

# Újszerű elvi megoldások és szabályozási stratégiák a megújuló energiaforrások hasznosításában

Témavezető: Dr. Járdán R. Kálmán

## 1. Bevezetés

A BME Automatizálási és Alkalmazott Informatikai Tanszéke az elmúlt mintegy másfél évtizedben hazai és EU-s források felhasználásával hatékony, környezetkímélő energia termelésre irányuló kutatás-fejlesztésbe kezdett, és olyan hulladék energiák hasznosítását célozta meg, amelyre a korábban alkalmazott technológiákkal nem állt rendelkezésre kidolgozott megoldás.

A jelen pályázat keretében a fenti kutatási irány folytatását tűztük ki célul, és a kidolgozott rendszer alkalmazási lehetőségeit vizsgáltuk meg az alacsony teljesítménysávba eső alternatív, megújuló energiaforrások, elsősorban *napenergia* hasznosítására, villamos illetve kapcsolt villamos és hőenergia termelés céljából, környezetbarát módon. A korábban kifejlesztett rendszer vizsgálata kiterjedt a villamos energia megtakarítást és a hálózatszennyezés csökkentését eredményező „hálózatbarát” megoldásokra is, amelyek az adott rendszerben gazdaságosan megoldhatónak bizonyultak.

Az általunk korábban kifejlesztett rendszerben a hőenergia átalakítása úgy történik, hogy valamely primer energiaforrás energiáját energiahordozó közeg közvetítésével juttatjuk a rendszerbe, amely a betáplált energiából két lépcsőben, először speciális turbina segítségével mechanikai energiát, majd elektromechanikai energia-átalakító (generátor) alkalmazásával villamos energiát állít elő. A villamos energiát teljesítményelektronikai AC/AC konverter segítségével alkalmassá tesszük közvetlen felhasználásra, vagy hálózatba történő visszatáplálásra. Az energiahordozó közeg lehet telített vagy túlhevített gőz, gáz (pl. földgáz) valamint folyadék. Gőz alkalmazása esetén a turbinából kilépő munkaközeg energiataralma tovább hasznosítható különböző célokra, ebben az esetben kapcsolt hő és villamos energia termelésről beszélhetünk, amelynek rendkívül kedvező az eredő hatásfoka, ezért sokkal gazdaságosabb a korábbi megoldásokhoz viszonyítva. A műszaki fejlődés napjainkra elérte azt a szintet, hogy a hulladék energiákból a villamos teljesítmény termelése már kisméretű Helyi Erőművekben (HEM) is gazdaságosan megvalósítható, a pályázat keretében tervezett kutatásokkal ezt kívánjuk kiterjeszteni a megújuló energiaforrások területére is.

A pályázat fő célkitűzése az volt, hogy a kutatás-fejlesztés eredményeként olyan rendszerek elméleti alapjait dolgozzuk ki, amelyek az eddigieknél jobb hatásfokkal biztosítják a napenergia hasznosítását, a hő és villamos energia kombinált előállításával.

## 2. A pályázat keretében kidolgozott rendszerek ismertetése

A napenergia szélesebb körű alkalmazását elsősorban a rendelkezésre álló technológiák viszonylag alacsony átalakítási hatásfoka illetve a rendszerek létesítésnek magas költsége korlátozza. A napenergia hasznosítási módszerek jellemzője, hogy az értékes villamos energia nyerésére alkalmas napelemek hatásfoka alacsony, gyártási költsége viszont magas. A napkollektorok hatásfoka magasabb (tipikus érték egy gyakorlati munkapontban 40 - 70 % körül van) míg az egységnyi teljesítményre vonatkoztatott gyártási költségük a napelemekhez viszonyítva alacsonyabb. Az egységnyi felületről nyerhető hőenergia a napkollektorok esetében mintegy ötszöröse a napelemekkel nyerhető villamos energiának. A leggyakoribb energia felhasználás esetében mind hő, mind villamos energiára szükség van, ezért célul tűztük ki, hogy olyan megoldást találjunk, amellyel a kétféle technológiát egyesíteni lehet, és a hőenergia formájában nem hasznosítható energia hányadot hő / villamos energiaátalakítási eljárással villamos energiává tudjuk alakítani. A kidolgozott rendszer egyik kulcs eleme a termikus napkollektor (sík kollektor) és a foto-villamos napelem felhasználásával kialakított kombinált foto-villamos / termikus egység (PV / T), amelyre az egész rendszer épül. A kísérleti vizsgálataink azt mutatták, hogy ezzel a megoldással az egységnyi területről nyerhető energia nagyobb, mint amennyi bármelyik egységgel külön nyerhető.

Elméleti analízis és számítógépes szimulációk szintjén foglalkoztunk a napenergia villamos energiává történő átalakításának egy újszerű megoldásával, amelyet gyűjtő néven Napkollektoros erőműnek nevezhetünk. Ennek a megoldásnak az alapja az a rendszer, amely korábban az irányításunkkal, egy nemzetközi konzorcium keretében, az EU támogatásával került kifejlesztésre. Alapvetően kétféle technológia jöhet szóba: közvetlen gőzfejlesztés magas hőmérsékletű (főkuszálás elvén működő) napkollektorral, vagy alacsony hőmérsékletű sík kollektor alkalmazása, ebben az esetben a turbinát zárt ciklusban, hőcserélő közbeiktatásával, alacsony forráspontú munkaközeggel (pl. izobután) táplálva működtetjük (Binary Cycle System). Az ilyen módon megtermelt villamos energia közvetlenül felhasználható szigetüzemi rendszerben, vagy visszatáplálható a meglévő fogyasztói hálózatba.

A fogyasztói hálózathoz csatlakozó AC/AC konverter felhasználható a hálózatkondicionálásra (Power Quality Conditioning, PQC), amely nemcsak a meddő teljesítmény kompenzálását foglalja magában, hanem a felharmonikus áram és feszültség összetevők eliminálását vagy jelentős csökkentését is lehetővé teszi.

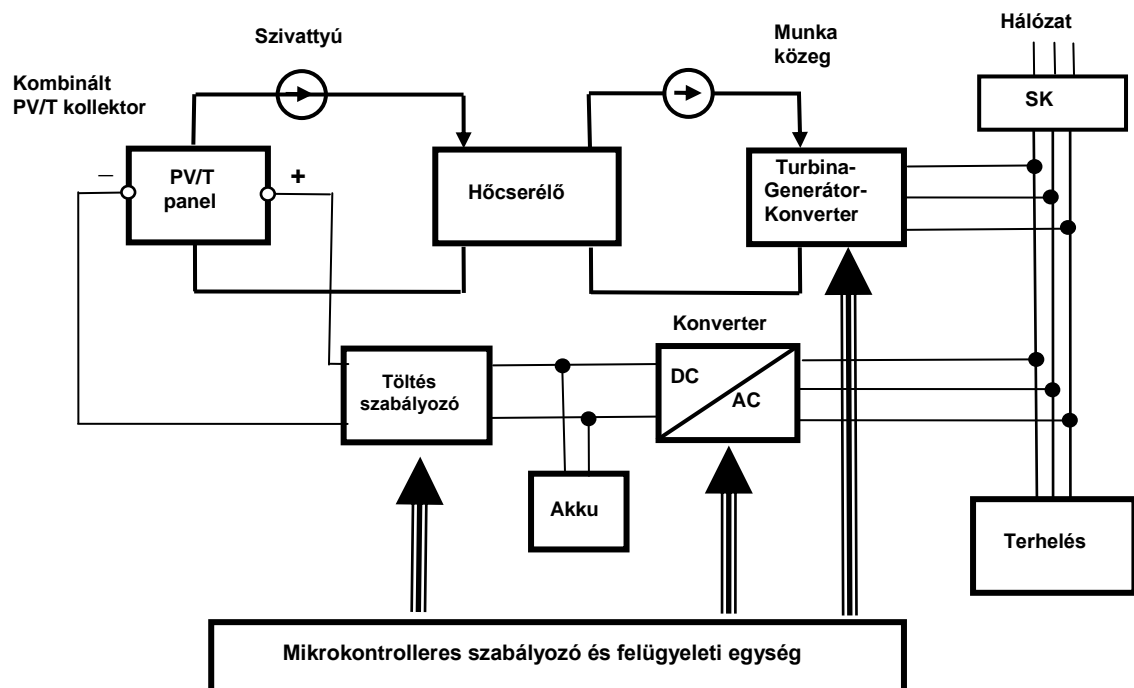
A PV/T rendszerek tervezéséhez és gyártásához szükséges lehet az egyes napelemek Volt-Amper karakterisztikájának mérése. Erre a célra újszerű elven működő automatikus laboratóriumi mérő berendezést fejlesztettünk ki, és készítettünk el, amelynek gyártási költsége alacsony és a berendezés a gyakorlatban jól használhatónak bizonyult. Ezeket a rendszereket ismertetjük röviden a következő pontokban.

## 2.1. A hőenergiát villamos energiává alakító rendszer felépítése és működése

Az általunk kifejlesztett kombinált napelem/napkollektor egység (PV/T) alkalmazásán alapuló rendszer egyszerűsített blokkvázlata az 1. ábrán látható. A PV/T által viszonylag alacsony munkaközeg hőmérsékleten szolgáltatott hőenergia a Hőcserélő primer körén keresztül átadódik a hőcserélő szekunder körében lévő alacsony forráspontú munkaközegnek, amely nagynyomású gázhalmazállapotba jut, és a turbinán keresztül áramolva nyomatókot hoz létre, amely átadódik a hozzá kapcsolt generátornak, így villamos teljesítményt generál, ezt egy AC/AC konverter segítségével a kívánt felhasználásnak megfelelő formába alakítjuk.

A PV/T egység által leadott villamos energiát vagy a hálózatba tápláljuk vissza (párhuzamos üzem) vagy közvetlenül villamos fogyasztók táplálására illetve akkumulátorban történő tárolásra használjuk (sziget üzem). A PV/T egység villamos kimeneti kapcsaira teljesítményelektronikai átalakító (DC/DC konverter) csatlakozik, amelynek kimenete egy DC/AC konvertert táplál. A villamos energia tárolását akkumulátor telep biztosítja, amely az akkumulátor megfelelő töltését is ellátó DC/DC konverter (*Töltés szabályozó*) kimenetére van kötve. A konverterek kimeneti villamos mennyiségeit, mint bemenő információt, felhasználjuk a *Mikrokontrolleres szabályozó és felügyeleti egységben*.

Az ábrán bemutatott, szünetmentes áramforrásként is működtethető rendszer jellemzője, hogy mind a párhuzamos, mind a szigetüzemi szabályozási stratégiát alkalmazni kell: alapállapotban a rendszer párhuzamos üzemben működik, hálózati zavar esetén rövid idő alatt át kell térni a szigetüzemi szabályozásra.



1. ábra. A kombinált napelem/napkollektor egység alkalmazásán alapuló rendszer blokkvázlata

## 2.2. A hőenergiát közvetlenül hasznosító rendszer

Ha a hőenergia teljes egészében közvetlenül hasznosítható, egyszerűbb rendszert alkalmazhatunk, nincs szükség a hőenergia villamos energiára történő átalakítására. Ebben az esetben a mikrokontrolleres egység biztosítja a szivattyú működtetésén keresztül a munkaközeg hőmérsékletének szabályozását. A termelt hőenergiát felhasználó termikus fogyasztók lehetnek, pl. használati meleg víz, radiátor vagy fal- lég- és padlófűtés stb. A munkaközeg hőcserélőn keresztül fűti a tárolóban lévő meleg vizet. A rendszer működése az automatika által irányított szivattyúkkal és egyéb szerelvényekkel elektromos energiát igényel, amelyet a napelemekből nyert villamos energiával tudunk biztosítani.

### 2.3. Hálózatkondicionálás

Felismertük, hogy a hálózathoz csatlakozó nagyfrekvenciás impulzusszélesség modulációval működő AC/AC konverter felhasználható hálózatkondicionálásra, amely leggyakrabban a meddő teljesítmény kompenzálást foglalja magában, de ezen kívül a konverterek megfelelő vezérlésével elérhető, a hálózat felharmonikus áram és feszültség összetevőit, sőt a háromfázisú rendszerekben fellépő, aszimmetrikus terhelés okozta negatív sorrendű összetevőket is elimináljuk, vagy jelentősen csökkentjük.

### 2.4. Napelem V-A karakterisztika mérés

A napelemeket használó rendszerek fejlesztése és gyártása során elengedhetetlen azok V-A karakterisztikáinak mérése. Erre a célra egy gazdaságos, automatizált mérő rendszert fejlesztettünk ki. Az általunk alkalmazott módszernek, az ismert megoldásoktól eltérően, az az elve, hogy a munkapontokat nem a mérendő elem kapcsaira kötött „elektronikus ellenállással” hozzuk létre, hanem dinamikus feszültségforrást alkalmazunk, amelynek feszültségét zérustól az üresjárású feszültségnek megfelelő értékig változtatjuk, ily módon a rövidzárás és üresjárás között minden munkapont létrejön. Változó feszültségű feszültségforrásként konverter helyett egy kondenzátort alkalmazunk, amelyet ha kisütött állapotban a mérendő napelem vagy rendszer kapcsaira kötünk, a napelem jelleggörbéjétől és a kondenzátor kapacitásától függő idő alatt (nagyságrendileg 10-100 ms) feltöltődik, így létrejön a rövidzárástól üresjárásig terjedő teljes tartomány valamennyi munkapontja, amelyből mintavételezéssel tetszőleges számú pont adatait eltárolhatjuk a jelleggörbe felrajzolásához.

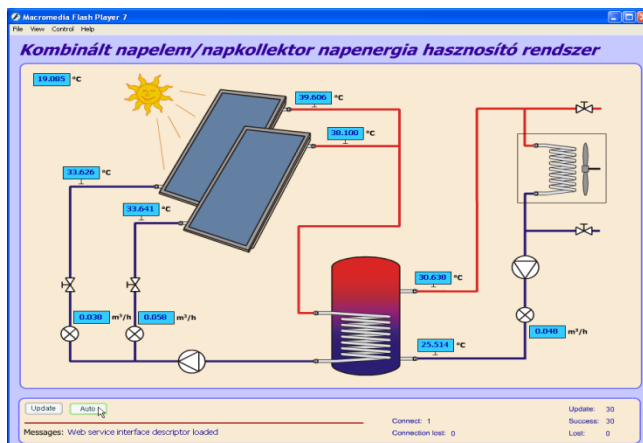
### 3. Az elért kutatási eredmények bemutatása

A pályázatban leírt kutatási munkaterv valamennyi feladatát maradéktalanul teljesítettük, néhány pontban az elért eredmények meghaladják a munkatervben foglalt kötelezettségeket. A 2. pontban írt rendszerekkel kapcsolatban a következőkben röviden összefoglaljuk a kutatás eredményeit.

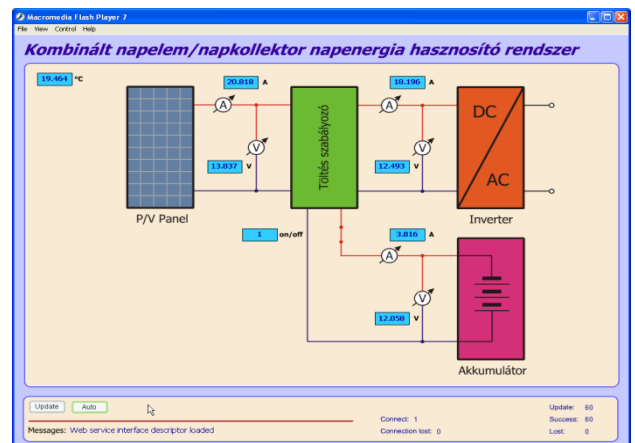
A 2.1 és 2.2 pontban vázolt rendszerek alapját képező *kombinált PV/T kollektorok* korábbi változatát továbbfejlesztve, sikerült olyan konstrukciót kidolgozni, amely a napelem résznek még kedvezőbb hatásfokot biztosít. Ezt a megoldást részletesebben a 2008. évi *IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC2008)* keretében tartott előadáson ismertettük [18].

A 2.1. pont szerinti, az 1. ábrán látható rendszerrel kapcsolatban részletes elméleti vizsgálatokat folytattunk a rendszer szabályozási stratégiájának kidolgozása terén, különösen a *DC/DC és a DC/AC konverterek szabályozásával* valamint a nemlineáris dinamika kérdéseivel kapcsolatos kutatási eredményeket emelhetjük ki, amelyekről több publikációban beszámoltunk [3,4,5,6,7,11,13,14]. A rendszer statikus és dinamikus viselkedésének tanulmányozására számítógépes szimulációs programokat dolgoztunk ki, amelyekkel a rendszer tanulmányozható, és amelyek segítséget nyújtanak a rendszer elemek tervezésekor.

A 2.2 pontban leírt *hő-, és villamos energia termelő rendszernek* részletesen kidolgoztuk a laboratóriumi szintű terveit, és ez alapján megvalósítottuk a rendszert, amelyen mérés sorozatot hajtottunk végre. A rendszer mikrokontrolleres vezérlő és felügyeleti egysége WEBen keresztül is elérhető, a jellemző paraméterek leolvashatóak, illetve alapjeleket lehet módosítani. A felhasználó számítógépén megjelenő kliens képernyők a 2. és 3. ábrán láthatók. A rendszer mikrokontrolleres szabályozó és felügyeleti egységét a 4. ábrán mutatjuk be. A kutatási eredményeket közzé tettük az IEEE ISIE2007 (Vigo, Spanyolország) illetve az IEEE PESC2008 (Orlando, USA) konferencián [15,189].

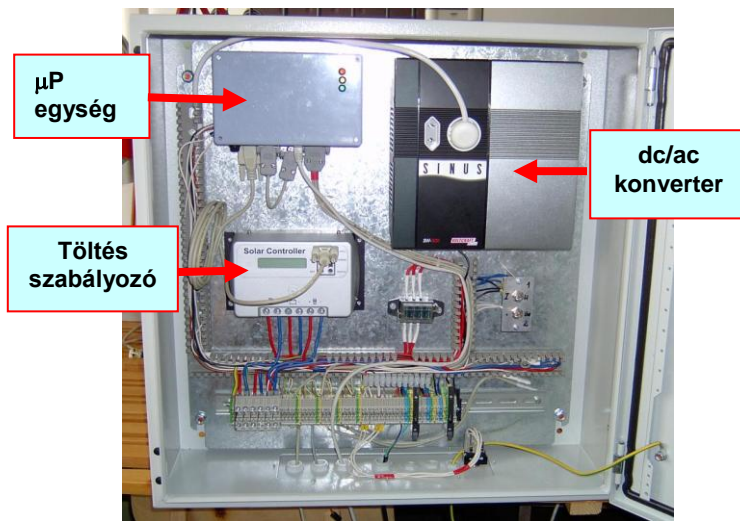


2. ábra. Kliens képernyő: termikus oldal



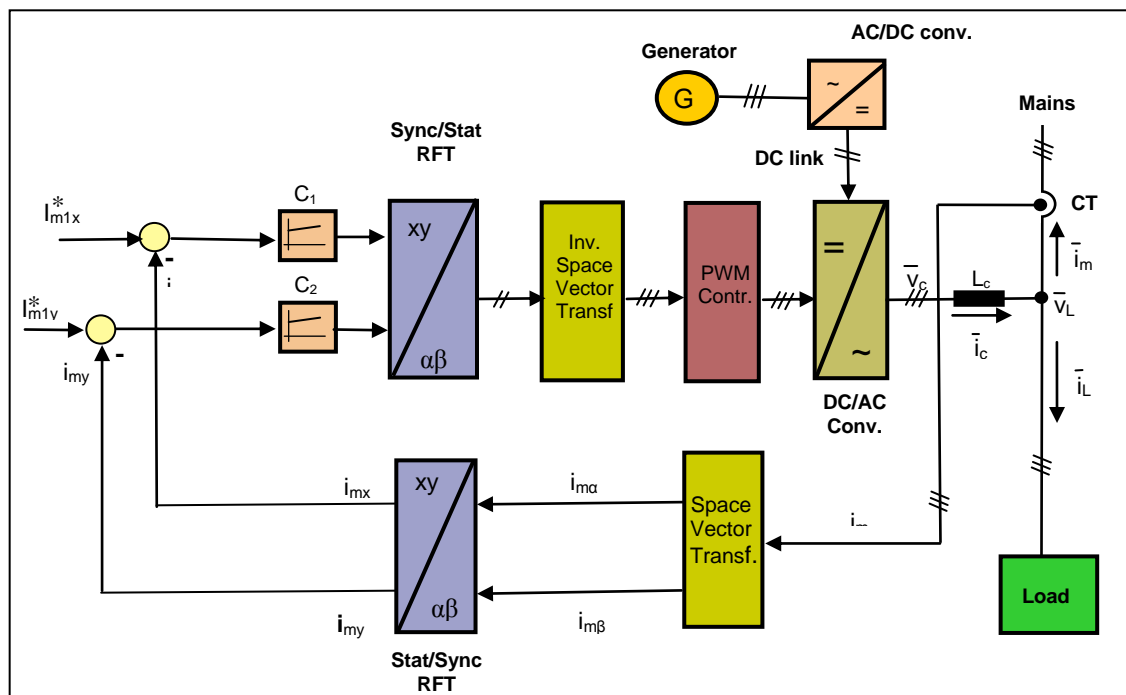
3. ábra. Kliens képernyő: villamos oldal

A hálózatkondicionálás (PQC) területén aktív kutatási tevékenységet folytattunk, és új tudományos eredményeket értünk el.



4. ábra. PV / T rendszer mikrokontrolleres szabályozó egysége

Az eredményeket több nemzetközi fórumon és publikációban ismertettük [1,2,8,10]. Az 5. ábrán látható blokkvázlat szerinti rendszer, amelynek működése a Park (az angol nyelvű szakirodalomban *Space*) vektorok elméletének alkalmazásán alapszik, és amelyet a 2006. évi EPE-PEMC konferencián mutatunk be [9], az eddig ismert PQC megoldások közül a leguniverzálisabb, egyaránt alkalmas a meddő teljesítmény kompenzálására, a felharmonikus áramösszetevők eliminálására és az aszimmetrikus terhelésből adódó negatív sorrendű áram komponensek kiküszöbölésére. A rendszer elméleti kidolgozását és számítógépes szimulációját elvégeztük, amelyek meggyőzően mutatják a megoldás előnyös tulajdonságait.

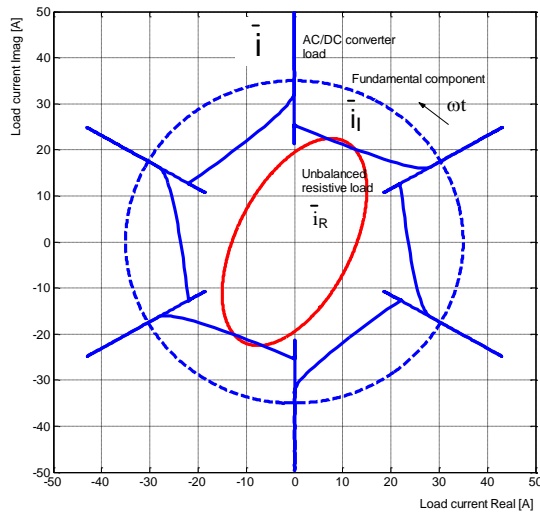


5. ábra. Park vektorok alkalmazásán alapuló hálózatkondicionáló rendszer blokkvázlata

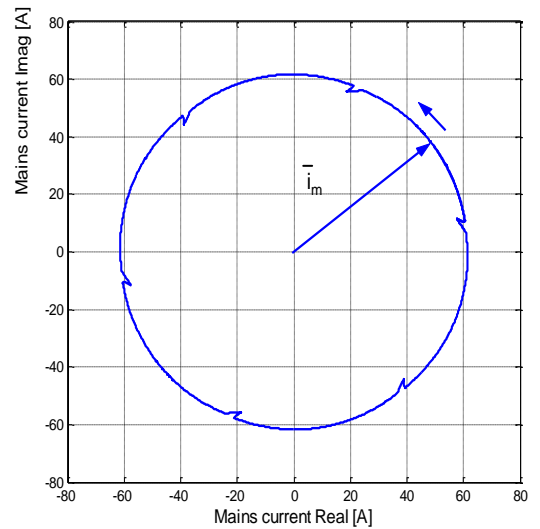
A 6. és 7. ábrán egy nagy felharmonikus áramösszetevőket és negatív sorrendű áramokat tartalmazó hálózati áram illetve a PQC berendezés hatására korrigált áram Park vektorának pályája látható. A publikált módszer felkeltette a franciaországi Belforti Műszaki Egyetemen (University of Technology of Belfort-Montbeliard, Belfort, France) dolgozó kollégák érdeklődését, akik velünk konzultálva, megvalósították a rendszer implementációját, így laboratóriumi mérésekkel igazolták az elméleti eredményeink helyességét. A laboratóriumi modellel kapcsolatos közös kutatásról a 2008. évi IEEE IECON2008 konferencián tartott előadásban számoltunk be [17].

A 2.1. pontban leírt rendszer kutatásával kapcsolatos új eredmények születtek az *ultra nagy fordulatszámú* ( $n=10^5$  ford/perc) turbina-generátor gépcsoport üzemével összefüggő kérdésekben. Újszerű megoldásokat dolgoztunk ki a generátorként alkalmazott aszinkron motor főmező fluxusának biztosítására, a nagyon magas fordulatszám miatt

rendkívül kritikus szabályozási és védelmi funkciók megoldására, továbbá újszerű jelenségeket tártunk fel a konverterről táplált aszinkron motor üzemében, amelynek további kimunkálása a közeljövő kutatási feladata lesz.



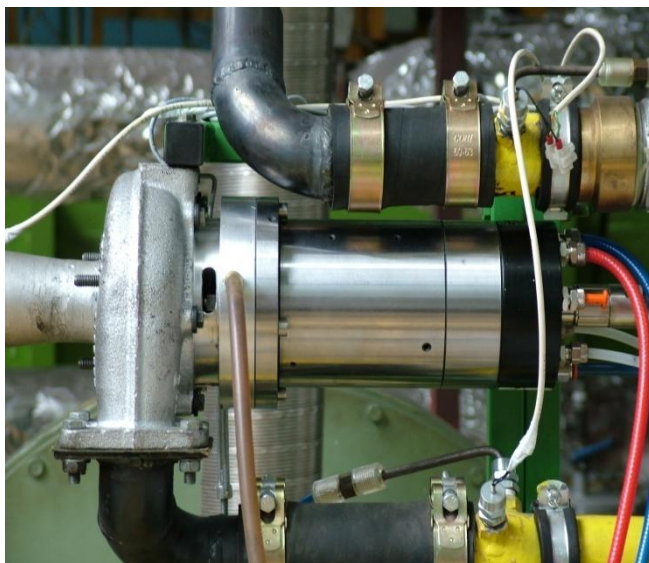
6. ábra. Háromfázisú AC/DC konverterből valamint aszimmetrikus ohmos fogyasztóból álló terhelés áramának Park vektor trajektóriája



7. ábra. A hálózati áram Park vektor trajektóriája a PQC berendezés alkalmazása esetén

A kísérletekhez alkalmazott turbina-generátor gépcsoport, valamint a számítógép irányítású AC/AC konverter egység fényképe a 8. és 9. ábrán látható. A témával kapcsolatos kutatási eredményekről a [6,16,19] publikációkban számoltunk be.

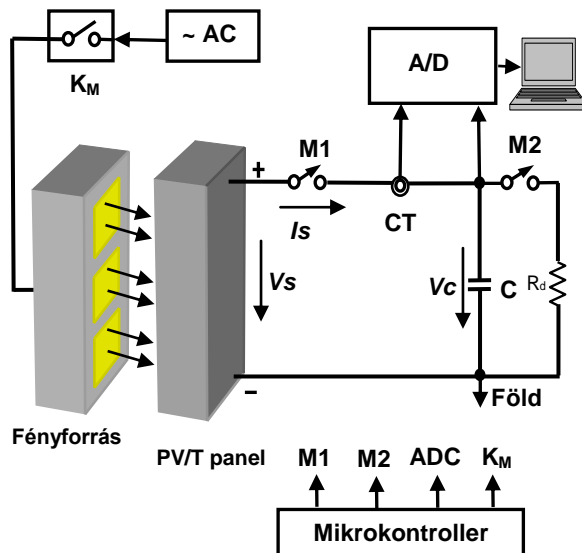
Az *automatizált napelem karakterisztika mérő berendezés* laboratóriumi kivitelű változata elkészült, azt részletesen teszteltük, a vizsgálat eredményei azt mutatják, hogy a gyakorlatban jól használható berendezés alakítható ki az ismertetett elvek alapján. A berendezés sematikus blokkvázlatát a 10. ábra mutatja. A témával kapcsolatos eredményekről a [15,20] publikációkban adtunk számot.



8. ábra . Ultra nagy sebességű turbina-generátor gépcsoport



9. ábra. A generátor számítógép vezérlésű AC/AC konvertere



10. ábra. A napelem mérő berendezés blokkvázlata

További eredmények:

Nagyrészt az OTKA támogatásával végzett kutatásainkhoz kapcsolható, hogy a megújuló energiaforrások, ezen belül a napenergia hasznosítása jelentős súllyal megjelent az egyetemi oktatásban. Az elmúlt 4 évben az angol nyelvű Integrált Mérnökképzés keretében, összesen több mint 20 Integrált Projekt és Diplomaterv került kiadásra, hallgatóink a Tudományos Diákköri Konferenciákon (TDK) díjakat nyertek ebben a témában készült dolgozataikkal. 2009-ben két hallgatónk a *Solar Energy Powered Electric Car* c. dolgozatával és a megvalósított kísérleti járművével az egyetemi TDK-n nagy sikert aratott, és a szekciójában első helyezést ért el, így részt vesznek az országos konferencián is. A napelem mérő berendezés pedig hallgatói laboratóriumi mérés tárgya lett. A témából készíti PhD értekezését Varga Zoltán doktoranduszunk, aki már hallgatóként is aktívan részt vett a napenergia hasznosítással kapcsolatos munkákban.

A projekt 2008. év végén lezárult, de még több publikáció jelenik meg 2009-ben is a témából. Benyújtottunk több konferencia cikket, valamint rövid időn belül esedékes két *IEEE Transaction* cikk benyújtása is.

Az elért eredmények gyakorlati, ipari hasznosítását folyamatosan vizsgáljuk. Meggyőződésünk, hogy a kombinált PV / T rendszer, valamint a napelem mérő berendezés további kutató-fejlesztő munkával ipari gyártásba vihető lehet.

A nagysebességű turbina-generátor rendszerrel kapcsolatos kutatásainknak köszönhető, hogy részt vehetünk a 2009-ben nagyon jó eséllyel induló nagyszabású, norvég finanszírozású egyetemi projekt megvalósításában.