



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Villamos Energetika Tanszék

Táczai István

Energiatárolóval megvalósított vezérlési stratégiák a decentralizálódó villamosenergia-rendszer támogatására

Tudományos Diákköri Konferencia Dolgozat

KONZULENS

Dr. Vokony István

BUDAPEST, 2015.

Összefoglaló

A next generation smart grid without energy storage is like a computer without hard drive: severely limited.

(Katie Fehrenbacher, GigaOm)

A növekvő megújuló penetráció (különös tekintettel a napelemes termelőkre) komoly kihívások elé állítja a közép- és kiefeszültségű hálózat üzemeltetőket. Bizonyos helyzetekben előállhat, hogy egy alacsony rendszerterhelés (a fogyasztói profilok alapján) és egy jelentős betáplálási viselkedés időben egybeesik. (Erre jó példa: a napelemek optimális maximuma 12 és 14 óra közé tehető, míg a lakossági profil ebben az időszakban alacsony igényt mutat.) A problémát fokozza, ha olyan típusú napelemek terjednek el, amelyeknek elegendő az egy fázisú betáplálás. Így a nem kellően gondos kivitelezés eredményeképpen nemcsak túlterhelésre lehet számítani, hanem jelentős aszimmetriára, valamint az egyéb feszültség minőségi mutatók (MSZ EN 50160) esetében is romlás várható. Javasolt a proaktív tervezés, viselkedés: a későbbi jelentős hálózatfejlesztési beruházásokat elkerülendő megoldás lehet energiatárolók üzembe helyezése, vagy a telepítés elemzése, vizsgálata tűnik megalapozott beavatkozásnak. Azokban az időszakokban, amikor a megújuló források többletet termelnek a hálózatra, és az energiaáramlás hagyományos iránya megváltozik, egy megfelelően választott kiefeszültségű hálózati ponton telepített energiatároló ezt az energiát betárolja. Majd, amikor megnőnek az energiaigények, ennek leadásával javítja a terhelési görbét.

A decentralizált struktúrákban a teljesítményáramlások szabályozásakor a hálózat értelmezhető jól elkülöníthető microgridek összességéként. Ekkor az egyes elemek számára vezérlési stratégiák fogalmazhatóak meg bizonyos optimumok elérésére: növelhető az ellátásbiztonság, javíthatóvá válnak bizonyos minőségi mutatók vagy akár kereskedési folyamatokban való részvétel is megoldható a külső határfeltételek ismeretében. A dolgozat fő célja ezen algoritmusok implementálásnak bemutatása az elosztói hálózaton, a fejlesztési lehetőségek ismertetése. Valószerű változásokat követő, prediktív és tanuló algoritmusok tesztelése szimulációs és valós környezetben egyaránt, konklúzió megfogalmazása az összetett hálózatfejlesztés jövőbeni lehetőségeire. A vizsgált modellek elvi hátterén, a fizikai és informatikai környezetén, valamint a teljes kompozíció összeállításán keresztül bemutatható, hogy a jövő smart grid hálózata esetén milyen kihívásokkal kell szembenéznie az üzemeltetőknek és fejlesztőknek.

Tartalomjegyzék

Összefoglaló	i
Tartalomjegyzék	ii
Ábrajegyzék	vii
Táblázatjegyzék	x
Egyenletjegyzék	xi
1 Az energiatárolás szükségessége	12
1.1 Motiváló folyamatok, a probléma aktualitása	12
1.2 Az energiatárolás fogalma	12
1.3 Konkrét tárolási mechanizmusok felsorolása	13
2 Alkalmazások a villamosenergia-rendszer támogatására	16
2.1 Áttekintés	16
2.2 Energiatermelés támogatása és rendszerszintű alkalmazások	17
2.2.1 Szabályozás	17
2.2.2 Gyors szabályozás	17
2.2.3 Csúcslevágás	18
2.2.4 Forgótartalékok	18
2.2.5 Inercia tartalék/cseretartalék	18
2.2.6 „Black start”	18
2.2.7 Árarbitrázs	19
2.2.8 Izolált hálózatok	19
2.3 Távvezeték- és elosztó-hálózati alkalmazások	19
2.3.1 Feszültségtámogatás	19
2.3.2 Fázisjavítás	19
2.3.3 Hálózati csatlakozási díjak	19
2.3.4 Befektetési késleltetések	19
2.3.5 Lokális kapacitás	20

2.3.6	Megújuló energiaforrás integráció	20
2.4	Felhasználó közeli alkalmazások	21
2.4.1	Teljesítményminőség	21
2.4.2	Megbízhatóság	21
2.4.3	Kiskereskedelmi díjak	22
2.5	Technológiák és alkalmazások összekapcsolása	22
3	A decentralizált hálózati struktúra	24
3.1	A decentralizáció jelensége, előnyei és hátrányai	24
3.2	Elosztóhálózatok a megváltozott struktúrában	25
3.3	Energiatároló berendezések kiválasztási folyamata elosztói engedélyesek vagy az érintett feszültségszinteken szereplő felelősök számára	26
3.3.1	A folyamat főbb lépései, standardizációs lehetőségek	26
3.3.2	Az elemzett lépések és az ezekhez tartozó konkrét megoldások	26
4	Modellezési metódusok, a Fóti Élhető Jövő Park	28
4.1	Az Élhető Jövő Park rövid jellemzése	28
4.2	A villamos modell megalkotása	29
4.2.1	Villamos termelői egységek	29
4.2.2	Villamos fogyasztók	31
4.2.3	Akkumulátoros energiatároló berendezés	35
4.2.4	Kábeles csatlakozások, gyűjtősinék, elosztók, externális hálózat	36
4.2.5	Load flow szimuláció	38
4.3	A modellalkotás általánosítására vonatkozó törekvések sikerességéhez szükséges megkötések ..	40
4.4	A standardizált analizáló script funkciói	40
5	Vezérlési stratégiák megfogalmazása	43
5.1	Smart microgrid koncepció	43
5.2	Az algoritmusok döntési mechanizmusai	44
5.2.1	Statikus algoritmus	44
5.2.2	Valós idejű load flow követés	44

5.2.3	Előre programozott menetrendkövetés	45
5.2.4	Model Predictive control, állapotterez szabályozás.....	45
5.3	Lehetséges célfüggvények	46
5.3.1	Valós és virtuális szigetüzem kialakítása	46
5.3.2	Menetrendszerű meddőteljesítmény igény kompenzálása	47
5.3.3	Ellátásbiztonság növelése	48
5.3.4	Speciális minőségi követelmények: meddőáramlási küszöb tartása.....	49
5.3.5	Speciális minőségi követelmények: feszültségtartás egy adott hálózati ponton	50
5.3.6	Energiakereskedelem: költséghatékonysági optimum	51
5.3.7	Hálózati veszteségek csökkentése	52
5.4	Általános határfeltételek	53
5.4.1	Egyensúlyi feltételek.....	53
5.4.2	Elemek korlátossága	53
5.4.3	Időfelbontás korlátai.....	54
5.5	Adaptivitás.....	54
5.6	Prediktivitás.....	55
5.7	Fejlesztési lehetőségek, aggregát működés.....	56
6	Szimulációs és mérési eredmények [F3]	57
6.1	A DigSilent Power Factory program szimulációs környezetében futtatott tesztek	57
6.1.1	A tároló teljesítményének vezérlése.....	58
6.1.2	A tárolt energia számításának implementálása a kapacitás határfeltételek kiértékeléséhez .	62
6.1.3	1. Stratégia: virtuális szigetüzem megvalósítása	63
6.1.4	2. Stratégia: Energiakereskedelem magas és alacsony küszöbökkel.....	65
6.1.5	3. Stratégia: Energiakereskedelem medián érték alapján.....	67
6.1.6	4. Stratégia: Biztonsági tartalékképzés a lokális termelés kiesésének kompenzálására	68
6.1.7	Fejlesztések a tapasztalatok alapján, továbblépési lehetőségek	69
6.1.8	Gyakorlati felhasználás	72
6.2	Az ELMŰ Nyrt. hálózatán implementált algoritmusok mérési eredményei	72

6.2.1	A SCADA CiCode környezete, fejlesztői környezet	72
6.2.2	A vezérlésekre vonatkozó megkötések	73
6.2.3	Kiesési tartalékképzés a napelemes ellátás támogatására	73
6.2.4	Valós idejű és prediktív elemeket tartalmazó virtuális szigetüzem létesítése	74
6.2.5	Energiakereskedelem árelfogadó stratégiával	76
6.2.6	Fejlesztési tervek, gyakorlati alkalmazás	77
7	Konklúzió	78
7.1	A kiválasztási folyamat standardizálása, a modell felhasználhatósága	78
7.2	Növekvő megújuló penetráció, prognózisok a közeljövőre, hálózatfejlesztési irányelvek	78
8	Összefoglalás	80
9	Irodalomjegyzék	81
	Függelék	1
F1	A villamos modell ellenőrző számításai	2
F2	Technológiák leírása [4] [5][7][8][3]	5
F2.1	Áttekintés	5
F2.2	Technológiák leírása	6
F2.2.1	Szivattyúzott víz (PHS)	6
F2.2.2	Sűrített levegő (CAES)	8
F2.2.3	Lendkerék (Flywheel)	9
F2.2.4	Ólomsavas akkumulátor (lead acid)	10
F2.2.5	Nátrium-kén akkumulátor (NaS)	10
F2.2.6	Lítium-ion akkumulátor (Li-ion)	11
F2.2.7	NiCd, NiMH, NaNiCl (Zebra), Zn-levegő, Vanádium-redox akkumulátorok	12
F2.2.8	Hidrogén (H)	15
F2.2.9	Syngas (SNG)	15
F2.2.10	Szuperkapacitás (DLC)	16
F2.2.11	Szupravezetős tároló (SMES)	17
F2.2.12	Termikus tároló (TES)	18

F2.3	Összehasonlítás	19
F3	Programkód részletek.....	23
F3.1	A Szimulációs program filteres objektum beolvasó eljárásának váza	23
F3.2	A szimulációs program teljesítmény érték beállítása kisütés esetén	23
F3.3	CiCode: Időlépés a végtelen ciklusban.....	24
F3.4	CiCode: Teljesítmény értékének beállítása	24
F3.5	CiCode: Nettó áramlás számítása	25
F3.6	CiCode: Adatlekérés trendekből	25

Ábrajegyzék

1-1. ábra: energiatároló technológiák csoportosítása [8].....	13
2-1. ábra: alkalmazások a villamosenergia-rendszer segítésére	16
2-2. ábra: frekvencia szabályozás lehetséges megvalósítása [8]	17
2-3. ábra: hálózati csúcsterhelések menedzselése [8].....	18
2-4. ábra: megújuló energiaforrások részesedési arányának felső határa [8]	21
2-5. ábra: Németország energiamixének változása [8].....	21
3-1. ábra: a decentralizált hálózat elemei és kapcsolataik [ILSR]	24
3-2. ábra: az áramlási irányok megváltozásának szemléltetése [EPRI]	25
4-1. ábra: a fűtési hálózat helyszínrajza [22]	28
4-2. ábra: napelemek karakterisztikája (24 óra)	30
4-3. ábra: törpe vízerőmű karakterisztikája (24 óra)	30
4-4. ábra: Parkoló locsoló hatásos teljesítmény felvétele (24 óra)	31
4-5. ábra: parkoló locsoló meddőteljesítmény felvétele (24 óra)	31
4-6. ábra: pályalocsoló hatásos teljesítmény felvétele (24 óra)	32
4-7. ábra: pályalocsoló meddőteljesítmény felvétele (24 óra)	32
4-8. ábra: pályavilágítás hatásos teljesítmény felvétele (24 óra).....	33
4-9. ábra: pályavilágítás meddőteljesítmény felvétele (24 óra)	33
4-10. ábra: iroda teljesítményfelvétele (24 óra)	34
4-11. ábra: közvilágítás hatásos teljesítmény felvétele (24 óra).....	34
4-12. ábra: közvilágítás meddőteljesítmény felvétele (24 óra).....	34
4-13. ábra: falitöltő teljesítmény felvétele (24 óra).....	35
4-14. ábra: hőszivattyú teljesítmény felvétele (24 óra)	35
4-15. ábra: akkumulátor jellemző töltési-kisütési görbéi	36
4-16. ábra: 240 mm ² rézkábel adatainak felvétele	37
4-17. ábra: 150 mm ² rézkábel adatainak felvétele	37
4-18. ábra: a mögöttes hálózat teljesítményáramlása (24 óra)	38
4-19. ábra: a megépített topológia.....	38
4-20. ábra: összfogyasztás görbe (24 óra)	39
4-21. ábra: össztermelés görbe (24 óra).....	39
5-1. ábra: a Smart Microgrid hálózat szereplői és kapcsolatuk megjelenítése [Zreyas]	43
5-2. ábra: Schneider-Electric SCADA adatgyűjtés és vezérlés áttekintő rajza [Schneider Electric]	45
5-3. ábra: állapotterez szabályozó struktúra terhelésbecslővel [BME].....	46
5-4. ábra: virtuális szigetüzem vezérlés folyamatábrája.....	47

5-5. ábra: menetrendszerű meddőkompenzálás folyamatábrája.....	48
5-6. ábra: megbízhatóság függvény folyamatábrája	49
5-7. ábra: meddőáramlás korlátozás vezérlés folyamatábrája	50
5-8. ábra: feszültségtartás vezérlés folyamatábra.....	51
5-9. ábra: energiakereskedelmi vezérlés folyamatábrája.....	52
5-10. ábra: az ELMŰ mögöttes hálózatának meddőteljesítmény leadása a pályavilágítás bekapcsolásakor (30 perces mért adat)	55
5-11. ábra: HUPX energiaár adatok, 2013. július [HUPX].....	56
6-1. ábra: 1 órás időléptékkel megvalósított kompenzáció (24 óra)	59
6-2. ábra: a nettóáramlás (narancs) és kompenzált áramlás (kék) különbségei órás lépték esetén (24 óra) .59	
6-3. ábra: 15 perces időlépték esetén az energiatároló teljesítménye (kék) és a kompenzált teljesítményáram (narancs) (24 óra)	60
6-4. ábra: Perces nagyságrendű időlépés esetén a kompenzálás nélküli (kék) és kompenzálás utáni (narancs) teljesítményáram (24 óra)	60
6-5. ábra: A kompenzált teljesítményáram (kék) és az energiatároló berendezés teljesítménye (narancs) (24 óra).....	61
6-6. ábra: kompenzálás nélküli teljesítményáram (narancs) és a kompenzált teljesítményáram összevetése (24 óra).....	62
6-7. ábra: a kapacitáskorlát szemléltetése tartalékképzési üzemben, kimaradás és visszakapcsolás mellett: 40 kWh és 20 kW határok (24 óra)	63
6-8. ábra: Energiatároló paraméterek változása 15 perces időléptékben megvalósított virtuális szigetüzem esetén (24 óra)	64
6-9. ábra: hálózathálóból vételezett teljesítmény 15 perces időléptékben megvalósított virtuális szigetüzem esetén (24 óra)	64
6-10. ábra: Hálózathálóból vételezett teljesítmény másodperces nagyságrendű időlépték esetén (24 óra)	64
6-11. ábra: Energiatároló teljesítménye és a hálózati csatlakozási ponton történő áramlások összevetése (24 óra).....	65
6-12. ábra: Energiaár alapú kereskedési küszöbök.....	66
6-13. ábra: Energiakereskedés felső és alsó határértékekkel (24 óra)	67
6-14. ábra: Energiakereskedés középértékes döntési küszöb alapján (24 óra)	68
6-15. ábra: kapacitás és teljesítmény értékek egy 22 órás kiesés esetén (24 óra)	68
6-16. ábra: tartaléküzem egy korai kiesés és későbbi visszaállás esetén (24 óra)	69
6-17. ábra: válaszidő ábrázolása adott eltolási idővel (24 óra)	70
6-18. ábra: hatásfok változó hatása (24 óra)	71
6-19. ábra: kapacitáshatár elérés és kapcsolási műveletek száma (24 óra)	71

6-20. ábra: energiamennyiség változása a virtuális szigetüzem éjszakai ciklusában	75
6-21. ábra: az egyes döntési pontokon beállított teljesítményértékek	75
6-22. ábra: teljesítményváltozás túlnyomóan eladási időszakban	76
7-1. ábra: megújuló energiaforrások részesedésének várható növekedése [8]	79
F9-1. ábra: Napi görbék összegzése	3
F9-2. ábra: nettó teljesítményáramlás	4
F9-3 ábra: a technológiák típusai	5
F9-4 ábra: technológiai fejlettség	5
F9-5 ábra: kiépített kapacitás 2014 januárjában	6
F9-6 ábra: szivattyúzott víz tározó sematikus keresztmetszeti rajza	7
F9-7 ábra: sematikus CAES elrendezés földalatti tárolóval.....	8
F9-8 ábra: lendkerék robbantott ábrája	9
F9-9 ábra: NaS akkumulátor	11
F9-10 ábra: Lítium-ionos akkumulátor részegységei, felépítése.....	12
F9-11 ábra: NiCd konstrukció	13
F9-12 ábra: NaNiCl szerkezeti struktúra	13
F9-13 ábra: a fém-levegő akkumulátor szerkezete	14
F9-14 ábra: Vanádium-redox elem sematikus felépítése	14
F9-15 ábra: 2,5 V 5000 F szuperkapacitás kialakítás.....	16
F9-16 ábra: SMES konstrukció Japánból (100 kWh)	17
F9-17 ábra: Smart Grid és tárolók kapacitásléptékű kapcsolata [8]	20
F9-18 ábra: Névleges teljesítmény-energia diagram [8].....	21
F9-19 ábra: kisütési idő-névleges teljesítmény diagram [8]	21
F9-20 ábra: teljesítménysűrűség-energiasűrűség diagram [8]	22
F9-21. ábra: Filterek segítségével történő hálózatbejárás és objektumokkal való összerendelés	23
F9-22. ábra: kisütési teljesítmény beállítása a kapacitáskorlát figyelembe vételével.....	24
F9-23. ábra: a szubrutin végtelen ciklusának struktúrája, várakozási beállítás implementálása	24
F8-9-24. ábra: töltőáram beállítás implementálása	25
F9-25. ábra: nettó áramlás beállító kódrészlet.....	25

Táblázatjegyzék

1-1. táblázat: főbb technológiák költségei [1]	15
2-1. táblázat: pillanatos kimaradások költségei, USA [3]	21
2-2. táblázat: átlagos kimaradási díjak, USA [3].....	22
2-3. táblázat: technológiák és alkalmazások összekapcsolása [8]	22
4-1. táblázat: akkumulátor mérendő paraméterei	36
4-2. táblázat: a bemeneti paraméterek listája.....	42
F8-1. táblázat: a modellezés eredményei összevetve a valós mérési körülményekkel.....	4
F8-2. táblázat: feltörekvő akkumulátor technológiák összehasonlítása	12
F8-3. táblázat: karakterisztika adatok.....	19

Egyenletjegyzék

2-1. egyenlet: Megújuló energiaforrások részesedési arányának behatárolása	20
5-1. egyenlet: A teljesítményegyensúly értelmezése hálózati szereplők csoportjaira	53
5-2. egyenlet: az elemek teljesítményének korlátossága	53
5-3. egyenlet: biztonságos működés miatti teljesítménykorlátozás	53
5-4. egyenlet: biztonságos működés miatti kapacitás korlátozás	54
5-5. egyenlet: a teljesítménytényező lehetséges értékei	54
5-6. egyenlet: az időfelbontás szemléletessége: T db minta egy adott intervallumon	54
F-8-1.1 egyenlet: A NaS akkumulátorokban lejátszódó kémiai folyamat	11

1 Az energiatárolás szükségessége

1.1 Motiváló folyamatok, a probléma aktualitása

Az energetikai rendszerek vizsgálatakor számos esetben találkozhatunk azzal a problémával, hogy az energia elosztása nem csak térben, de időben is szükséges. Ez a feladat, mint egy új dimenzió jelenik meg, és az ellátást alapvetően befolyásolja. Számos alkalmazás felsorolható, melyek növelik a hálózat rugalmasságát és kiegyensúlyozottságát, ezzel elősegítve a hatékonyság növekedését.[3]

A világpolitika környezetvédelemhez való viszonya is lényeges tényező: az energiahatékonyság növelése, a dekarbonizáció és a megújuló energiaforrások termelési részesedésének növelése egyaránt pozitív hatással lehet az energiatárolók elterjedésére. A globális felmelegedés kérdését vitató konferenciák valamint az Európai Unió 20/20/20-as vállalásai tipikus példái ennek. Ezen változások azonban magukkal hozzák azt a problémát, hogy immáron nem csak az igények tekinthetők változónak, hanem a termelés is, hiszen az időjárás közvetlen hatással bír az egyre inkább terjedő nap- és szélenergiákra. A teljesítményáramlás eddig konvencionálisan egyirányú volt, az ilyen jellegű hálózatok esetén azonban a kétirányú áramlásokra is fel kell készülni. [4][5][6]

A villamosenergia-rendszer kiépítésekor az energiatárolás nem játszott szerepet, mivel az energiaátalakítási határfoka alacsonynak bizonyult, valamint a költségei is túl magasak voltak. Ez az oka annak, hogy a hálózat tervezésekor az alapelv az volt, hogy az össztermelés minden időpillanatban meg kell, hogy egyezzen a teljes fogyasztással a névleges frekvencián. Manapság azonban a technológiák rohamos fejlődése és a változó igények újra reflektorfénybe hozták a tárolás kérdését. Teljesen újszerű megoldások szükségesek a hálózatfejlesztésben a terhelés csökkentésére, hiszen ezek a rendszerek nem ilyen üzemi körülményekre lettek megalkotva. A decentralizált hálózat teljes elterjedésének fontos lépése lehet a microgrid szintű struktúrák önálló vezérlésének megjelenése. Ebben a folyamatban pedig a villamos energia tárolása kulcsszereplő, megfelelő implementálás mellett képes az átmenet költséghatékonyságának biztosítására, a kellő flexibilitás megteremtésére. [23]

A jövőbeni hálózatfejlesztési irányzatok sokkal összetettebb mérési és szabályozási algoritmusokat alkalmaznak, melyben a jól mozgatható, decentralizált tároló struktúra növelheti a megbízhatóságot és ellátásminőséget. Ezentúl a villamos autók piacának megjelenése, valamint az időszakos termelés szabályozásának kérdései is erősen kapcsolódnak az energiatárolás kérdéséhez. [5]

1.2 Az energiatárolás fogalma

Energiatárolónak nevezzük az olyan fizikai eszközt, amely képes az energia generálás utáni időbeni abszorbeálására, majd leadására, illetve további felvételére az igények függvényében. A tárolás módja

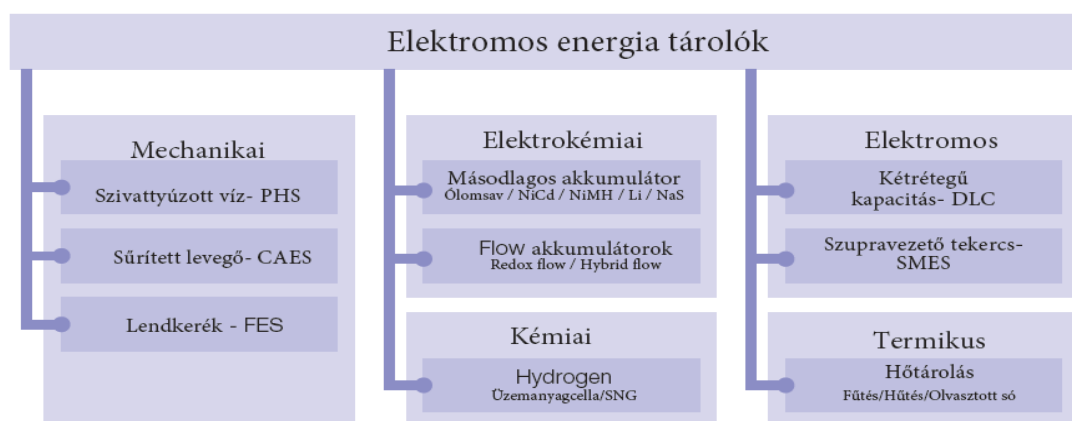
(főként fizikai közege) alapján tipizálhatjuk a különböző technológiákat. Egy adott eszköz jellemzésére alkothatunk egy összetett karakterisztikát amennyiben ismerjük a jellemző paramétereit. Ennek segítségével összehasonlíthatjuk más típusokkal, vizsgálhatjuk a rendszerbe illesztés lehetőségeit, meghatározhatjuk a potenciális alkalmazási területeket. A főbb elemek a következők: [8][3][7]

- **Teljesítmény** (Power): $[P]=W$
- **Kapacitás** (Energy/Capacity): $[E]=Wh$ (J)
- **Élettartam** (Lifetime): $[T]=\text{év}$ (s)
- **Hatásfok** (Efficiency): $[\eta]=\%$
- **Kibocsátási idő** (Discharge time): $[td]=\text{óra}$ (s)
- **Válaszidő** (Response time): $[tr]=\text{perc}$ (s)
- **Ciklusszám** (Cycle lifetime): $[c]=db$
- **Méret** (Size): $[p]=Wh/kg$ vagy Wh/m^3

A leírás standardizálásához egy alapvető terminológia tehát adott. Az üzembe helyezéskor azonban a konkrét definíciókat mindig tisztázni kell, illetve szükséges a megfelelő protokollok implementálása, komponensek közti kommunikáció létesítése és az összekapcsolási szükségletek meghatározása (kimeneti minőség, tolerancia és szinkronizációs adatok).

1.3 Konkrét tárolási mechanizmusok felsorolása

Az energiatárolási lehetőségeket alapvetően a tárolás mechanizmusa, azon belül is az energia megjelenési formája szerint csoportosíthatjuk. További fontos paraméter –mivel a legtöbb típusról kevés valós üzemi körülmények közt mért adatunk van- az adott technológia érettsége.[8]



1-1. ábra: energiatároló technológiák csoportosítása [8]

A dolgozat függelékében a potenciális lehetőségek részletesebb ismertetése megtalálható. Lényegében a fontos az, hogy a különböző karakterisztika adatok alapján milyen típus választható egy adott alkalmazás

megvalósítására. Esetünkben a csoportosítási és összekapcsolási elvek főként a teljesítményértékek alapján történnek:

- *nagy beavatkozó képesség* (100MW+)
 - szivattyúzott víz
 - sűrített levegő
 - termikus tárolók
 - kémiai tárolás (Hidrogén, Syngas)
- *Hálózat támogató rendszerek* (MW)
 - szuperkapacitás
 - szupravezetős energiatároló
 - lendkerék
 - Ólomsavas akkumulátor
 - Li-ion akkumulátor
 - NaS akkumulátor
- *Fogyasztóoldali alkalmazások* (kW)
 - szuperkapacitás
 - lendkerék
 - ólomsavas, Li-ion, NaS akkumulátor

Egy rövid kitekintést érdemes tenni a költségekre, ugyanis ez játssza a központi szerepet azokban a véleményekben, amelyek az energiatárolás ellen szólnak. Alapvetően minden moduláris rendszer különbözik, így konkrét számokat csak speciális információk ismeretében mondhatunk. A leginkább ismert típusok esetén azonban lehet egy jó becslést adni, mellyel helyes közelítő számítások végezhetőek. Ezen túlmenően speciálisan alkalmazásokhoz csatolva tudunk pontosabb eredményt szolgáltató módszertanokat kialakítani, mely esetén a táblázatban szereplő alap tőkeköltségeket és szintezett költségeket megfelelő súlyozással vesszük figyelembe. [3][1]

1-1. táblázat: főbb technológiák költségei [1]

	Ólomsavas akkumulátor	Li-ion akkumulátor	NaS akkumulátor	Lendkerék	Sűrített levegő	Szivattyúzott víz
Kisütési teljesítmény tőkekölttség [\$/kWh]	300-800	400-1000	1000-2000	2000-4000	800-1000	1000-4000
Kapacitás tőkekölttség [\$/kWh]	150-500	500-1500	125-250	1500-3000	50-150	100-250
Tárolás szintezett költisége	0.25-0.35	0.30-0.45	0.05-0.15	nincs adat	0.10-0.20	0.05-0.15
Éves működési költiségek [\$/kWh-év]	30	25	15	15	5	5

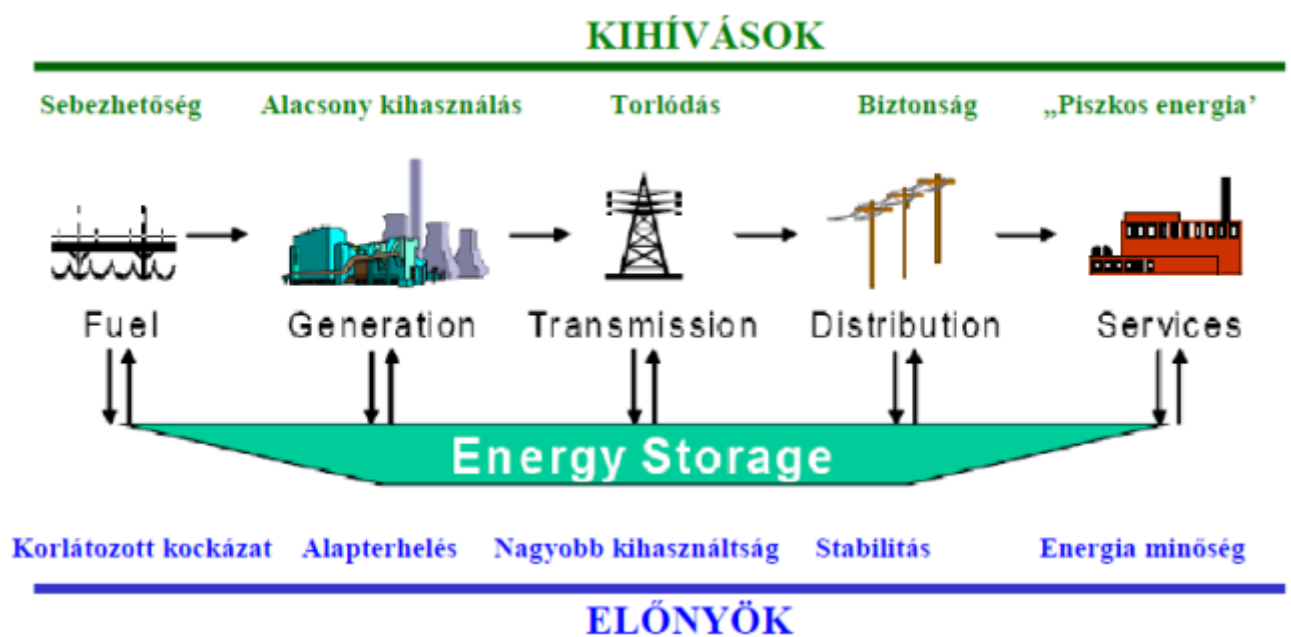
2 Alkalmazások a villamosenergia-rendszer támogatására

2.1 Áttekintés

Az energiatároló technológiák rendszerbe csatolása számos pozitív hatást vonhat maga után. Ezen alkalmazási területeket rendezhetjük hálózati szerepük alapján: [3][4][5][7][8]

- *Fogyasztói berendezések*
- *Elosztói hálózat* (DSO: Distribution System Operator) támogatása
- *Átviteli hálózat* (TSO: Transmission system operator) alkalmazásai
- *A teljes rendszer egészét befolyásoló berendezések*
- *Energiatermelés támogatása*

Az egyes szegmensek sok lehetőséget rejtenek magukban, a különböző alkalmazások pedig bizonyos esetekben párhuzamosíthatóak, ezzel halmozva a telepített berendezés hasznosságát. [3]



2-1. ábra: alkalmazások a villamosenergia-rendszer segítésére

Ezen felhasználások esetén a berendezések méreteitől és üzemétől függően erősen eltérő költségeket és bevételt tapasztalhatunk. Igazán hasznos alkalmazás az, amelyik nem csak a hálózati fizikai tulajdonságait javítja, hanem pénzügyi szempontból is pozitív mérlegre képes. Ennek vizsgálata azonban összetett feladat, amely minden esetben körültekintő kiválasztási folyamatot eredményez: pontosan ismernünk kell a szükséges kapacitást és az üzemi működés jellegét. Csak alapos számítások alapján lehet a megfelelő technológiát az adott alkalmazáshoz csatolni a kívánt eredmény eléréséhez.

A különböző alkalmazások egy teljes körű összegzésével a későbbiekben az elvégzett szimulációs és mérési tapasztalatokat kapcsolhatjuk össze, megmutatva, hogy az adott feszültségszinteken egy közel teljes körű elemzési eljárás alakul ki az eredmények alapján. Láthatóvá válik, hogy a különböző megvalósítások a teljes rendszerre hatással vannak, az eljárások megvalósításával pedig a hálózat egésze hatékonyabbá tehető. [3][7][8]

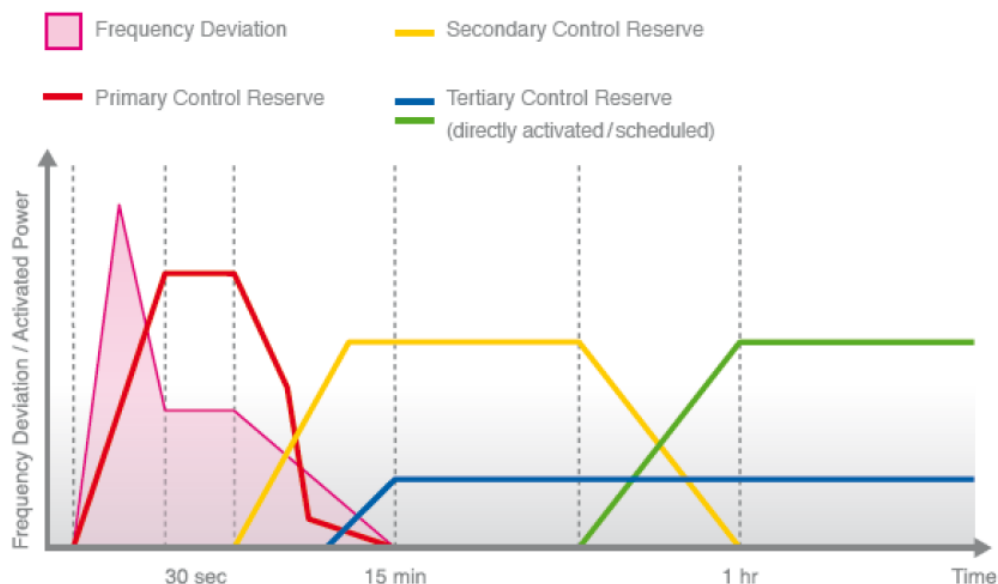
2.2 Energiatermelés támogatása és rendszerszintű alkalmazások

2.2.1 Szabályozás

Rövid idejű fluktuációk esetén fellépő hatások csillapítására szabályozást kell megvalósítani. Ezen jelenségek oka főként a termelés és fogyasztás pillanatos kiegyensúlyozatlansága. Például amennyiben a frekvencia meghaladja a névleges értéket, túlermelés van a rendszerben, ellentétes esetben a kereslet meghaladja a kínálatot. A különböző jellegű deviációk kezelésére megkülönböztetünk primer, szekunder és tercier tartalékokat. Az energiatárolók mindhárom említett kapacitásként létesíthetőek lehetnek, mindig az adott előírásoknak megfelelő paraméterekkel. [3][7][8]

2.2.2 Gyors szabályozás

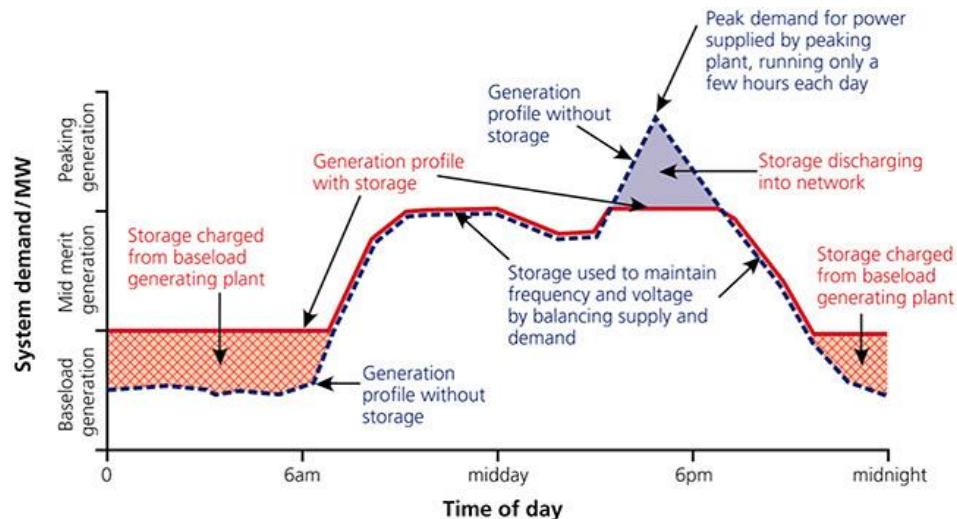
A tárolás kérdéskörével foglalkozó szakértők szerint a jelenlegi fosszilis- és vízerőmű tartalékoknál gyorsabb válaszidejű szabályozásra is képesek lehetnek egyes berendezések, mely az alkalmazás hatékonyságát nagyban növelheti. [3]



2-2. ábra: frekvencia szabályozás lehetséges megvalósítása [8]

2.2.3 Csúcslevágás

A hálózatok kihasználtságának mértéke kulcsfontosságú a hatékonyságnövelés szempontjából. Mivel a tárolók képesek időben mozgatni a termelést és az igényeket egyaránt, megfelelő algoritmus segítségével csökkenthető a maximális terhelés, nő a minimális. Ennek hatására javul a kihasználtság (átlagos terhelés/maximális terhelés), a terhelési görbe jellege a konstans felé mozdul. Ez költségek szempontjából is eredményes hálózatfejlesztési irány lehet, hiszen a méretezést mindig a maximális értékek szabják meg. [3][4][5][7][8]



2-3. ábra: hálózati csúcsterhelések menedzselése [8]

2.2.4 Forgótartalékok

Azon termelési kapacitásokat soroljuk ide, amelyek működésben vannak, jellemző szabályozások szerint 10 percen belül képesek növelni vagy csökkenteni kimenetüket és verseny piacon óránként frissítik az általuk biztosítható szolgáltatásokat. Az év legnagyobb részében a szabályozási árak magasabbak, néhány esetben azonban fordított helyzet áll elő, gazdaságilag ekkor éri meg a kapacitást ilyen üzemben működtetni. [3][7][8]

2.2.5 Inercia tartalék/cseretartalék

Ezen esetben a kapacitás nincs közvetlenül a rendszerre csatolva, de egy bizonyos időtartamon belül (lehet például 30 perc) képes a forgótartalékokhoz hasonló működésre. Fenntartási költségei alacsonyabbak, de kevesebb haszonnal is kecsegtet. [3]

2.2.6 „Black start”

Azon szolgáltatás, mely más energiatermelő egységek indításához szükséges kimaradás esetén. Ennek hatására teljes elszigetelődés után egy erőmű képes külső energiaforrás nélkül újra termelő üzembe állni (kis

indítási igényeknél rentábilis a tároló alkalmazása). Azon üzemek, melyek képesek ilyen működésre, plusz juttatásban részesülnek (versenypiaci szerződés, bilaterális szerződések keretein belül). [3][4][5][7][8]

2.2.7 Árarbitrázs

Az energiaárak a liberális piacon erősen illékonyak, e tulajdonság kihasználására irányuló kezdeményezés az árarbitrázs keresés. Az olcsóbb éjszakai és drágább csúcsterhelési áram közti különbség egy bizonyos differencia mellett kockázatmentes nyereséggé konvertálható. Ez a tárolót működtető szereplő számára jövedelmező, a hálózati irányítás szempontjából pedig szintén pozitív, kihasználtság javító hatású. [3][4][5][7][8]

2.2.8 Izolált hálózatok

Kisléptékű teljesítményáramlással rendelkező közműves ellátású elszigetelt hálózatok esetén is szükséges fenntartani a rendszer kiegyensúlyozottságát a megbízható működés érdekében. Ilyen esetekben elterjedtek a dízelgenerátoros támogatások és sokszor találkozhatunk magas megújuló energiaforrás termelési részesedéssel is. [1][3]

2.3 Távvezeték- és elosztó-hálózati alkalmazások

2.3.1 Feszültségtámogatás

Feszültségletörések akkor is kialakulhatnak, ha az energiamennyiség, amelyet át szeretnénk vinni, meghaladja a hálózati infrastruktúra képességeit, nem a kialakításnak megfelelő terhelés éri azt. Főként a csúcsterhelési időben és meleg délutánokon okozhat problémát. Ezen meghibásodások bekövetkezési valószínűségének csökkentésére használhatunk tárolókat. [3]

2.3.2 Fázisjavítás

Meddőteljesítmény felvétel illetve leadás segítségével a minőségi jellemzők javíthatóak. Jelenleg ezt a módszert generátorok, kapacitív és induktív tárolók, statikus VAR kompenzátorok segítségével valósítják meg, de megfelelő kommunikációs egység és inverter segítségével energiatárolók is képesek lehetnek ilyen működésre. [3]

2.3.3 Hálózati csatlakozási díjak

Az elosztóhálózatra csatlakozó ügyfeleknek belépési díjat kell fizetni, ez teljesítmény szerint számított költséget jelent számukra. Tároló berendezés segítségével a fogyasztó csökkentheti a maximális igényeit, ezzel kedvezőbb díjazást nyerve magának. [3]

2.3.4 Befektetési késleltetések

A hálózati infrastruktúra-fejlesztések elkerülhetetlenek, ha a rendszer valamely részén gyakorta kialakulnak torlódások. A csúcsterhelés csökkentésével ezek a beruházások akár több évvel is halaszthatóak, hiszen a

növekedést képes a tárolási kapacitás elfedni, aktívan igazítani a rendszert az igényekhez. Ezzel együtt az egyébként is szükséges és napirendre kerülő változtatásokkal összehangolhatóvá tehetőek a fejlesztések, ilyenkor pedig a jelentős költségek megoszlanak. [3][7][8]

2.3.5 Lokális kapacitás

Egyes területek nehezen láthatóak el megfelelően, mivel helyi szinten nincs megfelelő termelési kapacitás és kiépített hálózat. Belvárosi területeken jelentkező probléma, hogy a nagyon magas kereslet kiszolgálására meglehetősen drága a kapacitáslétesítés, valamint a fizikai méretek miatt a lehetőségek is erősen korlátozottak.

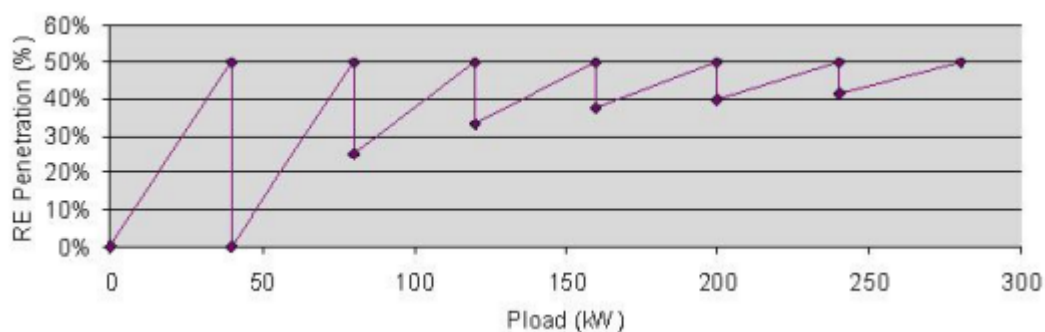
2.3.6 Megújuló energiaforrás integráció

Meglehetősen összetett kérdés, mely a deklarált célértékek elfogadása (USA: RPS, EU: 20/20/20) fényében minél korábbi megoldást igényel. A fő probléma a fluktuáció, mely a kimeneten tapasztalható. Ez nehezen jelezhető előre, az időjárás kaotikus viselkedése okozza. A szélenergia éjszakai csúcstermelése és a napenergia déli csúcsa egyaránt keresleti völgyidőszakokat érint. A szabályozási probléma tehát adott, időbeni eltolással kell illeszteni a profilokat. Fosszilis tartalékokra is szükség lehet, hiszen az ellátásbiztonság nem sérülhet. Ezentúl a csúcsterhelésbeli részesedés (NQC: net qualifying capacity) előírása lényeges, amely megmutatja, hogy mekkora részesedést vagyunk képesek elérni a megújuló energiaforrások segítségével csúcsterheléskor. Amennyiben ez az érték eléri a 25%-ot, perturbáció elleni védelem kiépítése szükséges. Flexibilis grid esetén a részesedés nagyon magas is lehet, ekkor lehet szerepe a nagyléptékű energiatárolásnak a kiegyensúlyozási feladatok elvégzésében, ez több 100 GW nagyságrendű is lehet. Mindemellett a decentralizált termelés is megkerülhetetlen, hiszen lokális szinten ez biztosítja a megbízhatóságot. [3][4][5][7][8]

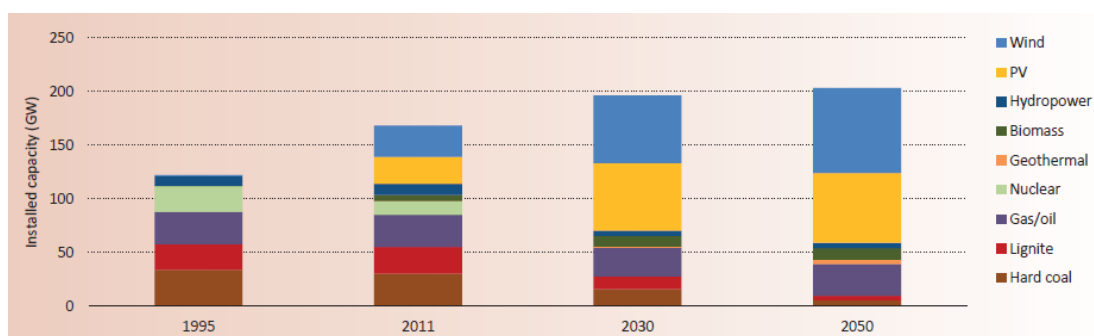
A megújuló energiák részesedési arányának maximuma a minimális konvencionális termelési teljesítmény és a forgótartalékok segítségével behatárolható:

$$\delta_{max} = \frac{P_{min}}{1 - P_{SR}}$$

2-1. egyenlet: Megújuló energiaforrások részesedési arányának behatárolása [8]



2-4. ábra: megújuló energiaforrások részesedési arányának felső határa [8]



2-5. ábra: Németország energiamixének változása [8]

2.4 Felhasználó közeli alkalmazások

2.4.1 Teljesítményminőség

A feszültség letörések és pillanatnyi kimaradások fogyasztói oldalon sokszor észrevehetetlenek, az elektronikai berendezésekben azonban komoly károkat okozhatnak. Ez főként kereskedelmi és ipari fogyasztóknál előforduló probléma. Megoldására gyors válaszidejű energiatároló eszközök alkalmazása javasolható. [3]

2-1. táblázat: pillanatos kimaradások költségei, USA [3]

Méret	Átlagos költség \$/kW
Lakossági	0,1
Ipari (kisméretű)	0,42
Ipari (nagy méretű)	1,4

2.4.2 Megbízhatóság

Biztonsági tartalékként felhasználva az energiatároló berendezések képesek lehetnek átmenteni egy rendszert a kimaradásra, végig fenntartva annak normál üzemét. Főként rövid idejű működésben lehet hasznos, 4 óránál hosszabb kimaradások esetén már a tartalékgenerátor üzemeltetése költséghatékonyabb minden esetben. [3]

2-2. táblázat: átlagos kimaradási díjak, USA [3]

\$/kW	15 perc	30 perc	1 óra	2 óra	4 óra	8 óra
Lakossági	0,05	0,6	2,6	3,95	5,3	5,6
Ipari (kisméretű)	8,65	16,01	23,37	48,91	117,76	189,23
Ipari (nagy méretű)	4,79	7,46	10,12	17,96	36,94	68,36

2.4.3 Kiskereskedelmi díjak

Attól függően, hogy milyen időszakban vásároljuk, az elektromos energia ára eltérhet. Ennek a különbségének a kihasználása irányul az úgynevezett TOU (time of use) díjak csökkentése. Ez a módszer nyilván akkor nyereséges, ha az árkülönbségekkel fedezni tudjuk a tárolási veszteségeket is. Erősen függ a szabályozási keretrendszertől, lokális piacokon lehet életképes megoldás. A fogyasztók továbbá díjat fizetnek a maximális igényeik után. Ez egy bizonyos időszakban mért érték, melyet a csúcslevágás kihasználásával csökkenteni lehet. A redukció mértéke erősen függ a fogyasztási görbe jellegétől. [3]

2.5 Technológiák és alkalmazások összekapcsolása

A kiválasztási folyamatról már sok szó esett, az alábbi táblázatban néhány konkrét lehetőség kerül bemutatásra. Minden esetben fontos a körütekintő, teljes körű vizsgálat, hogy a megfelelő megoldást valósíthassuk meg a rendszer támogatására. Jól látható, hogy bizonyos technológiák gyakorlatilag versenyhelyzetben állnak egymással: mivel intenzív kutatások folynak az egyes berendezések tökéletesítésére (gondoljunk csak a Tesla akkumulátor telepeire, vagy a SustainX sűrített levegős megoldásaira), így az állásfoglalás egyik vagy másik mellett nem lenne teljesen megalapozott. [3][4][5][7][8]

2-3. táblázat: technológiák és alkalmazások összekapcsolása [8]

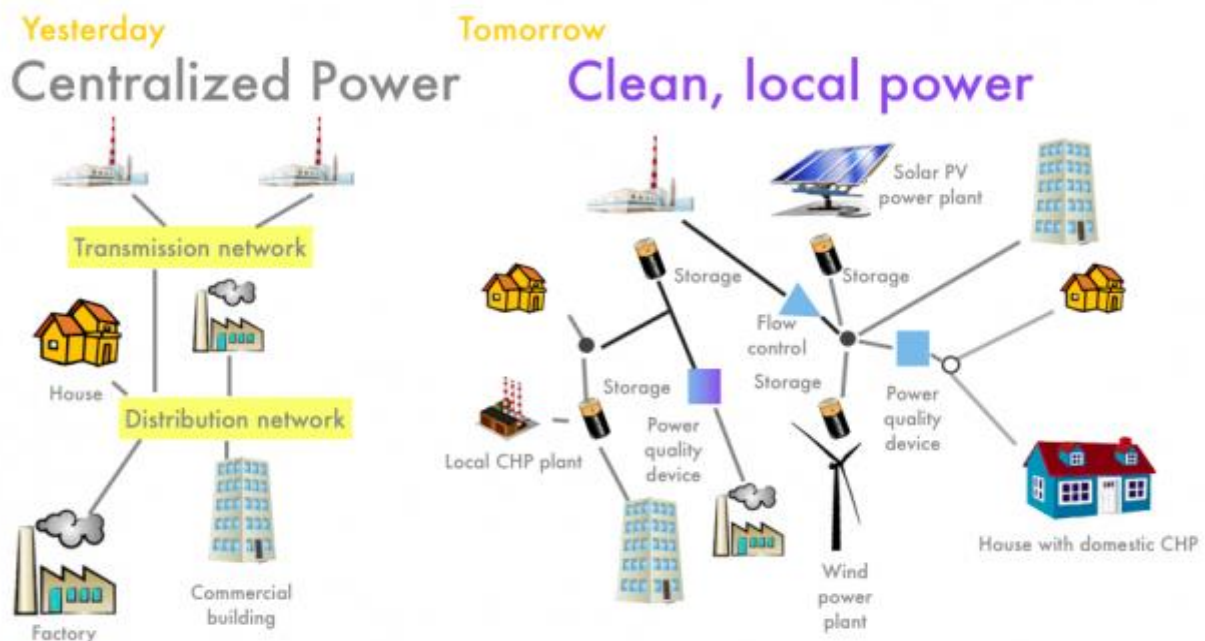
Technológia	Lehetséges alkalmazási területek
Szivattyúzott víz	Csúcslevágás, tartalékképzés, vészhelyzeti ellátás, black start
Sűrített levegő	Csúcslevágás, tartalékképzés, vészhelyzeti ellátás, black start
Lendkerék	Teljesítményminőség, frekvencia szabályozás

Ólomsavas akkumulátor	Izolált gridek, megújuló integráció, minőségi mutatók javítása, megbízhatóság, díjszabás
Li-ion akkumulátor	Izolált gridek, megújuló integráció, minőségi mutatók javítása, megbízhatóság, díjszabás
Cink-levegő akkumulátor	Izolált gridek, villamos autók
NaS akkumulátor	Tartalékképzés, izolált gridek, megújuló integráció, díjszabás
NaNiCl Akkumulátor	Villamos autók
Hidrogén, Syngas	Csúcslevágás, tartalékképzés
Szuperkapacitás	Frekvencia szabályozás, minőségi mutatók javítása
Szupravezető (SMES)	Frekvencia szabályozás, minőségi mutatók javítása, vészhelyzeti ellátás

3 A decentralizált hálózati struktúra

3.1 A decentralizáció jelensége, előnyei és hátrányai

A decentralizált hálózat a smart gridhez hasonlóan nehezen behatárolható fogalom: a villamos energia termelői az önálló hálózati csatlakozással rendelkezve elszórtan helyezkednek el. Főként nap és szélenergia-erőművekről beszélünk, de több egyéb típus is lehetséges (pl. mikro CHP erőművek) [16] [17].



3-1. ábra: a decentralizált hálózat elemei és kapcsolataik [ILSR]

Az elosztott termelés megjelenésének motivációi: [15]

- Aggodalom a nagyobb méretű, centrális termelőként üzemelő termelők egyre növekvő külső költségei miatt, melyek főként a környezeti hatások miatt keletkeznek.
- Öregedés, elhasználódás és kapacitás korlátok az átviteli és elosztói hálózaton.
- A háztartási méretű kiserőművek piacának térnyerése, telepítési költségeinek csökkenése.
- A magasabb relatív energiaár, nagyobb fokú komplexitás és szabályozási költségek, üzemelési és mérési költségek nagy megkötéseket tesznek a működés tervezésére.

A megoldás előnyei:

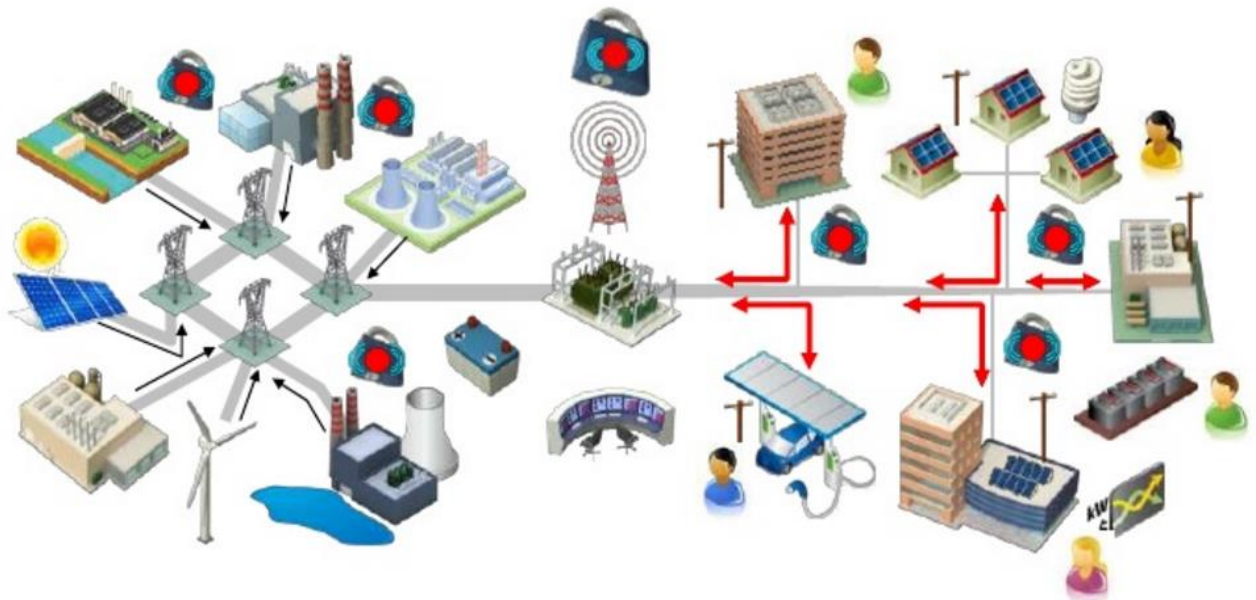
- Veszteségcsökkenés, feszültségtámogatás lehetősége, teljesítménytényező korrekció.
- Csúcslevágás megvalósítás: a decentralizált termelés használható lokális csúcsterhelések kielégítésére.
- Befektetés késleltetések a fejlesztések ütemezhetőségének javítása.
- Magasabb hatások a kombinált hő- és villamosenergia-termelők segítségével (CHP).

A megoldás hátrányai:

- Feszültségminőségi problémák: az EN 50160 szabvány előírásainak betartása kulcsfontosságú.
- Kétirányú energiaáramlás: hosszú ideje alkalmazott határfeltételeket sért meg az alacsony terhelési időszakban végzett termelés okozta egyenlőtlenség.
- Rövidzárási áramok növelése: a védelmek szelektivitása sérülhet.
- Magas harmonikus tartalom az inverterek miatt.
- A vezetékek megbízhatósági határon kívüli terhelést kaphatnak.

3.2 Elosztóhálózatok a megváltozott struktúrában

A fentebbi jelenségek hatásai a közép- és kiefeszültségű hálózaton komoly problémákat okozhatnak. Az elosztói engedélyesek számára fontos feladat lesz a megjelenő kiserőművek megfelelő kezelése, az újszerű feszültségviszonyok és áramlások figyelembe vételével. Ezek a hálózatok merőben más szükségleteket elégítenek ki, mint a jelenlegi konvencionális rendszerben, ahol a termelés az átviteli szintre kapcsolódik, és csak a felhasználóhoz való közvetítésben kell szerepet játszani. Itt az irányok előre definiáltak: azonban a termelés lekerülésével ez merőben megváltozik, az áramlási irány a terhelésektől függ. Ebben a szisztémában pedig a befolyásolás mértékét egyértelműen növelni kell, hiszen a kiszámíthatóság romlik. [16][17]



3-2. ábra: az áramlási irányok megváltozásának szemléltetése [EPRI]

3.3 Energiatároló berendezések kiválasztási folyamata elosztói engedélyesek vagy az érintett feszültségszinteken szereplő felelősök számára

A felsorolt motivációk, lehetséges alkalmazások és a strukturális változások alapján tehát levonhatjuk a következtetést, hogy szükség van energiatároló berendezések telepítésére a hálózaton. A dolgozat célja bemutatni az elosztóhálózaton alkalmazható megoldásokat az ötlettől egészen a megvalósításig.

3.3.1 A folyamat főbb lépései, standardizációs lehetőségek

Tételezzük fel, hogy felmerül az energiatároló telepítés gondolata egy adott hálózatrészen, mert valamely fentebb részletezett problémával szembesülnek az üzemeltetés során. Elsőként maga a hálózat szükséges, mint a teljes folyamat bemenete. Minél több adat szükséges, melyek alapján döntéseket hozhatunk. Először is a névleges teljesítmények és terhelések alapján, valamint a szükséges implementálandó vezérlés ismeretében egy méretezési és elhelyezési eljárás futtatható. Ezek az adatok definiálják az alkalmazott technológiát is, hiszen a főbb fizikai paraméterek meghatározhatóak. Ha a modellezésből nyert adatok alapján meghozott döntés szerint a telepítés szükséges, továbbhaladhatunk a folyamatban.

A hálózatra való csatlakozásnak feltételei vannak, ezeknek pedig eleget kell tenni: jelenleg nem létezik kidolgozott energiatároló berendezésekre vonatkozó jogszabályozás ezen a téren. A szükséges minőségi követelmények és csatolandó berendezések vizsgálata javasolt.

A kiválasztás és csatlakoztatás után az üzemelés kérdései következnek: az algoritmus, amely meghatározza a működést bizonyos fokú lokális függést kell, hogy mutasson a hatékony működés érdekében, de nagymértékű általánosítás lehetséges. Mihelyt a mechanizmus összeállt, a csatlakozás és vezérlés megkezdhető.

Az adatgyűjtés és kiértékelés fontos lépés a folyamat során: a hatások ellenőrzésére mérési eredményeket kell generálni, melyek feldolgozására pedig egy egységes, átlátható és egyszerűen kezelhető megoldás szükséges. Ezt minden egyes alkalmazás esetén külön, de azon belül együttesen lehet kezelni. A program képes adatexportálásra, így a feldolgozás akár Microsoft Excel vagy MATLAB segítségével. Ezek alapján a sikeresség mérhető, a teljes felépített csatlakoztatási folyamat végigkísérhető.

A szimulációs környezet lényege, hogy a hálózati modell bevétele és a szükséges vezérlések megadása után kiszámítja a várható hasznokat, ezáltal döntési lehetőséget ad az elosztói engedélyesek (vagy más, elosztói hálózati szintjén működő üzemeltető szereplők) kezébe.

3.3.2 Az elemzett lépések és az ezekhez tartozó konkrét megoldások

A dolgozatban a teljes folyamat nem ismertetett, néhány sarkalatos pontra korlátozódik.

A modellezési eljárások egy demonstrációs hálózati példán keresztül kerülnek bemutatásra: itt ismerhetjük meg a standardizáláshoz szükséges megkötéseket, valamint a beviteli formát. A szimulációs környezetet megvalósító program rendelkezésre áll, a bemenő adatokat fogadó script szintén bemutatásra kerül. A szimulációt végző script folyamatos fejlesztés alatt áll, a jelenleg működő funkciói és további lehetőségei szerepelnek.

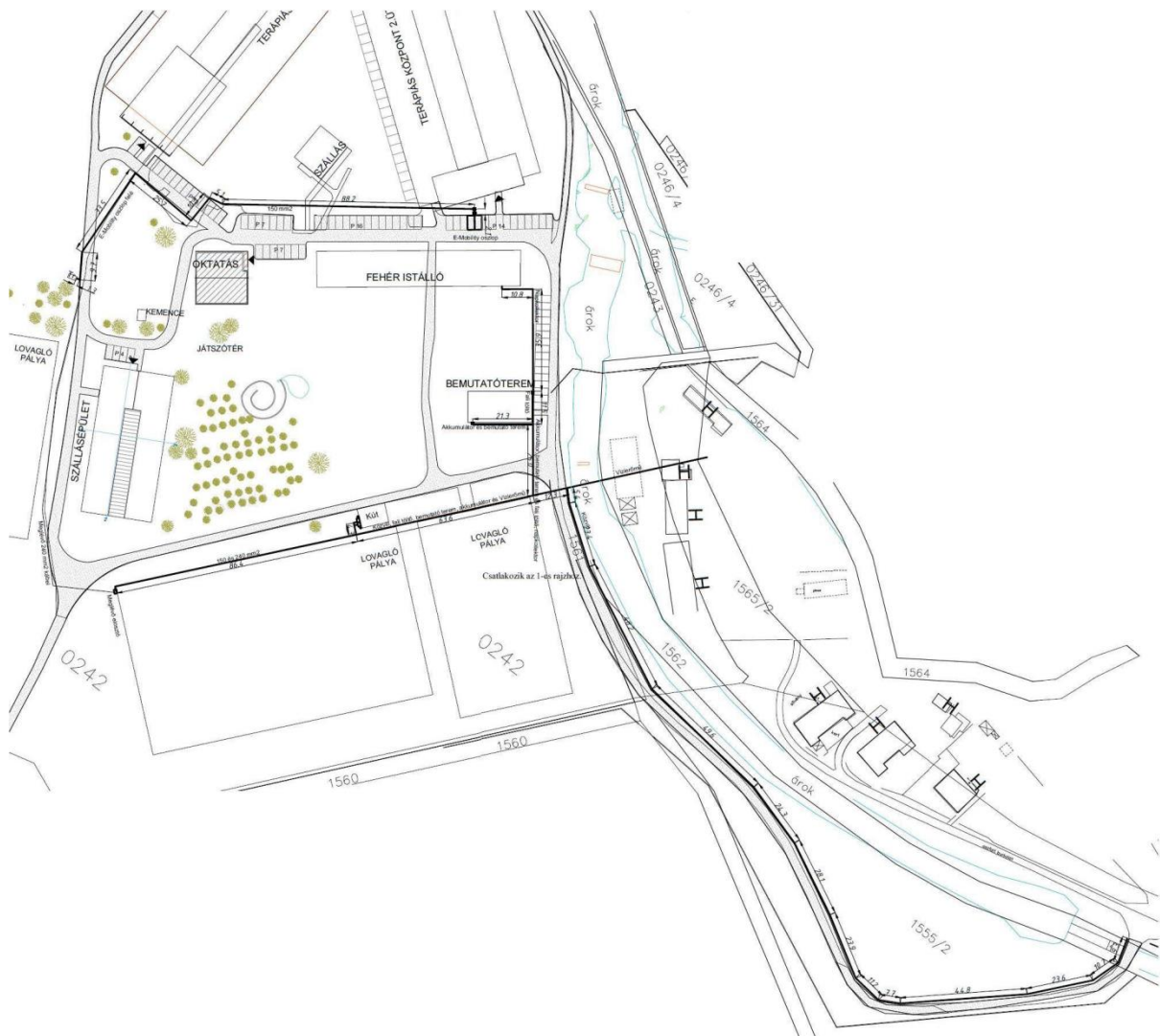
A csatlakozási szabályozás kérdése és a költségelemzési metódusok nem részei a dolgozatnak. A technológiai adatok, melyek alapján a kiválasztási és méretezési folyamat véghezvihető, mellékletben csatolt. A műszaki kiértékelés lehetőségei megjelennek, valamint az eredmények kezelése és az abból levonható konklúzió metodológiája is.

A vezérlési algoritmusok teljes egészében bemutatásra kerülnek, alapelvekkel és továbbfejlesztési lehetőségekkel is.

4 Modellezési módszerek, a Fóti Élhető Jövő Park

4.1 Az Élhető Jövő Park rövid jellemzése

A nagyjából 22 hektáros területen a Nemzetközi Gyermekmentő Szolgálat Lovas Terápiás Központja működik. Több különböző funkciót ellátó épülettel is találkozhatunk a helyszínen. A villamos modell szempontjából releváns épületek az iroda, a kútépület, a bemutatóterem és a lovaglópálya, ezek környezetében található villamos berendezések. Mivel az ELMŰ Nyrt. projektjének célja a smart grid jellegű működésben szerzett tapasztalatok felhalmozása egy demonstrációs jellegű megújuló energiaparkban, így várhatóan több fejlesztés is történik majd a közeljövőben: újabb energiatároló berendezés csatolása, fogyasztók vezérlésének megvalósítása, a szélerőmű hálózatra kapcsolása egyaránt felvetődött a rövidtávú tervek közt. Biomassza tüzeléssel működő alaperőmű beüzemelését is tervezik, a tüzelőanyagként szolgáló növények telepítése már megtörtént. [18][22]



4-1. ábra: a fóti hálózat helyszínrajza [22]

4.2 A villamos modell megalkotása

A fő cél a modellezésekor az volt, hogy a kulcsfontosságú standardizációs pontokat identifikálhatóvá tegyünk egy demonstrációs decentralizált hálózaton. Az Élhető Jövő Park szerkezete erre kiválóan alkalmas, helyben telepített megújuló energiaforrásokkal, adatgyűjtő és vezérlő berendezésekkel ellátva kiválóan reprezentál egy jövőbeni smart microgrid szerkezetet. A valós körülmények között futtatható vezérlések implementálásának lehetősége pedig tökéletessé teszi a projekt szempontjából. A szimulációs környezetben elvégzett tesztek és a valós mérések összehasonlításával mérhetővé tehető a modellalkotás sikeressége, így a kiértékelés is elvégezhető. A DigSilent Power Factory programcsomag segítségével a szükséges analízisek a hálózaton felhasználóbarát módon elvégezhetőek.

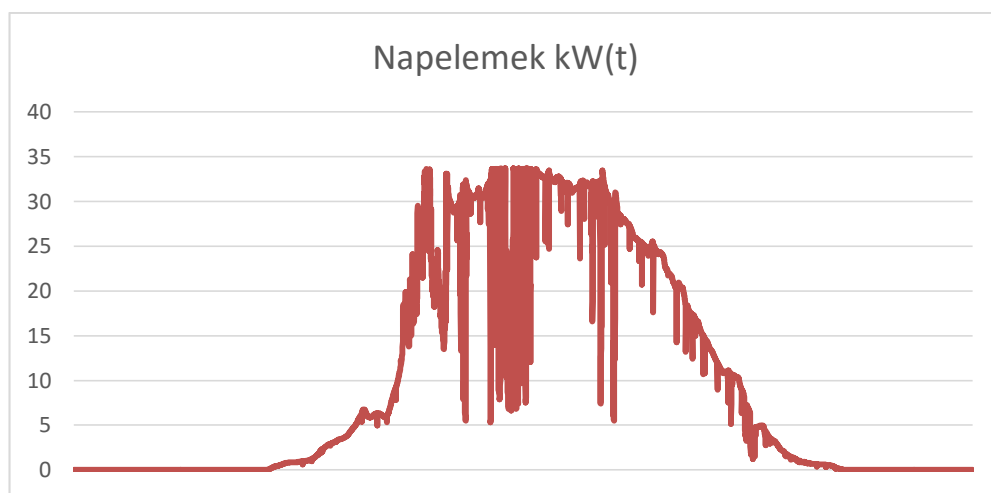
A következőkben a modell felépítésének lépésein keresztül megismerhető a vizsgálati lehetőségek komplexitása, a futtatható analízisek és a hozzájuk tartozó eredmények összessége, valamint a kiértékelési procedúrához szolgáltatott adatok formája. A hálózati elemekhez tartozó változók megadásával szolgáltatjuk az adatokat az algoritmusoknak, így a funkciók számát ez korlátozza. A modell kizárólag villamos mennyiségek befolyásolására és mérésére koncentrál, így hőenergia paraméterek és időjárási változók (melyek egyébként kinyerhetőek egy esetleges továbbfejlesztés esetén) nem szerepelnek benne.

Minden esetben 24 órás adatokat láthatunk, 10 másodperces mintavételi idővel (8641 minta). Az adatok feldolgozása a SCADA rendszerből egy .csv fájlba importálás után preprocessálás és egyszerű szöveges fájlra alakítás lépésein keresztül történt, hogy a modell minél egyszerűbben vegye a bemenő adatokat. A diszkrét értékek közti szakaszt az spline típusú interpolációs függvénnyel végezhetjük. Mivel több algoritmus célja villamos mennyiségek befolyásolása, a releváns méretű meddő komponenssel rendelkező elemeknél ezek az értékek is csatolva lettek az adott típushoz. Az adatokat és a hálózati elemek specifikációit az ELMŰ Nyrt. szolgáltatta.

4.2.1 Villamos termelői egységek

4.2.1.1 Napelemes rendszerek

A park területén két fotovoltaikus villamosenergia-termelő rendszer is kialakításra került. Az egyik 15,6 kW, míg a másik 23 kW névleges teljesítménnyel bír. A tájolások 200° körüliek, így ideálisnak mondhatóak. A dőlésszögek nem a legideálisabbak, de így is 16 és 22 MWh/év energiatermelést érnek el a rendszerek. A maximális betáplálást a telepített Fronius típusú inverterek korlátozzák, 15 és 22 kW maximális teljesítménnyel. Ez a meghatározó energiaforrás a parkban, napi termelése ideális körülmények közt könnyedén meghaladja a park összfogyasztását.



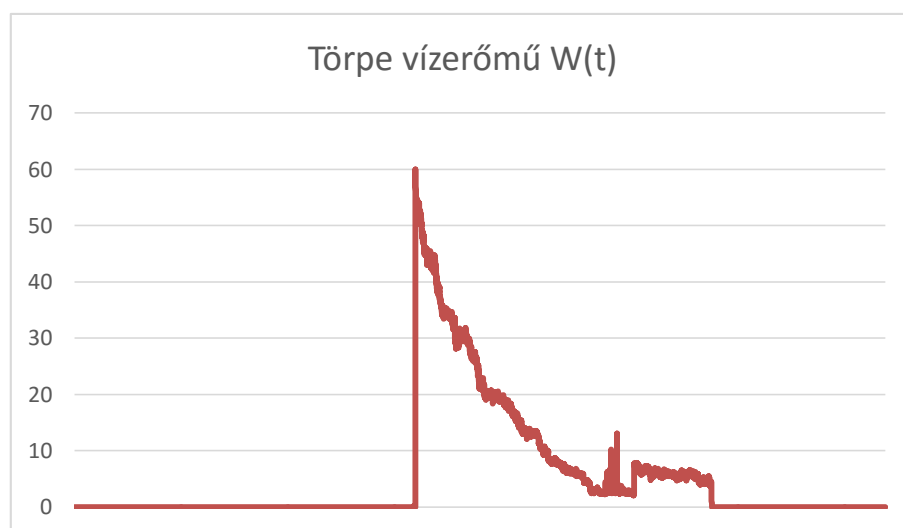
4-2. ábra: napelemek karakterisztikája (24 óra)

4.2.1.2 Szélérőmű

Egy 20 kW névleges teljesítményű kínai gyártmányú (Ouyad) szélérőmű is megtalálható a parkban. 17,4 m magas oszlopon 5 méter hosszú lapátok találhatók, NdFeB állandó mágneses generátorral van felszerelve. Rendelkezik motoros szélirányba állás vezérléssel, 150 1/perc a névleges fordulatszám. Sajnos egyelőre inverter problémák miatt nem képes a hálózatra táplálni, a modellbe. azonban inaktív elemként bekerült.

4.2.1.3 Törpe vízerőmű

Egy PowerPal kisesésű Kaplan vízturbina segítségével kihasználható a park területén található apró patak is energetikai szempontból. 200 W névleges teljesítményével nem meghatározó, de demonstrációs értékkel rendelkezik. 1,8 m esésmagasságra telepítették, éves termelése kb. 880 kWh/év.



4-3. ábra: törpe vízerőmű karakterisztikája (24 óra)

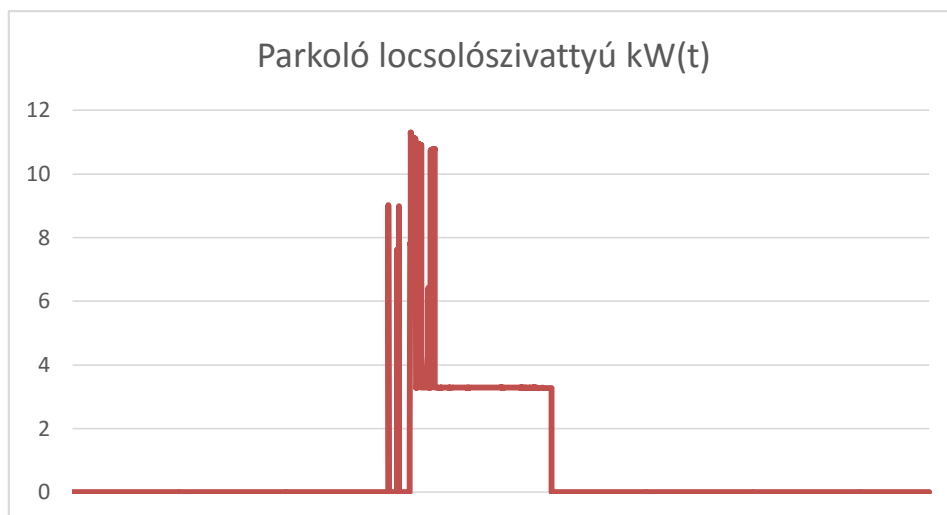
4.2.2 Villamos fogyasztók

4.2.2.1 Töltőoszlop

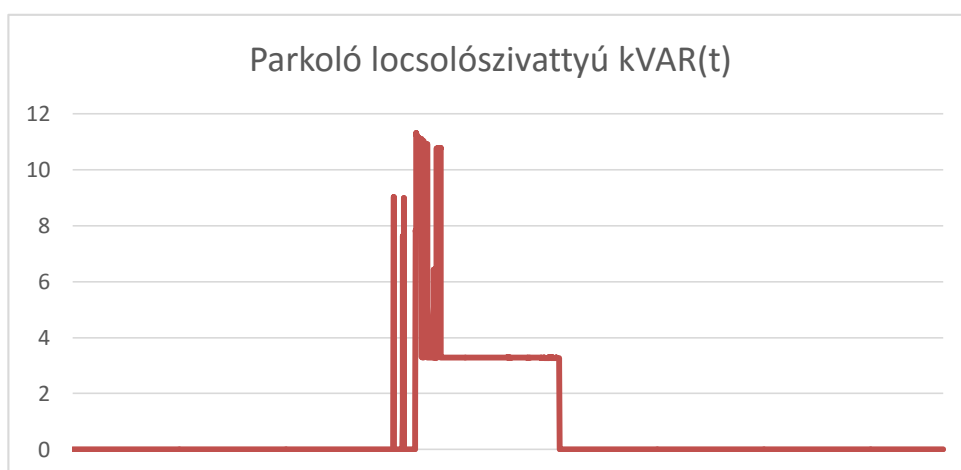
Egy elektromos autók számára fenntartott töltőoszlop található a parkoló területén, mely vezérelhető töltési ciklussal rendelkezik, így a későbbiekben a fogyasztói vezérlések tesztelésekor fontos elem lehet. Mivel kizárólag akkor üzemel, amikor az ELMŰ Nyrt. dolgozói elektromos autóval érkeznek a helyszínre, ezért profil adatot nem kapott a modellben, de megvalósításra került a későbbi fejleszthetőség érdekében.

4.2.2.2 Parkoló locsoló szivattyú

A kisebbik locsoló elem a parkolóhoz tartozik. Jelenleg még nem vezérelt, de ez értelem szerűen megoldható, így az időzített meddőigény kompenzációjára kiválóan alkalmas fogyasztó lehet. 12 kW névleges teljesítménnyel rendelkezik.



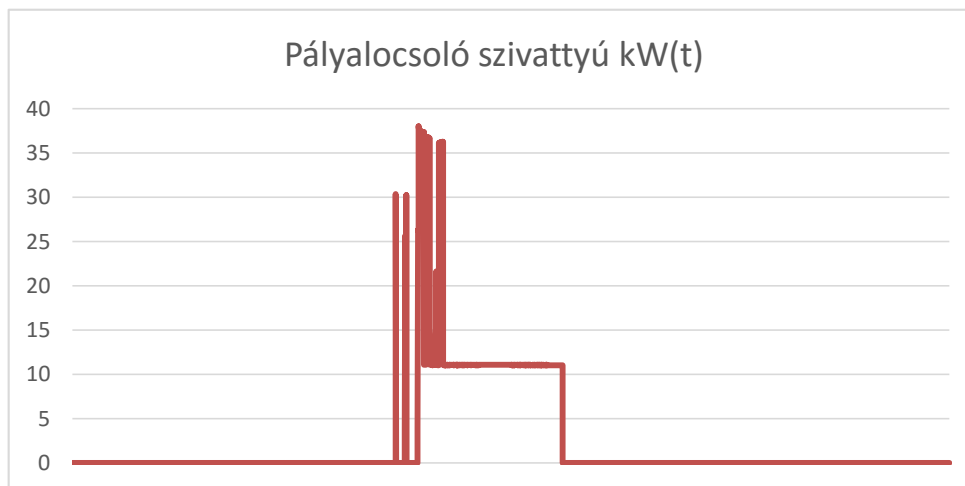
4-4. ábra: Parkoló locsoló hatásos teljesítmény felvétele (24 óra)



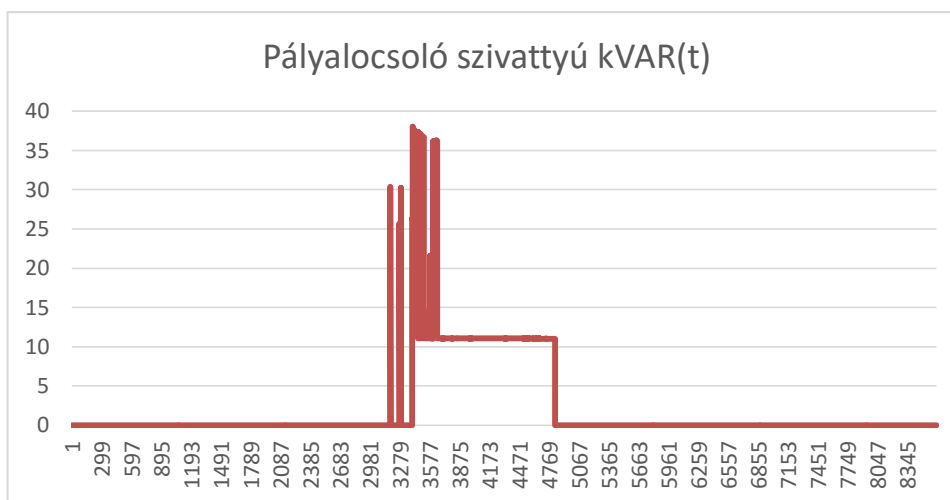
4-5. ábra: parkoló locsoló meddőteljesítmény felvétele (24 óra)

4.2.2.3 Pályalocsoló szivattyú

A nagyobbik locsoló fogyasztó, mely a lovaglópályához tartozik. A pályalocsolóval azonos helyről nyeri a villamos teljesítményét, így arányos osztállyal nyerhető a karakterisztikája. Minden tulajdonságában az előzőekben ismertetett locsolóhoz hasonlít. 37 kW a névleges teljesítménye.



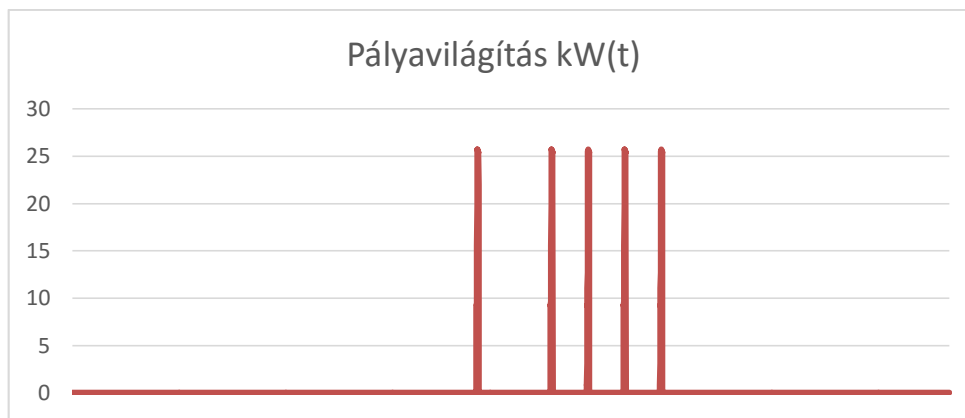
4-6. ábra: pályalocsoló hatásos teljesítmény felvétele (24 óra)



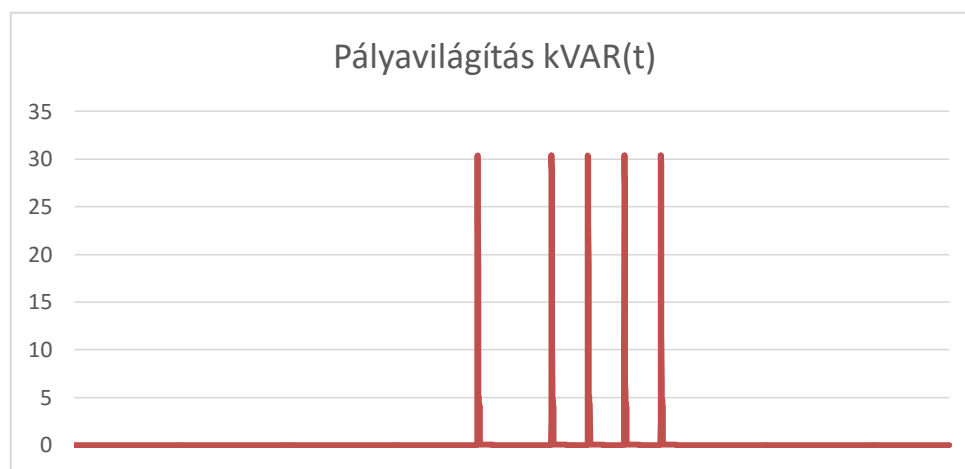
4-7. ábra: pályalocsoló meddőteljesítmény felvétele (24 óra)

4.2.2.4 Pályavilágítás

A pályavilágítás kapcsolásai a park használatától függenek, így az ELMŰ Nyrt. egy kapcsolási ciklust biztosított a modellhez. Ebből 5 darab kapcsolás lett implementálva egy napra, konkrét időpontokban.



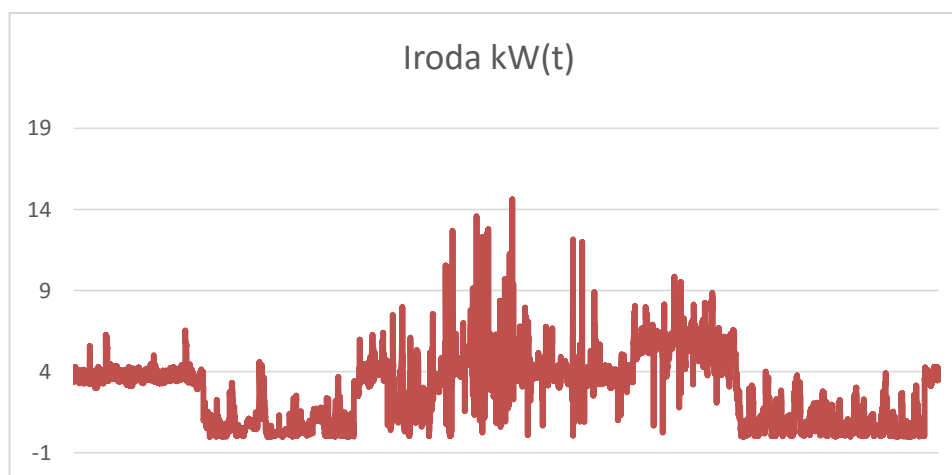
4-8. ábra: pályavilágítás hatásos teljesítmény felvétele (24 óra)



4-9. ábra: pályavilágítás meddőteljesítmény felvétele (24 óra)

4.2.2.5 Irodai fogyasztók csoportja

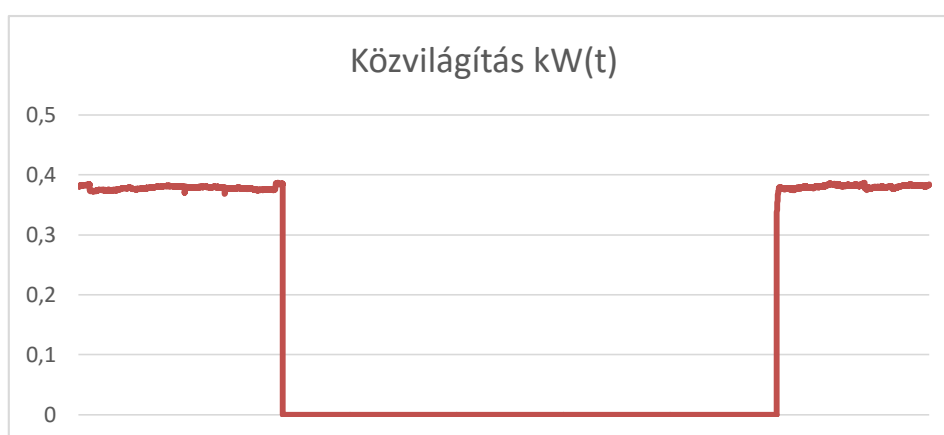
Az irodai fogyasztók nincsenek külön mérve a SCADA rendszerben, így karakterisztikájuk abból a feltételezésből számítható, hogy minden más teljesítmény mérve van a hálózaton. Ennek megfelelően 0,95-ös teljesítménytényezővel felvéve látható az alábbi számított érték, mely az iroda összes fogyasztóját magába foglalja.



4-10. ábra: iroda teljesítményfelvétele (24 óra)

4.2.2.6 Közvilágítás

A park területén levő közvilágítási hálózat is a microgridként definiált hálózatról kapja az ellátását. Jelentős meddőteljesítmény igénytel rendelkezik. Koncentráltan lett leképezve, de mivel konkrét mért adat alapján van felparaméterezve, ez nem jelent gondot. 5 kW maximális teljesítménnyel rendelkezik.



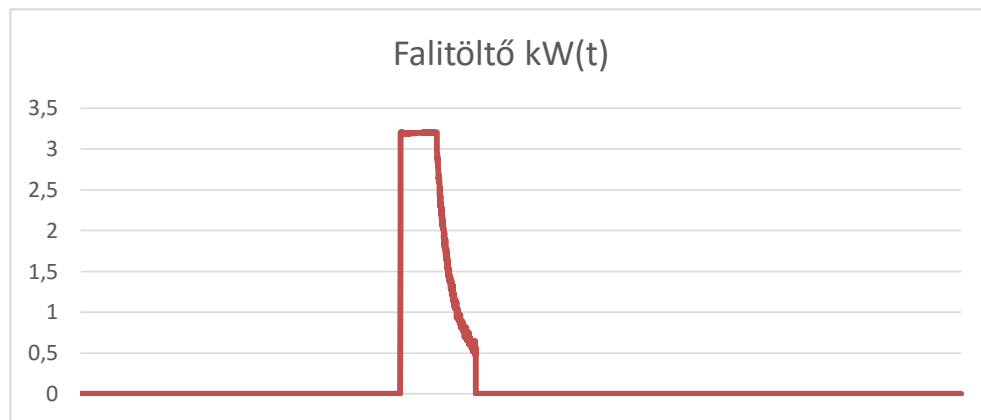
4-11. ábra: közvilágítás határos teljesítmény felvétele (24 óra)



4-12. ábra: közvilágítás meddőteljesítmény felvétele (24 óra)

4.2.2.7 Falitöltő

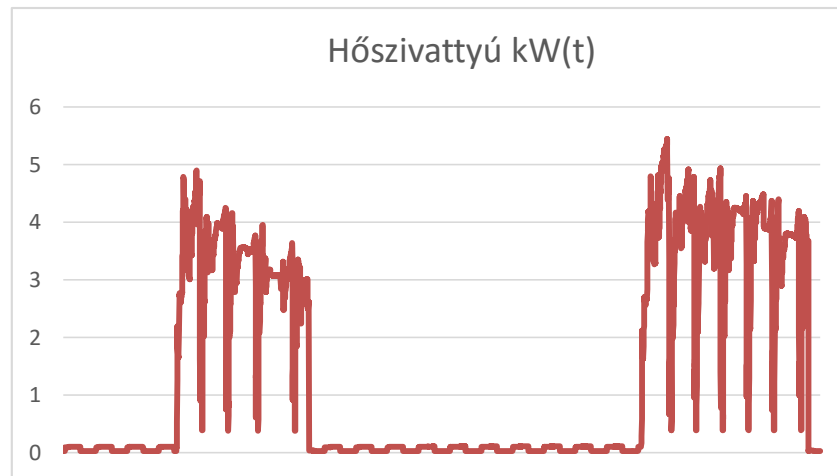
A bemutató teremben található egy elektromos autó falitöltő berendezés. 11 kW névleges teljesítménnyel bír. Egy autótöltés jellemző görbéje csatolva a modellhez.



4-13. ábra: falitöltő teljesítmény felvétele (24 óra)

4.2.2.8 Hőszivattyú

A bemutatóterem hőigényének ellátására egy 5,2 kW névleges villamos teljesítményű (14 kW hőteljesítményű) hőszivattyú üzemel. Ez egy Mitsubishi Zubadan típusú levegő-víz kialakításos szivattyú 53 dB zajszinttel.



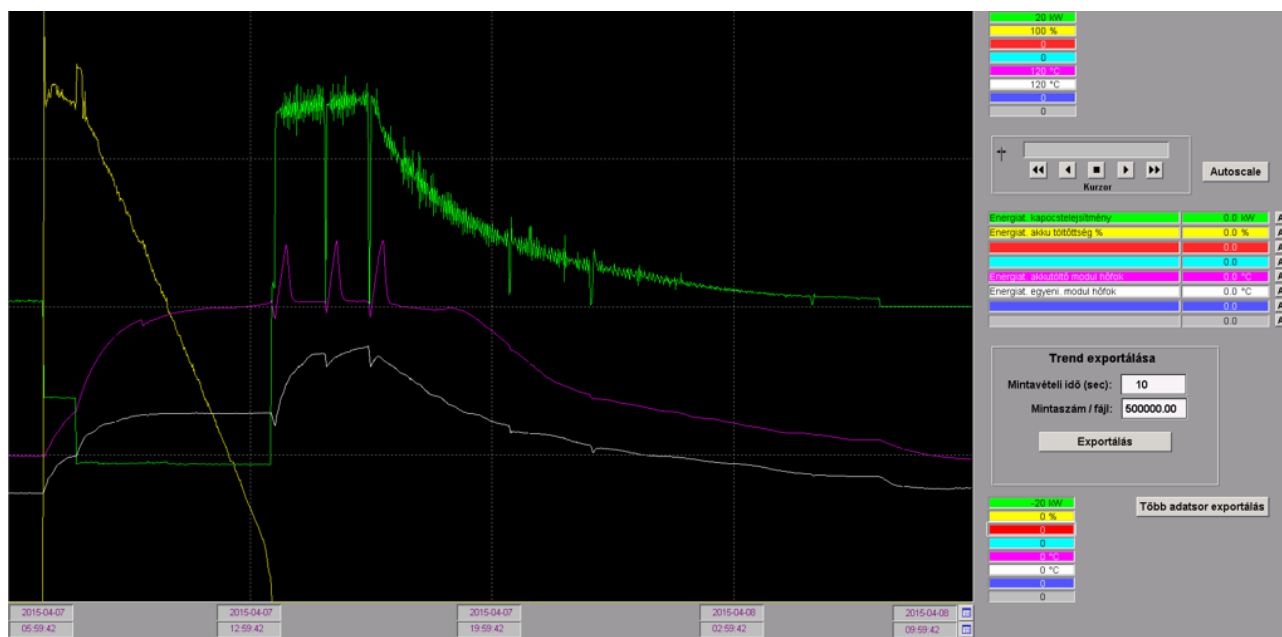
4-14. ábra: hőszivattyú teljesítmény felvétele (24 óra)

4.2.3 Akkumulátoros energiatároló berendezés

A PQ FHUPQ típusú Li-ion akkumulátor névleges kapacitása 40 kWh, névleges teljesítménye 20 kW. Adott a helyi és távvezérlési lehetőség, valamint DSM is. Nem UPS kialakítású. A vezérlését a SCADA rendszeren belül CiCode nyelven lehet implementálni.

4-1. táblázat: akkumulátor mérendő paramétere

Mért mennyiség	Mérés felbontása
Töltöttségi szint	1 perc, realtime
Töltés-kisütés ciklusok száma	alkalom
Töltés-kisütés ciklusok mélysége	alkalom
Hálózatra adott hatásos teljesítmény	15 perc, 1 perc
Hálózatra adott meddőteljesítmény, teljesítménytényező	15 perc, 1 perc
Csatlakozási pont feszültsége	15 perc, 1 perc
Csatlakozási ponton mérhető áram	15 perc, 1 perc
Hőmérséklet	1 óra, 15 perc



4-15. ábra: akkumulátor jellemző töltési-kisütési görbéi

4.2.4 Kábeles csatlakozások, gyűjtőszínek, elosztók, externális hálózat

4.2.4.1 Alkalmazott kábeltípusok

A modellalkotáskor a helyszíni adatok alapján két kábeltípus volt szükséges:

4-16. ábra: 240 mm² rézkábel adatainak felvétele

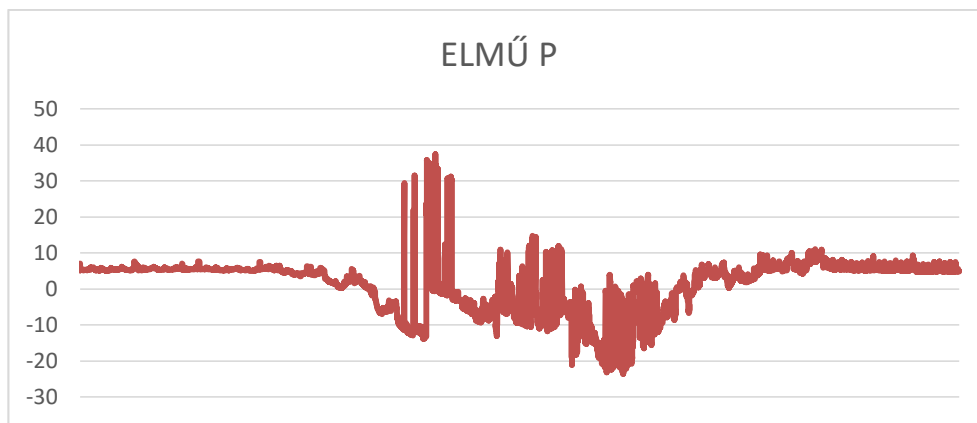
4-17. ábra: 150 mm² rézkábel adatainak felvétele

4.2.4.2 Gyűjtő sín és elosztó típusok

A hálózati összeköttetések megvalósításához mindenhol 0,4 kV névleges feszültségű gyűjtő síneket és elosztói pontokat alkalmazhatunk. A topológia áttekinthetőségének érdekében a helyszínrajz méretarányai alapján készült a kapcsolás.

4.2.4.3 Externális hálózat

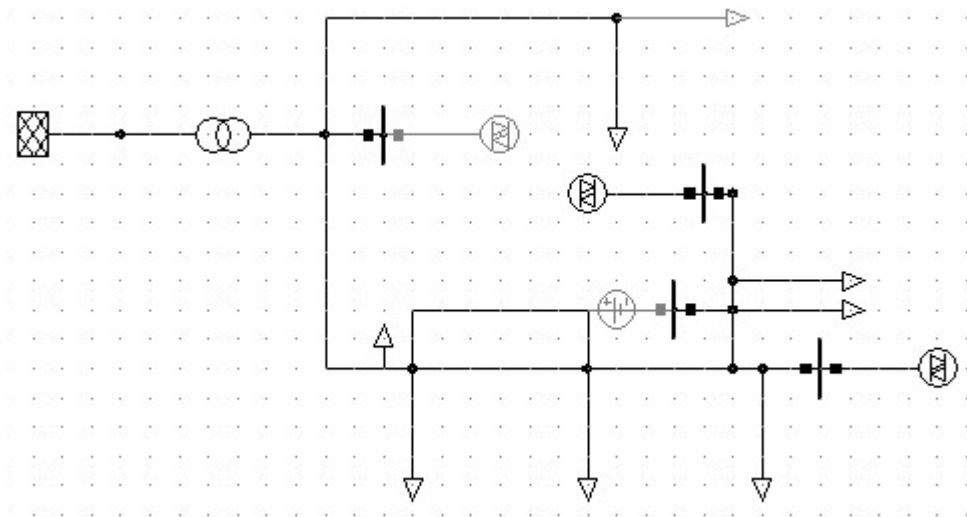
A mögöttes hálózat legfontosabb paramétere a zárlati teljesítmény. Esetünkben egy 20 kV névleges feszültségű elosztói hálózatrészről beszélünk, durva felső becsléssel 1000 MVA-nek vehető az érték. A jellemző teljesítményáramlás az alábbi görbén látható:



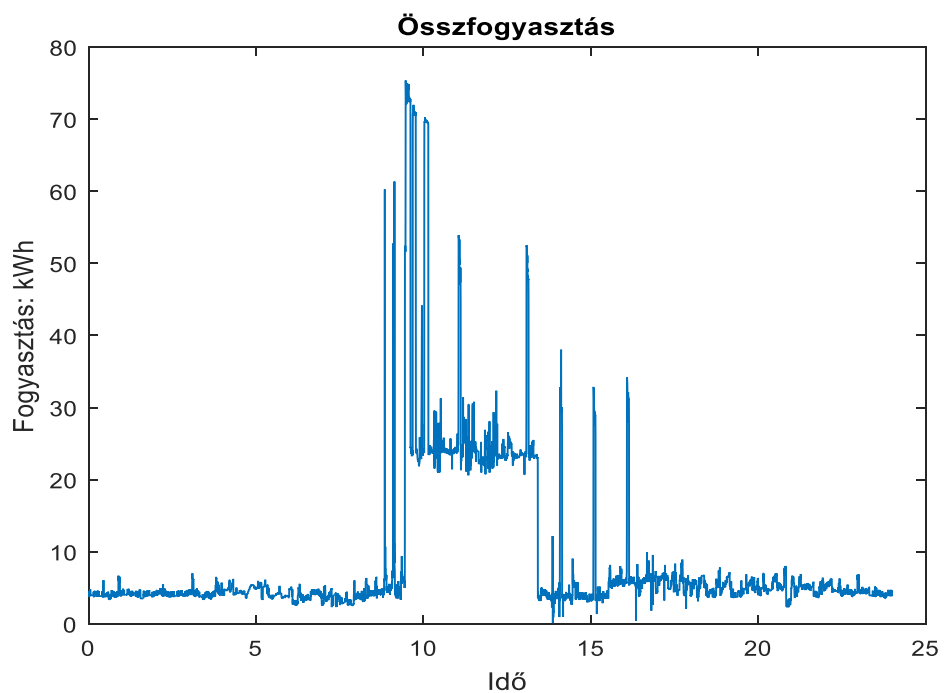
4-18. ábra: a mögöttes hálózat teljesítményáramlása (24 óra)

4.2.5 Load flow szimuláció

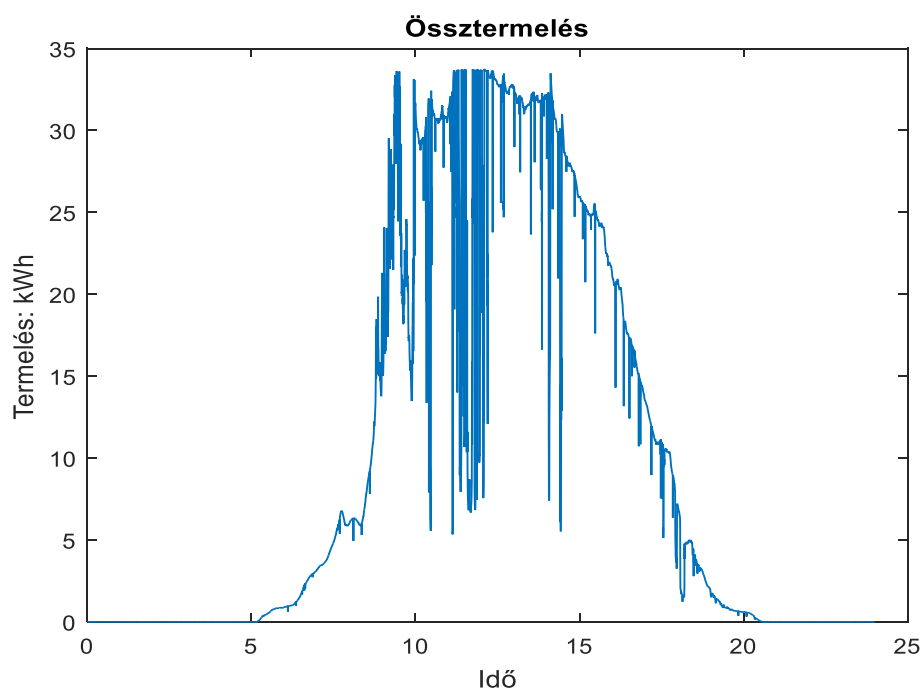
A megadott adatokkal és profilokkal a hálózat alkalmas teljesítményáramlás vizsgálatokra. Mivel a konkrét bevitt értékek felbontása 10 s, így ennél finomabb időközöket nem célszerű választani, a teljes szimulációs időtartam pedig 24 óra. Ezek alapján a hálózati analízis elvégezhető.



4-19. ábra: a megépített topológia



4-20. ábra: összfogyasztás görbe (24 óra)



4-21. ábra: össztermelés görbe (24 óra)

4.3 A modellalkotás általánosítására vonatkozó törekvések sikerességéhez szükséges megkötések

A bemenetek megadása során néhány megkötéssel kell, hogy éljünk annak érdekében, hogy az analízis működése sikeres legyen. Az első ilyen lényeges megkötés a felvehető objektumok száma: típusonként van egy adott korlát, amelynél több elemet a script nem képes feldolgozni, ezt figyelembe kell venni. A kódban ez a korlát igény esetén természetesen növelhető. Az objektumok adatainak minél részletesebb kitöltése javasolt, de minimálisan a teljesítményértékek 24 órás menetrendje szükséges, valamint a típusdefiníciókhoz szükséges alapvető értékek megadása is kötelező. Az analízáló script bemeneteit a mellettük található leírás alapján kell megadni, hibás érték bevitele esetén a program nem fog eredményt generálni.

Az energiatároló berendezések identifikálásához szükséges, hogy a reprezentáló elem neve az ESS (Energy Storage System) kifejezéssel kezdődjön. Ez alapján választódik ki a szabályozható elem. Jelenleg egyetlen berendezés implementálása lehetséges, párhuzamosan több berendezés működtetése eltérő helyeken minden stratégia újrafogalmazását igényli.

A kimenetek minden esetben a program output ablakára íródnak. A script rendelkezik eredmény objektummal, melybe a kimenet átmenthető és exportálható. A feldolgozáshoz minden esetben külső program javasolt, Microsoft Excel és MATLAB segítségével a kiértékelés elvégezhető.

4.4 A standardizált analízáló script funkciói

A bemeneti változók alapján a következő szimulációs paraméterek változtathatóak:

- A szimuláció kezdeti és végső időpontja: nagy időtartamot felölelő adatok esetén egy adott részre fókuszálhatunk, kritikus terhelések vizsgálata kiemelhető, az adatok reprezentálása megoldható.
- A lépésköz állításával az eredmények felbontása változtatható. Alkalmazása erősen függ a választott stratégiától. A load flow kiértékelés folytonos, a diszkrét adatsorok közelítése a modellalkotáskor megadható (spline közelítés javasolt). Az eredmények közt bemutatásra kerül órás és néhány másodperces felbontás is. Rövid idejű fluktuációk vizsgálatára is van lehetőség (<másodperc nagyságú időintervallumok), azonban ilyen szabályozást megvalósító stratégia jelenleg nincs implementálva a modellben.
- A teljesítmény és kapacitás értékek beállíthatóak az energiatároló berendezéshez. Néhány stratégia képes méretezési eljárásokra, ebben az esetben az itt beállított érték jelenik meg a kimeneti adatokban, de megkapjuk azt a kapacitásértéket is, mely esetén az adott körülmények közt nem korlátozza a vezérlést a rendelkezésre álló kapacitás szélsőértéke. A sztochasztikus modellek esetén biztonsági tényező megadása javasolt, mely rendelkezik alapértelmezett értékkel, de a felhasználó is beviheti.

- Az energiaárak és a vezérléshez szükséges limitek bevitele a kereskedési stratégiák meghatározására szolgál.
- A be és kikapcsolási műveletek a microgriden található megújuló energiaforrások esetleg meghibásodását hivatottak reprezentálni. Kapcsolásukkal a hálózati hibákat időzíthetjük, ezáltal modellezési lehetőséget biztosítva a különböző scenáriókra.
- A stratégia kiválasztása is egy egész szám típusú bemenettel határozható meg.
- A hatások változó segítségével megadhatjuk a berendezés villamos-villamos átalakítási hatásfokát, ezáltal figyelembe véve a legsarkalatosabb veszteségi tényezőt az energiatárolás alkalmazások során. A hálózati veszteségek szintén elérhetőek a számítások után, csakúgy mint a beépített scriptek esetén.
- A méretezés funkció bekapcsolásával bizonyos stratégiák esetén meghatározhatjuk az optimális kapacitás és teljesítmény értékeket, ehhez megadhatunk túlméretezési együtthatót is.
- A függelékben található technológiai összegzés alapján ciklusszám és válaszidős korlátokat adhatunk meg, melyek befolyásolják a vezérlést. A kommunikációs rendszerek késleltetése nincs számításba véve a folyamat során, de ez nem jelent nagy elhanyagolást, az ilyen rendszerek jellemzően kellően gyorsak ahhoz, hogy ne okozzanak problémát, illetve jelenleg nincs olyan stratégia implementálva, melynek ebbe a nagyságrendbe eső válaszidőkkel kéne releváns módosításokat végrehajtani.
- Az energiatároló berendezés kiindulási töltöttségi szintje változtatható 0-100% között.

Mint látható a funkciók gyakorlatilag teljes körű analízist tesznek lehetővé gyakorlatilag minden aspektusból vizsgálva a kérdéskört. Nincs minden funkció az összes stratégiához csatolva, minden gyakorlatban is használható eset felvétele még a fejlesztési tervek közt szerepel, de a felsorolt lehetőségek mindegyikének elve kidolgozott és legalább egy ponton meg is van valósítva a modellen belül.

4-2. táblázat: a bemeneti paraméterek listája

Típus	Név	Jellemző érték	Dimenzió	Leírás
double	start	0	h	Start time of the simulation
double	step	0.25	h	Time resolution
double	stop	24	h	Stop time of the simulation
double	capacity	0.04	MWh	Capacity of the storage system
double	power	0.02	MW	Nominal power of the storage system
double	StorageStrategy	4		Strategy selection
int	UpLimit	56		Buying price
int	LowLimit	27		Selling price
int	Median	48		
Int	Outage	2	h	Switches off generator element at exact time
int	Back	14		Switches generator element back at exact time
int	Efficiency	100	%	Storage system efficiency
double	Response	0	h	Response time in hour
int	Cycle	100000		Maximum charging-discharging cycles
int	Sizing	0	T/F	Switches on/off the sizing method

5 Vezérlési stratégiák megfogalmazása

5.1 Smart microgrid koncepció

A smart grid a legfelkapottabb fogalom manapság a villamosenergia-rendszerek kutatásakor. A pontos fogalom meghatározása nem könnyű feladat. A Smart Grids European Technology univerzális definíciója szerint ez egy villamos hálózat, mely intelligensen integrálja a hozzá tartozó minden felhasználó cselekvéseit - a termelőket és fogyasztókat, valamint akik mindkét csoportba tartoznak – azért, hogy hatékonyan tudjanak fenntartható, biztonságos és gazdaságos energiaellátást biztosítani. A lényege az ilyen jellegű hálózatoknak tehát, hogy a fejlett kommunikációs és mérési rendszerek támogatásával a működés az ideális felé közelítsen. Ennek elérésére a keletkezett adathalmazból bizonyos algoritmusok segítségével alakul ki egy vezérlés. Nyilván minél nagyobb a rendelkezésre álló kiinduló adat, annál inkább összetett eljárások valósíthatók meg. Az implementáció hatékonysága kulcskérdés lehet, és az egyes konkrét megvalósítások esetén végezhető módosítások egy általános algoritmusban sokat segíthetnek ennek javításában. Érdemes tehát minden ilyen jellegű probléma megoldását úgy megközelíteni, hogy változókat identificalunk, amelyek minden rendszert jellemeznek, majd speciális paramétereket kérünk a helyes működés eléréséhez. [5][16][17]

Smart Microgrid



5-1. ábra: a Smart Microgrid hálózat szereplői és kapcsolatuk megjelenítése [Zreyas]

Microgridek esetén az adathalmazok a helyi fogyasztói és termelői adatok, összeköttető berendezések (elosztószekrények, kábelezés, csatlakozási pontok a külső hálózathoz) valamint időjárési adatok lehetnek. Az igazán érdekes az, amikor megvalósítható a fogyasztók bizonyos csoportjainak vezérlése. Így a mérési

adatok alapján elindulhatunk egy olyan irányba, hogy a fizikai rendszer felépítésének korlátain túl (bizonyos határfeltételek mellett) bármit képesek vagyunk vezérelni, így a stratégiánk megvalósításakor sok változóval dolgozhatunk. Az idő szerepe is kulcskérdés, mert ez az egyik kritikus határfeltétel több szempontból is, ahogy a későbbiekben azt belátjuk. [5][16][17]

5.2 Az algoritmusok döntési mechanizmusai

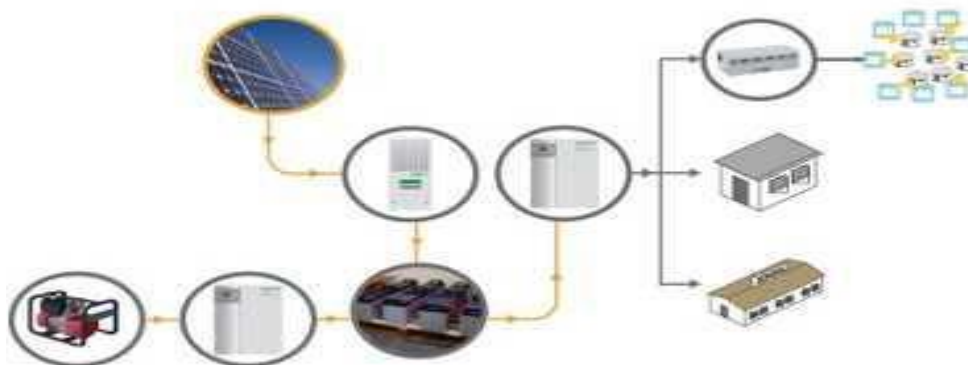
A stratégiák megfogalmazásakor az első fontos feladat, hogy a program milyen döntési feltételek kiértékelésére képes. Ez meghatározza a fejlettségét, illetve rendszerbe illeszthetőségét is. Az alábbiakban bemutatott néhány lehetséges mechanizmus alaptípusnak tekinthető, de ilyen alkalmazásokban az elterjedtségük eléggé eltérő. [15]

5.2.1 Statikus algoritmus

A legegyszerűbb eset, amikor a stratégia nem használ semmilyen változót, hanem bizonyos időpontokban azonos cselekvést végez. Ilyen lehet például egy kisebb teljesítményű energiatároló berendezés automatikus elindítása egy csúcsterhelésű időszakban maximális teljesítménnyel: ez könnyíti a rendszerirányító helyzetét, hiszen számolhat egy bizonyos lokális termeléssel a kiegyensúlyozáshoz. Előnye az egyszerűség, nem igényel komoly adatgyűjtő infrastruktúrát. Viszonylag helyfüggetlen, de a hálózati struktúra változásakor feleslegessé válhat, a döntési mechanizmus fejlesztése nélkül könnyen elavul.

5.2.2 Valós idejű load flow követés

Sokkal érdekesebb megoldás a valós idejű adatokat feldolgozó algoritmus. Ennek előnye, hogy a hálózat konkrét eseményei alapján hoz döntést, így mindig aktuális értékekkel dolgozik. Az adatgyűjtés szerepe itt kiemelt, ennek sebessége határfeltételt szab a működésnek. Klasszikus példa lehet erre egy biztonsági tartalék esete: folyamatosan feszültséget figyelünk egy adott ponton, ha hibát észlelünk, beindítjuk a tartalékot. Erősen ki van téve a kommunikációs rendszer meghibásodásainak, hiszen ha nincs adat a döntés pillanatában, akkor nem végezhető el a szükséges cselekvés sem. A konkrét implementálásra és paraméterekre a későbbi esettanulmányban részletes információ található. [15]



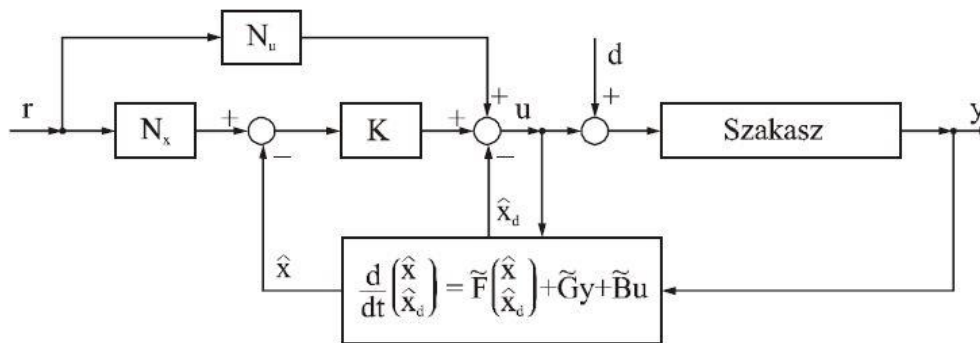
5-2. ábra: Schneider-Electric SCADA adatgyűjtés és vezérlés áttekintő rajza [Schneider Electric]

5.2.3 Előre programozott menetrendkövetés

A múltbéli események alapján következtetések vonhatóak le, melyek alapján a jövőbeni működtetés előre programozható. A megoldás lényege, hogy bizonyos mintázatokat eltárolunk, majd ezek alapján kialakítunk egy működést a következő periódusra. Előnye, hogy jó kialakítás esetén a vezérelt eszközünk nem reakciókat valósít meg, hanem a saját belső készletései alapján működik. Nem szükséges valós idejű adatok azonnali felhasználása, így kevésbé van kitéve a kommunikációs rendszerek hibáinak. [15]

5.2.4 Model Predictive control, állapotteres szabályozás

Klasszikus állapotteres szabályozó struktúrát is tervezhetünk a rendszerünkbe, mely egy megfelelően megválasztott folyamatot leíró differenciálegyenlet véges számú iterációs lépésben történő megoldásával állítja elő a megfelelő jeleket. Terhelésbecslés implementálásával dolgozható ki a leginkább áttekinthetően a módoszat a dolgozatban tárgyalt felhasználások esetén. Bizonyos esetekben soros kompenzátor elvű működés is elképzelhető, de ez egy elég speciális területe lehet az energiatároló berendezéseknek (pl. lendkerék, szuperkapacitás frekvenciaszabályozásban). [15]



5-3. ábra: állapotteres szabályozó struktúra terhelésbecslővel [BME]

5.3 Lehetséges célfüggvények

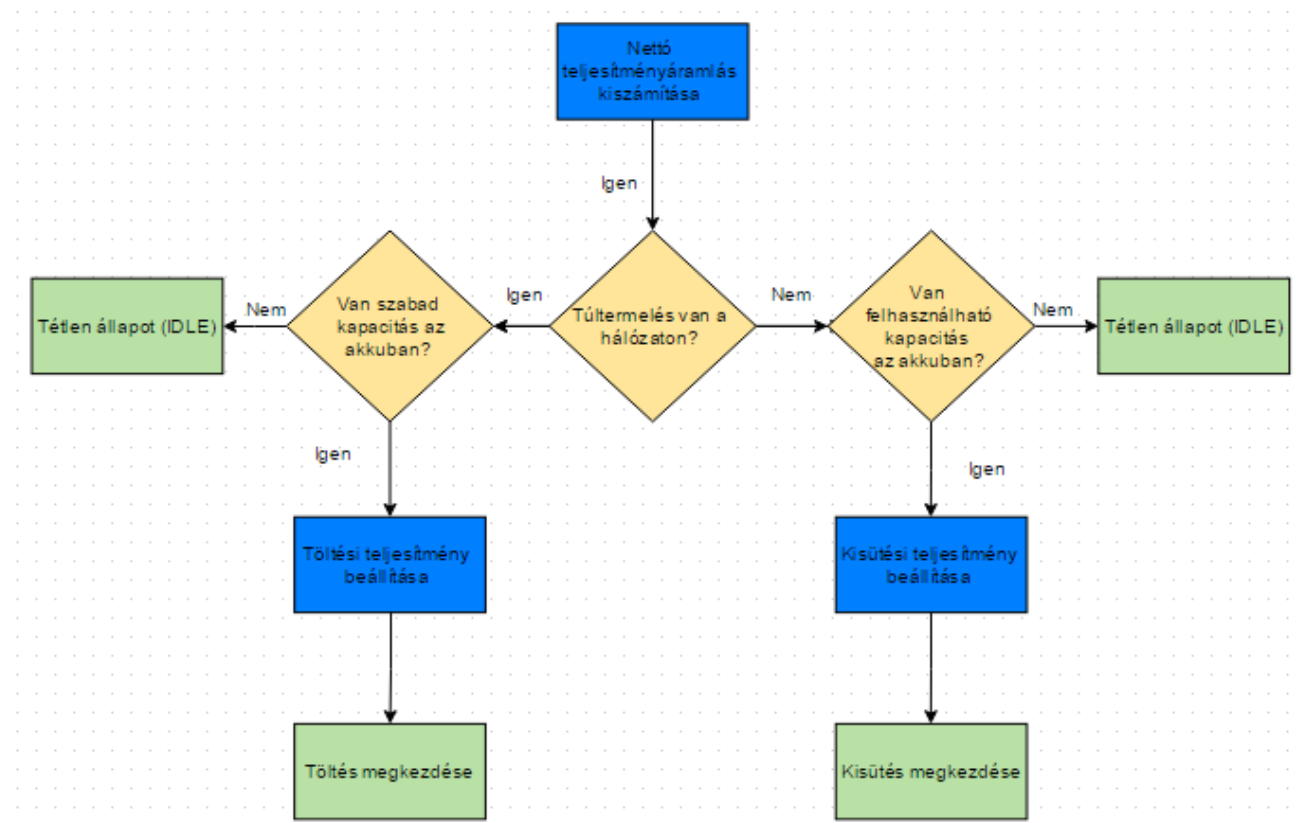
A konkrét célok megfogalmazása a kulcskérdés, hiszen ez az, ami összeköti az elméletet a gyakorlattal. A korábban felsorolt alkalmazások és hálózati sajátosságok matematikai algoritmusokon keresztül itt találkoznak a beavatkozó rendszerrel. Az alábbiakban több megoldás kerül bemutatásra, melyek az elosztói hálózaton végezhető műveletek közel teljes spektrumát lefedik. Külön érdekes lehet ezen célfüggvények megfelelő egymásba ágyazása, hiszen ekkor jutunk el a hőn áhított aggregát működésig, amely az energiatárolás elterjedésének Szent Grálja lehet. Az alapelv a következő: a hálózat, amelyet vizsgálunk egy önálló microgrid, csatlakozási ponttal az elosztói hálózatra (leginkább egy a szerencsés, a teljes analízis fejlesztésekor így feltételezzük, hogy minden vizsgált hálózat egyetlen csatlakozási ponttal rendelkezik: ez nem olyan szigorú megkötés, viszont több vizsgált algoritmus esetén komoly egyszerűsítést jelent). A hálózaton található termelőegység (jellemzően decentralizált megújuló energiaforrás, de adott esetben lehet más is), valamint különböző fogyasztók. A felsorolt 3 típus mellett játszik szerepet az energiatároló berendezés, optimalizálva a teljesítményáramlási egyenletet (később a határfeltételeknél kiegészítve). Minden esetben időfüggvényekről beszélünk, hiszen a vizsgált témakörnek ez a fő feladata: új dimenziót nyitni az ellátás megvalósításában. [15]

5.3.1 Valós és virtuális szigetüzem kialakítása

A bemutatott microgrid alapú decentralizált koncepcióban a szigetüzemű működés kritikus és sokat kutatott probléma. Az ellátás biztonságának kérdése itt egyértelműen függ az energiatároló berendezés kapacitásától, ennek végessége korlátozza a működés sikerességét. Ennek érdekében alakítható ki a virtuális szigetüzem gondolatmenete: alapvetően úgy gondolkodunk, hogy nincs kapcsolat a hálózat többi részével, de ha az ellátás megszűnne, tartalékként bevethető a mögöttes hálózat.

A teljesítményáramlás kiszámítása után (teljes fogyasztás, össztermelés) egy nettó érték kiszámítása: ezt alapesetben a hálózathoz vételeznénk, de most pont az a cél, hogy ne legyen kapcsolat: tehát ha van eltárolt energiánk, akkor bevetjük. Amennyiben túlermelés van, azt nem adjuk át, hanem elraktározzuk, hiszen ez a

képződő kapacitás lesz az, amely átvisz a magasabb fogyasztásértékű időszakokon. Természetesen kezelni kell azokat az üzemállapotokat, amikor nem tudunk az energiatárolóval megfelelő működést biztosítani: ekkor lépünk ki a szigetüzemből virtuális esetben. Valós szigetüzemnél ez nyilván nem lehetséges, de bizonyos hálózatok alapján véve nem alkalmasak ilyen működésre, valamint előfordulhat, hogy nincs elég kapacitás a lebonyolításhoz.

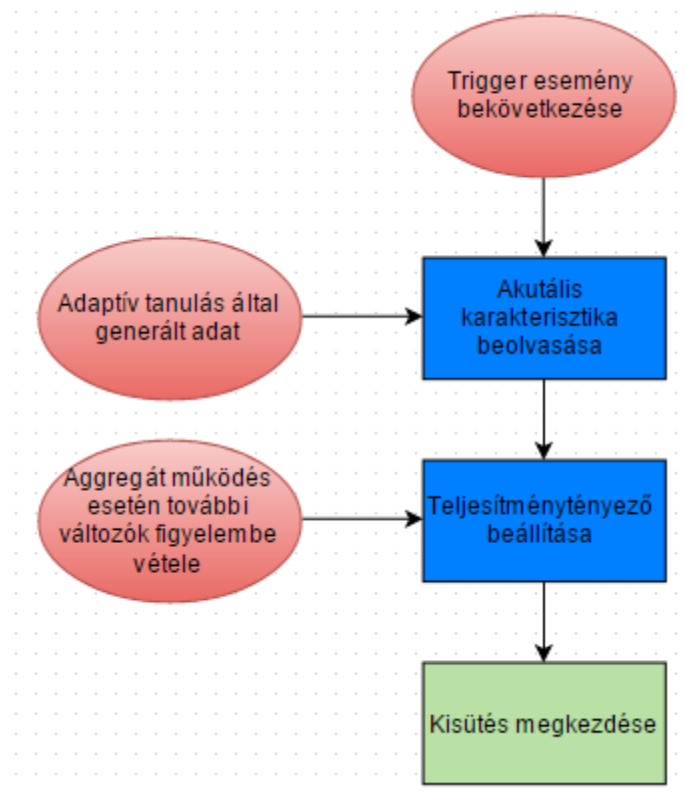


5-4. ábra: virtuális szigetüzem vezérlés folyamatábrája

5.3.2 Menetrendszerű meddőteljesítmény igény kompenzálása

A hálózatunkon vannak bizonyos fogyasztók, amelyek menetrendszerű működésűek, és komolyabb meddőigénnyel rendelkeznek (például motoros indítások). Ezek kezelésére kialakítható egy működés, melyben a tároló elemünk teljesítménytényezőjének befolyásolásával helyben állítjuk elő az igényelt reaktív komponens. Kiváló platform ez a smart grid koncepció egy sarkalatos gondolatának tesztelésére: a fogyasztói oldalon bevezetendő vezérlések lehetővé teszik a menetrendszerű meddőigény növelését, amely így szignifikánsabb eredményeket szolgáltatathat. Kiválóan alkalmas aggregát működtetésre, hiszen mindig egy konkrét időpontban aktív, azon kívül tétlen.

A lényeg tehát, hogy van egy eltárolt minta információnk a fellépő igényről: amint elérünk az időbéllyegig (lehet trigger esemény is), az energiatároló berendezés leadja a bevitt reaktív karakterisztikát, amely helyes működés esetén kiejti az igényeket.

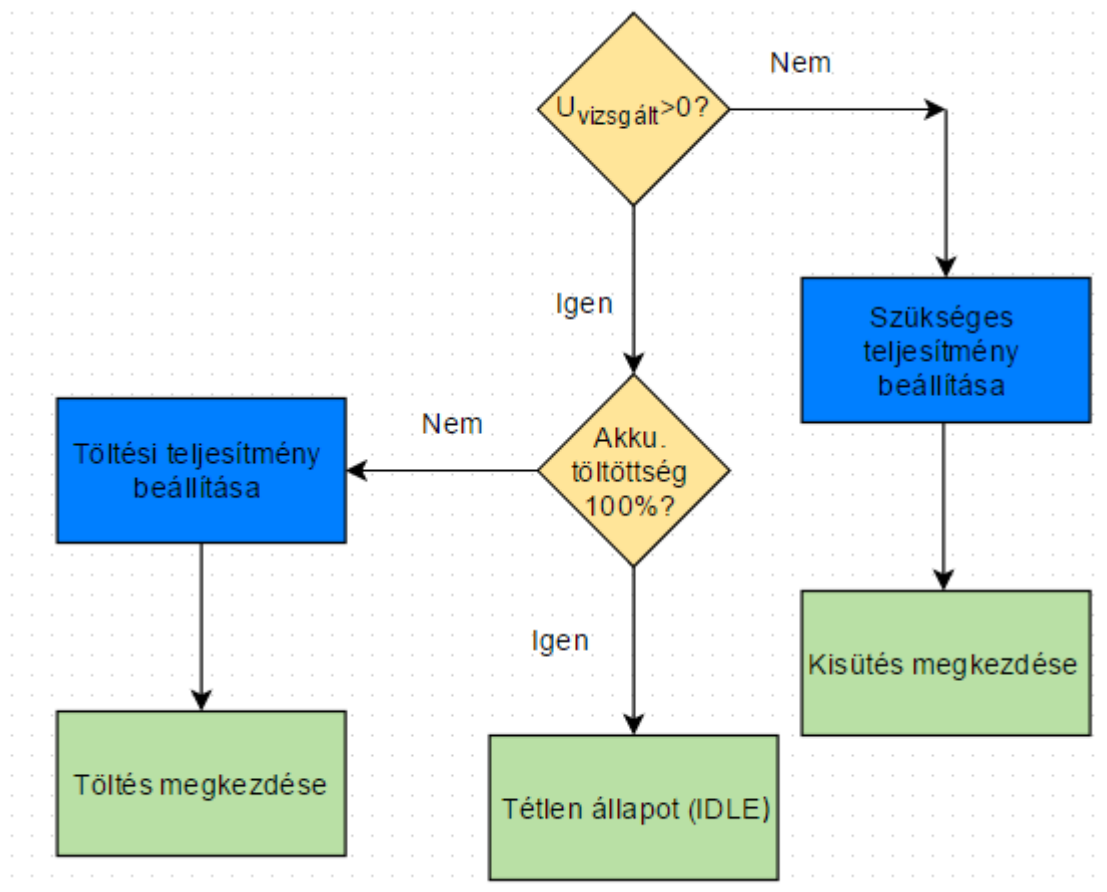


5-5. ábra: menetrendszerű meddőkompenzáció folyamatábrája

5.3.3 Ellátásbiztonság növelése

Bizonyos környezetben egyszerűen nem megengedhető bizonyos hálózatrészek ellátásának megszűnése. Az ilyen kritikus infrastruktúrák támogatására energiatároló tartályok létesíthetőek, melyekkel a meghibásodások esetén létrejövő kimaradások áthidalásának lehetősége javítható. Nyilván korlátozottak a lehetőségek, de a dízelgenerátoros megoldásoknál bizonyos helyzetekben jobb és költséghatékonyabb üzemelés valósítható meg.

A tartály feltöltésének két módja lehet: egyrészt lehetséges, hogy a bekapcsoláskor minden rendelkezésre álló erőforrás tölteni kezd a teljes töltöttség eléréséig. Másrészt feltölthetünk úgy is, hogy megvárjuk, míg a termelés meghaladja a fogyasztást, és a különbözetből fedezzük a szükségleteket. Ez lassabb, azonban sokkal inkább hálózathatóság megoldás, valamint a megfelelő termelők esetén tisztán zöld energiából álló tartály is képezhető.

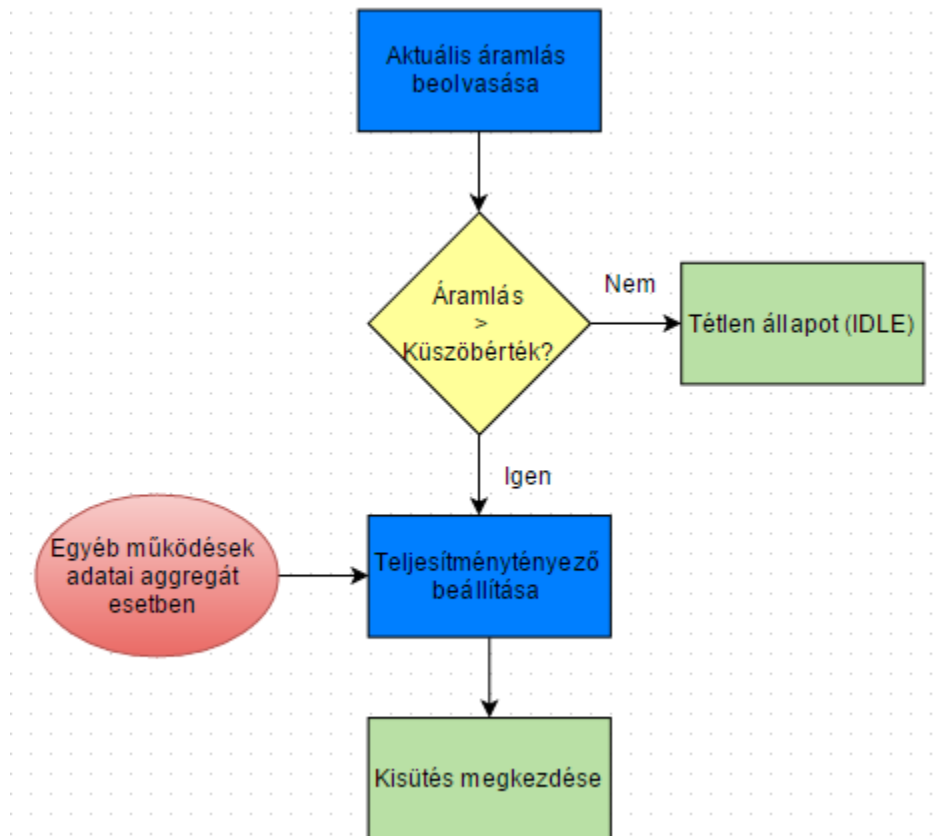


5-6. ábra: megbízhatóság függvény folyamatábrája

5.3.4 Speciális minőségi követelmények: meddőáramlási küszöb tartása

A feszültségminőség és hálózati veszteségek egyaránt erősen függenek a meddőteljesítmény-áramlástól. A fázisjavítás gondolata nem új keletű dolog, jól bevált eszközök és eljárások képződtek rá a közelmúltban. Ennek egy újszerű megvalósítása lehet az energiatárolók alkalmazása bizonyos küszöbértékek betartatására: ha eléri a kitűzött küszöbértéket a mért érték, a tároló kompenzációs működésbe kezd. Jó lehet aggregát alkalmazásban, hiszen az idő nagy részében nem szükséges az üzemelés.

Bizonyos pontokon mérjük a teljesítményértékeket, majd összehasonlítjuk a definiált határértékekkel. Ha túl nagy az áramló érték, kompenzáció szükséges az adott szakaszon.

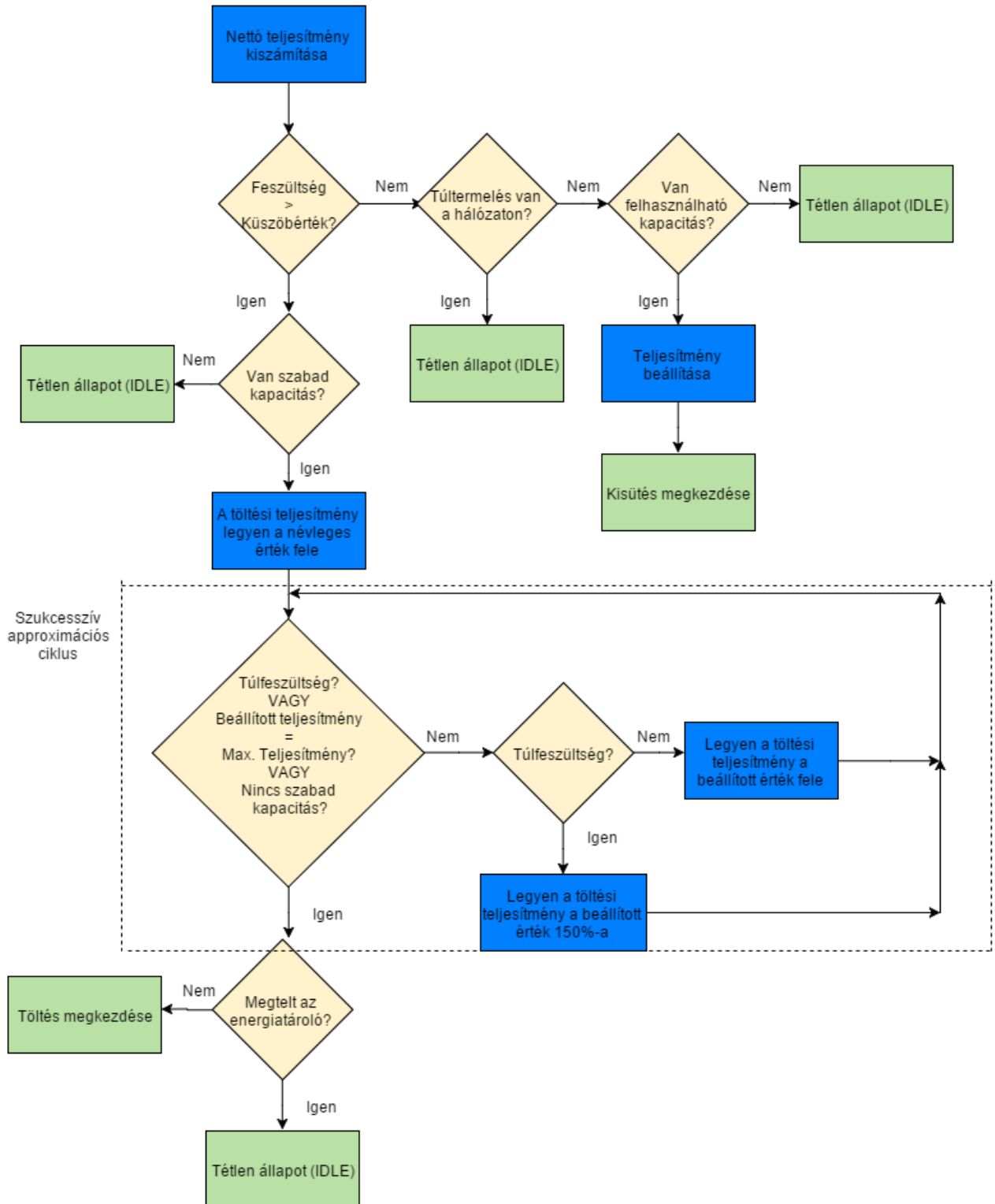


5-7. ábra: meddőáramlás korlátozás vezérlés folyamatábrája

5.3.5 Speciális minőségi követelmények: feszültségtartás egy adott hálózati ponton

Előfordulhat, hogy egy hálózati ponton a feszültségérték kiesik a definiált tűréshatárból. Léteznek olyan termelők illetve fogyasztók, amelyek érzékenyek az ilyen problémákra akár kis léptékben is, így érdemes ügyelni a határok betartására. Ez a kérdés a decentralizált termelőegységek elterjedésével egyre inkább aktuálissá válik.

A feszültségérték függvényében változtatunk a működésen: növelési igényre betáplálás erősítése, csökkentési igény esetén pedig felvétel jelenthet megoldást. A működésnek kellően gyorsnak kell lenni, de ebben az esetben a ciklusidő meglehetősen széles skálán mozoghat.



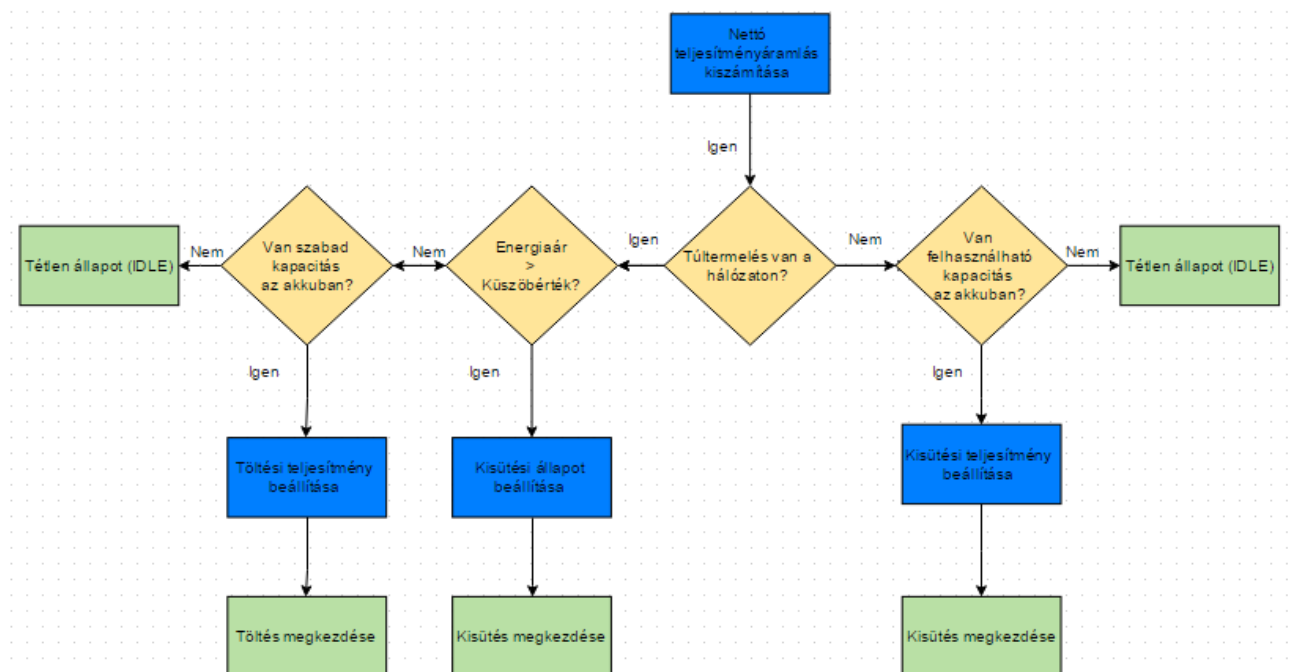
5-8. ábra: feszültségtartás vezérlés folyamatára

5.3.6 Energiakereskedelem: költséghatékonysági optimum

A liberalizált villamosenergia-piacra való belépés az egyik leginkább kecsegtető alkalmazás a gazdasági haszon előállítására. A megújuló energiákat körülvevő támogatásrendszer túlzó, hosszú távon működésképtelen, azonban a megfelelő tároló kapacitás alkalmazásával az eladást olyan időszakokra

időzíthetjük, amikor magasabb az ár, így több profitot realizálhatunk. Természetesen a veszteségi komponenseket minden esetben figyelembe kell venni.

A minimalizálandó függvény itt a lokális energiafelhasználás költsége: az áramlás nettó értékének kiszámítása az első döntési feltétel, ez határozza meg, hogy mit vagyunk képesek tenni. Ezután az ár szabja meg, hogy mit akarunk cselekedni. Ezek az értékek bemenő paraméterként jelentkeznek a függvények számára. Érdemes figyelembe venni, hogy az energiatárolásnak van egy bizonyos határfoka, így a veszteségi komponenst is fedeznünk kell a költségekből. Ezt bizonyos esetekben statikusan már az ár határfeltételbe beépíthetjük, avagy a cikluson belül konstans szorzásként valósíthatjuk meg.



5-9. ábra: energiakereskedelmi vezérlés folyamatábrája

5.3.7 Hálózati veszteségek csökkentése

A veszteségek csökkentése mindig is felkapott téma, főleg a kisebb feszültségszinteken, hiszen a veszteségek döntő többsége itt áll elő. A hálózat, mint fizikai közeg korlátot szab a csökkentésnek. Emellett a másik fontos tényező az, hogy mennyi teljesítményt áramoltatunk és mennyire állunk közel az optimális értékekhez az egyes alkalmazások esetén.

A csökkentés érdekében meghatározzuk, hogy mekkora értékek az ideálisak az egyes összekötő elemeken: szimulációs környezetben hasznos egy előzetes terhelésvizsgálat, erre az alkalmazott szoftver képes. Ezután meg kell találni az optimális áramlást: szerencsére erre sem kell új ötletet feltalálni, hiszen a lehetőség adott a program által kínált megoldásban. Azonban az energiatároló berendezéssel egy új változó is a kezünkben van, így ezt figyelembe véve kell döntéseket hozni az előzőekben leírt fizikai kép alapján.

5.4 Általános határfeltételek

A vezérlés megvalósításakor bizonyos határfeltételeknek kell megfelelnünk, hogy a valóságban is működőképes legyen az alkalmazásunk. Ezek néhány esetben triviálisnak tűnhetnek, ám az algoritmusok szintjén végzett műveletekben komoly odafigyelést igényelnek, hiszen ezek megsértésével könnyen kimaradást, esetleg maradandó eszközkárosodást okozhatunk. Mivel a célfüggvényeink teljesítményáramlás szabályozását hivatottak biztosítani az időben, így az alábbi határfeltételek is ehhez igazodnak. [15]

5.4.1 Egyensúlyi feltételek

Mivel fizikai rendszerről beszélünk, a megmaradási és egyensúlyi törvények mindig teljesülnek a hálózatunkon. A tárgyalt esetekben teljesítményáramlások vizsgálatával foglalkozunk, így az itt létrejövő egyensúlyt használhatjuk fel. A felírt egyenlőségben a már korábban is használt csoportosítást alkalmazzuk, mely alapján a fogyasztók, a termelők és a csatlakozási pont alkotja a hálózat konvencionális részét, míg az energiatároló elem áramlásán keresztül végezzük a szabályozást. A többi fizikai egyensúlyi feltétel a modellalkotás kényszereiből adódóan teljesül, és szabályozási szerepet nem játszik, így felsorolásától eltekinthetünk.

$$P_{net} = P_{termelt} - P_{fogyasztott} \pm P_{energiatároló}$$

5-1. egyenlet: a teljesítményegyensúly értelmezése hálózati szereplők csoportjaira [15]

5.4.2 Elemek korlátossága

Minden hálózati elemünk rendelkezik egy elvi korláttal az áramlási értékek tekintetében. A mögöttes hálózat ugyan igen széles skálán képes a működés biztosítására, hiba lenne azonban azt feltételezni, hogy bármilyen szélsőséges esetben képesek vagyunk ilyen módon kompenzálni az igényeket: itt a zárlati teljesítmény megadásával korlátozhatunk (ezt azonban a vizsgált kisméretű hálózatok pontosan a saját korlátosságukból adódóan jellemzően nem fogják elérni). Minden elemünk esetén fennállnak a következők:

$$0 \leq S_{üzemi} \leq S_{névleges} \rightarrow P, Q \text{ ebből következően hasonlóan}$$

5-2. egyenlet: az elemek teljesítményének korlátossága [15]

Megszabhatunk továbbá bizonyos határértékeket egyes elemekre, melyek a biztonságos működés érdekében nem léphetők át. Gondolhatunk például itt arra, hogy néhány akkumulátoros energiatároló berendezés esetén jelentősen csökkentheti a megvalósítható ciklusszámot az, ha teljes kisütést végzünk. Hasonló megfontolásból lehet megkötést tenni a maximális ki és beáramló teljesítményekre.

$$S_{min} \leq S_{üzemi} \leq S_{max}$$

5-3. egyenlet: biztonságos működés miatti teljesítménykorlátozás [15]

$$E_{min} \leq E_{üzemi} \leq E_{max}$$

5-4. egyenlet: biztonságos működés miatti kapacitás korlátozás [15]

Nem figyelmen kívül hagyható határfeltétel a teljesítménytényező értéke, melyet a szabályozási folyamatok során felhasználunk:

$$0 \leq \cos \varphi \leq 1$$

5-5. egyenlet: a teljesítménytényező lehetséges értékei [15]

5.4.3 Időfelbontás korlátai

Minden algoritmus működésében korlátot szab a lehetőségeinknek az, hogy milyen gyorsan vagyunk képesek a műveletek elvégzésére. Értendő ez a változók értékeinek figyelésére, valamint a beavatkozó műveletek elvégzésére egyaránt. Például a valós környezetben megvalósított stratégiák esetén, az akkumulátoron végzett minden kapcsolási művelet után 2 másodperces várakozást iktatunk be, hogy biztosan abban az állapotban legyen az eszköz, amelyet beállítottunk. Emellett a működés beállítása 15 perces ciklusokban történik. A változók kiértékelése azonban itt is lehet rövid idejű, ezeket az adatokat pedig felhasználhatjuk a kapcsolási műveletek megvalósításakor. Máshol a beavatkozás akár ms-os időben is történhet (pl. szuperkapacitások).

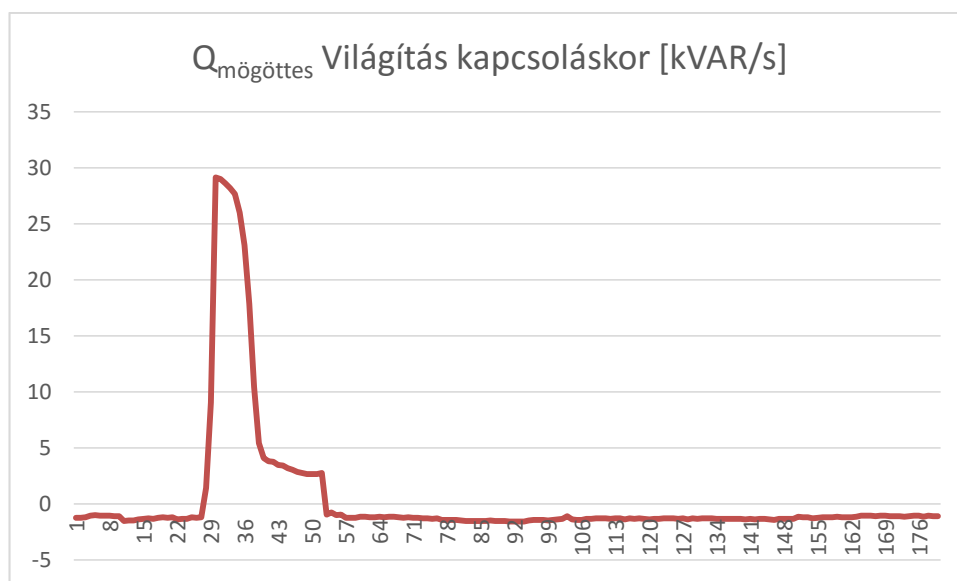
$$P_{össz} = \sum_{k=0}^T P_k, T \in \mathbb{Z}$$

5-6. egyenlet: az időfelbontás szemléletessége: T db minta egy adott intervallumon [15]

5.5 Adaptivitás

Az algoritmusok egyik fontos tulajdonsága lehet az alkalmazkodó képesség. Gondolhatunk itt arra, hogy a kapcsolási eseményekkor a kialakuló beállítások mindig az adott helyzetnek megfelelő áramlást állítsuk be. Ez elsősorban úgy alakul ki, hogy a programunk eltárolja az eseményeket, amelyekre reagál, majd valamilyen matematikai módszerrel kiértékeli az eddig megjegyzett adatokat. A konkrét megvalósítások erősen függenek attól, hogy milyen célfüggvényt valósítunk meg.

Jó példa lehet adaptivitás implementálására a menetrendszerű meddőteljesítmény kompenzációs üzem. Ilyenkor például egy motoros fogyasztó időzített bekapcsolásával alakul ki a trigger esemény, ez változtatja meg az energiatároló berendezésünk működését. Ilyenkor megvalósítható olyan értelemben adaptív algoritmus, amely az előző 10 működési ciklus átlagát veszi, a legutóbbit többszörös súllyal. A mért hálózaton ilyen esetben a szivattyúkat érdemes vizsgálni, itt jól elkülöníthető, jellegzetes görbén dolgozhatunk.

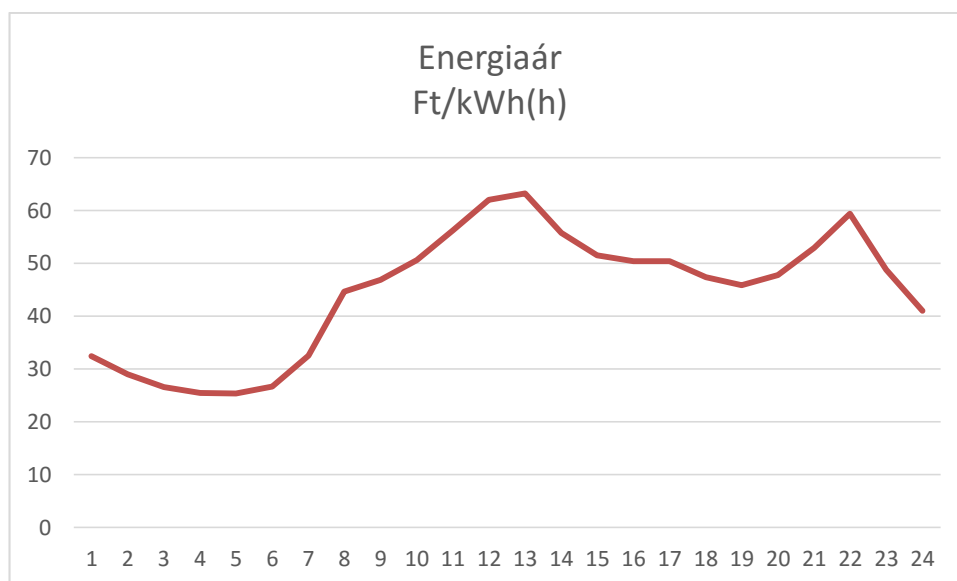


5-10. ábra: az ELMŰ mögöttes hálózatának meddőteljesítmény leadása a pályavilágítás bekapcsolásakor (30 perces mért adat)

5.6 Prediktivitás

Előrejelzések alkalmazása nagyon fontos a vezérlési stratégiák megfogalmazásakor, hiszen a csak tisztán reagálásra képes rendszer esetén gyakorlatilag csak késleltetett beavatkozások valósíthatóak meg. Az előrejelzések készítése nem egyszerű feladat: gondolhatunk itt például a megújuló energiaforrások esetén időjárási mérések segítségével végezhető előrejelzésekre: erre a mért hálózaton rendkívül sok lehetőségünk adódik. A bemutatott eljárásoknak azonban nem célja a predikciók előállítását ismertetni, ezek felhasználása a lényeges, így az előrejelzési függvények gyakorlatilag bemenetként kapnak egy becslést, mely segítségével beállnak egy bizonyos működésre.

Kiváló példa a prediktív algoritmusokra az energiakereskedelem esete. A liberalizált villamosenergia-piacon az árak 15 perces léptékben változnak. Ez a terület lehetőséget biztosít arra, hogy egy jól felépített stratégiával az energiatárolón keresztül vezérelt microgrid piaci szereplőként tevékenykedjen. Az árakra reagálni azonban nem kifizetődő stratégia, valamilyen előzetes menetrend és definiált határértékek szerint kell beállítani a helyes működést. A magyarországi liberalizált piac adatai a HUPX internetes oldalán elérhetőek különböző időbontásokban, ezekből az adatokból pedig megfelelő módszertannal a valóságot jól közelítő becslések állíthatók elő.



5-11. ábra: HUPX energiaár adatok, 2013. július [HUPX]

5.7 Fejlesztési lehetőségek, aggregát működés

Az intelligens algoritmusok megoldásaival a hálózat működtetése közel kerül az optimálishoz. Sosem lehet azonban leállni a mögöttes vezérlés fejlesztésével, hiszen az újszerű kihívások folyamatosan jelentkeznek. Az aggregát működések kialakításával olyan irányba léphetünk el, amely megváltoztatja a tárolásról eddig kialakult képet. Az időfüggvények közvetlen befolyásolásával olyan optimalizációs célfüggvényeket implementálhatunk, amelyek közvetlenül elősegítik a smart grid koncepció és a decentralizáció beteljesülését. Újabb és újabb célok elérésére fogalmazhatunk meg stratégiákat, melyek növelik a diverzitást. Sokszor lényeges, hogy rövid ideig nagy haszon realizálható egy működésből: több ilyen párhuzamosítva és kiegészítve egy átgondolt alaplóműködéssel a folyamatos bevétel generálás elérhető. Az aggregát kialakításokban gyakorlatilag végtelen lehetőségek rejlenek. Fontos emellett a lokális specialitások kezelése: minél inkább standardizált egy függvény, annál felkapottabb lesz a nagyléptékű felhasználásban, hiszen apróbb módosításokkal gyorsan implementálható.

6 Szimulációs és mérési eredmények [F3]

Az eredmények bemutatásakor a korábban megfogalmazott alapelvek szimulációs és valós mérési környezetben történő megvalósításának főbb lépései kerülnek részletezésre. Emellett egyes helyeken a vezérlést megvalósító kódok hivatkozásai találhatóak (ezek a függelékben találhatóak), valamint az eredmények grafikus szemléltetése. Néhány esetben olyan szimulációk és mérések is készültek, melyek kimenete nagyméretű adathalmaz (10 000 -50 000 mért érték egy változóra, 10-nél is több változó). Ezek grafikus megjeleníthetősége erősen korlátolt, a számításokhoz azonban a diagramok mögött álló táblázat nagyszerű lehetőségeket rejt magában.

6.1 A DigSilent Power Factory program szimulációs környezetében futtatott tesztek

A modell bemeneti és kimeneti paraméterei a funkció leírásban (4.4.) már bemutatásra kerültek. A Digsilent Programming Language (DPL) egy objektum orientált nyelvezet, mely igen sokrétű objektumokhoz rendelt függvénykínálattal rendelkezik. A különböző típusok leírását a programhoz tartozó User Manual és Technical Reference segítségével részletesen megismerheti a felhasználó. Az analízáló script felépítése a következő:

- Változók deklarálása
- Inicializáció, bemeneti változók esetleges feldolgozása
- Objektumok beolvasása a hálózat modelljéből
- Load flow ciklus:
 - Objektumok adatainak frissítése a Newton-Raphson iteráció alapján
 - Összesített áramlási adatok meghatározása
 - Vezérlési stratégiák
 - Eredmények kiírása
 - Időlépés

A műveletek elvégzéséhez szükséges változók kezdeti értékének beállítása után a program minden időlépésben kiszámítja az aktuális teljesítményáramot, mely alapjául szolgál a döntési mechanizmusnak. A load flow számítás program által kínált része az iterációs folyamat, amely a kényszerek alapján kiszámítja a teljesítmények irányát és nagyságát. A konkrét működéshez szükségünk van egy időbeni lépéseket megvalósító és ciklikusan az áramlásszámítás indítását vezérlő keretrendszerre: ezt a script valósítja meg. Az objektumok sem képződnek le automatikusan, ezeket minden ütemben egy pásztázás segítségével érhetjük el: a script fejlesztése során szűrők kerültek implementálásra a könnyebb hozzáférhetőség és áttekinthetőbb implementálás érdekében. A ciklusokon belül pedig egy bemeneti változó alapján választódik ki, hogy mely

vezérlés valósul meg. A vizsgálatok során a tároló 100%-os töltöttségi állapotról indult, de ennek beállítása bemeneti paraméterrel változtatható.

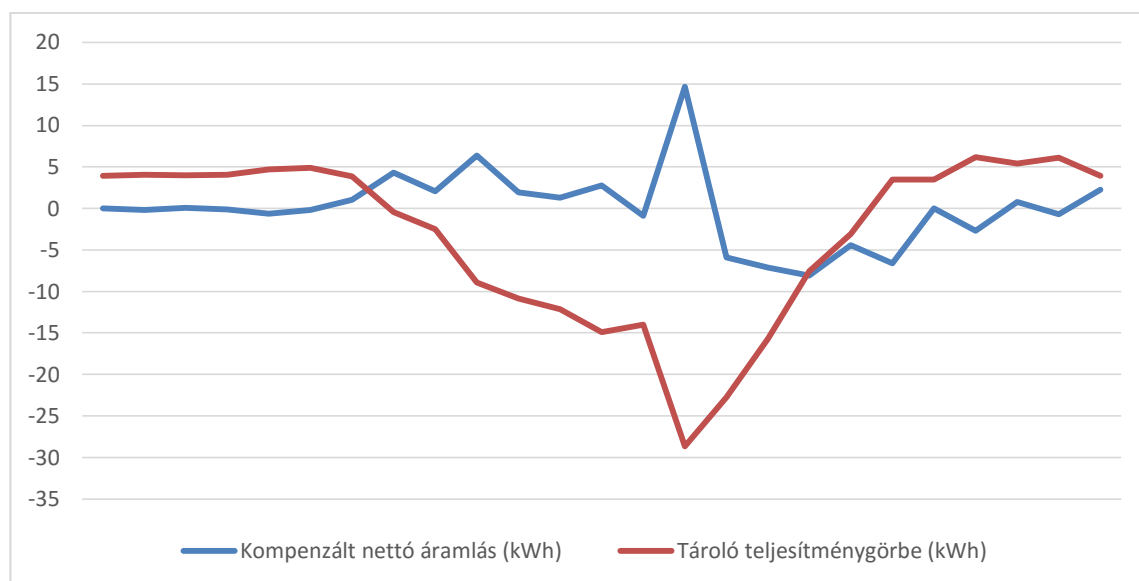
A szoftver használatának egyik legnagyobb előnye, hogy villamos mennyiségek széles palettája elérhető rajta keresztül plusz számítások implementálása nélkül. Így például kisebb változtatásokkal bármely stratégia esetén vizsgálhatjuk a feszültségviszonyokat, terheltségeket.

Alapvető változtatás a jelenlegi valós állapothoz képest: a korábbiakban ismertetett jelleggörbéknél megfigyelhető, hogy a locsoló berendezéseknek rövid, akár egy 10másodperces periódusú extrémén nagy (ezen a hálózaton) teljesítményfelvétele van: a berendezések működése a görbéből is jól visszakövetkeztethető: a folyamatos locsolás egy puffer tárolóból történik, ennek közel konstans teljesítményigénye van, a tárolóba való felszívás viszont rövid idejű tuskéket eredményez. Mivel ezek a berendezések tipikusan jól ütemezhető cselekvést valósítanak meg (a legtöbb új ilyen méretű locsoló berendezés már programozható), így feltételezzük azt, hogy a fogyasztóoldali vezérlés már adott, így ezek az ugrásszerű teljesítményváltozások nem okoznak problémát. Az ilyen rövid idejű változások ugyanis gyakorlatilag lekövethetetlenek, és felesleges egyciklusú kisütésekhez vezetnek, így elhanyagoljuk őket (a teljes projekt dokumentációjában természetesen ezek az eredmények is szerepelnek).

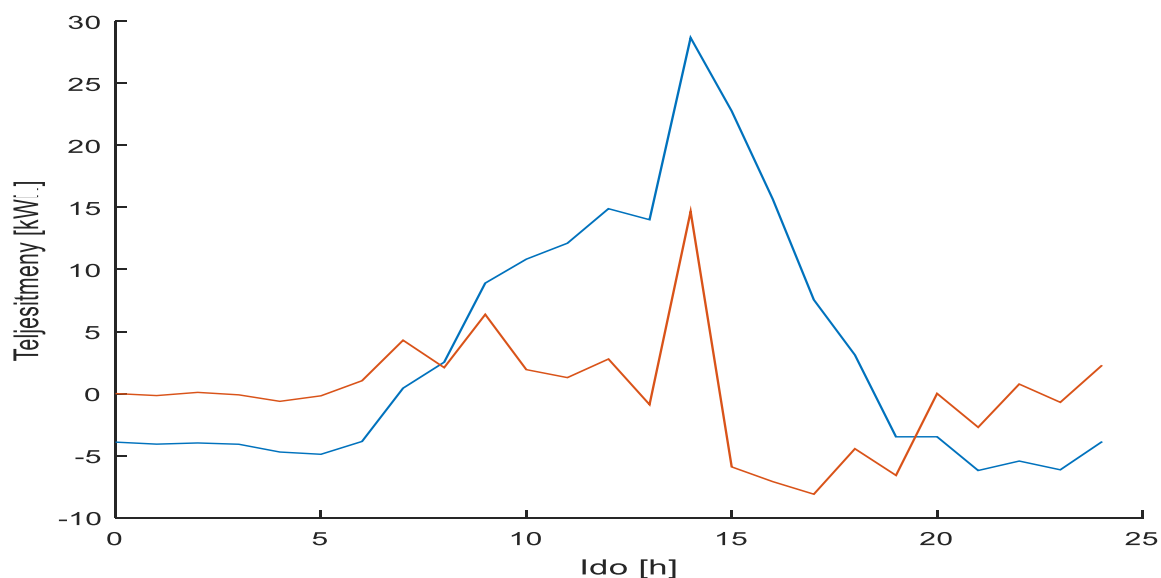
A nagy lépésközöktől haladjunk a kis periódusidejű teljesítmény beállítási ciklusok felé. Először az 1 órás lépésközzel kialakult karakterisztikák figyelhetőek meg:

6.1.1 A tároló teljesítményének vezérlése

Első lépésben az elvi struktúra fő elemeinek megalkotása és a load flow parancsok csatolása után egy elvi működést vizsgálhatunk a demonstrációs hálózaton: az össztermelés és teljes fogyasztás különbségét minden időlépésben kompenzáló, semmilyen teljesítmény vagy kapacitáskorláttal nem rendelkező 100% hatásfokú és 0 válaszidejű berendezéssel végezzük a műveleteket. Ezen szimulációknak kizárólag a keretrendszer ellenőrzés a célja, hiszen ennyire idealizált modellel tesztek végzni gyakorlatilag értelmetlen. Az alábbiakban néhány olyan számítás kerül bemutatásra, amely alapján megvizsgálható az időlépésekben eszközölt változtatások hatása az adatszolgáltatásra.

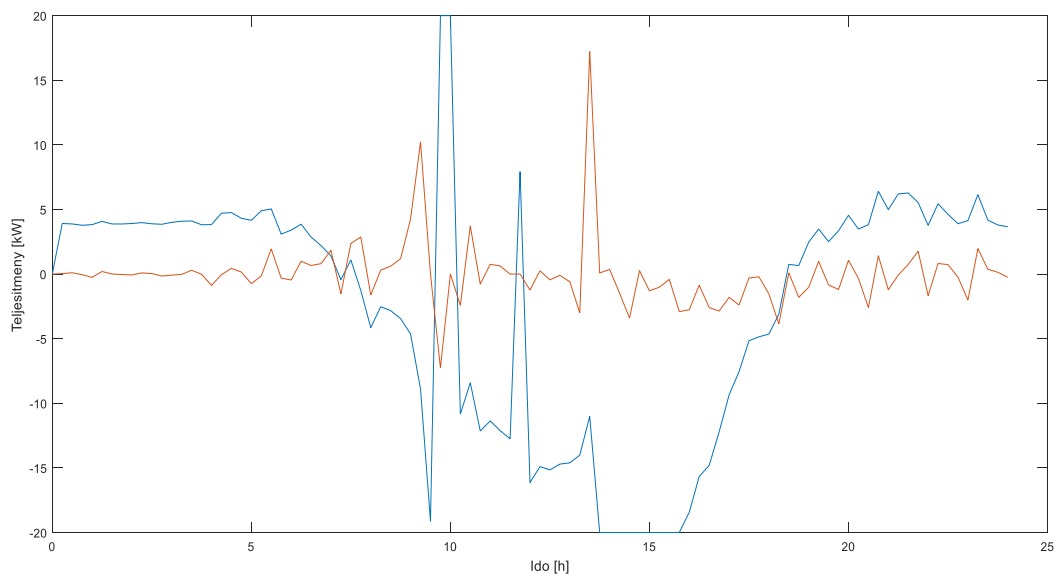


6-1. ábra: 1 órás időléptékkel megvalósított kompenzáció (24 óra)



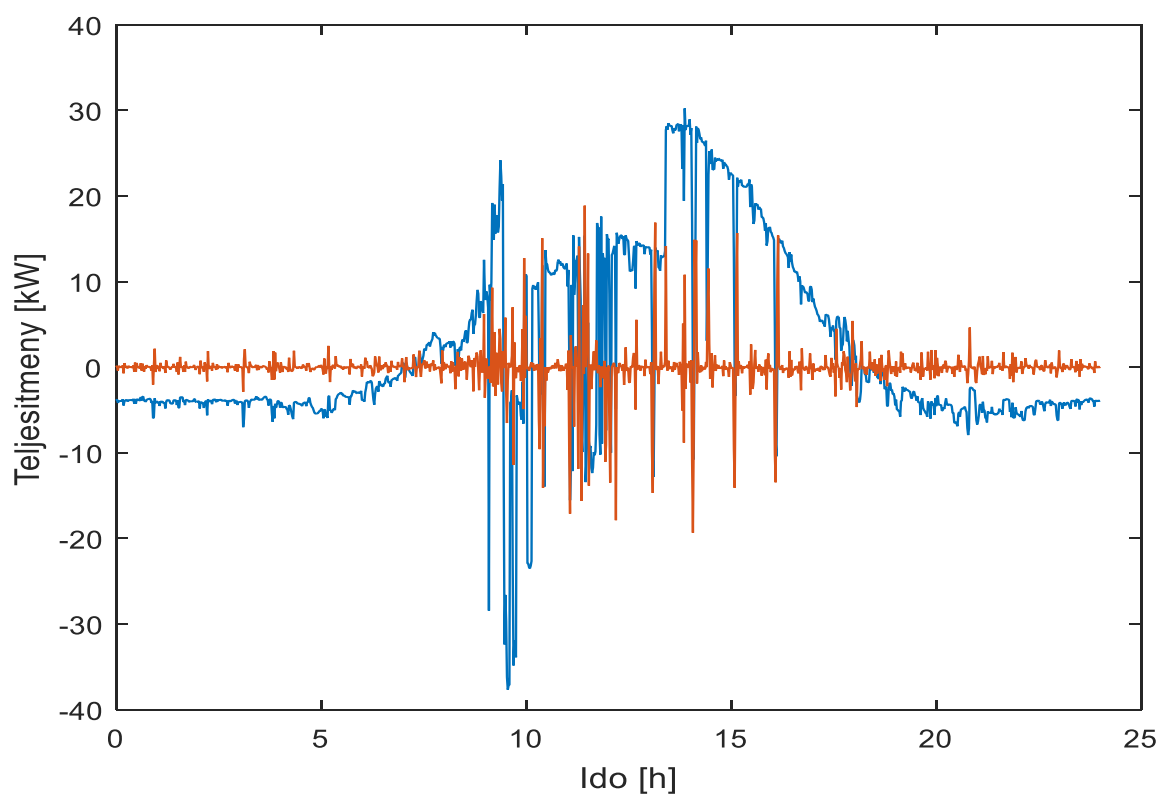
6-2. ábra: a nettóáramlás (narancs) és kompenzált áramlás (kék) különbségei órás lépték esetén (24 óra)

Az órás lépésköz esetén megfigyelhető, hogy nagy a teljesítményfluktuáció: ez nem meglepő, hiszen egy teljes órára előre konstans teljesítményt beállítani valós idejű eredményből nem helyes megközelítés. Ennek ellenére a pozitív hatás egyértelműen megfigyelhető, csökken az externális ponton az energiaforgalom, valamint a csúcérték is kisebb. Negatív hatásként megfigyelhetjük azonban, hogy van egy hosszú vételezési szakasz, mely a későbbi stratégiák esetében nem lenne helyes működési állapot.



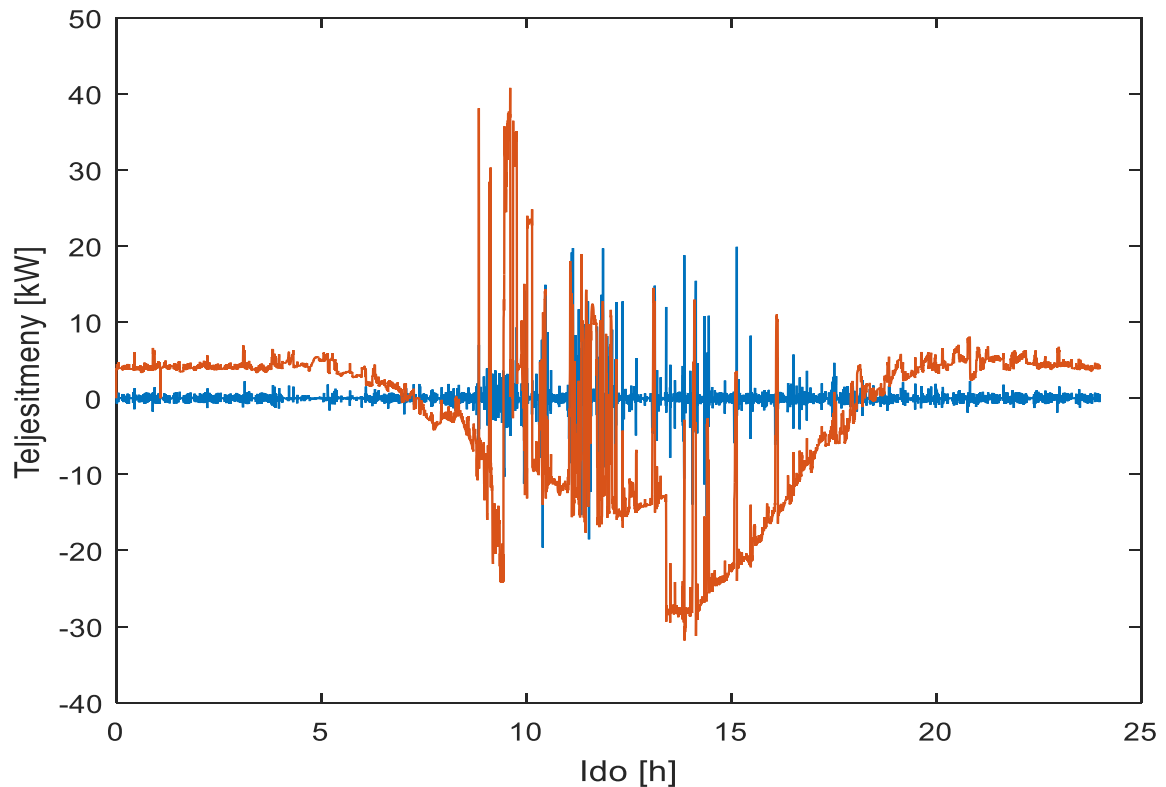
6-3. ábra: 15 perces időlépték esetén az energiatároló teljesítménye (kék) és a kompenzált teljesítményáram (narancs) (24 óra)

A kompenzált áramlás érezhetően tovább simult, a teljes energia is csökkent. Ez alapján a következőkben is javulást várunk, valamint a rövid idejű fluktuációk kezelése is megjelenik.



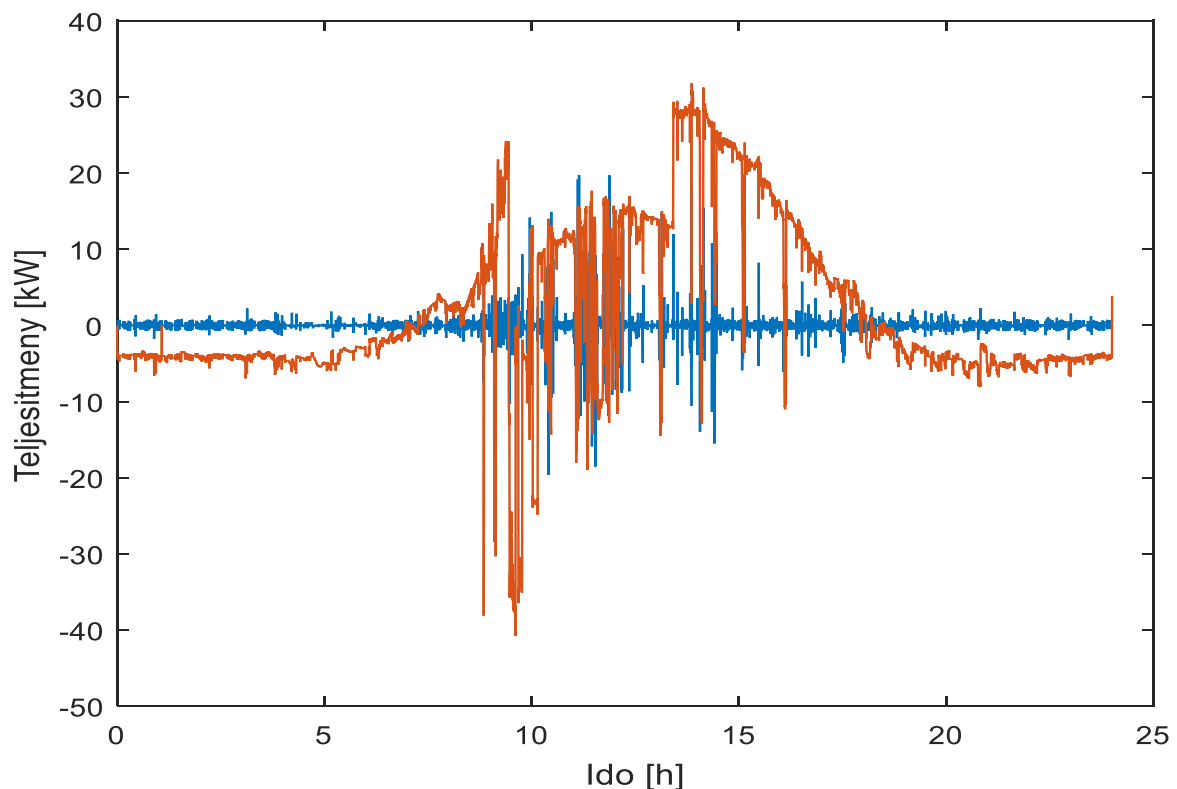
6-4. ábra: Perces nagyságrendű időlépés esetén a kompenzálás nélküli (kék) és kompenzálás utáni (narancs) teljesítményáram (24 óra)

Perces nagyságrendű feltétel kiértékelés esetén jól látható, hogy több péyam erős fluktuáció, amely a nettó áramlásban megjelent, a kompenzálással kiküszöbölhető. Néhány nagyobb teljesítményű rövid kisütés emiatt megfigyelhető. Ennek ellenére az összes energia szempontjából is javulás tapasztalható a hosszabb időléptékű megoldásokhoz képest.



6-5. ábra: A kompenzált teljesítményáram (kék) és az energiatároló berendezés teljesítménye (narancs) (24 óra)

Amennyiben a mintavételezési periódusnak közel megfelelő időlépést alkalmazunk, gyakorlatilag az energiatároló berendezés visszaadja a bevitt karakterisztikák alapján kialakuló nettó áramlást 1 időlépéssel eltolva. Láthatjuk, hogy a működés megvalósításához a nettó áram maximumára, azaz több, mint 40 kW teljesítményre lenne szükség. Ezt a korábban említett fogyasztóoldali vezérelhetőség implementálásával lecsökkenthetjük, így a vezérlés is egy viszonylag jól behatárolható görbe lesz.



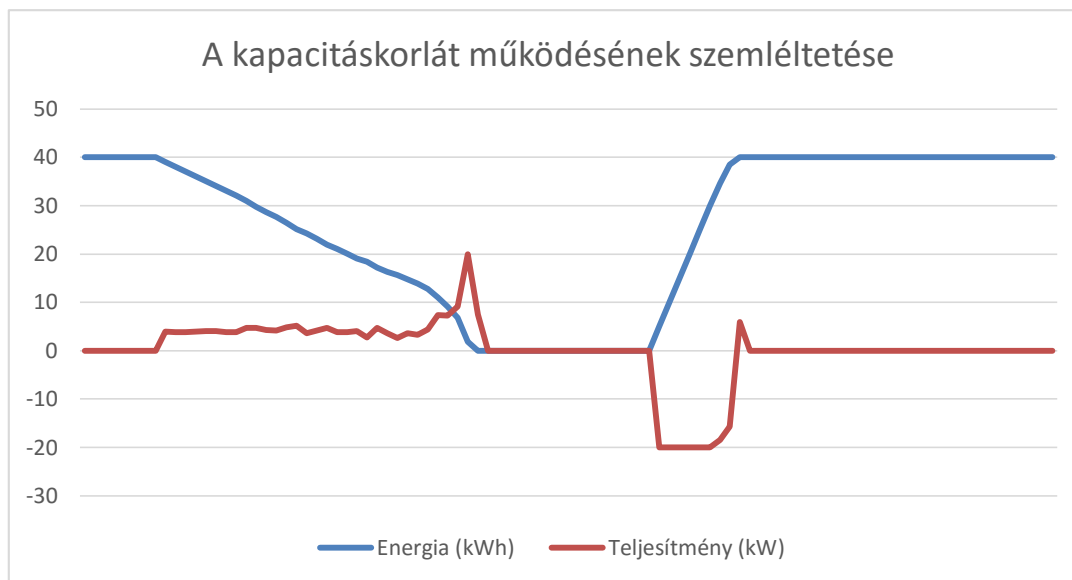
6-6. ábra: kompenzálás nélküli teljesítményáram (narancs) és a kompenzált teljesítményáram összevetése (24 óra)

Az ábrán jól kivehető, hogy az energiatároló hatásával együtt egy moderált áramlási görbét kaphattunk. A felbontás nagysága miatt sok a nagy ugrás, de ez a hálózati karakterisztikákból adódik. Összességében a kompenzált görbe jellege és korlátai jónak mondhatóak, tekinthetőek elméleti határnak a szabályozások esetén.

6.1.2 A tárolt energia számításának implementálása a kapacitás határfeltételek kiértékeléséhez

Mivel az energiatároló berendezést statikus generátorként implementáltuk, így ugyanolyan változó készlettel rendelkezik, akár egy napelem vagy szélérőművi egység. Azonban a kétirányú áramlás kihasználásához a kapacitás határfeltétel betartása elengedhetetlen. Ennek számítására, bevitelére és kiértékelésére a scripten belül lett kialakítva egy módszertan. Ennek lényege, hogy minden teljesítményváltoztatásnál ellenőrzi, hogy a lépés sértené-e a határfeltételt: ha igen, nem engedi végbemenni a változást. Az aktuális energiaérték mindig a ciklus elején, a teljesítményváltoztatással együtt változik, tehát az adott érték az épp beállított teljesítmény lépésközi idő alatt okozott változását is tartalmazza. Ebből kifolyólag fontos ellenőrizni a túlkisütés és túltöltés kérdését, mely bizonyos berendezések esetén komoly problémákat okozhat: ennek eredményeképp az energiaszámítás egy ciklusra előre ellenőrzi a kialakuló érték validságát, amennyiben sérülnek a határfeltételek, lekorlátozza teljesítményértéket pontosan akkorára, amellyel a határértékre

vezérlődik az energiatároló. Itt a valóságban természetesen érdemes biztonsági korlátokat bevezetni, a szimuláció feltételezi, hogy a bevitt kapacitásérték teljes mértékben kihasználható.

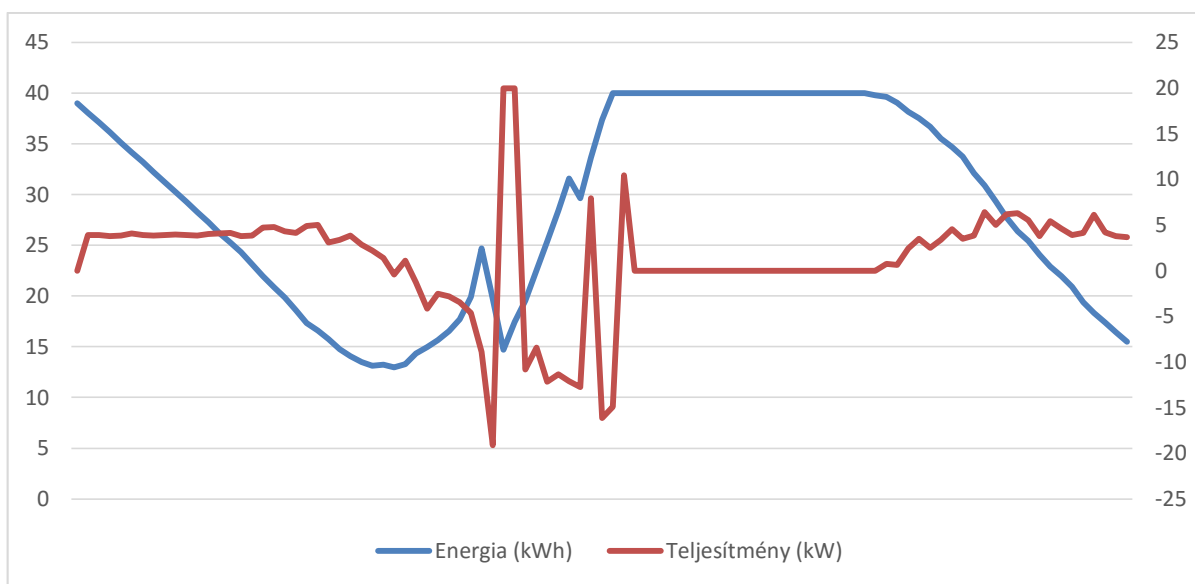


6-7. ábra: a kapacitáskorlát szemléltetése tartalékképzési üzemben, kimaradás és visszakapcsolás mellett: 40 kWh és 20 kW határok (24 óra)

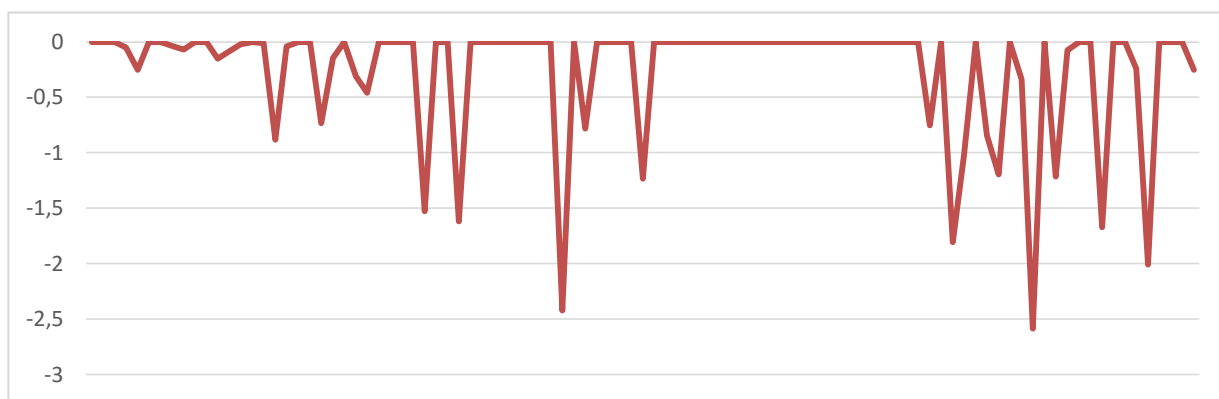
A megbízhatósági tartalékképzés esetén jól kivehető a kapacitásokkal kapcsolatos megkötések üzeme. A maximális kapacitás 40 kWh, a maximális teljesítmény pedig 20 kW. A helyi betáplálás visszakapcsolásakor látható egy feltöltési ciklus. A modellben az energia a teljesítmény idő szerinti integráljából nyerhető, nincsen számításba véve a kapacitás nemlineáris jellege.

6.1.3 1. Stratégia: virtuális szigetüzem megvalósítása

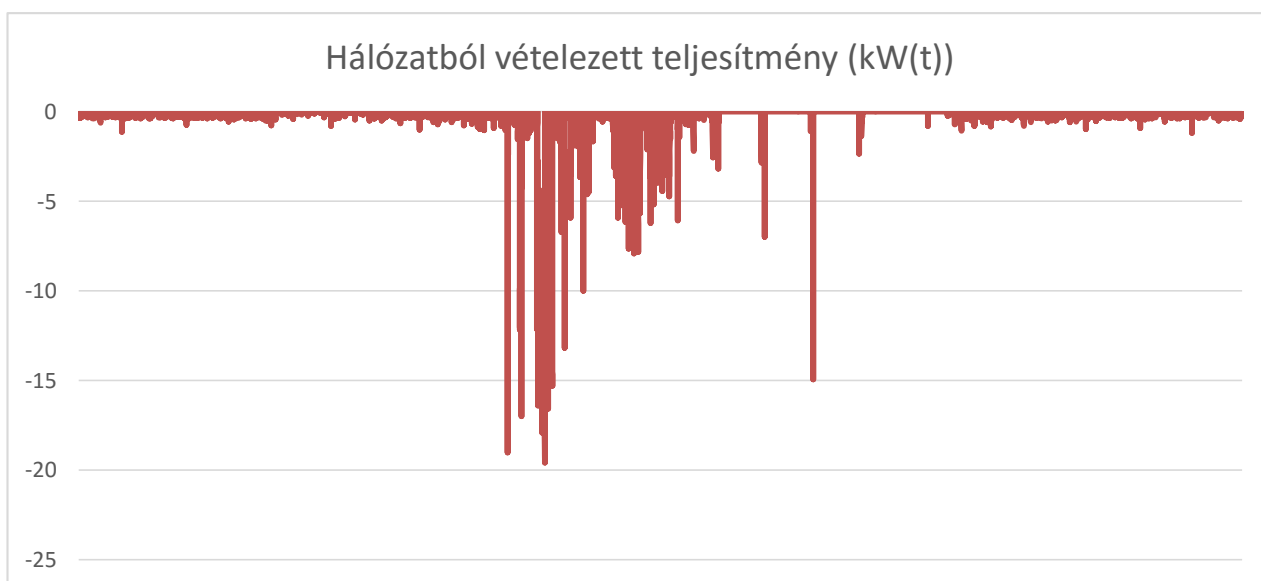
Az első megvalósított vezérlés célfüggvénye a hálózatról vételezett energia minimalizálása (és emellett a visszatáplált energia minimuma is, a helybeni zöldenergia felhasználás is megjelenik. Az algoritmus lényege a nettó áramlás számításából adódó érték kompenzálása a tároló berendezés segítségével: a működési elv valós idejű load flow követés, nem használ múltbéli értékeket: emiatt természetesen leginkább úgy effektív, ha rövid időlépésekkel dolgozunk. Érdekes pont lehet a kérdés, hogy mekkora kapacitású energiatároló berendezés szükséges a szigetüzemű működéshez. A vizsgálatok során 1 órás, 15 perces, perces nagyságrendű és másodperces időléptékekkel készültek számítási eredmények.



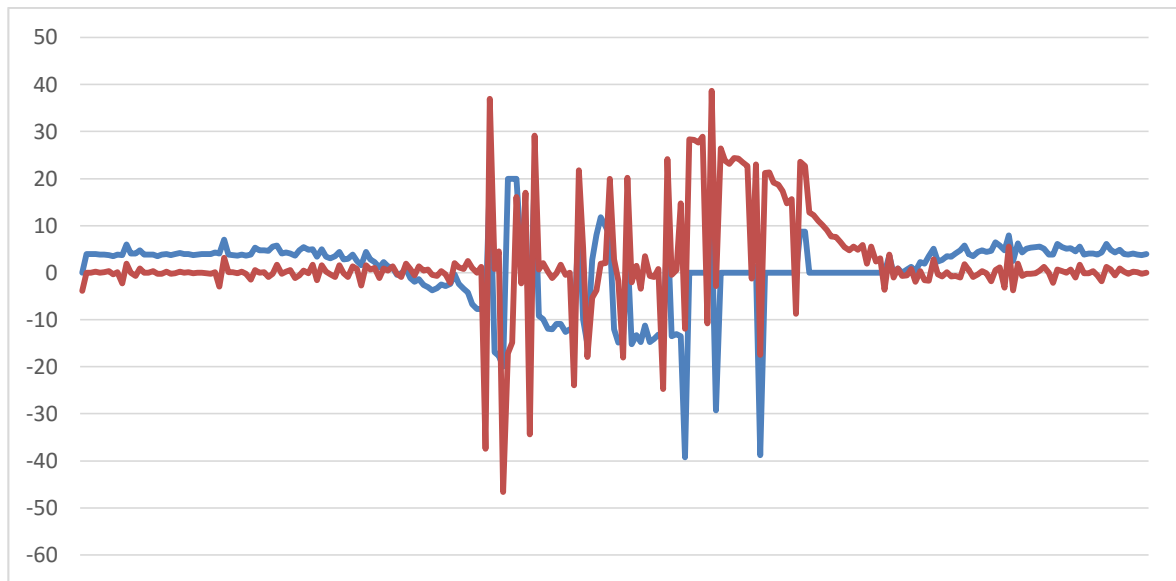
6-8. ábra: Energiatároló paraméterek változása 15 perces időléptékben megvalósított virtuális szigetüzem esetén (24 óra)



6-9. ábra: hálózathoz vételezett teljesítmény 15 perces időléptékben megvalósított virtuális szigetüzem esetén (24 óra)



6-10. ábra: Hálózathoz vételezett teljesítmény másodperces nagyságrendű időlépték esetén (24 óra)

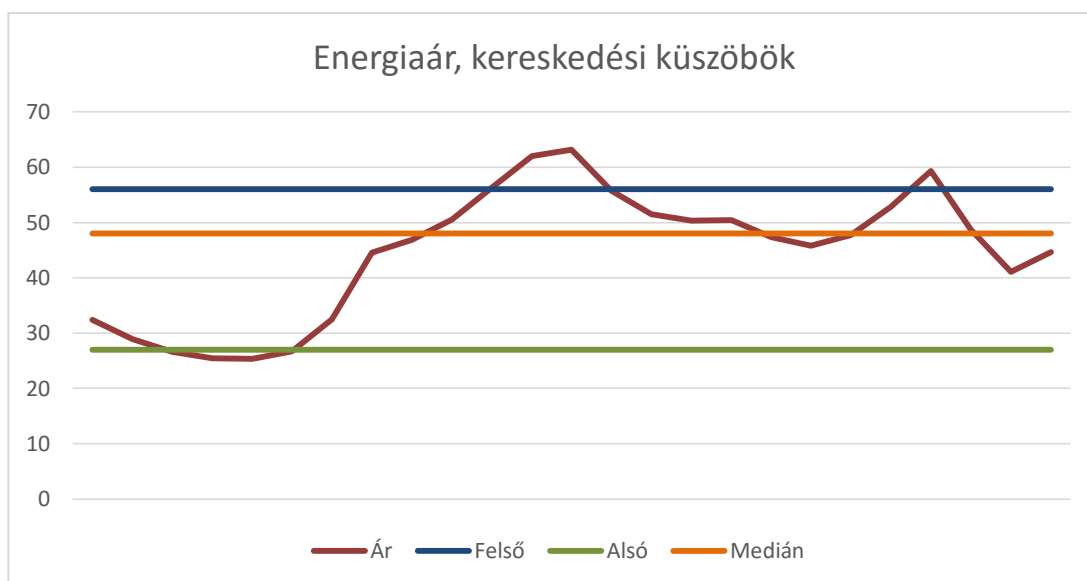


6-11. ábra: Energiatároló teljesítménye és a hálózati csatlakozási ponton történő áramlások összevetése (24 óra)

Konklúzióként levonható, hogy a kapcsolási frekvencia növelése sokat javít a szigetüzemű kialakítás lehetőségein. Egészen gyors működés esetén látható, hogy a rövid idejű fluktuációkat leszámítva alig van vételezett teljesítmény. Alapjában véve néhány kW nagyságrendjébe eső vételezések jelennek meg, ezek a 15 perces adatok ábrázolásán is identifikálhatóak (itt ugyebár nem jelenik meg a cikluson belüli eltérések ábrázolása). Megállapítható, hogy a jelenlegi tároló teljesítménye és kapacitása ezen bemenő adatok mellett képessé teszi arra a rendszert, hogy leváljon a hálózatról. Ehhez persze fontos megjegyezni, hogy a napelemes termelés április közepi, erősen napsütéses napról származik, azaz az erősen változó kimenetű helyi megújuló termelés éppen egy magas értékkel szerepel: később a szélerőmű működésével együtt azonban már nagy a valószínűsége, hogy a hálózat képes ilyen üzemállapot elérésére.

6.1.4 2. Stratégia: Energiakereskedelem magas és alacsony küszöbökkel

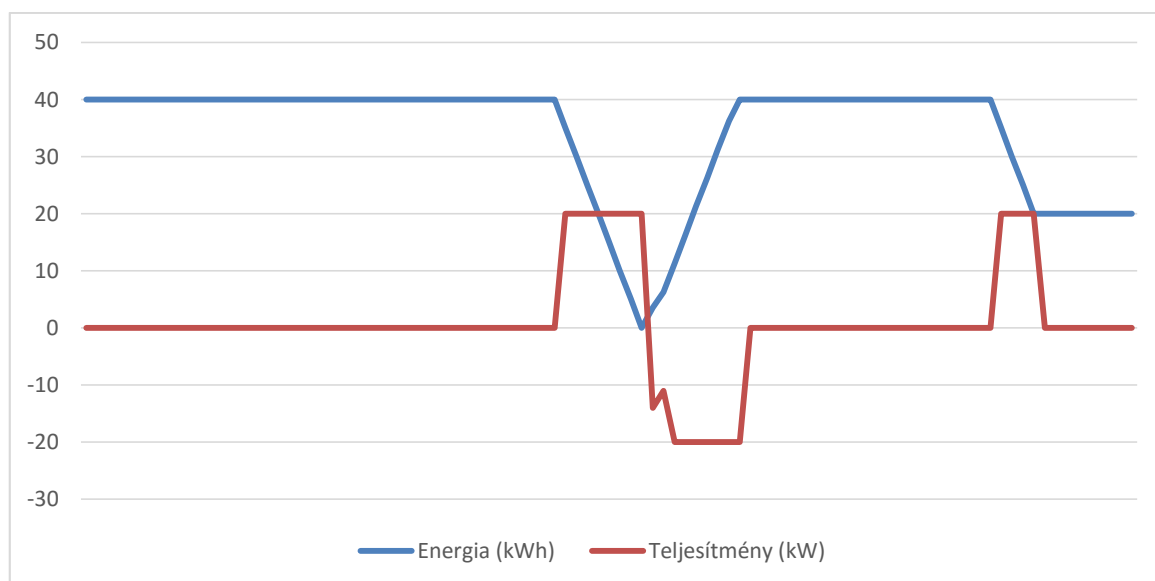
Az energiakereskedelem megvalósítása tároló berendezések segítségével nem egyszerű feladat. Először is minden algoritmusnak figyelembe kell vennie a villamos-villamos átalakítás hatásfokát. Ebben az esetben ez a határértékek megadásában van figyelembe véve, de mint majd később említésre is kerül, a hatásfok is bekerül az energiátároló berendezés modelljébe.



6-12. ábra: Energiaár alapú kereskedési küszöbök

Az adatok a HUPX Zrt. adatbázisából származnak, 2013 nyári energiaár átlagok képzéséből keletkeztek, tehát abszolút valóságosak. A számítások elvégzéséhez bemenetként kell megadni az energiaárak aktuális napi értékét, ez segédszámításokkal aktualizálható hosszabb idejű szimulációk esetén.

Az algoritmus lényege a következő: megadunk egy felső és egy alsó limitet, melyek eladási és vételi határértékként szolgálnak: amennyiben a magasabb limit felett van az ár, maximális teljesítménnyel történik kisütés, hogy minél több energia legyen értékesítve magas áron (vagy minél kevesebb legyen drágán véve, ha a fogyasztás van túlsúlyban az adott időszakban). Amennyiben az alsó határértéknél is alacsonyabb az ár, vételezés kezdődik (vagy minél kevesebb lokálisan termelt energia olcsó eladását vonja maga után az üzem). Amennyiben a két érték közt tartózkodunk, a tároló eszköz igyekszik minimalizálni a forgalmat, amolyan közömbös sávként jelenik meg ez az árintervallum. Esetünkben a határértékek az ábrán is szemléltetett 56 Ft/kWh és 27 Ft/kWh. A működés a következőképp alakult:

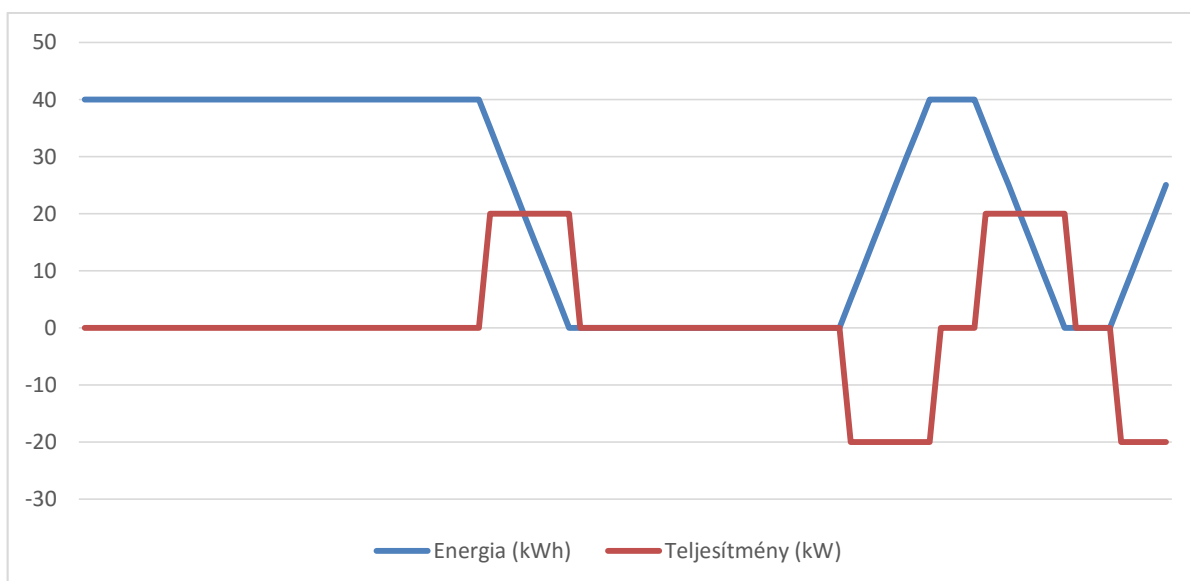


6-13. ábra: Energiakereskedés felső és alsó határértékekkel (24 óra)

A szimuláció 15 perces lépésközökkel dolgozik. Jól látható, hogy a kapacitáskorlátok limitálták a működést, viszont hosszú ideig tétlen állapot is fennállt a működés során. A töltés megvalósítása a hálózati túlermelésből is történik. Az alsó határ esetén történő működés az ábrán nem jelenik meg, hiszem vételezni akkor kellett volna, amikor a tároló 100% töltöttségi állapotban állt, így nem lehetett több energiát felvenni.

6.1.5 3. Stratégia: Energiakereskedelem medián érték alapján

Másik megoldási lehetőség az energiakereskedés megvalósítására az, hogy a helyi kiegyensúlyozást teljes mértékben figyelmen kívül hagyása, kizárólag az energiaár feltétel vizsgálata. Amennyiben van előre megadott menetrend valamilyen prediktív eljárás alapján (mint esetünkben az adatsor), akkor a megoldás lehet az, hogy 12 magasabb árérték esetén eladni próbálunk, míg a 12 alsó érték esetén vételezni. Nyilván a kapacitáskorlátok itt komoly szerepet játszanak (nagyon érdekes lehet a méretezési kérdés a prediktív bemenetek alapján és ennek hasznosulása).

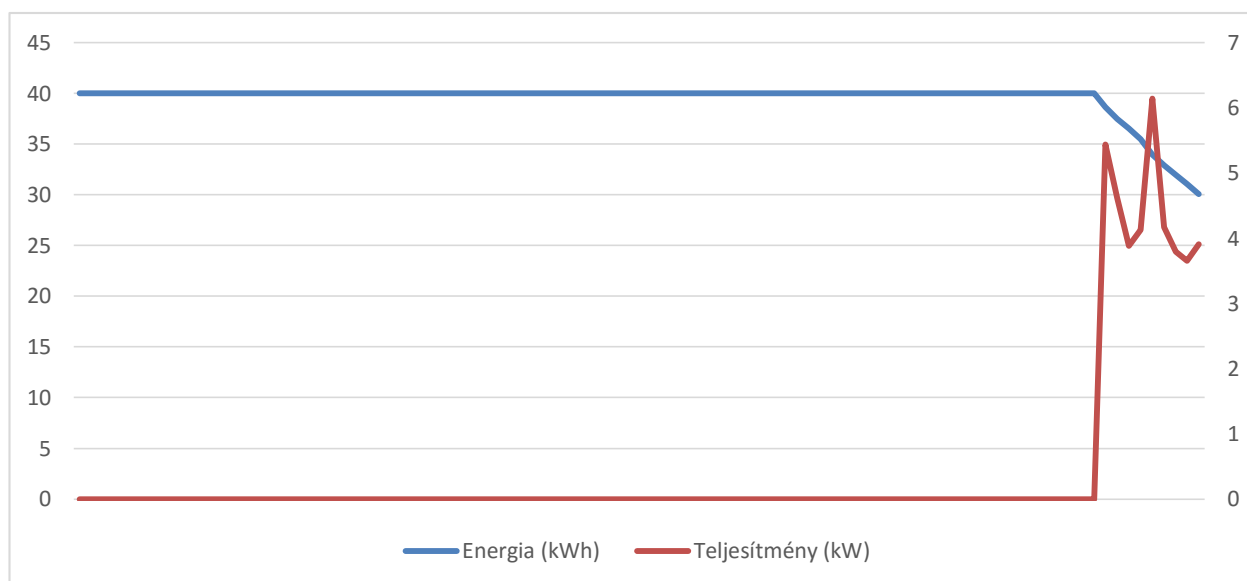


6-14. ábra: Energiakereskedés középértékes döntési küszöb alapján (24 óra)

Jól kivehető a működésben, hogy hol éri el az energiaár a küszöbértéket a reggeli órák alacsony értéke után. Később az előző stratégiához hasonló jeleget láthatunk, csak a más alapelv miatt több a váltás.

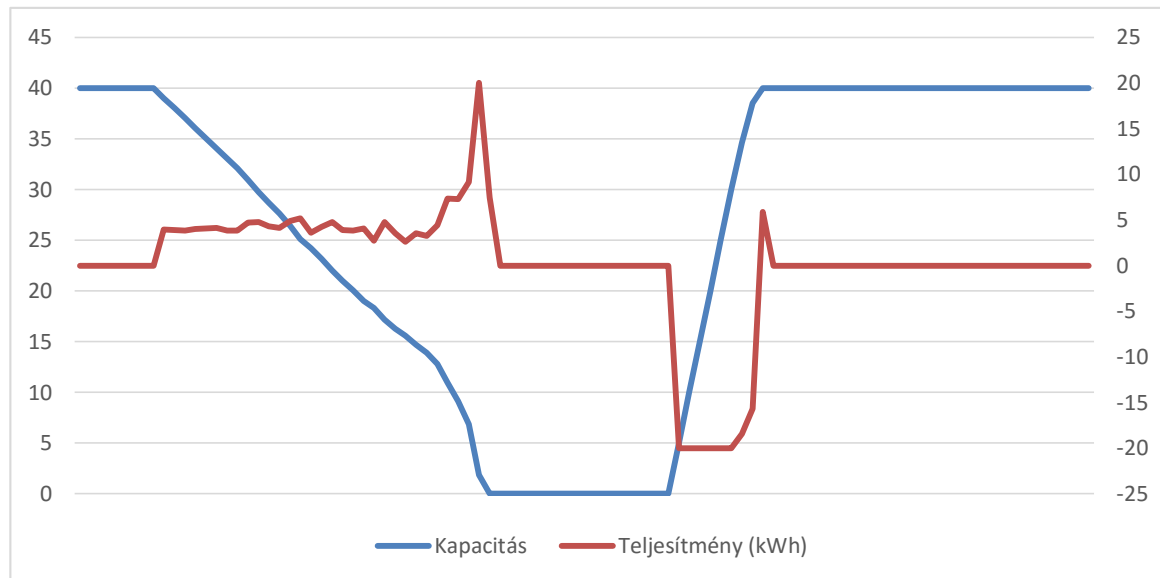
6.1.6 4. Stratégia: Biztonsági tartalékképzés a lokális termelés kiesésének kompenzálására

A helyi megújuló energiaforrások termelése kulcsfontosságú, meghibásodás esetén az ellátás komoly költségeket von maga után. Az algoritmus lényege, hogy figyeli a betáplálás állapotát, amennyiben az megszűnik, a számított nettó teljesítményáramnak (vagy a maximális értéknek) megfelelő kisütéssel reagál, ha szükség van rá. A feltöltési ciklus a későbbiekben az ELMŰ hálózaton mért algoritmushoz hasonlóan tisztán megújuló energiából történik.



6-15. ábra: kapacitás és teljesítmény értékek egy 22 órás kiesés esetén (24 óra)

Az ábrán a meghibásodott elem kiesésekor (22 óra) jól láthatóan a tároló elem felveszi a nettó teljesítményáram értékét, és kompenzálja a kialakult hiányt. Az ilyen load flow követő tartalékok képesek maximális ideig üzemre, hiszen a lehető leghasznosabban adják le az energiájukat, figyelembe véve a hálózat állapotát.



6-16. ábra: tartaléküzem egy korai kiesés és későbbi visszaállás esetén (24 óra)

Az ábrán a következő történések hatásai figyelhetők meg: a tároló maximális kapacitásról indul, majd 2 órákor megtörténik a kiesés, a teljesítmény leadása load flow követéssel megkezdődik. Ez egészen a teljes energia felhasználásáig tart, majd ezután leáll a kisütés. Amikor a meghibásodott elem visszaáll a hálózatra, a tartalék visszatöltése megkezdődik, az energiaérték eléri a maximumát, a berendezés visszakerül a kezdeti állapotába. A diagram igen látványos, gyakorlatilag minden üzemállapot felfedezhető rajta. Méretezési műveletek megvalósítása

Méretezési eljárás esetén két bemenetre van szükség: a túlméretezési együtthatóra (szorzó) és a méretezés jóváhagyására (Sizing=1).

6.1.7 Fejlesztések a tapasztalatok alapján, továbblépési lehetőségek

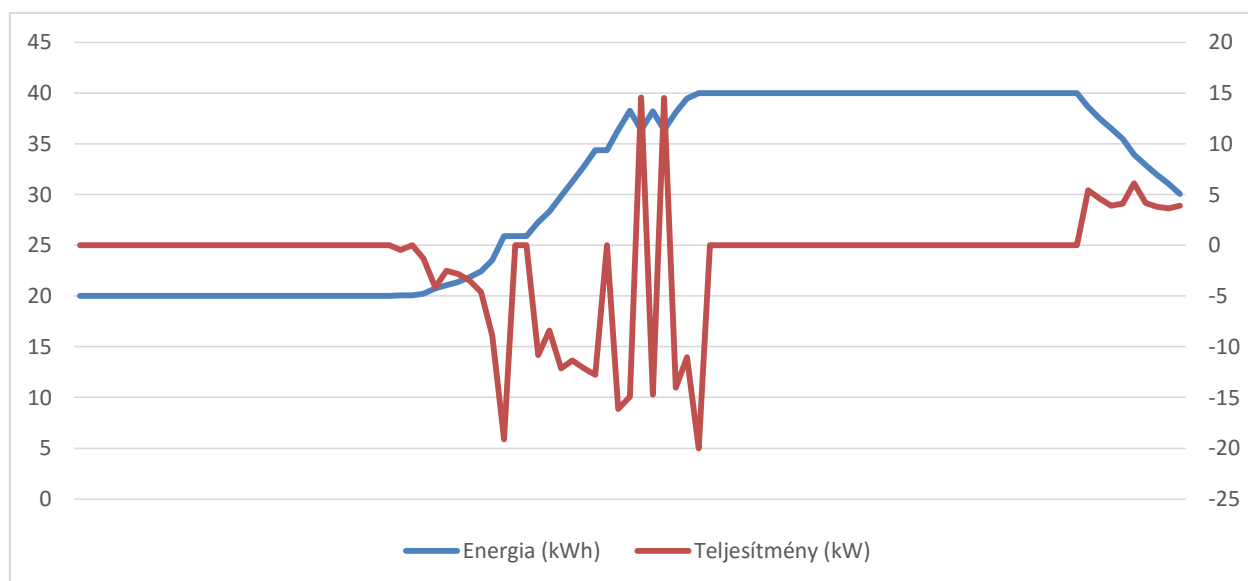
A leírt szimulációk alapján felvetődött néhány fejlesztési lehetőség, melyek közül több meg is valósult az első körös eredmények feldolgozása után. Az első ilyen fejlesztés a berendezések átalakítási veszteségeit figyelembe vevő hatásfok változó, melyet a felhasználó megadhat a felületen (alapértelmezett értéke 100%). Ez valóságosabbá teszi a viselkedést, műszaki és gazdasági szempontból elemezhetővé teszi a viselkedést. A hatásfok koncentráltan képződik le a modellben, hogy a töltés esetén csak adott százaléknyi energia jut a tárolóba, mely később a kisütésen keresztül felhasználható.

További fejlesztésként egy megszólalási idő is implementálható: ennek lényege, hogy bizonyos tároló eszközök nem képesek bármilyen felbontás esetén azonnal reagálni a változásra, késleltetést kell beépíteni a teljesítményérték változtatásába. Ez egy új időegység változóként jelenik meg: a lépésköz és a response time változók bemeneti értékek: amennyiben a response time kisebb, mint az időlépték, nincsen probléma. Ha nagyobb, akkor a teljesítmény változása csak a válaszügy elteltével mehet végbe a vizsgálat után. Ezért minden teljesítményváltoztatáskor be kell iktatni egy válaszügy iterációt is.



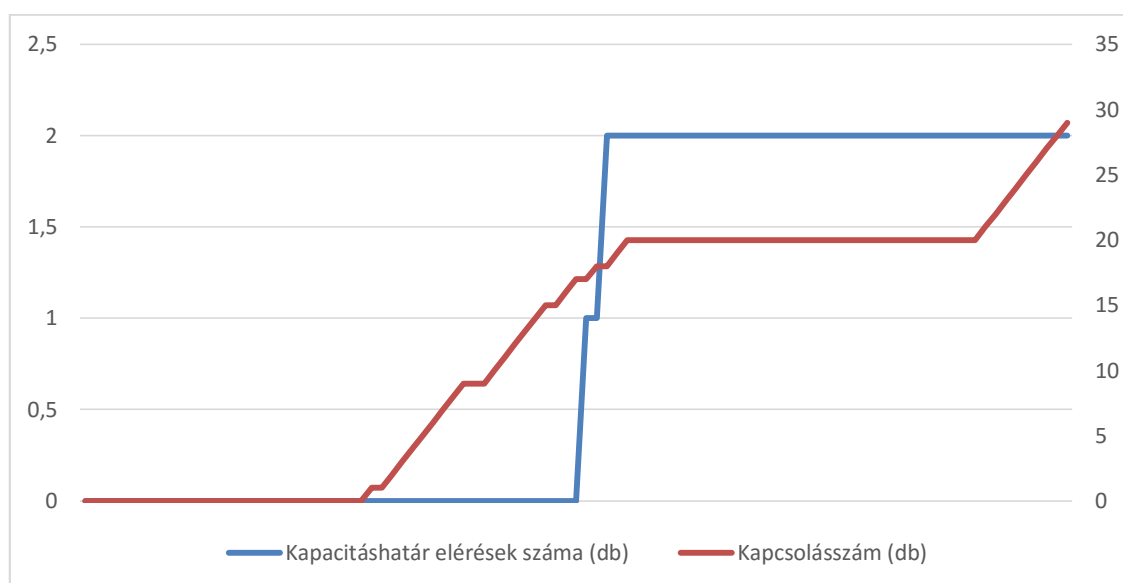
6-17. ábra: válaszügy ábrázolása adott eltolási idővel (24 óra)

Fontos lehet továbbá, hogy a névleges ciklusszámmal milyen összefüggésben áll egy stratégia. Van, amelynek gyakori a kapcsolási frekvenciája (virtuális szigetüzem), másik megvalósításoknak pedig egészen kicsi (tartalékok szerencsés esetben). Ehhez a tárgyalt modellnél hosszabb időtávban gyűjtött adatok szükségesek, de a kezdeti és végső időpont állíthatóságával a szimuláció ilyen tesztekre is alkalmas. A megoldás lényege, hogy ha túlterheljük az eszközt (maximal energy flow), a program leáll, és visszatér az addigi adatokkal, valamint az eltelt idővel. Megtérülés számítások esetén ez is fontos elem lehet. A megoldás nem veszi figyelembe a degradáció mértékét a nagyobb kisütések esetén, ez további fejlesztési lehetőség. Két változó tartalmazza ezeket az adatokat: egy kapcsolási szám az összes kapcsolási műveletet számolja, egy másik pedig a kapacitás határfeltétel elérését számolja. Ezek felhasználásával már adható egy reális értékelés.



6-18. ábra: hatások változó hatása (24 óra)

Megfigyelhető, hogy a töltés esetén kevésbé változik a kapacitás: a hatások ebben a szimulációban 50% volt, így fele akkora meredekséget vártunk.



6-19. ábra: kapacitáshatár elérés és kapcsolási műveletek száma (24 óra)

A számlálók az előző teljesítmény-energia diagrammal azonos szimulációban készültek, így a kapcsolási műveletek összeszámolhatóak. A működés az elvárt módon alakult, így ezek a bemenetként megadott korlátokkal alkalmazhatóak tervezéskor.

A teljes körű vizsgálathoz a fizikai méretek korlátait is be kell tartani. A scripthez integrálható lehet a jövőben egy olyan funkció, mely a rendelkezésre álló fizikai méretek alapján típust választ az energiasűrűségi és

teljesítménysűrűségi adatok alapján, ezáltal teljessé téve a kiválasztási folyamatot mindössze a hálózat és annak közvetlen környezetének ismeretében.

További stratégiák implementálása (az elveknél felsoroltak) és aggregát működések megvalósítása, valamint a tanuló algoritmusok kifejlesztése az eddig szerzett tapasztalatok alapján hasznos lehet a fejlesztésben.

6.1.8 Gyakorlati felhasználás

A modell összességében alkalmas arra, hogy az elosztói engedélyes hálózati fejlesztéseinek terveit tesztelje, újragondolja, optimalizálja. A tárolók minden főbb, F2-ben felsorolt fizikai tulajdonságát befolyásolhatja, ezáltal összetetté, mégis átláthatóvá téve a kiválasztási folyamatot. A függelék így felhasználható a modell bemeneteinek előállításához, mint iránymutató összefoglaló. Az elosztói engedélyesek elvégezhetnek a modellen stabilitási és kiterheltség vizsgálatokat, valamint megvizsgálhatják a megváltozott áramlás eloszlását a hálózaton. Ezáltal az eddig hosszadalmas fejlesztések előzetes megvalósíthatóságát vizsgáló tanulmányok gyorsabban és mélyebb tartalommal készülhetnek el.

6.2 Az ELMŰ Nyrt. hálózatán implementált algoritmusok mérési eredményei

Az előzőekben ismertetett Élhető Jövő Park hálózatán az ELMŰ Nyrt. lehetőséget biztosított a megfogalmazott stratégiákat valós körülmények közt történő tesztelésére, tapasztalatszerzésre és az esetleges modellezési problémák feltárására. A leírt szubrutinok vezérlése során a menetrendek bemutatása a fő cél, a beállított teljesítményértékek korlátosak, így a konkrét követés és beállítás nem valósul meg, azonban a működési állapotok jól megfigyelhetők. Mivel az algoritmusok 2-3 napig futnak, és az exportált mérési eredmények felbontása 10 másodperc, meglehetősen nehéz átláthatóan bemutatni a vizsgálható adathalmazt. Az alábbiakban néhány kiragadott mutató kerül bemutatásra, valamint a függelékben elérhető néhány kritikus részt megvalósító programkód.

6.2.1 A SCADA CiCode környezete, fejlesztői környezet

A fejlesztés célja olyan automatikus akkumulátor vezérlő szubrutin megvalósítása, mely egy adott optimalizálási célfüggvény elérése érdekében a hálózat jelenlegi és múltbéli állapotai alapján az akkumulátoros energiatároló egység üzemállapotát és töltési/kisütési teljesítményét periodikusan meghatározza és be is állítja. A felhasznált szoftveres környezetben a CiCode (Citect SCADA v7.20 környezet) nyelven íródott szubrutinok implementálhatóak. A megvalósítások minden esetben egy függvényként képzelendők el. A futtató környezet preemptív multitaskot képes megvalósítani, így az elkészült függvénnyel egy időben más taszkok is futhatnak, sőt ezek adatai fel is használhatóak: a későbbiekben leírt vezérlések már támaszkodnak például töltöttség számítására implementált „Coulomb counting” elvű töltöttség számító szubrutinra. [24]

6.2.2 A vezérlésekre vonatkozó megkötések

A függvényrel kapcsolatban a következő követelményeknek kell megfelelni:

- Nem rendelkezik visszatérési értékkel: taszkként fut, elméletileg soha nem fejeződik be, így visszatérési érték használata nem javasolt.
- Nem rendelkezik bemeneti paraméterrel: a környezetben úgynevezett tageken keresztül minden szükséges mért paraméter elérhető. A tagek értéke ugyanis folyamatosan rendelkezésre áll, míg a bemeneti paraméterek elveszhetnek egy újraindulás esetén, mely az ilyen típusú rendszereknél korántsem ritka. A felhasználói adatbekérés megvalósítható.
- Két fő része legyen a függvénynek: inicializálás, mely bekapcsoláskor fut le illetve egy végtelen ciklus, mely a vezérlés megszakításáig fut. Ezen ciklus idejét mérni kell a vezérlési időkre vonatkozó megkötések miatt.
- Lehet implementálni további segédfüggvényeket: ezekre nem érvényesek a fenti megkötések.

Adott egy BATTERY_AUTO_REFRESH_N változó, melyet a felhasználói felületen adhatunk meg. Ennek értéke 1-8 közti egész szám lehet: ennyiszer 15 percenként futhat le az algoritmus. Ennek alapvetően az a célja hogy akkumulátor élettartamát ne csökkentsük a túl gyors vezérlésekkel. Az akkumulátornak szóló parancsok után érdemes egy rövid holtidőt beiktatni a kódba, hogy a változtatások a következő lépésig biztosan végbemenjenek. Nincsen lehetőség pointerok valamint objektumorientált szemlélet alkalmazására (DLL állomány segítségével importálható lenne, de javasolt kerülni. Rendkívül sok villamos paraméter mérése megoldható a hálózaton egy Janitza UMG 605 típusú hálózat analízátor segítségével ezek előzetes egyeztetés alapján elérhetőek. A fogyasztói vezérlés jelenleg nem megoldott, de a közeljövőben erre is lesz lehetőség.

6.2.3 Kiesési tartalékképzés a napelemes ellátás támogatására

A hálózat jelenlegi releváns termelőegységei az épületek tetejére szerelt napelemes rendszerek (szélerőmű inverter problémája, vízerőmű elenyészően kicsi teljesítménye). Ezért amennyiben microgrid elvekben gondolkodunk, a fotovoltaikus berendezések helyes üzeme kulcsfontosságú.

A megbízhatóság növelésének egyik módja, hogy releváns betáplálások kiesésekor gyorsan mozgósítható tartalékokat csatlakoztatunk a hálózatra. Lehetne akár a transzformátor 20 kV-os oldalán is vizsgálni a feszültségértéket, esetünkben a napelemes rendszerek invertereire esett a választás. Mindkét rendszer mindhárom fázisának megléte jelenti az ép állapotot, tehát az energiatároló berendezés sánta üzem esetén is teljesítmény leadására áll be. A méréskor a vízerőmű épp egy akkumulátorra volt csatlakoztatva, mint töltőeszköz, így a beállításokban sem jelenik meg.

A kimaradás észlelésekor nem csak az üzemállapot változik meg: az akkumulátor vezérlése folyamatosan számít egy nettó áramlást a hálózaton, valamint a múltbéli értékeket tartalmazó trendek alapján következtet az igényekre, ennek megfelelő teljesítményt szolgáltat. A gyakorlatban is hasznos működéshez meg kell

szegnünk azt az alapelvet mely az $n \cdot 15$ perces szubrutin futási ciklusokat szabja meg: egy kimaradás esetén az 1 másodpercen belüli reakció már elfogadható. Így amennyiben az akkumulátor feltöltve rendelkezésre áll, másodpercenként értékelődik ki a feszültségvizsgálat feltétele. A szabályozás során az alapelv természetesen nem sérül, így gyakorlatilag nem tesz rosszabbá semmit sem a működés, csak a ciklikus vizsgálat frekvenciáját növeli.

Az alábbi vezérlésben a feltöltés tisztán megújuló energiából történik, amely csak akkor kerül a tároló berendezésbe, amikor túltermelés van a hálózaton. Az algoritmus elindulásakor azonban az akkumulátor 100%-os töltöttségi állapotban volt, így a feltöltési ciklust nem figyelhetjük meg az adatokon.

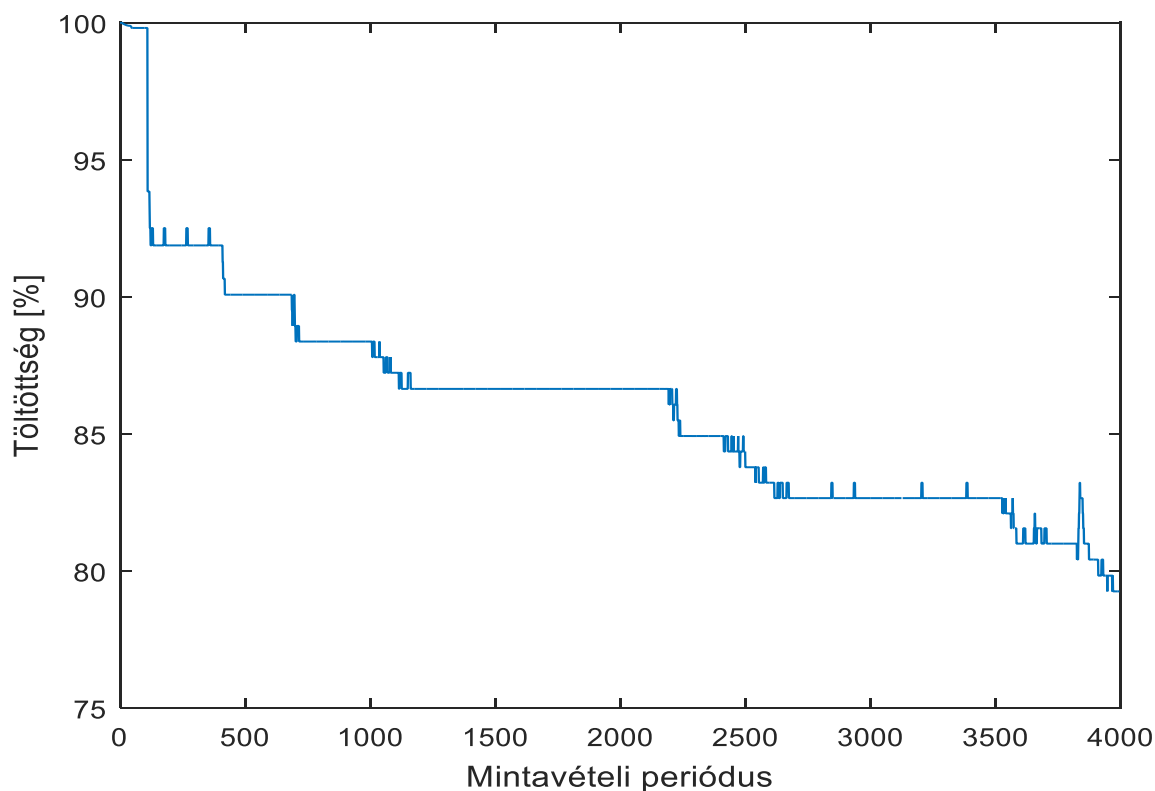
A vizsgált időszakban (2015.10.15-2015.10.17.) nem történt meghibásodás a hálózaton. Emiatt a konkrét kompenzáló működés nem reprezentálható, viszont a körülményeket figyelembe véve az algoritmus pontosan azt csinálta, amelyet várhattunk tőle: semmit. A működés ábrázolása így nem reprezentatív.

6.2.4 Valós idejű és prediktív elemeket tartalmazó virtuális szigetüzem létesítése

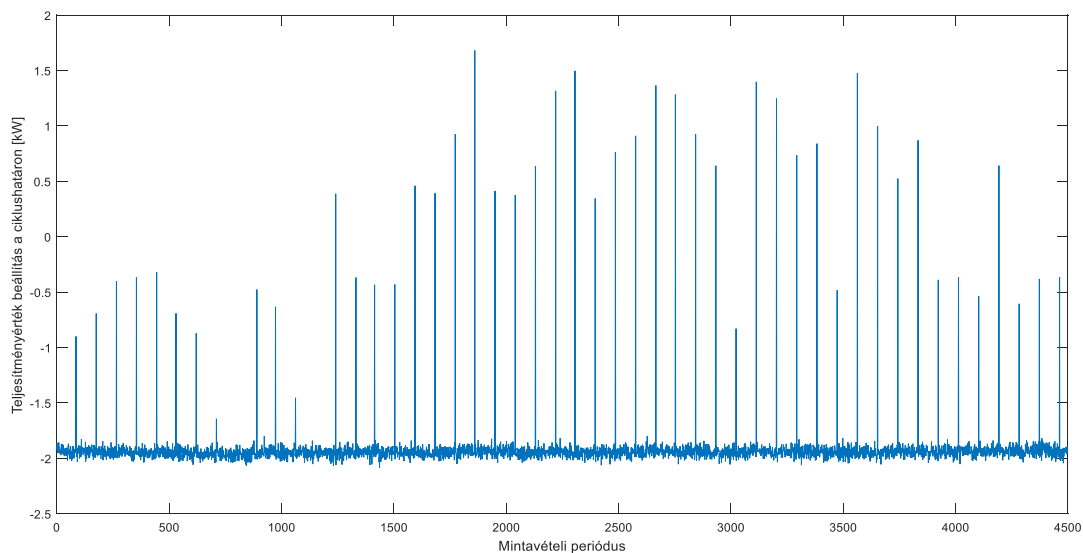
A működés lényege, hogy a helyi termelés és fogyasztás közti eltérést kompenzáljuk az energiatároló berendezés segítségével, így minimalizálva az externális csatlakozási ponton történő áramlást. A lényeg tehát a teljes termelés és fogyasztás különbségének kiszámítása, majd a kapacitáskorlátok figyelembe vételével a tároló teljesítményének ehhez igazítása.

A beállított teljesítmény minden esetben az előző 10 perc történéseiből képződik: mivel a hálózaton releváns méretű megújuló energiaforrás betáplálás adott, így nagy az ingadozás mértéke, egy pillanatos döntéshozatal hibás döntést eredményezhet, például egy kisebb felhő rövid idejű kitakarása alatt vett minta miatt két órán keresztül túl kis teljesítményt ad le a berendezés. Az előző 10 perc adatait azonos súllyal veszi figyelembe az algoritmus.

A vezérlés 2015.10.19-2015.10.22 közt működött. 15 perces vezérlés mellett a szigetüzem kialakítása gyakorlatilag lehetetlen, de az elvek és a beállítási mechanizmusok egyértelműen helyesnek mutatkoztak. Ezen eredmények alapjául szolgálhatnak a későbbi valós szigetüzem megvalósítására törekvő intézkedéseknek.



6-20. ábra: energiamennyiség változása a virtuális szigetüzem éjszakai ciklusában



6-21. ábra: az egyes döntési pontokon beállított teljesítményértékek

A fentiekben a virtuális szigetüzem két éjszakai adataiból nyert görbék láthatóak. A működés során a cél az volt, hogy a beállítási adatokat mért értékeken is ellenőrizni lehessen, így a vezérlésre vonatkozó konklúziót nem tudunk levonni. A beállítási kapcsolások sikeresek voltak. A konkrét működés tesztje nagyobb kapcsolási

frekvenciával (várhatóan 5 perc) a közeljövőben lesz mérve, akkor már korlátozásmentes teljesítményvizsgálattal.

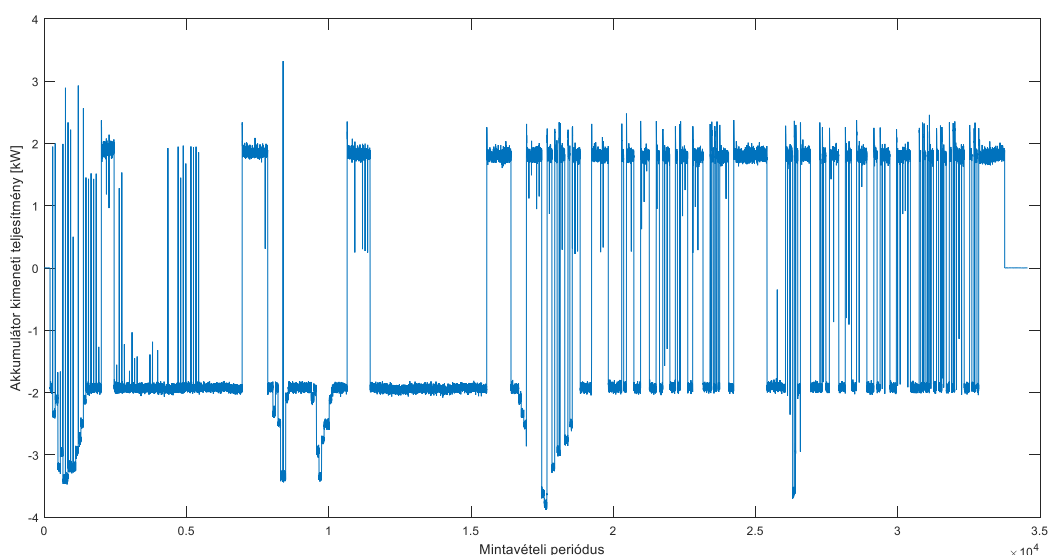
6.2.5 Energiakereskedelem árelfogadó stratégiával

Az energiakereskedési műveletek sokféle alapelve támaszkodhatnak, az optimális megoldás kiválasztása komoly feladat. Mindig alapvetően meghatározó pont az árak ingadozása, valamint a helyi termelés és fogyasztás rugalmassága, vezérelhetősége.

Az algoritmus az egyik legegyszerűbb megoldást valósítja meg: egy adott küszöbérték mellett megéri az energia továbbítása a teljes rendszer felé, így ha ez fennáll, teljes kapacitással leadásra áll az energiatároló berendezés, ellenkező esetben viszont a helyi hálózat optimalizálásában vesz részt.

Ha a microgridnek energiára van szüksége, először a tárolóban található elraktározott ingyen energiához fordul, csak ennek elhasználása után vételez a külső hálózatról. Természetesen itt lehetne stratégiát megfogalmazni a vételi időpontok alacsony áridőszakra tolására, de ennek kiszámíthatatlansága nagyjából hasonló mértékű lehetséges veszteséget hordoz magában, mint az adott pillanatban esetleges magasabb ár.

A szubrutinnak szüksége van egy segédfüggvényre, mely megkapja (vagy magától meghatároz egy menetrendtartást) az aktuális energiaárakat. A prediktivitás itt implementálható, ennek kialakításához sok adat áll rendelkezésre, mely jól hozzáférhető a liberalizált piac működtetőinél.



6-22. ábra: teljesítményváltozás túlnyomórészt eladási időszakban

Az ábrán az akkumulátor kimeneti teljesítményét láthatjuk: szintén korlátozott a beállított érték nagysága, valamint a döntési pontokon veszi csak fel a szükséges értékeket. A vártaknak megfelelően a medián alapú kereskedés nagyon sok áramlászváltozást okozott a rendszerben.

6.2.6 Fejlesztési tervek, gyakorlati alkalmazás

A továbbiakban a teljesítmény beállítása összhangba kerülhet a nettó áramlásértékkal, hiszen a tesztek alapján a szubrutinok nem tartalmaznak strukturális hibát, amely komoly meghibásodáshoz vezethetne. Emellett az említett predikciós eljárások kidolgozása hasznos lehet. További stratégiák implementálása is lehetséges, érdekes lehet a szimulációs környezetben is hozzáférhető minőségi paraméterek mérése a hálózaton, ez alapján a modell teljes villamos reprezentációjának validálása. A továbbiakban a hálózat smart grid koncepció szerinti fejlesztésével bővülő lehetőségeivel az algoritmusok fejlesztése is javasolt, hiszen így hatékonyabbá tehetők az eljárások. Néhány esetben szükséges a beavatkozási frekvencia növelése, melyhez jó kiindulási alapot adnak az ismertetett mérések.

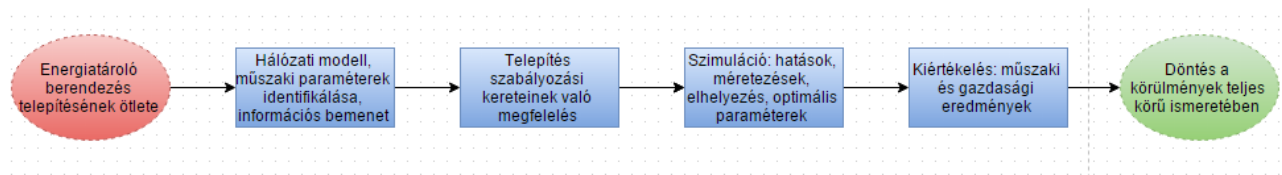
Az eredmények alapján ez a konkrét demonstrációs hálózat olyan üzemállapotok bemutatására képes, melyek a következő generációs rendszerek esetén mindennaposak lehetnek. A megbízhatóság növelésének bemutatásával kritikus infrastruktúrák esetén felhasználható tartalékok képzésének elterjedése érhető el. A valós szigetüzem megvalósítása a közeljövőben sokszor alkalmazott kapcsolási feladat lehet, melynek támogatására az energiatárolós berendezések a gyakorlatban megkerülhetetlenek. A jogszabályozási keret kialakulása esetén pedig a liberalizált piacon történő kereskedés mindennapossá válhat, az ezt megvalósító vezérlésekről szükséges releváns információ a költséghatékonysági optimum kereséshez.

7 Konklúzió

7.1 A kiválasztási folyamat standardizálása, a modell felhasználhatósága

A cél egy olyan modellezési eljárás, mely felhasználható tetszőleges hálózat esetén, hiszen ekkor alkalmas igazán gyakorlati szinten is. A 4. fejezetben tárgyalt megkötések mellett a szimulációs környezet képes vizsgálatokat végezni a benne implementált stratégiák alapján.

A teljes folyamat így gyakorlatilag a felhasználó kezében levő tudás, a keretrendszer korlátai és a kiértékelés fejlettsége alapján értékelhető. Ezen dolgozat célja főként a szimulációs környezet, valamint a modell és a vezérlési elvek felépítésének lehetőségei. A törekvések az általánosításra sikeresnek mondhatóak: teljes körű információ szerepel a lehetséges bemeneti adatokra, a megvalósítható algoritmusokra. A modellkészítés minden lépésére kitérő demonstrációs hálózat felépítés jó alapanyag a későbbi felhasználók számára. A megvalósított stratégiák és a mérési körülmények bemutatják a kinyerhető eredmények lehetőségeit. A kiértékelési folyamat pedig a későbbiekben specializáltan a kimenetekhez igazítva, automatizáltan működhetnek. Így konklúzióként megfogalmazható, hogy a program általános hálózaton a paraméterek széleskörű változtatási lehetőségei mellett komoly mennyiségű általános adatot produkál.

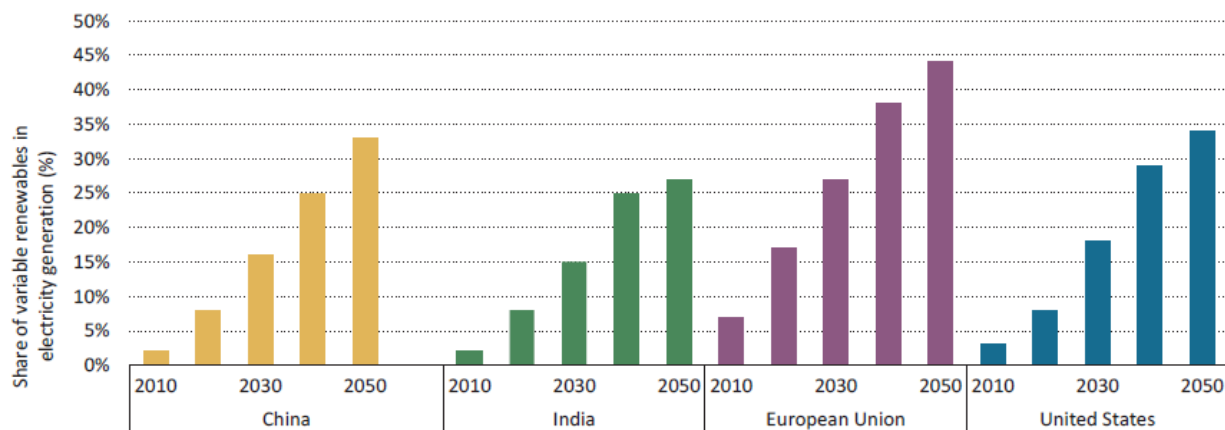


7.2 Növekvő megújuló penetráció, prognózisok a közeljövőre, hálózatfejlesztési irányelvek

Az alábbi ábrán látható egy prognózis a közeljövőben történő megújuló energiaforrás részesedés növekedésre. A korábban is felvázolt probléma miatt a hálózatfejlesztésben újszerű elvekre lesz szükség:

- Lokális vezérlések kialakítása
- Dinamizmus növelése: a rendszer időállandói csökkennek, veszít a robusztusságából
- A kiegyensúlyozási elvek összetettebbé válnak a variábilis termelés miatt, összetettebb algoritmusokra van szükség
- Lokális szintű, megfelelően méretezett tartalékképzések szükségesek
- Önálló működésre is képes hálózatrészek életképessége nagyobb lesz
- A kétirányú áramlás kérdése új eszközök és módszerek felhasználását igényli

Az E.On illetve az ELMŰ, mint konkrét elosztói engedélyesek egyaránt érdeklődnek az energiatárolási lehetőségek iránt, pilot projektek indítását tervezik, valamint a lokális szabályozás kérdéseit is intenzíven vizsgálják. Ez is mutatja a kérdéskör aktualitását.



7-1. ábra: megújuló energiaforrások részesedésének várható növekedése [8]

8 Összefoglalás

A projekt célja egy olyan modellezési eljárás, vezérlési stratégia halmaz és kiértékelési eljárás megalkotása, mely segítségével gyorsan és hatékonyan vizsgálhatóak a hálózatfejlesztés elvi lehetőségei. Ezek közül az energiatárolás berendezések lehetőségeinek bemutatása a fő cél. Mivel a hálózati struktúra a bemutatott komoly változások előtt áll (3. fejezet), így érdemes figyelembe venni a globális mozgatóerőket (1. fejezet), majd lokálisan cselekedni a fejlesztések megtervezésekor.

Elsőként a döntéshez szükséges bemeneti információk összegyűjtése történt meg: a lehetséges alkalmazások (2. fejezet) és a hozzájuk tartozó igények pontosítása fontos, hiszen nélkülük nem lehet konkrét terveket megfogalmazni. A technológiai lehetőségekkel (függelék) is tisztában kell lenni, hiszen a későbbi döntési helyzetekben az adatok minősége és mennyisége is korlátozó tényező. A hálózati modellek (4. fejezet), melyeken dolgozunk, meg kell, hogy feleljenek bizonyos feltételeknek: amennyiben ez teljesül, és az említett információ birtokában állunk, a modell képes analízisek futtatására.

Különböző vezérlési stratégiák (5. fejezet) határozzák meg a működést: javíthatjuk a hálózat fizikai tulajdonságait, késleltethetünk nagy volumenű fejlesztési beruházásokat kritikus pontokon megvalósított támogatással, valamint tisztán gazdasági szereplőként is megjelenhetünk a villamosenergia-rendszerben.

A szimulációs környezet (6. fejezet) rendkívül sok eredményt képes generálni, széleskörű paraméterlistával rendelkezik, minden fő berendezés jellemzőit beállíthatunk a kívánt értékekre. Teljes műszaki analízis végezhető a segítségével gyakorlatilag tetszőleges hálózaton (belső méretkorlátok, melyek igény esetén bővíthetőek). A megvalósításokat hamarosan releváns mérési eredmények is validálják.

Összességében elmondható (7. fejezet), hogy az ötlettől egészen a megvalósulás kiértékeléséig minden részlet górcső alá kerül az energiatároló rendszerek telepítésével kapcsolatban. A sikeresség kulcsa pedig a jó tervezhetőség a mai beruházások esetén, hiszen a műszakilag és gazdaságilag jól alátámasztott fejlesztések mindig életképesek maradnak ipari szinten.

9 Irodalomjegyzék

- [1] International Renewable Energy Agency, Electricity storage and renewables for island power, May 2012.
- [2] stoRE, Empfehlungen zur Anpassung der politischen und marktregulatorischen Rahmenbedingungen für Energiespeicher in Deutschland, 2014.
- [3] Electric Power Research Institute, Electricity energy storage technology options, 2010.
- [4] stoRE, Final publishable report (EU), May 2014.
- [5] Eurelectric, Decentralised storage: impact on future distribution grids, June 2012.
- [6] International Energy Agency, The future role and challenges of Energy storage working paper, 2014.
- [7] International Energy Agency, Technology roadmap on energy storage, 2014.
- [8] International Electrotechnical Commission, White paper on energy storage, December 2011.
- [9] Magyar Elektrotechnikai Egyesület (Témavezető: Dr. Dán András), A hazai hálózatra a közeljövőben várhatóan nagy számban csatlakozó háztartási méretű kiserőművek által okozott problémák vizsgálata
- [10] Magyar Elektrotechnikai Egyesület (Témavezető: Dr. Dán András), A hazai hálózatra a közeljövőben várhatóan nagy számban csatlakozó háztartási méretű kiserőművek által okozott problémák vizsgálata: a kutatási jelentés véleményezés alapján készített kiegészítése
- [11] Villamos Energia Törvény (VET, 2007. évi LXXXVI. törvény a villamos energiáról), elosztói engedélyesekre vonatkozó jogszabályok, csatlakozási feltételek
- [12] Vhr: 2007. Évi LXXXVI. Törvény egyes rendelkezéseinek végrehajtásáról szóló 273/2007. (X.19.) kormányrendelet
- [13] Csatlakozási rendelet: 76/2011. (XII. 21) NFM rendelet (pénzügyi, műszaki)
- [14] Rhd rendelet: 64/2011. (XI.30) NFM rendelet (rendszerhasználati díj megállapítás és alkalmazás)
- [15] International Journal of Electrochemical Science (Yan Zhang, Baolong Liu, Tao Zhang, Bo Guo), An intelligent control strategy of battery energy storage system for microgrid energy management under forecast uncertainties
- [16] Szakdolgozat: Study of DigSilent Power Factory and implementation of an all-in-one grid model (Lipták Szilárd, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, konzulensek: Dr. Hartmann Bálint, Daniel Unger
- [17] Network integration of distributed power generation (Peter Dondi, Deia Bayoumu, Christoph Haederli, Danny Julian, Marco Suter), ScienceDirect
- [18] Smart grid tapasztalatok, a fóti Élhető Jövő Park bemutatása (Sasvári Gergely)
- [19] Szélerőművek integrálása a villamosenergia-rendszerbe (Dr. Hartmann Bálint)
- [20] Alkalmazott mesterséges intelligencia (Dudás László)
- [21] Citect SCADA CiCode Reference (Schneider Electric)
- [22] Fóti Élhető Jövő Park Smart Grid tesztek, MEE Vándorgyűlés (Kertész Dávid)

- [23]Strategic Deployment Document for Europe’s Electricity Networks of the Future, European Technology Platform, 2013
- [24]Tájékoztató az akkumulátor vezérlő szubrutin implementálásához (Sasvári Gergely)
- [25]DigSilent Power Factory DigSILENT Programming Language User Manual (DigSILENT GmbH), 2003

Függelék

F1 A villamos modell ellenőrző számításai

Minden elkészített modellt validálni kell, mielőtt azon elemzéseket végzünk, ellenkező esetben könnyen hibás következtetéseket vonhatunk le. Miután a dolgozat célja egy eljárás formálása a beadott hálózat szimulációs elemzésére, a szükséges megkötések mellett bevitt hálózatok ellenőrzése nem része a feladatnak. Az alábbiakban ismertetett egyszerű és áttekinthető, gyorsan implementálható ellenőrző módszer megfelelő lehet a teljesítményáramlási vizsgálatokhoz rögzített modellek ellenőrzésére. A megoldás csak abban az esetben működik pontosan, ha nem sztochasztikus profilokkal dolgozunk: ezekre megoldás lehet, ha több adatsort exportálunk, átlagolunk, majd bizonyos tűréshatáron belülre várjuk a számítások eredményét. Az ellenőrzés arra irányul, hogy az adatok hozzárendelése a modellben megfelelően történt-e, nincs-e valóságban elképzelhetetlen terhelés alatt egyetlen eszköz sem, illetve hogy a nettó áramlási értékek egyeznek-e a modell kimenetében kapott értékekkel.

A teljesítményáramlás számításának helyességét vizsgáljuk a hálózaton, figyelembe véve a veszteségek megjelenését a villamos szimulációban. A megoldáshoz a MATLAB és a Microsoft Excel szoftverek megfelelnek.

A modell bemeneteként használt teljesítményprofilok összességére van szükségünk: ezekből a vektorokból megalkothatunk egy teljes termelés és teljes fogyasztás változót. A kettő különbségként előáll a nettó áramlás. A DigSilent PowerFactory Time Sweep funkciójának kimeneteivel koherens eredményeket szeretnénk előállítani, melyek:

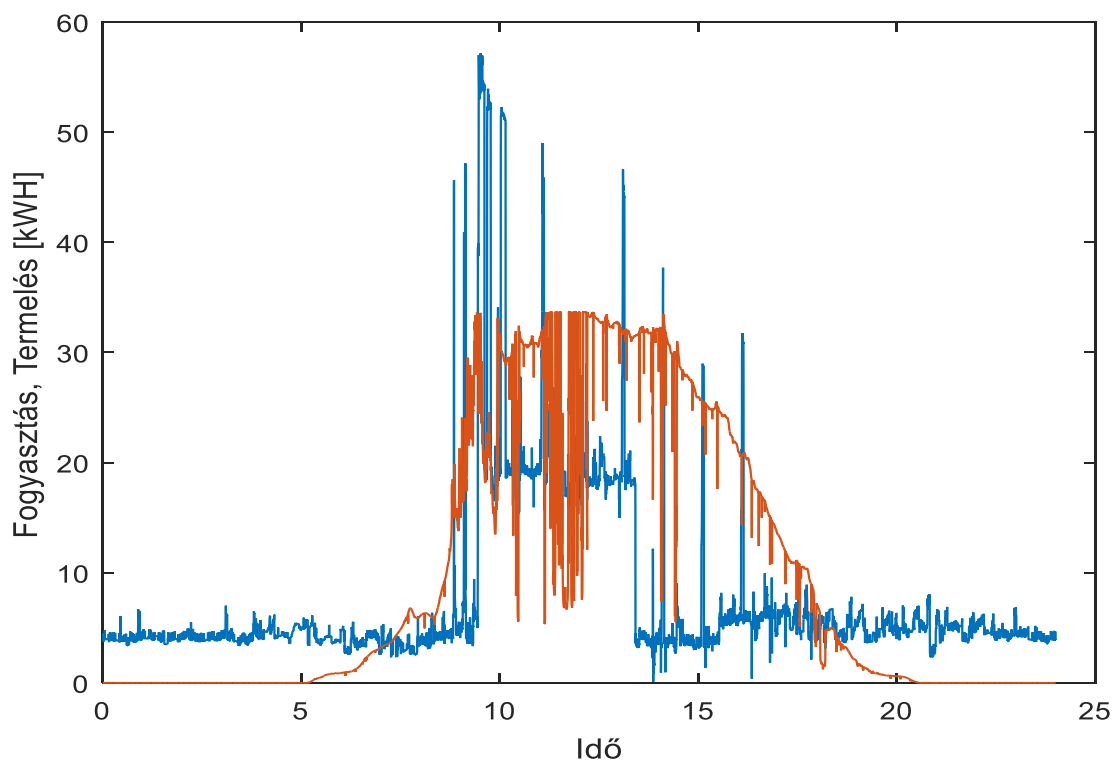
- Teljes termelés
- Teljes fogyasztás
- Nettó áramlás az externális hálózati elemen keresztül

Mindhárom mennyiség kWh egységekben áll rendelkezésre. Az alábbiakban leírt kód alapján a MATLAB szoftver elvégezte a fóti hálózat ellenőrzését, mely összevetését a végső Excel táblázat mutatja. A teljesítmények egy napi időre vett integráljával határozhatjuk meg az energiát: ezt a MATLAB integráló funkciójával is elvégezhetjük, vagy Excel segítségével téglalapos közelítést képezhetünk: a 10 másodperces bontású adat kellően finom ehhez.

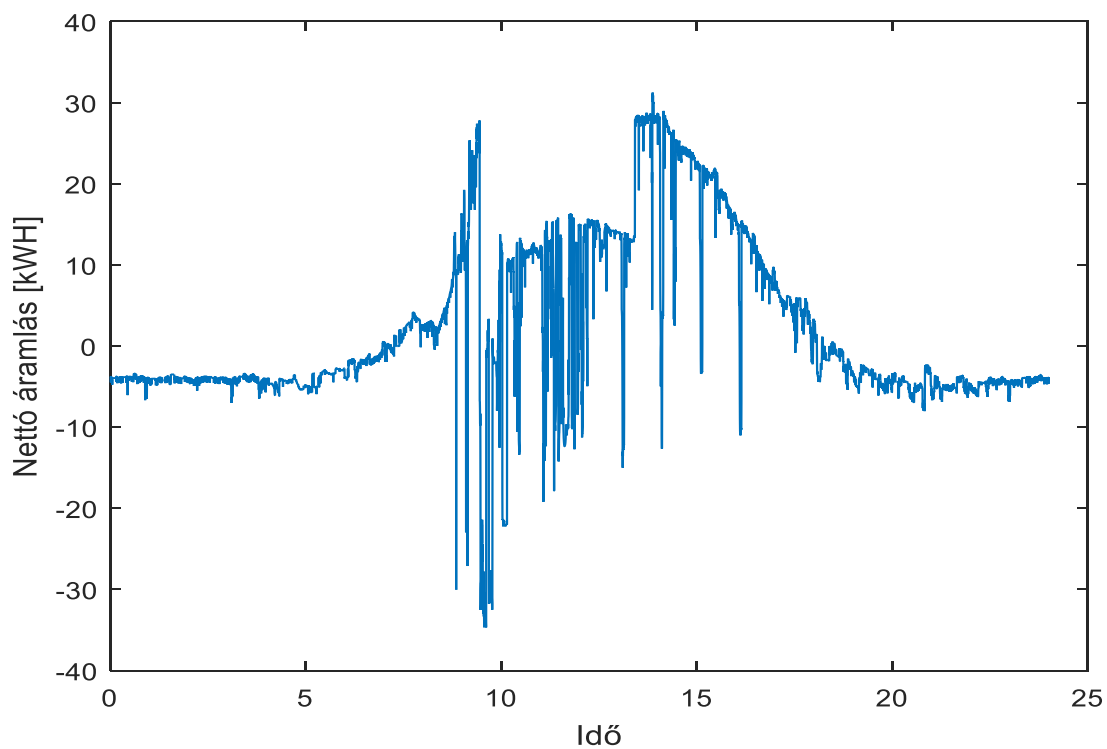
A téglalapos közelítés elve:

$$W = \int P dt = \sum_{i=1}^{i=8641} P_i * \tau, \tau = 10s, [W] = J$$
$$[W] = kWh \rightarrow \frac{W_J}{3600}$$

9-1. egyenlet: a téglalapos közelítés energiaszámításra



F9-1. ábra: Napi görbék összegzése



F9-2. ábra: nettó teljesítményáramlás

Az eredmények:

F9-1. táblázat: a modellezés eredményei összevetve a valós mérési körülményekkel

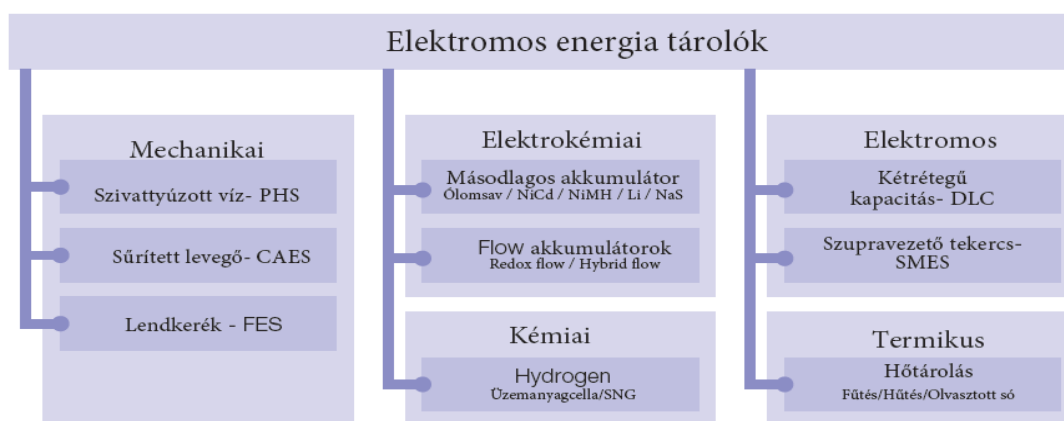
	Modell szimulációból származó értékek	Mérés alapján számított értékek
Nettó energia	37	37,98
Össztermelés	238	237,13
Összfogyasztás	190 (12 veszteség)	184,96 (14,19 veszteség9)

Ezek alapján a hálózat leképezése megfelelő, az eltérések a közelítések eltéréséből adódnak. Ilyen jellegű bemenetekre a felhasznált adatok ismeretében az eljárás megvalósítható.

F2 Technológiák leírása [4] [5][7][8][3]

F2.1 Áttekintés

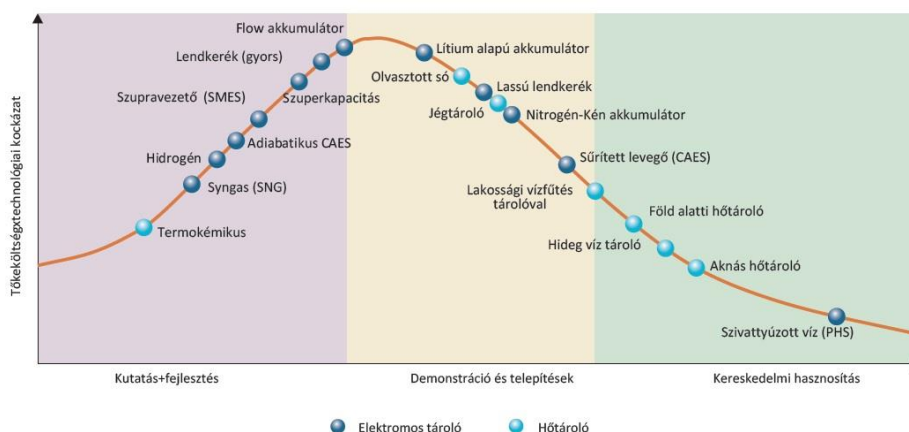
Az energiatárolási lehetőségeket alapvetően a tárolás mechanizmusa, azon belül is az energia megjelenési formája szerint csoportosíthatjuk. További fontos paraméter –mivel a legtöbb típusról kevés valós üzemi körülmények közt mért adatunk van- az adott technológia érettsége.



F9-3 ábra: a technológiák típusai

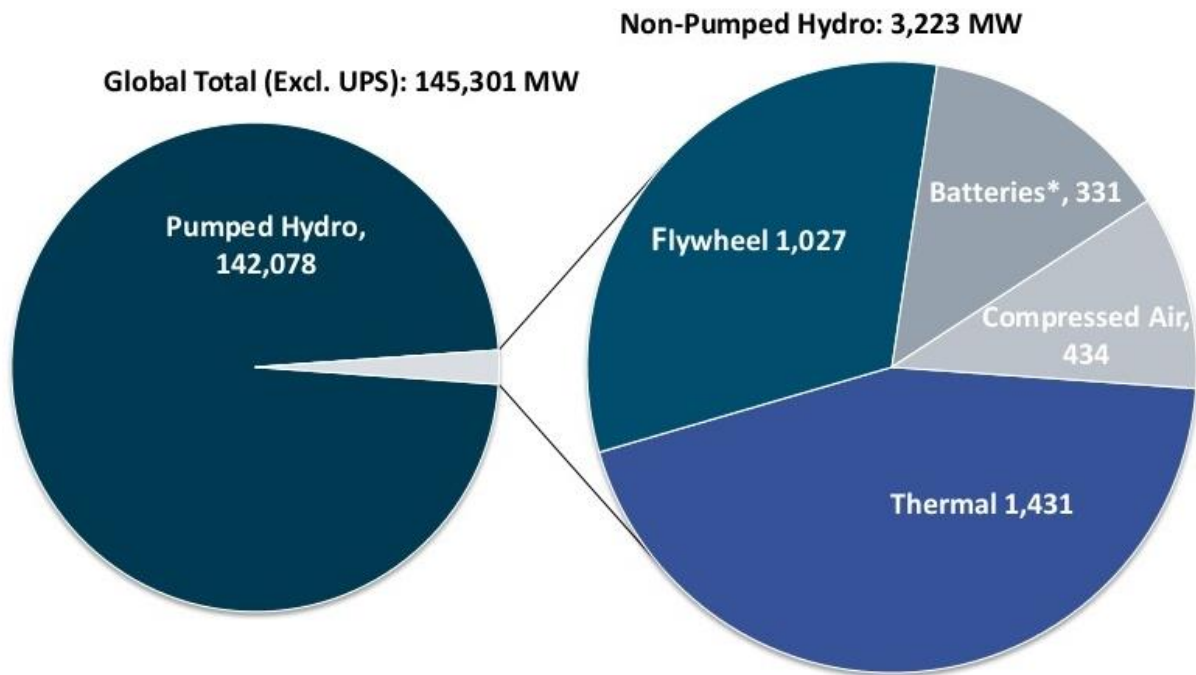
Fejlettség alapján az alábbi szinteket különíthetjük el:

- **érett:** szignifikáns kereskedelmi tapasztalat, több iparban működő egység
- **kereskedelmi:** létezik működő alkalmazás, üzemeltetési tapasztalat
- **demonstrációs:** integrált egységként megjelenő verifikált applikáció
- **minta projekt:** különállóan működő verifikált egység
- **laboratórium:** tanulmányokkal és kezdetleges mérésekkel verifikált ötlet
- **ötlet:** nincs működő rendszer, komponens tesztek sem elérhetőek



F9-4 ábra: technológiai fejlettség

A világon jelenleg (2014. januári adatok alapján) nagyjából a teljes villamos energia rendszer csúcsteljesítményének 2,7%-a a teljes installált tároló kapacitás, melynek döntő részét (99+%) jól láthatóan a szivattyúzott víz tárolók adják.



F9-5 ábra: kiépített kapacitás 2014 januárjában

F2.2 Technológiák leírása

F2.2.1 Szivattyúzott víz (PHS)

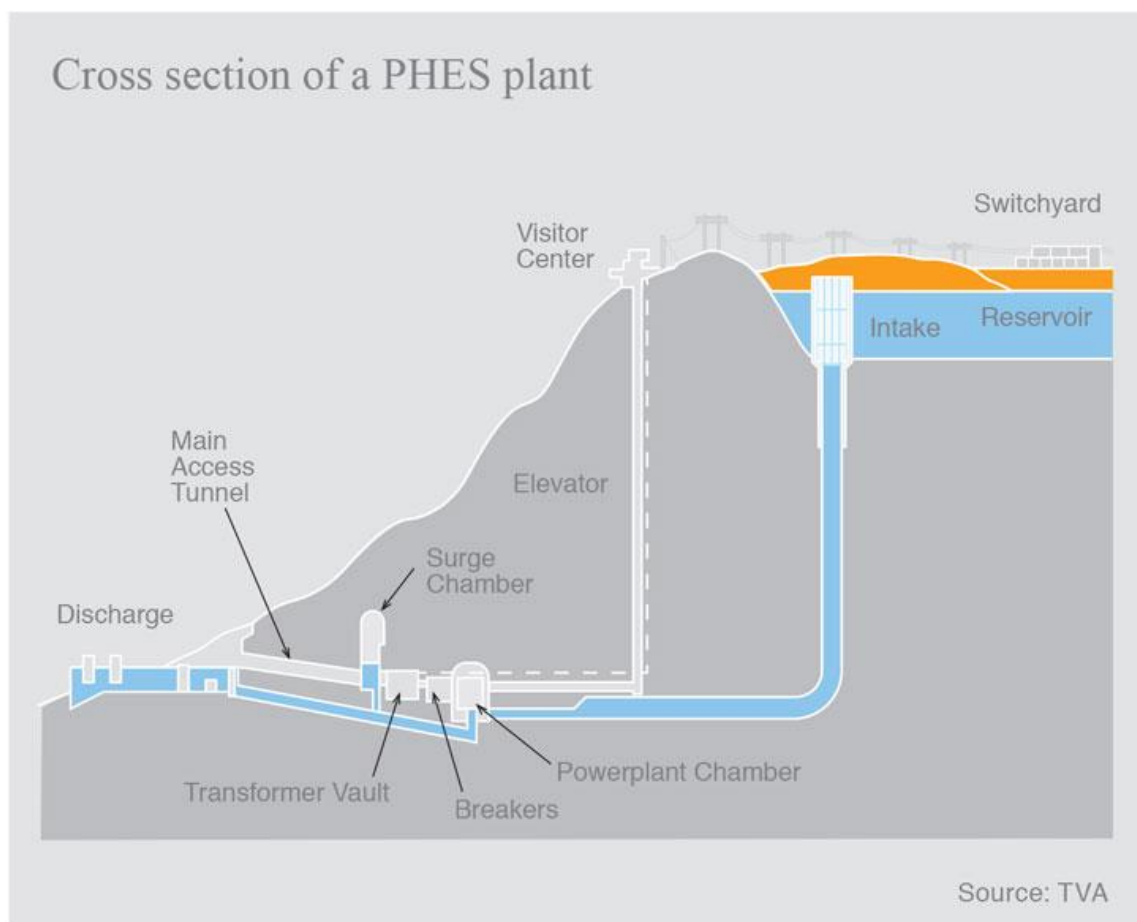
- Válaszidő: ~perc
- Energiasűrűség: $0.2-2 \frac{Wh}{kg}$
- Teljesítménysűrűség: $0.2-2 \frac{W}{l}$
- Tipikus kibocsátási idő: ~óra
- Hatásfok: 70-80%
- Élettartam: 50+ év
- Tipikus ciklusszám: 15000+
- Fejlettségi szint: érett

A világon telepített energiatároló kapacitás több mint 99%-a szivattyúzott víz formájában található. Érett, ipari közműszolgáltatásban több helyen is alkalmazott rendszer, nagy főtároló képességgel. A technológia lényege, hogy 2 víztárolót alkalmazunk, melyek eltérő magasságon helyezkednek el. Energia befektetés mellett képesek vagyunk a vizet az alacsonyabb tározóból a magasabbra juttatni. Amennyiben szükséglet adódik, a víz visszafolyatható az alsó tározóba, miközben meghajt egy turbinát,

amely generátorra kapcsolva villamos energiát szolgáltathat. A konkrét megoldások eltérőek lehetnek, például gát vagy barlangrendszer segítségével is megvalósítható lehet egy ilyen üzem. Már a XIX. században is alkalmazták energetikai célokra, 1933 óta pedig reverzibilis motor-generátor rendszerekkel csatolva is megjelenik. Magas az építési költség, de a működtetés és fenntartás kedvező. Jó néhány alkalmazás még a liberalizált piac kialakulás előtt épült, állami tulajdonban áll. Környezetvédelmi szempontból az úgynevezett nyitott rendszerű típus a leginkább támadható, megváltoztatja a folyó természetes szabályozását, az üledék és tápanyagáramlást, befolyásolja a vízhőmérsékletet és erősebb vízszint fluktuációt okozhat. A duzzasztógátaknál bevált szabályozás azonban sikeresen használható rá. Félig nyitott rendszer esetén már ember által épített környezetbe épül, míg a zárt rendszerek elszigetelten működnek a külvilágtól, így csak a konkrét telephelyükön változtatják meg a természetes környezetet.

Előnyök: nagyon hosszú élettartam, gyakorlatilag végtelen ciklusszám

Hátrányok: földrajzi függés, nagy felhasznált terület, környezeti hatások



F9-6 ábra: szivattyúzott víz tározó sematikus keresztmetszeti rajza

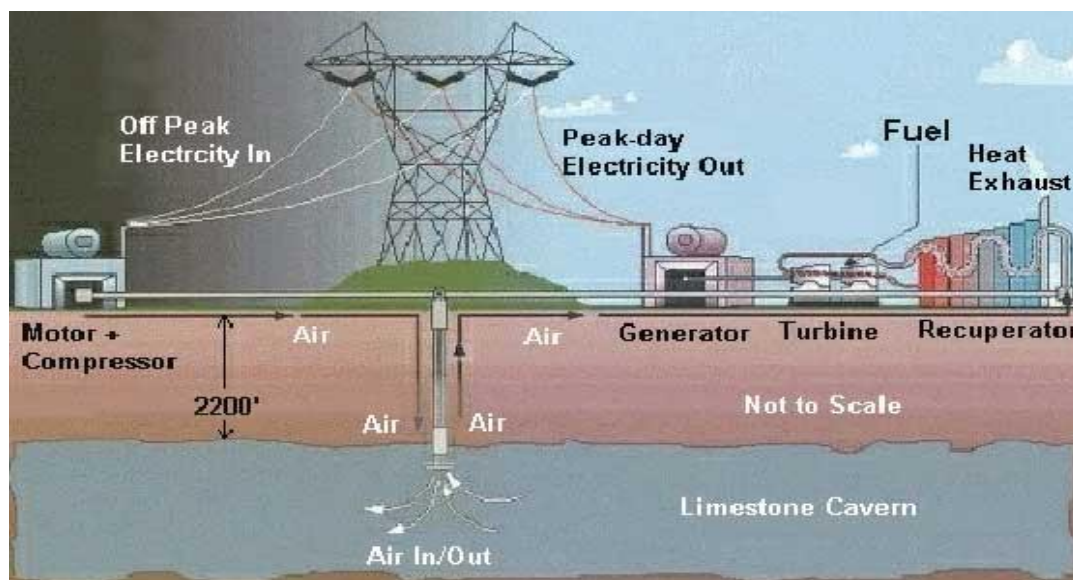
F2.2.2 Sűrített levegő (CAES)

- Válaszidő: ~perc
- Energiasűrűség: $2-6 \frac{Wh}{l}$
- Teljesítménysűrűség: $0.2-0.6 \frac{W}{l}$
- Tipikus kibocsátási idő: ~óra
- Hatásfok: 41-75%
- Élettartam: 25+ év
- Tipikus ciklusszám: 10000+
- Fejlettségi szint: kereskedelmi

XIX. század óta ipari szinten használt technológia, mobilis alkalmazások is elterjedtek. A levegő, mint tároló közeg az elérhetőség miatt merült fel. Energia befektetés árán összenyomjuk a gázt, és (föld feletti illetve földalatti) tartályokban, csövekben tároljuk. Mixelhető természetes gázzal, tágítható és elégethető egy megfelelő gázturbinában. Tipikusan barlangokban, elhagyatott bányákban tárolják. Ha a hőt, amely az összenyomáskor disszipálódik, hagyjuk elveszni, újra kell melegítsük a gázt tágláskor: ez a diabtikus CAES. Jelenleg is zajlik az adiabatikus folyamat ipari szintű alkalmazhatóságának kidolgozása, mely nagyban növelheti a hatásfokot (a fentebb említett hő tartomány is emiatt adódik, a diabtikus rendszerek 50% környékén állnak), 2020 környékére várnak konkrét eredményt.

Előnyök: nagy kapacitás, ár/érték arány

Hátrányok: limitált földrajzi lehetőségek, alacsony hatásfok



F9-7 ábra: sematikus CAES elrendezés földalatti tárolóval

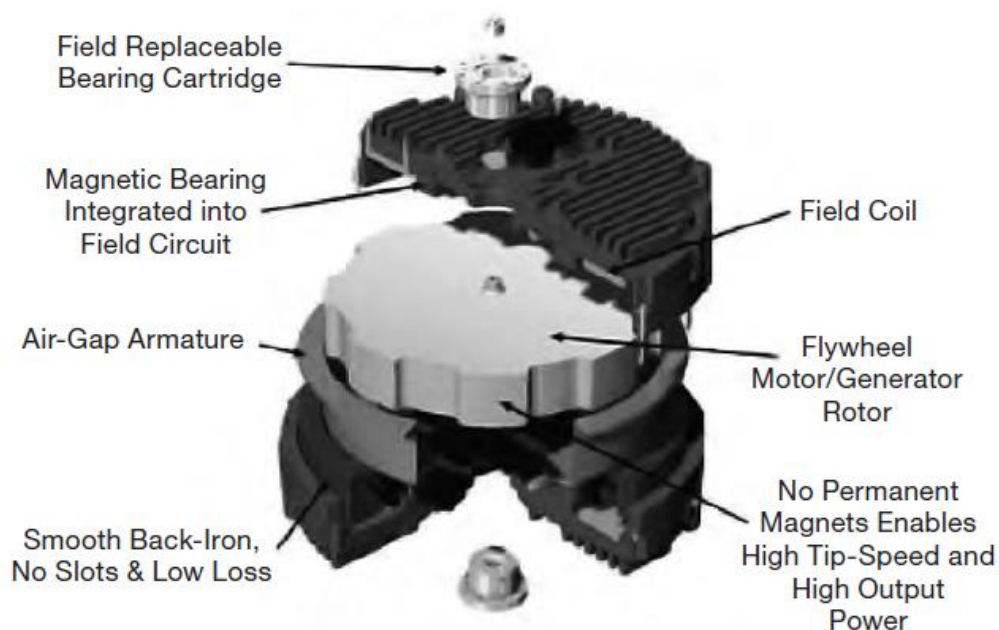
F2.2.3 Lendkerék (Flywheel)

- Válaszidő: $\sim$ másodperc
- Energiasűrűség: $5-30 \frac{Wh}{kg}$
- Teljesítménysűrűség: $5000 \frac{W}{l}$
- Tipikus kibocsátási idő: $\sim$ másodperc
- Hatásfok: 80-90%
- Élettartam: 15-20 év
- Tipikus ciklusszám: $2 \cdot 10^4 - 10^7$
- Fejlettségi szint: demonstrációs (frekvenciaszabályozásban)

Forgási energia tárolódik egy gyorsuló rotorban, egy nehéz forgó tárcsa segítségével. Fő komponensek: forgótest/tárcsa, gyűrű a tengelyen, csapágyazás és váltóeszköz (motor/generátor állórészre rögzítve, ez felel a gyorsításért és a kinetikus energia elektromos árammá alakításáért). Az energia a konstans sebességen tartásból adódik, magasabb sebesség alkalmazása esetén nagyobb energiamennyiség nyerhető ki. A 70-es években terjedt el, de első írásos említése a XI. századból származik. Elsősorban a változó tengelynyomatékú rendszerek egyenletes sebességtartására használják, energetikai vonatkozásban így még csak demonstrációs szintet ér el.

Előnyök: ciklusstabilitás, élettartam, nagy teljesítménysűrűség, nem környezetszennyező

Hátrányok: légellenállás, csapágyveszteségek, alacsony hatásfok



F9-8 ábra: lendkerék robbantott ábrája

F2.2.4 Ólomsavas akkumulátor (lead acid)

- Válaszidő: ~<másodperc
- Energiasűrűség: 30-45 $\frac{Wh}{kg}$
- Teljesítménysűrűség: 90-700 $\frac{W}{l}$
- Tipikus kibocsátási idő: ~óra
- Hatásfok: 75-90%
- Élettartam: 3-15 év
- Tipikus ciklusszám: 250-1500
- Fejlettségi szint: fejlett

XIX. század vége óta széles körben elterjedt típus. Mobilis és helyhez kötött rendszerek egyaránt elérhetőek. Vészhelyzeti energiaellátásban, napelemekkel és szélenergia-átalakítókkal alkotott önálló rendszerként, gépjárművek indító energiaforrásként megbízhatóan üzemel. Alacsony költségű, jól ismert technológia, de a stacionárius alkalmazások drágábbak, mint a starter üzeműek. Névleges feszültsége 2 V, Kapacitása cellánként 1-4000 Ah között mozog.

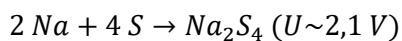
Előnyök: a költség/teljesítmény mutató jónak mondható, újrahasznosítható, egyszerű tölteni, elterjedt

Hátrányok: kapacitásvesztés nagyteljesítményű kisütés esetén, alacsony energiasűrűség, ólom használata, hőmérséklet érzékenység

F2.2.5 Nátrium-kén akkumulátor (NaS)

- Válaszidő: ~<másodperc
- Energiasűrűség: 100-250 $\frac{Wh}{kg}$
- Teljesítménysűrűség: 120-160 $\frac{W}{l}$
- Tipikus kibocsátási idő: ~óra
- Hatásfok: 70-85%
- Élettartam: 10-15 év
- Tipikus ciklusszám: 2500-4500
- Fejlettségi szint: fejlett

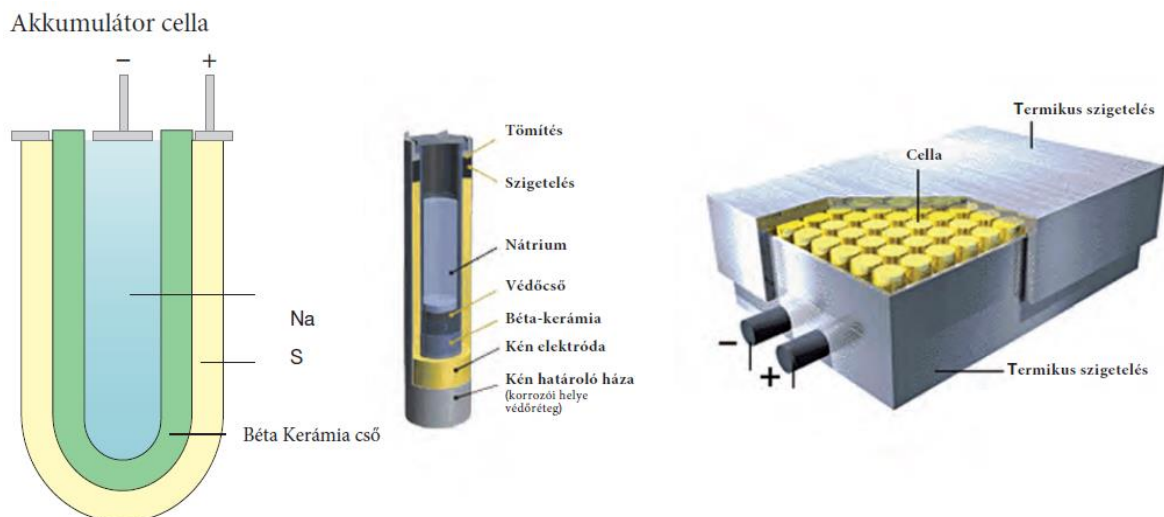
Folyékony kén pozitív elektród és folyékony nátrium negatív elektród alkotja szilárd kerámia elektrolittal elválasztva. 300-350 °C üzemi hőmérséklet jellemzi az olvadáspontok miatt. Névleges feszültsége 2,1 V, cellánkénti kapacitása 4-30 Ah.



F-9-2.1 egyenlet: A NaS akkumulátorokban lejátszódó kémiai folyamat

Előnyök: magas ciklusszám, hosszú kibocsátási idő, gyors válasz magas hatások.

Hátrányok: hőforrás szükséges, amely az elem energiáját használja, korróziós hatások



F9-9 ábra: NaS akkumulátor

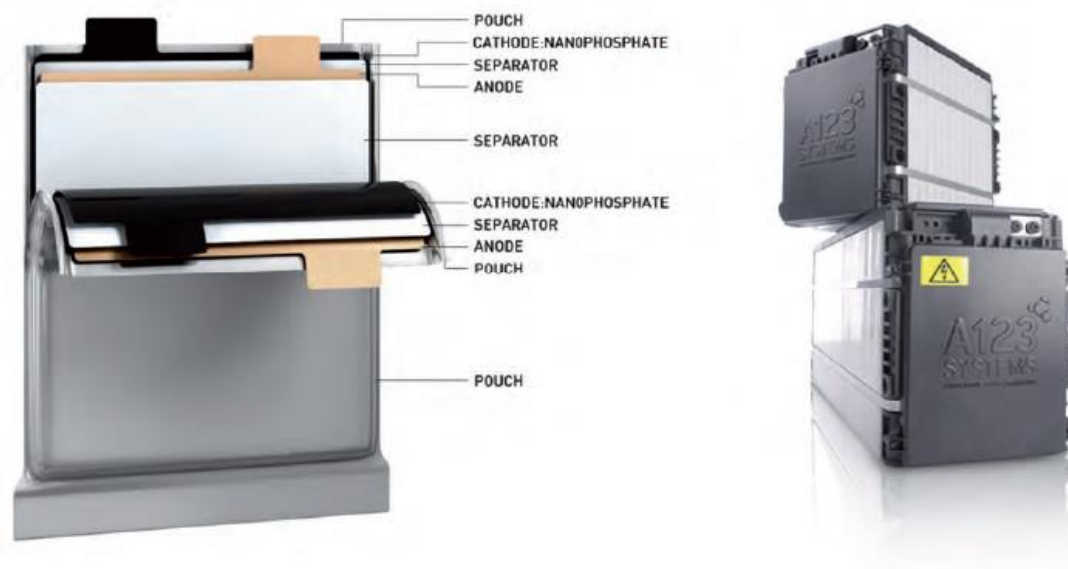
F2.2.6 Lítium-ion akkumulátor (Li-ion)

- Válaszidő: $\sim$ másodperc
- Energiasűrűség: $130-200 \frac{Wh}{kg}$
- Teljesítménysűrűség: $1300-10000 \frac{W}{l}$
- Tipikus kibocsátási idő: $\sim$ óra
- Hatásfok: 85-98%
- Élettartam: 5-15 év
- Tipikus ciklusszám: 500-10000
- Fejlettségi szint: demonstrációs

Mobilis alkalmazások legelterjedtebb tárolója a XXI. században (piaci részesedése meghaladja az 50%-ot), az elektronikai iparban meghatározó. Komoly befolyásoló tényező lehet az elektromos autók piacának alakulása a későbbi fejlődésre. Nominális cellafeszültsége 3,7 V, cellánkénti kapacitása 0,05-100 Ah között mozog. Komoly biztonsági kérdések merülnek fel, a fém-oxid elektródák termikusan nem stabilak, túltöltés és túlterhelés ellen egy megfigyelő egységgel kell ellátni a berendezést. Jellemzően a kimeneti feszültség szint is monitorozott.

Előnyök: magas maximális cellafeszültség (3,7 V), nagy energiasűrűség, költséges alakul ki a tömeggyártásban, magas ciklusszám

Hátrányok: Drága az egységteljesítmény főként a speciális csomagolás és szállítás miatt, érzékeny a túltöltésre és túlterhelésre, hőmegfutási jelenség



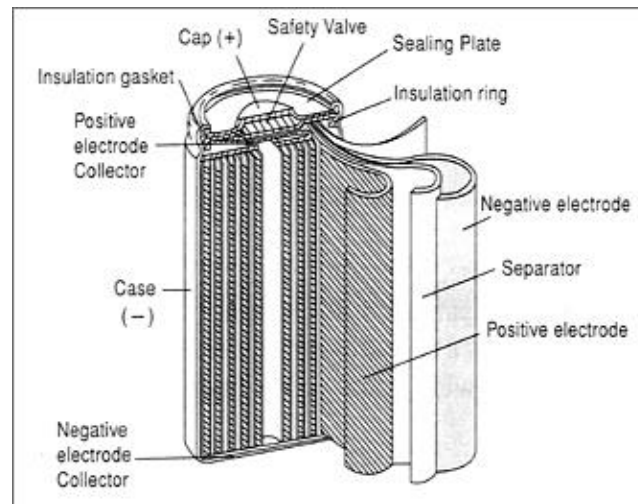
F9-10 ábra: Lítium-ionos akkumulátor részegységei, felépítése

F2.2.7 NiCd, NiMH, NaNiCl (Zebra), Zn-levegő, Vanádium-redox akkumulátorok

F9-2. táblázat: feltörekvő akkumulátor technológiák összehasonlítása

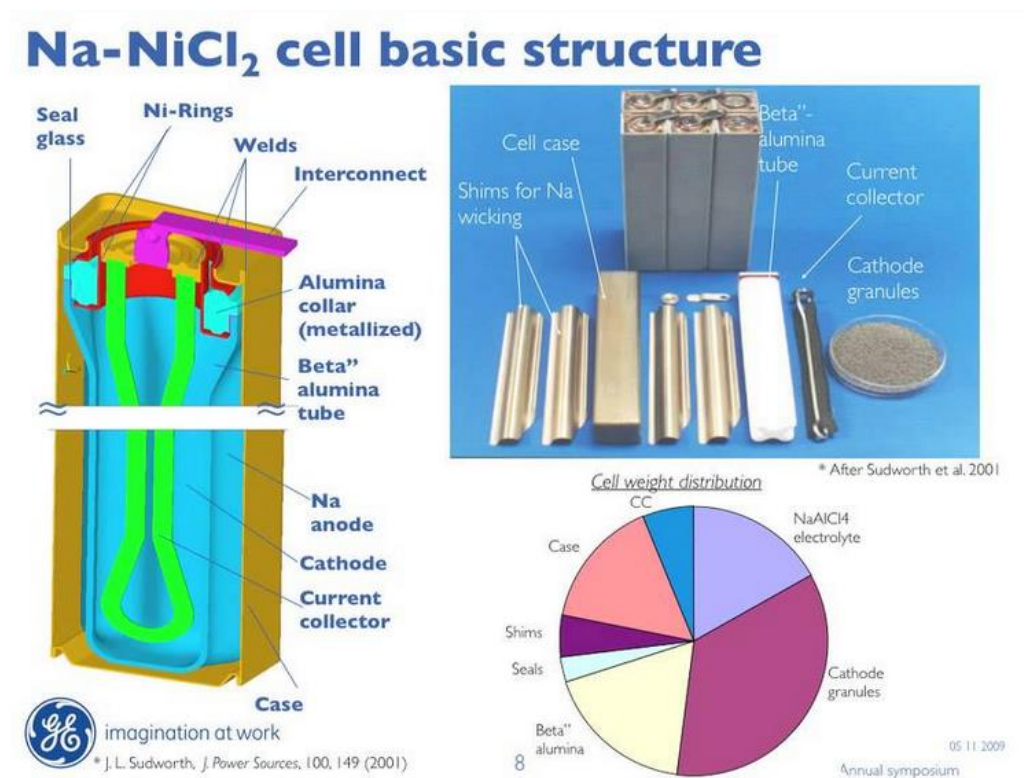
	Válaszidő	Energiasűrűség ($\frac{Wh}{kg}$)	Teljesítménysűrűség ($\frac{W}{l}$)	Típusos kibocsátási idő	Hatásfok (%)	Élettartam (év)	Típusos ciklusszám	Nominális cellafeszültség (V)	Érettség
NiCD	<mp	15-40 30-45	75-700	óra	60-80 60-70	5-20 5-10	1500-3000 500-800	1.2	kereskedelmi
NiMH	<mp	40-80	500-3000	óra	65-75	5-10	600-1200	1.2	kereskedelmi
NaNiCl	<mp	100-200	250-270	óra	80-90	10-15	~1000	2.6	K+F
Zn-levegő	<mp	130-200	50-100	óra	50-70	>1	>1000	1.0	laboratóriumi
Vanádium-redox	~mp	15-50	0.5-2	óra	60-75	5-20	>10000	1.6	demonstrációs

NiCd, NiMH: 1915 illetve 1995 óta kereskedelmi forgalomban levő technológiák. Alacsony (-20-40 °C) hőmérsékleten is működőképesek. Nagyobb energiasűrűség és magasabb ciklusszám jellemzi őket ólomsavas vetélytársaiknál. A kadmium mérgező hatása miatt volt szükséges a továbbfejlesztés, mely után akár az elektromos autók piacára is alkalmas akkumulátor típust alakítottak ki.



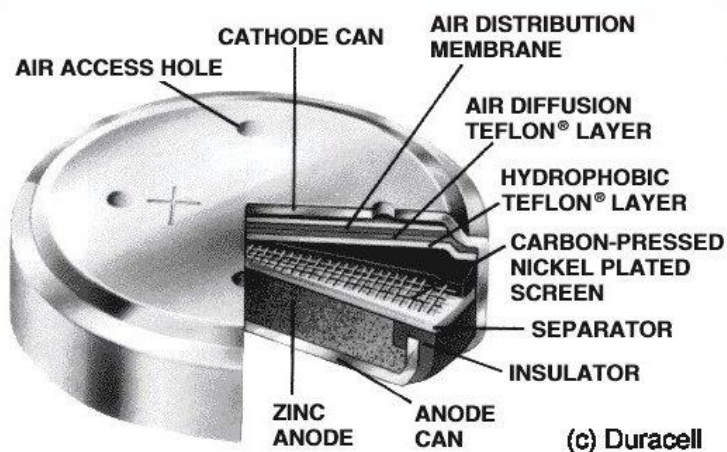
F9-11 ábra: NiCd konstrukció

NaNiCl₂: magas hőmérsékleten (270 °C) üzemelő akkumulátor, 1995 óta kereskedelmi forgalomban is kapható. Magas cellafeszültség és vetélytársainál biztonságosabb működés jellemzi. Hiba esetén csak 1 cellányi energia esik ki a rendszerből, a többi üzemképes marad. Szintén az elektromos autók piacán merült fel mint alkalmazási lehetőség. Folyékony elektródos kialakítású, negatív elektród nátrium, pozitív elektród pedig a NiCl₂ vegyület. 1985-ben készítették el, a Zeolite Battery Research Africa Project (ZEBRA) kutatócsoportról kapta nevét.



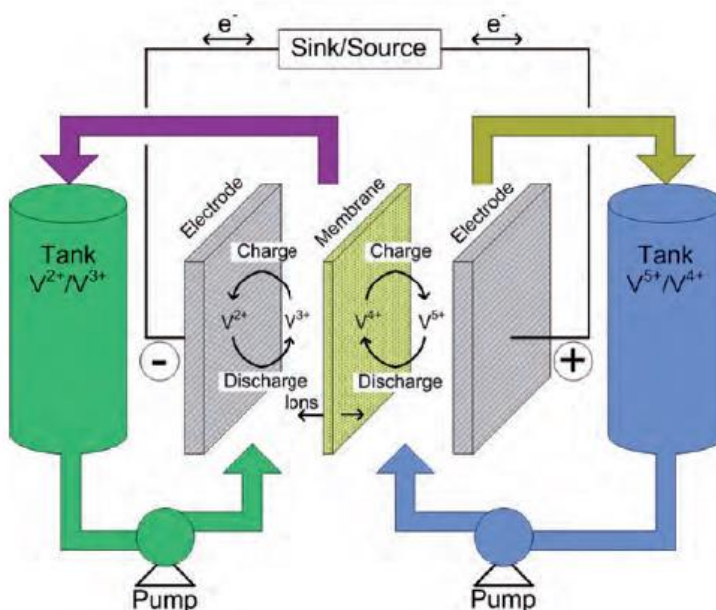
F9-12 ábra: NaNiCl szerkezeti struktúra

Zn-levegő: A fém-levegő elektrokémikus cella tiszta fém anódból és a gyakorlatilag kifogyhatatlanul rendelkezésre álló levegő katódból áll. Jelenleg egyedül a cink típus tűnik megvalósíthatónak: üzemanyagcellákban és konvencionális elemekben alkalmazzák. A cink mint üzemanyag szerepel, a levegőáramlás szabályozásával pedig a teljesítmény befolyásolható.



F9-13 ábra: a fém-levegő akkumulátor szerkezete

Vanádium-redox: 2 folyékony elektrolit, az anolit és katolit alkotja. Nincs fázisátalakulás: porózus elektródákon átfolyva membránhatás alakul ki, csak a protonok jutnak át. Gyors újratölthetőség, pár perces kisütési idő és alacsony energiasűrűség jellemzi, emellett nincs irreverzibilis kapacitásvesztés és elektrolit károsulás.



F9-14 ábra: Vanádium-redox elem sematikus felépítése

F2.2.8 Hidrogén (H)

- Válaszidő: ~másodperc-perc
- Energiasűrűség: $33300 \frac{Wh}{kg}$
- Teljesítménysűrűség: $0.2-2,2-20 \frac{W}{l}$
- Tipikus kibocsátási idő: ~órák-hetek
- Hatásfok: 34-44%
- Élettartam: 10-30 év
- Tipikus ciklusszám: 1000-10000
- Fejlettségi szint: laboratóriumi

Jellemzően egy elektrolizálóból, hidrogéntároló tartályból és üzemanyagcellából áll. Az elektrolizáló a vizet képes hidrogénné és oxigénné bontani (hő felvétele mellett). A hidrogént magas nyomásértéken tároljuk. Az üzemanyagcella a visszaalakításért felelős, ekkor keletkezik hő és elektromos áram. A tárolás módjára több ötlet is adódik, folyékony és kémiai kötött állapot is elképzelhető.

Előnyök: nagyléptékű tárolás, nagy energiasűrűség

Hátrányok: alacsony hatásfok (elektrolizáló miatt)

F2.2.9 Syngas (SNG)

- Válaszidő: ~perc
- Energiasűrűség: $10000 \frac{Wh}{kg}$
- Teljesítménysűrűség: $0.2-2 \frac{W}{l}$
- Tipikus kibocsátási idő: ~órák-hetek
- Hatásfok: 30-38%
- Élettartam: 10-30 év
- Tipikus ciklusszám: 1000-10000
- Fejlettségi szint: laboratóriumi

A metánszintézis a hidrogén mellett alternatív megoldásként szerepelhet. Ebben az esetben szükséges egy újabb technológiai lépés, a metanizáció. Szén-dioxid felhasználó folyamat. A tárolás mechanizmusa a hidrogénhez hasonlatos.

Előnyök: létező infrastruktúrához köthető, nagy energiasűrűség

Hátrányok: AC/AC hatásfoka 35% körül mozog

F2.2.10 Szuperkapacitás (DLC)

- Válaszidő: $\sim < \text{másodperc}$
- Energiasűrűség: $1-15 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}}$
- Teljesítménysűrűség: $40000-120000 \frac{\text{W}}{\text{I}}$
- Tipikus kibocsátási idő: $\sim \text{másodperc}$
- Hatásfok: 85-98%
- Élettartam: 4-12 év
- Tipikus ciklusszám: 10000-100000
- Fejlettségi szint: laboratóriumi

Kétrétegű kapacitásokként is emlegetik. 60 éves ismert technológia. Nincs mozgó alkatrésze, nagy teljesítménysűrűség jellemzi. Nagy teljesítménnyel kisüthető szerkezeti károsodás nélkül. Kis belső ellenállású, nagyon gyors kibocsátás érhető el vele. Újrahasznosítása megoldott.

Előnyök: nagy teljesítménysűrűség, tartósság, jó hőmérséklettűrés

Hátrányok: drága, hosszú idejű tárolásra használhatatlan



F9-15 ábra: 2,5 V 5000 F szuperkapacitás kialakítás

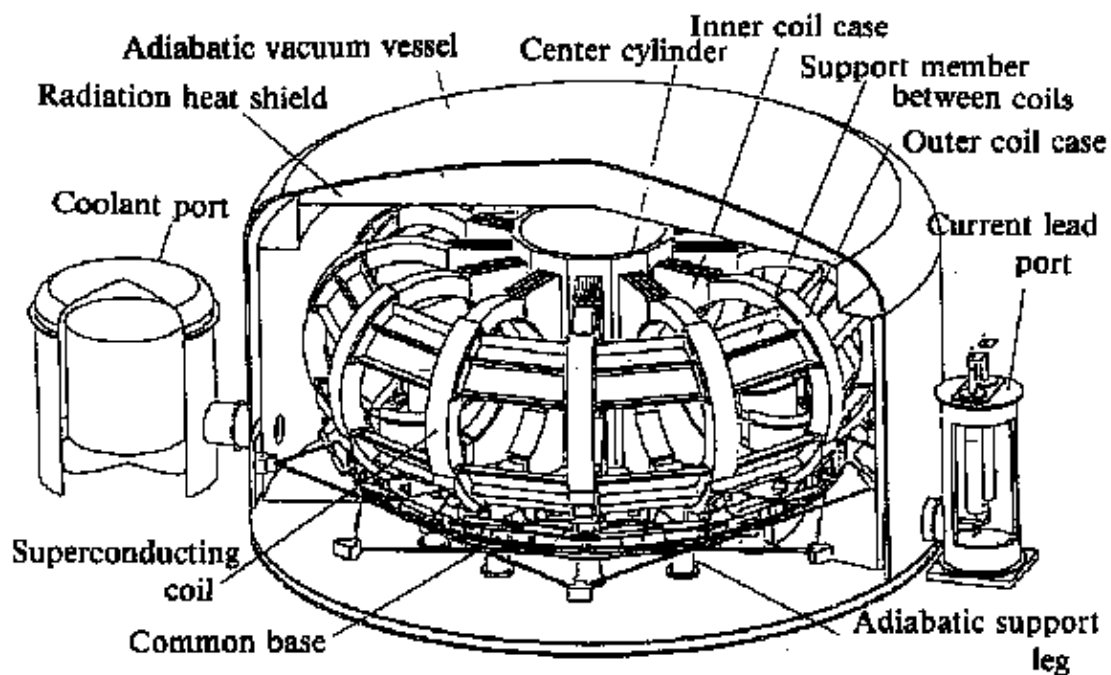
F2.2.11 Szupravezető tároló (SMES)

- Válaszidő: $\sim < \text{másodperc}$
- Energiasűrűség: $6 \frac{Wh}{l}$
- Teljesítménysűrűség: $2600 \frac{W}{l}$
- Tipikus kibocsátási idő: $\sim \text{másodperc}$
- Hatásfok: 75-80%
- Élettartam: nincs elég adat
- Tipikus ciklusszám: nincs elég adat
- Fejlettségi szint: laboratóriumi

Mágneses mezőben tárolódik az energia, melyet egyenáram szupravezetőben folyása okoz. A kritikus hőmérsékletérték növelésére irányuló kutatások folyamatos eredményekkel szolgálnak, ennek függvényében válik egyre érdekesebbé a technológia tárolási szempontból. Szupravezetésre alkalmas tekercs szükséges hozzá, valamint összetett hűtőrendszer. Részecskegyorsítók mellett már alkalmazzák a technológiát energetikai üzemben is (10 MW).

Előnyök: gyors válasz, magas hatásfok, nincs mozgó alkatrész

Hátrányok: a megbízhatóság erősen hűtésfüggő



F9-16 ábra: SMES konstrukció Japánból (100 kWh)

F2.2.12 Termikus tároló (TES)

- Válaszidő: ~<másodperc
- Energiasűrűség: $130-200 \frac{Wh}{kg}$
- Teljesítménysűrűség: $1300-10000 \frac{W}{l}$
- Tipikus kibocsátási idő: ~óra
- Hatásfok: 85-98%
- Élettartam: 5-15 év
- Tipikus ciklusszám: 500-10000
- Fejlettségi szint: kereskedelmi

A termikus tárolásban 3 fő típust különíthetünk el:

- érezhető hő: tartályokban tárolható. Jól ismert technológia, folyékony és szilárd halmazállapotú anyagban is megőrizhető a befektetett hő
- látens hő: fázisátalakulást idézünk elő, majd a visszaalakuláskor kinyerhetjük a hőt
- termokémikus abszorpció: hőszivattyúk segítségével működtethető vákuumban, komplex rendszer, amely energiatárolási szempontból jelen fejlettségi stádiumában nem túl érdekes.

A CHP (kombinált hő és villamos teljesítményű) erőművek képesek lehetnek lecsatolni a hőtermelést a keresletről, hasonlóan sok előnyt képezve, mint a villamos hálózat esetén. A hőtárolásban léteznek részletes technológiai tanulmányok, ipari körülmények közt működő alkalmazások.

Hőmérsékleti érték alapján 3 fő csoportot különböztethetünk meg:

- alacsony hőmérséklet (<10°C): hűtési kapacitás
- közepes hőmérséklet (10-250°C): csúcsterhelések kezelése (~5% redukció)
- magas hőmérséklet (> 250°C): olvasztott só, veszteség felhasználás

Komoly szerepet játszik a tárolás a lakossági hűtési rendszerekben, főként az épületenergetikai alkalmazások optimalizálásakor.

F2.3 Összehasonlítás

A karakterisztika adatokat tartalmazó összesített táblázat:

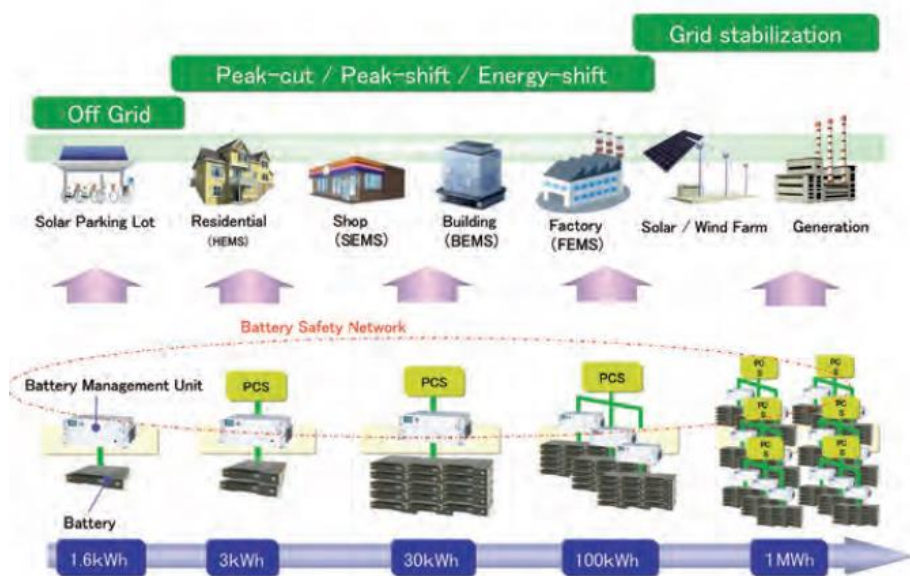
F9-3. táblázat: karakterisztika adatok

Technológia	Nominális feszültség [V]	Cellakapacitás [Ah]	Válaszidő	Energia-sűrűség [Wh/kg]	Energiasűrűség [Wh/l]	Teljesítmény sűrűség W/l	Tipikus kibocsátási idő	Energia-hatékonyság η_{Wh} [%]	Élettartam [a]	Tipikus ciklusszám
PHS	-	-	perc	0.2 – 2	0.2 – 2	0.1 – 0.2	óra	70 – 80	> 50	> 15 000
CAES	-	-	perc	-	2 – 6	0.2 – 0.6	óra	41 – 75	> 25	> 10 000
Lendkerék	-	0.7 – 1.7 MW	< mp	5 – 30	20 – 80	5 000	másodperc	80 – 90	15 – 20	$2 \cdot 10^4 - 10^5$
Ólomsavas	2.0	1 – 4 000	< mp	30 – 45	50 – 80	90 – 700	óra	75 – 90	3 – 15	250 – 1 500
NiCd	1.2	2 – 1 300 0.05 – 25	< mp	15 – 40 30 – 45	15 – 80 80 – 110	75 – 700 (vented)	óra	60 – 80 60 – 70	5 – 20 5 – 10	1 500 – 3 000 500 – 800
NiMH	1.2	0.05 – 110	< mp	40 – 80	80 – 200	500 – 3 000	óra	65 – 75	5 – 10	600 – 1 200
Li-ion	3.7	0.05 – 100	< mp	60 – 200	200 – 400	1 300 – 10 000	óra	85 – 98	5 – 15	500 – 10^4
Cink-levegő	1.0	1 – 100	< mp	130 – 200	130 – 200	50 – 100	óra	50 – 70	> 1	> 1 000
NaS	2.1	4 – 30	< mp	100 – 250	150 – 300	120 – 160	óra	70 – 85	10 – 15	2 500 – 4 500
NaNiCl	2.6	38	< mp	100 – 200	150 – 200	250 – 270	óra	80 – 90	10 – 15	~ 1 000
VRFB	1.6	-	mp	15 – 50	20 – 70	0.5 – 2	óra	60 – 75	5 – 20	> 10 000
HFB	1.8	-	mp	75 – 85	65	1 – 25	óra	65 – 75	5 – 10	1 000 – 3 650
Hidrogén centralizált decentralizált	-	-	mp-perc	33 330	600 (200 bar)	0.2 – 2 2.0 – 20	órák-hetek	34 – 44	10 – 30	$10^3 - 10^4$
SNG	-	-	perc	10 000	1 800 (200 bar)	0.2 – 2	órák-hetek	30 – 38	10 – 30	$10^3 - 10^4$
DLC	2.5	0.1 – 1 500 F	< mp	1 – 15	10 – 20	40 000 – 120 000	másodperc	85 – 98	4 – 12	$10^4 - 10^5$
SMES	-	-	< mp	-	6	2 600	másodperc	75 – 80		

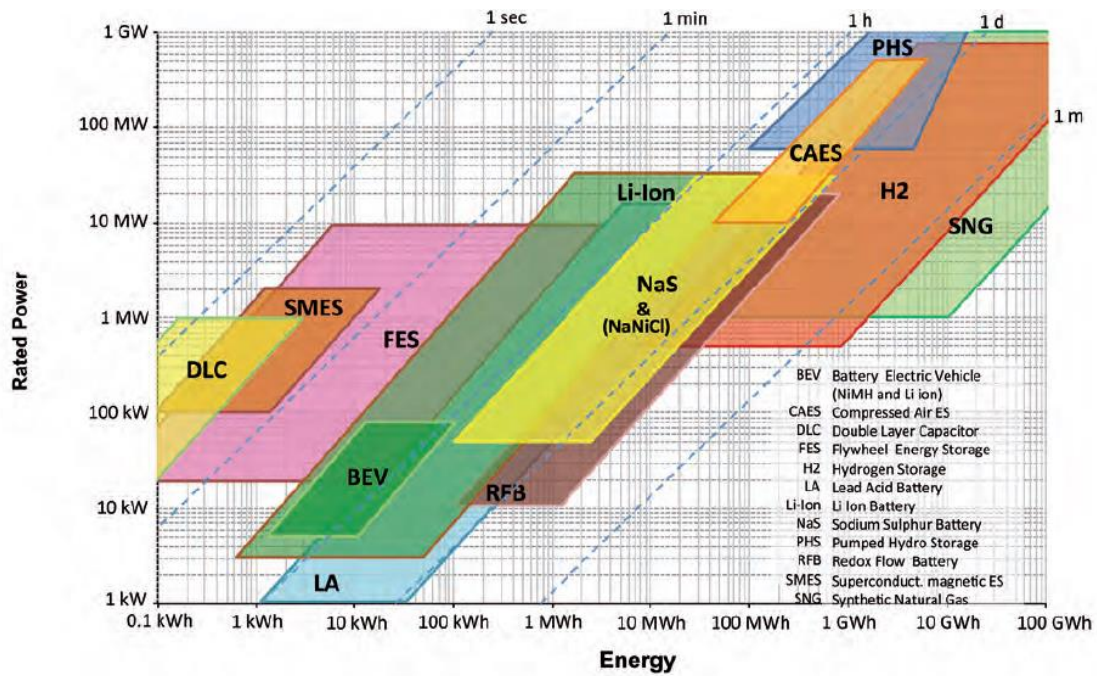
Az egyes technológiákat az összetettség miatt nehéz kezelni, így kézenfekvő, hogy csoportosítsuk őket valamilyen igény szerint. A tárgyalt konkrét alkalmazásokhoz rendeléskor elsősorban a kapacitás és teljesítményigényeket vizsgáljuk, így ezen adatok mentén alakítjuk ki a csoportokat. Fontos egy alkalmazás szempontjából, hogy mennyi ideig kell fenntartani a kimenetet, ez a fentiek alapján jól behatárolható. A teljesítményeket jellemző élettartományokba osztjuk: nagy termelésű hálózati alaperőművekkel összemérhető méretű, kiserőművek tartományába eső illetve fogyasztói oldalon használható. Ezáltal az egyes esettanulmányoknál tudatosan kereshetjük a megfelelő technológiákat. Egyes kérdések más, speciális megközelítést igényelnek, de ebben a rendszerben a legtöbb kérdés egyértelműen eldönthető.

- Teljesítményüzemű működésben:
 - nagy beavatkozó képesség (100MW+)
 - szivattyúzott víz
 - sűrített levegő
 - termikus tárolók
 - kémiai tárolás (Hidrogén, Syngas)
 - Hálózat támogató rendszerek (MW)
 - szuperkapacitás
 - szupravezetős energiatároló
 - lendkerék
 - Ólomsavas akkumulátor
 - Li-ion akkumulátor
 - NaS akkumulátor
 - Fogyasztóoldali alkalmazások (kW)
 - szuperkapacitás
 - lendkerék
 - ólomsavas, Li-ion, NaS akkumulátor

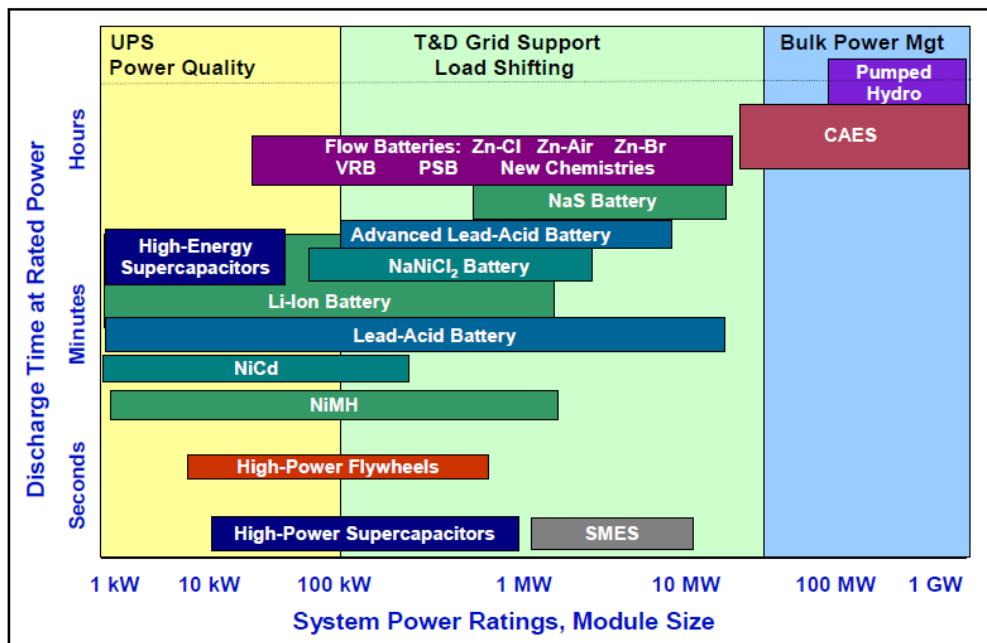
Néhány szemléletes ábrán tekintsük át az alkalmazások egymáshoz viszonyulását:



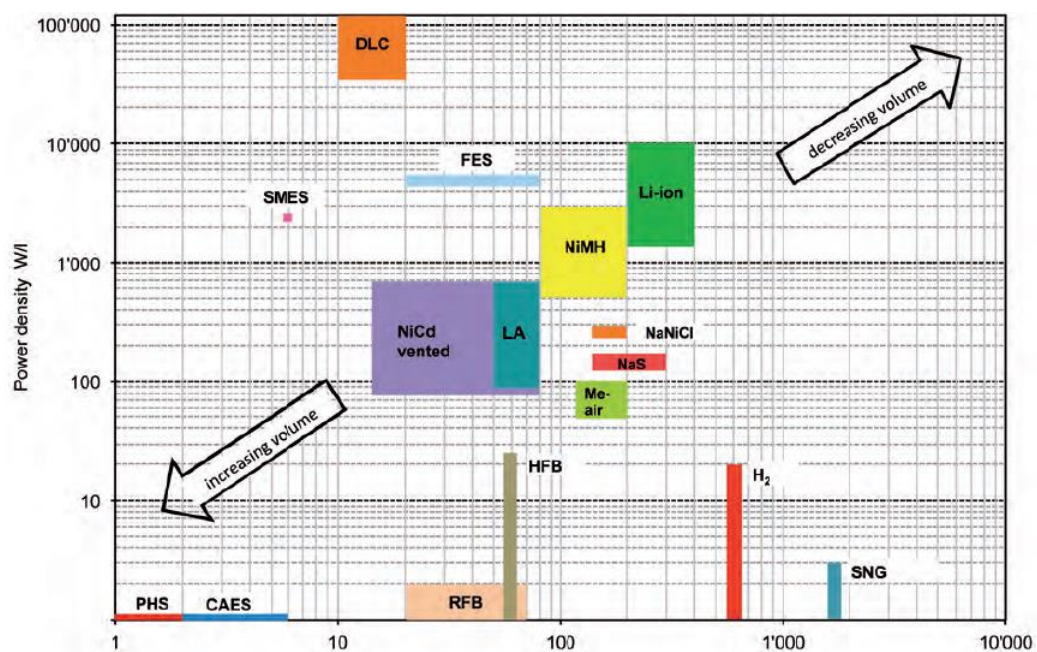
F9-17 ábra: Smart Grid és tárolók kapacitásléptékű kapcsolata [8]



F9-18 ábra: Névleges teljesítmény-energia diagram [8]



F9-19 ábra: kisütési idő-névleges teljesítmény diagram [8]



F9-20 ábra: teljesítménysűrűség-energiasűrűség diagram [8]

F3 Programkód részletek

F3.1 A Szimulációs program filteres objektum beolvasó eljárásának váza

```
LoadSet=Load.Get();
LoadObj=LoadSet.First();
while(LoadObj)
{
... !Hozzárendelés
}
GenSet=Generator.Get();
GenObj=GenSet.First();
while(GenObj)
{
... !Hozzárendelés
}
```

F9-21. ábra: Filterek segítségével történő hálózatbejárás és objektumokkal való összerendelés

F3.2 A szimulációs program teljesítmény érték beállítása kisütés esetén

```
if(energy>0)
{
    if(net < (-1)*abs(power))
    {
        gen1:e:pgini= power;
        energy=energy-step*power;
        if(energy<0)
        {
            energy=energy+step*power;
            gen1:e:pgini=(energy/step);
            energy=0;
        }
    }
    else
    {
        gen1:e:pgini=(-1)*net;
        energy=energy-step*gen1:e:pgini;
        if(energy<0)
        {
```

```

        energy=energy+step*gen1:e:pgini;
        gen1:e:pgini=energy/step;
        energy=0;
    }
}
else
{
    gen1:e:pgini=0; !elfogyott a kisutnivalo
}

```

F9-22. ábra: kisütési teljesítmény beállítása a kapacitáskorlát figyelembe vételével

F3.3 CiCode: Időlépés a végtelen ciklusban

```

WHILE 1 DO
    iStartTime = SysTime();
    //CONTROLLING STRATEGY HERE
    iTimeSleepMS = BATTERY_AUTO_REFRESH_N*15*60*1000;
    iDelay = SysTimeDelta(iStartTime);
    IF iTimeSleep - iDelay > 1 THEN
        SleepMS(iTimeSleep - iDelay);
    END
END
END

```

F9-23. ábra: a szubrutin végtelen ciklusának struktúrája, várakozási beállítás implementálása

F3.4 CiCode: Teljesítmény értékének beállítása

```

IF AKKUBANK_UZEMMOD BITAND _AKKUBANK_EGYENIRANYIT THEN
    AKKUBANK_UZEMMOD_PAR = _AKKUBANK_VISSZATAPLAL;
    Sleep(2);
    iFlow = StrToInt(Abs(rFLOW):#);
    AKKUBANK_VISSZATAPLALTARAM_PAR = iFlow;
    Sleep(2);
ELSE

```

```

AKKUBANK_UZEMBEKAPCS_PAR = _AKKUBANK_UZEMBEN; //bekapcsoljuk, ha nincs
Sleep(2);
AKKUBANK_UZEMMOD_PAR = _AKKUBANK_VISSZATAPLAL; //kisütni akarunk
Sleep(2);
iFlow = StrToInt(Abs(rFLOW):#);
AKKUBANK_VISSZATAPLALTARAM_PAR = iFlow; //ennyi teljesítménnyel
Sleep(2);

```

END

F8-9-24. ábra: töltőáram beállítás implementálása

F3.5 CiCode: Nettó áramlás számítása

```

rDemand = rFalitolto+rHosziv+rKozvil+rLocsolosziv+rPalyalocs+rPalyavil+rTolto;
rGeneration = rNaperomu+rNaperomu_2;
rDifference = rGeneration-rDemand;
IF abs(rDifference) < rPMax THEN
    rFLOW=rDIFFERENCE;
ELSE
    rFlow = rPMax;
END

```

F9-25. ábra: nettó áramlás beállító kódrészlet

F3.6 CiCode: Adatlekérés trendekből

```

WHILE 1 DO

    iStartTime = SysTime(); // idobelyeg mentese

    TrnGetTable("TREND_FALITOLTO_P", 0, 600, 60, rAvg_Data, 259);
    rFalitolto = Abs(TableMath(rAvg_Data,60,2,1));
    TrnGetTable("TREND_HOSZIV_P", 0, 600, 60, rAvg_Data, 259);
    rHosziv = Abs(TableMath(rAvg_Data,60,2,1));

    ...

IF AKKUBANK_AKKU_TOLTOTTSEG_SZAMOLT > 0 THEN
    AKKUBANK_UZEMBEKAPCS_PAR = _AKKUBANK_UZEMBEN;
    SLEEP(2);
    AKKUBANK_UZEMMOD_PAR = _AKKUBANK_VISSZATAPLAL;
    SLEEP(2);
    iFlow = StrToInt(Abs(rFLOW):#);

```

```
                AKKUBANK_VISSZATAPLALARAM_PAR = iFLOW;  
ELSE            AKKUBANK_UZEMBEKAPCS_PAR = 0;  
                SLEEP(2);  
END
```

F8-26. ábra: leadott teljesítmény beállítása az áramlás alapján, figyelembe véve a kapacitáskorlátokat