



SZENT ISTVÁN EGYETEM

Autonóm és hálózattal együttműködő
fotovillamos energiatermelő rendszerek
optimalizálása

Tézisfüzet

Kapros Zoltán

Gödöllő
2017

A doktori iskola

megnevezése: Műszaki Tudományi Doktori Iskola

tudományága: Energetikai műszaki mérnöki

vezetője: Prof. Dr. Farkas István
egyetemi tanár, DSc
SZIE, Gépészmérnöki Kar

témavezető: Prof. Dr. Farkas István
egyetemi tanár, DSc
SZIE, Gépészmérnöki Kar,
Környezetipari Rendszerek Intézet

.....
az iskolavezető jóváhagyása

.....
a témavezető jóváhagyása

TARTALOMJEGYZÉK

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK	4
2. ANYAG ÉS MÓDSZER	5
2.1. Kisteljesítményű napelemes rendszer perces teljesítményének előrejelzése	5
2.2. Kisteljesítményű napelemes rendszer menetrendtartásának előrejelzése	6
2.3. Kisteljesítményű virtuális napelemes mérlegkör együttes teljesítmények előre jelezhetősége	6
2.4. Mikro napelemes rendszerek hálózat integrálhatósági minősítésének kísérleti adatai	7
2.5. Társadalmi, környezeti, gazdasági érték szerinti numerikus döntéstámogatási rendszer	8
3. EREDMÉNYEK	9
3.1. Napelemes rendszerek dinamikus teljesítmény előrejelzési módszere	9
3.2. Napelemes rendszerek időszakon belüli átlagteljesítményének előrejelezhetősége	13
3.3. Erőmű alapú csoportszintű teljesítmény előrejelzés	13
3.4. Fotovillamos rendszerek hálózatba integrálhatóságának minősítése	14
3.5. Numerikus döntéstámogató rendszer megújuló energetikai célstruktúra optimalizálásához	15
4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	17
5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK	20
6. ÖSSZEFOGLALÁS	21
7. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ KIEMELT PUBLIKÁCIÓK	22

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK

A fotovillamos technológia a jövő fenntartható energiaellátásának meghatározó elemévé vált. A tudományos élet és a mérnök társadalom ezért számos komplex kihívással szembesül. A centralizált és a decentralizált rendszerek stratégiai és operatív összehangolása, a fogyasztási igények menetrend szerinti befolyásolása, korábban elkülönült szektorok (villamosenergia gazdálkodás, hőenergia gazdálkodás, szállítás) közötti technológiai kapcsolódások kiépítése a fenntartható, versenyképes és biztonságos energiaszolgáltatás kulcselemévé válik már napjainkban is. A megbízható, rövid időtartamú teljesítmény előrejelzés hiánya jelenleg akadályt jelent a további fejlődése előtt. Az igény a virtuálisan összekapcsolt rendszerek kialakítására, a helyi energiatermelők és fogyasztók szervezett közösségei alakítására is adott, mert közös érdekek szerint szervezhető a költséghatékony decentralizált energiatermelés, az energiaértékesítés és a centralizált rendszerekre is támaszkodó fogyasztás. A prediktív szabályozási feladatokhoz való kapcsolódásra ezért autonóm és hálózattal együttműködő rendszerek szintjén is alkalmassá kell tenni a fotovillamos technológiát az előrejelzési módszerek fejlesztésével.

A napelemes rendszerek integrálhatóságára a telepítési mód is hatással van, de alapvetően szemléletbeli kérdés a telepítéskor jellemző egyedi érdekekre való törekvés, ami közlegelő problémát okoz. Az egyedi rendszerek kisebb éves termelése lehetővé teheti, hogy összességében nagyobb megújuló részarány legyen integrálható. A megújuló energia fejlesztési célok tovább jellemzően nem a társadalmi és környezeti előnyök és hátrányok objektív értékelésén alapszanak. Olyan hiteles és objektív célkitűzésre van szükség, amely alkalmas a minél nagyobb egyetértés és összefogás megteremtésére. A kutatás fő célja a napelemek közüzemi vagy autonóm hálózati integrálhatóságának elősegítése. Céljaim pontokba szedve az alábbiak:

- Új fotovillamos teljesítmény előrejelzési módszer kidolgozása;
- Egy fotovillamos rendszer adott menetrendi periódusra vonatkozó, a perióduson belüli előrejelzési módszer kidolgozása és értékelése;
- Fotovillamos erőművek csoportszintű előre jelezhetőségének értékelése a rendszercsoportok homogenitásának a függvényében;
- Az egyes fotovillamos rendszer telepítési megoldásokra olyan értékelési rendszer kidolgozása, amely alkalmas az egyes telepítési változatoknak a közüzemi hálózati rendszer stabilitására gyakorolt negatív hatások szempontjából történő minősítésre, osztályozásra.
- Egy olyan numerikus döntéstámogató optimalizációs módszer kidolgozása, amely a költséghatékony, a közvetlen társadalmi hatások és a környezetvédelmi szempontok együttes értékelésével alkalmas egy optimális megújuló energiafejlesztési célstruktúra meghatározására

2. ANYAG ÉS MÓDSZER

Ebben a fejezetben azokat a módszereket ismertetem, amelyek dolgozat céljainak eléréséhez szükségesek.

2.1. Kisteljesítményű napelemes rendszer perces teljesítményének előrejelzése

A gyakorlatban így a sztochasztikus megközelítésű modellezéseknek van létjogosultsága. A fotovillamos energiatermelés változékonysága, ellentétben a szélenergiával, nem követ jól leírható eloszlást. A normál vagy más eloszlásra épülő sztochasztikus modellezések így a több órás, vagy leginkább a napos, vagy még hosszabb időszakra vonatkozó átlagos előrejelzések esetén biztosítanak elfogadott pontosságú előrejelzést. Továbbá nem feltétlenül elegendő az átlagos hőmérséklet viszonyok ismerete, hiszen egy fotovillamos rendszer hatásfokát egyéb külső körülmények (pld. a fénysugárzás spektrális viszonyai, a felhők átmeneti árnyékoló hatásai, stb.) illetve az adott rendszer egyéb jellemzői is meghatározzák. A fentiek miatt az előrejelzési módszertan kifejlesztésénél a genetikus algoritmus módszerét alkalmaztam, újszerű megközelítés mellett. A genetikus algoritmus megközelítés a genetikai populációkra vonatkozó megfigyelt szabályszerűségek matematikai alkalmazását jelenti. Ezek szerint egy kiinduló helyzet elemzésével a megfigyelhető adottságok ismeretében a valószínűségi tér minden egyes lehetséges pontjára egy adott valószínűségi érték határozható meg. A napelem teljesítmény előrejelzésénél így egy fizikailag és technikailag pontosan behatárolt és definiálható lehetőségek adott halmazán belül határozható meg a legnagyobb valószínűséggel rendelkező érték.

A mintavételi időszakban a teljesítményérték kódolását illetve az előre jelzett időpontokban a dekódolást az egy-egy adott pillanatban tipikusan várható és a mért értékek közötti eltérések alapján végeztem. A kutatásom során kidolgozott előrejelzési módszertan meghatározó részét képezi tehát a napelem várható tipikus teljesítményértékeinek a fizikai modell alapú előrejelzése. Ennek meghatározására ismert és viszonylag kevés információ alapján is alkalmazható összefüggéseket és ingyen elérhető adatbázisokat alkalmaztam. Az év minden egyes percére a várható teljesítményértékeket meghatároztam reprodukálható módon (1. táblázat).

A kísérleti rendszer a FŐTÁV 150 db 250 Wp névleges teljesítménnyel rendelkező rendszer volt, mely nyolc inverterrel kapcsolódik a hálózatra. Az 5 kW-os inverterekre hat esetben egy 10 napelemből álló és egy 9 napelemből álló párhuzamos string csatlakozik, illetve két esetben két 9 napelemből álló string csatlakozik. Az inverteres mérési adatok alapján így 8 db függetlennek tekinthető rendszer esetében tudtam összehasonlító vizsgálatokat végezni. A modulok típusai: AS-60P 250 W ECO polikristályos szilícium napelemek. Egy modul névleges teljesítménye 250 Wp. A telepítés irányszöge (tájolás): +10,7 fok (DDNY), dőlésszöge: 20 fok. A névleges csatlakozási teljesítmény: 40 kW.

1. táblázat: A tesztelésre kiválasztott napok és ezek jellemzői

Idő-pont. (2014)	A nap sor-száma (d_n)	Napkelte (SRT) (GT+1)	Nap-nyugta (SST) (GT+1)	Írányszög nap- keltekor (AZI_{SRT})	Írányszög nap- nyugatakor (AZI_{SST})	Lehetséges napfénytartam (N_0) [h]
IV. 1.	91	6:23:09	19:13:13	-97,58°	97,89°	12,84
IV. 20.	110	5:46:32	19:39:56	-108,07°	108,37°	13,89
V. 1.	121	5:27:32	19:55:15	-113,55°	113,89°	14,16
V. 20.	140	5:01:25	20:20:01	-121,36°	121,58°	15,31
VI. 1.	152	4:50:58	20:32:51	-124,80°	124,96°	15,69
VI. 14.	165	4:46:12	20:42:09	-126,86°	126,91°	15,93
VI. 20.	201	5:07:10	20:32:34	-122,58°	122,38°	15:42

A kísérleteket hét különböző, véletlenszerűen kiválasztott nap vizsgálati adatai alapján végeztem. Az egyes napokon eltérő számú adat állt a rendelkezésre, de egy-egy napi adatsor tesztelése során 689-809 db/nap teljesítmény előrejelzési adatot állítottam elő ekvivalens csúcskihasználási óraszámban kifejezve. Az egész napra vonatkozó értékelés mellett külön vizsgáltam az intenzív sugárzási időszakokat (10:00-16:00 óra között), ami 360 darab/nap előrejelzést jelent.

2.2. Kisteljesítményű napelemes rendszer menetrendtartásának előrejelzése

Az adott pillanatokra érvényes teljesítmény előrejelzések mellett az adott időszakra (menetrendi periódusra) szóló előrejelzési sorozatokat is készítettem. A menetrend tartási előrejelzés alapját az előző pont szerinti teljesítmény, illetve ekvivalens csúcskihasználási óraszám előrejelzések adják. A tesztelés során az előrejelzést 5 perccel készítettem el a 15 perces szakaszok vége előtt. Egy előrejelzésnél öt darab mért és tíz darab előre jelzett teljesítmény értéket alkalmaztam. Egy 15 perces szakasz energiatermelése így a 15 rendelkezésre álló percenkénti teljesítményadatból lett előállítható. Az egyes tesztelési napokon a legelső előrejelzést az első olyan negyedórás periódusra készítettem el, amelynek minden egyes percében volt mért energiatermelés. Így az egyes napokon 45-52 db/nap negyedórás menetrendtartási előrejelzést készítettem el.

2.3. Kisteljesítményű virtuális napelemes mérlegkör együttes teljesítmények előre jelezhetősége

A csoportszintű előrejelzés alapja az egyetlen rendszer mérési és előrejelzési adataira alapozott együttes előrejelzés. Két különböző, eltérő összetételű PV generátor csoporttal dolgoztam. A „Homogén” csoportnak a Kalotaszeg utcai fotovillamos rendszer egészét tekintettem (nyolc független inverterterem mért egység). A „Heterogén” csoportot az egyes, a hármas (4750 W_p) és a hetes (4500 W_p) számú inverterek mögötti részrendszerek és két az előzőektől eltérő helyszínű és gyártmányú fotovillamos rendszer alkotta (2160 W_p /rendszer).

2.4. Mikro napelemes rendszerek hálózat integrálhatósági minőségének kísérleti adatai

A megtermelt, de nem hasznosított energia az autonóm rendszerek esetében fontos paraméter, de a hálózatra csatlakozó rendszerek esetében jelenleg jellemzően sajnos még nem értékelt. A fenti okból bevezettem a nettó teljesítménytényezőt az (1) egyenlet szerint módosítva az ismert összefüggést:

$$PR_{net} = \frac{(E_{pr} - E_{grl} + E_{grw} - E_{ow} - E_{st} - E_{bl})}{E_{us}}. \quad (1)$$

A közvetlenül megtermelt E_{pr} villamosenergiát, a fotovillamos rendszer veszteségeit (E_{ow}), az elért hálózati veszteségsökkentést (E_{grw}), a tárolási veszteségeket (E_{st}), a hálózatvédelmi funkcióik miatti veszteségeket (E_{bl}) és a közüzemi hálózatra kiadott, de ott nem hasznosított veszteségnövekedést (E_{grw}) veszem figyelembe vettem. Az egyenletben E_{us} a valóban hasznosításra kerülő villamosenergia. A bevezetett nettó teljesítménytényező és a megszokott teljesítménytényező közötti különbség főként a hálózati túlterhelések kezelése miatti hálózati veszteségek, valamint a termelt villamosenergia hálózatra juttatásának részleges vagy teljes kívülről vezérelt tilalmából ered. A fotovillamos rendszerek telepítésénél a nettó teljesítménytényező kifejezi a rendszerszintű hatékonyságot. A rendszerek telepítési módjával így nem csak E_p , de a PR_{net} is befolyásolható. A két mutató összhangjának minősítésére alkottam értékelési rendszert, melynek alapja a vácrátóti botanikus kertben létesített rendszerbarát napelemes rendszer.

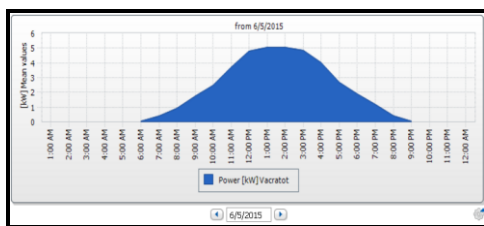
A megvalósult összesen 7,75 kW_p névleges teljesítményű napelemes rendszer villamosenergia termelő képessége így bár elmarad egy rendszerint optimálisnak tartott telepítésű azonos névleges teljesítményű rendszerétől, viszont elősegíti az integrált fotovillamos energiatermelési korlát növelését. A 3 különálló egységekből kettő a délkeleti tetőfelületre, egy pedig a délnyugati tetőfelületre került:

- D-K-i tető, felső sor, 2 kW_p polikristályos napelem modul,
- D-K-i tető, alsó sor, 1 kW_p amorf napelem modul,
- D-Ny-i tető, 4 kW_p polikristályos napelem modul.

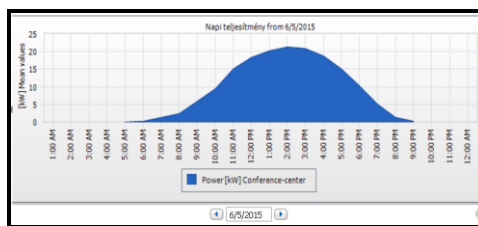
A „rendszerbarát stílusú” telepítésnek az okai a telepítés három egyedi sajátosságából erednek.. A PV mező egyszerre tartalmaz DK-i illetve DNY-i tájolással telepített napelemeket, így összességében a leadott teljesítmény napi lefutása eltér a hagyományos módon telepített rendszerek kumulálódó haranggörbétől, a napi teljesítmény csúcsértéke kevésbé kiemelkedő (csúcslevágás). A napelemek épületintegrált stílusban, az épületsíkból nem kiemelve épültek, így a jelleggörbe eltér az „ideális” dőlésszögű rendszerekétől. A rendszer nem csak a direkt sugárzást nagyobb határfokkal hasznosítani képes polikristályos modulokat, hanem a szórt sugárzásnál kedvezőbb, árnyékoló hatásra kevésbé érzékeny amorf szilíciumos modulokat is alkalmaz.

2. Anyag és módszer

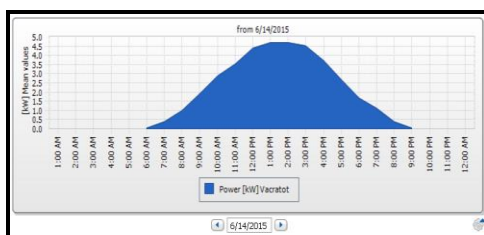
A vácrátóti és egy szentendrei rendszer közötti különbségeket az 1-4. ábrákkal szemléltetem:



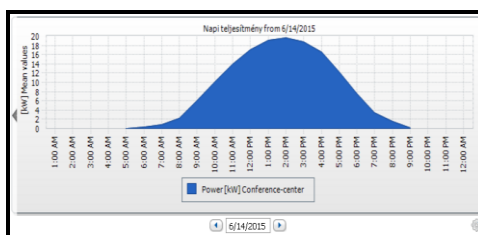
1. ábra: Vácraóti PV rendszer óras teljesítmények (2015. június.6.)



2. ábra: Szentendrei PV rendszer óras teljesítmények (2015. június.6.)



3. ábra: Vácraóti PV rendszer óras teljesítmények (2015. június.14.)



4. ábra: Szentendrei PV rendszer óras teljesítmények (2015. június.14.)

A 2014-15-ös évek májustól augusztusig tartó időszak adatait vizsgálva az elemzésre olyan napokat választottam ki (derűt napok), amelyekre teljesült az, hogy a 10-16 óra között mért 7 db óras teljesítmény adatai minden esetben meghaladják az adott hónap azonos óráiban mért legnagyobb teljesítményének 75%-át, ezek a hálózati terhelés szempontjából kritikus időszakok.

2.5. Társadalmi, környezeti, gazdasági érték szerinti numerikus döntéstámogatási rendszer

A 2010-ben kidolgozott Nemzeti Megújuló Energiahasznosítási Cselekvési Terv elfogott stratégiai dokumentum. A cselekvési terv készítésekor a célmeghatározáshoz új módszert alkottam. Ennek alkalmazásához a megújuló energia technológiák főbb energetikai, gazdasági és társadalmi jellemzőinek feltérképezése és sorba rendezése szükséges, amit szakértői munkacsoport végzett. Alapvetően a három különböző szempont szerinti rangsor felállítása jelenti a kiindulást. Ezek az energiatermelés teljes fajlagos költsége, a társadalmi hatások (helyi munkahelyteremtés, jövedelem régióban tartása) értékelése és környezetvédelmi hatások értékelés (karbonlábnyom, vízfelhasználás) alapján képzett rangsorok.

A technológiák költségének az értékelése a Bécsi Egyetem által vezetett és az Európai Bizottság Kutatási Főigazgatósága (DG Research) által támogatott konzorcium által kifejlesztet GREEN-X módszer szerint történt. A módszer leírása és kapcsolódó tanulmányai a <http://www.green-x.at> honlapon elérhetők.

3. EREDMÉNYEK

Ebben a fejezetben az új tudományos eredményeimet alátámasztó kutatási eredményeimet ismertetem

3.1. Napelemes rendszerek dinamikus teljesítmény előrejelzési módszere

A kutatás során cél volt, hogy a vizsgált PV generátor nagyságától függetlenül összehasonlítható és így általánosítható eredmények szülessenek, ezért az előrejelzéseket ekvivalens csúcskihasználási óraszámra készítettem. A kidolgozott genetikusan algoritmusok során alkalmazott kód így a fizikai alapú modellezéssel megállapított várható ekvivalens csúcskihasználási óraszám értékein alapszanak. A feltalált dinamikus, folyamatos mérési adatokra építő előrejelzésnél (data driven determination) egy t_0 időpontra érvényes fizikai alapon előre jelzett teljesítményt (ekvivalens csúcskihasználási óraszám meghatározva) a $\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_n$ szerint valós időben változó mintavételezési időpontokban rögzített mérési (monitoring) adatsor értékein alapuló számítással dinamikus módon szükséges módosítani. Ennek a folyamatos módosításnak az alapja az a kódolt adattartalom, amely kifejezi a mintavételi időszak működésére csak aktuálisan ható egyedi hatások eredőjét. A kódrendszer így alkalmas arra, hogy egy adott mintavételezési időszak adataira genetikusan értelmezhetően rögzítse a várhatótól eltérő viselkedéseket, mint egy közeli időszakra is még jellemzőnek feltételezhető tulajdonságokat. A tulajdonságok kódrendszer segítségével történő definiálásával, a mintavételi időszakban rögzített tulajdonságokat mintegy szülői génállománynak tekintve határozta meg a legvalószínűbb, a következő időpontban érvényesnek tekinthető kódokat.

Számítható így a valószínűsége a mintavételi időszakban kódokkal rögzített tulajdonságok által kijelölt tartományon belüli bármely érték megjelenésének, tehát lehetővé válik, hogy a különböző mértékű teljesítmény előrejelzésekhez különböző valószínűségeket lehessen társítani. A meghatározó időjárási viszonyok szélsőséges változására az esély mindig megmarad. Ezek hatása genetikai értelemben mutációnak tekinthetők. Mutáció során teljesítmény valósul meg, amelynek a valószínűsége a mintavételi időszakot genetikai állományként értékelve nulla. A fentieket az következőkben (2) egyenlet szerint határozta meg.

$$H_i(t) = \frac{(h_i^*(t) - h_i(t))}{h_i^*(t)}, \quad (2)$$

ahol egy $t-n$ múltbeli időpontra a várható ekvivalens csúcskihasználási óraszám (h_i^*) a fizikai alapú elemzés és modellezés alapján meghatározott. A fotovillamos rendszer mért teljesítmény értéke alapján a múltbeli tényleges ekvivalens csúcskihasználási óraszám (h_i) számolt érték. A két érték közötti eltérés a fizikai alapú előrejelzés hibája, amelyből a fajlagos hibát (H_i) kifejeztem. Definiálható továbbá (3) egyenletnek megfelelően a fajlagos

hibáknak egy olyan sorozata a t időpontnál korábbi n és m időpont közötti mintavételi időszakban, ami alapján a fajlagos hiba értékének az átlagos dH/dt változása meghatározható. Az egyenletben az n és m időpont közötti időtartam SI mértékrendszer szerint másodpercben szerepel.

$$\frac{dH_i}{dt} \approx \frac{\Delta H_i}{\Delta t} = 60 \left[\frac{s}{\text{min}} \right] \frac{(H_i - H_{i-1}) + (H_{i-1} - H_{i-2}) + \dots + (H_{m+1} + H_m)}{\Delta t_{n-m}}. \quad (3)$$

Az egyenlet feltétele, hogy a $H_i \dots H_m$ sorozat tagjaira vonatkozó időpontok között az időtartamok (4) egyenlet szerint megegyeznek:

$$t_i - t_{i-1} = t_{i-1} - t_{i-2} = \dots = t_{m+1} - t_m. \quad (4)$$

A fentiek ismeretében a várható érték és a tényleges érték közötti fajlagos hiba prognosztizált előrejelzésére az (5) egyenletet határoztam meg.

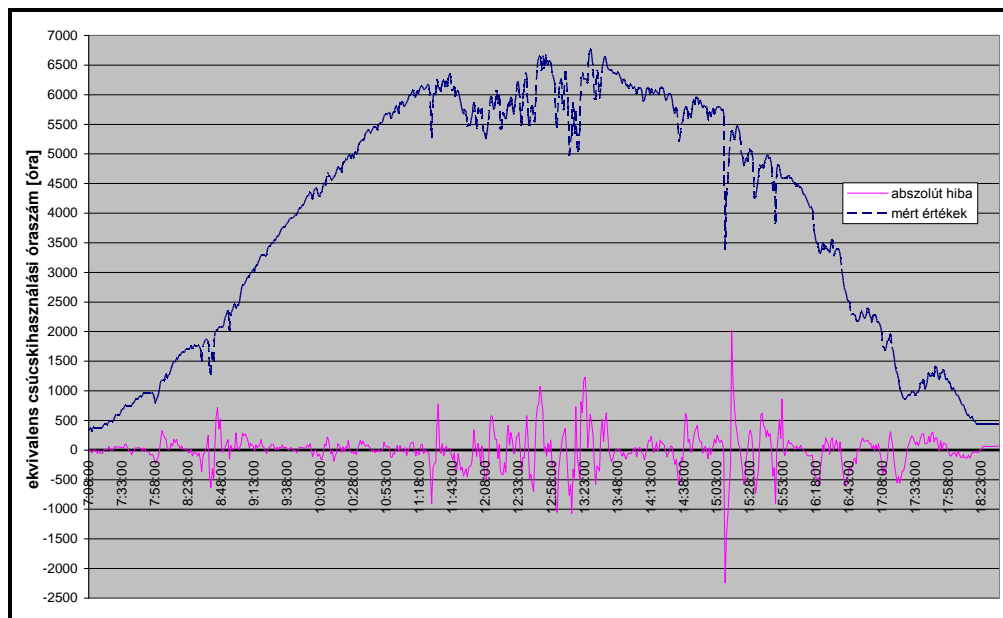
$$H_t = H_{t-1} \left(1 + \frac{dH}{dt} \right) \approx H_i \left(1 + \frac{dH_i}{dt} \right)^{\frac{\Delta t_{t-n}}{60[s/\text{min}]}} \approx H_i \left(1 + \frac{\Delta H_i}{\Delta t} \right)^{0,4 \frac{\Delta t_{t-n}}{60[s/\text{min}]}}. \quad (5)$$

Az előrejelzés értékelésekor az (5) egyenletben szereplő időtartam kitevőnél 0,4-szeres szorzót alkalmazását találtam a legkedvezőbbnek. Ennek oka, hogy a mintavételi időszakban rögzített H fajlagos hiba adatok nem tekinthetők egymástól teljesen függetlennek, így a mintavételi időszakban a fajlagos hiba értékek változásai mögött sztochasztikus folyamatok is feltételezhetők. A tört időtartam kitevőként való alkalmazásának oka, hogy a várható érték és a mért érték közötti fajlagos hibák n és m időszak közötti percenkénti változásait csak kisebb részben, illetve csak esetenként okozza olyan természeti hatás, amely a $t-n$ (mért adat nélküli) időszakban is hasonló ütemben jelentkezik. Így a kidolgozott előrejelzésnél az utolsó mért és figyelembe vett relatív hiba értéke nagyobb súllyal meghatározó, mint a relatív hibaértékek ezt megelőző időszakban jellemző kis mértékben figyelembe vett átlagos változása. A fentiek ismeretében (6) egyenlet szerint írtam fel az egy aktuális t időpontra vonatkozó korrigált, n időpontban elkészíthető κ_t dinamikus előrejelzés a dinamikus adatvezérléssel pontosított ekvivalens csúcskihasználási óraszámra.

$$\kappa_t = h_t^* + H_t \times h_t^* = h_t^* \times (1 + H_t). \quad (6)$$

A 2014. április 1-i nap a hét vizsgált nap közül bár a második legkevésbé változékony nap volt, melyet enyhén felhős, alapvetően derült idő és viszonylag stabil fényviszonyok jellemeztek. Előre jelezhetőség szempontjából nehézség, hogy az ilyen időszakban már nem rajzolódik ki tisztán a haranggörbe jelleg és jelentősebb eltérések is előfordulhatnak várható értékekhez képest. Ugyanakkor a fényviszonyok változásai kevésbé dinamikusak, ami kedvező a kidolgozott genetikus módszertanra. Az előrejelzés átlagos relatív hibája a 10 és 16 óra közötti időszakában jellemzően 5%-akatt marad. Továbbá megfigyeltem, hogy

egyes rövid hatású dinamikus változások által okozott nagyobb hibák beépülnek az előrejelzésbe és később ellentétes előjelű torzításokat okoznak. Az 5. ábrán a mért ekvivalens csúcshasználati óraszám értékeit is feltüntettem az előrejelzési hibák értékei mellett. Az előrejelzésbe beépülő torzítások, lengések jól megfigyelhetők. A lengés csillapításához elegendő lehet a jellemző viszonyok (fényintenzitás, szélesség, spektrális viszonyok) valós idejű mérése és a jelentős, genetikus értelemben „mutációkat okozó” hatások élettartamának valós idejű követése.



5. ábra: Előrejelzésének abszolút hibái és a mérés alapján számított értékek, 2014. április 1-én

Az előrejelzés relatív hibáit a kísérletsorozat egészére a 2. táblázat mutatja.

2. táblázat: Az előrejelzés abszolút értékű relatív hibái 10 és 16 óra között

Vizsgált napok 2014-ben	Relatív hiba abszolút érték átlaga, %	15%-nál hiba gyakorisága, %	10%-15% közötti hiba gyakorisága, %	5%-10% közötti hiba gyakorisága, %	5% alatti hiba gyakorisága, %
IV.01.	4,34	4,43	5,26	19,11	71,19
IV.20.	20,68	30,47	13,02	16,07	40,44
V.01.	17,18	26,59	12,47	22,71	38,23
V.20.	34,56	15,51	0,55	4,16	79,78
VI.01.	28,74	54,85	12,19	13,57	19,39
VI.14.	55,75	47,92	5,54	12,47	34,07
VII.20.	3,87	3,60	1,39	4,99	90,03
Átlag	23,6	26	7	13	53

3. Eredmények

Az átlagosan 18,6%, illetve a 10-16 óra közötti 23,6% túl magas érték. De az előzőekben felismert lengés jelenség miatt, ezek az értékek még javíthatók lehetnek. Ráadásul mivel a lengéseknél a pozitív és negatív előrejelzésű hibák váltakozva jelennek meg, egy hosszabb periódusra vonatkozó előrejelzés jelentősen kisebb relatív hibát ad. Összességben megállapítható, hogy a kidolgozott előrejelzés valóban alkalmazható a kisteljesítményű fotovillamos rendszerek esetében.

Az előrejelzés megbízhatósága és a „mutációk” gyakorisága, illetve a sugárzási viszonyok változékonysága meghatározó, így olyan indikátort alkottam, amelynek egy adott időszakban jellemző értéke a változékonyság gyakoriságát és nagyságát komplexen fejezi ki. Az indikátor és a megbízhatóság közötti korrelációt megállapítottam, így lehetővé vált, hogy az előrejelzés során egy adott szinten a konfidencia intervallumot is meghatározzam. Az indikátor részben a nap illetve a napszak hosszán, részben a nap vagy a napszak során bekövetkezett ugrásszerűen nagy (előző perchez képest) teljesítményváltozások számán alapuló általam bevezetett változékonysági tényező értékén alapul. A változékonysági tényező meghatározását a 3. táblázat szemlélteti.

3. táblázat: Változékonysági tényező meghatározása

	AC perces átlagteljesítmény 1 perc alatti változása, db/nap								Változékonysági tényező V_{nap} , db/nap
	Csökkenés				Növekedés				
	55% feletti	35%-55% között	15%-35% között	5%-15% között	55% feletti	35%-55% között	15%-35% között	5%-15% között	
2014.	a_1	a_2	a_3	a_4	b_1	b_2	b_3	b_4	Nappal
IV.0	0	1	2	55	0	0	9	51	131
IV.2	8	8	40	71	16	11	40	76	460
V.01.	2	6	21	68	5	4	19	65	271
V.20.	11	6	10	47	19	3	10	34	268
VI.0	3	7	34	108	12	9	38	106	466
VI.1	20	19	29	61	35	10	29	54	538
VII.2	2	0	7	26	3	0	6	23	95

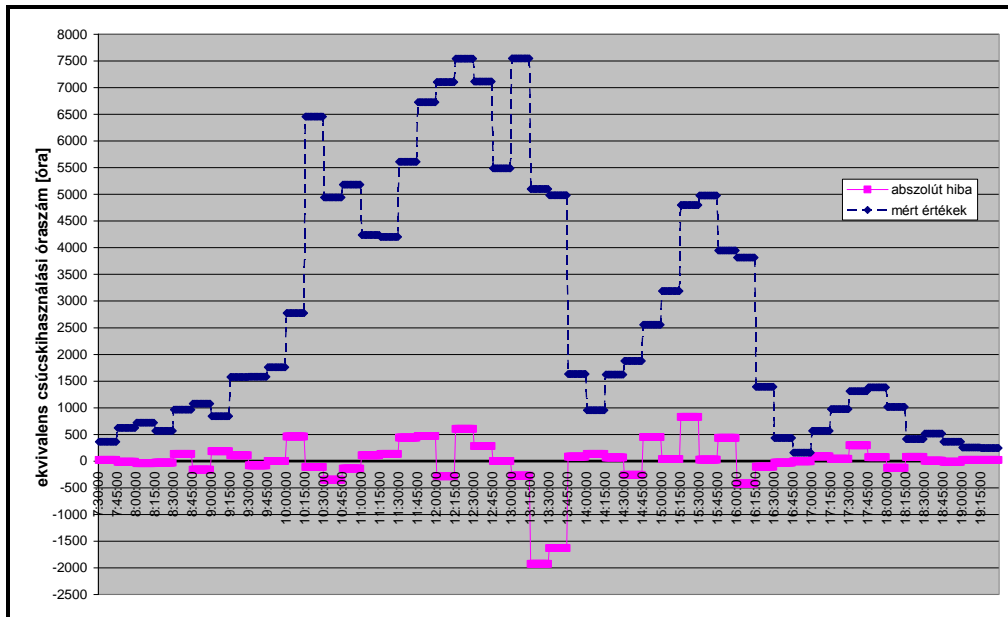
A táblázatban szereplő fajlagos tényezők meghatározását a (7) és (8) egyenletek mutatják. A becslési módszertan megbízhatóságának értékeléséhez a bevezetett fajlagos változékonysági tényezőt használtam, ami a fenti táblázatok szerint definiált változékonysági tényező egy órára vetített átlagértékét jelenti:

$$V_{nap} = 4a_1 + 3a_2 + 2a_3 + a_4 + 4b_1 + 3b_2 + 2b_3 + b_4, \quad (7)$$

$$V_{nsz} = 4a_{1'} + 3a_{2'} + 2a_{3'} + a_{4'} + 4b_{1'} + 3b_{2'} + 2b_{3'} + b_{4'}. \quad (8)$$

3.2. Napelemes rendszerek időszakon belüli átlagteljesítményének előrejelezhetősége

Az első öt perc mért valamint a 6-15. perc minden egyes percére előállított genetikus előrejelzés alapján öt perccel az egyes periódusok vége előtt készítettem el a 15 perces időszak átlagteljesítményére vonatkozó előrejelzéseket. Egy nagyon változékony nap eredményei a 6. ábrán láthatók.



6. ábra: Menetrendtartásra vonatkozó dinamikus átlagteljesítmény előrejelzés hibái és a mért értékek (2014.06.01.)

A kísérletsorozat során az átlagos relatív hiba 6% alatt maradt. A hétből három nap esetében az összes időszakra teljesült, hogy a 10-16 óra közötti időszakban a relatív hibák 10% alatt maradtak. A hét nap átlagában az előrejelzések hibája 65%-os valószínűséggel marad 5% alatt. Igazoltam, hogy a fajlagos változékonysági tényező 23,65 db/óra értéke esetén teljesül, hogy az előrejelzés átlagos relatív hibája 3,54-6,46% közé esik, valamint, hogy 16,61 db/óra esetén az átlagos relatív hiba kisebb, mint 5%. Bizonyítottam, hogy az előrejelzés 5% alatti átlagos relatív hibája 10-16 óra között jelentős részben biztosítható és 5-7% közötti átlagos relatív hiba érhető el a feltalált módszerrel.

3.3. Erőmű alapú csoport szintű teljesítmény előrejelzés

A csoport szintű előrejelzési alapja az a meglátás, hogy az előzőek szerint egy referencia rendszer teljesítményére rövid távú előrejelzés készíthető, valamint, hogy a dinamikus előrejelzés és a fizikai alapú előrejelzés közötti hiba, mint egy tulajdonságként jelölő genetikus kód, jelentős részben olyan külső fizikai

3. Eredmények

hatások eredménye, amelyek a hasonló típusú, földrajzilag közel fekvő más rendszereket közel azonos időszakban érintik. Egy referencia erőmű fizikai alapú modellezéssel előállított teljesítmény értékei és a mért értékek közötti eltérések alapján így nem csak a referenciarendszer fizikai modellezés szerinti jövőbeli várható értékétől való eltérésre, hanem más rendszerek esetében várható eltérésekre is előrejelzéseket készítettem. Ezek aggregálásával jutottam a csoportszintű előrejelzésekhez. A csoportszintű előrejelzéseket két eltérő összetételű csoportra vizsgáltam és a menetrendtartásra vonatkozó 5 perces előrejelzés hibaadatait a táblázatban ismertetem. Az összehasonlíthatóság érdekében a referencia rendszer saját magára történő előrejelzési hibájához viszonyított csoportszintű előrejelzés jellemző hibáit a 4. táblázatban ismertetem.

4. táblázat: Csoportszintű mentrendtartás előrejelzés értékelése

2014	Értékelt időszak	Eltérések abszolút értékeinek átlaga ekv. csúcsk. órászámában, h			Abszolút értékű relatív hibák átlaga, %		
		Egy PV rendszer	Homogén csoport	Heterogén csoport	Egy PV rendszer	Homogén csoport	Heterogén csoport
IV.01.	7:08-18:36	73	79	89	2,64	3,01	3,42
	10:00-16:00	87	90	102	1,55	1,60	1,77
V.20.	6:25-19:09	189	473	331	5,26	9,78	9,51
	10:00-16:00	260	665	466	4,36	9,65	7,67
VI.01.	7:34-19:14	242	273	429	9,00	11,28	19,55
	10:00-16:00	397	402	567	9,29	8,94	14,81
VII.20	6:32-19:14	104	61	161	4,03	1,86	4,78
	10:00-16:00	175	80	214	3,87	1,31	3,47
Átlag	Egész nappal	152	222	253	5,23	6,48	9,32
	10:00-16:00	230	309	337	4,77	5,38	6,93

3.4. Fotovillamos rendszerek hálózatba integrálhatóságának minősítése

A minősítő rendszer indikátorainak megalkotásánál nyilvánosan és egyszerűen elérhető adatokat használtam fel. Az értékelés a rögzített óránkénti teljesítmény adatokra illetve a napi villamosenergia termelés adataira épül a rendszerek névleges adatainak ismeretében. A következő indikátorokat határoztam meg:

- csúcsidőszaki variabilitás,
- linearitás,
- csúcsmagasság,
- csúcslevágási hatékonyság.

Az indikátorok kísérleti tesztelése során meghatározott eredményeket az 5. táblázatban összesítem. Az értékelése a 2.4. pont szerinti derült napokon végeztem

5. táblázat: Az integrálhatóságát minősítő indikátortáblázat

Elnevezés	Magyarázat	Vácrátóti PV rendszer	Mértékegység
Csúcsidőszaki variabilitás	Óras teljesítmények szórásainak átlaga és a néveleges teljesítmény hányadosa (május - augusztus)	35	W/kW _P
Linearitás	Óras teljesítményekből lineáris regresszióval képzett egyenes meredeksége abszolút értéken (május - augusztus)	13	W/kW _P /h
Csúcsmagasság	Legnagyobb óras fajlagos teljesítmény és a megelőző illetve követő óras fajlagos teljesítmények alapján képzett háromszög magassága (május - augusztus).	44	W/ kW _P
Csúcslevágás hatékonyság	A vizsgált és a közeli optimális telepítésű referencia rendszerek június havi derült napokon mért fajlagos napi termelésátlagok különbsége és a csúcsmagasság különbségek hányadosa.	7,70	kWh/ kW/d

A vizsgálat eredménye egy olyan módszertan megalkotása, amely a hálózathoz való integrálhatóság szempontjából áttekinthető módon értékelni és minősíteni képes az eltérő létesítési megoldásokat. A építészeti megoldásokkal a rendszerbarát fotovillamos rendszerek definiálhatók. Az indikátorok méréssel igazolhatók és az eredmények általánosíthatók. A csúcsidőszaki variabilitás, linearitás, csúcsmagasság és a csúcslevágás hatékonysága mutatók alkalmasak az egyes PV telepítési megoldások objektív és összevethető minősítésre.

3.5. Numerikus döntéstámogató rendszer megújuló energetikai célstruktúra optimalizálásához

Adott megújuló energia célstruktúra kialakítása a különböző technológiák illetve a technológiák mögötti megújuló energiaforrások közötti választást tesz szükségessé. Ez a választás többféle megközelítéssel és különböző érdekek közötti politikai súlyozás eredménye, de a meghatározó döntési szempontok súlyának megfelelő objektív numerikus eljárást sikerült kidolgoznom.

A numerikus feladat a három extrém változat kombinálásával nagyszámú változat előállítására és a változatok objektív indikátorok segítségével történő

3. Eredmények

rangsorolása. A kombináláshoz öt különböző paramétert definiáltam. Ezek közül három paraméter mindig azt az adott arányt mutatja, hogy az egyes extrém változatok milyen arányban kerülnek figyelembe vételre a kombináció során. Összegük egy. A fennmaradó másik két paraméter kétféle együttesen is használható alternatív kombinációs eljárás alkalmazása arányait jellemzi, így ezek összege szintén egy. Az egyik kombinációs transzformáció alkalmazása után minden korábban valamely extrém változatban már elfogadottan szereplő technológia megmarad, de míg korábban a teljes műszaki és fenntarthatósági megfontolásból kiaknázható potenciálok szerepeltek egy-egy extrém változatban, addig a transzformáció során a potenciálok megcélzott kihasználása az adott arányok szerint csökken. A másik transzformáció során viszont a gyengébb prioritású, de az egyes extrém változatokba korábban még beférő technológiák esnek ki, viszont ami a transzformáció után megmarad, az teljes potenciálértékén marad. Egy extrém alapváltozat kijelölését és numerikus transzformációját a 6. táblázatban szemléltetem.

6. táblázat: Extrém optimális változatok kombinációs lehetőségei

Rang-sor	Technológia sorszáma	A figyelembe vehető potenciál	Ajánlott cél extrém változat esetén	α kombináció után maradó cél	β kombináció után maradó cél
1.	N_1	P_1	P_1	αP_1	P_1
2.	N_2	P_2	P_2	αP_2	P_2
...
H	N_h	P_h	P_h	αP_h	λP_h
I	N_i	P_i	P_i	αP_i	0
...
M	N_m	P_m	μP_m	$\alpha\mu P_m$	0
N	N_n	P_n	0	0	0
...
Z	N_z	P_z	0	0	0

Az egyes transzformációk során kapott eredményei mátrix formában felírhatók. A változatok véglegesítése előtt a halmozódásokra és a nagyteljesítményű technológiák darabszámától diszkréten függő értékekre is oda kell figyelni. Az egyes technológiák jellemzőinek és hatásainak elemzésével minden egyes változat mögé generálható egy hatásmátrix. A hatásmátrix ismeretében és célszerűen megválasztott eredményindikátorok alkalmazásával az egyes változatok értékelhetők és rangsorolhatók. A 2010-ben végzett kutatási-fejlesztési feladat során az egyes kidolgozott változatok értékeléséhez a következő eredmény indikátorokat alkalmaztam: támogatás igény, üzemen tartási támogatást biztosító pénzügyi keret 2020-ban; munkahelyteremtés és az elérhető üvegházhatású gázcsökkentés mértéke.

4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

Az elvégzett kutatómunkám tudományos eredményi témák szerinti csoportosítással az alábbiak szerint foglalható össze:

1. Napelemes rendszer dinamikus teljesítmény előrejelzésének új módszere

Új teljesítmény előrejelzési módszert dolgoztam ki a napelemes rendszerek teljesítményének rövid távú előrejelzésére, melyet dinamikus hibajel vezérelt előrejelzésnek neveztem el. A módszer genetikus algoritmus megközelítéssel egy megelőző mintavételezési időszak alatti teljesítmény adatokból készít előrejelzést. A mért teljesítmények és a fizikai modell alapján előzetesen számított várható teljesítmények közötti különbségek az adott időszaki, szokásostól eltérő körülmények és folyamatok komplex hatását fejezik ki. A mintavételi időszakban képzett dinamikus hibasorozat az összetett hatásokat, mint a jövőre genetikusan kódolt tulajdonságok lehetőségeit szemlélteti. A hibasorozat statisztikai értékelése lehetővé teszi, hogy egy közeli időpontra a fizikai alapú várható értékek lehetséges hibáira különböző valószínűségek legyenek meghatározhatók. A legvalószínűbb hibaérték dekódolásával a teljesítmény előrejelzés elkészíthető. Egy fizikai alapú várható teljesítménnyel egyenértékű és a valódi teljesítménnyel egyenértékű ekvivalens csúcskihasználási óraszámok közötti fajlagos hiba t időponti legvalószínűbb értékére a következő összefüggést határoztam meg:

$$H_t = H_{t-1} \left(1 + \frac{dH}{dt}\right) \approx H_i \left(1 + \frac{dH_i}{dt}\right)^{\frac{\Delta t_{t-n}}{60[s/\text{min}]}} \approx H_i \left(1 + \frac{\Delta H_i}{\Delta t}\right)^{0,4 \frac{\Delta t_{t-n}}{60[s/\text{min}]}}. \quad (9)$$

2. Napelemes rendszer átlagteljesítményének adott időszakon belüli előre jelezhetősége

Adott menetrendi periódusra részben mérési adatokkal, részben a dinamikus hibajel vezérelt teljesítmény előrejelzéssel menetrendi időszak átlagteljesítményére vonatkozó dinamikus előrejelzést dolgoztam ki. Igazoltam, hogy alkalmas körülmények között 5 perccel a menetrendi szakasz vége előtt öt mért és tíz előre jelzett rendszer teljesítmény alapján az előrejelzés 5% alatti relatív hibával elkészíthető, valamint a fényviszonyok erős variabilitása mellett is ez 9% közeli relatív hiba biztosítható. Az előrejelzés megbízhatóságának vizsgálatára új paramétert vezettem be, melyet fajlagos változékonysági tényezőnek neveztem el:

$$v_{nap} = \frac{V_{nap}}{\Delta t} = \frac{(4a_1 + 3a_2 + 2a_3 + a_4 + 4b_1 + 3b_2 + 2b_3 + b_4)}{\Delta t}. \quad (10)$$

Ez a tényező egy adott időtartam alatt a napelem működésének változékonyságát és a napelem teljesítményének előre jelezhetőségét kifejező mutató. Az előrejelzés átlagos relatív hibája és a fajlagos változékonysági tényező közötti erős korrelációt 95%-os megbízhatósággal igazoltam.

3. Erőmű alapú csoportszintű előrejelzés és valós idejű monitoring megbízhatósága

Kísérleti vizsgálattal igazoltam, hogy egyes fizikailag, vagy csak virtuálisan képzett napelemes rendszer csoportok együttes teljesítményére megbízható előrejelzés készíthető egyetlen kiválasztott referencia erőmű teljesítményének valós idejű nyomon követésével és a dinamikus hibajel vezérelt előrejelzési módszer kiterjesztett alkalmazásával. További mérésekkel megállapítottam, hogy a referencia fotovillamos erőmű mérésére kidolgozott előrejelzési módszer kis átalakítással a csoport együttes teljesítményének valós idejű nyomon követésére is alkalmas. A kísérleti eredmények alapján igazoltam, hogy a referencia erőmű valós idejű teljesítménymérésére alapozott csoportszintű előrejelzés és a csoportszintű valós idejű monitoring megbízhatósága a napelemes rendszercsoport homogenitásának a függvénye

4. Fotovillamos rendszerek hálózat integrálhatóságának minősítése

A fotovillamos elemek telepítésénél a dőlésszögek és a tájolások megváltoztatásával az egyedi energiatermelés helyi optimumától eltérő, de rendszer szinten kedvezőbb állapot hozható létre. A rendszer elemeinek részletes kidolgozásával és kísérleti tesztelésével az egyes fotovillamos rendszerek építési megoldásait objektívan minősítő rendszert hoztam létre, amely az egyes telepítési változatok osztályba sorolására, minősítésére a közüzemi hálózati rendszer stabilitására való negatív hatások szempontjából alkalmas.

Egy rendszerszintű hatékonyság és integrálhatóság érdekében alkalmazott telepítési megoldás műszaki költségének minősítésre bevezettem F_4 csúcslevágási hatékonysági mutatót:

$$F_4 = \frac{\bar{E}_R - \bar{E}_{PV}}{F_{3,R} - F_{3,PV}}. \quad (11)$$

Ez egy olyan új indikátor, mely alkalmas az 1 kW/kW_p csúcslevágás műszaki költségének az összehasonlítható meghatározására. A csúcslevágási hatékonysági mutató az integrálhatóságot szolgáló építészeti megoldás miatt bekövetkező villamosenergia termelési képesség fajlagos csökkenésének értékelésére szolgáló, a megoldás megfelelőségének minősítésére alkalmas szám.

5. Numerikus döntéstámogató rendszer megújuló energia célstruktúra optimalizálásához

Kidolgoztam egy új döntéstámogató numerikus optimalizációs módszert, amely a költséghatékonyság, a közvetlen társadalmi hatások (munkahelyteremtés) és a környezetvédelmi szempontok (üvegházhatású gázkibocsátás csökkentés)

együttes értékelésével alkalmas arra, hogy egy döntéshozatal számára az egyes döntési szempontok (preferenciák) nyíltan és előre rögzíthető súlyainak megfelelően optimális megújuló energiafejlesztési célstruktúrát definiáljon.

Igazoltam, hogy az egyes kiválasztott főprioritások szerint kidolgozott extrém változatok numerikusan kombinálhatók úgy, hogy a kombináláskor egyes input indikátorok szisztematikus változtatásaival szabadon választott számú változatok (célstruktúrák) hozhatók létre. Az egyes változatok megvalósításának azonos elvek szerint történő modellezésével és eredményindikátorok alapján a döntési súlyok alapján értékelhetők és rangsorolhatók azzal a feltétellel, hogy az $E_{cél}$ maximális és minimális értékei a döntéstámogató rendszertől függetlenül meghatározottak. Az input indikátorok függvényében az optimalizációs eljárásra a következő célfüggvényt állítottam fel:

$$E_{cél} = \alpha_1(P_1^I + P_2^I + \dots + \mu^I P_m^I) + \alpha_2(P_1^{II} + P_2^{II} + \dots + \mu^{II} P_m^{II}) + \alpha_3(P_1^{III} + P_2^{III} + \dots + \mu^{III} P_m^{III}) + (P_1^I + P_2^I + \dots + \lambda^I P_h^I) + (P_1^{II} + P_2^{II} + \dots + \lambda^{II} P_h^{II}) + (P_1^{III} + P_2^{III} + \dots + \lambda^{III} P_h^{III}). \quad (12)$$

A kifejlesztett optimalizációs módszer alkalmas regionális, országos illetve nemzetközi szinten is a megújuló energetikai technológiák műszaki jellemzőin alapuló technológiáinként meghatározható optimális és objektív stratégiai célok rögzítésére. A döntéstámogatási rendszer objektív, mivel nem engedi, hogy egyes kiemelt technológiai célértékek önkényesen legyenek meghatározva. Csak az előre rögzített peremfeltételek és preferenciák a meghatározók.

5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

A kutatásom eredményei megalapozott megoldásokat és továbblépési irányokat adnak. A javaslataimat és következtetéseimet három részre bontva ismertetem.

A genetikus algoritmus megközelítésű, dinamikus, mintavételi adatok vezérelte előrejelzési technikák napjainkban egyre inkább elfogadottnak számítanak. Azonban ritka az olyan megoldási kísérlet, amely nem nagyszámú paramétermérésekkel és ezekből felállított dinamikus modellekkel operál. Az eredmények alapján úgy látom, hogy szakmailag megalapozott a tipikus meteorológia évre készített várható teljesítményértékek és kizárólag egy-egy referencia erőmű által kiadott teljesítménymérés alapján elfogadható szintű rövid távú előrejelzések készítése. Elkerülhető azonban a tipizált viszonyok költséges, 15-20 paraméteres meghatározása. A kutatásom során felvettem olyan további irányokat, mely a fenti megközelítés mellett az új előrejelzési módszertan alkalmazhatóságát, megbízhatóságát tovább javítaná.

Ezen irányok közül a sugárzási intenzitás olyan mérése tűnik jó iránynak, mely során elsősorban az intenzitása dinamikus változásainak mértéke és gyakorisága jelent lényegi információt az előrejelzések javításához. Ha a dinamikus változásokra meteorológiai előrejelzés lenne biztosítható, hasznos lenne, de úgy tűnik, hogy rövid távú előrejelzések esetén a valós idejű meteorológiai mérések is már elegendő és költséghatékony megoldások lehetnek. A munkám leírt új módszer alkalmas lehet nagyobb kisteljesítményű fotovillamos rendszerek virtuális vagy valós csoportjai esetében kísérleti előrejelzések megvalósítására, mely során az előre jelzést segítő paraméterek rendezetten vizsgálhatók és elemezhetők. Míg az egyedi fotovillamos rendszerek előrejelzései a prediktív szabályozások megvalósításait segítik, a referencia rendszer mért teljesítménye alapján történő csoportszintű teljesítmény előrejelzés az okos hálózati rendszerek valós idejű nyomon követésére lehet költséghatékony megoldás.

A kisebb fotovillamos rendszerek közüzemi hálózatra való hatása szempontjából rendszerbarát minősítésének pontosabb meghatározáshoz további vizsgálatokat érdemes végezni. Ezen túlmenően a napelemek rendszerbarát telepítését célzó különböző tipikus műszaki-építészeti megoldások feltérképezésére volna szükség ahhoz, hogy a megoldások hatásosságát és költséghatékonyágát a kidolgozott módszerrel a műszaki gyakorlatban is értékelni és a jobb telepítési megoldásokat elősegíteni lehessen.

A gazdasági, társadalmi és környezetvédelmi szempontú célok transzparens meghatározására nagy az igény nemzetközi, nemzeti és regionális szinten egyaránt. A kifejlesztett numerikus döntéstámogatói rendszer alkalmazásához nem nélkülözhetők a szóba jöhető technológiák potenciáljainak, költségeinek, társadalmi és környezetvédelmi hatásainak részletes meghatározásai. Ezekkel a racionális, transzparens és optimális célmeghatározása biztosítható. A numerikus optimalizációs eljárás ehhez kész és alkalmazhatónak bizonyult.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A fotovillamos rendszerek technológiai érettsége olyan szintre ért, hogy a korábbi marginális szerepből kitörve egyre jelentősebb súlyt képvisel a világ villamosenergia termelésében. A napenergia magas potenciálja és a fotovillamos technológia szinte mindenhol lehetséges alkalmazhatósága a műszaki fejlesztés révén elért eredményekkel együtt előre vetíti, hogy a jövőben a napelem jelentősége még inkább növekedni fog. A dolgozatban bemutattam, hogy ennek az intenzív folyamatnak a hatása társadalmi és környezetvédelmi szempontból kedvező, ám rendkívül összetett, viszont az energiatermelés változékonyság komoly kihívást jelent a hálózati villamosenergia biztonságos üzemeltetése szempontjából. Bemutattam, hogy a hálózatba történő integráció nehézségei talán a legnagyobb akadályt jelentik a napelem technológia további terjedése előtt. A változékony energiatermelés előrejelzési lehetőségeinek kutatása ezért kulcsfontosságú. A dolgozatomban részletesen bemutatattam a különböző előrejelzési módszerek főbb típusait illetve ismertettem a különböző lehetséges előrejelzési célokat, valamint a napsugárzási potenciál fizikai alapú meghatározásához szükséges elméleti alapokat.

A dolgozatban ismertetett kutatási munkám az integráció kérdéskörére fókuszál. Az integráció erősítésének a lehetőségét három oldalról közelítettem meg. Egyrészt az előrejelzési lehetőségek okos alkalmazásával, másrészt a fotovillamos rendszerek telepítése során elvárt rendszerszinten kedvező megoldások alkalmazásával, harmadrészt a társadalmi és környezetvédelmi előnyök elismertetésével és a döntési folyamatok transzparens alkalmazásával foglalkoztam. Részletesen ismertetett kutatási tevékenységem és eredményeim ezekre a kihívásokra reagálnak.

A fotovillamos rendszerek kiadott teljesítményeinek rövid időszakon belüli előre jelezhetőségére genetikus megközelítéssel, dinamikus adatvezérelt előrejelzési módszert dolgoztam ki. E kidolgozott módszert alkalmaztam az egyes menetrendi periódusok átlagteljesítményére vonatkozó előrejelzésekre is. Az előrejelzési lehetőségeket teszteltem. Az időjárás változékonyságának jellemzésére új indikátort alkottam, melynek függvényében az előrejelzési módszer megbízhatóságát értékeltem. A méréseket és értékeléseket egyedi rendszerekre, de rendszercsoportokra vonatkoztatva is elvégeztem. Az előrejelzés mellett a rendszercsoportok valós idejű, referencia rendszer mérésén alapuló monitoring rendszer alkalmazhatóságát is vizsgáltam.

Egy bemutatott minta projekt kialakításánál a cél a hálózati integrálhatóságra kedvezőbb, eltérő karakterisztikájú napelemes rendszer telepítése volt. A minta rendszer mérési adatait egy referenciarendszer adataival vettem össze, és egy komplex értékelési rendszert állítottam fel. Ennek a használhatóságát kísérletileg igazoltam. A dolgozatban továbbá ismertettem azt a numerikus gazdasági, társadalmi és környezetvédelmi szempontból optimalizáló matematikai megoldást, melyet 2010-ben a Nemzeti Megújuló Energetikai Cselekvési Terv keretszámainak kialakítása során élesben tesztelni is volt alkalmam.

7. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ KIEMELT PUBLIKÁCIÓK

Lektorált cikk világnyelven

1. Kapros, Z. (2012): Predictive modelling for low power photovoltaic systems, Mechanical Engineering Letters, Volume 8, pp. 84-89.
2. Kapros, Z. (2012): Reference system based performance examination of PV power plant, Hungarian Agricultural Engineering, No. 20/2012, Gödöllő, pp. 40-42. HU ISSN 0864-7410
3. **Kapros, Z.**, Farkas I. (2016): Smart Tariffs and Photovoltaic System Sizing, Journal of Scientific and Engineering Research, 3(6), pp. 298-306. ISSN: 2394-2630
4. Kapros, Z. (2017): A dynamic data-driven forecast prediction methodology for photovoltaic power systems, Időjárás, (in press), (IF: 0,810*)

Lektorált cikk magyar nyelven

5. **Kapros Z.**, Termann Zs. (2011): Kis energiaigényű épület fotovillamos rendszerrel, Magyar Energetika, XVIII. évf., 2. sz., 24.-27. o.
6. **Kapros Z.**, Unk Jné. (2011): Javaslat a megújuló energetikai átvételi rendszer átalakítására GREEN-X alapon, Magyar Energetika, XVIII. évf., 5. sz., 2-7. o.
7. Kapros Z. (2012): A fotovillamos energiahatékonysági potenciál, Mezőgazdasági Technika, LIII. évf., 5. sz., 14-15. o.
8. **Kapros Z.**, Alföldy-Boruss M. (2014): Az energiahatékonyság és a kötelezettségi rendszer, Magyar Energetikai, XXI. évf., 1. sz., 31-37. o.
9. Kapros Z. (2017): A napenergia hasznosítás környezeti és társadalmi hatásai, Magyar Tudomány, (megjelenés alatt)

Nemzetközi konferencia kiadvány

10. Kapros, Z. (2006): Alternative solutions with autonomous energy supply for mixed farms, Energy and the environment 2006 International Congress, Opatija, Croatia, 25-27. October, 2006. pp. 349-358, ISBN 953-6886-09-X.
11. Kapros, Z. (2008): Advantages and differences between PV power plants and integrated solar home systems, Energy and Environment in the practice, Seminar of Doctorate Students from Justus Liebig University (Giessen) and Szent Istvan University, 19-21. August, 2008, Gödöllő, Hungary. pp. 79-86.
12. Kapros, Z. (2015): The reference PV power plant-based method, Proceedings of the ISES Solar World Congress 2015, Daegu, Korea, 08-12. November, 2015, pp. 506-516. ISBN 978-3-981 4659-5-2,
13. Kapros, Z. (2016): A dynamic data-driven forecasting methodology for small-scale photovoltaic power systems, Energy and the environment 2016 International Congress, Opatija, Croatia, 26-28. October, 2016. pp. 257-266. ISBN 978-953-6886-23-4