



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Gépészmérnöki Kar
Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék

Napelemparkok optimális tervezése és termelés előrejelzése

Tézisfüzet

MAYER MARTIN JÁNOS

Témavezető
DR. GRÓF GYULA

Budapest
2020

1 Témafelvetés, célkitűzések

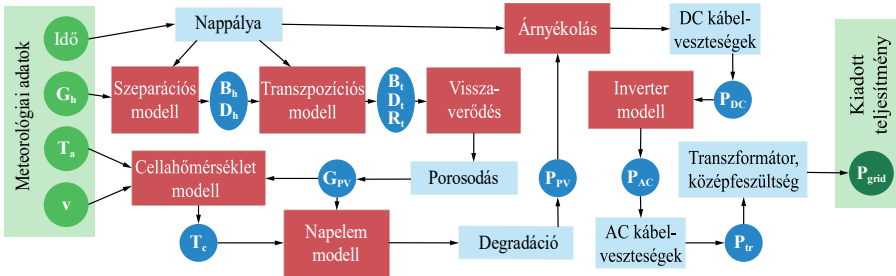
Az elmúlt évtizedek technológiai fejlődésének és a szinte korlátlan rendelkezésre állásának hatására a napenergia mára az egyik legfontosabb megújuló energiaforrássá vált. A napelemek alkalmazása a legdinamikusabban terjedő megújuló alapú villamosenergia-termelési technológia, melynek világszintű beépített teljesítménye átlagosan 39%-os éves növekedési ütemmel bővült az elmúlt évtizedben. A napelemparkokban termelt villamos energia ára 82%-kal csökkent 2010 és 2019 között, így a napelemek már nem csak az újonnan létesített kapacitások közül a legolcsóbbak, de bizonyos helyeken a működő szénrőművek üzemeltetési költségénél is kedvezőbb áron termelnek. Ezek a trendek alapján a következő évtizedben is a napelemek egyre növekvő ütemű terjedésére számíthatunk, így a napelemparkok tervezésével és hálózati integrációjával kapcsolatos kutatások is egyre fontosabbak.

A napelemek időjárásfüggő, korlátozottan szabályozható energiatermelők, tehát a maximális kiadott teljesítményüket a napsugárzás és más időjárási jellemzők határozzák meg, így az nem változtatható szabadon a fogyasztás kielégítése érdekében. A napsugárzás felhőzetből fakadó ingadozó jellege nehézséget jelent a napelemparkok termelés előrejelzése és menetredezése során. A termelés előrejelzések pontatlansága veszélyezteti a villamosenergia-rendszer stabilitását és növeli a tartalék kapacitások költségét [1]. A napelem termelés előrejelzések leggyakrabban numerikus időjárás előrejelző (*numerical weather prediction*, NWP) modellekkel vagy műholdképek alapján készített sugárzás előrejelzéseken alapulnak [2]. A napsugárzás előrejelzés a meteorológia egy részterülete, míg a napsugárzás alapján várható termelés előrejelzése a napelemparkok működéséhez kötődő mérnöki kutatási feladat. A várható teljesítmény a napelemparkok fizikai, statisztikai, vagy hibrid modellezésével becsülhető meg [3]. Disszertációmban a napelemparkok fizikai megközelítést követő termelés előrejelzésével foglalkozom, mivel ezek historikus adatok nélkül is használhatók, ami komoly előny az újonnan létesített naperőművek esetén.

A napelemparkok beruházási költsége és várható energiatermelése számos műszaki tervezési paramétertől függ, így a legkedvezőbb megtérülés ezek optimalizálásával érhető el. A napelemparkok tervezésének támogatására több általánosan elfogadott kereskedelmi szimulációs szoftver is elérhető, de átfogó optimalizálásra ezek egyikében sincs mód. Egy hatékony napelempark optimalizálási módszertan elősegítené a tervezés során szükséges döntéshozatalt, csökkentené a tervezési és telepítési költségeket, valamint növelné a napelemparkok műszaki színvonalát. A jelenlegi tervezési gyakorlat csak a napelemparkok költségeit és várható energiatermelését veszi tekintetbe a leggyorsabb megtérülés biztosítása érdekében. További tényezők figyelembevétele, mint például a környezeti hatások vagy a várható menetredezhetőség, elősegítené azt, hogy a napelemparkok nem csak a befektetők számára, hanem nemzetgazdasági szinten is

leghatékonyabb módon létesüljenek [4]. Disszertációmban bemutatok egy általános keretrendszert a napelemparkok tervezési optimalizálására, és feltárom a számítások megbízhatóságát befolyásoló legfontosabb tényezőket is.

A napelemparkok fizikai termelés előrejelzése és termelési optimalizálása gyakorlati szempontból két különálló témakör, a mögöttes módszertan szempontjából azonban mindkettő a napelemparkok termelésének előrejelzett vagy historikus időjárási adatokon alapuló előrejelzésén nyugszik. A napelemparkok hálózatra táplált teljesítménye a főbb időjárási adatok, a globálsugárzás, környezeti hőmérséklet és szélesebbég függvényében az 1. ábrán bemutatott modellsor segítségével számítható ki. A hét legfontosabb számítási lépés a szeparációs modellezés direkt és szórt sugárzás szétválasztására (1), transzpozíciós modellezés a vízszintes sugárzás ferde felületre történő átszámítására (2), valamint a felületi visszaverődések (3), cellahőmérséklet (4), napelem modul határfok (5), árnyékolási veszteségek (6) és inverter veszteségek (7) meghatározása. Egyik számítási lépésben sincs általánosan elfogadott pontos számítási mód, így több különböző modellt is összegyűjtöttem szakirodalmi források alapján, melyeket disszertációmban egy egységes jelölérendszerrel mutatok be. Dolgozatom így a napelempark modellezési módszerek jelenleg elérhető legátfogóbb összefoglalója, és jó alapot adhat a témával ismerkedők számára a különféle modellezési módok hatékony megismerésére.

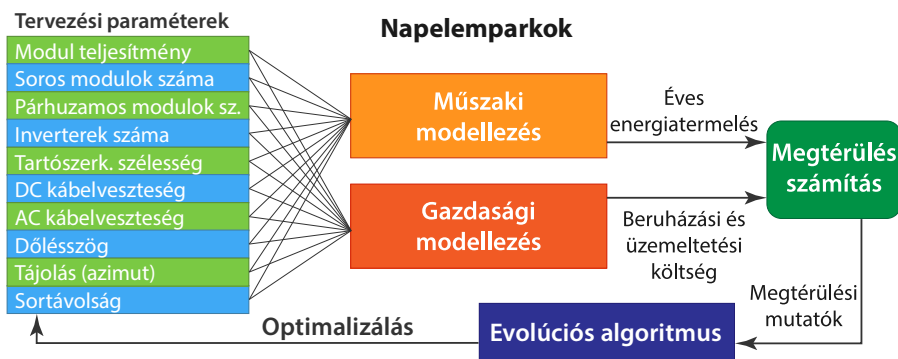


1. ábra: A napelemparkok időjárási adatokon alapuló teljesítmény fizikai modellezésének elvi vázlata (a piros szín a modellsor főbb lépéseit jelzi, melyekben több különböző modellt is bemutatok és összehasonlítok)

A fizikai alapú modellezés egy elterjedten alkalmazott megközelítés a sugárzás előrejelzések teljesítmény előrejelzéssé alakítására, de az ehhez használt modellek megválasztása jellemzően önkényes módon történik a szakirodalomban. Különböző modellek összehasonlításával mindössze három cikkben találkozhatunk, de ezek a kutatások is csak a teljes modellezési sor néhány lépésére terjednek ki [5,6]. Eddig nem készült még a modellek megválasztásának hatását és jelentőségét átfogó módon bemutató kutatás, így az alábbi fontos kérdésekre sem található még megbízható válasz: 1) milyen mértékben befolyásolja a modellek megválasztása a termelés előrejelzés pontosságát, 2) melyek a legfontosabb modellezési lépések, 3) milyen modellsort érdemes választani a gyakorlati alkalmazások során? Kutatásom célja e

kérdések megválaszolása, amellyel nem csak a fizikai modellezési folyamat mélyebb megértéséhez járulok hozzá, de a gyakorlatban is hasznos következtetésekre jutok. A legpontosabb modellsorok kiválasztása közvetlenül hozzájárul a termelés előrejelzés hibájának csökkentéséhez, ezáltal elősegíti a napelemparkok hálózati integrációját, míg a modellsor választásból fakadó bizonytalanság számszerűsítése a termelés előrejelzéssel kapcsolatos kutatások megbízhatóságát is javítja.

A legtöbb napelemes rendszer tervezési optimalizálással foglalkozó publikáció a tervezési folyamatnak csak néhány elemével foglalkozik, úgy mint az inverter méretezése, a modulok kapcsolása, a dőlésszög, sortávolság vagy kábelveszteségek. A legtöbb ilyen cikkben a napelem szimuláció is egyszerűsített modelleken alapul, melyek közül még a legösszetettebb is csak a fent bemutatott modellsor öt fő elemét veszi figyelembe. Disszertáciomban bemutatok egy átfogó módszertant napelemparkok tíz fő tervezési paraméterének részletes fizikai modellezésen alapuló optimalizálására. A napelemparkok gazdasági és környezeti modelljét is elkészítettem annak érdekében, hogy célfüggvényként a megtérülés és a környezeti hatások is felhasználhatóak legyenek. Ezek a modellek a napelemparkba beépített berendezések és felhasznált anyagok mennyiségén és az elfoglalt földterület nagyságán alapulnak, melyeket szakirodalomból és valós projektekből vett feltételezések alapján határozok meg. A beruházási költségeket egyszerű, de testreszabható költségfüggvények segítségével számolom, a különböző megtérülési mutatókat pedig egy dinamikus gazdasági modell segítségével határozom meg. A környezeti hatásokat életciklus elemzéssel (*life cycle assessment, LCA*) modellezem, melynek kidolgozását Szilágyi Artúrral együtt végeztük el [7]. A napelempark optimalizálási keretrendszer általános felépítése és a tíz döntési változó a 2. ábrán látható.



2. ábra: Napelemparkok tervezési optimalizálásának elvi vázlata gazdasági megtérülés célfüggvénnyel

A napelempark optimalizálás célfüggvénye a döntési változók multimodális, számos lokális szélsőértékkel rendelkező függvénye, így fejlett metaheurisztikus

algoritmusok használatára van szükség a globális optimum konzisztens megtalálásához. A populáció alapú metaheurisztikus algoritmusokat a szakirodalomban elterjedten és sikerrel használják az összetett optimalizálási problémák megoldására. Az adott optimalizálási probléma megoldására a leghatékonyabb algoritmus és paraméterek megválasztása elengedhetetlen az optimum hatékony és megbízható felderítéséhez. Az optimális tervezési paraméterek megbízhatóságát a szimulációhoz használt időjárás adatok, a modellek és a költségfüggvények egyaránt befolyásolják, melyek hatását érzékenységvizsgálatok segítségével számszerűsítettem. A napelempark szimulációk a gyakorlatban jellemzően órás bontású, műholdas mérési sugárzási adatokon alapulnak. A kis felbontású adatsorokon alapuló szimulációk alábecsülik az inverterek levágási veszteségeit, de ennek hatását a optimalizálási eredményekre még nem vizsgálták korábban [8]. A sugárzási adatok legmegbízhatóbb forrása a perces felbontású felszíni mérőrendszerek. Kutatásom során elemeztem a különböző adatforrások, időbeli felbontások és modellsorok megválasztásának hatásait, amivel hozzájárulok a napelempark szimulációk és az optimális tervezés megbízhatóságának javításához.

2 Módszertan

A fizikai napelem termelés előrejelzéssel kapcsolatos kutatási eredményeimet 151200 különböző modellsor verifikációjára alapozva határoztam meg. A vizsgált modellsorokat tíz szeparációs, tizennégy transzpozíciós, négy visszaverődési, öt cellahőmérséklet, hat napelem hatásfok, három árnyékolás és három inverter modell összes lehetséges kombinációjaként állítottam össze. A termelés előrejelzést az MVM Zöld Generáció Kft. az ország nagy részét lefedő 14 helyszínen üzemelő összesen 16 napelemparkjára készítettem el. Az időjárás előrejelzési adatokat az Országos Meteorológiai Szolgálat bocsátotta rendelkezésemre az AROME numerikus időjárás előrejelző modelljük alapján. A napelem termelés és az időjárás előrejelzés egyaránt 15 perces időbeli felbontással fedi le a teljes 2019-es évet. Az előrejelzés időhorizontja 48 óra, amit napon belüli (0-24 óra) és másnapi (24-48 óra) részekre bontottam fel. A hibás adatpontok elvetése után minden erőműre és időhorizontra kb. 17000 érvényes nappali adatpont áll rendelkezésre.

A verifikációt a szakirodalom legújabb ajánlásainak figyelembevételével végeztem el annak érdekében, hogy elősegítsem a más tanulmányokkal történő összehasonlíthatóságot és az eredmények hosszú távú értékét [9]. A modellsorok, helyszínek és a két időtáv összes lehetséges kombinációjára 4838400 egyedi verifikációt végeztem. A pontosságot az alábbi hat mutató segítségével értékeltem: átlagos abszolút hiba (mean absolute error, MAE), átlagos torzítás (mean bias error, MBE), gyök átlagos négyzetes hiba (root mean square error, RMSE), kétféle ún. *skill score* (előrejelző készség) [10], és az előrejelzés és tényleges termelés varianciájának aránya. A nagy számú önálló eredmény kiértékelését az egyes komponens modellekre számított átlagok, az egyes helyszínekre vonatkozó szélsőértékek és

eloszlás alapján végeztem, és minden esetre megkerestem a legpontosabb modellsort is. Ezen túl megvizsgáltam a legjobb modellek megválasztásának módszereit, valamint a szélsőbességek előrejelzések hatását is.

A napelemparkok optimalizálási problémájának leghatékonyabb megoldó algoritmusát és paramétereit különböző populáció alapú metaheurisztikus algoritmusok összehasonlítása és metasztintú optimalizálása segítségével választottam ki. Dolgozatomban három egycélú algoritmus, a genetikus algoritmus, a részecskeraj optimalizálás és a differenciál evolúció, valamint az NSGA-II (*non-dominated sorting genetic algorithm*) többcélú algoritmus vizsgálatát mutatom be. Ezek mindegyikét a DEAP (*Distributed Evolutionary Algorithms in Python*) Python csomag segítségével valósítottam meg, ami különböző evolúciós algoritmusok moduláris és rugalmas felépítését teszi lehetővé. A metasztintú optimalizálást a főbb paraméterek előzetesen kiválasztott diszkrét értékeire vonatkoztatott rácsminti kereséssel végeztem el. Az algoritmusok sztochasztikus természete miatt minden paraméter kombináció esetére öt futtatást végeztem, ami alapján pontosabb képet kaptam az eredmények pontosságáról, konzisztenciájáról és számítási idejéről is.

Az optimalizálási eredményekhez kapcsolódó érzékenységvizsgálatokat a legpontosabbnak mutató differenciál evolúció segítségével végeztem el. A vizsgálathoz az 1. táblázatban bemutatott négy, különböző éghajlatú helyszínt választottam ki. A perces felbontású felszíni mérési adatok a BSRN (*Baseline Surface Radiation Network*) mérőállomásairól származnak. Az órás műholdas adatokat a Európára vonatkozóan a SARAH (*Surface Solar Radiation Data Set – Heliosat*), Észak-Amerika esetében az NSRDB (*National Solar Radiation Database*) adatbázisokból töltöttem le a PVGIS (*Photovoltaic Geographical Information System*) rendszeren keresztül. Az adatok felbontásának vizsgálatát a perces adatsorok 5, 10, 15, 30, és 60 percre összegzett változatai alapján vizsgáltam meg. A felbontás csökkentésére két különböző módszert is összehasonlítottam, az adatok hagyományos átlagolását, valamint az intervallumok középső értékeinek mintavételezését.

1. táblázat: A négy kiválasztott BSRN mérőállomás helyszíne és éghajlata

Helyszín	Ország	Éghajlat
Lindenberg	Németország	Nedves kontinentális, meleg nyár
Rock Springs	Pennsylvania, USA	Nedves kontinentális, forró nyár
Carpentras	Franciaország	Mediterrán, forró nyár
Desert Rock	Nevada, USA	Mérsékelt övezeti sivatag

3 Új tudományos eredmények

Az új tudományos eredményeket kilenc tézispontban foglaltam össze, melyek közül az 1-4. tézis a napelempark termelés előrejelzéshez, míg az 5-9. tézis az optimális tervezéshez kapcsolódik. A napelem termelés előrejelzés verifikáció eredményeinek elemzése alapján feltártam a modellválasztásnak az előrejelzés pontosságára¹ gyakorolt hatását és az egyes modellezési lépések (részmodell kiválasztása) fontosságát.

1. tézis

A fizikai modellsor összeállítása – azaz a részmodellek megválasztása – jelentősen befolyásolja a napelempark termelés előrejelzés pontosságát. A legpontosabb modellsorok átlagos abszolút hibája 17%-kal, gyök átlagos négyzetes hibája 13%-kal kisebb, *skill score* mutatója pedig 26-38%-kal nagyobb a legpontatlanabbhoz képest az összes eset átlagát tekintve. Az egyes részmodellek megválasztásának az előrejelzési hibára gyakorolt hatásai eltérőek, csökkenő sorrendben: 1) transzpozíció, 2) szeparáció, 3) cellahőmérséklet, 4) napelem, 5) árnyékolás, 6) visszaverődés, 7) inverter modellezés. [P1-2]

A napelemparkok termelés előrejelzésének pontosságát az előrejelzés időtávja és a napelempark helyszíne egyaránt befolyásolja. Ezen tényezők hatását a napon belüli és másnapi előrejelzések, valamint a Magyarország különböző részein telepített napelemparkok előrejelzés verifikációs eredményei alapján számszerűsítettem. A földrajzi hely előrejelzési hibára gyakorolt hatásának felderítése elősegíti az egyes helyszíneken elérhető legjobb pontosság meghatározását.

2. tézis

A napelemparkok fizikai termelés előrejelzésének pontossága függ az időhorizonttól és az napelemparkok földrajzi helyétől.

a) Magyarországon a fizikai napelem termelés előrejelzéseknek 3,8-9,5%-kal (átlagosan 6,8%) kisebb az átlagos abszolút hibája és 3,9-8,7%-kal (átlagosan 6,3%) kisebb a gyök átlagos négyzetes hibája napon belüli időtávon (0-24 óra) a másnapi időtávhoz (24-48 óra) képest.

b) Az Alföldön üzemelő napelemparkok fizikai termelés előrejelzésének átlagosan 8,0%-kal kisebb az átlagos abszolút hibája és 7,6%-kal kisebb a gyök átlagos négyzetes hibája az ország más részein található napelemparkokhoz képest. A pontosabb előrejelzés oka a síkságnak a dombvidékhez képest kevésbé változékonnyá időjárása. [P1]

¹ A pontosság fogalmának hiba érték nélküli használata a MAE vagy RMSE szerint sorbarendezett fizikai modellsorok egymáshoz való viszonyára utal.

Az átlagos abszolút hiba (MAE) és a gyök átlagos négyzetes hiba (RMSE) két általánosan használatos hibamutató az előrejelzések pontosságának értékelésére. A legpontosabb modellsorok megválasztása során fontos, hogy melyik mutató szerint mérjük a pontosságot, de erre vonatkozóan a kétféle hibaszámítás általános előnyeinek és hátrányain túl nem található információ a szakirodalomban. Az egyes mutatók szerint optimalizált modellsorok közti különbségek elemzése elősegíti a különféle gyakorlati alkalmazásoknak leginkább megfelelő hibamutató és modellek megtalálását.

3. tézis

Az átlagos abszolút hiba (MAE) és a gyök átlagos négyzetes hiba (RMSE) két ellentmondó mutató a fizikai napelem termelés előrejelzésekor, mivel nincs olyan modellsor, ami mindkét hiba tekintetében a legpontosabb. Az RSME-re optimalizált modellsorok egyszerűbb modellekből állnak, és a termelés varianciájának csak 78-85%-át fedik le. Ezzel szemben a MAE-re optimalizált modellsorok összetettebb modellekből épülnek fel, és a termelés varianciájának 92-101%-át is lefedik. Az RMSE-re optimalizált modellsorok kis varianciája miatt a MAE-re optimalizált előrejelzések javasoltak minden olyan esetben, amikor a várható teljesítmény szélsőségesen alacsony és magas értékeinek előrejelzése is fontos. [P1]

A szél sebessége a napelem modulok hőmérsékletét és teljesítményét is befolyásolja, amit figyelembe kell venni napelemes rendszerek pontos modellezése során. Jelentős bizonytalansággal rendelkező időjárás előrejelzések alapján számított napelem termelés előrejelzés esetén azonban kérdéses a szélesség adatok fontossága. A várható szélesség figyelembevételének jelentőségét a szélesség előrejelzésen és egy átlagos szélességen alapuló termelés előrejelzések összehasonításával határoztam meg.

4. tézis

A szélesség előrejelzési adatok csak kis hatással vannak a fizikai napelem termelés előrejelzés pontosságára. Az állandó, hosszútávú átlagnak megfelelő szélességgel készített termelés előrejelzések pontossága hasonló, vagy bizonyos esetekben meg is haladja a szélesség előrejelzésen alapuló termelés előrejelzés pontosságát, de a különbség átlagos abszolút hiba, átlagos torzítás és gyök átlagos négyzetes hiba tekintetében is 0,1%-nál kisebb. [P1]

A napelemparkok részletes műszaki, gazdasági és környezeti modellezése lehetővé teszi a napelemparkok főbb tervezési paramétereinek különféle célfüggvényekre történő optimalizálását. Az összetett optimalizálási probléma globális optimumának megtalálására a leghatékonyabb módszer három gyakran használt metaheurisztikus algoritmus metaszintű optimalizálásával és összehasonlításával választottam ki.

5. tézis

A napelemparkok tíz fő tervezési paraméterének termelt energia egységköltségre történő optimalizálásának leghatékonyabb módját három populáció alapú metaheurisztikus algoritmus, a genetikus algoritmus (GA), differenciál evolúció (DE) és részecskeraj optimalizálás (PSO) finomhangolása és összehasonlítása alapján választottam ki. A metaszintű optimalizálás eredménye alapján egyes algoritmusok leghatékonyabb paraméterezése:

- **GA:** 100 egyedből álló populáció, 80% keresztezési valószínűség, 10% elit részarány, és a futtatás leállítása a célfüggvény 50 generáción keresztül kevesebb, mint 10^{-5} relatív változása esetén.
- **DE:** 50 egyedből álló populáció, 80% keresztezési ráta, 0,5-ös F súlytényező, és a futtatás leállítása a célfüggvény 50 generáción keresztül kevesebb, mint 10^{-6} relatív változása esetén.
- **PSO:** 25 részecskéből álló populáció, 1-es súlyvektor, 0,5-ös kognitív és 2-es szociális tanulási ráta, és a futtatás leállítása a célfüggvény 100 generáción keresztül kevesebb, mint 10^{-5} relatív változása esetén.

A három algoritmus közül a DE képes a legpontosabban és leginkább konzisztens módon megtalálni a globális optimumot, míg a PSO a második, és a GA a harmadik helyezett. A differenciál evolúció a legalkalmasabb módszer a bemutatott napelempark optimalizálási probléma megoldására. [P3-4]

A napelemparkok többcélű optimalizálása egy hatékony módja a különböző célfüggvények közti kompromisszum megtalálásának. A napelemparkok gazdasági és környezeti szempontból optimális tervezési paraméterei közti különbségek felderítésével feltárható a napelemparkok környezetbarát tervezésének jelentősége. A többcélű optimalizálás elvégzésének leghatékonyabb módját az NSGA-II algoritmus finomhangolásán keresztül derítettem fel.

6. tézis

Az NSGA-II algoritmus egy hatékony módszer a napelemparkok többcélű optimalizálására az alábbi paraméterekkel: 80%-os keresztezési részarány, 10-es eloszlási index a szimulált bináris keresztezés és polinomiális mutáció operátorokban, és a futtatás leállítása a populáció által dominált és a nadír pont által lehatárolt hipertérfogat 50 generáción keresztüli 10^{-4} -nél kisebb relatív növekedése esetén. Az eredményként kapott Pareto-front felbontása és a számítás időigénye egyaránt a populáció nagyságával arányos, így ezt a paramétert a pontossági követelmények és a rendelkezésre álló idő figyelembevételével kell meghatározni. Több egy célű optimalizálás gyorsabb és pontosabb eredményeket ad a többcélűhöz képest akkor, ha a Pareto-front helyett csak az extrém pontok meghatározására van szükség. [P4-5]

A nagy felbontású időjárási adatok elengedhetetlenek a napelemparkok működésének pontos modellezéséhez, a tervezési paraméterek optimalizálására azonban nem alkalmasak a hosszú számítási idő miatt. A különböző időbeli felbontású időjárási adatokon alapuló optimalizálás összehasonlításával felderítettem a kis felbontású időjárási adatokból fakadó hibát, és az adatok összegzésének a számítások pontosságát is fenntartó legkedvezőbb módját.

7. tézis

A napelempark optimalizálás megbízhatóságát jelentősen befolyásolja a bemeneti meteorológiai adatok időbeli felbontása. Az 5 perc és 1 óra közötti felbontású adatokon alapuló optimalizálás alulbecsüli az optimális AC/DC teljesítményarányt, túlbecsüli a várható energiatermelést, és alulbecsüli a villamosenergia-termelés várható egységköltségét a perces felbontású referencia adatokhoz viszonyítva. A felbontás csökkentése során átlagolás helyett az egyes intervallumok középső értékeinek mintavételezésével fenntartható a sugárzás adatok valós változékonysága. A mintavételezett adatsoron alapuló optimalizálás még órás adatok esetén is a perceshez hasonló eredményt ad.

A számítási ideje a napelempark optimalizálásnak arányos a meteorológiai adatok mennyiségével, így a túl hosszú számítási idő miatt a perces adatsorok nem alkalmasak a napelemparkok optimalizálására. A kisebb felbontású, mintavételezett adatsoron alapuló optimalizálás jóval rövidebb számítási idő után ad megbízható eredményeket.

A napelemek fizikai modellezésének legfontosabb eleme a transzpozíciós modell, amelynek megválasztása a tervezési optimalizálás során is jelentősen befolyásolja az eredményeket. A tizennégy transzpozíciós modell összehasonlításával bemutattam, hogy az adott területen legpontosabb modell felderítése alapvető fontosságú az optimalizálási eredmények megbízhatóságának biztosításához.

8. tézis

A napelemparkok maximális éves besugárzáshoz tartozó optimális dőlésszögének és tájolásának szimulációval meghatározott értéke jelentősen függ a számíthatóhoz használt transzpozíciós modelltől. Napelemparkok optimalizálása során a transzpozíciós modell megválasztása a dőlésszögön és tájoláson túl az optimális AC/DC teljesítményarányt és a sortávolságot is befolyásolja. A különböző modellekkel számolt eredmények különbsége a szórt sugárzás részarányával párhuzamosan növekszik. A pontatlanabb transzpozíciós modelleken alapuló szimulációk szuboptimális tervezési paraméterekhez és a várható energiatermelés és megtérülés hibás becsléséhez vezetnek. Az adott térségben legpontosabb transzpozíciós modell egy különböző irányultságú sugárzásmérőkből álló mérőállomás adatai alapján határozható meg. [P3,P6]

A napelem modulok költsége folyamatosan csökkent az elmúlt évtizedek során. A bemutatott napelempark optimalizáló keretrendszer lehetővé teszi, hogy hatékonyan modellezzük a jövőben várható költségcsökkenésnek az optimális tervezési paraméterekre és a termelés energia egységköltségére gyakorolt hatását.

9. tézis

A bemutatott napelempark tervezési optimalizáló keretrendszer alkalmas arra, hogy feltárjuk az optimális tervezési paraméterek érzékenységét a különféle műszaki és gazdasági paraméterekre. A napelem modulok árának csökkenése csökkenti az optimális AC/DC teljesítményarányt, dőlésszöveget és sortávolságot, valamint enyhén növeli az optimális névleges feszültségesést. A napelempark tervezési irányelveket rendszeresen frissíteni kell annak érdekében, hogy kövesse ezeket a változásokat. A napelem modulok nagykereskedelmi árának további 50%-os csökkenése mindössze 15%-kal csökkentené a villamosenergia-termelés egységköltségét, ami rámutat a többi rendszerelem optimalizálásának fontosságára. [P3]

4 Eredmények hasznosítása

A doktori kutatásom során kifejlesztett fizikai napelempark termelés előrejelző módszerek képzik az alapját a Magyar Villamos Művek Zrt. által a FIEK (Felsőoktatási és Ipari Együttműködési Központ) program keretében fejlesztett napelempark menetrendező szolgáltatásnak. A kidolgozott algoritmus egy alapértelmezett modellsor segítségével újonnan létesült napelemparkok menetrendezésére is alkalmas, historikus adatok alapján azonban az adott helyszíntre leginkább illeszkedő modellsor is kiválasztható. A termelés előrejelzés területi eltérései hasznos információt nyújtanak a beruházók számára a tervezett napelemparkok részére legalkalmasabb helyszín kiválasztásában. A MAE és RMSE szerint optimalizált előrejelzések közti főbb eltérések bemutatása elősegíti a döntéshozókat az előrejelzések valós értékét legjobban tükröző pótdíj, vagy kiegyenlítő energia elszámolási rendszer kidolgozásában. A szélsőbesség előrejelzések szinte elhanyagolható jelentőségének felderítése alapot ad az ennek beszerzése által jelentett többletköltségek megtakarításához.

A disszertációban bemutatott napelempark optimalizálási keretrendszert kereskedelmi forgalomba hozva, vagy egy létező napelempark szimulációs programba beépítve egy praktikus és hatékony döntéstámogató eszközként szolgálhatna, mely elősegíti az egyre nagyobb számban létesülő napelemparkok optimális tervezését. Az időjárási adatok felbontásának és a transzpozíciós modell megválasztásának jelentőségére rámutató eredmények az optimális tervezés megbízhatóságának növeléséhez járulnak hozzá. A levont következtetések az itt bemutatott optimalizálási módszeren túl bármilyen más gyakorlati, akár iteratív jellegű tervezési optimalizálás esetén is érvényesek. A napelem modul árcsökkenés

hatásának a vizsgálatával előre felderíthetőek az optimális tervezési paraméterek tekintetében várható jövőbeli változások.

A bemutatott eredmények számos további kutatási irány alapjául szolgálnak. Napelempark termelés előrejelzés tekintetében a verifikáció kiterjesztése más éghajlatú területekre megmutatná, hogy mennyiben függ a legjobb modellsor a helyi jellemzőktől, és lehetővé tenné a világszinten legpontosabb modellsorok megkeresését. További fontos lépés a vizsgálatok elvégzése más sugárzás előrejelzési adatokra, például más szolgáltatóktól származó numerikus előrejelzésre vagy akár műholdas előrejelzési adatokra. A termelés előrejelzés pontossága gépi tanulási módszerek segítségével tovább javítható, amelynek gyakorlati vonatkozásai, így a legalkalmasabb tanuló modell kiválasztása és a hibridizálás legkedvezőbb módja további kutatásokat tesznek szükségessé. További vizsgálatok szükségesek annak felderítésére is, hogy a MAE, az RMSE, vagy ezek milyen súlyozott átlaga jellemzi legjobban az előrejelzés piaci értékét a különböző piaci szereplők számára. A MAE-re optimalizált előrejelzések varianciája akár egy egyszerű mozgó átlagolással is hatékonyan csökkenthető, de ennek a simításnak az RMSE-re gyakorolt hatása ma még nem ismert.

A napelempark optimalizálási keretrendszer számos kutatás alapjául szolgálhat, például a különféle megújuló támogatási módok és a piaci villamosenergia-árak változásának várható hatása is könnyen vizsgálható vele. További célfüggvények definiálása, például a menetrendi pontatlanságok kiegyenlítő energia költségek csökkentése a tervezési paraméterek segítségével, szintén ígéretes eredményekhez vezethetnek. A modellek bővítése akkumulátoros energiátároló egységekkel elősegítheti az energiátárolás előnyeinek hatékony kiértékelését és különféle tárolási stratégiák összehasonlítását. A tervezési optimalizálás és a várható költségcsökkenés beépítésével a villamosenergia-rendszer átfogó, hosszú távú modelljébe javítható az energiamix és a villamosenergia-árak várható alakulásának előrejelzése.

Irodalmi hivatkozások

- [1] Antonanzas J, Perpignan-Lamigueiro O, Urraca R, Antonanzas-Torres F. Influence of electricity market structures on deterministic solar forecasting verification. *Sol Energy* 2020;1–3. doi:10.1016/j.solener.2020.04.017.
- [2] Wolff B, Kühnert J, Lorenz E, Kramer O, Heinemann D. Comparing support vector regression for PV power forecasting to a physical modeling approach using measurement, numerical weather prediction, and cloud motion data. *Sol Energy* 2016;135:197–208. doi:10.1016/j.solener.2016.05.051.
- [3] Antonanzas J, Osorio N, Escobar R, Urraca R, Martinez-de-Pison FJ, Antonanzas-Torres F. Review of photovoltaic power forecasting. *Sol Energy* 2016;136:78–111. doi:10.1016/j.solener.2016.06.069.
- [4] Perez-Gallardo JR, Azzaro-Pantel C, Astier S, Domenech S, Aguilar-

- Lasserre A. Ecodesign of photovoltaic grid-connected systems. *Renew Energy* 2014;64:82–97. doi:10.1016/j.renene.2013.10.027.
- [5] Pelland S, Galanis G, Kallos G. Solar and photovoltaic forecasting through post-processing of the Global Environmental Multiscale numerical weather prediction model. *Prog Photovoltaics Res Appl* 2013;21:284–96. doi:10.1002/pip.1180.
- [6] Dolara A, Leva S, Manzolini G. Comparison of different physical models for PV power output prediction. *Sol Energy* 2015;119:83–99. doi:10.1016/j.solener.2015.06.017.
- [7] Szilágyi A, Gróf G. Estimating the environmental footprint of a grid-connected 20 MWp photovoltaic system. *Sol Energy* 2020;197:491–7. doi:10.1016/j.solener.2020.01.028.
- [8] Hofmann M, Seckmeyer G. Influence of Various Irradiance Models and Their Combination on Simulation Results of Photovoltaic Systems. *Energies* 2017;10:1495. doi:10.3390/en10101495.
- [9] Yang D, Alessandrini S, Antonanzas J, Antonanzas-Torres F, Badescu V, Beyer HG, et al. Verification of deterministic solar forecasts. *Sol Energy* 2020:1–18. doi:10.1016/j.solener.2020.04.019.
- [10] Yang D. Making reference solar forecasts with climatology, persistence, and their optimal convex combination. *Sol Energy* 2019;193:981–5. doi:10.1016/j.solener.2019.10.006.

Tézispontokhoz kapcsolódó publikációk

- [P1] Mayer MJ, Gróf G. Extensive comparison of physical models for photovoltaic power forecasting (In Press). *Applied Energy* 2020.
- [P2] Mayer MJ, Dán A. Complex method for performance prediction of photovoltaic systems. *Renewable Energy and Power Quality Journal* 2014;1:948–53. doi:10.24084/repqj12.542.
- [P3] Mayer MJ, Gróf G. Techno-economic optimization of grid-connected, ground-mounted photovoltaic power plants by genetic algorithm based on a comprehensive mathematical model. *Solar Energy* 2020;202:210–26. doi:10.1016/j.solener.2020.03.109.
- [P4] Mayer MJ, Szilágyi A, Gróf G. Ecodesign of ground-mounted photovoltaic power plants: economic and environmental multi-objective optimization. *Journal of Cleaner Production* 2020;278:123934. doi:10.1016/j.jclepro.2020.123934.
- [P5] Mayer MJ, Szilágyi A, Gróf G. Environmental and economic multi-objective optimization of a household level hybrid renewable energy system by genetic algorithm. *Applied Energy* 2020;269:115058. doi:10.1016/j.apenergy.2020.115058.

[P6] Mayer MJ. Napelemparkok optimális méretezése. *Energiagazdálkodás* 2017;6:26–31.

További saját publikációk

[P7] Mayer MJ, Dán A. Napelemes rendszerek modellezése. *Elektrotechnika* 2013;108:5–9.

[P8] Mayer MJ. Naphőerőművek szerves Rankine-körfolyamat alkalmazásával. *Energiagazdálkodás* 2015;56:38–42.

[P9] Mayer MJ, Nyerges V, Schroth A. Geotermikus erőmű illesztése kimerült szénhidrogén kutakhoz. *Magyar Energetika* 2015;1:8-13.

[P10] Mayer MJ. Comparison of different solar energy utilization methods: Photovoltaic systems and solar thermal power plants. 2015 5th International Youth Conference on Energy; 2015, p. 1–7. doi:10.1109/IYCE.2015.7180791.

[P11] Mayer MJ, Nyerges V, Schroth A. Investigation of geothermal power generation on abandoned hydrocarbon wells. 2015 5th International Youth Conference on Energy; 2015, p. 1–7. doi:10.1109/IYCE.2015.7180820.

[P12] Mayer MJ. Naphőerőművek magyarországi lehetőségeinek modellalapú vizsgálata. *Magyar Energetika* 2016;23:42–7.

[P13] Mayer MJ. Model-based analysis of the viability of concentrating solar power plants. *Renewable Energy and Power Quality Journal* 2016;1:885–9. doi:10.24084/repqj14.506.

[P14] Mayer MJ, Gács I. Naphőerőművek. *Magyar Tudomány* 2017;5:574-82.

[P15] Mayer MJ. Naphőerőművek típusai, helyzete és jövőképe. *Épületgépész* 2018;11:35-9.

[P16] Mayer MJ. Absorption cooling in concentrating solar power plants. 13th International Conference on Heat Engines and Environmental Protection Proceedings; 2019, pp. 99-107.

[P17] Lénárt F, Mayer MJ. Háztartás energiaellátásának optimalizálása megújuló energiaforrások segítségével. *Energiagazdálkodás* 2019;60:40-5.

[P18] Varga Á, Mayer MJ. Naperőművek invertereinek optimális megválasztása és komplex elemzése. *Energiagazdálkodás* 2019;60:46-50.

[P19] Varga N, Mayer MJ. Model-based analysis of shading losses in ground-mounted photovoltaic power plants (beadott kézirat). *Solar Energy* 2020.