



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

Óbudai Egyetem
Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar
Automatika Intézet

Költségoptimalizált hálózati kihasználtság szabályozás

HMKE szabályozása a hálózat kihasználtsági fokának javítása érdekében

Készítette: Szalai Gábor

Neptun kód: D261EP

Utolsó módosítás: 2024.10.13



Tartalom

Bevezető.....	4
Miért probléma a hálózatnak a napelem?	5
Miért probléma a plug-in autó?	7
Túlpanelezés.....	9
Jelentése	9
Oka	9
Hatása	9
Konklúzió	10
„Piacon” levő megoldások	10
A Visszwatt rendszer	10
Mágnescapcsolós	10
Inverterkommunikáció alapú	10
Victron Energy.....	11
Saját rendszer.....	12
Inverter szabályozás.....	13
PRI Interfész az inverteren	13
Modbus interfész az inverteren	14
Interfész a teljesítménymérőn	15
Interfészek közti hardver	16
Fejlesztői környezet	19
A program	20
WiFi kapcsolat	21
Adatlekérés a Shelly EM-től	22
Modbus kommunikáció.....	24
Inverter teljesítményének számítása	26
Kapcsolat a HomeAssistant rendszerrel.....	29
HomeAssistant	31
Nagy fogyasztók vezérlése	32
Plug-In jármű töltése.....	32
Szabályozás megvalósítása.....	33
Egyéb funkciók	37
Költségszámítás.....	38



Költség értékelés.....	39
Megbízhatóság	39
Fejlesztési lehetőségek	40
Összegzés	41
Források	42



Bevezető

Napjainkban erősen emelkedő tendenciát mutatnak a villamoshálózatra csatlakoztatott háztartási méretű kiserőművek (a továbbiakban: HMKE) – elsősorban napelemes rendszerek – száma. A nagymértékű növekedés, és a megújuló energiaforrások sztochasztikussága, kombinálva a Plug-In (villamosenergia-hálózatról tölthető) elektromos és hibrid autók úttörésével és jellemzően a tulajdonosok éjszakai töltési szokásaival, kihívások elé állítják a villamosenergia-hálózatot.

A helyzetet tovább súlyosbítja a Magyarországon is jellemző „túlpanelezés”¹, amivel a HMKE tulajdonosok megpróbálják villamosenergia termelés mértékét növelni inverter csere nélkül. Az alapgondolat nem rossz, azonban az inverter teljesítménykorlátja miatt erős napsütésben nincsen kihasználva a napelempanellek által termelhető energiamennyiség maximuma akkor sem, amikor egyébként lenne villamos fogyasztó, ami elfogyasztaná a többlet energiát.

Ezekre a problémákra dolgoztam ki egy komplett megoldást, ami áll egy pici relés panelből, egy WLAN kommunikációra képes mikrokontrollerből, és egy teljesítménymérőből.

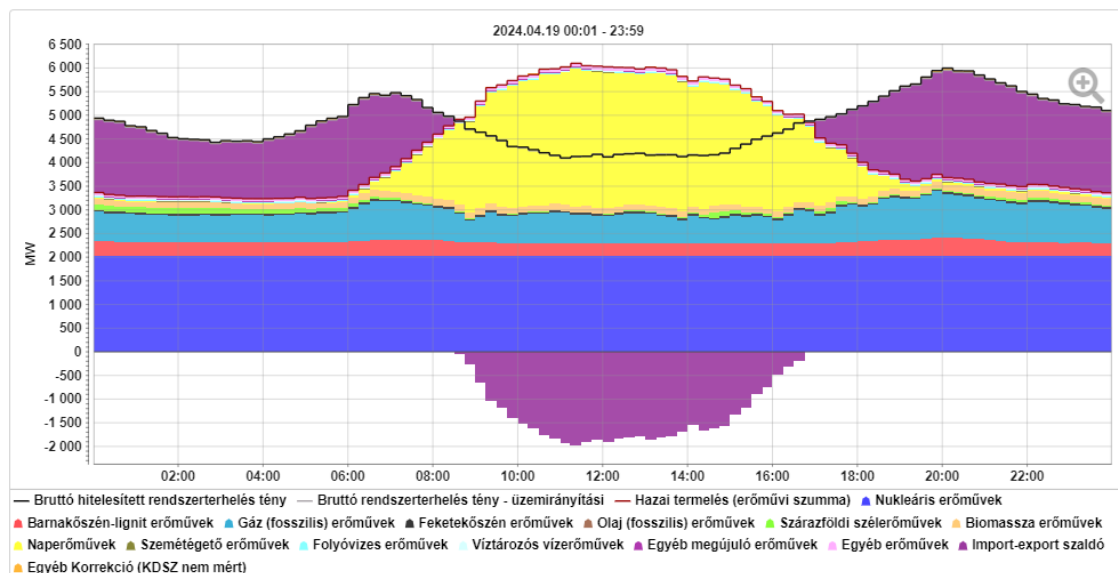
Ez a dolgozat a magánemberek számára is elérhető megoldásokat taglal, alapvetően a napelemmel, és nagy fogyasztóval rendelkező (egyre szélesedő) réteg számára nyújt még most, a terjedés hajnalán egy megbízható szabályozórendszert.

¹ Az inverter leadható legnagyobb teljesítményénél nagyobb összteljesítményű napelempanellek használata.

Miért probléma a hálózatnak a napelem?

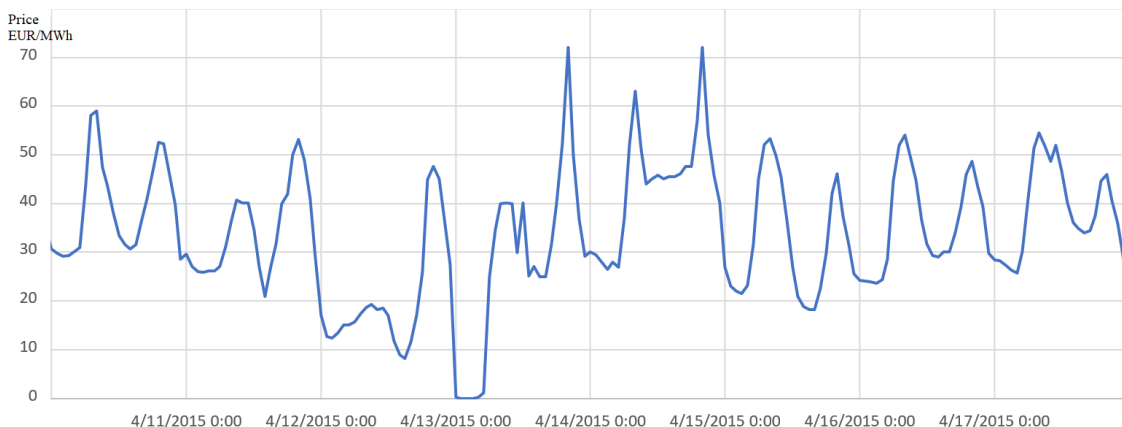
A megújuló energiaforrások termelési karakterisztikája kifejezetten sztochasztikus, így nagyon nehéz dolguk van az erőművi menetrendkészítőknek, és kialakulhatnak olyan szituációk, amikor a termelés a várthoz képest oly mértékben megnő, hogy a villanyárampiacon negatív villamosenergia ár is felléphet. [1] Ez gazdaságilag nem előnyös.

Továbbá probléma, hogy a hálózatba beépített teljesítmény majdnem felét [4] a napelemek adják. El lehet képzelni, hogy tavasszal minden egyes napon megjelenik 3 GW teljesítmény a hálózaton, tart pár órán keresztül, aztán ez mind eltűnik, és importra szorul az ország. (Paks zsinórteljesítménye volt 2024 április közepén nagyságrendileg 2 GW) [4]



1. ábra MAVIR tájékoztató jellegű energiamix közlése, energiaszektorokra bontva [4]

Ezt az importot is kontextusban kell kezelni, ugyanis a villanyáram piaci ára nemhogy napról napra, de óráról órára változik. [5]



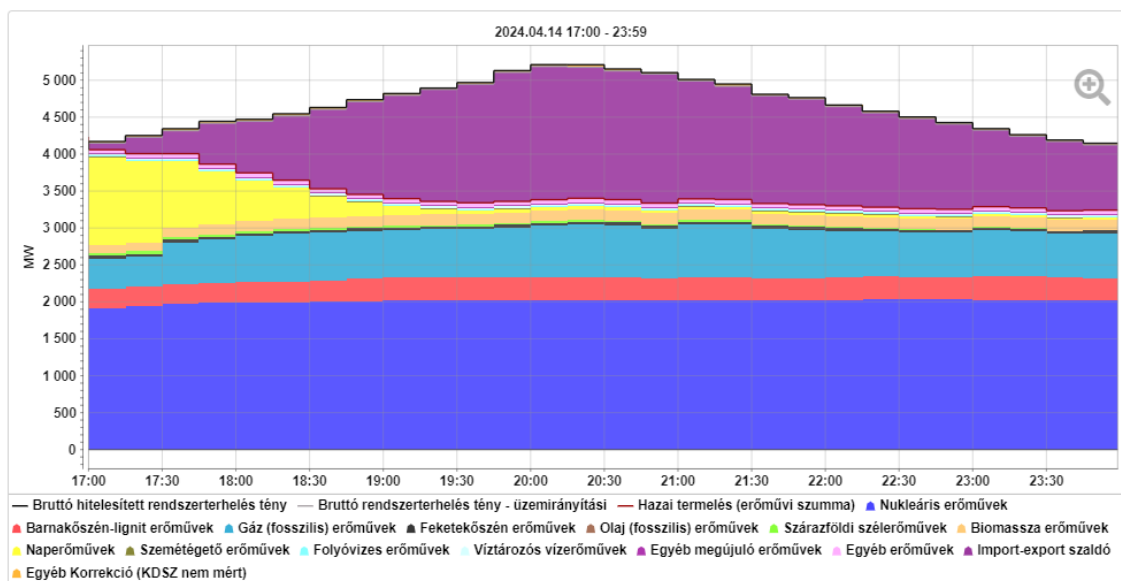
2. ábra Óráról órára változó villamosenergia árak [5]

Kijelenthető, hogy a villamosenergia árak akár duplájára is nőhetnek a napi minimum értéküknek. A csúcsok a délelőtti órákban, valamint a késő délutáni, éjszakai órákra esnek. Napközben, dél és kora délután, amikor a napelemek a legnagyobb teljesítményt tudják nyújtani, eladjuk olcsón a fel nem használt áramot, és amikor importra szorulunk, akkor drágán visszavásároljuk.

A problémát technikai oldalról szemlélve megállapítható, hogy a fogyasztók, a lakossági ügyfelek jellemzően a 0.4 kV-os hálózatra termelnek rá, tehát a kisfeszültségű (a továbbiakban: KiF) hálózatnak kell elbírnia ezt a hatalmas teljesítménycsúcsot, ami a teljesítmény nagysága miatt nagyobb transzformátor beépítését igényli a csúcsidepszakban. Csúcsidepszakon kívül, például késő délután és hajnal között, vagy nyártól kora tavaszig azonban ezek a transzformátorok nincsenek kihasználva, mintegy „túlméretezett” transzformátorként állnak az oszlopokon. Ha ezek a megfelelő teljesítményű transzformátorok nem kerülnek telepítésre, akkor a lakossági ügyfeleknél előfordulhat (elő is fordul), hogy a hálózati feszültség annyira megemelkedik, hogy a HMKE a kimenet védelme miatt leállítja a termelést. Ez a hálózati feszültség szabványban (és szerződésben) foglalt értékének be nem tartását jelenti, ami az ügyfélnek termeléskiesést jelent. A szolgáltató jelenlegi „egyszerű” fejlesztés nélkül alkalmazott megoldása az, hogy a transzformátor feszültség áttételét változtatva alacsonyabb szintre szabályozza a KiF hálózat feszültségértéket, így a napelemes rendszerek képesek betermelni a hálózatba. Azonban a visszatermelés csökkenésekor, teljes leállásakor az alacsony feszültség szint és a fogyasztók által megjelenő teljesítmény igény együttese olyan alacsony hálózati feszültséget eredményez, amely újra - jelen esetben ellenkező előjellel - az ellátásbiztonságot veszélyezteti.

Miért probléma a plug-in autó?

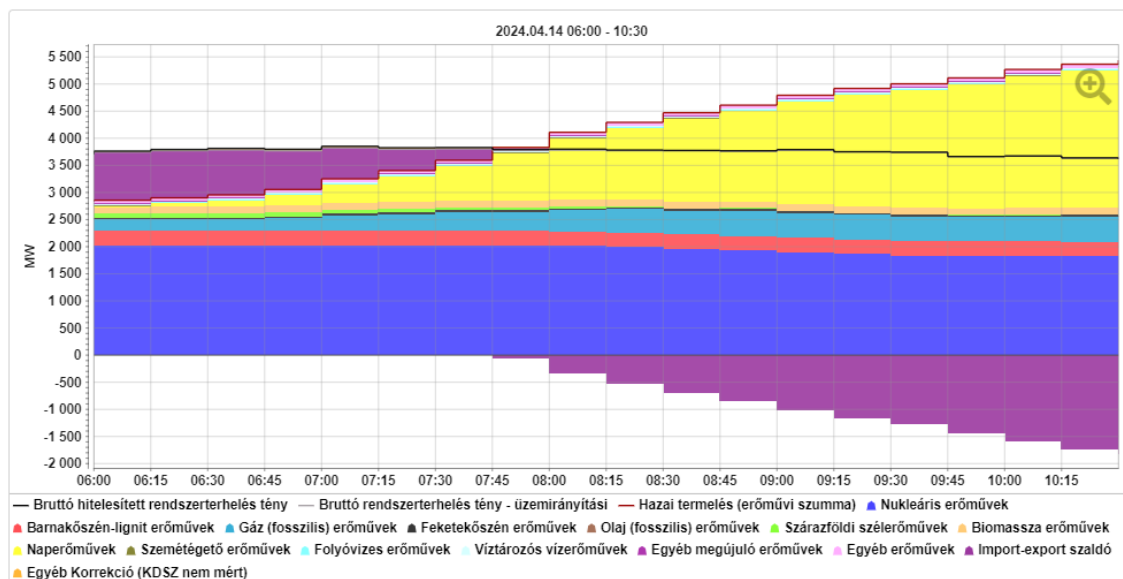
A napelemtelepítésekkel együtt nagymértékben terjednek a villamos hálózatról tölthető járművek, [2] olyan méretű akkumulátorokkal, melyek két-tízszeresét is el tudják tárolni egy családi ház napi villamosenergia fogyasztásának. [3] Ezeket az akkumulátorokat a tulajdonosok tölteni szeretnék, nyilvánvalóan a legolcsóbb módon, ami jellemzően az otthoni hálózati áramot fogja jelenteni, ráadásul akkor, amikor hazaérnek. Ez normál esetben 18:00-19:00 közt történik. Ekkor felteszik az autót tölteni. A töltési időt a szükséges akkukapacitás (betöltött energiamennyiség igény) és az autóban levő fedélzeti töltő teljesítményének hányadosa adja meg. Tegyük fel, hogy 14 kWh/100km-es átlaggal autózott a tulajdonos 50 km-t, és ezt szeretné visszatölteni az autójába. Ez 7 kWh energia lesz. Az autohoz járó Electric Vehicle Supply Equipment-ek (a továbbiakban EVSE) nagy része 10 A-t engedélyez az autó részére a fedélzeti töltő által a felvehető áramra, tehát folyamatos ~2300 W-tal terheli a hálózatot. A hatásfok általában 85% körül van (beleszámítva az autó fedélzeti rendszerének fogyasztását), tehát az akkumulátor töltésére fordítódó teljesítmény körülbelül 2 kW. A 7 kWh-t 3.5 óra alatt fogja az autó felvenni a hálózatról. Tehát az autó folyamatosan töltődni fog 19:30-21:30 időszámban is, amikor a legmagasabb az importált villamosenergia mennyisége.



3. ábra MAVIR 2024.04.14 17:00-23:59

Ebből persze a felhasználó semmit nem érez, ameddig nem az aktuális piaci áron történik a felvett energia elszámolása, mert a veszteség a szolgáltatónál realizálódik.

Ha a felhasználó energia-, és környezettudatos, – és lehetősége van az autót napközben otthon tölteni – munkába menet előtt elindítja az autó töltését, így az autó nagyrészt akkor töltődik, amikor a napelemek által termelt energia részaránya nagy a hálózaton. Ekkor a nagy egészt tekintve, már szebb a mérleg, azonban a töltés fele még mindig tartalmaz nem elhanyagolható mennyiségű import áramot.



4. ábra MAVIR 2024.04.14 6:00-10:30

Megoldás lehet az autó töltésének időzítése is, azonban erre még ma sem képes minden elektromos autó. Elvileg lehetséges a töltésindítást egy háztartási időzítővel megoldani, azonban nem tanácsos egy ilyen nagy fogyasztót kapcsolón keresztül bekötni a potenciális érintkezési problémákkal együtt járó melegedési gondok miatt. Fali töltővel (ez is EVSE) - néhány típust kivéve - gyakorlatilag lehetetlen időzíteni, egyrészt mert az eszközök nem tudják ezt a funkciót, másrészt mert az autók egy része az időzár után nem hajlandó töltést indítani abban az esetben, ha az EVSE autóoldali csatlakozója csatlakoztatva van, és nem tud energiát kérvényezni a töltőtől. (Ilyen például a Mitsubishi i-MiEV, a Peugeot iOn, és Citroen C-Zero is.)

Túlpanelezés

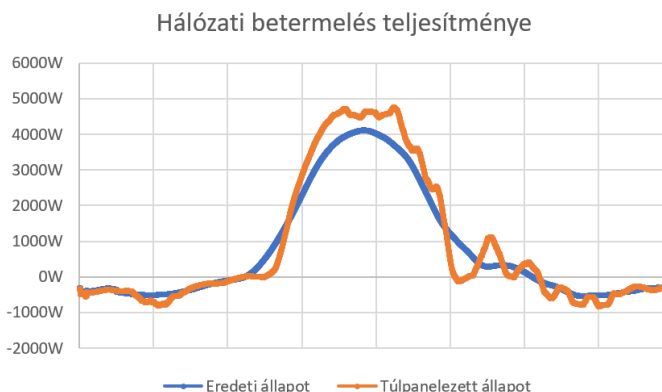
Jelentése

Az inverter névleges teljesítményénél számottevően nagyobb névleges teljesítményű panelmennyiség telepítése és csatlakoztatása az inverterhez.

Oka

A már napelemet használók a villamosenergia igényük növekedése miatt, bizonyos esetekben bővíteni szeretnék a rendszerüket, ám a Magyar jogszabályok értelmében másikk/további invertertípust csak újra engedélyeztetéssel engedélyezett a hálózatra kapcsolni, ami egy hosszadalmas és bonyolult folyamat, valamint a környező jogszabályok változása miatt esetenként háromfázisra történő bővítést is igényelne. A háromfázisú inverterek esetén újabb problémák jelenhetnek meg az invertergyártók különleges (különös) megoldásai miatt. (Ilyen különös megoldás például az, hogy a háromfázisú inverterek elenyésző része képes aszimmetrikusan termelni terhelés függvényében, a nagyrészüket csak és kizárólag szimmetrikus termelésre képes. Ez problémát jelenthet bizonyos Plug-In autók egyfázisú teljesítményfelvétele miatt.)

A fentiek miatt a napelemes HMKE tulajdonosok jellemzően a túlpanelezést választják. Ebben az esetben az inverter teljesítménye válik egy bizonyos időszakban a szűk keresztmetszetté, de összességében nagyobb napi termelést jelent mint a túlpanelezés előtt.



5. ábra Túlpanelezés hatása a betermelési teljesítményre
(A két diagram nyilvánvalóan nem egyidőben készült, ezért az eredeti állapotnál más a felfutás meredeksége.) (saját forrás)

Azonban ez a megoldás azt jelenti, hogy a csúcsidőszakban nem lehetséges minden potenciálisan megtermelhető energia megtermelése akkor sem, ha a teljes termelést felvinné a ház. Ebből a nézőpontból elmondható, hogy kárba megy az a néhány kilowattóra.

Hatása

Megnő a napi termelt energia mennyisége, de természetesen nem a hozzáadott „napelemes teljesítmények” arányában, hiszen amikor a napelempanelek teljesítménye eléri az inverter teljesítményét, akkor a hálózatra kapcsolt teljesítmény nem tud tovább növekedni. A betermelési teljesítmény tetején látható [5. ábra] egy közel vízszintes szakasz, ami az inverter általi limitációt mutatja. Az adatokban az ingadozást ilyenkor az inverter melegekedése-hűlése, és az emiatt fellépő teljesítmény csökkenés-növelés okozza.



Konklúzió

Ha a túlpanelezésből eredő teljesítményt is szeretnénk felhasználni, akkor nagyobb teljesítményű inverterre van szükség. Azonban nem lehet nagyobb teljesítményt visszatáplálni a hálózatba mint amiről a HMKE szerződés szól (jogszabályi oldal), vagy amennyit a hálózati biztosító enged. A jogszabályi tiltással – tekintettel a dolgozat technikai jellegére – nem kívánok foglalkozni. A túlfogyasztás igényből eredő túláram problémára azonban létezik piaci megoldás.

„Piacon” levő megoldások

A Visszwatt rendszer

Kétféle megoldás érhető el a piacon, mindkettőnek ugyanaz a célja: megakadályozni a hálózati visszatáplálást. Ez a megoldás egyáltalán nem flexibilis, mert nem állítható be rajta egy adott hálózati betermelési teljesítmény a nulla kivételével.

Mágneskapcsolós

[6] Csúnyábban fogalmazva főáramú megszakítás. Amint a rendszer hálózati visszatermelést érzékel, azonnal kiszakaszolja az invertert. Tehát ha 5000 W-ot vesz fel épp otthon egy nagy fogyasztó, és egy pillanatra kisüt a felhők mögül a nap az 5.5 kWp teljesítményű napelemrendszerre, megjelenik 5.3 kW teljesítmény az inverter AC oldalán, akkor azonnal 300 W kerülne visszatáplálásra a hálózatba. Ebben a pillanatban old a mágneskapcsoló, és ettől kezdve mind az 5000 W felvett teljesítménnyel a hálózatot terheljük, mivel a Visszwatt rendszer leválasztotta a napelemes invertert a hálózatról.

Ezek után a visszakapcsolás perceket vesz igénybe, mert az inverterek várnak egy meghatározott időt a termelés újrakezdése előtt.

Inverterkommunikáció alapú

Ez a megoldás az inverterek RS485 (általában ModBus) csatolófelületét használja, és az aktuális felvett teljesítmény függvényében kommunikálja le az inverterrel, hogy mekkora legyen az aktuális termelési teljesítmény.

Ez egy jobb megoldás, kvázi analóg szabályozást tesz lehetővé, viszont nem találtam hiteles forrást arról, hogy milyen szabályozási idővel dolgozik a rendszer. Saját méréseimből tudom, hogy a SolarEdge inverterek a hardveres, RRCR csatlakozófelületen is hét (7) másodperces időállandó letelte után kezdenek csak el rászabályozni a megadott kimeneti teljesítményre. Ha változik az érték, újabb 7 másodpercnek kell eltelnie az újabb szabályozási pont beállításáig, ami után további másodpercek kellenek a beállított teljesítménymaximum elérésére.

Költségek

Sajnos költségkalkulációt nem tudok beszúrni, mert a felkeresett telepítéssel foglalkozó vállalatok közül senki nem válaszolt a TDK munka beadási határidejéig (és kétlem, hogy valaha is fognak, mert volt a válaszra több, mint egy hónapjuk).



Victron Energy

A Victron Energy alapvetően csak energiatárolóval megtámogatott rendszereket kínál, viszont ezekből közel készre szerelt megoldásokat biztosít. Sajnos a már napelemmel rendelkező végfelhasználók nagy részének inverter cserével is együtt jár a Victron Energy rendszer telepítése, mivel az csak nagyon kevés invertertípussal képes együttműködni.

Ez azt jelenti, hogy egy rendszerfejlesztés úgy indul, hogy minden valószínűség szerint kidobásra kerül az eddig szolgálatot teljesítő inverter, és be kell szerezni kettő-négy panelenként egy 60.000Ft-os akkumulátortöltő egységet. [18] Ezen felül kell egy 48V/230V inverter, egy hálózati teljesítménymérő (EM540) és az ezeket összekapcsoló „GX” eszköz. Nagy fogyasztót nem tud kapcsolni a Victron rendszere, ez alól kivétel az elektromos autó töltő, amelyet egy opcionális extraként kínálnak.

A kialakított rendszer képes lehet adott hálózati betermelésre szabályozni, elektromos autó töltést napelemes termelés függvényében indítani és leállítani.

Azonban nem képes konstans hálózati teljesítménnyelvitelre szabályozni, nem tud semmilyen nagy fogyasztót (hűtőt, mosógépet, kenyérsütőt, teafőzőt, sütőt...) kapcsolni, valamint együttműködni a már meglevő napelemes rendszerekkel. Természetesen léteznek olyan Fronius és SolarEdge inverterek, amikkel képes együttműködni a Victron Energy rendszere, és akkor kihagyható a sok akkumulátortöltő egység, de a végfelhasználókhoz általában nem egy profi Fronius kerül telepítésre, hanem egy olcsó Growatt, SAJ, vagy SunPlus.



Saját rendszer

Az általam épített rendszer képes egy konfigurálható hálózati betermelési teljesítménymaximumot tartani, képes több invertert is kezelni, és képes egy nem szabályozható inverter teljesítményét is figyelembe venni a második, szabályozható inverter szabályozásakor. Valamint képes a nem szabályozható inverter névleges teljesítményére szabályozni a hálózati betáplálási teljesítményt, ezáltal szimpla túlpaneelésnek látszik a megoldás a hálózat oldaláról.

Az eddigiekből következik egy hihetetlenül nagy előny. Ha a nap besugárzása lehetővé teszi, és kellően nagy fogyasztó üzemel a háztartásban (például elektromos autó töltődik), akkor képes a szabályozható invertert is teljes teljesítményre állítani, így lehetővé téve minden telepített napelempanel legmagasabb fokú kihasználását, nem túllépve a hálózati visszatáplálás maximálisan engedélyezett értékét.

Ezen felül még egy hallatlanul nagy előnye van ennek, amire jelenleg semmilyen piaci rendszer nem képes.

A rendszer képes bizonyos autótípusok (jelenlegi konfigurációban minden 2012 után gyártott Tesla márkájú jármű) töltési teljesítményét (pontosabban hálózati oldalon felvett áramerősségét) amperenként változtatni. Ezáltal automatikusan összehangolja a töltést a napelemekkel. Megadható a rendszernek, hogy fix teljesítménnyel töltsön az autó, vagy fix hálózati betermelés mellett vegyen fel minden felesleget az autó, vagy éppen fix teljesítményt fogyasszon a hálózatról, és minden aktuális termelést szintén vegyen föl a napelemekről. Természetesen képes a rendszer nulla hálózati betermelésre is szabályozni az elektromos autó töltést: más szavakkal, úgy szabályozza az autó töltését, hogy a hálózat felé és a hálózat felől nem történik energia szállítás. Ennek a megoldásnak különösen a hálózati szaldó elszámolás hiányában van rendkívüli létjogosultsága. A rendszer az autó töltését elindítja, amikor az aktuális inverter összteljesítmény ezt indokolja, követi a napi termelés alakulását, majd este, amikor a napelemek indokolják, kikapcsolja a töltést. Mindezen folyamatokat teljesen automatikusan, az autó hálózati csatlakozójának csatlakoztatását követően emberi beavatkozás nélkül végzi a rendszer.

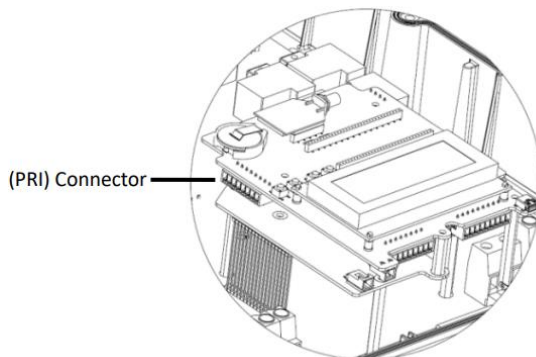
Természetesen a rendszer képes az inverterekből kinyert adatok szerint nyitni-zárni az inverterek környékén a megfelelő nyílászárókat, ezáltal fokozza forró nyári napokon az inverterek hűtését, ami miatt nő a termelés, valamint meghosszabbodik az inverterek élettartama. A nyílászárók napvégi, illetve hőmérsékletre történő csukása is teljesen automatikus.

Ezt a komplex rendszert két részre tagolva mutatom be: „Inverter” szabályozás, és „Nagy fogyasztók vezérlése”.

Inverter szabályozás

PRI Interfész az inverteren

A rendszerben a szabályozható inverter szerepét egy SolarEdge SE3500 (nem HD Wave) látja el, melynek a CPU lapján van egy PRI (Power Reduction Interface) csatlakozó. Ez lehetővé teszi az inverter teljesítményének korlátozását, egy négybites, bináris szám reprezentálásával a csatlakozó öt tűskéjén. (Az ötödik tűske a GND.) Az inverter minden reprezentálható értékhez rendel egy százaléértéket, mely az inverter névleges maximális



6. ábra SolarEdge SE3500 Power Reduction Interface [7]

Bináris kombináció a PRI-n	Hozzá tartozó teljesítménylimit [W]
0000	0
0001	250
0010	500
0011	750
0100	1000
0101	1250
0110	1500
0111	1750
1000	2000
1001	2250
1010	2500
1011	2750
1100	3000
1101	3250
1110	3500
1111	0

teljesítményének adott százaléka korlátozza a maximális hálózat oldali teljesítményt. A százaléérték a felhasználó által beállítható, biztonsági okokból a '0000' és '1111' kombinációkat azonnal 0%-ra is állítottam. Az inverterhez a koncepció validálása érdekében csak 2.8 kWp napelempanel csatlakozik, így 3000 W fölött gyakorlatilag minden érték fölösleges.

Felmerülhet a kérdés, miért nem Modbus kapcsolaton keresztül kerül a teljesítménylimit lekommunikálásra?

Azért, mert a SolarEdge inverterek a SunSpec implementációt követik, és nincsenek regisztereik a

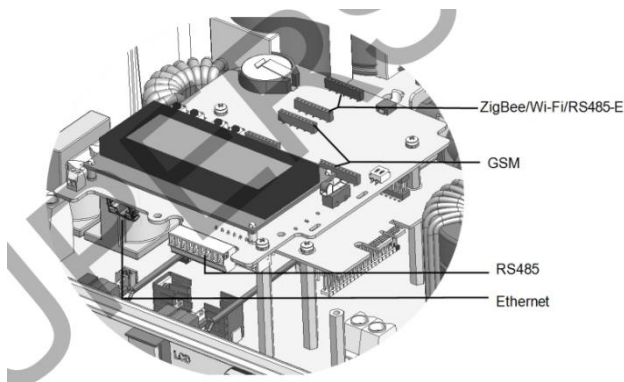
teljesítménylimit beállításához. A Fronius invertereknek elméletileg van, de teszt rendszer lévén a korlátozott anyagi erőforrások csak a fenti inverter beszerzését tették lehetővé.

Modbus interfész az inverteren

A szabályozás pontosítása érdekében szükséges információ az inverter aktuális teljesítménye, amit a beépített RS485 csatlakozón, Modbus szabványon keresztül lehet lekérni az invertertől. Erre a SolarEdge az úgynevezett „SunSpec”

implementációt használja, amely kommunikáció egy definiált, bárki számára elérhető leírás, amiben megtalálhatóak az egyes paraméterek regiszterértékei, azok formátumozása,

szorzótényezői, és az adatokat tároló regiszterek típusai. Bizonyos inverterek támogatnak Modbus TCP-t is, ami nem igényel RS485 átalakítót, nem igényel extra vezetékezést, de a megoldással a lehető legtöbb invertert szeretném támogatni, így a Modbus RTU-t választottam, mert ezt szinte minden inverter támogatja. [10]



7. ábra SolarEdge RS485 csatlakozó [9]

Address		Size	Name	Type	Units	Description
(base 0)	(base 1)					
40069	40070	1	C_SunSpec_DID	uint16		101 = single phase 102 = split phase 103 = three phase
40070	40071	1	C_SunSpec_Length	uint16	Registers	50 = Length of model block
40071	40072	1	I_AC_Current	uint16	Amps	AC Total Current value
40072	40073	1	I_AC_CurrentA	uint16	Amps	AC Phase A Current value
40073	40074	1	I_AC_CurrentB	uint16	Amps	AC Phase B Current value
40074	40075	1	I_AC_CurrentC	uint16	Amps	AC Phase C Current value
40075	40076	1	I_AC_Current_SF	int16		AC Current scale factor
40076	40077	1	I_AC_VoltageAB	uint16	Volts	AC Voltage Phase AB value
40077	40078	1	I_AC_VoltageBC	uint16	Volts	AC Voltage Phase BC value
40078	40079	1	I_AC_VoltageCA	uint16	Volts	AC Voltage Phase CA value
40079	40080	1	I_AC_VoltageAN ¹	uint16	Volts	AC Voltage Phase A to N value
40080	40081	1	I_AC_VoltageBN ¹	uint16	Volts	AC Voltage Phase B to N value
40081	40082	1	I_AC_VoltageCN ¹	uint16	Volts	AC Voltage Phase C to N value
40082	40083	1	I_AC_Voltage_SF	int16		AC Voltage scale factor
40083	40084	1	I_AC_Power	int16	Watts	AC Power value
40084	40085	1	I_AC_Power_SF	int16		AC Power scale factor
40085	40086	1	I_AC_Frequency	uint16	Hertz	AC Frequency value
40086	40087	1	I_AC_Frequency_SF	int16		Scale factor
40087	40088	1	I_AC_VA	int16	VA	Apparent Power
40088	40089	1	I_AC_VA_SF	int16		Scale factor
40089	40090	1	I_AC_VAR ²	int16	VAR	Reactive Power
40090	40091	1	I_AC_VAR_SF ²	int16		Scale factor

8. ábra SunSpec leírás a regiszterértékekről, és az adatok formátumozásáról (részlet) [10]

Interfész a teljesítménymérőn

A rendszer működéséhez elengedhetetlen a közmű hálózat felé menő vezetékeken átvitt teljesítmény monitorozása, lekérése, rögzítése. Megtehettem volna, hogy tervezek egy teljesítménymérőt, de akkor sokkal kevesebb ember számára volna elérhető ez a rendszer.

Így vásároltam egy Shelly EM egyfázisú fogyasztásmérőt, melynek változatos áramváltó opciói vannak, van benne egy távolról kapcsolható relé, képes hosszútávú adatok tárolására, beépített WiFi modullal rendelkezik, és REST API-n keresztül JSON formátumban lekérhető tőle minden fogyasztási adat. Ez nagyban leegyszerűsítette a kommunikáció kérdését.



10. ábra Shelly EM + 50A áramváltó [8]

```
{
  "wifi_sta": {
    "connected": true,
    "ssid": "XXXXXXXXXX",
    "ip": "192.168.31.154",
    "rssi": -85
  },
  "cloud": {
    "enabled": true,
    "connected": true
  },
  "mqtt": {
    "connected": false
  },
  "time": "12:50",
  "unixtime": 1697280632,
  "serial": 8613,
  "has_update": true,
  "mac": "244CAB419732",
  "cfg_changed_cnt": 0,
  "actions_stats": {
    "skipped": 0
  },
  "relays": [
    {
      "ison": true,
      "has_timer": false,
      "timer_started": 0,
      "timer_duration": 0,
      "timer_remaining": 0,
      "overpower": false,
      "is_valid": true,
      "source": "input"
    }
  ],
  "meters": [
    {
      "power": -61.55,
      "reactive": 0.00,
      "voltage": 246.51,
      "is_valid": true,
      "total": 0.0,
      "total_returned": 0.0
    }
  ],
  "update": {
    "status": "pending",
    "has_update": true,
    "new_version": "20230913-114150/v1.14.0-gcb84623",
    "old_version": "20210429-104836/v1.10.4-2-g9a159c1fb-release-1.10"
  },
  "ram_total": 49600,
  "ram_free": 34800,
  "fs_size": 233681,
  "fs_free": 157628,
  "ping_check": true,
  "uptime": 156022
}
```

9. ábra Shelly EM JSON formátumozott válasz

Szerencsére a Shelly teljesítménymérővel nem kell egy szimpla szöveges HTML alapú kérdés-válasz kombinációnál bonyolultabb adatcserét folytatni. Felhasználónév vagy jelszó szintén nem szükséges hozzá, mert a REST API nem képes semmilyen beállítást módosítani a Shelly-n, a csatlakoztatott WiFi SSID adatát pedig aki rosszindulatú személy, és idáig eljut, az már úgylis tudja.

Látható, hogy a Shelly nem ad vissza áramerősség értéket, cserébe feszültségértéket, valós, és reaktív teljesítményt szolgáltat. Ezekből az adatokból minden szükséges információ kinyerhető, számolható.

Interfészek közti hardver

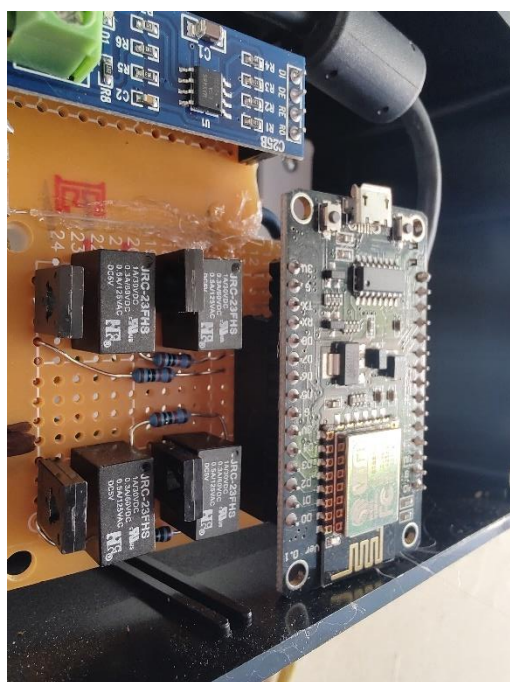
A rendszert egy ESP8266-os mikrokontroller hajtja, amely a panel kimenetein galvanikusan leválasztott módon, panelrelékkel jeleníti meg a SolarEdge inverter PRI csatlakozóján a kívánt teljesítménylimít értéket reprezentáló bináris értékeket.

Mikrokontroller

Egymagos, 80MHz-es órajellel rendelkező, integrált WiFi modullal és WiFi stack-kel szerelt modell, képes 802.11 b/g/n kommunikációra. Nincs 5GHz-es támogatása. Annak ellenére döntöttem emellett, hogy az 5GHz-es sávban lényegesen kevesebb zavaró tényező van, emiatt nagyobb ennek a tartománynak a sávszélessége. Számomra az adatátviteli sebesség nem kritikus tényező, a hatótávolság, a megbízhatóság, a kompatibilitás, és az ár sokkal fontosabbak. 1-1 kimeneti lába 12mA árammal terhelhető, a mikrokontroller maximális fogyasztása 200mA 3.3V-on (és az analóg feszültségszabályozó miatt 5V-on is).



11. ábra ESP8266 [11]



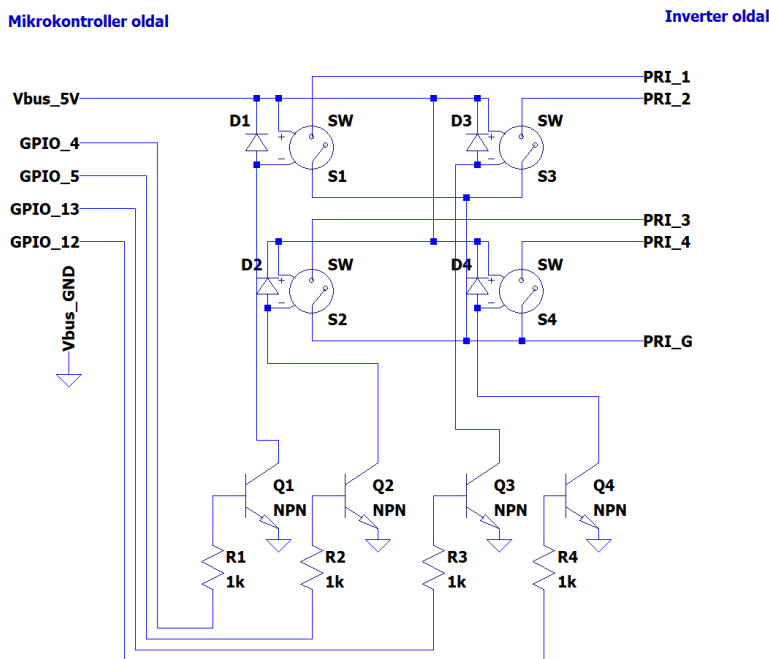
12. ábra Áramköri lap, RS485 átalakító, és mikrokontroller

Az alkalmazott mikrokontroller előnye az ár, és a beépített „programégető”. A lehető legegyszerűbb, és legolcsóbb módon szerettem volna kialakítani a rendszert azért, hogy a lehető legszélesebb kör számára elérhető legyen, és ez az eszköz rendelkezik az integrált „programégetővel”, szükségtelenné téve a külön beszerzést. Az idézőjel jelzi, hogy a mikrokontroller lap valójában nem rendelkezik programégetővel, de a hozzátartozó IDE (Integrált Fejlesztő Környezet) olyan felületet szimulál, mintha mégis rendelkezne programégetővel az eszköz.

Az implementációm tartalmaz egy 5V kimeneti feszültségű tápegységet, mely biztosítja a mikrokontroller számára a megfelelő tápellátást. Helyet kapott a rendszerben továbbá egy MAX485 IC-t tartalmazó modul, amely az inverterrel történő Modbus kommunikációért felel. Az IC támogat 3.3V, 5V, és 12V-os vonalakat is, melyek közül a SolarEdge inverter a 3.3V-os módot használja. Ez az információ mellesleg nem szerepel sem a SolarEdge inverter telepítési útmutatójában, sem a SunSpec implementációs dokumentumban. Az IC csak fél-duplex kommunikációt valósít meg, így minden kiküldött kérés után azonnal át kell váltani fogadó módba, még mielőtt a SolarEdge inverter megkezdene a válaszüzenet kiküldését. Az átváltásra rendelkezésre álló idő körülbelül 1ms, így kis odafigyeléssel könnyen megvalósítható a váltás.



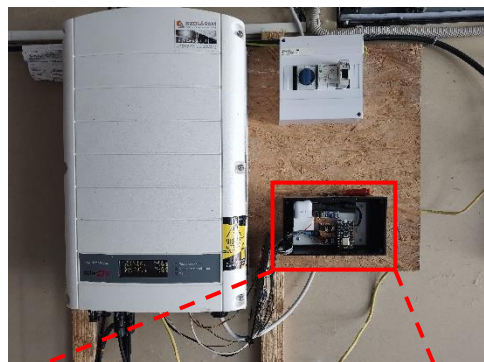
13. ábra MAX485 modul [12]



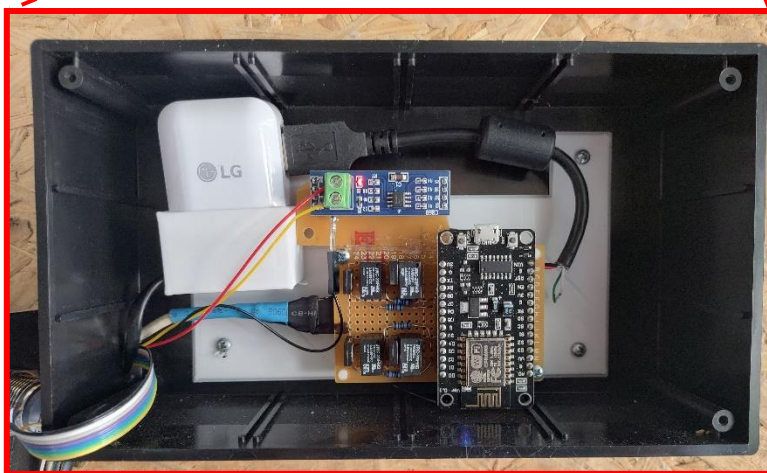
Hardver vizuális áttekintése



15. ábra Inverter és szabályozó üzemi állapotban



14. ábra Inverter és szabályozó állapotban



16. ábra Inverterszabályozó elektronika

Az inverter felé/felől három féle vezetékezés megy:

230VAC Táplálja a szabályozó elektronikát

Többberű „szivárvány” kábel Inverter vezérlőpanelének gombjainak kivezetése

Sárga-Piros-Fekete Modbus kommunikáció vezetékei

Szürke négyeres kábel PRI csatlakozóra menő, limitbeállító kábel



Fejlesztői környezet

A legegyszerűbb megoldás az Arduino IDE használata. Ezek az ESP IC-k már flashelve vannak egy olyan bootloaderrel, ami kompatibilissá teszi őket az IDE-vel való kommunikációra, ezáltal nincs szükség külön programégető használatára. Emiatt bárki könnyen feltöltheti a programot az otthonában az ESP-re, és már működik is a rendszer.

Ez azt jelenti, hogy az IDE minden előnyével és hátrányával együtt kellett a programot megtervezni és megírni.

Előnyei:

- Széleskörű támogatás (az integrált áramkörökhöz a sok könyvtár miatt).
- Plug and Play működés, egy COM port driver telepítés után.
- Az absztrakciós szint miatt könnyebb nagyobb lélegzetvételű kódokat (pl.: TCP/IP kommunikáció) megírni.
- Több fájlba szétdarabolható a programkód, de ezek nincsenek linkelve egymáshoz.
- A kódfeltöltés nem igényel műszaki érzéket/tudást.

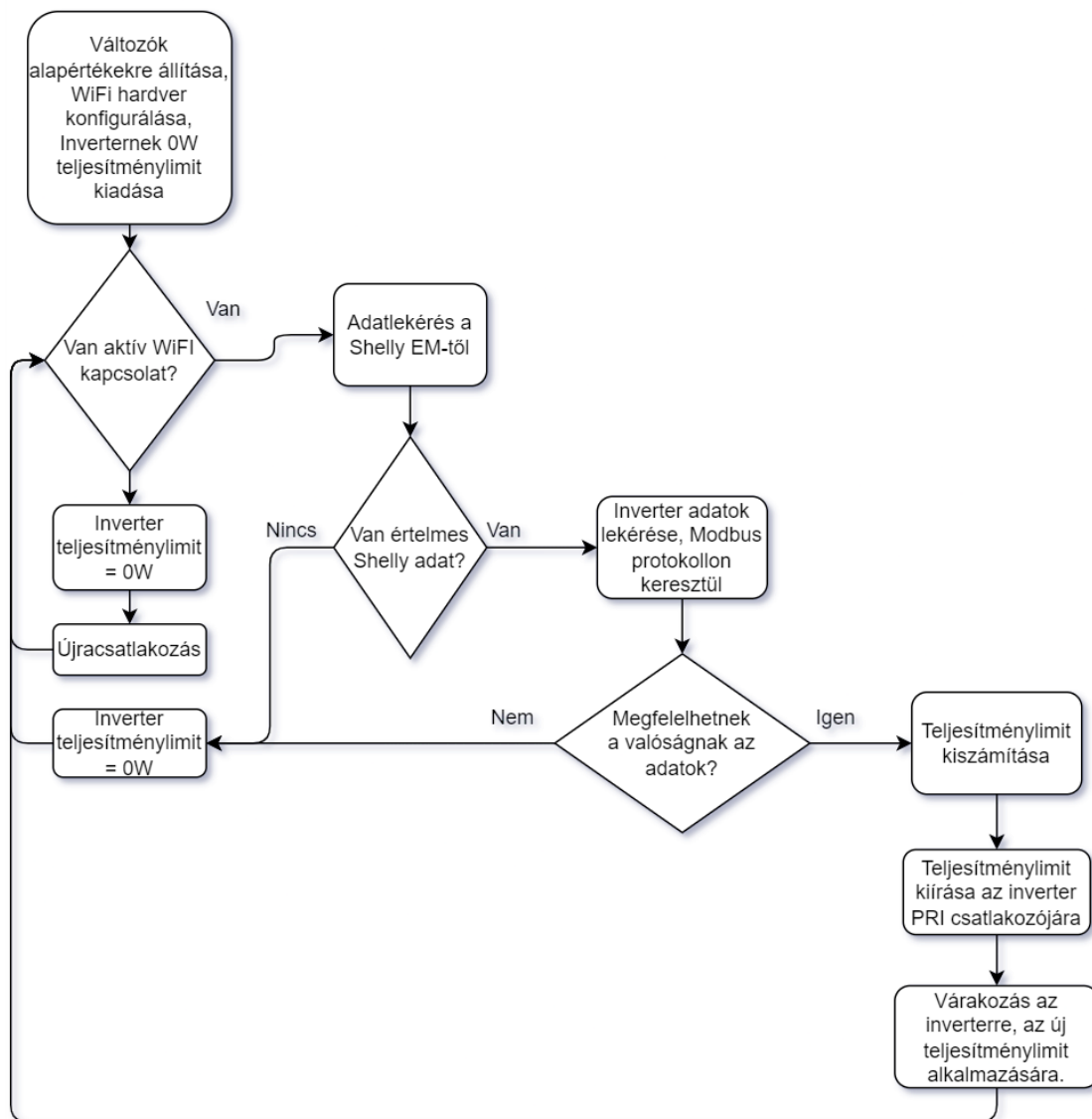
Hátrányai:

- Sok ember sokfélélt írt hozzá, inkonzisztencia elkerülhetetlen.
- Dokumentáció kissé sekélyes, néhol hiányos.
- A forráskód tanulmányozása nélkül nem ismert az egyes könyvtárak működése.
- Nincs benne hosszú kódokra optimalizálás, nem lehet összecsukni függvényeket.
- Bugok, hibák előfordulnak a megírt könyvtárakban.



A program

Az alábbi folyamatábra a program működését ábrázolja.





WiFi kapcsolat

Az ESP8266 egy beépített WiFi modult tartalmaz, aminek az IDE-vel való integrációja egyetlen könyvtárra, azon belül is négy metódusra egyszerűsödik:

`instance.hostname(„ESP_SolarEdge”);`beállítja az eszköz nevét

`instance.config( local_IP, gateway, subnet);`statikus IP címet állít be

`instance.begin(SSID, password);`elindítja a WiFi manager rutint

`instance.status();`lekéri az aktuális kapcsolati állapotot

Elméletben nagyon jól működik, de vizsgáljuk meg, mi történik, ha megszakad a WiFi kapcsolat (amint az nálunk, és a nem erre felkészített otthonokban elég sokszor megtörténik).

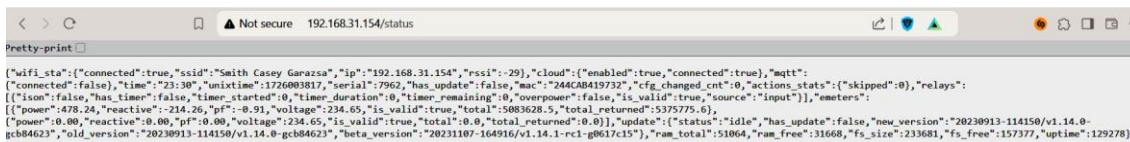
Alapesetben az ESP folyamatosan megpróbál visszacsatlakozni a hálózatra, azonban ezt bizonyos alacsony kategóriás (TP-LINK) adapterek, repeater-ek nem „szeretik”, és nem tudják visszacsatlakoztatni az ESP-t a hálózatba. Erre megoldásképp egy figyelést építettem az ESP programjába, ami beiktat egy hosszabb várakozási időt két WiFi csatlakozási kísérlet között. Amennyiben ez sem válik be, és továbbra sincs csatlakozás, akkor várakoztatja 10 másodpercre az ESP-t, és újraindítja azt. Ez a megoldás már több hónapja üzemel, és nem igényelt még manuális újraindítást. (A TP-LINK repeaterrel ellentétben.)

```
void manageWiFi()
{
  if (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    Serial.println(F("WiFi not connected, initiating connection.));
    wlanConnectionFailures++; //Csatlakozasi hibak szama novelve 1-gyel
    if (wlanConnectionFailures > 3)
    {
      //Akkor valszeg elment a wifi. 10 masodpercet varunk, addigis kikapcsoljuk az invertert.
      outputPowerSetpoint = 0;
      generateRelaysValue(outputPowerSetpoint);
      writeRelaysValueToRelays();
      //Logolunk a Serial monitorra
      Serial.println();
      Serial.println("Nem sikerult a WiFi csatlakozas. Varok 10 masodpercet, es resetelek.");
      Serial.println();
      delay(10000);
      ESP.reset(); //Reseteljuk az ESP-t.
    }
    connectWiFi();
  }
}
```

17. ábra WiFi kezelő függvényem

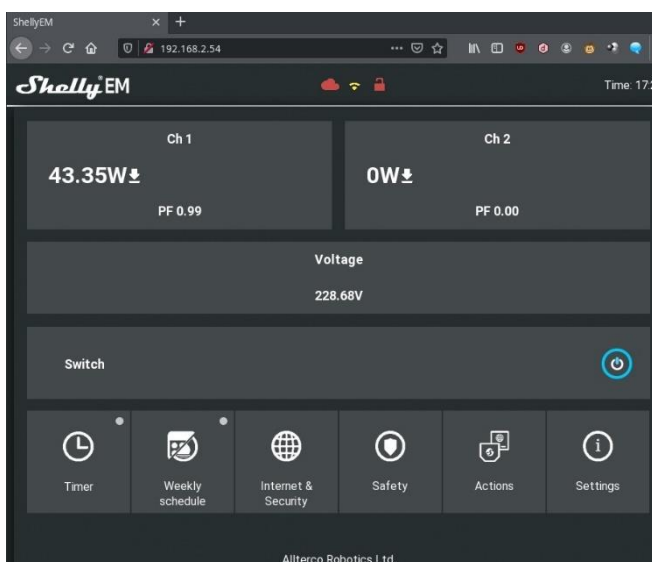
Adatlekérés a Shelly EM-től

A Shelly EM a hozzá TCP/IP csatornán 8080-as portra érkező „/status” kérésekre egy hosszú, formátumozott UTF-8 szöveggel válaszol:



18. ábra Shelly EM nyers visszaadott adat

A formátum JSON, megfelelő szoftverrel kinyerhetők belőle a válaszok, és az egész egy dinamikus változó, szép felületre formálható:



19. ábra Formátumozott Shelly EM felület [13]

Amennyiben érkezett válasz, és a HTTP kód is azt mondja, hogy sikeres az átvitel, akkor bekerül a teljes szöveg egy óriási szöveges változóba. Innen egy rutin megkeresi a „voltage”-ban szereplő karakterek egymás utáni sorozatát, ahonnan egy rögzített karakterszámmal később és korábban kigyűjti az egyes helyiértékeket, majd számot formáz belőle.

Ugyanezt megcsinálja a „power” és a „reactive” változókkal is.

```
//Shelly Voltage kiszamolas
shellyVoltage = 0;
shellyVoltage += (shellyResponse[checkIndex + 1] - '0') * 0.01;
shellyVoltage += (shellyResponse[checkIndex] - '0') * 0.1;
shellyVoltage += (shellyResponse[checkIndex - 2] - '0') * 1.0;
shellyVoltage += (shellyResponse[checkIndex - 3] - '0') * 10.0;
shellyVoltage += (shellyResponse[checkIndex - 4] - '0') * 100.0;

//Lekerjuk a teljesitmenyt is:
checkChar = '0';
checkIndex = 0;
found = 0;
while (found < 4)
{
    checkChar = shellyResponse[checkIndex];
    if (checkChar == '.')
    {
        found++;
    }
    checkIndex++;
}
```

20. ábra Shelly EM válaszüzenetének dekódolása (részlet)



A fent említett megoldásnak az egzakt szövegkeresés miatt viszonylag nagy a számítási igénye, de előnye, hogy mindenféle frissítést túlél, nem számít, hogy a Shelly EM kimeneti formátumozása hogyan változik a különböző szoftveres távoli frissítések okán.

Modbus kommunikáció

A MAX458-as modul mikrokontroller oldalon TTL szintekkel kommunikál, és UART-hoz hasonló üzeneteket vár. Érdekes lenne az ESP UART portjára kötni, ám ez nem történhet meg, mert az egyetlen UART portot a számítógéppel való kapcsolattartásra, és hibakeresésre kívánom használni. Ez azt jelenti, hogy szoftveres UART-ot kell használnom Modbus kommunikációra. Ezzel csak az okoz nehézséget, hogy a CPU-nak a lehető legtöbbet kell a Modbus kommunikáció végéig a fogadással foglalkoznia. Nem tarthat túl sokáig sem ez a művelet, mert a main() függvény watchdog-ja dobni fog egy megszakítást, a túl hosszú ciklusidő miatt.

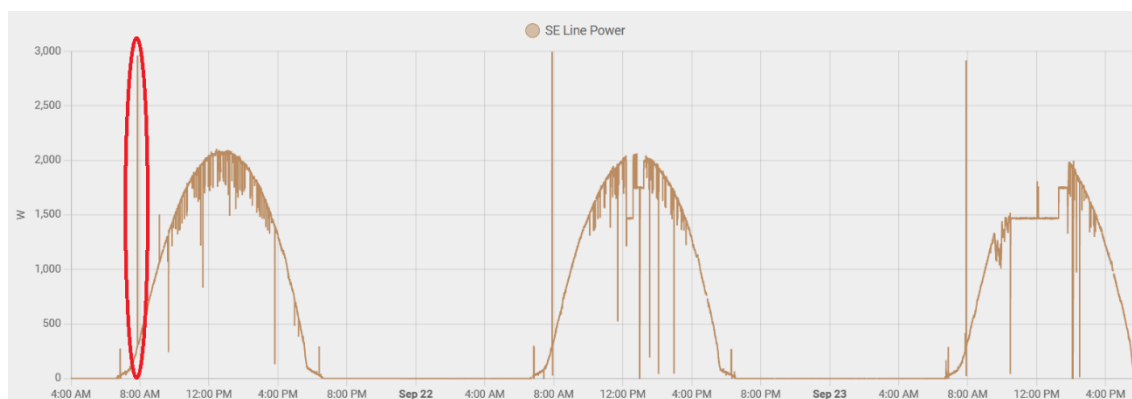
Jelenleg úgy működik, hogy egy körbefordulási idő alatt lekér 1-1 változót (a kétregiszteres érték is egy körben kerül lekérésre), majd 22db körbefordulás után a lekért adatok tömbje továbbítódik feldolgozásra.

A feldolgozás magába foglalja az adatok skálázását. Modbus-on keresztül a SunSpec implementáció értelmében így áll össze a példa értékű 2154.8W adat:

	Regiszter érték	Adat érték
Teljesítmény	40083	21548
Teljesítmény osztó	40084	65535

1. $P_{\text{valós}} = \text{Teljesítmény} / (10 * (65536 - \text{Teljesítmény osztó}))$
2. $P_{\text{valós}} = 21548 / (10 * (65536 - 65535))$
3. $P_{\text{valós}} = 21548 / (10 * (1))$
4. $P_{\text{valós}} = 21548 / (10)$
5. $P_{\text{valós}} = 2154.8W$

Ez elméletileg jól működik. Mi okozza mégis, hogy ilyen (21. ábra) a napi teljesítményalakulás ábrája?



21. ábra SolarEdge szabályozott inverter aktuális teljesítményének alakulása

A válasz egyszerű. A SunSpec implementációból következik ez a hiba. A teljesítményérték szorzója ugyanis nem a teljesítményértékkel együtt kerül lekérésre, és



valószínűleg az inverterben nem is egyszerre kerülnek frissítésre, így a következő eset fennállhat:

Kora reggel van, a teljesítmény kicsi...

	Regiszter érték	Adat érték
Teljesítmény	40083	250
Teljesítmény osztó	40084	65536

1. $P_{\text{valós}} = \text{Teljesítmény} / (10 * (65536 - \text{Teljesítmény osztó}))$
2. $P_{\text{valós}} = 250 / (10 * (65536 - 65536))$
3. $P_{\text{valós}} = 250 / (10 * (0))$
4. $P_{\text{valós}} = 250 / (0)$ (Természetesen ez az osztás nem megy végbe)
5. $P_{\text{valós}} = 250W$

A teljesítmény nő...

	Regiszter érték	Adat érték
Teljesítmény	40083	2586
Teljesítmény osztó	40084	65536

1. $P_{\text{valós}} = \text{Teljesítmény} / (10 * (65536 - \text{Teljesítmény osztó}))$
2. $P_{\text{valós}} = 2586 / (10 * (65536 - 65536))$
3. $P_{\text{valós}} = 2586 / (10 * (0))$
4. $P_{\text{valós}} = 2586 / (0)$ (Természetesen ez az osztás nem megy végbe)
5. $P_{\text{valós}} = 2586W$

Aztán a skálázó tényező is frissül...

	Regiszter érték	Adat érték
Teljesítmény	40083	2582
Teljesítmény osztó	40084	65535

1. $P_{\text{valós}} = \text{Teljesítmény} / (10 * (65536 - \text{Teljesítmény osztó}))$
2. $P_{\text{valós}} = 2582 / (10 * (65536 - 65535))$
3. $P_{\text{valós}} = 2582 / (10 * (1))$
4. $P_{\text{valós}} = 2582 / (10)$
5. $P_{\text{valós}} = 258.2W$

Így alakulnak ki a tüskék. Erre a megoldás, hogy háromszor veszek mintát a teljesítményértékből, majd a legnagyobbat, és a legkisebbet kiviszem a listából, és a hátramaradó értéket adom tovább.



Inverter teljesítményének számítása

A számítást el lehetne végezni egyetlen függvénnyel:

$$P_{\max_inverter} = P_{\max_hálózat} - (P_{\text{aktuális_hálózat}} - P_{\text{aktuális_inverter}})$$

$$P_{\max_inverter} = 5000\text{W} - (3500\text{W} - 1000\text{W})$$

$$P_{\max_inverter} = 2500\text{W}$$

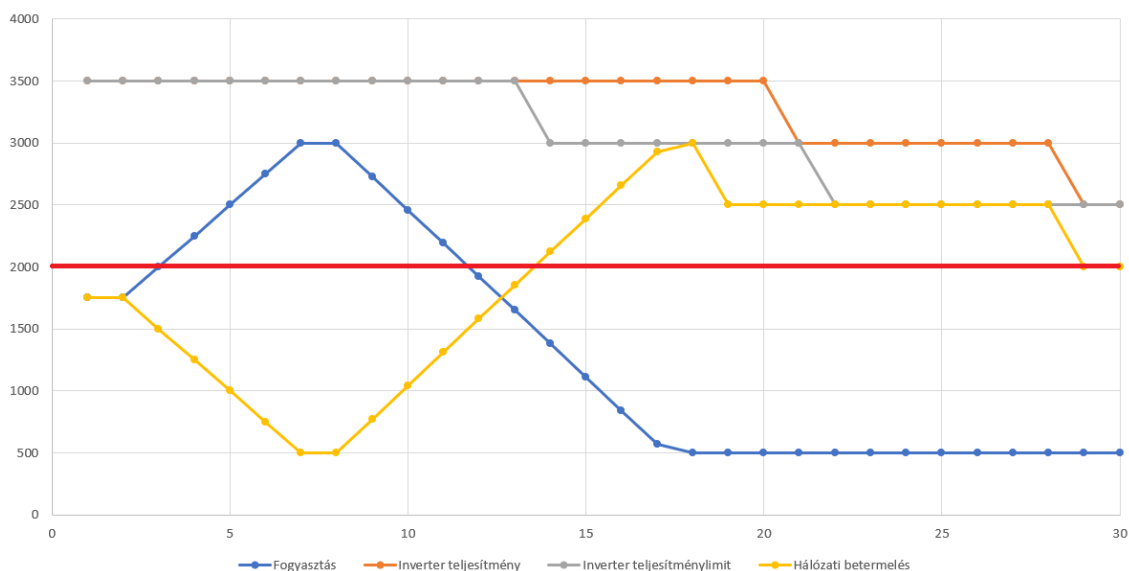
Ez abban az esetben működik tökéletesen, ha feltételezzük, hogy a szabályozási körünk időállandója nulla. Azonban az inverter időállandója már önmagában 7 másodperc, és a teljesítmény növekedésének/csökkenésének idejéről nem is beszéltünk. Ehhez hozzájárul, hogy az inverter csak akkor állítja be a számára kiszabott teljesítménylimitet, ha az nem változott a 7 másodperces várakozási idő alatt. Ez az idő nem állítható, és lengővé teszi a szabályozást.

A megoldás egyszerű:

Ha a teljesítménylimit fölfelé változna, akkor 10 másodpercenként növeli a rendszer 250W-tal azt, ha pedig csökkenne, akkor a fent említett képlettel kiszámolja a beállítandó teljesítménylimitet, beállítja a kiszámítottat, majd vár a program 10 másodpercet, hogy az inverter biztosan felvegye az új előirányozott teljesítménylimit értéket.

Ez a rendszer majdnem tökéletes, azonban ha a napsütés állandó, és a felvett teljesítmény folyamatosan csökken egy adott időtartam alatt, akkor az alábbiakban ábrázolt [22] és leírt probléma állhat elő.

Tételezzük fel, hogy 2000W a hálózati betermelés limitje.



22. ábra Teljesítménylimit szabályozása

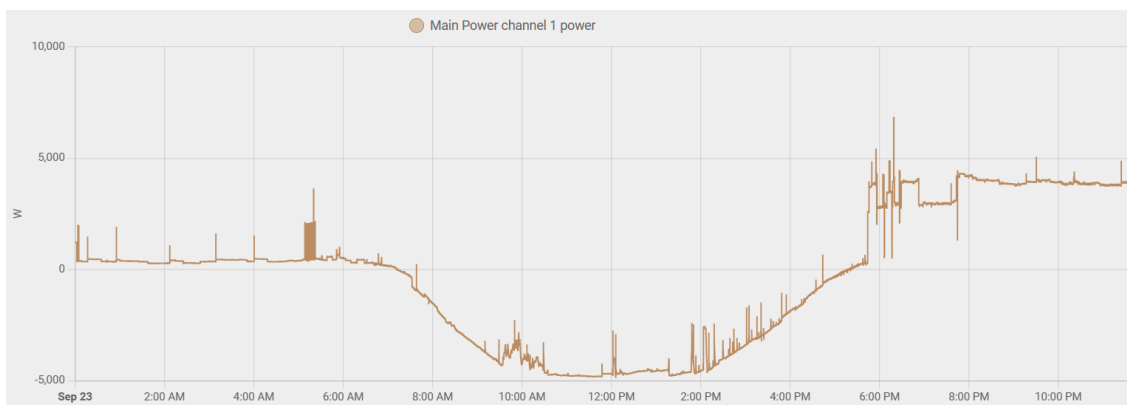
Amint elkezd a 2000W-on túl nőni a hálózati betermelés, akkor bár az elektronika elkezd vissz szabályozni az invertert, de el kell kezdenie kivárni a 7 másodpercet, hogy az előirányozott teljesítménylimit életbe lépjen. Ezen 7 másodperces időtartam alatt nem tud a rendszer rászabályozni egy következő (esetünkben alacsonyabb) teljesítményértékre. Ez ideiglenesen túlzottan nagy betermelést jelent a hálózat felé.

A megoldást az jelenti, hogy az első hétmásodperces periódusban még előirányozza az inverternek az újonnan érkező teljesítménylimitet, de csak abban az esetben, ha egy alacsonyabb limit érkezett, mint a jelenleg előirányozott érték. Amennyiben még egy az előzőnél alacsonyabb limit érték érkezik, akkor a második érkezett értéknek a fele értékű, de legalább 250W-tal a második érték alatti érték kerül előirányozásra az inverternek.

Ez a megoldás gyakorlatilag megszüntette a problémát. Elméletileg továbbra is fennállhat a beállított teljesítménylimit átlépésének veszélye, de ezt a veszélyt jelentősen csökkenti, hogy a beállított teljesítménylimit a valós limit alá került beállításra 500W-tal. Így két inverterszabályozási cikluson (14 másodpercen) keresztül kellene 35W/másodperc értékkel csökkennie a felvett teljesítménynek, hogy egyáltalán eljusson a szabályozás a harmadik teljesítménycsökkentési metódusig, aminek az előfordulása 0db/6 hónap.



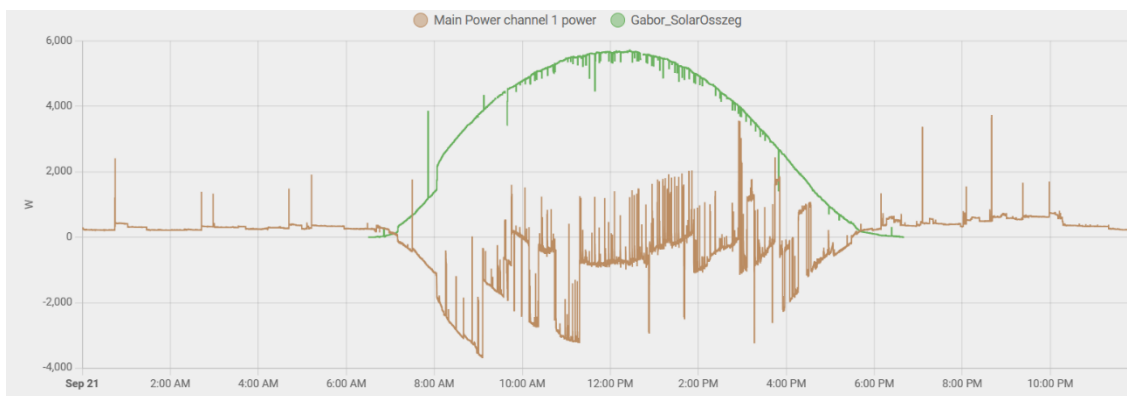
Az alábbi ábra az ezzel a szabályozási módszerrel megépített hálózat kimeneti teljesítmény változásait mutatja egy tökéletesen napos napon:



23. ábra Valós hálózati betermelés alakulása a fent tárgyalt szabályozási módszerrel

Az ábrán [23. ábra] a negatív teljesítmények a hálózat felé irányuló teljesítmények. Tökéletesen látszik, hogy az 5000W-os betermelési teljesítménylimitet megközelíti, el nem éri, és addig marad a közelében, ameddig csak lehet. Ez egy körülbelül négy órás időszakot jelent.

Ez a rendszer abban több egy sima túlpanelezésnél, hogy ha van helyi fogyasztás, akkor engedélyezi a napelemes inverternek az igényelt fogyasztásnyival nagyobb termelési teljesítménylimitet. (lásd [24. ábra] ábra)



24. ábra Megfelelően magas fogyasztás esetén a napelemek maximális kihasználtsággal üzemelnek

Barna: Hálózathál felvett teljesítmény értéke.

Zöld: A napelemes termelés értéke.

A termelés teljesítménye 10:00-tól 13:30-ig 5000W fölött van, így mintegy 1.6kWh energiával többet tudott termelni és felhasználni a háztartás egy sima túlpanelezős megoldáshoz képest, miközben a visszatermelés az engedélyezett maximumot nem lépte át!



Kapcsolat a HomeAssistant rendszerrel

A HomeAssistant különleges flexibilitása révén lehetőségem van REST API-t használni a SolarEdge invertert vezérlő panelen.

Az ESP, a 8080-as portra érkező HTTP GET parancsra vissza fogja adni a következő szöveget:

1,78,231,18018,5000,1910,180,438,419,18378,3812,39843157,5,9816,2000

Ahhoz, hogy ezt a sor adatot értelmezni tudja a HomeAssistant, meg kell adni neki, hogy mit jelentenek az egyes helyeken levő értékek.

Érték	Értelmezés	Szorzó	Valódi érték
1	ESP Státuszjelző	-	1
78	AC oldali áramerősség	10	7.8A
231	AC oldali feszültség	1	231V
18018	AC oldali teljesítmény	10	1801.8W
5000	AC hálózati frekvencia	100	50.00Hz
1910	AC oldali látszólagos teljesítmény	1	1910VA
180	AC oldali reaktív teljesítmény	1	180VAR
438	DC oldali feszültség	1	438V
419	DC oldali áramerősség	100	4.19A
18378	DC oldali teljesítmény	10	1837.8W
3812	Hűtőborda hőmérséklet	100	38.12°C
39843157	Termelt energia	1	39.84MWh
5	Inverter státuszjelző	-	5
9816	Inverter hatásfok	100	98.16%
2000	Teljesítménylimit érték	1	2kW

Ezt az értéksomagot a következő metódus készíti elő:

```
restElkuldendo = "1," + String((int)(10.0 * SE_Current))
+ "," + String((int)SE_Voltage) + "," + String((int)(10.0 * SE_Power))
+ "," + String((int)(100 * SE_Frequency)) + "," + String((int)SE_ApparentPower)
+ "," + String((int)SE_ReactivePower) + "," + String((int)(100 * SE_DCCurrent))
+ "," + String((int)SE_DCVoltage) + "," + String((int)(10.0 * SE_DCPower))
+ "," + String((int)(100 * SE_Temperature)) + "," + String((int)SE_LifetimeEnergy)
+ "," + String((int)SE_Status) + "," + String((int)(100.0 * SE_Efficiency))
+ "," + String((int)outputPowerSetpoint);
```

25. ábra Inverter korlátozó mikrokontroller REST API adatcsomagja

A HomeAssistant ezt a következő beállítási panel szerint fogadja:

```
/config/configuration.yaml

89 ▾ -- platform: template
90 ▾ sensors:
91 ▾   #Solaredge szenzorok Cur, Vol, Pow, Freq, Va, Var, Dccur, dcv, dcp, temp, ener, st, hatás
92 ▾   ... se_line_current:
93 ▾     ... friendly_name: SE Line Current
94 ▾     ... value_template: "{{ states.sensor.solaredge_wlan.state.split(',')[1] | float / 10 }}"
95 ▾     ... unit_of_measurement: 'A'
96 ▾   ... se_line_voltage:
97 ▾     ... friendly_name: SE Line Voltage
98 ▾     ... value_template: "{{ states.sensor.solaredge_wlan.state.split(',')[2] | float / 1 }}"
99 ▾     ... unit_of_measurement: 'V'
100 ▾   ... se_line_power:
101 ▾     ... friendly_name: SE Line Power
102 ▾     ... value_template: "{{ states.sensor.solaredge_wlan.state.split(',')[3] | float / 10 }}"
103 ▾     ... unit_of_measurement: 'W'
104 ▾   ... se_line_frequency:
105 ▾     ... friendly_name: SE Line Frequency
106 ▾     ... value_template: "{{ states.sensor.solaredge_wlan.state.split(',')[4] | float / 100 }}"
107 ▾     ... unit_of_measurement: 'Hz'
108 ▾   ... se_line_apparent_power:
109 ▾     ... friendly_name: SE Line Apparent Power
110 ▾     ... value_template: "{{ states.sensor.solaredge_wlan.state.split(',')[5] | float / 1 }}"
111 ▾     ... unit_of_measurement: 'VA'
112 ▾   ... se_line_reactive_power:
113 ▾     ... friendly_name: SE Line Reactive Power
114 ▾     ... value_template: "{{ states.sensor.solaredge_wlan.state.split(',')[6] | float / 1 }}"
115 ▾     ... unit_of_measurement: 'VAR'
116 ▾   ... se_dc_current:
117 ▾     ... friendly_name: SE DC Current
118 ▾     ... value_template: "{{ states.sensor.solaredge_wlan.state.split(',')[7] | float / 100 }}"
119 ▾     ... unit_of_measurement: 'A'
120 ▾   ... se_dc_voltage:
121 ▾     ... friendly_name: SE DC Voltage
122 ▾     ... value_template: "{{ states.sensor.solaredge_wlan.state.split(',')[8] | float / 1 }}"
123 ▾     ... unit_of_measurement: 'V'
124 ▾   ... se_dc_power:
125 ▾     ... friendly_name: SE DC Power
126 ▾     ... value_template: "{{ states.sensor.solaredge_wlan.state.split(',')[9] | float / 10 }}"
127 ▾     ... unit_of_measurement: 'W'
128 ▾   ... se_temp:
129 ▾     ... friendly_name: SE Temp
130 ▾     ... value_template: "{{ states.sensor.solaredge_wlan.state.split(',')[10] | float / 100 }}"
```

26. ábra HomeAssistant konfigurációja, a SolarEdge inverter információinak olvasására REST API-n keresztül



HomeAssistant

Miért HomeAssistant? A nagy fogyasztók vezérlése okán szükséges egy rendszer, mely képes több, különböző márkájú, típusú, jellegű fogyasztót kezelni. Egy tartályos vízmelegítő ('bojler') esetén persze egyszerű a kérdés, be kell építeni egy fűtőszákapcsoló relét, és egy vízhőfok-érzékelőt. Ugyanilyen egyszerű lehet egy fali infrapanel kapcsolása, de egy modernebb vízmelegítőé, mosogatógépé, mosógépé, egy klímáé már komolyabb feladat az általuk használt protokollok bonyolultsága miatt.

Persze, a mosógép gombpaneljére lehet relét építeni, és a klíma távirányítóján levő bekapcsológombot is lehet relével helyettesíteni, de korszerűen ezeket az eszközöket már okosotthonokba tervezték, ezek mind „okos”, vagy legalábbis WLAN képes eszközök.

Okosotthon vezérlőkben nincs hiány, Google Nest, Amazon Alexa, Hubitat Elevation, Apple HomeKit, Samsung SmartThings, stb. Ritka azonban az a megoldás, ami egyszerre tud integrálni egy Tesla API-t, Gree klímát, és egyedi fejlesztésű ESP8266 alapú rendszert.

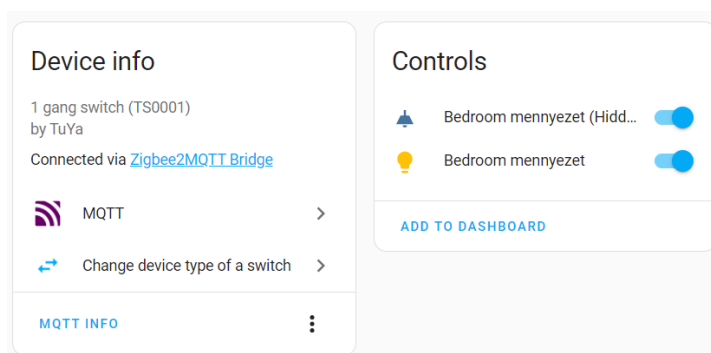
Kellő mennyiségű utánajárás, telepítés, tesztelés, bontás, átkonfigurálás után a HomeAssistant rendszerre esett a választás, a hatalmas mennyiségű támogatott eszköz, az alacsony rendszerigény, a saját LAN hálózatra közvetlenül csatlakozó szerver, és a minden más rendszert elsőprő flexibilitása miatt. Egyetlen hátránya, hogy néhány eszköz integrálása komoly informatikai tudást igényel az IoT rendszerek terén.



27. ábra HomeAssistant logó
(2022)

Nagy fogyasztók vezérlése

Ezen vezérlések a HomeAssistant rendszeren alapulnak, mert ez nem függ semmilyen felhőszolgáltatástól, és emiatt nem feltétlenül igényel internetkapcsolatot sem. A hozzátartozó Zigbee alapú relék, kapcsolók pedig könnyen felszerelhetők és párosíthatók, így ez egy nagyon széles felhasználói körnek lehet megfelelő megoldás.

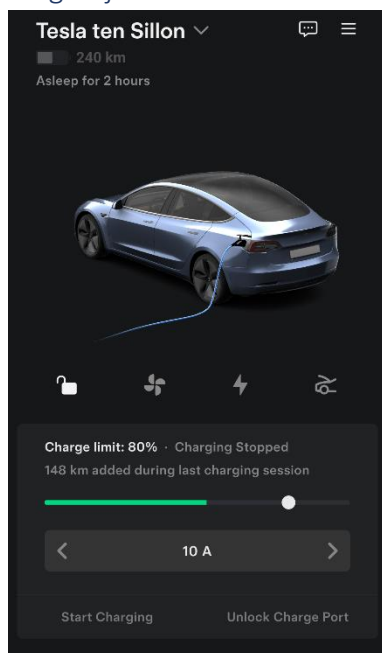


28. ábra HomeAssistant kapcsoló integráció

Esetemben sem a mosógép, sem a mosogatógép nem okos eszköz, és a vizet is egy FÉG átfolyásos vízmelegítő állítja elő, így nem sok lehetőségem van ezeket automatizálni.

Található viszont a háztartásban egy Tesla Model 3.

Plug-In jármű töltése



29. ábra Tesla mobil alkalmazás és csatlakoztatott jármű

A hálózatról tölthető jármű egy Tesla Model 3, melynek van csatlakozási pontja az internetre, és egy mobiltelefonos alkalmazáson keresztül bizonyos paraméterei az autónak valós időben állíthatók. Ilyen paraméter például az utastér prekondicionálása, a töltés indítása, megállítása, vagy a hálózatról felvehető áramerősség értéke. Számunkra az utóbbiak lényegesebbek.

Ehhez a kommunikációs csatornához enged hozzáférést a gyártó, a „Tesla API” formájában [14]. Létezik HomeAssistant-hoz egy illesztőfelület, mellyel hozzáférés nyílik a Tesla API-hoz, ez a „Tesla Custom Integration” [15]. Az integráció forráskódja nyílt, és telepítés után is ellenőrizhető a tartalma, mert nincs titkosítva, és könnyen elérhető a HomeAssistant szerver fájlljai között.

(Ez semmilyen formában nem mondható el sem a Google Nest, sem az Apple HomeKit rendszereiről, bár tény, hogy azoknak nincs is Tesla API támogatása.)

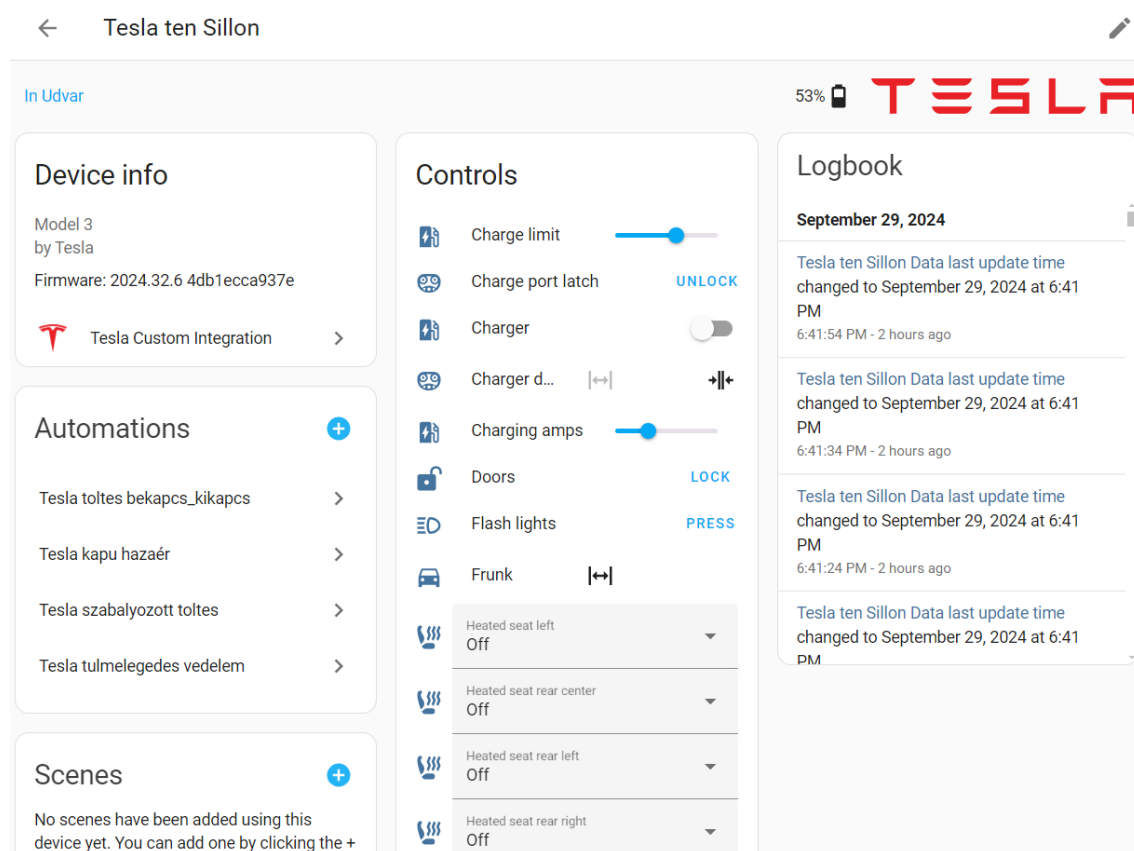


Adatbiztonság

Természetesen az autóhoz történő hozzáférés autentikációhoz kötött, melyet az OAuth2 rendszeren keresztül végez a Tesla. (Ugyanezt használja egyetemünk is a levelezés (Microsoft) eléréséhez.) Autentikáció után generálásra kerül egy token és egy kliensazonosító, melyek így csak a saját szerveremnek biztosítanak hozzáférést a fiókomhoz csatolt járműhöz.

Szabályozás megvalósítása

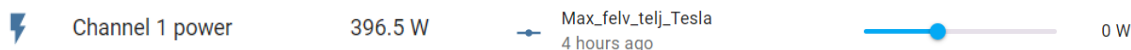
Az autó integrálása után megjelennek a HomeAssistant rendszerben az autóhoz tartozó beállítások.



30. ábra Tesla integráció által hozott változók



A töltésre beállítható áramerősséget a hálózati betermelés értékéből, és a beállított hálózati teljesítménycélból kell kiszámolni. Előbbi megtalálható a Shelly EM integráció változói között, utóbbi szerepét pedig egy létrehozott belső változó tölti be.



32. ábra Aktuális hálózati teljesítmény

31. ábra Hálózati teljesítménycél (töltés közben)

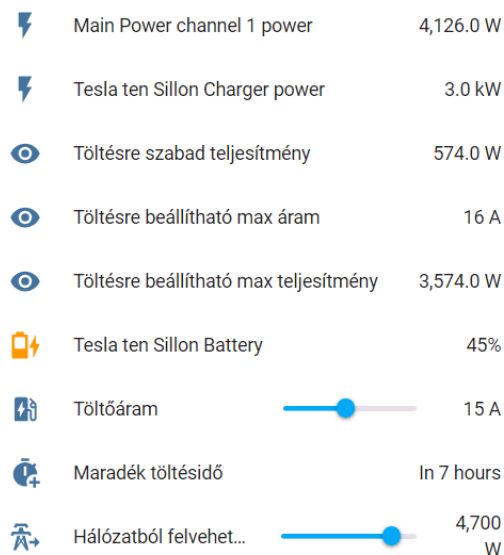
Kiszámolásra kerül a töltésre szabad teljesítmény

Töltésre szabad teljesítmény = Hálózati teljesítménycél (31.ábra) – Hálózati teljesítmény (32. ábra). Hálózati teljesítménycél jelenti azt az értéket ami a hálózatról felvehető teljesítményként meghatározunk. Pl. ha „0”, akkor a rendszer csak a napelemrendszer által előállított teljesítmény és a háztartás által felvett teljesítmény különbséggel tölti az autót, így a nem vesz fel energiát a hálózatról. Azonban, ha beállítjuk pl. 5 kW-ra, és a napelem rendszer képes 5 kW-ot termelni, akkor az autó 10 kW teljesítménnyel töltődhet.

Töltésre beállítható max teljesítmény = Töltésre szabad teljesítmény + Töltési teljesítmény

Ebből ki kell számolni az áramerősséget, amit be lehet állítani az autónak.

Töltésre beállítható max áram = Töltési teljesítmény / Hálózati feszültség



33. ábra Számítás működés közben
(4700W-os hálózatról felvehető teljesítményre szabályozva)



A HomeAssistant lehetőséget ad automatizmusok készítésére, melyekben feltételekben, számolásokban felhasználásra bocsájtja az integrációk által létrehozott változók értékeit.

Minden automatizmusnak van egy „Trigger” indító eseménye, egy „Condition” indítást engedő feltétele, és egy „Action” kimeneti beavatkozása.

34. ábra HomeAssistant példa automatizmus

Ilyen formában a töltés áramerősségének állításának automatizmusa a következőképpen áll össze (35.ábra).

Fontos megemlíteni, hogy az „autó otthon tartózkodik” feltétel elengedhetetlen, mert az autó nem csak otthon töltődhet váltakozóáramról, hanem munkahelyen, mélygarázsban, családtagoknál, bárhol. A vezérlés viszont minden váltakozó áramú töltésre vonatkozik, és GSM hálózaton keresztül is működik, amire az autó ismert WiFi hálózat hiányában automatikusan át is vált. Nyilván nem szerencsés, ha az otthoni napelemtermelés szabályozza az ország másik oldalán töltődő autó töltését, ezért automatikusan deaktiválódik az automatizmus.

Mikor

- Amikor a beállítható áramerősség értéke megváltozik

És

- Az autó otthon tartózkodik

Akkor

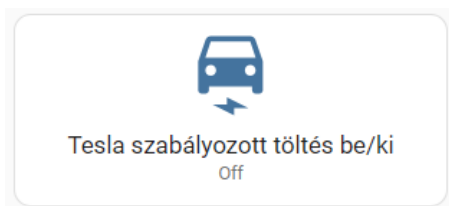
- Egy perc várakozás után
- Ha beáll.max.áram < 15A
 - o Tesla töltőáram = 10A
- Ha $15A < \text{beáll.max.áram} < 20A$
 - o Tesla töltőáram = 15A
- Ha $20A < \text{beáll.max.áram} < 25A$
 - o Tesla töltőáram = 20A
- Ha $25A < \text{beáll.max.áram} < 30A$
 - o Tesla töltőáram = 25A
- Ha $30 < \text{beáll.max.áram}$
 - o Tesla töltőáram = 30A

35. ábra Töltési áramerősség beállítása

Egy perc várakozás került beiktatásra, mert ennyi idő kell a járműnek, hogy megkapja, alkalmazza a megváltozott előirányozott töltési teljesítmény értéket, illetve visszaküldje a megváltozott aktuális felvett teljesítményértéket.

A teljesítménybeállítás 5 amperenként van felosztva, mert az autó csak egész számú kilowatt értékben képes jelezni az aktuális töltési teljesítményét, ezért a szabályozás stabilitását segíti, ha minden bemeneti változtatásra a visszaolvasott töltési teljesítmény is változik (megfelelő mértékben). A 35. ábrán bemutatott program azonban nem tartalmazza a töltés indítás/leállítás rutinját.

Az indító/leállító rutin a 37. ábrán látható. Megemlítendő benne a „Szabályozott töltés engedélyezve van” feltétel. Ez egy ON/OFF gomb a HomeAssistant kezelőfületen, melyet az automatikus indítás/leállítás letiltására hoztam létre.



36. ábra Szabályozott töltést engedélyező gomb

Érdemes megjegyezni, hogy ha a töltéslimitet eléri a Tesla, de az automatizált töltés indítani akarja a töltést, akkor az autó nem fogja elindítani a töltést.

Tíz perces várakozás van az indítás, és a leállítás között, mert ha a töltésre beállítható áramerősség 10A körül mozog, akkor nem szeretném, ha változásonként ki-be kapcsolna a töltés. A Teslában ugyanis a töltőcsatlakozó csatlakoztatása nem jelenti automatikusan az akkumulátorban levő mágneskapcsolók zárását, emiatt minden töltésindítási kérelemnél működésbe lép a lágyindító kör, terhelődik a lágyindító ellenállás, érintkezési pontok érnek össze és szakadnak meg, ami mechanikailag és termodinamikailag is igénybe veszi a mágneskapcsolókat.

Mikor

- Amikor a beállítható áramerősség értéke megváltozik

És

- Az autó otthon tartózkodik
- Szabályozott töltés engedélyezve van

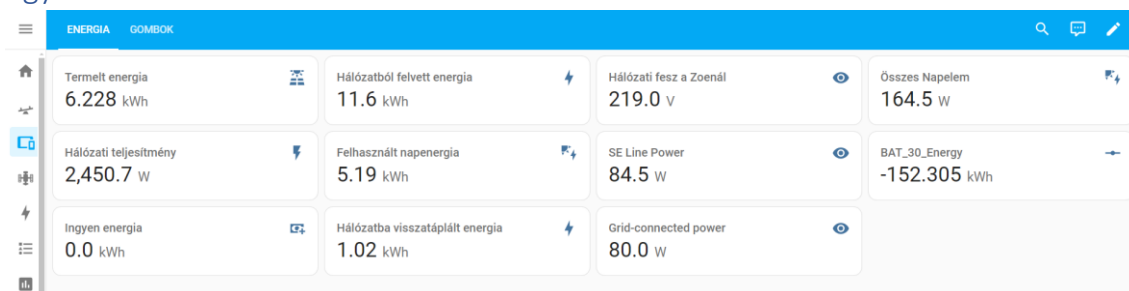
Akkor

- Tíz másodperc várakozás
- Ha $10A < \text{beáll.max.áram}$
 - o Tesla töltés = BE
- Tíz perc várakozás
- Ha $\text{beáll.max.áram} < 10A$
 - o Tesla töltés = KI

37. ábra Automatizmus a töltés indítására és leállítására



Egyéb funkciók



38. ábra HomeAssistant egyéb mért és számolt értékek

A rendszer méri, tárolja, feldolgozza a következő értékeket:

- Napi hálózathálba betáplált energia mennyisége.
- Napi hálózathálból vételezett energia mennyisége.
- Inverter 1 teljesítménye
- Inverter 1 napi megtermelt energia mennyisége.
- Inverter 2 teljesítménye
- Inverter 2 napi megtermelt energia mennyisége.

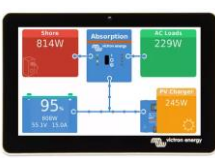
A rendszer számolja a következő értékeket:

- Napközben megtermelt villamosenergia mennyisége.
- Termelés közben elfogyasztott (napelemmel megtermelt) villamosenergia mennyisége.
- Több különböző kapacitású virtuális akkumulátorpakk szimulálása, így látható, mekkora akkumulátor kapacitás lenne elegendő a háztartásnak szigetüzemű működés esetén.
- Virtuális akkumulátorpakkok járműtöltéssel, és járműtöltés nélkül. (Ezzel szimulálható, hogy mi lenne, ha nem elégséges napelemes termelés esetén csak hálózati áramról töltődne az elektromos jármű.)

A rendszer figyeli az inverterek hőmérsékletét, és automatikusan kinyitja résnyire az inverterek helyiségeinek a nyílászáróit a fokozott légmozgás érdekében. Visszahűléskor, és éjszakára automatikusan becsukja a nyílászárókat. Ha emberi beavatkozás történt (pl.: kinyitottam teljesen a garázkaput, hogy be tudjak rajta menni), akkor is képes az automata rendszer bezárni a kaput.



Költségszámítás

	Saját rendszer	Saját rendszer ára	Victron Energy	Victron ára
Energia-mérő	 Shelly EM [8]	18.939 + 4.829 ~= 25.000Ft	 EM540 [19]	62.590Ft
Kontroller	 ESP8266 [11]	~2000Ft	 Cerbo GX [20]	130.900Ft
Szerver	 HomeAssistant Szerver [17]	~20.000Ft		
EV töltő	 LEKTRI (opcionális) [22]	~240.000Ft	 Victron Charger [23]	240.900Ft
Egyéb szerelések	 Passzív alkatrészek [16]	~8000Ft	-	-
SCADA	 Használt tablet [18]	~20.000Ft	 GX Touch [21]	104.900Ft
Végösszeg		75.000Ft (315.000Ft)		476.700Ft



Költség értékelés

Két ár van megadva a saját rendszerhez. Az alacsonyabbik érvényes, ha a felhasználó autója támogatja a távoli elérést és támogatja a töltőáram beállítást is, a magasabb pedig akkor érvényes, ha egy „okos” töltőt szükséges venni a jármű mellé. Tesláknak nem kell, ezt részletesen bemutattam. Renault, Audi, Mercedes tudnak töltésindítást/megállítást, Volkswagen/Seat/Cupra autók viszont semmilyen távoli elérést/parancsot nem támogatnak.

Egy ilyen „okos” töltőt szintén nem bonyolult építeni. Az autóval való kommunikációs szabvány egyszerű, csak meg kell venni hozzá a biztonsági rendszereket (ÁVK), reléket, csatlakozókat, és össze kell rakni. Nem bonyolultabb, mint a bemutatott SolarEdge inverter szabályozómodulja. Egy későbbi projekt/diploma/TDK munka keretein belül lehet, hogy bemutatom, hogyan működik/készül egy EVSE.

A Victron rendszer egy nagyszerű, kulcsrakész megoldást nyújt, és további félmillió forintért azonnal integrálható bele hálózati energiatároló rendszer is. Az én rendszerem szintén képes kezelni egy ilyen fejlesztést, de nem Plug&Play módon. Hátránya a Victron rendszernek, hogy mindenhova ugyanazt a LAN hálózatot ki kell húzni, nincs vezeték nélküli opció. Nem módosítható a grafikus felület, nagyon drága több felület kiépítése a hálózaton, nem integrálhatók bele jelenlétérzékelők, nem integrálható bele klíma kezelése, nem tud inverterhőmérséklet függvényében nyílászárókat kezelni, és ha valami tönkremegy benne, a javítás lassú, és körülményes, ha egyáltalán lehetséges, és nem cserés az alkatrész. Esetemben, ha tönkremegy a szerver, akkor SSD átépítése egy másik öreg számítógépbe és a rendszer már üzemelhet is. Mindeközben persze zavartalanul működik az inverter szabályozása, a rendszerembe épített redundancia miatt. Tönkremegy a képernyő? Nem probléma, a szekrényben van még két másik öreg tablet. Esetleg nem kommunikál az invertert vezérlő mikrokontroller? Egy új vásárlása - 2000Ft - , valamint a program feltöltése után már működik is.

Nos, a Victron Energy rendszere (és bármely más készen kapható rendszer) ipari színvonalú megoldás, amely hosszútávon valószínűleg megbízhatóságban jobb mutatókkal rendelkezik mint az enyém, azonban az ilyen megbízható megoldásokat gyárakba, kórházakba szükséges építeni, ahol minden kiesett percen emberéletek, vagy dollártízezrek, dollármilliók múlhatnak.

Véleményem szerint a háztartási rendszerekben más az igényelt ár/érték arány. Nekem pl. elegendő a 95%-os rendelkezésre állás is, amit magasan felülteljesít a rendszer.

Megbízhatóság

A tesztidőszak alatt (~9600 óra) két darab leállás volt, amely rendszer újraindítást igényelt. Mindkettőt egy rossz LAN hálózati átjátszóállomás okozta, ez ellen a Victron Energy rendszer sem védett. A tesztidőszak alatt nem fordult elő olyan esemény, ami az inverter szabályozás megszűnését, hálózati túltermelést okozott volna.



Fejlesztési lehetőségek

Gyorsabbá tehető a szabályozás, ha egy olyan inverter kerül szabályozandó inverternek felhasználásra, ami adatbeírás után azonnal állítja a kimeneti teljesítményt. Ebben az esetben PID szabályozó is alkalmazható lenne.

Beépítésre fog kerülni egy tartályos vízmelegítő, mely automata vezérlést, és HomeAssistant integrációt kap, ezzel a melegvíz (a napos időszakban) is így kerül majd előállításra.

Tervezés alatt áll egy olyan Type2 töltő (EVSE) fejlesztése, amely minden elektromos járművel kompatibilissá teszi a rendszert, és az offline adatkommunikáció miatt gyorsabb, és megbízhatóbb szabályozást tesz lehetővé.

A rendszerhez kivitelezés alatt áll egy (a házat) szigetüzemre átkapcsoló elektronika, amely használt, nagyjából azonos akkucellákat használ egy 150Wh-s áramszünet áthidaló akkumulátorhoz, és csatlakoztatható hozzá 10-50V között bármilyen akkumulátor, vagy jármű. Ezzel nagyban megnövelhető a ház áramszünet-áthidaló képessége.

A rendszerhez tervezés alatt áll egy használt Li-Ion akkumulátorokból álló hálózati energiatároló. Ebben a kihívást nem az automatizálás jelenti, hanem az 1kA ami a 3kW teljesítményhez kell.



Összegzés

Az alapproblémát az jelentette, hogy a hálózatba beépített napelemes rendszerek miatt kialakuló túltermelés alacsony eladási árú energiaexportra sarkallja a villamosenergia szolgáltatókat. A tervezetlen nagyfogyasztók üzemeltetése csúcsidőszakban drága energiaimportra kényszeríti az országot.

Ennek oka, hogy a felhasználók nem akkor fogyasztanak, amikor az „olcsó” energia termelésének részaránya magas, hanem akkor, amikor az számukra kényelmes.

Erre bemutattam egy működő megoldást, ami a Plug-In járművek töltését teszi szabályozhatóvá, azonban ezt a rendszert lehet használni hűtésre, fűtésre, használati melegvíz előállítására is.

Fontos megemlíteni, hogy szakítani kell a szemlélettel, miszerint addigra legyen temperálva a ház, amikor hazaérünk, akkor legyen melegítve a víz amikor zuhanyzunk, mert a szigeteléstechika óriási fejlődésen ment keresztül a házak, és a tartályos vízmelegítők terén is. A ház temperálható és a fürdővíz melegíthető napsütésben is, így csökkenthető a megújulók által hálózatra rótt terhelés, csökken a csúcsidőszakban exportált villamosenergia mennyisége, és nő az importfüggetlenség.

Az energiát akkor kell felhasználni, amikor az éppen rendelkezésre áll.

2024.12.13, Inárcs

Szalai Gábor



Források

- [1] 2024.09.14 – Negatív áramár
<https://www.vg.hu/energia-vgplus/2023/08/nullas-es-negativ-arak-a-magyar-aramtozsden-valodi-hir-vagy-csak-kacs>
- [2] 2024.09.14 – Plug-In autók terjedése
<https://villanyautosok.hu/2024/07/04/szazezer-felett-a-zold-rendszamos-jarmuvek-szama-magyarorszagon/>
- [3] 2024.09.14 – Háztartás napi fogyasztás (2022-es 2226kWh/év adatból)
https://www.ksh.hu/stadat_files/kor/hu/kor0044.html
- [4] 2024.09.13 – MAVIR energiamix (2024.04.14 adatok)
<https://www.mavir.hu/web/mavir/energia-mix-eromuvi-termeles-primer-forrasok-szerinti-megoszlasa-es-az-import-export-szaldo-brutto-uzemiranyitasi-meresek-alapjan>
- [5] 2024.09.15 – EA HUN Energia árak
<https://ember-climate.org/data-catalogue/european-wholesale-electricity-price-data/>
- [6] 2024.09.15 – VisszWatt védelem típusok
<https://soler.hu/visszwatt-vedelem/>
- [7] 2024.09.17 – SolarEdge PRI, RRRCR útmutató
<https://knowledge-center.solaredge.com/sites/kc/files/power-reduction-control-application-note.pdf>
- [8] 2024.09.17 – Shelly EM + 50A áramváltó
<https://sklep.wizro.pl/zestawy-shelly/2222-shelly-em-1x-scct-50a.html>
<https://www.okosabbotthon.hu/shelly-em>
<https://www.okosabbotthon.hu/shelly-50a-aramvalto>
- [9] 2024.09.18 – SolarEdge RS485, telepítési útmutató
<https://knowledge-center.solaredge.com/sites/kc/files/se-inverter-installation-guide.pdf>
- [10] 2024.09.18 – SolarEdge SunSpec implementáció
<https://knowledge-center.solaredge.com/sites/kc/files/sunspec-implementation-technical-note.pdf>
- [11] 2024.09.19 – ESP8266 ár és üzlet
https://www.hestore.hu/prod_10036631.html
- [12] 2024.09.19 – MAX485 modul (Hestore)
https://www.hestore.hu/prod_10035508.html
- [13] 2024.09.23 – Shelly EM Web Interface
https://bitekmindenhol.blog.hu/2020/06/29/shelly_em



- [14] 2024.09.29 – Tesla API dokumentáció
<https://developer.tesla.com/docs/fleet-api/getting-started/what-is-fleet-api>
- [15] 2024.09.29 – Tesla Custom Integration (HomeAssistant)
<https://github.com/alandtse/tesla>
- [16] 2024.10.01 – Passzív alkatrészek (kép)
<https://www.escomponents.com/passive-electronic-components-what-are-they3>
- [17] 2024.10.01 – Használt irodai gép = HomeAssistant szerver
https://hardverapro.hu/apro/hp_elitedesk_800_g2_dm_mini_pc_g4400t_8gb_ram_usb/hsz_1-50.html
- [18] 2024.10.01 – Victron Energy MPPT akkutöltő
https://kulsoaksi.hu/victron-energy-smartsolar-mppt-10030-12v-24v-30a-napelemes-toltesvezerlo-32184?gad_source=1
- [18] 2024.10.02 – Felhasználói felületet megjelenítő tablet (HA)
https://hardverapro.hu/apro/samsung_t805_galaxy_tab_s_10_5_lte_16gb_akcioo/hsz_1-50.html
- [19] 2024.10.02 – EM540 Victron fogyasztásmérő
<https://kulsoaksi.hu/victron-energy-em540-3-fazisu65a-fogyasztasmero>
- [20] 2024.10.02 – Cerbo GX központi egység
https://kulsoaksi.hu/victron-energy-cerbo-gx-kozponti-felugyelet-32570?gad_source=1
- [21] 2024.10.02 – Victron Energy GX Touch
https://kulsoaksi.hu/victron-energy-gx-touch-50-kijelzo-32698?gad_source=1
- [22] 2024.10.02 – LEKTRI 1P7K EV EVSE (töltő)
<https://evshop.eu/en/charging-stations/424-charging-station-lektrico-1p7k-em-type-2-74-kw-32a.html>
- [23] 2024.10.02 – Victron EV Charger (EVSE)
https://kulsoaksi.hu/victron-energy-22000w-32a-elektromos-jarmu-toltoallomas-31898?gad_source=1