

Mayer Martin János, Dr. Dán András

Napelemes rendszerek modellezése

A napelemes rendszerek modellezésének célja a főbb üzemi jellemzők meghatározása a működésüket befolyásoló környezeti paraméterek függvényében. A napelemek és inverter jellemzőit is figyelembe vevő modelleken alapuló szimulációs program lehetőséget teremt a napelemes kiserőművek működési sajátosságainak széles körű vizsgálatára. Az eredmények alapján bemutatom a sugárzás és a hőmérséklet változásának hatását a napelemek hatásfokára, valamint a sugárzás hirtelen változása okozta tranziens jelenségeket. A szimuláció segítségével számításokat végeztem a napelemes rendszerek várható éves energiatermelésére, melynek ismerete a megtérülésszámításnál fontos, foglalkoztam a rendszer teljesítményének rövidtávú előrejelzésének lehetőségeivel is, valamint az inverter optimális méretezésének szempontjaival.

The main goal of the PV system models is the calculation of the main operational characteristics as a function of environmental data. A simulation program based on the models of solar cells and inverter enables the extensive analysis of the PV systems. The PV system efficiency was presented as a function of solar radiation and temperature, as also the transients caused by the quick radiation changes. Calculations were made with the simulation program to predict the system's annual energy production, which is very important in payback calculations, while the possibilities of short-term power prediction and the principles of the optimal inverter sizing were also presented.

1. BEVEZETÉS

A napenergia villamosenergia-termelésre történő hasznosításának legelterjedtebb eszközei a napelemes rendszerek, melyek a napsugárzást közvetlenül alakítják villamos energiává. A napelemek beépített teljesítménye az elmúlt évtizedben hatalmas mértékű növekedésnek indult, 2013 végére világszerte meghaladta a 138 GW értéket. A fejlődés eleinte az Európai Unió országaiiban bontakozott ki, ahol azonban a 2011-es csúcs óta eltelt két évben folyamatos és jelentős mértékben csökken az éves szinten telepített napelemes teljesítmény. A világszintű növekedés ennek ellenére töretlenül folytatódik, súlypontja az elmúlt évben az európai visszaeséssel párhuzamosan lendületes fejlődésnek induló távol-keleti és amerikai piacokra helyeződött át. Magyarországon 2013 végéig mindösszesen 22 MW összteljesítményű napelemes rendszer létesült, amely az európai átlaghoz és a hazai villamosenergia-rendszer (VER) méretéhez képest is elenyésző érték [1].

A napelem-telepítési ütem hirtelen megváltozásának okát az állami támogatási lehetőségek átalakulásaira vezethetjük vissza. A napelemes rendszerek napjainkban támogatás nélkül, tisztán piaci alapon az esetek döntő többségében nem térülnek meg a rendszer várható élettartama alatt, így napelemek telepítése csak megfelelő mértékű támogatás mellett kifizetődő. A támogatás jelentkezik közvetlenül a létesítés

során, illetve a rendszer működése során biztosított kedvezményes villamosenergia-átvételi ár formájában is. A Magyarországon létező kötelező átvételi rendszer (KÁT), valamint bizonyos szempontból a háztartási méretű kiserőművek (HMKE) esetén igényelhető szaldós elszámolás is támogatást biztosít a napelemes rendszerek számára, ennek mértéke azonban, ahogy a létesítési adatok is mutatják, nem elegendő a napelemek jelentős elterjedéséhez. A támogatások növekedése és a technológia árának csökkenése hatására néhány éven belül várhatóan Magyarországon is az EU több országában tapasztaltnál hasonló növekedés bontakozik majd ki.

A napelemes rendszerek modellezése jó lehetőséget biztosít a napelemek működési sajátosságainak részletesebb vizsgálatára, valamint az energiatermelési lehetőségek pontosabb felmérésére, hozzájárulva a technológia megismeréséhez és tudatosabb alkalmazásához a várható széles körű elterjedés során. Napelemes rendszerek nagy penetrációja esetén nagyon fontos kérdés az ún. rendszerintegráció is, hiszen időjárásfüggő, szabályozatlan teljesítményük miatt veszélyt jelenthetnek a VER stabilitására. A modellezés során az ezzel kapcsolatos alapokat is áttekintettem.

2. MODELLEK

2.1 Modellalkotás szempontjai és célja

A napelemes rendszerek teljesítménye az időjárási jellemzők függvénye, a modellezés célja az ezek közti kapcsolat leírása. A napelemek teljesítményét leginkább befolyásoló környezeti paraméterek a sugárzás intenzitása és a külső hőmérséklet, így ezek szolgálnak a modell bemenő adataiként. A legfontosabb kimenet a teljes rendszer által a hálózatba táplált teljesítmény, azonban a modell képes kiszámítani a különböző veszteségek és hatásfokok értékeit, valamint számos további jellemzőt is. Az interneten is elérhető, napelemes rendszerek működését szimuláló programok általában csak egy teljesítmény- vagy adott időszakra vonatkozó energiatermelési adatot adnak eredményül. Jelen, saját készítésű modell előnye ezekkel szemben, hogy a számítás részeredményei is hozzáférhetőek, melyek jelentősen segítik a kapott eredmények részletes értékelését és szerteágazóbb következtetések levonását.

A modellezés során igen fontos, azonban nem kizárólagos szempont a pontosság, lényeges emellett a számítási idő, valamint a rendszer leírásához szükséges paraméterek száma is. Ami a számítási időt illeti, amennyiben csak egyszeri vizsgálatokat vagy előrejelzéseket szeretnénk készíteni, akkor a magasabb futásidő is elfogadható, valós idejű működés szükségessége esetén azonban fontos a számításgyorsítást minimalizálása. Összetettebb, és ezáltal pontosabb modell készítéséhez több információra van szükség a vizsgált rendszerről, a több szükséges adat azonban megnehezíti a modell használatát, valamint korlátozza a kapott eredmények érvényességi körét is. Munkám során arra törekedtem, hogy az elkészített modell az egyes berendezések adatlapján található, a gyártók által általánosan közölt adatok alapján képes legyen elvégezni a számítás, ezáltal tetszőleges napelemes rendszer vizsgálatát lehetővé téve.

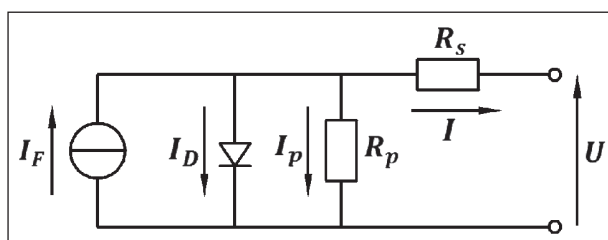
Legtöbb esetben a fenti követelmények egy modellben nem elégíthetők ki, ilyenkor több, különböző bonyolultságú modellt is beépítettem a számítások elvégzését szolgáló, Matlabban készített szimulációs programomba. A szimulációs vizsgálatok futtatása során tehát lehetőség van több különböző modell közti választásra, valamint időtakarékosági célból vagy bizonyos szükséges adatok hiánya miatt a számítás egyes részeinek elhanyagolására is.

2.2 Napelemmodell

A napelemmodulok teljesítménye legegyszerűbben az alábbi egyenlet segítségével számítható [2]:

$$P_{mpp} = P_{mpp,STC} \cdot \frac{G}{G_{STC}} \cdot \left[1 + \mu_{P,mpp} \cdot \frac{T_c - T_{c,STC}}{100} \right] \quad (1)$$

ahol P_{mpp} [W] a modul teljesítménye a legnagyobb teljesítményű pontban (maximum power point – MPP), G [W/m²] a modul felületét érő globálisugárzás, T_c [°C] a cellahőmérséklet, $\mu_{P,mpp}$ [%/°C] a teljesítményre vonatkozó hőmérsékleti együttható. Az STC (Standard Test Conditions) index a napelemek névleges állapotára utal, amelyre az adatlapon található adatok érvényesek (1000 W/m² sugárzás és 25 °C cellahőmérséklet). A modell előnye az egyszerű és gyors számítás és a cellahőmérséklet hatásának viszonylag pontos figyelembevétele. Hátránya, hogy csak az MPP-re végezhető el a számítás, a munkaponti feszültség és áram értékét nem ismerjük, valamint a módszer a hatásfok sugárzásfüggését sem veszi számításba.



1. ábra Napelemmodul helyettesítő áramköre

Pontosabb és részletesebb modellt kaphatunk a modul karakterisztikáinak meghatározása által, melyhez az 1. ábrán látható helyettesítő áramkört vehetjük alapul. Az áramgenerátor modellezi a beeső fény okozta töltésszétválást, a dióda a p-n átmeneten fellépő rekombinációt, az ellenállások pedig a napelem belső veszteségeit. A helyettesítő áramkör alapján az alábbi egyenlet írható fel:

$$I = I_F - I_0 \cdot \left(\exp \left(\frac{q(U + I \cdot R_s)}{n \cdot k \cdot T_c \cdot N_s} \right) - 1 \right) - \frac{(U + I \cdot R_s)}{R_p} \quad (2)$$

ahol I [A] és U [V] a modul árama és feszültsége, I_F [A] az ún. fény áram, a beeső fotonok által okozott töltésszétválásnak megfelelő áramérték, I_0 [A] a dióda telítési árama, q [C] az elemi töltés, n [-] a diódára jellemző állandó, k [J/K] a Boltzmann-állandó, T_c [K] a cellahőmérséklet, N_s [-] az egy modulban sorba kapcsolt cellák száma, R_s és R_p [Ω] pedig a soros illetve párhuzamos ellenállás. A párhuzamos ellenállás hatását elhanyagoltam, mivel a korszerű napelemek esetében ennek értéke kellően nagy ahhoz, hogy elhanyagolása nem vezet jelentős hibához, azonban jelentősen egyszerűsíti a modellt. A (2) egyenletben szereplő ismeretlen paraméterek értékének, valamint hőmérséklet- és sugárzásfüggésének számítását a Townsend [3] által bemutatott módszerrel végeztem a karakterisztika nevezetes pontjainak adatai alapján. A karakterisztika ismeretében tetszőleges munkapontban meghatározható a modul teljesítménye, árama és feszültsége, valamint a modell pontosan leírja ezek hőmérséklet- és sugárzásfüggését is. Hátránya a numerikus számítás szükségessége a (2) egyenlet transzcendens volta miatt, mely jelentős számítási kapacitást igényel.

A cellahőmérséklet az energiamegmaradás elve alapján, a névleges üzemi cellahőmérséklet (NOCT) felhasználásával az alábbi módon számolható:

$$T_c = T_k + \frac{G}{G_{NOCT}} \cdot (T_{c,NOCT} - T_{k,NOCT}) \cdot \left(1 - \frac{\eta}{\tau \alpha} \right) \quad (3)$$

ahol T_k [°C] a külső hőmérséklet, η [-] a modul hatásfoka, τ [-] a borítás transzmissziós tényezője, valamint α [-] a modul abszorpciós tényezője. A NOCT index a névleges üzemi cellahőmérséklet mérésekor érvényes állapotra (800 W/m² sugárzás és 20 °C külső hőmérséklet) utal. A cellahőmérséklet a modul hatásfokától is függ, hiszen az előállított villamos energia nem fordítódik a modul melegítésére, ez iterációs számítást tesz szükségessé.

2.3 Egyenáramú áramköri és inverter modell

Az egyenáramú áramkör modellje a sorba és párhuzamosan kapcsolt modulok száma alapján kiszámolja az inverterre jutó bemeneti feszültséget és áramot. Amennyiben az alkalmazott vezetékek adatai ismertek, a modell figyelembe veszi a feszültségesést és teljesítményvesztést is.

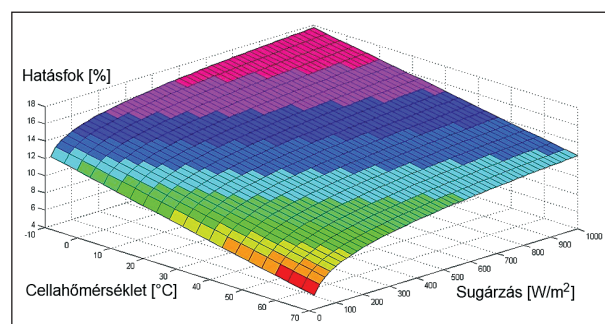
Az inverter modell fő feladata az inverteren jelentkező veszteségek számítása, melyek értéke a DC feszültség valamint a teljesítmény nagyságától függ. A bemeneti teljesítmény függvényében a veszteségeket másodfokú polinommal közelítettem, mely jól illeszkedik a gyártó által mérésrel meghatározott adatokra. Állandó feszültség mellett a szötelemek jelentkező veszteségek állandóak, míg a kapcsolóelemek vesztesége az átvitt teljesítménnyel, a soros elemeké pedig annak négyzetével arányos. A DC feszültség hatását részletesebb adatok hiányában lineáris interpolációval vettem figyelembe. Éves energiatermelés számítása esetén az átlagos európai hatásfok segítségével egyszerűsített számítás is végezhető.

Az inverter modell feladata a készülék működési korlátainak figyelembevételével a valóságban nem elérhető üzemiállapotok kiszűrése. Amennyiben a napelemek által biztosított teljesítmény vagy a DC feszültség kívül esik az inverter működési határain, a modell a napelemek egy, az MPP-nél alacsonyabb teljesítményű, megvalósítható munkapontjával számol.

3. VIZSGÁLATI EREDMÉNYEK

3.1 Napelemek hatásfoka

Az elkészített szimulációs program lehetővé tette a napelemmodulok hatásfokának vizsgálatát különböző időjárási jellemzők között. A 2. ábrán egy diagramba foglalva látható a sugárzás és a cellahőmérséklet hatása a napelemek hatásfokára a legpontosabb modell számításai szerint.



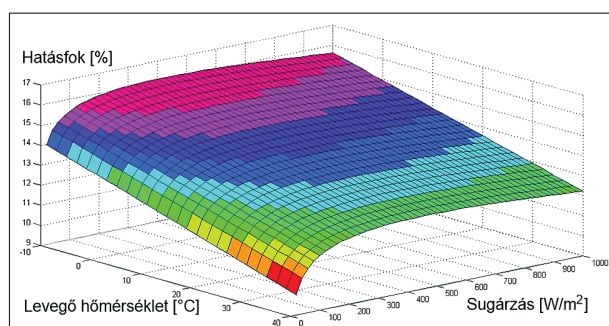
2. ábra Napelemmodul hatásfoka a sugárzás és cellahőmérséklet függvényében

A cellahőmérséklet növekedésével a hatásfok lineáris csökkenését figyeljük meg, így az egyszerűbb modellben bemutatott, hőmérsékleti együtthatót alkalmazó számítási mód valóban alkalmas a jelenség pontos leírására. A hatásfok a sugárzástól is hasonlóan jelentős mértékben függ, mely jelenség leírására azonban annak erős nemlinearitása miatt a legtöbb egyszerűbb modell nem alkalmas. A hatásfok a sugárzás

csökkenésével folyamatosan csökken, így, mivel a napelem névleges (STC) adatai 1000 W/m² sugárzásra vonatkoznak, a hatásfok sugárzásfüggésének elhanyagolása szinte mindig a leadott teljesítmény túlbecsülését, tehát a kedvezőbb eset irányába történő tévedést jelenti.

A hatásfok változásának okát is vizsgáltam: a szimulációs eredmények alapján az MPP árama a rövidzárási árammal és így a sugárzással egyenes arányban változott, így a hatásfok alakulását közvetlenül az MPP feszültség befolyásolja. A hatásfok megváltozása tehát minden esetben az MPP feszültség változására vezethető vissza, mely a hőmérséklet növekedése esetén a rövidzárási feszültség csökkenéséből, míg a sugárzás csökkenésekor az I-U karakterisztika eltolódásából adódik. A fentiek alapján a napelemmodulok hatásfokának alakulása egyszerűen és kellő pontossággal meghatározható az MPP feszültség mérésével.

A gyakorlati számításokban a cellahőmérséklet helyett a külső hőmérséklet ismert. A 3. ábra a hatásfok alakulását a sugárzás mellett a cellahőmérséklet helyett a külső hőmérséklet függvényében mutatja.



3. ábra Napelemmodul hatásfoka a sugárzás és külső hőmérséklet függvényében

A legnagyobb eltérés a 2. ábrához képest, hogy ebben az esetben a hatásfok nem növekszik folyamatosan, hanem magas sugárzás esetén valamelyest csökken. A csökkenés oka a magasabb cellahőmérséklet, hiszen állandó környezeti hőmérséklet mellett a nagyobb sugárzás a modulok nagyobb mértékű felmelegedéséhez vezet. A hatásfoknak a sugárzás függvényében a közepes sugárzási tartományban van maximuma, tehát a napelemek adott környezeti hőmérséklet mellett a közepes napsugárzást tudják a legnagyobb arányban hasznosítani.

A teljes napelemes rendszer hatásfokát vizsgálva nem tapasztalunk jellegi eltérést a modul hatásfokához képest. A vezetékek és az inverter veszteségei állandó, a sugárzással arányos, valamint annak négyzetével arányos tagokból állnak, így az ebből kifejezett hatásfok szintén közepes sugárzás esetén a legmagasabb, a teljes rendszer figyelembevétele tehát erősíti a 3. ábrán tapasztalható jelet. Jelentős különbség csak kis sugárzás esetén tapasztalható, ahol az inverter saját teljesítményigénye jelentőssé válik az előállított teljesítményhez képest, ám ennek az alacsony értékek miatt kevés a gyakorlati jelentősége.

3.2 Éves energiatermelés előrejelzése

Az éves szinten várható energiatermelés előzetes becslésének nagy jelentősége van a beruházás megtérülési számításaira, hiszen a napelemes rendszerek bevétele a megtermelt energiából származik. A megtérülésszámítás egyik legegyszerűbb módja a nettó jelenérték (NPV) számításra alapul. A (4) egyenlet egy egyszerűsített formulát mutat, amely azonban így is tartalmazza a megtérülést befolyásoló legfontosabb tényezőket.

$$C_0 = c \cdot E \cdot \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r \cdot (1+r)^n} \right) \quad (4)$$

ahol C_0 [Ft] a beruházási költség, c [Ft/kWh] a villamos energia átvételi ára, E [kWh/év] az éves szinten megtermelt energia, r [v.e.] az elvart hozam ráta, n [év] pedig a megtérülési idő. A beruházási költségek a létesítés során ismertek, az átvételi tarifa a megkötött szerződéstől függő, általában állandó érték, így a megtérülési idő szempontjából az egyetlen ismeretlen paraméter a várható energiatermelés, ezért fontos ennek minél pontosabb előrejelzése. Az elvart hozam ráta alapvetően a beruházás kockázatától függ, az alacsonyabb érték gyorsabb megtérülést eredményez, és a bizonytalanság csökkentéséhez hozzájárul a minél pontosabb előrejelzésből adódó tervezhetőség is.

Az előrejelzés készítéséhez meteorológiai adatbázisra van szükség, amely egy jellemző év párhuzamosan mért sugárzás- és hőmérsékletadatait mutatja az adott földrajzi helyen. A számítást két eltérő felépítésű adatbázis alapján is elvégeztem, melyek közül az egyik az Európai Bizottság Közös Kutatóközpontjának adatbázisa (PVGIS) [4]. Ennek előnye, hogy könnyedén hozzáférhető és Európa teljes területére tartalmaz adatokat, hátránya azonban, hogy minden hónapban csak egy átlagos nap adatait tartalmazza negyedórás bontásban. A másik, Meteonorm nevezetű adatbázis a PVsyst program ingyenes próbaverziójából származik [5], így hátránya a korlátozott hozzáférés, előnye azonban, hogy az év minden napjáról tartalmaz órás bontású adatpárokat.

A számításokat egy Debrecen közeli helyszínen (é. sz. 47° 29' 25", k. h. 21° 35' 59") végeztem el. A vizsgált rendszer két párhuzamosan kapcsolt ágba összesen 30 darab BOSCH c-Si M60 250 monokristályos, 250 W_p névleges teljesítményű modult tartalmaz, mely összesen 7,5 kW_p napelem teljesítményt jelent. A választott inverter egy 6 kW névleges teljesítményű Fronius IG Plus 60 V-1 transzformátoros inverter. A számítás főbb eredményeit az 1. táblázatban foglaltam össze.

1. táblázat Éves energiatermelés számítási eredményei

Adatbázis	PVGIS	Meteonorm
Éves besugárzás [kWh/m ²]	1490	1535
Éves PV energiatermelés [kWh]	10409	10582
Éves AC energiatermelés [kWh]	9837	9979
Átlagos PV hatásfok [%]	14.17	13.99
Átlagos AC hatásfok [%]	13.39	13.19
Éves rendszerveszteség [kWh]	572	603
Átlagos DC feszültség [V]	429	416

A táblázatban szereplő PV megjelölés a napelemek által előállított energiát, illetve hatásfokot jelenti, míg az AC a hálózatra táplált energiát, melyek különbségét a rendszer vesztesége jelenti. A táblázat első sorában látható, hogy az azonos földrajzi hely ellenére a Meteonorm adatbázis alapján némileg magasabb az éves besugárzás, ezzel magyarázható a több megtermelt energia is. A hatásfokokat összehasonlítva azonban a PVGIS adatbázisnál tapasztalunk magasabb értéket, melynek oka, hogy ez az adatbázis csak átlagos napok adatait tartalmazza, melyhez a 3. ábrán bemutatottak szerint magasabb hatásfok tartozik. A Meteonorm adatbázis által számolt értéket ennek megfelelően pontosabbnak tartom, mivel abban a szélsőséges időjárási helyzetek hatása is megjelenik.

Az éves energiatermelési adatok alapján módosult volt más, hasonló számítást végző programokkal is összevetni a modellem. Mindkét adatbázis esetében azzal a programmal

végeztem az összehasonlítást, amelyből a meteorológiai adatok származtak. Az azonos bemeneti adatok mellett minden esetben kevesebb, mint 1,2% eltérés adódott a számított eredményekben, így az általam készített szimulációs programot is igen pontosnak értékelem.

Az eredmények alapján megvizsgáltam a rendszer veszteségeinek összetételét is. A Meteororm számítások alapján a teljes veszteség aránya 5,7%, melynek szinte elhanyagolható része, 0,45% jelentkezik az egyenáramú vezetékeken, míg a veszteség többsége, 5,25% az inverteren lép fel. A vizsgált inverter átlagos európai hatásfoka 95%, tehát az európai hatásfok használata éves számításoknál a hazai időjárási körülmények mellett kielégítően pontos eredményekhez vezet.

Az éves szinten termelt energiát a napelemek névleges teljesítményével elosztva kapjuk a fajlagos energiatermelés értékét, mely a bemutatott esetben 1330 kWh/kW, számértékét tekintve pedig egy csúcskihasználási óraszámra felel meg. A kihasználási tényező értéke 15,2%, amely a ténylegesen megtermelt és az elméletileg maximálisan, egész évben névleges teljesítményen üzemelve termelhető energia aránya. Ez a két tényező alkalmas a különböző energiatermelési alternatívák összehasonlítására, értékük azonban napelemek esetén a rendszer paramétereitől függően az adott területre jellemző éves besugárzástól függ.

Az 1. táblázat csak az éves összesített adatokat tartalmazza, de a szimuláció a Meteororm adatsor alapján képes volt a teljes évre nézve órás bontásban is kiszámítani az aktuálisan termelt energia mennyiségét, illetve az adott órára jellemző átlagos teljesítményt. Ezek az idősoros teljesítményadatok egy háztartásra jellemző fogyasztási profil segítségével lehetővé teszik annak becslését is, hogy az éves szinten termelt energia hányad részét tudjuk a háztartásban hasznosítani, illetve mennyit táplálunk a hálózatra, illetve mennyit kell onnan vételezni a háztartás ellátása céljából. Egy számítás energiátároló modellel történő bővítése lehetővé teszi az optimális tároló kapacitás meghatározását is, illetve különböző tárolási stratégiák hatékonyságának vizsgálatát is.

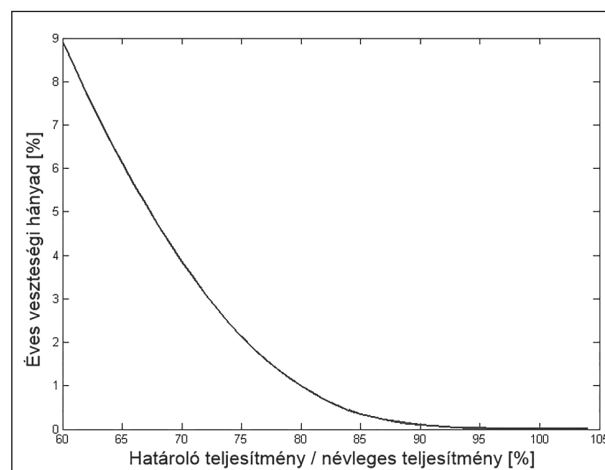
Az éves előrejelzéshez hasonló módon rövidtávú előrejelzés is készíthető, amelynek célja a napelemes rendszer várható teljesítményének meghatározására az elkövetkező néhány órára vagy napra nézve. Az ilyen számítások időtávját és pontosságát nagymértékben behatárolja a meteorológiai előrejelzések, főleg a napsugárzás előrejelzésének jelentős pontatlansága. A számítás célja a széltermelés előrejelzéséhez hasonló: a napelemek energiatermelésének kiszámíthatóbbá tétele és pontosabb menetredek készítése által a VER szabályozásának megkönnyítése. Az időjárás előrejelzés pontatlanságán túl további nehézséget jelent a napelemek rendszerek szélturbinákhoz viszonyított jóval kisebb egységteljesítménye is, így azonos teljesítmény esetén jóval nagyobb számú adat számítása és összegzése szükséges. A napelemek nagyarányú elterjedése esetén a legtöbb problémát mindenhol a hálózati integráció kérdése okozza, így hosszú távon a pontatlanságok és nehézségek ellenére is célszerű lehet egy ilyen előrejelző rendszer kialakítása.

3.3 Inverter optimális méretezése

Megfelelő inverter választása a napelemek mellé döntő fontosságú a rendszer optimális működése szempontjából. A maximális energiatermelés elérése érdekében a napelemeknek mindig a legnagyobb teljesítményű munkapontban (MPP) kell üzemelniük, így annak mindig az inverter működési tartományán belül kell lennie. Az inverter bemeneti feszültsége függ a sorba kapcsolt modulok számától, az egyes modulok MPP feszültsége pedig az időjárás függvényében változik. A

sorba kapcsolt modulok számát úgy kell megválasztani, hogy az MPP feszültség minden előforduló időjárási körülmény esetén az inverter bemeneti feszültség határai között legyen. A napelemek adatlapján szereplő MPP feszültség az STC körülményekre vonatkozik, a valóságban ennél általában kisebb feszültség fordul elő. Az előző alfejezetben bemutatott rendszer 15 sorba kapcsolt moduljának együttes névleges MPP feszültsége 455 V, míg ugyanez az érték éves átlagban mindössze 416 V az 1. táblázat adatai alapján, erre a rendszer tervezése során mindenképpen tekintettel kell lenni.

Az inverter maximális bemeneti teljesítményének megválasztása egy összetett optimalizálási feladat eredménye. A napelemek névleges teljesítménye nem egy maximális, hanem egy referenciasugárzáshoz tartozik, így még a napelemekkel azonos teljesítményű inverter választása esetén sem biztos a folyamatos MPP-ben történő működés. Amennyiben a napelemek MPP teljesítménye meghaladja az inverter bemeneti teljesítmény korlátját, az inverter leszabályozza a napelemek teljesítményét, tehát egy alacsonyabb teljesítményű munkapontban működteti őket. A hazai sugárzási jellemzők mellett a napelemek csak az év kis részében működnek névleges teljesítményük közelében, ezért gazdasági szempontból nem fontos a maximális energiatermelés biztosítása. Alacsonyabb teljesítményű inverter alkalmazásával elveszítjük a megtermelhető energia bizonyos részét, azonban az olcsóbb inverter miatt csökken a beruházási költség. A leszabályozás miatt éves szinten elvesztett energia részaránya az inverter és napelemek közti teljesítményarány függvényében a 4. ábrán látható.



4. ábra Alulméretezett inverter okozta energiavesztés

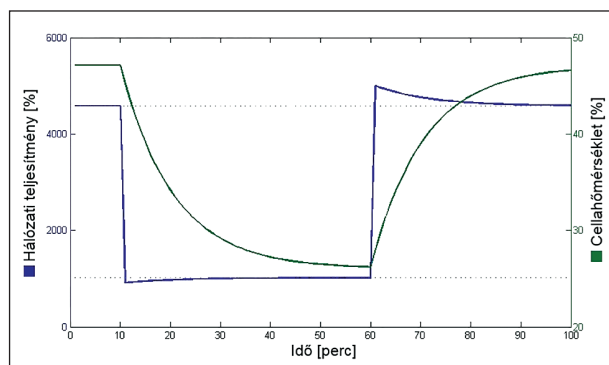
A vízszintes tengelyen a napelemek névleges teljesítményéhez viszonyítva az inverter maximális bemeneti teljesítménye látható, amely általában 5%-kal magasabb az inverter névleges teljesítményénél. 90% teljesítményarány felett a veszteség szinte elhanyagolható, 80%-nál is csak alig 1%-ot tesz ki, ez alatt azonban rohamos növekedésnek indul.

Az optimális inverterteljesítmény meghatározásához az energiavesztés arányán túl ismerni kell a villamos energia átvételi árát, a különböző teljesítményű inverterek és a napelemmodulok bekerülési költségét, valamint az inverter várható élettartamát is, mely általában jóval alacsonyabb a napelemek élettartamánál. A beruházási költség megtérülése az inverter árkülönbségén túl a kisebb teljesítményű kiserőmű esetleges alacsonyabb hálózati csatlakoztatási költségeiből is adódhat. A fenti bizonytalanságok ellenére a legtöbb esetben érvényes ökölszabályként kijelenthető, hogy 80% körüli arány általában elfogadható az inverter és a napelemek névleges teljesítménye közt.

3.4 Napelemek dinamikus viselkedése

Az eddig bemutatott modellek állandósult állapotra vonatkoznak, és nem veszik figyelembe a sugárzás és hőmérséklet változásakor lezajló tranziens jelenségeket. A környezeti adatok a nap folyamán folyamatosan változnak, így szigorúan értelmezve a rendszer sosem működik állandósult állapotban, az erre vonatkozó modell azonban mégis elfogadható, ha a tranziensek időállandója alacsonyabb a számítási időlépésnél. Az elektromos jelenségek időállandója igen alacsony, így ezek hatása az energiatermelés szempontjából elhanyagolható, a napelemek teljesítménye pillanatszerűen követi a sugárzás változását. A termikus folyamatok időállandója kellően magas ahhoz, hogy befolyásolja a napelemek energiatermelését, így ennek vizsgálatára dinamikus modellel bővítettem az elkészített szimulációs programot.

A környezeti jellemzők közül a külső hőmérséklet csak lassan változik, a sugárzás azonban felhők okozta árnyékolás miatt akár igen gyors és jelentős megváltozásra is képes. A dinamikus modellben a elektromos időállandót elhanyagoltam, termikus szempontból pedig egytárolós rendszernek tekintettem a modult 6 perces időállandóval, melyet a modul hőkapacitása, felülete és a NOCT hőmérsékletből származtatott hőátadási tényező alapján határoztam meg. Az 5. ábrán egy felhő áthaladásának hatását ábrázoltam, amely a sugárzás hirtelen csökkenését okozza a 10. percben, majd újbóli növekedést a 60. percben. A sugárzás és a külső hőmérséklet ezen kívül mindenhol állandó a tranziens jelenségek kiemelése érdekében.



5. ábra Napelemek teljesítményének alakulása a sugárzás hirtelen változása esetén

A leadott teljesítmény változása a sugárzás megváltozását pillanatszerűen követi, azonban a teljesítményugrások nagysága mindkét esetben nagyobb az állandósult állapotokra jellemző értékek különbségénél. A sugárzás növekedésekor a cellahőmérséklet nem változik pillanatszerűen, így az első percekben a magasabb sugárzást még az alacsonyabb cellahőmérsékletnek megfelelő jobb hatásfokkal hasznosítja a modul, majd ez a teljesítménycsúcs a cellahőmérséklet növekedése miatt egy állandósult értékre csökken. A sugárzás csökkenésekor szintén hasonló folyamat játszódik le, csak a változások iránya ellentétes.

A dinamikus hatások figyelembevétele kismértékű többletet eredményezett a termelt energiában, ennek mennyisége azonban éves számítás során szinte elhanyagolható, valamint az órák bontású adatbázisok egyébként sem alkalmasak eme rövidebb idő alatt lejátszódó folyamatok leírására. A vártnál nagyobb mértékű teljesítményugrások figyelembevétele a hálózati hatások vizsgálata során fontos, hiszen ezek a gyors teljesítményváltozások alapvetően hátrányosak a kiserőművek hálózati integrációja szempontjából.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A modern módszerek és számítógépek használata lehetővé teszi a napelemes rendszerek működésének pontosabb szimulációját, amelyben a legnagyobb hibát a bemeneti időjárási adatok bizonytalansága jelenti. Több különböző modellt is bemutattam, rámutatva ezek sajátosságaira, alkalmazásuk főbb előnyeire és hátrányaira.

A modelleken alapuló szimulációs program lehetővé tette a napelemek hatásfokának részletes vizsgálatát, amely kimutatta, hogy a hatásfok nem elhanyagolható mértékben függ a cellahőmérséklettől és a sugárzás intenzitásától egyaránt. Állandó külső hőmérséklet mellett a napelemek közepes sugárzás esetén képesek legjobb hatásfokkal működni, de alacsony sugárzást is képesek jó hatásfokkal hasznosítani, így gyengébb besugárzási adottságokkal rendelkező helyeken is jól használhatóak.

A napelemes rendszerek megtérülésének számításához a fellépő költségek mellett fontos megbecsülnünk az éves szinten termelhető energia mennyiségét is. Az energiatermelés előrejelzése meteorológia adatbázisok segítségével történhet, melyek közül két különböző adatsor alapján végzett számítást is bemutattam. A rendszer veszteségeinek összetételét is megvizsgáltam, mely megmutatta, hogy a veszteségek többsége az inverteren jelentkezik, így döntően annak hatásfoka befolyásolja a veszteségeket. A hosszú távú előrejelzések mellett a rendszer teljesítményének rövid távú előrejelzése is fontos, amely a menetrend tervezhetőbbé tételével segítheti a napelemes kiserőművek hálózati integrációját.

Az inverter optimális megválasztásának alapvető szempontjait szimulációs számítási eredményekkel alátámasztva mutattam be, melyek alapján az inverter napelemekhez képest történő alulméretezése nagyjából 80%-os teljesítményarányig gazdasági szempontból kifizetődő. A napelemek dinamikus működését vizsgálva bemutattam a sugárzás változását követő jelentős teljesítményugrásokat és a teljesítmény változásának sajátos időbeli lefutását. A dinamikus hatások elhanyagolása az éves számítások során nem okoz jelentős hibát, a hálózati hatások vizsgálatánál azonban ennek figyelembevétele is fontos lehet.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] **European Photovoltaic Industry Association:** Global Market Outlook for Photovoltaics 2014-2018. <http://www.epia.org/news/publications/> (2014. szept. 1.)
- [2] **Ádám G., Baksai-Szabó K.:** Napelemes rendszer energiatermelésének szimulációja. *Elektrotechnika*, 104. évf. 12. szám, 2011.
- [3] **Townsend, T. U.:** A method for estimating the long-term performance of direct-coupled photovoltaic systems. University of Wisconsin-Madison, 1989.
- [4] **Joint Research Centre:** Photovoltaic Geographical Information System. <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/> (2014. szept. 15.)
- [5] **PVsys:** Photovoltaic Software. <http://www.pvsyst.com/en/> (2014. szept. 15.)



Dr. Dán András

professor emeritus
BME Villamos Energetika Tanszék
Villamos Művek és Környezet Csoport
MEE-tag
dan.andras@vet.bme.hu



Mayer Martin János

Gépészmérnök MSc, BME
Villamos Energetika Tanszék
MEE-tag
mayer.martin@gmail.com