

DIPLOMATERVEZÉSI FELADAT

Veress Gábor

Villamosmérnök hallgató részére

Keretrendszer energetikai felügyelethez

A villamosenergetikai rendszerekben egyre inkább elvárássá válik, hogy a felhasználóhoz közeli hálózatrészekben is távolról felügyelhető, és vezérelhető elemeket, például távolról is vezérelhető kismegszakítókat telepítsenek. A hatékonyság és a biztonság növelése egyaránt célja lehet az ilyen fejlesztéseknek.

Az ebben rejlő lehetőségek megvizsgálására érdemes olyan keretrendszert kidolgozni, melyben mérésre és beavatkozásra képes kis bonyolultságú végponti elemeket egy adatbázissal támogatott monitorozó komponenssel kötünk össze. Az adatgyűjtés eredményét egy felügyeleti logika dolgozhatja fel, és ennek döntéseit a végpontokat vezérlő információként használhatjuk fel. A teszteléshez és a hatások elemzéséhez a végponti elemek működésének és bemeneteinek szimulációjára is szükség van.

A rendszer stabilitásának növeléséhez célszerű a komponenseket konténer-környezetben futtatni, és a redundanciájukat, illetve skálázhatóságukat biztosítani.

A hallgató feladatai a következők:

- Tekintse át az egyszerű energetikai eszközök felügyeletét ellátó megoldásokat!
- Azonosítsa a szükséges komponenseket, és tervezze meg a keretrendszert!
- Valósítsa meg a monitorozás, az adattárolás, és a felügyeleti logika komponenseit és azok kommunikációját, figyelembe véve az alapvető biztonsági elvárásokat is!
- Készítsen skálázható, konténeralapú komponenseket, és hangolja össze az elemek működését Kubernetes segítségével!
- Alkalmazzon redundanciát a hálózatban is, és javasoljon megoldást a végponti elemek megbízható kezelésére!
- Dolgozzon ki a működés tesztelésére alkalmas szkenáriókat, melyek pillanatnyi állapotokat, vagy időzített változásokat szimulálnak, és ezek segítségével értékelje a rendszer működését hibamentes állapotban, és egyes egyszerű hibák esetében!

Tanszéki konzulens: Dr. Zsóka Zoltán docens

Külső konzulens:

Budapest, 2025. március 3.

Dr. Imre Sándor
egyetemi tanár
tanszékvezető

Konzulensi vélemények:

Tanszéki konzulens: ☐ Beadható, ☐ Nem beadható, dátum:

aláírás:

Külső konzulens: ☐ Beadható, ☐ Nem beadható, dátum:

aláírás:



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Hálózati Rendszerek és Szolgáltatások Tanszék

Keretrendszer energetikai felügyelethez

DIPLOMATERV

Készítette
Veress Gábor

Konzulens
dr. Zsóka Zoltán

2025. november 18.

Tartalomjegyzék

Kivonat	i
Abstract	ii
1. Bevezetés	1
1.1. Motiváció és ipari környezet	1
1.2. A dolgozat célkitűzései	1
2. Meglévő megoldásokkal összehasonlítása	3
2.1. Meglévő ipari megoldások	3
2.1.1. Schneider Power Monitoring Expert	3
2.1.1.1. Alapfunkciók	3
2.1.1.2. Előnyök	4
2.1.2. Siemens SIMATIC Energy Suite	4
2.1.2.1. Alapfunkciók	4
2.1.2.2. Előnyök	4
2.2. Saját megoldás	5
3. Keretrendszer	6
3.1. Rendszerarchitektúra áttekintése	6
3.2. Eszközök	7
3.2.1. Végpontok	7
3.2.1.1. ESP8266 és AC árammérő szenzorok	7
3.2.1.2. Mért eszközök	9
3.3. Kommunikáció	11
3.3.1. ESP8266 és Szerver között (Wi-Fi és REST API)	11
3.3.2. Modbus	11
3.4. Standardizált rendszer	12
3.4.1. Áttekintés	12
3.4.2. Tervezési célok és követelmények	12
4. Max–min fair (water-filling) elosztás	14
4.1. Elméleti háttér és cél	14
4.1.1. Motiváció és cél	14
4.1.2. Definíció (max–min fair)	14
4.1.3. Feltöltés (water-filling)	14
4.1.4. Algoritmus és bonyolultság	14
4.1.5. Tulajdonságok	15

4.2.	A vezérlőben alkalmazott megvalósítás	15
4.2.1.	Kapcsolat a rendszer komponenseivel	15
4.2.2.	Példák	16
4.2.3.	Implementációs részletek	16
4.2.4.	Alternatív allokációs stratégiák	16
5.	Komponensek megvalósítása	18
5.1.	Végpontok	18
5.1.1.	Autótöltő	18
5.1.1.1.	Bevezetés	18
5.1.1.2.	Megvalósítás	19
5.1.1.3.	Mérési adatok elküldése	19
5.1.1.4.	Main loop	19
5.1.1.5.	Kommunikáció	19
5.1.1.6.	Modbus kommunikáció vezérléshez	19
5.1.2.	Megszakító	20
5.1.2.1.	Hardver	20
5.1.2.2.	Szoftver	20
5.2.	Kontroll szerver	21
5.3.	Adatbázis	21
5.3.1.	Prometheus adatgyűjtés kezelése	22
5.3.2.	Prometheus lekérdezések kezelése	22
5.4.	Grafana alapú megjelenítés	23
5.4.1.	Az áramok vizualizálása és riasztások a Grafanában	23
5.4.1.1.	A Dashboard	24
6.	A vezérlési késleltetés és a rendszer-reakcióidő elemzése	25
6.1.	Bevezetés: A reakcióidő kritikus szerepe	25
6.2.	A vezérlés komponenseinek késleltetése	25
6.3.	A fő késleltetési tényezők	26
6.4.	Védelmi beállítások késleltetések alapján	27
6.5.	Következtetések	27
7.	Kubernetes integráció	28
7.1.	Bevezetés	28
7.2.	A Docker Compose és Kubernetes áttekintése	28
7.3.	Rendszerarchitektúrája	29
7.4.	A Docker Compose beállítások konvertálása Kubernetes manifesztekke	30
7.4.1.	Névtér- és konfigurációkezelés	30
7.4.2.	Deployment-ek és Service-ek	30
7.4.3.	Perzisztens tárolók kezelése	30
7.4.4.	Szolgáltatások elérhetővé tétele és hálózati konfiguráció	31
7.4.5.	Telepítés és tesztelés	31
7.5.	Nagy elérhetőségű rendszer implementációja	31
7.5.1.	Replikák megvalósítása	32
7.5.2.	KubeADM	33
8.	Szöveges interfészek a szimulációhoz	34

8.1.	Cél és áttekintés	34
8.2.	Bemeneti szövegfájlok	35
8.2.1.	thresholds.txt – küszöbök és maximum megengedhető áram	35
8.2.2.	esp{x}_schedule.txt – idősoros bemenet	35
8.3.	sim_control.txt – futtatási állapot	35
8.4.	Kimeneti szövegfájl	35
8.4.1.	output.txt – idősoros kimenet	35
8.5.	Időkezelés és futtatás	36
8.6.	Reprodukálhatóság és feldolgozhatóság	36
8.7.	Rövid példa – beállítás → kimenet	36
9.	Fejlesztői panel (Dev Panel)	38
9.1.	Cél és szerep	38
9.2.	Architektúra áttekintése	38
9.3.	Fő funkciók és munkamenet	38
9.4.	Backend API (elérések)	39
9.5.	Biztonsági és korlátok	39
9.6.	Kiterjeszthetőség	39
9.7.	Dev Panel módosítások	40
9.7.1.	Motiváció és cél	40
9.7.2.	Fő fejlesztések	40
9.7.3.	Felépítés és API változások	41
9.7.4.	UI szervezés (<i>Scenarios</i> kártya)	41
9.7.5.	Használati munkafolyamat	42
10.	Rendszertesztek és bemutató scénáriók	44
10.1.	Tesztek megvalósítása	44
10.2.	Bemenetek és állapot	45
10.3.	Várt viselkedés	45
10.4.	Scenáriók és elfogadási kritériumok	46
10.4.1.	Alaptesztek: Start/Stop/Reset/Clear	46
10.4.2.	Alulterhelés: nincs korlátozás	47
10.4.3.	Túlterhelés, azonos igények: fair 3/3/3 allokáció	49
10.4.4.	Dinamikus újraelosztás: a nagy felhasználó kap teret	50
10.4.5.	Megszakító hiszterézis	52
10.4.6.	Leállított mód (STOPPED)	54
11.	Összefoglalás és kitekintés	57
	Ábrák jegyzéke	59
	Táblázatok jegyzéke	60
	Irodalomjegyzék	60

HALLGATÓI NYILATKOZAT

Alulírott *Veress Gábor*, szigorló hallgató kijelentem, hogy ezt a diplomatervet meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, csak a megadott forrásokat (szakirodalom, eszközök stb.) használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint, vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Hozzájárulok, hogy a jelen munkám alapadatait (szerző(k), cím, angol és magyar nyelvű tartalmi kivonat, készítés éve, konzulens(ek) neve) a BME VIK nyilvánosan hozzáférhető elektronikus formában, a munka teljes szövegét pedig az egyetem belső hálózataán keresztül (vagy autentikált felhasználók számára) közzétegye. Kijelentem, hogy a benyújtott munka és annak elektronikus verziója megegyezik. Dékáni engedéllyel titkosított diplomatervek esetén a dolgozat szövege csak 3 év eltelte után válik hozzáférhetővé.

Budapest, 2025. november 18.

Veress Gábor
hallgató

Kivonat

Az elosztott villamosenergia-felhasználás (elektromos járműtöltők, lokális termelők, intelligens fogyasztók) gyors terjedése új követelményeket támaszt a villamos energia elosztó hálózattal szemben. A dolgozat egy olyan, nyílt forrású és konténerizált keretrendszert mutat be, ami kis költségű eszközöket (ESP8266 alapú mérő), egy Python-alapú vezérlőt, idősoros adatkezelést (Prometheus) és vizualizációt (Grafana) integrál egy egységesmegoldásba. A cél egy könnyen reprodukálható és testreszabható rendszer megvalósítása, ami képes valós idejű felügyeletre és korlátos erőforrások kezelésére.

A javasolt architektúra a mérést és a vezérlést átlátható interfészekon mutatja. A végpontok áramértékeket exportálnak Prometheus-kompatibilis metrikákként. A kontrollszervert (Python/Flask) REST API-n keresztül fogadja a méréseket, majd ipari környezetben elterjedt protokollon, Modbus/TCP-n keresztül hajt végre beavatkozásokat az energetikai eszközökön. A rendszer komponensei konténerekben futnak, fejlesztői környezetben Docker Compose biztosítja az orkesztrációt, míg nagyobb rendelkezésre állási igény esetén Kubernetes alkalmazható.

A rendszer kulcseleme egy max-min fair allokációs elv, ami egy előre rögzített globális áramkeretet tartat be több fogyasztó között. Ez a kisebb igényeket preferálja, majd a fennmaradó kapacitást olyan módon osztja szét, hogy a fogyasztás összege kiegyenlítődjön. Ez a megközelítés determinisztikus, egyszerűen paraméterezhető, és jól illeszthető valós idejű döntésekhez. A szabályozó a mérésekből származó idősoros adatokon dolgozik, és szabályok mentén (időablakok, prioritások, határértékek) állítja elő a beavatkozási parancsokat.

A megvalósítást szimulációs környezetben próbáltam. Itt ESP8266-alapú végpont gyűjtött terhelési adatokat valós idejű vizualizációval, miközben a kontrollkomponens dinamikusan korlátozta a fogyasztókat a megadott áramkeretre. A szimuláció determinisztikus bemenetekkel (küszöbök, ütemezések, vezérlési szkriptek) engedte meg különböző terhelési profilok és hibaesemények létrehozását, az algoritmus stabilitásának és működésének vizsgálatára. A tapasztalatok szerint a rendszer képes a keretek pontos követésére, a túllépések gyors csillapítására és az erőforrások igazságos elosztására.

A dolgozat hozzájárulásai a következők: (i) egységesített, Prometheus kompatibilis mérési interfész energetikai rendszerekhez (ii) max-min fair elosztást megvalósító vezérlő (iii) konténer-alapú referenciaimplementáció Docker Compose és Kubernetesben (iv) Grafana alapú üzemviteli és diagnosztikai irányítópultok (v) reprodukálható tesztkörnyezet. A keretrendszer akár ipari célokra is alkalmas, költséghatékony alternatívát kínál a zárt, gyártóspecifikus megoldásokkal szemben.

Abstract

The rapid spread of distributed electricity use (electric vehicle chargers, local producers, smart consumers) places new demands on the electricity distribution network. The thesis presents an open source and containerized framework that integrates low-cost devices (ESP8266-based meter), a Python-based controller, time series data management (Prometheus) and visualization (Grafana) into a single solution. The goal is to implement an easily reproducible and customizable system that is capable of real-time monitoring and managing limited resources.

The proposed architecture exposes measurement and control through transparent interfaces. The endpoints export current values as Prometheus-compatible metrics. The control server (Python/Flask) receives measurements via REST API, then performs commands on energy devices via Modbus/TCP, a protocol common in industrial environments. The system components run in containers, Docker Compose provides orchestration in the development environment, while Kubernetes can be used in cases of higher availability requirements.

The key element of the system is a max-min fair allocation principle, which maintains a pre-set global power limit among multiple consumers. This prefers smaller demands, then distributes the remaining capacity in such a way that the amount of consumption is balanced. This approach is deterministic, easily parameterizable, and well suited to real-time decisions. The controller works on time-series data from measurements and generates intervention commands based on rules (time windows, priorities, limit values). I tried the implementation in a simulation environment. Here, an ESP8266-based endpoint collected load data with real-time visualization, while the control component dynamically limited the consumers to the specified power frame. The simulation allowed the creation of different load profiles and fault events with deterministic inputs (thresholds, schedules, control scripts), to test the stability and operation of the algorithm. According to the experience, the system is able to accurately track the frames, quickly mitigate overshoots, and fairly allocate resources.

The contributions of the thesis are as follows: (i) a unified, Prometheus-compatible metering interface for energy systems (ii) a controller implementing max-min fair allocation (iii) a container-based reference implementation in Docker Compose and Kubernetes (iv) Grafana-based operational and diagnostic dashboards (v) a reproducible test environment. The framework is suitable even for industrial purposes and offers a cost-effective alternative to closed, manufacturer-specific solutions.

1. fejezet

Bevezetés

Az elmúlt évtizedben az energetikai szektor, és különösen a villamosenergia-rendszer, alapvető változásokon ment keresztül. A megújuló energiaforrások - elsősorban a nap- és szélenergia - exponenciális terjedése, valamint az elektromobilitás megjelenése új kihívások elé állította a hálózatüzemeltetőket. A hagyományos, egyirányú energiaáramlásra méretezett hálózatoknak ma már dinamikus, kétirányú terheléseket kell kezelniük, ahol a fogyasztás és a termelés egyensúlya folyamatosan ingadozik.

A jövő energetikája adatvezérelt: a mérés, az adatfeldolgozás és a beavatkozás ciklusidejének drasztikus csökkenése a kulcs a fenntartható üzemeltetéshez.

1.1. Motiváció és ipari környezet

Az épületautomatizálás és az ipari folyamatirányítás területén jelenleg egy érdekes kettősség figyelhető meg. A piacon domináns nagyvállalati megoldások (például Siemens, Schneider Electric) robusztus, szabványosított hardvert és szoftvert kínálnak. Ezek a rendszerek zárt ökoszisztémákra épülnek. Magas licencköltségeik, egyedi kommunikációs protokolljaik és a gyártói függőség gyakran gátat szabnak a kisebb felhasználóknak.

Ezzel párhuzamosan, az Ipar 4.0 rendszerek részeként, az olcsó mikrokontrollerek és beágyazott rendszerek ma már olyan számítási kapacitással és kommunikációs képességekkel rendelkeznek, amelyek néhány éve még csak drága ipari PC-k kiváltságai voltak. Ez a technológiai demokratizálódás teremt alapot dolgozatom motivációjának: lehetséges-e ipari szemléletű, megbízható felügyeleti rendszert építeni ezen költséghatékony, nyílt eszközök felhasználásával?

1.2. A dolgozat célkitűzései

Jelen diplomaterv célja egy olyan moduláris, nyílt forráskódú keretrendszer tervezése és megvalósítása, amely alternatívát kínál a drága ipari megoldásokkal szemben kutatási és fejlesztési célokra. A rendszernek képesnek kell lennie a teljes mérési-beavatkozási lánc kezelésére.

A megvalósítás során az alábbi konkrét célokat tűztem ki:

- **Architektúra tervezés:** Egy egységesített, konténerizált szoftverkörnyezet kialakítása a következő elemekkel idősoros adatgyűjtés (Prometheus), vezérlés (Python) és a vizualizáció (Grafana).
- **Végponti integráció:** Költséghatékony IoT eszközök (ESP8266) illesztése a rendszerbe szabványos ipari (Modbus/TCP) és webes (REST API) protokollokon keresztül.
- **Algoritmikus vezérlés:** A water-filling allokációs algoritmus implementálása.
- **Validáció és vizualizáció:** A rendszer működésének igazolása valós idejű mérésekkel, valamint egy átlátható kezelőfelület létrehozása az üzemeltető számára.

A dolgozat bemutatja, hogy a nyílt szabványok és a modern szoftvertechnológiák megfelelő kombinációjával létrehozható egy olyan rugalmas energetikai menedzsment rendszer, amely funkcióban hasonló, mint a drágább ipari megoldásokat.

2. fejezet

Meglévő megoldásokkal összehasonlítása

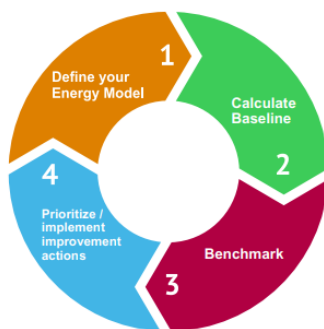
2.1. Meglévő ipari megoldások

2.1.1. Schneider Power Monitoring Expert

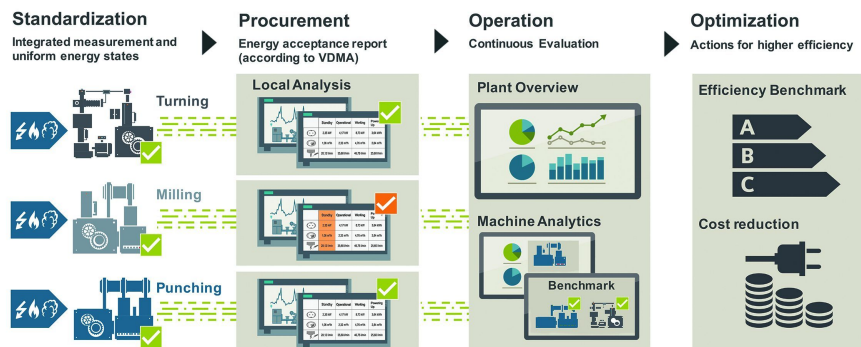
2.1.1.1. Alapfunkciók

- Segít csökkenteni a meddő teljesítmény termelést és az ebből keletkező büntetéseket.
- Saját számlát készít, a helyi mérések alapján, hogy összehasonlítási alap legyen a számlákhoz.
- Segít elszámolhatóságot biztosítani alszámlázáshoz.
- Berendezések teljesítményét és várható élettartamát ellenőrzi.
- Valós idejű adatfigyelés, riasztás és energiafolyamatok vezérlése a létesítményen belül.
- Azonosítsa a potenciális áramminőségi problémákat a hálózatában, és értesíti erről a személyzetet.

[4]



2.1. ábra. Schneider Electric PME model[4]



2.2. ábra. Siemens EMS model[16]

2.1.1.2. Előnyök

Az energiamérési rendszer használata átlagban 24%-kal csökkentette a fogyasztást, és 30%-al a költségeket.

Mivel folyamatos megfigyelés és beavatkozás lehetséges, a problémák korai szakaszában orvosolhatóak így ezeket 22%-al lehet csökkenteni. Ez a tudatosság csökkenti a hiba utáni visszaállítások idejét is. Ezenkívül segít a mögöttes problémák megtalálásában is.[4]

2.1.2. Siemens SIMATIC Energy Suite

2.1.2.1. Alapfunkciók

A Siemens SIMATIC Energy Management rendszere integrált tehát nem csak megfigyelésre alkalmas hanem vezérlésre is. A már létező TIA Portal keretrendszerükbe épül és így egy helyen elérhető a többi rendszerükkel. Ez szintén egy moduláris és skálázható rendszer. Megfelel az ISO 50001 szabványnak, és ez is alkalmazható terhelés figyelésre számlázásra és rendszerelemzésre, mint az előzőleg taglalt rendszer.[16]

2.1.2.2. Előnyök

- Terepi szintű integráció saját és más eszközökkel. Figyelve itt az egyedi eszközökre.
- Gyártás szintű felügyelet. Üzem szintű energia fogyasztást lehet vele figyelni.
- Nagyobb rendszerekben vállalati szintű energiaelemzés, ahol több helyszín között is lehet felügyelni.
- Ezentúl alkalmas beavatkozásra is. Amennyiben túl nagy a fogyasztás képes fogyasztókat leválasztani távolról is akár.

[16]

2.2. Saját megoldás

Egy mondatban: a saját eszközkészletem (ESP-8266 + Prometheus + Grafana + Python) sokkal olcsóbb és könnyebben módosítható, de a Schneider EcoStruxure Power Monitoring Expert (PME) és a Siemens SIMATIC Energy Suite olyan pontosságot, energiaminőség-elemzést, ISO-50001-megfelelőséget és 24/7-es gyártói támogatást biztosít, aminek megvalósítása nagy munkát és pénzt igényelne.

Jellemző	Nyílt forráskódú megoldás	Schneider PME	Siemens Energy Suite
Peremi eszközök	ESP8266 + CT	PowerLogic / ION & PowerTag mérők, megszakítók, átjárók	S7-1500 PLC + Sentron PAC, 7KM PAC, megszakítók
Adatátvitel	Wi-Fi és HTTPS REST	Modbus/TCP	PROFINET
Adatbázis	Prometheus	Beépített SQL Express	Integrált WinCC SQL archívum
Vizualizáció	Grafana	Webalapú HTML5 irányítópult	WinCC HMI képernyő
Analitika	Ami lekódolásra kerül	Harmonikus, villódzás, EN 50160 megfelelés	Automatikus terheléskikapcsolás ISO 50001
Licenc költségek	Nincs	Eszközcsomagok: 5-től korlátlanig; 50-es csomag tízezer eurós nagyságrend	Futtatási licenc eszközönként ezer eurós nagyságrend
Tipikus ár 50 mérőpontra	kb. 1 000 € (panelek + szenzorok + szerver)	kb. 10 ezer € (mérők + licenc + szerver)	kb. 10 ezer € (mérők, PLC, licencek, TIA Portal)
Támogatás	Közösségi támogatás; nincs hivatalos tanúsítvány	Gyártói 24/7, ISO 50001	Gyártói 24/7, TÜV EN 13849

2.1. táblázat. Rendszeráttekintés - összehasonlítás

3. fejezet

Keretrendszer

3.1. Rendszerarchitektúra áttekintése

Az áramérzékelők (áramváltó bilincsek) mérik az elektromos áramot és az adatokat egy ESP8266 gyűjti, ezek pedig a központi vezérlőhöz táplálják, amely vezérlőparancsokat küld visszafelé az elektromos járművek töltőinek a megengedett áram beállításához.

Az ESP8266-alapú érzékelőcsomópontok mindegyik elektromos töltőnél el vannak helyezve, hogy valós időben mérjék a töltőáramot. Ezek pedig Wi-Fi-n keresztül küldik el az adatokat egy Python Flask alkalmazást futtató vezérlőhöz, amely össze-síti a méréseket és kiadja a vezérlőparancsokat.

Maguk az töltők Modbus kommunikációval rendelkeznek, ezért a Modbus protokollon keresztül fogadják a távolról érkező utasításokat (esetünkben a megengedett áram beállítását). Mindegyik töltő saját címmel rendelkezik a soros hálózaton.

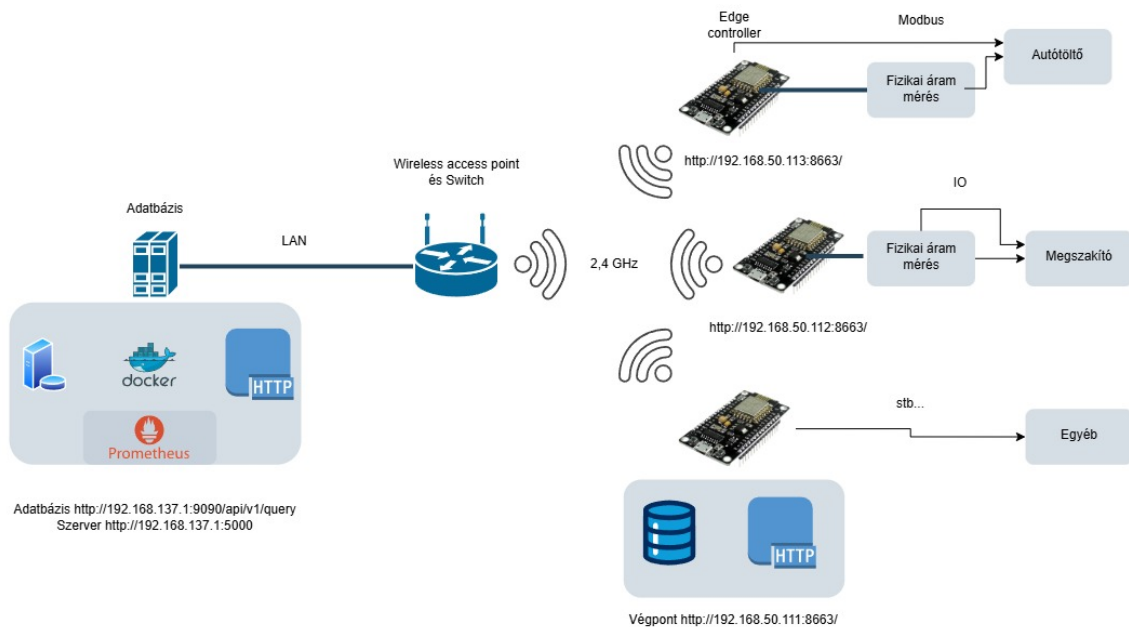
Az ESP8266 csomópontok csak az adatok két oldalú továbbadásáért felelősek, aktuális adatokat küldenek a szervernek, míg a Flask szerver döntéshozatalt hajt végre és parancsokat ad ki a töltőknek. Az érzékelés és a vezérlés szétválasztása leegyszerűsíti a végpont tervezését és a feldolgozást a szerver oldalon központosítja, ami növeli a robosztusságot.

A Flask szerver egy Prometheus idősoros adatbázissal dolgozik (ami külön konténer alapú szolgáltatásként fut), ez naplózza az összes mérést a megfigyeléshez és elemzéshez. Az összes kiszolgálóoldali összetevő (a Flask alkalmazás, a Modbus interfész és a Prometheus) a Docker használatával van konténerben tárolva a felhőalapú környezetben történő egyszerű telepítés érdekében. Az architektúra a következőket tartalmazza:

- ESP8266 érzékelő csomópontok: Wi-Fi csatlakozású mikrokontrollerek minden végponon (legyen az töltő, megszakító, stb...), amelyek a csatlakoztatott érzékelőkön keresztül mérik a váltakozó áramot.
- Wi-Fi hálózat: Ami biztosítja, hogy a végpontok tudjanak kommunikálni a központi szerverrel. Mindegyik csomópont csatlakozik a helyi Wi-Fi-hez és HTTPS-kéréseken keresztül adatokat küld a szerver REST API-jának.
- Flask alapú központi szerver: Helyi szerveren vagy cloud környezetben is fut-hat. Mérési adatokat fogad az ESP8266 csomópontoktól, feldolgozza és tárolja

azokat és ahogy már említettem Modbus segítségével vezérlőjeleket küld az EV-töltőknek.

- Modbus kommunikációs kapcsolat: Összekapcsolja a végpontokat a töltőkkel. Ez esetünkben Modbus/TCP over Ethernet. A végpontok Modbus masterként működnek, és minden elektromos töltő egy Modbus slave eszköz.
- Prometheus adatbázis: Idősoros adatbázis, amely összegyűjti és tárolja a mért értékeket (pl. áramok, töltőállapotok, megszakító állapotok) a Flask szerverről való idejű megfigyeléshez és későbbi elemzéshez.
- Docker containerek: A Flask server és a Prometheus Docker-tárolókban fut, így megvalósul a mikroszolgáltatás alapú összeállítás, ami akár helyi szerveren, akár modern felhő natív rendszeren jól fut. A Docker biztosítja, hogy az összes szükséges függőséget (Python-könyvtárak stb.) így megkönnyítve az üzemeltetés dolgát, és lehetővé teszi a rendszer megbízható méretezését vagy replikálását.



3.1. ábra. Rendszerarchitektúra

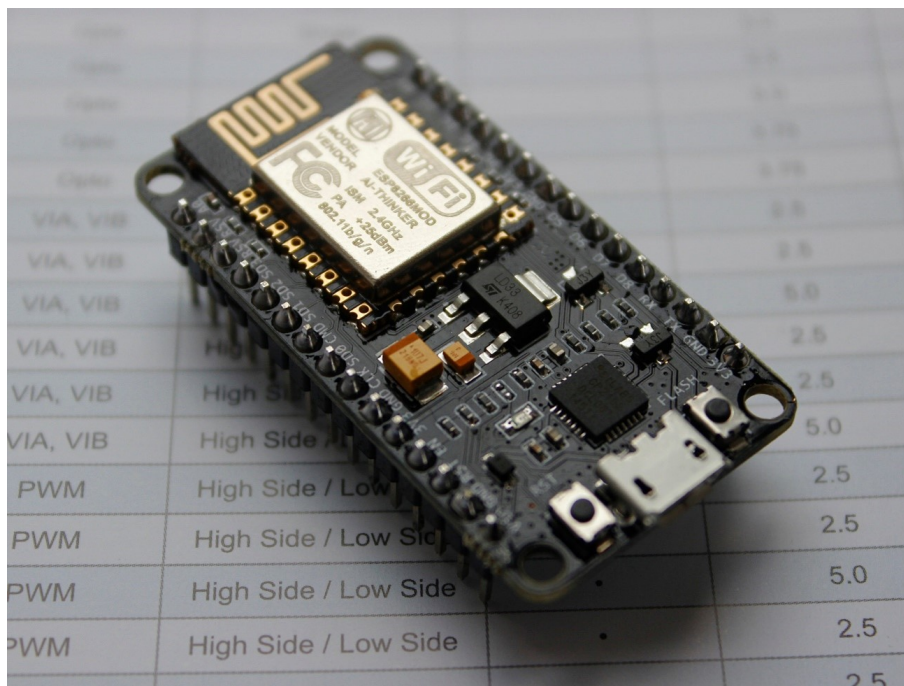
3.2. Eszközök

3.2.1. Végpontok

3.2.1.1. ESP8266 és AC árammérő szenzorok

A pontos árammérés minden elektromos töltőnél kritikus a rendszer számára. Az ESP8266-ot (NodeMCU) nem invazív váltakozóáram-érzékelőkkel párosítva használjuk a megfelelő áramkörök által felvett áramerősség mérésére. Egy megfelelő érzékelő az YHDC SCT-013 sorozatú bilincses áramtranszformátor, például az SCT-013-030

modell, ami 30 A AC feszültségre van méretezve. Az SCT-013 egy osztott magú áramváltó így könnyű a csatlakozása, ez a tápkábelnek feszültség alatt álló vezetőke köré kerül, és nincs szükség közvetlen elektromos érintkezésre a vezetővel. Ez az érzékelő a kábelben átfolyó árammal arányos kis váltakozó feszültséget ad ki. Különösen az SCT-013-030 körülbelül 0-1 V AC (effektív) kimenetet produkál 0-30 A mérésekor. [9]



3.2. ábra. NodeMCU (ESP8266) [14]

Ez a feszültségtartomány kompatibilis az ESP8266 analóg-digitális átalakítójával az analóg bemeneten, amely a legtöbb ESP8266 kártyán 0-1 V-ot tud olvasni (a NodeMCU kártyák tartalmazznak beépített feszültségosztót, amely lehetővé teszi a 3,3 V-os bemenetet). Így az SCT-013-030 0-1 V-os kimenete közvetlenül az analóg bemenetre rakható. Az SCT-013 érzékelők, amelyek feszültségkimenettel rendelkeznek, már rendelkeznek belső ellenállással, így nincs szükség további terhelésre. [13]

Mindkét esetben szükséges egy csatoló áramkör az érzékelőhöz: A CT AC kimenete 0 V ha nincsen semmi behatás, de az ESP8266 ADC nem tudja leolvasni a negatív feszültséget. Ezért el kell tolnunk az értékeket ehhez kell két ellenállás, amelyek feszültségosztót alkotnak a 3,3 V-os tápegységgel, hogy az érzékelő kimenetét a skála közepére rakjuk. Lényegében az érzékelő két vezetőke csatlakozik: az egyik az ADC bemenethez, a másik pedig a középponthoz körülbelül 1,65 V a 3,3 V-os táp miatt. [13]

Mindegyik ESP8266 tápellátást kap lehetőleg 5 V-os USB-adapterrel az EV-töltő kiegészítő tápellátásával és az analóg bemeneten keresztül olvassa le a CT-érzékelőjét. A mikrokontroller a megírt kódot futtatja, csatlakozik a Wi-Fi-hez, és folyamatosan méri az áramerősséget. Ezt úgy küldi a szervernek, hogy már könnyű legyen prometheusnak tovább küldeni.



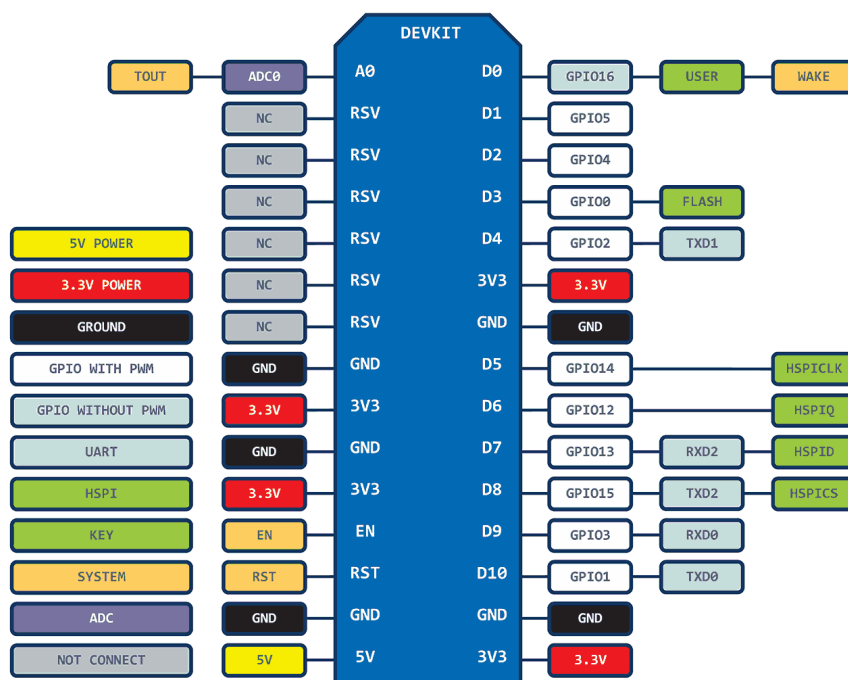
3.3. ábra. SCT-013 áramváltó [11]

3.2.1.2. Mért eszközök

Különböző eszközök mérését hajtók végre egy hálózatban, amiknél, más paraméterek mérésére van szükségünk.

Ilyen eszközök a megszakítók, itt érzékelnünk kell:

- **Megszakítók:**
 - Pillanatnyi áramerősség
 - Állapotjelzés
 - Hibajel
 - Túlterhelés figyelmeztetések
- **Autótöltők:**
 - Pillanatnyi áram
 - Állapot (csatlakoztatva, tölt, hiba, stb...)
- **Szekrények:**
 - Hőmérés
 - Gázelemzés (füst érzékelés)



3.4. ábra. Pinout [8]

A mérések egy mikrokontrollerbe vannak beprogramozva, sok esetben, hogy a megfelelő és helyileg feldolgozható jelet kapjunk valamilyen hardverre van szükség, ez átalakítja az eredeti jelet. Ilyen például az áram méréséhez használt áramváltó és sönt ellenállás, jellemzően a nagyobb áramokat 5 A-re transzformáljuk egy áramváltóval.

Esetünkben maga az ESP8266 chip az analóg bemenetén 0 és 1 volt közötti jelszintet vár, viszont a nodeMCU környezet már végez az áramkörön feszültség áttalakitást így a bemeneti skála változik 0 és 3,3 voltra.

Ha áramméréseket áramváltóval akarjuk megvalósítani akkor az áramváltó 5 A-es maximum kimenetét kell a kontroller 3,3 v-os maximum bemenetére alakítani. Ezt egy sönt ellenállással tudjuk megvalósítani.

$$R = \frac{U}{I} = \frac{3.3 \text{ V}}{5 \text{ A}} = 660 \text{ m}\Omega \quad (3.1)$$

1. egyenlet: Áramméréshez használt sönt ellenállás értéke

$$P = U \times I = 3.3 \text{ V} \times 5 \text{ A} = 16.5 \text{ W} \quad (3.2)$$

2. egyenlet: A sönt ellenállás

A számítások után látszik, hogy olyan ellenállásra van szükség, ami $R = 660 \text{ m}\Omega$ ellenállással rendelkezik és legalább 16,5 W teljesítményt el tud dissipálni folyamatos terhelés mellett is.

3.3. Kommunikáció

3.3.1. ESP8266 és Szerver között (Wi-Fi és REST API)

A kommunikációhoz az ESP8266 végpontok Wi-Fi-t használnak a mérések továbbítására a vezérlő Flask szerverre. Indításkor minden ESP8266 csatlakozik a konfigurált Wi-Fi hozzáférési ponthoz.

```
(pl. WiFi.begin(ssid, jelszó))
```

Itt az ESP8266 beépített WiFi könyvtárat használtam. [19] A csatlakozást követően a csomópont képes HTTP vagy esetünkben HTTPS kéréseket küldeni a szerver IP-címére. Egy egyszerű RESTful API-t implementáltam a Flask szerveren az adatok fogadásához. Minden fizikai végpont Prometheus adatbázis jellegű kommunikációhoz is használt végponton hirdeti a mért adatait.

```
app.run(host="0.0.0.0", port=6000, ssl_context=('cert.pem', 'key.pem'))
```

```
http://<szerver_ip>:6000/metrics
```

A JSON adatstruktúra a következő:

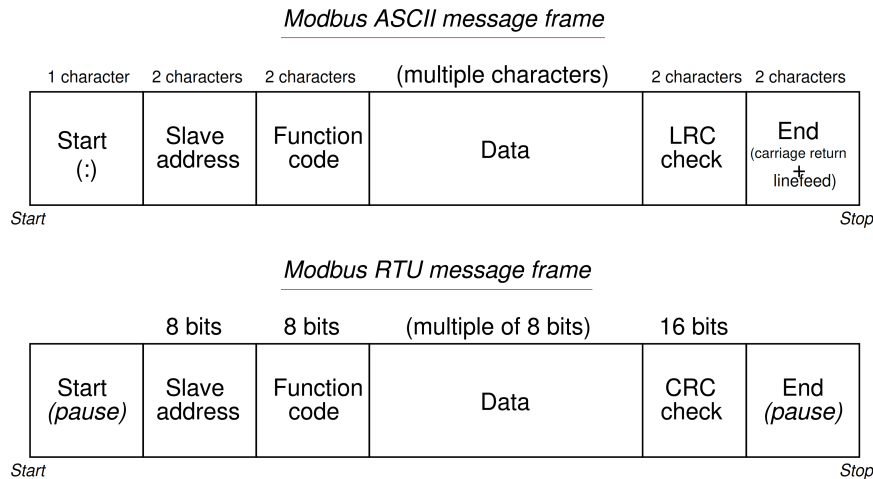
```
def metrics():  
    return jsonify({  
        "simulator_id": simulator_id,  
        "current": current_value,  
        "state": "plugged in" if charger_on else "plugged out",  
        "max_current": max_current  
    })
```

A Wi-Fi kommunikáció itt nem követeli meg, hogy az ESP8266 ismerje a szerver címét, mert csak GET parancsokat használtam. Itt a kiszolgáló fix IP-címmel rendelkezhet a LAN-ban. Elég viszont, ha a szerver ismeri a végpontok IP címét, amit viszont könnyű megadni és frissíteni. Kezdetben titkosítatlan HTTP-t használtam, viszont ezt később frissítettem a valódi telepítési környezethez hasonló HTTPS-el. Szerencsére az ESP8266 képes kezelni a TLS-t.

3.3.2. Modbus

A vezérlő oldalon a szerver a Modbus protokollt használja az EV-töltőkkel való kommunikációhoz. A Modbus egy széles körben elterjedt protokoll az ipari rendszerekben elektronikus eszközök csatlakoztatására. Eredtileg PLC-k közötti Kommunikáció kialakítására használták. A mi beállításunkban a szerver Modbus masterként van konfigurálva, és minden EV töltő Modbus slave eszköz (Modbus/TCP). A Modbuson keresztül a szerver képes regisztereket olvasni a töltőkről, és regisztereket írni. Ezzel áttudtam írni a töltőben a maximális áramértéket amit engedélyezett. [18]

A képen Modbus RTU soros kommunikáció összeállítása látszik. Ebben a rendszerben Modbus TCP rendszert használunk. Ez igazából csak annyit csinál, hogy TCP keretekbe foglalja a már előbb felsorolt kommunikációt.



3.5. ábra. Modbus adatstruktúra [10]

3.4. Standardizált rendszer

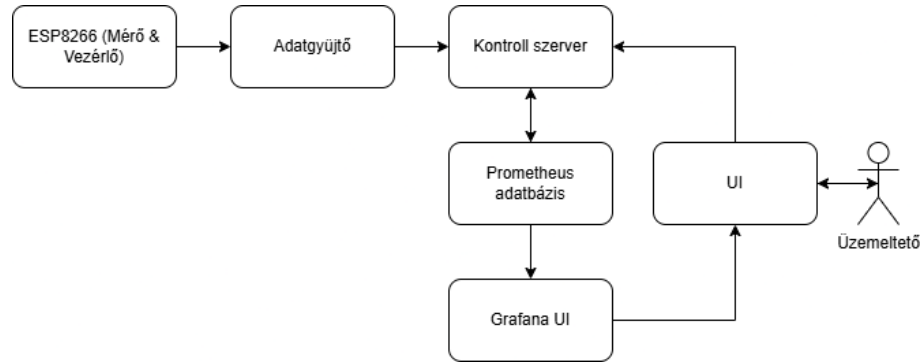
3.4.1. Áttekintés

Direkt úgy állítottam össze a rendszert, hogy az moduláris, konténeres keretrendszert tudjon képezni. Ez így lehetővé teszi az épületek energiagazdálkodásához szükséges komponensek gyors integrációját, leginkább az EV-töltőkre és a megszakítópanelekre fókuszálva. Az adat tárolást (Prometheus), vezérlő API-kat és vizualizációt (Grafana) szabványosítja ebben az esetben, hogy egyszerűsítse a demo környezeteket és a termelési környezetben bevezetéseket is.

3.4.2. Tervezési célok és követelmények

- Plug-and-Play alkatrészek: A felhasználók új érzékelőket vagy vezérlőket önálló szolgáltatásként telepíthet, amíg az kompatibilis a keretrendszer eszközeivel.
- Szabványosított mérési API: Itt egyszerűen minden komponens Prometheus-formátumú metrikákat exportál HTTPS-n keresztül.
- Vezérlő: A Python-alapú ControlServer REST protokollon keresztül irányítja az eszközöket.
- Konténerizált környezet: Minden mikroszolgáltatás konténerekben fut; az orkestrálást, pedig Kubernetes segítségével oldottam meg.
- Skálázhatóság és bővíthetőség: Könnyedén skálázható ez a környezet , hozzá lehet adni új erőforrástípusokat, és integrálni új eszközöket, mint ütemezés vagy akár valamilyen ML elemzés.

Mivel kubernetesben telepíthető a keretrendszer minden komponense konténerként fut és a cluster szolgáltatásai gondoskodnak arról, hogy a Python ControlServer, az ESP8266-hoz kapcsolódó adapterek, valamint a Prometheus és Grafana mindig elérhetők és skálázhatók legyenek.



3.6. ábra. Keretrendszer architektúra

A Python ControlServer egy Deployment formájában jön létre, ezt egy Service köti össze a belső hálózaton belül. A Deployment manifest-jében TLS tanúsítványokat tartalmazó Secret hivatkozik a HTTPS tanúsítványokra, így minden REST hívás titkosított csatornán zajlik. A control serveren belül a Flask alapú REST API két fő végpontot kínál: az egyik a `/metrics`, ami Prometheus kompatibilis formátumban szolgáltatja az aktuális fogyasztási metrikákat, a másik pedig a vezérlőhívások fogadására van fenntartva ahol lehet új áramkorlátokat beállítani az EV töltők számára.

Az ESP8266 szenzorok microservice-ként jelennek meg a rendszerben: mind-egyik egy Deployment, ami tartalmazza a hardverrel kommunikáló sorospor adaptert. Ezek a podok HTTPS-en jelentkeznek be a ControlServernél, és folyamatosan kiszolgálják a `/metrics` végpontjukat. A Prometheus-ban lekonfiguráljuk, hogy a Prometheus scrapper felvegye őket a targetek közé. A felhasználó, ha új eszközt telepít és megadja a `prometheus.io/scrape: "true"` és `prometheus.io/path: "/metrics"` értékeket. Így plug and play módon csatlakozható tetszőleges új érzékelők vagy vezérlők.

A Prometheus egy StatefulSet formájában fut és PersistentVolumeClaim segítségével tárolja el az adatbázist, így újraindítás esetén se vesznek el az adatok. A scrape konfiguráció paraméterezését ConfigMapben lehet megtenni. A Grafana Deployment mellé szintén egy PVC került a dashboard-ok mentéséhez és ConfigMap-eken keresztül lehet dashboard-okat definiálni. Az útválasztó SSL-terminációja után a felhasználó hozzá fér az irányítópulthoz.

A skálázhatóságot HorizontalPodAutoscaler biztosítja: ha egy pod CPU- vagy memóriahasználata átlépi a beállított küszöböt, Kubernetes automatikusan podokat indít. Ez a felépítés lehetővé teszi, hogy a cluster pillanatnyi terhelésének megfelelően bővítsük a kapacitást, akár kibővtve külső linux VM-re.

4. fejezet

Max–min fair (water-filling) elosztás

4.1. Elméleti háttér és cél

4.1.1. Motiváció és cél

A szimulált fogyasztók áramigénye (d_i) időben változik. Adott egy globális, maximum áramérték $B = \text{ALLOC_MAX_TOTAL}$ amperben, ennél a tényleges összárám nem lehet nagyobb. A cél egy olyan kiosztás a_i meghatározása, amely (i) nem lépi túl az egyes igényeket ($0 \leq a_i \leq d_i$), (ii) a teljes kereten belül marad ($\sum_i a_i \leq B$), (iii) és *fair* a kis igényűekkel szemben, azaz a kis igények teljesülnek először, a fennmaradó kapacitás pedig egyenlő alapról oszlik meg.

4.1.2. Definíció (max–min fair)

Egy $a = (a_1, \dots, a_n)$ kiosztás *max–min fair*, ha bármely más megengedett y esetén, ha létezik i úgy, hogy $y_i > a_i$, akkor létezik j olyan, hogy $a_j \leq a_i$ és $y_j < a_j$. Intuíció: csak a *már kisebb* részesedések rovására lehet növelni bárki juttatását. [2]

4.1.3. Feltöltés (water-filling)

A max–min fair kiosztás felírható egyetlen paraméterrel:

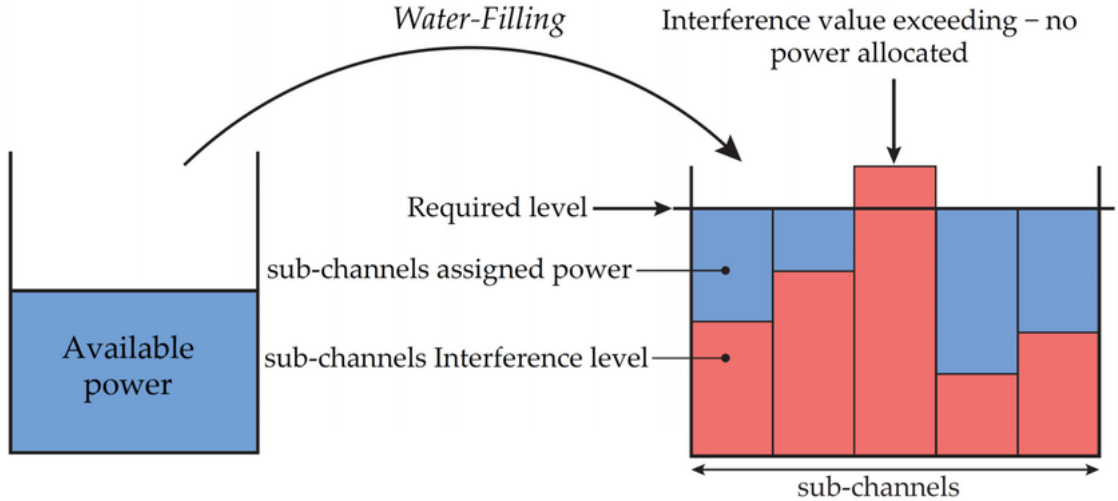
$$a_i = \min\{d_i, \lambda\}, \quad \text{ahol} \quad \sum_{i=1}^n \min\{d_i, \lambda\} = B. \quad (4.1)$$

A λ *vízszint* úgy választandó, hogy a keret pont kiteljen (vagy ha $\sum_i d_i < B$, akkor $\lambda \geq \max_i d_i$, vagyis nincs korlát).

4.1.4. Algoritmus és bonyolultság

Gyakorlati, determinisztikus eljárás (progresszív töltés):

1. Rendezzük az igényeket növekvő sorrendbe: $d_{(1)} \leq \dots \leq d_{(n)}$.



4.1. ábra. Water-filling elve telekommunikációban. [17]

2. Iteráljuk $k = 1..n$: feltételezzük, hogy az első k igény teljesül ($a_{(i)} = d_{(i)}$, $i \leq k$), és a maradék $B_k = B - \sum_{i=1}^k d_{(i)}$ egyenlő szinten oszlik meg a még nyitott $n - k$ elemre. A jelölt vízszint: $\lambda_k = B_k / (n - k)$.
3. Ha $\lambda_k \leq d_{(k+1)}$, megtaláltuk a vízszintet: az összes hátralévő $a_{(i)} = \lambda_k$ (és a korábbiak $d_{(i)}$).
4. Ha minden $d_{(i)}$ teljesül és még marad keret, akkor nincs korlátozás: $a_i = d_i$.

A rendezés miatt az időbonyolultság $O(n \log n)$. A megvalósított vezérlőben egy ekvivalens, iteratív *progresszív* algoritmus fut, amely kis elemszámon szintén gyors és stabil.

4.1.5. Tulajdonságok

- **Egyenlő szint elve:** a λ alatti igények teljes, a λ felettiek λ -ig kapnak. Így a kis igényűek sosem szenvednek hátrányt.
- **Monotonitás:** ha a keret B nő, akkor λ nem csökken, és senki kiosztása nem csökken.
- **Határhelyzetek:** ha $\sum_i d_i \leq B \rightarrow$ nincs cap (végtelen korlát). Ha $B = 0 \rightarrow$ minden $a_i = 0$.

4.2. A vezérlőben alkalmazott megvalósítás

4.2.1. Kapcsolat a rendszer komponenseivel

A vezérlő igényekből (raw_current) számolja a limiteket a fenti elv szerint a ALLOC_MAX_TOTAL kereten. A megszakító (breaker) logika ettől független, a mért, tényleges áramhoz viszonyít (BREAKER_MAX_TOTAL, BREAKER_MIN_TOTAL) biztonsági réteggént.

4.2.2. Példák

Klasszikus példa. $d = [10, 10, 100]$, $B = 90 \Rightarrow a = [10, 10, 70]$ (a két kicsi teljesül, a maradék egy szinten oszlik meg).

Vegyes igények. $d = [3, 8, 8, 20]$, $B = 25 \Rightarrow$ rendezve az első igény (3) teljesül, a maradék 22 három felé oszlik: $a = [3, 7.33, 7.33, 7.33]$ A.

4.2.3. Implementációs részletek

A limitek csak $\pm 10^{-3}$ A változás felett frissülnek a fogyasztók felé (zajcsillapítás), a „nincs korlát” állapotot nagy INF_CAP érték reprezentálja. Ha a nyers igény összeg a keret alá esik, a limitek feloldódnak.

4.2.4. Alternatív allokációs stratégiák

A globális keret elosztására több lehetőség is fennáll. A megfelelő algoritmus választása sokat tud javítani a rendszer hatékonyságán, ezért nagyon fontos. A max-min fair elv mellett kettő alternatívát találtam.

Proporcionális elosztás. Ennél a megközelítésnél minden fogyasztó a teljes igény ($\sum_j d_j$) arányában részesül a rendelkezésre álló keretből, amennyiben $\sum_j d_j > B$ | $B = \text{Globálkeret}$. A kiosztás képlete: $a_i = d_i \times (B / \sum_j d_j)$.

- *Példa:* Ha a keret $B = 90$ A, és az igények $d = [50, 50, 100]$, a teljes igény itt ekkor, $\sum d_j = 200$ A. Az arányos kiosztás $a \approx [22.5, 22.5, 45]$ A lenne.
- *Előnye:* Az egyik legegyszerűbb algoritmus.
- *Hátrány:* Ez a stratégia a "nagy" fogyasztóknak kedvez, és a kis igényűeket "éhezteti" (starvation).

Prioritásos (súlyozott) elosztás. Ebben az esetben minden fogyasztó kap w_i prioritási szintet (súlyt). Ha túlterhelés lépne fel a rendszer először a magasabb prioritású fogyasztókat elégíti ki, és a maradék keretből kapnak az alacsonyabb prioritású fogyasztók.

- *Előny:* Lehetővé teszi a "prémium" ügyfél fogalmát pl.: adott emberek autótöltője mindig kap áramot.
- *Hátrány:* Szintén bevezeti az "éheztetés" (starvation) problémáját, ahol egy alacsony prioritású végpont akár soha nem kap erőforrást. A rendszer komplexitása nő, és a konfiguráció nehézkessé válik.

A választás indoklása. Az alternatívákkal szemben azért esett a választás a max-min fair elosztásra mert ez biztosítja a legjobb egyensúlyt az egyszerűség és az igazságosság között. Motivációk között megfogalmazott pontokat teljesíti:

1. *Védi a kis fogyasztókat:* Garantálja, hogy aki keveset kér, az megkapja, amíg a keret ezt egyáltalán lehetővé teszi. Ezzel elkerüli az arányos elosztás fő problémáját az "éheztetést".
2. *Igazságos a nagy fogyasztók között:* A fennmaradó kapacitást egyenlően osztja szét a nagy igényű fogyasztók között, anélkül, hogy bonyolult prioritási problémákat kéne megoldani.
3. *Determinisztikus és stabil:* Az algoritmus viselkedése kiszámítható, és könnyen implementálható.

Ezek a tulajdonságok miatt esett a választás a Max–Min fair elvre.

5. fejezet

Komponensek megvalósítása

5.1. Végpontok

5.1.1. Autótöltő

5.1.1.1. Bevezetés

A rendszer egy ESP8266 mikrokontroller köré épül, amely két elsődleges funkciót lát el:

- Árammérés: Folyamatosan méri az autótöltők által felvett elektromos áramot. Összegyűjti és a Prometheus, egy népszerű nyílt forráskódú felügyeleti rendszerrel kompatibilis formátumban jelenti ezeket a mérési adatokat, hogy a rendszerben egységes adatstruktúrákat használjunk.
- Vezérlő interfész: Emellett olyan mechanizmust biztosít, ami Modbus parancsokon keresztül vezérli az autótöltőket.



5.1. ábra. Autótöltő [5]

5.1.1.2. Megvalósítás

Itt az ESP8266 firmware főbb részeit elemzem.

WiFi és HTTP-kiszolgáló beállítása Kezdsnek az ESP8266 csatlakozik WiFi-re és ezzel a helyi hálózatra a megadott SSID és jelszóval. A csatlakozást követően az eszköz az ESP8266WebServer könyvtár segítségével inicializál egy HTTPS-kiszolgálót. Ez a szerver egy kijelölt porton (pl. 8663) figyel, és a /metrics végpontot teszi közzé, ahol közli az adatokat a központ vezérlővel.

5.1.1.3. Mérési adatok elküldése

A `sendMetricsToEndpoint()` függvény formázza a méréseket Prometheus-szerű szöveges formába. A metrikák a következőket tartalmazzák:

- **esp8266_current0:** A mért áramértéket mutatja.
- **esp8266_connection:** Az ESP8266 kapcsolati állapotát jelzi, pl.: csatlakozva vagy nem.

Ez a funkció a Prometheus-kompatibilis mért érték és címkézési formátummal küldi el a mérést. Amikor például a vezérlő szerver lekéri a /metrics végpontot, a HTTPS-kiszolgáló 200 OK státusszal küldi vissza ezeket a formázott metrikákat, amennyiben minden rendben ment.

5.1.1.4. Main loop

A `loop()` funkcióban az ESP8266 folyamatosan kezeli a bejövő HTTPS kéréseket és 30 másodpercenként az eszköz meghívja a `queryPrometheus()` függvényt, hogy frissítse az összesített metrikát. Ez az időszakos lekérdezési mechanizmus biztosítja, hogy a helyi mérések folyamatosan frissek legyenek és döntéshozatal alapjául lehessen venni őket.

5.1.1.5. Kommunikáció

A rendszer itt is a biztonságos adatátvitel érdekében minden hálózati kommunikációhoz HTTPS protokollt használ. A legfontosabb adatáramlások a következők:

- **Mérések közzététele:** Az ESP8266 összegyűjti az aktuális méréseket, és azokat a /metrics végponton olyan formátumban teszi elérhetővé, ami már alkalmas Prometheus alapú adattárolásra.
- **Visszacsatolási hurok:** Az ESP8266 vezérlési értékeket kap a szervertől, amiket aztán modbuson ad tovább az eszközöknek.

5.1.1.6. Modbus kommunikáció vezérléshez

Ez a funkció az autó töltő áramhatárának beállítására szolgál. Az itt használt Modbus RTU használatával az ESP8266 lesz a master, ami „Write Single Register” parancsot ad az autó töltőnek (Modbus slave). Az autós töltő áramkorlátja egy előre meghatározott regiszterben található.

Hardver

- **RS485:** Az ESP8266 natívan nem támogatja az RS485 kommunikációt, viszont tudunk használni egy RS485 adó-vevőt (pl. MAX485). Ez az ESP8266 UART jeleit RS485-re alakítja, ami az ipari kommunikációban elterjedt szabvány, ezért jellemzően a töltőkben és egyéb épületinformatikai eszközökben is megtalálható.
- **ModbusMaster könyvtár:** Itt az open source ModbusMaster könyvtárat [21] használtam a továbbítás egyszerűsítésére.
- **Átviteli vezérlés:** Az előbb említett adó-vevőnek szüksége van egy úgynevezett DE/RE (Driver Enable/Receiver Enable) vezérlőpinre. Amit viszont egyszerű megvalósítani az ESP8266-on egy digitális pin segítségével amire itt a D2 lett használva. Ezzel tudunk később adó és vevő módok között kapcsolni. Küldéshez a pin HIGH (adási mód), ezután a vételhez, pedig (vételi mód) állapotba kerül, ekkor LOW.

5.1.2. Megszakító

5.1.2.1. Hardver

A felügyelet- és vezérlésben minden megszakító egy ESP8266 modulhoz van csatlakoztatva, ami megkapja az aktuális állapotot, és ki-/bekapcsolást tud végezni. Legfontosabb komponensek és munkafolyamatok:

- **Állapotérzékelés:** Az ESP8266 digitális bemenete a megszakító egy segédérintkezőjéhez van kötve. Ha a megszakító zárva van, az érintkező bezár és az ESP bemenetét magasra húzza, ha nyitva van, a bemenet alacsony. Egy sima RC-szűrő és szoftveres pergesmentesítéssel (pl. 50 ms) lehet biztosítani a tiszta és zaj mentes átmeneteket.
- **Parancskimenet:** Egy GPIO pin egy relét húz meg, ami a megszakító kioldó/-becsukó tekercsét aktiválja.

5.1.2.2. Szoftver

Az ESP8266 arduino alapokon fut, és HTTPS segítségével csatlakozik a LAN-hoz Wi-Fi-n keresztül. Minden megszakító interakció RESTful API hívásokon keresztül történik a Python vezérlő szerverhez:

```
https://<control-server>/api/breakers/<id>/state
```

```
{ "breaker_state": 1 }
```

A metrika mezők használatával a Python szerver fordítás nélkül le tudja képezni a bejövő JSON-t a Prometheus-nak megfelelő formátumra (breaker_state és breaker_command).



5.2. ábra. Megszakító [6]

5.2. Kontroll szerver

5.3. Adatbázis

A rendszer által generált adatok tárolásához egy Prometheus adatbázist használok. A Prometheus egy nyílt forráskódú idősoros adatbázis, ami inkább felhő környezetben ismert, de ugyanolyan hasznos az IoT-telemetry számára. Minden adatot időbélyegzett értéksorozatként kezel. Ezeket lehet tárolni és lekérdezni. [7] [15]

Esetemben minden metrika tárhelyeként szolgál. Ez lehetővé teszi, hogy megőrizsem a töltési áramok történetét és ez alapján irányítsam a rendszert.



5.3. ábra. Prometheus [12]

A Flask szerver-ből könnyű továbbítani az adatokat. A megközelítés amit én használtam hogy egy HTTPS /metrics végpont elérhetővé tettem. Amin prometheus által olvasható formában hirdetem az adatokat. Például a Flask alkalmazás tudja továbbítani a mért számokat:

```
current_gauge = prometheus_client.Gauge('ev_charger_current', 'Current draw of EV charger', ['charger'])
```

Ha olvasás érkezik, a szerver frissíti a számokat (egyébként ezt periodikusan is megteszi)

```
current_gauge.labels(charger=id).set(value).
```

A Prometheus-nak előre meg kell adni az IP-címeket a konfigurációs fájljában (a scrape konfigurációján keresztül), hogy időszakonként megnézze a Flask szerver /metrics URL-jét. Ez azért előnyösebb mert utólag ezeket már nem lehet állítani a Prometheusban indítás után. A szerver, pedig egy stabil IP címen van. A sok fizikai végpontról, pedig a szerver gyűjt ahol elértem, hogy üzem közben is lehessen új végpontokat hozzáadni vagy módosítani.

Amikor a Prometheus olvas, a Flask az összes aktuális értéket szöveges Prometheus metrika formátumban adja ki. A Prometheus ezután ezeket az értékeket a metrika névvel és címkékkel indexelve tárolja. Ez a hívás alapú felügyelet jól illeszkedik a Prometheus működéséhez. A Prometheus adatai megjeleníthetők a Grafana által is és összetett lekérdezések írhatók például a teljes áram kiszámítására, amihez szükségem is volt nekem rendszer irányításához.

5.3.1. Prometheus adatgyűjtés kezelése

A mikrokontroller több metrikát is mér, amit belső változókba elment. Jelenleg teszt célokból ezek, csak kézzel megadott számok.

```
{
  "# HELP": "esp8266_current Current sensor reading.",
  "# TYPE": "esp8266_current gauge",
  "esp8266_current0": 1.20,
  "esp8266_current1": 2.50
}
```

Ez a formátum megengedi, hogy ezt a /metrics endpointon a Prometheus folyamatosan lekérdezze a mikrokontrollerektől.

A formátumot a következő függvény hozza létre és küldi:

```
sendMetricsToEndpoint()
...
server.send(200, "text/plain", metrics);
```

5.3.2. Prometheus lekérdezések kezelése

```
queryPrometheus()
```

Ez a függvény egy HTTP GET kérést küld a Prometheus szervernek, amely a esp8266_total_current metrikát kérdezi le és a prometheusValue változóba írja be.

```
/api/v1/query?query=esp8266_total_current
```

A fentebbi endpointon.

A lekérdezés sikerességét a httpCode ellenőrzésével teszem amennyiben ez 200-at ad vissza az értéket eltárolom és kiírom a soros kommunikáción ellenőrzés céljából.

```
if (httpCode == HTTP_CODE_OK) {
  String payload = http.getString();
  Serial.println("Response from Prometheus:");
  Serial.println(payload); \texttt{Adat JSON-be nyomtatása}

  DynamicJsonDocument doc(1024);
```

```

DeserializationError error = deserializeJson(doc, payload);

if (error) {
  Serial.print(F("JSON deserialization failed: "));
  Serial.println(error.c_str());
  return;
}
}

```

Mivel a lekérdezés egy JSON formátumú változót ad vissza és ennek feldolgozása nehézkes ezért ezt rögtön szám formátumba alakítom későbbi feldolgozás céljából.

```

const char* status = doc["status"];
if (String(status) == "success") {

  const char* valueStr = doc["data"]["result"][0]["value"][1];

  prometheusValue = String(valueStr).toFloat();

  Serial.print("Extracted Prometheus Value: ");
  Serial.println(prometheusValue);
}

```

A fenti rész kinyeri az adatot JSON formátumból és szám formátumba írja.

Természetesen az egész queryPrometheus loop-ban ismétlődve fut, hogy a kontroller folyamatosan frissítse az értékeket. Jelenleg a gyakoriságot 30 másodperc-re állítottam, hogy ne terhelje a próbák során feleslegesen a hálózatot, de gyorsabb válaszidő érdekében ez növelhető.

5.4. Grafana alapú megjelenítés

A szerver automatikusan beavatkozik szükséges esetben, viszont emellett továbbra is szükséges a működtető személyzetnek látnia, a rendszer működését. Ezt folyamatosan ellenőrizni és amennyiben nem megfelelő működés lép fel. Akár nem működik az automatizmus akár rosszul működik, szükséges beavatkozni manuálisan.

5.4.1. Az áramok vizualizálása és riasztások a Grafanában

Ebben a fejezetben bemutatom, hogy a nyers árammérések az egyes EV-töltők és egyéb terhelések hogyan oszlanak meg három fázison, valamint a napelemek bemeneti áramai hogyan jelennek meg Grafanában, és hogyan történik a túláram vagy más veszélyes állapotok automatikus vagy manuális kezelése. Minden eszköz a Prometheus metrikákat exportálja a következőképpen:

```

ev_charger_current_phase_a_amplitude{charger="ev1"} 12.3
ev_charger_current_phase_b_amplitude{charger="ev1"} 11.8
ev_charger_current_phase_c_amplitude{charger="ev1"} 12.1

equipment_current_phase_a_amplitude{device="pump1"} 5.4
...

solar_input_current_amplitude 8.7

```

5.4.1.1. A Dashboard

1. sor EV töltők áramai amik a \$charger változóval vannak jelölve, ez felsorolja az összes ide tartozó címke értékét (pl. „ev1”, „ev2”, ...). Ezután az idősoros panel: ábrázolja az összegzett értéket három fázison.

```
ev_charger_current{charger="$charger"}
```

Itt ugyanazon a tengelyen láthatóak a három fázis összegzett értékei, különböző színnel és elnevezéssel. Az úgynevezett "mérőpanelen" a pillanatnyi fázisáramokat három kis mérő formájában lehet látni igazából továbbra is a a fenti lekérdezéseket használva, pillanatnyi csak üzemmódban. A küszöb értékeket állítottam be a könnyeb vizualizáció érdekében a töltő névleges áramának, 80 %-ánál (sárga) és 100 %-ánál (piros) vannak beállítva.

2. sor Segédberendezések áramai A \$device változóban keressük ezeket a metrikákat.

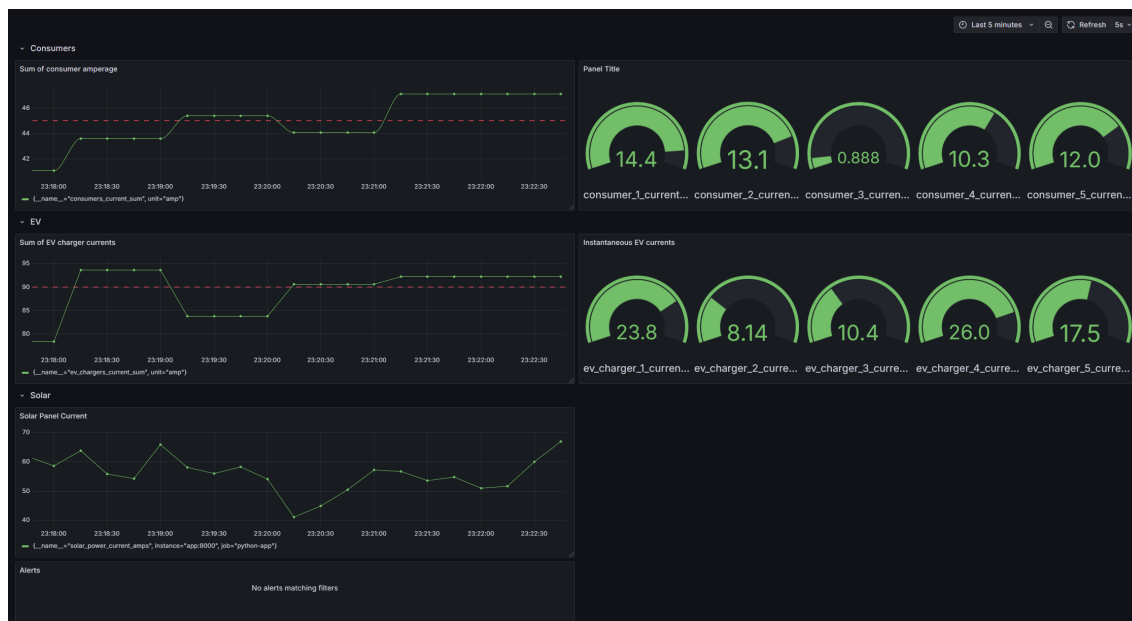
A panel hasonlóan az előző ponthoz jeleníti meg az adatokat, amely a pillanatnyi és max értéket mutatja.

```
max_over_time(equipment_current_phase_a_amplitude{device="\$device"}[1m])
```

A maximumot minden fázisra az elmúlt percben mutatja, az idetartozó megfelelő színküszöbökkel. Mellette raktam egymás mellé csoportosító oszlopdiagramot a gyors összehasonlításokra.

3. Sor Napelem bemeneti áram Itt szintén egy idősoros panelt alkalmaztam a megjeleníthetőség érdekében.

```
solar_input_current_amplitude
```



5.4. ábra. Általam készített Grafana dashboard

6. fejezet

A vezérlési késleltetés és a rendszer-reakcióidő elemzése

6.1. Bevezetés: A reakcióidő kritikus szerepe

A dolgozatban bemutatott keretrendszer nem csak egy statikus eszköz, hanem egy aktív beleszól a rendszer elemek működésébe. Ezen túl vannak egyéb fizikai eszközök, amelyek a felügyeleti rendszertől függetlenül üzemelnek. Míg a dolgozat végén található tesztek a rendszer *funkcionális* helyességét igazolják, itt a rendszer időbeli viselkedését, azaz a késleltetését vizsgáltam.

Energetikai rendszerek felügyeleténél a reakcióidő kritikus tényező, mert egy zárlat esetén rövid idő alatt nagyon nagy energiák szabadulnak fel. A keretrendszer célja, hogy a szoftveres energia allokációval a teljes keretet (`ALLOC_MAX_TOTAL`) úgy ossza fel, hogy megelőzze a fizikai védelmi eszközök (megszakítók) leoldását. A rendszer gyakorlatilag egy "versenyt fut" az idővel: a szoftveres vezérlőhuroknak gyorsabban kell észlelnie és kezelnie a túlterhelést, mint ami a fizikai megszakító védelmén van beállítva leoldási időnek.

Ha a késleltetés túl nagy, a rendszer – bár funkcionálisan helyesen működne – mégis kudarcot fog vallani, mert a túlterhelés hatására a megszakítók leoldanak, mielőtt a szoftveres korlátozás érvénybe léphetne.

6.2. A vezérlés komponenseinek késleltetése

Ahhoz, hogy a teljes rendszer reakcióidejét (T_{total}) megértsük, fel kell bontanunk a teljes vezérlési hurkot az egyes komponensek által hozzáadott késleltetésekre. Egy túlterhelés észlelése és kezelése a következő lépésekből áll:

1. **Mérés** ($T_{measure}$): Az ESP8266 árammérő szenzora (pl. SCT-013) fizikailag megméri az áramot. Ez kb. valós időben történik, ez a késleltetés elhanyagolható.
2. **Adat küldés** ($T_{publish}$): Az ESP8266 frissíti a mért értéket és elérhetővé teszi azt a `/metrics` végponton. Ez elég szintén elég gyors, hogy valós idejűnek nevezzük.

3. **Adatgyűjtés** (T_{scrape}): A Prometheus szerver a kontrol szerveren keresztül, gyűjti az adatokat. Mivel a kontrol szerverrel szinkronben kérdeznak, ezért szükséges mindekettőnek a konfigurációjában (`scrape_interval`) változót előre és egységesen meghatározni, ez időközönként lekérdezi a mérő végpontjának a `/metrics` URL-jét. *Ez a rendszer egyik legjelentősebb késleltetési tényezője.* Ha egy tipikus 5 másodperces időközről beszélünk a mérés és a Prometheus általi észlelés között, átlagosan 2.5, rosszabb esetben 5 másodperc is eltelhet.
4. **Adatfeldolgozás** (T_{query}): A Kontroll Szerver lekérdezi az adatbázisból az áramokat. A lekérdezés gyors, viszont ez a lépés is a Prometheus belső frissítési ciklusától függ.
5. **Döntéshozatal** (T_{algo}): A Python szerver az adatokra lefuttatja a max-min fair algoritmust. Az elosztást tagalaló fejezetben láttuk, hogy ennek bonyolultsága $O(n \log n)$, ez kis ($n = 3..10$) fogyasztószám esetén elhanyagolható.
6. **Beavatkozás** ($T_{command}$): A szerver a számolás után korlátokat küld a végpontoknak. Itt egyedül a hálózati késleltetések lépnek fel (Wi-Fi, LAN).
7. **Végrehajtás** ($T_{execute}$): Az ESP8266 fogadja a parancsot és a Modbus-os fizikai eszközök beállítják az autótöltő vagy egyéb eszköz maximális áramát. Ez is egy gyors műveletnek számít.

Így jön ki, hogy a következő lesz a teljes késleltetés:

$$T_{total} = T_{measure} + T_{publish} + T_{scrape} + T_{query} + T_{algo} + T_{command} + T_{execute} \quad (6.1)$$

6.3. A fő késleltetési tényezők

Az előző pont láncja jól mutatja, hogy a késleltetést nem az algoritmus limitálja, hanem az adatgyűjtés architektúrája.

A teljes késleltetés nagy részét (T_{total}) kettő tényező dominálja:

1. **Prometheus Scrape Interval** (T_{scrape}): Ez a rendszer "szívverése". A vezérlőhurok nem tud gyorsabban reagálni, mint amilyen sűrűn friss adathoz jut. Ha ez az érték 5 másodperc, a rendszer fizikailag "vakon" repül 5 másodpercig, és csak utólag értesül a korábbi eseményekről.
2. **Hálózati késleltetés** ($T_{command}$): A Wi-Fi-alapú kommunikáció további, változó hosszúságú (jitter) késleltetést vihet a rendszerbe, terhelt vagy zajos hálózati környezetben, ez különösen problémás hiszen nehéz számolni a dinamikus változó késleltetéssel.

Míg a hálózati késleltetés általában tíz-száz milliszekundum nagyságrendű, a `scrape_interval` másodperces nagyságrendű alap beállítás szerint. Viszont ezt lecsökkenthetjük akár 100ms-re is, ez növeli a hálózati forgalmat és a szerver terhelését, de jelentősen csökkenti a teljes késleltetést. Így beállítható a megszakitók védelmi szintje ennél nagyobb értékre, például 500ms-re. Így már nem kell aggódnunk, hogy a késleltetés miatt a fizikai védelem leold.

6.4. Védelmi beállítások késleltetések alapján

A késleltetés számítása után lehetséges beállítani a védelem értékeit. A rendszerben kettő kvázi független védelmi szint létezik:

- **1. Szoftveres Védelem (Allokáció):** Ezt a `ALLOC_MAX_TOTAL` kerettel tudjuk beállítani. Célja a *komfort* és a *hatékonyság* biztosítása, a keretek a felhasználható teljesítmény folyamatos kihasználása és a fizikai leoldások *megelőzése*. Reakcióideje megfelelően pár száz milliszekundum (T_{total}).
- **2. Fizikai Védelem (Megszakító):** Ezt a megszakító védelmének fizikai beállítása határozza meg. Célja a hálózat fizikai védelme. Reakcióideje azonnali viszont a védelemben késleltetést állítunk be, amit körülbelül a szoftveres érték kétszeresére állítunk.

A rendszer stabil működésének feltétele, hogy e két szint megfelelően legyen összehangolva, a kétszeres érték valószínűleg egy megfelelő mértékű eltávolítás, ami enged helyet még a jitter-nek és egyéb hibáknak a vezeték nélküli hálózaton.

Konfigurációs példa. Tegyük fel, hogy:

- A szoftveres keret `ALLOC_MAX_TOTAL = 90 A`.
- A Prometheus `scrape_interval` és a teljes hurok késleltetése $T_{total} = 200 \text{ ms}$.
- A csatlakoztatott eszközök (pl. autótöltők) képesek 200 milliszekundum alatt további 20 A terhelést bekapcsolni (pl. egy új autó csatlakozik).
- Ebben az esetben a fizikai megszakító védelmi beállítása legyen legalább $T_{total} = 400 \text{ ms}$.

Ebben az esetben az esetben megfelelő a kettő késleltetés távolsága, hogy ne történjen véletlen leoldás.

6.5. Következtetések

A keretrendszer sebességét nem a max-min fair algoritmus bonyolultsága, hanem a pull-alapú adatgyűjtési architektúra késleltetése határozza meg főként. Ez a szoftveres késleltetés (T_{total}) a rendszer egyik fő paramétere.

A fizikai védelmi beállításokat a megszakító fizikai felületén kötelezően ennek a szoftveres késleltetésnek a figyelembevételével kell konfigurálni. A két védelmi szint között elegendő headroom-ot kell hagyni, hogy a szoftveres allokációnak legyen ideje reagálni a terhelésváltozásokra, mielőtt a fizikai védelem szükségtelenül megszakítaná a szolgáltatást, a fizikai megszakítónak csak a hibák kivédésére szabad működnie. A rendszer finomhangolásánál viszont fontos figyelembe venni az egyensúlyt a gyors adatgyűjtés, ezáltal gyors védelmi beállítás és a magas hálózati terhelés között.

7. fejezet

Kubernetes integráció

7.1. Bevezetés

A konténerizáció nagy előnyt nyújt, mivel szabványosított, elszigetelt környezetet kínál a szoftverek futtatásához. A Docker Compose elterjedt a helyi, több konténert tartalmazó alkalmazásokhoz, egyszerűsítve az összekapcsolt szolgáltatások definiálását és futtatását. Mivel azonban sokszor skálázódásra van szükség, és olyan funkciókra, mint a nagy rendelkezésre állás, az automatikus skálázás és a kifinomult orkesztráció, a Kubernetes vált a konténer orkesztráció szabványává.

Ebben a fejezetben megmutatom, hogy az eredetileg a Docker Compose segítségével definiált rendszeremet, hogyan migráltam Kubernetes környezetbe. A rendszeremben a már meglévő szolgáltatások jelennek meg, mint a Prometheus a felügyelethez, a Grafana a vizualizációhoz, több szimulátorszolgáltatás és egy vezérlőszerver. Itt bemutatom a Docker Compose konfigurációk Kubernetes manifeszttekbe való átforgatásának kihívásait.

7.2. A Docker Compose és Kubernetes áttekintése

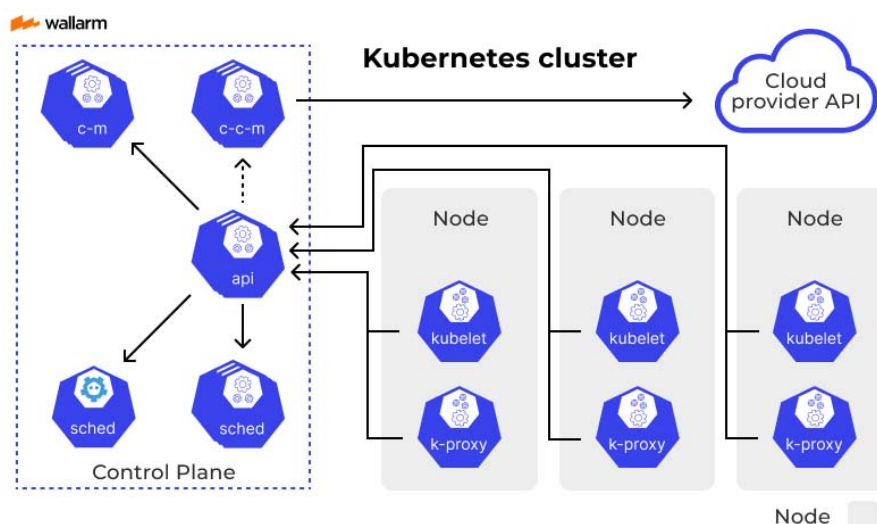
Docker Compose Ezzel több konténert tartalmazó Docker alkalmazásokat lehet definiálni és futtatni. Konfigurációja egy YML fájlban tárolt, ahol a szolgáltatásokat, hálózati kapcsolatokat, köteteket és függőségeket lehet megadni. A Docker Compose leegyszerűsíti a konténerek egyetlen hoszton történő orkesztrációját, így segíti a fejlesztést és tesztelést.

Kubernetes A Kubernetes viszont egy robusztus, open source platform a konténerek telepítésének, skálázásának és üzemeltetésének automatizálására hostokon. A Kubernetes új absztrakciókat vezet be:

- **Pod:** Ez a legkisebb telepíthető egység, amely egy vagy több konténert foglalnak magukba.
- **Deployment:** Állapot nélküli alkalmazások kezelésére szolgáló objektumok, amelyek olyan funkciókat kínálnak, mint a gördülő frissítések és a visszaállítás.
- **Service:** Végpontokat biztosítanak a podok eléréséhez, segítve a felfedezést és a terheléelosztást.

- **ConfigMap és Secret:** Mechanizmus a konfiguráció és az imagek szétválasztására.
- **PersistentVolumeClaim (PVC):** Absztrakció adattárolásra.

A migráció során ezeket képeztem le docker-ból k8-ba.



7.1. ábra. Kubernetes architektúra [1]

7.3. Rendszerarchitektúrája

A rendszer a már megismert következő részeket tartalmazza:

- **Prometheus:** Egyéni prometheus.yml fájljal konfigurált idősoros adatbázis. Ennek szerencsétlensége, hogy az újra konfiguráció csak újra indítással lehetséges.
- **Grafana:** Vizualizációs eszköz, ami közvetlen a Prometheushoz kapcsolódik megjelenítéséhez.
- **ESP8266 szimulátorok:** Itt épen három példány szimulálja a különböző szimulátorazonosítókkal rendelkező eszközöket.
- **Breaker Simulators:** Más jellegű, de hasonló célú szimulátor.
- **Vezérlőszerver:** Lebonyolítja az eszközök közötti interakciókat, vezérlést és adatok továbbítását.
- **System Simulator:** A rendszer általános viselkedését emuláló központi szolgáltatás.

A Docker Compose alkalmazásban ezek az összetevők hálózaton és socketeken keresztül kapcsolódtak össze, és meghatározott végpontokon jelenítettek meg. [3]

7.4. A Docker Compose beállítások konvertálása Kubernetes manifeszteké

A Docker Compose-ról a Kubernetesre való áttérés magában foglalja az alkalmazás architektúrájának újragondolását a podok, deployment-ek, szolgáltatások és más Kubernetes objektumok szerint. [20]

7.4.1. Névtér- és konfigurációkezelés

Itt létrehoztam egy névtér (pl. monitoring) ez izolációt biztosít az alkalmazás számára. A ConfigMap a Prometheus konfiguráció tárolására szolgál (a prometheus.yml tartalma), lehetővé téve a konfiguráció frissítését a konténerek image-einek újbóli legenerálása nélkül.

```
apiVersion: v1
kind: Namespace
metadata:
  name: monitoring
---
apiVersion: v1
kind: ConfigMap
metadata:
  name: prometheus-config
  namespace: monitoring
data:
  prometheus.yml: |-
    global:
      scrape_interval: 15s
    scrape_configs:
      - job_name: 'prometheus'
        static_configs:
          - targets: ['localhost:9090']
```

7.4.2. Deployment-ek és Service-ek

Minden szolgáltatás Docker Compose-ban egy Deployment és egy Service formájában jelenik meg a Kubernetesben. A Deployment kezeli az alkalmazásban a podokat, a Service ezeket a podokat teszi elérhetővé.

Például a Prometheus szolgáltatás egyetlen replikával rendelkezik. Konfigurációja a ConfigMap-ról van mountolva, a perzisztens adatai pedig egy PersistentVolumeClaim (PVC) segítségével tárolom. Hasonlóképpen, más szolgáltatások, például az ESP8266 szimulátorok és a vezérlő szerver deployment-ekké alakulnak át, amelyek környezeti változókat és portkonfigurációkat adnak meg.

7.4.3. Perzisztens tárolók kezelése

A Docker Compose-ban gyakran definiálnak volume-okat az adattárolására. A Kubernetesben ezt a PersistentVolumeClaims biztosítja. A készített rendszeremben a Prometheus, mind a Grafana perzisztens tárolót igényelt az adatok megőrzéséhez, amiket a PVC-k létrehozásával és konténerekhez kötésével értem el.

```
apiVersion: v1
kind: PersistentVolumeClaim
metadata:
  name: grafana-data
  namespace: monitoring
spec:
```

```
accessModes:
  - ReadWriteOnce
resources:
  requests:
    storage: 1Gi
```

7.4.4. Szolgáltatások elérhetővé tétele és hálózati konfiguráció

A Docker Compose-ban a portok hozzárendelését a konfigurációban végezzük. A Kubernetesben a portok meghatározást a Service-ek kezelik, ezek lehetnek NodePort típusúak a külső hozzáféréshez vagy ClusterIP típusúak a belső kommunikációhoz. A migráció során a konténerek portjait le kellett képezni a hosztokra, hogy a külső interfész ugyanaz maradjon az eredeti Docker Compose-hoz képest.

Például a Docker Compose-ban az 5000-es porton található vezérlő szervert egy olyan Kubernetes Service replikálja, amely egy adott NodePort-ot rendel hozzá, például 30050-et.

7.4.5. Telepítés és tesztelés

A Kubernetes manifeszt a kubectl apply -f paranccsal kerül alkalmazásra. Ez telepíti az összes komponenst a névtérben. A telepítés után a szabványos Kubernetes-parancsok (pl. kubectl get pods, kubectl logs, kubectl describe) a podok állapotának ellenőrzésére szolgálnak. Így iteratívan lehet tesztelni az új rendszert és később szolgáltatás kimaradás nélkül frissíteni.

Telepítéséhez a következő parancsot használjuk:

```
kubectl apply -f monitoring.yaml
```

És hogy megvizsgáljuk a telepített podokat:

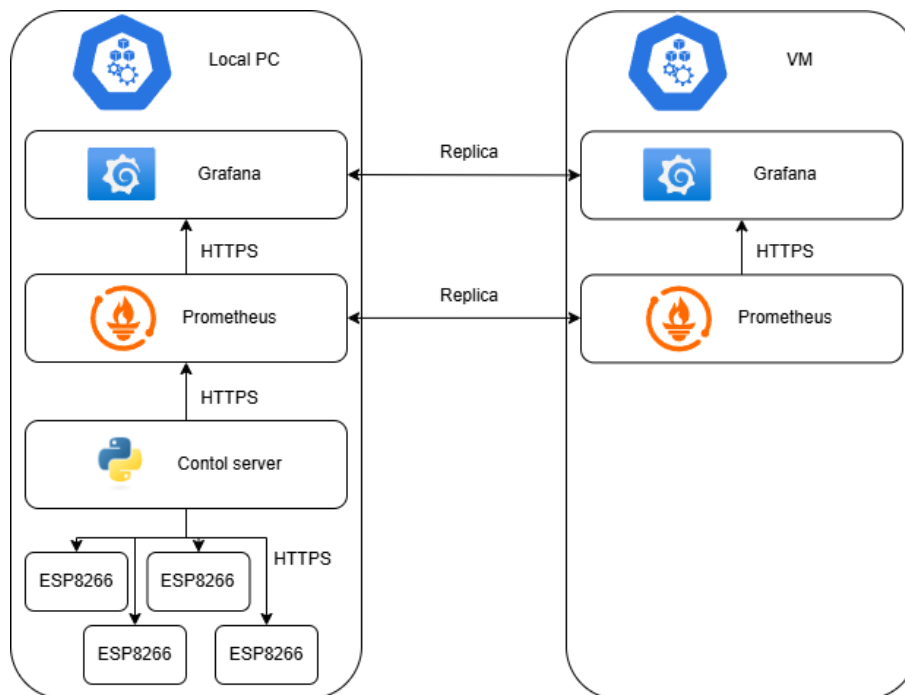
```
kubectl get pods -n monitoring
```

7.5. Nagy elérhetőségű rendszer implementációja

Az aktív elsődleges és passzív készenléti minta csökkenti a komplexitást és emellett megbízható felügyeletet biztosít:

- A Prometheus folyamatos adatreprodukciója mindent megőriz a második helyszínen.
- A replikán keresztül biztosított a Grafana-B azonnali használhatósága.
- Az átállást csak a DNS/szolgáltatás frissítési sebessége korlátozza.
- Ez a topológia megfelel a megbízhatósági céloknak a monitorozási környezetbe.

A Prometheus-A minden célpontot lekérdez, és elvégzi az összes értékelést. A Prometheus-B távoli írást kap A-tól (A hálózat felesleges terhelésének elkerülése érdekében nem scrapel közvetlen). A Grafana-B csatlakozik a Prometheus-B-hez, és a dashboardokat inen frissíti (ez közvetlenül nem érhető el). Egyetlen DNS név mutat az A ingressre. A Kubernetes és egy külső állapotellenőrzés frissíti a DNS-t a B oldalra, amikor az A leáll.



7.2. ábra. Hibrid kubernetes topológia

7.5.1. Replikák megvalósítása

A VM-n a prometheus konfigurációja a következő képen történik.

```

apiVersion: apps/v1
kind: Deployment
metadata:
  name: prometheus-b
  namespace: monitoring
spec:
  replicas: 1
  selector: { matchLabels: { app: prometheus-b } }
  template:
    metadata: { labels: { app: prometheus-b } }
    spec:
      nodeSelector: { site: "b" }
      containers:
        - name: prometheus
          image: prom/prometheus:v2.49
          args:
            - --config.file=/etc/prometheus/prometheus.yml
            - --web.enable-lifecycle
          volumeMounts:
            - name: data
              mountPath: /prometheus
          readinessProbe: { httpGet: { path: /-/ready, port: 9090 } }
      volumes:
        - name: data
          persistentVolumeClaim:
            claimName: prometheus-b-data
---
kind: PersistentVolumeClaim
metadata:
  name: prometheus-b-data
  namespace: monitoring
spec:
  accessModes: [ReadWriteOnce]
  storageClassName: cloud-ssd
  resources: { requests: { storage: 50Gi } }

```


Az eredeti A prometheus-ból pedig a B-be folyamatosan írunk.

```
remote_write:
- url: http://prometheus-b.monitoring.svc.cluster.local:9090/api/v1/write
queue_config:
  capacity: 10000
  max_shards: 5
  max_samples_per_send: 1000
  batch_send_deadline: 5s
```

A grafana megvalósítása során igazából csak egy ugyanolyan deployment-et hozunk létre. Ez egy másolat a másikról amire ha kell áttudunk bármikor térni.

```
spec:
  replicas: 1
  template:
    metadata: { labels: { app: grafana-b } }
    spec:
      nodeSelector: { site: "b" }
      containers:
      - name: grafana
        image: grafana/grafana:11.0.0
        env:
          - name: GF_DATABASE_URL      # same secret as primary
            valueFrom: { secretKeyRef: { name: grafana-db, key: db_url } }
          - name: GF_SECURITY_SECRET_KEY
            valueFrom: { secretKeyRef: { name: grafana-db, key: secret } }
        readinessProbe:
          httpGet: { path: /api/health, port: 3000 }
```

7.5.2. KubeADM

A projektemben a kubeadm-re támaszkodtam, hogy kubernetes klasztert készítsek a linux vm-et bevonva. Ez megkönnyítette a folyamatot mert magasabb szintű tervezésre volt csak szükség és ez megoldotta magától az alacsonyabb szintű problémákat.

```
sudo kubeadm init --config=/etc/kubeadm/config.yaml
```

Az inicializálás után csak egy token kellett adni a nodenak, hogy csatlakozzon a clusterhez. Ezután a további folyamatokat kezelte is a Kubeadm.

```
sudo kubeadm join 10.200.0.1:6443 \
  --token <token> \
  --discovery-token-ca-cert-hash sha256:<hash>
```

Ennek köszönhetően egy hasonló rendszerben, ha a egy node meghibásodik akkor a másik átveszi a helyét és felhasználói oldalról nem érzünk kiesést. A helyre állítás során, pedig csak egy parancsot kell kiadnunk:

```
kubeadm join
```

Ezután újra csatlakoztattuk is a node-ot és újonnan felépíthetjük a clusterben.

8. fejezet

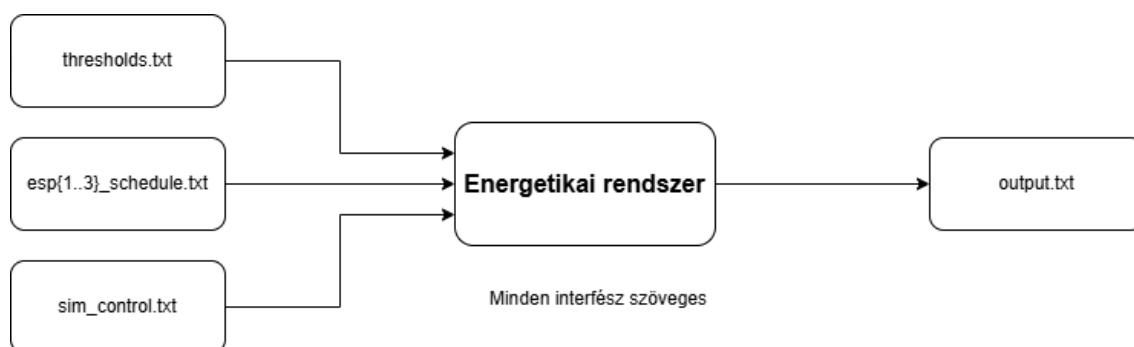
Szöveges interfészek a szimulációhoz

8.1. Cél és áttekintés

A rendszer szöveges alapú beállításra és eredménygyűjtésre alkalmas. A cél, hogy a szimuláció *kiegészítő eszközei* (pl. curl, CSV-konverzió) nélkül, egyszerű szövegfájlokkal legyen vezérelhető és kiértékelhető.

Rövid összefoglaló:

- **Bemenetek:**
 - `thresholds.txt` - itt találhatóak meg a maximum és minimum értékek, amit elérhet különböző pontjain a rendszer.
 - `esp{1..3}_schedule.txt` - ebben találhatóak meg a mérőpontok napi-rendjei.
 - `sim_control.txt` - itt találhatóak meg a futtatási állapotok parancsai.
- **Kimenet/napló:** `output.txt` (idősoros; egy sor = egy vezérlési ciklus) Ebben található meg az összes lényeges mérőszám és állapot minden ciklusban.
- **Webes felület:** „Dev Panel” (`localhost:8080`) a fájlok szerkesztéséhez, generálásához, letöltéséhez, a futás indításához/megállításhoz, az idő nullázásához és a napló törléséhez használható.



8.1. ábra. Interfészek

8.2. Bemeneti szövegfájlok

8.2.1. thresholds.txt – küszöbök és maximum megengedhető áram

A vezérlő szerver minden ciklusban beolvassa. Kulcs–érték párok, tizedes ponttal:

```
# Küszöbértékek a vezérlő szerverhez
BREAKER_MAX_TOTAL=65.0 # [A] - Megszakító lekapcsolási áram
BREAKER_MIN_TOTAL=35.0 # [A] - Megszakító bekapcsolási áram
ALLOC_MAX_TOTAL=95.0 # [A] - Max áram érték
```

Megjegyzések:

- A *megszakítók* (breakerek) logikája az *aktuálisan mért hatásos* összáramhoz viszonyít (BREAKER_MAX_TOTAL, BREAKER_MIN_TOTAL).
- A SIM-ekre küldött korlátok (cap) a *nyers igényekből* számítódnak *max-min fair* elv szerint, az ALLOC_MAX_TOTAL keret figyelembevételével.

8.2.2. esp{x}_schedule.txt – idősoros bemenet

Formátum: időpillanat másodpercben + kívánt áram (A). A menetrend *lépcsős*: a legutóbbi időponthoz tartozó érték érvényes a következő megadásig.

```
# seconds amps
0 1.0
30 2.5
120 0.8
```

Írányelvek: tizedes elválasztó pont; tetszőleges szóköz; a sorok idő szerint rendezve mint minden szöveges ki- és bemeneti file-ban.

8.3. sim_control.txt – futtatási állapot

Egyetlen szó: RUNNING vagy STOPPED (Az alapértelmezés STOPPED). A SIM-ek „virtuális órája” csak RUNNING állapotban megy.

8.4. Kimeneti szövegfájl

8.4.1. output.txt – idősoros kimenet

A vezérlő minden ciklusban *egy sort* ír. A fájl alapértelmezetten *append-only* a véletlen szerkesztést elkerülendő; a Dev Panel „Clear output.txt” művelete törli amennyiben ez szükséges, és a vezérlő legközelebb automatikusan újra létrehozza a fejléct. Formátum: kulcs=érték párok szóközzel elválasztva.

```
# One record per line; fields are key=value separated by spaces
timestamp=1758199200 sim_state=RUNNING sum_current_amps=5.7 \
alloc_max_total_amps=6.0 max_total_amps=6.0 min_total_amps=1.0 \
sims=esp1:raw=2.0,effective=2.0,cap=2.0|esp2:raw=1.7,effective=1.7, \
cap=2.0|esp3:raw=2.5,effective=2.0,cap=2.0 \
breakers=brk1:on,brk2:on
```

Kulcsok a kimeneti file-ban:

- timestamp – UNIX időpecsét (s).

- `sim_state` – globális állapot: RUNNING/STOPPED.
- `sum_current_amps` – mért hatásos összáram (cap után).
- `alloc_max_total_amps` – allokációs keret (A).
- `max_total_amps / min_total_amps` – breaker küszöbök (legacy nevek).
- `sims` – | jellel szeparált lista SIM-enként:
`espX:raw=..., effective=..., cap=...`
 ahol `raw` = menetrendi igény, `effective` = tényleges áram, `cap` = küldött maximum.
- `breakers` – megszakítók állapota on/off, vesszővel elválasztva.

8.5. Időkezelés és futtatás

- **Virtuális idő:** minden SIM saját menetrendi ideje csak RUNNING állapotban növekszik.
- **STOPPED** módban a SIM-ek ideje megáll; a vezérlő nem küld új cap-et és nem kapcsolgat megszakítót, csak mér és naplóz.
- **Reset (t=0):** a Dev Panel „Reset sim time (t=0)” gombja az összes SIM virtuális idejét nullázza (a panel előbb STOP-ra állít, majd resetel).

8.6. Reprodukálhatóság és feldolgozhatóság

A bemenetek (küszöbök, menetrendek, futtatási állapot) verziózhatók és mellékelhetők. A kimeneti `output.txt` önleíró; minden rekord tartalmazza az adott ciklus lényeges paramétereit. A formátum egyszerűen feldolgozható bármely nyelven (kulcs=érték párok; `sims` és `breakers` mezők jól definiált szeparátorokkal).

8.7. Rövid példa – beállítás → kimenet

`thresholds.txt`

```
BREAKER_MAX_TOTAL=9.0
BREAKER_MIN_TOTAL=2.0
ALLOC_MAX_TOTAL=9.0
```

`esp1_schedule.txt`

```
# seconds  amps
0  50
60 10
```

`esp2_schedule.txt`

```
0  50
60 10
```

`esp3_schedule.txt`

```
0  50
60 100
```

Várható kiosztás a 0–60 s szakaszban: mindhárom SIM korlátozott, mivel az igény $150\text{ A} > 9\text{ A}$. 60 s után az igények $[10, 10, 100] \Rightarrow$ kiosztás $[10, 10, 70]$. A cap és az effective értékek ennek megfelelően jelennek meg az `output.txt`-ben.

9. fejezet

Fejlesztői panel (Dev Panel)

9.1. Cél és szerep

A Dev Panel egy könnyű használatú webes felület, amely a szöveges bemenetek és kimenetek kezelését, a futtatás indítását/megállítását, az idő nullázását és a napló törlését teszi lehetővé. Célja a *gyors kísérletezés* és a *reprodukálható* tesztfutások támogatása külön eszközök nélkül.

9.2. Architektúra áttekintése

A panel egy Flask-alapú backendből (`/api/`) és statikus frontendből (HTML+CSS+JS) áll. A backend közvetlenül a `./data` mappában található fájlokat kezeli, és hálózaton hívja az esp-t szimuláló konténerek végpontjait. A vezérlő külön, a saját portján (8000) fut; a Prometheus és Grafana eléréséhez gyorslinkek állnak rendelkezésre.

9.3. Fő funkciók és munkamenet

Start/Stop. A `sim_control.txt` fájlba írja a panel a RUNNING vagy STOPPED értéket. STOP módban az esp szimulátorok virtuális ideje megáll, a vezérlő nem küld max értékeket és nem kapcsol megszakítókat, csak mérést és naplózást végez.

Reset ($t=0$). A panel a STOP beállítás után meghívja minden esp szimulátor `/reset_time` végpontját, a virtuális idejük nulláról indul újra.

Clear output.txt. A `data/output.txt` törlése. A vezérlő a következő ciklusban automatikusan újra létrehozza a fejléceket és folytatja a naplózást.

Thresholds szerkesztés. A `thresholds.txt` beolvasása/írása a panelről: `BREAKER_MAX_TOTAL`, `BREAKER_MIN_TOTAL`, `ALLOC_MAX_TOTAL`.

Menetrend-generátor. Konstans, fel- és lefutás, lépcső, szinusz és random walk idősorok képezhetők a `esp{x}_schedule.txt` fájlokba (formátum: seconds amps). A generált tartalom előnézetben ellenőrizhető.

Raw editor & Letöltés. Tetszőleges bemeneti fájl közvetlen szerkeszthető; az `output.txt` csak olvasható. Minden be- és a kimenet letölthető megőrzéshez.

9.4. Backend API (elérések)

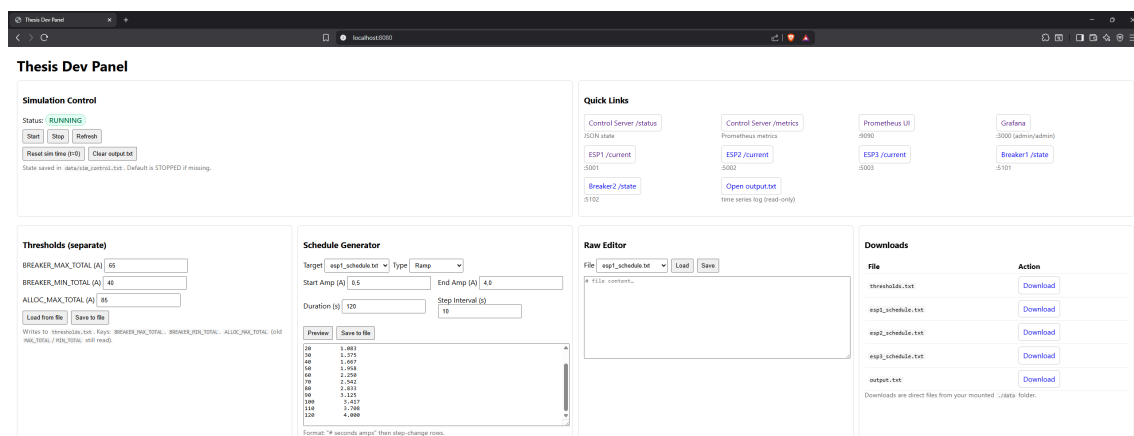
Végpont	Funkció
GET /api/read?name=...	Fájl beolvasása
POST /api/write	Fájl írása
GET /api/download?name=...	Közvetlen letöltés
GET /api/sim_state	Globális állapot lekérdezése
POST /api/sim_state	RUNNING/STOPPED beállítása
POST /api/clear_output	<code>output.txt</code> törlése
POST /api/reset_sim_time	Minden szimulátor időnullázása

9.5. Biztonsági és korlátok

A panel *belső* használatra készült. Nincs többfelhasználós jogosultság- és CSRF-kezelés; éles környezetben ezeket pótolni szükséges. A fájlműveletek engedélyezett listához kötöttek, a végpontok nem tesznek lehetővé tetszőleges fájlhozzáférést.

9.6. Kiterjeszthetőség

A panel könnyen bővíthető új be- és kimenetekkel: pl. súlyozott fair-elosztás bemenete (`weights.txt`), előre definiált menetrend-sablonok, vagy beépített grafikon a `output.txt` vizualizálására. A funkcionalitás változtatása különösen egyszerű, mivel az állapot *szöveges fájlokban* van deklarálva.



9.1. ábra. Devpanel

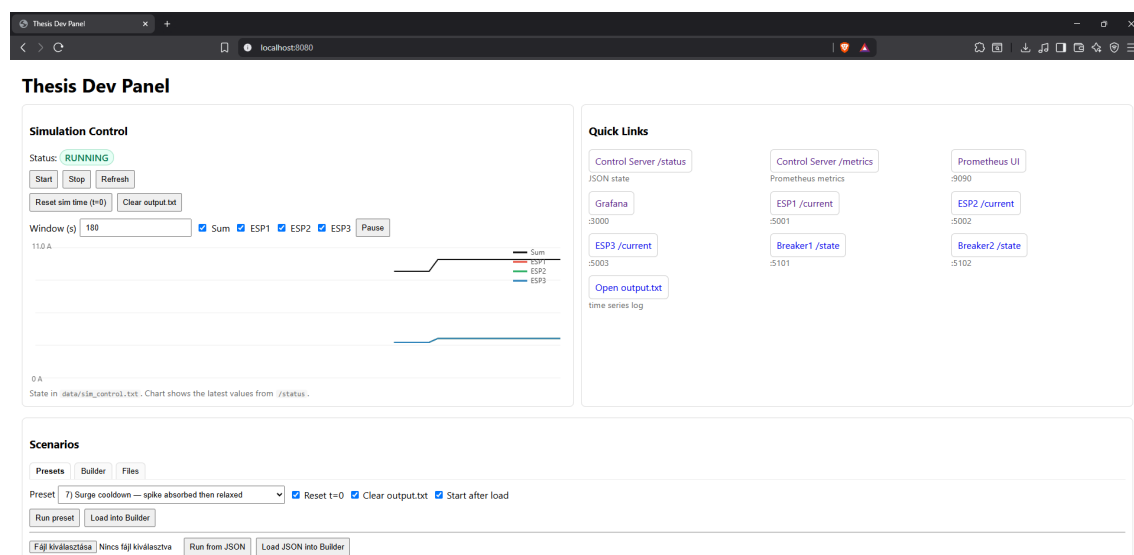
9.7. Dev Panel módosítások

9.7.1. Motiváció és cél

A fejlesztői panelt a készítésnek ebben a fázisában úgy bővítettem, hogy a tesztesetek egy kattintással reprodukálhatóak legyenek, a kézi teszt generátor pedig ugyanazon a felületen, azonnali futtatással történjen és opciót adjon a kimentésre. A fő cél: *egységes teszteset kezelés* (presetek, és könnyen generálható egyedi scenariók), *automatizált tesztelés*, és *idősoros megfigyelés* egy nézetben.

9.7.2. Fő fejlesztések

- **Egységesítettem a *Scenarios* kártyát** három füllel: *Presets*, *Builder*, *Files*.
- **Auto Test Runner**: beépített demók (presetek) egy kattintással futtathatóak, illetve betölthető és kimenthető JSON-ba egy teljes scenarió.
- **Összevont szerkesztés**: a menetrend-generátor és a nyers szövegszerkesztő panelt egységesítettem (*Builder*).
- **Scenarió-könyvtár**: megvalósítottam a teljes tesztet magába foglaló JSON mentését sajátgépre vagy szerverre. (/data/scenarios/).
- **Atomikus írás és állapotkezelés**: bemeneti fájlok biztonságos felülírása, `sim_control.txt` kezelés, opcionális *reset* és naplótörlés.
- **Élő grafikon és gyorsshivatkozások**: valós idejű összárám és szimulátoronkénti külön görbe, közvetlen linkek is itt találhatóak meg a /status, /metrics, Prometheus, Grafana nézetekhez.



9.2. ábra. Devpanel v2

9.7.3. Felépítés és API változások

A Dev Panel backend része új végpontokkal bővült, ezek:

- POST /api/run_scenario - teljes scenario alkalmazása (küszöbök + menetrendek + vezérlési opciók).
- GET/POST /api/read, /api/write - bemeneti állományok (txt) kezelése.
- POST /api/clear_output, POST /api/reset_sim_time, POST /api/sim_state.
- GET /api/list_scenarios, GET /api/read_scenario, GET /api/download_scenario, POST /api/save_scenario_json, DELETE /api/delete_scenario.

Az általam használt JSON séma a tesztek definiálására:

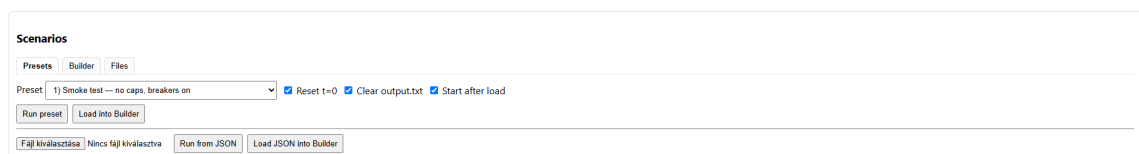
```
{
  "name": "Demo",
  "thresholds": {
    "BREAKER_MAX_TOTAL": 12,
    "BREAKER_MIN_TOTAL": 2,
    "ALLOC_MAX_TOTAL": 9
  },
  "schedules": {
    "esp1": [[0, 50], [60, 10]],
    "esp2": [[0, 50], [60, 10]],
    "esp3": [[0, 50], [60, 100]]
  },
  "control": {
    "reset_time": true,
    "clear_output": true,
    "start_after_load": true
  }
}
```

A /api/run_scenario hívás menete:

1. sim_control.txt → STOPPED.
2. Opcionálisan lehet törölni az output.txt tartalmát, szimulátor időket resetelni *reset*.
3. thresholds.txt, esp{1..3}_schedule.txt újra írása.
4. Végállapot a futattás után: RUNNING vagy STOPPED (beállítástól függően).

9.7.4. UI szervezés (*Scenarios* kártya)

Presets. Előre definiált demókat tartalmaz (smoke test, under budget, fair split 3/3/3, dinamikus újraelosztás, hiszterézis, STOPPED invariánsok) Ezek futtathatóak az említett opciókkal: *Reset t=0*, *Clear output.txt*, *Start after load*. Külső JSON is betölthető/futtatható.



9.3. ábra. Devpanel Presets fül

Builder. Max értékek (BREAKER_MAX_TOTAL, BREAKER_MIN_TOTAL, ALLOC_MAX_TOTAL) és vezérlési opciók mellett szerkesztőablakok a menetrendekhez. Különböző menetrend típusok választhatóak (állandó, rámpa, lépcső, szinusz, random walk) *Insert/Overwrite* móddal. Kettő opció van ezután:

- *Apply to files:* csak fájlok írása (nem indul a szimuláció).
- *Run now:* fájlok írása és azonnali futtatás az opciók szerint.

9.4. ábra. Devpanel Builder fül

Files. Gyors letöltések a txt-állományokhoz, illetve a szerveren tárolt scenáriók listája (futtatás, letöltés, betöltés a Builderbe, törlés).

File	Action
thresholds.txt	Download
esp1_schedule.txt	Download
esp2_schedule.txt	Download
esp3_schedule.txt	Download
output.txt	Download

Saved Scenarios			
Stored in /data/scenarios/. You can run, download or delete them.			
Name	Size	Modified	Actions
No saved scenarios			
Refresh list			

9.5. ábra. Devpanel Files fül

9.7.5. Használati munkafolyamat

A kipróbáláshoz javasolt lépések folyamata:

1. *Presets:* kiválasztás → opciók (*Reset/Clear/Start*) → *Run preset*.
2. *Builder:* menetrend generálása/szerkesztése → *Run now*.

3. *Export/Save*: scenario JSON letöltése vagy mentése saját gépre vagy a szerverre későbbi felhasználás céljából.
4. *Files*: `output.txt` letöltése eredmények tárolásához.

10. fejezet

Rendszertesztek és bemutató szcenáriók

10.1. Tesztek megvalósítása

A cél itt annak igazolása volt, hogy a rendszer komponensei megfelelően működnek. A vizsgálat során *idősoros* bemeneti és kimeneti fájlt (`thresholds.txt`) használtam. Ebben az esetben a kontrollciklus periódusa $T_c = 3$ s.

Mérőszámok és ellenőrzési pontok:

- **Mérőnkénti tényleges áram** (effective) ez nem az igényelt hanem a ténylegesen megkapott áramerősség, a vezérlő `/status` végpontján és az `output.txt`-ben.
- **Összáram** A Mérőnkénti tényleges áramok összege (`sum_current_amps`)
- **Korlátok (cap):** az alokált teljesítmény a végpontokon (max–min fair) eredményei.
- **Küszöbök:**
 - `ALLOC_MAX_TOTAL` - Ez a teljes teljesítmény keret, amit a vezérlő ki tud osztani, a kiosztott áramok összege legfeljebb ennyi lehet.
 - `BREAKER_MAX_TOTAL` - A védelem kapcsolásának küszöbe, ha az összáram meghaladja ezt az értéket, a megszakítók lekapcsolnak (OFF).
 - `BREAKER_MIN_TOTAL` - A védelem automatikus visszakapcsolásának küszöbe, csak akkor kapcsol vissza (ON) a megszakító, ha az összáram ez alá csökken.
- **Megszakító állapot:** Itt csak on/off értéket figyelünk a védelmet ellátó megszakítókon.

Ezeket `output.txt` idősoros naplóban ellenőriztem, itt volt a legegyszerűbb, mert itt egy sor egy ciklus.

10.2. Bemenetek és állapot

- `thresholds.txt`:
 - `BREAKER_MAX_TOTAL`
 - `BREAKER_MIN_TOTAL`
 - `ALLOC_MAX_TOTAL`

Ezek fentebb említett módon kerülnek használatra.

- idő - áramerősség párokat tartalmazó menetrendek minden végponthoz:
 - `esp1_schedule.txt`
 - `esp2_schedule.txt`
 - `esp3_schedule.txt`
- `sim_control.txt`:
 - `RUNNING` a szimulációhoz használt mérők belső órája megy
 - `STOPPED` a szimulációhoz használt mérők belső órája megáll

alapértelmezés: `STOPPED`.

10.3. Várt viselkedés

1. Ha $\sum_i d_i \leq \text{ALLOC_MAX_TOTAL}$: *nincs korlát*, ezért $\text{effective}_i = d_i$ minden mérőre és az összárám egyszerűen $\sum_i d_i$. Ilyenkor a vezérlő nem „oszt újra”, a kiosztás megegyezik az igényekkel és a megszakító-logika csak akkor lép működésbe, ha az összárám véletlenül mégis átlépi a védelmi küszöböt.
2. Ha $\sum_i d_i > \text{ALLOC_MAX_TOTAL}$: *max-min fair* elosztás lép életbe, vagyis egy λ szintet keresünk úgy, hogy $a_i = \min\{d_i, \lambda\}$ és $\sum_i a_i = \text{ALLOC_MAX_TOTAL}$. Azok a mérők, amelyek igénye $d_i \leq \lambda$, teljes igényüket megkapják, a nagyobb igényűek pedig λ -nál „levágódnak”, a vezérlő ezt 3 s-onként újraszámolja, így ha szabadul fel kapacitás ez automatikusan átcsoportosul.
3. Megszakító: ha az *összárám* $\text{sum} \geq \text{BREAKER_MAX_TOTAL}$, a megszakító kikapcsol (védelmi leoldás) és csak akkor kapcsol vissza, ha $\text{sum} \leq \text{BREAKER_MIN_TOTAL}$.
4. `STOPPED` állapotban a virtuális idő nem halad, a vezérlő nem küld új korlátozókat és nem ad megszakító-parancsokat, ilyenkor a bemeneti fájlok szabadon szerkeszthetők, és a következő `RUNNING` ciklus kezdetekor az új konfiguráció lép életbe, ha ez be van kattintva időnullázással és naplőürítéssel.

10.4. Szcenáriók és elfogadási kritériumok

10.4.1. Alaptesztek: Start/Stop/Reset/Clear

Az első teszt a vezérlő és a szimulációs környezet alapvető funkcióinak (indítás, leállítás, újraindítás) működését validálja. Itt a cél annak ellenőrzése, hogy a rendszer alapállapotban stabil, a vezérlő parancsokra megfelelően reagál. A bemeneti paramétereket szándékosan úgy állítottam be, hogy ne lépjen fel semmilyen áramkorlátozás vagy megszakítási esemény, így itt kizárólag az alapvető vezérlés ellenőrzésén van a hangsúly.

Bemenetek:

- BREAKER_MAX_TOTAL=12
- BREAKER_MIN_TOTAL=2
- ALLOC_MAX_TOTAL=30
- ESP1=1,0 A
- ESP2=1,5 A
- ESP3=0,5 A

Miért ez a beállítás? Az igények összege $1,0 + 1,5 + 0,5 = 3,0$ A \ll ALLOC_MAX_TOTAL, ezért nem várható korlátozás: $\text{effective}_i = d_i$.

Lépések és jelentésük:

1. **STOP** — a `sim_control.txt` STOPPED-ra állítása, a vezérlő nem küld új korlátotokat és nem is kapcsol megszakítót.
2. **Reset** $t=0$ — minden szimulátor idejét nullázzuk, a szimuláció elejéről kezdünk.
3. **START** — a vezérlő elindul, a következő ciklusban kiírja az állapotot és beállítja a korlátokat, de ebben az esetben nem kell.
4. *(Opcionális)* `Clear output.txt` törölhető a napló amennyiben tiszta fájlt szeretne valaki látni.

Várt rendszerállapot

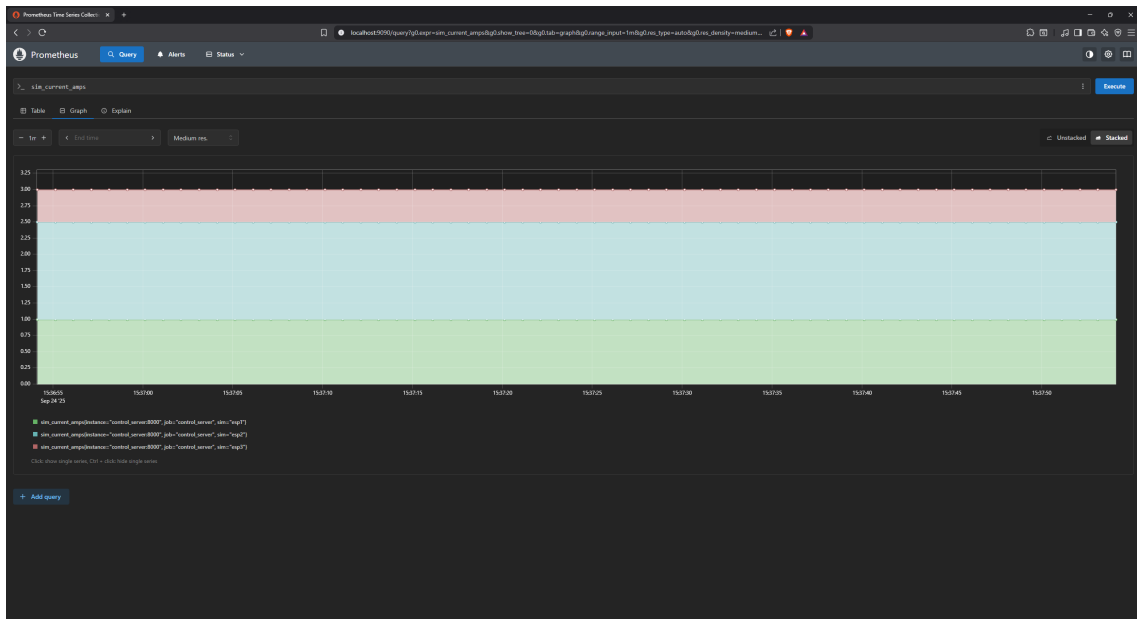
- *Nincs korlát:* $\text{effective}_{1,2,3} = \{1,0; 1,5; 0,5\}$ A, a korlátokat nagy értékek ($\sim 10^9$) jelölik.
- *Összáram:* $\text{sum_current_amps} \approx 3,0$ A stabilan, ez így vízszintes vonal az élő grafikonon.
- *Megszakító:* bekapcsolt állapotban van, mert $3,0 < \text{BREAKER_MAX_TOTAL} = 12$ és $3,0 > \text{BREAKER_MIN_TOTAL} = 2$.

Hol ellenőrizhető?

- output.txt: 3 s-onként új sor, pl.:

```
sim_state=RUNNING sum_current_amps=3.0
sims=esp1:raw=1.0,effective=1.0,cap=1e9|esp2:raw=1.5,
effective=1.5,cap=1e9|esp3:raw=0.5,effective=0.5,cap=1e9
breakers=brk1:on,brk2:on
```

Siker kritérium: A grafikon 3 A változatlan értékű görbét mutat az output.txt-ből ugyanezt tudjuk kiolvasni, hogy $\text{effective}_i = d_i$, korlátok nincsenek érvényben, a megszakítók be vannak kapcsolva ez 1-2 ciklus (3-6 s) után stabilan látszik.



10.1. ábra. Alaptesztek

10.4.2. Alulterhelés: nincs korlátozás

Ebben a tesztben azt a normál körülmények között is előforduló esetet vizsgálom, amikor a fogyasztói igények összege ($\sum d_i$) kevesebb, mint a maximálisan engedélyezett teljes fogyasztható áram. Itt a cél annyi, ellenőrizni kell, hogy a vezérlő helyesen ismeri fel az alulterhelt állapotot, és nem aktivál semmilyen korlátozási mechanizmust. A várt működés, hogy minden fogyasztó a teljes igényelt áramát kapja meg ($\text{effective}_i = d_i$), és a megszakítók is bekapcsolt állapotban maradnak, mivel a terhelés a megengedett sávon belül van.

Bemenetek:

- ALLOC_MAX_TOTAL=6
- BREAKER_MAX_TOTAL=12
- BREAKER_MIN_TOTAL=2
- ESP1=2,0 A

- ESP2=1,5 A
- ESP3=0,5 A

Miért ez a beállítás? Az igények összege $2,0 + 1,5 + 0,5 = 4,0$ A $\leq \text{ALLOC_MAX_TOTAL} = 6$, ezért *nem* indul korlátozás (max-min fair kiosztásra nincs szükség), így $\text{effective}_i = d_i$. A 4,0 A az BREAKER_MIN és BREAKER_MAX között van, ezért a megszakítók *bekapcsolt* állapotban maradnak.

Lépések és jelentésük:

1. **START** — a vezérlő elindul, és kiírja az állapotot, mivel $\sum d_i \leq \text{ALLOC_MAX}$, a korlátokat nem kell érvényesíteni.
2. **Várakozás \sim 2 ciklus** — 6–7 s múlva a naplóban stabilan láthatóak a beállítások.

Várt rendszerállapot

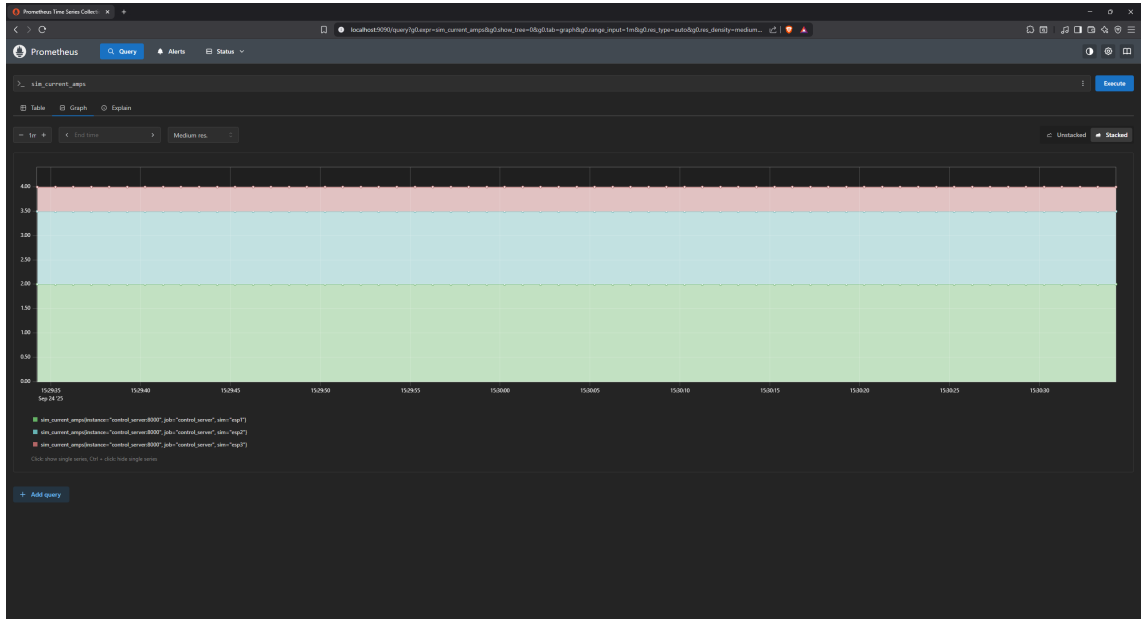
- *Nincs korlát*: $\text{effective}_{1,2,3} = \{2,0; 1,5; 0,5\}$ A, a korlátok nagy értékekkel ($\sim 10^9$) jelzik a „nincs limit” állapotot.
- *Összáram*: $\text{sum_current_amps} \approx 4,0$ A \Rightarrow vízszintes vonal az élő grafikonon.
- *Megszakító*: bekapcsolva, mert $4,0 < \text{BREAKER_MAX_TOTAL} = 12$ és $4,0 > \text{BREAKER_MIN_TOTAL} = 2$.

Hol ellenőrizhető?

- output.txt: 3 s-onként új sor, pl.:

```
sim_state=RUNNING sum_current_amps=4.0
sims=esp1:raw=2.0,effective=2.0,cap=1e9|esp2:raw=1.5,
effective=1.5,cap=1e9|esp3:raw=0.5,effective=0.5,cap=1e9
breakers=brk1:on,brk2:on
```

Siker kritérium: az élő grafikon 4 A vízszintes görbét mutat, az output.txt egyezően jelzi, hogy $\text{effective}_i = d_i$, korlát nincs érvényben, a megszakítók be vannak kapcsolva mindez 1–2 ciklus (3–6 s) után stabilan látszik.



10.2. ábra. Alulterhelt eset

10.4.3. Túlterhelés, azonos igények: fair 3/3/3 allokáció

Itt jelentős túlterhelést vizsgálunk, az összesített igény (150 A) ez nagyon meghaladja a globális allokációs keretet (9 A). A teszt célja, hogy ellenőrizze a "max-min fair" elosztási algoritmus helyes működését. A forgatókönyv lényege, hogy minden fogyasztó azonos, a keretnél jóval magasabb igényvel jelentkezik, így a várt eredmény egy tökéletesen egyenlő, 3 A-es elosztás a fogyasztók között.

Bemenetek:

- `ALLOC_MAX_TOTAL=9`
- `BREAKER_MAX_TOTAL=12`
- `BREAKER_MIN_TOTAL=2`
- `ESP1=50 A`
- `ESP2=50 A`
- `ESP3=50 A`

Miért ez a beállítás? Az igények összege $50 + 50 + 50 = 150 \text{ A} \gg \text{ALLOC_MAX_TOTAL} = 9$, ezért a max-min fair elosztás: egy közös λ szintet keresünk úgy, hogy $a_i = \min\{d_i, \lambda\}$ és $\sum a_i = 9$. Azonos igények mellett $\lambda = 9/3 = 3 \text{ A}$, tehát minden mérő 3 A-t kap.

Lépések és jelentésük:

1. **START** — a vezérlő elindul, kiszámítja λ -t és beállítja a korlátokat.
2. **Várakozás ~ 2 ciklus** — 6 s alatt a napló stabilan tükrözi a 3/3/3 kiosztást.

Várt rendszerállapot

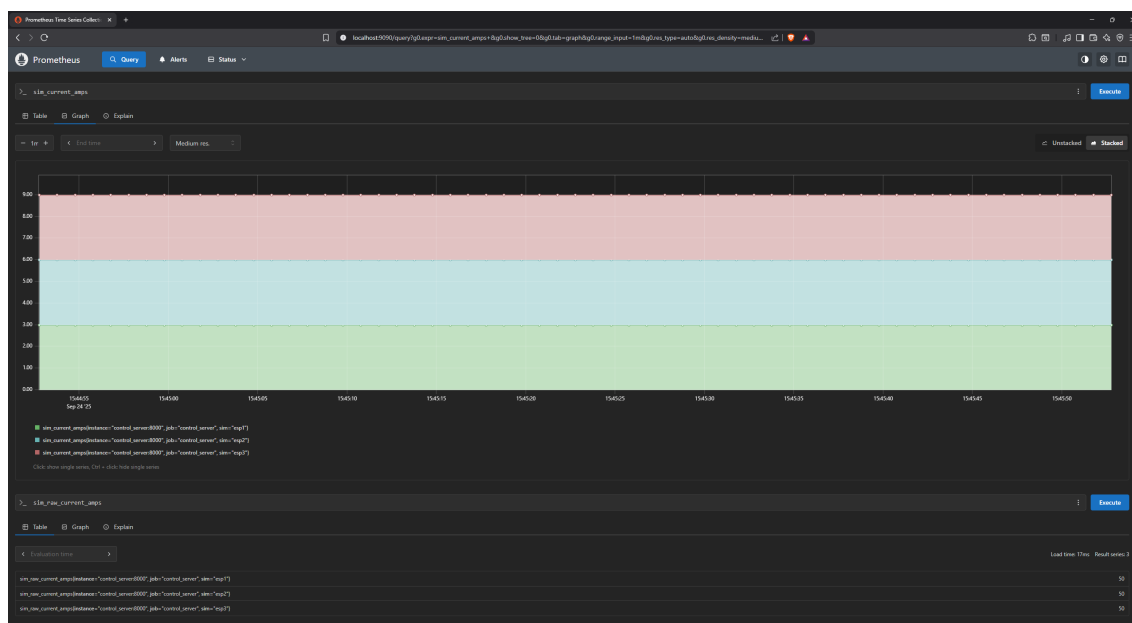
- *Korlátok*: mindhárom mérőnél $\text{cap} = 3 \text{ A}$; $\text{effective}_{1,2,3} = \{3, 3, 3\} \text{ A}$.
- *Összáram*: $\text{sum_current_amps} = 3+3+3 = 9 \text{ A} \Rightarrow$ egyenes vonal a grafikonon.
- *Megszakító*: bekapcsolva, mert $9 < \text{BREAKER_MAX_TOTAL} = 12$ és $9 > \text{BREAKER_MIN_TOTAL} = 2$.

Hol ellenőrizhető?

- `output.txt`: 3 s-onként új sor, pl.:

```
sim_state=RUNNING sum_current_amps=9.0
sims=esp1:raw=50.0,effective=3.0,cap=3.0|esp2:raw=50.0,
effective=3.0,cap=3.0|esp3:raw=50.0,effective=3.0,cap=3.0
breakers=brk1:on,brk2:on
```

Siker kritérium: az élő grafikon három, közel azonos (3 A) szintet és 9 A összarámot mutat, az `output.txt` $\text{cap} = 3 \text{ A}$ értéket jelez mindhárom mérőnél, a megszakítók bekapcsolva vannak mindez 2 ciklus (6 s) után stabil.



10.3. ábra. Túlterhelt eset

10.4.4. Dinamikus újraelosztás: a nagy felhasználó kap teret

Ez a teszt a dinamikus viselkedést vizsgálja. A cél annak demonstrálása, hogy a rendszer nemcsak statikus túlterhelést tud kezelni, hanem képes valós időben reagálni a fogyasztói igények drasztikus változására is. Ez a forgatókönyv azt modellezi, ahogy egyes fogyasztók igénye lecsökken, a felszabaduló kapacitást pedig a rendszer automatikusan és a "max-min fair" elvnek megfelelően újraosztja egy másik, nagy igényű jelentkező fogyasztóhoz, miközben az összarám végig a globális kereten belül marad.

Bemenetek:

- `ALLOC_MAX_TOTAL=90`
- `BREAKER_MAX_TOTAL=120`
- `BREAKER_MIN_TOTAL=10`
- Menetrendek:
 - ESP1: $0\text{ s} \rightarrow 50\text{ A}$, $60\text{ s} \rightarrow 10\text{ A}$
 - ESP2: $0\text{ s} \rightarrow 50\text{ A}$, $60\text{ s} \rightarrow 10\text{ A}$
 - ESP3: $0\text{ s} \rightarrow 50\text{ A}$, $60\text{ s} \rightarrow 100\text{ A}$

Miért ez a beállítás? Az elején az igények azonosak (50, 50, 50 A), ez túl nagy a 90 A kerethez képest, ezért *fair* elosztás lép életbe: [30, 30, 30] A. Egy idő után két mérő visszaesik 10 A-ra, a harmadik 100 A-t kér; a felszabaduló 80 A-ból a keret kitöltéséhez a harmadik kap 70 A-t, így [10, 10, 70] A lesz a kiosztás.

Lépések és jelentésük:

1. **Reset** $t=0$ — szinkron kezdet mindenki biztosan 0-ról indul.
2. **START** — a vezérlő 3 s-os ciklusokban számolja újra az allokációt, a $t = 60\text{ s}$ utáni váltás az ezt követő ciklusban fog megjelenni.
3. **Megfigyelés** 0..80 s — várjuk $t = 60\text{ s}$ -nél az újra osztást a grafikonon.

Várt rendszerállapot

- 0..60 s: tényleges értékek [30, 30, 30] A, összáram = 90 A.
- 60+ s: ténylegesek [10, 10, 70] A, összáram = 90 A (a két kicsi igény teljesül, a maradék, pedig a nagyhoz kerül).
- *Megszakító*: végig be van kapcsolva, mert $90 < \text{BREAKER_MAX} = 120$ és $90 > \text{BREAKER_MIN} = 10$.

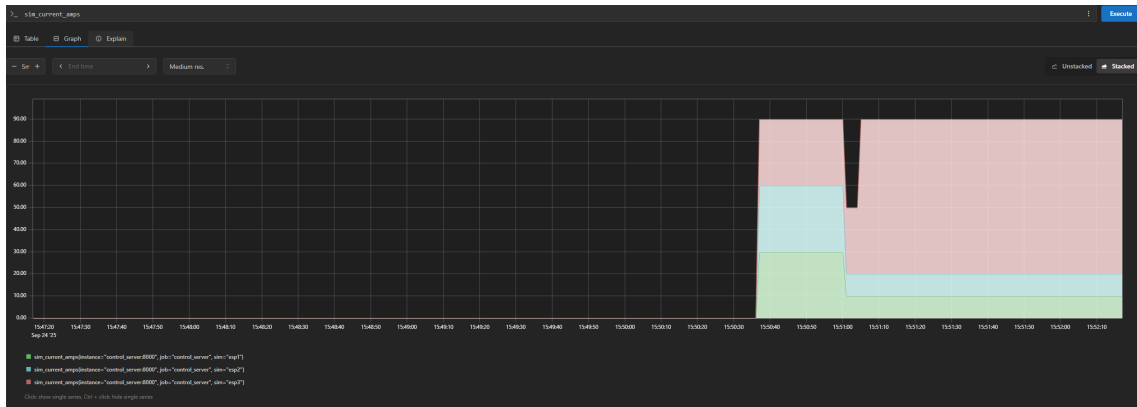
Hol ellenőrizhető?

- `output.txt`: 3 s-onként új sor; jellemző minták:

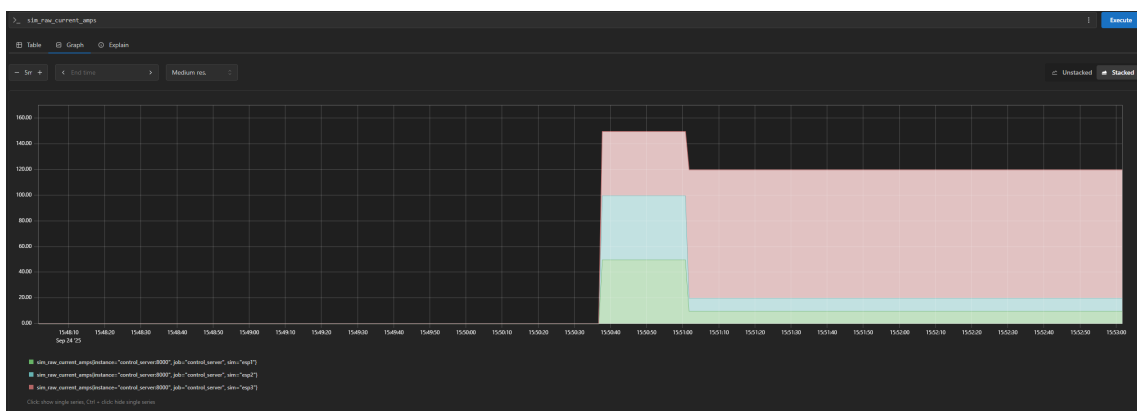
```
# t=3s (első szakasz)
sim_state=RUNNING sum_current_amps=90.0
sims=esp1:raw=50.0,effective=30.0,cap=30.0|esp2:raw=50.0,
effective=30.0,cap=30.0|esp3:raw=50.0,effective=30.0,cap=30.0
breakers=brk1:on,brk2:on

# t=63s (második szakasz, igényváltozás után)
sim_state=RUNNING sum_current_amps=90.0
sims=esp1:raw=10.0,effective=10.0,cap=10.0|esp2:raw=10.0,
effective=10.0,cap=10.0|esp3:raw=100.0,effective=70.0,cap=70.0
breakers=brk1:on,brk2:on
```

Siker kritérium: a grafikon két állapotba áll be: előbb 30/30/30 A, majd a $t = 60\text{ s}$ után 10/10/70 A, az összáram végig 90 A, a megszakítók végig bekapcsolva maradnak.



10.4. ábra. Dinamikus újraelosztás áramerősség



10.5. ábra. Dinamikus újraelosztás igények

10.4.5. Megszakító hiszterézis

Itt ebben a tesztben a megszakító vezérlési logikáját vizsgálom. A cél annak megmutatása, hogy a rendszer helyesen kezeli a kétlépcsős kapcsolást: a megszakító leold, ha az áramerősség meghaladja a felső küszöbértéket (`BREAKER_MAX_TOTAL`), de csak akkor kapcsol vissza, ha az áramfelvétel egy másik alacsonyabb érték (`BREAKER_MIN_TOTAL`) alá esik. Ez a viselkedés biztosítja, hogy a rendszer stabil, sűrű ki-be kapcsolás nem lesz a határérték körüli terhelésingadozás esetén sem. A teszt során az allokációs korlátozás szándékosan nem aktív.

Bemenetek:

- `ALLOC_MAX_TOTAL=50`
- `BREAKER_MAX_TOTAL=6`
- `BREAKER_MIN_TOTAL=3`
- Menetrendek:
 - ESP1: $0\text{ s} \rightarrow 2,0\text{ A}$, $40\text{ s} \rightarrow 0,5\text{ A}$
 - ESP2: $0\text{ s} \rightarrow 5,0\text{ A}$, $40\text{ s} \rightarrow 0,5\text{ A}$

– ESP3: $0\text{ s} \rightarrow 0,0\text{ A}$

Miért ez a beállítás? Kezdetben az összáram $2,0 + 5,0 + 0,0 = 7,0\text{ A}$, ami nagyobb, mint $\text{BREAKER_MAX_TOTAL} = 6\text{ A}$, ezért a megszakító *leold*, 40 s után a terhelések $0,5 + 0,5 + 0,0 = 1,0\text{ A}$ -ra esnek, ami kisebb, mint $\text{BREAKER_MIN_TOTAL} = 3\text{ A}$, így a megszakító *visszakapcsol*. Az $\text{ALLOC_MAX_TOTAL} = 50\text{ A}$ bőven a terhelések fölött van, ezért *allokációs korlátozás nem várható*.

Lépések és jelentésük:

1. **Reset** $t=0$ — szinkron indulás.
2. **START** — a vezérlő 3 s-os ciklusokban értékeli ki az adatokat. Az első ciklusban a $\geq 6\text{ A}$ miatt ki van kapcsolva, a 40 s utáni első ciklusban a $\leq 3\text{ A}$ miatt bekapcsol.
3. **Megfigyelés** 0..60 s — a naplóban egy off \rightarrow on átmenet látszik 40 s-nél.

Várt rendszerállapot

- 0..40 s: összáram $\approx 7,0\text{ A} \Rightarrow$ megszakító kikapcsolva.
- 40+ s: összáram $\approx 1,0\text{ A} \Rightarrow$ megszakító bekapcsolva.
- *Allokáció*: nincs korlát (nagy szám), mert $\sum d_i \ll \text{ALLOC_MAX_TOTAL}$.

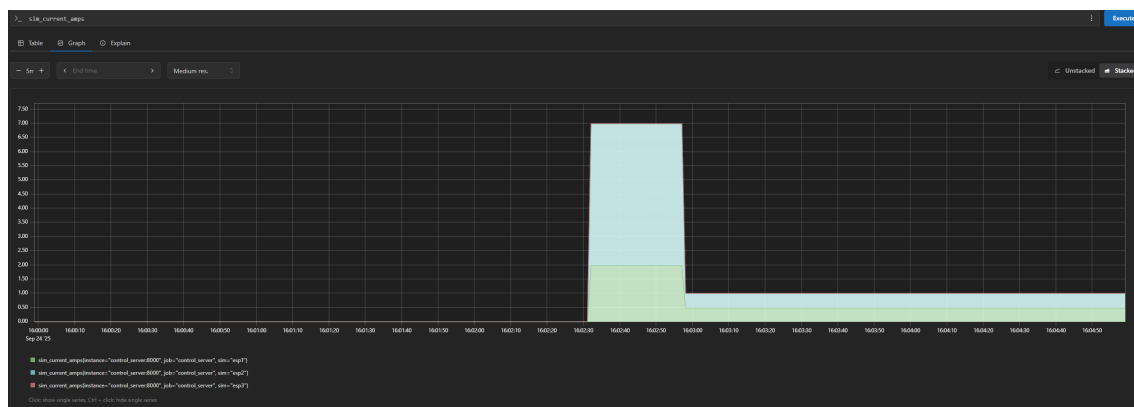
Hol ellenőrizhető?

- output.txt: 3 s-onként új sor; tipikus minták:

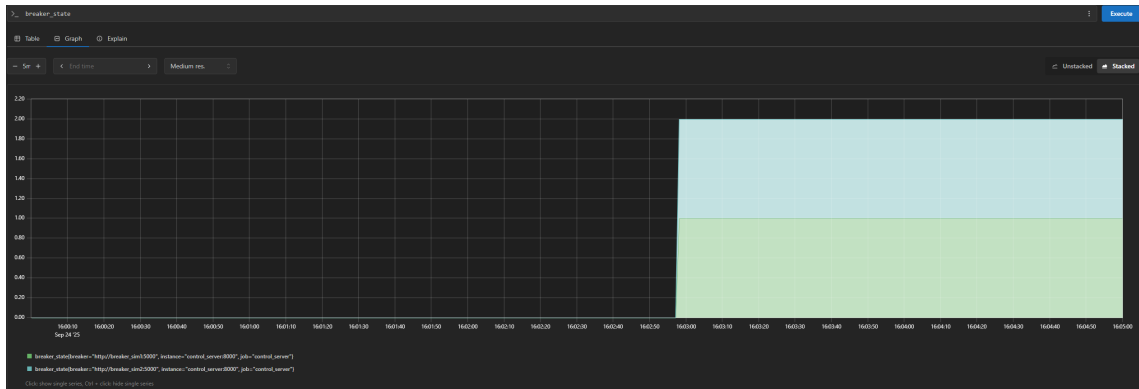
```
# t=3s (kezdeti szakasz)
sim_state=RUNNING sum_current_amps=7.0
sims=esp1:raw=2.0,effective=2.0,cap=1e9|esp2:raw=5.0,
effective=5.0,cap=1e9|esp3:raw=0.0,effective=0.0,cap=1e9
breakers=brk1:off,brk2:off

# t=42s (menetrendváltás utáni első ciklus)
sim_state=RUNNING sum_current_amps=1.0
sims=esp1:raw=0.5,effective=0.5,cap=1e9|esp2:raw=0.5,
effective=0.5,cap=1e9|esp3:raw=0.0,effective=0.0,cap=1e9
breakers=brk1:on,brk2:on
```

Siker kritérium: az élő grafikonon 0..40 s között $\sim 7\text{ A}$ körüli összáram mellett kikapcsolt állapot látszik, 40 s után $\sim 1\text{ A}$ mellett bekapcsolt, az output.txt ezt a off \rightarrow on váltást 2-3 cikluson belül egyértelműen tükrözi.



10.6. ábra. Megszakító áramerősség



10.7. ábra. Megszakító állapotok

10.4.6. Leállított mód (STOPPED)

Ez a teszt azt vizsgálja, hogy a vezérlő 'STOPPED' állapotban megfelelően viselkedik-e. A forgatókönyv igazolja, hogy a rendszer leállítása után a vezérlő valóban felfüggesztésre kerül, és a rendszer "befagyasztja" az utolsó ismert stabil állapotot. Annak ellenére, hogy a leállítás alatt a háttérben a bemeneti konfigurációk (pl. allokációs keret) megváltoztatható, a teszt sikeres, ha a vezérlő nem reagál ezekre, nem számol új korlátokat, és nem frissíti a kimeneti naplót.

Bemenetek:

- Kiindulás: a 3. scenárió stabil állapota
 - $ALLOC_MAX_TOTAL = 9$
 - $BREAKER_MAX_TOTAL = 12$
 - $BREAKER_MIN_TOTAL = 2$
 - $effective = [3, 3, 3]$ A
 - $sum = 9$ A, megszakítók on
- Módosítások STOPPED állapot alatt *csak fájlba írva*:
 - $ALLOC_MAX_TOTAL = 6$
 - ESP1 menetrend 1,0 A

Miért ez a beállítás? A cél annak igazolása, hogy STOPPED módban a vezérlő *nem avatkozik be*: nem számol ad új korlátokat, nem kapcsol megszakítót, a virtuális idő nem halad és a napló is megáll.

Lépések és jelentésük:

1. **STOPPED** — a `sim_control.txt` STOPPED-re áll, a vezérlési ciklus megáll, nincs új allokáció vagy megszakítóparancs.
2. **Konfiguráció módosítása** — $ALLOC_MAX_TOTAL = 6$ és ESP1 1,0 A változtatások *mentése* (de ez még nem lép életbe).

3. **Várakozás ~ 2 ciklusnyi időtartam** — mivel a rendszer áll, nem várható új státusz- vagy naplósor.

Várt rendszerállapot

- *Korlátok és effektív értékek:* változatlanul $[3, 3, 3]$ A (a leállítás *előtti* állapot szerint).
- *Megszakító:* változatlanul bekapcsolt állapotban van (nem történik átkapcsolás).
- *Idő és napló:* a virtuális idő nem halad, az `output.txt` *nem* bővül.

Hol ellenőrizhető?

- `output.txt`: az utolsó RUNNING sor után nem jelennek meg új bejegyzések STOPPED alatt, pl.:

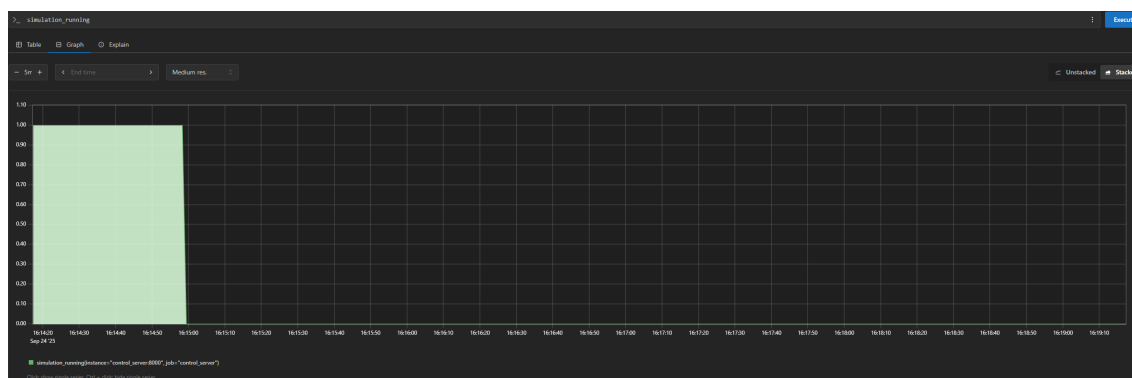
```
# utolsó sor STOPPED előtt
sim_state=RUNNING sum_current_amps=9.0
sims=esp1:raw=50.0,effective=3.0,cap=3.0|esp2:raw=50.0,effective=3.0,cap=3.0|esp3:raw=50.0,
      effective=3.0,cap=3.0
breakers=brk1:on,brk2:on

# STOPPED alatt nincs új sor
```

Siker kritérium: `/status.sim_state=STOPPED`, a korlátok és megszakító értékek megegyeznek a leállítás *előtti* állapottal és az `output.txt` nem bővül a várakozás ideje alatt.



10.8. ábra. stopped állapot áramerősség



10.9. ábra. stopped állapot állapotok



10.10. ábra. stopped állapot maximális áramok

Összegzés

A tesztek ellenőrzik, hogy (i) az allokáció a max-min fair elvet követi-e, (ii) a megszakító hiszterézise a küszöbértékekhez képest működik-e, (iii) a STOPPED állapot működik-e, és (iv) a rendszer minden ciklusban önmagát leíró idősoros naplót állít elő. Ezek együttesen biztosítják az elvárt funkció nális helyességet és transzparens viselkedést.

11. fejezet

Összefoglalás és kitekintés

A dolgozat célja egy nyílt forrású, konténerizált energetikai felügyeletre képes keretrendszer tervezése volt, ami alacsony költségű végponti eszközöket (ESP8266 mérő), Python-on alapuló vezérlő komponens, idősoros adattárolást (Prometheus) és ezenkívül vizualizációt (Grafana) tartalmaz. A rendszer az interfészeket szét választja a mérést és a döntéshozatalt, a beavatkozást pedig ipari protokollon (Modbus/TCP) keresztül valósítja meg a villamos hálózati eszközökön. Az üzemeltetési környezet teszt állapotban, ahogy én is használtam általában Docker Compose, nagyobb rendelkezésre állási igény esetén Kubernetes.

Eredmények és tanulságok. A szimulációs vizsgálatok azt mutatták, hogy a keretrendszer képes:

- a mért villamos mennyiségek folyamatos, Prometheus-kompatibilis exportjára és azok megjelenítésére
- determinisztikus beavatkozásra, vezetéknélküli hálózaton keresztül, ez gyors reagálást és reprodukálhatóságot biztosít
- globális áramkeret pontos követésére, adott esetben a túllépések gyors csillapítására és az erőforrások igazságos újraelosztására a max-min fair elv alapján
- skálázható, konténer-alapú üzemeltetésre, ami nagyban megkönnyíti a telepítést, a frissítést és a diagnosztikát.

Gyakorlati tapasztalat, hogy az egyszerű vezérlő rendszer fontosabb a túlbonyolított modellnél, a mérési zaj, a késleltetések és a végpontok nemlineáris viselkedése mellett a robusztus, determinisztikus vezérlő stabilabban teljesített. A komponensek laza csatolása és a metrika-alapú rendszer érdemben csökkenti a hibaelhárítás bonyolultságát.

A munka fő műszaki hozzájárulásai:

1. Egységesített mérési/vezérlési interfész energetikai rendszerekhez Prometheus-formátumú metrikákkal és REST és Modbus átalakítóval.
2. Max-min fair elosztású beavatkozási szabályozó integrációja ipari rendszerbe.
3. Konténer-alapú referenciaimplementáció Docker Compose vagy Kubernetes.

4. Grafana-alapú üzemeltetési, illetve diagnosztikai irányítópultok, előre tervezett riasztások és alap-telemetry.
5. Reprodukálható szimulációs rendszer, ami determinisztikusan teszteli a rendszer beállításait.

Korlátok és érvényességi fenyegetések. A vizsgálatok kontrollált környezetben zajlottak; a terepi viszonyok (hálózati zavarok, különböző végponti firmware-ek, szélsőséges terhelési profilok) további kihívásokat jelenthetnek. A biztonsági réteg alapértelmezetten a helyi hálózatra és egyszerű hitelesítésre támaszkodik; nagyvállalati környezetben szükséges a végpont- és szolgáltatásoldali tanúsítványkezelés és kulcsforgatás beépítése. A Modbus/TCP protokoll korlátai (nincs beépített titkosítás, korlátozott hibakezelés) szintén megfontolandók.

Jövőbeli munka. A rendszer fejlesztésének lehetséges irányai:

- **Biztonság és megbízhatóság:** mTLS alapú végpont-hitelesítés, kulcsforgatás, jogosultságkezelés.
- **Protokoll-tágítás:** IEC 60870-5-104 / IEC 61850 gateway, illetve modern ipari mezőbuszok támogatása a heterogén eszközparkhoz.
- **Fejlettebb szabályozás:** modellprediktív vagy hibrid (MPC + max-min) vezérlő vizsgálata időkorlátos optimalizálásra, költség- és hálózati korlátok együttes kezelésére.
- **Edge-képességek:** lokális döntésképeség és *graceful degradation* hálózati problémák esetén, OTA frissítési csatorna az ESP eszközökre.
- **Megfigyelhetőség és üzemeltetés:** trace-alapú hibakeresés (OpenTelemetry), automatikus eszköz-felfedezés, konfiguráció- és verziókezelés.
- **Valós terepi pilot:** több, egymást zavaró terhelés és megosztott hálózati infrastruktúra mellett végzett hosszú távú mérések, SLA-k és üzemeltetési költségek becslésével.

Zárásgondolat. Az elkészült keretrendszer egy átlátható, bővíthető és költséghatékony alapot ad az energetikai felügyeleti rendszer elkészítéséhez. Az egyszerű és robusztus szabályozási elvek, a metrika-központúság és a konténeres üzemeltetés együtt olyan eszköztárat alkotnak, ami ipari környezetekben is gyors bevezetést és megbízható működést tesz lehetővé.

Ábrák jegyzéke

2.1. Schneider Electric PME model[4]	3
2.2. Siemens EMS model[16]	4
3.1. Rendszerarchitektúra	7
3.2. NodeMCU (ESP8266) [14]	8
3.3. SCT-013 áramváltó [11]	9
3.4. Pinout [8]	10
3.5. Modbus adatstruktúra [10]	12
3.6. Keretrendszer architektúra	13
4.1. Water-filling elve telekommunikációban. [17]	15
5.1. Autótöltő [5]	18
5.2. Megszakító [6]	21
5.3. Prometheus [12]	21
5.4. Általam készített Grafana dashboard	24
7.1. Kubernetes architektúra [1]	29
7.2. Hibrid kubernetes topológia	32
8.1. Interfészek	34
9.1. Devpanel	39
9.2. Devpanel v2	40
9.3. Devpanel Presets fül	41
9.4. Devpanel Builder fül	42
9.5. Devpanel Files fül	42
10.1. Alaptesztek	47
10.2. Alulterhelt eset	49
10.3. Túlterhelt eset	50
10.4. Dinamikus újraelosztás áramerősség	52
10.5. Dinamikus újraelosztás igények	52
10.6. Megszakító áramerősség	53
10.7. Megszakító állapotok	54
10.8. stopped állapot áramerősség	55
10.9. stopped állapot állapotok	55
10.10 stopped állapot maximális áramok	56

Táblázatok jegyzéke

2.1. Rendszeráttekintés - összehasonlítás	5
---	---

Irodalomjegyzék

- [1] Mukhadin Beschokov: How to work with a kubernetes cluster? guide by wallarm, 2025. URL <https://www.wallarm.com/what/what-is-a-kubernetes-cluster-and-how-does-it-work>. Megnyitva: 2025-04-05.
- [2] Jean-Yves Le Boudec: Rate adaptation, congestion control and fairness: A tutorial. https://web.archive.org/web/20230422115954/https://icalwww.epfl.ch/PS_files/LEB3132.pdf, 2005. EPFL.
- [3] Docker Inc.: Deploy on kubernetes with docker desktop, 2025. URL <https://docs.docker.com/desktop/features/kubernetes/>. Megnyitva: 2025-04-05.
- [4] Ecostruxure™ power monitoring expert. <https://www.se.com/hu/hu/product-range/65404-ecostruxure-power-monitoring-expert/#overview>, 2025. Megnyitva: 2025-03-17.
- [5] Schneider Electric: Charging station evlink, 2025. URL <https://www.se.com/hu/hu/product/EVB3S07NC0/charging-station-evlink-pro-ac-ac-metal-7-4kw-32a-1p+n-t2-attached-cable-rdcdd-6ma-mnx-aux-/>. Megnyitva: 2025-05-18.
- [6] Schneider Electric: Masterpact mtz product range, 2025. URL <https://www.se.com/hu/hu/product-range/63545-masterpact-mtz/#products>. Megnyitva: 2025-05-18.
- [7] electrofunsmart: Iot szerver prometheus és grafana monitorozással egy esp8266 esetén, 2025. URL <https://www.hackster.io/electrofunsmart/iot-server-with-prometheus-and-grafana-monitoring-a-esp8266-9e0661>. Megnyitva: 2025-03-25.
- [8] ElectronicWings: Nodemcu development kit/board, 2023. URL <https://www.electronicwings.com/nodemcu/nodemcu-development-kitboard>. Megnyitva: 2025-05-01.
- [9] Simply Explained: Home energy monitor esp32 ct sensor emonlib, 2025. URL <https://simplyexplained.com/blog/Home-Energy-Monitor-ESP32-CT-Sensor-Emonlib/>. Megnyitva: 2025-03-22.

- [10] Instrumentation Tools: Background of modbus ascii and rtu data frames, 2025. URL <https://instrumentationtools.com/background-of-modbus-ascii-and-rtu-data-frames/>. Megnyitva: 2025-03-25.
- [11] Mikroelektronik: Yhdc sct013 100a 1v felfüggesztés típusú osztott magos áramérzékelő, 2025.
URL <https://mikroelektronik.hu/elektronikus-osszetevek/126660-yhdc-sct013-100a-1v-felfuggesztes-tipusa-osztott-magos-aramerzekelo.html>. Megnyitva: 2025-03-22.
- [12] Creator name or YouTube channel name if known: Title of video, 2025. URL https://www.youtube.com/watch?v=pcGg-U5d_n8. Megnyitva: 2025-03-25.
- [13] OpenEnergyMonitor: Interface with arduino, 2025.
URL <https://docs.openenergymonitor.org/electricity-monitoring/ct-sensors/interface-with-arduino.html>. Megnyitva: 2025-03-22.
- [14] Darshil Patel: Getting started with nodemcu (esp8266) on arduino ide, 2020. URL <https://projecthub.arduino.cc/PatelDarshil/getting-started-with-nodemcu-esp8266-on-arduino-ide-b193c3>. Megnyitva: 2024-11-08.
- [15] Prometheus: Prometheus - dimenzionális adatok: kulcs-érték párokon alapuló modell, 2025. URL <https://prometheus.io/>. Megnyitva: 2025-03-25.
- [16] Simatic energy management software. <https://www.siemens.com/global/en/products/automation/industry-software/automation-software/energymanagement.html>, 2025. Megnyitva: 2025-03-17.
- [17] Jan Sláčík–Petr Mlynek–Martin Ruzs–Petr Musil–Lukas Benesl–Michal Ptáček: Broadband power line communication for integration of energy sensors within a smart city ecosystem. *Sensors*, 21. évf. (2021) 10. sz., 3402. p. See Fig. 2 for the principle of the water-filling algorithm.
- [18] Erich Styger: Controlling an ev charger with modbus rtu, 2022. URL <https://mcuoneclipse.com/2022/12/31/controlling-an-ev-charger-with-modbus-rtu/>. Megnyitva: 2025-03-24.
- [19] TechTutorialsX: Esp8266 posting json data to a flask server on the cloud, 2017. URL <https://techtutorialsx.com/2017/01/08/esp8266-posting-json-data-to-a-flask-server-on-the-cloud/>. Megnyitva: 2025-03-24.
- [20] The Kubernetes Authors: Kubernetes documentation, 2025.
URL <https://kubernetes.io/>. Megnyitva: 2025-04-05.
- [21] Doc Walker: Modbusmaster: Arduino library for modbus communication, 2016.
URL <https://github.com/4-20ma/ModbusMaster>. Megnyitva: 2025-04-07.