

SZAKDOLGOZAT

Mikáczó Dániel

2024



Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem

Szent István Campus

**Mechatronikai mérnöki alapképzési gépipari
mechatronika szakirányú továbbképzési szak**

Háztartási napelemes rendszerek lokális feszültség szabályozása

Belső konzulens: Dr. Gergely Zoltán Albert

Egyetemi adjunktus

**Belső konzulens
intézete/tanszéke: Járműtechnikai tanszék**

Külső konzulens: nincs

Készítette: Mikáczó Dániel

Magyar Agrár – és Élettudományi Egyetem

Szent István Campus - Gödöllő

2024

MŰSZAKI INTÉZET
MECHATRONIKA ALAPSZAK
Gépipari mechatronika specializáció

SZAKDOLGOZAT
feladatlap

Mikáczó Dániel (CRRNDG)

részére

A szakdolgozat címe:

Háztartási napelemes rendszerek lokális feszültség szabályozása

Feladatkiírás:

Bevezetés, szakirodalom összefoglalás, Probléma bemutatása, feszültség szabályozó rendszer tervezése, irányító rendszer elemeinek kiválasztása, irányítási feladat megfogalmazása, irányító program elkészítése, továbblépési lehetőségek, gazdasági számítás, összefoglalás

Közreműködő tanszék: Mechatronika

Külső konzulens: *None, None*

Belső konzulens: *Dr. Gergely Zoltán Albert, egyetemi adjunktus*
, MATE MI

Beadási határidő: 2024. november 5

Gödöllő, 2024. szeptember 9

Jóváhagyom

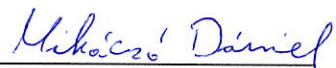


(tanszékvezető)



(szakfelelős)

Átvettem



(hallgató)

A dolgozat készítőjének külső konzulense nyilatkozom arról, hogy a hallgató az előre egyeztetett konzultációkon megjelent.

Gödöllő, 2024.

(külső konzulens)

Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék	1
1 Bevezetés és célkitűzés	3
2 Szakirodalmi áttekintés.....	4
2.1 Villamos hálózat felépítése.....	4
2.2 Fotovoltaikus napelemek (PV) felépítése és működése	7
2.3 Fotovoltaikus inverterek működése	8
2.4 Okosmérők és áramváltók alkalmazása.....	9
2.5 PLC felépítése	10
2.6 RS485 kommunikáció.....	12
2.7 Modbus protokoll	13
2.8 Napelemes rendszer okozta feszültségemelkedés jelensége	14
2.9 Kisfeszültségű hálózat hálózati előírások.....	15
2.9.1 P(U) szabályozás	16
2.9.2 Meddőteljesítmény termelés/nyelés	17
3 Anyag és módszer.....	18
4 Feszültség szabályozó rendszer tervezése	19
4.1 Irányítási feladat megfogalmazása	19
4.1.1 Első vizsgált rendszer.....	22
4.1.2 Második vizsgált rendszer	25
4.2 Irányító rendszer elemeinek kiválasztása	27
4.2.1 Inverter kiválasztása.....	27
4.2.2 Okosmérő kiválasztása	28
4.2.3 PLC kiválasztása	29
4.3 Irányító program elkészítése	30
4.3.1 Gray box modell.....	32

4.3.2	Program beállítása	33
4.3.3	Adat kiolvasás az okosmérőből	34
4.3.4	A szabályozás egyenletei	35
4.3.5	Inverter irányítása	38
4.4	Eredmények	40
4.4.1	Sztokasztikus zajok szűrése	40
4.4.2	A lineáris és a lépcsőzetes beavatkozójel összehasonlítása	43
4.4.3	PLC program megírása	44
5	Gazdasági számítás	45
5.1	Mérnök munkadíj	45
5.2	Anyagköltség	45
5.3	Összesen	45
6	Tovább lépési lehetőségek	46
6.1.1	További vizsgálatok éles rendszeren	46
6.1.2	Arduino Cloud integráció	46
6.1.3	Kompatibilitás további inverterekkel	46
	Összefoglalás	47
	SUMMARY	49
	Hivatkozások	51
	Ábrajegyzék	54
	Egyenletjegyzék	55
	Táblázatjegyzék	56
I.	Melléklet: A szabályozás PLC IDE programban	57
II	Melléklet: Teszt program Finder F7M okosmérővel	59

1 Bevezetés és célkitűzés

Napjainkban a megújuló energiaforrások használata a környezeti változások miatt egyre szükségesebbé válik. A globális CO₂ kibocsátás csökkentésének első számú eszköze a megfizethető és könnyedén telepíthető napelemes rendszerek lettek.

A világban a napelemes energiatermelés 2022-ben rekordmennyiségű, 270 TWh-val (26%-kal) nőtt, és megközelítette az 1 300 TWh-t. Az összes megújuló technológia közül 2022-ben ez a legnagyobb abszolút termelésnövekedést mutatja, és a történelemben először előzi meg a szélenergia növekedését. Ez a termelésnövekedési ütem megegyezik a 2050-ig megvalósítandó nettó nulla kibocsátási forgatókönyvben 2023 és 2030 között tervezett szinttel. A PV gazdasági vonzerejének folyamatos növekedése, az ellátási lánc masszív fejlődése és a növekvő politikai támogatás - különösen Kínában, az Egyesült Államokban, az Európai Unióban és Indiában - várhatóan tovább gyorsítja a kapacitásnövekedést az elkövetkező években. [1]

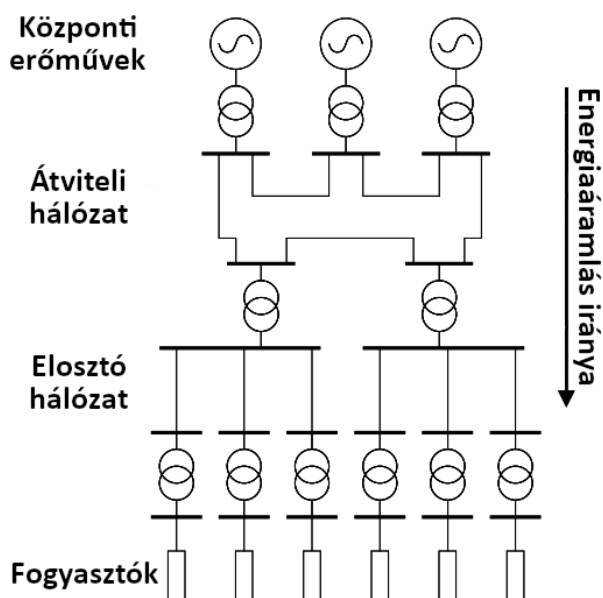
Ami a napenergia-potenciált illeti, Magyarországon a napsütéses órák száma 1950-2150 óra között mozog évente, az éves globális vízszintes napsugárzás pedig 1280 kWh/m². Ezek az értékek alapján Magyarország viszonylag nagy napenergia-hasznosítási potenciállal rendelkezik. A napelemes rendszerek az elmúlt években hatalmas növekedésbe kezdtek a technológiához való könnyedebb, és olcsóbb hozzáférhetőség, és a kormányzati támogatások következtében. A háztartási méretű kiserőművek (HMKE) mennyisége 2023 végére átugrotta a negyedmilliót. A népszámlálási adatokból kiderült, hogy a legalább 100 négyzetméteres, 2010 után épült lakóingatlanok több, mint negyedén van napelem. [2] [3]

Az elmúlt években a napelemes rendszerek elterjedése Magyarországon hatalmas ütemben gyorsult köszönhetően a kedvező elszámolásnak, és az állami támogatásoknak. Az áramszolgáltatók nem tudták lekövetni ezt a hirtelen növekedést, ami hálózati túlterhelést eredményezett országsszerte. A túlterhelés magas hálózati feszültség formájában jelentkezett, aminek a következtében a napelemes rendszerek hatékonysága, és a háztartási elektromos berendezések élettartama csökkent. A napelemes invertereknek az előírt magas hálózati feszültség esetén le kell állniuk. A termelés leállást lokális feszültségszabályozás segítségével lehetőség van csökkenteni, jobb esetben megszüntetni. Jelen dolgozatom célja egy olyan lineáris feszültségszabályozó létrehozása, amit az elosztói szabályzat előír, de egyes napelemes inverterek jelenlegi beállíthatósága nem tesz lehetővé.

2 Szakirodalmi áttekintés

2.1 Villamos hálózat felépítése

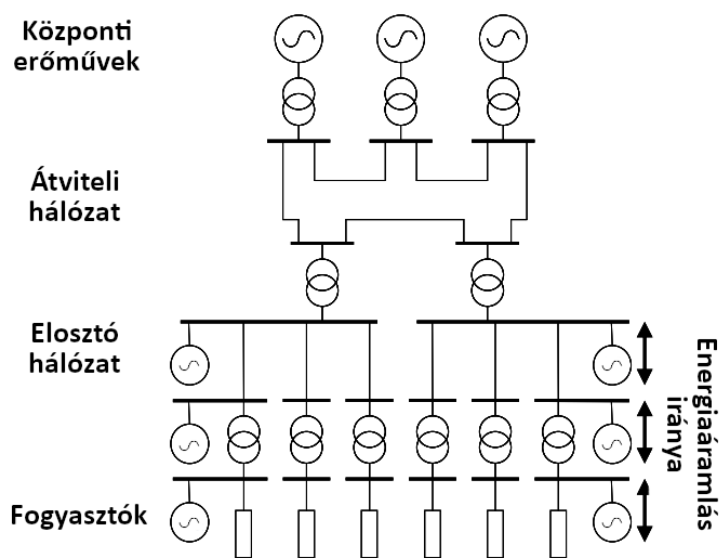
Az elektromos hálózat hagyományos szerkezete (lásd 1. ábra) a villamos energia szállítására lett kifejlesztve a nagy erőművektől a fogyasztók irányába. A villamos energiát nagy erőművekben központilag koncentráltan állítják elő, amit központi állomásoknak nevezünk. A megtermelt villamos energia feszültségét feltranszformálják nagyfeszültségre (220 - 400 kV), amit az átviteli hálózaton keresztül veszteségek mellett nagy távolságokra továbbítanak. Ezután a feszültséget közép- és alacsonyfeszültségre (10 – 20 kV), illetve kisfeszültségre (0,4 kV) letranszformálják, hogy a sugárirányú elosztóhálózatokon keresztül a fogyasztókhoz juttassák el (ahogyan az első ábrán is látható). [4] [5]



1. ábra: Hagományos villamosenergia hálózat felépítése [4]

A hagyományos villamosenergia-rendszerek már több mint 70 éve léteznek, és az évek során folyamatosan fejlődtek. Ezek a hagyományos rendszerek számos előnnyel rendelkeznek, mint például a hatékonyság, és viszonylag kis létszámú személyzettel való üzemeltethetőség. A hálózat alapvetően stabil működésre van tervezve, ami a terhelés függvényében használja ki az erőművek kapacitását. Az elektromos kábelekkal nagy teljesítményt nagy távolságokra lehet szállítani, mindazonáltal a rendszerek nem makulátlanok, és az átvitel és szállítás során az energia egy része veszteségként elvész. [4] [6]

Európa számára jelenleg fontos cél a decentralizált energiaellátás megvalósítása. Ez azt jelentené, hogy a nagy, központosított erőművektől a megújuló energiaforrásokat jobban kihasználó kis, helyi hálózatokra térnénk át, ahol a szállításból fakadó veszteségek elhanyagolhatóak és könnyedén tárolhatóak (lásd 2. ábra). Ahogy a második ábra is mutatja, ezek olyan kisméretű villamosenergia-termelő egységek, amely a terhelés helyén, vagy annak közelében szolgáltat villamos energiát, és csatlakoztatva van az elosztóhálózathoz, vagy közvetlenül a fogyasztó létesítményekhez, akár mindkettőhöz. Ez egy rugalmasabb modellt jelentene, ahol a fogyasztók irányíthatják energiafelhasználásukat, és élhetnek a termelő-fogyasztókká válás lehetőségével. [6]



2. ábra: Villamos hálózat a kisméretű termelő egységek jelenlétével [4]

A legtöbb villamosenergia-piacon növekszik az elosztott energiatermelés elterjedtsége, és ez a fejlődés várhatóan folytatódni fog a közeljövőben. Általánosságban három politikai célt lehet megkülönböztetni, amelyek a decentralizált termelés növekedését ösztönzik: az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentése (a Kiotói Jegyzőkönyv), a megújuló energiaforrások felhasználása (a megújuló energiaforrásokról szóló európai irányelv) és az energiahatékonyság javítása (a kapcsolt energiatermelésről szóló európai irányelv). A jövőben megválaszolandó fő kutatási kérdés az, hogy az elosztórendszer-üzemeltetők, és az energiaszolgáltatók hogyan tudnak alkalmazkodni a növekedéshez, és ezzel párhuzamosan

hogyan tudnak hozzájárulni a napelemes rendszerek versenyképességének erősítéséhez a szabályozott és versenyző villamosenergia-piacon. [7]

Az decentralizált energiatermelés számos előnnyel járhat a villamosenergia-hálózat számára, beleértve a rendszer megbízhatóságának javulását, a kibocsátás csökkentését az energiahatékonyság növelése és a szénelapú villamosenergia-termelés kiszorítása révén, a szállítási veszteségek elkerülését, valamint az átviteli rendszer szűk keresztmetszeteinek enyhítését. Bizonyos típusú termelők képesek bizonyos hálózati kiegészítő szolgáltatásokat is nyújtani a rendszerüzemeltetőnek, például a reaktív teljesítménytámogatást és a feszültségszabályozást, amelyek javítják a teljesítmény minőségét. [7]

A decentralizált energia felé való elmozdulást Európában számos tényező mozgatja. Ezek a tényezők a következők:

- Az éghajlatváltozás kezelése az üvegházhatású gázok csökkentése révén;
- A megújuló energiafelhasználás növelésének szükségessége;
- Az energiahatékonyság növelésének szükségessége;
- Az energiabiztonság növelésének szükségessége az import csökkentésével, és a megújuló energiára való nagyobb támaszkodással;
- a növekvő villamosenergia-igény Európa-szerte, és
- az európai energiapiacok liberalizációja. [8]

Az elosztott termelés növekvő aránya azonban befolyásolja az energiarendszer felépítését, és a szabályozási kérdésekkel együtt negatívan befolyásolhatja az elosztórendszer-üzemeltetők üzleti tevékenységét. Mivel a HMKE egységek általában közelebb helyezkednek el a kereslethez, mint a központi termelés, a gyakoribb elterjedésük az áramszolgáltatók bevételeinek csökkenését eredményezheti, mivel kevesebb áramra van szükség a megtermelt villamos energia fogyasztók ellátásához. A csökkenő bevételek mellett a napelemes rendszerek növekvő elterjedése a költségek növekedéséhez is vezethet. A háztartási méretű napelemes kiserőművek (továbbiakban HMKE) többnyire alacsony feszültség szinten csatlakoznak az elosztóhálózathoz, olyan helyeken, amelyeket eredetileg nem energiatermelő létesítmények csatlakoztatására szántak. Ez az új helyzet számos problémát okozhat az elosztóhálózatok számára a stabilitás, és a teljesítményminőség szempontjából. Minél több HMKE csatlakozik egy adott elosztóhálózathoz, annál nagyobb a kihívás. [7]

2.2 Fotovoltaikus napelemek (PV) felépítése és működése

A napelem két, vagy több vékony félvezető anyagból, leggyakrabban szilíciumból álló rétegből áll. Amikor a szilíciumot fény éri, elektromos töltés keletkezik, amely a fémérintkezőkön keresztül egyenáram formájában elvezethető. Egyetlen cella elektromos kimenete kicsi, ezért több cellát összekapcsolnak, hogy modult (más néven panelt) alkossanak. A PV-panel a PV-rendszer fő építőeleme, és tetszőleges számú panel csatlakoztatható egymáshoz a kívánt elektromos teljesítmény elérése érdekében. Ez a moduláris felépítés a PV-rendszer jelentős előnye, mivel a meglévő rendszerhez igény szerint további paneleket lehet hozzáadni. A fotovoltaikus hatás megértéséhez szükséges néhány alapvető elméleti ismeret a félvezetőkről, és azok fotovoltaikus energiaátalakító eszközként való felhasználásáról, valamint a p-n átmenetetről. [9]

A fotovoltaikus cella egy p-típusú, és egy n-típusú félvezetőből álló átmenetet, azaz p-n átmenetet tartalmaz. Bizonyos mértékig elektronok, és lyukak diffundálnak át ennek az átmenetnek a határán, elektromos mezőt hozva létre rajta. A szabad elektronok az n-rétegben a fotonok hatására keletkeznek. Amikor a napfény fotonjai a napelem felületére érnek, és a félvezető elnyeli őket, néhányuk elektron- és lyukpárokat hoz létre. A folyamat a pn átmenetben jön létre. Ha ezek a párok elég közel kerülnek a p-n átmenethez, annak elektromos tere a töltések szétválását okozza, az elektronok az n-típusú oldalra, a lyukak pedig a p-típusú oldalra vándorolnak. Ha a napelem két oldala egy terhelésen keresztül összekapcsolódik, elektromos áram folyik mindaddig, amíg napfény éri a cellát. [9]

A PV-modulokat kültéri használatra tervezték, olyan zord körülmények között, mint a tengeri, trópusi, sarkvidéki és sivatagi környezet. A fotovoltaikus cellák atomszerkezete lehet egykristályos, polikristályos, vagy amorf. A leggyakrabban előállított PV-anyag a kristályos szilícium, akár egykristályos, akár polikristályos. [9]

- **Mono-kristályos (egykristályos) szilícium:** A szilícium tömböket ostyákra vágják. Magasabb hatásfokkal rendelkezik (nagyságrendileg 20-25%). Mivel gyártása bonyolultabb és időigényesebb, általában drágább, de jobb teljesítményt nyújt kisebb felületen. [10]

- **Poli-kristályos (több kristályos) szilícium:** Több, kisebb kristályból áll, szerkezete kevésbé rendezett. Emiatt alacsonyabb hatásfokú (kb. 20% jelenleg), de olcsóbb és ellenállóbb a sugárzás okozta degradációval szemben. Emiatt hosszú távon jobban bírja a környezeti hatásokat, bár valamivel több helyet igényel ugyanolyan teljesítmény eléréséhez. [10]
- **Vékonyréteg (Thin Film, Amorfi):** A vékonyrétegeket úgy készítik, hogy mikrométeres (μm) tartományban rendkívül vékony rétegeket raknak le fényérzékeny anyagokból, alacsony költségű hordozóra, például üvegre, rozsdamentes acélra vagy műanyagra. A vékony filmrétegek fő előnyei a viszonylag alacsony nyersanyag-felhasználás, a magas fokú automatizáltság, és gyártási hatékonyság, az épületekbe való könnyű integrálhatóság, és a jobb megjelenés, a jó teljesítmény magas környezeti hőmérsékleten, valamint a kisebb érzékenység a túlmelegedésre. Jelenlegi hátrányai közé tartozik az alacsonyabb hatásfok. [10]

2.3 Fotovoltaikus inverterek működése

A hálózatra kapcsolt napelemes rendszerben a hálózati inverter kulcsfontosságú a fotovoltaikus (PV) stringekről (sorba kapcsolt napelemek) származó egyenáramú energia váltakozó áramúvá alakításához, hogy az megfeleljen a hálózati feszültségnek és frekvenciának. A termelt egyenáramot az inverter segítségével váltakozó áramra alakítják át, mielőtt a közüzemi hálózatba táplálják. Az inverter kimenete lehet egy- vagy háromfázisú. Háromfázisú inverterek sok esetben három kisebb egy fázisú inverterből van gyárilag összeépítve. A következő inverter kialakításokat különböztetjük meg: [9] [11]

- **Mikro-inverterek:** Ezek a készülékek a napelem modulokba vannak integrálva, létrehozva egy kompakt, akár hordozható napelemes rendszert. Előnyük, hogy nincs többszáz volt egyenáram a rendszerben. [9]
- **String inverterek:** Az inverterben számos string csatlakozik saját egyenáramról egyenáramra (DC-DC) átalakítójához, mindegyikhez külön Maximum Power Point Tracking (MPP) rendszerrel. Az MPP automatikusan optimalizálja az áramot, és feszültséget, hogy a napelem rendszer mindig a legnagyobb teljesítményt biztosítsa. Ezután az összes string egy közös egyenáramról váltóáramra (DC-AC) átalakítóhoz kapcsolódik. Minden stringet egyedileg lehet szabályozni. Moduláris felépítésű, és könnyen bővíthető új string hozzáadásával a meglévőhöz. [12]

- **Teljesítményoptimalizálóval rendelkező inverterek:** A teljesítmény-optimalizálási technológia az egyes modulok specifikus áram- és feszültségigényeinek megfelelően történő beállításával garantálja, hogy a modulok mindig maximális kapacitással működjenek, függetlenül a napelem string többi moduljának teljesítményétől, és mérsékli a teljesítménykülönbségekből eredő energiaveszteségeket. Ez jelentős előny a hagyományos inverter rendszerekkel szemben, ahol a PV rendszer leggyengébb moduljai lerontják az egész rendszer teljesítményét. A rendszerben a gyengébb modulok nem befolyásolják az erősebbeket. [13]

Az invertereket a teljes teljesítménykapacitás alapján különböztetik meg. Az inverterek hatékonyságát a DC oldali kapacitás bővítésével lehet növelni, nagyobb rendelkezésre álló teljesítmény esetén az inverter könnyebben, és hosszabb ideig is el tudja érni a maximális névleges teljesítményét. Nagyobb rendszer teljesítmény eléréséhez több invertert lehet összekötni, amivel egy master-slave kapcsolatot hozunk létre. A fő inverter lesz a master, ami irányíthatja a többi slave invertert. [9]

2.4 Okosmérők és áramváltók alkalmazása

Az érzékelő, ellenőrző és működtető rendszerek kulcsszerepet játszanak a lakossági és kereskedelmi energiafogyasztás mérésében. A teljesítménymérő rendszerek általában transzformátorokat, és érintésmentes áramérzékelőket használnak, mint például a tömörmagos áramtranszformátorok, osztott magos áramtranszformátorok, FeSi osztott magos áramtranszformátorok, és FeNi osztott magos áramtranszformátorok. Ezért ma számos technológia áll rendelkezésre az áramérzékelésre az elektromos mérőeszközökben. A tömörmagos áramérzékelő technológia jó teljesítményt nyújt alacsony költségek mellett. Az osztott magos érzékelők azonban különösen az olyan alkalmazásokban érnek el jelentős fejlődést, mint például meglévő berendezések utólagos felszerelése teljesítménymérőkkel. Néhány újabb osztott magos áramtranszformátor könnyebb, így lehetőséget nyit a költséghatékonyabb és pontosabb érzékelők számára. [14]

Áramváltók transzformátor (CT)

Az áramérzékelő transzformátor (CT) egy huzalból készült tekercs, amely felveszi a fő vezetékben lévő áram által létrehozott mágneses mezőt. Az EMF (indukált feszültség) egy feszültségjel, amely arányos az áramváltozással. [14]

Okosmérők

Az okosmérő alacsony költségű ellenállásos söntöket és opcionális érzékelő interfészeket használ. Ezek a mérési megoldások kiküszöbölik a drága, és terjedelmes áramtranszformátorok szükségességét, ami csökkenti a költségeket, és a készülékház méretigényét.

A Smart Grid egyik fő kihívása az információs és kommunikációs technológia (ICT) alapú adatkommunikációs hálózat. Az áramérzékelőket vezeték nélküli kommunikációs hálózatokkal integrálják, mivel ezek zökkenőmentesen képesek a készülékek monitorozására és vezérlésére. Az olyan technológiák, mint a ZigBee, lehetővé teszik, hogy az otthoni energiaszabályozó kezelje, és figyelje a fogyasztói energiafogyasztást, beleértve a valós idejű árazást, és a keresletválasz-rendszert.

Az okosmérők valós idejű energiafogyasztást rögzítenek, és legalább napi szinten továbbítják az adatokat, növelve a mérési intervallumok részletességét. Ez lehetővé teszi a végfelhasználók számára, hogy figyelemmel kísérjék saját energiafelhasználásukat, és a közüzemi hálózatba betáplált energiát. Az okosmérőkben található érzékelők, és integrált áramérzékelők megbízható, nagy pontosságú, és alacsony költségű módot biztosítanak az energia mérésére. [14]

2.5 PLC felépítése

A programozható logikai vezérlő más néven PLC (Programmable Logic Control), a mikroprocesszor-alapú vezérlő ipari formája, amely egy könnyű programozhatóságú, megbízható, minimális karbantartásigényű, gyors, összetett műveletek elvégzésére képes ipari vezérlő. Segítségével egy vezérlést a vezetékezés megbontása nélkül meg lehet változtatni, elegendő egy új PLC program feltöltése. A PLC segítségével lehetséges a vezérlés paramétereinek üzem közbeni változtatása, naplózása, visszajelzése, illetve kiértékelése. A PLC-ket kivitel alapján különböztetjük meg: [15] [16]

Kompakt PLC-k

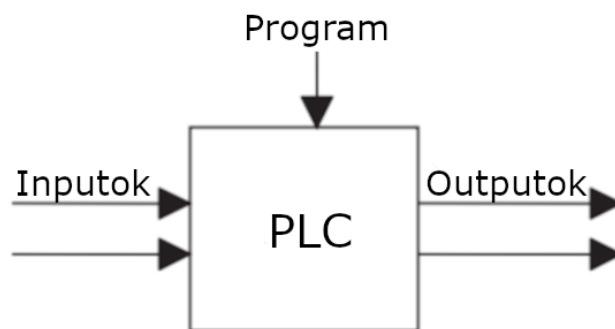
- Kisméretű
- Fix hardverstruktúrájú
- Megfelelő ipari tokozással ellátott

- Minimálisan bővíthető I/O egységgel és memóriakártyával [16]

Moduláris felépítésű PLC-k

- Speciális funkciót önmagában ellátó modulokból épül fel
- Modulok úgynevezett rack-be (tartókeret) dugaszolhatók
- Konfigurációja bővíthető
- ipari folyamatok irányítására fejlesztették ki [16]

A PLC (lásd 3.ábra) általában egy központi feldolgozóegységből (CPU) áll, amely tartalmazza a rendszer mikroprocesszorát, a memóriát és a be- és kimeneti áramköröket. Gyakorlatilag egy olyan egységnek tekinthető, amely nagyszámú különálló relét, számlálót, időzítőt és adattároló egységet tartalmaz. Ezek azonban fizikailag nem léteznek a PLC-ben, hanem szoftveresen szimuláltak. A PLC bemeneti/kimeneti (I/O) egysége biztosítja a rendszer, és a külvilág közötti interfész áramköreit, lehetővé téve a bemeneti/kimeneti csatornákon keresztül a bemeneti eszközökhöz, például érzékelőkhöz, és kimeneti eszközökhöz, például motorokhoz és mágnesszelepekhez való csatlakozást (ahogyan a harmadik ábrán látható).



3. ábra: Programozható logikai vezérlő [17]

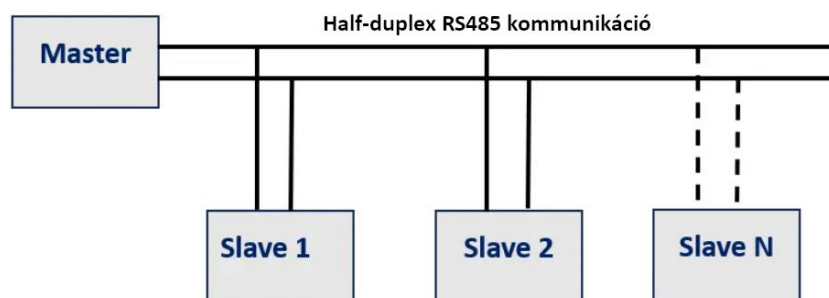
A PLC-kel használható programok többféle formátumban írhatók. Annak érdekében, hogy a programozásban nem jártas mérnökök számára megkönnyítsék a PLC-hez való programírást, kifejlesztették a létraprogramozást. A legtöbb PLC-gyártó átvette ezt a programírási módszert; azonban mindegyikük hajlamos volt saját verziókat kifejleszteni, így a létraprogramozásra, sőt a PLC-k programozására használt összes módszerre nemzetközi szabványt fogadtak el. A IEC

61131-3 szabályban öt nyelv van meghatározva: létradiagram (LAD), Sorrendi folyamatábra (SFC), funkcióblokk diagram (FBD), strukturált szöveg (ST) és utasításlista (IL). [17]

2.6 RS485 kommunikáció

Az RS485 egy 1983-ban létrehozott ajánlott szabvány (Recommended Standard), amely egy differenciális jelfeldolgozó szabvány, amely meghatározza a meghajtók, és vevők elektromos jellemzőit a kiegyensúlyozott többpontos átviteli vonal megvalósítására [18].

Az RS-485 (lásd 4. ábra) lehetővé teszi a soros kommunikációt egy többpontos hálózaton keresztül. Példák erre: a minimális jelamplitúdó a jeladó oldaláról, a vevő bemeneti érzékenysége és a vevő bemeneti impedanciája. A szabvány nem definiálja a kábelezést, a csatlakozókat és az adatprotokollt, így a rendszertervezők számára rugalmasságot biztosít. Az RS-485 meghajtók nagy differenciális jelet továbbítanak az RS-485 terhelés felé, ami lehetővé teszi, hogy a jel hosszú távolságokra jusson el, miközben elég nagy marad ahhoz, hogy a vevő pontosan értelmezze [18].



4. ábra: RS485 Half-duplex kommunikáció [19]

- **Half-duplex RS-485 busz konfiguráció:** Egy kétvezetékes busz több adóból és vevőből áll, amelyeket egyetlen vezetékpárra kötnek. A kommunikációban egy adó-vevő vagy adatot küld, vagy fogad, de nem mindkettőt egyszerre. A buszhoz csatlakoztatott adók közül egyszerre csak egy lehet aktív, vagy engedélyezett. Ha több adó egyszerre aktív, adatvesztéshez vezethet, és a jeladókat is károsíthatja [18].
- **Full-duplex RS-485 busz konfiguráció:** Egy négyvezetékes busz mester-szolga konfigurációban működik, ahol a mester csomópont meghajtója párhuzamosan csatlakozik minden szolga vevőhöz az egyik vezetékpáron, a mester csomópont vevője pedig párhuzamosan csatlakozik minden szolga meghajtóhoz egy másik vezetékpáron.

A különálló buszkábelek lehetővé teszik a kétirányú, egyidejű kommunikációt a mester és a szolga csomópont között. [18]

2.7 Modbus protokoll

A Modbus protokollt 1979-ben vezette be a "Modicon" nevű cég, amely úttörő volt a programozható logikai vezérlők (PLC) piacán. Eredetileg a Modicon PLC-k és a vezérlők programozására használt programozó panelek közötti pont-pont kommunikációs protokollnak szánták. Ez egy nyílt rendszer, amely jogdíjmentesen használható. A Modbus protokoll egy mester-szolga protokoll, amely csak egy mestert és legfeljebb 247 szolgáltszert engedélyez [20].

A Modbus protokollban csak a mester kezdeményezhet üzenetet, a szolgáltszerek ezt nem tehetik meg. Hiba esetén a szolga nem tudja értesíteni a mestert, amíg a mester nem küld egy lekérdezést a szolga felé. A lekérdezés-válasz ciklusnak be kell fejeződnie, mielőtt a mester elküldi a következő lekérdezést, akár ugyanannak, akár egy másik szolgáltszernek. Ez eltér más protokolloktól, amely képesek egy multicast (egyszerre több) parancsot küldeni, majd több eszköz választ várni tetszőleges sorrendben erre az egy parancsra. A Modbus nem rendelkezik multicast képességgel, így idővesztés keletkezik, mivel minden egyes mesteri lekérdezés megköveteli, hogy a címzett szolga ne csak fogadja az üzenetet, hanem reagáljon is rá, mielőtt a mester továbblépne más kommunikációs feladatokra [20].

A Modbus protokollal rendelkező eszközök regiszterekben (kisméretű tárolóegység) tárolják az adatokat. Az üzenetküldés funkciókódok segítségével valósul meg. A különböző kódok különböző típusú regiszterek értékeinek lekérdezésére és írására szolgálnak. Nagyon fontos a megfelelő funkciókód használata. Nagyságrendileg 20 különböző kód van használatban [20].

Modbus RTU

RTU módban az időzítés kritikus fontosságú. Nincs külön "keret kezdete" karakter. Ehelyett az üzenetkeret négy karakter idejű jelzéssel kezdődik. Ezen intervallum után a készülék címe következik, majd a funkciókód, és az adat, összesen 8 bit hosszan. A ciklusok végén egy robusztusabb ciklikus redundanciavizsgálat (CRC) ellenőrzést alkalmaznak az adatokra. A keret végének jelzése szigorúan négy karakter idejű jelzésen alapul. Az RTU üzeneteket folyamatos adatfolyamként kell küldeni, és bármilyen jelentős szünet a karakterek között üzenetvesztést okozhat. Az RTU üzenetek nem olvashatók ember által. [20]

2.8 Napelemes rendszer okozta feszültségemelkedés jelensége

A napenergia-rendszerek (PV)- kapacitásuktól függően -hozzájárulnak a háztartások hálózatára csatlakoztatott terhelések egy részének kiszolgálásához. A helyben történő energiatermelés a PV rendszerek segítségével segít csökkenteni az elosztóvezetékek terhelését, javítja a rendszer teljesítményét a vezetékveszteségek csökkentésével, valamint felszabadítja a hálózati kapacitást. Ugyanakkor a PV rendszerek magas szintű integrációja több kihívást is jelenthet az elosztóhálózat üzemeltetői számára. A napelemes inverterek nagymértékű elterjedése kihívást jelent a kisméretű elosztói hálózat számára a feszültségstabilitás szempontjából az inverterek, és a hálózat közötti kölcsönhatások miatt. [21] [22] [23] [24]

Az elosztóvezetéseken, PV rendszerek nélkül, a feszültség általában csökken az alállomástól a távolabbi végpontig a vonali impedanciák és a terhelések miatt. A PV rendszerek integrációjával azonban javul a feszültségprofil, mivel a vezeték egyes szakaszainál csökken a feszültségesés a kisebb hálózati terhelés miatt. Ha a PV termelés minden csatlakozási ponton tökéletesen kiegyenlíti a terhelést, akkor ideálisan nem lenne aktív teljesítményáramlás a vezetéken keresztül, és a feszültségprofil majdnem egyenes lenne. Azonban, ha a PV termelés meghaladja a vezeték terhelését, különösen a vezeték legtávolabbi végén, akkor a teljesítmény visszaáramlik a hálózat felé, ami feszültségnövekedést okoz. Ebben az esetben a feszültségnövekedés a PV csatlakozási pontokon jelentkező többlet teljesítmény miatt következik be. [24]

A napenergia-rendszerek csúcsterhelési ideje általában délben van, amikor a napsugárzás szintje a legmagasabb, ugyanakkor a háztartási terhelés ebben az időpontban általában alacsonyabb. Ezért az alacsony feszültségű elosztóvezetéseknél ebben az időszakban feszültségnövekedés tapasztalható az alacsony terhelés, és a maximális PV termelés miatt. Az elosztóhálózatok üzemeltetőinek azonban biztosítaniuk kell, hogy a vezetéken a feszültség szintek ne lépjék túl a helyi szabványokban meghatározott határértékeket. A PV rendszerek nagy arányú integrációja esetén fennáll a felső feszültséghatár átlépésének lehetősége. [21] [22] [23] [24]

2.9 Kisfeszültségű hálózat hálózati előírások

A hálózati előírások meghatározzák a villamosenergia-szolgáltatás minőségi követelményeit és a feszültségszabályozás szabályait, amelyek biztosítják a megbízható és stabil szolgáltatást a fogyasztók számára [25].

A kisfeszültségű hálózatok esetében a névleges feszültség 400/230 V. Az előírások szerint a fogyasztói csatlakozási pontokon mért feszültség effektív értékeinek egyhetes időszakon belüli mérését követően, a feszültség értékeinek 95%-a a névleges érték $\pm 7,5\%$ -án belül kell, hogy maradjon. Ez biztosítja, hogy a háztartások és egyéb kisfeszültségű fogyasztók stabil és biztonságos feszültséget kapjanak [25].

A rövid idejű feszültségváltozások, amik olyan gyors és rövid távú ingadozások, amelyek az ellátó hálózat dinamikus terhelésváltozásai, például nagy teljesítményű berendezések be- és kikapcsolása miatt következnek be. Ezek az ingadozások problémákat okozhatnak érzékeny elektronikus eszközök számára, ezért a szabályozás célja, hogy minimalizálja az ilyen jellegű feszültség-ingadozások gyakoriságát és mértékét [25].

A feszültségletörésekre, azaz a feszültség rövid idejű hirtelen csökkenésére is vonatkoznak előírások. Az ilyen események évente maximum 300 alkalommal fordulhatnak elő. A feszültségletörések leggyakoribb okai közé tartoznak az ideiglenes hálózati zavarok, -például egyes fogyasztók nagyobb teljesítményű gépeinek bekapcsolása- vagy bizonyos időszakokban fellépő magasabb terhelési igények. Az előírások célja, hogy ezek az események ne legyenek gyakoriak, és ne okozzanak problémákat a fogyasztók számára [25].

A hálózati előírások betartása alapvető fontosságú mind a szolgáltatók, mind a fogyasztók számára. A szolgáltatóknak az előírásoknak megfelelő feszültségszinteket és hálózati paramétereket kell biztosítaniuk, hogy elkerüljék a fogyasztók eszközeinek károsodását, és biztosítsák a szolgáltatás megbízhatóságát. Az előírások megszegése esetén a szolgáltatók akár jogi következményekkel is szembesülhetnek, valamint a fogyasztók elégedetlensége is problémát jelenthet. A fogyasztók számára is fontos, hogy tisztában legyenek a hálózati előírásokkal, különösen akkor, ha saját generátort (pl. napelemes rendszert) telepítenek az ingatlanukra. A hálózatra csatlakozó generátorok feszültségnövekedést okozhatnak, ami befolyásolhatja az ingatlan energiaellátását és a hálózat stabilitását. [25]

2.9.1 P(U) szabályozás

A napelemes rendszerek esetén a leggyakrabban előforduló hiba a kitáplálás következtében jelentkező megnövekedett hálózati feszültség, ami a megengedett szint fölött már komoly károkat tud okozni az elektromos berendezésekben. Az elosztói szabályzat kötelezően előírja az inverterek és központi hálózatvédelmek számára a megengedett legnagyobb hálózati feszültséget, ami $230\text{ V} \pm 10\%$. Feszültségszabályozás hiányában a napelemes rendszer a felső határt elérve lekapcsol, és a feszültség szint megfelelő csökkenése esetén indul csak újra, ami a tulajdonosnak termelési veszteséget, és az inverter sérülékeny komponensei számára veszélyt jelent az állandó ki – bekapcsolások miatt. [26]

Ennek a veszteségnek a korrigálására és a hálózat stabilitása miatt a magyarországi elosztói szabályzat az inverterek, és központi hálózatvédelmek számára feszültségfüggő hatásos teljesítményszabályozást ír elő, aminek aktivált állapotban kell lennie. A szabályozás lépcsőzetes, vagy lineáris karakterisztikával valósítható meg. A stabilabb működés szempontjából a lineáris karakterisztika preferált, de annak hiánya esetén a lépcsős karakterisztika is megfelelő. A lineáris beállítás az előírt módon kell beállítani: [27]

1. táblázat: *P(U) szabályozás lineáris karakterisztikája [27]*

$U_{\text{küszöb}}$	$\Delta P_{\%}$
250 V	-33.34%/V

A P(U) lépcsőzetes karakterisztikát az alábbiak szerint kell beállítani:

2. táblázat: *P(U) szabályozás lépcsős karakterisztikája [27]*

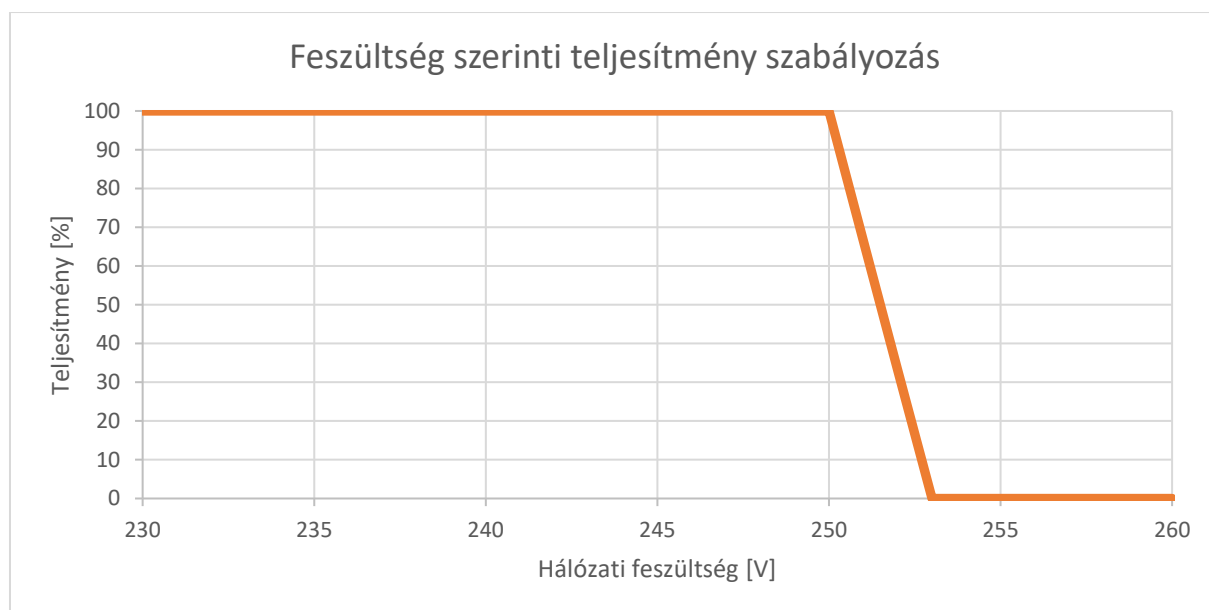
U	$P_{\%}$
250 V	100%
251 V	66,6%
252 V	33,3 %
253 V	0 %

Az inverter működéséből adódóan a megtermelt energiát elsősorban az épületen belüli fogyasztók számára biztosítja, míg a megmaradó többletet a hálózatba kitáplálja. Ebből

fakadóan az inverter hálózati feszültsége a csatlakozási ponthoz képest mindig magasabb lesz. Az inverter a hálózaton a betáplálási ponttól távolabb elhelyezkedő fogyasztónak az ellátásához a szükséges energiát csak a hálózati feszültség emelkedésének a segítségével tudja megtermelni, mivel csak abban az esetben fog abba az irányba áramlani az energia [26].

Az inverterek a feszültségszabályozás hiányban a 253 V hálózati feszültséget átlépve megadott időn belül le kell állnia, abban az esetben, ha ez idő alatt a feszültség nem csökken vissza a megengedett érték alá. [26]

Feszültségfüggő hatásos teljesítményszabályozásnak (lásd 5. ábra) 250 V értéknél aktiválódnia kell, ami alatt az inverter a rendelkezésre álló energia 100%-át megtermelheti. Lineáris szabályozás esetén az inverter 250 V felett minden további 1 V-os feszültségemelkedésre 34 %-os fokozatmentes leszabályozással fog reagálni, ami maximális 253 V-ot elérve 102 %-os leszabályozást fog jelenteni. Erre azért van szükség, hogy az inverter termelése picivel már a 253 V-os határ előtt leálljon. [26]



5. ábra: Elosztói szabályzat által előírt feszültségszabályozási karakterisztika [26]

2.9.2 Meddőteljesítmény termelés/nyelés

Az MSZ EN 50549-1 szabvány szerint az invertereknek alkalmasnak kell lenniük az alábbi fázisszögű meddőteljesítmény termelésére/nyelésére [27]:

$$\cos\varphi = 0,9_{\text{alulgerjesztett}} - \cos\varphi = 0,9_{\text{túlgerjesztett}}$$

3 Anyag és módszer

A dolgozatom fő célja a hálózati feszültség- Magyarországon elterjedt hibajelenség- negatív hatásainak kiszűrése, és létrejövetelüknek a megakadályozása. Az elmúlt években a telepített napelemes rendszerek száma robbanásszerűen megnőtt. Ezt a hirtelen növekedést egy állami támogatás, illetve a szaldó elszámolás indította meg. Az áramszolgáltatók kapacitás hiányában nem mérték fel eléggé az engedélyezés során a hálózat állapotát, így rengeteg helyen rendszer túlterhelés alakult ki. Ilyen területek a mai napig találhatók országszerte, főleg kisebb városokban és falvakban, ahol az elektromos hálózat fejlesztése még nem következett be.

Az adatgyűjtéshez a Solar Edge, illetve a Solax rendszerek felügyeletéhez használt webes monitoring weboldalakat használtam. Az adatokhoz való hozzáférést a Wagner Solar Hungária Kft. biztosította számomra. A kiválasztott rendszerek az említett cég által lettek telepítve. Az adatgyűjtéshez két rendszert választottam ki, amelyeken a jelenség könnyedén megfigyelhető volt, illetve a mért adatok megfelelően rögzítésre kerültek a megfelelő elemzés érdekében. A rendszerek választásánál fontos szempont volt, hogy két teljesen különböző példán keresztül elemezzem ki a hibajelenséget.

Az első rendszert két Solar Edge inverter alkotja okosmérő nélkül, ami az elemzett adatokon meg is figyelhető. A két inverter AC csatlakozásánál végez belső méréseket. Ebben az esetben megfigyelhető, hogy két különböző mérésre kerül sor az adott időpillanatban, ami a két inverter eltérő működéséhez vezet. A rendszer egyedi adottsága a teljesítményoptimalizálók alkalmazása, amik enyhítik a napelemmodulok eltéréséből adódó veszteségeket a gyártási tűréstől a részleges árnyékolásig bezárólag.

A második rendszer egy úgynevezett „hibrid rendszer”, ami akkumulátorral van ellátva, illetve külön kiépített okosmérővel rendelkezik. Ennél a rendszernél figyelembe kell venni, hogy az inverter teljesítmény grafikonján nehéz megkülönböztetni a nappali és az éjszakai üzemmódot felhősebb időjárás esetén, mivel akkumulátor kisütés révén éjjel is ellátja a fogyasztókat árammal. A méréseket az okosmérő végzi, ami az épület betáplálási pontjához, közvetlenül a villanyóra után kerül elhelyezésre. Az okosmérő közvetlenül UTP kábelon keresztül van összekötve az inverterrel.

Az adatokat importáltam az inverterek felügyeleti felületeiről CSV formátumban. A kapott fájlokat beolvastam Excelbe a könnyebb feldolgozás érdekében. A mért adatokat megjelenítettem diagramokban a probléma könnyebb megértése és ismertetése érdekében.

4 Feszültségszabályozó rendszer tervezése

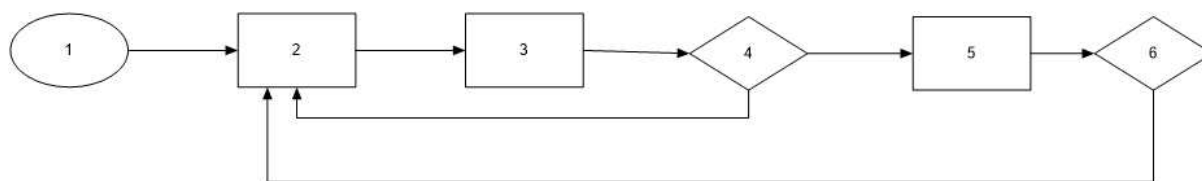
4.1 Irányítási feladat megfogalmazása

Az irányítási feladat fő célja egy olyan rendszer megalkotása, amely magas hálózati feszültség által érintett napelemes rendszerek termelés kiesését érdemben csökkenteni tudja, és az elektromos eszközök élettartamának érdekében a hálózati feszültség-ingadozását stabilizálni képes.

A magas hálózati feszültség következtében az inverternek le kell kapcsolnia arra az időre míg a hálózati feszültség nagysága vissza nem csökken a hálózati előírások által meghatározott 253 V értékre. A kiesés hatalmas veszteséget jelent a tulajdonosnak, ami a rendszer megtérülési idejét növeli. A magas hálózati feszültség mindeközben veszélyt jelent a 230 V tápfeszültségre tervezett elektromos eszközökre, csökkentve az élettartamukat.

A magas hálózati feszültség elsősorban az alacsony energiafogyasztás idején jelentkezik, például amikor a háztartások áramfogyasztása alacsony, de a napelemes rendszerek jelentős mennyiségű energiát termelnek. A napelemes rendszer az épület által fel nem használt megtermelt energiát az elosztói hálózatba táplálja vissza. A visszatáplált többletenergia feszültségnövekedést eredményezhet a hálózatban. Sajnálatos módon a legtöbb esetben az okosmérő hiánya miatt az épület fogyasztásáról nincsen rendelkezésre álló információ.

A következő ábra és leírás a szabályozás folyamatábráját mutatja:



6. ábra: A szabályozás egyszerűsített folyamatábrája

1. Energiamegfigyelés:

- Kezdődik az energiafogyasztás mérése.
- Az adatokat szenzorok gyűjtik.

2. Adatgyűjtés:

- Az összegyűjtött adatok továbbítása egy központi adatbázisba.
- Az adatok tárolása és előkészítése elemzésre.

3. Adatelemzés:

- Az adatok elemzése különböző algoritmusokkal.
- Az energiafogyasztási minták és anomáliák azonosítása.

4. Döntéshozatal:

- Az elemzési eredmények alapján döntések meghozatala.
- Beavatkozási stratégiák kidolgozása.

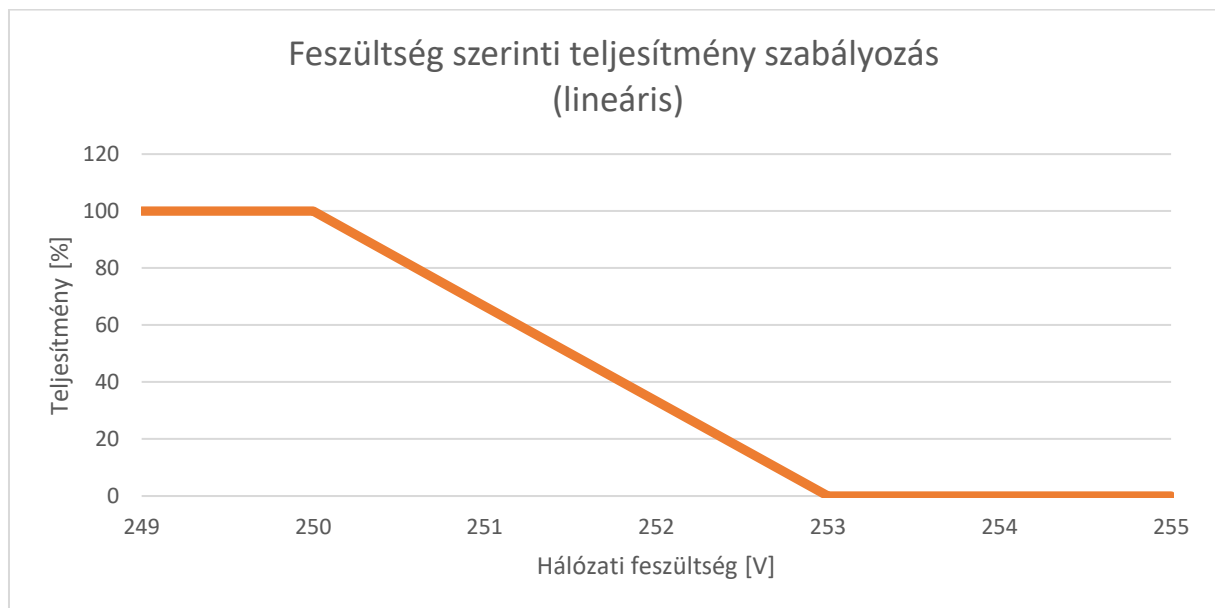
5. Beavatkozás:

- A beavatkozási stratégiák végrehajtása.
- Az energiafogyasztás optimalizálása, vagy szabályozása.

6. Visszacsatolás:

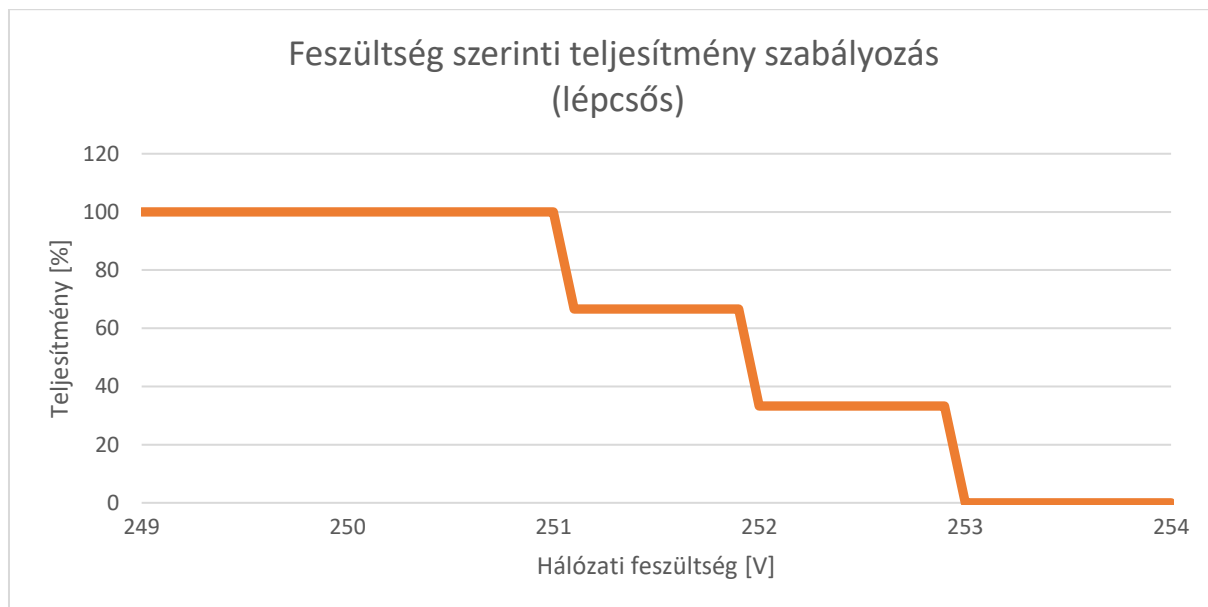
- Az eredmények monitorozása és visszacsatolása a rendszerbe.
- A folyamat finomhangolása az új adatok alapján.

Az elosztói szabályzat elsődlegesen a lineáris (lásd 7. ábra) szabályozás karakterisztikáját írja elő a napelemes rendszerek számára. A beállítást a $-33.34\%/V$ értékkel adják meg 250 - 253V tartományban, ami a következő diagrammon látható:



7. ábra: Lineáris feszültség szabályozás

Sajnálatos módon nem minden inverter gyártó készülékén elérhető ennek a karakterisztikának a használata. Ezek a gyártók inkább a többlepcső (lásd 8. ábra) szabályozás beállítását teszik lehetővé, ami a következő ábrán látható:



8. ábra: Többlepcső feszültség szabályozás

A lépcsős szabályozás esetén az a probléma, hogy az inverter teljesítménye az egyik pillanatról a másikra nagy mértékben tud változni, ami nem kedvező a hálózat stabilitásának szempontjából. A problémát az okozza, hogy az inverter teljesítménye visszahatással van a hálózati feszültségre.

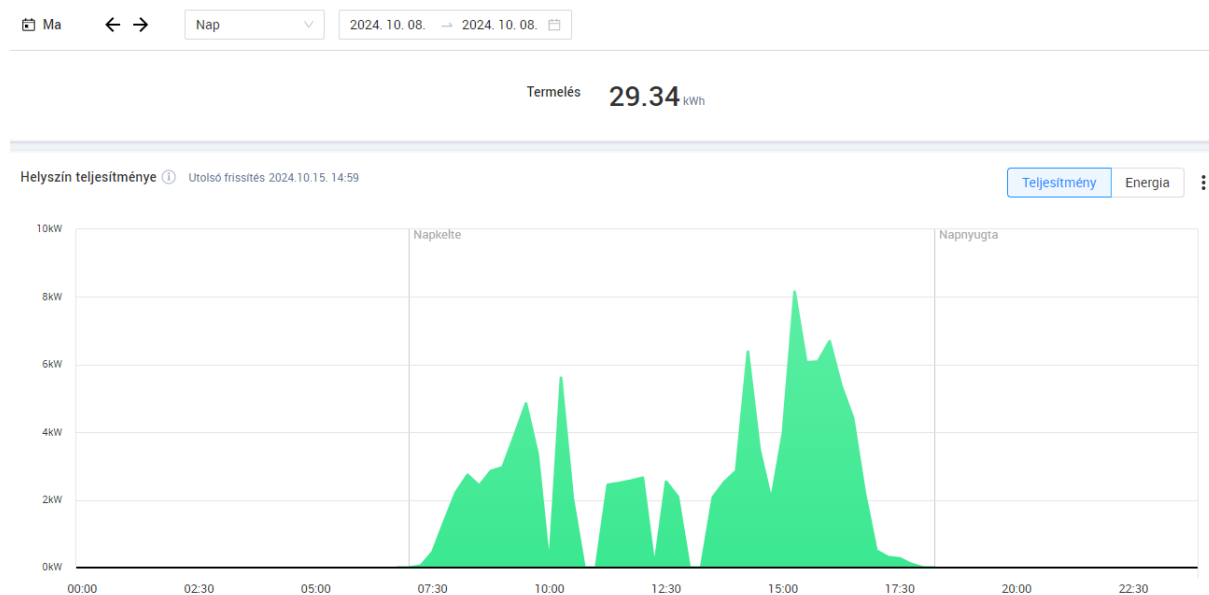
A szabályozás pontos paramétereinek meghatározásához választottam két napelemes rendszert, amin az említett jelenség tapasztalható. Az általam elemzett két rendszer invertere képes a feszültség szabályozásra, de a folyamatot több lépcsőben képesek csak végrehajtani, ami nem képes ezt a problémát megfelelően kezelni.

4.1.1 Első vizsgált rendszer

Rendszer adatai:

- Inverterek: Solar Edge SE5K-ER-01 és SE8K-RW0TEBEN4
- Okosmérő: nincs
- Akkumulátor: nincs
- Névleges DC teljesítmény: 17.16 kWp
- Elhelyezkedés: 9082 Nyúl
- Vizsgált időpont: 2024.10.08.

Az elsőnek kiválasztott rendszer (lásd 9. ábra) különlegessége, hogy két különböző inverter dolgozik, különböző helyen, és időközönként mért adatok alapján. A napelemekre teljesítményoptimalizálók vannak csatlakoztatva, amik növelik a hatékonyságot, és állandó egyenáramú feszültséget biztosítanak a napelemek irányából. Az ideális teljesítménygörbe elérése alapesetben sokkal könnyebben elérhető egy optimalizált rendszer esetében, mint egy string inverternél.

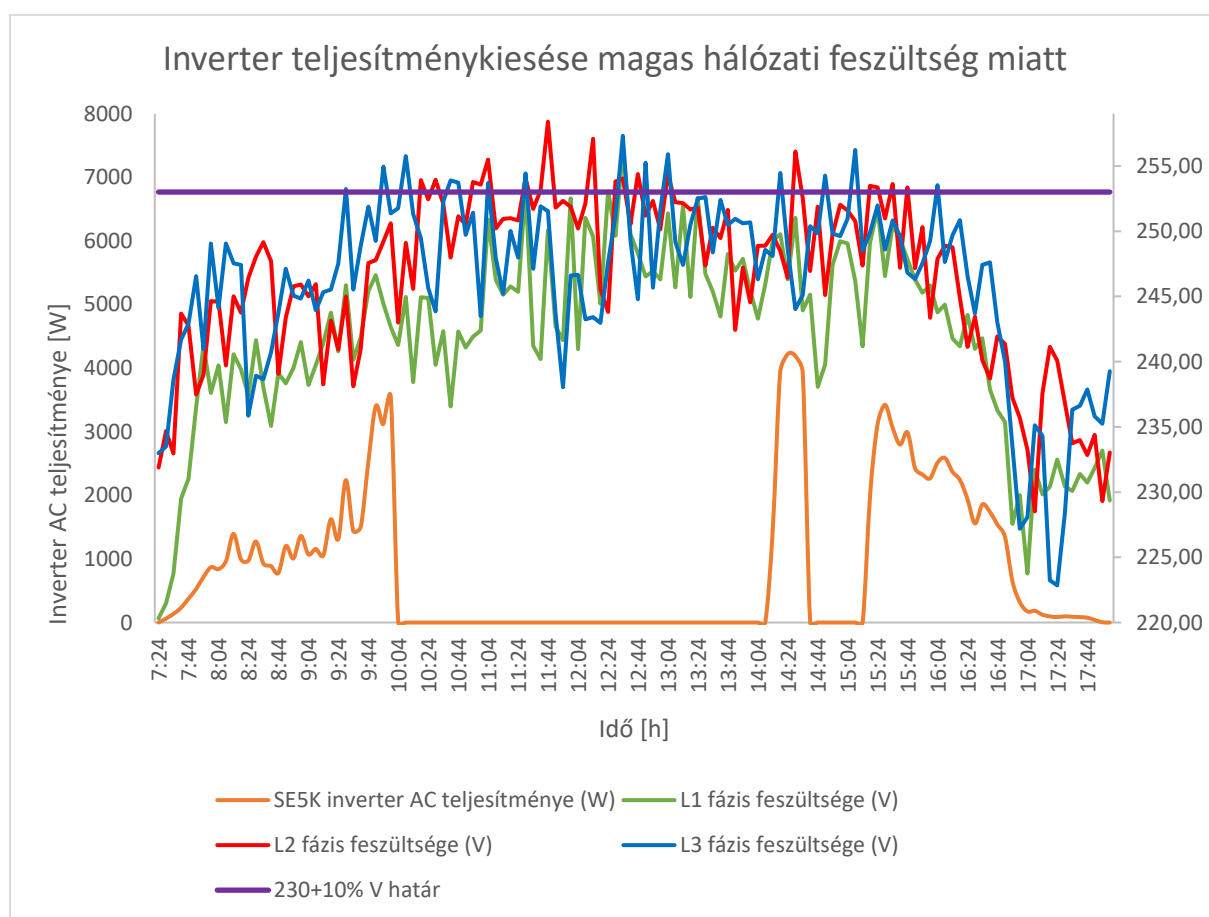


9. ábra: Első rendszer termelése 10.08.-án [28]

Ahogy az ábrán is látható, a rendszer termelési diagramja nem szabályos ívet ír le, hanem többször beesik nullára a nap folyamán. Ebben az esetben az inverterek működését nagymértékben befolyásolja a hálózati feszültség. Az inverterek egy előre meghatározott feszültségtartományban képesek a termelt áramot a hálózatba táplálni, és ha a hálózati feszültség meghalad egy bizonyos küszöbértéket, az inverterek lekapcsolnak, hogy elkerüljék

a túlterhelést és a hálózati instabilitást. Ilyenkor a napelemes rendszer termelése kiesik (lásd 10. ábra), ami veszteséget jelent a tulajdonos számára. A túl gyakori lekapcsolások a rendszer hosszú távú megbízhatóságát is negatívan befolyásolhatják.

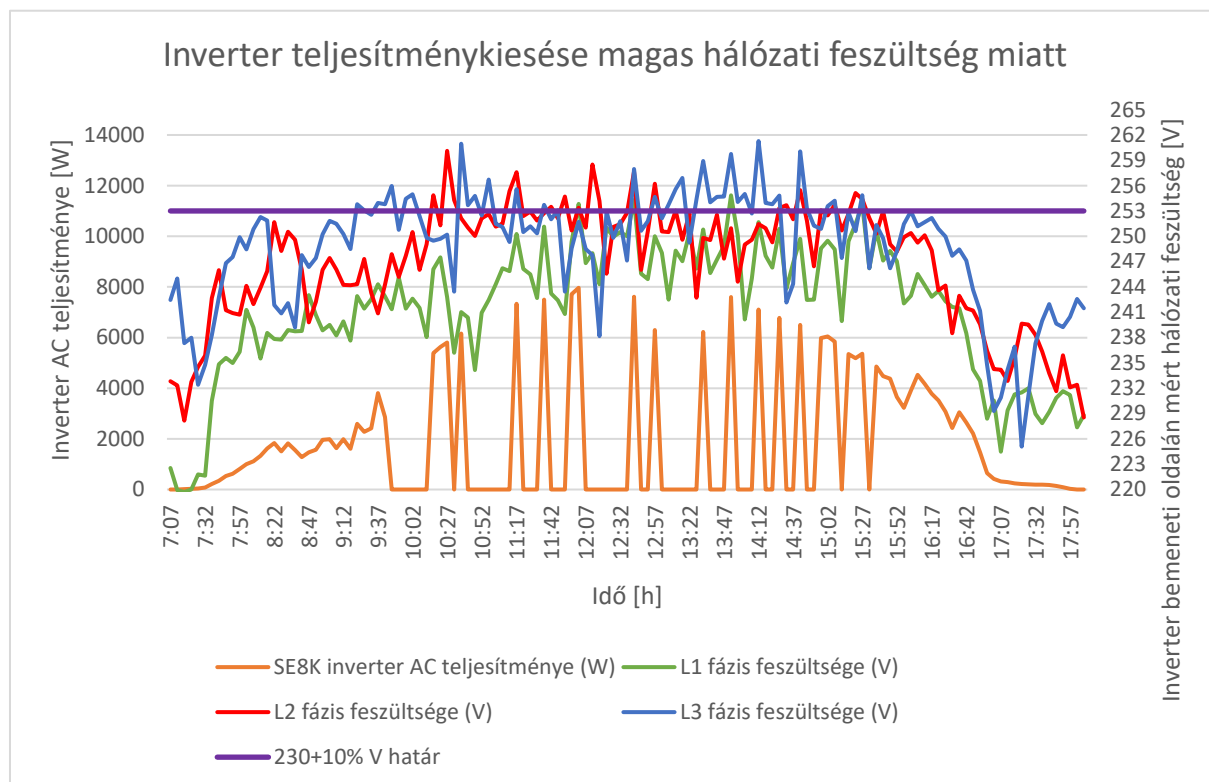
Az adatok feldolgozása során figyelembe kellett vennem a Solar Edge inverterek egy fontos funkcióját. Az inverter napnyugta után éjszakai üzemmódba kapcsol, ami annyit jelent, hogy bizonyos ideig nem kap elegendő DC feszültséget az optimalizálók irányából. Ez egy energiatakarékos üzemmód, ami a mentett adatokra is hatással van. Ilyenkor az okosmérő által mért adatok 1-2 órás időközzel kerülnek mentésre, a nappali időszak 5 perces időközével ellentétben. Az ebből adódó mérési hibák elkerülésének érdekében az első és az utolsó bekapcsolt termelési adattól számított 10 perces mérést vettem figyelembe.



10. ábra: Az 5kW-os inverter teljesítménye a hálózati feszültség függvényében [28]

A diagrammról leolvasható, hogy a L2 és L3 fázisok már a délelőtti óráktól kezdődően átlépik a 253 V felső értéket. A kisebbik 5 kW-os inverter be sem kapcsol a nap folyamán. A hálózati

feszültséget 10 perces átlagból számolja az inverter. Ha ez az érték meghaladja a 253 V feszültséget, akkor a készülék elindít egy 300 mp-es hálózati figyelési időt, aminek leteltével ismételten mér egy hálózati feszültséget. Csak akkor indulhat újra, hogy ha a szükséges feltételek teljesülnek. Ez látszik is 14 óra környékén. Amint a feszültség értékek visszaesnek, az inverter el tudott indulni egy kisebb időre. A kettős fázis érte el a legmagasabb 258,39 V feszültséget és a legmagasabb napi átlagot 246,5 V-ot az inverter által mért időtartományban.



11. ábra: A 8kW-os inverter teljesítménye a hálózati feszültség függvényében [28]

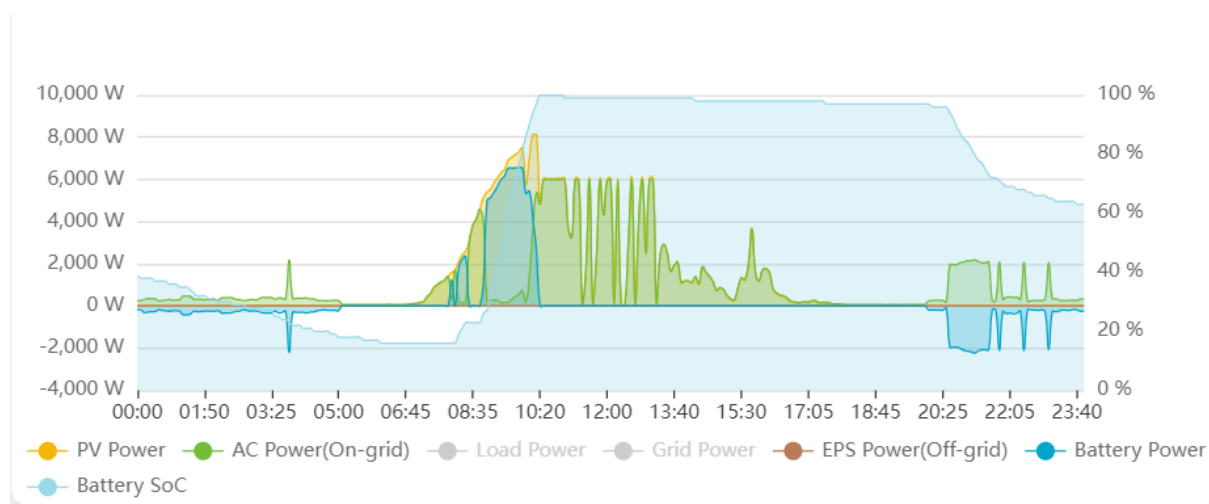
A második inverter (lásd 11. ábra) többször el tudott indulni a nap folyamán, ami a feszültségértékeken is meglátszik. A 8 kW-os inverter mérési pontjánál mért feszültségadatok magasabbak, mint a kisebbik inverternél történt mérések adatai. A hármas fázis napközben elérte a 261,278 V értéket, 248,63 V-os napi átlagfeszültség értéket elérve. A hálózati feszültség már 9:22 perckor magasabb volt a megengedettnél és érdemben csak 15:37 perckor csökkent a megengedett tartományba.

4.1.2 Második vizsgált rendszer

- Inverterek: Solax X3-Hybrid-12kW-G4
- Okosmérő: Chint DTSU 666
- Akkumulátor: Solax T-BAT-SYS-HV-S2.5 (HS10.0)
- Névleges DC teljesítmény: 13 kWp
- Elhelyezkedés: 2072 Zsámbék
- Vizsgált időpont: 2024.10.10.

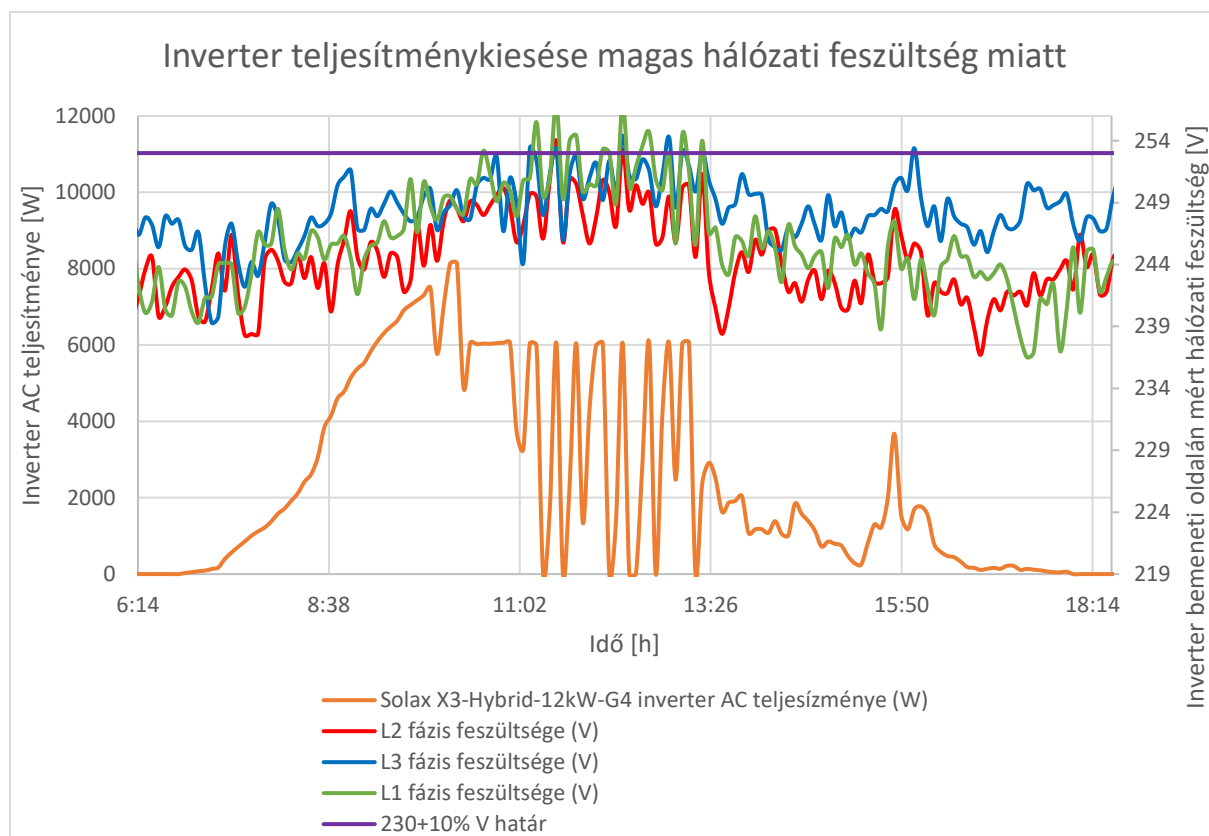
A másodiknak kiválasztott rendszer (lásd 12. ábra) egy sokkal összetettebb hibrid napelemes rendszer, ami képes a napenergia hatékony felhasználására, az energiafüggetlenségre, és a hálózattól való részleges, vagy teljes autonómiára. Egy háromfázisú string inverter adja a rendszer szívét, amire akkumulátor is csatlakoztatva van. A hibrid rendszernek a kötelező eleme az okosmérő, ami méri és rögzíti az átfolyó elektromos áram irányát, teljesítményét, feszültségét, áramának nagyságát, frekvenciáját és még pár egyéb tulajdonságot.

A nappali órákban a napelemek áramot termelnek. Az inverter elsődlegesen a háztartás aktuális energiaigényét látja el ezzel az energiával. Ha a fogyasztás magasabb, mint a termelés, akkor a rendszer a hálózatról is igénybe vesz áramot. Amennyiben a termelés meghaladja a háztartás energiafogyasztását, az inverter az energiát az akkumulátorba irányítja. Ezáltal az akkumulátor feltöltődik, és tárolja a felesleges energiát, amely később felhasználható. Ez a funkció különösen fontos azokban az időszakokban, amikor az energiatermelés magas, például a napsütéses déli órákban.



12. ábra: A második rendszer termelése 10.10.-én [29]

Éjszaka vagy borús napokon, amikor a napelemek nem termelnek elég energiát, az akkumulátorban tárolt energia kerül felhasználásra. Az inverter gondoskodik arról, hogy az akkumulátor által tárolt egyenáram átalakuljon váltakozó árammá, így az otthoni készülékek továbbra is működhetnek.



13. ábra: A hibrid inverter teljesítménye a hálózati feszültség függvényében [29]

A jelenség ismételt megfigyelhető a 13. ábrán, az előző rendszerhez hasonlóan. Hibrid inverter előnyeként ennél a rendszernél több lehetőség áll rendelkezésre a feszültség csökkentéséhez. Egyik hibrid specifikus funkció az aszimmetrikus terhelhetőség, ami képes a magas feszültség jelenségét csökkenteni egy nagyobb egyfázisú fogyasztó bekapcsolása esetén. A másik megoldás egy feszültséget figyelő backup box lehetne, ami képes lenne magas hálózati feszültség esetén leválasztani az épületet a hálózatról a magas hálózat idejére. A gyári Solax EPS boks nem képes erre a funkcióra, mivel csak kettő mágneskapcsolóból épül fel.

4.2 Irányító rendszer elemeinek kiválasztása

A rendszer megfelelő működéséhez három alapvető eszközre lesz szükség. A feszültség mérésére egy okosmérőre lesz szükség, ami folyamatos visszacsatolást biztosít a rendszer számára. Az eszköz által biztosított mért érték nagysága alapján fog működni az irányító rendszer, amit a PLC fog lekérdezni az okosmérőtől. A PLC egy meghatározott feltételrendszer alapján fogja meghatározni a beavatkozó számára szükséges módosító jelet. A beavatkozó maga az inverter lesz, ami az aktív teljesítmény beállítás által lesz szabályozva.

4.2.1 Inverter kiválasztása

Az inverter kiválasztása során kiemelt szempont volt a lineáris feszültségszabályozási karakterisztika beállíthatóságának a hiánya. Egy olyan inverter kiválasztása volt a cél, ami a jelenlegi időszakban nagy mennyiségben van telepítve.

- **Solax X3-Hybrid-5kW-G4**

Szaktervezésemben, a Solax háromfázisú 5 kW névleges teljesítményre képes legújabb verziójú hibrid inverterére került a választás. Az előzőleg kielemezett Solax inverter is hasonlóan egy G4-es verziójú hibrid inverter volt, annyi különbséggel, hogy nagyobb teljesítménnyel rendelkezett. Szerencsére a két inverter irányítása között nincsen különbség. Minden X3-Hybrid-G4 inverter ugyan azzal a Modbus táblával rendelkezik, ami nagyobb mozgásteret biztosít egy irányító rendszer alkalmazhatóságához. A Solax hibrid inverterek teljesítmény szerint az 5 kW-tól 15 kW-ig terjedő skálán kaphatóak, amivel a lakossági szektort le tudják fedni. Jelenleg ez a legkelendőbb Solax inverter, mivel képes akkumulátor csatlakoztatására, illetve az aszimmetrikus működésre, ami annyit jelent, hogy egy adott fázisra ki tudja küldeni a névleges teljesítményének a felét.

4.2.2 Okosmérő kiválasztása

Az okosmérők sokoldalú, nagy pontosságú eszközök, amelyeket lakossági, kereskedelmi és ipari napelemes rendszerek energiafelhasználásának mérésére és nyomon követésére terveztek. Többféle konfigurációban érhetők el: belső és külső áramváltós kivitelben, illetve egy és háromfázisú kivitelben, amelyek különböző rendszerkövetelményekhez igazodnak. Az okosmérők kivételes pontossággal mérnek olyan paramétereket, mint a feszültség, áram, aktív és reaktív teljesítmény, valamint a frekvencia. Ez a pontosság lehetővé teszi a felhasználók számára, hogy valós időben követhessék nyomon energiafogyasztásukat és termelésüket, ami hatékonyabb energiahasználathoz vezethet. Költséghatékonyság szempontjából olyan okosmérőre van szükség, amely kommunikáció szempontjából kompatibilis a Solax inverterrel. Hivatalosan három gyártó rendelkezik ilyen készülékkel:

- **Eastron SDM630**
- **Solarman DTSD422-D-100 és DTSD422-D3-G**
- **Chint DTSU666 és DTSU666-CT**

3. táblázat: Okosmérők összehasonlítása

	Solarman DTSD422-D [30]	Solarman DTSD422-D3 [31]	Chint DTSU666 [32]	Chint DTSU666-CT [32]	Eastron SDM630 [33]
Ár*	~52 000 Ft	~85 000 Ft	~36 000 Ft	~60 000 Ft	~36 000 Ft
CT	belső	külső	belső	külső	belső
Fázisok száma	három	három	három	három	egy/három
Modbus RTU	igen	igen	igen	igen	igen
Kijelző	van	nincs	van	van	van

*Az árakat google keresés során állapítottam meg (2024. októberi adatok).

A kiválasztás során a Chint DTSU666-ra esett a választásom. A választás egyik fő indoka a kedvező ár. Ennél egy belső áramváltókkal rendelkező kivitelről van szó, aminek egyszerű a bekötése. Mivel a CT verzióhoz képest specifikáció szempontjából csak a bekötés a különbség, így szükség esetén teljes mértékben kompatibilis lesz a rendszer a DTSU666-CT árammérővel is. A CT-re olyan esetekben van szükség, ha a rendszer meghaladja a 80 A áramot, illetve a bekötés nem lehetséges közvetlenül.

4.2.3 PLC kiválasztása

A PLC kiválasztása több, funkciók terén nagyon hasonló, de mégis sok esetben egyedi kialakítású, és nyelvvel rendelkező eszköz közül történt. A választás során nagyon fontos szempont volt a Modbus RTU protokoll megléte, mivel az okosmérőkből csak ilyen formában lehet közvetlenül információt kinyerni. Egy másik figyelembe vett szempont az internet elérhetőség volt. Egy ilyen rendszer esetén, egy távoli hozzáférés segítségével lehetőség van elmenteni és feldolgozni az adatokat, amik a rendszer finomhangolásának szempontjából jelentős előrelépést jelenthet hosszútávon. Mivel nincs két teljesen megegyező szituáció, így külön vizuális felületen megjelenített adatokból könnyebben ki lehet szűrni a személyre szabható lehetőségeket.

- **Rievtech SR-12DC-DA-R Ethernet PLC**
- **Schneider Electric Optimized Display 22 I/Os, Modbus**
- **Finder Arduino Opta**

4. táblázat: PLC-k összehasonlítása

	Arduino Opta [34]	Modicon M171 [35]	Rievtech SR-12DC [36]
Ár*	~67 000 Ft	~93 000 Ft	~55 000 Ft
Modbus RTU	igen	igen	igen
Wifi	van	nincs	nincs
WLAN	van	nincs	van
Programozási nyelvek	5+1	4	FBD

*Az árakat google keresés során állapítottam meg (2024. októberi adatok).

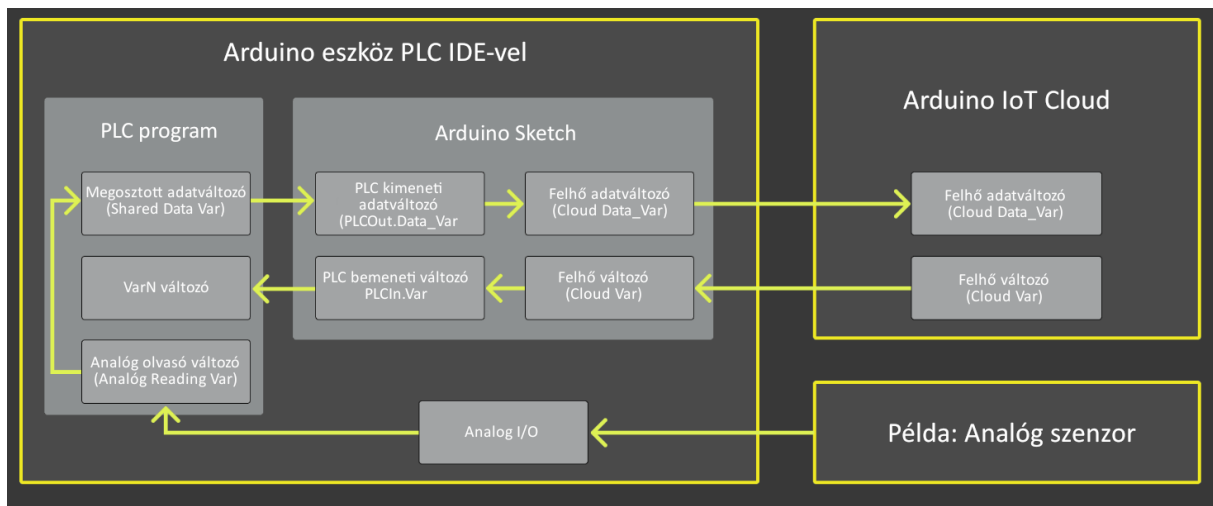
A választásom az Arduino Opta-ra esett, több fontos szempont figyelembevételével. Ár-érték arányban a legjobb megoldás, mivel az öt nagyobb programozási nyelvet tudja, illetve lehetséges az Arduino (C++ egyik változata) nyelven is programozni. Az Opta rendelkezik RS485 bemenettel, amire szükség lesz a Modbus kommunikáció használatához. A PLC-hez rendelkezésre áll távoli felhőalapú felület, aminek az elérhetőségére két funkció áll rendelkezésre. Az Opta rendelkezik gyárilag beépített wifi antennával, illetve ethernet bemenettel, amiknek a segítségével vezeték nélküli, és vezetékes kommunikáció is rendelkezésre áll a helyszínen, így adatokat küldve a felhő felügyelet számára.

4.3 Irányító program elkészítése

A rendszer elkészítéséhez az Arduino PLC IDE fejlesztőkörnyezetet használtam, amelyet az Arduino PLC eszközök programozásához és vezérléséhez fejlesztettek ki. A program kézenfekvő választás volt számomra, mivel lehetővé tette az IEC61131-3 programozási nyelvek használatának lehetőségét számomra, mint például a Funkcióblokk diagramm (FBD) használatát. A program kompatibilis az Arduino Opta és más ipari PLC-eszközökkel, amelyek Arduino környezetre épülnek, így biztosítva az ipari szabványok kompatibilitását.

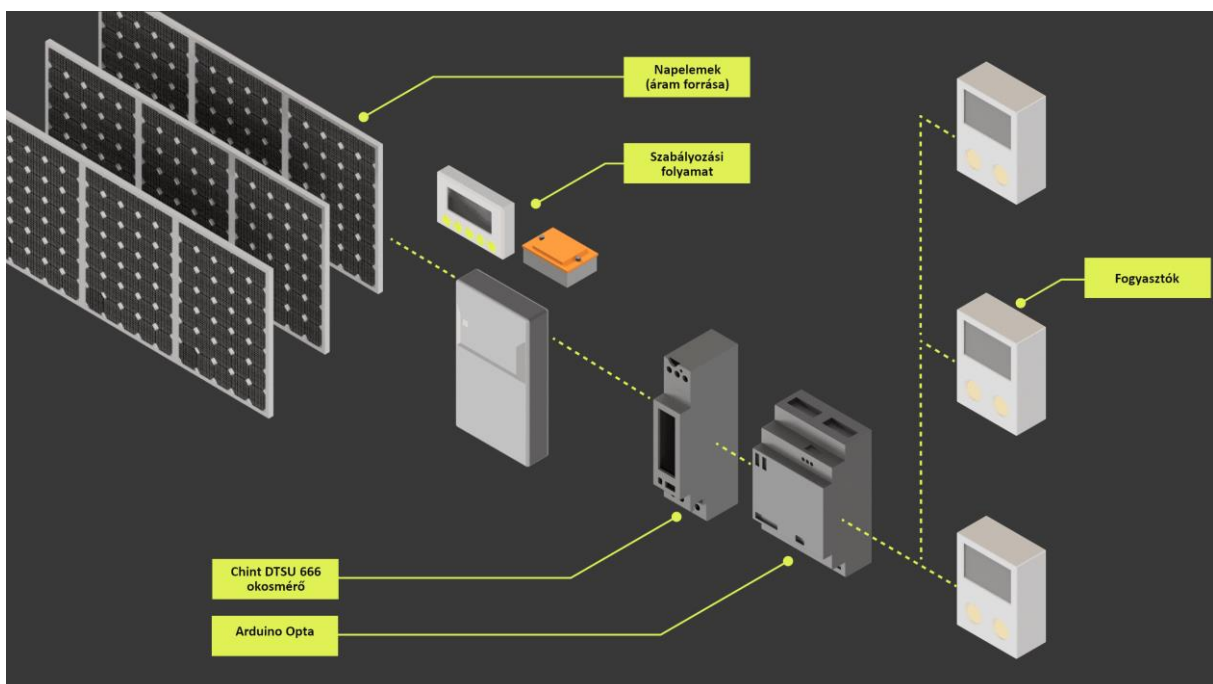
- **Arduino IDE** (Integrated Development Environment) egy nyílt forráskódú fejlesztői környezet, amelyet kifejezetten az Arduino mikrokontroller alapú fejlesztésekhez terveztek. Az Arduino IDE lehetővé teszi a felhasználók számára, hogy egyszerűen programozhassák és kezeljék az Arduino hardvert.
- **Az Arduino PLC IDE-t** elsősorban ipari automatizálás, okosépületek vezérlése és folyamatirányítási alkalmazások fejlesztésére tervezték. Ötvözi az Arduino közösség által kedvelt egyszerűséget, a PLC-k robusztus ipari szabványaival, így rugalmas megoldást kínál mind hobbi, mind professzionális felhasználóknak.

Az Arduino PLC IDE ezen felül képes a kommunikációra az Arduino Cloud felhőalapú platformmal (lásd 14. ábra). Az Arduino Cloud lehetővé teszi a felhasználók számára, hogy egyszerűen csatlakoztassanak eszközöket az internethez, valós időben gyűjtsenek adatokat, és távolról vezéreljék a hardvert (14. ábra: Munkafolyamat az PLC IDE és az Arduino Cloud között). A platform különösen hasznos IoT projektek fejlesztésére, mivel az adatok kezelése, tárolása és megjelenítése felhőben történik.



14. ábra: Munkafolyamat az PLC IDE és az Arduino Cloud között [37]

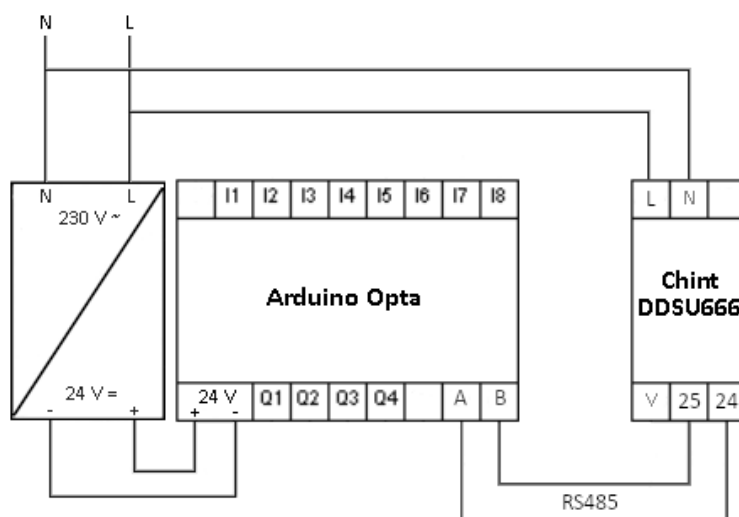
Az irányító program célja egy napelemes rendszer termelésének befolyásolása a hálózati feszültség mértékének függvényében. Ahogyan a 15. ábráról is leolvasható, az okosmérő folyamatosan méri a feszültség értékét, aminek nem szabad meghaladnia a már korábban említett 253 V-os értéket. A felső határérték elérését a lineáris karakterisztikával rendelkező feszültségszabályozással kívánom elkerülni. A szabályozást a PLC irányítja, minden parancsot az ad ki a megfelelő információk tudatában. A parancsokat az inverter fogja megkapni és eszerint fogja változtatni a termelését. Parancstól függően csökkentheti a napelemek irányából érkező energia átalakításának mértékét. Ez a teljesítmény változás feszültség változással is jár, aminek a hatása meg fog jelenni az okosmérő által mért adatsoron.



15. ábra: Irányított napelemes rendszer [38]

4.3.1 Gray box modell

A rendszer programjának megírásához gray box modellezést használtam. A gray box modell ötvözi a white és black box megközelítéseket. Azért választottam ezt a típust, mivel tudomásom volt az inputok és outputok kapcsolódásáról a rendszerhez, valamint rálátásom volt a belső struktúrára (pl. programozás logikájára és funkcióira), de a rendszer belső felépítése kérdéses volt számomra. A modellhez összeállítottam egy kisebb, az eredetihez lényegesen hasonló rendszert, amin némi változtatást eszközöltem. Az egyszerűség kedvéért Chint DDSU 666 okosmérőt használtam (lásd 16. ábra), ami annyiban különbözik a DTSU 666 okosmérőtől, hogy csak egy fázist képes mérni. Az alap program így annyival egyszerűbbé vált, hogy a három fázis feszültségéhez képest csak 1 fázis feszültség adatait kellett feldolgoznom. Az okosmérőt, és a PLC-t összekötöttem RS485 kapcsolathoz.



16. ábra: Gray box modell

Az összeállított rendszer legnagyobb előnye ebben a formában, hogy egy egyszerű konnektorba csatlakoztatva is működő képes. Az okosmérő méri a konnektor irányából átfolyó áram fázisának feszültségét, amely a kijelzőn is nyomon követhető. A PLC beállított időközönként lekérdezi ezt az adatot a Chint-től, és feldolgozza. A kapott értéktől függően a PLC jelet küld az inverter irányába, ami alapján az beavatkozhat a termelésébe.

4.3.2 Program beállítása

Első, és legfontosabb lépésként megtörtént a PLC konfigurációja és a Modbus RTU protokoll beállítása. A Modbus RTU egy kommunikációs protokoll, amely kommunikációs vonalon fogad adatokat tömörített bináris formátumban, ami alacsonyabb adatforgalom mellett hatékony adatátvitelt nyújt. Először is, a gazdaszámítógép jele keres egy termináleszközt (slave) egy címen, majd a termináleszköz válasz jelet ad, és ellenkező irányban továbbítja a gazdaszámítógépnek, azaz félduplex munkamódban. Ez a protokoll csak a gazdaszámítógép (PC, PLC stb.) és a végberendezés közötti kommunikációt teszi lehetővé, nem pedig a független végberendezések közötti adatcserét. Így az egyes végberendezések nem foglalják le a kommunikációs áramköröket az inicializálásuk során, és csak a lekérdezési jelnek a gazdaszámítógéphez történő megválaszolására korlátozódnak. A PLC lesz a Master a rendszerben. Lekérdezéseket fog végrehajtani az okosmérő irányába és parancsokat fog adni az inverternek.

Modbus RTU beállításai:

- **A kommunikációs sebesség,** vagyis a baud rate, az adatátvitel sebességét jelöli, amit bit/másodpercben (bps) mérünk. Ez az érték nagyon fontos a Modbus RTU rendszerben, mert meghatározza, hogy milyen gyorsan lehet adatokat küldeni és fogadni a buszon keresztül. A rendszer összes eszközének azonos baud rate-en kell működnie a sikeres adatkommunikáció érdekében. Ha a baud rate túl alacsony, az adatátvitel lassabb lesz, ami késleltetéseket okozhat, különösen nagyobb adatforgalom esetén. Ha túl magas a baud rate, akkor nagyobb a hiba esélye, különösen hosszabb kábelek vagy zajos környezet esetén.
- **Eszköz címezés:** A Modbus RTU protokollban minden eszköz rendelkezik egyedi azonosítóval, amit Modbus ID-ként ismeretes. Ez a cím biztosítja, hogy a rendszerben lévő minden egyes eszközt egyedileg lehessen elérni, és ne legyenek kommunikációs ütközések. Minden eszközhöz egyedi ID-t kell rendelni (általában 1 és 247 között) a buszon lévő ütközések elkerülése végett. Ha két eszköz ugyanazzal az ID-vel rendelkezik, az adatátviteli ütközésekhez és kommunikációs hibákhoz vezet.

4.3.3 Adat kiolvasás az okosmérőből

A Modbus RTU protokollban a FC03 (Function Code 04) – Read Input Registers funkciókódot használják arra, hogy a master eszköz kiolvasson adatokat a slave eszköz „input” regisztereiből. Az input regiszterek olyan 16 bites tárolók, amelyekben az eszköz különböző mérési adatokat, vagy állapotokat tárol, amelyekhez az olvasás és -bizonyos esetekben- írás is lehetséges. A funkciókód működése a következő:

1. **Kérés küldése:** A Modbus master eszköz küld egy kérést a slave-nek, amely tartalmazza a funkciókódot (FC04), a kiolvasni kívánt első regiszter címét, és az olvasandó regiszterek számát.
2. **Címzés:** A master pontosan megadja a regiszter kezdőcímét (az első regisztert, amelyből olvasni szeretne), és a regiszterek számát. Például, ha a kezdőcím 40001, és három regisztert szeretnénk kiolvasni, akkor a slave a 40001, 40002, és 40003 regiszterekből fogja visszaküldeni az adatokat.
3. **Válasz:** A slave eszköz válaszként elküldi a kért regiszterek tartalmát. A válaszban szerepel a funkciókód (hogy a master tudja, hogy sikeres volt a kérés), a kiolvasott adat hosszúsága, majd a regiszterek értékei.
4. **Adatértelmezés:** A master a beérkezett adatokat tovább feldolgozza, amely lehet például egy mérési adat megjelenítése, vagy egy automatikus vezérlési parancs kiadása az értékek alapján.

A következő táblázat tartalmazza a DDSU666 Modbus címeit, amit a funkcióblokk meg fog címezni az adatlekérdezés során:

5. táblázat: Chint DDSU666 Modbus táblázata [39]

Cím	Kód	A paraméterek utasításai	Adattípus	Adathossz Szó	Olvasás - R Írás - W
2000H	U	Feszültség	uint16	2	R
2002H	I	Áramerősség	uint16	2	R
2004H	P	Teljesítmény	uint16	2	R
2006H	Q	Meddő teljesítmény	uint16	2	R
200EH	Freq	Frekvencia	uint16	2	R

Az 5. táblázatból kiolvasható, hogy a regiszterek uint16 adattípusban vannak tárolva. Az uint16 (unsigned integer, 16-bit) egy olyan adattípus, amelyet széles körben használnak az ipari kommunikációs rendszerekben, különösen olyan protokollokban, mint a Modbus. Az uint16 egy előjel nélküli, 16 bites egész szám típus, amely csak pozitív egész értékeket tartalmazhat, 0 és 65535 között. Az uint16 adattípust számos területen és célra használják, főként az egyszerűbb és kisebb méretű egész számok hatékony tárolására.

A Modbus protokollban gyakran előfordul, hogy egy nagyobb, 32 bites egész számot (uint32) két különálló 16 bites regiszterben (uint16) tárolnak. Ezeket a regiszterek együttesen kerülnek kiolvasásra, majd a kapott értékeket egyetlen 32 bites adattá kell alakítani. A két uint16 regiszterből uint32 adattípus létrehozása során a magasabb helyiértékű (high) és alacsonyabb helyiértékű (low) regisztert kombinálni kell. Ez az átalakítás általában biteltolással történik.

- **High register** (magas helyiértékű), amely a 32 bites szám felső 16 bitjét tartalmazza.
- **Low register** (alacsony helyiértékű), amely a 32 bites szám alsó 16 bitjét tartalmazza.

A high regiszter értékét 16 bittel balra (higher significant) kell tolni, hogy a 32 bites szám felső felét alkossa. Az így eltolással kapott értéket hozzá kell adni a low regiszter értékéhez, amely a 32 bites szám alsó részét alkotja. Az eredmény egy 32 bites uint32 szám, amely a két uint16 regiszter kombinációjából származik. Az így kapott számokból meg is van az input adatsor, amit továbbiakban fel lehet dolgozni.

4.3.4 A szabályozás egyenletei

Az egyenletek célja, hogy az okosmérő által mért feszültségértékek használható kimeneti jellé alakuljanak át. Ebben az esetben adott a hálózati feszültség, aminek a nagyságára a napelemes inverter hatással van, mint zavaró tényező. Ennek a tényezőnek a nagyságát szeretném befolyásolni az inverter teljesítményének állításával. A folyamat során nagyon fontos, hogy a sztochasztikus zajokból (mérési hibák, zavarok) eredő kilengésekre ne reagáljon a rendszer, mert könnyedén lengésbe hozhatja, ami a hálózat stabilitását még jobban ronthatja.

Sztochasztikus Jelenségek a Hálózati Feszültségben

A feszültség értéke időben ingadozik, és ezek az ingadozások előre nem meghatározhatóak, de bizonyos határok között mozgó véletlenszerű változások figyelhetők meg. A hálózati feszültség sztochasztikus tulajdonságai számos tényezőből adódnak, amelyek jellemzően a

terhelési változások, a környezeti hatások, és az elektromos hálózat állapotváltozásai miatt lépnek fel.

1. **Feszültségingadozás:** Az elektromos hálózatokban előforduló fogyasztói terhelések változása miatt a feszültség folyamatosan ingadozik. Amikor nagyobb terhelés kapcsolódik a hálózatra, a feszültség jellemzően csökken, míg kisebb terhelés esetén emelkedhet. Ez a jelenség véletlenszerűen történik a hálózat különböző pontjain.
2. **Harmonikus torzítás:** A hálózaton jelen lévő harmonikus torzítás szintén sztochasztikus természetű lehet, mivel a fogyasztók (például motorok, inverterek, számítógépek) különböző mértékű és frekvenciájú harmonikusokat generálnak, amelyek összeadódnak és torzítják a feszültség hullámformáját. Ez a torzítás véletlenszerű változásokhoz vezet a feszültség hullámformájában.
3. **Feszültségzajok:** A hálózatban fellépő különböző zajhatások, például kapcsolóesemények, elektromágneses interferenciák, viharok vagy egyéb külső hatások miatt rövid ideig tartó, véletlenszerű feszültségcsúcsok, vagy esések jelentkezhetnek.
4. **Terhelési fluktuációk:** Az egyes fogyasztók által keltett terhelés változása a nap folyamán is változó, például ipari, lakossági és közlekedési rendszerek által. Az ilyen típusú fluktuációk is sztochasztikus változásokat eredményeznek a feszültségben.

A zajok szűrésére több lehetőség is rendelkezésre áll. A két legismertebb a Kálmán szűrő és az átlagolás.

Kálmán-szűrő

A Kálmán-szűrő egy optimalizált digitális szűrési technika, amelyet kifejezetten sztochasztikus rendszerekre fejlesztettek ki. A szűrő úgy működik, hogy egy modell alapján becsléseket készít a rendszer állapotáról, majd a tényleges mérések alapján folyamatosan javítja ezt a becslést. Ez a szűrő különösen alkalmas olyan rendszerek esetén, ahol a mérési zaj és a rendszer zaj is véletlenszerű.

1. **Előrejelzés:** A szűrő előrejelzi a rendszer következő állapotát a korábbi mérések és egy állapotmodell alapján.
2. **Frissítés:** Az aktuális mérési adatok alapján javítja az előrejelzett állapotot. Ezt úgy végzi, hogy a mérési és előrejelzési bizonytalanságok alapján súlyozott átlagot képez.

3. **Becsült és tényleges állapot összehasonlítása:** Az előrejelzett állapot, és a tényleges mérések közötti különbség (a hiba) alapján módosítja a következő előrejelzést.

Átlagolás

Az átlagolás egy egyszerű és hatékony zajcsökkentő módszer, amely során több mérésből számítanak egy átlagértéket. Ennek lényege, hogy a sztochasztikus zajokat (amelyek jellemzően véletlenszerűen ingadoznak a valódi érték körül) a több mérést összegző átlagolás módszerével csökkentjük. Az átlagolásnak több típusa létezik:

1. **Egyszerű átlagolás:** Adott számú mérési adat átlaga, ahol minden adat egyforma súlyt kap.
2. **Mozgóátlag:** Az aktuális és korábbi mérési eredmények mozgó ablakban történő átlaga. Például egy 5 elemű ablakban mindig az utolsó 5 mérés átlagát vesszük.
3. **Súlyozott átlag:** Az aktuális mérési adatokra nagyobb súlyt helyez, míg a korábbiakra kisebbet. Ez gyorsabban reagál a változásokra, mint az egyszerű átlagolás.

Összességében a Kálmán-szűrő pontosabb és adaptívabb, de számításigényesebb. Az átlagolás gyorsan és egyszerűen implementálható, de korlátozottabb a hatékonysága a feszültségzaj szűrésében. Végül a mozgóátlag mellett döntöttem. A mozgóátlagot használják zajszűrésre, például feszültség- vagy hőmérsékletmérések során. A mozgóátlag segít eltávolítani a véletlenszerű zajt, és stabilabb, használhatóbb jelet biztosít. Hatékony a rövidtávú ingadozások csökkentésére és a trendek kiemelésére.

Skálázási képlet

Az egyenlet célja, hogy a bemeneti feszültséget átalakítsa egy százalékos értéké azzal, hogy a bemeneti értéket a minimum és maximum között arányosítja. Ez hasznos olyan rendszerekben, ahol egy adott bemeneti tartományt egy standard, 0-100% közötti skálára kell átalakítani, például folyamatirányítás, érzékelők adatai, vagy más analóg jel feldolgozása során.

$$\text{output} = \frac{\max_{in} - U_{fesz}}{\max_{in} - \min_{in}} \cdot 100$$

1. egyenlet: A szabályozás egyenlete

1. **Különbség kiszámítása a maximum és az aktuális feszültség között:** A számlálóban a maximális bemeneti értékből kivonjuk az aktuális feszültséget. Ezzel azt mérjük, hogy az aktuális feszültség mennyire van közel a maximális értékhez. Ha az aktuális feszültség értéke megegyezik a maximummal, akkor a különbség nulla lesz, így az eredmény 0%-nak felel meg a fordított arányítás miatt.
2. **Tartomány normalizálása:** Az így kapott különbséget elosztjuk a bemeneti tartomány szélességével. Ez a normalizálás biztosítja, hogy a bemeneti érték arányosan, lineárisan kerüljön átalakításra 0 és 1 közötti értékre (vagyis 0% és 100% közötti értékre).
3. **Százalékos kifejezés:** A kapott arányt megszorozzuk 100-zal, hogy a végeredmény százalékos formában jelenjen meg.

Ez az egyenlet rendkívül gyakori az ipari szabályozástechnikában, ahol a különböző érzékelőkből és mérőeszközökből származó analóg jeleket át kell alakítani egy egyszerűen kezelhető skálára. Az egyenlet egyszerű és könnyen alkalmazható, amely lehetővé teszi a gyors számításokat és skálázásokat.

4.3.5 Inverter irányítása

Az FC06 (Function Code 06) – Write Single Register funkciókód lehetővé teszi, hogy a Modbus master eszköz egyetlen regiszter értékét írja be a Modbus slave eszközbe. Ezt a funkciókódot tipikusan olyan esetekben használják, amikor egyetlen adatot, például egy paramétert vagy egy vezérlési parancsot kell küldeni a slave eszköznek.

1. **Kérés küldése:** A Modbus master eszköz küld egy kérést a slave eszköznek, amely tartalmazza a slave eszköz címét (ID), a funkciókódot (06), a cél regiszter címét, amelybe írni szeretne és az új értéket, amit be akar írni.
2. **Címzés:** A master megadja a pontos regiszter címét, és azt az új értéket, amit ebbe a regiszterbe szeretne írni.
3. **Válasz:** Ha a slave eszköz sikeresen fogadta és végrehajtotta a parancsot, válaszként visszaküldi a funkciókódot, a megadott regiszter címét és az új értéket, amelyet sikeresen beírt. Ez biztosítja a master számára, hogy a művelet helyesen végrehajtásra került.

4. **Hibakezelés:** Ha a kérés végrehajtása során hiba történik (például a regiszter írásvédett, vagy érvénytelen címet adtak meg), a slave eszköz hibakódot küld vissza, amely jelzi a hiba típusát.

Az inverter teljesítményének a vezérléséhez szükséges adatot a 6. táblázat tartalmazza.

6. táblázat: Solax X3-Hybrid-G4 Modbus táblázat [40]

Cím	Kód	A paraméterek utasításai	Adattípus	Adathossz Szó	Olvasás - R Írás - W
0x0011	W	Aktív teljesítményhatár (0~100)	uint16	1	W

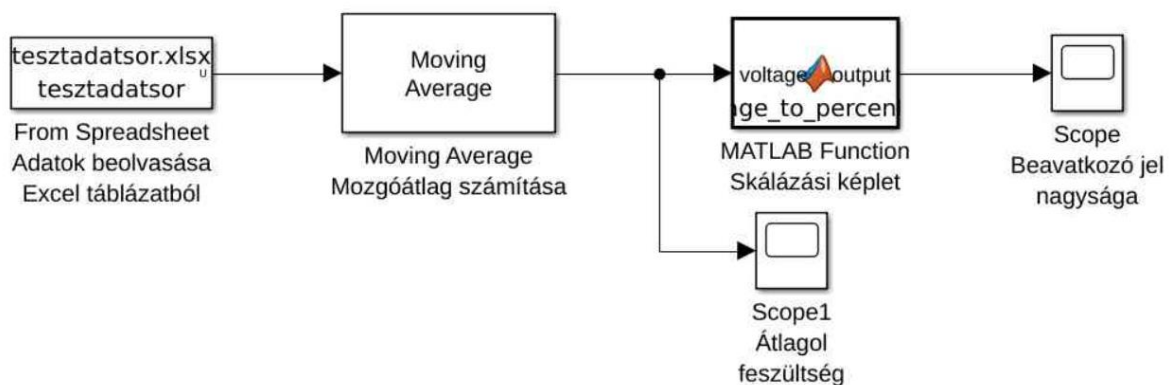
4.4 Eredmények

Sajnálatos módon a kész rendszert nem sikerült tesztelni technikai problémák miatt. A gondot a Modbus RTU protokoll okozta. A rendszer megalkotásakor problémák merültek fel az okosmérő – PLC kommunikációban. A kiolvasás során a feszültség regiszter kiolvasásakor nem érkezett megfelelő adat az okosmérőtől. Több különböző regisztercím lekérdezése már adott eredményt, de közel sem hasonlítottak egy feszültség értékre. A protokollt használó eszközöknél sokszor használnak olyan megoldást, amikor a regiszter címet egy adott mennyiséggel eltolják (például hozzá kell adni egy fix összeget a címhez írásnál, vagy olvasásnál). Az eszköz leírásában ilyen információ nem szerepelt.

Sajnálatos módon nagyon sok idő elment, és nem sikerült eredményre jutnom ilyen téren, ezért a jelfeldolgozásra helyeztem nagyobb hangsúlyt. A szűrő modelljét MATLAB Simulinkben alkottam meg. A rendszer teszteléséhez egy külön mérés során készült adatsort használtam, ami két órán keresztül másodpercenként mért feszültség adatot tartalmaz.

4.4.1 Sztochasztikus zajok szűrése

A modell (lásd 17. ábra) felépítés szempontjából a következő. A modellbe egy Excel táblázatból olvastam be adatokat, majd egy mozgóátlag blokkal kiszűrtem a mért adatokban érzékelhető zajokat. A modellbe a skálázási képletet is beépítettem.



17. ábra: Jelszűrő modellje MATLAB-ban

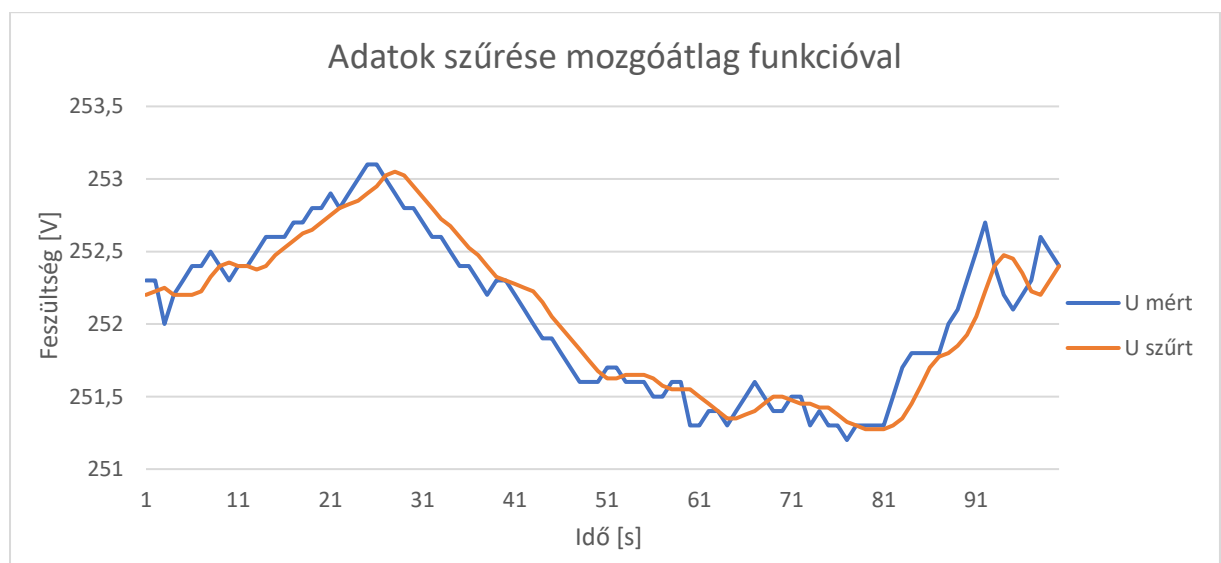
A sztochasztikus zajos kiszűrésére mozgóátlag funkciót használtam. A mozgóátlag egy gyakran használt statisztikai módszer, amely lehetővé teszi, hogy az idősoros adatokból kiszűrjük a véletlenszerű ingadozásokat, és az adatok trendjét kiemeljük. A mozgóátlag kiszámítása során

egy adott időablakon belüli értékek átlaga kerül meghatározásra, és ezt az ablakot léptetve az idő előrehaladtával az újabb adatok kerülnek átlagolásra. A mozgóátlag segít kisimítani a zajt, és könnyebbé teszi a trendek észlelését az idősorban.

A mozgóátlag kiszámítása során egy előre meghatározott számú adatpont (ablakméret) került átlagolásra. Az ablak méretének kiválasztása az adott problémától, és a rendelkezésre álló adatoktól függ; egy kisebb ablakméret gyorsabban követi az adatok változását, de kevesebb zajt szűr ki, míg egy nagyobb ablakméret jobban kisimítja az adatokat, de lassabban reagál az új trendekre.

A következő grafikon (lásd 18. ábra) a mért adatok mozgóátlagolását mutatja a mért adatokkal összehasonlítva. A mozgóátlag beállítása a következő:

- Ablak hossza: 4
- Átfedés hossza: 3

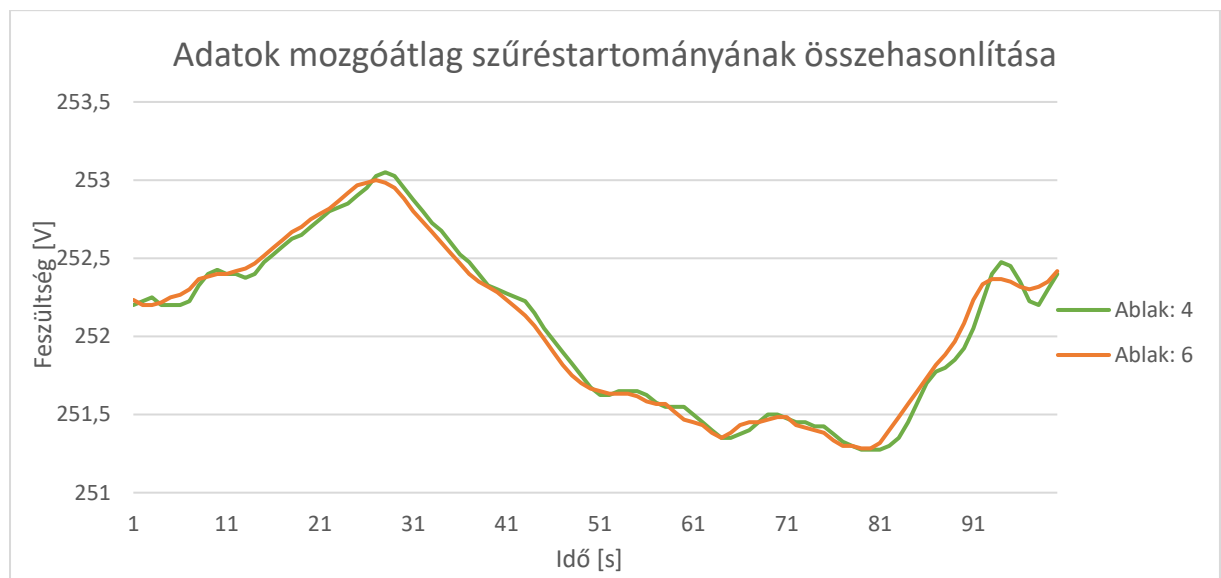


18. ábra: Mozgóátlaggal szűrt adatsor

A grafikon a feszültségadatok idősoros változását mutatja egy mérés, és egy mozgóátlag szűrő alkalmazásával. A grafikonon látszik, hogy az adatsor kevésbé érzékeny a hirtelen kiugrásokra (zajokra). A mért adatokban kisebb, véletlenszerű feszültségingadozások figyelhetők meg, míg a szűrt adatok simábbak, kevésbé zajosak. A módszer hátránya, hogy a mozgóátlag csökkenti az adatok élességét és késleltetett válaszokat eredményezhet gyors változásokra.

A szabályozás érdekében a mozgóátlag beállításain módosítottam (lásd 19. ábra). Az mozgóátlag méretét nagyobbra állítottam, így a MATLAB függvény több adatból számolja az átlagokat, ahogy a grafikonon is látszik.

- Ablak hossza: 6
- Átfedés hossza: 5



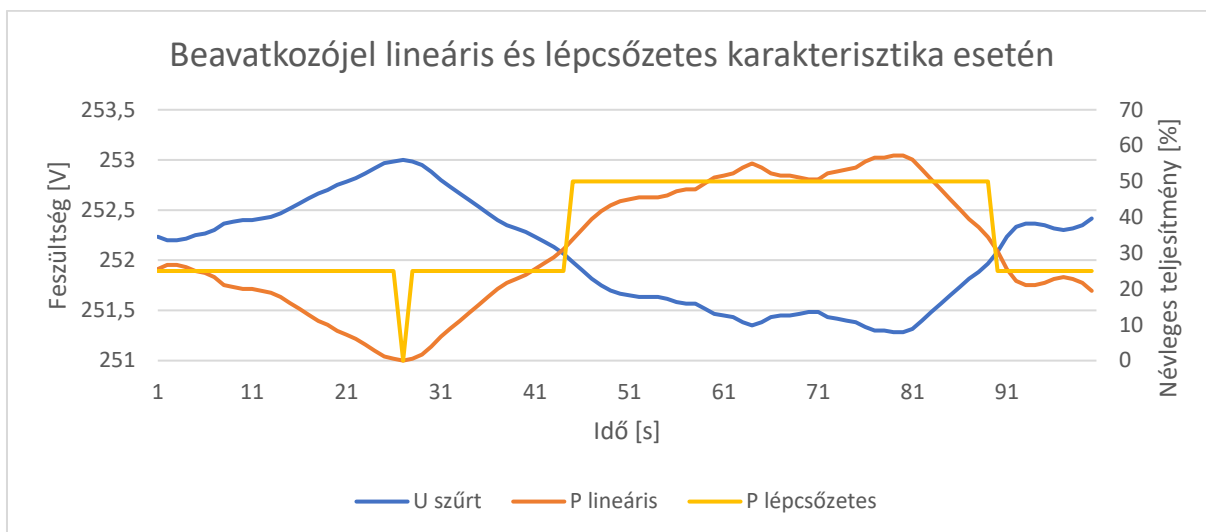
19. ábra: A mozgóátlag különböző beállításainak összehasonlítása

A módosított beavatkozási jel a zavarokra még kisebb kiugrásokkal válaszol, miközben további késések jelentkeztek a mozgóátlag beállításainak nagyobb értékekre való átállítása után. A mért adatokból megállapítható az így kapott késés értéke. A grafikonról leolvasva, a 252 V értéket a kisebb ablakkal rendelkező szűrő a 45. másodpercben lépi át, míg a nagyobb ablakkal rendelkező szűrő 1 másodperccel később. Ebből következtetve a késés mértéke a feszültség viszonylatában 0,1-0,2 V, a meredekség függvényében.

A szabályozás további finomhangolásához további mérésekre lenne szükség, aminek a megvalósítása technikai probléma miatt a dolgozat írásakor megghiúsult.

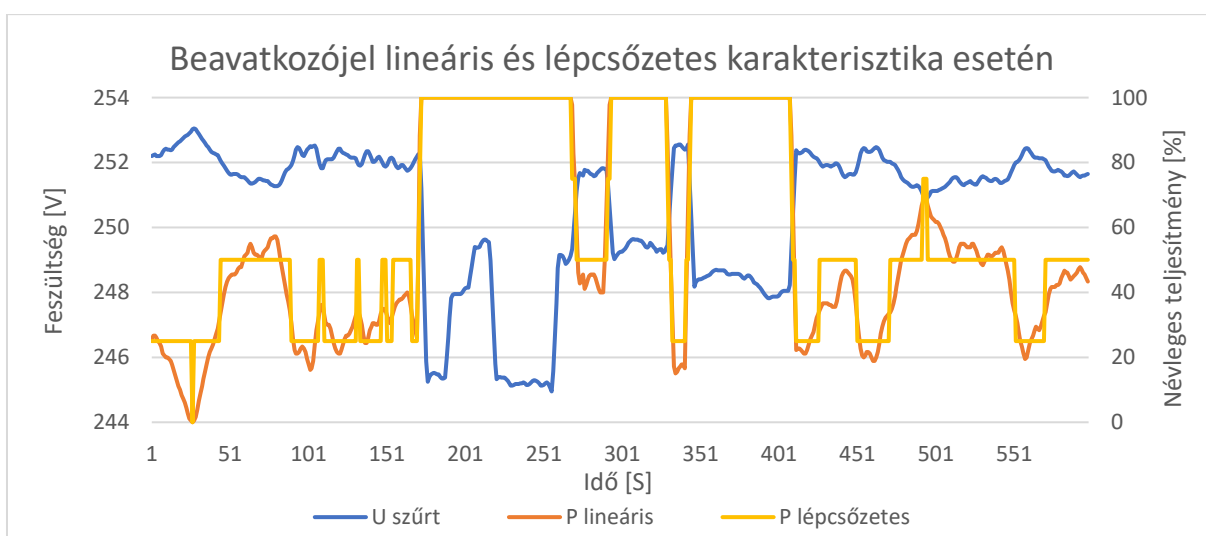
4.4.2 A lineáris és a lépcsőzetes beavatkozójel összehasonlítása

A szűrt jelet következő lépésben át kellett számolni a beavatkozó jel értékévé. A szabályozás a megadott tartományban működik. Ezt a tartományt könnyedén lehet állítani. Az inverternek a beavatkozó függvényében kell változtatni a névleges teljesítményét (lásd 20. ábra), aminek a változása kihatással van az inverter által generált feszültségre. A valóságban ez a hatás zavarójel formájában jelent meg a szabályozó bemeneti oldalán.



20. ábra: A beavatkozó jel lineáris és lépcsőzetes karakterisztika esetén

A jobb összehasonlíthatóság kedvéért a lépcsőzetes karakterisztikát kiszélesítettem 250-253 tartományba, így jobban látszik a két karakterisztikának a különbségét (21. ábra).



21. ábra: A beavatkozó jel lineáris és lépcsőzetes karakterisztika esetén 10 perces mérés során

A grafikon szemléletesen mutatja a két különböző karakterisztika viselkedésének különbségét. A grafikonról is leolvasható, hogy a lépcsőzetes karakterisztika esetén az inverter termelése egyik pillanatról a másikra jelentősen változhat, ami feszültség ugrásokat okozhat a hálózatban. Fontos megemlíteni, hogy az inverter termelésének zavarása nincsen megjelenítve. A valóságban az inverter termelése jelentősen befolyásolhatja a feszültség görbéjének meredekségét. Egy magas hálózati feszültséggel rendelkező rendszernél a legfontosabb szempont az inverter kikapcsolásának elkerülése. A készülék élettartama főként a kapcsolások számától függ. Termelésben a lépcsőzetes grafikon kicsit csalóka, mivel első ránézésre a termelése többnek tűnik, de lassabban és rosszabbul reagál a feszültségzavarokra.

4.4.3 PLC program megírása

A szabályozást PLC IDE programban szándékoztam megtervezni, de sajnálatos módon az okosmérőből nem sikerült a Modbuson keresztül kiolvasni értékeket. A tervezett program az I. számú mellékletben megtekinthető. A Modbus tesztelésére sikerült beszerezni egy Finder F7M okosmérőt, amire írtam egy teszt programot (II. számú melléklet). A program képes a feszültség, a teljesítmény, és a frekvencia értékeinek kiolvasására. A Finder okosmérő táblázatában egyértelműen le van írva, hogy kiolvasás során a regisztercímhez hozzá kell adni egy megadott értéket. A Chint okosmérő használatához további kutató munka és tesztelés szükségeltetik, amit a szakdolgozat írásakor idő hiányában nem megvalósítható.

5 Gazdasági számítás

A rendszer gazdasági számításánál figyelembe kell venni a mérnök napidíját, a használt eszközök beszerzésének költségét, illetve az egyéb felhasználandó segédanyagok költségét.

5.1 Mérnök munkadíj

A rendszer megtervezéséhez, a mérnök napidíját, a Magyar Mérnöki Kamara Elnöksége által elfogadott díjazási táblázatot vettem alapul. A táblázat nettó árakat tartalmaz.

7. táblázat: *Mérnöki díjszabás [41]*

Mérnöknap díja forintban (Érvényes 2024. január 1-től.)					
Kiemelt Mérnök	Irányító Mérnök	Önálló Mérnök	Beosztott Mérnök	Kezdő Mérnök	Segéd tervező, szerkesztő
405.000 Ft	296.000 Ft	235.000 Ft	178.000 Ft	119.000 Ft	89.000 Ft

Ideális esetben egy tapasztalattal rendelkező mérnök, aki megfelelő felszereltséggel, és tesztelési lehetőségekkel rendelkezik a rendszer megtervezéséhez, megközelítőleg három – négy nap alatt képes a rendszert megfelelően megtervezni.

5.2 Anyagköltség

Alkatrész	Megnevezés	Költség*
PLC	Arduinio Opta	67 000 Ft
Okosmérő (rendelkezésre állhat)	Chint DTSU666	36 000 Ft
Elosztó doboz	8 modulós	~6000 Ft
Segédanyag	Érvéghüvelyek, vezetékek, tömszelencék, fővezetési leágazókapcsok	~4000 Ft

*Az árakat Google keresés során állapítottam meg (2024. októberi adatok).

5.3 Összesen

Egy önálló mérnök egy heti munkáját figyelembe véve, a felsorolt anyagköltségekkel számolva a rendszer megtervezésének költsége nagyságrendileg nettó 800 000 Ft.

6 Továbblépési lehetőségek

6.1.1 További vizsgálatok éles rendszeren

Napelemes rendszeren nem sikerült vizsgálatokat végezni technikai problémák miatt. Más okosmérők használata segíthet orvosolni a problémát. Egy másik opció lehet MATLAB-ban felépíteni az egész rendszer modelljét. Egy egész napelemes rendszert lefedő modellben lehetőség szerint le lehetne generálni a zavarójeleket, ami lehetővé tenné a szabályozás további beállítását.

6.1.2 Arduino Cloud integráció

A felhasználói és karbantartási igények figyelembevétele manapság kiemelt fontosságú. A modern rendszerek esetében már alapkövetelmény egy átlátható felület megléte, amin keresztül távolról figyelemmel lehet kísérni a rendszer működését. Az Arduino lehetőséget kínál ezeknek az érdekeknek a kiszolgálására.

- **Dashboard:** Az irányítópultok segítségével a felhasználók valós időben követhetik az eszközeik által gyűjtött adatokat. A vizualizáció testreszabható grafikonokkal, és kijelzőkkel segít az adatkövetésben, elemzésben.
- **Mobil Alkalmazás Támogatás:** Az Arduino Cloud mobilalkalmazás lehetőséget biztosít arra, hogy a felhasználók bárholnan hozzáférjenek az irányítópultjukhoz, megfigyelhessék az adatokat, és vezéreljék az eszközeiket okostelefonjukon keresztül.

6.1.3 Kompatibilitás további inverterekkel

Az Arduino fejlesztőkörnyezet lehetővé teszi, hogy a PLC több programnak a futtatására is képes legyen. A különböző programokat el lehet menteni egy könyvtárban, amiből mindig a szükséges programot be lehet tölteni a PLC-be. Erre kedvező felületet kínál az Arduino Cloud, ahol az összes program egyszerre tárolható, így nincsen szükség tároló eszközökre. Mivel az összes gyártó másik Modbus beállítással és címezéssel dolgozik, így újabb eszközök, újabb módosított program szükséges, amit egyedileg kell beállítani az okosmérő és az inverter Modbus táblázata alapján.

Összefoglalás

Az elmúlt években a napelemes rendszerek elterjedése Magyarországon hatalmas ütemben gyorsult köszönhetően a kedvező elszámolásnak és az állami támogatásoknak. Az áramszolgáltatók nem tudták lekövetni ezt a hirtelen növekedést, ami hálózati túlterhelést eredményezett országszerte. A túlterhelés magas hálózati feszültség formájában jelentkezett, aminek a következtében a napelemes rendszerek hatékonysága, és a háztartási elektromos berendezések élettartama csökkent. A napelemes invertereknek az előírt magas hálózati feszültség esetén le kell állniuk. A termelés leállást lokális feszültségszabályozás segítségével lehetőség van csökkenteni, jobb esetben megszüntetni.

Az inverterek egy ideális rendszer esetében kiegyenlítik a terhelést a rendszerben, így megszűnik az aktív teljesítményáramlás a vezetékeken keresztül. Hálózatra visszatápláló napelemes rendszerek esetében, ha az inverter teljesítménye meghaladja a vezeték terhelését, akkor a teljesítmény a hálózat irányába áramlik, ami feszültségnövekedéssel jár.

Az elosztói szabályzat előírja a feszültségszabályozó rendszer használatát, ami annyit jelent, hogy 250 és 253 V között értékek között az inverternek vissza kell vennie a termelését arányosan a névleges teljesítményéhez képest. A szabályzat elsősorban lineáris karakterisztikát ír elő ezeknek a rendszereknek, amire a legtöbb inverter szoftveresen nem képes. Ezeknél az eszközöknél lépcsős karakterisztika beállítására van lehetőség. A szabályozás során ez a szabályozás 1 V hirtelen értékváltozásra harmadolhatja az inverter teljesítményét kis időn belül, ami nem tesz jót sem rendszernek, sem a készüléknek.

A magas hálózati feszültség okozta termelés kiesést két példán keresztül kielemeztem. A kielemezés során látszott, hogy szabályozás nélkül az inverter sűrűn ki-be kapcsolgat, ami hosszútávon csökkentheti az élettartamát. Ebből az okból kifolyólag egy lineáris karakterisztika beállíthatóságát tűztem ki célomul ezeken az eszközökön. A szabályozó rendszert egy PLC irányításával terveztem meg.

A rendszer megfelelő működéséhez három alapvető eszközre volt szükségem. A feszültség mérésére egy okosmérőre, ami folyamatos visszacsatolást biztosít a rendszer számára. A PLC-nek az okosmérőből kinyert mérési adatok fel kell dolgoznia meghatározott feltételrendszerben, ami alapján meg kell határoznia a beavatkozó számára szükséges jelet. A

beavatkozó maga az inverter volt, ami az aktív teljesítmény beállítás által lett volna szabályozva.

Sajnálatos módon az okosmérő és a PLC között kommunikációval technikai gondok akadtak, amik megakadályozták a kész rendszer befejezését és tesztelését. A szabályozó egy független mérés során rögzített mérési adatok alapján került megtervezésre MATLAB-ban. A szabályozót tervezésekor figyelembe kellett vennem, hogy a feszültség értéke időben ingadozik, és ezek az ingadozások előre nem meghatározhatóak, de bizonyos határok között mozgó véletlenszerű változások figyelhetők meg. A hálózati feszültség sztochasztikus tulajdonságai számos tényezőtől adódnak, amelyek jellemzően a terhelési változások, a környezeti hatások és az elektromos hálózat állapotváltozásai miatt lépnek fel.

A végleges szabályozó képes volt kiszűrni a hálózat zajából eredő rövid idejű, pár tizedes kiugrásokat, amik alapesetben lengésbe hozhatnak egy megfelelő szűrés nélküli rendszert. Irányítástechnika és jelfeldolgozás során a sztochasztikus jellegű adatok, például feszültség- vagy hőmérsékletmérések szűrésére mozgóátlag szűrést használnak a véletlenszerű zajok eltávolításának, és stabilabb jel érdekében.

Az elosztói szabályzat által előírt lineáris és lépcsőzetes karakterisztikákat összehasonlítottam a megfelelő jelszűrés ismeretében. A lépcsőzetes beállítás látszólag több ideig engedi termelni a napelemes rendszert, de a nagy lépésköz következtében feszültségingadozásokat okozhat a hálózatban. A lineáris karakterisztikával ellátott szabályozás megfelelően beállítva képes lehet stabilizálni a feszültség értékét egy adott tartományban az inverter teljesítménynek folyamatos állításával.

SUMMARY

In recent years, the expansion of solar systems in Hungary has accelerated significantly due to favorable compensation and government support. Electricity providers could not keep up with this sudden growth, which has resulted in grid overload nationwide. This overload has manifested in the form of high grid voltage, which has consequently reduced the efficiency of solar systems and the lifespan of household electrical appliances. Solar inverters must shut down in the event of prescribed high grid voltage. Production stoppages can be reduced, or even eliminated in an ideal case, through local voltage regulation.

In an ideal system, inverters balance the load within the system, eliminating active power flow through the cables. In grid-connected solar systems, if the inverter's output exceeds the load capacity of the cables, the excess power flows toward the grid, leading to an increase in voltage.

The distribution regulation mandates the use of a voltage control system, which means that between 250 V and 253 V, the inverter must reduce its output proportionally to its rated power. The regulation primarily prescribes a linear characteristic for these systems, but most inverters are not capable of this type of regulation in software. For these devices, a stepwise characteristic can be set. During regulation, this stepwise control can reduce the inverter's output to one-third with a sudden 1 V change within a short time, which is harmful both to the system and the device.

I analyzed the production loss caused by high grid voltage through two examples. The analysis showed that without regulation, the inverter frequently switches on and off, which can reduce its lifespan in the long term. For this reason, my goal was to make a linear characteristic configurable on these devices. I designed the control system to be managed by a PLC.

For the system to operate correctly, three essential devices are required. To measure voltage, a smart meter was needed to provide continuous feedback to the system. The PLC must process the measurement data obtained from the smart meter within a specified set of conditions, based on which it determines the necessary signal for the actuator. The actuator itself will be the inverter, which will be controlled by setting the active power.

Unfortunately, there were technical issues with the communication between the smart meter and the PLC, which prevented the completion and testing of the final system. The controller

was designed in MATLAB based on measurement data recorded during an independent measurement. During the design of the controller, I had to consider that the voltage value fluctuates over time, and these fluctuations are unpredictable but exhibit random variations within certain boundaries. The stochastic characteristics of grid voltage are due to several factors, typically arising from load changes, environmental effects, and changes in the condition of the electrical grid.

The final controller is capable of filtering out short-term decimal fluctuations from the network noise, which could otherwise cause oscillations in a controller without proper filtering. In control engineering and signal processing, moving average filtering is used to remove random noise and achieve a more stable signal for stochastic data, such as voltage or temperature measurements.

I compared the linear and stepwise characteristics prescribed by the distribution regulations with an understanding of appropriate signal filtering. The stepwise setting seemingly allows the solar power system to operate longer, but due to the large step size, it may cause voltage fluctuations in the grid. Properly adjusted regulation with a linear characteristic can potentially stabilize the voltage within a specific range by continuously adjusting the inverter's output.

Hivatkozások

- [1] IEA - International Energy Agency, "IEA - International Energy Agency," 11 07 2023. [Online]. Available: <https://www.iea.org/energy-system/renewables/solar-pv>. [Accessed 10 09 2024].
- [2] Energiaügyi Minisztérium, „Magyarország Kormánya,” 11 január 2024. [Online]. Available: <https://kormany.hu/hirek/2023-ban-sosem-latott-mertekben-bovult-a-hazai-napenergia-kapacitas>. [Hozzáférés dátuma: 10 szeptember 2024].
- [3] Divine Atsu, István Seres és István Farkas, „The state of solar PV and performance analysis of different PV technologies grid-connected installations in Hungary,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021.
- [4] F. A. VIAWAN, Steady State Operation and Control of Power, Göteborg: Technical Report at Chalmers University of Technology, 2006.
- [5] MVM Erbe, „Átviteli Hálózatok,” MVM ERBE Zrt., 2021. [Online]. Available: <https://erbe.mvm.hu/hu-HU/Tevekenyseguink/Szolgalattasok/Energiatermeles>. [Hozzáférés dátuma: 14 szeptember 2024].
- [6] S. M. K. Shah, T. U. Rasheed és H. M. Ali, „Smart Integrated Decentralization Strategies of Solar Power,” *International Journal of Photoenergy*, p. 14, 2022.
- [7] M. v. Werven és M. Scheepers , „The Changing Role of Energy Suppliers and Distribution System Operators in the Deployment of Distributed Generation in Liberalised Electricity Markets,” ECN, 2005.
- [8] R. Leal-Arcas, N. Akondo és J. A. Rios, „Energy Decentralization in the European Union Energy decentralization in the EU Energy decentralization in the European Union,” *Queen Mary University of London, School of Law Legal Studies Research Paper N*, p. 59, 2019.
- [9] S. A. Kalogirou, Solar Energy Engineering, Elsevier, 2014.
- [10] Y. Chu, „Review and Comparison of Different Solar Energy Technologies,” Global Energy Network Institute, 2011.
- [11] A. H. M. Nordin, A. M. Omar és . H. Zainuddin, „Modeling and Simulation of Grid Inverter in GridConnected Photovoltaic System,” *International JournalL of Renewable Energy Research*, p. 9, 2014.
- [12] K. Zeb, W. Uddin, M. A. Khan, Z. Ali, M. U. Ali, N. Christofides és H. J. Kim, „A comprehensive review on inverter topologies and control strategies for grid connected photovoltaic system,” 2018.

- [13] SolarEdge Technologies Inc., „Why choose SolarEdge Solutions?,” [Online]. Available: <https://solaredge.in/why-solaredge>. [Hozzáférés dátuma: 30 október 2024].
- [14] S. Zahurul, N. Mariun, V. Grozescu, M. L. Lutfi, H. Hizam és I. Z. Abidin, „ELECTRICITY MEASUREMENT SENSOR: A REVIEW ON APPLICATION TO SMART METER COMMUNICATION,” in *Syed Zahurul Islam*, Madinah, Kingdom of Saudi Arabia, 2013.
- [15] M. A. Maczik, PLC ismeretek és példatár, Budapest: Tankönyvmester Kiadó, 2013.
- [16] L. Hodossy, Programozott vezérlések I., Győr: Széchenyi István Egyetem, 2006.
- [17] W. Bolton, Programmable Logic Controllers, Waltham: Elsevier Ltd, 2015.
- [18] Texas Instruments, „Precision labs series: RS-485,” 22 november 2019. [Online]. Available: https://www.ti.com/video/series/precision-labs/ti-precision-labs-rs-485.html?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=asc-null-null-58700008359844890_RS-485_RSA-cpc-tr-google-ww_en_int&utm_content=RS-485_RSA&ds_k=what+is+rs-485&DCM=yes&gad_source=1&g. [Hozzáférés dátuma: 31 október 2024].
- [19] R. Bhuiyan, „RS485 Communication Protocol: Basics, Working Principle & Applications,” 26 december 2023. [Online]. Available: <https://embeddedthere.com/rs485-communication-protocol/>. [Hozzáférés dátuma: 31 október 2024].
- [20] G. Thomas, „Introduction to the Modbus protocol,” *The Extension*, p. 4, 2008.
- [21] Y. P. Agalgaonkar, B. C. Pal és R. A. Jabr, „Regulators, Distribution Voltage Control Considering the Impact of PV Generation on Tap Changers and Autonomous,” *IEEE Transactions on Power Systems*, pp. 182-192, 2013.
- [22] D. Erhan, S. Dezso, T. Remus és R. Pedro, „Clustered PV Inverters in LV Networks: An Overview of Impacts and Comparison of Voltage Control Strategies,” *Proceedings of the Electrical Power and Energy Conference*, 2009.
- [23] E. Demirok, . P. C. González, K. H. B. Frederiksen, D. Sera, P. Rodriguez és R. Teodorescu, „Local Reactive Power Control Methods for Overvoltage Prevention of Distributed Solar Inverters in Low-Voltage Grids,” *IEEE Journal of Photovoltaics*, pp. 174-182, 2011.
- [24] M. J. E Alam, K. M. Muttaqi és D. Sutanto, „Distributed ener Distributed energy storage for mitigation of v age for mitigation of voltage-rise impact caused b oltage-rise impact caused by rooftop solar PV,” *Faculty of Engineering and Information Sciences*, 2012.
- [25] *Elosztói Üzletszabályzata M4. számú melléklet*, 2020.
- [26] Fronius Hungary Kft, „Fronius Smart Grid Ready hálózat támogató funkció: Feszültség függő teljesítmény leszabályozás (GVDPR),” Fronius International GmbH, 2022.

- [27] *Elosztói szabályzat*, 2024.
- [28] Solar Edge, „Solar Edge monitoring,” Solar Edge, [Online]. Available: monitoring.solaredge.com.
- [29] Solax Power, „Solax Cloud,” Solax Power, [Online]. Available: <https://www.solaxcloud.com/user-center/>.
- [30] Solarman, „DTSD422-D-100 datasheet,” IGEN Tech Co., Ltd., Kína.
- [31] Solarman, „DTSD422-D3-W datasheet,” IGEN Tech Co., Ltd., Kína.
- [32] Solax Power, „Energy meter datasheet,” Solax Power, Kína, 2024.
- [33] Eastron, „SDM630 Series datasheet,” Eastron, 2024.
- [34] Arduino, „Arduino Opta Collective Datasheet,” Finder, 2024.
- [35] Scheinder Electric, „Modicon M171 Optimized Display datasheet,” 2024.
- [36] Rievtech, „SR-12DC-DA-R datasheet,” Rievtech.
- [37] T. Chung, J. Bagur és G. Mancini, „Using PLC IDE With Arduino Cloud”.
- [38] J. Bagur és T. Chung, „Energy Management with Opta™”.
- [39] Zhejiang Chint Instrument & Meter Co., „DDSU666 Operation Manual,” Csöcsiang, 2019.
- [40] Solax Power, „Energy Storage Inverter Modbus TCP&RTU Communication protocols,” [Online]. Available: https://gbc-solino.cz/wp-content/uploads/2022/07/Hybrid-X1X3-G4-ModbusTCPRTU-V3.21-English_0622-public-version.pdf. [Hozzáférés dátuma: 24 október 2024].
- [41] Magyar Mérnöki Kamara, „Mérnöki díjszabás,” [Online]. Available: <https://mernokvagyok.hu/mernoki-dijszabas/>. [Hozzáférés dátuma: 8 november 2024].

Ábrajegyzék

1. ábra: Hagyományos villamosenergia hálózat felépítése [4]	4
2. ábra: Villamos hálózat a kisméretű termelő egységek jelenlétével [4]	5
3. ábra: Programozható logikai vezérlő [17]	11
4. ábra: RS485 Half-duplex kommunikáció [19]	12
5. ábra: Elosztói szabályzat által előírt feszültségszabályozási karakterisztika [26]	17
6. ábra: A szabályozás egyszerűsített folyamatábrája	19
7. ábra: Lineáris feszültségszabályozás	20
8. ábra: Többlépcsős feszültségszabályozás	21
9. ábra: Első rendszer termelése 10.08.-án [28]	22
10. ábra: Az 5kW-os inverter teljesítménye a hálózati feszültség függvényében [28]	23
11. ábra: A 8kW-os inverter teljesítménye a hálózati feszültség függvényében [28]	24
12. ábra: A második rendszer termelése 10.10.-én [29]	25
13. ábra: A hibrid inverter teljesítménye a hálózati feszültség függvényében [29]	26
14. ábra: Munkafolyamat az PLC IDE és az Arduino Cloud között [37]	31
15. ábra: Irányított napelemes rendszer [38]	31
16. ábra: Gray box modell	32
17. ábra: Jelszűrő modellje MATLAB-ban	40
18. ábra: Mozgóátlaggal szűrt adatsor	41
19. ábra: A mozgóátlag különböző beállításainak összehasonlítása	42
20. ábra: A beavatkozó jel lineáris és lépcsőzetes karakterisztika esetén	43
21. ábra: A beavatkozó jel lineáris és lépcsőzetes karakterisztika esetén 10 perces mérés során	43

Egyenletjegyzék

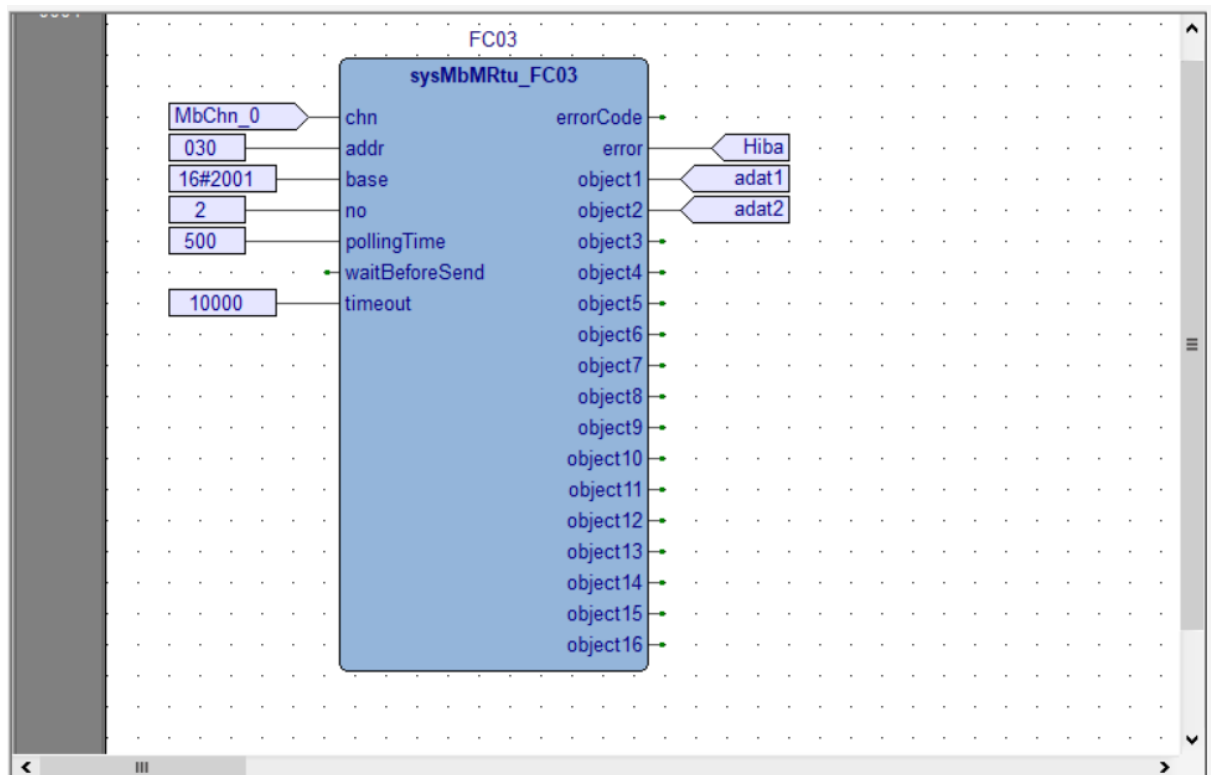
1. egyenlet: A szabályozás egyenlete	37
--	----

Táblázatjegyzék

1. táblázat: P(U) szabályozás lineáris karakterisztikája [27]	16
2. táblázat: P(U) szabályozás lépcsős karakterisztikája [27]	16
3. táblázat: Okosmérők összehasonlítása	28
4. táblázat: PLC-k összehasonlítása	29
5. táblázat: Chint DDSU666 Modbus táblázata [39]	34
6. táblázat: Solax X3-Hybrid-G4 Modbus táblázat [40]	39
7. táblázat: Mérnöki díjszabás [41]	45

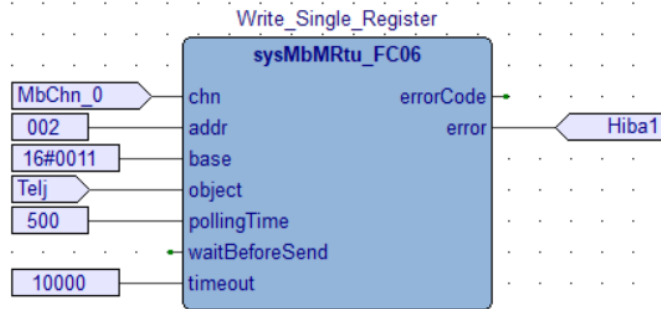
I. Melléklet: A szabályozás PLC IDE programban

```
0001 IF Hiba = FALSE THEN
0002     RED := FALSE;
0003     GREEN := TRUE;
0004 ELSE
0005     RED := TRUE;
0006     GREEN := FALSE;
0007 END_IF;
0008
```



```
0001 // Két 16 bites register kombinálása egy 32 bites értékké
0002 Uifesz := SHR(adat1, 16);
0003
0004
0005 // A 32 bites feszültség REAL-re konvertálása
0006 Fesz := TO_REAL(Uifesz);
0007
0008 // Mozgóátlag, ablak méret 6 and átfedés 5
0009 sum := sum - buffer[bufferIndex]; //Legutolsó érték eltávolítása
0010 buffer[bufferIndex] := Fesz; //Új érték meghatározása
0011 sum := sum + buffer[bufferIndex]; //Új érték hozzáadása
0012
0013 bufferIndex := (bufferIndex + 1) MOD 6; //A puffindex frissítése
0014
0015 filteredValue := sum / 6.0; //Mozgóátlagolás
0016
0017 // Lineáris szabályozás
0018 outputValue := (Szaz * ((max_in - Fesz) / (max_in - min_in)));
0019
0020 // A kapott érték átkonvertálása UINT típusra
0021 Telj := TO_UINT(outputValue);
0022
```

0001



II Melléklet: Teszt program Finder F7M oksomérővel

```
1  #include <Finder7M.h>
2
3  Finder7M f7m;
4  constexpr uint8_t MODBUS_7M_ADDRESS = 33;
5
6  void setup()
7  {
8      Serial.begin(19200);
9
10     if (!f7m.init())
11     {
12         while (1)
13         {
14         }
15     }
16     Serial.println("*** Reading 7M at address " + String(MODBUS_7M_ADDRESS));
17
18     // Model Number
19     Finder7MModelNumber modelBuffer;
20     Serial.print("    Serial Model = ");
21     if (f7m.getModelNumber(MODBUS_7M_ADDRESS, modelBuffer))
22     {
23         Serial.println(String(modelBuffer, 16));
24     }
25     else
26     {
27         Serial.println("read error!");
28     }
29
30     // Serial Number
31     Finder7MSerialNumber serialBuffer;
32     Serial.print("    Serial Number = ");
33     if (f7m.getSerialNumber(MODBUS_7M_ADDRESS, serialBuffer))
34     {
35         Serial.println(String(serialBuffer, 8));
36     }
37     else
38     {
39         Serial.println("read error!");
40     }
41
42     // Software and hardware reference
43     uint16_t sref = f7m.getSoftwareReference(MODBUS_7M_ADDRESS);
44     printUInt("Software Reference", sref);
45     uint16_t href = f7m.getHardwareReference(MODBUS_7M_ADDRESS);
46     printUInt("Hardware Reference", href);
47 }
```

```

48
49 void loop()
50 {
51     delay(3000);
52
53
54
55     // MID counters
56     Measure inActive = f7m.getMIDInActiveEnergy(MODBUS_7M_ADDRESS);
57     printMeasure("IN Active Energy", inActive);
58
59
60     // Measurements
61     Measure frequency = f7m.getFrequency(MODBUS_7M_ADDRESS);
62     printMeasure("Frequency", frequency);
63     Measure voltage = f7m.getVoltage(MODBUS_7M_ADDRESS);
64     printMeasure("Voltage", voltage);
65     Measure pt = f7m.getActivePowerTotal(MODBUS_7M_ADDRESS);
66     printMeasure("Active Power Total", pt);
67     Measure qt = f7m.getReactivePowerTotal(MODBUS_7M_ADDRESS);
68
69 };

70
71 void printMeasure(String label, Measure m)
72 {
73     int32_t mantissa = m.mantissa();
74     int32_t exponent = m.exponent();
75     Serial.print("  " + label + " = ");
76     if (!m.isReadError())
77     {
78         Serial.println( m.toFloat() );
79     }
80     else
81     {
82         uint8_t err = m.getErrorCode();
83         switch (err)
84         {
85             case INVALID_MANTISSA:
86                 Serial.println("error while reading mantissa!");
87                 break;
88             case INVALID_EXPONENT:
89                 Serial.println("error while reading exponent!");
90                 break;
91             case INVALID_READ:
92                 Serial.println("read error!");
93                 break;
94         }
95     }
96 };

97
98 void printUInt(String label, uint16_t n)
99 {
100     int32_t n32 = (int16_t)n;
101     Serial.println("  " + label + " = " + (n32 != INVALID_DATA ? String(n) : String("read error!")));
102 };
103

```

NYILATKOZAT

Alulírott MIKÁCSÓ DA'NIEL, a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, SZENT ISTVÁN Campus, MECHATRONIKA MÉRNÖK szak nappali/levelező* tagozat végzős hallgatója nyilatkozom, hogy a dolgozat saját munkám, melynek elkészítése során a felhasznált irodalmat korrekt módon, a jogi és etikai szabályok betartásával kezeltem. Hozzájárulok ahhoz, hogy Záródolgozatom/Szakdolgozatom/Diplomadolgozatom egyoldalas összefoglalója felkerüljön az Egyetem honlapjára és hogy a digitális verzióban (pdf formátumban) leadott dolgozatom elérhető legyen a témát vezető Tanszéken/Intézetben, illetve az Egyetem központi nyilvántartásában, a jogi és etikai szabályok teljes körű betartása mellett.

A dolgozat állam- vagy szolgálati titkot tartalmaz: igen nem*

Kelt: 2024 év 11 hó 8 nap

Mikácsó Dániel
Hallgató

NYILATKOZAT

A dolgozat készítőjének konzulense nyilatkozom arról, hogy a Záródolgozatot/Szakdolgozatot/Diplomadolgozatot áttekintettem, a hallgatót az irodalmi források korrekt kezelésének követelményeiről, jogi és etikai szabályairól tájékoztattam.

A Záródolgozatot/Szakdolgozatot/Diplomadolgozatot záróvizsgán történő védelemre javaslom/
nem javaslom*.

A dolgozat állam- vagy szolgálati titkot tartalmaz: igen nem*

Kelt: 2024 év 11 hó 11 nap

Gerő Zoltán
Belső konzulens

*Kérjük a megfelelőt aláhúzni!

NYILATKOZAT

a záródolgozat/szakdolgozat/diplomadolgozat/portfólió¹ nyilvános hozzáféréséről és eredetiségéről

A hallgató neve: MIKÁCSÓ DÁNIEL
A Hallgató Neptun kódja: CRNDG
A dolgozat címe: HÁZTARTÁSI NAPELÉMES RENDSZEREK LOKÁLIS FESZÜLTSEG
A megjelenés éve: 2024 SZABÁLYOZÁSA
A tanszék neve: MÉCHATRONIKAI

Kijelentem, hogy az általam benyújtott záródolgozat/szakdolgozat/diplomadolgozat/portfólió² egyéni, eredeti jellegű, saját szellemi alkotásom. Azon részeket, melyeket más szerzők munkájából vettem át, egyértelműen megjelöltem, s az irodalomjegyzékben szerepeltettem.

Ha a fenti nyilatkozattal valótlan állítottam, tudomásul veszem, hogy a Záróvizsga-bizottság a záróvizsgából kizár és a záróvizsgát csak új dolgozat készítése után tehetek.

A leadott dolgozat, mely PDF dokumentum, szerkesztését nem, megtekintését és nyomtatását engedélyezem.

Tudomásul veszem, hogy az általam készített dolgozatra, mint szellemi alkotás felhasználására, hasznosítására a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem mindenkori szellemi tulajdon-kezelési szabályzatában megfogalmazottak érvényesek.

Tudomásul veszem, hogy dolgozatom elektronikus változata feltöltésre kerül a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem könyvtári repozitori rendszerébe.

Kelt: 2024 év 11 hó 8 nap

Mikácsó Dániel
Hallgató aláírása

¹A megfelelő dolgozattípus meghagyása mellett a többi típus törlendő.

²A megfelelő dolgozattípus meghagyása mellett a többi típus törlendő.