

Napelemes tápellátó rendszerekben alkalmazott
növelt hatásfokú, analóg maximális teljesítmény-
követő áramkör analízise

Ph.D. értekezés

Szabó István

Konzulens: dr. Szabó József

Budapest, 1996-97.

"Ráesni Newton fejére:

Alma
álma."
(Bokor Nándor)

"Ha a tudományt műveljük, nyugodtan állíthatjuk,
hogy teszünk valamit: a talaj itt biztos, s minden
felfedezés, még a legkisebb is, megmarad."

(Pierre Curie)

TARTALOMJEGYZÉK

1. ELŐSZÓ	4.
2. BEVEZETÉS	6.
3. A NAPELEM	8.
3.1. A Nap	8.
3.2. A napelem	10.
3.3. Maximális Teljesítményű Pont Követésének igénye	17.
4. NAPELEMES TÁPELLÁTÓ RENDSZEREK	20.
4.1. Az energiaellátó rendszer általános felépítése	20.
4.2. Tápellátó rendszer struktúrái	21.
Úreszközök tápellátása	23.
4.3. Tápellátó rendszerek tervezése	29.
5. MAXIMÁLIS TELJESÍTMÉNYŰ PONT KÖVETÉS (MPPT)	32.
5.1. Általános felvetések	32.
Kitöltési tényező, mint közvetlen vezérlési paraméter	32.
Többszörös lokális maximum problémája	33.
MPP meghatározásához nélkülözhetetlen a teljesítmény mérés?	34.
5.2. MPP Követési stratégiák funkcionális osztályozása	35.
6. KÖVETÉSI ALGORITMUSOK	37.
6.1. Hill-climbing (Hegymászó) algoritmusú követők	37.
6.2. Oszcillációs elven dolgozó követők	40.
6.3. Referencia követők	44.
6.4. MPR feszültségkövető rendszerek	45.
6.5. Visszatáplált kimenettel vezérelt MPP Követők	48.
7. A PÁRHUZAMOS ENERGIAKEZELÉS ELŐNYEINEK ALKALMAZÁSA MPPT-RE	52.
7.1. Elméleti áttekintés	52.
7.2. Realizált PPCT MPP Követő mérése, szimulációja	56.
8. MATEMATIKAI ANALÍZIS	64.
8.1. Kezdeti feltevések, a Buck konverteres modell.	64.
A modell tulajdonságai.	70.
Növelt hatásfokú PPCT struktúra modellje.	72.
9. ÖSSZEFOGLALÁS. Kompenzált Pszeudo-MPP Követő	79.

1. ELŐSZÓ

A dolgozat a teljesség igényére törekedve megpróbálja összefoglalni azokat a módszereket, melyek alkalmasak napelemes tápellátó rendszerekben a napelem Maximális Teljesítményű Pontjának Követésére (Maximum Power Point Tracking, MPPT). Egy általunk jónak tartott módszert megvizsgálunk, egyrészt realizált modelláramkörön végzett mérésekkel és digitális számítógépen történő szimulációval, másrészt egy újszerű matematikai vizsgálattal igazoljuk a mérések, szimulációk eredményeinek helyességét. A vizsgálatok során szerzett ismeretekre támaszkodva energetikai és ún. Követési hatásfokra optimalizált beállításra nyílik mód.

A bevezetés - a dolgozat második fejezete - kitekintést ad a napenergia hasznosításának széles és ma még korántsem teljesen ismert felhasználási spektrumára, melynek csak egy alkalmazási technológiája a napelem és a hozzá telepített elektromos energia-feldolgozó rendszer.

A harmadik fejezet megismerteti a fotoelektromos (Photovoltaic, PV) technológia számunkra érdekes jellemzőivel, a napelem felhasználói tulajdonságaival.

A negyedik fejezet összefoglalja a napelemes tápellátó rendszerek struktúráit, a tervezés legfontosabb követelményeit.

Az ötödik fejezetben az MPP Követés néhány általános elméleti és gyakorlati problémáját vetjük fel, valamint osztályozzuk a jelenleg ismert és alkalmazott követési stratégiákat.

A hatodik fejezetben a teljesség igényére törekedve bemutatjuk az elviekben bármekkora pontosságig fejleszthető ún. Valódi Maximális Pont Kereső (True Maximum Point Seeking, TMPS) elvet, valamint a Nem-valódi Maximális Pont Kereső (Non-true Maximum Point Seeking, NMPS) áramkörök családját. A működési elvek bemutatását megvalósított áramkörök elvi leírásával tesszük szemléletessé.

A hetedik fejezetben bemutatjuk a Párhuzamos Teljesítmény-átalakító Struktúrát (Parallel Power Conversion Structure, PPCS vagy Parallel Power Conversion Technique, PPCT), mint az energetikai hatásfok emelésének a gyakorlatban kevésbé propagált és elterjedt módszerét. A PPCT az alkalmazott energia-átalakító komplexitását nem, a struktúra bonyolultságát minimális mértékben emeli, mellyel jelentős, más hatásfok-optimalizálási eljárás költségéhez és nagyságrendjéhez képest attraktív hatásfok javulás érhető el. Ugyanebben a fejezetben ismertetjük az általunk realizált NMPS PPCT MPPT áramkör

mérésének, szimulációjának eredményeit. Az eredmények egzakt rögzítése és értékelhetősége miatt megalkottuk a Nem-valódi Maximális Pont Kereső (NMPS) rendszerek "jóságának" vizsgálatához elengedhetetlen viszonyítási rendszert, amelyet egy már alkalmazott rendszer általánosításával alakítottunk ki.

A nyolcadik fejezet tartalmazza az ún. Visszatáplált kimenettel vezérelt Nem-valódi MPPT áramkörök teljes matematikai vizsgálatának elvi leírását, két realizált áramkörön történő bemutatását.

A matematikai modell alapján feltérképezve ezen MPPT áramkörök működését, egy új típusú, eddig még sehol nem publikált ún. "Kompenzált Pszeudo-MPP Követő" áramkör megvalósítására és vizsgálatára teszünk javaslatot a kilencedik fejezetben.

A dolgozat első hat fejezete tartalmazza a vonatkozó irodalom áttekintését, rendszerezését. Az utolsó három fejezetben leírt vizsgálati módszerek, megállapítások és javaslatok a szerző önálló eredményei.

A dolgozat szerkesztésével kapcsolatban megjegyezzük, hogy terjedelmi, didaktikai szempontból olykor fontosabbnak tartottuk egy adott összefüggés tartalmát, értelmezését konkrét példán keresztül bemutatni, mint annak általános levezetését. A dolgozatban fellelhető, Nagy Kezdőbetűkkel Álló Kifejezések, fogalmak angol elnevezésükkel, rövidítésükkel, - ill. a vonatkozó irodalomban esetlegesen előforduló eltérő elnevezésükkel együtt - megtalálhatók.

Ezúton köszönöm meg a Budapesti Műszaki Egyetem Mikrohullámú Híradástechnika Tanszék munkatársainak a támogatást. Külön köszönöm az Űrkutató Csoportnak a téma részeként a napelemes tápellátó rendszerek tervezési szempontjai feldolgozásához nyújtott, és egyéb máshol beszerezhetetlen információkhoz való hozzáférést, a 708-as laboratórium erkölcsi, információs és eszközökben megnyilvánuló segítségét, más irányú tevékenységeim miatti többlet szervezés tolerálását, konzulensem, dr. Szabó József szakmán is túlnyúló emberi támogatását, biztatását. Köszönöm a Gondviselésnek azokat az objektív körülményeket, melyek nélkül aligha készülhetett volna el a dolgozat.

Dunaújváros, 1996. december 21.

2. BEVEZETÉS

Az alternatív energiaforrások témaköre 1972, az olajválság kirobbanása óta a fejlett világ divatos aktualitását adja nemcsak tudományos, hanem népszerű tudományos-ismeretterjesztő cikkekben, sajtótermékek-ben is. A kezdeti lelkesedés mintha mára alábbhagyott volna, hiszen a nagy érdeklődést a tömegek jövő iránti bizalmatlansága váltotta ki és ez a félelem az idő előrehaladtával a különböző tudományos tématerületekről érkező tanulmányok hatására lecsökkent. Geológusok szerint a fosszilis energiahordozók területén nincs ok aggodalomra, a szén-és kőolajkészletek legalább 100 évre biztosítják az energiatermelést ill. az üzemanyagot a belső égésű motorok számára. A fogyasztói társadalom átlagfogyasztóját megnyugtatja az a tény, ha már az unokái számára biztosítva látja a létezéshez szükséges erőforrásokat. Tovább mérséklék a nyugtalanságot azok az eredmények, melyeket napjainkban az új energiahordozók vagy energiatermelő technológiák után kutató tudósok publikálnak.

Az idők során a kutatások fő mozgatórugójává egyre inkább a környezetvédelem vált. Az új technológiák fejlődése és elterjedése, a jogi-államigazgatási szabályozás és a termelési költségek együttes hatása szoros korrelációban állnak. Az energiatermelés és -felhasználás döntő hányadát ma és a belátható közeli jövőben is hagyományos energiahordozók adják. A használt technológiák olcsóságának egyik meghatározó oka az, hogy az energiahordozók előállítás, de főként tárolása időben és térben jól megoldott, az erőátviteli berendezések, hőerőgépek technológiája kiforrott, olcsó. Mindezek csak részben mondhatók el a nukleáris, a víz-, a szél-, ill. a napenergiáról. A módszerek előnyei-hátrányai közel arányosak az elterjedtségükkel. Megemlítjük még a fúziós reaktort, mint egy fejlesztés alatt álló, ígéretes technológiát, melynek térnyerésére ma még várni kell. Tény, hogy a rendkívül magas hőmérsékletű, plazma halmazállapotú (üzem)anyag kezelésének problémája nem megoldott. Lényegesen nagyobb sebességű irányítástechnikára lenne szükség a folyamat biztonságosan ellenőrizhető fenntartásához.

A napenergia-felhasználás témakörében hétköznapi gondolkodással azonnal a napkollektoros melegvízes rendszerekre vagy a napelemes tápellátó rendszerekre asszociálunk. Napkollektort,

napelemet ma már bárki vásárolhat épületgépészeti, elektronikai alkatrész áruházakban ill. a gyártóknál. Nem közismertek azonban a Nap energiájának szolárkémiai alkalmazásai.

A Nap energiáját tükrökkel adott térfogatra fókuszálhatjuk, ahol így nagyon magas hőmérséklet is elérhető. Ma már átlagos környezeti adottságok mellett is lehetséges a 2000 °C feletti technológiai hőt napkemencében előállítani. Használható koncentrált napsugárzásból nyert napenergia vegyi reakciók energiaszükségletének fedezésére. Fotoreakciók során napenergiával helyettesíthető a hősugárzó mesterséges fényforrás, melynek tetemes áramfogyasztása és rövid élettartama küszöbölhető így ki. Ráadásul nem kell szűrni a fényforrást. A napfény fehér fényforrás, vagyis az intenzitás kvázi azonos amplitúdóval szerepel minden hullámhosszon az adott (itt a látható) spektrumban. Szűrt napfényel bármely hullámhosszon lehet dolgozni, nem úgy, mint például egy monokromatikus lézerefénynél.

A napenergia gazdaságos tárolása jelenleg még nem megoldott. A német Légügyi és Űrhajózási Társaság ill. az izraeli Weizmann Institute 480 kW teljesítményű metán akkumulátorral kísérletezik. A naphővel fűtött endoterm metán reformációt és az így nyert szintézisgáz exoterm metanizációját kapcsolják össze. A kétirányú reakció szolgál a kémiaailag megkötött napenergia tárolására.

Azokban a napenergiát használó rendszerekben, ahol szükséges a folyamatos energia-hozzáférés, előszeretettel nyúlnak vissza a már bevált akkumulátoros energiatároláshoz (kis méret, relatívan nagy energiasűrűség, megbízható üzem) [1].

3. A NAPELEM

3.1. A Nap

A Nap közepes méretű csillag, a Naprendszer centrális égitestje. Anyaga magas hőmérsékletű, nagy nyomású Hidrogén, mely termonukleáris fúziós reakció során, elektromágneses sugárzás kíséretében Héliummá alakul. A folyamat mintegy 4 milliárd éve tart és többször ennyi ideig fog még tartani a Hidrogén-Hélium arányából kiszámított becslések alapján. A Nap távolsága a Földtől 149.6 ± 2.5 millió km, tömege $2 \cdot 10^{30}$ kg, összszugárzása $3.86 \cdot 10^{26}$ W. Ennek az irdatlan teljesítménynek szerény töredéke - amely eljut hozzánk - tartja fenn az életet bolygónkon.

A Napból eredő sugárzás egyrészt elektromágneses, másrészt korpuzkuláris jellegű. A korpuzkuláris sugárzás a napkitörésekből és a napszélből ered.

A napkitörésekből - melyek időtartama néhány perc, vagy akár több nap is lehet - származó protonfluxus 10^4 proton/cm² nagyságrendű, a protonok energiája $3 \cdot 10^7$ eV is lehet. A napkitörés teljes dózisa tipikusan 10 és 1000 röntgen közötti értékű.

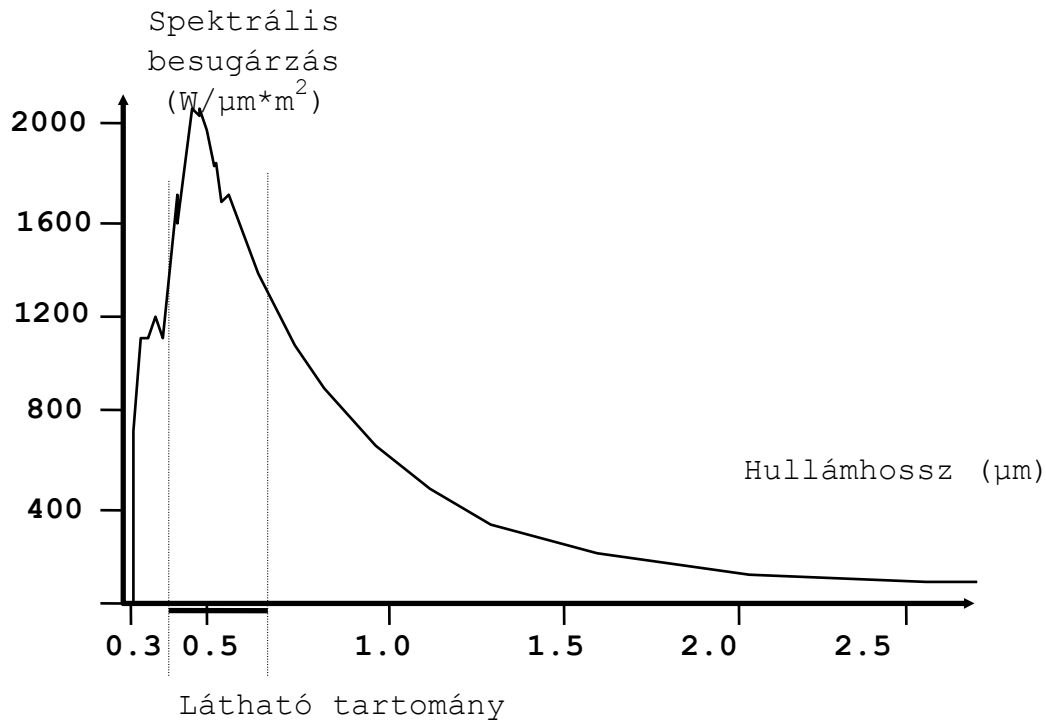
A napszél a Napból áramló plazma, melynek fluxusa 3 és 10^9 részecske/cm² a részecskék energiája 200 és 8000 eV között változik [3].

Ember űrutazása során a Van Allen övezeten túl a protonszugárzás ellen védekezni kell. A napszél magasabb dózis esetén az űreszköz optikai és hőszabályozó elemeit teheti tönkre.

A fúziós reakció során elsugárzott elektromágneses energia 95%-a a 0.3 és 3 μm hullámhossz tartományú fény formájában jelentkezik, melynek spektrális eloszlása a 3.1. ábrán figyelhető meg [1].

A napfény energiatartalma Földtávolságnyira 1.353 kW/m^2 . Mind az intenzitás, mind az egyes összetevők aránya jelentősen módosul a légköri szűrésen való áthaladás során. A napfény csúcsintenzitása a legfényesebb déli napsütés esetén is alig 1 kW/m^2 a földfelszínen [1].

Az eddigiek alapján megállapítható, hogy akár Földi, akár Földközeli űrbeli alkalmazásról van szó, a Nap időben és térben konstans, ismert spektrumú elektromágneses sugárzónak tekint-



3.1. ábra. A napsugárzás intenzitása a hullámhossz függvényében

hető. Intenzitásváltozás csak rossz pozicionálás esetén ill. Földi alkalmazásnál a légkör anyagi összetételének és mozgásának sztochasztikus változásaiból származó, meglehetősen bonyolult matematikai modellezésű szűrés miatt jöhet létre. A napelemet alkotó cellák kimenő teljesítmény hullámhossz-függésének ill. a felhők intenzitáseloszlás-megváltoztató hatásának vizsgálata jelen dolgozatnak nem témája. Megjegyezzük, hogy gyakorlati tervezés során ez nem okoz problémát, mert a napelemes tápellátó rendszerek tervezésekor csak a napelem felületére jutó intenzitás energiatartalmát tekintjük alapvető tervezési paraméternek. Nem foglalkozunk a napelem energia-átalakító képességének (kollektív hatásfok) hullámhossz-függésével sem.

Az energiatárolóval felépített, folyamatos energiaellátást biztosító napelemes tápellátó rendszerben a működés során előálló legrosszabb esetre kell meghatározni a rendszer paramétereit (biztonsági időtartalék). A pontosan ismert, vagy a statisztikai-valószínűségi számítással becsült leghosszabb

árnyékos időtartam mellett a napelem-teljesítmény csökkenését előidéző időleges (felhősödés) vagy irreverzibilis okokkal (öregedés, degradáció, szennyeződés) is foglalkozni kell.

3.2. A napelem

Napelemeknek nevezzük azokat a félvezető alapú alkatrészeket, melyek a nap fényenergiáját közvetlenül elektromos energiává alakítják.

Azokon az eseteken túl, mikor a specifikáció vagy a feladat jellege lehetetlenné teszi más energiaforrás alkalmazását, bemutatjuk, miért érdemes megfontolni minden energiaellátást igénylő esetben a napelemek használatát.

Megbízhatóság:

- Nem tartalmaz mozgó alkatrészeket (Klasszikus mechanikai értelemben), nincs kopás.
- Nem tartalmaz folyadékokat, gázokat (kivéve a hibrid rendszereket), nem kell ezek szivárgásával, elfolyásával, pótlásával, karbantartásával számolni.
- Nincs üzemanyag-fogyasztás.
- Helyes üzemeltetés esetén minimális karbantartás-igényűek.

Relatívan olcsó:

- A legelterjedtebb típusok Szilíciumból készülnek, ami Földünk 2. leggyakoribb eleme.
- Egylépcsős direkt energia-átalakítás, relatívan magas, 14-28%-os konverziós hatásokkal.

Sokoldalú felhasználhatóság:

- Moduláris tervezhetőség. Különböző számú tömbök összekapcsolásával a leadott teljesítmény tekintetében széles a spektrum: A mikrowattos zsebszámológépektől a négyzetkilométeres nagyságrendű megawattos teljesítményű központi energiatermelő üzemekig terjed. Könnyen kialakítható helyszíni, azonnal installálható egyedi tápellátás.
- Magas W/kg arány: Űralkalmazások esetén döntő gazdasági érv. Földi alkalmazásoknál alkalmassá teszi lakóépületek fűdémszerkezetébe való beépítésre.
- Gyors dinamikus válaszú: Kimeneti paramétereit pillanatszerűen változtatja, igénytelen extrém lezárásokra.
- Széles működési hőmérsékleti tartománnyal bír.

Környezetbarát:

- A működése alatt nem termel környezetkárosító anyagokat. Jól kihasznált üzemeltetéssel a napelem élete során nyert energiát viszonyítva az előállítás során termelt hulladékok, toxikus gázok mennyiségéhez, a napelemes technológia környezeti terhelése minimális.

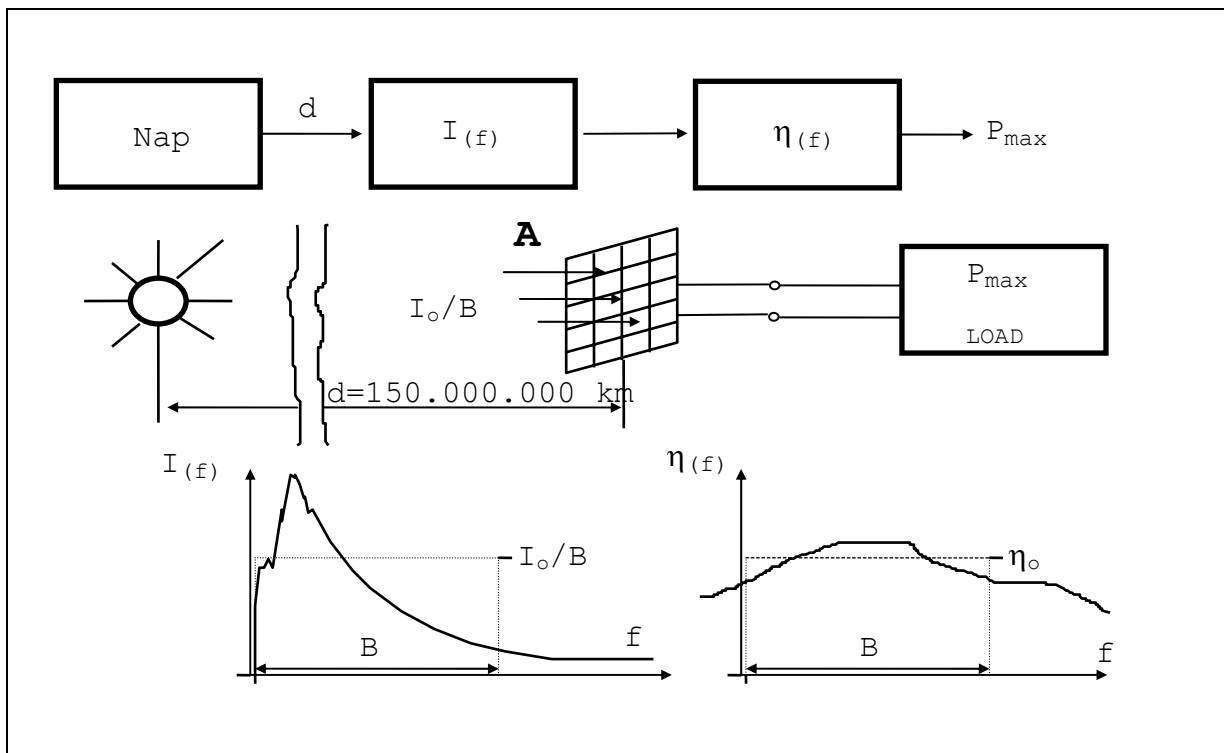
A napelemek ellen szól, hogy a napenergia nem koncentráltan jelenik meg, Földi alkalmazásban viszonylag megbízhatatlan és a hétköznapi felhasználása még drága [1][2].

A napelem besugárzási modelljében egy frekvenciafüggetlen, de hőmérséklet- és intenzitásfüggő hatásfokkal számolunk ($\eta_{o(T,I)}$), továbbá nem foglalkozunk inhomogenitással és degradációval. A 3.2. ábra mutatja a modellt.

B paraméterrel jelöltük azt az ekvivalens fény sáv szélességet, amelyben megtalálható a napfény energiájának 95 %-a (kb. a 0.3-3 μm hullámhossz tartomány). η_o integrális hatásfok jelöli a B sáv szélességre eső átlagos kollektív hatásfokot ($\eta(f)$), így a villamos oldalon nyerhető teljesítmény:

$$P_{(max)} = A \cdot \int_0^{\infty} \eta(f) \cdot I(f) \cdot df = A \cdot \int_B \eta_o \cdot \frac{I_o}{B} \cdot df = \eta_o \cdot I_o \cdot A \quad (3.1)$$

ahol $I_o=1353 \text{ W/m}^2$, A pedig a 3.2. ábrán is jelölt intenzitásra mérőleges napelem-felület. A modell földi telepítés esetén a



3.2. ábra. A napelem besugárzási modellje

légtör hatását az ún. Légtömeg (Air Mass, AM_x) mennyiséggel veszi figyelembe. A hosszabb utat, vagy a sűrűbb, elnyelőbb közeget magasabb indexű AM_x mennyiség jelzi. AM_0 esetén $I=I_0$, AM_1 Légtömeghez (ami a legtisztább légtörrel jelöli, merőleges áthaladáskor, a tengerszinten) $I=924.9 \text{ W/m}^2$, AM_{10} -hez $I=234.5 \text{ W/m}^2$ intenzitás tartozik. Széles tartományban jól közelíti az AM_x tényleges intenzitás értékét az

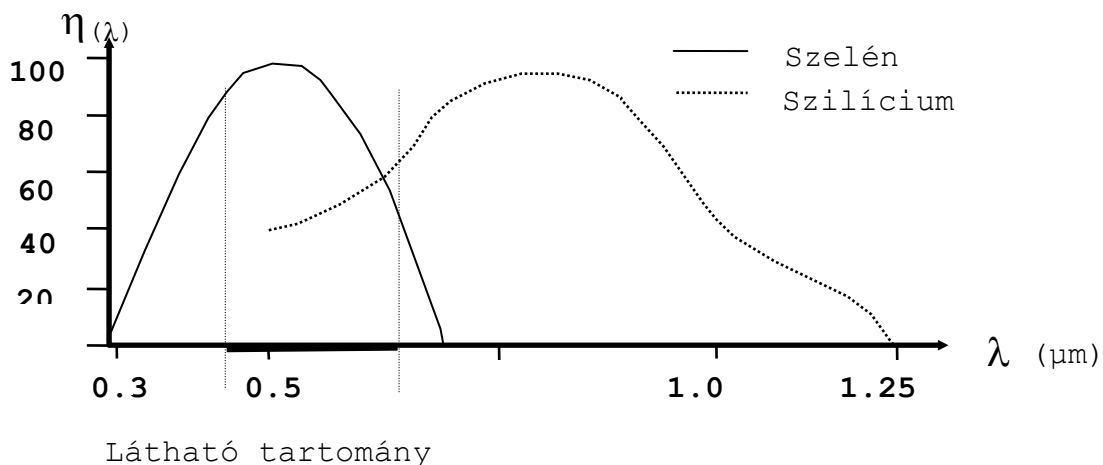
$$I_{AMx} = I / \cos(z), \quad \text{ahol} \quad (3.2)$$

z a Földfelszín normálisa és a beeső napsugár iránya közötti szög, $I=924.9 \text{ W/m}^2$.

A földi telepítés esetén az előbbiekben leírt direkt sugárzáson kívül számolni kell a diffúziós sugárzással is, mely a direkt sugárzásra szuperponálódva adja a teljes besugárzást, ami végül a napelem felületét éri. A szórás, fényelnyelés, diffúzió modellezése kellően bonyolult, emellett nem is célunk, így ez a modell nem tartalmazza e jelenségek matematikai leírását.

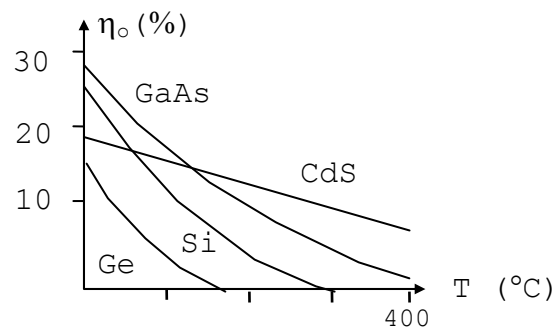
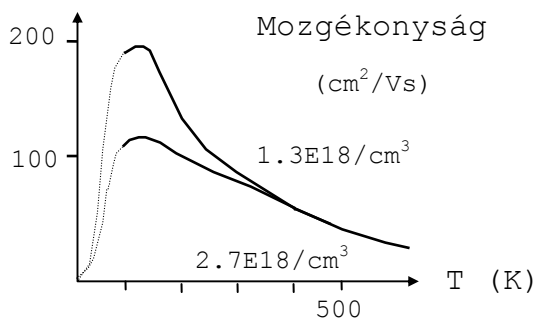
A napelemek anyagát félvezetők képezik. Az energia-átalakítás folyamatában a p-n átmenet mint külső feszültségforrás nélkül üzemelő fotodióda jelenik meg, amely fény hatására forrásfeszültséget hoz létre a kivezetésein.

A fényelektromos effektust először Edmond Becquerel észlelte 1839-ben, majd a vezető folyadékok után a figyelem a réz-oxidokra, szelénre és Szilíciumra terelődött. A ma készített Si fényelemek a Nap elektromágneses sugárzását mintegy 4-23.5 %-os határfokkal alakítják elektromos energiává, a kialakuló forrásfeszültség elérheti a 0.5 V-ot. A szelén fényelem spektrális érzékenysége csaknem egybeesik a látható fény spektrumával, ami alkalmassá teszi fotometrikus alkalmazásokra. A Szilícium fényelem alacsonyabb frekvencián éri el a kollektív határfok maximumát és jóval nagyobb a sáv szélessége, ami indokolja a magasabb integrális határfokot (3.3. ábra).



3.3. ábra. Félvezető anyagok fényelektromos hatásfokai ($\eta_{(f)}$) a hullámhossz függvényében

A napelemek makro tulajdonságait a többségi töltéshordozók mozgékonyasága határozza meg. A 3.4.a. ábra 2 különböző szennyezéskonzentráció esetén mutatja a Szilícium töltéshordozók mozgékonyaságát. Látható, hogy szobahőmérsékleten már túl vagyunk a maximumon és a mozgékonyaság csökken a hőmérséklet emelkedésével. Itt jegyezzük meg, hogy a mozgékonyaság csökkenése az abszolút nulla fok közelében főként a Naptól nagy távolságra kerülő műhold /Deep Space Mission/ energiaellátó rendszerének tervezésekor lényeges paraméter. A termikusan gerjesztett töltéshordozók olyan sok energiával bírnak, hogy könnyedén keresztezik a kiürített réteget, mintha az ott sem lenne. A struktúra felborul, a cella aktivitás és a hatásfok lecsökken (3.4.b. ábra) [1].

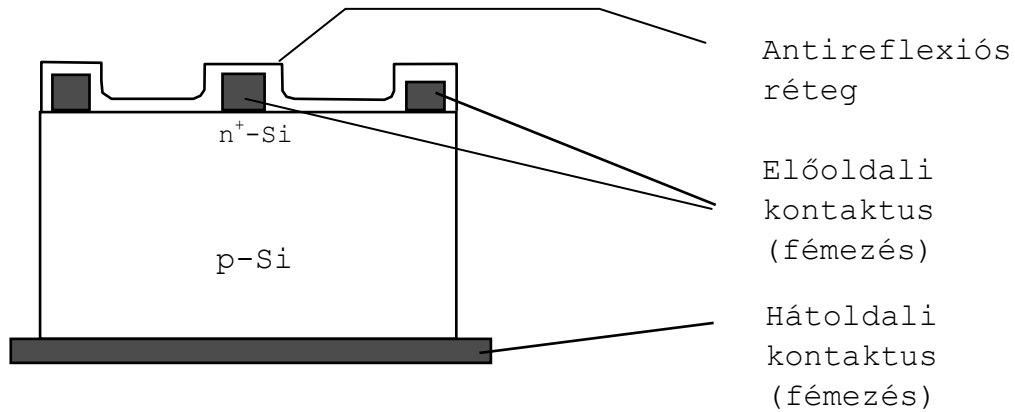


3.4.a. ábra. A Mozgékonyaság hőmérséklet-függése különbözőképpen adalékolt Si esetén

3.4.b. ábra. B sávszélességre vonatkozó integrális hatásfok (η_0) hőmérséklet-függése

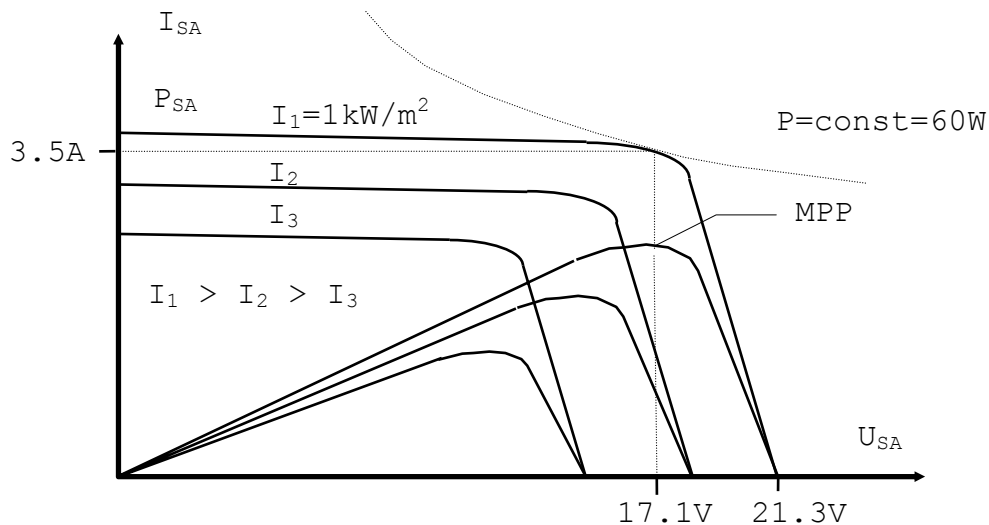
Egy Szilícium alapú napelem-konstrukciót mutat a 3.5. ábra. A bemutatott egyedi napelemeket soros és párhuzamos kapcsolással nagyobb egységekbe szervezik, a tokozás az elemek hermetikus lezárására és mechanikai behatásoktól való korlátozott védelmére szolgál. Az űrtechnikában napjainkban elsősorban GaAs alapú egykristályos hetero-átmeneteket alkalmaznak az egyedi cellákban.

Mint azt korábban leírtuk, az űrben lévő eszközök nagymértékű proton- és elektronfluksusnak, valamint radioaktív sugárzásnak vannak kitéve. Az idő előtti öregedést, degradálódást késleltetendő a napelemek felületét általában kvarcüveggel borítják, megfelelő adalékolással igyekeznek szerkezetét ellenállóvá tenni. A reflexió csökkentésével további hatásfoknyereség érhető el.



3.5. ábra. Egyszerű Szilícium napelem konstrukció

Úralkalmazásoknál az alkalmazott energiaellátás technológiai költségébe beletartozik a pályára állítás díja is. Ebből adódóan az egész tápellátó rendszer a szolgáltatott energia mennyiségét, az esetlegesen kisebb tároló kapacitást - és mindezek által a kevesebb össz tömeget - tekintve a drágábban előállított napelemmel valószínűleg olcsóbban megvalósítható.



3.6. ábra. Kereskedelmi napelem-tábla áram-feszültség ill. a hozzá tartozó teljesítmény-feszültség karakterisztikái különböző besugárzási intenzitások mellett

Tápellátás szempontból a legfontosabb elektromos paraméter a napelem teljesítménye, áramköri szempontból a kimenetén szolgáltatott feszültség. Teljesen kézenfekvő, hogy a napelem

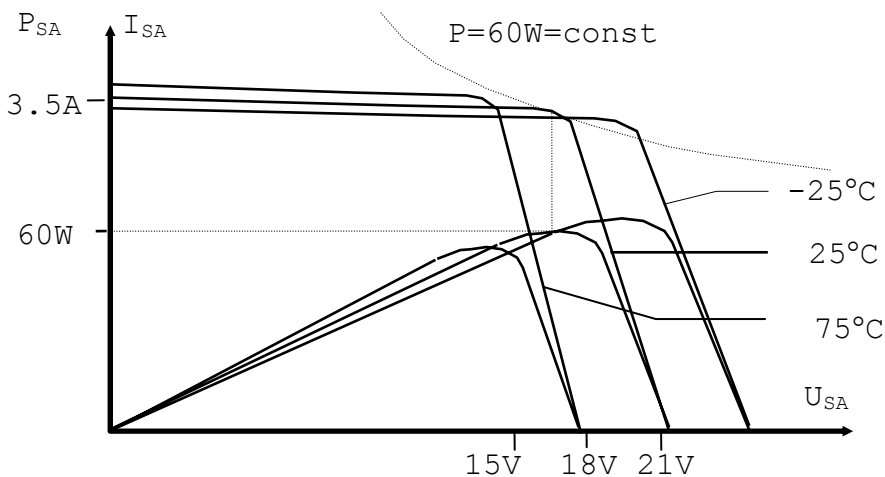
vizsgálatakor a külső változásokra adott válaszokat a teljesítmény-feszültség, ill. az áram-feszültség kimeneti karakterisztikákban adják meg.

Egy 60 W-os kereskedelmi napelem-tábla tipikus áram-feszültség ($I_{SA}-U_{SA}$) és teljesítmény-feszültség ($P_{SA}-U_{SA}$) karakterisztikája látható a 3.6. és 3.7. ábrán [4][5][6][7]. Ekkora teljesítményt kb. 1/3-1/2 m²-es panel képes előállítani.

Egyéb adatok: Rövidzárási áram, $I_{SA0}=3.8$ A, üresjárási kimeneti feszültség, $U_{SA0}=21.3$ V, az üresjárási kimeneti feszültség hőmérsékleti együtthatója $-73\text{mV}/^\circ\text{C}$, a rövidzárási áram hőmérsékleti együtthatója $3.3\text{mA}/^\circ\text{C}$, mely adatok 45°C névleges cella-hőmérséklet mellett érvényesek. A 60W-os napelem-tábla mérete 467 x 1109 x 54 mm.

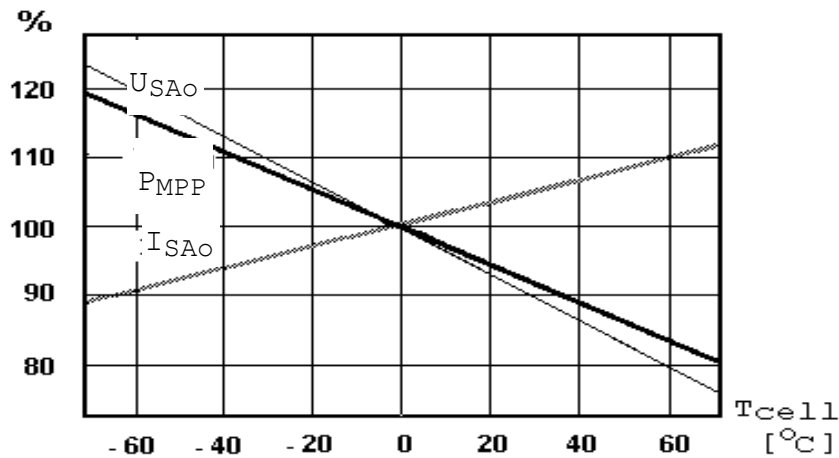
Szokásos grafikusán megadni a kimeneti karakterisztikákat, a mechanikai (szerelési) méreteket, tömeget. Az egyértelműség kedvéért a katalógusadatokhoz jelzik azok mérésének körülményeit is (T_{cell} , $T_{\text{környezet}}$, I intenzitás, AM_x , konvekciós hűtésű környezet esetén $v_{\text{szél}}$). Használatos módszer 1 cellára vonatkoztatva megadni az U_{SA0} , I_{SA0} , P_{MPP} és a kollektív hatásfok adatokat. Néha megadják az ún. telítési vagy kitöltési tényezőt (Fill factor), amely az $U_{SA}-I_{SA}$ karakterisztika alatti terület százalékos arányát jelöli az $U_{SA0}\cdot I_{SA0}$ téglalap területhez viszonyítva [13].

A 3.7. ábra jól szemlélteti a munkapont hőmérséklet-függőségét. A berajzolt hiperbola az $I_{SA}-U_{SA}$ síkon mutatja a konstans teljesítményű pontokat.



3.7. ábra. Kereskedelmi napelem-tábla áram-feszültség ill. a hozzá tartozó teljesítmény-feszültség karakterisztikái a cella-hőmérséklet (T_{cell}) függvényében

A 3.8. ábra a cella-hőmérséklet függvényében mutatja a napelem jellemző mennyiségeit.



3.8. ábra. Kereskedelmi napelem jellemzői a cella-hőmérséklet függvényében

A napelem munkapont-függő belső ellenállású generátorként is jellemezhető, amely egy adott környezeti paraméter-beállítás (T_{cell} , I , stb.) mellett az aktuális karakterisztika MPP-jétől a magasabb áramú, alacsonyabb feszültségű tartományában áramgenerátornak ($R_b \rightarrow \infty$), az alacsonyabb áramú, magasabb feszültségű tartományában pedig feszültséggenerátornak tekinthető ($R \rightarrow 0$). A MPP körül a belső ellenállás viszonylag hirtelen, folyamatosan változik közel nulla és az igen nagy Ω értékek között. Ezzel összhangban az $I_{SA}-U_{SA}$ és a $P_{SA}-U_{SA}$ görbe meredeksége az MPP környezetében jelentősen változik.

Félvezető-fizikai p-n átmenet modell alapján a napelem $U_{SA}-I_{SA}$ karakterisztikája meghatározható:

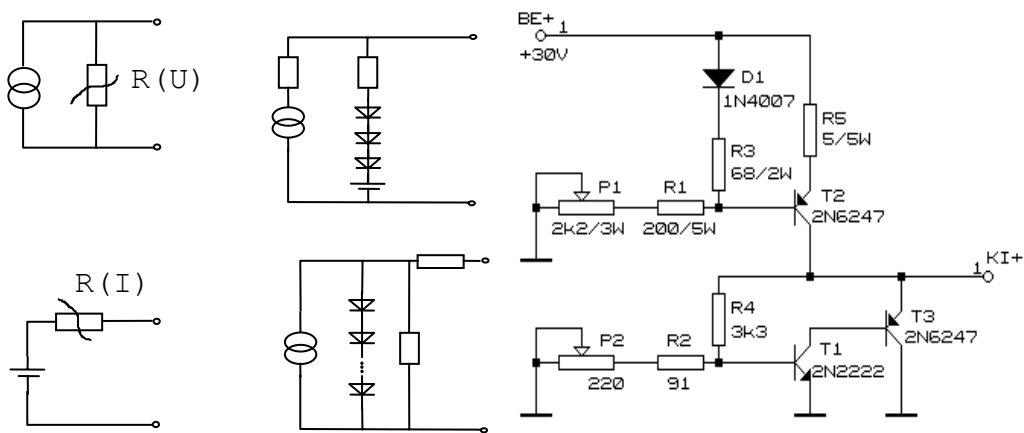
$$U_{SAx} = n \cdot \frac{k \cdot T_{cell}}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_{SAo} - I_{SAx}}{I_{sat}} + 1 \right) \quad (3.3),$$

ahol x jelöli a kialakuló munkapontot, n a sorba kapcsolt cellák száma, k a Boltzmann állandó, T_{cell} a napelem-cellák abszolút hőmérséklete, q egy elektron töltése, I_{sat} az adott p-n struktúrára vonatkozó szaturációs áram (10^{-10} A nagyságrendű).

$I_{SAo}(T_{cell}, I)$ szoros (közel lineáris) kapcsolatban áll a besugárzási intenzitással, normál intenzitáskivezérlés tartományokban. Mivel a kifejezésben szereplő konstansok és változók adott struktúra mellett ismertek, ezért bármely hőmérséklet, besugárzás, valamint áramkörüi környezet mellett a

munkapont számítható. A gond általában abból adódik, hogy konkrét számítás során csak numerikus módszerekkel megoldható egyenletet kapunk, ami az esetek zömében bonyolítja a vizsgálatokat.

Számos esetben a napelemek nemlineáris $U_{SA}-I_{SA}$ karakterisztikájának modellezése, egyszerűsítése az elméleti és a gyakorlati vizsgálatokban szükséges. A napelemek MPP vándorlásának nyomon követése, gyakorlati realizálása fontossá válhat a Nem-valódi MPP Követő áramkörök vizsgálatakor. A 3.9. ábra bemutat néhány elvi és gyakorlati megoldást, amelyek mérésekben, szimulációkban alkalmasak a nemlineáris napelem-karakterisztika közelítő helyettesítésére.



3.9. ábra. Napelem-szimulátor áramkörök

3.3. A Maximális Teljesítményű Pont Követésének igénye

A Maximális Teljesítményű Pont Követését gazdasági indokok motiválják. Célja a teljes napelemes tápellátó rendszer előállítási és működtetési költségének csökkentése.

A MPP Követés elvének alkalmazásával adott méretű, adott besugárzású napelemből, adott idő alatt ideális esetben az elérhető összes energiát ki lehet termelni. Megfordítva a gondolatmenetet: Ha egy napelem nem MPP-ben működik, akkor adott energiaszükséglet eléréséhez adott idő alatt több napelem egységre van szükség, mint MPP Követéssel. Ez önmagában költségnövelő tényező. Űralkalmazás esetén a tömeg kérdés még komolyabb anyagi vonzattal jár. Ha környezetvédő szemlélettel a működtetési költségek közé számítjuk a napelem és az

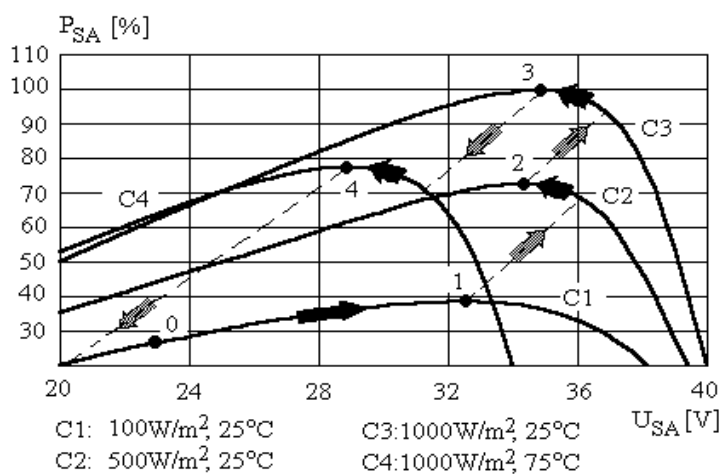
elektronika előállításakor és megsemmisítésekor keletkező környezetszennyezési költséget, akkor valószínűsíthető az MPPT rendszer olcsóbb üzeme. Egyszerűbben fogalmazva: MPPT-vel kevesebb szennyezés, több felhasználható energia keletkezik.

MPP Követés megvalósításának akkor van értelme, ha adott teljesítményigény esetén az MPP beépítésével felszabaduló napelem-költségek meghaladják az MPP kialakításának költségét.

A gyakorlati feladat megfogalmazása a következő: A folyamatosan változó környezeti paraméterek miatt, azzal összhangban mozgó karakterisztika maximális teljesítményű pontjának folyamatos beállítása a PV generátor kimenetén, azaz a rá kapcsolódó terhelő konverter bemenetén. Fizikailag az MPP konverter bemeneti impedanciájának a napelem aktuális impedanciájához való illesztéséről van szó, amely a bemeneti munkaponti adatokat éppen az MPP-be állítja. A beállítás %-os pontossága /Követési hatásfok, $\eta_{kö}$ (Tracking efficiency, η_{tr}) /, ill. a tranziens időállandója nem túl kritikus paraméter.

A 3.10. ábra egy kereskedelmi napelem maximális teljesítményű pontjának vándorlását mutatja be egy tipikusnak mondható nap során.

A bemutatott görbesereg a korábban már leírt intenzitás- és



3.10. ábra. Egy átlagos napra jellemző besugárzás- és hőmérséklet-változás hatására fellépő eltolódások a napelem teljesítménygörbéiben. A nyilak az MPP konverter bemeneti munkapontjának feltételezett mozgását jelzik.

hőmérséklet-függőség alapján mutatja be a különböző napszakoknak megfelelő, az aktuális helyi idő- és meteorológiai pillanatokban érvényes teljesítmény-karakterisztikákat.

Jelen dolgozatban a napelemes tápellátó rendszer optimalizálása során a napelem-besugárzási modell kimenetén jelentkező villamos teljesítményt (P_{\max}) tekintjük bemenő paraméternek és az MPPT kimenetén található terhelés teljesítményét nevezzük kimeneti paraméternek.

$$P_{ki} = P_{\max} \cdot \eta_{conv} = P_{MPP} \cdot \eta_{kö} \cdot \eta_{conv} \quad (3.4),$$

ahol P_{ki} a követő kimeneti teljesítménye, P_{MPP} a napelemből aktuálisan kinyerhető maximális teljesítmény, $\eta_{kö}$ a követési hatásfok, η_{conv} pedig az MPP követőt realizáló konverter energetikai hatásfoka.

Nem foglalkozunk a napelem felületére érkező elektromágneses sugárzás optikai anomáliáival (reflexió, szűrés, interferencia), valamint a napelem mechanikai-konstrukciós és pozicionálási kérdéseivel. Így a fentiekben leírt nemlineáris függvénnel jellemzett "ideális" generátor alkotja a MPP Követő bemenetét, a kimeneti terhelés pedig célszerűen egy energiatároló akkumulátor, melyet a vizsgálatok szempontjából elég jó közelítéssel egy feszültség-generátorral jellemzünk. A feladatunknak a követő kimeneti teljesítményének a növelését tekintjük, amely magába foglalja mind az MPP Követő követési hatásfokának ($\eta_{kö}$), mind pedig az energetikai hatásfokának (η_{conv}) a javítását. A probléma tisztán elektromos.

A korábbi vizsgálatok során megállapították, hogy különböző terheléseket közvetlenül a napelemre kapcsolva, milyen hatásfokkal (η_T) nyerhető ki az energia [37]. η_T értéke a nappal folyamán fellépő besugárzás-változásból fakadóan az aktuális időponthoz tartozó hatásfok-értékek súlyozott átlagaként jellemzi az energiatranszfert. Természetesen a terhelés fajtája jelentősen befolyásolja az illesztés jóságát, η_T értékét.

A korábbiaknál pontosabb megfogalmazással az MPPT alkalmazása akkor reális, ha az alkalmazott elektronika költsége alacsonyabb, mint a többlet energia $/(\eta_{kö} \cdot \eta_{conv} - \eta_T) \cdot P_{MPP} /$ ára. Többletenergia MPPT illesztésével akkor jön létre, ha az

$$\eta_T < \eta_{kö} \cdot \eta_{conv} \quad (3.5)$$

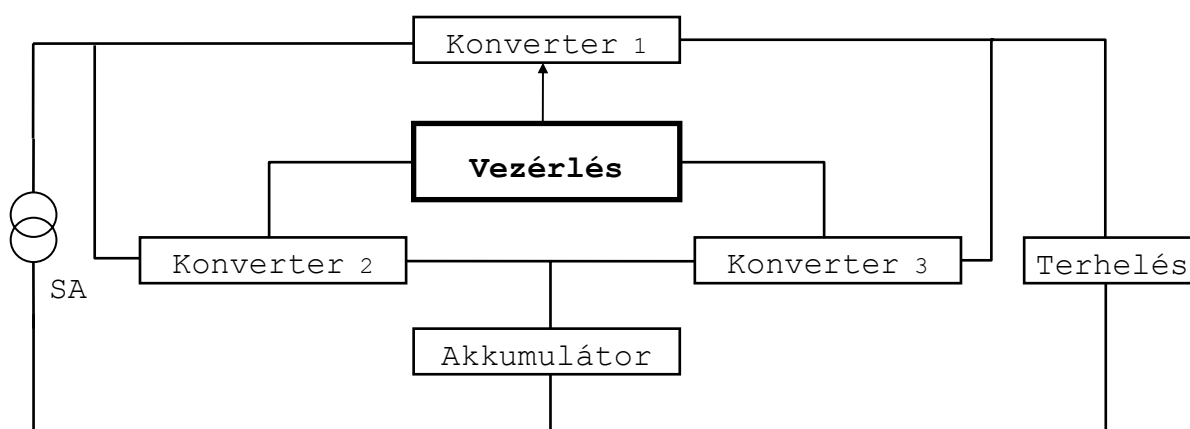
feltétel teljesül.

4. NAPELEMES TÁPELLÁTÓ RENDSZEREK

4.1. Az energiaellátó rendszer általános felépítése

Az energiaellátó rendszer felépítését tekintve akkor a legegyszerűbb, ha a fogyasztó adott időben a megfelelő mennyiségben és a kívánt paraméter szerinti energiát kapja egy energiaforrástól. Ekkor értelemszerűen egy energiaforrásból, egy energia továbbító sínből és egy fogyasztóból áll a rendszer. Ha a fogyasztó kívánt és a forrás szolgáltatott paraméterei nem egyeznek meg, akkor energia-átalakítóra, ha a szolgáltatott és kívánt teljesítmények időfüggvénye különbözik, akkor pedig energiatárolóra (és további energia-átalakítóra) van szükség.

A napelemes tápellátó rendszerekre alkalmazva a 70-es években A. Poncin és Y. Robin-Jouan publikálta először az ún.



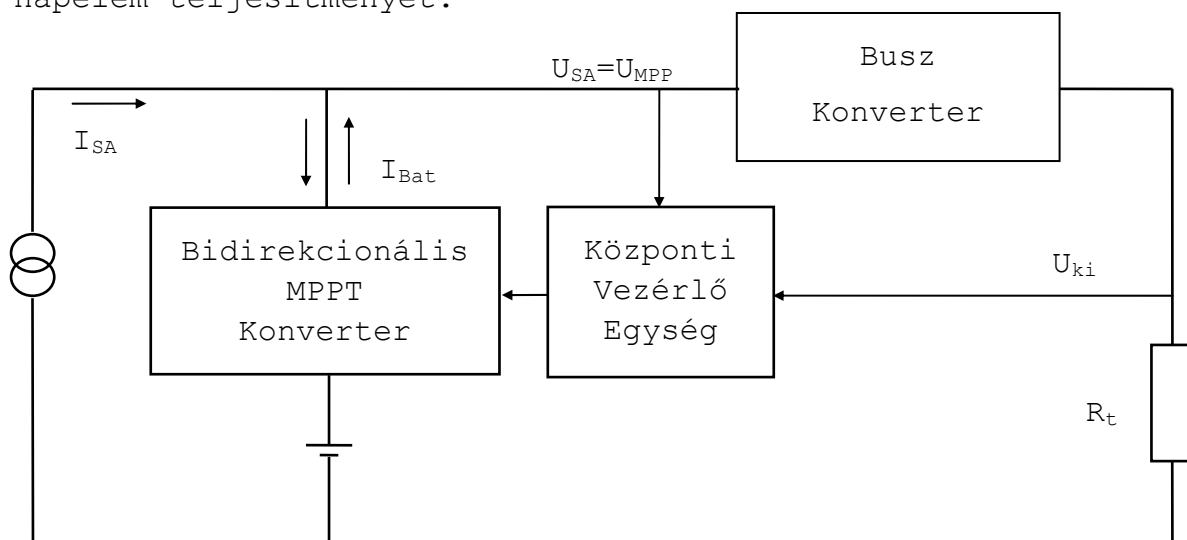
4.1. ábra. Klasszikus Háromszög koncepció

Háromszög koncepciót (4.1. ábra). A szerzők kifejtik, hogy a felmerült igény kielégítéséhez az energiaforrás (napelem), az energiatároló (akkumulátor, telep) és a fogyasztó (terhelés) szétválasztására van szükség. A struktúra energia-átalakító konverterei (elektromos) energiát továbbítanak az energiaforrások (napelem ill. az akkumulátor) felől a terhelés felé, ill. az elsődleges forrásból (napelem) az energiatároló irányába.

Teljesítményfüggő munkapont esetén a forrás optimális üzemet a vezérlés úgy állítja be, hogy a kimenete minden időpillanatban a szükséges ill. az elérhető maximális teljesítmény közelében legyen. A 3 konverter működésének összehangolása következtében a vezérlés kellően bonyolult.

4.2. Napelemes tápellátó rendszer struktúrái

Funkciók összevonásával, elhagyásával további egyszerűbb struktúrák alakíthatók ki. A töltés és kisütés funkció egy időben egyszerre soha nem aktív. A 3. konverter 2. konverterbe olvasztásával, funkcióik helyettesíthetők egy darab ún. Kétirányú (Bidirectional) konverterrel, amely megvalósítja az akkumulátor töltési-kisütési funkcióit és felelős az MPP követéséért (4.2. ábra). A követést a központi vezérlő egység úgy éri el, hogy a Kétirányú konverter "bármilyen nagyságú" és előjelű teljesítményével beállítja a napelem teljesítményét.

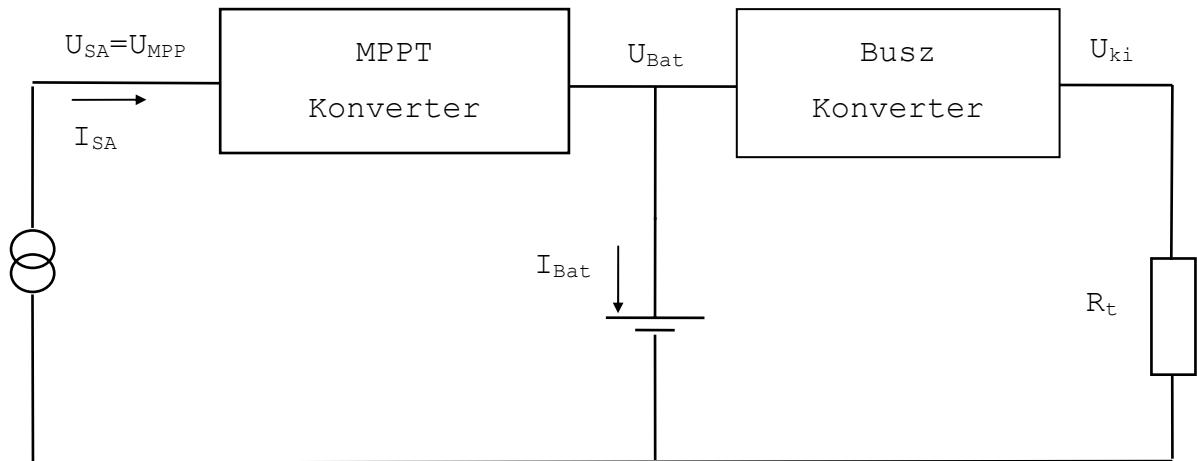


4.2. ábra. A Kétirányú konverter alkalmazása egyszerűbb felépítést, kevésbé bonyolult vezérlést valósít meg

Tekintve a forrás, a terhelés és az energiatároló elhelyezkedését, a 4.2. ábra struktúrája párhuzamos energiatovábbítást valósít meg.

A vezérlést tovább egyszerűsíthetjük, ha az MPPT megvalósításához csak egy egyirányú konvertert kell irányítanunk. Ekkor az eredeti Háromszög koncepció elemeiből az 1. konvertert olvasztjuk bele a 2. konverterbe, vagyis csak egy konverter csatlakozik közvetlenül a forrásra. Ez a forrás-energiatároló-fogyasztó teljesítményáramlási irányt tekintve egy soros struktúrát képez (4.3. ábra).

Egy adott struktúra elemeinek hatásfoka és az elemeken áramló energiák időfüggvénye ismeretében a forrás-terhelés energiatranszfer hatásfoka minden esetben meghatározható.



4.3. ábra. Soros (Kaszád) energiaellátás MPP követéssel

A 4.4 ábrán bemutatott struktúra hatásfoka az alábbi módon számítható [5][6][7]:

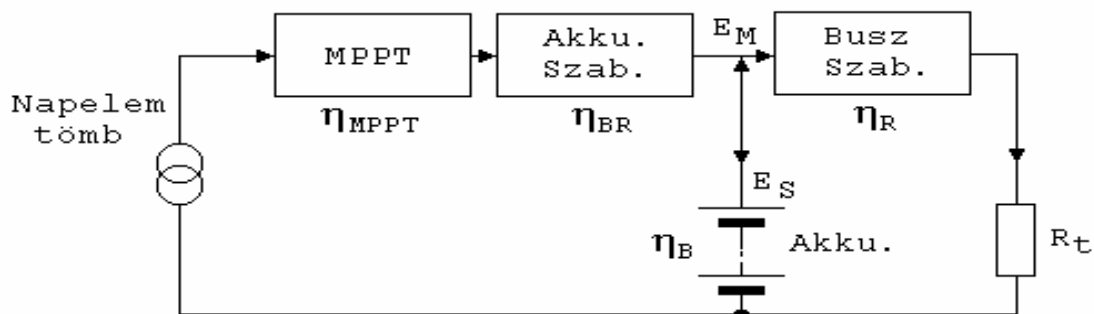
$$\eta = \eta_{MPPT} \cdot \eta_{BR} \cdot \left[\frac{E_M + \eta_B \cdot E_S}{E_M + E_S} \right] \cdot \eta_R \quad (4.1)$$

ahol $\eta_{(x)}$ a 4.4. ábra aktuális hatásfokát, $E_{(x)}$ pedig energiát jelöl.

Megjegyezzük, hogy a 4.3. ábra struktúrája azonos a 4.4. ábrán példaként bemutatott rendszer felépítésével. Funkcionális különbséget az akkumulátor töltésszabályozó beépítése jelent. Amennyiben fennáll minden időpillanatban a

$$P_{SA(t)} \leq P_{M(t)} + P_{S(t)} \quad (4.2)$$

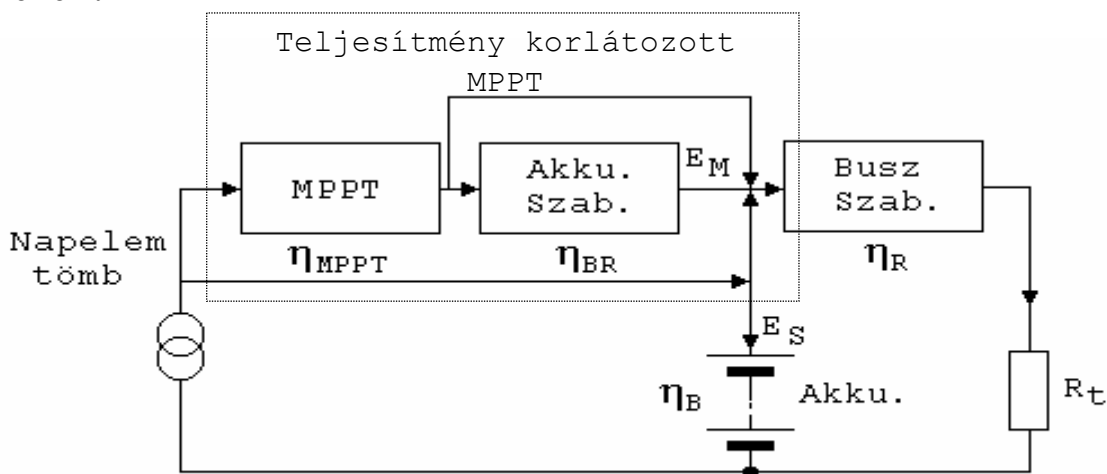
teljesítmény-egyenlőtlenség, akkor mind az MPPT, mind az akkumulátor töltésszabályozó ellátja feladatát. Ha az összes terhelés teljesítményigénye kevesebb, mint az adott



4.4. ábra. Soros energiakezelés teljesítmény korlátozott MPP követéssel

időpillanatban érvényes P_{MPP} , akkor az MPPT konverter nem képes a napelemet MPP-be állítani. Az akkumulátor szabályozóval egybeépített MPPT konvertert szokás teljesítménykorlátozott MPPT-nek nevezni.

A 4.5. ábrán bemutatásra kerülő soros struktúrájú energiaellátó rendszerben párhuzamos energiakezelést alkalmaztunk. Itt a forrás-energiatároló-terhelés energiaút szempontjából a soros struktúra megmarad, azonban egyes elemek alternatív energiautakkal is rendelkeznek. Ezen utak folyamatosan vagy időlegesen, részben, vagy egészben magasabb hatásfokú úttal helyettesítik az adott elemet, amely így hatásfok javulást okoz.



4.5.ábra. Soros struktúrájú energiakezelés a teljesítmény korlátozott MPPT Követőbe épített párhuzamos energiautakkal

A hatásfok-javulásért a vezérléssel szemben támasztott magasabb követelményekkel kell fizetni. A párhuzamos energiakezelésre a 7. fejezetben realizált példát mutatunk be.

Üreszközök tápellátása

Az ūrben egyedül hozzáférhető természetes energiaforrás a Nap, melynek szerepe jelentős az ūreszközök tápellátásában. Az ūreszközök energiaellátó rendszereinek tervezése során az eddig bemutatott általános követelményeken (MPPT, Akkumulátor töltés szabályozás) túl egyéb másodlagos, azonban ūralkalmazásoknál döntő jelentőségű követelményeket kell elsősorban figyelembe venni, ūgymint:

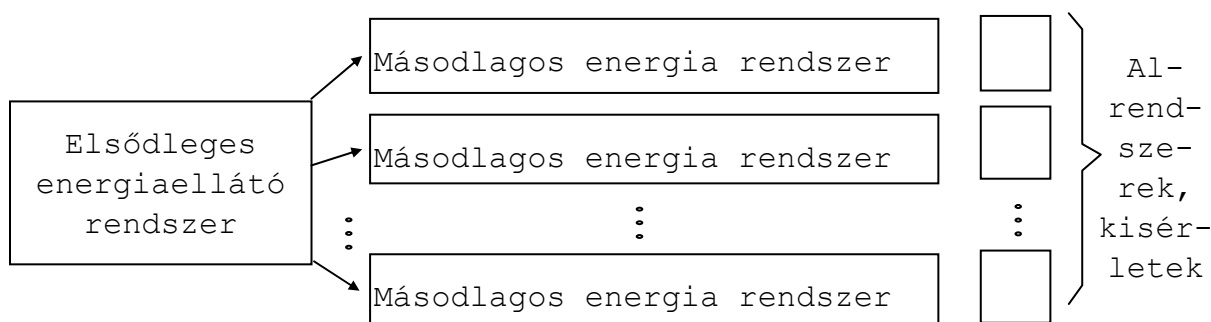
- Környezeti feltételek

- Misszió célja /Tudományos, telekommunikációs, ipari-meteorológiai-erőforráskutató, ember közreműködésű/
- Mechanikai és elektromos szabványok /melyek célja a kompatibilitás [EMC], moduláris tervezhetőség, stb./
- Felhasznált elemek minőségtanúsítási rendszertervek
- Tömeg-optimalizálás
- Gazdaságossági megfontolások
- Adott kutató műhely tapasztalatai, házi szabványok
- **Megbízhatóság**

Az űreszköz energiaellátó rendszerének alapfeladata a megfelelő paraméterű, folyamatos és elégséges tápellátás biztosítása az önkiszolgáló és a missziós berendezések számára akár az elsődleges energiaforrás - legtöbbször napelem - energiájának elérhetetlensége /napfogyatkozás/ esetén is. A rendszernek meg kell bírkoznia minden missziós berendezés és nélkülözhető önkiszolgáló alrendszer meghibásodásával és - amennyiben lehetséges - önműködően vissza kell álljon a rendszer újraindítását követően.

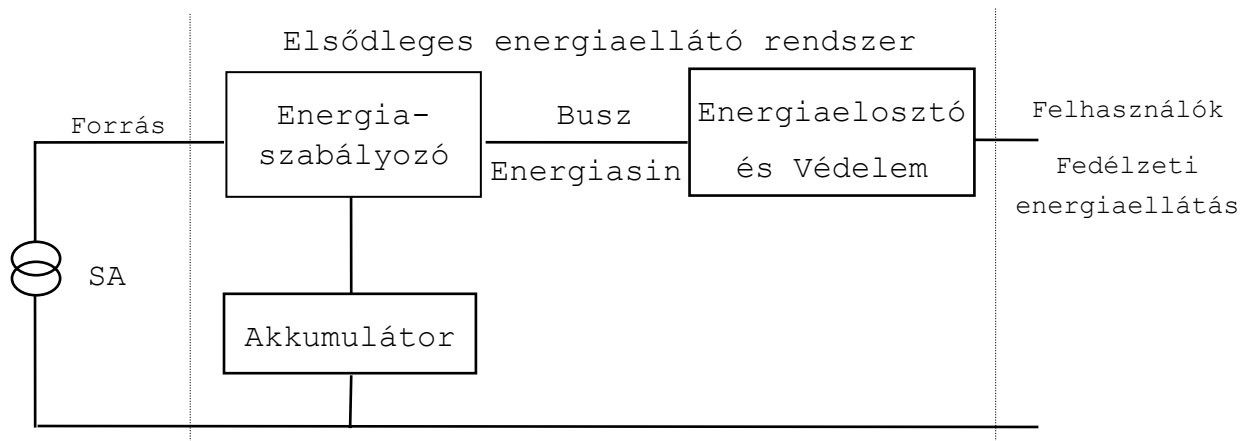
A nem javíthatóságra tekintettel a megbízhatóság az a paraméter, amely az összes többi követelményre hatással van és befolyásolja az alkalmazott technológia minden aspektusát.

A funkciók kiegészülése a felsorolt követelményekkel a tápellátó rendszert a 4.6. ábrán részletezett, történelmileg kialakult struktúrába rendezte.



4.6. ábra. Űralkalmazású tápellátó rendszer fő részei

Az elsődleges energiaellátó rendszer elemeinek bemutatásához példának hívjuk a CESAR műhold (várható kilövés 2000-ben) fedélzeti energiaellátó rendszerét (4.7. ábra).



4.7. ábra. A CESAR műhold fedélzeti energiaellátó rendszere, mint elsődleges energiaellátó rendszer

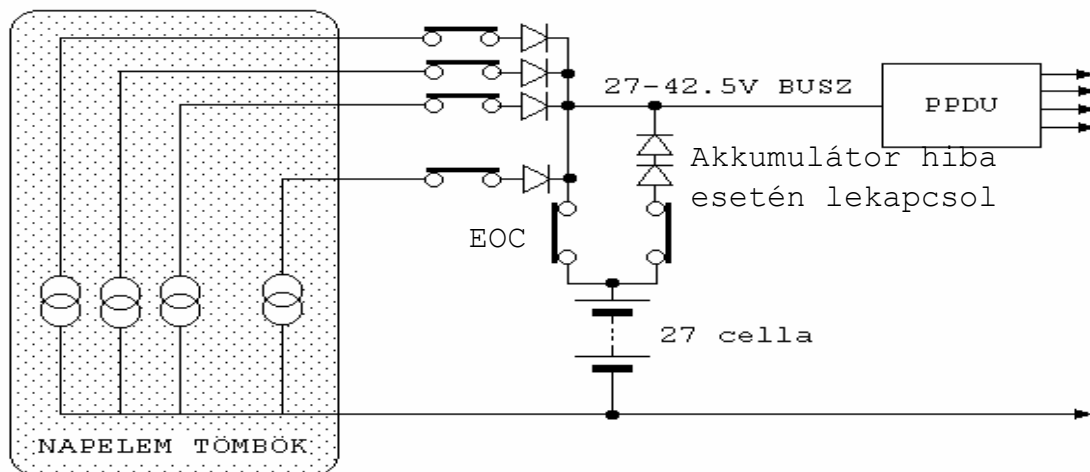
- (Elsődleges) Energiaforrásként / (Primary) Energy Source/ ma leggyakrabban napelemet használnak, de alkalmazhatnak radioizotópos generátort termoelektromos átalakítóval (Ulysses, ESA), vagy bármilyen kötött formájú energiatárolót.
- Energiatárolóként kémiai akkumulátorokat használnak (NiCd, NiH). A szükséges energiatároló kapacitás egyenesen arányos az árnyékban szolgáltatott energiával, fordítottan a kisütés mélységével. Az akkumulátor energiát szolgáltatathat nagy áramú csúcsterheléskor napfényes időszakban is.
- Az (Elsődleges) Energiaszabályozó egység / (Primary) Power Control Unit, PCU/ kapcsolatot teremt az energiaforrás, a tároló és a fogyasztók között, gondoskodik az elsődleges energiaellátó rendszer vezérléséről.
- Az Energia-elosztó és Védelem egység / Power Protection and Distribution Unit, PPDU/ táplálja az üresköz önfenntartó rendszereinek áramköreit ill. a missziós feladatokat végző egységek Másodlagos energia-átalakító rendszereit. Rendszerek meghibásodása esetén biztosítja a tartalékra kapcsolást, az alrendszerek meghibásodása esetén pedig azok leválasztását a buszról.

Úralkalmazásoknál a napelemes tápellátó rendszerek tervezésében megoldandó kulcskérdés az akkumulátorok töltése, kisütése (akku élettartam-optimalizálás), valamint a napelem-felület minimalizálása. Mindkét probléma egyenes következménye a fokozott megbízhatósági és tömegoptimalizálási követelménynek. Ezen igények kielégíthetők a már ismertetett struktúrákkal.

A buszfeszültség stabilizált vagy nem stabilizált megvalósítása alapvetően határozza meg a Másodlagos energiaellátó rendszerek

felépítésének bonyolultságát. A buszfeszültség stabilizálás, mint felmerülő újabb követelmény további struktúra variációk kialakulását hozza magával.

A 4.8. ábrán bemutatott Elsődleges energiaellátó rendszerben az



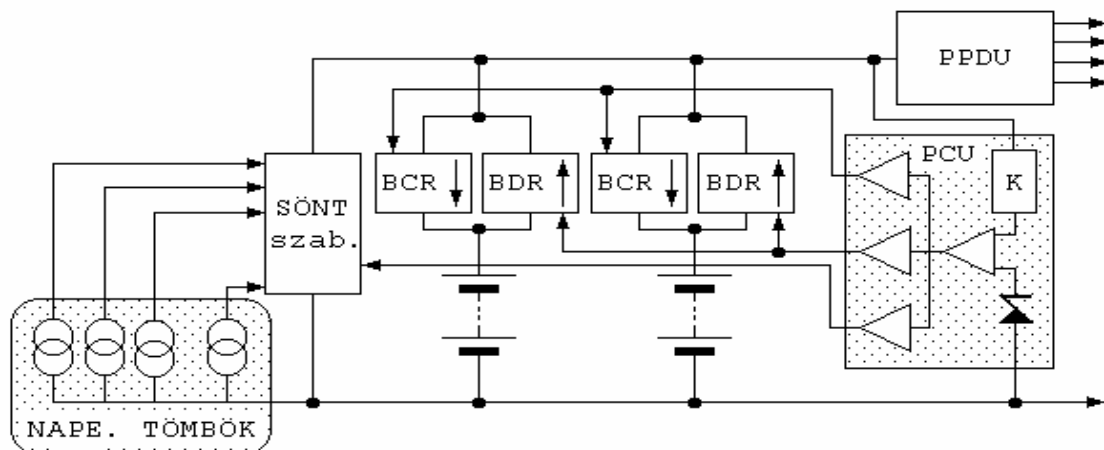
4.8. ábra. Szabályozatlan energiabusz

energiabusz szabályozatlan, a feszültség szint az akkumulátor töltési-kisütési ill. töltöttségi állapotának megfelelően széles határok között változik. A diódák feladata a napelem-csoportok leválasztása árnyékos időszakban, ill. meghibásodáskor. Az akkumulátor túltöltését az EOC (End of Charge) kapcsoló akadályozza meg. Itt sem napelem-felület, sem pedig akkumulátor-élettartam optimalizálásról nem számolhatunk be.

Teljesen szabályozott buszfeszültséggel rendelkezik a 4.9. ábrán látható struktúra, mivel a buszra kapcsolódó mindkét energia-átalakító stabilizált feszültséget szolgáltat a kimenetén. A struktúra emlékeztet a 4.2. ábra kétirányú konverteres struktúrájára. A különbség azonban az, hogy a töltési és kisütési funkciókat külön konverter (BCR és BDR, vagyis Battery Charge/Discharge Regulator, akkumulátor töltés/kisütés szabályozó) látja el. Emellett itt az akkumulátor szabályozás adott, de a 4.9. ábrán jelölt ún. söntszabályozó nem oldja meg a napelem-felület optimalizálását. A kettőzött akkumulátor és kiszolgáló áramkörök tartalékolási funkciót töltenek be.

A söntszabályozót (Sequential Switched Shunt Regulator, S^3R , S3R) egyszerűsége folytán szívesen alkalmazzák. Az S3R ötlete azon alapul, hogy ha a napelemet egy elméletileg nulla ellenállással rövidre zárunk, akkor a körben I_{SA0} rövidzárási

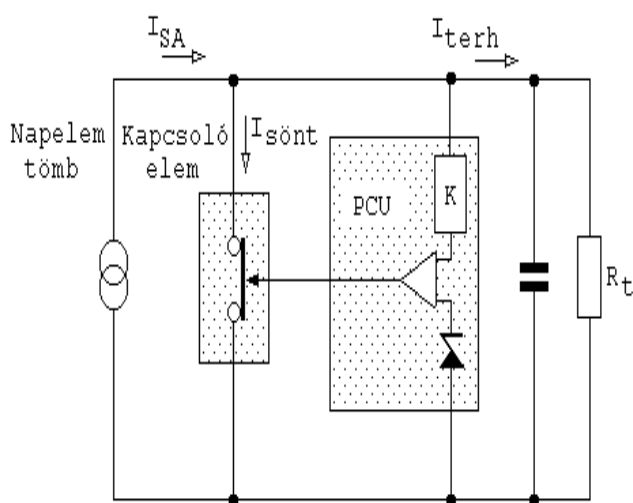
áram folyik, de mivel feszültség a nulla ellenálláson nem esik, a disszipáció is nulla (4.10.a. ábra). Az elrendezéssel



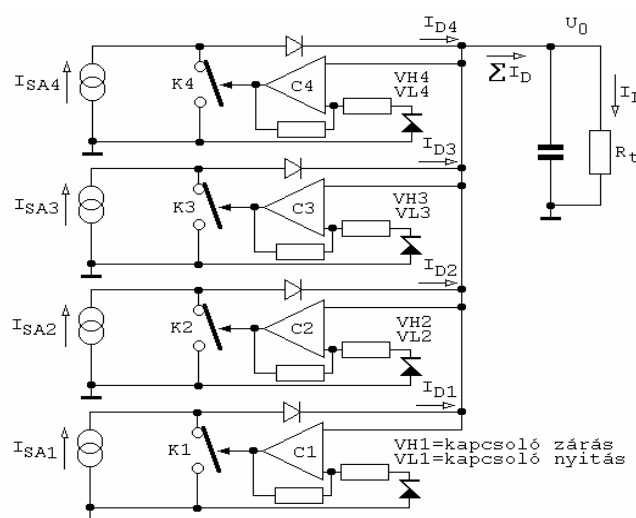
4.9. ábra. Szabályozott energiabusz

beállítható az átlagos napelem-áram, a kondenzátor feszültsége a töltő ill. terhelő áramok különbsége szerint nő vagy csökken. A vezérléssel a kondenzátor, azaz a terhelés feszültsége stabilizálható.

A szekvenciális söntszabályozó a napelemeket csoportokra bontva, a terhelés függvényében kapcsolja be, ill. ki (4.10.b. ábra). Maximális terhelés esetén az összes csoport kikapcsolt állapotban van. Az egyes komparátorok visszacsatoló ellenállásaival, ill. a Zener diódával állíthatók be a be- és kikapcsolási szintek. Az egymás melletti csoportok más-más szinteknél kapcsolgatnak, a tartományok egymásba lóghatnak. A söntszabályozást a napelem rövidrezárhatósága és munkapont-



4.10.a. ábra. Söntszabályozás



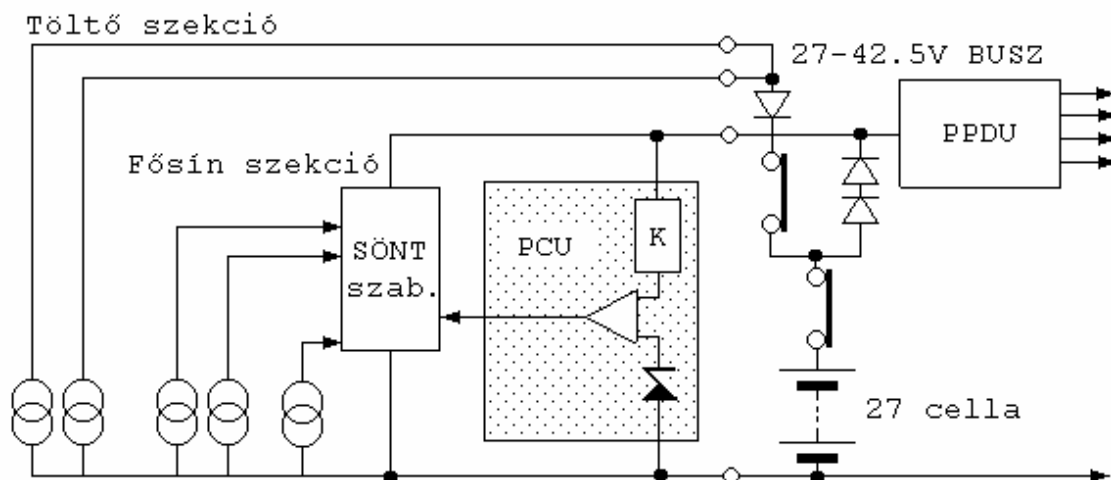
4.10.b. ábra. Négy határoló körös S3R

változásnál a rendkívül gyorsan beálló kimeneti munkapontja teszi lehetővé. Az S3R szabályozás előnyei:

- Moduláris tervezhetőség.
- A kimeneti szűrést csak 1 modul kapcsolgatására kell méretezni. A buszfeszültség hullámossága konstans.
- Nagy terhelésugrásra kiváló dinamikus választ ad.
- Egy modul meghibásodása nem befolyásolja számottevően a működést.
- Minimális disszipáció.

A buszszabályozottság tekintetében egy kompromisszumos megoldásként fogható fel az ún. Napfény-szabályozott vagy félig szabályozott busz megoldás (4.11. ábra). Ezzel a megoldással jelentős teljesítményelektronika-tömeg csökkenés érhető el, az árnyékidőszakban azonban a feszültség-szabályozás problémáját ugyanúgy a felhasználókra hárítja, mint a szabályozatlan energiabusz.

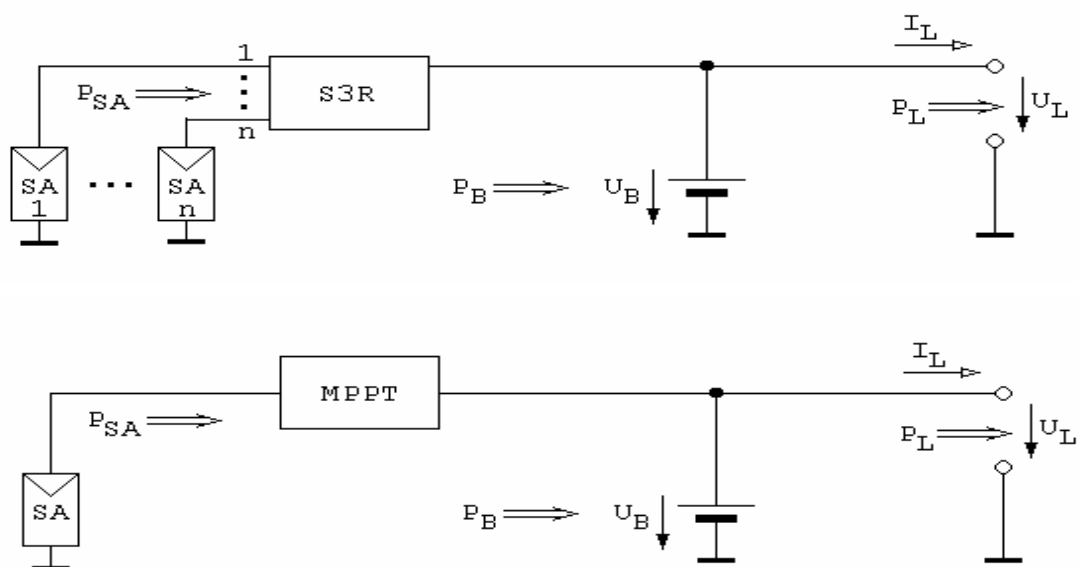
Ezekon a megoldásokon kívül egy sor egyéb változat kialakítható a leírt struktúrák kisebb-nagyobb változtatásával, funkciók szétválasztásával, összevonásával, a szükséges egyéb igényeknek megfelelően.



4.11. ábra. Napfényszabályozott energiabusz

4.3. Tápellátó rendszerek tervezése

Példaként bemutatunk egy rövid keringési idejű, ún. Alacsonypályás (LEO) műholdon alkalmazott szabályozatlan energiabusz elrendezést, amelyben azonos feladatra alkalmaz S3R és MPPT szabályozást (4.12. ábra). Azt a kérdést, hogy mikor,



4.12. ábra. Két koncepció LEO pályás műhold tápellátására

melyik megoldást célszerű választani, nem lehet megválaszolni azonnal, egyértelműen. A megbízhatóság növelése érdekében az űreszközök energiaellátó rendszereiben sokszor nem a legújabb kutatási eredményeket, hanem korábban már jól bevált megoldásokat használnak (Űrminősítésű alkatrészek és technológiák).

A tápellátó rendszer tervezésekor alapvető tervezési filozófiai kérdés az elindulás: Milyen szemlélettel történjen a struktúra felépítése?

- Az egyik megközelítésben először az energiaforrás illesztésével, a napelem-felület minimalizálásával foglalkozunk, azt követően a másodlagos feladatok (energiatárolás, rendszerspecifikumok, űrminősítésű modulok házi szabványok) további kidolgozásával (MPPT rendszerek).
- A másik ajánlás szerint optimalizáljuk az energiatároló akkumulátorok töltését és azután foglalkozunk az energiaátalakító rendszer további igényeivel (S3R).

Nem lehet megválaszolni egy mondatban azt a dilemmát, hogy adott feladatra melyik struktúrát alkalmazzuk a legjobb eredmény elérése érdekében (LEO, GEO, HEO, Deep-Space Mission,

speciális pályák /pld. hold vagy üstökös műholdja/) [10][12]. Az optimum meghatározása is bonyodalmat okoz, hiszen több, a tervezést és az eredményt befolyásoló, egymásnak ellentmondó követelményt kell egyidejűleg kielégíteni. A követelmények definiálásakor nem lehet egyértelműen megadni, hogy adott paramétert "mennyire" kell teljesíteni, ill. adott paraméter mekkora súllyal szerepel a követelmények súlyozott átlagaként "számított jószág"-ban. Máig nem alkottak meg olyan minőségmérő rendszert, amely jósági egysége a követelmények figyelt paramétereit tekintve kompatibilis, a mérőszám ismeretében azok összevethetők, súlyozással abszolút optimum kereshető.

A struktúra felépítése, az alkalmazott konvertertípusok, a vezérlési, megbízhatóság-növelést célzó elvek megválasztása önmagukban soha nem képeznek abszolút optimum választást. A tömeg-hatásfok-költség-megbízhatóság négyes egy elemének legkisebb módosítása során felléphet olyan lényeges változás, ami akár más, korábban a legjobbnak vélt megoldás jószágát és unikum jellegét is módosíthatja [14][15].

A fellelhető szakirodalom utal arra a törekvésre, hogy az üreszközök tápellátó rendszereinek tervezését számítógépes algoritmus szerinti mederbe lenne célszerű terelni (mint az élet más területein optimummal bíró műszaki megoldások tervezési metódusát), amire már vannak kísérletek is. A problémát abban látjuk, hogy az algoritmusnak az elágazási pontjainak döntési küszöbét mindig adott helyzethez, koncepcióhoz kell igazítani, valamint az algoritmusba belekerülnek olyan visszacsatoló hurkok /legegyszerűbb esetben is legalább egy/, amelyek a tervezés állapotától függően változtatják a hurkok visszacsatolási helyét a tervezés utasítás lépései között.

Az algoritmus hasonlít egy, a digitális technikából ismert sorrendi hálózatra, amelyben azonos állapotváltozó értékek esetén is lehetnek eltérő kimenetek, mert azok előélete is hatással van a végeredményre. Ezért a tervezés során sokszor intuíciókra hagyatkozva juthatunk el a közel optimális megoldáshoz. A kialakuló megoldás akkor válik "elég jóvá", ha a tervező team különböző álláspontokat és igényeket képviselő tagjai - megismerve interdiszciplináris szempontokat - azt annak ítélik.

Az alábbiakban megnevezzük a tervező munka minden pillanatára érvényes követelményeket, amelyek kielégítésére törekedni kell [11]:

- Költségek csökkentése.
- Kis tömegre és térfogatra való törekvés.
- Nagyobb hatásfokra való törekvés, a hasznos teher (Payload) kiszolgálás képességének javítása.
- Nagyobb megbízhatóságra való törekvés.

A missziós feladat ismeretében a felhasználóval közösen állíthatók fel a specifikációs követelmények. A specifikációs

munkát és a megfelelő struktúra behatárolását segíti a 4.13. ábra összefoglaló táblázata.

SZEMPONT	ÁLTALA BEFOLYÁSOLT SZEMPONT	A BERENDEZÉS MEGVALÓSÍTÁSÁBAN JELENTKEZŐ HATÁSA
Funkcionális összevetés	Minden felsorolt	Missziós cél, EMC, buszstabilizáltság, Egyedi szigorú követ.
Költség	Minden felsorolt	Rendszerblokk, áramköri egység, elem kiválasztása
Konstrukció	Költség, Komplexitás, Tervezés és minősítés	Méret, energiasűrűség, EMC, energiaforrás és -tároló kiválasztás
Rendszer energetikai hatásfok	Költség, Komplexitás, Funkcionális összevet.	Hatásfok optimalizálás Energiasűrűség növelés válogatott elemek
Tartalékolási filozófia, hibaelhárítás	Költség, Konstrukció Tervezés és minősítés	Elemszám, bonyolultság, redundancia
Komplexitás	Költség, Konstrukció Energetikai hatásfok Tartalékolás, Funkcionális összevet.	Konverterek száma, beépítés szerinti teljesítmény, bővíthetőség
Tervezés és minősítés	Költség, Konstrukció Komplexitás, Tartalék	Modulrendszerű tervezés

4.13. ábra. Szempontok összefoglalása a specifikáció megalkotásához, a tápellátási koncepció kialakításához

Földi napelemes rendszerek specifikációs követelményei rendszerint jóval lazábbak, a megvalósítás eszközei kevésbé korlátozottak. A specifikáció súlypontját a megrendelő alakítja, rendszerint döntő a gazdasági tényező, a megbízhatóság, tömeg, hatásfok szempont kevésbé áll a középpontban.

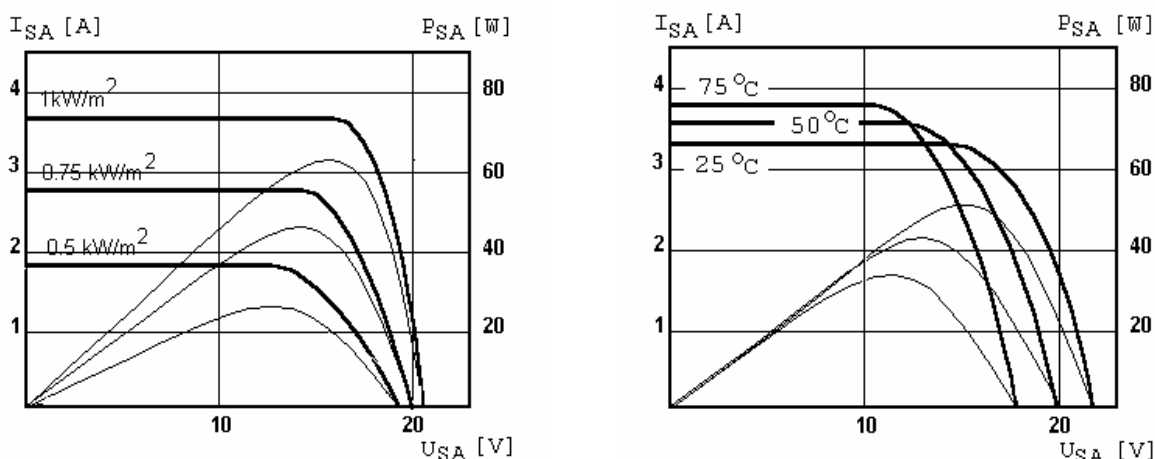
Versenyeztetni rendszereket csak azonos szabályok és mérőszámok szerint lehet. A felsorolt rendszereket minősíteni, összehasonlítani azért nehéz, mert más a funkció.

Megbízhatósági alapon két rendszer-koncepciót nem lehet összehasonlítani.

5. MAXIMÁLIS TELJESÍTMÉNYŰ PONT KÖVETÉS (MPPT)

5.1. Általános felvetések

A 3. fejezetben bemutattuk a napelem fizikai tulajdonságainak felhasználói oldalról fontos jellemzőit, melyet az 5.1. ábra idéz fel. A 4. fejezet rendszerszemléletű tervezői oldalról



5.1. ábra. A napelemből kivehető teljesítmény munkapont-függő.

Az I_{SA-MPP} 0-110%, az U_{SA-MPP} 50-90% között változik az abszolút MPP-hez ($I=1\text{kW/m}^2$, $T=0^\circ\text{C}$) tartozó $I_{SA0}-U_{SA0}$ adataihoz képest.

mutatta meg a napelemes energiarendszerek nagy családját, rávilágított a tervezés összetettségére. A továbbiakban az MPPT rendszerekkel foglalkozunk, mint a napelemfelület-optimalizálás ill. a költségmegtakarítás egy hatékony módszerével.

A Maximális Teljesítményű Pont Követésének többféle alternatívája van. A megoldások közös jellemzője, hogy minden esetben kapcsolóüzemű energia-átalakítót használnak a teljesítmény kezelésére, melynek a vezérlését kellő megfontolások után egy követési stratégiára bízják. A módszer megválasztása elviekben meghatározza a rendszer követési jellemzőit, költségét, korlátait. A vezérlési stratégiák bemutatása előtt néhány másodlagos problémát vetünk fel.

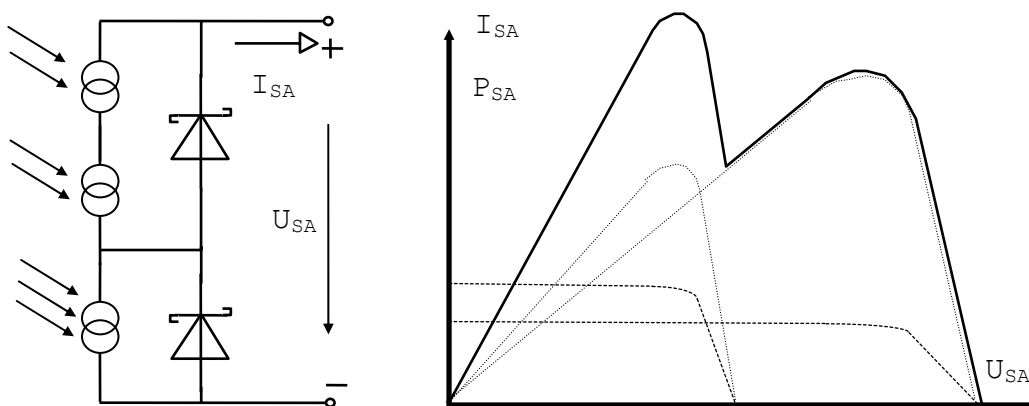
A kitöltési tényező (d), mint közvetlen vezérlési paraméter

A napelemre kapcsolt konverter bemeneti impedanciája (ellenállása) a kapcsoló elem kitöltési tényezőjének változtatásával minden esetben állítható, ellenállás vagy akkumulátor terhelés esetén. Ily módon a napelem karakterisztikán - bizonyos határok között - tetszőleges

munkapont beállítható. A bemeneti konverter feszültség (U_{SA}) ill. a konverter kitöltési tényező (d) megfeleltetés egy-egyértelmű függvénykapcsolatot képez. Folytonos áramú esetben, rögzített kimeneti feszültség esetén (a terhelés egy ideális akkumulátor) adott kitöltési tényezőhöz adott bemeneti feszültség tartozik. Például ilyen feltételek mellett Buck konverter esetén a kitöltési tényező a bemeneti feszültséggel fordítottan arányos ($d=U_{BAT}/U_{SA}$).

Többszörös lokális maximum problémája

Mikroprocesszoros követési stratégia alkalmazásával általában magasabb flexibilitás érhető el. A MPP Követő algoritmusok közül a mikroprocesszoros alkalmazás az egyetlen, amely felépítésénél fogva azonnali követési filozófia-váltásra képes. Példaként álljon itt egy többszörös helyi teljesítmény-maximummal rendelkező napelem-csoport (5.2. ábra). Az áramköri



5.2. ábra. Napelem-csoport kétszeres helyi maximummal

kapcsolás mellett a napelem degradációja, egyenlőtlen cella-/napelem-csoport/ megvilágítás, árnyékolás is okozhat többszörös lokális teljesítmény-maximumot tartalmazó karakterisztikát. A probléma különösen élő napelemes hajtású elektromos autók esetén, ahol előre definiálhatatlan árnyéket okozó objektumok mentén haladhat a kocsí [20].

A szokásos keresési-követési filozófiák nem alkalmasak több lokális teljesítménymaximum közül a globális kiválasztására. Egy mikroprocesszor átprogramozása a hardware és a konverter változtatása nélkül minden nehézség nélkül megoldható a programba iktatott, időközönként lefutó, a teljes tartományon végigsöprő, maximum detektáló szubrutinnal.

Analóg technikát a vezérlés olcsóbb realizálása céljából alkalmaznak. Az olcsóbb megoldás általában gyengébb minőségű megvalósítást is jelent. Másik oldalról viszont az

egyszerűségnek majdnem direkt következménye a megbízható működés.

MPP meghatározásához nélkülözhetetlen a teljesítmény mérés?

A követés elvét nem befolyásolja, de a megvalósítás szempontjából meghatározó tényezővé válhat a teljesítmény mérés és maximalizálás egyszerűsítése, azaz a teljesítménnyel arányos mennyiség mérése, vagy az algoritmus szempontjából ekvivalens leképezése. A napelem-teljesítmény meghatározása történhet a megmért napelem áram- és feszültségértékek analóg szorzóval, vagy mikroprocesszorral végzett közvetett szorzásával, de a szorzás művelet túl komplex és költséges.

Tegyük fel, hogy az MPPT konverter vezérlése és a terhelés dinamikus tranziensei nem hatnak egymásra, így a működés a terhelés statikus $U-I$ karakterisztikájával leírható. Ha a terhelésre felírt dP/dI derivált a lehetséges munkapontokban határozottan nagyobb, mint nulla, akkor a terhelés teljesítmény- és áramgörbéjének maximuma egybeesik [20]. Azoknál a terheléseknél, ahol $dP/dI \cong 0$, vagyis a terhelés teljesítménye áramfüggetlen, kvázi konstans, a fenti állítás nem igaz, a kimeneti áram detektálása nem vezet eredményre. A $P = U \cdot I$ kifejezés szimmetriája miatt a $dP/dU \cong 0$ vizsgálat hasonló eredményre vezet.

Olyan kommersz terheléseknél, mint például az akkumulátor vagy ellenállás, a derivált mindig különbözik nullától ($I \neq 0!$, de ez a gyakorlatban nem fordul elő), így a teljesítménymaximum-detektálás helyett célszerű az áramérték csúcsát keresni. A teljesítmény-szélsőérték a $dI_{ki}/d\underline{d}=0$ kifejezés teljesülése esetén is fennáll.

A terhelés teljesítmény- és árammaximumainak egybeesését általános esetben a $-U/I < dU/dI < \infty$ szükséges és elégséges feltétel vizsgálatával végezhetjük el. Akkumulátor esetén a teljesítmény- és árammaximumok egybeesése kézenfekvő, tekintve a kvázi konstans akkumulátor-feszültséget és eltekintve a másodlagos hatásoktól.

5.2. MPP követési stratégiák funkcionális osztályozása

A követés lényegét tekintve két alapvetően eltérő eljárást különböztetünk meg:

1. Valódi Maximális Pont Kereső (True Maximum Point Seeking, TMPS)
2. Nem-valódi Maximális Pont Kereső (Non-true Maximum Point Seeking, NMPS)

A Valódi TMPS eljárás elemi módszerekkel valóban az éppen aktuális karakterisztika maximális teljesítményű pontját keresi. A követési pontosság határesetben tart a nullához, elviekben bármilyen közel kerülhet 100%-hoz a követési hatásfok (η_{k0}). A módszerek a Maximális Teljesítményű Pontot a karakterisztika és változásának "a priori" ismerete nélkül, annak kvalitatív jellemzői alapján követik. A két legmarkánsabb tervezési irányzat lényegében azonos tulajdonságot kihasználva, de eltérő szemlélettel operál. Egyes esetekben a határ elmosódik az irányzatok között.

A **Hegymászó** algoritmus méri a teljesítményt adott pontokban és elemi lépésekben a munkapontot módosítja a mérés eredményétől függően. Az **Oszcillációs** elven működő követők az MPPT konverter bemeneti teljesítményét perturbálják (mérőjelet ültetnek rá) és a kismértékű teljesítményváltozásból derítik ki a munkapont helyzetét a napelem-karakteristikából, tehát annak helyzete alapján terelik a munkapontot a vezérlési paraméter változtatásával.

A Nem-valódi NMPS eljárások a napelem-karakterisztika számszerűleg ismert, "a priori" tulajdonságait kihasználva vezérlik a konverter bemeneti munkapontját. Egyes módszerek a napelem-karakterisztika adatait memóriában tárolják és adott helyzetű konverter-munkaponthoz ($U_{SA}-I_{SA}$ párhoz) egyértelmű vezérlési paramétert rendelnek. Más megoldások a napelemnek azt a nem túl egzakt tulajdonságát használják ki, hogy a maximális ponthoz tartozó feszültség egy adott környezetben a napelem üresjárású feszültségének 0.75-0.86-szorosa [21][22][23].

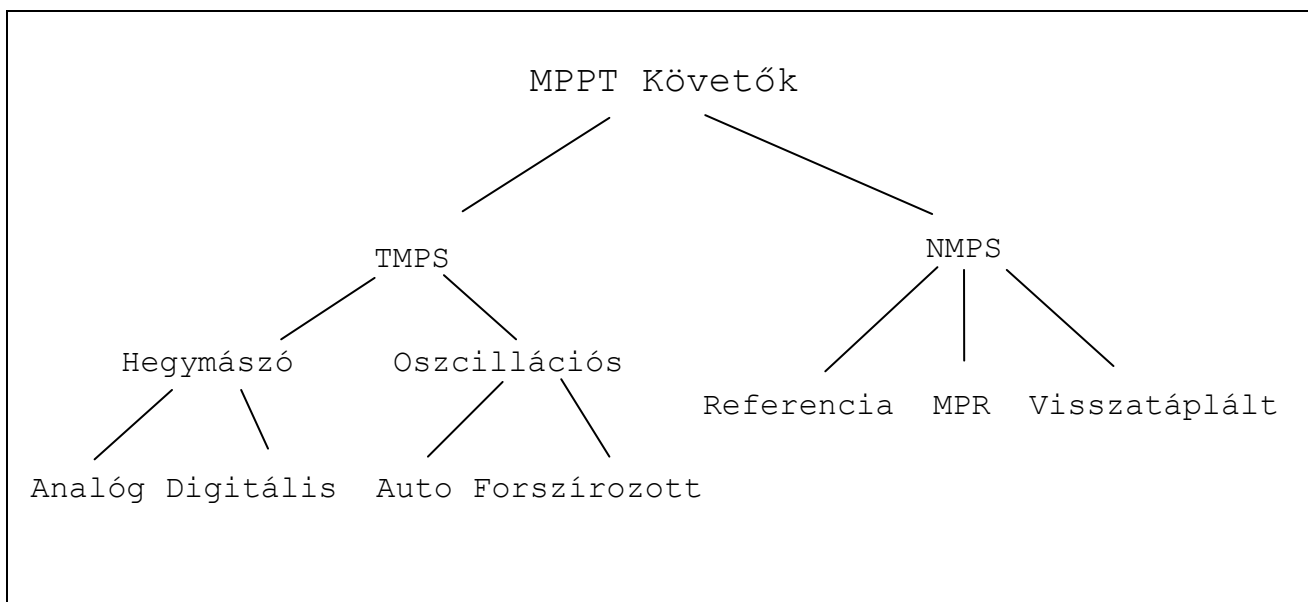
Adott környezeti feltételek mellett kialakuló $U_{SA}-I_{SA}$ karakterisztika maximális teljesítményű pontjához tartozó feszültség és ugyanezen karakterisztika üresjárású feszültség ($I_{SA}=0$) hányadosát Maximális Teljesítményű Pont Feszültség Hányadosnak (Maximum Power Ratio, **MPR**) nevezzük.

Az NMPS rendszerek egy jól elkülönülő csoportját képezik a **kimeneti és bemeneti paraméterek visszatáplálását** vezérlésként használó MPP Követők. Itt a kimeneti (legtöbbször akkumulátor-) áramnak, valamint egyes esetekben a bemeneti feszültségnek a

vezérlési paraméterre ható meghatározott befolyásával érnek el egy pszeudo követést [26][27][28][30].

Ezen kívül a felsorolt megoldásokból vett ötletek kevert megvalósítása is elképzelhető, sőt, az általában TMPS elvet realizáló algoritmusok csupaszításával (például az egzakt teljesítménymérést megspórolva) annak NMPS megoldása is kialakítható. Már most kihangsúlyozzuk, hogy az NMPS elvű követéssel a leggondosabb tervezés, a legkimunkáltabb kivitelezés mellett elvileg sem érhető el a 100 %-os követési hatásfok ($\eta_{k\ddot{o}}$), de egyes esetekben rendkívül jó eredményeket érhetünk el.

Megjegyezzük, hogy az itt ismertetett megoldások hozzávetőleg bonyolultsági és költségsorrendet is jelentenek, a drágább, bonyolultabb, de flexibilisebb megoldásoktól az olcsóbb, egyszerűbb, de partikulárisan alkalmazható megoldások felé. A következő fejezetben - nem a teljesség igényére törekedve - leírjuk a MPPT követési stratégiákat. Az 5.3. ábra rendszerezi a bemutatásra kerülő követőket.



5.3. ábra. Követési stratégiák

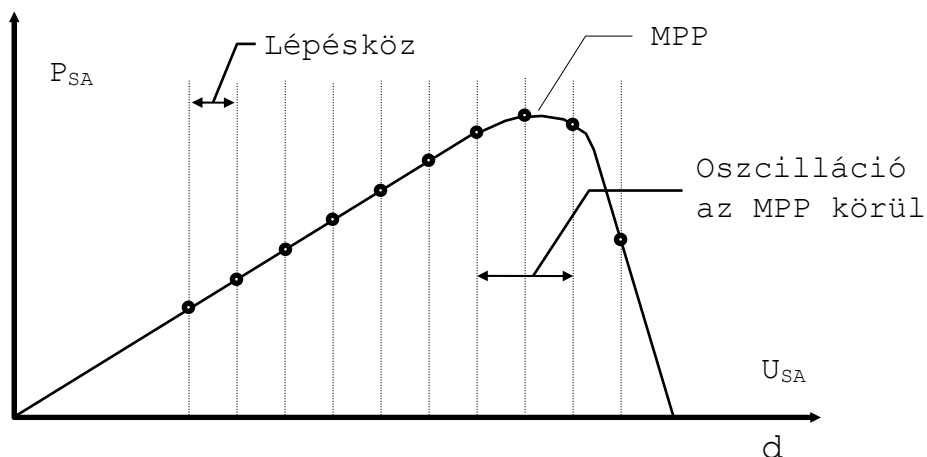
6. KÖVETÉSI STRATÉGIÁK

6.1. Hill-climbing (Hegymászó) algoritmusú követők

Ez az eljárás az MPP-t józan paraszti elven keresi és követi. A napelem teljesítményét méréssel (U_{SA} , I_{SA}) és közvetett számítás útján határozza meg. Az MPP követőt realizáló konverter kitöltési tényezőjének (d) vagy bemenő feszültségének (mindegy, hogy melyik, mert legtöbbször kapcsolt paraméter) kismértékű, egy lépésben történő megváltoztatása után a napelem-teljesítményben előálló változást figyeli meg. Ha a változás pozitív, akkor azonos irányba változtatja egy lépéssel a kitöltési tényezőt (vagy feszültséget), ha negatív, akkor ellentétes irányba lépteti azt.

A lépésköz nagyságát a cél közeledtével célszerű csökkenteni. A maximális pont körül a lépésköz "amplitúdójának" kétszeresével imbolyog a munkapont (6.1. ábra). Elviekben bármilyen jól megközelíthető az MPP.

A módszert hívhatnánk kísérletező algoritmusnak is, mert a munkaponti paramétereket mintavételi időközönként (ami jóval nagyobb periódusidejű, mint a kapcsoló vezérlése) folyamatosan megváltoztatja, abból a célból, hogy információt nyerjen arról, valóban a lokális is teljesítménymaximumon van-e a rendszer, vagy mehet-e még feljebb? A változtatások (kísérletek) akkor sem maradnak abba, ha már az MPP körül oszcillál a munkapont.



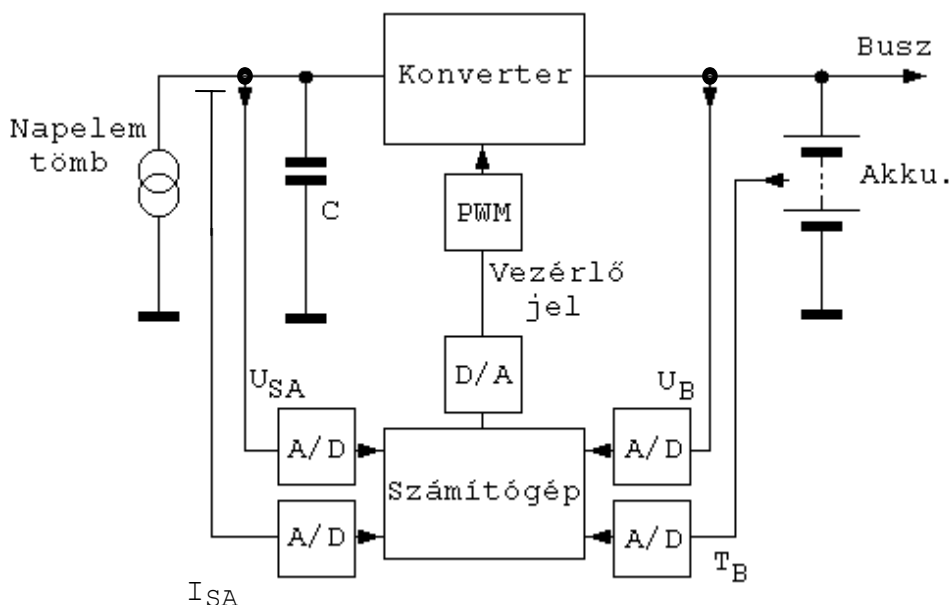
6.1. ábra. A hegymászó (Hill-climbing) algoritmus elve és hibája

Mivel a napelem sem földi (felhősödés), sem űr (napfogyatkozás) körülmények között nem tud nagyon hirtelen karakterisztikát

változtatni, azt a kérdést, hogy a "rendszer teljesítmény-csúcson van-e?" az algoritmusnak viszonylag ritkán kell feltennie (MPPT mintavételi frekvencia/periódusidő). Megvalósított hegymászó rendszerek igen lassú beállási ideje is elhanyagolható a napos időszakok hossza mellett (lehet 1 s nagyságrendű is).

A hegymászó algoritmus megvalósítható analóg áramkörökkel (szorzó, tároló, komparátor) és mikroprocesszor segítségével is (inkább szokásos).

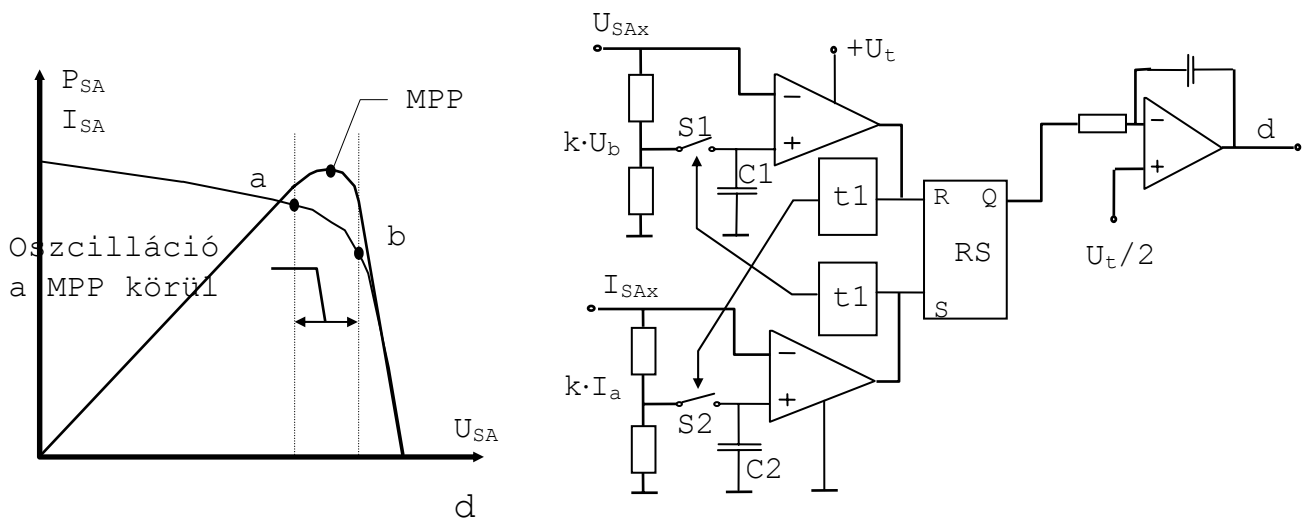
A 6.2. ábrán a magától értetődő módon megvalósított, Számítógép-programba integrált Hill-climbing algoritmussal működő MPP Követő látható.



6.2. ábra. A számítógép nemcsak a Hegymászó algoritmust valósítja meg, de csekély hardware bővítéssel az akkumulátor töltési procedúrát is felügyelheti

A Hegymászó algoritmus egy analóg realizációjára mutat példát a 6.3. ábra [21]. Az ötletet a témában alapműnek tekintett Boehringer-féle Önillesztő DC átalakító [16] adta. A kontrollerek kimeneti mennyisége a kitöltési tényezőt reprezentáló egyenszint, mely közvetlenül egy PWM modulátor moduláló jele is lehet. Az egyenszint egy RS tároló kimenetén jelentkező 1 és 0 impulzussorozat integrálja, tehát amíg az RS tároló kimenete azonos állapotban van, addig a kitöltési tényező lineárisan nő vagy csökken. Az áramkör további 2 tárolót tartalmaz (C1 és C2), melyek mindig az aktuális alsó $I_{SA} =$ és U_{SA} limitértékeket tárolják. A napelem feszültség- és áramjeléből felváltva vesz mintát C1 és C2 ($U_{SA2i} = k \cdot U_{SA2i-1}$ és $I_{SA2i+1} = k \cdot I_{SA2i}$, $i \in \mathbb{N}$), miközben a kitöltési tényezőt olyan irányba változtatja, hogy a munkapont

az előző mintavett feszültség vagy áram-érték irányába mozogjon.



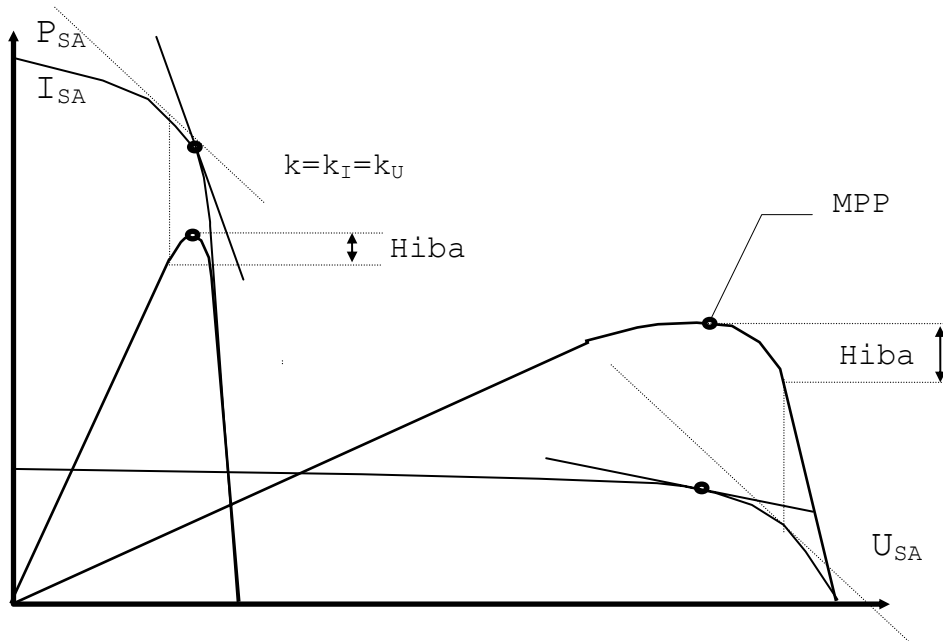
6.3. ábra. MPP Követő analóg áramkörökből felépített, Hegymászó elven dolgozó vezérlő áramkörrel. Nem szoroz.

Tegyük fel, hogy a konverter már a-ban volt és b felé halad MPP-n keresztül. A C2 $k \cdot I_a$ értéket tárolja, az RS tároló kimenetén 0 van, tehát csökken a kitöltési tényező, vagyis csökken az áram és nő a konverter bemeneti feszültsége. Mikor b-be érünk, az aktuális I_{SAx} komparálódik a $k \cdot I_a$ értékével, az RS tároló kimenetét "1"-be löki, amely növelni kezdi a kitöltési tényezőt (csökkenti a feszültséget, növeli a konverteráramot). Egy kis késleltetéssel S1 rövid időre zár, C1 eltárolja $k \cdot U_b$ -t. A kitöltési tényező addig nő, míg a pontba nem ér a rendszer, ekkor ugyanis az aktuális U_{SAx} komparálódik $k \cdot U_b$ -vel, ami az RS-t nullázza és elkezd csökkenni a kitöltési tényező. Ezzel egyidőben ($t1$ múltával) C2 mintát vesz és a kör bezárult...

$k = 0.8$ kellően nagy ahhoz, hogy a "könyök" mindig jól érzékelhető legyen, ekkor az átlagos teljesítményvesztés 1.2% [21]. Ennél jobb eredményt könnyen elérhetünk k növelésével. k értékét közelítve egyhez, a lépés nagysága csökken. Megjegyezzük, hogy az ebben a formában működő vezérlő Nem-valódi MPP-t keres, hiszen az áramkör nem állítja elő a teljesítménnyel arányos jelet analóg szorzóval. A megoldás az aktuális napelem-karakterisztika adott meredekségű érintőjét keresi meg. A maximális teljesítményű pontok érintőjének meredeksége az alábbi módon számítható [16]:

$$\left. \frac{dI_{SA}}{dU_{SA}} \right|_{MPP} = - I_{MPP}/U_{MPP} \quad (6.1)$$

Tehát a statikus munkaponti adatoktól függ, hogy az érintő milyen meredek (6.4. ábra). Mivel a fenti áramkör - U_{SA} és



6.4. ábra. Az MPP-ben az érintő meredeksége változik.

I_{SA} értékekre normalizált karakterisztika esetén 45° -ra áll be ($k=k_I=k_U$), az áramkör hibája annál több, minél messzebb van az adott MPP a normalizáló görbe MPP-jétől. Az optimális megoldás első közelítésben az, ha a követési tartomány közepére normalizálunk. Ennél jobb eredmény is elérhető például akkor, ha a k értékét az aktuális munkakarakterisztika MPP meredekség arányában kompenzáljuk. Egy ilyen megoldás átlagos teljesítményhibája ezreléknyire csökkenthető.

6.2. Oszcillációs elven dolgozó követők

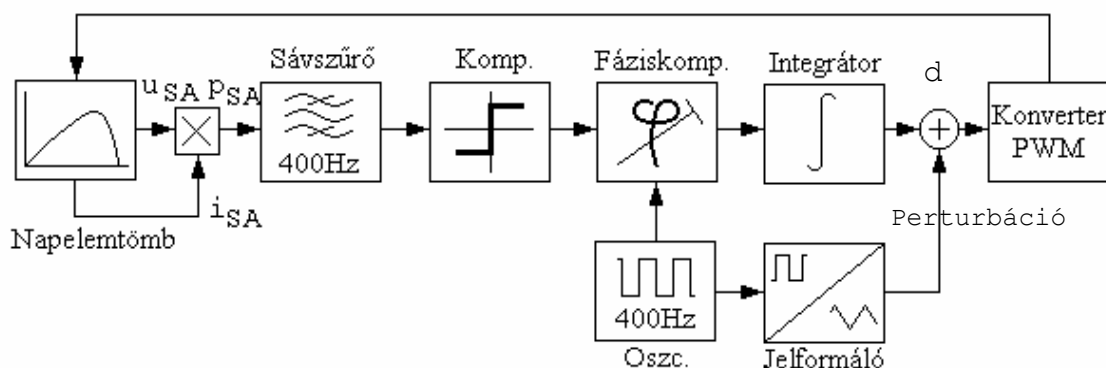
Az ehhez a csoporthoz tartozó követők a napelem P-U karakterisztika $dP/dU=0$ értékű pontját keresik. Az 5.1. pontban megállapítottuk, hogy amennyiben a konverter terhelése akkumulátor, a bemeneti feszültség (U_{SA}) és a kitöltési tényező (d) kötött paraméterek. Adott struktúra mellett a konkrét függés explicit formában megadható. Így az algoritmus keresheti az ekvivalens $dP/d\underline{d}=0$ értékű pontot is, mint lokális szélső értéket.

Az 5.1. pontban megállapítottuk továbbá, hogy "közönséges" terheléseknél a teljesítménymaximum egybeesik az árammaximummal. Ezek az ismeretek megkönnyítik az áramköri realizációt.

Két általános elterjedt technika használatos a feszültség, ill. a kitöltési tényező perturbációjára: Az ún. Auto-oszcillációs és az ún. Forszírozott-oszcillációs megoldások. Ezen megoldások

során szinuszos, vagy más periódikus időfüggvény szerinti jelet adnak a vezérlési paraméterhez és annak hatását vizsgálják a napelem-teljesítményben [20][25]. Az Auto-oszcillációs megoldások általában egyszerűbb áramköri felépítésűek.

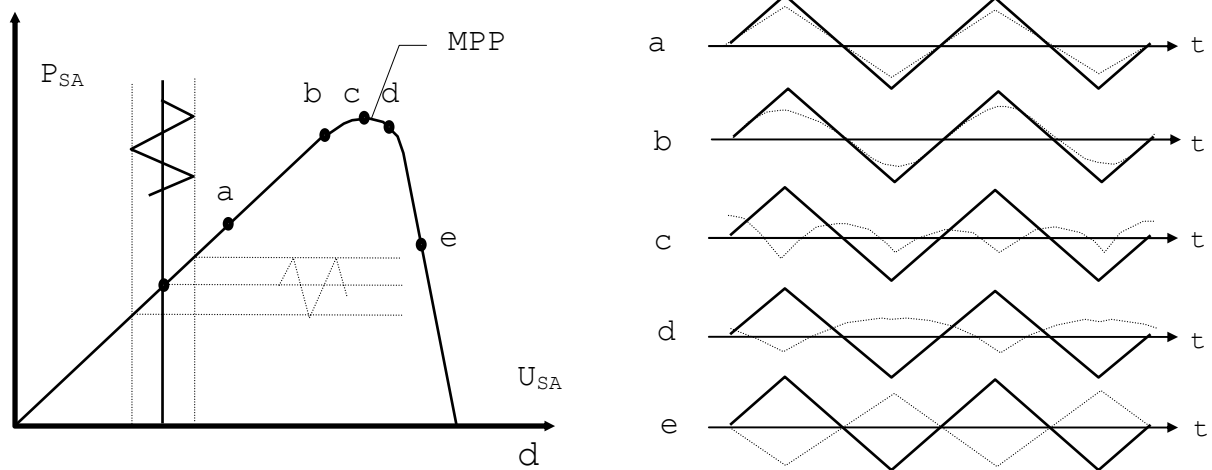
A 6.5. ábrán egy Forszírozott-oszcillációs elven működő MPP Követő szabályozási elvét mutatjuk be [25]. A perturbáló jel



6.5. ábra. Forszírozott-oszcillációs elven dolgozó MPP controller szabályozó hurkának elvi felépítése

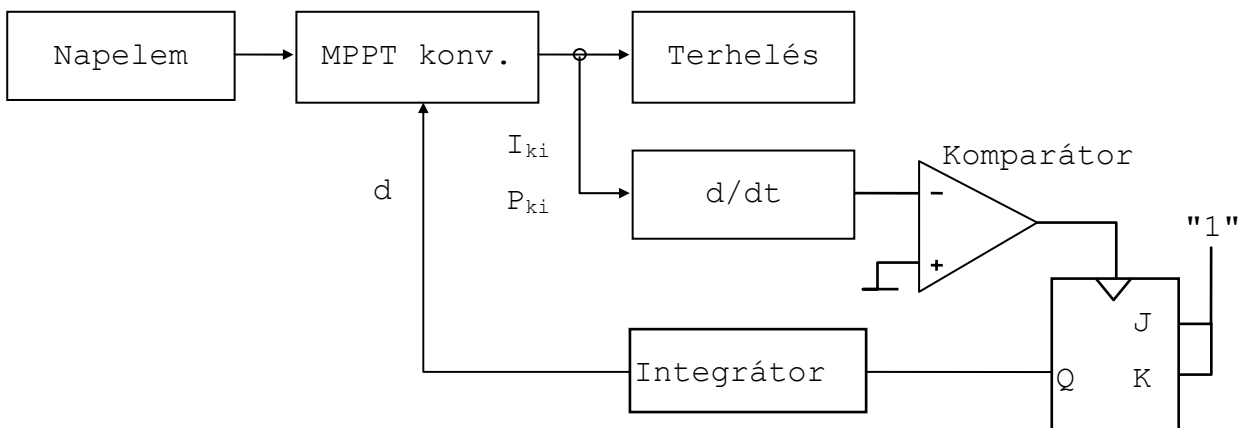
amplitúdója töredéke a kitöltési tényezőt (d) az ábrában reprezentáló jel amplitúdójának ($n\%$). A modulált kitöltési tényező hatására egy 400 Hz-es komponens is megjelenik a napelem-teljesítményben, melyet a sávszűrő kiválaszt. A komparátor kettős feladatot lát el: Egyrészt a 400 Hz-es teljesítménykomponenst négyzetjellé alakítja a fáziskomparátor számára, másrészt alulról limitálja azt a jelértéket, amire még beavatkozik a rendszer. A fáziskomparátor a beérkező jelek fáziskülönbségének megfelelően növeli vagy csökkenti a kitöltési tényezőt. Nem értékelhető jelek komparálásakor (nem azonos frekvenciájú vagy alacsony amplitúdójú jeleknél) a kitöltési tényezőt nem változtatja.

A 6.6. ábra a munkapont helyzetétől függően mutatja be a perturbáló jel és a kimeneti teljesítményben okozott 400 Hz-es moduláció helyzetét. Látható, hogy az MPP-n való áthaladáskor a modulációs komponens az eredeti perturbáló jelhez képest 180° -os fázistolást szenved, valamint a csúcs körül \pm modulációs mélységnyire a frekvencia a kétszeresére változik, a nem egyértelmű leképezés következtében. Ebből közvetlenül adódik a követés hibája, mely arányos a perturbáló jel nagyságával (ha a komparátor működik). A szabályozó mind mikroprocesszorral, mind analóg áramkörökkel megvalósítható. A példaként szereplő mikroprocesszoros áramkör beállási ideje 100 ms.



6.6. ábra. A perturbációs komponens időfüggvénye a munkapont P - U görbén való elhelyezkedésének függvényében.

Auto-oszcillációs megoldásra mutat példát a 6.7. ábra. A logikai elemek ebben az összeállításban +1 és -1 értékeket vehetnek fel aszerint, hogy magas vagy alacsony állapotot reprezentálnak. A J-K tároló kimenete a logikai függvény szerint váltja kimenetét, amely így +1 és -1 között ugráló



6.7. ábra. Auto-oszcillációs MPP Követő szabályozó rendszere. A logikai elemek szintjei: magas +1, alacsony -1.

négyszög jelet alkot. Ennek integrálja képezi a konverter kitöltési tényezőjét (d), amely egyébként egy viszonylag magas egyenszintre ültetett háromszög feszültség. Ez az eltolt háromszög feszültség egyben a perturbáló jel, amely a dP/dU értékkel ekvivalens $dI_{ki}/d\underline{d}$ derivált meghatározását lehetővé

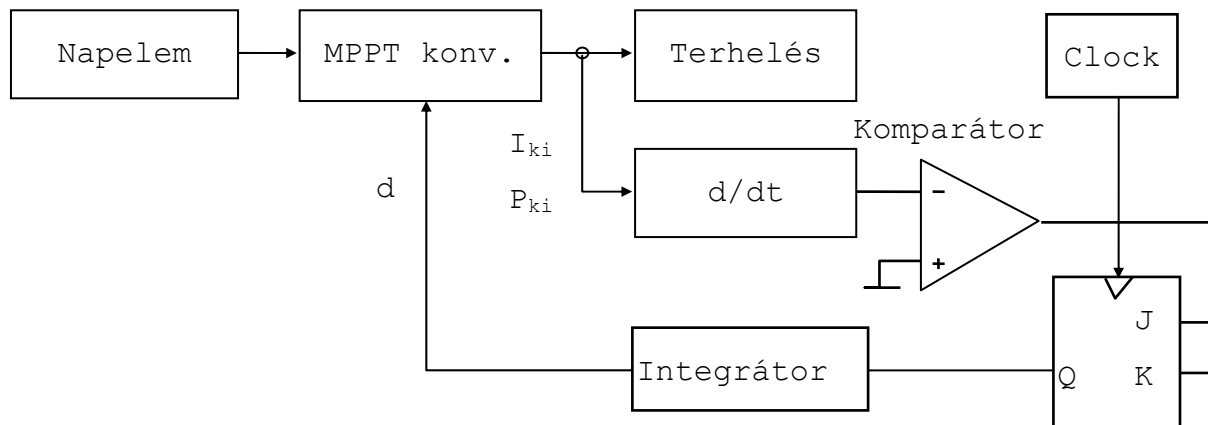
teszi. A differenciátor a dI_{ki}/dt deriváltat állítja elő, amely egyenesen arányos a dI_{ki}/dd mennyiséggel, eltekintve az előjelétől ($dI_{ki}/dd = dI_{ki}/dt \cdot dt/dd$, ahol dt/dd konstans nagyságú, a flip-flop állapotától függő előjelű szorzó).

Tegyük fel, hogy a teljesítmény görbén a munkapont az MPP felé halad, miközben a tároló kimenete magas (+1), vagyis nő a kitöltési tényező, nő a kimeneti áram. Mikor a munkapont elhagyja az MPP-t, a kimeneti áram csökkenni kezd, a komparátor bebillen, a tároló kimenete előjelet vált (-1). Mindezek hatására csökken a kitöltési tényező, majd a munkapont elindul az MPP felé. A kimeneti áram és a teljesítmény nő, majd az MPP-t elhagyva csökkenni kezd. A kimeneti áram csökkenése negatívba viszi a komparátort, ami bebillenti ismét a tárolót (+1). Nő a kitöltési tényező, növekszik a teljesítmény, eljutottunk a kiindulási ponthoz.

A fő probléma az elrendezéssel, hogy hiba esetén nem képes feléledni. A kiküszöbölésre született megoldásban [20] egy előre meghatározott határ alá csökkenő kimeneti áramérték esetén a tároló kimenetét - feltételezve, hogy az áramcsökkenés oka a terjedő hiba - megnegálja. A megoldás így már teljes, azonban a gyakori munkapont-elkalandozás az MPP-től jelentős energiaveszteséget okozhat.

A továbbfejlesztett ún. Órajeles Auto-oszcillációs megoldásban a zajimpulzus okozta hiba korrekciójára a zavar megszűnését követő órajel ciklusban sor kerül (6.8. ábra). Így az energiaveszteség gyakori beütő hibák esetén is jelentéktelen.

Az elrendezés mind analóg áramkörökkel, mind mikroprocesszorral megvalósítható.

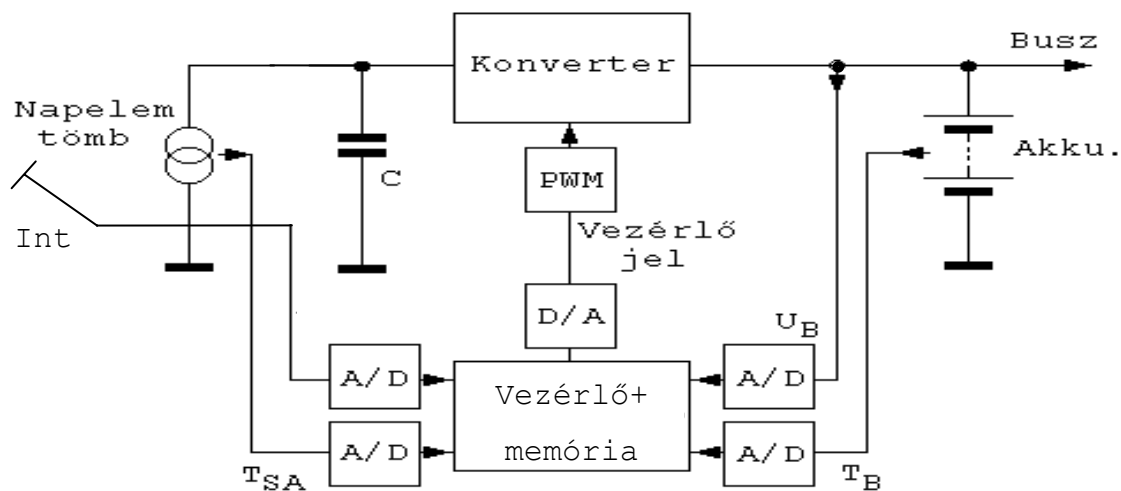


6.8. ábra. Órajeles Auto-oszcillációs megoldás a beütő hibák miatt feléledni képtelen ún. Unclocked verzió kiváltására

6.3. Referencia követők

A referencia követés lényege, hogy a napelem adott környezeti hatásra előálló kimeneti paramétereire direkt vezérlési paramétert (kitöltési tényezőt, vagy konverter bemeneti feszültséget, U_{SA} -t) rendel úgy, hogy a kialakuló munkapont megközelítse az adott környezeti hatásra előálló napelem-karakterisztika Maximális Teljesítményű Pontját.

A vezérlő tehát nem intelligens, nincs információja arra vonatkozólag, hogy hogyan sikerült a beállítás. A mért és rendelkezésre álló adatok összevetésével, esetleges korrekcióval direkt hozzárendelést végez, megállapít egy kitöltési tényezőt és azzal járattja a konvertert.



6.9. ábra. Digitális számítógép memóriájából - azt mért adatokkal címezve - megkapható az adott esetben optimális kitöltési tényező

A feladat végrehajtásához szükség van valahány mért adatnak (konkrét esetben a direkt hozzárendelésnek) memóriában való eltárolására, továbbá egy korrekciós számítási kapacitásra, amely a referencia adatokból (hőmérsékleti és besugárzási adatokból) interpolálja a konkrét feltételekhez az adatokat. Minél több referencia adat áll rendelkezésre, annál kevesebb korrekció számításra van szükség a hozzárendeléshez. Kellően sok referencia adat ismerete gyakorlatilag feleslegessé is teheti a számításokat. Nagy mennyiségű adat tárolása digitális memóriában praktikus (6.9. ábra).

Hasonlóan a 6.2. ábrán már bemutatott Hegymászó algoritmust megvalósító elrendezéshez, itt is kiegészülhet az akkumulátor management-tel a számítógép/vezérlő feladatköre. A két struktúra kísértetiesen hasonlít egymásra. A referencia követő azonban mikroprocesszor nélkül, digitális memóriával és

egyszerű digitális áramköröket tartalmazó vezérlővel - szoftver és számítási kapacitás nélkül - is megvalósítható.

A referencia követők rendszerhibájaként róható fel a paramétermérési hibák szinergikus, nem kontrollálható hatása. Továbbá a vezérlés tehetetlen az elhangolódások, a napelem-karakterisztika degradálódás következtében előálló változásával szemben. A megoldás inkább elvi jelentőségű, gyakorlatban ritka.

Az elméleti jellegű digitális példával szemben nem önálló megoldásként, hanem információs mérések támogatására más megoldások részeként a gyakorlatban is alkalmazzák az ún. referencia cellát. A napelem gyártók egyes napelem típusokat ezen referencia cellákkal hoznak forgalomba, mely cellák tökéletesen azonos félvezető-fizikai technológiával, mechanikai egységben, struktúrában, de az energiatermelő celláktól elektromosan szeparált kivitelben kerülnek kialakításra. A referencia cellák egy adott időpontban egy aktuális adathalmazt hordoznak (aktuális intenzitás és hőmérséklet mellett a teljes kimeneti karakterisztikát), amely azonnal rendelkezésre áll a további feldolgozáshoz. E kialakítás előnye, hogy nem kell időben megszakítani a vezérléshez szükséges adatok méréséhez a teljesítményfolyamot, amennyiben olyan adat mérésére szükséges, melyhez más esetben a megszakítás nélkülözhetetlen (U_{SA0} , I_{SA0}).

6.4. MPR feszültségkövető rendszerek

Ez a NMPS eljárás a napelem-karakterisztika azon "a priori" tulajdonságát használja ki, hogy a Maximális Teljesítményű Ponthoz tartozó feszültség (U_{MPP}) és a napelem üresjárási feszültség (U_{SA0}) hányadosa kvázi konstans értékű. A hányados történetileg kialakult elnevezése a Maximális Teljesítmény/-ű Ponthoz Tartozó Feszültség/ Hányados (Maximum Power Ratio, MPR), mely a nevét meghazudtolóan tehát feszültségviszony.

$$MPR = U_{MPP} / U_{SA0} \quad (6.2)$$

A hányados gyakorlati értéke 0.75, más irodalmak szerint 0.86, de a módszer lényege, hogy feltételezi: Az intenzitás- és hőmérséklet-változás a karakterisztika alakját nem befolyásolja.

Ez persze csak első ránézésre tűnik igaznak. Az MPR arány a hőmérséklettel viszonylag jelentősen, ill. a besugárzás-változással csekély mértékben változik. Az MPR hőmérséklet-függése a Maximális Teljesítményű Ponthoz tartozó feszültség (U_{MPP}) és az üresjárási feszültségek (U_{SA0}) eltérő arányú hőmérséklet-függésének a következménye. Az üresjárási feszültség a (3.2) kifejezés alapján [23][34]:

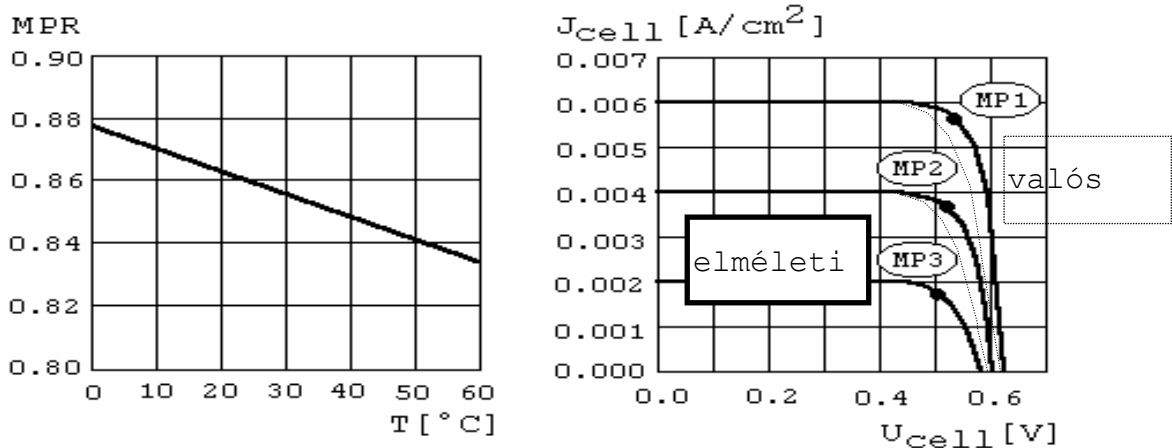
$$U_{SA0} = (k \cdot T_{cell} / q) \ln (I_{SA0} / I_{sat} + 1) \quad (6.3)$$

A napelem-teljesítmény U_{SAx} feszültség szerinti deriváltjának nulla értéke a (6.4) egyenlethez vezet.

$$e^{q \cdot U_{MPP} / k \cdot T_{cell}} \cdot (1 + q \cdot U_{MPP} / k \cdot T_{cell}) = I_{SA0} / I_{sat} + 1 = e^{q \cdot U_{SA0} / k \cdot T_{cell}} \quad (6.4)$$

A (6.4) kifejezés $U_{SAX} = U_{MPP}$ szempontjából implicit, tehát az MPR hányados sem állítható elő explicit formában. A (6.3) és (6.4) kifejezésből a cella-hőmérséklet explicit módon kinyerhető, de mindenképpen benne marad a p-n átmenet szaturációs áram hőmérséklet-függése, amely implicit módon jelenik meg benne. Az MPR tényező hőmérsékletfüggésének leírására az

$$U_{SA0} = U_1 - b \cdot T_{cell} \quad (6.5)$$



6.10. ábra. Az MPR hőmérséklet-függése. A normál Földi viszonyok között 5% drift tipikus. Az intenzitás a görbék jellegét minimálisan befolyásolja

linearizált kifejezést használják [5][23], ahol U_1 és b anyagra jellemző konstansok (pl. Si esetén $U_1=1.2$ V, $b=2.2$ mV/°C). Az MPR tényező hőmérsékletfüggését a 6.10. ábra bal oldala mutatja be. A jobb oldal a görbék alaktartását mutatja be, ami előre vetíti a kvázi intenzitásfüggetlen MPR-t.

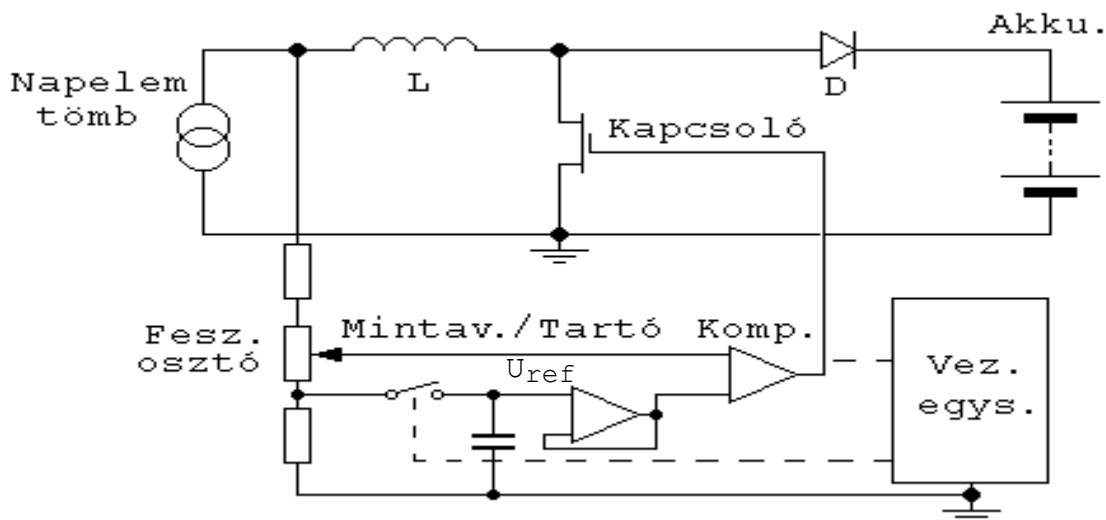
Mérés során az elvileg várható - a p-n átmenet áramsűrűség-feszültség kapcsolatát leíró elméleti görbe egyenletből levezethető - enyhe pozitív "intenzitás" faktor helyett közepes értékű negatív intenzitás-függés adódik [22]. Az ellentmondás azzal oldható fel, hogy a hozzávezetési ellenállások a kvázi feszültséggenerátoros rész meredekségét csökkentik (6.10. ábra jobb oldala). A mérést a belső ellenállás meghamisítja, mivel a kapcsolokon mért U_{MPP} valójában kevesebb, mint a tényleges. Így a mért MPR arányt is kevesebbnek látjuk az elméletinél. A kimérhető "intenzitás" faktor konstrukciófüggő, elvileg akár ki is kompenzálható a hozzávezetési ellenállások csökkentésével, ill. a beépítés megfelelő megtervezésével.

Az intenzitásváltozás okozta csekély mértékű MPR shiftet nagyságánál fogva elfedi az eközben fellépő hőmérséklet-változás által előidézett MPR változás. Külső áramköri

kompenzálás tervezéskor csak a termikus faktort veszik számításba.

A viszonylag erős hőmérséklet-függés növeli a tervezés bizonytalanságát. Űralkalmazások esetén nemcsak a követés relatív pontatlansága, hanem a Földinél szélesebb működési hőmérsékleti tartomány is a rendszer alkalmazhatóságának korlátja.

A 6.11. ábra példaként egy MPR feszültségkövető elven dolgozó MPPT rendszert mutat be [23]. Az ilyen elven, analóg áramkörökből felépített követők tervezésekor a lehető legkevesebb elemszám elérése lebeg a tervezők szeme előtt. A megoldást előszeretettel alkalmazzák távoli területek egyedi telepítésű energiaellátó rendszereinek (Remote Area Power Supply, RAPS systems) megvalósítására egyszerű, megbízható és olcsó kivitelezhetősége miatt. A működése a következő: A



6.11. ábra. MPR feszültségkövető MPPT. Minimális az elemszám

mintavevő és tartó áramkör éppen az aktuális referencia feszültséget tárolja, ami meg kell egyezzen az MPP feszültségével. A hiszterézises komparátor bekapcsolja a kapcsolót, ha egy küszöb fölé nő a napelem feszültsége ($U_{MPP} + \Delta U1$). Elkezd töltődni a tekercs, közben a lineárisan növekvő tekercsáram ($=I_{SA}$) miatt csökken a napelem feszültsége. Egy adott értéknél ($U_{MPP} - \Delta U2$) a komparátor átbillen, kikapcsolja a tranzisztort. A tekercsáram ($=I_{SA}$) lineárisan csökken, U_{SA} elkezd nőni, míg el nem éri a hiszterézis felső küszöbét. A folyamatot időközönként a vezérlő egység szakítja meg: A tranzisztor vezérlésének időleges, több periódusidő hosszú megszakításakor a mintavevő mintát vesz az ekkor terheletlen napelem feszültségéből, eltárolja annak MPR-szeresét, vagyis meghatározza azt a referencia értéket, amihez képest a napelem-feszültség $+\Delta U1$ ill. $-\Delta U2$ érték távolságok között oszcillál.

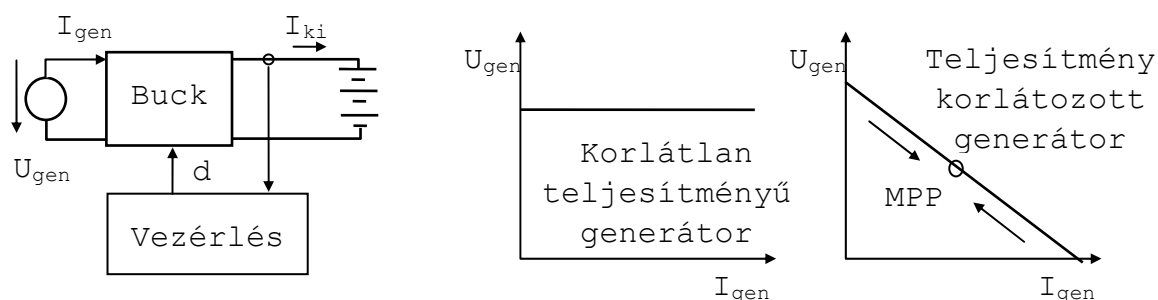
A hiszterézis nagysága a visszacsatoló ellenállásokkal és a feszültségosztóval állítható be.

A bemutatott elrendezés megbízhatóság szempontjából lényeges eleme, hogy nem igényel a konverter bemenetén energiatároló kapacitást.

6.5. Visszatáplált kimenettel vezérelt MPP Követők

Az elnevezést célszerű megmagyarázni, mert ebben a formában még soha nem jelent meg, általában mindenki az angol technicus terminust használja (Feed-forward of the Output /Current/, Feed-forward /MPPT/ control/ler/). A feed-forward technikát a DC-DC konverterek dinamikus tulajdonságainak javítása céljából vizsgálták ill. használják, tehát ebben az értelemben inkább előreccsatolásként lenne fordítható, ami időbeliségre és nem a csatolójel vonulatára utal [18][19].

A visszatáplálás lényegének megvilágítása céljából bemutatunk egy gondolati kísérletet, amely nemcsak az elnevezést magyarázza, hanem a követés elvét is bemutatja. A 6.12. ábra elrendezését vizsgáljuk meg. A vezérlés elve legyen a kimeneti



6.12. ábra. Pozitív vagy negatív visszacsatolás?
Az elnevezés generátor- ill. munkapont-függő is.

áram negatív visszacsatolása, ami azt jelenti, hogy **a kimeneti áram növekedése csökkentse a kitöltési tényezőt** (d) és viszont.

Ha a konverter bemenetén feszültséggenerátor dolgozik és csökken a kitöltési tényező, ez csökkenti a generátor áramát (I_{gen}), ami a teljesítménycsökkenés miatt csökkenti a kimeneti áramot (I_{ki}) is.

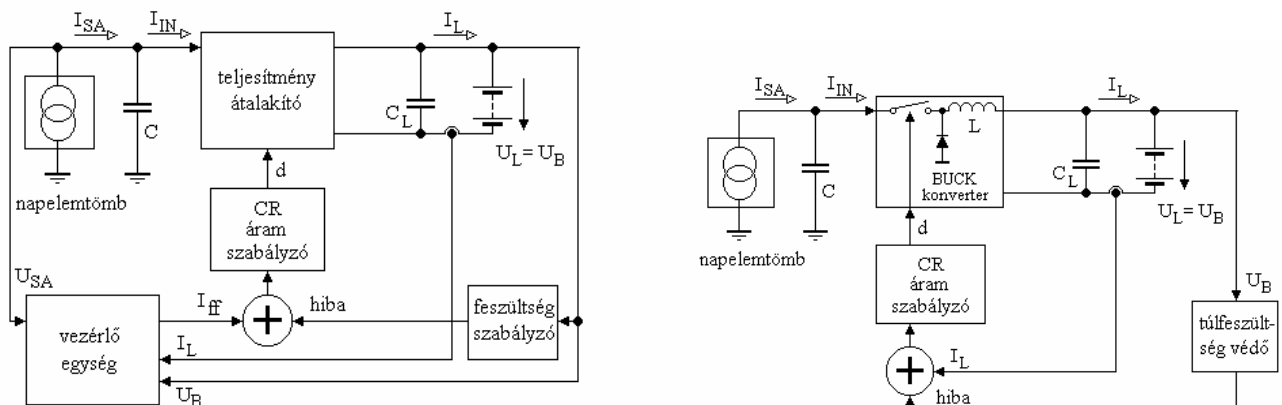
Ha a konverter bemenetén teljesítmény korlátozott generátor helyezkedik el, akkor a helyzet más: A kitöltési tényező csökkenése csökkenti a generátoráramot, de növeli a generátorfeszültséget (U_{gen}), ami a munkapont helyzetétől függően növelheti (és csökkentheti) is a generátor teljesítményét! Ez pedig növeli a kimeneti áramot és teljesítményt. A kimeneti áram növekedése pedig tovább

csökkenti a kitöltési tényezőt. A folyamat egészét tekintve mondhatjuk, hogy ez pozitív visszacsatolás. Az öngerjesztés addig tart, ameddig növelhető a generátor teljesítménye. Csökkenő generátorteljesítmény csökkenő I_{ki} -t okoz, ami növeli a vezérlés miatt a d -t, ami biztosan I_{gen} -növekedést és U_{gen} -csökkenést okoz. A kialakuló generátor munkapont ezzel a vezérlési stratégiával stabil.

A kísérlet további tanulsága, hogy a visszacsatolás elnevezésének polémiája helyett nevezzük a hasonló elven dolgozó MPPT konvertereket magyarul a címben szereplő Visszatáplált kimenettel vezérelt MPP Követőknek.

A megoldás előnye, hogy bármilyen konvertertípus, bármilyen struktúrában alkalmas Visszatáplált kimenetű MPP Követő megvalósítására, a vezérlést aktualizálva az adott megvalósítás számára. Kvalitatívan szemlélve minden alapkönverter hasonlóan viselkedik a gondolati kísérlet konverterével, tehát konstans feszültségű generátorral a bemeneten kitöltési tényezőjüket növelve növekedik a kimeneti teljesítmény. Ugyanakkor limitált forrással a bemeneten a munkapont igyekszik az MPP felé, a leírt mechanizmus szerint.

A Feed-forward vezérlést és annak egyszerűsített változatát mutatja be 6.13. ábra.



6.13. ábra. Feed-forward vezérlés általános alkalmazásban /bal oldal/, ill. Buck konverter felhasználása esetén a kialakuló egyszerűsített vezérléssel /jobb oldal/

Az áramkörökben szereplő akkumulátor oldali feszültséggurkok a töltési eljárás megvalósítását szolgálják.

A DC-DC konverterek bemeneti és kimeneti paramétereit használó optimális vagy ún. közel optimális vezérlések által nyújtott előnyök jól ismertek [18]. A kimeneti áram ill. a bemeneti feszültség visszatáplálási arányát a vezérlő egység (Control Law Generator) határozza meg. Az árammódusú vezérlést alkalmazó alapkönverterekre R. Redl és N. O. Sokal határozták meg a vezérlő egység matematikai tartalmát. Például a

feszültségnövelő (Boost) konverter esetén a visszatáplált vezérlőjel (I_{ff}) értéke:

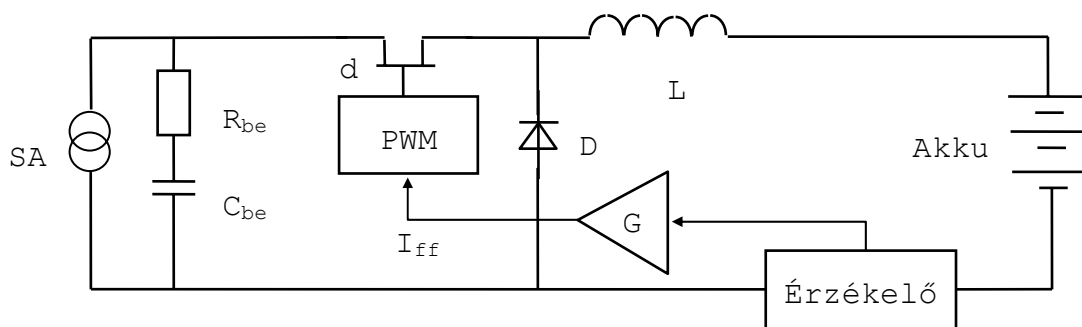
$$I_{ff} = U_B \cdot I_L / U_{SA} \quad (6.6)$$

valamint a polaritásváltó (Buck-boost) konverter esetén:

$$I_{ff} = (U_B - U_{SA}) \cdot I_L / U_{SA} \quad (6.7)$$

J.H.R. Enslin és D.B. Snyman mutatott rá, hogy a Feed-forward technikát alkalmazó feszültségcsökkentő Buck konverterrel megvalósított MPP követők közel optimális vezérlésére elegendő csak a konverter kimeneti áramjelét ($I_{ff}=I_L$) visszatáplálni, ha a terhelés akkumulátor [26]. A 8. fejezetben teljes matematikai analízis tárgyát képező Párhuzamos Energiakezelést alkalmazó Buck-Boost MPPT konverterről is belátjuk, hogy szintén kielégítő csak a kimeneti áramjel visszatáplálása. Ezzel csak látszólag mond ellent az, hogy egy önmagában szereplő - nem PPCT - polaritásváltó konverter vezérlő egysége számára szükséges a konverter bemeneti feszültség (U_{SA}) is a visszatáplált vezérlőjel (I_{ff}) előállításához. Arról, hogy a vezérlési elv hogyan határozható meg bármilyen struktúrában alkalmazott, bármilyen alapkonverterre épülő visszatáplált kimenetű MPPT controller esetén, a későbbiekben lesz szó.

A leírt egyszerűsített vezérlésű Buck konverterrel felépített MPP Követő a 6.14. ábrán látható. A Buck konverternek a



6.14. ábra. Buck konverterrel megvalósított egyszerűsített vezérlésű, visszacsatolt kimenettel vezérelt MPPT

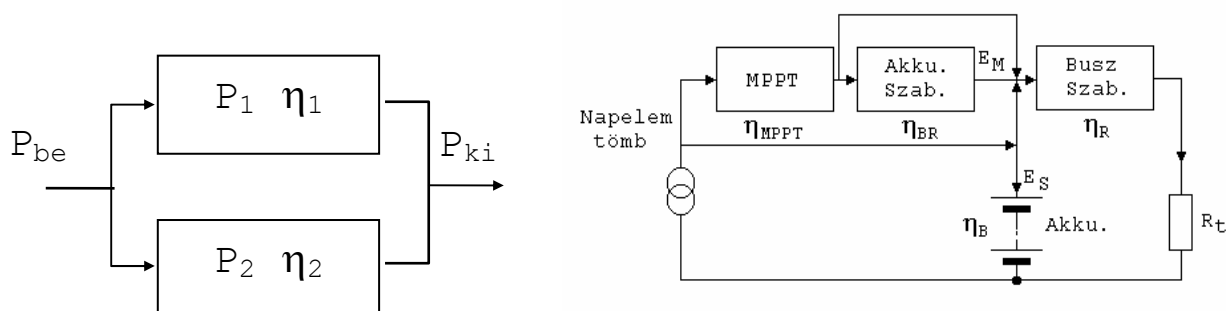
használatát az effajta MPPT megvalósításához az is segíti, hogy a 6.13 ábrán szereplő kimeneti kapacitás elhanyagolható, ha az induktivitás áramingadozása kicsi.

A bemutatott MPPT egyszerű, olcsó, a megbízhatósága igen jó. A követés pontossága nem hasonlítható a számítógépes megoldásokéhoz, azonban kisteljesítményű rendszerekben ($P < 500W$) - ahol a rendszer összköltségéhez képest az MPPT jelentős tétel lehet - az alkalmazása kifizetődik. A kevés elemszám és a korlátozott méretek lehetőséget adnak a követő napelem-táblába való beültetésére, amely rendszer így, a nem túl magas - 85%-os - konverter energetikai hatásfok mellett is, átlag napi 17%-kal több energia termelésére képes [28].

7. A PÁRHUZAMOS ENERGIAKEZELÉS ELŐNYEINEK ALKALMAZÁSA MPPT RENDSZEREKBEN

7.1. Elméleti áttekintés

A napelemes tápellátó rendszerek felépítését taglaló 4.2. fejezetben megállapítottuk, hogy a teljes rendszer egészét tekintve hatásfok-növekedés érhető el, ha az energiautak részlegesen/időlegesen magasabb hatásfokú elemmel válthatók ki (7.1. ábra). A bejövő teljesítmény (P_{be}) kettéosztott (P_1 és P_2)



7.1. ábra. Párhuzamos energiakezelés. Hatásfok-növekedés csak $\eta_2 > \eta_1$ esetén lehet.

úgy, hogy a teljesítményutak rendre η_1 és η_2 hatásfokúak. Ekkor a kialakuló eredő hatásfok a

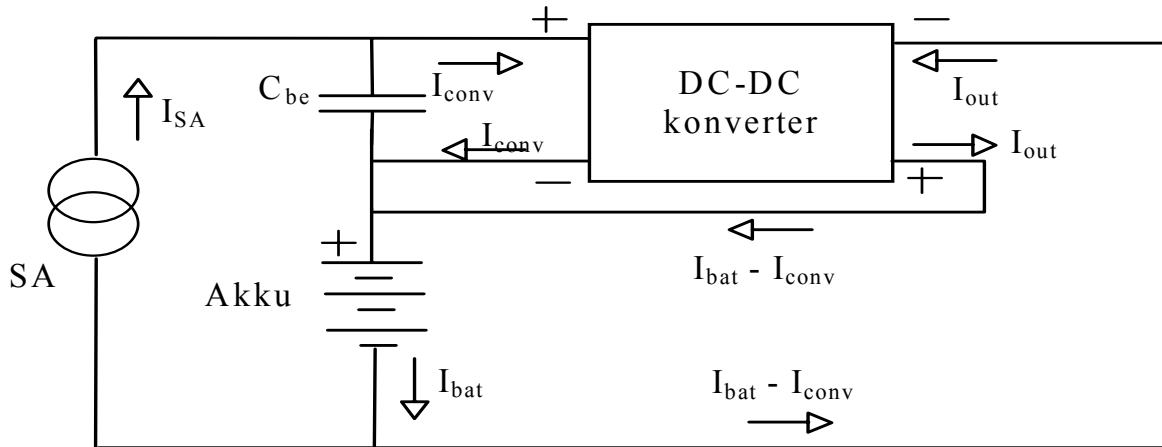
$$\eta_e = P_{ki} / P_{be} = (\eta_1 \cdot P_1 + \eta_2 \cdot P_2) / P_{be} \quad (7.1)$$

kifejezéssel határozható meg. A 7.1. ábra jobb oldalán a példában szereplő alternatív teljesítményutak (átkötés) közel 100 % hatásfokúak, amik a súlyozással a legnagyobb arányú hatásfok-növekedést hozzák.

A korábbiakban bemutatott MPP Követő megoldások követési szempontból megfelelőek. A tápellátó rendszerbe illesztést követően (soros struktúra) felmerülhet az igény nagyobb hatásfok elérésére. Bizonyos körülmények, felhasználások olyan igényeket támaszthatnak, amelyek a hatásfok-növelés minden határon túl emelését teszik szükségessé (kellő hűtés kivitelezhetetlensége, nagy energiák kezelése). A hatásfok-optimalizálás költsége az igen jó értékek tartományában aránytalanul megnő, ami bekorlátozza a lehetőségeket.

Egy újszerű, kevésbé ismert és elismert megoldást javasolunk a hatásfok-optimalizálás költségeinek csökkentésére, a hatásfok drasztikus növelésére: A Párhuzamos Energia-átalakító Technikát (Parallel Power Conversion Technique, PPCT [30][31]).

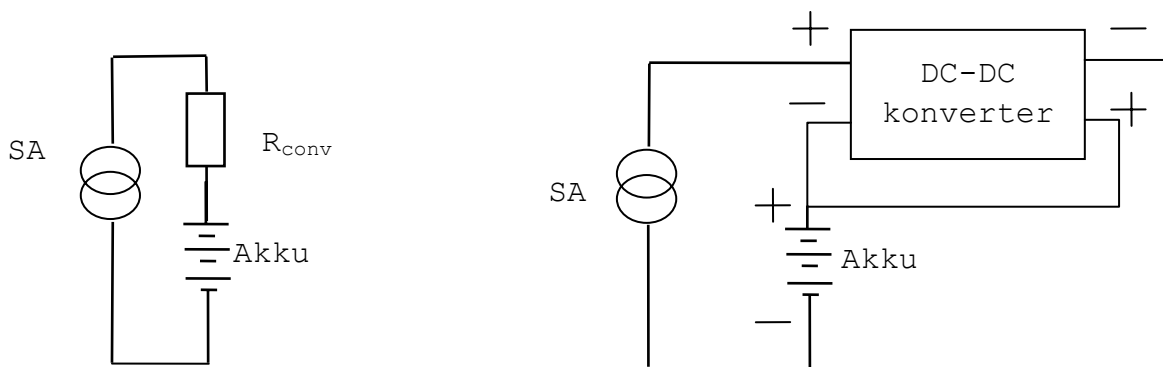
Megjegyezzük, hogy az ötletet először MPPT konverter alkalmazásban publikálták, de a megoldás más kapcsolóüzemű teljesítmény-átalakító feladat megoldására is felhasználható. Egy napelemes akkumulátortöltő elrendezésben mutatjuk be a PPCT megoldást (7.2. ábra).



7.2. ábra. PPC Struktúrában működő napelemes akkutöltő

Látható, hogy a napelemmel sorban kapcsolódik az akkumulátor és a konverter bemenetén a kapacitás. A kapacitás lehet a DC-DC konverter bemeneti kapacitása. A konverter a vezérlésen keresztül valósítja meg az MPP Követést.

A kapacitás feszültsége (U_{conv}) és az akkumulátor feszültsége (U_{bat}) határozza meg azt, hogy a közel 100% hatásfokú direkt energiaáramlás mennyit emel az eredő hatásfokon. A 7.3. ábrán látható, hogy mind az akkumulátor, mind a konverter terhelésként jelentkeznek a napelemtábla számára. A statikus



7.3. ábra. Illusztráció az eredő hatásfok számításához

munkaponti adatokkal meghatározott R_{conv} jelölje a konvertert bemeneti impedanciáját, mint a terhelés egy részét. Ha a munkaponti adatok több kapcsolási perióduson keresztül kvázi

konstansnak tekinthetők (ami legtöbbször teljesül), akkor az akkumulátorba jutó direkt teljesítmény egyenesen arányos az aktuális napelem-árammal, valamint független az aktuális napelem-feszültségtől (áramgenerátor).

A konverter bemenetét reprezentáló ellenállás teljesítménye nem veszik el, hiszen azt a konverter az aktuális hatásfokkal (η_{conv}) és a megfelelő polaritással nagy részét az akkumulátorba juttatja. A konvertált energia egyenesen arányos a konverter bemeneti feszültségével ($U_{conv}=U_{SA}-U_{bat}$) és a napelem-árammal.

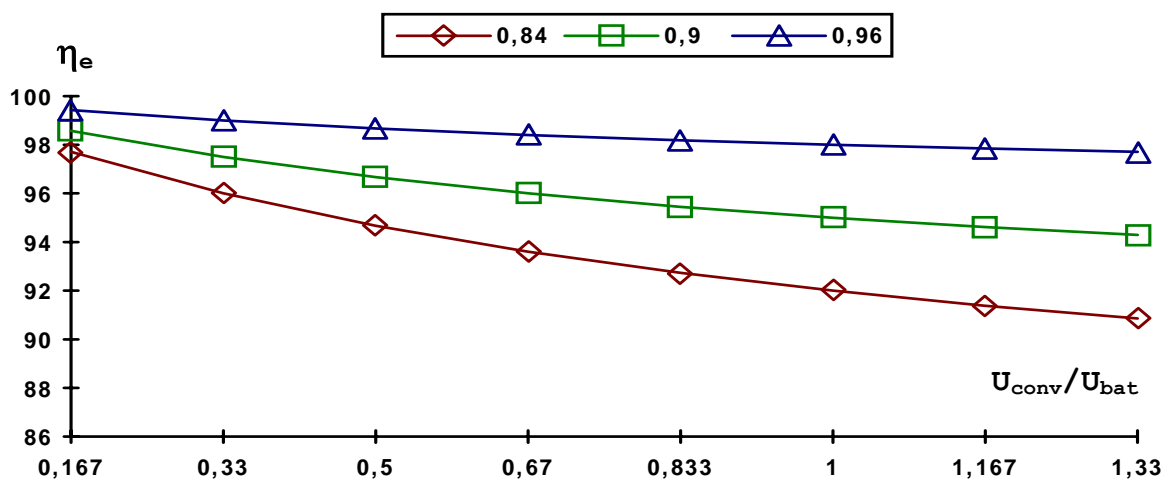
Például amikor a kapacitás feszültsége (U_{conv}) egyenlő az akku feszültségével, akkor a direkt akkumulátor-teljesítmény megegyezik a konvertálttal. Ez $(100-\eta_{conv})/2$ %-os hatásfok-javulást eredményez η_{conv} -hoz képest. Ezek után a rendszer eredő hatásfoka az akku- és napelem-teljesítmények hányadosaként számítható:

$$\eta_e = \frac{U_{bat} \cdot I_{conv} + \eta_{conv} \cdot U_{conv} \cdot I_{conv}}{(U_{conv} + U_{bat}) \cdot I_{SA}} \quad (7.2)$$

Mivel $I_{SA}=I_{conv}$, ezért a kifejezés $U_{bat} \cdot I_{conv}$ kifejezéssel egyszerűsíthető, így az eredő rendszer-hatásfok:

$$\eta_e = \frac{1 + \eta_{conv} \cdot \frac{U_{conv}}{U_{bat}}}{1 + \frac{U_{conv}}{U_{bat}}} \quad (7.3)$$

Látható, hogy az η_e eredő rendszer hatásfok bármilyen U_{conv}/U_{bat} viszony esetén is nagyobb η_{conv} -nál. Az eredő hatásfok értékét ábrázolja a 7.4. ábra néhány reális konverter hatásfok feltételezése mellett.



7.4. ábra. Eredő rendszer hatásfok az U_{conv}/U_{bat} függvényében néhány kiválasztott konverter-hatásfok esetén

Az előbbi 50 %-os példa kapcsán látható, hogy célszerű bevezetni egy új jellemzőt, amely megmutatja, hogy a rendszeren áthaladó teljesítmény mekkora hányadát kezeli a konverter. A konverter aktivitás (CA) a példában 50%.

$$CA = P_{conv}/P_{SA} = U_{conv}/U_{SA} \quad (7.4)$$

A rendszer hatásfokát elsősorban a konverter bemeneti feszültsége befolyásolja, hiszen az üzemi körülmények között a relatív változások itt a legnagyobbak. Az eredő hatásfok kifejezhető a konverter aktivitással (CA) is:

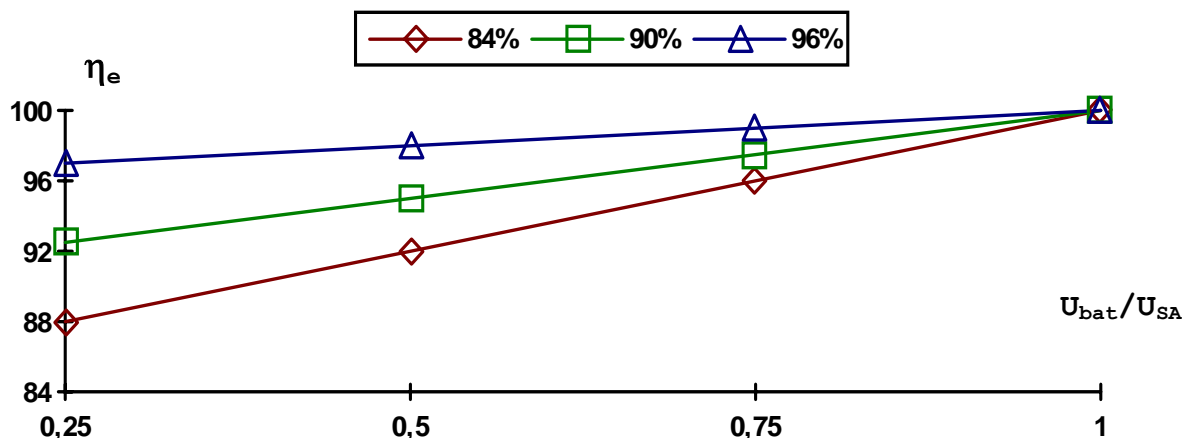
$$\eta_e = 1 - \frac{U_{conv}}{U_{SA}} + \eta_{conv} \cdot \frac{U_{conv}}{U_{SA}} = 1 - CA \cdot (1 - \eta_{conv}) \quad (7.5)$$

A kifejezés összhangban áll a fenti példában a hatásfok-javulással kapcsolatosan tett megállapítással.

Az eredő hatásfok kifejezhető továbbá az $U_{bat}/U_{SA} = 1 - CA$ függvényében is:

$$\eta_e = \frac{U_{bat}}{U_{SA}} + \eta_{conv} \cdot \left(1 - \frac{U_{bat}}{U_{SA}}\right) \quad (7.6)$$

A (7.6) tartalma grafikusán szemléltetve a 7.5. ábrán látható.



7.5. ábra. Eredő rendszer hatásfok az U_{bat}/U_{SA} függvényében néhány kiválasztott konverter-hatásfok esetén

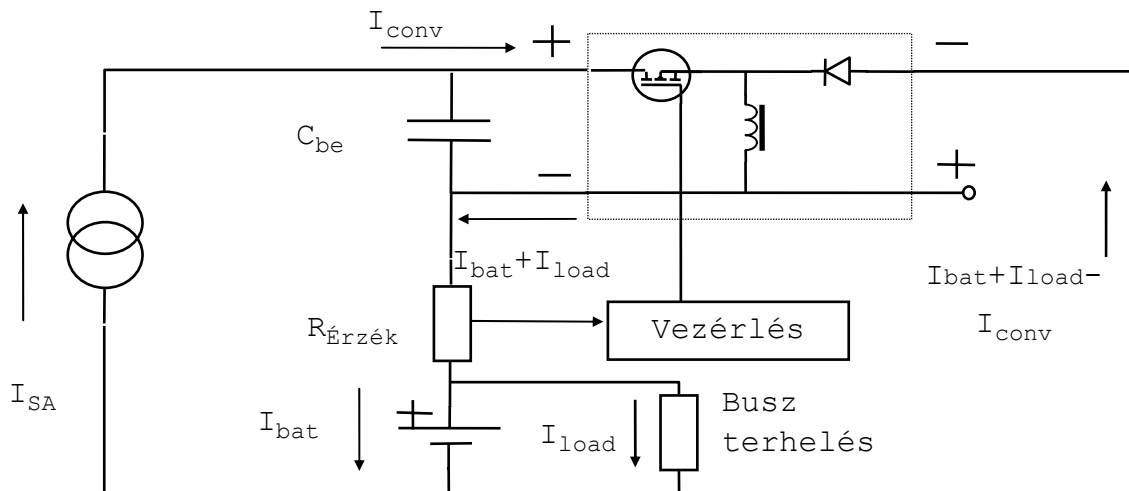
A 6. fejezetben ismertetett MPP Követő konverterek közös jellemzője, hogy a napelemből kinyert teljes teljesítményt kezelik. A PPC Technikát alkalmazó konverter annál kevesebb energiát kezel, minél kisebb a konverter aktivitás vagy az U_{conv}/U_{bat} arány. A relatívan kevesebb energiát kisebb tömegű és árú konverter képes átalakítani.

Az U_{conv}/U_{bat} hányados, ill. CA csökkentésének a konverter bemeneti feszültségtartománya, ill. a relatív működési tartománya szab határt. A gyakorlati feladatokban az $U_{conv}/U_{bat} \cong 1$ körüli tartomány ($CA \cong 0.5$) megvalósítása reális.

7.2. Realizált PPCT MPP Követő mérése, szimulációja

A PPCT bemutatása során hivatkoztunk egy megvalósított MPP Követőre. Mivel az említett Compound konvertert [29][30][31] - nagyfokú induktív alkatrész integráltsága okán - kellően bonyolultnak véltük, ezért a buszstabilizáltság igényét elhanyagolva, valamint a rendszer egyszerűbb realizálhatóságát szem előtt tartva egy alapkoverterrel felépített megoldást javasoltunk az akkumulátortöltő megvalósításra [32][33].

Visszatekintve a 7.2. ábrára látható, hogy olyan konverterre van szükség, amely teljesít egyfajta polaritás-kritériumot. Az erre alkalmas konverterek (a galvanikusan szeparált, valamint a Čuk és a Buck-boost alapkoverterek) közül az egyszerű megvalósítást követve választottuk a Buck-boost (polaritásváltó) konvertert. A PPCT MPPT rendszer sematikus felépítése a 7.6. ábrán található. Előnyei közé tartozik, hogy

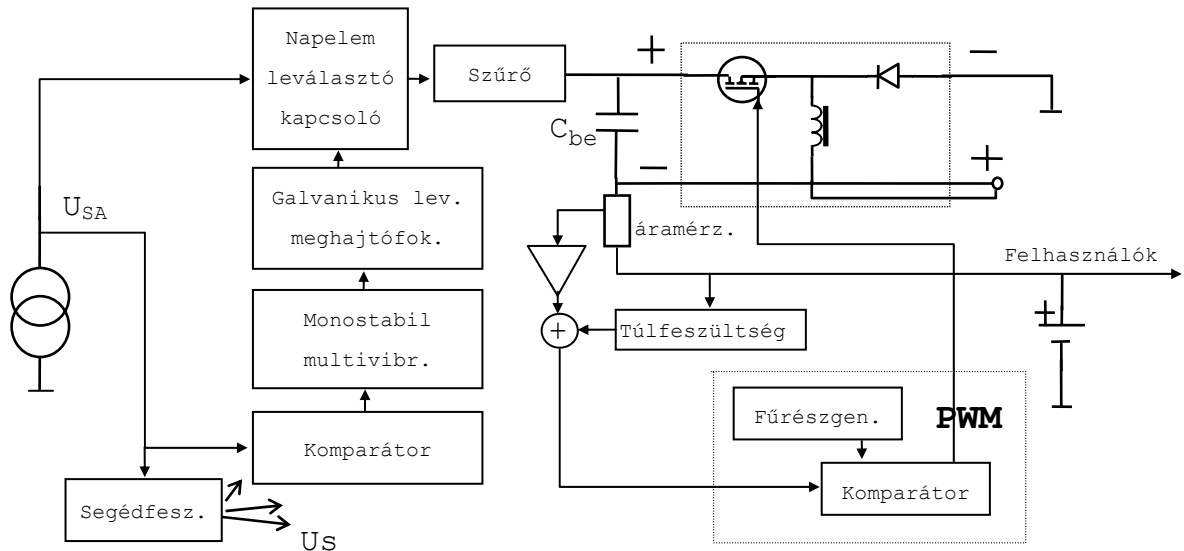


7.6. ábra. A javasolt MPPT sematikus modellje

csak 1 induktív elemet kell realizálni, a Visszatáplált kimenettel vezérelt MPP Követés a rendszer kimeneti áramának ($I_{bat}+I_{load}$) visszacsatolásával megoldható. Az akkumulátor túltöltését megakadályozó, valamint a sötét időszakokra a napelem-leválasztó kapcsolóval ellátott, realizált rendszer blokkvázlatát taglalja a 7.7. ábra. Megjegyezzük, hogy a napelem-leválasztó kapcsoló és csatlakozó áramköreinek a feladata a napelemek összegzése/leválasztása. A más áramkörökben használatos leválasztó diódákat itt a kapcsoló FET beépített Source-Drain irányú diódája valósítja meg, a kapcsoló plusz szolgáltatása, hogy aktív időszakban bekapcsol és csökkenti a diódák okozta disszipációt.

A vezérlőt közönséges PWM integrált kontrollert felhasználásával építettük fel. A működési frekvencia 50 kHz.

Az áramkör felépítésével igazolni kívántuk, hogy a Visszatáplált kimeneti árammal vezérelt MPP Követés nemcsak a korábban már megismert Buck konverteres struktúra egyedüli kiváltsága, hanem az elv alkalmazható más konverterek hasonló elven történő vezérlésére is. További célként jelöltük meg



7.7. ábra. PPCT-vel kialakított Visszatáplált kimenetű MPPT

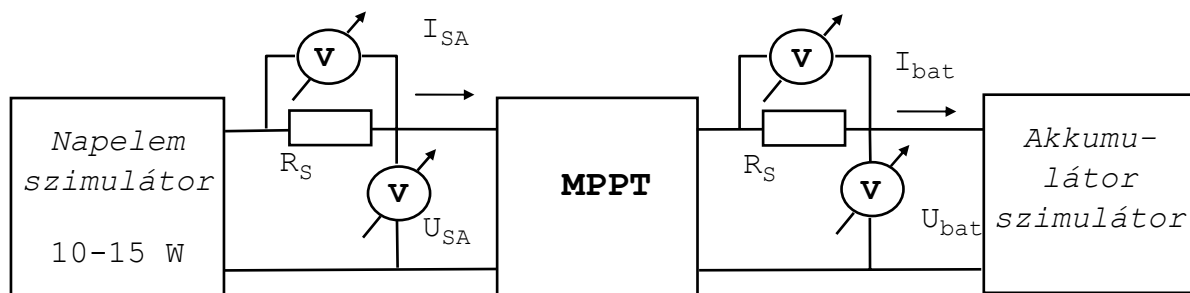
az energetikai hatásfok (η_e) javulásának detektálását, valamint valamiféle minőségi paraméter (\rightarrow Követési hatásfok, $\eta_{k\ddot{o}}$) definíció megalkotását annak mérésére, hogy a felépített áramkör MPP követési mechanizmusa "mennyire jó". A mérési elrendezés a 7.8. ábrán látható.

Itt jegyezzük meg, hogy a felhasználás szempontjából mind a két hatásfok javítása végső soron a rendelkezésre álló energiát növeli. Sok esetben MPPT rendszerek tárgyalásakor nem is jelölik sorra a rendelkezésre álló energia veszteségeinek okait, csak a rendszer egészének outputját. A szemlélet elfogadható, de kevésbé analitikus.

A munka során alkalmas napelem és akkumulátor hiányában szimulátorokat használtunk, melyek további előnnyel is bírtak:

- Az akkumulátor-szimulátor konstans feszültségű akkumulátorként jelenik meg az áramkörben, vagyis pld. túltöltés miatt nem kell megállítani a mérést, valamint pontosabbak az azonos körülmények között mért értékek.

- A napelem-szimulátor alkalmazásának előnye, hogy laboratóriumi körülmények között állíthatunk elő "intenzitás- és hőmérsékletváltozást". További előnye, hogy egy adott környezeti paramétereket szimuláló napelem-karakterisztika bármikor újból előállítható, tehát a tesztsorozat mérési eredményei a karakterisztika reprodukálhatósága folytán szintén reprodukálhatóvá válnak. A szimulátorral szemben követelményként jelentkezik a szimulált karakterisztika közelítésének minősége, valamint az, hogy a dinamikus terhelésváltozás bekövetkezésekor a munkapont mennyire jól követi a statikus karakterisztika vonulatát.



7.8. ábra. Mérési elrendezés

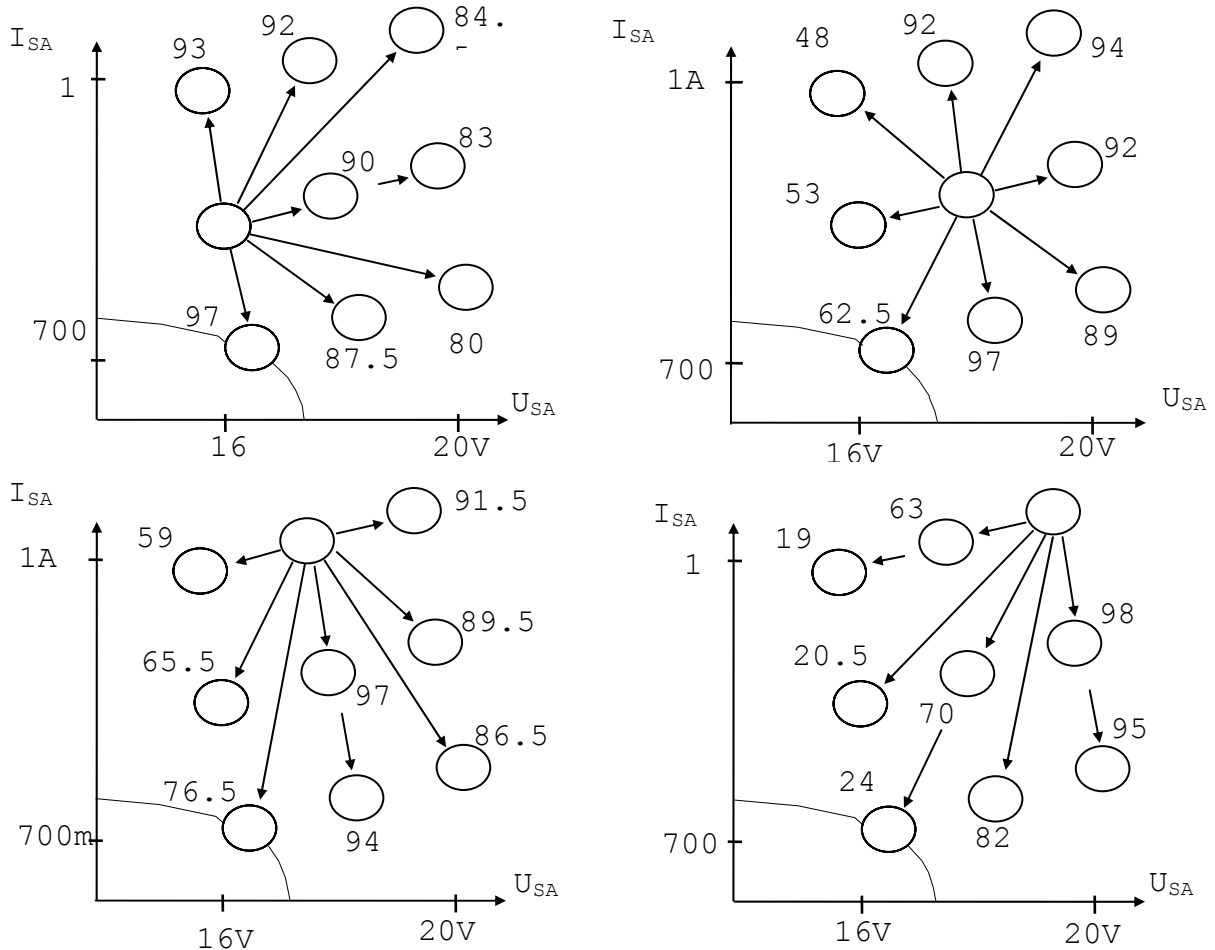
A későbbiek folyamán látni fogjuk, hogy adott struktúrájú, Visszatáplált kimenettel vezérelt MPP Követő egy adott - környezeti paraméter-beállítás mellett kialakuló - napelem-karakterisztika esetén mindig MPP-be állítható (a konverter normál működését feltételezve). A mérés menete a következő: Adott karakterisztikán (x) MPP-t állítunk, majd egy másik karakterisztikára (z) lépve azt vizsgáljuk, hogy az aktuális új karakterisztika MPP teljesítményéhez képest mekkora teljesítményt ad le a napelem-szimulátor. A hányados egyben definíciója is az általunk használt Követési hatásfoknak:

$$\eta_{k\ddot{o} \ x \rightarrow z} = P_{SA \ x \rightarrow z} / P_{MPPz} \quad (7.7)$$

ahol $P_{SA \ x \rightarrow z}$ jelöli a z környezeti állapotnak megfelelő karakterisztikán kialakuló munkaponti értékek ($U_{SAz} \cdot I_{SAz}$) szorzatát, P_{MPPz} pedig ugyanennek a karakterisztikának a maximális teljesítményű pontját. Természetesen más karakterisztikáról (pld. y -ről) indul a mérés, ha $\eta_{k\ddot{o} \ y \rightarrow z}$ értékét határozzuk meg, és értelemszerűen nem feltétlenül egyezik meg $P_{SA \ x \rightarrow z}$ és $P_{SA \ y \rightarrow z}$ egymással.

A 7.9. ábra körökkel jelöli 9 db általunk megvalósított, egzakt, reprodukálható napelem-karakterisztika maximális teljesítményű pontját. A kilenc karakterisztikával

vizsgálhatóvá vált a követés minősége mind intenzitás-, mind hőmérséklet-változás, mind pedig azok együttes jelentkezésekor. A nyilak szimbolizálják a karakterisztikaváltást, a számok pedig a mért napelem- és akkumulátorjellemzők alapján számított Követési hatásfokokat ($\eta_{k\ddot{o}}$) mutatják százalékban, néhány méréssorozatot tekintve.



7.9. ábra. A vizsgált Párhuzamos Energiakezelő MPPT Követési hatásfok-értékei néhány esetben

Minden karakterisztika MPP-ből 8 irányba lehetett vizsgálni a követést, ez összesen 72 mérést jelentett, mely alapján nagy biztonsággal lehet megállapításokat tenni az áramkör követési viselkedésére.

A szimulált intenzitásváltozásra a követő viszonylag magas értékű $\eta_{k\ddot{o}}$ -vel működött, ami kevésbé mondható el a hőmérséklet-változás okozta vízszintes irányú eltolódásokra. Ott is inkább az alacsonyabtból a magasabb feszültségek irányában volt erősebben észlelhető a követési hatás.

A rendszer η_e eredő energetikai hatásfok értéke a munkapont helyzetétől (CA-tól) függően 88 és 92 % között mozgott.

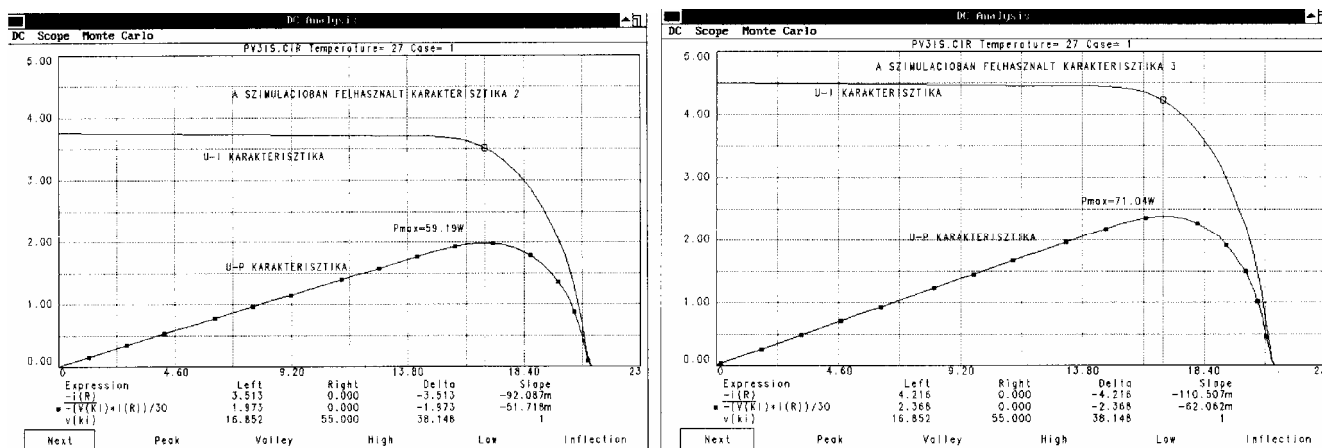
A mérések során felmerült kérdések:

- Van-e a követési képességnek az U_{SA} - I_{SA} koordinátarendszerben megrajzolható határa?
- Hogyan, milyen paraméter(ek) beállításával lehet fokozni a Követési hatásfokot?
- Bármilyen követelményrendszerben létezhet-e a paraméterek optimális beállítása?

Az energetikai hatásfok-növelésnek megvannak a kidolgozott módszerei (Disszipáció analízis, konstrukció-optimalizálás, PPCT), ezzel a továbbiakban nem foglalkozunk. A felmerült kérdések motiválták a további vizsgálatokat, így sor került a modelláramkör Microcap MC4S áramkör-analizátor programon történő szimulációjára.

A felmerült kérdéseken túl továbbra is feladatunknak tekintjük az MPP követés szemléltetését, a Párhuzamos Energiakezelésből eredő hatásfokjavulás igazolását.

A szimuláció megvalósításához - hasonlóan az áramköri mérés során használt napelem-szimulátorhoz - rögzített, a jellemző paraméterei által determinált napelem-karakterisztikákat hoztunk létre. Itt a lehetőségek könnyebben engedték a valódi karakterisztikát szinte tökéletesen lemásoló görbék megvalósítását, viszont megnehezült a több paraméter 1 szimulációs vizsgálatban való megjelenítése. A 7.10. ábra bemutat a 3 megvalósított napelem-karakterisztikából 2 különböző intenzitásértékű alapkarakterisztikát. A karakterisztikák főbb jellemzői: No1./ $U_{SA0}=21V$, $I_{SA0}=3A$, $U_{MPP}=16.98V$, $I_{MPP}=2.79A$, $P_{MPP}=47.37W$; No2./ $U_{SA0}=21V$, $I_{SA0}=3.75A$,

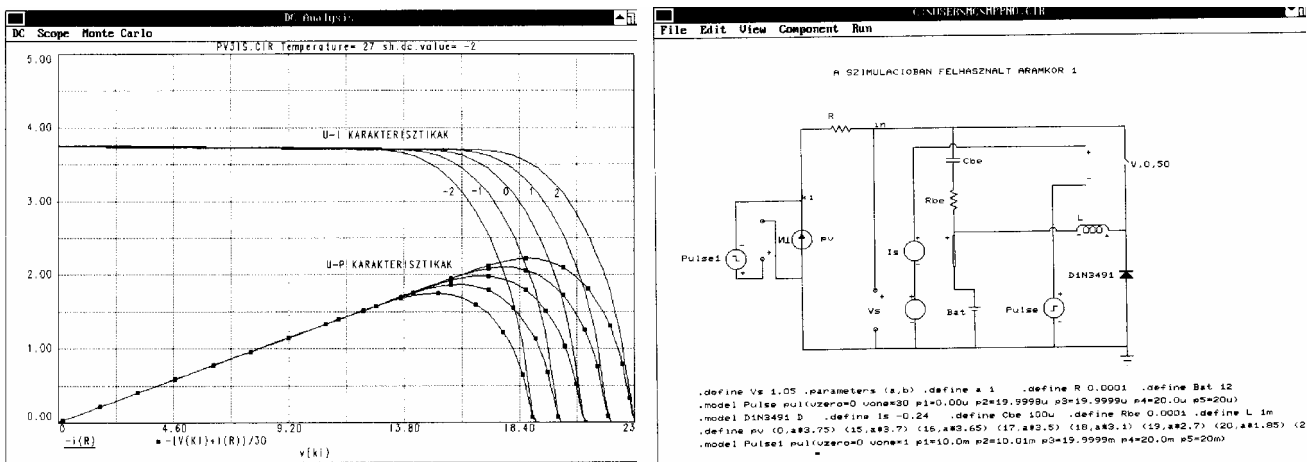


7.10. ábra. A szimulációban megvalósított napelem- karakterisztikák (No2. és No3.)

$U_{MPP}=16.85V$, $I_{MPP}=3.51A$, $P_{MPP}=59.19W$; No3./ $U_{SA0}=21V$, $I_{SA0}=4.5A$,

$U_{MPP}=16.85V$, $I_{MPP}=4.21A$, $P_{MPP}=71.04W$. A hőmérséklet-változás szimulálására feszültségben eltolott karakterisztikákat készítettünk, minden intenzitásértékhez 5 db-ot. Így összesen 15 rögzített karakterisztika állt a rendelkezésünkre. A 7.11. ábra bal oldala a közepes intenzitású karakterisztika (No2.) feszültségben eltolott görbe-seregét ábrázolja -2 és 2V közötti eltolásokkal, az ábra jobb oldala a vizsgált modell-áramkört mutatja be. A karakterisztikák ugyanabban a koordináta-rendszerben, P/30-as osztásban bemutatják a megfelelő feszültség-teljesítmény görbéket is.

A szimuláció során értelemszerűen folytonos áramú esetet tételezünk fel.

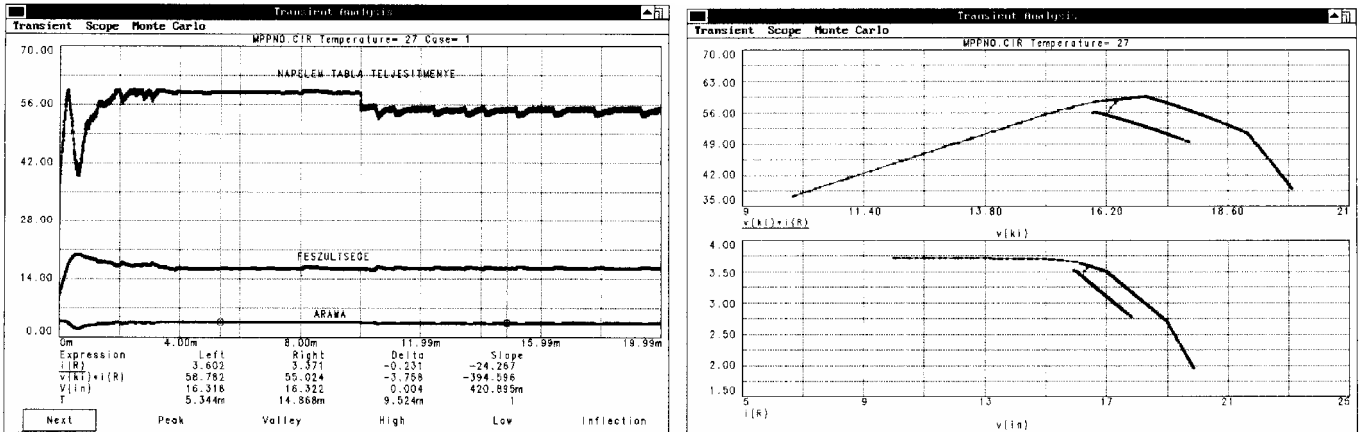


7.11. ábra. Feszültségben eltolott karakterisztikák a hőmérsékleti drift szemléltetésére (bal oldal), ill. a szimulációs modell (jobb oldal)

A [7] diplomatervezés részletesen ismerteti a szimulációban alkalmazott építőelemeket, a vizsgálat menetét, eredményeit. Mi három vizsgálatot elemzünk részletesen:

1. Megvizsgáljuk a modellt feszültségeltolás esetén.
2. Megvizsgáljuk a modell tulajdonságait, ha a karakterisztikán feszültség- és árameltolás együttesen lép fel.
3. A Visszacsatoló hurokban az erősítést, mint paramétert változtatva megvizsgáljuk a követési tulajdonságok alakulását.

1. A feszültségugrást a No2. karakterisztika $0 \rightarrow -1$ V-os eltolása állítja elő a szimuláció $t=10$ ms időpontjában. A napelem teljesítményét, feszültségét és áramát mutatja az idő függvényében a 7.12. ábra bal oldala, valamint a teljesítmény-feszültség ill. áram-feszültség koordináta-rendszerben látható a karakterisztikaváltás a jobb oldalon.

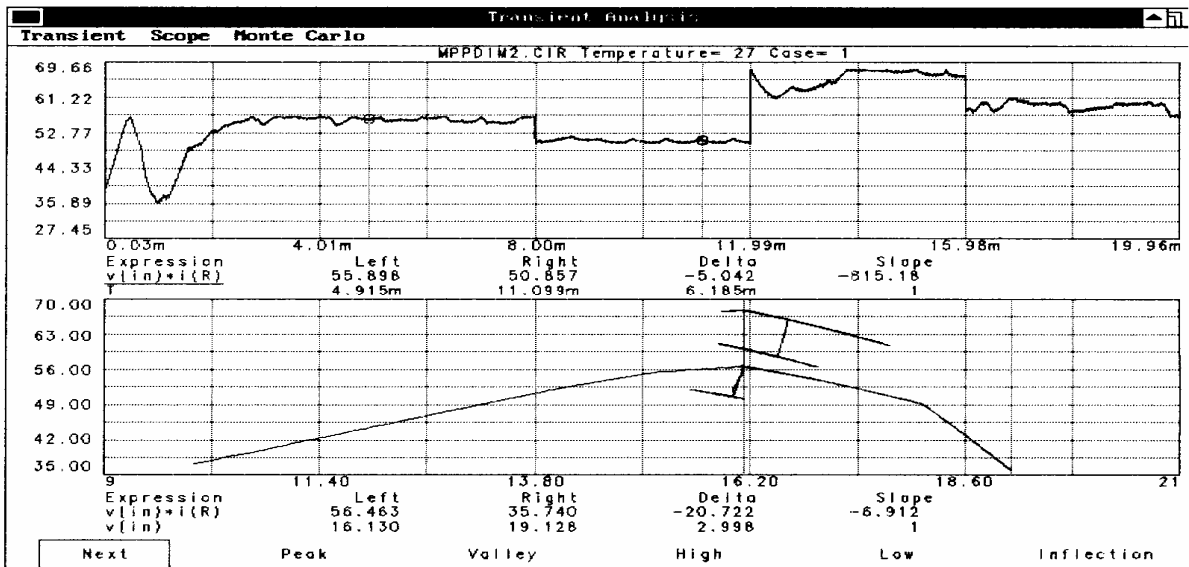


7.12. ábra. A feszültségváltozáskor fellépő változások időfüggése (bal oldal) és a napelem-karakterisztikán való megjelenése (jobb oldal)

A bal oldali ábrán látható, hogy bekapcsoláskor a napelem feszültsége lehelletnyit megnőtt, az árama kissé nagyobb mértékben csökkent. Ez a tranziens 2-3 ms alatt lezajlik és a teljesítmény beáll 59 W körüli értékre. A $t=10$ ms-nál a teljesítmény 59W-ról kb. 55W-ra esett vissza, ami az ezen a karakterisztikán fellelhető MPP teljesítményéhez (kb. 55.5W) a Követési hatásfok itt kb. 99.1%-os.

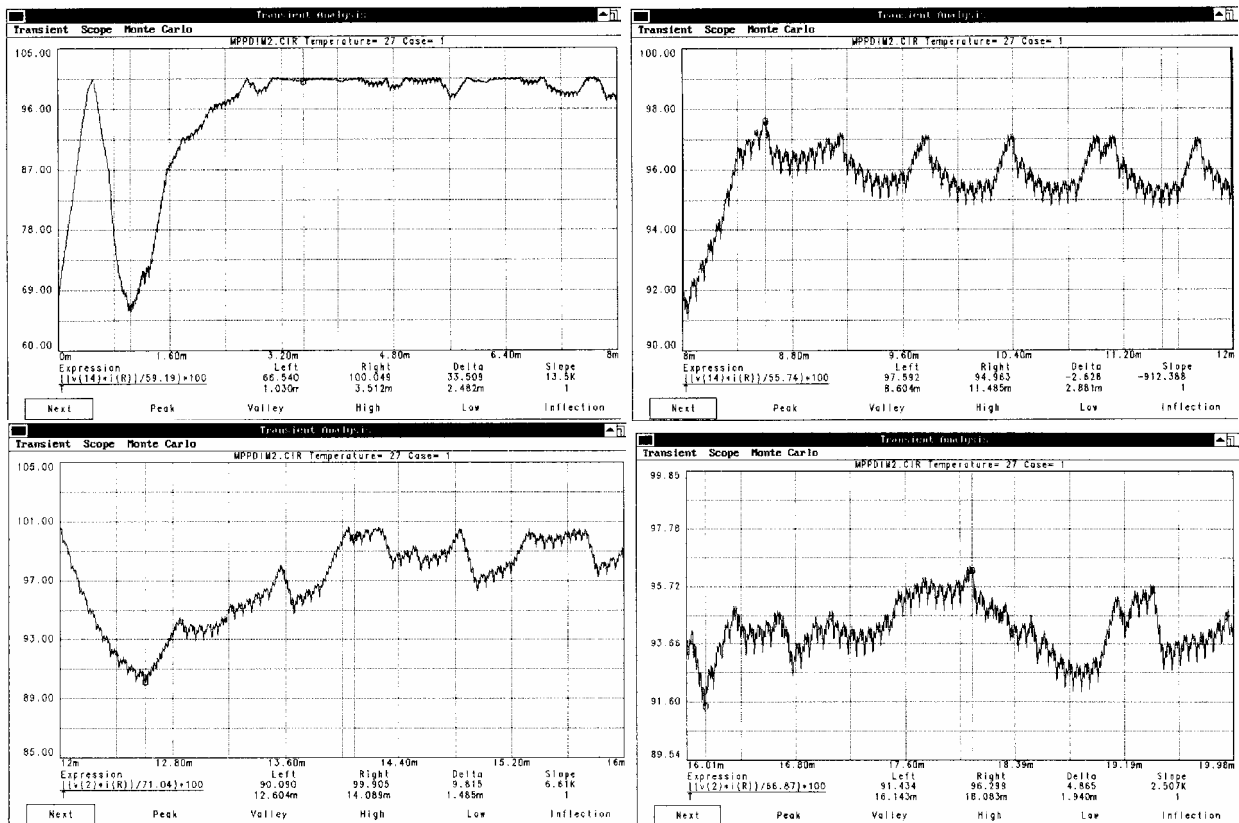
2. A kimeneti teljesítmény változását és a Követési hatásfokok vizsgálatát céloztuk meg a második szimuláció során. Figyelembe véve a rendszer tranzienseinek időállandóit, felbontottuk a rendelkezésre álló időt 4 részre. Az elsőben, a 0-8 ms intervallumban lezajlik a bekapcsolási tranziens és a No2. karakterisztika 0V-os eltolású görbéjén beáll az MPP-be a rendszer ($\eta_{kő}=100\%$). A $t=8$ ms-nál belép a No2. karakterisztika -1V-os eltolt változata, $t=12$ ms-tól pedig a No3. karakterisztika 0V-os görbéje az érvényes. 16 ms-nál a No3-as görbe -1V-tal eltolt változata lesz az aktuális karakterisztika. A 7.13 ábrán a felső kép az időben, az alsó a napelem-feszültség függvényében ábrázolja a napelem teljesítményét.

Mivel minden karakterisztika rögzített, ezért közvetlenül kirajzoltatható az egyes időtartományok számára a Követési hatásfok időfüggvénye. A 7.14 ábra 4 részletben közli - a 4 időtartománynak megfelelően - az $\eta_{kő}$ időfüggvényeit. Az első 8 ms-ban a tranziens lezajlása után a Követési hatásfok 100%



7.13. ábra. A napelem teljesítménye időben és a napelem-feszültség függvényében

közeliében (MPP közeliében) tanyázik. A $t=8$ ms-nál bekövetkező $-1V$ -os eltolás 96% körülre mérsékli a Követési hatásfokot. A 12 ms elérésekor a szimuláció átlép a harmadik karakterisztika

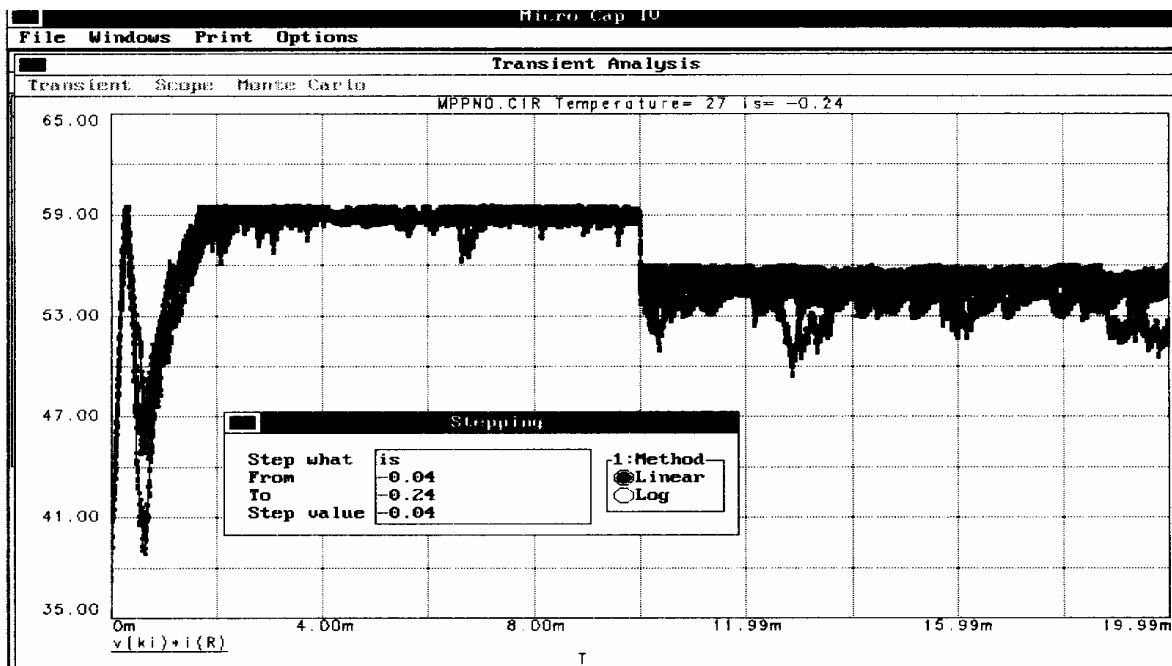


7.14. ábra. Követési hatásfok-időfüggvények a 2. vizsgálat során

0V eltolású görbéjére. Ez a lépés az előző állapothoz képest feszültség- és árameltolást is jelent. A Követési hatásfok kis átkapcsolási anomália után 99% körül vacillál. A 16 ms-nál bekövetkező -1V-os eltolás után $\eta_{k\ddot{o}}$ 94%-ra esik vissza.

3. A harmadik feladatban arra keresünk választ, hogy mekkora értékű legyen a visszacsatoló paraméter annak érdekében, hogy maximális követési jellemzőket kapjunk. A vizsgálat eredménye a 7.15. ábrában jelenik meg.

A kimeneti áramot az áramérzékelő feszültsége reprezentálja. A jel szorzóját (amely egyébként negatív) -0.04 és -0.24 között 0.04-es lépésekben változtattuk meg és néztük a generátor teljesítményének időfüggvényét. A $t=10$ ms időpillanatban beépített feszültségeltolásra adott válasz minden visszacsatoló értéknél információt ad a tranziens viselkedésről. Mivel a szoftver minden szorzóhoz tartozó időfüggvényt egy ábrába, egymásra rajzol, ezért elmondjuk, hogy véleményünk szerint a legkedvezőbb beállítást a -0.24 értékű esetben értük el, ahol a modell rövid tranzienssel, kis ingadozással, nagyobb értékű teljesítményszintet produkált. Az alacsonyabb értékeknél (-0.2 irányába) megnőtt az ingadozás, a magasabb értékeknél pedig (-0.28 irányába) csökkent a teljesítmény [7].



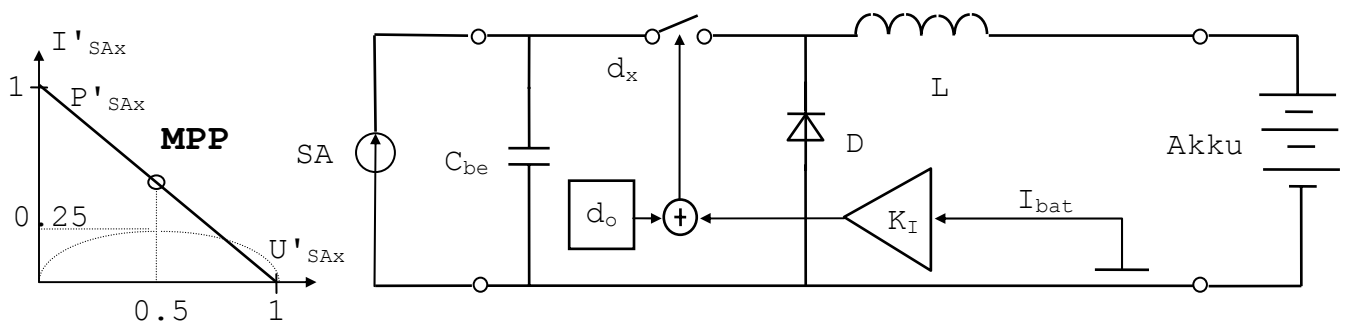
7.15. ábra. A kimeneti áram visszacsatolásának hatása

A számítógépes szimuláció helyenként igen látványos eredményekkel szolgált, és erősítette a gyanút, hogy érdemes foglalkozni a követés tökéletesítésével. Egzakt, kézzel fogható beállítási utasítást, a lehetőségek korlátait nem ismertük meg.

8. MATEMATIKAI ANALÍZIS

8.1. A vizsgált modell. Kezdeti feltevések

Egy jó matematikai modell megalkotásához nem állt elég ismeret rendelkezésre. Igyekeztünk kellőképpen lecsupaszított problémával szembekerülni. A 6.5. fejezetben, a 6.14. ábrán bemutatott, Buck konverterrel megvalósított egyszerűsített vezérlésű, visszacsatolt kimenettel vezérelt MPP követőhöz [5] [26][27], mely megfelelően egyszerűnek tűnt ahhoz, hogy a számítások eredményre is vezessenek. Az egyszerűsített Buck konverteres követő alapján alkottuk meg a 8.1. ábrán részletezett modellt.



8.1. ábra. Visszatáplált kimeneti áramú Buck konverteres MPPT modellje a vizsgálatokhoz

Feltételezések:

- A modell vizsgálata során a veszteségeket elhanyagoljuk ($\eta_{conv} = 100\%$).
- A modellben szereplő D diódát ideális egyenirányítónak tételezzük fel, a nyitófeszültséget a számításokban elhanyagoljuk.
- L és C_{be} értékeit nem határozzuk meg, azok legyenek akkorák, hogy a konverter a legkisebb töltőáram esetén is a folytonos áramú tartományban legyen.
- A modellben szereplő feszültségek és áramok a karakterisztika átkapcsolási tranziensek lezajlása utáni stacionárius állapot értékeinek megfelelő, a kapcsolóüzemű perióduson belül fellépő természetes változásokat elhanyagoló, hosszú idejű átlagként értelmezett mennyiségeket jelentenek.

A vizsgálathoz a legegyszerűbb korlátozott teljesítményű generátort használjuk fel, amely szintén a 8.1. ábrán látható [34]. A számítások során előforduló mennyiségeket az aktuális korlátozott teljesítményű generátor U_{SA0} és I_{SA0} értékeire normalizáljuk.

$$U'_{SAX} = U_{SAX}/U_{SA0} \quad (8.1),$$

$$I'_{SAX} = I_{SAX}/I_{SA0} \quad (8.2) \text{ és}$$

$$P'_{SAX} = P_{SAX}/U_{SA0} \cdot I_{SA0} \quad (8.3) \text{ etc.}$$

Itt állapítjuk meg, hogy a normalizálás az abszolút értékeket tekintve nem befolyásolja a számítások eredményét.

A maximális teljesítményű pont a (0.5, 0.5) koordinátájú pontban helyezkedik el. A továbbiakban tett megállapításokat a 8.1. ábra struktúrájára tesszük, ha ezt egyébként nem jelezzük.

1. lemma

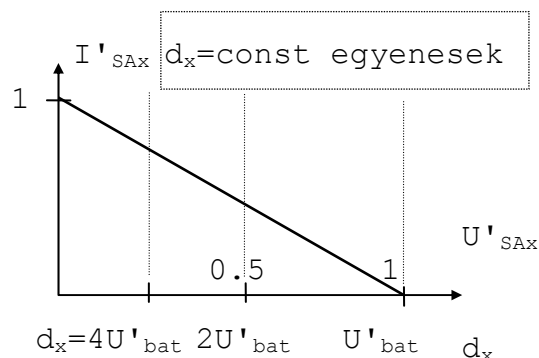
A korlátozott teljesítményű generátor (SA) munkapontja az $I'_{SAX} = 1 - U'_{SAX}$ egyenletű egyenes mentén tetszőlegesen változtatható a d_x kitöltési tényező alkalmas beállításával. Az $I_{SAX} \leftrightarrow d_x$ ill. $U_{SAX} \leftrightarrow d_x$ hozzárendelés egy-egyértelmű és monoton függvényt alkot.

Bizonyítás:

$d_x = U_{ki}/U_{be} = U_{bat}/U_{SAX} = U'_{bat}/1 - I'_{SAX} = \text{const}/1 - I'_{SAX}$. Mivel U_{bat} konstans, d_x és U_{SAX} fordítottan arányos. Továbbá ha U_{SAX} monoton függvény, akkor I_{SAX} is monoton, hiszen a korlátozott teljesítményű generátort úgy választottuk meg.

.....

A $d_x = \text{const}$ pontok halmaza függőleges egyeneseket alkot az $I_{SAX} - U_{SAX}$ síkon (8.2. ábra). Az U_{SAX} tengely a kitöltési tényezővel is paraméterezhető.



8.2. ábra. A kitöltési tényezővel (d_x reális értelmezési tartományán belül) a munkapont tetszőlegesen beállítható

A kitöltési tényezőt befolyásoló vezérléssel széles határok között változó bemeneti impedanciát állíthatunk elő a konverter bemenetén. Kicsit teátrálisabb megfogalmazásban a függőleges d_x egyenes vízszintes eltolásával a korlátozott teljesítményű generátor munkapontja végigpásztázható a kimeneti karakterisztikáján. A vezérlést nevezhetjük d_x eltolásos vezérlésnek is.

2. lemma

Az aktuális karakterisztikán a követő minden esetben MPP-be állítható.

Bizonyítás:

A kitöltési tényező a 8.1. ábra alapján a következő:

$$d_x = d_o + K_I \cdot I_{bat} \quad (8.4)$$

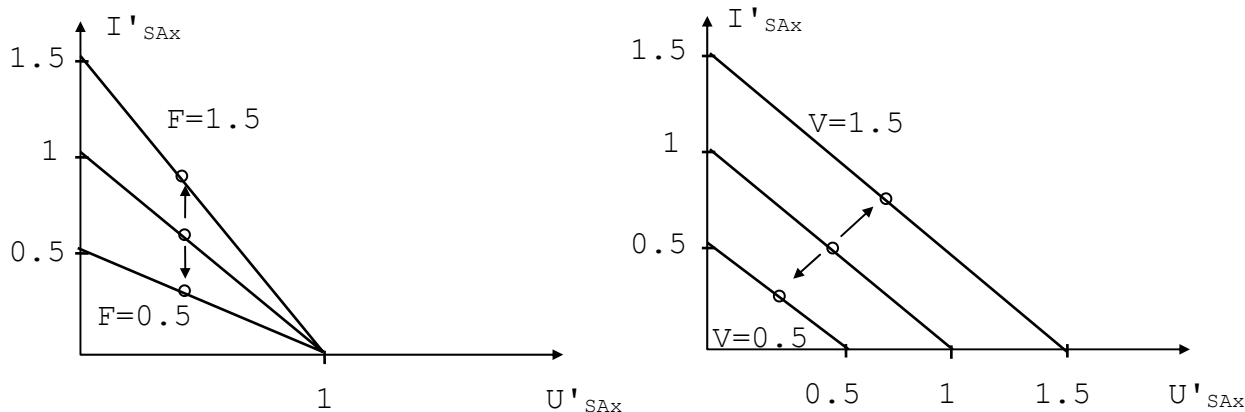
d_o és K_I értékét szabadon megválaszthatjuk. Szerepük a vezérlési stratégia kidolgozásakor válik komolyabbá. Itt azonban akkorára választjuk, hogy az aktuális kitöltési tényező mellett a Buck konverter bemenete MPP-be, azaz a (0.5, 0.5) pontba kerüljön, aminek természetesen az 1. lemma értelmében nincs akadálya.

.....

A modellezés feladata a 7. fejezetben már mérésrel és szimulációval vizsgált Visszatáplált kimeneti áramú MPP Követők működésének optimalizálása, a Követési hatásfokok számítása, növelése. Az analitikailag jól követhető mozgás leírásához szükséges az $I'_{SAX} = 1 - U'_{SAX}$ egyenessel leírt generátorkarakterisztika transzformációja annak érdekében, hogy szimulálható legyen az aktuális karakterisztika ill. a hozzá tartozó MPP eltolódása a környezeti feltételek megváltozása következtében.

Bevezetünk két mennyiséget, melyek a függőleges (F) és "vízszintes" (V) irányú karakterisztika-eltolódás mérőszámai. A mennyiségek értelmezését a 8.3. ábrán találjuk. Megjegyezzük, hogy az F és V mennyiségek által jelölt eltolódásirányok egymásra nem merőlegesek, de bármely karakterisztika és MPP változás leírható egy F és egy V irányú eltolás lineáris kombinációjával.

Ezek után nézzük meg, hogyan használható a modell konkrét feladatban. Adott - egyenes karakterisztikával leírt - napelemet adott környezeti paraméterek mellett MPP-be állítunk a (0.5, 0.5) pontba. Tétélezzük fel, hogy $F = 1.5$ -tel leírható intenzitásváltozás következik be. Hova kerül a rendszer munkapontja, mennyi lesz a követési hatásfok?



8.3. ábra. A függőleges (F) és "vízszintes" (V) eltolások értékei a kiindulási karakterisztikához, mint referenciához képest kerülnek megadásra

A megoldáshoz ismerni kell a napelem adatait, hogy a 8.1. ábra jellemző mennyiségeit is ki tudjuk fejezni normalizált egységben. Legyen $U_{SA0} = 200V$, $I_{SA0} = 1A$, $U_{bat} = 10V$, konkrét feladatban természetesen ismert adatok.

$$U'_{SA0} = U_{SA0}/U_{SA0} = 1 \quad (8.1)$$

$$I'_{SA0} = I_{SA0}/I_{SA0} = 1 \quad (8.2)$$

$$U'_{bat} = U_{bat}/U_{SA0} = 0.05 \quad (8.1)$$

$I'_{bat} = P'_{bat}/U'_{bat}$, de mivel nincs veszteség ($\eta_e=100\%$), ezért

$$I'_{bat} = P'_{MPP}/U'_{bat} = 0.5 \cdot 0.5 / 0.05 = 5 \quad (8.5)$$

A (8.5) kifejezés feltételezi, hogy eltolás nélkül ($F=1$) a rendszer MPP-ben van, ami szükséges a (7.7) definícióhoz.

A 2. lemma szerint d_0 -t válasszuk nullának, ekkor

$$K_I = d_{MPP}/I'_{bat} = U'_{ki}/(U'_{be} \cdot I'_{bat}) = U'_{bat}/(U'_{SAMPP} \cdot I'_{bat}) \quad (8.6)$$

$$K_I = 0.05/(0.5 \cdot 5) = 0.02 \quad d_{MPP} = 0.1$$

Most már teljesen meghatározott a rendszer. Számítsuk ki ezzel a beállítással, hogy a megváltozott karakterisztikán ($F=1.5$) mi lesz a napelem kialakuló $Z(U_{SAZ}; I_{SAZ})$ munkapontja!

1. $d_z = K_I \cdot I'_{bat z}$
2. $U'_{bat} = d_z \cdot U'_{SAZ}$
3. $I'_{bat z} = I'_{SAZ}/d_z$
4. $I'_{SAZ} = F \cdot (1 - U'_{SAZ}) = 1.5 \cdot (1 - U'_{SAZ})$
5. $U'_{SAZ} \cdot I'_{SAZ} = U'_{bat} \cdot I'_{bat z}$

Az 1-4. egyenletek 5-be helyettesítésével és rendezéssel a

$$0 = (U'_{SAz})^3 - (U'_{SAz})^2 + (U'_{bat})^2 / (1.5 * K_I) \quad (8.7)$$

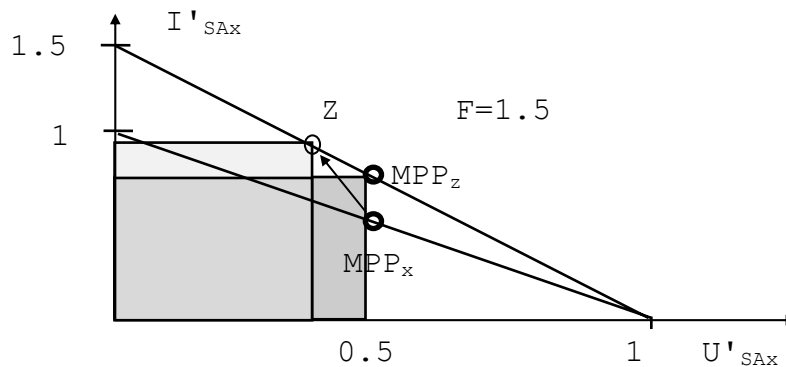
egyismeretlenes egyenletet kapjuk U'_{SAz} -re, amely megoldóképlettel vagy numerikus módszerrel megoldható. Az energetikai (5) egyenletből nyert (8.7) egyenletet a továbbiakban karakterisztikus egyenletnek hívjuk. Az eredmény:

$$U'_{SAz} = 0.3612; \quad I'_{SAz} = 0.9582; \quad P'_{SAz} = 0.3461;$$

Mivel $P'_{MPPz} = 0.5 * 0.75 = 0.375$, ezért

$$\eta_{kö} = P'_{SAz} / P'_{MPPz} = 92.29 \%, \text{ ami nem rossz, de lehetne jobb is.}$$

A példát didaktikai céllal részleteztük, megmutatva azt, hogyan használható konkrét feladat megoldására az apparátus. A 8.4. ábra grafikusán ábrázolja az eredményt.



8.4. ábra. A Követési hatásfok a téglalapok területeinek aránya

A valósághoz sokkal közelebb álló modellt nyerünk, ha a korlátozott teljesítményű generátort nem egyenessel írjuk le, hanem bármilyen explicit függvénnyel, amely "kellően" approximálja az aktuális napelem-karakterisztikát.

- Elsődleges követelmény lehet, hogy az extrém értékeknél a közelítő függvény értéke legyen azonos U_{SA0} , I_{SA0} értékével.
- Követelmény lehet az MPR tényező, a telítési tényező (Fill factor), pontok körül a meredekség azonos/hasonló értéke.
- Előírható a modellezett és a modell karakterisztika abszolút ill. relatív eltérésének maximuma (integrálja, négyzetes integrálja, stb.) a teljes/résztartományra, etc.

A fentiek alapján elkészítettük az approximáló függvények egy családjának, az $I'_{SAx} = (1 - U'_{SAx})^{1/n}$ alakú hatványfüggvények feladatmegoldásra nélkülözhetetlen adatait összefoglaló táblázatot, melyet a 8.5 ábra közöl.

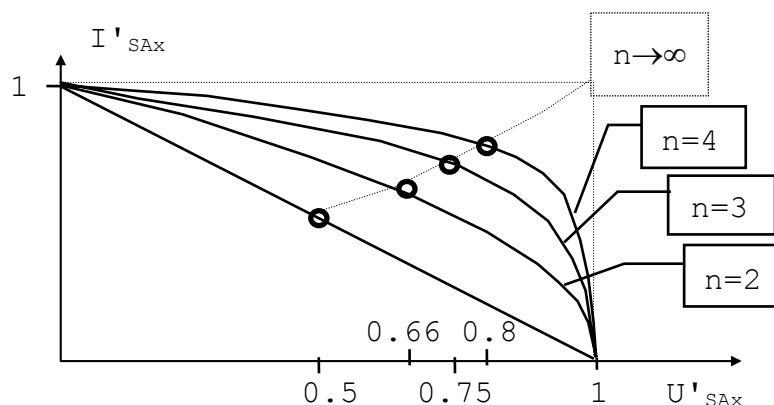
A táblázat csak a $d_x = K_I \cdot I'_{bat}$ vezérlésre adja meg a karakterisztikus egyenletet, ezért első és n. fokú esetre közöljük az általános alakot a $d_x = d_o + K_I \cdot I'_{bat}$ vezérlésre is:

$$0 = (U'_{SAx})^3 - V \cdot (U'_{SAx})^2 + \frac{(U'_{bat})^2}{K_I \cdot F} \cdot \left(1 - \frac{d_o}{U'_{bat}} \cdot U'_{SAx}\right) \quad (8.8)$$

$$0 = (U'_{SAx})^{2n+1} - V \cdot (U'_{SAx})^{2n} + \left(\frac{(U'_{bat})^2}{K_I \cdot F}\right)^n \cdot \left(1 - \frac{d_o}{U'_{bat}} \cdot U'_{SAx}\right)^n \quad (8.9)$$

n	1	2	3	4	n
Karakterisztikus egyenlet	$(U'_{SAx})^3 - V \cdot (U'_{SAx})^2 + \frac{(U'_{bat})^2}{K_I \cdot F} = 0$	$(U'_{SAx})^5 - V \cdot (U'_{SAx})^4 + \left(\frac{(U'_{bat})^2}{K_I \cdot F}\right)^2 = 0$	$(U'_{SAx})^7 - V \cdot (U'_{SAx})^6 + \left(\frac{(U'_{bat})^2}{K_I \cdot F}\right)^3 = 0$	$(U'_{SAx})^9 - V \cdot (U'_{SAx})^8 + \left(\frac{(U'_{bat})^2}{K_I \cdot F}\right)^4 = 0$	$(U'_{SAx})^{2n+1} - V \cdot (U'_{SAx})^{2n} + \left(\frac{(U'_{bat})^2}{K_I \cdot F}\right)^n = 0$
U' SAx_{MPP}	1/2	2/3	3/4	4/5	n/(n+1)
I' SAx_{MPP}	1/2	0.577	0.63	0.66874	$[1/(n+1)]^{1/n}$
P' SAx_{MPP}	0.25	0.3849	0.4725	0.535	$n/(n+1) \cdot [1/(n+1)]^{1/n}$
d_{MPP}	0.1	0.075	0.06667	0.0625	$\lim_{n \rightarrow \infty} \Rightarrow 0.05$
K_I (MPP, F=1, V=1)	0.02	9.749E-3	7.0547E-3	5.8412E-3	$\lim_{n \rightarrow \infty} \Rightarrow 2.5E-3$
I' bat (U' bat=0.05)	5	7.698	9.45	10.7	$\lim_{n \rightarrow \infty} \Rightarrow 30$

8.5. ábra. Az $I'_{SAx} = (1 - U'_{SAx})^{1/n}$ alakú hatványfüggvények összefoglaló táblázata



8.6. ábra. A hatványkarakterisztikák n=1-től n=4-ig

$n \rightarrow \infty$ esetén $U'_{SAxMPP} \Rightarrow 1$, $I'_{SAxMPP} \Rightarrow 1$, tehát $P'_{SAxMPP} \Rightarrow 1$ és a telítési tényező is tart 1-hez. n növelésével az MPP-k az $U'_{SAx} = I'_{SAx}$ egyenestől jobbra helyezkednek el és az origótól nézve enyhén balra kanyarodnak (8.6. ábra).

Példa a hatványkarakterisztika kiválasztására:

A 7. fejezet mérésében felhasznált napelem-szimulátor karakterisztikák MPR tényezője:

$U_{SA0} = 20V$	$U_{SA} = 22V$	$U_{SA} = 24V$
$\frac{16.3V + 15.8V + 15.35V}{3 \cdot 20V} = 0.79083$	$\frac{18.1V + 17.7V + 17.25V}{66V} = 0.80379$	$\frac{20V + 19.7V + 19.25V}{72V} = 0.81875$

$$\frac{0.79083 + 0.80379 + 0.81875}{3} = 0.8045,$$

vagyis első közelítésben a lineáris átlagolás eredményeképpen a szimulátor MPR tényezője 0.8045. A 4. fokú karakterisztika (MPR=0.8) a maximális teljesítményű pont körül jól közelíti a szimulátor kimeneti karakterisztikáját. Felhívjuk azonban a figyelmet arra, hogy ez a karakterisztika közelítés nem állja meg a helyét például azoknál a követőknel, amelyek a MPP körüli meredekség detektálásával operálnak.

A modell tulajdonságai

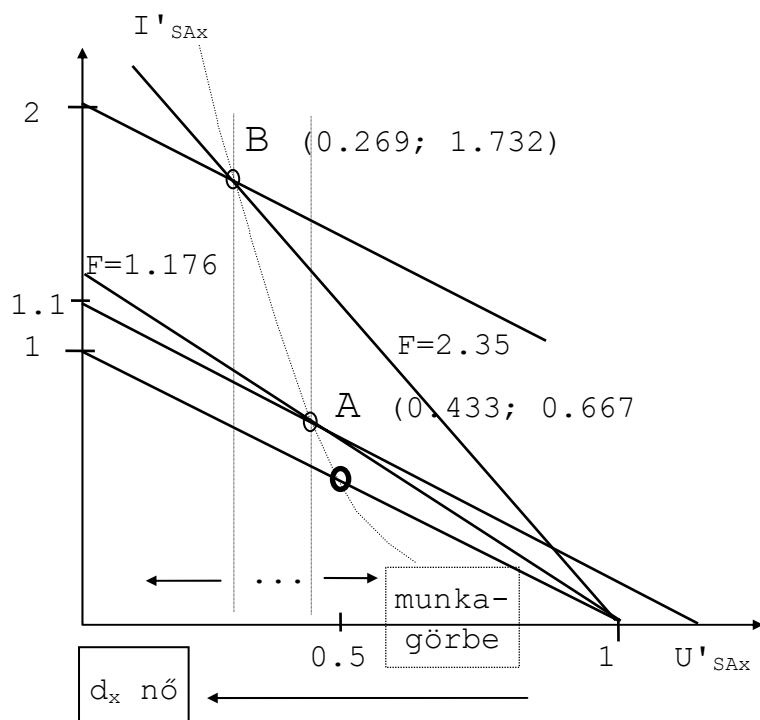
Rövid számolgatással igazolhatók a matematikai modell itt felsorolt jellemzői.

- F és V eltolásokkal kapott karakterisztikák jellemzői (MPR, telítési tényezők, meredekségek) nem változnak, a karakterisztikák alaktartóak.
- A 8.1. ábra szerinti modellben adott kitöltési tényező meghatározza a konverter bemeneti impedanciáját. Adott struktúra (vezérlés) mindig ugyanazon munkagörbén (statikus munkapontok által alkotott vonalon) halad végig d_x kitöltési tényező teljes tartományon való végigsöprésekor.
- Tapasztaltuk, hogy az intenzitás növekedésével (F növekedésével) az előző pontban leírt munkagörbe enyhén jobbra kanyarodik.

A második állításhoz kapcsolódik a 8.7. magyarázó ábra. Az MPPT konverter vezérlése abból áll, hogy a kimeneti árammal arányos (és/vagy esetleg más paraméter lineáris kombinációjaként előállított) kitöltési tényezőt kényszerít a kapcsolóelemre. A

kitöltési tényező az egyetlen paraméter, ami a vezérlés által változik, tehát d_x a vezérlési paraméter. Mivel a kimeneti feszültség a modell struktúrájában rögzített, ezért U_{SAx} és d_x egymáshoz kötött paraméterek, ahogy arra korábban már utaltunk.

A 8.7. ábrán a munkagörbe kiszerkesztése történhet úgy, hogy a karakterisztika-változás miatt bekövetkező kitöltési tényező változás függőleges egyenesként elmozdul az U'_{SAx} ill. a d_x tengely mentén és az aktuális napelem-karakteristikából kimetszi a kialakuló munkapontot. A munkagörbe egy adott vezérlési szabálynál (8.4) fix.



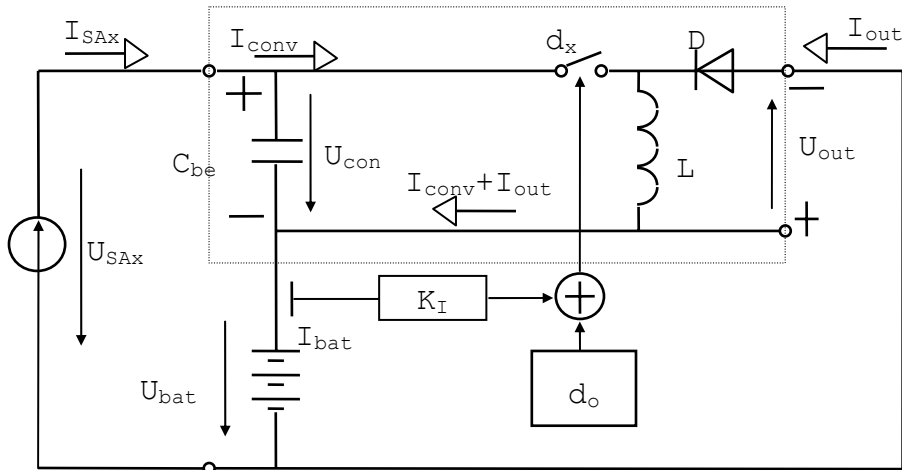
8.7. ábra. A statikus munkapontok által leírt munkagörbe az A pontban ugyanott fut, ha az eltolás $V=1.1$ ill. $F=1.176$, valamint a B pontban, ha az eltolás $V=2$ ill. $F=2.35$

A 8.7 ábra megmutatja, hogy a konverter bemeneti impedanciája a napelem statikus U_{SAx} - I_{SAx} paramétereinek hányadosa és az értéke csak a kitöltési tényezőtől függ.

Az eddigiek ismeretében megállapíthatjuk, hogy rendelkezünk egy olyan matematikai apparátussal, amellyel képesek vagyunk megvalósított, Buck konverterrel felépített Visszatáplált kimeneti áramú MPP Követő működését elemezni. A modellt két lényeges irányba szükséges továbbfejleszteni: Egyrészt célszerű lenne a vezérlési stratégia analízist átültetni más konverterekre, másrészt a követés minőségének javítására kell módszert kidolgozni.

Növelt hatásfokú PPCT struktúra modellje

A 8.8. ábrán a Polaritásváltó konverterrel felépített párhuzamos energiakezelő MPPT látható. A Buck konverteres modellnél ismertetett feltételek természetesen a modellre általánosan érvényesek ($\eta_{\text{conv}} = 100\%$, nyitófeszültség $U_{D_0}=0$, reaktáns elemek méretezése, mennyiségek értelmezése).



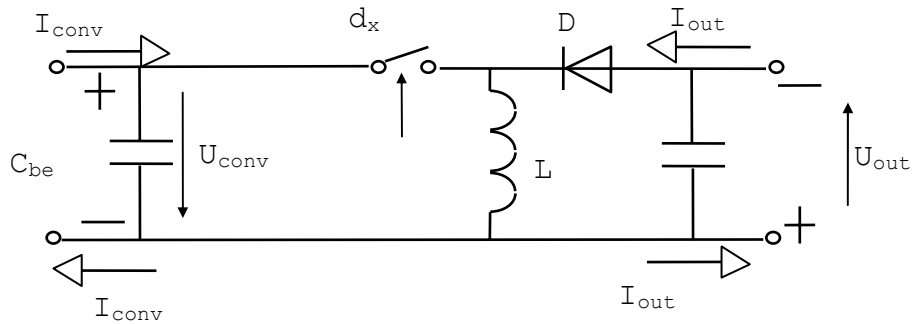
8.8. ábra. Polaritásváltó konverterrel felépített PPCT MPPT

A feladat: Határozzuk meg a struktúra karakterisztikus egyenletét! A generátor egyenlete normalizálás után legyen $I'_{SAx} = F \cdot (V - U'_{SAx})$, $d_0=0$. Írjuk fel a struktúrát leíró egyenleteket elsőfokú hatványkarakterisztikával!

1. $d_x = K_I \cdot I'_{bat}$
2. $U'_{bat} = U'_{out}$
3. $I'_{bat} = I'_{conv} + I'_{out}$
4. $I'_{SAx} = F \cdot (V - U'_{SAx})$
5. $U'_{SAx} \cdot I'_{SAx} = U'_{bat} \cdot I'_{bat}$

A Buck konverteres megoldástól az egyenletrendszer 2. és 3. egyenlete tér el annyiban, hogy U'_{bat} és I'_{bat} értékei nem a napelem-jellemzőkkel és a vezérlési paraméterrel vannak kifejezve. Ez a struktúra különbözőségéből fakad, a feladat minden új konverter esetén az $U'_{bat} = f(U'_{SAx}, d_x)$, ill. az $I'_{bat} = f(I'_{SAx}, d_x)$ egyenletek meghatározása, miután a karakterisztikus

egyenlet belőlük előállítható. Vizsgáljuk meg a Polaritásváltó konverterrel felépített PPC struktúrát!



8.9. ábra. Polaritásváltó (Buck-Boost) konverter és jellemző mennyiségei

A 8.8. és 8.9. ábrák alapján az alábbi egyenlőségeket ismerhetjük fel:

$$I'_{SAx} = I'_{conv} \quad (8.10)$$

$$U'_{SAx} = U'_{conv} + U'_{out} \quad (8.11)$$

A Polaritásváltó konverter működési egyenletei:

$$d_x \cdot U'_{conv} = (1 - d_x) \cdot U'_{out} \quad (8.12)$$

$$I'_{conv} = d_x \cdot I_L \quad (8.13)$$

$$I'_{out} = (1 - d_x) \cdot I_L \quad (8.14)$$

Felhasználva (8.10)-(8.14) egyenleteket, az egyenletrendszer 2. egyenletének továbbalakításával a

$$U'_{bat} = U'_{out} = U'_{SAx} - U'_{conv} = U'_{SAx} - (1 - d_x) \cdot U'_{out} / d_x \quad (8.15)$$

kifejezés adódik, amiből U'_{SAx} kifejezhető:

$$U'_{SAx} = U'_{bat} \cdot (1 + (1 - d_x) / d_x) = U'_{bat} / d_x \quad (8.16)$$

A 3. egyenlet rendezésével

$$\begin{aligned} I'_{bat} &= I'_{conv} + I'_{out} = I'_{conv} + (1 - d_x) \cdot I'_{conv} / d_x = \\ &= I'_{SAx} \cdot (1 + (1 - d_x) / d_x) = I'_{SAx} / d_x \end{aligned} \quad (8.17)$$

A Buck-Boost konverter 1.-5. egyenletei tehát formailag azonosak a Buck konverter egyenleteivel:

1. $d_x = K_I \cdot I'_{bat}$
2. $U'_{bat} = d_x \cdot U'_{SAz}$
3. $I'_{bat} = I'_{SAx} / d_x$
4. $I'_{SAx} = F \cdot (V - U'_{SAz})$
5. $U'_{SAx} \cdot I'_{SAx} = U'_{bat} \cdot I'_{bat}$

Az 1-4. egyenletek 5-be helyettesítésével, valamint rendezéssel a

$$0 = (U'_{SAx})^3 - V \cdot (U'_{SAx})^2 + (U'_{bat})^2 / (K_I \cdot F) \quad (8.18)$$

karakterisztikus egyenlethez jutunk, amely tartalmilag és formailag tökéletesen azonos a Buck konverter (8.7)-(8.9) karakterisztikus egyenletéhez! Az n-dik hatványra, valamint $d_o \neq 0$ általános esetre pedig a

$$0 = (U'_{SAx})^{2n+1} - V \cdot (U'_{SAx})^{2n} + \left(\frac{(U'_{bat})^2}{K_I \cdot F} \right)^n \cdot \left(1 - \frac{d_o}{U'_{bat}} \cdot U'_{SAx} \right)^n \quad (8.19)$$

általános karakterisztikus egyenlet (amely azonos a (8.9)-cel), valamint a 8.5. ábra táblázata használható.

Az előzőekben ismertetett módon meghatározható bármelyik alapkonverterre a karakterisztikus egyenlet. Mivel a Čuk konverter is polaritásváltó, valamint a bemeneti és kimeneti paraméterek, valamint a kitöltési tényező kapcsolata azonos, ezért a bemutatotthoz teljesen ekvivalens módon használható a Čuk konverter PPC struktúrához. A karakterisztikus egyenlet a konverter működési egyenleteinek azonossága miatt azonos (8.9)-cel.

A korábban tett megállapítások tehát érvényesek a párhuzamos energiakezelést alkalmazó Polaritásváltó (ill. a Čuk) konverteres MPP Követőre is. Adott konkrét vezérlési szabály esetén az $I_{SAx} \leftrightarrow d_x$ ill. $U_{SAx} \leftrightarrow d_x$ hozzárendelés egy-egyértelmű és monoton függvényt alkot. A d_x eltolásos vezérlés megvalósul. Az aktuális karakterisztikán a követő minden esetben MPP-be állítható.

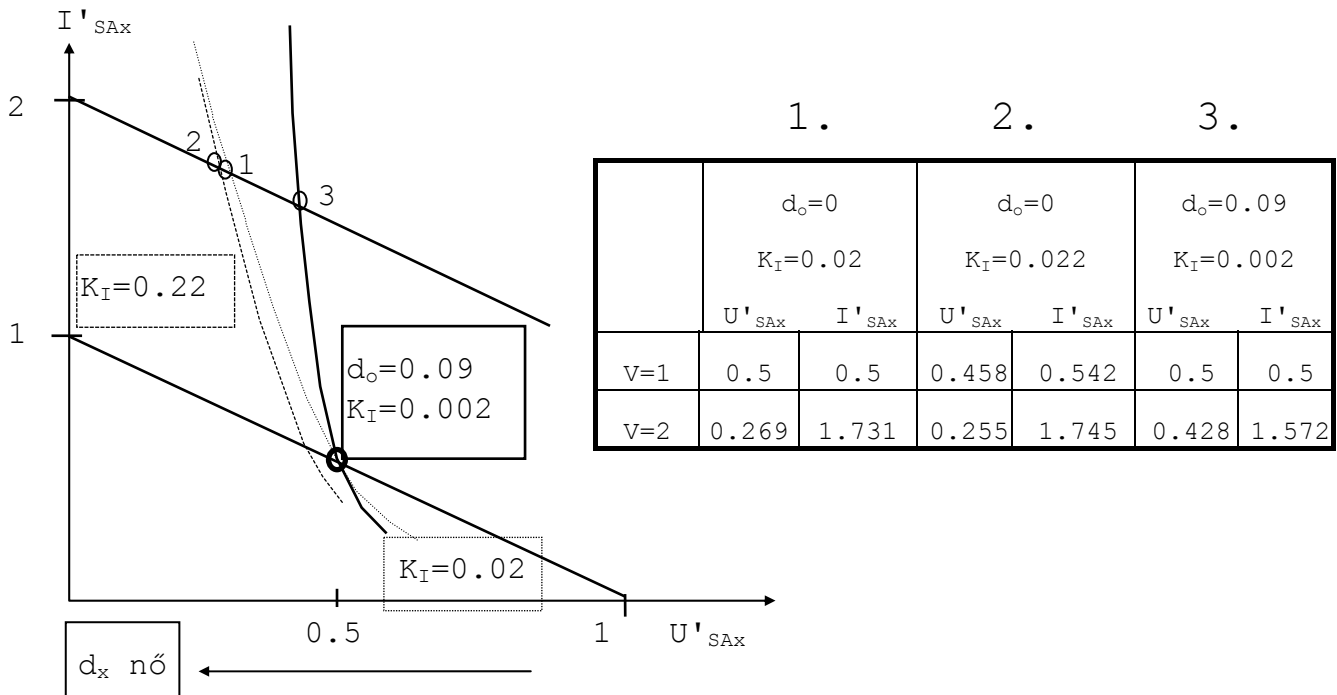
A 8.10. ábra táblázata összefoglalja a vizsgált konverterek be- és kimeneti adatait.

Konverter	Buck MPPT		PPCT MPPT Buck-Boost	
	I_{conv}	$d_x \cdot I_{bat}$	I_{conv}	$d_x \cdot I_{bat}$
$I_{SAx} =$	I_{conv}	$d_x \cdot I_{bat}$	I_{conv}	$d_x \cdot I_{bat}$
$U_{SAx} =$	U_{conv}	U_{bat} / d_x	$U_{conv} + U_{out}$	U_{bat} / d_x
$I_{bat} =$	I_{out}	I_{SAx} / d_x	$I_{conv} + I_{out}$	I_{SAx} / d_x
$U_{bat} =$	U_{out}	$d_x \cdot U_{SAx}$	U_{out}	$d_x \cdot U_{SAx}$

8.10. ábra. A vizsgált konverterek be- és kimeneti adatai

A modell megismerése után a további feladat: a Követési határfok növelése. Mi a rendszer korlátja, mi a követési optimum?

Megfigyeltük, hogy a $d_x = K_I \cdot I'_{bat}$ vezérlés alkalmazása során K_I változtatása változásokat okoz a munkagörbe elhelyezkedésében (8.11. ábra).

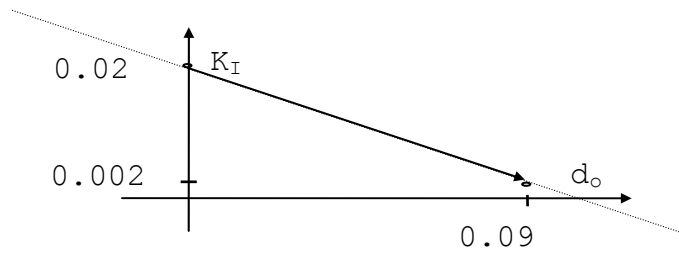


8.11. ábra. K_I értéke és a munkagörbe "függőlegessége" között összefüggés van

Ha K_I -t növeljük, akkor megnő a kitöltési tényező. Egy adott munkaponti beállítás (például az $F=1$, $V=1$ egyenes MPP-je, 0.5, 0.5 pont) megőrzéséhez, valamint eközben a K_I értéke /"meredekség"/ változtatásához az szükséges, hogy d_o mindig K_I után legyen "hangolva". Az áramkör szempontjából ez azt jelenti, hogy rögzítjük a $d_{(0.5, 0.5)}$ kitöltési tényezőt.

$$d_{(0.5, 0.5)} = d_o + K_I \cdot I'_{bat} = \text{const} \quad (8.20)$$

A módszer bemutatását végigkísérő példánkban a (0.5, 0.5) pontban a kitöltési tényező 0.1 értékű. A 8.12. ábra bemutatja azokat az összetertozó d_o - K_I párokat, amelyek mellett az $F=1$, $V=1$, $n=1$ egyenesen előáll a (0.5, 0.5) MPP.



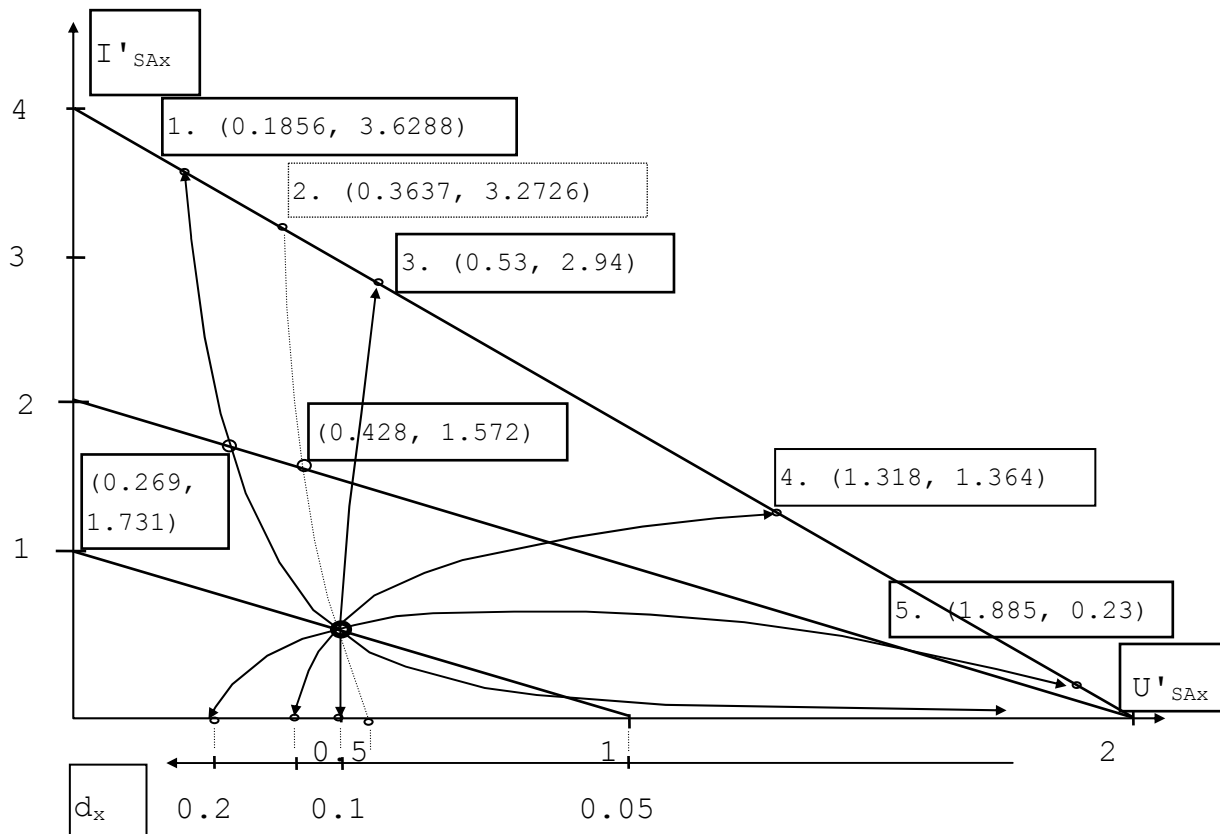
8.12. ábra

Terjesszük ki 8.12. ábrát az I.-IV. síknegyedre, azaz engedélyezzük K_I negatív értékét is! A következő példában bemutatjuk azt is, hogyan használható 2 koordináta-paraméter egyidejű eltolásával a modell, valamint több vezérlési szabályhoz tartozó, annak megfelelően kialakuló munkagörbét is ábrázolunk ($F=2$ $V=2$, $U'_{bat}=0.05$, $d_{MPP}=0.1$).

1./	$0 = (U'_{SAX})^3 - 2 \cdot (U'_{SAX})^2 + 12.625 \cdot U'_{SAX} - 6.25$
$d_x = d_o + K_I \cdot I'_{bat} = 0 + 0.02 \cdot I'_{bat}$	Megoldás: $U'_{SAX} = 0.53$, $I'_{SAX} = 2.94$
$0 = (U'_{SAX})^3 - 2 \cdot (U'_{SAX})^2 + 0.0625$	4./
Megoldás: $U'_{SAX} = 0.1856$, $I'_{SAX} = 3.6288$	$d_x = d_o + K_I \cdot I'_{bat} = 0.11 - 0.002 \cdot I'_{bat}$
2./	$0 = (U'_{SAX})^3 - 2 \cdot (U'_{SAX})^2 + 1.375 \cdot U'_{SAX} - 0.625$
$d_x = d_o + K_I \cdot I'_{bat} = 0.09 + 0.002 \cdot I'_{bat}$	Megoldás: $U'_{SAX} = 1.318$, $I'_{SAX} = 1.364$
$0 = (U'_{SAX})^3 - 2 \cdot (U'_{SAX})^2 - 1.125 \cdot U'_{SAX} + 0.625$	5./
Megoldás: $U'_{SAX} = 0.3637$, $I'_{SAX} = 3.2726$	$d_x = d_o + K_I \cdot I'_{bat} = 0.2 - 0.02 \cdot I'_{bat}$
3./	$0 = (U'_{SAX})^3 - 2 \cdot (U'_{SAX})^2 + 0.25 \cdot U'_{SAX} - 0.0625$
$d_x = d_o + K_I \cdot I'_{bat} = 0.101 - 0.0002 \cdot I'_{bat}$	Megoldás: $U'_{SAX} = 1.885$, $I'_{SAX} = 0.23$

A 8. 13. ábra az $U'_{SAX} - I'_{SAX}$ koordinátarendszerben, grafikusán mutatja be az eredményeket.

Az eredmények azt a sejtést igazolják, hogy d_o és K_I értékének alkalmas beállításával bármilyen irányú munkapont-eltolás realizálható. Az eredményt általános esetre tételként fogalmazzuk meg.



8.13. ábra. Különböző vezérlésekhez tartozó munkagörbék.

Tétel:

- Visszatáplált kimeneti árammal vezérelt konverter a kitöltési tényező változása következtében megváltoztatja a bemeneti impedanciáját. A fenti típusú, rögzített vezérlésű ($d_x = d_o + K_I \cdot I'_{bat}$) konvertert, mint terhelést egy (F, V paraméterek szerint pásztázó) változtatható korlátozott teljesítményű generátorra kapcsolva a generátor kimeneti feszültsége és árama (munkapontja) meghatározott görbét (munkagörbét) ír le az koordináta-rendszerben (az előző példa szerint). A munkagörbe menetét csak a vezérlési szabály határozza meg.
- Adott kezdeti munkaponthoz képest (amely célszerűen lehet az MPP) a létrehozott munkagörbék az $U_{SA} - I_{SA}$ sík bármely pontját képesek elérni. A $d_x = d_o + K_I \cdot I'_{bat}$ vezérlés K_I paraméterének nagyságával az eltolás meredeksége, előjelével pedig az elérhető irányok választhatók meg.

Bizonyítás:

Tény, hogy a munkapont helye megváltozik a d_x kitöltési tényező F vagy V eltolás miatt bekövetkező változásakor. A konverter

bemeneti impedanciája megegyezik a korlátozott teljesítményű generátor kimeneti munkapont koordinátapontjainak a hányadosával.

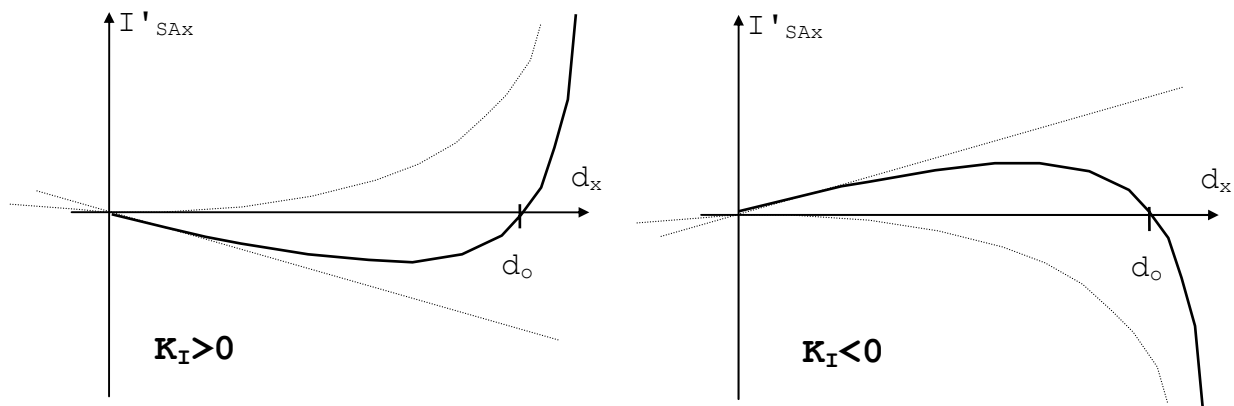
$$R_{be_{conv}} = U_{be_{conv}} / I_{be_{conv}} = U'_{SAx} / I'_{SAx} = ctg\alpha, \quad (8.21)$$

ahol $\alpha \in R(0, \Pi/2)$ az origóból a munkapontba húzott félegyenes irányszöge.

A létező $d_x \leftrightarrow U'_{SAx}$ (egyenletrendszer 2.) függvény, és a létező $d_x \leftrightarrow I'_{SAx}$ (8.22) függvény miatt az F és V eltolások hatására a kialakuló munkapontok (U'_{SAx}, I'_{SAx}) mindig ugyanazon koordinátapontokon haladnak. Más szóval: rögzített vezérlés esetén a munkagörbe fix.

Megállapítható, hogy bármelyik munkagörbe ábrázolható $U'_{SAx} - I'_{SAx}$ koordináta-rendszer helyett $d_x - I'_{SAx}$ rendszerben. (A 8.13. ábrán már feltüntettünk néhány U'_{SAx} -nek megfelelő d_x értéket.) A 8.14. ábra K_I pozitív és negatív értékeire mutatja a $d_x - I'_{SAx}$ függvény menetét, jellegzetes pontjait. A görbék egyenlete:

$$I'_{SAx} = d_x \cdot I'_{bat} = d_x^2 / K_I - d_o \cdot d_x / K_I \quad (K_I \neq 0) \quad (8.22)$$



8.14. ábra. A görbéknek csak a pozitív I'_{SAx} tartománya értelmes a gyakorlatban

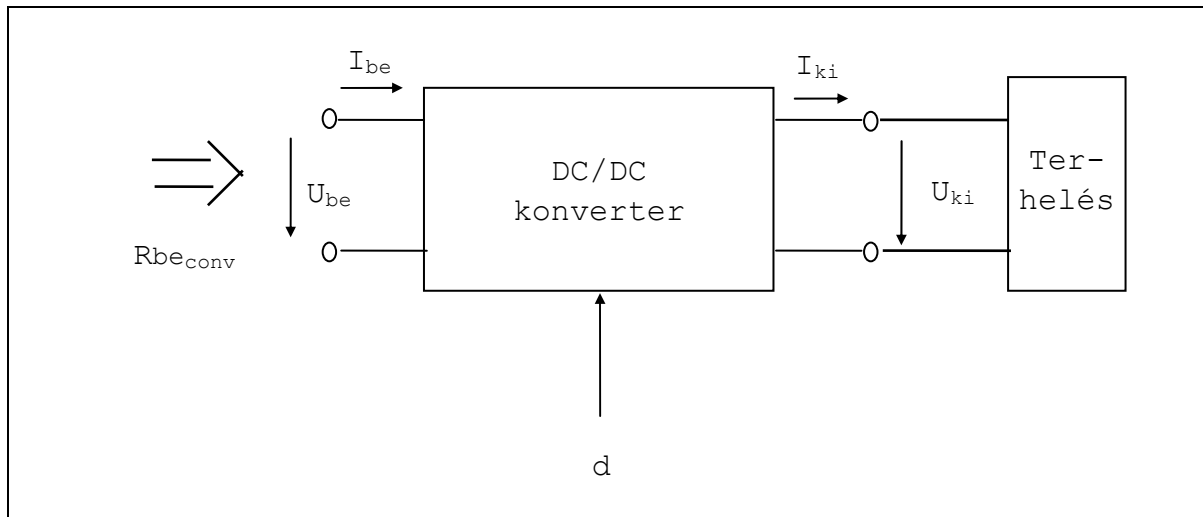
$K_I > 0$ esetén (8.13. ábra 1. és 2. munkagörbe) a karakterisztika d_o -tól magasabb értékeit használjuk, ezért a kialakuló I'_{SAx} áram négyzetes jelleggel emelkedik. A 8.13. ábra 1. és 2. görbéje I'_{SAx} emelkedésével enyhén jobbra kanyarodik. Ugyanez a 8.14. ábrában kis balkanyarban nyilvánul meg, ami d_x és U'_{SAx} fordított arányossága miatt azonos jelleget mutat. $K_I < 0$ esetén (8.13. ábra 3. 4. 5. munkagörbe) a karakterisztika d_o -tól alacsonyabb értékeit használjuk. Itt a nullához közeli tartományban inkább lineáris jellegű, d_o -hoz közel inkább négyzetes a napelem-áram kitöltési tényező függése.

A 8.13. és a 8.14. ábrák konkrét esetben egymásba átszerkeszthetők, ekvivalensek. A 8.11. ábra alapján a munkagörbe irányára, meredekségére tett megállapításokat a 8.13. ábra igazolja.

d_0 paraméter felhasználható kezdeti MPP-be állításra, vagy értékének változtatásával kompenzálásra (pld. d_0 -t hőfokfüggővé téve a munkagörbe kiléphet statikus nyomvonalából, stb.). A 8.13. és a 8.14. ábrák munkagörbéi $I'_{sAx}=0$ -nál d_0 -ból indulnak.

9. ÖSSZEFOGLALÁS. KOMPENZÁLT PSZEUDO MPP KÖVETŐ

A tétel következménye, hogy adott beállítás (d_o , K_I) és adott generátor esetén d_x -hez meghatározott értékű $R_{be_{conv}}$ tartozik. Vizsgáljuk meg, hogy kényszerített, nem visszacsatolással nyert kitöltési tényezővel vezérelve a konvertert adott kimeneti terhelés esetén hogyan alakul a 9.1. ábrán látható elrendezésben a konverter bemeneti impedanciája ($R_{be_{conv}}$)!



9.1. ábra. A DC/DC konverter, mint impedancia transzformátor

Feltételezzük, hogy a munkaponti adatok 1 kapcsolási perióduson belül állandóak.

Minden konverterre felírható a be- és kimeneti jellemzők kapcsolata:

$$U_{ki} = f(U_{be}) \quad \text{ill.} \quad (9.1)$$

$$I_{ki} = g(I_{be}) \quad (9.2)$$

Minden esetben előállítható az

$$R_{be_{conv}} = U_{be} / I_{be} = f^{-1}(U_{ki}) / g^{-1}(I_{ki}) = N^{-2} \cdot U_{ki} / I_{ki} \quad (9.3)$$

bemeneti impedancia. Az N megfelel a DC/DC konverter, mint impedancia transzformátor áttételének. A 8.1. és a 8.8. ábrákon ismertetett struktúrák esetén a (9.1.) és (9.2) egyenletek

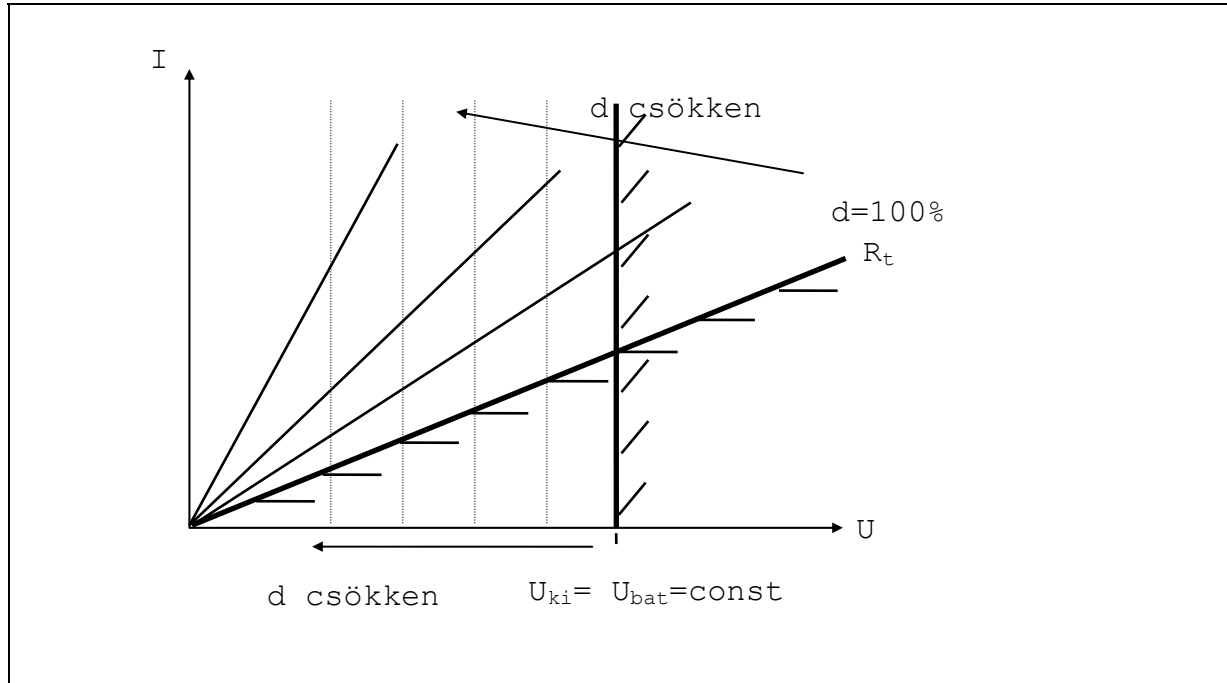
$$U_{be} = U_{ki} / d \quad \text{ill.} \quad (8.16, \text{ egyenletrendszer } 2.)$$

$$I_{be} = I_{ki} \cdot d \quad (8.17, \text{ egyenletrendszer } 2.)$$

vagyis

$$R_{be_{conv}} = U_{be} / I_{be} = U_{ki} / (I_{ki} \cdot d^2) \quad (9.4)$$

Tehát az általunk vizsgált konverterek megfelelnek egy d áttételű impedancia transzformátornak akkumulátor terheléssel, melyeknek jellemzője, hogy az áttétel folyamatosan, széles határok között állítható. A 9.2. ábra bemutatja a transzformátor által elviekben elérhető tartományt az U-I síkon.



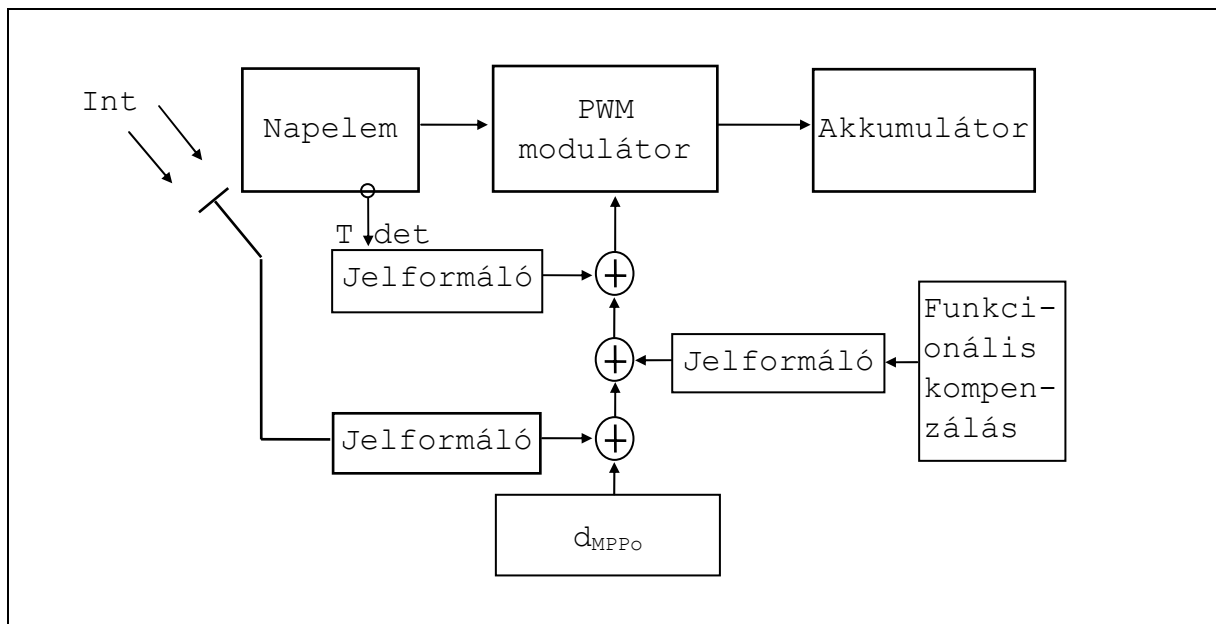
9.2. ábra. Az DC/DC konverter kitöltési tényezőjének változtatásával elvileg beállítható bemeneti impedanciái ohmos terhelés és akkumulátor esetén

A DC/DC konverterrel megvalósított akkumulátortöltők esetén ha feltételezzük továbbá azt is, hogy az akkumulátorok hosszú idejű töltés esetén sem változtatják meg jelentősen a feszültségüket, valamint kellően alacsony és időben állandó belső ellenállással rendelkeznek, akkor kijelenthetjük, hogy a feszültség-áram síkon rendelkezünk egy kvázi függőleges egyenessel, amely d vezérlésével eltolható a sík $U_{bat} = \text{const}$ és az áramtengely közötti tartományán (d eltolásos vezérlés). Fizikailag ez azt jelenti, hogy a konverter bemenete helyettesíthető egy U_{bat}/d feszültségértékű akkumulátorral.

Áramgenerátor, vagy korlátozott teljesítményű generátor munkapontja a fenti "virtuális akkumulátorral" a kitöltési tényező alkalmas megválasztásával a fent bekorlátozott tartományon belül tetszőlegesen beállítható.

A fentiek ismeretében összeállítunk egy új típusú, véleményünk szerint eddig még sehol nem publikált NMPS MPPT megoldás, amely

egyszerűségében vetekedhet minden korábbi megoldással (9.3. ábra).



9.3. ábra. Kompenzált Pszeudo-MPP Követő elvi sémája

Az alapötlet az, hogy valamilyen megfontolás alapján állítsuk a követő munkapontját alap helyzetben a követési tartomány közepére (d_{MPP_0}). Hasonlóan a 3.8. ábrához, a Maximális Teljesítményű Pont koordinátái részére is rendelkezésre állnak (mérhetőek, számíthatóak) a hőmérsékleti tényezők (TK_{MPP} , TKI_{MPP}). Ugyancsak meghatározhatók az intenzitásváltozás okozta "intenzitásváltozási koefficiensek" (IK_{MPP} , IKI_{MPP}). A hőmérséklet- és intenzitásváltozás okozta feszültség-eltolódások:

$$\Delta U_{MPP_T} = TK_{MPP} \cdot \Delta T = \Delta d_T \cdot U_{MPP_0} \quad (9.5)$$

$$\Delta U_{MPP_I} = IK_{MPP} \cdot \Delta I = \Delta d_I \cdot U_{MPP_0} \quad (9.6)$$

A Δd_T és Δd_I értékét a Jelformálók akkorára állítják be, hogy az MPP mozgásával azonos mértékben mozdítsa el a d eltolásos vezérlés a "virtuális akkumulátor" karakterisztikáját. A Funkcionális kompenzálással a bármilyen másodlagos effektus által okozott anomália hatásának kompenzálását meg lehet oldani.

Összefoglalás

A dolgozatban napelemes kapcsolóüzemű tápellátó rendszerek Maximális Teljesítményű Pontjának Követésével foglalkoztunk. Egy felmerült konkrét problémát, az ún. Visszatáplált kimenettel vezérelt MPPT áramkörök viselkedését egy új matematikai modellel leírtuk, melynek ismeretében adott feladatra, konkrét rendszer tervezhető, felépíthető.

A megszerzett ismeretek birtokában egy véleményünk szerint még sehol nem publikált Nem-valódi Maximális Teljesítményű Pont Kereső eljárást, az ún. Kompenzált Pszeudo-MPP Követőt hoztuk létre. Egy adott napelemről begyűjthető információk mennyiségétől függően a kompenzáció pontosságának mélysége elviekben a végtelenségig fokozható. A gyakorlat mondja majd meg a rendszer bonyolultságának optimumát.

Előforduló kifejezések, rövidítések

- Akkumulátor élettartam-optimalizálás (Battery Lifetime-Optimization)
- Akkumulátor töltés/kisütés szabályozó (Battery Charge / Discharge Regulator, BCR/BDR)
- Alacsonypályás /műhold/ (Low Earth Orbit /Satellite/, LEO)
- Áram (arányossági) előrecsatolási tényező, K_I
- Besugárzási intenzitás (Insolation, illumination, radiation, intensity)
- DC-DC konverterek /Közel/ optimális vezérlése (/Near/ Optimum Control of DC-DC Converters)
- Elsődleges energiaellátó rendszer (Primary Power System)
- /Elsődleges/ Energiaforrás (/Primary/ Energy Source)
- /Elsődleges/ Energiaszabályozó egység (/Primary/ Power Control Unit, PCU)
- Energiaelosztó és Védelem egység (Power Protection and Distribution Unit, PPDU)
- Fotelektromos effektus/technológia (Photovoltaic [PV] effect/technology)
- Geostacionárius pálya (Geostationary Orbit, GEO)
- Háromszög koncepció (Triangular Concept)
- Hasznos teher (Payload)
- Kétirányú konverter (Bidirectional Converter)
- Kollektív hatásfok (Collection Efficiency, $\eta_{(\lambda)}$, $\eta_{(F)}$) -> fényelektromos hatásfok (Photovoltaic Efficiency)
- Kompenzált Pszeudo-MPP Követő (Compensated Pseudo-MPPT, CPs-MPPT)
- Követési hatásfok, $\eta_{k\ddot{o}}$ (Tracking efficiency, η_{tr})
- Légtömeg (Air Mass, AM_x)
- Másodlagos energiaellátó rendszer (Secondary Power System)
- Maximális Teljesítmény Hányados (Maximum Power Ratio, MPR)
Maximális Teljesítményű Ponthoz tartozó feszültség-hányados
- Maximális Teljesítményű Pont Követés (Maximum Power Point Tracking, MPPT)

- Napelem(-tömb,-cella), szolár panel (solar array, SA, solar cell)
- Napelem-felület minimalizálás (Solar Array Surface Optimization)
- Napfény-szabályozott /vagy félig szabályozott/ energiabusz (Sun-regulated/or Half-regulated/ bus)
- Nyújtott elliptikus pálya (Highly Elliptical Orbit, HEO)
- Párhuzamos Teljesítmény/Energia/átalakító Struktúra (Parallel Power Conversion Structure, PPCS)
- Párhuzamos Teljesítmény/Energia/átalakító Technika (Parallel Power Conversion Technique, PPCT)
- Rövidzárási áram (Short-circuit current, I_{SAO})
- Szabályozatlan energiabusz (Unregulated bus)
- Szabályozott energiabusz (Regulated bus)
- Szekvenciális söntszabályozó (Sequential Switched Shunt Regulator, S^3R , S3R)
- Távoli bolygó kutatás (Deep-Space Mission)
- Távoli területek egyedi telepítésű energiaellátó rendszerei (Remote Area Power Supply, RAPS systems)
- Telítési vagy kitöltési tényező (Fill Factor)
- Üresjárási kimeneti feszültség (Open-circuit voltage, U_{SAO})
- Űrminősítésű alkatrészek és technológiák (Space Qualified Components and Technology)
- Valódi/Nem-valódi Maximális Pont Kereső (True/Non-true Maximum Point Seeking, TMPS/NMPS)
- Valódi/Nem-valódi Maximális Teljesítményű Pont Követő (True/Non-true Maximum Power Point Tracking, True/Non-true MPPT, TMPP/NMPP)
- Visszatáplált kimenettel vezérelt MPP Követők (MPPT Methods with Feedforward of the Output /Current/, Feed-forward /MPPT/control/ler/).

Irodalomjegyzék

- [1] Solar Energy Research Institute: Basic Photovoltaic Principles and Methods, Van Nostrand Reinhold Company Inc. 1984.
- [2] Sabina Mühlenkamp: Szolárkémia - Van új a Nap alatt (Translation from a German scientific magazine), in Hungarian, Műszaki Magazin, 5/1995.
- [3] Elektronikus szerkezetek konstrukciója és gyártása, Műszaki Könyvkiadó, 19xx.
- [4] Solar-Tech Hungary Holland Ltd. Product Catalogue, 1990.
- [5] Szilák Zsolt: Diplomaterv, BME Mikrohullámú Híradástechnika Tanszék, 1995.
- [6] Szegedi Péter: Diplomaterv, BME Mikrohullámú Híradástechnika Tanszék, 1995.
- [7] Gerőfi Szilárd: Diplomaterv, BME Mikrohullámú Híradástechnika Tanszék, 1996.
- [8] W.J.A. Teulings, J.C. Marpinard, A. Capel, D.O'Sullivan: A new Maximum Power Point Tracking system, Proc. of 24th IEEE PESC'93, pp. 833-837, 0-7803-1243-0/93\$03.00, 1993.
- [9] G. Eggers: Electrical Power Systems for Low Earth Orbits, Proc. 4th ESTEC Spacecraft Power Conditioning Seminar, Noordwijk (ESA SP-186, September 1982).
- [10] D.O'Sullivan: Powering ESA's Spacecraft, ESA Bulletin 59.
- [11] D.O'Sullivan: Satellite Power System Topologies, ESA Journal 1989, Vol. 13.
- [12] D.O'Sullivan: Space Power Electronics - Design Drivers, ESA Journal 1994, Vol. 18.
- [13] C. Signorini, K. Bogus, Power and Energy Conversion Division ESTEC, G. Strobl (DASA Germany): High Efficiency Solar Cells for Deep Space Missions, Preparing for the Future ESA's Technology Programme Quarterly Vol. 4. No. 3. September 1994.
- [14] A. Szimler, A. Gschwindt, A. Banfalvi, I. Szabo, J. Szabo: Mission Oriented On-board Power Systems, PEMC Proceedings Vol. 3. pp. 619-623. Budapest, September 1996.
- [15] A. Szimler, A. Gschwindt, A. Banfalvi, I. Szabo, J. Szabo: Mission Oriented On-board Power Systems, Telescon '97 2nd International Telecommunications Energy Special

- Conference Budapest, April 22-27, 1997; Proceedings pp. xx-xx.
- [16] A.F. Boehringer: Self-adapting DC Converter for Solar Spacecraft Power Supply, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, January 1968.
 - [17] A. F. Boehringer: Struktur und Regelung von Energieversorgungssystemen in Satelliten (in German), ETZ-A Bd. 92 (1971) H.2
 - [18] Richard Redl, Nathan O. Sokal: Near-optimum Dynamic Performance of Switching-mode Power Converters using Feed-forward of Output Current and Input Voltage with Current-mode Control, Proc. 4th ESTEC Spacecraft Power Conditioning Seminar, Noordwijk (ESA SP-186, September 1982)
 - [19] Istvan Szabo: Dynamic Analysis of Power Converters, Periodica Polytechnica Serial Electrical Engineering, Vol. 37, No. 3, pp. 211-221.
 - [20] Charles R. Sullivan, Matthew J. Powers: A High Efficiency Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Arrays in a Solar Powered Race Vehicle, Proc. of 24th IEEE PESC'93, pp. 574-580, 0-7803-1243-0/93\$03.00, 1993.
 - [21] Ulrich Hermann, Hans G. Langer, Heinz van der Broeck: Low Cost DC to AC Converter for Photovoltaic Power Conversion in Residential Applications, Proc. of 24th IEEE PESC'93, pp. 588-594, 0-7803-1243-0/93\$03.00, 1993.
 - [22] J.J. Schoeman, J.D. van Wyk: A Simplified Maximal Power Controller for Terrestrial Photovoltaic Panel Arrays, Proc. 13th IEEE PESC'82, pp. 361-367, IEEE 0275-9306/82/0000-0361\$00.75, June 1982.
 - [23] M.J. Case, J.J. Schoeman: A minimum component Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracker, Proc. of the European Space Power Conference in Graz, August 1993 (ESA WPP-054, August 1993).
 - [24] John F. Schaefer: An inexpensive (\$34.69) Photovoltaic Pseudo Maximum Power Point Tracker, IEEE CH2019-8/84/0000-0643\$1.00, 1984.
 - [25] Manfred Knütel: Entwicklung und Bau eines Solarwechselrichters mit HF-Übertrager zur Netztrennung (in German), Diplomarbeit, Elektrotechnisches Institut, Karlsruhe, 1989.
 - [26] J.H.R. Enslin, D.B. Snyman: Simplified Feed-forward Control of the Maximum Power Point in PV Installations,

- Proc. IECON'92 San Diego, CA, pp. 548-553, 0-7803-0582-5/92\$3.00 1992.
- [27] D.B. Snyman, J.H.R. Enslin: Simplified Maximum Power Point Controller for PV Installations, 23rd IEEE PV Specialists Conference, May 1993.
- [28] S.M.M. Wolf, J.H.R. Enslin: Economical, PV Maximum Power Point Tracking Regulator with Simplistic Controller, Proc. of 24th IEEE PESC'93, pp. 581-587, 0-7803-1243-0/93\$03.00, 1993.
- [29] D.B. Snyman, J.H.R. Enslin: Combined Low-cost, High-efficient Inverter, Peak Power Tracker and Regulator for PV Applications, Proc. of 20th IEEE PESC'89, Milwaukee, Wisconsin, pp. 67-74, June 1989, CH2721-9/89/0000-0067 \$1.00.
- [30] D.B. Snyman, J.H.R. Enslin: Analysis and Experimental Evaluation of a New MPPT Converter Topology for PV Installations, Proc. IECON'92 San Diego, CA, pp. 542-547, 0-7803-0582-5/92\$3.00 1992.
- [31] H.J. Beukes, J.H.R. Enslin: Analysis of a New Compound Converter as MPPT, Battery Regulator and Bus Regulator for Satellite Power Systems, Proc. of 24th IEEE PESC'93, pp. 846-852, 0-7803-1243-0/93\$03.00, 1993.
- [32] Istvan Szabo, Jozsef Szabo: A Novel Analogue Maximum Power Point Tracker for Solar Array, Proc. of 5th OPTIM'96 Conf. Brasow, 15-17. May 1996, Vol. 6, pp. 1674-1680.
- [33] Istvan Szabo, Jozsef Szabo: Simplified Analogue MPP Tracker with Improved Efficiency, PEMC Proceedings Vol. 3. pp. 624-629. Budapest, September 1996.
- [34] A.S. Kislovski, R. Redl: Maximum Power Tracking using Positive Feedback, Proc. of 25th IEEE PESC'94, pp. 1065-1068, 0-7803-1859-5/94/\$4.00, 1994.
- [35] A.S. Kislovski: Power Tracking Methods in Photovoltaic Applications, Proc. of the PCIM, pp. 513-528, June 1993.
- [36] A.S. Kislovski: Maximum Power Point Monitor, Proc. IEEE INTELEC'90, pp. 283-288, 1990.
- [37] J. Applebaum: The Quality of Load Matching in a Direct-coupling Photovoltaic System, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. EC-2, No.4, December 1987, 0885-8969/87/1200-0534\$01.00, 1988.

- [38] Y.Z. Bahnas: Microprocessor based Maximum Power Point Tracker, Proceedings, C.9.15.
- [39] A. Mas, J. Garcia, L. Castaner: High efficiency Maximum Power Point Photovoltaic Panel Tracker with battery protection, Proceedings, D.6.04.
- [40] Dr. Hermann Imre: Elektronikus tápegységek, Egyetemi jegyzet, 1994.
- [41] Frantisek Latka: Matematikai képletgyűjtemény, Műszaki Könyvkiadó, 1985.
- [42] Fenyő I., Frey T.: Matematika villamosmérnököknek, Műszaki Könyvkiadó, 1964.
- [43] Korn-Korn: Matematikai kézikönyv műszakiaknak, Műszaki Könyvkiadó.