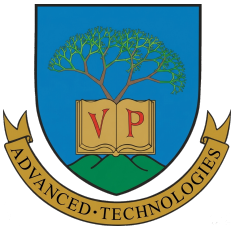
Pannon Egyetem
Műszaki Informatikai Kar
Informatikai Tudományok Doktori Iskolája



Előrejelzés, vezérlés és tervezés: Gépi tanulási és optimalizálási módszerek akkumulátorral kiegészített megújuló energiarendszerekhez

Tézisfüzet

Szerző: Miseta Tamás

Témavezetők:
Dr. Vathy-Fogarassy Ágnes PhD
Dr. Fodor Attila PhD

Veszprém
2026

1. Motiváció és kutatási célok

Az időjárásfüggő megújuló energiaforrásokra (RES) való globális átállás összetett, egymással összefüggő kihívásokat teremtett a villamosenergia-piaci árelőrejelzésben, az akkumulátoros energiatárolóval integrált erőművek prediktív szabályozásában, valamint a fotovoltaikus (PV) rendszerek fizikai tervezésében. A versenyalapú másnapi villamosenergia-piacokon (DAM) a termelők és a fogyasztók a saját kereskedési stratégiájuknak megfelelően tesznek ajánlatokat a következő nap elszámolási periódusaira; az elszámolási árat az aggregált keresleti és kínálati görbék metszéspontja határozza meg [1]. Az időjárásfüggő szél- és napenergia-termelés növekvő aránya ezeket az árakat volatilisabbá tette. Ez lehetőséget teremt az akkumulátorral kiegészített PV-erőművek számára, hogy a hálózatba történő betáplálást az olcsóbb időszakokról a drágábbakra tolják el (energiaarbitrázs), feltéve, hogy az árak pontosan előrejelezhetők [1]. Egy hatékony időbeli energiaeltolási stratégiával növelhető a megújuló projektek jövedelmezősége, ami elősegíti ezen energiaforrások szélesebb körű elterjedését az energiamixben [2]. Emellett ezek a stratégiák hozzájárulhatnak a hálózat stabilitásához, és csökkenthetik a villamosenergia-termelés fajlagos szén-dioxid kibocsájtását.

E célok eléréséhez a módszerek három fő kategóriájára van szükség: (1) árelőrejelzési módszerekre, amelyek megbízható és pontos képet adnak a másnapi villamosenergia-piacok dinamikájáról; (2) szabályozási módszerekre a RES-alapú mikrohálózatokhoz, amelyek az előrejelzett árakra és a rendszermodellre támaszkodva optimalizálják a kereskedési stratégiákat; és (3) rendszerméretezési módszerekre, amelyek e stratégiák eredményei alapján értékelik és optimalizálják a fizikai rendszerkonfigurációkat.

Bár a szakirodalomban fellelhető módszerek már jelentős fejlettségi szintet értek el, a továbbra is fennálló, megoldatlan kihívások indokolttá teszik a disszertációban bemutatott kutatást:

(i) A gépi tanulásban széles körben alkalmazott early stopping módszere [3] a tanítás során kizárólag a validációs veszteséget figyeli, ami nem mindig vezet optimális eredményre. A tanítási és a validációs veszteség dinamikájának együttes elemzése a túltanulás megbízhatóbb észlelését teheti lehetővé.

(ii) A long-short term memory (LSTM) modelleket [4] kiterjedten és nagy sikerrel alkalmazzák az idősoros előrejelzésben [5, 6]. Teljesítményük azonban új regularizációs technikákkal, hiperparaméter-optimalizálással és keresztvalidációval tovább növelhető.

(iii) Az elmúlt időszakban megjelentek az idősor-előrejelző alapmodellek (foundation models) [7, 8, 9]: olyan Transformer-alapú architektúrák, amelyeket hatalmas mennyiségű idősoros adaton tanítottak elő. Bár léteznek kezdeti kuta-

tások ezen a területen [10], ezen alapmodellek kontextushosszra (context length) való érzékenysége a villamosenergia-árak előrejelzésében (EPF) nagyrészt feltáratlan.
(iv) Bár a szakirodalom számos akkumulátoros energiatároló-modellt mutat be [11], kevés alkalmas arra, hogy e rendszerek viselkedését kellően átfogóan, mégis számítási szempontból elég hatékonyan írja le ahhoz, hogy nagyléptékű, a rendszerméretet és a kereskedési stratégiákat egyaránt optimalizáló szimulációkban lehessen alkalmazni. Indokolttá vált tehát egy ezen kritériumoknak megfelelő, egyszerűsített rendszermodell megalkotása.
(v) Az akkumulátoros energiatárolót, fotovoltaikus rendszert és fogyasztót integráló mikrohálózatok irányítását kiterjedten vizsgálja a szakirodalom [11]; gazdasági, fenntarthatósági és mérnöki szempontból azonban ezek az irányítási stratégiák továbbfejleszthetők. Továbbá nyitott kérdés, hogy e stratégiák miként járulhatnak hozzá a hálózat stabilitásának növeléséhez.
(vi) A szakirodalomban jelenleg elérhető fotovoltaikus tervezési módszerek inkább empirikusak, mint szisztematikusak [12], és hiányoznak az automatizált, többsztringes PV-rendszereket tervező algoritmusok. Szükség van egy olyan algoritmusra, amely a fogyasztási adatok és a betáplálási korlátozások figyelembevételével optimalizálja a többsztringes rendszereket, és bizonyítottan unimodális célfüggvények esetén sztringenkénti konvergenciagaranciát nyújt.
(vii) A részben önellátó (prosumer) lakossági fogyasztókat és többsztringes PV-rendszereket tartalmazó mikrohálózatok fizikai tervezésének módszertana még továbbfejleszthető. Ezért indokolt egy olyan átfogó energiarendszer-tervezési módszertan kidolgozása, amely a többsztringes PV-rendszereket és az akkumulátoros tárolókat integráló struktúrákat vizsgálja.

Kutatásom a fenti tudományos hiányosságokra reflektál, és a problémákat három egymással összefüggő pillér mentén, három konkrét kutatási célkitűzés formájában tárgyalja:

1. Célkitűzés. *Gépi tanulási módszerek fejlesztése a másnapi villamosenergia-piaci árak pontos előrejelzésére.*

2. Célkitűzés. *Optimalizálási algoritmusok és rendszermodellek fejlesztése olyan energiakereskedési stratégiákhoz, amelyek az előrejelzett villamosenergia-árak felhasználásával maximalizálják az akkumulátoros energiatárolóval integrált megújuló erőművek profitját.*

3. Célkitűzés. *Optimalizálási algoritmusok és rendszermodellezési módszertanok fejlesztése PV-energiarendszerek fizikai tervezéséhez valós üzemeltetési, szabályozási és fenntarthatósági korlátok mellett.*

2. Tudományos eredmények összefoglalása

2.1. Gépi tanulási módszerek a másnapi villamosenergia-árak előrejelzésére

Az LSTM hálózatokat [4] széles körben és sikeresen alkalmazzák a villamosenergia-árak [5, 13], valamint a hálózati terhelés előrejelzésére [6]. Az ilyen modellek tanításának egyik fő kihívása az overfitting: a tanítási folyamatot jellemzően early stoppinggal fejezik be, ha a validációs veszteség egy adott számú epoch során nem mutat javulást [3]. Ez a megközelítés azonban csak egyetlen veszteséggörbét vesz figyelembe, így nem képes megkülönböztetni a valódi konvergenciatetőzést az átmeneti ingadozástól, ennek eredményeként túl korai leállításhoz vagy épp szükségtelenül meghosszabbított tanításhoz vezethet. E korlát kezelésére egy új leállítási kritériumot dolgoztam ki, amely a neurális hálózati modellek tanítása során együttesen elemzi a tanítási és a validációs veszteség dinamikáját. Az előtanított, Transformer-alapú idősor-előrejelző alapmodellek, (köztük a Chronos [7, 14], a TimesFM [8] és a Moirai [9]) egy olyan új modellosztályként jelentek meg, amelyek a self-attention mechanizmusra [15] és az előtanításra támaszkodnak. A kezdeti benchmarking vizsgálatok [10] rávilágítottak, hogy ezen alapmodellek teljesítménye bár összemérhető a hagyományos EPF-módszerekével, nem múlják felül konzisztensen a jól finomhangolt, feladatspecifikus modelleket. Emellett a kontextushosszra (context length) való érzékenységük az EPF terén nagyrészt feltáratlan maradt. Ezek a hiányosságok indokolttá teszik az alapmodellek, valamint a különböző kontextushosszak melletti viselkedésük vizsgálatát az EPF-feladatok során.

I.1. Tézis: Correlation-Driven Stopping Criterion (CDSC) neurális hálózatok tanításához

Kidolgoztam a Correlation-Driven Stopping Criterion (CDSC) elnevezésű leállítási kritériumot, amely a tanítási és a validációs veszteséggörbék közötti mozgó Pearson-korreláció (moving Pearson correlation) elemzésével detektálja a túltanulás (overfitting) kezdetét, és ekkor leállítja a neurális hálózat tanítási folyamatát. Négy benchmark feladaton és három különböző hálózati architektúrán elvégzett kísérletek során a CDSC teljesítménye elérte vagy felülmúlta mind az early stopping, mind a maximális epochszám (maximum epoch) kritériumokét. A módszer egyértelmű előrelépést jelentett még azokon a problémákon is, ahol a hagyományos leállítási kritériumok alig vagy egyáltalán nem hoztak javulást. Az eredmények helytállóságát egy összehasonlító regret bound elemzés, valamint egy átfogó paraméterérzékenység-vizsgálat is alátámasztja.

Publikáció: [P1]

I.2. Tézis: LSTM-alapú másnapi villamosenergia-árelőrejelzés CDSC-vel vezérelt tanítással

Egyváltozós (univariate), hiperparaméter-optimalizált Long Short-Term Memory (LSTM) modelleket dolgoztam ki a másnapi villamosenergia-árak előrejelzésére. A vizsgálatokat először a hazai (HUPX) piacra végeztem el, majd egy több piacot átfogó (cross-market) elemzés keretében kiterjesztettem a német, a szingapúri és az egyesült királyságbeli (UK) másnapi piacokra is, ahol a CDSC paramétereit a hálózatéval együttesen finomhangoltam. Az optimalizáció kiterjedt a bemeneti ablakméretre (lookback window), a hálózati architektúrára és a regularizációs beállításokra. A több piacot átfogó kísérletek során a CDSC-vel tanított modellek a 12 vizsgált konfigurációból (három piac, két előrejelzési horizont és két validációs séma) 10 esetben elérték vagy felülmúlták a hagyományos early stoppinggal tanított modellek teljesítményét. A legjelentősebb javulást (a teszthalmazon mért átlagos abszolút hiba (MAE) 16,7%-os csökkenését) a hosszabb horizontú előrejelzések esetén, a kifejezetten volatilis szingapúri (NEMS) piacon érték el.

Publikációk: [P2], [P5]

I.3. Tézis: Transformer-alapú alapmodellek a közvetlen többlépéses villamosenergia-árelőrejelzésben

Elvégeztem hat előtanított Transformer-alapmodell (foundation model) szisztematikus, kontextushossz-optimalizált finomhangolás nélküli (zero shot) teljesítményvizsgálatát a közvetlen többlépéses másnapi villamosenergia-árelőrejelzés feladatára. A modellek teljesítményét hiperparaméter-optimalizált egyváltozós LSTM hálózatokkal és hagyományos referenciamodellekkel vetettem össze. Annak ellenére, hogy nem estek át feladatspecifikus tanításon mind a hat vizsgált piac–horizont konfigurációban a legjobban teljesítő alapmodell a teszthalmazon kisebb MAE-t ért el az optimalizált LSTM-nél és az előrejelzési hibát 18,4–40,8%-kal csökkentette. A vizsgált hat esetből 5 esetben a Chronos 2 modell érte el a legjobb eredményt. A vizsgált modellek teljesítményrangsora a szignifikancia- és robusztusságvizsgálatok, valamint egy független, kiértékelésre fenntartott tesztéven elvégzett elemzés során is stabil maradt. Hozzá kell tenni azonban, hogy az alapmodellek teljesítménye egy olyan nagyléptékű előtanítási folyamat eredménye, amely az egyváltozós LSTM számára nem állt rendelkezésre.

Publikáció: [P5]

2.2. Energiakereskedési stratégiák optimalizálása akkumulátoros energiatárolóval integrált megújuló erőművekhez

A legtöbb akkumulátoros energiatárolóval integrált megújuló erőmű gazdasági életképessége nagymértékben függ a másnapi piacon alkalmazott kereskedési stratégiától [2]. A Differential Evolution (DE) [16] algoritmust, mint rugalmas, gradiensmentes optimalizációs módszert, már sikerrel alkalmazták villamosenergia-rendszerekben a gazdaságos teherelosztás feladatokra [17], valamint megújuló energiarendszerek méretezésére [18]. Mindazonáltal továbbra is csak korlátozott számban érhetők el olyan feladatspecifikus módszerek, amelyek kifejezetten az energiakereskedési probléma belső struktúráját aknázzák ki, valamint olyan paraméterezett rendszermodellek, amelyek folytonos formalizálással képesek hűen megragadni a DC-csatolt rendszerek alapvető fizikai korlátait.

Ezek a hiányosságok indokolttá teszik mind a problémastruktúrát kiaknázó, gradiens-alapú optimalizációs módszerek, mind pedig a robusztus gradiensmentes alternatívák kidolgozását annak érdekében, hogy az előrejelzett villamosenergia-árak alapján hatékonyan optimalizálhassuk a másnapi energiakereskedési stratégiákat.

II.1. Tézis: Adaptív gradiens-alapú energiakereskedési optimalizálás

Kidolgoztam az OptEnT-GD (Optimised Energy Trading by Gradient Descent) elnevezésű új, adaptív gradiens-alapú módszert az akkumulátoros energiatárolóval integrált fotovoltaikus (PV) erőművek 24 órás másnapi piaci (DAM) kereskedési stratégiáinak optimalizálására. Az optimalizálás az előrejelzett villamosenergia-árak alapján, az akkumulátorkapacitás- és inverterteljesítmény-korlátok figyelembevételével történik. A módszert 42 különböző rendszerkonfiguráción értékeltem ki, amelyek három inverterteljesítményt, hét akkumulátorkapacitást és két tárolási hatásfokot fedtek le. Az azonnali hálózati betáplálást alkalmazó stratégiához viszonyított napi profitnövekedés az akkumulátorkapacitás és az inverterteljesítmény arányával párhuzamosan nőtt. Az 5%-os tárolási veszteséggel rendelkező konfigurációk esetén, tökéletes árismeret mellett ez a növekedés elérte az 52,94%-ot, míg az LSTM-alapú árelőrejelzések használatával a 46,26%-ot. Az előrejelzési hiba a tökéletes információs bázisesethez képest csupán 1,93–6,93 százalékponttal csökkentette az elérhető profitnövekedést.

Publikáció: [P2]

II.2. Tézis: Differenciálevolúció-alapú energiakereskedelmi optimalizálás és rendszerméretezési útmutató

Kidolgoztam az OptEnT-DE (Optimised Energy Trading by Differential Evolution) elnevezésű deriváltmentes módszert a 24 órás másnapi piaci (DAM) kereskedési stratégiák optimalizálására, amely nem él előzetes monotonitási feltételezéssel. Az algoritmus a standard DE operátorokat egy feladatspecifikus formulázással ötvözi, amelyben minden jelölt megoldás egy teljes 24 órás kereskedési ütemtervet kódol, a célfüggvényt pedig a hálózati és rendszerkorlátokat figyelembe vevő profitmaximalizáló célfüggvény határozza meg. Kialakításából adódóan a módszer a nemlineáris, nem differenciálható célfüggvények szélesebb osztályának kezelésére is alkalmas.

A módszer teljesítményét az OptEnT-GD algoritmussal vetettem össze ugyanazon a 42 rendszerkonfiguráción, az előrejelzett árak felhasználásával. Az eredmények alapján a 100 futtatás legjobbja a legnagyobb akkumulátorkapacitás esetén megközelítőleg 3%-kal maradt el az OptEnT-GD által elért maximális profittól, és ez a különbség az akkumulátor méretének növekedésével párhuzamosan nőtt. A konfigurációkon végzett átfogó elemzés továbbá rávilágított, hogy a relatív profitnövekedés az akkumulátorkapacitás és az inverterteljesítmény arányával növekszik. Ez az összefüggés empirikus alapot biztosít egy olyan rendszerméretezési útmutatóhoz, amely támogatja az optimális tárolókapacitás kiválasztását a rendelkezésre álló inverterteljesítmény függvényében.

Publikáció: [P2]

2.3. Fizikai energiarendszerek optimalizálása és modellezése ipari és háztartási méretű prosumerek számára

Az ipari és háztartási méretű prosumerek (termelő-fogyasztók) számos olyan peremfeltétellel szembesülnek, amelyek a hagyományos fotovoltaikus (PV) tervezési módszereket szuboptimálissá teszik [12]. A klasszikus dichotóm keresés [19] bár garantálja a konvergenciát unimodális célfüggvények esetén, eddig nem adaptálták a fogyasztási profilokat figyelembe vevő, többsztringes PV-rendszerek betáplálási korlátok melletti optimalizálására. A részben önellátó épületek esetében (amelyek az év nagy részében a közcélú hálózattól függetlenül működnek, de korlátozott hálózati csatlakozást továbbra is fenntartanak) szükségessé vált egy olyan integrált módszertan kidolgozása, amely egyaránt magában foglalja a terhelésbecslést, a termikus modellezést, valamint a PV-rendszer és az energiatároló együttes (joint) optimalizálását.

Az ipari gyakorlatban jelenleg alkalmazott módszerek többsége inkább empirikus, mintsem szisztematikus. Két megközelítés terjedt el széles körben: a *Sum Yearly Consumption Matching* (SYCM) módszer úgy méretezi a PV-rendszert, hogy annak becsült éves termelése megegyezzen a helyszín éves energiafogyasztásával. A második módszer a hálózati betáplálási korlátok miatt fel nem használt (leszabályozott) energiát szorítja egy előre meghatározott küszöbérték alá (E_{lost} *limit method*). Ezek az eljárások azonban nem automatizáltak, és sem gazdasági, sem mérnöki, sem fenntarthatósági szempontból nem eredményeznek optimális rendszerkonfigurációt. Ezen téziscsoport eredményei lefektetik a fenti hármas szempontrendszer alapján kifejlesztett optimális energiarendszerek szisztematikus és automatizált tervezésének alapjait.

III.1. Tézis: Fogyasztási profilokat figyelembe vevő *dichotomous search-based string optimisation* (DSSO) többsztringes PV rendszerekhez

Kidolgoztam a *dichotomous search-based string optimisation* (DSSO) algoritmust, amely egy fogyasztási profilokat figyelembe vevő módszer olyan ipari prosumerek többsztringes PV-rendszereinek tervezésére, akik számára a hálózatba történő visszatáplálás nem engedélyezett. Az algoritmus logaritmikus lépésszám alatt, egyetlen napelem-panelnyi pontossággal határozza meg bármely, az adott sztring kimeneti teljesítményére nézve unimodális célfüggvény optimumát. A többsztringes rendszerek optimalizálását iteratív, koordinátánkénti ereszkedéssel végzi, amelyek a sztringeket a célfüggvény-érzékenységük sorrendjében értékelik ki. Az eljárás olyan fixponthoz konvergál, amely egyetlen sztring perturbációjára nézve optimális. Rögzített díjszabású környezetben az optimalizált rendszerek az E_{lost} *limit* módszerhez képest 14,8–17,5%-kal alacsonyabb hálózati fogyasztást, 2,7–3,2-szeres önellátási arányt és 12,9–15%-kal alacsonyabb CO_2-kibocsátást értek el, a *Sum Yearly Consumption Matching* (SYCM) módszer által javasolt rendszerméret mindössze 37–45%-a mellett. Másnapi piaci (DAM) árképzés feltételezése esetén a módszer szintén sikerrel alkalmazható maradt, és összességében kisebb optimális rendszerméreteket eredményezett.

Publikáció: [P4]

III.2. Tézis: Tervezési módszertan részben önellátó villamosenergia-rendszerekhez

Kidolgoztam egy tervezési módszertant részben önellátó energiarendszereihez, amely egyetlen keretrendszerben ötvözi a helyszínspecifikus, mért fogyasztási adatokat nem igénylő *Stochastic Consumption Estimation Algorithm* (SCEA) terhelésgenerátort, egy csatolt termikus-elektromos rendszermodellt, valamint a PV- és az akkumulátoros energiatároló (BESS) konfigurációk diszkrét enumerációját a visszwatt védelem és a vonatkozó súlykorlátozások figyelembevételével. Egy valós úszóházterven alapuló, egy évet átfogó és 12 PV–BESS konfigurációt vizsgáló esettanulmány során kimutattam, hogy a legnagyobb kiterjedésű PV-mező (26,65 kWp, három különböző tájolással) egy 20 kWh-s akkumulátorral párosítva 91,43%-os önellátási arányt és a hálózati fogyasztás 86,2%-os csökkenését érte el, ugyanakkor évente 22,14 MWh megtermelt energia maradt kihasználatlanul. Ezzel szemben egy kizárólag tetőre telepített PV-mező ugyanezzel az akkumulátorral 89,59%-os önellátási arányt és a hálózati fogyasztás 83,7%-os csökkenését biztosította, miközben a kihasználatlan energiát 16,53 MWh-ra szorította le. Az eredmények alapján a kisebb rendszer bizonyult a műszakilag és gazdaságilag racionálisabb, hatékonyabb tervezési alternatívának.

Publikáció: [P3]

3. Az eredmények alkalmazása és jövőbeli irányok

A disszertációban kidolgozott módszerek három egymással összefüggő területen is jól alkalmazhatók a gyakorlatban, és mindegyikük konkrét irányvonalakat jelöl ki a jövőbeli kutatások számára.

A CDSC algoritmusa túlmutat az energiaszektor határain, bármely olyan felügyelt neurálisháló-tanítási folyamatban alkalmazható, amelyben a validációs veszteség érdemi korrelációt mutat a tanítási veszteséggel. Architektúrafüggetlen kialakításának köszönhetően az early stopping közvetlen alternatívája lehet. Bár a módszer három paramétere (ablakméret, küszöbérték és türelem) az early stoppinghoz képest nagyobb hiperparaméter-keresési teret határoz meg, a megfelelő beállításokat egy gradiensnövelt regressziós fákra épülő Bayes-féle optimalizáció 35–60 kiértékelésen belül képes volt azonosítani. Mivel az optimális paraméterértékek feladatfüggők, ezeket minden esetben az adott problémára kell finomhangolni. A jövőbeli fejlesztési célkitűzések között szerepel a módszer *callback* függvényként történő natív integrálása a PyTorch és TensorFlow keretrendszerekbe, valamint alkalmazásának kiterjesztése további előrejelzési feladatokra, mint például a PV-termelés és a hálózati terhelés előrejelzésére.

Az LSTM-alapú előrejelzési folyamat és az alapmodellek teljesítményvizsgálata a gyakorlatban is közvetlenül alkalmazható előrejelzési megoldásokat nyújt a 30 és 60 perces felbontású másnapi villamosenergia-piacokon, feltéve, hogy több évnyi historikus áradatsor áll rendelkezésre. Az a megállapítás, hogy a *zero-shot* (finomhangolás nélküli) alapmodellek jelentősen felülmúlhatják a feladatspecifikusan tanított LSTM-hálózatokat, kiemelt jelentőségű a piaci szereplők és üzemeltetők számára, akiknek a feladatspecifikus tanítás számítási többletterhe nélkül is pontos előrejelzésekre van szükségük (feltéve, hogy a rendelkezésre álló idősor hossza eléri a leghosszabb vizsgált kontextushosszt).

A módszerek igazolt, piacokon átívelő alkalmazhatósága (amely kiterjedt a magyar (HUPX), a német (EPEX SPOT), a szingapúri (NEMS) és az egyesült királyságbeli (N2EX) másnapi piacokra) arra utal, hogy az eredmények jól általánosíthatók a szerkezetileg eltérő piacokon is. Fontos azonban megjegyezni, hogy az optimális CDSC-küszöbérték piacspecifikusnak bizonyult (0,0 és 0,7 közötti értékekkel), az alapmodellek kiértékelése pedig kizárólag *zero-shot* módon, DAM-adatokon történő finomhangolás nélkül történt.

A jövőbeli kutatások célja a vizsgálatok kiterjesztése további piacokra és köztes előrejelzési horizontokra. Emellett tervezem a legjobban teljesítő alapmodellek DAM-adatbázisokon történő finomhangolását, valamint kvantilis- vagy eloszlásalapú kimenetekkel való kiegészítését. Ezek segítségével az előrejelzés bizonytalansága beépíthetővé válik a kockázattudatos ajánlattételi stratégiákba.

Az OptEnT-GD és OptEnT-DE algoritmusok a paraméterezett, DC-csatolt rendszermodellel ötvözve átfogó keretrendszert biztosítanak az akkumulátoros energiatárolóval integrált megújuló erőművek kereskedési stratégiáinak kidolgozásához az órás felbontású, 24 órás időhorizontú és standard kapuzárási idejű másnapi piacokon. Ezek a módszerek sikerrel alkalmazhatók háztartási méretű rendszereknél, virtuális erőműveknél (VPP) és energiaközösségeknél egyaránt.

Az OptEnT-GD algoritmus abban az esetben alkalmazható, ha a kereskedési célfüggvény folytonos, differenciálható, és a lépésközre nézve kezdetben monoton. Bár ez a feltétel a vizsgált profitmaximalizáló célfüggvény esetében teljesült, a monotonitás könnyen sérülhet, amint az akkumulátor-degradáció, a tranzakciós költségek, a részletes invertervesztességek vagy a nemkonvex tarifák is beépítésre kerülnek a modellbe. Ilyen esetekben a deriváltmentes OptEnT-DE algoritmus nyújt robusztus alternatívát. Ennek a rugalmasságnak az ára azonban a módszer megnövekedett varianciája: 100 futtatás legjobb és legrosszabb eredménye között 25–30%-os szórás is megfigyelhető, ami azt jelenti, hogy egy egyszeri futtatás nem mindig garantálja a maximális profit elérését.

A vizsgálatok során levezetett rendszerméretezési útmutató empirikus alapot biztosít az ipari szakemberek számára, hogy a beszerzési és tervezési fázisban a rendelkezésre álló inverterteljesítmény függvényében választhassák ki az optimális tárolókapacitást.

Mivel mindkét kidolgozott módszer egy egyszerűsített DC-csatolt modellre épül, a jövőbeli kutatások kiemelt iránya a modell valós, fizikai rendszeren történő validációja. Ezt követheti a célfüggvény kiterjesztése komplexebb tarifastruktúrákra, valamint a profitmaximalizáláson túli gazdasági, mérnöki és fenntarthatósági mutatók bevonása, párhuzamosan az OptEnT-DE algoritmus sztochasztikus szórásának csökkentését célzó algoritmikus fejlesztésekkel.

A DSSO algoritmus és a fogyasztási profilokat figyelembe vevő értékelési keretrendszer hatékony optimalizálási eszközt nyújt a hálózati betáplálási korlátok mellett működő ipari prosumerek (termelő-fogyasztók) számára, feltéve, hogy megbízható, óránál finomabb időbeli felbontású terhelési adatok állnak rendelkezésre. Az algoritmus logaritmikus idő alatt konvergál olyan célfüggvény és tarifastruktúra esetén, amely a sztring kimeneti teljesítményére nézve megőrzi az unimodalitást. Bármely új optimalizációs mutató bevezetése előtt szintén csupán ennek az egydimenziós unimodalitásnak az ellenőrzése szükséges.

Jelen kutatásban az eredmények összevetése a standard mérnöki méretezési szabályokra (az SYCM és az E_{lost} *limit method* eljárásokra) korlátozódott. A jövőbeli kutatások kiemelt célja a modell teljesítményének összehasonlítása az iparági optimalizálásalapú méretezési eszközökkel (például a HOMER szoftverrel vagy a PVSyst munkafolyamatokkal), illetve a vegyes egészértékű lineáris programozási (MILP) formulázásokkal. Emellett tervezett a nem unimodális célfüggvények

metaheurisztikus eljárásokkal történő kezelése, a vizsgált gazdasági, mérnöki és fenntarthatósági mutatók körének bővítése, valamint a validáció kiterjesztése az ipari terhelési profilok egy jóval szélesebb halmazára.

A részben önellátó struktúrákra kidolgozott átfogó módszertan, amely magában foglalja az SCEA algoritmust, a termikus-elektromos modellt, valamint a PV-rendszer és a tároló együttes optimalizálását, lehetővé teszi a mérnökök számára a különböző konfigurációk megvalósítás előtti kiértékelését, elkerülve ezáltal a költséges túl- vagy alulméretezést. Ez a megközelítés ott alkalmazható sikerrel, ahol a cél egy épület hálózatfüggőségének minimalizálása szigorú tömeg-, tájolási és hőtehetetlenségi korlátok figyelembevételével, a hiányzó historikus fogyasztási adatokat pedig berendezésszintű használati adatokkal kell becsülni. Bár a kidolgozott termikus csatolás jelenleg a vízzel körülvett struktúrákra van kalibrálva, a módszer jól általánosítható a hasonló hőcsereprofillal rendelkező, könnyűszerkezetes előregyártott lakóépületekre is.

Tekintve, hogy a jelenlegi validáció szimulációalapú és egyetlen esettanulmányra korlátozódik, a jövőbeli munka fő fókusza a modell megépült úszóházon történő fizikai validációja. Ezt egészíti ki a termikus és elektromos alrendszerek optimalizációs cikluson belüli teljes körű csatolása, valamint az SCEA által generált profiloknak a hasonló szerkezetű épületek valós, mért fogyasztási adataihoz történő illesztése.

A három téziscsoportban kidolgozott módszerek szorosan igazodnak az egyes részproblémák belső struktúrájához, ami egyben egy szélesebb körben is alkalmazható módszerválasztási iránymutatást kínál. A CDSC azokban az esetekben képes hatékonyan regularizálni a tanítási folyamatot, ahol a tanítási és a validációs veszteséggörbék érdemi korrelációt mutatnak. Az OptEnT-GD algoritmus a profitmaximalizáló célfüggvény kezdeti monotonitását aknázza ki, míg a DSSO eljárás a célfüggvény sztring kimeneti teljesítményére nézve fennálló unimodalitására támaszkodik. Olyan esetekben, ahol ez a jól definiálható problémastruktúra hiányzik, a feladatot a robusztus, populációalapú algoritmusok (mint az OptEnT-DE), illetve az előtanított, általános célú alapmodellek (*foundation models*) veszik át.

A kutatás hosszú távú potenciálja egy olyan egységes döntéstámogató munkafolyamat létrehozásában rejlik, amely az árelőrejelzést (I. Tézis), az energiakereskedési optimalizálást (II. Tézis) és a fizikai rendszertervezést (III. Tézis) egyetlen átfogó eszközbe integrálja a prosumerek és az energiaközösségek számára. A jövőbeli kutatások legfőbb iránya ennek a koncepciónak a megvalósítása: a három pillér egyetlen közös másnapi piacon és egy konkrét fizikai helyszínen történő, csatolt validációja. Egy ilyen integrált megközelítés biztosíthatja, hogy az előrejelzés, a kereskedés és a tervezés lépései szinergikusan erősítsék egymást.

3.1. A tézisekhez kapcsolódó publikációk

P1 Miseta Tamás, Fodor Attila és Vathy-Fogarassy Ágnes. Surpassing early stopping: A novel correlation-based stopping criterion for neural networks. *Neurocomputing*, 567:127028, 2024. **[Q1, IF: 6.7]**

P2 Miseta Tamás, Fodor Attila és Vathy-Fogarassy Ágnes. Energy trading strategy for storage-based renewable power plants. *Energy*, 250:123788, 2022. **[D1, IF: 10.1]**

P3 Miseta Tamás, Vathy-Fogarassy Ágnes, Závodi-Fodor Zsófia és Fodor Attila. Design, modeling, and simulation of the energy system of semi-autonomous floating homes. In *29th International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES 2025), Palermo, Italy*, pages 143–148. IEEE, 2025.

P4 Miseta Tamás, Vathy-Fogarassy Ágnes, Závodi-Fodor Zsófia és Fodor Attila. Consumption-aware optimization of multi-string photovoltaic systems based on economic metrics. In *5th International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET 2025), Paris, France*, pages 1–6. IEEE, 2025.

P5 Miseta Tamás, Fodor Attila és Vathy-Fogarassy Ágnes. Electricity price prediction with univariate Long Short-Term Memory and zero-shot foundation transformer models. *Energy and AI*, 100886, 2026. **[D1, IF: 9.7]**

Hivatkozások

[1] Rafał Weron. Electricity price forecasting: A review of the state-of-the-art with a look into the future. *International Journal of Forecasting*, 30(4):1030–1081, 2014.

[2] Muhammad Khalid, Ricardo P Aguilera, Andrey V Savkin, and Vassilios G Agelidis. On maximizing profit of wind-battery supported power station based on wind power and energy price forecasting. *Applied Energy*, 211:764–773, 2018.

[3] Lutz Prechelt. Early stopping – but when? In Grégoire Montavon, Geneviève B. Orr, and Klaus-Robert Müller, editors, *Neural Networks: Tricks of the Trade*, volume 7700 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 53–67. Springer, 2 edition, 2012.

[4] Sepp Hochreiter and Jürgen Schmidhuber. Long short-term memory. *Neural Computation*, 9(8):1735–1780, 1997.

[5] Umut Uğurlu, Ilkay Oksuz, and Oktay Tas. Electricity price forecasting using recurrent neural networks. *Energies*, 11(5):1255, 2018.

[6] Salah Bouktif, Ali Fiaz, Ali Ouni, and Mohamed Adel Serhani. Optimal deep learning LSTM model for electric load forecasting using feature selection and genetic algorithm: comparison with machine learning approaches. *Energies*, 11(7):1636, 2018.

[7] Abdul Fatir Ansari, Lorenzo Stella, Caner Turkmen, Xiyuan Zhang, Pedro Mercado, Huibin Shen, Oleksandr Shchur, Syama Sundar Rangapuram, Sebastian Pineda Arango, Shubham Kapoor, et al. Chronos: Learning the language of time series. *arXiv preprint arXiv:2403.07815*, 2024.

[8] Abhimanyu Das, Weihao Kong, Rajat Sen, and Yichen Zhou. A decoder-only foundation model for time-series forecasting. *arXiv preprint arXiv:2310.10688*, 2024. TimesFM 2.0.

[9] Gerald Woo, Chenghao Liu, Akshat Kumar, Caiming Xiong, Silvio Savarese, and Doyen Sahoo. Unified training of universal time series forecasting transformers. *arXiv preprint arXiv:2402.02592*, 2024.

[10] Timothée Hornek, Amir Sartipi, Igor Tchappi, and Gilbert Fridgen. Benchmarking pre-trained time series models for electricity price forecasting. In *Proceedings of the 2025 21st International Conference on the European Energy Market (EEM)*. IEEE, 2025.

[11] Shaopeng Guo, Qibin Liu, Jie Sun, and Hongguang Jin. A review on the utilization of hybrid renewable energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91:1121–1147, 2018.

[12] Gang Liu, M. G. Rasul, and D. Harris. Techno-economic assessment of a residential grid-connected solar photovoltaic system. *Renewable Energy*, 53:85–94, 2013.

[13] Ping-Huan Kuo and Chiou-Jye Huang. An electricity price forecasting model by hybrid structured deep neural networks. *Sustainability*, 10(4):1280, 2018.

[14] Abdul Fatir Ansari, Caner Turkmen, Lorenzo Stella, Oleksandr Shchur, Syama Sundar Rangapuram, Sebastian Pineda Arango, et al. Chronos-Bolt: Efficient and accurate pretrained models for probabilistic time series forecasting. *arXiv preprint arXiv:2410.20081*, 2024.

[15] Ashish Vaswani, Noam Shazeer, Niki Parmar, Jakob Uszkoreit, Llion Jones, Aidan N Gomez, Łukasz Kaiser, and Illia Polosukhin. Attention is all you need. In *Advances in Neural Information Processing Systems*, volume 30, pages 5998–6008, 2017.

[16] Rainer Storn and Kenneth Price. Differential evolution–a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of Global Optimization*, 11(4):341–359, 1997.

[17] Nasimul Noman and Hitoshi Iba. Differential evolution for economic load dispatch problems. *Electric Power Systems Research*, 78(8):1322–1331, 2008.

[18] Makbul A. M. Ramli, H. R. E. H. Bouchekara, and Ali S. Alghamdi. Optimal sizing of PV/wind/diesel hybrid microgrid system using multi-objective self-adaptive differential evolution algorithm. *Renewable Energy*, 121:400–411, 2018.

[19] Jack Kiefer. Sequential minimax search for a maximum. *Proceedings of the American Mathematical Society*, 4(3):502–506, 1953.