

Napelemforgató rendszerek hatásvizsgálata

Korunkban az emberiség villamosenergia-éhsége gyors ütemben növekszik. Azoknak az energiaszolgáltatóknak, akik szeretnék lépést tartani a növekvő igényekkel új energiaforrások után kell kutatniuk, illetve a már meglévők hatékonyságát kell nagymértékben fejleszteniük. Ezzel párhuzamosan a társadalom egyre inkább figyelemmel kíséri, hogy az előállított többlet energia mekkora része valósul meg megújuló, úgynevezett „zöld” energiaforrásokból. Az egyik legnépszerűbb és manapság legelterjedtebb ilyen zöld energiaforrás a napenergia, amely napelem modulok segítségével közvetlenül termel villamos energiát. Ezen modulok ma már napkövetést biztosító szerkezetre, úgynevezett „solar tracker”-re (Napkövetőre) is felszerelhetők.

A napenergia kihasználása, hasznosítása, akárcsak sok minden más energiaforrásé is bizonyos korlátokba ütközik. Ilyen tényező a földrajzi helyzet, időjárás (főként a felhősödés), a nappali hőmérséklet vagy éppen magának a fotovoltaikus (PV) napelem modulnak a hatásfoka. A cél természetesen az lenne, hogy ezen tényezők közül minél többet ki tudjunk zárni, és hatásaikhoz „alkalmazkodó” automatizált berendezés segítségével minél több energiamentiséget tudjunk termelni a Nap éltető sugaraiból. Egy ilyen integrált megoldás a solar tracker. A cikkben a forgatható napelemek tulajdonságait elemezzük és a kinyert energia szempontjából összehasonlítjuk a fixen lehelyezett napelemmel.

Napelem működése, típusai

A napelem vagy fotovoltaikus elem egy olyan félvezető eszköz, amely fény hatására villamos energiát termel. A hullám- és részecsketulajdonságokat hordozó fény, mint elektromágneses sugárának az elemi részei (kvantumai) a fontosak. Amikor a napelemcella „elnyeli” a fényt, azok a fotonok, amelyek elég nagy energiával rendelkeznek, elektron-lyuk párt hoznak létre. Az elektron természetesen a negatív, míg a lyuk a pozitív töltéshordozó. Ennek következtében egy elektromos potenciálkülönbség jön létre a félvezető eszközben, minek hatására elektromos áram kezd el folyni a cella kivezetésein keresztül, hogy ez a potenciálkülönbség megszűnjön. A félvezető cella p-n átmenete gondoskodik róla, hogy az áram csak egy irányban folyhasson.

Napelemcellák a mai napig főleg szilíciumból készülnek, de már megjelentek speciálisabb anyagból készült lapkák is, mint például: gallium-arzénid, réz-indium-gallium-szelén vagy éppen kadmium-tellurid. Az elterjedt szilíciumcelláknak 3 fő típusa van:

– *Monokristályos PV cella:* A legnagyobb (15-20 %) hatásfokkal rendelkező típus, melyet teljes egészében egy szilícium egykristály rüdből vágunk ki, így egy nagyon tiszta lapka nyerhető. Természetesen viszonylag magas hatásfokához ehhez hasonló ár tartozik.

– *Polikristályos PV cella:* ezeket a lapkákat megömlesztett szilíciumblokkokból vágják ki, emiatt az árak is jóval olcsóbb, mint a fentebb említett monokristályos celláé, de hatásfokuk elmarad ezektől. Manapság ez a típus uralja a piacot.

– *Amorf PV cella:* A legolcsóbb típus, amely nem kristályos félvezetőkből készül. Alacsony hatásfokuk miatt szorultak mára vissza ezek a vékonyréteg cellák.

Napelemmodulok orientációja

Ahhoz, hogy érthetővé váljon a napelemek orientációjának alapelve, illetve a különböző követési technikák elmélete, először a Nap éves mozgását kell megismerni.

A Föld a Nap körül egy ellipszis pályán mozog, amelynek síkjával a Föld észak-déli tengelye 23,5°-ot zár be. Ennek következtében,

amikor a Föld északi féltekéjén nyár van, akkor a Nap észak felé és nyugaton megy le.

Ebből következően más-más szélességi körökön, különböző évszakokban eltérő beállítással lehet egy napelemmodult a legoptimálisabban üzemeltetni. A cél az lenne, hogy a napsugarak mindig 90°-os beesési szögben ériék a napelemmodul felszínét, hiszen ebben az esetben a legnagyobb az egységnyi felületre jutó besugárzás [W/m²]. Ha a beesési szög ennél kisebb, a sugárzás csökkenése mellett redukálódik az elnyelt fény mennyisége is, hiszen a felületről a fénysugarak könnyebben vissza fognak verődni.

Ha egy ökoszabályt szeretnénk megfogalmazni a **rögzített panelek** orientációjára, akkor azt mondhatjuk, hogy a moduloknak a vízszintessel földrajzi helyzetük szélességi fokával megegyező szöget kell bezárniuk. Emellett a paneleket ideális esetben az Egyenlítő felé kell orientálni. Ez Magyarországon déli orientációt és kb. 47°-os dőlési szöveget jelent. Ebben az esetben a panelek éves energiahozamát optimálisnak tekintjük.

Ha a **modul dőlésszöge** legalább évszakonként **állítható/finomítható**, akkor a következő számolási módot alkalmazhatjuk a szögekre:

$$\beta_{nyár} = (\text{szélességi fok}) \cdot 0,92 - 24,3^\circ (=18,94^\circ)$$

$$\beta_{tel} = (\text{szélességi fok}) \cdot 0,89 - 24^\circ (=65,83^\circ)$$

$$\beta_{osztavas} = (\text{szélességi fok}) \cdot 0,98 - 2,3^\circ (=43,76^\circ)$$

– az egyenlőségek a Föld északi féltekére vonatkoznak,

– β a panel vízszintessel bezárt szöge

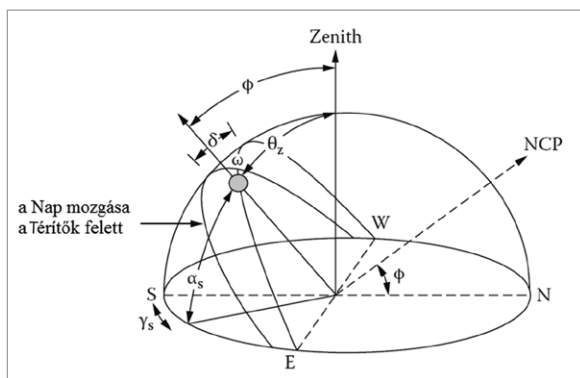
– zárójelben az értékek Magyarországra vetítve

Természetesen az északi féltekén a paneleknek ilyenkor is dél felé kell nézniük.

Napkövető (Solar tracker) típusok

A napkövetők olyan berendezések, melyek követik a Nap égbolton megtett útját annak érdekében, hogy maximalizálják a megtermelt – hasznosított – energia mennyiségét olyan módon, hogy a napsugarak beesési szögének derékszögtől való eltérést minimalizálják. Csoportosításuk leegyszerűbben a forgatható tengelyek száma szerint történhet.

Egytengelyes napkövetők egy szabadsági fokkal rendelkeznek, mely lehetővé tesz egy tengely körüli elforgatást. Főleg nagyobb volumenű beruházásoknál telepítik őket, mivel magasabb energiahozam mellett az árak még viszonylag alacsony.



1. ábra
Napmozgás
vizsgálata

a) *Vízszintes egytengelyes tracker*: a forgatás tengelye észak-déli orientációjú, így a tengely körüli forgatással a kelet-nyugat irányú követést valósítja meg.

b) *Függőleges egytengelyes tracker*: ez esetben a modul általában a földrajzi szélességnek megfelelően van megdöntve, viszont a forgatás tengelye függőleges.

c) *Döntött tengelyű tracker*: a panel meg van döntve ebben az esetben is, viszont a forgatás tengelye ekkor megegyezik a megdöntött panel tengelyével.

Kéttengelyes napkövetőknél a két szabadsági fok két szabad elfordulást eredményez. A két forgatási tengely általában merőleges egymásra. Jellemzően lakóépületekre, azok mellé telepítik ezeket a berendezéseket.

a) *Bólintó/billenő tracker (TTDAT)*: az egyik tengely függőleges (kelet-nyugati követés), a másik pedig vízszintes (nappali követés)

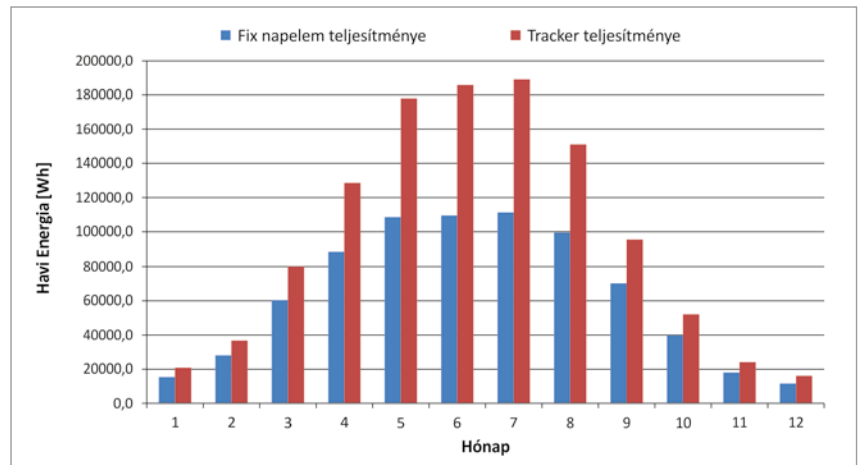
b) *Azimuth-tengerszint feletti magasságon alapuló követő (AADAT)*: ez a típus igen nagy helyet igényel, ugyanis függőleges forgatása kör alakú sínpályán történik, aminek köszönhetően nagy a teherbírása, így nagy felületen hordozhat modulokat.

Követési módszerek

Az egyik régebben használt napkövetési módszer a **kronológiai követés**. A kronológiai követés alapja, hogy a Föld 15° -ot fordul minden eltelt óra alatt. A berendezés tehát az eltelt időt méri, és ezzel arányosan forgatja a napelemmodult keletre nyugat felé. A módszer hibája a Föld ellipszis pályájából adódik, ugyanis ez a fajta követés nem képes kezelni a Nap Ráktérítő és Bak-térítő közötti delelési helyének változását.

Ma az egyik legelterjedtebb módszer **GPS-es algoritmuson** alapszik. Ez általában egy mikrokontroller-vezérelt rendszer, ahol a mikrokontrollernek két bemenő adata van szüksége: az aktuális időre (hónap, nap, óra, perc), illetve a tracker pontos földrajzi helyzetére. A két adat alapján az algoritmus meghatározza a Nap pozícióját, és ennek megfelelően állítja be a modulok szöghelyzetét.

A másik manapság gyakran alkalmazott követés **szenzorokkal valósul meg**. Két pár fotoszenzor használnak kéttengelyes követésnél, ugyanakkor egytengelyes tracker-eknél egy pár is elég a megfelelő működéshez. A fénszenzorokat (fototranzisztor vagy fotoellenállás) a panellel párhuzamos lapos hordozóra szerelik, és páronként közéjük egyfajta elválasztó falat szerelnek föl. Ha a panel teljesen merőleges a nap sugáira, akkor nincs árnyéka a falaknak. Ha azonban a beesési szög a derékszöghöz képest megváltozik, akkor árnyék fog vetülni



2. ábra Havi leadott teljesítmény a szimuláció alapján

a fotoszenzor-párok egyik tagjára. Emiatt a párok tagjára más-más feszültség fog esni, amit egy mikrokontroller érzékel, és megfelelő aktuátorral beavatkozik. Ha a feszültség a két szenzoron ismételt közel egyenlő lesz, a kontroller a forgatást megállítja. A szenzorokat szerelhetik egymáshoz képest 45° -ban döntött (vízszintessel 45° -ot bezáró) felületekre is, ekkor maga a szabályozás ugyanezen az elven történik.

Szimuláció

MATLAB program segítségével egy szimulációt írtunk, hogy összehasonlítsuk a fixen rögzített és egy kéttengelyes solar tracker villamosenergia-termelését egy évre vonatkozóan. A szimuláció a GPS-es követésen alapszik. Tehát kezdeti bemeneti paraméterként meg kell adni a dátumot és a fixen rögzített panel tájolását (billentési szög és orientáció). A Nap helyzete az 1. ábrán látható paraméterekkel írható le.

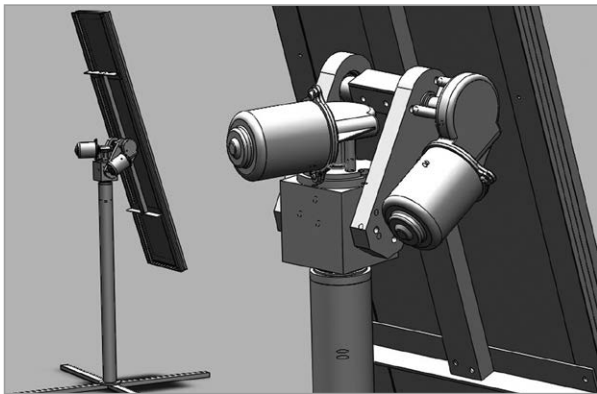
A szimulációban egy Siemens M50 típusú napelempanel valódi adatait használtuk, és ebből építettünk fel egy 1 kWp rendszert mind a fix, mind a napkövető esetén. A szimuláció egyetlen hátránya, hogy a napok felhővel borítottságát nem veszi figyelembe, de a rögzített rendszer és a napkövető közötti százalékos különbség jól modellezhető vele. Az éves termelt energia havi bontásban a 2. ábrán látható. Éves szinten a **szimuláció 53 % körüli nyereséget** mutat a solar tracker javára. Ez egy igen nagy különbségnek tekinthető, azonban ez az érték a valóságban alacsonyabb (lásd később!). Kalkulálni kell azzal, hogy a gyakorlatban csak bizonyos időközönként ellenőrizzük a solar tracker pozícióját, és csak adott különbségeket észlelve állítunk a helyzetén, így teljesen ideálisnak a tracker termelése sem tekinthető. A solar tracker aktuátorjainak (rendszerint motorjainak) is szüksége van energiára a forgatáshoz, de szerencsére ez a termelt energia töredékét

teszik ki. Mivel a solar tracker a forgás miatt mozgó alkatrészekkel rendelkezik, ezért a karbantartás költsége sem elhanyagolható ezeknél a szerkezeteknél.

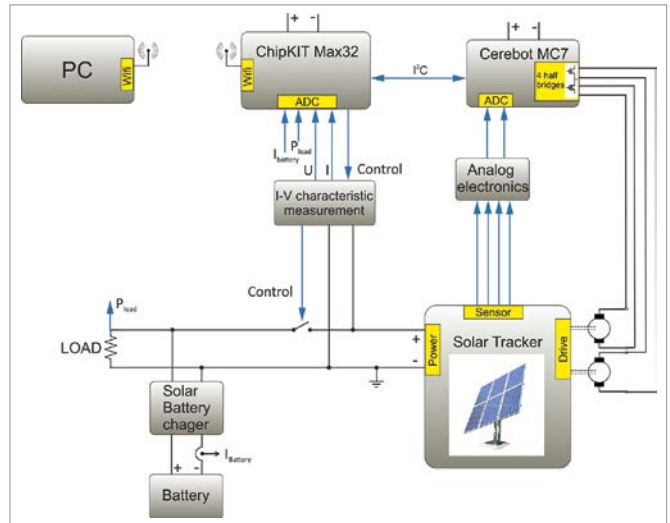
Laboratóriumi tesztberendezés

A gyakorlatban egy kéttengelyes forgatásra alkalmas solar trackert valósítottunk meg. Ez egy laboratóriumi körülményekhez alkalmazkodó, kisteljesítményű berendezés, amelyre egy – már fentebb említett – 50 Wp Siemens M50 modul lett felszerelve. Típusát tekintve a konstrukció egy TTDAT típusú napkövető, ahol a forgatást két 12 V-os áttételes DC motor végzi. Az iparban a forgatáshoz a solar tracker-ekhez kialakított speciális csigahajtóművet használnak, amelyek igen tekintélyes nyomatékokkal képesek megbirkózni. Magának a szerkezetnek a 3D-s modellje és az elkészült konstrukciója a 3. ábrán látható.

A követési módszerek közül a berendezés a szenzoros követést valósítja meg. Egy kvadráns fotodetektort építettünk, ami 2 pár fotoellenállásból és a közéjük emelt elválasztókból áll. A detektor 5 %-os szöghibát engedélyez, előlött az offset fölött viszont működésbe lép a vezérlés. A két pár két-két szemközti fotoellenállásán eső feszültséget egy egyszerű analóg elektronikai áramkör hasonlítja össze, majd továbbítja az eredő jelet a mikrokontrollernek. A mikrokontroller értelmezi a kapott feszültségi értékeket, és vezérli a motorokat. A vezérlés H-hidas kapcsolás segítségével valósul meg, mert így a forgatás iránya, és az impulzusszélesség-moduláció segítségével annak sebessége is könnyedén befolyásolható. A használt motorok a beállított helyzetet tartani tudják az áttételes csigahajtás önzáró tulajdonsága révén. A motor és a mikrokontroller táplálásához akkumulátort használunk, amit a napelem folyamatosan tölt, így lényegében egy kis, szigetüzemű önfenntartó rendszerrel beszélhetünk.



3. ábra Mechanikai rendszer felépítése



4. ábra Mikrokontroller alapú vezérlés

Szabályzószoftver

Az elkészült mechanikai és villamos rendszerhez mikrokontroller alapú szabályzást készítettünk (4. ábra). A berendezés irányítását kézi, illetve automatikus vezérléssel is végezhetjük. A kézi vezérlés esetén gombnyomással működtetjük a trackert. Automatikus üzemmódban algoritmus végzi a szabályzást. A szabályzó egyetlen bemeneti jele a digitális jellel alakított szög-helyzet hiba. Az algoritmus paramétereit paraméteresen állíthatóak a működtetés előtt. A kimeneti jel a hiba függvényében a 5. ábrán látható. Kis szöghiba esetén a program megállítja a mozgatót. A mozgató előre meghatározott időintervallumonként történik. Az általunk javasolt idő 5 perc, ennyi idő alatt a nap 1,25°-ot fordul, így a viszonylag ritka mozgató ellenére is kis hiba marad. Az 5 percnkénti forgatás nagy előnye, hogy energiatakarékos, a motorok által használt energia elhanyagolható a termelt energiához képest (kevesebb, mint 1%). A mikrovezérlő nagy teljesítményű MOSFETeket vezérel, melyek H-hidas elrendezésben csatlakoztatunk a motorokhoz. Ezzel a módszerrel megfelelő követést sikerült megvalósítani, viszont a változó napsütés miatt néha kisebb zavarok jelentkez-

hetnek. Ipari megvalósítás esetén szög-helyzet-adókkal felszerelt berendezés készítése javasolt.

Mérőrendszer

A fix és a forgatható napelem összehasonlításához készíteni kell egy mérőegységet, mely a cella maximális teljesítményét meg tudja határozni. A napelemek elektromos jelleggörbéje nem lineáris, így a maximális teljesítmény meghatározásához nem elegendő a rövidzárási áram, illetve az üresjárási feszültség sem. Egyszerű módszer a teljes karakterisztika mérése. Időigényes megoldás számos különböző ellenállással való terhelés és feszültség mérése. Így a jelleggörbe pontjait egyesével kaphatjuk meg. Az általunk megvalósított esetben, egy kezdetben üres kondenzátort töltve mérjük egyszerre a feszültség és áram értékeket. A napelem árama (I) folyamatosan tölti a kondenzátort, melyre az alábbi differenciálegyenlet érvényes.

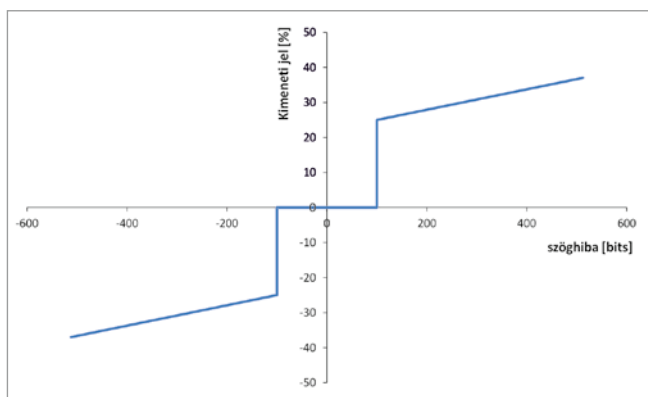
$$I = C \frac{dU}{dt}$$

Ezáltal a feszültség (U) folyamatosan növekszik a mérés közben. A kapacitás (C) értékével tudjuk befolyásolni a mérés idejét.

Az áramkör kapcsolási rajza a 6. ábrán található meg. A két tranzisztor a mérés kezdésére (Signal1), valamint a kondenzátor kisütésére (Signal2) szolgál. A gyorsaságnak csak a digitális mintavételezés szab határt, de könnyedén elérhető a negyed másodpercen belüli mérés. A teljesítményadatok az áram és a feszültség szorzatából adódnak. Egy mérési eredmény a 7. és 8. ábrán látható. A 7. ábrán a feszültség és az áram időfüggvényei, a 8. ábrán az ebből kirajzolt karakterisztika található meg. Bal oldalt az áram- feszültség, jobb oldalt a teljesítmény-feszültség grafikon látható. A mérés végén a mérést végző mikrovezérlő a számítógépnek elküldi a mért értékeket, majd a számítógép megállapítja a kinyerhető legnagyobb teljesítményt. Ezzel a méréssel könnyedén menthető a fix és a forgatható napelem pillanatnyi teljesítménye is.

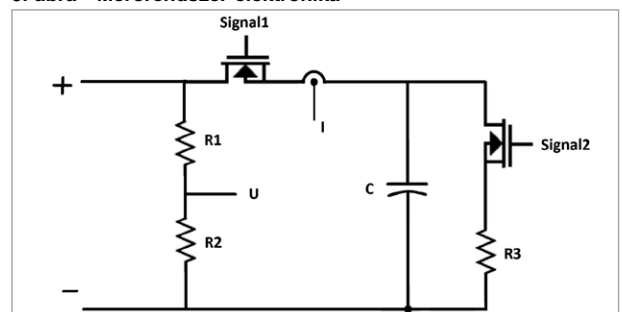
Mérési eredmények

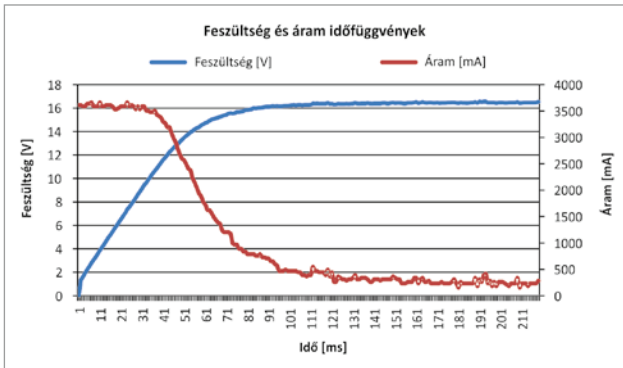
A két napelem teljesítményét több órán keresztül méréssel hasonlítottuk össze. A 9. ábrán megtalálható a fix (világoskék görbe) és forgatott (vörös) napelemek teljesítmény értéke. A mért teljesítmények arányát a zöld görbén jelenítettük meg. A szimulált eredmény a naptári év egyes napjain különböző,



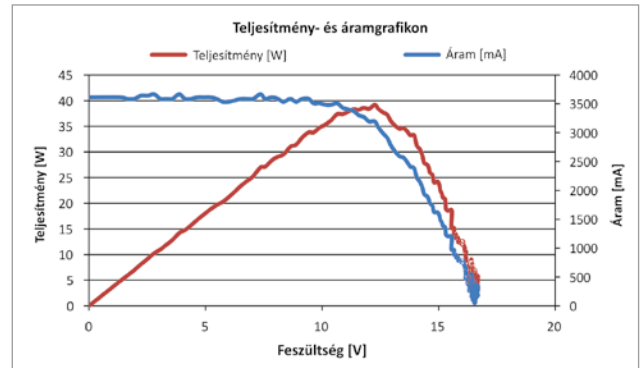
5. ábra Szabályzófüggvény

6. ábra Mérőrendszer elektronika





7. ábra Karakterisztika-mérés időfüggvényei



8. ábra Kimért karakterisztika

így a méréssel megegyező napi (május 23.) szimulált arányt (lila szín) jelenítettük meg. A mérés közben egy felhős napviszonyok közt is történt mérés (3:50 perc), ekkor a különbség a két napelem között csekély. Jól látható, hogy a mérési adatokon alapuló értékek elmaradnak a szimulált értékektől, de a jellegén jól látható, a kettő közel van egymáshoz. Ez a különbség azt jelzi, hogy éves szinten nem nyerhető ki 50 %-kal több energia. A két energia aránya numerikus integrálással határozható meg:

$$E = \sum P_i \Delta t_i$$

A két energia arányából következtethetünk az éves különbségre.

A mérési adatok alapján napos időjárás esetén, éves szinten mintegy 40 % energianövekedés érhető el a napelem forgatókkal a fixen beépített rendszerekhez képest.

A földre jutó napenergia maximális értéke mintegy 1000 W/m², ugyanakkor jelenleg a kereskedelmi forgalomban kapható napelemek hatásfoka jellemzően nem több 12-17 %-nál. Jóllehet napjainkban már hallani lehet ennél lényegesen jobb hatásfokú napelemről is. Fentiek miatt lényeges szempont, hogy a napelemes rendszerek minél hatékonyabban működjenek.

Ehhez nyújtanak lehetőséget a különböző napelemforgató rendszerek, amelyek közül egy héttengelyes rendszert vizsgáltunk.

Összefoglalás

Bemutattuk a forgatható napelemek típusait, napkövetési metódusokat és az irányítási lehetőségeket. Az általunk megépített tesztberendezés egy kéttengelyes szenzorokkal működő tracker, melyet mikrokontrollerrel működtetünk. Az általunk készített szimuláció éves szinten 53 % körüli energiatöbbletet jelzett. A megépített solar trackerrel és egy azonos paraméterű, fixen lehelyezett napelemmel mérésekkel próbáltuk validálni a szimulációt. A teljes karakterisztika-görbe leméréssel állapítottuk meg

az aktuális teljesítmény értékeket. A forgatható és a rögzített napelem teljesítményadatait elemezve kiderült, hogy a különbségük a szimulált eredményeket megközelíti, de nem éri el. Egész évre vetítve, állandó nap-sütéssel számolva 30-40 % energianövekedést jelent a napelem forgatása. Felhős időben a fogatás nem növeli jelentős mértékben a bejövő energia mennyiségét.

Lektorálta: Dr. Tóth László

Summary

The types of the solar trackers were presented, as well the tracking algorithms, and the control schemes. A two-axis tracker was built, supplied with microcontroller control, and sensor based feedback. Our simulation indicated 53 % energy increase. With the solar tracker and a fix solar panel with the same parameters, we tried to validate the simulation. The actual power of each panel was determined by measuring the full characteristics. The results of the measurements showed, that the ratio of the two cells was close, but didn't reach the

expected value. After some further calculation, the annual energy increase calculating with constant sunlight is fairly 40 %. However, in cloudy conditions, the tracking doesn't improve the energy income significantly.

Herdovics Bálint – Horváth Ádám
BME Mechatronika

Irodalom

- [1] S. Hegedus and A. Luque, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, Chichester, United Kingdom: John Wiley and Sons, 2011.
- [2] R. Foster, M. Ghassemi and A. Cota, Solar Energy - Renewable Energy and the Environment, Boca Raton, USA: CRC Press, 2009..
- [3] Tóth, László, Alternatív Energiaellátási Rendszerek az Agrárgazdaságban, Bp.Szak-tudás Kiadó Ház 2012
- [4] D. Kaminski, „The Follow-Up Control Regulation Device for Solar Cells,” IEEE, Gliwice, Poland, 2011..

9. ábra Kiértékelt eredmények

