

Mihácsi Viktor, Várhelyi Nándor

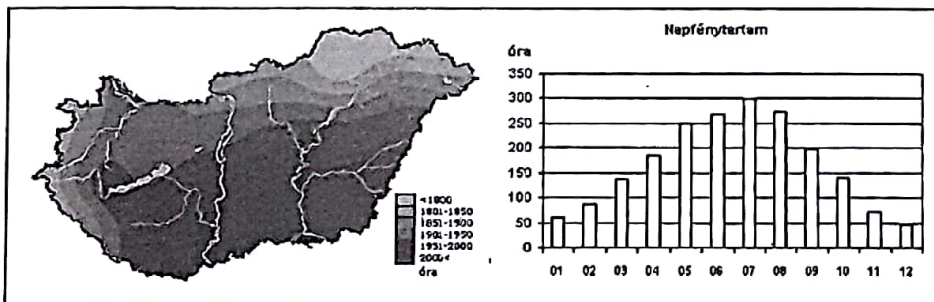
Napelemes, hálózatra visszatápláló inverter

A cikkben bemutatjuk az új VIPQ termékcsaládunk egyik tagját, a napelemtől működő, hálózatra visszatápláló inverter 3kW-os változatát. Az egység transzformátormentes kivitelű, ezért sokkal kisebb, kompaktabb. Ethernetes csatlakozási felülettel rendelkezik, a beépített webszerver alkalmazás az adatok egyszerű, áttekinthető elérését teszi lehetővé.

In the article we show an equipment of our new VIPQ product family. This 3kW nominal power inverter is operating from solar cell and recuperates to mains. The unit does not have transformer therefore its size is much smaller and more compact. It has an Ethernet connection platform and the inbuilt web server application facilitates the simple and well-arranged admittance of the data.

BEVEZETÉS

Magyarország területén a napsütötte órák számának éves összege átlagosan 1750-2050 óra között alakul (1. ábra). Az MTA (2006) becslése szerint a hazai besugárzási viszonyok alapján mintegy 1852 PJ napenergiát lehetne a mai technológiákkal évente hasznosítani (az ország teljes energiafogyasztása 1153,2 PJ/év). Ez a napfénytartamérték magasabb, mint például az Ausztriában mért érték. Ennek ellenére a rosszabb besugárzási értékekkel rendelkező szomszédos Ausztria egyes területein alig találunk olyan háztetőt, amire nincs napenergiát hasznosító berendezés felszerelve.



1. ábra A napsütéses órák átlagos évi összegei és havi értékei Magyarországon



2. ábra VIPQ 450/230-3/50²

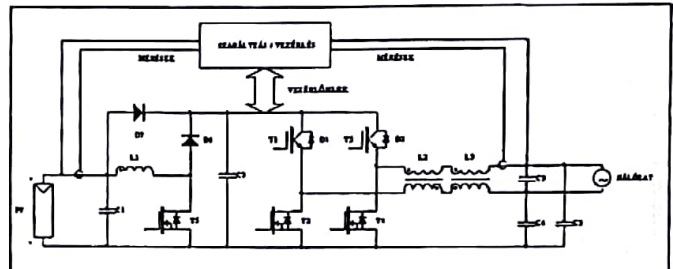
A napsugárzásból maximum 1000 W/m² jut a Föld felszínére¹. A napsugárzás intenzitása még változó időjárás esetén is jelentős mértékű. Magyarországon a sokéves statisztikák alapján 1000-1350 kWh/m²-es napenergia-mennyiséggel lehet számolni, pl. Budapest déli részén 1200-1250 kWh/m² az évi napenergia-mennyiség. Aktív napenergia-hasznosítás során megkülönböztetünk fotovoltaikus és termikus hasznosítást.

Fotovoltaikus napenergia-felhasználás során a nap sugárzását napelemmel elektromos energiává alakítjuk.

Jelen cikkünkben bemutatunk egy napelemtábláról üzemelő hálózatra visszatápláló inverter modult, mely a 2. ábrán látható.

FELÉPÍTÉS

A modult három alapvető részre bonthatjuk. Két főáramkörre és a szabályzás/vezérlés áramköreire. Az első főáramkör egy feszültségemelő (booster) kapcsolás, a második fokozatban egy inverter található, H-bridge elrendezésben. A berendezés transzformátort nem tartalmaz, vagyis a napelempanelek galvanikus leválasztás nélkül kapcsolódnak a hálózatra (3. ábra).



3. ábra Főáramkör egyszerűsített felépítése

FŐÁRAMKÖR ISMERTETÉSE

Az első fokozat (booster) a napelempaneleket illeszti az inverterhez. Ahhoz, hogy a hálózatra történő szinuszos áramú visszatáplálás transzformátor nélkül lehetséges legyen, az inverter főáramköri egyenfeszültségének nagyobbak kell lennie, mint a hálózati feszültség csúcsa. Vagyis, ha névleges hálózati feszültséggel számolunk, a közbenső körű feszültség

minimum $230V \cdot \sqrt{2} = 325$ V kell, hogy legyen. Az alkalmazott félvezetőkészlet és kondenzátor telep feszültségtűrése megadja a bemenetre kapcsolható egyenfeszültség maximumát. Az alkalmazott főáramköri elektrolit kondenzátorok 450 V-os értékűek. Az előzőekből következik, hogy az alkalmazható napelemodulok feszültségtartományja 325-450 V között kell, hogy legyen. A különböző típusú és gyártmányú napelempanelek soros és/vagy párhuzamos kö-

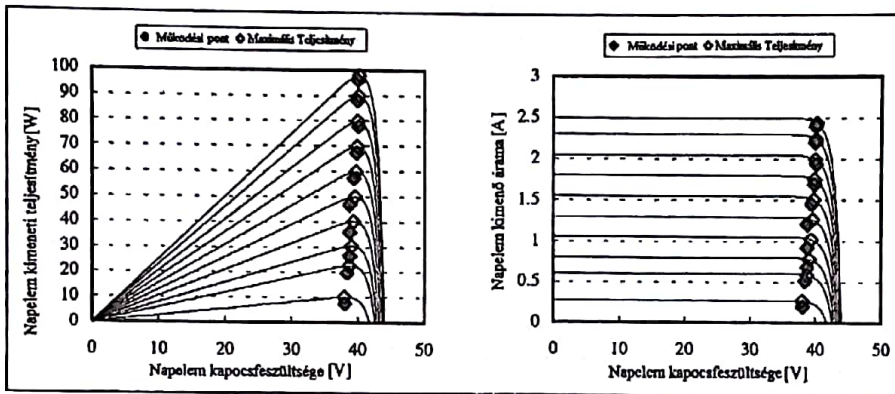
tései különböző bemeneti feszültségeket eredményeznek. A széles bemeneti feszültségtartomány biztosításához egy feszültségnövelő kapcsolást (booster) építve az inverter elé, kibővíthető a berendezésre kapcsolható feszültségtartomány. Esetünkben 75 V-450 V egyenfeszültségről működtethető a szolár inverter.

Az alkalmazott főáramköri topológiához a Vincotech gyártmányú félvezető pack alkalmazásával a diszkrét elemeket elhagyhatjuk, vagyis minden teljesítmény-félvezető megtalálható egy tokban. Ennek alkalmazásával kisebb, egyszerűbb és jobb hatásfokú berendezés építhető.

¹ 1000 m magasságban, merőleges beesési szög nélkül mérve

² A modul főbb műszaki adatai: névleges bemeneti feszültség 75-450V DC, névleges kimenő áram 13A, 50Hz, modul súlya 26kg, mérete 500x470x184mm (szélesség x magasság x mélység).

A booster fokozat akkor működik, amikor a hálózati feszültség csúcsánál kisebb, de 75 V-nál nagyobb a napelemtábla feszültsége. Az első ütemben T5 FET bekapcsolásával a főtötekercs (L₁) árama felépül a pillanatnyi bemeneti feszültségnek megfelelően. A második ütemben T5 kikapcsolásával az árama áterelődik D6 diódán keresztül C2 kondenzátor telepre. C2 kondenzátor telep tartalmaz impulzus kondenzátort a túlfeszültségek elkerülése miatt, és tartalmaz elektrolit kondenzátort az energiátároláshoz. T5 FET alacsony csatorna-ellenállású és gyors kapcsolási sebességű eszköz, D6 silicon carbid (SiC) dióda, melyre szinte elhanyagolható Qrr (tárolt töltés) érték jellemző.



4. ábra PV panel jellemző karakterisztikái

Ezen elemek használatával magasabb kapcsolási frekvencia és jobb hatásfok érhető el. A nagyobb kapcsolási frekvencia az L1 induktivitás méretének csökkentését eredményezi.

A PV (Photovoltaikus) cella egy működési pontban adja le a maximális kimeneti teljesítményt az áram és feszültség függvényében (4. ábra).

A PV cellában az áram és a feszültség között exponenciális összefüggés van, a maximuma a görbe könyökénél található. A berendezés MPPT (maximum power point tracking) vezérlést tartalmaz, hogy megkeresse ezt a munkapontot, annak érdekében, hogy a konverter áramkör a cellából elérhető maximális teljesítményt adja le. A panelek különbözősége (gyártási eltérések, részleges árnyék) miatt különböző U/I görbék és munkapontok vannak az egyes panelekben, és ezért az egyforma meghatározott áram miatt egyes panelek nem MPP-n teljesítenek, ezzel energiavesztést okozva. A jobb energiakinyerés miatt a 3 kW-nál nagyobb berendezéseink már több MPPT bemenettel rendelkeznek.

A booster fokozat, hogy a PV cellákból a maximális energiát kinyerje, folyamatosan keresi a munkapontot, a kinyert energiát pedig belepumpálja a főáramköri kondenzátortelepre (C2). Emiatt a kondenzátortelep feszültsége a beáramló töltés miatt folyamatosan emelkedne, de az inverter ezt az energiát hálózatra táplálja. Vagyis az inverter a kondenzátortelep feszültségére szabályoz, azt a pillanatnyi hálózati feszültségcsúcs érték fölött tartva 20-30 V-tal. A kondenzátortelep feszültségemelkedésére az inverter nagyobb szinuszos áramot táplál a hálózatba, emiatt csökkentve a kondenzátortelep feszültségét. Ha a PV panelekből kevesebb energia nyerhető ki (pl.: felhőárnyék), a booster energiatermelése is csökken, ez viszont a kondenzátortelep feszültségének csökkenésével jár. Az inverter ekkor kevesebb áramot (teljesítményt) táplál a hálózatba, kisebb „terhelést” jelent a kondenzátortelepnek, így annak feszültsége nem csökken.

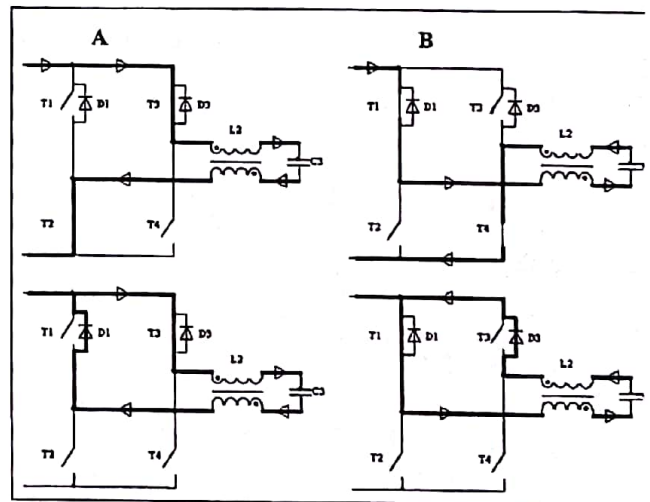
Az inverter fokozat teljes híd (H-bridge) elrendezésű, működtetése aszimmetrikus unipoláris vezérléssel történik.

A hálózatra táplálásnál fontos előírás, hogy a hálózati feszültség és a visszatáplált áram frekvenciája és fázisa azonos legyen, $\cos\varphi \approx 1$ (ezért használjuk a cikkben mindenhol a hatásos teljesítmény mértékegységét [W]).

A hálózati feszültség pozitív félperiódusa esetén T₂ és T₃ kapcsolóelemek bekapcsolásával az L₂ induktivitás áramának felépülése a főköri feszültség és a pillanatnyi hálózati feszültség különbségétől függ (5. ábra/A), T₂ kikapcsolásával L₂ áramát D1 SiC dióda veszi át, ekkor az induktivitás lemagneződ feszültsége a hálózati feszültség pillanatértéke.

A hálózati feszültség negatív félperiódusában (5. ábra/B) az L₂ induktivitás fel- és lemagnezése ellentétes oldali félvezetőkkel történik. Az inverter alkotó félvezetők kiválasztása a topológia alapján történt. T₁ és T₃ IGBT-k egy hálózati periódusban 10-10 ms-ot vezetnek, vagyis kapcsolási veszteségük elhanyagolható. Vezetési veszteségük viszont alacsony a kicsi V_{CE} feszültség miatt. T₂, T₄ FET-ek kapcsolási vesztesége alacsony, míg D₁, D₃ SiC diódák tárolt töltése ugyancsak elhanyagolható. Az alkalmazott topológia és eszközök használatával az inverter követő szabályozásos kapcsolási frekvenciája elérheti a 100kHz-et.

T₁ és T₃ IGBT-k Gate Emitere (GE) között el kell helyezni egy 10-15 nF kondenzátort, mert az alattuk elhelyezkedő FET-ek jelentős kapcsolási sebességéből adódóan és az IGBT Miller kapacitásainak köszönhető Gate-re jutó tranziens feszültsége már meghaladja az IGBT vezérléséhez szükséges minimális feszültséget. (Threshold). Vagyis az



5. ábra Inverter híd kapcsolási fázisai

IGBT nemkívánatosan bekapcsolhat, és az alatta elhelyezkedő soros FET-tel együtt rövidre zárja a főáramköri kondenzátort, ami az IGBT és FET tönkremeneteléhez vezethet.

A 10-15 nF-os G-E-en elhelyezett kondenzátor és a Miller kapacitások már egy olyan tranziens feszültségosztót hoznak létre, amivel már megelőzhető az IGBT nemkívánatos bekapcsolása.

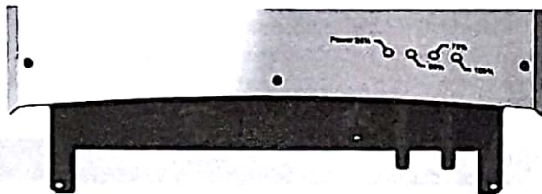
L₂ induktivitás és C₃ kapacitás alkotja az inverter kimeneti szűrőjét. Ezek mérete jelentősen függ a kapcsolási frekvenciától.

A lakókörnyezetben való elhelyezése miatt a berendezés egyenáramú bemenetei és váltakozó áramú kimenete a legszigorúbb 'B' karakterisztikájú rádiófrekvenciás szűrővel vannak ellátva, zavartűrő képessége (EMC) is megfelel a rá

vonatkozó szabványoknak. A berendezés segéd tápegysége a hálózatról üzemel. Ahhoz, hogy a készenléti üzemmódban (pl.: éjszaka, rossz fényviszonyok mellett) fogyasztása az előírtak alatt maradjon a segéd tápegységet kikapcsoljuk, csak egy időzítő áramkör működik, ami meghatározott időközönként indítja az Invertert. Ha a fényviszonyok továbbra sem megfelelőek, a modul visszakerül energiatakarékos módba. Energiatakarékos üzemmódban a teljesítményfelvétel kevesebb, mint 0,5W. Ha a visszatáplált energia nagyobb, mint amennyit a berendezés önmaga fogyaszt, a berendezés bekapcsolva marad.

CSATLAKOZÁSI PONTOK

A modul a napelemes rendszerekben használt, szabványosított Multi-Contact gyártmányú SolarLine MC4 típusú csatlakozókkal van ellátva a napelemek felé, illetve Amphenol gyártmányú csatlakozókkal a hálózati kitéplési pontnál, illetve Ethernet-kommunikációs felületnél. Az összes csatlakozási pont és a berendezés háza IP65 védettséggel rendelkezik. (6. ábra)



6. ábra VIPQ modul csatlakozói

SZABÁLYZÁS, VEZÉRLÉS

A feszültségemelő és az inverter egység vezérlési feladatait és bemeneti/kimeneti jellemzőinek szabályozását egy Microchip gyártmányú PIC32 típusú mikrovezérlő végzi.

A mikrovezérlő nagy számítás teljesítménnyel rendelkezik, ezért alkalmas a számos vezérlési feladat ellátására, továbbá a háromfázisú inverter híd és két független feszültségemelő áramkör vezérlésére, valamint egy webszerver futtatására. A vezérlő egység közvetlenül csatlakozik a főáramkört tartalmazó alaplap nyákhöz. A vezérlő kártya a következő perifériákból épül fel:

- 3 fázisú hálózati szinkronjel előállító áramkör
- 3 db DAC modul, a szinuszos kimenő áramalapjelek előállítására
- Digitális kimenet illesztő, kimeneti jelfogók működtetéséhez és az előlapon található LED-es kijelzés számára
- Digitális bemenet illesztő, nyomógombok fogadásához
- Analóg bemenet illesztő, a feszültség-, áram- és hőmérséklet-érzékelők jeleinek feldolgozásához
- PWM kimenetek a félvezető kapcsolóelemek (IGBT-k) működtetéséhez
- 10/100 Mbit/s sebességű ethernet áramkör
- Nagy kapacitású flash memória, a modul konfigurációs konstansainak, ethernet hálózati beállításoknak, valamint a működési paraméterek és visszatáplálási adatok tárolása céljára

A szoftver folyamatosan méri a napelem bemenetfeszültségét, ha az 75V fölött van, engedélyezi a feszültségemelő áramkör működését. A feszültségemelő IGBT 40 kHz-es PWM jellel van vezérelve, melynek kitöltési tényezője 300 ms-ként folyamatosan változik. A kitöltési tényezőt az MPPT algoritmus működteti, mely P&O (Perturbation and Observation) elvet használ a maximális energia kinyeréséhez. Az algoritmus 300 ms-ként elemzi a napelem kapocsfeszültségét és a

belőle kifolyó áramot. Ha az aktuális napelem-teljesítmény nagyobb, mint az előző (300 ms-mal korábbi) mérés esetén volt, akkor a PWM kitöltési tényező megváltozása irányát meghagyja, ellenkező esetben megfordítja. Miután az algoritmus megtalálta a maximális teljesítmény helyét, a kitöltési tényező MPP körüli ide-oda változása nagyon kicsi, ezért nem okoz káros flicker jelenséget. A feszültségemelő alapesetben áramszabályozós működésű, azonban a mindenkori hálózati feszültség csúcsértéke +40 V-os szint elérésekor feszültség-szabályozó módban működik. Erre az inverter fokozat esetleges áramkorlátozásba kerülésekor vagy meghibásodáskor van szükség. A visszatápláló inverter fokozat a hálózati feszültség csúcsértéke +20V-os szintre szabályozza a közbeni köri feszültséget a hálózatba visszatáplált árammal. A mikrokontroller a teljes inverter híd két felső IGBT-jét kapcsolja, míg az alsó IGBT-eket precíziós áram komparátorok vezérlik.

- Az inverter szoftver 3 hurkos szabályzókörrrel rendelkezik:
- a közbensőkör feszültségének szabályozása
 - a hídáram jelalakjának szabályozása
 - a hálózatba visszatáplált áram jelalakjának szabályozása, a THD³ minimalizálására

Ha a bemeneti napelemfeszültség nagyobb, mint a közbensőkör feszültsége, akkor a feszültségemelő áramkör kikapcsol, ezzel a hatásfok 97% fölé nő. A munkapontkereső feladatot ezután az inverter szabályzóköre veszi át.

A modul előlapjába épített LED-es folyamatjelző egység tájékoztatást ad a visszatáplált teljesítményről, vagy az esetleges hibaállapotról.

BEÉPÍTETT VÉDELMEK

A berendezés és a hálózatra kapcsolt fogyasztók védelme érdekében a visszatáplált áram jelalakját egy kettős komparátor folyamatosan figyeli, és ha az áram pillanatértéke alul- vagy meghaladja a működési tartományt (melyet az éppen aktuális áramalapjel segítségével állít elő) azonnal leállítja a működést.

Életvédelmi okokból a berendezés beépített földzárlatfigyelő áramkörrel rendelkezik, mely a szivárgó áram előírt határértéke felett leállítja a működést, és hibajelzést szolgáltat a felhasználónak.

A vezérlés méri a hálózati feszültség szintjét és frekvenciáját. Hibajelzés és leállítás történik alacsony és magas hálózati feszültségszint esetén, továbbá, ha az inverter kiesik a hálózattal való szinkron helyzetből. Ha a hálózati frekvencia kilép a 49,5-50,5 Hz-es tartományból, akkor 10 mp-es késleltetéssel az inverter leáll. A frekvencia 48-50 Hz-es tartományból való kilépése azonnali leállást eredményez.

A mikrovezérlőben futó szoftver folyamatosan ellenőrzi önmaga működését, ezt beépített watchdog áramkör, RAM tartalom teszt, gépi regiszterteszt és megszakításcsapdák szolgálják. A külső flash memóriaegység tesztelése is folyamatosan történik.

A szoftver biztosítja a káros szigetüzem elkerülését. Ez életvédelmi okokból fontos, hiszen a hálózati feszültség megszűnésekor az inverter számára előállhatnak olyan terhelési viszonyok, melyek biztosíthatják, hogy a helyi fogyasztókon lévő feszültségés megegyezhet a hálózati feszültség meglétekor jelenlevő szinttel. Ha pl. a hálózaton karbantartási munkákat végeznek, akkor ez a jelenség nem megengedhető.

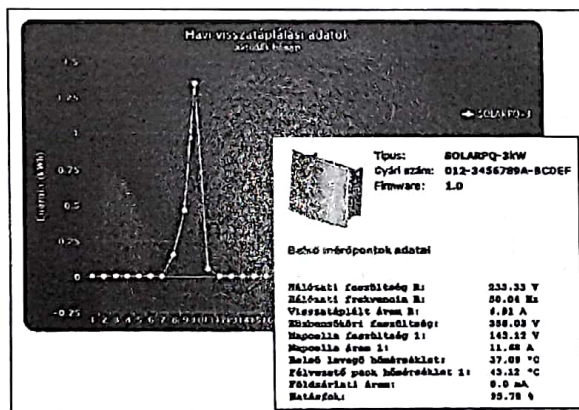
A vezérlés ezt a káros jelenséget a hálózati feszültség szintjének és frekvenciájának folyamatos monitorozása mellett, a PhaseShift algoritmus segítségével szünteti meg, az előírt 200 ms-os időn belül.

³ THD = Total Harmonic Distortion, Teljes Harmonikus Torzítás

BEÉPÍTETT WEBSZERVER

Az Inverter működési jellemzői könnyen nyomon követhetőek a beépített webservert alkalmazás segítségével. A felhasználó konfigurálhatja és igazíthatja a helyi hálózati viszonyokhoz megfelelően a webservert.

7. ábra Webservert főoldal



8. ábra Webservert funkciók

A webservert alkalmazás segítségével a következő adatokhoz lehet hozzáférni:

- A főoldalon láthatjuk a berendezés azonosító adatait: típusát, gyári számát és szoftver verzióját. Itt jelennek meg a belső naptár/óra adatai, az aktuális állapot, melyből látható, hogy a berendezés visszatáplál vagy valamilyen hiba miatt áll. A pillanatnyi visszatáplált teljesítményről, a napi energiatermelésről és a teljes termelésről is kaphatunk itt információt.
- A napi/havi/éves lebontás menü alatt grafikus formában megtekinthetjük az aktuális időszak termelési adatait.
- A teljes termelés menüpont alatt a berendezés által megtermelt villamosenergia-mennyiség alakulását láthatjuk az elmúlt 20 évben.
- A termelés archívumban az elmúlt húsz év termelési adatai közül kérhetünk le tetszőleges adatot. Pl. ha kíváncsiak vagyunk rá, mennyi volt a visszatermelés tavaly június 12-én vagy idén márciusban, az itt látható.
- A speciális adatok menüpontban a felhasználó számára néhány érdekes mérési adat látható, ilyenek pl. az aktuális hálózati paraméterek, napelem mérési értékei, a modul belső

hőmérséklete, a félvezető pack hőmérséklete, földzárlati áram aktuális értéke, illetve a kalkulált hatásfok.

- A beállítások menüpont jelszóvédett, itt adható meg a dátum/óra beállítás és a kommunikációhoz szükséges hálózati beállítások, továbbá a jelszó is itt változtatható meg.
- A gyári menüpont jelszóvédett, ez a gyártó számára fenntartott kalibrációs felület, mely elérése a felhasználó számára nem lehetséges.

Ha a felhasználó valamilyen oknál fogva nem tud hozzáférni a webserverthez, nem találja azt meg a hálózaton, lehetőség van azt egy segédprogrammal egyszerűen megkeresni.

Ez a program, tájékoztatást ad a berendezés nevééről és aktuális IP-címéről. Ha a felhasználó szeretné alaphelyzetbe állítani a hálózati beállításokat, erre is van lehetősége, a berendezés alján található nyomógomb segítségével ez automatikusan megtehető.

A modul szoftvere egy segédprogrammal az internetről frissíthető. A frissítés néhány egyszerű lépésből áll, a modul megbontása nélkül akár a felhasználó is elvégezheti az ethernet hálózati kapcsolat segítségével. A szoftverfrissítéseket díjmentesen bocsátjuk a felhasználók rendelkezésére a termék teljes élete alatt. Ezek megtalálhatók lesznek megújuló honlapunkon a <http://www.powerquattro.hu> internet címen.

ÖSSZEFOGLALÁS

A villamos energia dráguló fogyasztói ára, az egyre korszerűbb, nagyobb hatásfokú napelempanelek és állami támogatások emelkedésével kedvező megtérülési idővel számolhatunk. Amennyiben feltételezzük, hogy a technológiai fejlődés rövid idő alatt 30%-ra emeli a napelemek hatékonyságát, és az állami támogatás is 25%-os lesz, a napelemes beruházások már 10-15 év alatt megtérülhetnek. A PowerQuattro Zrt. napelemes inverter családja versenyképes árával és kiváló műszaki jellemzőivel segíti a környezettudatos szemléletmód elterjedését.

Irodalomjegyzék

- [1] John Stevens, Russell Bonn, Jerry Glinn, and Sigifredo Gonzalez: Development and Testing of an Approach to Anti-Islanding in Utility-Interconnected Photovoltaic Systems Sandia National Laboratories, 2000
- [2] David Sanz Morales: Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic Applications Aalto University, Faculty of Electronics, Communications and Automation, 2010
- [3] Michael Frisch, Temesi Ernő: Design Concept for a Transformerless Solar Inverter Vincotech GmbH, 2009
- [4] Internet



Várhelyi Nándor
erőáramú fejlesztőmérnök
PowerQuattro Zrt.
MEE-tag
pqinfo@powerquattro.hu



Mihácz Viktor
fejlesztőmérnök
PowerQuattro Zrt.
MEE-tag
pqinfo@powerquattro.hu

Szakmai lektor: Molnár Károly Fejlesztési Igazgató, PowerQuattro Zrt.