A MAXIMÁLIS TELJESÍTMÉNYŰ PONT KÖVETÉSÉNEK LEHETŐSÉGEI NAPELEMES RENDSZEREKBEN 1

Szegedi Péter mérnök főhadnagy
főiskolai tanársegéd
Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem
Szolnoki Repülőtiszti Főiskolai Kar
Fedélzeti Rendszerek Tanszék

A napelemes rendszerekben alkalmaznak általában egy elektromos áramkört, akkumulátort és napelemet. Az elektromos áramkör állítja elő minden időpillanatban az optimális feszültség- és áramértéket az akkumulátor és a felhasználó számára. Ezen rendszerek legdrágább eleme a napelem, ezért jogos követelmény a napelem optimális teljesítményű üzemének biztosítása, és a minél jobb hatásfok elérése. A párhuzamos energiakezelés elvét kiragadva a hatásfok-javulás vizsgálatára lehetőséget láttunk egy polaritásváltóval megépített MPPT áramkör megépítésére. Ennek a megvalósítását és mérési eredményeit több cikken keresztül mutatom be.

BEVEZETÉS

A földre lesugárzott napenergia elegendő lenne arra, hogy fedezze a jelenlegi energiafelhasználás sokszorosát. Kézenfekvő, hogy ezt a lehetőséget, mint energiaforrást hasznosítsák. A napenergiát napelemek segítségével alakítják át elektromos energiává. A jelenlegi napelemes technika igen drága, és a napelemek hatásfoka nagyon alacsony, 15-23%, esetleg 28%. Az űrbeli alkalmazásoknál mégis szinte kizárólagosan ezt alkalmazzák energiaforrásként, de bárhol is alkalmazzák mindig felmerül igényként az adott méretű napelemből kivehető maximális energia kinyerése.

A napelem áram-feszültség karakterisztikán mindig található egy maximális teljesítményű pont (Maximum Power Point). A széles tartományban mozgó maximális teljesítményű pont követése szükséges követelménye a maximális villamosenergia kinyerésének. A követésre sok bonyolult, komoly hardver és szoftver igényekkel bíró számítógépes követőrendszereket fejlesztettek már ki. A költségek optimalizálása, a még

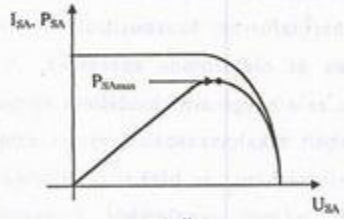
kisebb méret, és a súly csökkentése érdekében az eszközök fejlesztésének iránya az egyre jobb hatásfokú és egyre egyszerűbb megoldások keresése felé irányul.

1. MAXIMÁLIS TELJESÍTMÉNYŰ PONT

1.1. A maximális teljesítményű pont követésének néhány lehetősége

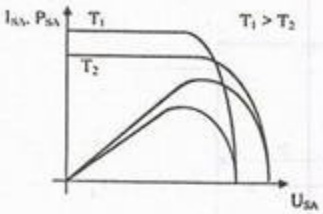
A napenergiát hasznosító rendszerek legdrágább eleme a napelem. Fizikai mérete a rendszer teljesítményének meghatározó eleme. A rákapcsolt fogyasztók energiaigényét azonban csak megvilágítása idején képes biztosítani.

A maximális teljesítményű pont helyét a napelem degradációja, hőmérséklete, illetve a besugárzás szöge és intenzitása erősen befolyásol. Az 1. ábrán látható a napelem-tábla áram-feszültség karakterisztikája és a kimenő teljesítmény-feszültség karakterisztikája.

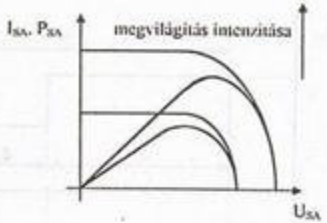


1. ábra
A napelem I_{SA}-U_{SA} és P_{SA}-U_{SA} karakterisztikái

Ezek a nem lineáris karakterisztikák a hőmérséklettől és a megvilágítástól erősen függnek, ez a 2. és 3. ábrákon látható.



2. ábra
A napelem I_{SA}-U_{SA} és P_{SA}-U_{SA} karakterisztikája a cellahőmérséklet függvényében

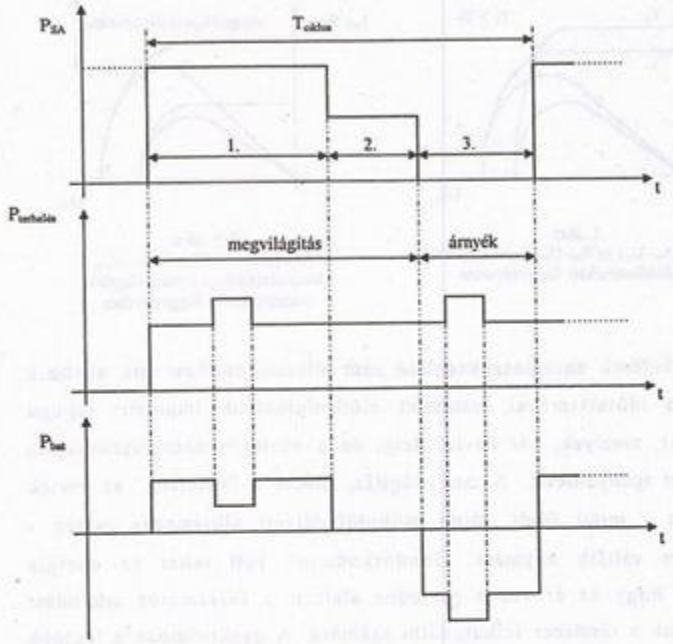


2. b. ábra
A napelem I_{SA}-U_{SA} és P_{SA}-U_{SA} karakterisztikája a megvilágítás intenzitásának függvényében

A terhelések energiaszükséglete nem minden esetben esik egybe a megvilágítás időtartamával, valamint előfordulhatnak impulzus jellegű terhelések is, amelyek, bár rövid ideig, de a névleges energiaszükséglet többszörösét igényelhetik. A megvilágítás, illetve a "sötétség" az esetek többségében - mind földi, mind műholdfedélzeti alkalmazás esetén - periodikusan váltják egymást. Gondoskodnunk kell tehát az energia tárolásáról, hogy az árnyékos periódus alatt is a folyamatos működést biztosíthassuk a rendszer felhasználói számára. A gyakorlatban a legtöbb esetben akkumulátorokat használnak, melyek a terhelések teljesítmény változásait, esetleges csúcsigényeit is kielégítik.

A megvilágítás és a "sötétség" ideje a műholdfedélzeten jól számítható a pályaadatok alapján. Földi viszonyok között ez a ciklusidő állandó (24 óra), de az időjárást komoly kockázati tényezőnek kell tekinteni. A ciklusidő, illetve az ehhez illeszkedő energiaigény ismeretében kiszámítható egy ciklus maximális energiaszükséglete. Például egy ciklusidő teljesítményigényeit szemlélteti a 3. ábra.

1. A napelem tábla MPPT-ben működik
2. Biztonsági időtartalék
3. Árnyékos ciklusidő rész



3. ábra
A napelem és a felhasználók teljesítményének egy lehetséges időciklusa

$$P_{felhasználók} \cdot T_{ciklus} = P_{SAMPPT} \cdot T_{megvilágítás} \qquad (1.1)$$

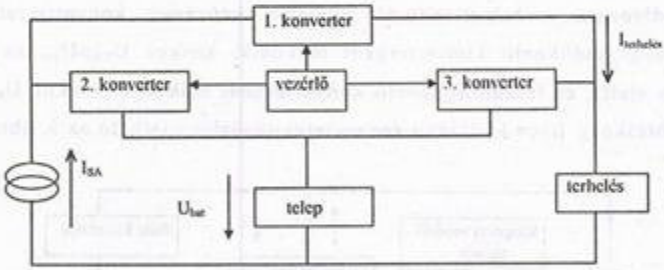
Ezt az energiát (a 3. ábrán látható) a megvilágítás ideje alatt kell a napelemből kinyerni.

Anyagi megfontolások alapján a napelem méretét minimalizálni kell. A megvilágítás időszakában minél tovább a maximális munkapontban működik a napelem, annál inkább minimalizálható a napelem-tábla mérete

az adott energiaszükséglet figyelembevételével. A 3. ábrán látható módon biztonsági időtartalék ráhagyása szükséges az előforduló veszteségek miatt. Az energiaellátó-rendszer megbízhatósága miatt nem lehet azt a kockázatot vállalni, hogy a megvilágítás időszakában mindvégig maximális munkapontban működjön a rendszer, ezért megfelelő méretű biztonsági időtartalékot kell figyelembe venni a napelem-tábla méretezésnél (5-10%).

A napelem maximális munkapontban történő üzemeltetéséhez feszültségét (U_{SA}), vagy áramát (I_{SA}) szabályozzák. Általában az egyszerűség miatt a feszültséget szabályozzák. Ezt egy olyan áramkör alkalmazásával érik el, ami lehetővé teszi a maximális teljesítményű pont követését. Ezt Maximum Power Point Tracking-nek nevezik (MPPT). A módszer alapjait A.F.Boehringer és J.Hausmann írták le.

A '70-es években jelent meg Y. Robin - Jouan és A. Poncin tudományos munkája a háromszög koncepció. A publikációban kifejtették, hogy a telep, a terhelés és a napelem szétválasztására van szükség. Egy ilyen "háromszög koncepciót" mutat be a 4. ábra.



4. ábra
Klasszikus háromszög koncepció

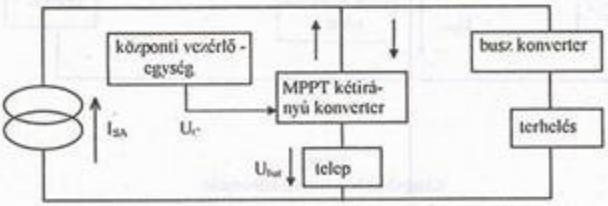
A háromszög szerkezet konverterei az elektromosenergiát átjuttatják a napelem-táblából a terhelésre, a telepről a terhelésre, vagy a napelem-

táblából az akkumulátorba. Ezt három konverter végzi (4. ábra). A konvertereket egy központi vezérlő egység irányítja a terhelés teljesítményigényének, az akkumulátor töltöttségi fokának és a napelem megvilágításának a függvényében. Az 1. konverter a napelem és a terhelés közötti kapcsolatot biztosítja. A 2. konverter az akkumulátor töltéséért, a 3. konverter az akkumulátor kisütéséért felelős. A napelem optimális üzemét úgy biztosítják, hogy kapcsain mindig az adott maximális teljesítményű ponthoz tartozó feszültséget állítják be a központi vezérlő egység utasításainak megfelelően. [1] [2] [3]

A maximális teljesítményű pont követésének többféle alternatívája létezik. A kutatások újabb és újabb megoldásokhoz vezetnek. Ezek közül néhány:

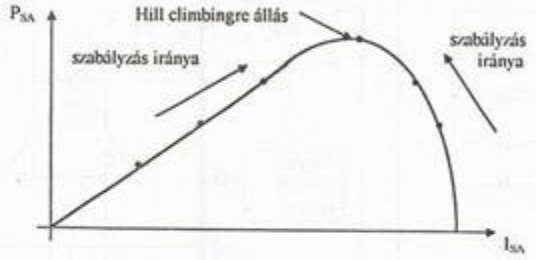
1.1.2. Digitális "hill-climbing" MPPT

A háromszög koncepciónál alkalmazott (4.ábra) 2-es, 3-as konverter - amelyeknek a feladata az akkumulátor töltésének, illetve kisütésének szabályozása - helyettesíthető egyetlen kétirányú konverterrel, ami feszültségcsökkentő konverterként működik, amikor $U_{SA}>U_{bat}$ (a töltés ideje alatt), és feszültségnövelő konverterként működik, amikor $U_{bat}>U_{SA}$ (kisütéskor). Ilyen kétirányú konverteres szabályzó látható az 5. ábrán .



5. ábra
Kétirányú konverterrel megvalósított MPPT

Az U_C vezérlő jelet a napelem teljesítménye és annak deriváltja határozza meg. A sajátossága, hogy egy úgynevezett hill climbing (görbemaximumra állás) algoritmus szerint kerül értelmezésre a 6. ábrán látható módon.



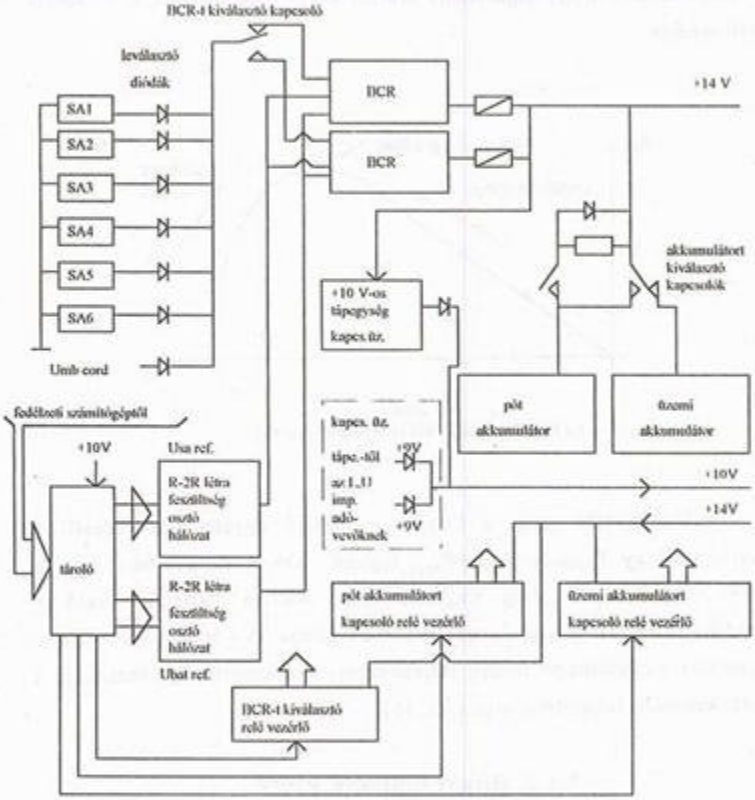
6. ábra
Az MPPT beállítása hill climbing módszerrel

Az U_C vezérlő jellel a központi vezérlő egység úgy vezérli a konvertert, hogy $P_{SAMPPT}=P_{töltő}+P_{busz}$ legyen. Abban az esetben, ha a terhelés (P_{busz}) rövid ideig nagyobb lesz, mint a P_{SAMPPT}, akkor a töltőteljesítménynek ($P_{töltő}$) "negatívvá" kell válnia. A kétirányú konverter U_C hatására megváltozott irányú teljesítményt fog kezelni, így biztosítja a terhelés megnőtt teljesítményigényét. [3]

1.1.3. Direkt digitális MPPT

Digitális MPPT-t alkalmaznak az AMSAT Phase III B műhold tápellátó rendszerében. A rendszer vezérlését egy számítógépre bízták, ami különböző perifériákon keresztül figyeli a napelem áramát és feszültségét, az akkumulátor feszültségét, hőmérsékletét, a sugárzás

intenzitását. Ezeknek és a beprogramozott könyökfeszültség értékeknek megfelelően vezérli a napelemre kapcsolódó konvertert. Az AMSAT Phase III B műhold tápellátó rendszerének blokkvázlata látható a 7. ábrán.

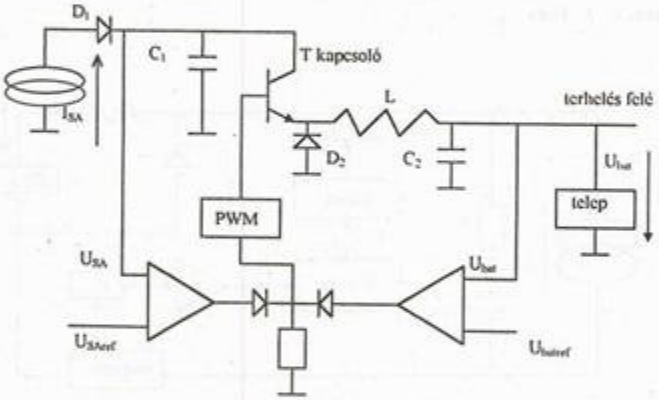


7. ábra A Phase III B tápellátó rendszerének vázlata

Amig U_{bat} nem egyenlő U_{batref} -el, addig a számítógép a figyelt paraméterek és az előre megirt szoftver alapján MPPT-be vezérli a rendszert, a BCR (akkumulátor töltés szabályzó) a bemenő feszültségét stabilizálja. Ha $U_{BAT}=U_{BATref}$, akkor a BCR működésében állapotváltozás

következik be, a kimenő feszültségét stabilizálja, a rendszer nem működik MPPT-ben.

A BCR két referenciajelet kap. Az egyik a napelem referenciafeszültsége, a másik az akkumulátor referenciafeszültsége. A referenciajeleket a vezérlő áramkörből R-2R létrás ellenállás osztó hálózaton keresztül kapja meg az akkumulátor töltését szabályzó egység. A BCR egységen belül egy PWM (impulzus szélesség modulátor) egységbe jutnak a referenciajelek, ezeknek és a telep feszültségének megfelelően az impulzus szélesség modulátor kimenő jelének a kitöltési tényezője vezérli a T kapcsolót, ez a 8. ábrán látható.



8. ábra
A BCR egység egyszerűsített áramköri vázlata

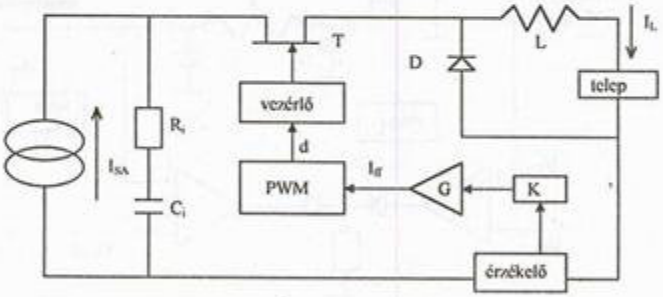
A BCR egység az üzemi vagy a pót akkumulátor töltését vezérli. A túltöltés megakadályozható, mert a teljes feltöltöttséghez tartozó feszültség minden akkumulátor hőmérsékletnél könnyen számolható és az akkumulátor töltő szabályzó referencia D/A áramkörével beállítható. Továbbá az alkalmazott soros szabályzás miatt az akkumulátor töltése

megszakítható, vagyis a soros szabályzó eszköz lekapcsolja az akkumulátort a napelemről nagy megvilágítás és/vagy kis terhelés esetén.

Az űrbeli alkalmazás körültekintő tervezést, többszörös redundanciát követel. A világűr káros sugarai főleg a CMOS áramkörökbe becsapódó α részecskék miatt veszélyesek, mert meghamisítják a tárolt információt. [4]

1.1.4. Buck konverteres analóg MPPT

Egyszerű felépítése szembetűnő az előzőekhez képest. Egy feszültségcsökkentő (Buck) konverterrel valósítják meg, de bármely ismert konverter felhasználható az energiaforrás teljesítménymaximumon való tartására, 9. ábra.



9.ábra
Buck konverteres MPPT

Ez a szabályzás a felhasznált konverter kimenő áramának pozitív visszacsatolásán alapul. A szabályzó egy áramkicsatoló söntelemből és egy G erősítésű áramerősítőből áll, ami egy hibajellel (I_{ff} -el) vezérli az impulzus szélesség modulátort. A hibajel a kívánt és valóságos kimenő feszültség közötti különbségből adódik. A PWM kimenő jelének kitöltési

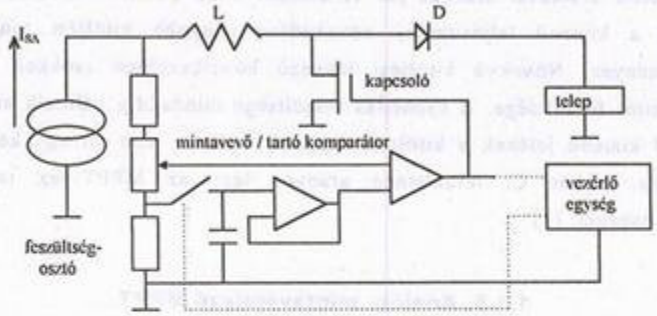
tényezője (d) vezérli a T tranzisztort. A PWM bemenetén lévő I_{ff} hibajel a konverter áramával arányos jel. A kimenő áram pozitív visszacsatolása miatt a kimenő teljesítmény növekedése nagyobb kitöltési tényezőt eredményez. Növekvő kitöltési tényező következtében csökken a C_i kapacitás feszültsége. A kapacitás feszültsége mindaddig változik amíg a PWM kimenő jelének a kitöltési tényezője (d) be nem áll egy konkrét értékre, ekkor C_i feszültsége arányos lesz az MPPT-hez tartozó feszültséggel. [1]

1.1.5. Analóg mintavételező MPPT

A módszer alapját a maximális teljesítmény tényező, az MPR adja. Az MPR az MPP-hez tartozó feszültség (U_{SAMPP}) és az üresjárási feszültség (U_{SA0}) hányadosa. A földi körülmények között közel állandó értékű, T=300K-n. Ezen az elven működő MPPT látható a 10. ábrán.

$$MPR = \frac{U_{SAMPP}}{U_{SA0}} = 0{,}86 \qquad (1.2)$$

A mintavevő / tartó áramkör a vezérlés hatására mintákat vesz a napelem tábla leosztott feszültségéből, ami eközben terheletlen, mert a konvertert erre az időre a vezérlő egység kikapcsolja. A minták a napelem-tábla üresjárási feszültségével U_{SA0}-al lesznek arányosak. A feladat ezután az, hogy a bemeneti feszültség értéke a mintavett jel értékének MPR=0,86 szorosa legyen. A napelem-tábla karakterisztikájának változásával változik a mintavett U_{SA0} értéke is, ennek megfelelően az MPP-hez tartozó feszültség (U_{SAMPP}) korrigálható a bemeneten a kitöltési tényező megváltoztatásával.



10. ábra
Analóg mintavételező MPPT

Hátránya ennek a megvalósításnak, hogy az MPR=0,86 közelítés csak földi körülmények között érvényes, így olyan esetekben, ahol a környezeti hőmérséklet ingadozás nagy (pl.: világűr) ez az eljárás nem alkalmazható. [6]

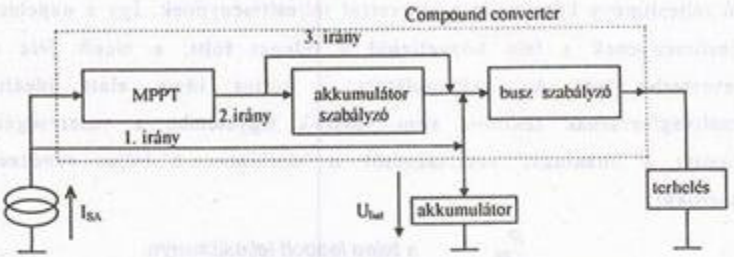
1.1.6. Párhuzamos struktúrájú MPPT

Az eddig bemutatott MPPT eljárások közös jellemzője, hogy csak egy úton áramlik a villamos energia a forrás (napelem) és a terhelés között. A párhuzamos energiaátalakító eljárásnál (PPCT) az energiának lehetősége van a forrás és a terhelés között több párhuzamos úton áramolni. (11. ábra) Az ábrán látható, hogy három irányban tud eljutni a napelem energiája a terhelésre:

1. irány: napelem - Busz szabályzó - terhelés

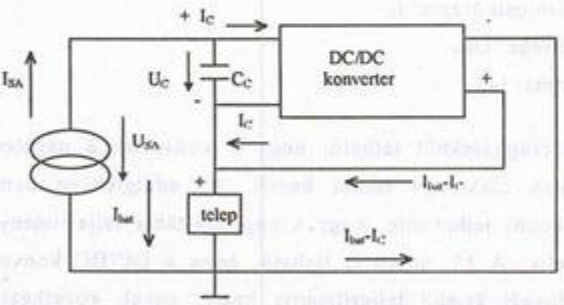
2. irány: napelem - MPPT - Akkumulátor szabályzó - Busz szabályzó - terhelés

3. irány: napelem - MPPT - Busz szabályzó - terhelés



11. ábra
Párhuzamos felépítésű MPP szabályzós energiaellátás

A PPCT struktúra egyik elvi újdonsága, a párhuzamos elrendezésű MPPT, sematikusan vázolt elvi rajza látható a 12. ábrán. Egy lehetséges megvalósításának áramköri rajza a 15. ábrán látható.



12. ábra
Újszerű elrendezésű MPPT

Az ábrán látható, hogy a napelemmel sorba kapcsolódik a telep és egy kapacitás. A kapacitás a DC/DC konverter bemeneti kapacitása. A DC/DC konverter valósítja meg a az MPP követést, és az akkumulátor

töltését. Amikor a kapacitás feszültsége U_C (egyben a DC/DC konverter bemeneti feszültsége is) pl: egyenlő a telep feszültségével, akkor a telepbe jutó teljesítmény kétszerese a konverter teljesítményének. Így a napelem teljesítményének a fele közvetlenül a telepet tölti, a másik fele a konverterbe jut. Az akkumulátort a töltés ideje alatt ideális feszültségforrásnak tekintve nem vesszük figyelembe a veszteségét, valamint a huzalozás veszteségétől is eltekintve a teljes rendszer hatásfoka:

$$\eta_{rendszer} = \frac{P_{ki}}{P_{be}} = \frac{\text{a telep leadott teljesítménye}}{\text{a napelem tábla leadott teljesítménye}} \tag{1.3}$$

$$\eta_{rendszer} = \frac{U_{bat} \cdot I_c + \eta_{átalakító} \cdot U_c \cdot I_c}{\left(U_c + U_{bat}\right) \cdot I_{SA}} = \frac{1 + \eta_{átalakító} \cdot U_c / U_{bat}}{1 + U_c / U_{bat}} \tag{1.4}$$

A konverter hatásfoka: $\eta_{átalakító}$

A konverter bementi feszültsége: U_C

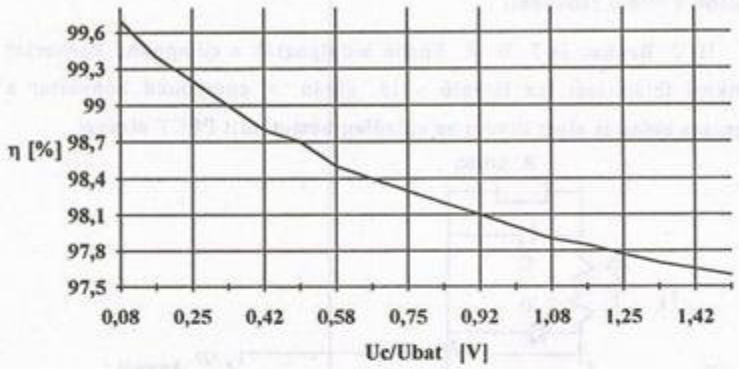
A konverter bementi árama: I_C

A telep feszültsége: U_{bat}

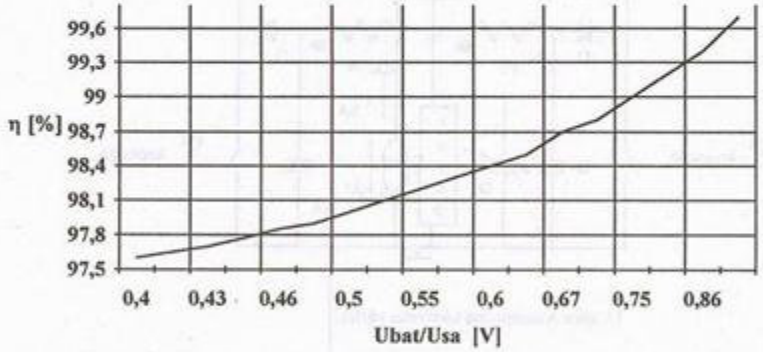
A napelem árama: I_{SA}

Az összefüggésekből látható, hogy a konverter a napelem-tábla teljesítményének csak egy részét kezeli. Az eddigiekben bemutatott konverterek közös jellemzője, hogy a napelem-tábla teljesítményének a 100%-át kezelik. A 12. ábrán is látható, hogy a DC/DC konverter az összteljesítménynél kisebb teljesítményt kezel, ennek következtében a relatív vesztesége csökken. Így az előzőekben ismertetett konverterekkel azonos hatásfokú DC/DC konverter alkalmazása esetén a rendszer hatásfoka nő.[5]

Pl: ha a $\eta_{átalakító}$ = 96%, és az U_{bat} = 12V,
valamint az U_{SA}=13-30V között változik, akkor a rendszer hatásfoka a 13., 14. ábrán látható módon változik.



13. ábra
A rendszer hatásfokának ábrázolása U_C/U_{bat} függvényében

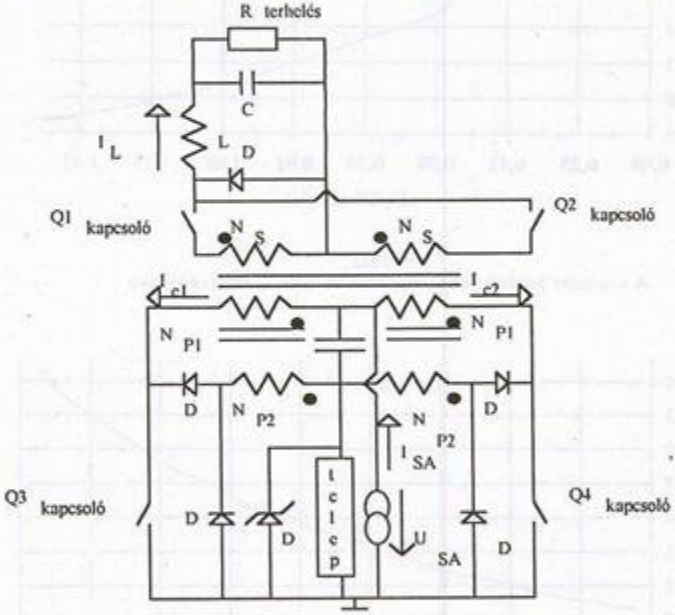


14. ábra
A rendszer hatásfokának ábrázolása U_{bat}/U_{SA} függvényében

A karakterisztikákból leolvasható, hogy ha a konverter bemenő feszültsége (U_C) kisebb vagy egyenlő az akkumulátor feszültségével (U_{bat}),

akkor kb 2-3,5%-os hatásfok javulást eredményez ez a módszer. Ha U_C nagyobb mint az U_{bat} akkor a hatásfok javulás kisebb, kb 1,5-2%-os, vagyis ez a módszer a veszteséget, kizárólag a felépítéséből adódóan, legalább a felére csökkenti.

H. J. Beukes és J. H. R. Enslin kidolgozták a compound konverter áramköri felépítését, ez látható a 15. ábrán. A compound konverter a mágneses erősítés elvét ötvözi az előzőleg bemutatott PPCT elvével.



15. ábra A compound konverter vázlata

Két szabályzó köre van. A Q3 és a Q4 kapcsolók az MPP szabályzást végzik. Egy galvanikus elválasztó fokozat kimeneti diódáit vezérelt kapcsolókra (Q1 és Q2) cserélve a valósítják meg a buszfeszültség szabályozását. [5]

2. Polaritásváltóval felépített MPPT

A párhuzamos teljesítménykezelés elvének a tanulmányozása után lehetőségként merült fel a 12. ábrán látható elvi felépítésből kiindulva a hatásfok javulás vizsgálata. A DC/DC konverter helyébe bármilyen galvanikus leválasztású konverter megfelel. De a galvanikus leválasztású konverterek bonyolult felépítésűek, sok induktivitást, sok vezérelt kapcsolót tartalmaznak. A DC/DC átalakítók közül csak a polaritásváltó konverter felel meg az áramkör azon követelményének, hogy a bemenete és kimenete között polaritásváltás valósuljon meg.

Így egy egyszerűbb felépítésű rendszer megtervezése és megépítése lehetséges a hatásfok-növekedés vizsgálatához. Ilyen egyszerűbb felépítésű rendszernek is van létjogosultsága kisebb műholdak energia-ellátó-rendszerében. Egyszerűbben, jobb hatásfokkal a buszfeszültség szabályozása nélkül valósíthatja meg az MPP követését.

ÖSSZEFOGLALÁS

A napelemes rendszerekben szükséges alkalmazni MPP követést a napelem drága volta és az űrbeli alkalmazásokban gondot okozó többlet teher (több napelem-tábla) elkerülése végett. Megvizsgáltunk néhány - napelemes tápellátó-rendszerekben alkalmazott - MPP szabályozási módszert. A párhuzamos energiakezelés elvét alkalmazó rendszer felépítéséből adódó hatásfok-növekedés lehetősége egy hatásfok-vizsgálat lefolytatatására ösztönzött. A H. J. Beukes és J. H. R. Enslin által megvalósított MPP szabályzót bonyolultnak találtuk egy tesztáramköri hatásfok-vizsgálat lefolytatásához. A mérések elvégzésére egy

polaritásváltóval megépített MPP szabályzót készítettünk. Az áramkör megvalósítását és mérési eredményeit több cikken keresztül ismertetem.

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] D. B. Snyman (MIEEE), J. H. R. Enslin
Simplified Maximum Power Point Controller for PV Installations
23rd IEEE PV Specialists Conference May 1993.

[2] Solar Energy Research Instute
Basic photovoltaic principles and methods
Van Nostrand Reinhold Company 1984

[3] W.J.A. Teulings, J.C. Marpinard, A. Capel, D.O' Sullivan
A new Maximum Power Point Tracking system
24TH Annual Electronics Specialist Conference

[4] Richard Redl, Antal Bánfalvi
Power conditioning system of an internactional amateur radio satellite
XXXIV. congress of teh . Institut Astronantical Fedration 1993. oct.

[5] H.J. Beukes, JHR Enslin
Analysis of a New Compound Converter as MPPT, Battery Regulator and Bus Regulator for Satellite Power Systems
24TH Annual Power Electronics Specialist Conference

[6] Ferenczi Ödön
Kapcsolóüzemű tápegységek
Műszaki könyvkiadó, 1978

The most of solar array systems consist three typical parts such as a solar array, a battery and an electric circuit. The optimum voltage and current are produced for the battery and for the user by the electric circuit. Because of the high price of the solar array, the evidentt requirements, prescribed for solar array systems are high efficiency and working on optimal power. The paper is recommending a new MPPT electric circuit with the reversing switch and using the principle of parallel power control, which offers maximum efficiency. Electric circuit design will be shown through series of papers. The present one is the first of them.