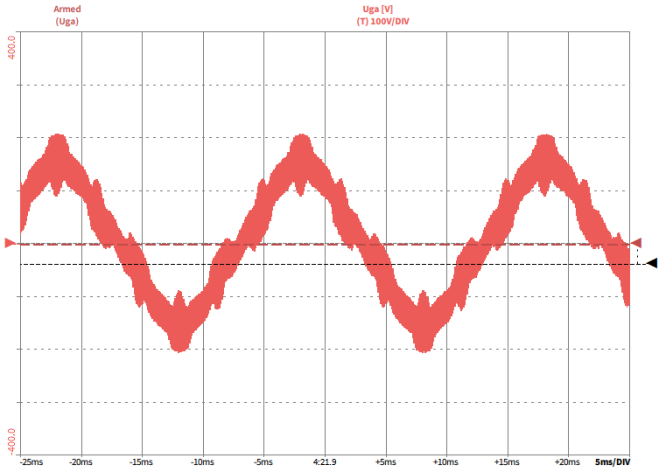
A hálózaton kialakuló feszültség jelalakja erősen függ attól, hogy milyen referenciapontot használunk a méréshez. A következő két ábra ugyanazt a fázisfeszültséget mutatja, azonban az első esetben a terhelő ellenállások csillagpontját, a második esetben a kisfeszültségű hálózat nulla vezetőjét használtuk földpontnak. Látható, hogy az utóbbi esetben a feszültségjel felharmonikus tartalma lényegesen nagyobb, ami összességében a laborban található többi eszköz nulla vezetőre gyakorolt hatását tükrözheti.



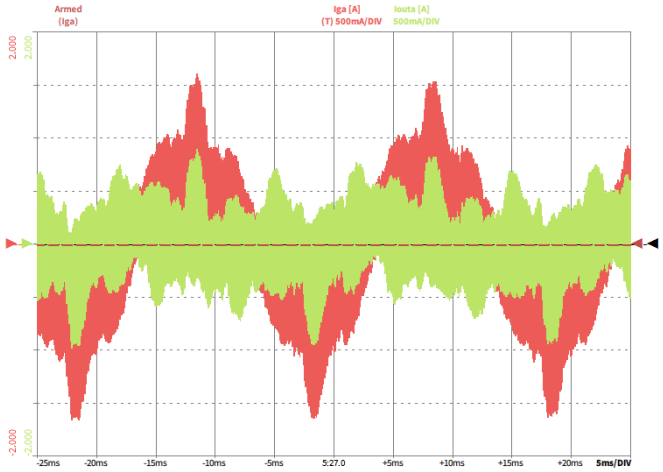
6. ábra A PCC ponti „a” fázis feszültségének jelalakja a terhelő ellenállások csillagpontjához mérve

6. KIADHATÓ ÁRAM

Két munkapont is található, amelyekben a megjelenített áramok közül egynek nullának kell lennie. p=0 esetében a hálózat látja el az inverter kimenetén lévő ellenállást, így a szűrőn nem folyik áram, míg p=0,01 esetén az inverter látja el az ellenállást, és a hálózat felé folyó áram nagysága 0. Ezzel szemben, a kapcsoló készülék működéséből adódóan valójában mindkét esetben nullától eltérő áramot tapasztalhatunk. Az utóbbi esetet illusztrálja a 8. ábra, ahol piros színnel az inverter által kiadott, zöld színnel a hálózat felé folyó áramot tüntettük fel.

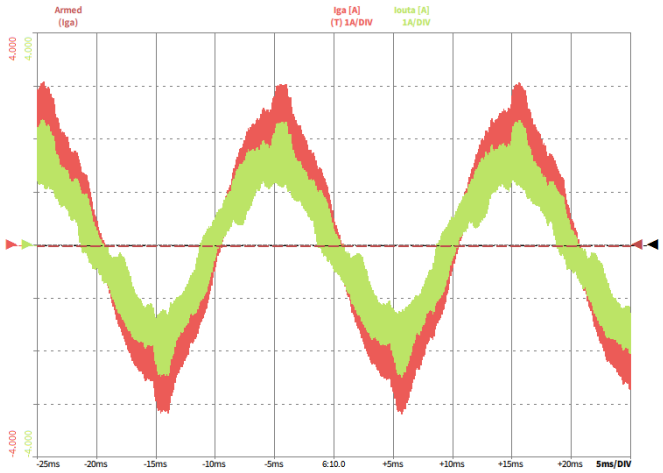


7. ábra A PCC ponti „a” fázis feszültségének jelalakja a hálózat nulla vezetőjéhez mérve



8. ábra $\omega^* = 1, p^* = 0$ mellett mérhető inverter áram (piros) és hálózat felől folyó áram (zöld) 2 MHz frekvenciával mintavételezve

Ahogy a teljesítmény alapjel, és ezzel együtt az áram nő, úgy kapható egyre jobb jel-zaj arány. Ezzel pedig p=0,04 esetén mind a konverter kimeneti árama, mind a hálózat felé folyó áram szinuszosnak mondható (9. ábra).



9. ábra $\omega^* = 1, p^* = 0{,}04$ mellett mérhető inverter áram (piros) és hálózat felől folyó áram (zöld) 2 MHz frekvenciával mintavételezve

7. ÖSSZEFOGLALÁS

A jelen cikkben bemutattunk egy virtuális szinkron gép modellt, amely alkalmazhatósága kiterjed mind a hálózatpárhuzamos, mind a szigetüzemi körülményekre. A DC oldalon rendelkezésre álló teljesítmény alapján a lengési egyenlet implementálásával képes virtuális inerciát szolgáltatni, valamint feszültségszabályozási feladatokat ellátni. A cikk második része a működés bemutatására, illetve a hálózatra kapcsolás folyamatára fókuszált. Megállapítottuk, hogy a konverter valóban képes hatásosteljesítmény-frekvencia szabályozásra, ezt részletesen elemeztük. Emellett, a modell valós rendszerben történő alkalmazásából adódó egyéb kihívásokat, tapasztalatokat (pl. feszültségmérés referenciapontja) is tárgyaltunk.

Munkánk folytatásaként vizsgálni fogjuk a feszültségmeddőteljesítmény szabályozás működését. Továbbá célunk, hogy további RTS eszközök segítségével egy gyenge hálózatot hozzunk létre, amelyben frekvenciaérzékeny termelők és fogyasztók helyezkednek el. Ilyen környezetben lehetőség nyílik a most bemutatott VSM modell kívülről jövő frekvenciaváltozásra adott válaszának kísérleti vizsgálatára is.

8. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

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

9. IRODALOMJEGYZÉK

[1] ***Zhong, Q.-C., Weiss, G.:*** *„Synchronverters: Inverters That Mimic Synchronous Generators", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58., no. 4., pp. 1259-1267., April 2011.,*

[2] ***Raisz, D.:*** *„Valós idejű szimulátorok", Elektrotechnika, 110. évfolyam, 10. szám, 5-9. old., 2017.*

[3] ***D'Arco, S., Suul, J. A., Fosso, O. B.:*** *„Small-Signal Modelling and Parametric Sensitivity of a Vitual Synchronous Machine",* Proceedings of the 18th Power Systems Computation Conference, PSCC 2014, Wroclaw, Poland, August 2014.

[4] ***D'Arco, S., Suul, J. A., Fosso, O. B.:*** *„Small-Signal Modelling and Parametric Sensitivity of a Vitual Synchronous Machine in Islanded Operation",* Electrical Power and Energy Systems, vol. 72, pp. 3-15., November 2015.

[5] ***D'Arco, S., Suul, J. A.:*** *"A Synchronization Controller for Grid Reconnection of Islanded Virtual Synchronous Machines",* Proceedings of the IEEE 6th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), Aachen, Germany, June 2015.

[6] ***Cho, C., Jeon, J., Kim, J., Kwon, S., Park, K., Kim, S.:*** *"Active Synchronizing Control of a Microgrid",* IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 26. no. 12., pp. 3707-3719., December 2011.

Kazsoki Attila Sándor, Dr. Hartmann Bálint

Középfeszültségű mintahálózatok létrehozása adatbányászati módszerek felhasználásával

A hazai és nemzetközi téren megfigyelhető napelemes penetráció-növekedés hatására a villamosenergia-rendszer egyre nagyobb mértékben decentralizálódik teljesítménystabilitási kérdéseket és problémákat eredményezve, melyek megválaszolása a hálózat (mintahálózatok) sztochasztikus szimulációja segítségével történhet. Jelen munka nagy területet lefedő, matematikai és fizikai paraméterekkel leírt középfeszültségű elosztóhálózatokra jellemző mintahálózatok létrehozásának lehetséges módszertanát (főfaktoranalízis - 95% lefedettséggel, optimális klaszterszám meghatározás - 6, k-közép klaszterezés), illetve az ennek segítségével kialakított klasztereket és mintahálózatokat mutatja be.

As a result of the nationally and internationally expected rapidly increasing photovoltaic penetration, the structure of the electric power system is becoming increasingly decentralized, and resulting in power stability questions and problems that can be answered by running stochastic simulations of the network (reference networks). In this paper, a reference network formulation methodology (principal component analysis with 95% coverage, the determination of optimal cluster number – 6, and K-means clustering) on a large scale medium voltage network, characterized by mathematical and physical parameters is presented.

Kulcsszavak: **középfeszültségű elosztóhálózat; hálózatok klaszterezése, K-közép klaszterezés; optimális klaszterszám meghatározása; mintahálózatok.**

1. BEVEZETÉS

A hazai és nemzetközi szinten megfigyelhető napelemes penetrációnövekedés, mely a globális felmelegedés (és üvegházhatású gáz és légszennyező anyag kibocsátás) csökkentésére kialakított és elfogadott energiastratégiák egyik alappillére, a következő két évtizedben is jelentős mértékűnek ígérkezik, ezzel is hozzájárulva a villamosenergia-rendszer decentralizációjához. Ezen fotovillamos penetrációnövekedés egyik színtere a kisfeszültségű elosztóhálózat, melyre a háztartási méretű kiserőművek (<50kVA) csatlakoznak, másik színtere a középfeszültségű elosztóhálózat. Ezen feszültségszinten eddig jellemzően <500 kVA csatlakozási teljesítményű kiserőművek nagyszámú megjelenése volt tapasztalható. A jövőben azonban a csatlakozó erőművek teljesítményében is jelentős változás várható (<20 MVA, valamint <50 MVA), ezzel is hozzájárulva a hierarchikus villamosenergia-rendszer struktúrájának átalakulásához [1][2].

Annak érdekében, hogy az elosztóhálózatok közelíteni tudják a kívánt okos hálózati struktúrát, azok fejlesztése szükséges. Ahhoz, hogy a fejlesztési irányok meghatározhatók, az terjedő napelemes rendszerek okozta problémák feltárhatók, a kérdések megválaszolhatók legyenek, az elosztóhálózatok modellezése és szimulációja elengedhetetlen. Ezen szimulációk elvégzéséhez egyes középfeszültségű hálózatok szoftveres implementációja szükséges. Mivel hazánkban jelentős számú és topológiájú középfeszültségű hálózat található, ezek szoftveres leképezése, és azokon történő, nagyszámú sztochasztikus szimuláció futtatása jelentős idő- és erőforrásigényű feladat, célszerű a valós rendszereket jól leíró mintahálózatok létrehozása. Mintahálózatokon történő szimuláció egy-egy konkrét esetben kis valószínűséggel ad pontos megoldást, ellenben átfogó vizsgálatok esetén nagyobb valószínűséggel fogalmazható meg a hálózat biztonságos üzemének fenntartásához szükséges hálózatfejlesztési irányok.

1. táblázat Bemutatott klaszterezési módszerek összefoglalása

Módszer megnevezése	Irodalom	Kialakított klaszterek száma	Vizsgált hálózatok száma
Klasszifikáció	[3-13]	Kisszámú (jellemzően 3-5)	néhány 100 - néhány 1000
Dimenzió-csökkentés (SOM)	[3-6, 13-15]	Közepes számú (jellemzően 8-9)	néhány 100
Hierarchikus felépítő klaszterezés	[3-6, 12, 13, 16-19]	Nagyszámú (jellemzően 10-25)	néhány 100 - 10000+
Hierarchikus lebontó (particionális) klaszterezés	[3-6, 12, 13, 18, 20]	-	néhány 100
K-közép klaszterezés	[3-6, 13. 16, 19-26]	Változó számú (jellemzően 2-12)	néhány 100 - 10000+
K-medián klaszterezés	[3-6, 13, 18, 24, 27]	Közepes számú (jellemzően 8-9)	néhány 1000

Mintahálózatok létrehozásának egyik lehetséges módja a hálózati topológiák csoportosítása. A leggyakrabban használt módszerek (1. Táblázat) viszonylagos

egyszerűsége és statisztikai szoftveres implementációja nagymértéken hozzájárul ahhoz, hogy nagymennyiségű kis-, és középfeszültségű (KIF, KÖF) elosztóhálózatból azokra jellemző kisszámú mintahálózat kialakítása legyen lehetséges.

A nagyszámú hálózati topológia és a kisszámú mintahálózatok kialakítása jelen munka során k-közép klaszterezés segítségével történik.

A 2. fejezetben valós hálózati topológiákon keresztül (magyarországi elosztóhálózati területre vonatkozóan) bemutatásra kerül egy, az elosztóhálózatok esetén alkalmazható kombinált adatbányászati (klaszterezési) módszer (több matematikai algoritmusok, mint például a főfaktoranalízis (PCA) és klaszterezés egyidejű alkalmazásával), mely segítségével nagyszámú középfeszültségű hálózatból, az optimális klaszterszám meghatározásával, kezelhető számú, klaszterekre jellemző mintahálózat alakítható ki. A kialakított klaszterek és mintahálózatok (6), valamint azok topológiai jellemzése a 3. fejezetben kerül bemutatásra.

2. ADATOK ÉS MÓDSZEREK

2.1. Vizsgált hálózatok

A vizsgált hálózatok egy hazai elosztóhálózati engedélyes (DSO) teljes területét lefedő KÖF elosztóhálózat ellátókörzeteit reprezentálják (1769), melyek között megtalálható vidéki, elővárosi, ritkábban és sűrűbben beépített városszövet is.

Az egyes hálózatok jellemzése 15 matematikai és villamos és fizikai paraméterek paraméterrel történhet, mely korrelációanalízis után redukálásra került. A vizsgált hálózatok jellemzése 8 paraméter alapján történik. Ezen paraméterek:

- *v1*: oszlopkacsolók száma
- *v2*: transzformátorok száma
- *v3*: vezetékek átlagos impedanciája [Ω]
- *v4*: csomópontok száma
- *v5*: átlagos fokszám
- *v6*: karakterisztikus impedancia [Ω]
- *v7*: hálózat átmérője [m]
- *v8*: átlagos köztiség

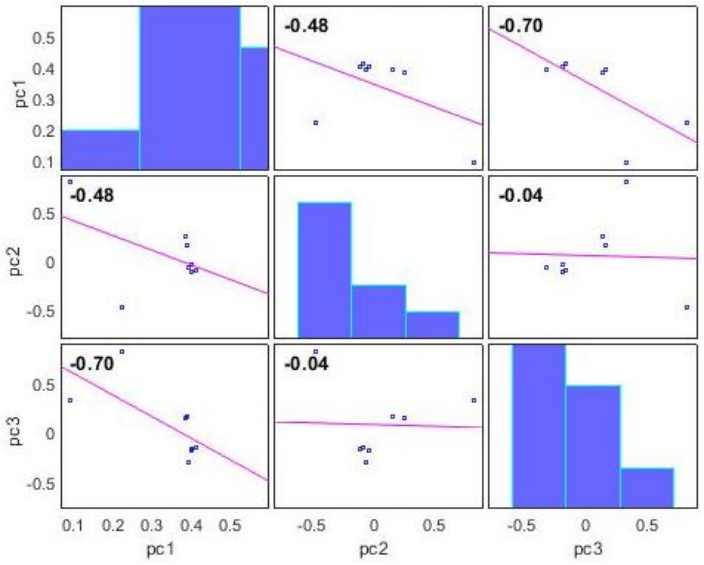
A paraméterek számszerű értékei egyrészt DSO adatszoláltatása alapján (*v1*, *v2*, *v3*), másrészt a hálózatokat reprezentáló gráfokra származtatott matematikai paraméterként (*v4*, *v5*, *v6*, *v7*, *v8*) került meghatározásra. A szerzők által készített irodalmi áttekintés [3] alapján megállapítható, hogy elosztóhálózatok jellemzésére eddig *v1* paramétert (és ezen változóösszetételt) még nem használták.

2.2. Főfaktoranalízis

A vizsgált hálózat előző fejezetben bemutatott paraméterekkel való egyidejű jellemzése, azok számossága miatt igen nehézkes. Annak érdekében, hogy a paraméterszám csökkenjen, mégis a változók által hordozott információ ne, vagy csak elfogadhatóan kis mértékben változzon, célszerű főfaktoranalízist (PCA) alkalmazni.

Az optimális faktorszám, és lefedettségi értékei MINITAB 18.0 statiszikai szoftver segítségével kerültek meghatározásra. Az egyes főfaktorok (*PC*) sajátértékeinek kumulált aránya 3 főfaktor esetén 95% (*PC1* = 71,2%, *PC2* = 15,9%, *PC3* = 8%). Ezen főfaktorok felhasználásával az információveszteség 5%, mely jelen munka során megfelelő lefedettséget biztosít. Az elemzés során meghatározó töréspont (könyökpont) szintén a 3. főfaktornál figyelhető meg.

PCA során az „új változók” korrelációja szintén meghatározásra került. Ahogy az 1. Ábrán is látható, az egyes főfaktorok között negatív korreláció figyelhető meg, a legikesebb érték *PC2* és *PC3* között figyelhető meg (-0,0351), melynek alapján megállapítható, hogy e két főfaktor egymástól független.



1. ábra Főfaktorok közti korrelációanalízis grafikus reprezentációja

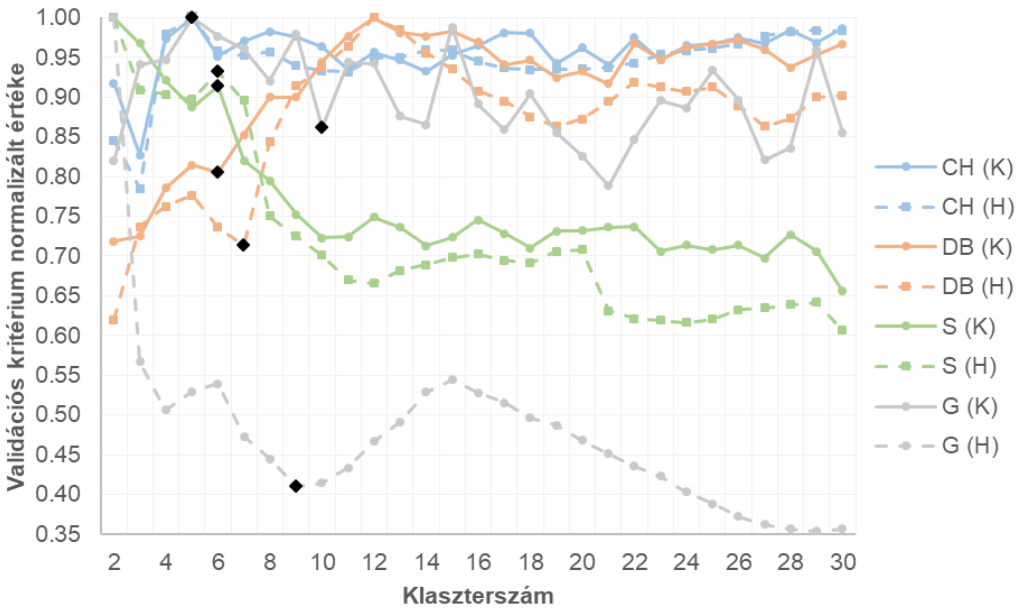
Az, hogy a korreláció szignifikáns-e, a Pearson korrelációs együttható segítségével állapítható meg. Jelen munka során a szignifikancia szint 5%. A főfaktorok közti szignifikancia érték (1. Ábra) rendre: *PC1* és *PC2* között 0,2321, *PC1* és *PC3* között 0,0553, és *PC2* és *PC3* között 0,9343. Ez mindhárom esetben meghaladja a kívánt 0,05 értéket, így megállapítható, hogy a korreláció egyik esetben sem szignifikáns [6].

2.3. Optimális klaszterszám meghatározása

Jelen munka során a klaszterezés a *PC1*, *PC2*, *PC3* által meghatározott 3D ponthalmazon történik, k-közép klaszterezés segítségével. A klaszterezés első lépéseként meg kell adni a kialakítani kívánt (optimális) klaszterszámot is. Ezen érték a Calinski-Harabasz (*CH*), Davies-Bouldin (*DB*), Silhouette (*S*), és Gap (*G*) validációs kritériumok egyidejű használatával, a [2;30] tartományon

vizsgálva került meghatározásra [6]. A validációs kritériumok részletes leírását a szerzők korábbi művei [4][5] tartalmazzák. Korábbi tapasztalatok [16] és a munka célkitűzése alapján (kezelhető számú mintahálózat kerüljön kialakításra) az optimális klaszterszám vizsgálati tartománya a [2;10] tartományra csökkent.

Annak érdekében, hogy az optimális klaszterszám szignifikánsabb legyen, a jelen munka során használt k-közép klaszterezés mellett az irodalomban másik legnépszerűbb klaszterezés (hierarchikus) esetén a validációs kritériumok szintén kiértékelésre kerültek. Az egyes kritériumok grafikus reprezentációja az 2. Ábrán látható.



2. ábra Validációs kritériumok normalizált értékei (K: k-közép klaszterezés H: hierarchikus felépítő klaszterezés; fekete négyzet: optimális klaszterszám a vizsgált tartományban)

Az optimális klaszterszám meghatározása többségi statisztika alapján történt. Ennek eredményeként megállapítható, hogy az optimális klaszterszám 6. A klaszterezés többszöri futtás során mindig ugyanazt az eredményt adta, így annak konvergenciája biztosított.

3. EREDMÉNYEK ÉS ÖSSZEGZÉS

Az előző fejezetben bemutatott klaszterezési módszer segítségével nagy területet lefedő hazai KÖF elosztóhálózaton 6 jellemző csoport került kialakításra. Az egyes klaszterek számossága igen változatos. Klaszter 1 - 230, Klaszter 2 - 21, Klaszter 3 - 153, Klaszter 4 - 882, Klaszter 5 - 210, Klaszter 6 - 273.

A klaszterek a hálózatok karakterisztikáját meghatározó változók (*v1* - *v8*) eloszlásának (normál eloszlás) várható értékével és szórásával jellemezhetők. A normál eloszlás várható értéke a klaszter középpontjára jellemző. Itt csak nagyon kis valószínűséggel ($p \rightarrow 0$) található valós hálózati topológia (jelen munka során egyetlen klaszter esetén sincs a klaszter középpontjában adatpont). Így a klaszterek a középponthoz legközelebb eső mintahálózattal jellemezhető. Ebben az esetben a paraméter várható értéke kis mértékben eltér a mintahálózatot leíró paraméterértékektől.

A hálózat méretét jellemzően a *v4*, *v6* és *v7* paraméterek határozzák meg. Ezen változók hatással vannak az ellátókörzet jellegére is (város – kábeles hálózat, vidék – légvezetékes hálózat). Légvezetékes rendszer esetén a hálózat méretére *v1* és *v2* változók szintén hatással vannak. Kábeles hálózatok esetéén *v1* értéke nulla, de *v2* értéke is alacsony marad. Azon elosztókörzetek nagysága, melyekben mind légvezetékes, mind kábeles hálózatrész található, csupán e paraméterek felhasználásával nem határozható meg. A *v8* paraméter segítségével a hálózat kritikus pontjai szintén meghatározhatók. Ha egy csomópont minél nagyobb köztiséggel rendelkezik, az a gráf szempontjából annál kritikusabbnak mondható, mivel ezeket eltávolítva a gráf könnyen több komponensre eshet szét. Ezen csomópontok védelme az ellátásbiztonság szempontjából fontos. (Megjegyzendő, hogy valós esetben a csomópontok kritikussága csupán a v8 paraméterrel nem jellemezhető.)

A klaszterek vezetéktípusainak és jellemző feszültségszintjeinek logikáját a 2. Táblázat tartalmazza.

Klaszter 1 hálózatai jellemzően légvezetékes rendszerek (96,09%), melyek feszültségszintje 96,03%-ban 22 kV. Mivel a klaszter 11 kV-os vezetéket nem tartalmaz, így megállapítható, hogy az ellátókörzetek vidéki és ritkán beépített elővárosi környezettet látnak el.

Klaszter 2 szintén jellemzően légvezetés hálózatokat tartalmaz (97,25%), viszont itt jellemző feszültségszint a 35 kV (59,40%, a többi 22 kV). Földkábeles vezetékszakaszok esetén a feszültségszint arány megfordul. E klaszter hálózatai topológiájukat tekintve nagyfogyasztókat látnak el. A klaszter számosságát tekintve e csoport a legkisebb a maga 21 hálózatával.

Klaszter 3 jellemzően 22 kV-os (61,99%) kábeles hálózatokat tartalmaz (78,43%). Jellemző hálózati topológia a pár csomópontot és párhuzamos kábeleket tartalmaz, melyek nagyfogyasztók villamosenergia-ellátását látja el.

2. táblázat Klaszterek jellemző vezetéktípusai *('LV': légvezeték, 'FK': földkábel*; *'-': a klaszter ilyen vezetéket nem tartalmaz, '+' és '++': a klaszter ilyen vezetéket kis-, vagy nagymértékben tartalmaz; '!': jellemző feszültségszint)*

Feszültségszint	Vezetéktípus	Klaszter 1	Klaszter 2	Klaszter 3	Klaszter 4	Klaszter 5	Klaszter 6
11 kV	LV	-	-	-	+	-	+
	FK	-	-	++	++!	-	++
22 kV	LV	++!	++	+	+	++!	++!
	FK	+	+	++!	+	+	+
35 kV	LV	++	++!	++	++	-	++
	FK	+	+	+	+	-	+

Klaszter 4 jellemzően kábeles hálózatokat tartalmaz (66,83%), melyek közül a 11 kV-os vonalak aránya 37,94%, a 22 kV-os vonalak aránya pedig 61,34%. Ezen klaszterben a 35 kV névleges feszültségszintű vezetékek száma elhanyagolható. Klaszter 4 hálózatai jellemzően megyei jogú városok sűrűn beépített városszövetéire jellemzők.

Klaszter 5, Klaszter 1-hez hasonlóan, jellemzően 22 kV feszültségszintű légvezetékes hálózatokat tartalmaz. *v1*, *v2*, *v4*, *v6*, és *v7* paraméterek alapján, melyek főként az ellátókörzet méretét írják le, megállapítható, hogy e rendszerek a vidéki villamosenergia-ellátásra jellemzők. Bár a 22 kV mellett megjelenik a másik kettő KÖF feszültségszint is, de ezek aránya jelen esetben elhanyagolható.

Klaszter 6 esetén az előző megállapítások szintén helytállók. A különbség az ellátókörzet nagyságában van. A kisebb ellátókörzetek a sűrűbb településkép eredménye.

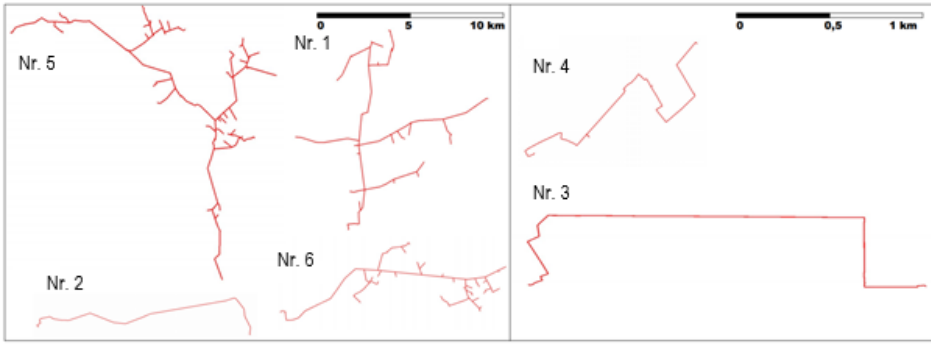
Megjegyzés: A 22 kV-os és a 35 kV-os légvezetékes hálózatok között földelési különbségek vannak. A 22 kV-os hálózat kompenzált (Petersen-tekercsen keresztül földelt), míg a 35 kV-os hálózat nem kompenzált. A hálózatrekonstrukció során a 35 kV-os vezetékszakaszok 22 kV-s vezetékszakaszokkal kiváltásra kerülnek.

Az előzőekben bemutatott 6 klaszter az ellátóterület karakterisztikája alapján további 3 csoportba osztható. Az 1. csoportba tartoznak azon klaszterek, melyek a vidéki, elővárosi hálózatokat tartalmazzák (Klaszter 1, Klaszter 5, Klaszter 6). A 2. csoportba tartozik a városi környezetre jellemző hálózatokat tartalmazó klaszter Klaszter 4). A 3. csoportba az egyedi, nagyfogyasztók villamosenergia-ellátását biztosító hálózati topológiák tartoznak (Klaszter 2, Klaszter 3). A klaszterenkénti ellátókörzet tipizálását és csoportosítását a 3. Táblázat tartalmazza.

3. Táblázat. Ellátókörzet típusok az egyes klaszterek esetén

Klaszter	Ellátókörzet típusa	Csoportszám
Klaszter 1	sűrűn beépített elővárosi környezet	1
Klaszter 2	egyedi (nagy)fogyasztók – légvezetékes ellátás	3
Klaszter 3	egyedi (nagy)fogyasztók – kábeles ellátás	3
Klaszter 4	városi környezet	2
Klaszter 5	vidéki környezet	1
Klaszter 6	ritkán beépített elővárosi környezet	1

A klaszterekre jellemző mintahálózatok a klaszter középpontjához legközelebb eső (legkisebb Euklideszi távolság) valós hálózatok, melyek méretarányos topográfiája a 3. ábrán látható. Az egyes ellátókörzetek É-D [km] valamint K-NY [km] dimenziói.



3. ábra Mintahálózatok topográfiai (Nr. X Klaszter X-et reprezentálja)

Az egyes ellátókörzetek É-D [km] valamint K-NY [km] dimenziói: 11,0 × 11,0 (Nr. 1), 2,5 × 12,0 (Nr. 2), 0,5 × 2,3 (Nr. 3), 0,7 × 1,3 (Nr. 4), 15,0 × 15,0 (Nr. 5) and 5,0 × 13,0 (Nr. 6). A vidéki környezettől a városi környezet felé haladva mind a terült nagyságában, mind *v4* paraméter értékében csökkenő tendencia figyelhető meg (rendre Nr. 1: 68 Nr. 2: 6, Nr. 3: 2, Nr. 4: 20, Nr. 5: 176, Nr. 6: 96). Hasonló tendecia figyelhető meg *v1*, *v2* és *v6*, paraméterek esetén is (*v1*: rendre 35, 2, 0, 10, 103, 52; *v2*: rendre 20, 2, 1, 4, 66, 31; *v6*: rendre 4,8326, 4,1676, 0,5269, 0,1571, 5,3193, 3,6787). Az 1. csoport mintahálózatai esetén (Nr. 1, Nr. 5, Nr. 6) az ellátókörzet területe és az átlagos fokszám (*v5*) között fordított arányosság figyelhető meg (*v5*: rendre 1,906, 1,9886, 1,9792). Az át-

lagos fokszám értéke a 2. csoport esetén ezen értékeknél jóval kisebb (Nr. 2 is 1,6667 and Nr. 3 is 1,0000), míg a 3. csoportba tartozó városi környezet esetén a két csoport értékei között marad (Nr.4 1,9000). Ezek alapján megállapítható, hogy az átlagos fokszám értéke az ellátókörzet jellegétől nagymértékben függ.

A klaszterekre jellemző elosztókörzetek validációja a mintahálózatok topográfiái alapján megtörtént.

A mintahálózatok paramétereinek részletes vizsgálatával megállapítható, hogy a 3. Táblázatban bemutatott klaszterek a 2. ábrán látható mintahálózatokkal jól jellemezhetők.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen munkában egy, a magyar KÖF elosztóhálózatra jól alkalmazható, mintahálózatok létrehozására alkalmas módszertan, valamint annak eredményei kerültek bemutatásra. Az irodalmi áttekintés után a k-közép klaszterezésre esett a választás.

A 2.1 fejezetben a bemeneti adatbázist alkotó KÖF hálózatok kerültek bemutatásra. Ezen hálózatok 8 paraméter segítségével jellemezhetők, melyek az oszlopkacsolók száma, transzformátorok száma, vezetékek átlagos impedanciája [Ω], csomópontok száma, átlagos fokszám, karakterisztikus impedancia [Ω], hálózat átmérője [m] és átlagos köztiség.

A változók nagy száma miatt azok egyidejű kezelése nehézkes, azok száma PCA segítségével csökkentésre került (3). A főfaktorok a paraméterek által hordott információ 95%-os lefedettségét biztosítják. A klaszterező algoritmus futtatása a PCA adatbázison történt.

A k-közép klaszterezés során a kialakítandó klaszterszámot szintén meg kell adni. Az optimális klaszterszám meghatározása a Calinski-Harabasz, Davies-Bouldin, Silhouette, és Gap validációs kritériumok egyidejű használatával, két klaszterezési módszerre (transzparens eredmény érdekében), többségi statisztika alapján került meghatározásra (6).

A klaszterezés MINITAB 18.0 statisztikai szoftver segítségével került elvégzésre. A kialakított klaszterek jellemzése az eredeti paraméterek normál eloszlásának várható értéke valamint szórása alapján történt. Ezek alapján a 6 klaszter: Klaszter 1 - sűrűn beépített elővárosi környezet; Klaszter 2 - egyedi (nagy)fogyasztók – légvezetékes ellátás, Klaszter 3 - egyedi (nagy)fogyasztók - kábeles ellátás; Klaszter 4 - városi környezet, Klaszter 5 - vidéki környezet, Klaszter 6 - ritkán beépített elővárosi környezet. A klaszterek jellemzése a középpontjukhoz legközelebb eső valós hálózattal történt. Az elosztókörzet-típusok validációjához a mintahálózatok topográfiái kerültek felhasználásra.

Jelen munkában kialakított mintahálózatok alkalmasak a hazai növekvő napelemes penetráció okozta feszültség és teljesítményváltozási jelenséges vizsgálatára, valamint a növekvő energiatároló penetráció és e-mobilitás töltőrendszer okozta hálózati hatások vizsgálatára is.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Jelen munka a VEKOP-2.3.2-16-2016-00011 projekt keretében, az Európai Bizottság és a Magyar Kormány által közösen finanszírozott Európai Strukturális és Befektetési Alapok támogatásával készült.

6. IRODALOMJEGYZÉK

[1] **Whiteman A. et al.,** *"Renewable energy statistics",* 2019.

[2] **Hungarian Energy and Public Utility Regulatory Authority**, *"Data of license exemptioned small power plants and household size small power plants between 2008 and 2017,"* 2018.

[3] **Kazsoki A. S., Hartmann B.,** *"Data Analysis and Data Generation Techniques for Comparative Examination of Distribution Network Topologies,"* Int. Rev. Electr. Eng., vol. 14, no. February, pp. 32–42, 2019.

[4] **Kazsoki A. S., Hartmann B.,** *"Typologization of medium voltage distribution networks using data mining techniques,"* 7th Int. Youth Conf. Energy, p. 8, 2019.

[5] **Kazsoki A. S., Hartmann B.,** *"Hierarchical Agglomerative Clustering of Selected Hungarian Medium Voltage Distribution Networks,"* Acta Polytech. Hungarica, vol. 17, no. 4, pp. 201–219, 2020.

[6] **Kazsoki A. S., Hartmann B.,** *"Methodology for the formulation of medium voltage representative networks in three DSO areas,"* Renew. Energy Power Qual. J., vol. 18, no. 1, 2020.

[7] **Pagani G. A.,** *"From the Grid to the Smart Grid, Topologically,"* University of Groningen, 2014.

[8] **Pagani G. A., Aiello M.,** *"Towards Decentralization: A Topological Investigation of the Medium and Low Voltage Grids,"* IEEE Trans. Smart Grid, vol. 2, pp. 538–547, 2011.

[9] **Lenz V.,** *"Generation of Realistic Distribution GridTopologies Based on Spatial Load Maps,"* Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich, 2015.

[10] **Hines P. et al.,** *"The Topological and Electrical Structure of Power Grids,"* in 2010 43rd Hawaii International Conference on System Sciences, 2010, pp. 1–10.

[11] **Wang Y. et al.,** *"Study on structural vulnerabilities of power grids based on the electrical distance,"* in IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, 2012, pp. 1–5.

[12] **Schneider K. P. et al.,** *"Modern Grid InitiativeDistribution Taxonomy Final Report,"* Pacific Northwest National Laboratory, 2008.

[13] **Ilonczai Z.,** *"Cluster analysis and their applications,"* Eötvös Loránd University, Budapest, 2014.

[14] **Dehghani F. et al.,** *"Distribution feeder classification based on self-organized maps (case study: Lorestan province, Iran),"* in 2015 20th Conference on Electrical Power Distribution Networks Conference (EPDC), 2015, pp. 27–31.

[15] **Li Y., Wolfs P.,** *"Preliminary statistical study of low voltage distribution feeders under a representative HV network in Western Australia,"* in AUPEC 2011, 2011, pp. 1–6.

[16] **Méffe A., Oliveira C.,** *"Classification techniques applied to electrical energy distribution systems,"* in CIRED 2005

- 18th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, 2005, pp. 1–5.

[17] **Li Y., Wolfs P.,** *"Statistical identification of prototypical low voltage distribution feeders in Western Australia,"* in 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2012, pp. 1–8.

[18] **Tan P. N., Steinbach M., Kumar V.,** *"Introduction to Data Mining: Pearson New International Edition,"* Pearson Education Limited, 2013.

[19] **Zahra S. et al.,** *"Novel Centroid Selection Approaches for KMeans-Clustering Based Recommender Systems,"* Inf. Sci. (Ny)., 2015.

[20] **Broderick R. J., Munoz-Ramos K., Reno M. J.,** *"Accuracy of clustering as a method to group distribution feeders by PV hosting capacity,"* in 2016 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), 2016, pp. 1–5.

[21] **Watson J. et al.,** *"Low Voltage Network Modelling,"* EEA Conference & Exhibition. Auckland, New Zealand, p. 15, 2014.

[22] **Gonzalez C. et al.,** *"LV distribution network feeders in Belgium and power quality issues due to increasing PV penetration levels,"* in 2012 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe, 2012.

[23] **Dickert J., Domagk M., Schegner P.,** *"Benchmark Low Voltage Distribution Networks Based on Cluster Analysis of Actual Grid Properties,"* 2013.

[24] **Cale J. et al.,** ***"****Clustering distribution feeders in the Arizona Public Service territory,"* in 2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), 2014, pp. 2076–2081.

[25] **Borlea I. D. et al.,** *"Centroid Update Approach to K-Means Clustering,"* Adv. Electr. Comput. Eng., vol. 17, pp. 3–10, 2017.

[26] **Chakraborty S., Das S.,** *"k − means Clustering with a New divergence-based Distance Metric: Convergence and Performance Analysis,"* Pattern Recognit. Lett., vol. 100, 2017.

[27] **Broderick R. J., Williams J. R.**, *"Clustering methodology for classifying distribution feeders,"* in 2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2013, pp. 1706–1710.

Kertész Dávid, Dr. Vokony István

Az elosztóhálózati feladatok koncepcionális adatmodellezése

A villamosenergetikai-rendszer (VER) folyamatos fejlődése azt eredményezte, hogy egy komplex, több réteggel rendelkező hálózat alakult ki, melynek üzemeltetése adatorientáltan történik.
A cikk célja, hogy az energetikai kihívások által leginkább érintett elosztóhálózat mentén keletkező adatköröket feltárja egy koncepcionális adatmodellbe rendezve. Ezen modell segítségével lehetőség nyílik arra, hogy részletesen megismerjük a hálózat üzemeltetésével kapcsolatos adatmennyiséget. Az adatmodell, illetve a létrehozása közben feltárt nehézségek is hozzájárulnak a későbbi adatelemzési projektek könnyebb lebonyolításához.

The development of the grid has resulted a complex, multi-layered network, which is operated in a data-oriented way. The aim of the paper is to explore the data sets generated along the distribution network in a conceptual data model. The data model and the difficulties discovered during its creation also contribute to the easier execution of data analysis projects.

Kulcsszavak: **adatelemzés, adatmodell, koncepcionális adatmodell, adattárház, elosztóhálózat**

1. BEVEZETÉS

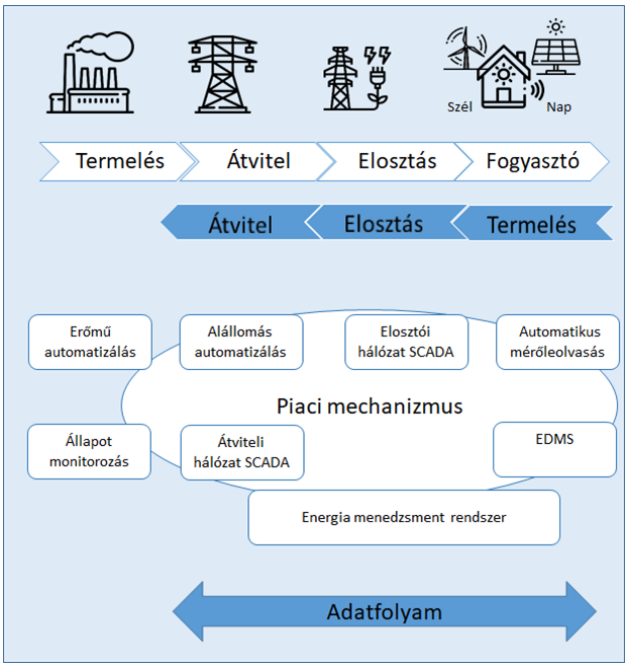
Napjainkban a klasszikus energetikai ellátólánc olyasfajta átalakuláson megy át, melynek pontos kimenetele is nehezen előre jelezhető, köszönhetően a decentralizált energiatermelő egységek megjelenésének, az elektromos hajtású autók terjedésének, a változó környezeti adottságoknak, illetve az átalakuló fogyasztói gondolkodásmódnak és igényeknek. A változások között említhetjük az időjárásfüggő energiatermelést, kisfeszültségi szinten a hálózatba való visszatáplálást, az elektromos autók terjedésének köszönhető növekvő éjszakai fogyasztást, mi több adott esetben egyes ön fogyasztók hálózatról való lecsatlakozása is elképzelhető, amennyiben önellátóvá válnak.

Egy 2016-ban készült felmérés során megkérdeztek energetikai cégeket, hogy mik azok a fő változások, amik meghatározzák a szektor működését a jövőben. Négy kulcsfontosságú trendet azonosítottak: [1]

- Az energiatermelés helye és lehetőségei folyamatosan változnak
- Új energetikai innovációk vállnak megvalósíthatóvá a következő két évtizedben
- A decentralizált energiatermelés hatására fejleszteni kell a smart grideket
- -A fejlett információs és kommunikációs technológiai (IKT) rendszerek és Big Data alapú optimalizációk kitűntetett szerepet játszanak a jövőben

Vagyis a változások nem csak az energia kétirányú áramlását hozzák maguk után, hanem az adatfolyamok is kétirányúvá fognak válni (1. ábra). Ami főként az elosztói engedélyeseket érinti és a fentebb felsorolt kihívások is elsősorban náluk csapódnak le.

Ezen kihívásokat minden energetikai vállalat látja és valamilyen módon szeretnék kivenni vagy a megoldásokból, vagy a lehetőségekből a részüket. De megjelennek új versenyzők is a piacon, olyan technológiai cégek, mint például a TESLA, aki teljeskörű szolgáltatást tud nyújtani otthoni energiaellátásra és közlekedésre egyaránt. Ahhoz, hogy ezen átalakulási folyamatokra ez energetikai szereplők, köztük kiemelten az elosztói engedélyesek fel tudjanak készülni, egyre jobban tisztában kell lenniük a változó környezettel és a saját elosztói területükkel.



22. ábra Az energetikai ellátólánc változása [1]

Az adatbányászat ebben nyújthatja a legnagyobb segítséget az energetikai vállalatoknak, ugyanis azon utility cégek, akik kezelni tudják a termékekről, szolgáltatásokról, fogyasztói magatartásról, preferenciákról, valamint a hálózati és egyéb eszközeikről keletkező hatalmas információtömeget, várhatóan hasznot húznak ebből a lehetőségből.

2. ADATMODELLEK

Ahhoz, hogy az energetikai cégek is kihasználják az adatelemzésben rejlő lehetőségeket, sokrétű erőforrással kell rendelkezniük. Egyrészt szükség van adatelemzőkre, fejlesztőkre, statisztikai szakemberekre, de a legfontosabb, hogy rendelkezzenek megfelelő mennyiségű és minőségű adattal.

Amennyiben a fentebb felsoroltak teljesülnek az első lépés a folyamatban az, hogy megismerjük a rendelkezésünkre álló adathalmazokat. Ezeknek az alapja egy jól megtervezett és dokumentált adatmodell. A későbbiekben ezekre építkezve lehet adatelemzési projekteket indítani.

2.1. Az adatmodellezés szintjei

Három szintje van az adatmodelleknek, melyek a komplexitásuk és funkciójuk szerint kerülnek különböző csoportokba [2]:

- Koncepcionális adatmodell
- Logikai adatmodell
- Fizikai adatmodell

- A *koncepcionális adatmodell* reprezentálja a magas szintű üzleti látásmódot. Nagyon effektíven használható vállalati környezetben kommunikációs célra, ugyanis könnyen megérthetőek és definiálhatóak vele egyes üzleti folyamatok.
- A *logikai adatmodell* egy mélyebb réteg, elsősorban adatelemzési és üzleti intelligencia projektek tervezéséhez használják. Segítségével könnyen megérthetőek az adatok részletei, de az implementálásuk még nem. Ezek alapján tekinthetünk rá úgy is, mint az adatok architektúrai nézetére.
- A *fizikai adatmodell* képezi a harmadik réteget. Ezen modell segítségével könnyen átlátható, hogy az egyes adatok hogyan lettek implementálva, vagyis tartalmazza az adattáblákat, oszlopokat, egyedi kulcsokat, a változók típusait, valamint a táblák közötti kapcsolatokat. Az alkalmazásfejlesztés folyamatában tervezésre, implementálásra és tesztelésre is használják.

2. ábra Adatmodellek szintjei [2]

3. ELOSZTÓHÁLÓZAT KONCEPCIONÁLIS ADATMODELLE

A 2.1-es fejezetben bemutatott adatmodellek értelmezése elsősorban üzleti szempontból definiált a szakirodalomban. Azonban a definíció alapján könnyen alkalmazható nagyobb rendszerek leírására is, ilyen módon az elosztóhálózati feladatok reprezentálására.

3.1. Kiindulási megfontolások

A koncepcionális adatmodell megalkotásához több szempontot is figyelembe vettem. Kiindulásként a villamosenergia-rendszer jelenleg működő fizikai és pénzügyi struktúráját tekintettem át. Ezáltal könnyen áttekinthetőek az egyes energetikai folyamatok.

Ezek után fókuszáltam az elosztókra, melyek a fogyasztók biztonságos ellátása érdekében és az Európai Unió tevékenységszétválasztási előírásai miatt vállalatcsoportokat hoztak létre. Így a teljeskörű ellátáshoz az alábbi 3 fókuszterület azonosítható ezen csoportoknál:

- Elosztói engedélyes (DSO)
- Energiakereskedő
- Ügyfélszolgálat

Mivel a funkcionális adatmodell egyik célja a folyamatok értelmezése, emiatt figyelembe vettem a fentebb említett három cégnek a tevékenységeit is.

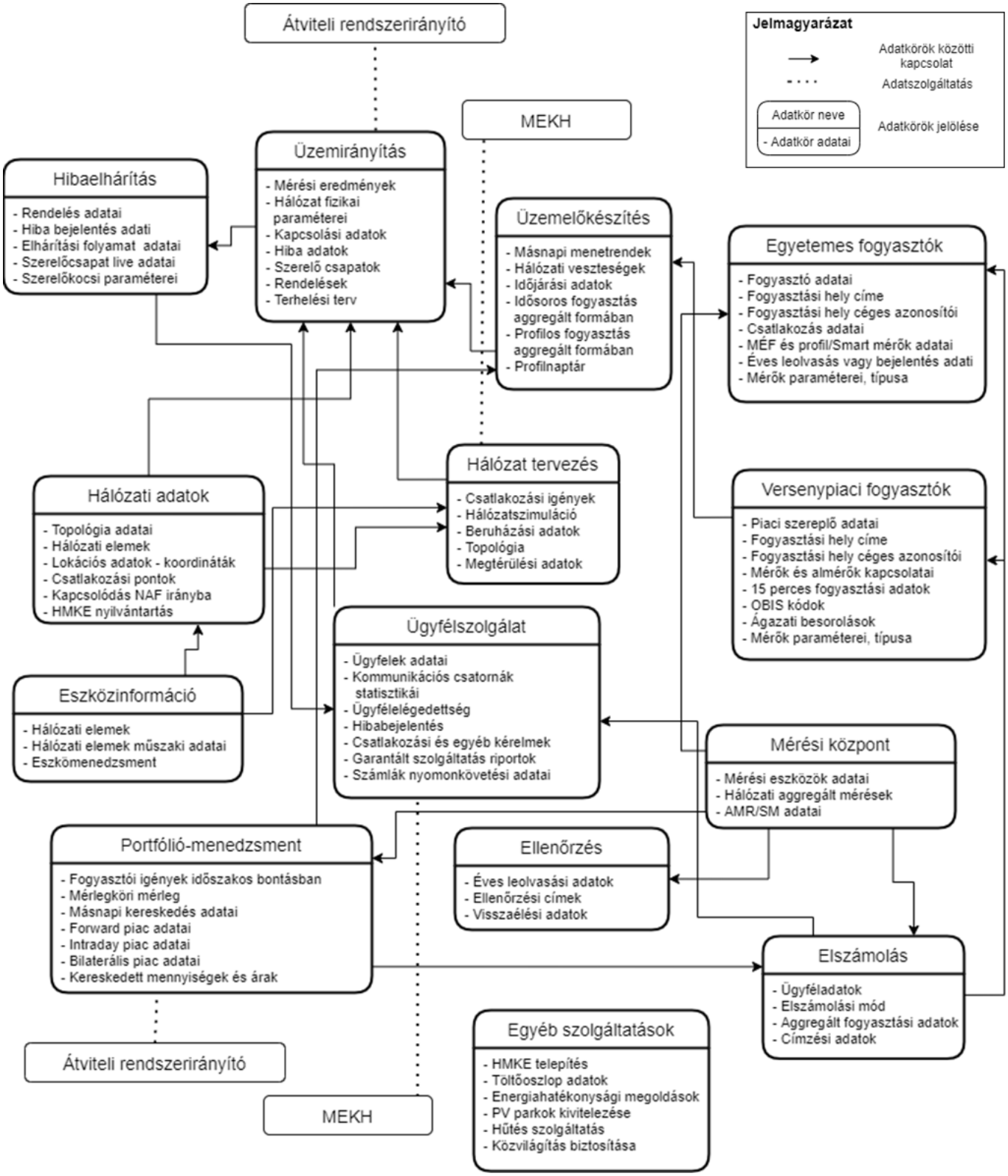
Elosztói engedélyesek fő tevékenysége a villamos energia szolgáltatása. Ehhez az alábbi legfontosabb kötelezettségeket kell teljesítenie az Elosztói szabályzat alapján [3]:

- A hozzá tartozó elosztó hálózat irányítása és az üzemeltetéséhez szükséges műszaki feltételek biztosítása
- A villamos energia elosztó hálózatokon keresztül történő továbbítása, a villamos energia felhasználókhoz történő eljuttatása.
- A szállított villamos energiához köthető meghatározott mennyiségi elszámolások elvégzése
    - A karbantartási, javítási, felújítási munkák, fejlesztések időben történő elvégzése
    - Évente hálózat fejlesztési terv készítése
    - Az üzemeltett hálózatához tartotó információk összegyűjtése és szolgáltatása
    - A háztartási méretű kiserőművekről nyilvántartás vezetése
    - A mérési, leolvasási és számlázási rendszerek üzemeltetése
    - Beszámolási kötelezettség és adatszolgáltatás a Magyar Energetikai- és Közműszabályozási Hivatal részére
    - Az elosztó hálózathoz történő csatlakozáshoz szükséges információk biztosítása a rendszerhasználók részére.

Az energiakereskedő versenypiaci villamosenergia-kereskedelmi tevékenységet folytat, valamint az egyetemes szolgáltatási körében árammal látja el ügyfeleit. Ehhez az alábbi legfontosabb feladatokat látja el:

- Energetikához kapcsolódó termék és szolgáltatás értékesítés
- Közvilágítási rendszer korszerűsítése, üzemeltetése és karbantartása
- Elektromobilitáshoz kapcsolódó termékek, szolgáltatások kialakítása

- Termékértékesítés támogatása
- Egyéb termék és szolgáltatás értékesítés
- Villamos energia egyetemes szolgáltatás
- Számlázás



3. ábra Elosztóhálózati vállalatok koncepcionális adatmodellje

Az *ügyfélszolgálat* fő tevékenységeként működteti az ügyfélszolgálati csatornákat. Ehhez az alábbi legfontosabb feladatokat látja el:

- Állandó ügyfélszolgálati irodák működtetése telefonos ér elektronikus eléréssel
- Számlázás és folyószámla-kezelés
- Kintlévőségek kezelése
- Értékesítési csatornák működtetése

3.2. Elosztóhálózati vállalatok koncepcionális adatmodellje

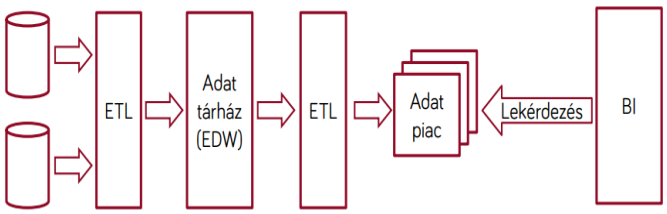
A 3. ábrán látható az a 14 adatkör, melyek az elosztó hálózati vállalatok tevékenysége alapján került meghatározásra általánosítva a rendszerre. Vagyis ezen adatkörök minden vállalatcsoportnál valamilyen formában fellelhetőek, azonban a pontos tárolási módjuk és koncepciók nem feltétlen egyezik meg. Az egyes adatkörök között található nyilak egyértelmű kapcsolatot jelentenek két csoport között, azonban a funkcionális adatmodellnek nem képezi részét az, hogy a kapcsolat módjáról pontos képet adjon.

Ezen koncepcionális adatmodell egy áttekintő nézetet ad az elosztóhálózati folyamatokra. Segítségével kiválaszthatóak azon adatkörök, amelyek egy adatbányászati projekt tervezése során egy adatbányászati Proof of Concept projektek során felhasználásra kerülnének. Majd ezekre alapozva kidolgozható a feladathoz szükséges logikai adatmodell, ami egy részletesebb modellt jelent. Ezen kidolgozás esetén nem csak arról lenne információnk, hogy adott esetben a Mérési központ adatai között a mérőeszközökről fellelhető információ, de részletezésre kerülne a mérő típusa, gyártója, felszerelési dátuma, vagy üzemi határideje is.

4. ADATMODELL KÖVETKEZTETÉSEI

4.1. Adattárház és megfelelő adattárolás

Jól látható a koncepcionális adatmodell alapján, hogy nagyon sokrétű adat keletkezik eltérő gyakorisággal ráadásul. Ezek alapján az elosztóhálózati vállalatoknak mindenképpen érdemes egy központi adattárhelyet, azaz adattárházat (DW) fenntartani. Mellette pedig olyan szakembereket alkalmazni, akik ezen DW-t karban tudják tartani. (4. ábra) Így növelni tudják az adatpontosságot és a struktúrált működést, mely lehetőséget teremt az adatbányászati megoldások alkalmazására.



4. ábra A javasolt adattárház felépítése [4]

Az adattárházba lehetőség van különböző forrásokból származó táblákat feltölteni, pl.: Excel- fájlokat, CSV fájlokat, Access adatbázisokat, vállalatirányítási rendszerek, számlázási rendszerek adatait, valamint a mérési eredményeket is. A feltöltés egy „Kinyerés, átalakítás, betöltés” (ETL) [5] folyamaton keresztül valósul meg. Az első ETL folyamat után a stage rétegbe kerülnek az adatok, ahol az eredeti forrásnak megfelelően megőrzik a feltölteni kívánt fájlokat. Innen egy újabb ETL folyamat keretében jutunk el a központi adattárolóhoz, amely fizikailag elhelyezkedhet a vállalatnál, vagy a vállalat felhőjében. Ezek után érünk el az egyes osztályok által használt adat piacokhoz, ahonnan már lekérdezések segítségével használhatjuk az adatbányászati folyamatokat, vagy riportokat készíthetünk. [6]

4.2. Különböző forrásrendszerek és referencia

Az előző pontban látható, hogy az ETL folyamat elején különböző források csatlakoztathatóak a rendszerbe. Az elosztóhálózat üzemeltetése során gyakran előfordul az, hogy különböző rendszerekből érkező, ugyan azon attribútumot leíró értékek nem egyeznek meg. Tipikusan ilyen lehet, ha egy térinformatikai rendszerből és a hálózat-nyilvántartási rendszerből érkező adatok nem feltétlen ugyan azon lokációra mutatnak, mert a két alkalmazás más koordinátaalapot használ. Leggyakrabban az okozhatja az eltérést, hogy egy attribútum értéke megváltozik, azonban nem minden alrendszerben kerül frissítésre.

Ezen okok miatt célszerű megállapítani referenciaértékeket vagy referenciarendszer, amiről tudjuk, hogy magasabb színvonalon van karbantartva.

4.3. Szétválasztás hatása

Az egy helyen tárolt adatok nagy potenciált jelentenek adatelemzési szempontból, ugyanis a folyamatok olyan adatokkal egészíthetőek ki, amik az alrendszerek szintjén nem álltak rendelkezésre. Azonban ennek vannak korlátai is, ugyanis az Európai Unió által kimondott rendeleteknek az adattárolás tekintetében is eleget kell tenni, vagyis a hatáskörök szétválasztásával a DSO-k és az energiakereskedők nem tárolhatják közös adattárházban az adataikat.

Ilyen esetre jó példa lehet az ügyfelekkel kapcsolatos elemzések készítése. Amennyiben a DSO ilyen jellegű adatelemzési projektet indít, akkor nem használhatja fel az ügyfél személyes adatait hozzá, ugyanis ezen adatok csak az energiakereskedőnél lehetnek meg, ahol a szerződés köttetett.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Az energetikai rendszerek előtt álló kihívások erősen érintik az elosztóhálózati vállalatokat. Ennek kapcsán a megoldásokat is több helyen érdemes keresni, melyhez az egyik eszköz az adatelemzés lesz a közeljövőben.

A cikk rávilágított arra, hogy ezen cégeknél egy adatelemzési projekt elindítása előtt fontos felmérni az adat-

vagyont, amelyre a legjobb megoldás adatmodellek készítése. Ennek kapcsán elkészítettem az elosztó hálózati feladatokra vonatkozó koncepcionális adatmodellt. Az elkészítés folyamata után levonható következtetések alapján ekkora adatmennyiségre érdemes adattárházat telepíteni, azonban ezek használatánál ügyelni kell a referenciaértékek megválasztására és az összeférhetetlenségek elkerülésére.

6. IRODALOMJEGYZÉK

[1] **Juha P. Lahti, Petri Helo, Kongkiti Phusavat:** *Big Data in Evolving Energy Supply Chains*, Fourteenth International Conference on ICT and Knowledge Engineering, 2016

[2] **R. Sherman:** *Business Intelligence guidebook: From Data Integration to Analytics,* Elsevior, Waltham, 2015., 173-195.

[3] **Elosztói szabályzat***, 12. számú módosítás,* Budapest, 2019. február 6.

[4] **Üzleti intelligencia rendszerek,** *Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,* egyetemi előadás

[5] ***Microsoft Azure: ETL****, https://docs.microsoft.com/hu-hu/azure/architecture/data-guide/relational-data/etl Ellenőrizve: 2020. augusztus 15.*

[6] **Fajszi Bulcsú, Cser László, Fehér Tamás:** *Üzleti haszon az adatok mélyén,* Alinea Kiadó, 2010

ISBN 978-963-9299-41-2