



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Villamos Energetika Tanszék

Táczai István

Energiatárolás alkalmazásai, különös tekintettel az elosztó hálózatokra

Szakdolgozat

KONZULENS

Dr. Vokony István

BUDAPEST, 2015.

Táczai István

Szigorló villamosmérnök hallgató részére

Energiatárolás alkalmazásai, különös tekintettel az elosztói hálózatokra

A villamosenergia-rendszer komoly változások előtt áll a közeljövőben. Az egyre növekvő megújuló penetráció újszerű megközelítéseket igényel a hálózatfejlesztésekben. Az energiatárolás több jelentkező problémára is megoldás lehet, javíthatja a hálózat műszaki paramétereit, valamint gazdasági szempontból is több lehetőséget rejt magában. Az elosztóhálózati alkalmazások a közeljövőben javíthatják a feszültségminőséget, nagyobb ellátásbiztonságot adhatnak, valamint a terhelés kiegyenlítésben is fontos szerepük lehet. A kiválasztáskor fontosak a körülvévő hálózat tulajdonságai valamint egyéb határfeltételek, melyek alapján effektív működtetési stratégia fogalmazható meg.

A hallgató feladatának a következőkre kell kiterjednie:

- Mutassa be az energiatárolás motiváló tényezőit, jelenlegi technológiai lehetőségeket.
- Mutassa be a hálózattámogató alkalmazási lehetőségeket, kitérve azok költségeire is.
- Mutassa be az elosztói hálózaton telepítendő berendezés kiválasztási folyamatát külön figyelmet fordítva a konkrét vezérlési eljárásokra.
- Elemezze a különböző stratégiákat villamos hálózati modelleken. Vonjon le következtetéseket, fejlesszen adaptív és prediktív algoritmusokat az eljárások hatékonyságának növelésére
- Készítsen konkrét villamos hálózati modellt és szimulációs környezetet, amely lehetőséget biztosít a továbbfejlesztésre, standardizálásra.
- Készítsen egy átlátható módszertant a műszaki és gazdasági hatások elemzésére, mutassa be kvalitatívan és kvantitatívan az eredményeket.

Hallgatói nyilatkozat

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

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

Kelt: Budapest, 2015.12.11.

.....
NÉV

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

(Katie Fehrenbacher, GigaOm)

A villamosenergia-rendszer hatalmas változások előtt áll: a közeljövőben hálózatra csatlakozó megújuló energiaforrások ingadozó penetrációja újszerű kihívások elé állítja a hálózat üzemeltetőit. Kétirányú energiaáramlások, teljesítmény- és feszültségminőségi problémák alakulhatnak ki, melyek veszélyeztethetik az ellátás biztonságát.

Az energiatárolás képes lehet megoldásként szolgálni a felmerülő problémákra. Egy megfelelően kialakított működési stratégiával ezek az alkalmazások képesek az elosztóhálózat lokális támogatására is: virtuális szigetüzem, teljesítményáramlás követés és biztonsági tartalékok készítése egyaránt megvalósítható. A hálózatra csatlakoztatott energiatárolók akár gazdasági haszon teremtésére is felhasználhatóak a liberalizált villamosenergia-piacon történő kereskedéssel.

Szakdolgozatomban bemutatok egy eljárást, melynek célja, az energiatároló berendezések alkalmazhatóságának valósághű reprezentálása. Ehhez – a DigSilent Power Factory program segítségével – létrehoztam egy szimulációs szkriptet, mely saját fejlesztésű energiatárolási stratégiák hatásait vizsgálja egy demonstrációs hálózati modellen. Figyelembe veszi az energiatároló főbb karakterisztikus elemeit, mint a hatásfok, válaszidő, ciklusszám, kapacitás és névleges teljesítmény. Munkám során igyekeztem a lehető legkevesebb megkötéssel élni annak érdekében, hogy a szimulációs környezet általános modellen is felhasználható legyen és a lehető legtöbb adatot szolgáltatassa. Végezetül a műszaki és gazdasági paraméterek kiértékelésére mutatok be néhány lehetséges eljárást, melyek alapján a működés sikeressége validálható. További általánosítások implementálásával ez a koncepció felhasználható lehet akár hálózatfejlesztési beruházások elbírálására is. A modellezés sikerességéhez széleskörű műszaki-, alkalmazhatósági- és gazdasági adatokat szolgáltatok a megfelelő bemenet képzéséhez.

Abstract

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

(Katie Fehrenbacher, GigaOm)

Distribution power grids will basically change in the near future: the increasing penetration of renewable energy sources causes high amount of intermittent and decentralized generation. This procedure will lead to problems which are unknown for a conventionally planned and operated grid. Bidirectional power flows, power quality issues and voltage sags can occur.

Energy storage systems are able to play a key role in the solutions. With a well-developed controlling strategy, these applications could support the low voltage grids locally: virtual islanding operations and load following, or improved reliability with reserves are all feasible. These installations can even be used for trading on the liberalized electricity market.

The focus of this work is to provide useful information and a proper approach for evaluating the possibilities of the integration of storage systems as a network development. The simulation script - which has been implemented in the DigSilent Power Factory program - considerate the main parameters of an ESS: efficiency, capacity, response time, and cycle lifetime in optional time steps through load flow simulations. If a grid model meets a few requirements, it can be used as an input for the simulation script (demonstration topology is attached in the appendix). Wide range of technical data inputs and possible applications are also provided. The functioning is demonstrated with self-developed strategies. The technical and economic effects of the installations is evaluated with some simple calculations. With further standardizing, this concept could be a useful tool for the distribution system operators and network developers.

Tartalomjegyzék

Feladatkiírás	i
Hallgatói nyilatkozat	ii
Összefoglaló	iii
Abstract	iv
Tartalomjegyzék	v
Ábrajegyzék	x
Táblázatjegyzék	xiii
Egyenletjegyzék	xiv
1 Az energiatárolás szükségessége	15
1.1 Motiváló folyamatok, a probléma aktualitása	15
1.2 Az energiatárolás fogalma	16
2 Technológiák bemutatása, karakterisztika adatok	17
2.1 Áttekintés	17
2.2 Összehasonlítás	19
2.3 Csoportosítás	20
3 Alkalmazások a villamosenergia-rendszer támogatására	23
3.1 Áttekintés	23
3.2 Energiatermelés támogatása és rendszerszintű alkalmazások	24
3.2.1 Szabályozás	24
3.2.2 Gyors válaszidőn alapuló szabályozás	24
3.2.3 Csúcslevágás	25
3.2.4 Forgótartalékok	25
3.2.5 Inercia tartalék/cseretartalék	25
3.2.6 „Black start”	25
3.2.7 Árarbitrázs	26
3.2.8 Izolált hálózatok	26

3.3	Távvezeték- és elosztó-hálózati alkalmazások	26
3.3.1	Feszültségtámogatás	26
3.3.2	Fázisjavítás.....	26
3.3.3	Hálózati csatlakozási díjak	26
3.3.4	Befektetési késleltetések.....	26
3.3.5	Lokális kapacitás	27
3.3.6	Megújuló energiaforrás integráció.....	27
3.4	Felhasználó közeli alkalmazások	28
3.4.1	Teljesítményminőség.....	28
3.4.2	Megbízhatóság	28
3.4.3	Kiskereskedelmi díjak	29
3.5	Technológiák és alkalmazások összekapcsolása	29
4	Energiatároló berendezések költségei	31
4.1	Költségek értelmezése	31
4.1.1	A költségek és bevételek figyelembe vétele	31
4.2	Alkalmazás csoportok elemzése.....	32
4.3	LCOE adatok	33
4.4	Beruházási tőkeigény adatok	35
4.5	Prognózis a jövőre: amire az ipari szereplők számítanak.....	36
5	Kiválasztási folyamat, vezérlési eljárások, egy lehetséges modellezés és szimulációs eljárás.....	39
5.1	Energiatároló berendezések kiválasztási folyamata elosztói engedélyesek vagy az érintett feszültségszinteken szereplő felelősök számára	39
5.1.1	A folyamat főbb lépései, standardizációs lehetőségek	39
5.2	A modellalkotás általánosítására vonatkozó törekvések sikerességéhez szükséges megkötések...	40
5.3	A standardizált analízis script funkciói.....	41
5.4	Az algoritmusok döntési mechanizmusai.....	42
5.4.1	Statikus algoritmus	43
5.4.2	Valós idejű load flow követés.....	43

5.4.3	Előre programozott menetrendkövetés.....	43
5.4.4	Model Predictive control, állapotterez szabályozás.....	44
5.5	Lehetséges célfüggvények.....	44
5.5.1	Valós és virtuális szigetüzem kialakítása	44
5.5.2	Menetrendszerű meddőteljesítmény igény kompenzálása	45
5.5.3	Ellátásbiztonság növelése.....	46
5.5.4	Speciális minőségi követelmények: meddőáramlási küszöb tartása	47
5.5.5	Speciális minőségi követelmények: feszültségtartás egy adott hálózati ponton.....	48
5.5.6	Energiakereskedelem: költséghatékonyági optimum	49
5.5.7	Hálózati veszteségek csökkentése.....	50
5.6	Általános határfeltételek.....	51
5.6.1	Egyensúlyi feltételek.....	51
5.6.2	Elemek korlátossága.....	51
5.6.3	Időfelbontás korlátai	52
5.7	Adaptivitás.....	52
5.8	Prediktivitás.....	53
5.9	Fejlesztési lehetőségek, aggregát működés	54
6	Szimulációs eredmények, gyakorlati alkalmazás lehetősége	55
6.1	A DigSilent Power Factory program szimulációs környezetében felépített vizsgáló script	55
6.2	A tároló teljesítményének vezérlése	56
6.3	A tárolt energia számításának implementálása a kapacitás határfeltételek kiértékeléséhez	60
6.4	1. Stratégia: virtuális szigetüzem megvalósítása	61
6.5	2. Stratégia: Energiakereskedelem magas és alacsony küszöbökkel	64
6.6	3. Stratégia: Energiakereskedelem medián érték alapján.....	65
6.6.1	4. Stratégia: Biztonsági tartalékképzés a lokális termelés kiesésének kompenzálására.....	66
6.7	Menetrendszerű meddőteljesítmény-kompenzáció	67
6.8	Méretezési műveletek.....	69
6.9	Fejlesztések a tapasztalatok alapján, továbblépési lehetőségek	70

6.10	Gyakorlati felhasználás.....	73
7	Kiértékelési lehetőségek	74
7.1	Műszaki paraméterek befolyásolása	74
7.1.1	Virtuális szigetüzem.....	74
7.1.2	Biztonsági tartalékképzés	74
7.1.3	Meddőkompenzáció	74
7.2	Gazdasági elemzés lehetőségei.....	75
7.2.1	Egyszerű megtérülés-számítási modell	75
7.2.2	Virtuális szigetüzem.....	77
7.2.3	Energiakereskedés 1.....	78
7.2.4	Energiakereskedés 2.....	79
7.2.5	Továbblépési lehetőségek	80
8	Konklúzió	81
9	Irodalomjegyzék	82
F1	Demonstrációs modell: a fóti Élhető Jövő Park.....	83
F1.1	Az Élhető Jövő Park rövid jellemzése	83
F1.2	A villamos modell megalkotása	84
F1.3	Villamos termelői egységek.....	84
F1.3.1	Napelemes rendszerek	84
F1.3.2	Szélerőmű.....	85
F1.3.3	Törpe vízerőmű	85
F1.4	Villamos fogyasztók	86
F1.4.1	Töltőoszlop	86
F1.4.2	Parkoló locsoló szivattyú	86
F1.4.3	Pályalocsoló szivattyú.....	87
F1.4.4	Pályavilágítás	87
F1.4.5	Irodai fogyasztók csoportja	88
F1.4.6	Közvilágítás	89

F1.4.7	Falitöltő.....	90
F1.4.8	Hőszivattyú	90
F1.4.9	Akkumulátoros energiatároló berendezés.....	90
F1.5	Kábeles csatlakozások, gyűjtősínek, elosztók, externális hálózat	91
F1.5.1	Alkalmazott kábeltípusok	91
F1.5.2	Gyűjtősín és elosztó típusok.....	92
F1.5.3	Externális hálózat	92
F1.5.4	Load flow szimuláció	93
F2	Megtérülés számítási táblázat.....	95
F2.1	Virtuális szigetüzem cash flow	95
F2.2	Energiakereskedés 1. stratégia cash flow	95
F2.3	Energiakereskedés 2. stratégia cash flow	96

Ábrajegyzék

2-1 ábra: a technológiák típusai és csoportosításuk [8]	17
2-2 ábra: technológiai fejlettség [8]	17
2-3 ábra: kiépített kapacitás 2014 januárjában [IEA]	18
2-4 ábra: Smart Grid és tárolók kapacitásléptékű kapcsolata [8]	20
2-5 ábra: Névleges teljesítmény-energia diagram [8]	21
2-6 ábra: teljesítménysűrűség-energiasűrűség diagram [8]	22
3-1. ábra: alkalmazások a villamosenergia-rendszer segítésére	23
3-2. ábra: frekvencia szabályozásban résztvevő tartalékok teljesítménygörbéi [8]	24
3-3. ábra: hálózati csúcsterhelések menedzselése [8]	25
3-4. ábra: megújuló energiaforrások részesedési arányának felső határa [8]	27
3-5. ábra: Németország energiamixének változása [8]	28
4-1. ábra: LCOE és a bevételek szemléltetése a megtérülés számításához [26]	32
4-2. ábra: támogatásmentes LCOE nagyobb léptékű alkalmazásokra [26]	34
4-3. ábra: támogatásmentes LCOE kisebb alkalmazásokra [26]	34
4-4. ábra: Nagyléptékű alkalmazáscsaládok tőkeköltés adatai [26]	35
4-5. ábra: Kisebb méretigényű alkalmazáscsaládok tőkeköltés adatai [26]	36
4-6. ábra: Ipari szereplők becslései az árváltozások méretére [26]	37
4-7. ábra: A becslések figyelembe vételével újraszámolt LCOE nagyléptékű berendezésekre [26]	37
4-8. ábra: a becslések alapján újraszámolt LCOE kisebb méretigényű alkalmazáscsaládokra [26]	38
5-1. ábra: Az energiatároló berendezések telepítésének folyamata	40
5-2. ábra: Schneider-Electric SCADA adatgyűjtés és vezérlés áttekintő rajza [Schneider Electric]	43
5-3. ábra: állapotterez szabályozó struktúra terhelésbecslővel [BME-IIT]	44
5-4. ábra: virtuális szigetüzem vezérlés folyamatábrája	45
5-5. ábra: menetrendszerű meddőkompenzálás folyamatábrája	46
5-6. ábra: megbízhatóság függvény folyamatábrája	47
5-7. ábra: meddőáramlás korlátozás vezérlés folyamatábrája	48
5-8. ábra: feszültségtartás vezérlés folyamatábra [16]	49
5-9. ábra: energiakereskedelmi vezérlés folyamatábrája	50
5-10. ábra: az ELMŰ mögöttes hálózatának meddőteli teljesítmény leadása a pályavilágítás bekapcsolásakor (30 perces mért adat)	53
5-11. ábra: HUPX energiaár adatok, 2013. július [HUPX]	54
6-1. ábra: 1 órás időléptékkel megvalósított kompenzáció	57
6-2. ábra: a nettóáramlás (narancs) és kompenzált áramlás (kék) különbségei órás lépték esetén	57

6-3. ábra: 15 perces időlépték esetén az energiatároló teljesítménye (kék) és a kompenzált teljesítményáram (narancs).....	58
6-4. ábra: Perces nagyságrendű időlépés esetén a kompenzálás nélküli (kék) és kompenzálás utáni (narancs) teljesítményáram	58
6-5. ábra: A kompenzált teljesítményáram (kék) és az energiatároló berendezés teljesítménye (narancs)...	59
6-6. ábra: kompenzálás nélküli teljesítményáram (narancs) és a kompenzált teljesítményáram összevetése	60
6-7. ábra: a kapacitáskorlát szemléltetése tartalékképzési üzemben, kimaradás és visszakapcsolás mellett: 40 kWh és 20 kW határok	61
6-8. ábra: Energiatároló paraméterek változása 15 perces időléptékben megvalósított virtuális szigetüzem esetén.....	62
6-9. ábra: hálózathálózati vételezett teljesítmény 15 perces időléptékben megvalósított virtuális szigetüzem esetén	62
6-10. ábra: Hálózathálózati vételezett teljesítmény másodperces nagyságrendű időlépték esetén	63
6-11. ábra: Energiatároló teljesítménye és a hálózati csatlakozási ponton történő áramlások összevetése (24 óra)	63
6-12. ábra: Energiaár alapú kereskedési küszöbök	64
6-13. ábra: Energiakereskedés felső és alsó határértékekkel	65
6-14. ábra: Energiakereskedés középértékes döntési küszöb alapján.....	66
6-15. ábra: kapacitás és teljesítmény értékek egy 22 órás kiesés esetén (24 óra).....	66
6-16. ábra: tartaléküzem egy korai kiesés és későbbi visszaállás esetén (24 óra)	67
6-17. ábra: Meddőteljesítmény kompenzálás: az eredeti és a kompenzált görbe összevetése.....	68
6-18. ábra: Meddőteljesítmény kompenzálása: az energiatároló berendezés kimeneti teljesítménye.....	68
6-19. ábra: Méretezési algoritmus virtuális szigetüzemben	69
6-20. ábra: Méretezési algoritmus biztonsági tartalékképzéskor	70
6-21. ábra: válaszdő ábrázolása adott eltolási idővel	71
6-22. ábra: hatásfok változó hatása (24 óra).....	72
6-23. ábra: kapacitáshatár elérés és kapcsolási műveletek száma (24 óra)	72
7-1. ábra: a telepítés megtérülése	77
7-2. ábra: a telepítés megtérülésének szemléltetése	78
7-3. ábra: a telepítés megtérülése	79
9-1. ábra: a fűtési hálózat helyszínrajza [22]	83
9-2. ábra: napelemek karakterisztikája (24 óra)	85
9-3. ábra: törpe vízerőmű karakterisztikája (24 óra).....	85
9-4. ábra: Parkoló locsoló hatásos teljesítmény felvétele (24 óra)	86

9-5. ábra: parkoló locsoló meddőteljesítmény felvétele (24 óra).....	86
9-6. ábra: pályalocsoló hatásos teljesítmény felvétele (24 óra)	87
9-7. ábra: pályalocsoló meddőteljesítmény felvétele (24 óra)	87
9-8. ábra: pályavilágítás hatásos teljesítmény felvétele (24 óra).....	88
9-9. ábra: pályavilágítás meddőteljesítmény felvétele (24 óra).....	88
9-10. ábra: iroda teljesítményfelvétele (24 óra)	89
9-11. ábra: közvilágítás hatásos teljesítmény felvétele (24 óra).....	89
9-12. ábra: közvilágítás meddőteljesítmény felvétele (24 óra).....	89
9-13. ábra: falitöltő teljesítmény felvétele (24 óra)	90
9-14. ábra: hőszivattyú teljesítmény felvétele (24 óra)	90
9-15. ábra: akkumulátor jellemző töltési-kisütési görbéi.....	91
9-16. ábra: 240 mm ² rézkábel adatainak felvétele	92
9-17. ábra: 150 mm ² rézkábel adatainak felvétele	92
9-18. ábra: a mögöttes hálózat teljesítményáramlása (24 óra)	93
9-19. ábra: a megépített topológia	93
9-20. ábra: összfogyasztás görbe (24 óra).....	94
9-21. ábra: össztermelés görbe (24 óra)	94

Táblázatjegyzék

2-1. táblázat: technológiai paraméterek összegzése [8]	19
3-1. táblázat: pillanatos kimaradások költségei, USA [3]	28
3-2. táblázat: átlagos kimaradási díjak, USA [3]	29
3-3. táblázat: technológiák és alkalmazások összekapcsolása [8].....	29
4-1. táblázat: Paraméterek a költségelemzéshez alkalmazáscsaládokra bontva [26]	33
5-1. táblázat: a bemeneti paraméterek listája	42
7-1. táblázat: Virtuális szigetüzem kiértékelése	74
7-2. táblázat: Meddőteljesítmény igények kompenzálása.....	75
7-3. táblázat: Hosszútávú adatok a számításhoz.....	75
7-4. táblázat: Bevételek és költségek a vizsgált stratégiák esetén.....	76
7-5. táblázat: virtuális szigetüzem kiinduló adatai	77
7-6. táblázat: Energiakereskedés 1. kiinduló adatai.....	78
7-7. táblázat: energiakereskedés 2. kiinduló adatai.....	79
9-1. táblázat: akkumulátor mérendő paraméterei	90

Egyenletjegyzék

3-1. egyenlet: Megújuló energiaforrások részesedési arányának behatárolása [8]	27
5-1. egyenlet: a teljesítményegyensúly értelmezése hálózati szereplők csoportjaira [15]	51
5-2. egyenlet: az elemek teljesítményének korlátossága [15]	51
5-3. egyenlet: biztonságos működés miatti teljesítménykorlátozás [15]	51
5-4. egyenlet: biztonságos működés miatti kapacitás korlátozás [15]	52
5-5. egyenlet: a teljesítménytényező lehetséges értékei [15]	52
5-6. egyenlet: az időfelbontás szemléletessége: T db minta egy adott intervallumon [15]	52
F-8-2.1 egyenlet: A NaS akkumulátorokban lejátszódó kémiai folyamat	Hiba! A könyvjelző nem létezik.

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 struktúrák önálló vezérelhetőségének 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 (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]

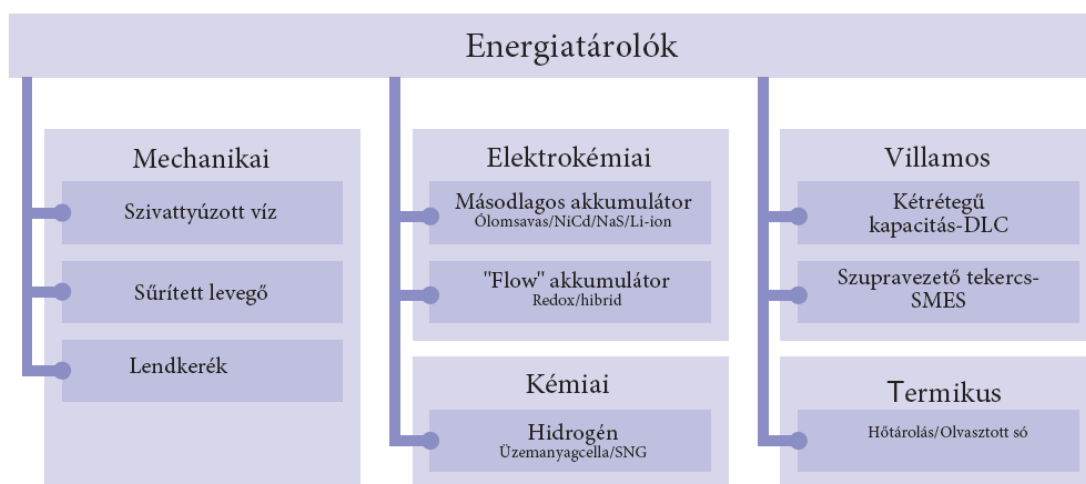
- *Teljesítmény* (Power): $[P]=W$
- *Kapacitás* (Energy/Capacity): $[E]=Wh$ (J)
- *Élettartam* (Lifetime): $[T]=\text{év}$ (s)
- *Hatásfok* (Efficiency): $[\eta]=\%$
- *Kibocsátási idő* (Discharge time): $[td]=\text{óra}$ (s)
- *Válaszidő* (Response time): $[tr]=\text{perc}$ (s)
- *Ciklusszám* (Cycle 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).

2 Technológiák bemutatása, karakterisztika adatok

2.1 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.



2-1 ábra: a technológiák típusai és csoportosításuk [8]

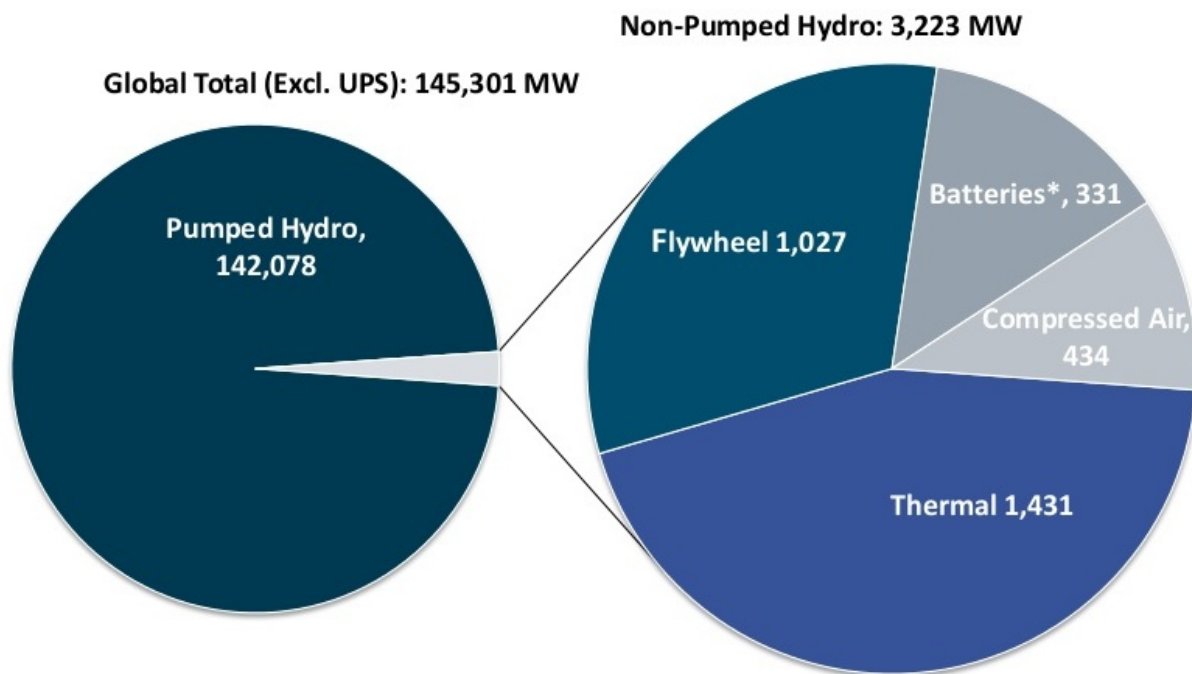
Fejlettség alapján pedig az alábbi szinteket különíthetjük el:

- **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
- **laboratóriumi:** tanulmányokkal és kezdetleges mérésekkel verifikált ötlet
- **ötlet:** nincs működő rendszer, komponens tesztek sem elérhetőek



2-2 ábra: technológiai fejlettség [8]

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. [7]



2-3 ábra: kiépített kapacitás 2014 januárjában [IEA]

2.2 Összehasonlítás

A technológiai lehetőségek összegzésére készítettem egy táblázatot, melyben a főbb paraméterek megtalálhatóak.

2-1. táblázat: technológiai paraméterek összegzése [8]

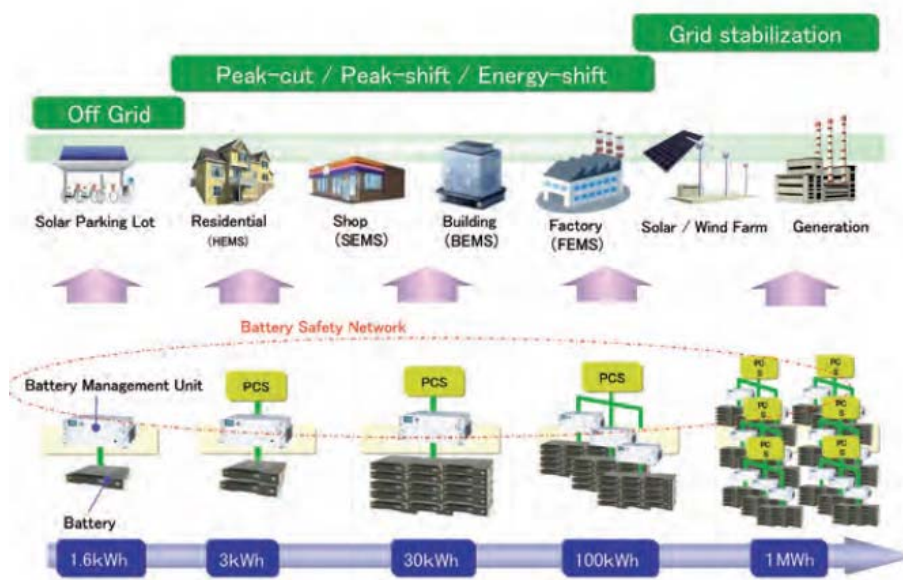
Technológia	Válaszidő nagyságrendje	Energiasűrűség Wh/Kg	Teljesítménysűrűség W/l	Kisütési idő nagyságrendje	Hatásfok	Élettartam (év)	Maximális ciklusélettartam
Szivattyúzott víz	perc	0,2-2	0,1-0,2	óra	70-80	>50	>15000
Sűrített levegő	perc	-	0,2-0,6	óra	41-75	>25	>10000
Lendkerék	<mp	42154	5000	mp	80-90	15.0-20	20000-10000000
Ólomsavas akkumulátor	<mp	30-45	90-700	perc	75-90	3.0-15	250-1500
NiCd akkumulátor	<mp	15-40	75-700	óra	60-80	5.0-20	1500-3000
NiMH akkumulátor	<mp	40-80	500-3000	óra	65-75	5.0-10	600-1200
Li-ion akkumulátor	<mp	60-200	1300-10000	óra	85-98	5.0-15	500-10000
Cink-levegő akkumulátor	<mp	130-200	50-100	óra	50-70	>1	>1000
NaS akkumulátor	<mp	100-250	120-160	óra	70-85	10.0-15	2500-4500
NaNiCl akkumulátor	<mp	100-200	250-270	óra	80-90	10.0-15	~1000
Vanádium-redox akkumulátor	<mp	15-50	0,5-2	óra	60-75	5.0-20	>10000
Hidrogén Centralizált Decentralizált	mp-perc	33330	0,2-2 2,0-20	óra-hetek	34-44	10.0-30	1000-10000
Syngas	perc	10000	0,2-2	óra-hetek	30-38	10.0-30	1000-10000
Szuperkapacitás	<mp	1,0-15	40000-120000	mp	85-98	4.0-12	10000-100000
Szupravezetős energiatároló	<mp	-	2600	mp	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 értéktartományokba 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.

[2][3][4][8]

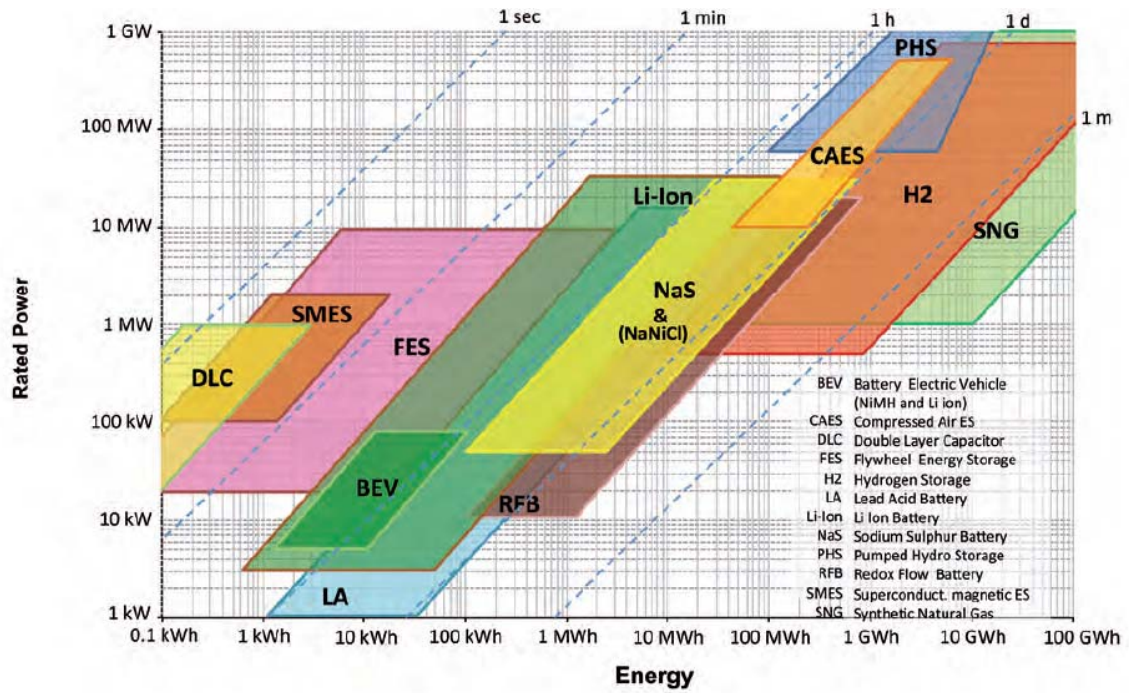
2.3 Csoportosítás

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



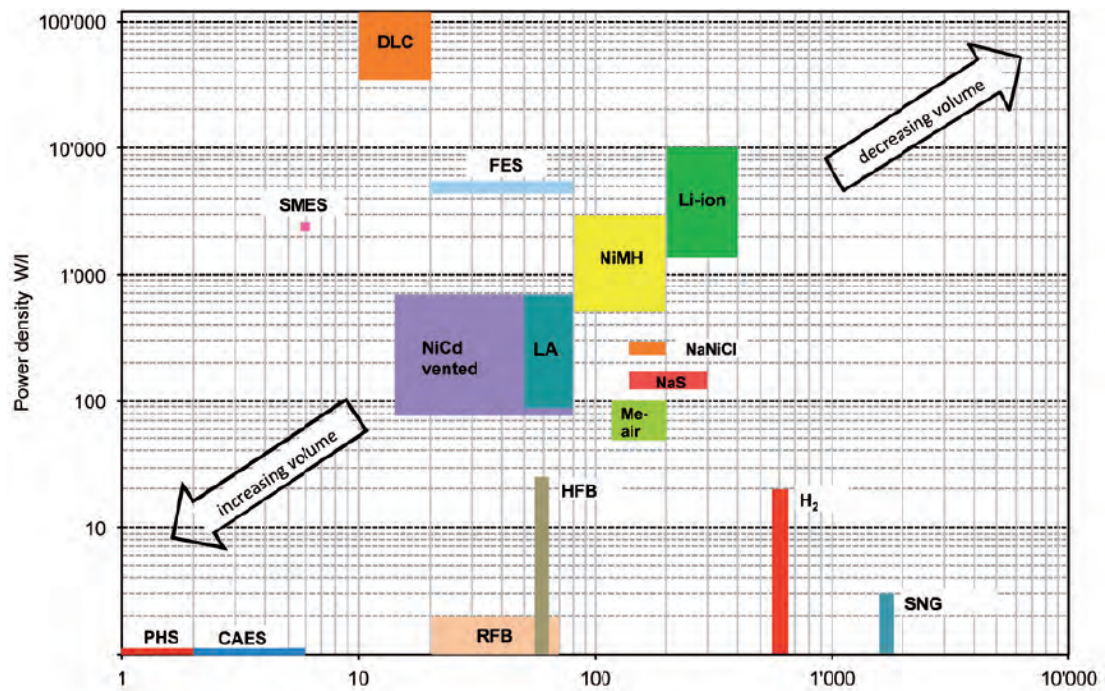
2-4 ábra: Smart Grid és tárolók kapacitásléptékű kapcsolata [8]

Egy másik lehetséges felosztás a szükséges energiamennyiség alapján végezhető. A 2-15. ábrán egy ilyen megközelítés látható. Mindkét elv jól felhasználható elkülönítésre.



2-5 ábra: Névleges teljesítmény-energia diagram [8]

A csoportosítások két irányelve után adódik az igény a tárolók olyan összevetésére, melyben az összevetés mindkét vonalon megtörténik. Ilyen ábrázolásban a szükséges paraméterek ismeretében a választás egyszerű és szemléletes.



2-6 ábra: teljesítménysűrűség-energiasűrűség diagram [8]

A fizikai méretek kérdése is sok esetben fontos szempont, hiszen nem mindig áll rendelkezésre elégséges hely a berendezések számára. A tárolás fizikai közege jól definiálja az ilyen típusú mutatókat, az azonos típusok közelsége jól megfigyelhető az ábrán.

Ezen adatok összegyűjtésével és összevetésével az energiatároló berendezések alkalmazhatóságának vizsgálatához egyfajta bemenet képződik. A vizsgálatok során különböző paraméterű installációkra lesz szükség, ezek a paraméterek pedig innen könnyen és gyorsan kikereshetőek. Ezen irodalomkutatás fő eredménye tehát az, hogy rendezett input adatot szolgáltat a későbbi szimulációkhoz, áttekintést ad a technológiai lehetőségekről a hálózatfejlesztési tervekhez.

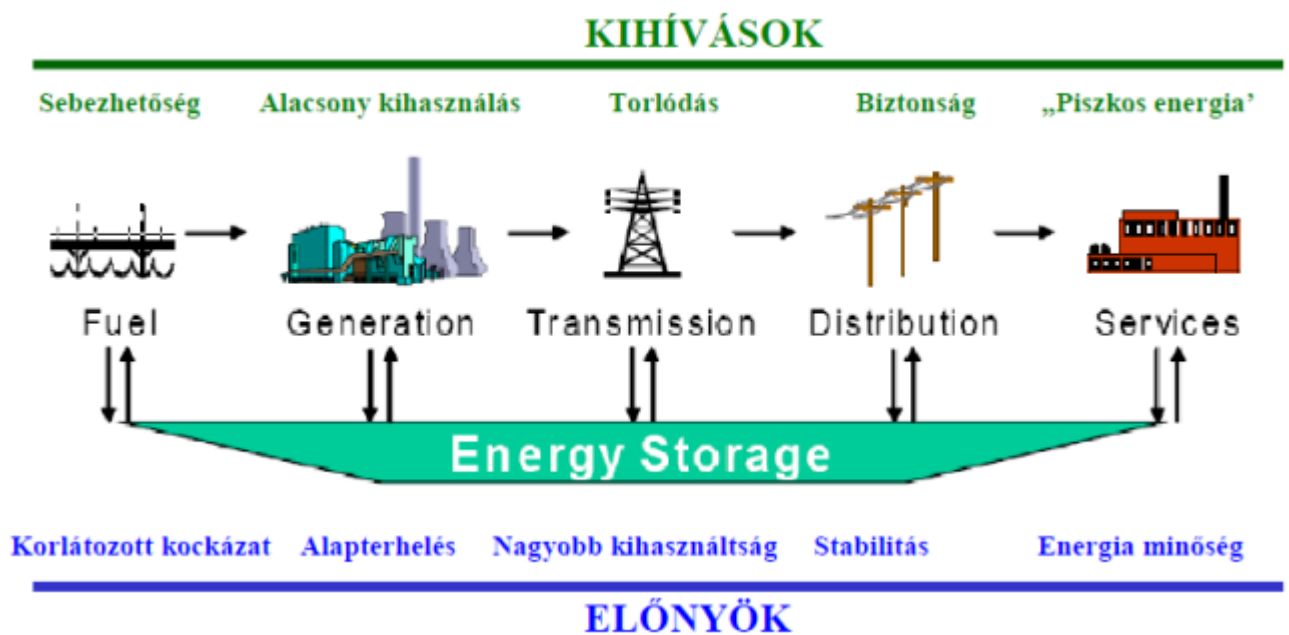
3 Alkalmazások a villamosenergia-rendszer támogatására

3.1 Áttekintés

Az energiatároló technológiák rendszerbe csatolása számos pozitív hatást gyakorolhat a hálózatra. Az alkalmazási területeket rendezhetjük hálózati szerepük alapján: [3][4][5][7][8]

- *Fogyasztó közeli berendezések*
- *Elosztói hálózat* (DS: Distribution System) támogatása
- *Átviteli hálózat* (TS: Transmission system) alkalmazásai
- *A teljes rendszer egészét befolyásoló berendezések*
- *Energiatermelési oldal támogatása*

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



3-1. ábra: alkalmazások a villamosenergia-rendszer segítésére

A különböző alkalmazások esetén a berendezések méreteitől és üzemétől függően erősen eltérő a gazdasági haszon számítása. 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.

Az egyes lehetőségek 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]

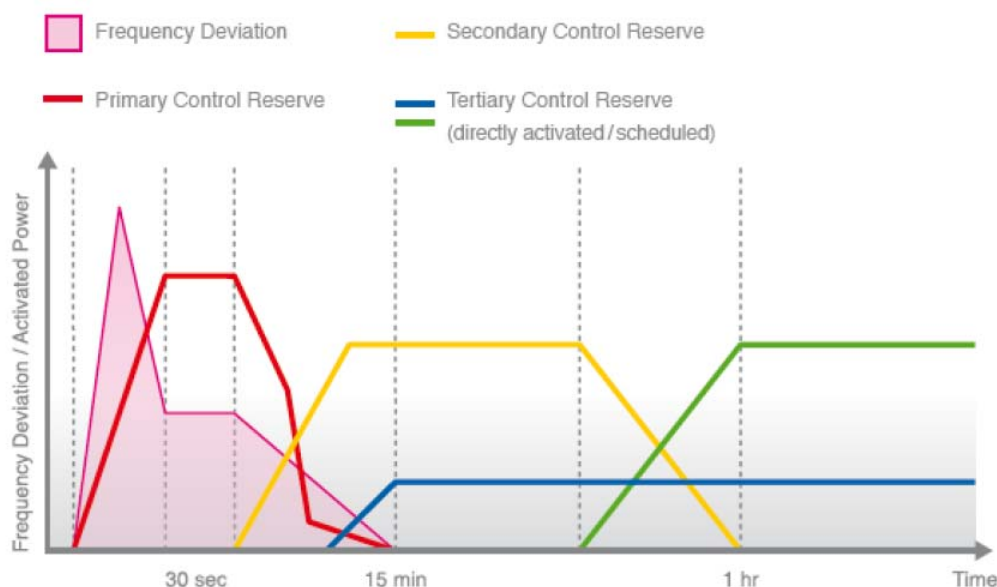
3.2 Energiatermelés támogatása és rendszerszintű alkalmazások

3.2.1 Szabályozás

Rövid idejű fluktuációk okozta hatások kiküszöbölésére szabályozást kell megvalósítani. Ezen jelenségek oka főként a termelés és fogyasztás pillanatos kiegyensúlyozatlansága. Például amennyiben a frekvencia meghaladja a névleges értéket, túltermelés van a rendszerben, ellentétes esetben a kereslet meghaladja a kínálatot. A különböző jellegű deviációk kezelésére megkülönböztetünk primer, szekunder és tercier tartalékokat. Az energiatárolók mindhárom típusban megállhatják a helyüket, mindig az adott előírásoknak megfelelő paraméterekkel. [3][7][8]

3.2.2 Gyors válaszidőn alapuló szabályozás

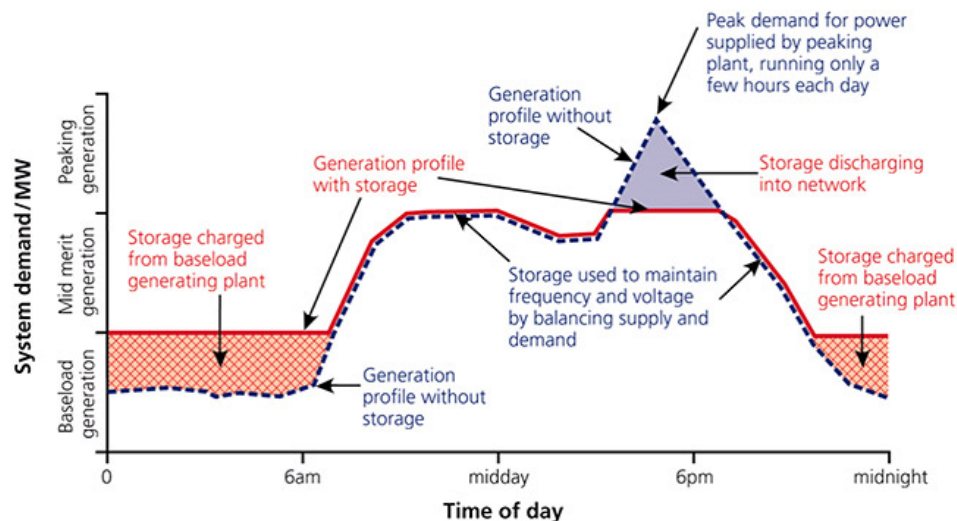
A tárolás kérdéskörével foglalkozó szakértők szerint a jelenlegi fosszilis- és vízerőmű tartalékoknál gyorsabb válaszidejű szabályozásra is képesek lehetnek egyes berendezések, mely az alkalmazás hatékonyságát nagyban növelheti. Az energiatároló rendszerek széleskörű karakterisztika palettájuk miatt akár csoportokban (több technológia vegyítése) is felhasználhatóak. [3]



3-2. ábra: frekvencia szabályozásban résztvevő tartalékok teljesítménygörbéi [8]

3.2.3 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, hiszem a méretezést mindig a maximális értékek szabják meg. [3][4][5][7][8]



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

3.2.4 Forgótartalékok

Azon termelési kapacitásokat soroljuk ide, amelyek közvetlenül rendelkezésre állnak, jellemző szabályozások szerint 10 percen belül képesek növelni vagy csökkenteni kimeneti teljesítményüket és versenypiacon 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 tárolókapacitást ilyen üzemben felhasználni. [3][7][8]

3.2.5 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]

3.2.6 „Black start”

Azon szolgáltatás, mely egy energiatermelő egység (újra) 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]

3.2.7 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]

3.2.8 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. Kiegyensúlyozási és csúcsterhelés kompenzációs üzemben lehet energiatároló berendezéseket alkalmazni ilyen környezetben. [1][3]

3.3 Távvezeték- és elosztó-hálózati alkalmazások

3.3.1 Feszültségtámogatás

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

3.3.2 Fázisjavítás

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

3.3.3 Hálózati csatlakozási díjak

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

3.3.4 Befektetési késleltetések

A tőkeigényes hálózati infrastruktúra-fejlesztések elkerülhetetlenek, ha a rendszer valamely részén gyakorta kialakulnak torlódások. A csúcsterhelés kompenzálásával ezek a beruházások akár több évvel is elhalaszthatóak, 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]

3.3.5 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. A problémára megoldást jelenthet az energiatároló berendezések alkalmazása.

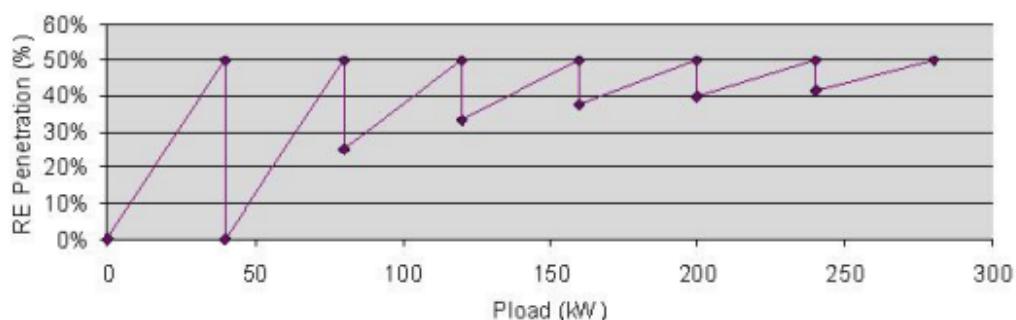
3.3.6 Megújuló energiaforrás integráció

A megújulók integrációja meglehetősen összetett kérdés, mely a deklarált célértékek (USA: RPS, EU: 20/20/20) egyre sürgetőbb. A fő probléma a fluktuáció, mely a kimeneti teljesítményben tapasztalható. Ennek előrejelzése nehéz, mivel az időjárás kaotikus viselkedése okozza. A szélenergia és napenergia jellemző eloszlása teljesen más jellegű, mint a villamosenergia-igény, ezáltal a termelés és fogyasztás görbék eltérőek. A szabályozási probléma tehát adott, időbeni eltolással kell illeszteni a profilokat. Fosszilis tartalékokra is szükség lesz a jövőben, 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 a legmagasabb igények idején. 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]

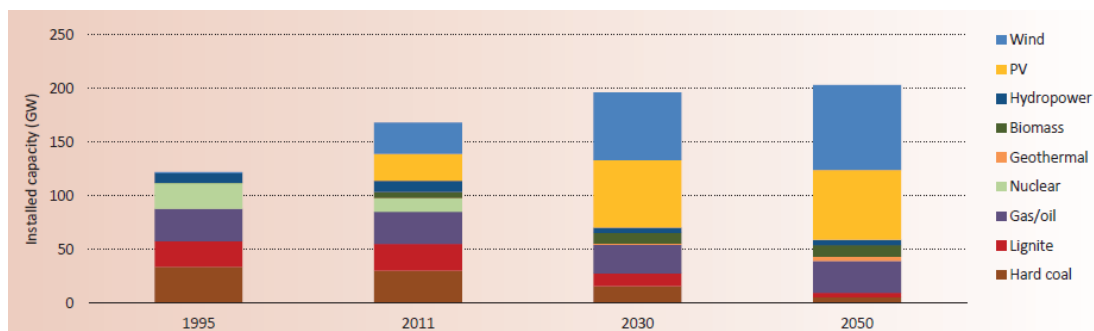
A megújuló energiák részesedési arányának maximuma a minimális konvencionális termelési teljesítmény és a forgótartalékok segítségével behatárolható:

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

3-1. egyenlet: Megújuló energiaforrások részesedési arányának behatárolása [8]



3-4. ábra: megújuló energiaforrások részesedési arányának felső határa [8]



3-5. ábra: Németország energiamixének változása [8]

3.4 Felhasználó közeli alkalmazások

3.4.1 Teljesítményminőség

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

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

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

3.4.2 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 várhatóan a tartalékgenerátor üzemeltetése költséghatékonyabb minden esetben. [3]

3-2. 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

3.4.3 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. 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]

3.5 Technológiák és alkalmazások összekapcsolása

A kiválasztási folyamatról már sok szó esett, az alábbi táblázatban néhány konkrét lehetőség kerül bemutatásra. Minden esetben fontos a körültekintő, 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 (például a Tesla akkumulátor telepei, vagy a SustainX sűrített levegős megoldásai), így az állásfoglalás egyik vagy másik mellett nem lenne teljesen megalapozott. [3][4][5][7][8]

3-3. 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

Technológia	Lehetséges alkalmazási területek
Li-ion akkumulátor	Izolált grillek, megújuló integráció, minőségi mutatók javítása, megbízhatóság, díjszabás
Cink-levegő akkumulátor	Izolált grillek, villamos autók
NaS akkumulátor	Tartalékképzés, izolált grillek, 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

Az összekapcsolással egy olyan irodalomkutatási eredmény áll rendelkezésre, mely alapján a bizonyos megvalósítások vizsgálatakor egyaránt rendelkezésre áll számunkra az alapelv és a potenciális technológiák csoportja. Ehhez az elemek megfelelő modellezését és célfüggvények megfogalmazását felépítve eljuthatunk egy szimulációs eljárásig, mellyel a hálózatfejlesztési lehetőségeket vizsgálhatjuk.

4 Energiatároló berendezések költségei

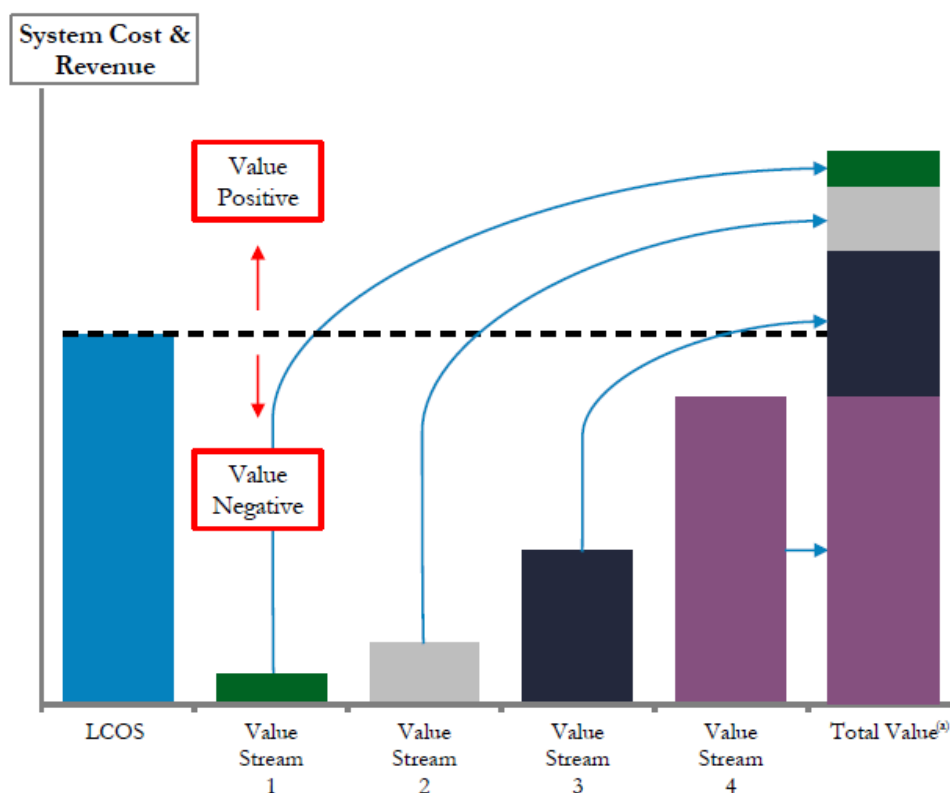
4.1 Költségek értelmezése

Központi kérdés az energiatárolók vizsgálatakor a költségelemzés. Igazán hasznos alkalmazás az, amelyik nem csak a hálózat fizikai tulajdonságait javítja, hanem pénzügyi szempontból is pozitív mérlegre képes. A korábbi elterjedés gátjaként egyértelműen a túl magas költségeket említhetjük, azonban a technológiai fejlődés komoly hatást gyakorol az akkumulátoriparra, illetve teljesen új alapelvű berendezések is képesek lehetnek versenyképes működésre a közeljövőben. A bevezetőben említett motivációk pedig akár szabályozó szintű beavatkozásokat is előrevetíthetnek, mely megjelenhet támogatások és tarifakedvezmények formájában is. [2]

A költségeket a fajlagosítás érdekében vetíthetjük a névleges teljesítményre illetve a maximálisan tárolható energiamennyiségre egyaránt (kapacitás), mindkettőnek lehet gyakorlati haszna összehasonlításakor. A következőkben az energiamennyiségre egységesített megközelítés kerül bemutatásra. Az adatok nem tartalmaznak semmilyen társadalmi vagy környezet hatás miatt keletkező költségelemet (pl. a működés utáni újrahasznosítás, hulladékkezelés, vagy az káros anyag kibocsátások mérsékléséből eredő elkerült költség). A bemutatott adatok döntő része egy 2015-ös tanulmányból származik, mely több komoly ipari szereplő által szolgáltatott adatok alapján készült. Az adathalmaz alapján a gazdasági elvű összehasonlítás megalkotható, több alkalmazáscsalád mellett találunk alternatívákat a pontos összehasonlítás elvégzéséhez. Nincs semmilyen konkrét szabályozói beavatkozás számítva, valamint az ehhez kapcsolódó, lokálisan eltérő költségek (pl. adók) sem jelennek meg. Így a hálózatfejlesztési beruházás értékének meghatározásához csak egy kellően összetett és rendezett adathalmazt bocsát rendelkezésre. Ebből azonban a dolgot végén, a kiértékelési eljárások során néhány lehetséges megoldás áll össze. [26]

4.1.1 A költségek és bevételek figyelembe vétele

Az energiatároló berendezések működése egy konkrét alkalmazáshoz csatolható, de olykor lehetséges ezeket párhuzamosan megvalósítani: lehetséges például, hogy a tároló kapacitás lekötés formájában csatlakozzon a szabályozási piachoz frekvenciaszabályozási üzemben, de emellett egy nagyobb hálózatfejlesztési beruházás késleltetését (pl. alállomás építése) is lehetővé teszi. Ezek egymásra hatását is figyelembe kell venni a méretezés és telepítés során. A kiértékeléskor csak a valós működés alapján ténylegesen végbemenő szolgáltatások vehetőek figyelembe. Az így kapott bevételek összegzésével és a LCOE (Levelized Cost of Electricity, kiegyenlített villamosenergia-költség) összevetésével pedig gazdasági megtérülés számítás készíthető. A számítások során jól követhetővé válik, hogy a működési idő mely időpillanatában válik nyereséggé a befektetés. Ez felhasználható előzetes hálózatfejlesztési tervek elbírálásakor becslésre, vagy a folyamat után a meglévő adatokkal annak kiértékelésére és a módszertan sikerességének megítélésére. [26]



4-1. ábra: LCOE és a bevételek szemléltetése a megtérülés számításához [26]

4.2 Alkalmazás csoportok elemzése

A különböző alkalmazáscsoportoknak eltérő karakterisztikájú tároló berendezések feleltethetők meg: a pontosabb analízis érdekében a korábban elvégzett csoportosítás alapján néhány tipikus felhasználási mód mellett jellemző adatok alapján kerülnek bemutatásra a költségek. Az egyes csoportok mellett megjegyzésként a konvencionális alternatív megoldás is említésre kerül a megfelelő kontextusba helyezés és jobb összehasonlíthatóság érdekében. [26][3]

- **Átviteli hálózati szint:** nagyléptékű energiatárolás az átviteli kapacitás növelésére és a megújuló energiaforrások rendszerszintű integrálására.
- **Csúcslevágási műveletek:** nagyléptékű tárolás a gyorsindítású gáztüzelésű erőművek kiváltására a csúcsidőszakokban. Frekvenciaszabályozás: a frekvenciaérték alapján történő szabályozással a rendszerstabilitás megőrizhető.
- **Elosztói hálózat fejlesztése, szolgáltatások:** stabilitás megőrzésére és csúcsterhelések kompenzálására alkalmazható megoldások-
- **Fotovoltaikus termelés integrálása:** a termelés ingadozását kompenzálhatja energiatároló berendezés.
- **Microgrid:** lokális szintű szabályozásokban való részvétel lehetősége.
- **Szigetüzemű működés:** izolált hálózatrész számára rugalmasságot biztosíthatunk a tároló telepítésével.

- **Kereskedelmi és ipari fogyasztók:** a profilváltoztatás lehetősége és a biztonsági tartalékképzés egyaránt hasznos lehet a nagyobb energiaigényű fogyasztók számára.
- **Lakossági alkalmazások:** ugyanez igaz a lakossági szinten is, csak kisebb léptékben. A megújuló energiák lokális felhasználásában komoly szerepet játszhat az ilyen jellegű megvalósítás. [26]

Jelenleg ezek a problémákat alapvetően tőkeigényes hálózatfejlesztési beruházásokkal (új vonalak és alállomások létesítése) végzik, vagy (az üzemből kifolyólag általában alacsony kihasználtságú) gyorsindítású gáztüzelésű erőműveket alkalmaznak. A felhasználóhoz közelítve a profilok vegyítéséből (és befolyásolásából) kialakítva próbálnak előnyösebb karakterisztikákat alkotni, vagy tartaléküzemben álló diesel és gáztüzelésű generátorokat tartanak fenn. [26]

Az alábbi táblázatban a számításhoz alkalmazható adatok találhatóak az egyes csoportokhoz kialakítva:

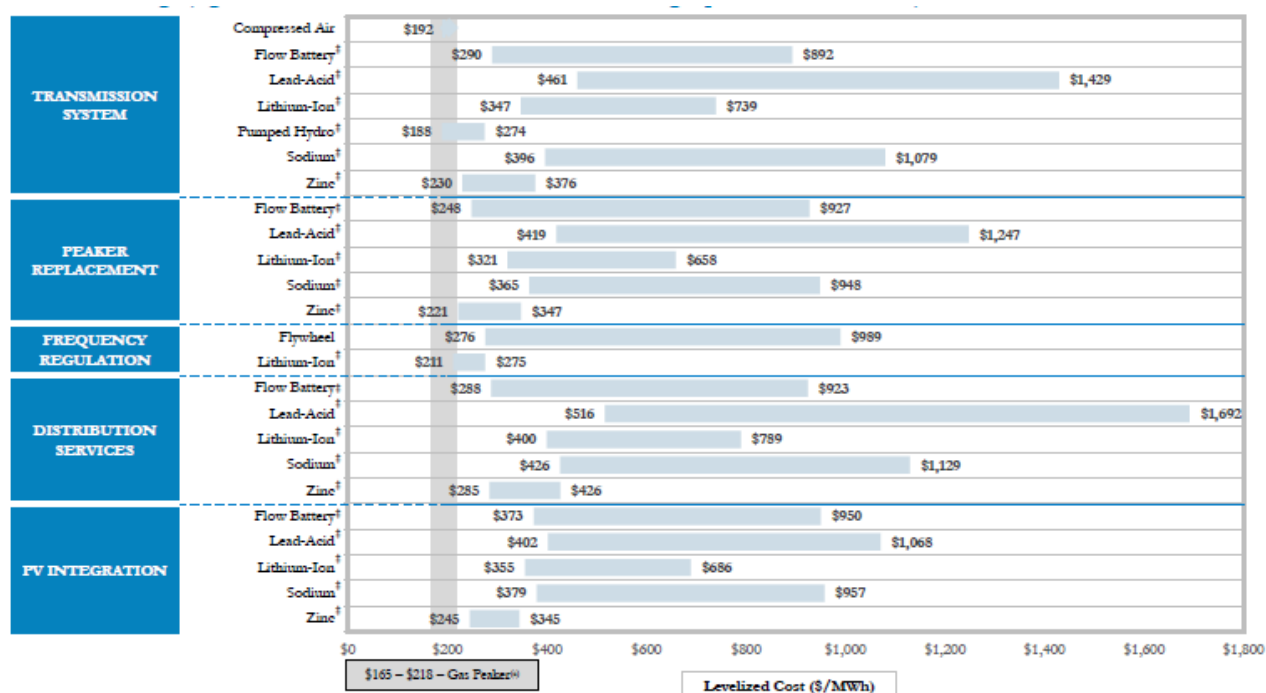
4-1. táblázat: Paraméterek a költségelemzéshez alkalmazáscsaládokra bontva [26]

	PROJECT LIFE (YEARS)	MW ^(a)	MWh OF CAPACITY ^(b)	100% DOD CYCLES/ DAY ^(c)	DAYS / YEAR ^(d)	ANNUAL MWh	PROJECT MWh
TRANSMISSION SYSTEM	20	100	800	1	300	240,000	4,800,000
PEAKER REPLACEMENT	20	25	100	1	350	35,000	700,000
FREQUENCY REGULATION	20	10	5	4.8	350	8,400	168,000
DISTRIBUTION SERVICES	20	4	16	1	300	4,800	96,000
PV INTEGRATION	20	2	4	1.25	350	1,750	35,000
MICROGRID	20	2	2	2	350	1,400	28,000
ISLAND GRID	20	1	6	1	350	2,100	42,000
COMMERCIAL & INDUSTRIAL	10	1	4	1	350	1,400	14,000
COMMERCIAL APPLIANCE	10	0.1	0.2	1	250	50	500
RESIDENTIAL	10	0.005	0.01	1	300	3	30

 = "Usable Energy"^(e)

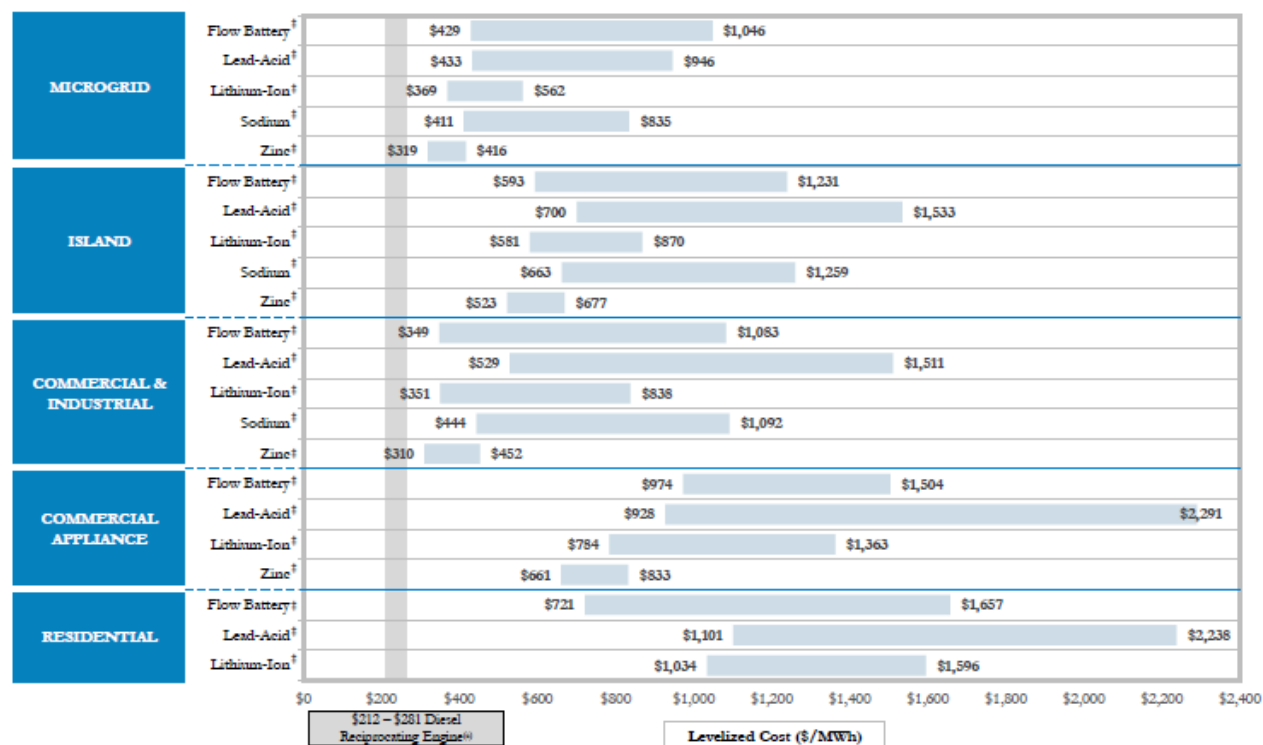
4.3 LCOE adatok

Elsőként nézzük a teljes élettartamra vonatkoztatott költségeket az LCOE számítás alapján. Ebben az esetben összevethetjük a különböző technológiájú energiatároló berendezéseket a konvencionális versenytársaikkal. A teljes LCOE a berendezés megszerzésének, működtetésének és karbantartásának, adóinak valamint a tárolók esetében speciálisan a töltésnek az árából alakul ki.



4-2. ábra: támogatásmentes LCOE nagyobb léptékű alkalmazásokra [26]

Az ábrán megfigyelhető, hogy bizonyos alkalmazáscsaládokra találhatunk versenyképes energiatároló megoldásokat a szabályozói beavatkozással létrehozott támogatási környezet teljes hiánya mellett is a jelenlegi fejlettségi szinten. Az elemzés nem tér ki olyan megoldásokra, melyek megosztják a szükséges szolgáltatásokat, pedig ezek bizonyos feltételek mellett a legoptimálisabbak lehetnek.

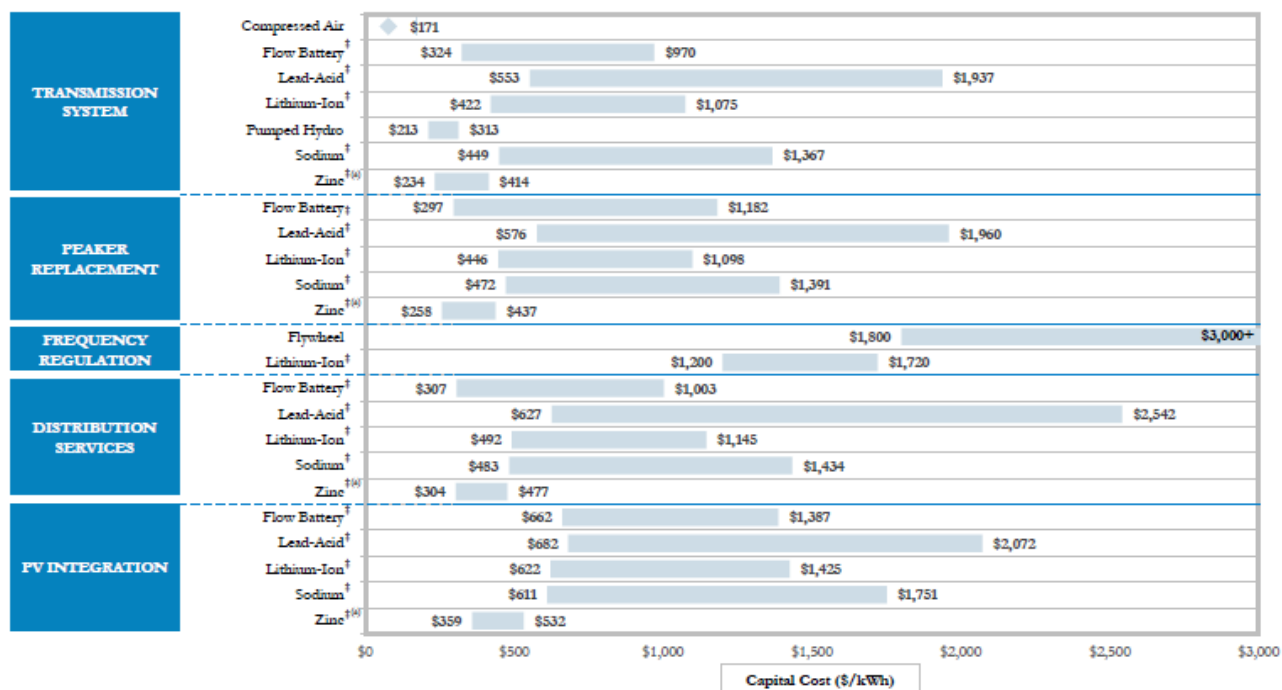


4-3. ábra: támogatásmentes LCOE kisebb alkalmazásokra [26]

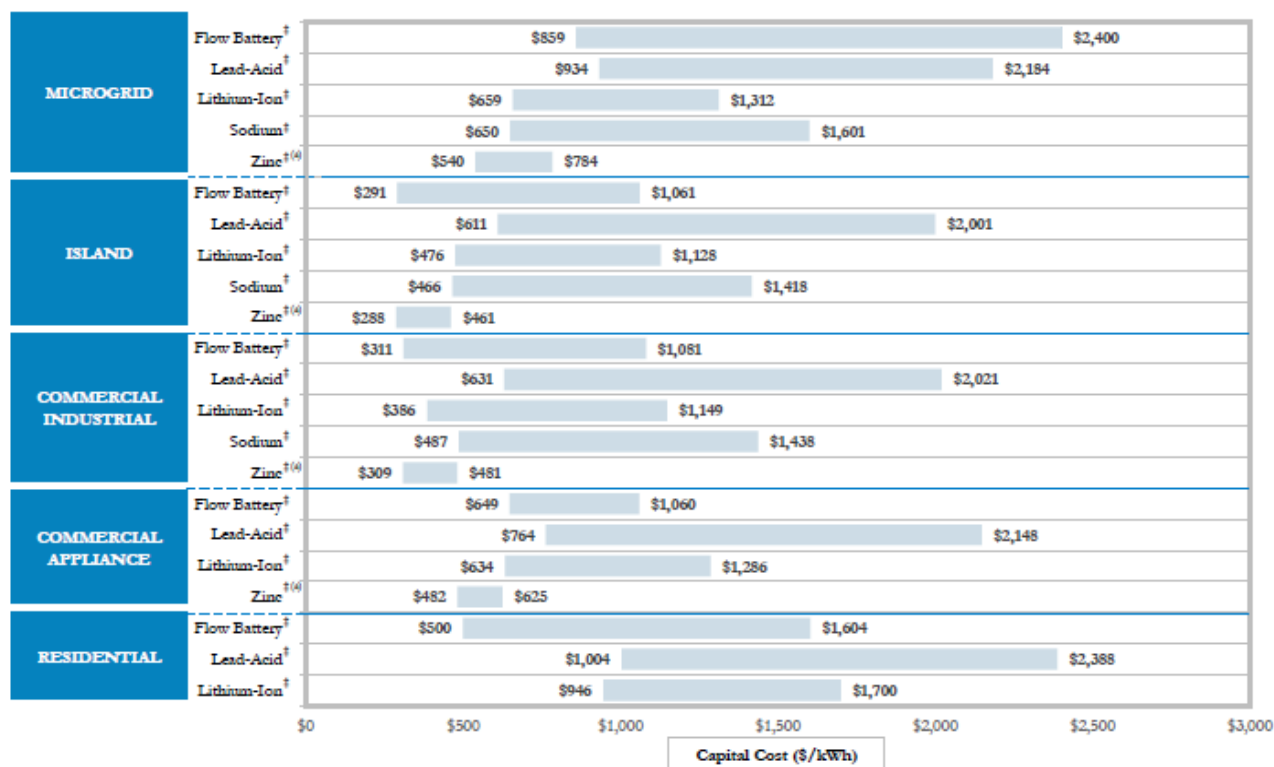
Legfeljebb „lőtávolon belül” találunk energiatárolás megoldásokat a kisebb méretek esetén teljesen gazdasági szempontból, mely azonban a környezeti hatások figyelembe vételével komolyan megváltozhat. Ennek ellenére azonban nem zárható ki ezek elterjedése bizonyos optimalizálási feladatokban.

4.4 Beruházási tőkeigény adatok

Alapvetően az alábbi adatok alapján kijelenthető, hogy a konvencionális versenytársakkal szemben az energiatárolás megoldások egyelőre magas költségekkel bírnak. Ezeknél azonban érdemes figyelembe venni a szükséges fizikai paramétereket is. A fejlettebb technológiák esetén az eltérés mérsékeltebb. A költségek a teljes egyen- és váltakozó áram formájában jelen levő energiamennyiség alapján adódtak. Az ábrán a versenyző konvencionális technológia költsége adja a sáv kezdetét, majd az energiatároló berendezés összköltségéig világoskék sáv jelöli a különbséget.



4-4. ábra: Nagyléptékű alkalmazáscsaládok tőkeköltség adatai [26]

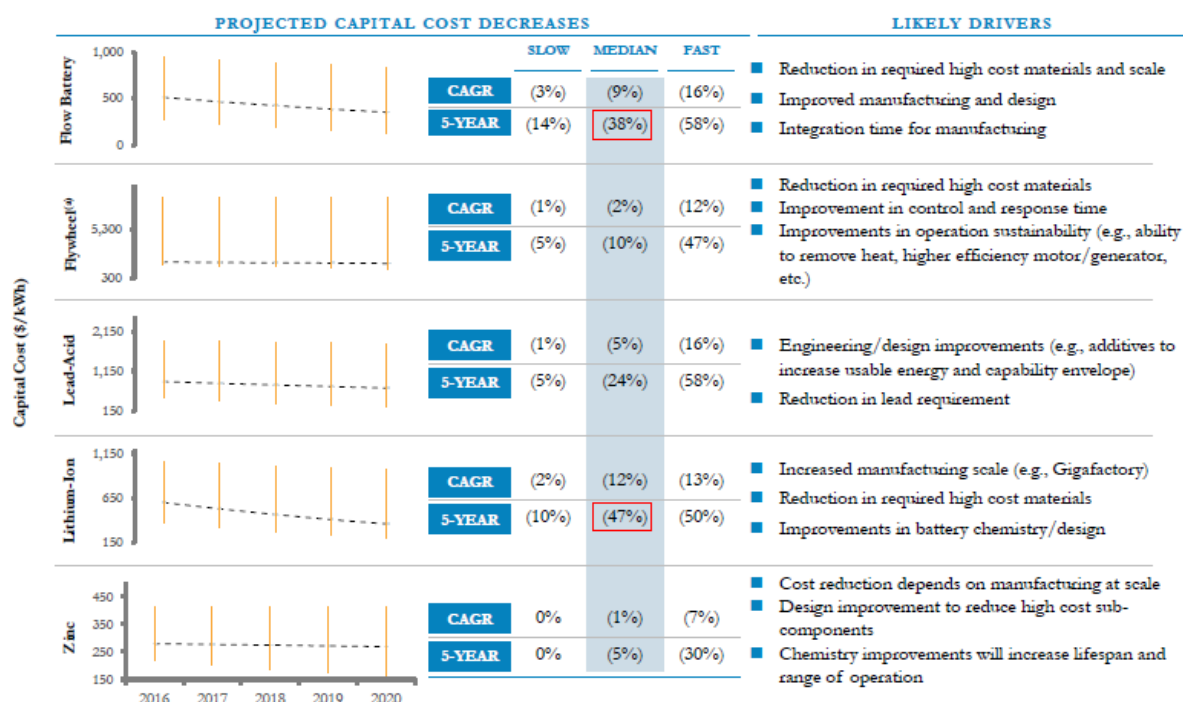


4-5. ábra: Kiseb méretigényű alkalmazásaládok tőkeköltség adatai [26]

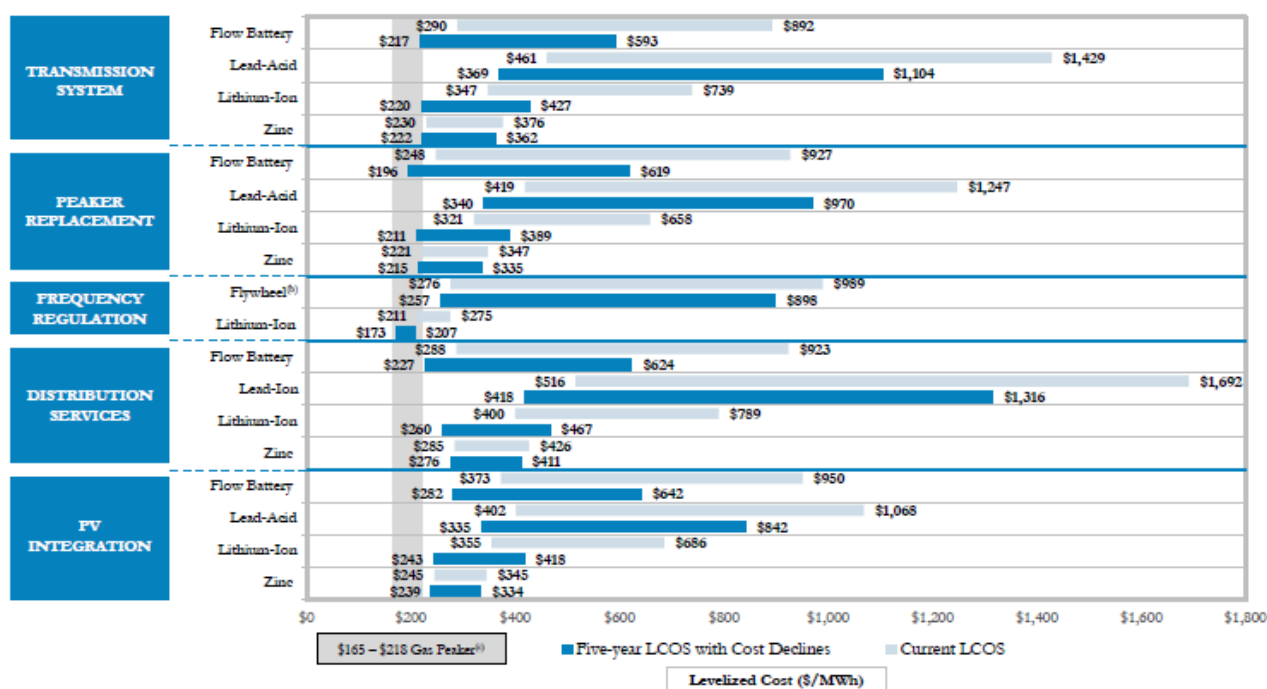
Alapvetően változást az akkumulátor technológiákkal kapcsolatban várhatunk, itt az egységnyi energia költsége várhatóan erősen csökkenni fog a közeljövőben. Addig a szabályozás változtatása nélkül, pusztán gazdasági alapon csak a már érettebb technológiák esetén beszélhetünk versenyképességről (sűrített levegős és szivattyúzott vizes tárolók).

4.5 Prognózis a jövőre: amire az ipari szereplők számítanak

Az alábbiakban néhány olyan eredmény található, melyek az iparági szereplők bizakodását támasztják alá az energiatárolás lehetőségeivel kapcsolatban. A változások bemutatására három forgatókönyv készült: lassú változások, a jóslások középértékei és robbanásszerű fejlődés esete. A fejezetben a technológiai fejlődés a fő mozgatórugója a költségcsökkenésnek: a szükséges drága komponensek mennyiségének és részarányának csökkenésétől kezdve a gyártástechnológiában kialakuló folyamatoptimalizáláson (és a gyártás méreteinek folyamatos növekedése) át a hatékonyabb tervezési megoldásokig mindenhol vannak még kiaknázatlan lehetőségek. Ez alapján a legrosszabb esetben is néhány százalékos, de várhatóan az akkumulátorok piacán például 20-50%-os költségcsökkenéssel számolhatunk 5 éves távlatban is. Ezek alapján pedig a korábbi adatokból kiindulva egy prognózist adhatunk a közeljövőre.

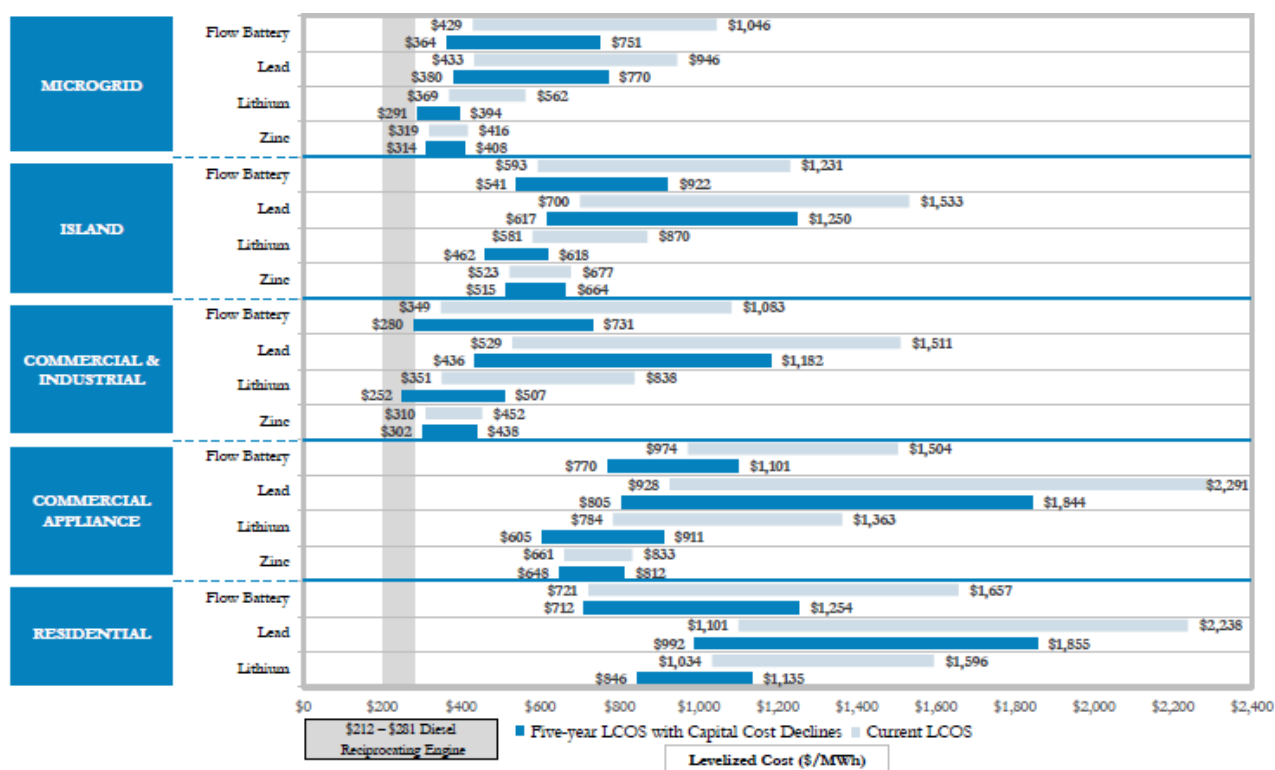


4-6. ábra: Ipari szereplők becslései az átváltások méretére [26]



4-7. ábra: A becslések figyelembe vételével újraszámolt LCOE nagyléptékű berendezésekre [26]

Az ábrán jól megfigyelhető, hogy a konvencionális megoldásokkal történő tisztán gazdasági elvű verseny is reális számos alkalmazás esetén. A modellezés pedig továbbra sem tartalmaz szabályozói beavatkozást, ebben a környezetben egy mérsékeltebb prioritizálás is komoly elterjedés növekedéshez vezethet.



4-8. ábra: a becslések alapján újraszámolt LCOE kisebb méretigényű alkalmazáscsaládokra [26]

A villamosenergia-rendszer fogyasztókhöz közelebbi részén is megjelennek a gazdasági alapon versenyképes berendezések főként a nagyobb ipari fogyasztóknál. Itt további hatékonyságnöveléssel a vezérlésben (kihasználva a folyamatirányításban rejlő lehetőségeket) abszolút versenyképes microgrid koncepciók alakíthatóak ki energiatároló berendezések segítségével.

5 Kiválasztási folyamat, vezérlési eljárások, egy lehetséges modellezés és szimulációs eljárás

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

A felsorolt motivációk valamint a technológiai és alkalmazhatósági összegzés alapján tehát levonhatjuk a következtetést, hogy szükség van energiátároló berendezések telepítésére, érdemes megvizsgálni a lehetséges eseteket és hatásait a villamosenergia-rendszerre. A következőekben bemutatásra kerül egy eljárás, mellyel a telepítés ötletétől a dolgozatban szereplő adatok és eljárások segítségével áttekinthető kvalitatív és kvantitatív adatokhoz juthatunk az esetleges hálózatfejlesztési beruházás hatásairól.

5.1.1 A folyamat főbb lépései, standardizációs lehetőségek

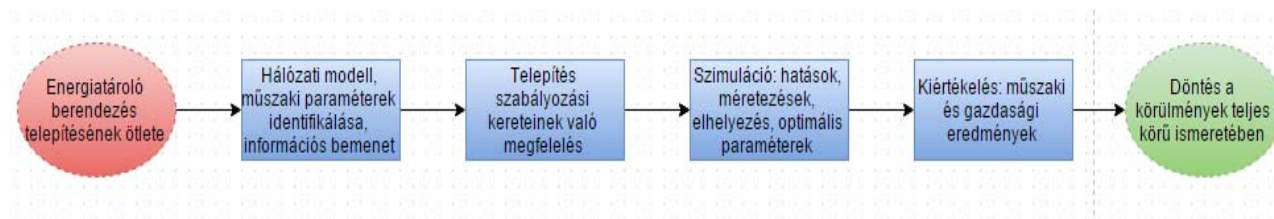
Tételezzük fel, hogy felmerül az energiátároló telepítés gondolata egy adott hálózatrészen, mert valamely fentebb részletezett problémával szembesülnek az üzemeltetés során. Elsőként maga a hálózat egy modellje szükséges, mint a teljes folyamat bemenete [F1]. Minél több hasznos műszaki adat, melyek alapján döntéseket hozhatunk. Először is a névleges teljesítmények és terhelések alapján végezhetünk egy statikus becslést a szükséges tároló paraméterekre. Ezután - mivel a vizsgált algoritmusok minden esetben valamilyen teljesítményáramlás szabályozást valósítanak meg – bizonyos időfelbontásban és időtartamban mért felvett és leadott teljesítményadatok szükségesek. A meddőteljesítmény-kompenzációt megvalósító algoritmus esetén fontos, hogy legyen megfelelő adatunk a hatásos teljesítmények mellett a meddőviszonyokra (akár teljesítménytényezőre). A dolgozat függelékében található a későbbi szimulációkban vizsgált hálózat felépítésének menete és az adatok pontos felhasználása.

A hálózatra való csatlakozásnak feltételei vannak, ezeknek pedig eleget kell tenni: jelenleg nem létezik kimondottan energiátároló berendezésekre vonatkozó jogszabályozás ezen a téren. A szükséges minőségi követelmények és csatolandó berendezések vizsgálata fontos eleme a telepítési folyamatnak. Az elosztóhálózat esetén jó kiindulási alapot jelenthet a háztartási méretű kiserőművekre kidolgozott eljárás.

A technológiai lehetőségek paramétereinek bemutatása és alkalmazásokkal párosítása alapján tehát ésszerű döntés hozható, hogy mely lehetőségeket kell figyelembe venni a berendezés kiválasztása során.

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.



5-1. ábra: Az energiatároló berendezések telepítésének folyamata

5.2 A modellalkotás általánosítására vonatkozó törekvések sikerességéhez szükséges megkötések

A dolgozatban önálló munkaként egy modellezési eljárás és szimulációs script fejlesztésének ismertetése volt a fő cél. A következőkben a modellezés megkötései valamint a megvalósított funkciók leírása szerepel, továbbá a célfüggvények és az alkalmazott határfeltételek. A vizsgálatokat a DigSilent Power Factory 14.1 és 15.0 verziószámú szoftverekkel végeztem, melynek használatát a [25] és [16] irodalmak segítségével sajátítottam el.

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 bevitelére esetén a program nem fog eredményt generálni. A profilokra nincs különösebb megkötés, alkalmazhatunk egyaránt mérési eredményekből származó görbéket vagy sztochasztikus modell alapján előállított menetrendeket is.

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

programot alkalmaztam, Microsoft Excel és MATLAB segítségével a kiértékelésben bemutatott számítások elvégezhetőek.

5.3 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. Lehet akár rövid időtartamot is vizsgálni, vagy több éves viszonyokat, ezt csak a rendelkezésre álló terhelési adatok szabják meg.
- A lépésköz állításával az eredmények felbontása változtatható. Alkalmazása erősen függ a választott stratégiától. A load flow kiértékelés és a diszkrét adatsorok közelítése a modellalkotáskor megadható (spline közelítést alkalmaztam a bemutatott adatok esetén). 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 demonstrációs szimulációk között.
- A teljesítmény és kapacitás értékek beállíthatóak az energiatároló berendezéshez. Néhány stratégia képes kapacitás méretezési eljárásra, 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. Jelenleg ez statikusan a script belsejében szerepel, de a DigSilent lehetőséget ad külső objektum átadására, így vektor formában ez átadható a program számára kisebb változtatással.
- 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 hatásfok változó segítségével megadhatjuk a berendezés villamos-villamos átalakítási hatásfokát, ezáltal figyelembe véve a legsarkalatosabb veszteségi tényezőt az energiatárolós alkalmazások során. A hálózati veszteségek számítására létezik beépített script.
- A méretezés funkció bekapcsolásával bizonyos stratégiák esetén meghatározhatjuk az optimális kapacitás értékét, 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 válaszütemekkel kéne releváns módosításokat végrehajtani.

- Az energiátároló berendezés kiindulási töltöttségi szintje változtatható 0-100% között.

Mint látható a funkciók gyakorlatilag teljes körű analízist tesznek lehetővé, 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.

5-1. 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

5.4 Az algoritmusok döntési mechanizmusai

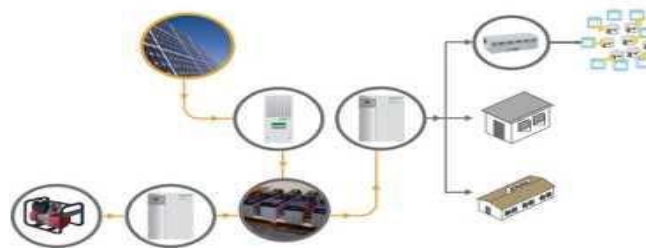
A stratégiák megfogalmazásakor az első fontos feladat, hogy a program milyen döntési feltételek kiértékelésére képes. Ez meghatározza a fejlettségét, illetve rendszerbe illeszthetőségét is. Az alábbiakban bemutatott néhány lehetséges mechanizmus alaptípusnak tekinthető, de ilyen alkalmazásokban az elterjedtségük eléggé eltérő. A stratégiák kialakításakor a [15] cikk alapelveit vettem figyelembe és ez alapján fogalmaztam meg a saját ötleteimet a stratégiákkal kapcsolatban (ebben az irodalomban csak energiakereskedési eljárás szerepel).

5.4.1 Statikus algoritmus

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

5.4.2 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]



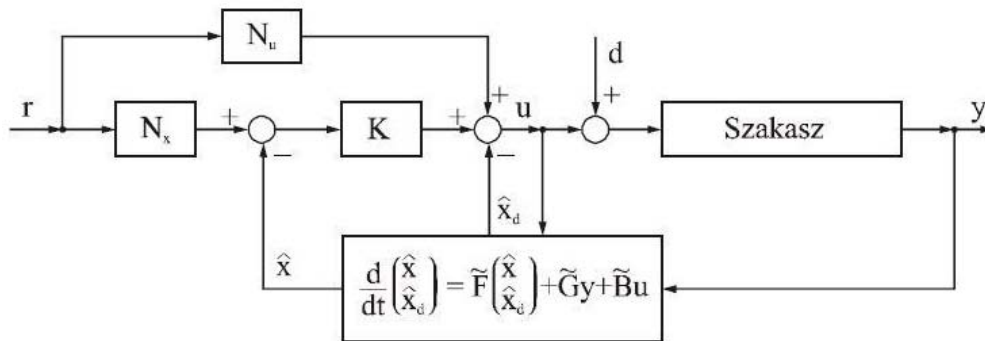
5-2. ábra: Schneider-Electric SCADA adatgyűjtés és vezérlés áttekintő rajza [Schneider Electric]

5.4.3 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 adatai alapján működik. Nem szükséges valós idejű adatok azonnali felhasználása, így kevésbé van kitéve a kommunikációs rendszerek hibáinak, illetve azok magas költségeinek. [15]

5.4.4 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 módozat a dolgozatban tárgyalt felhasználások esetén. Bizonyos esetekben soros kompenzátor elvű működés is elképzelhető. [15]



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

5.5 Lehetséges célfüggvények

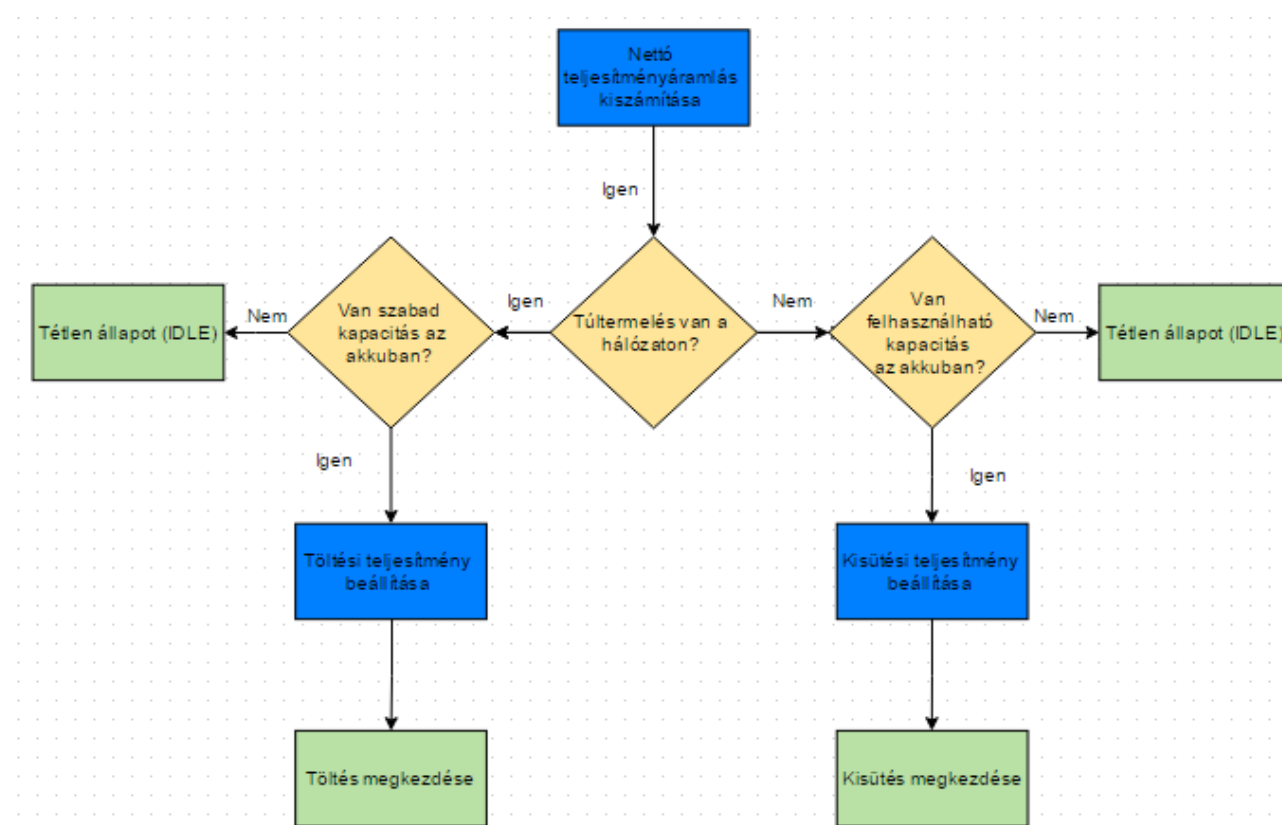
A konkrét célok megfogalmazása a kulcskérdés, hiszen ez az, ami összeköti az elméletet a gyakorlattal. A korábban felsorolt alkalmazások és hálózati sajátosságok matematikai algoritmusokon keresztül itt találkoznak a beavatkozó rendszerrel. Az alábbiakban több megoldás kerül bemutatásra, melyek az elosztói hálózaton végezhető műveletek közel teljes spektrumát lefedik. Külön érdekes lehet e 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]

5.5.1 Valós és virtuális szigetüzem kialakítása

Egy microgrid-eken alapuló decentralizált koncepcióban a szigetüzemű működés kritikus és sokat kutatott probléma. Az ellátás biztonságának kérdése itt egyértelműen függ az energiatároló berendezés kapacitásától,

ennek végeessége korlátozza a működés sikerességét. Ennek érdekében alakítható ki a virtuális szigetüzem gondolatmenete: alapvetően úgy próbáljuk a vezérlést kialakítani, mintha nem lenne kapcsolat a hálózat többi részével, de ha az ellátás megszűnne, tartalékként bevethető a mögöttes hálózat.

A teljesítményáramlás kiszámítása után (teljes fogyasztás és össztermelés előjeles összege) egy nettó érték adódik: ezt alapesetben a hálózathoz vételeznénk, de most pont az a cél, hogy ne legyen kapcsolat: tehát ha van eltárolt energiánk, akkor bevetjük. Amennyiben túltermelés 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.



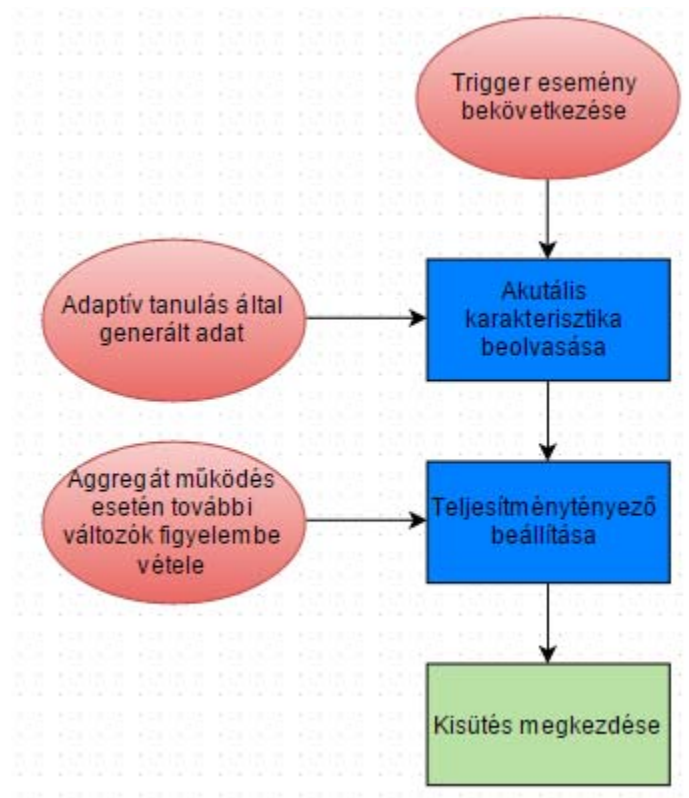
5-4. ábra: virtuális szigetüzem vezérlési folyamatábrája

5.5.2 Menetrendszerű meddőteljesítmény igény kompenzálása

A hálózatunkon lehetnek 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 komponenst. 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. A stratégia 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.

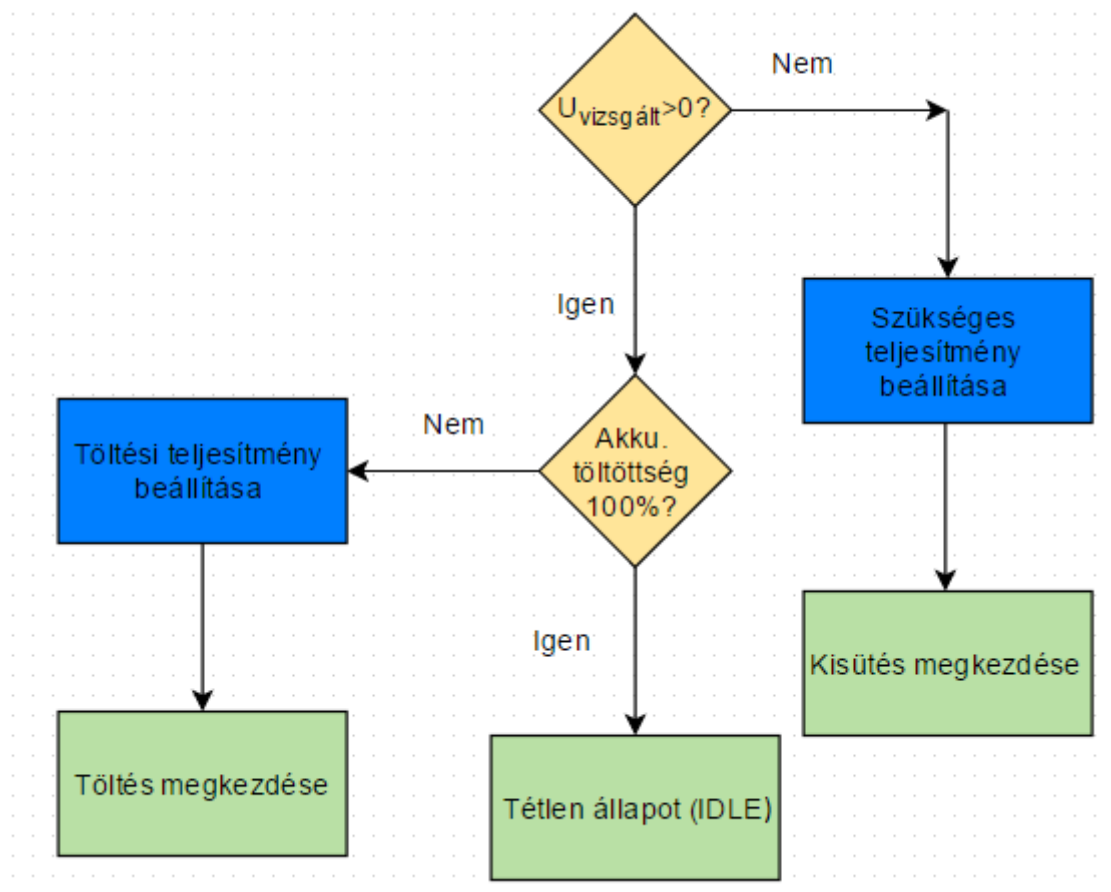


5-5. ábra: menetrendszerű meddőkompenzáció folyamatábrája

5.5.3 Ellátásbiztonság növelése

Bizonyos környezetben egyszerűen nem megengedhető egyes hálózatrészek ellátásának megszűnése. Az ilyen kritikus infrastruktúrák támogatására energiatároló tartályok létesíthetőek, melyekkel a meghibásodások esetén létrejövő kimaradások áthidalásának lehetősége javítható. Nyilván korlátosak 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 hálózatarát megoldás, valamint a megfelelő termelők esetén tisztán zöld energiából álló tartály is képezhető.

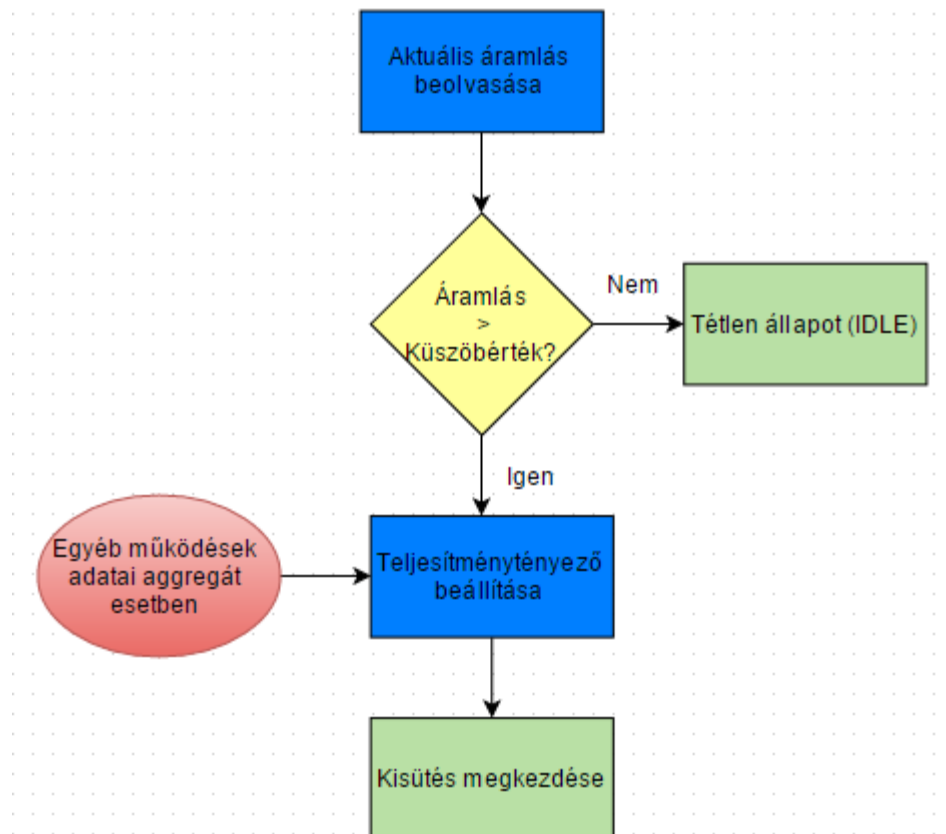


5-6. ábra: megbízhatóság függvény folyamatábrája

5.5.4 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. Jól felhasználható lehet aggregát alkalmazásban.

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

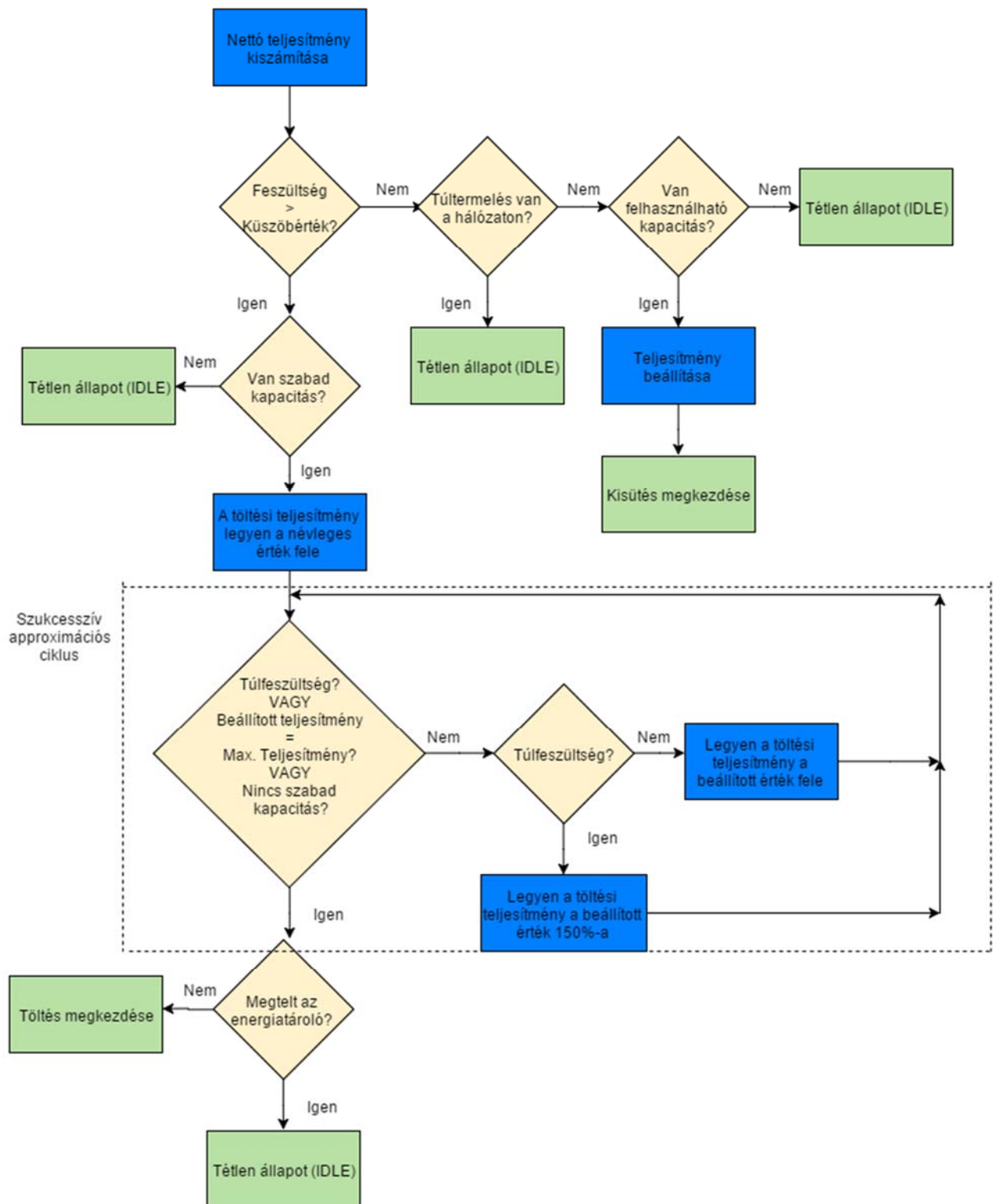


5-7. ábra: meddőáramlás korlátozás vezérlés folyamatábrája

5.5.5 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.



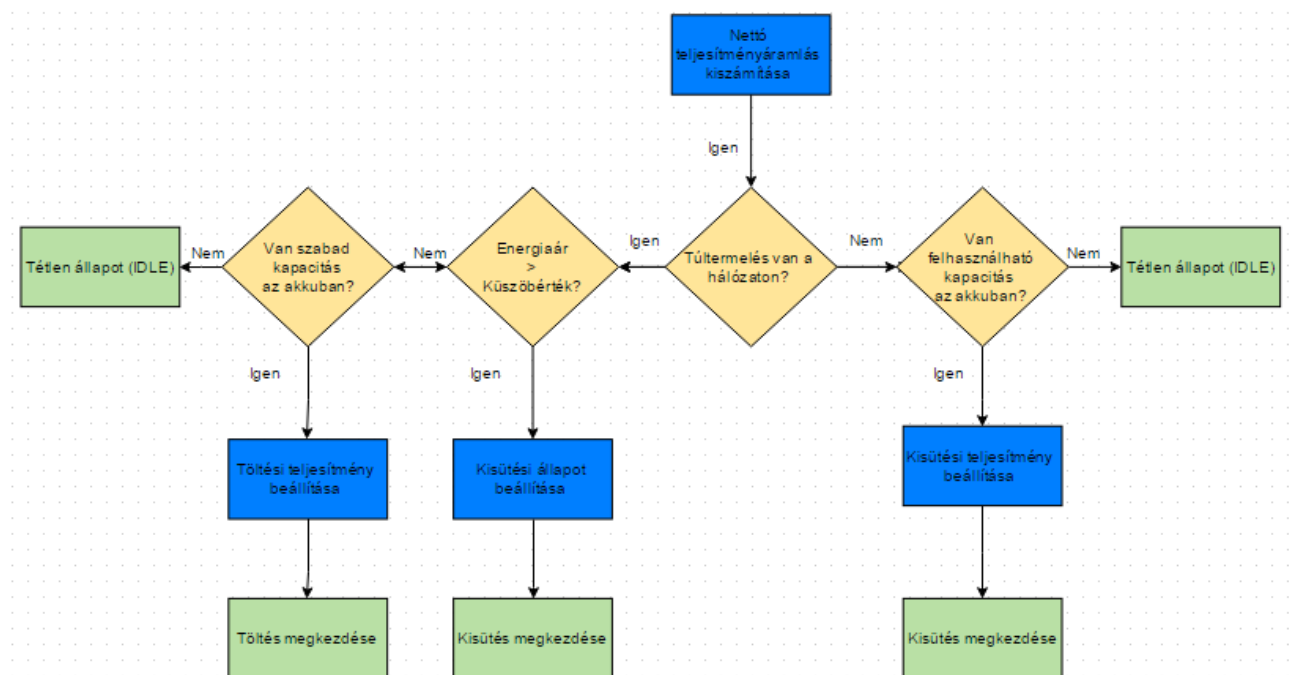
5-8. ábra: feszültségtartás vezérlés folyamatára [16]

5.5.6 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

5.5.7 Hálózati veszteségek csökkentése

A veszteségek csökkentése mindig is felkapott téma lesz, főleg a kisebb feszültség szinteken, 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: a lehetőség adott a program beépített scriptje 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.

5.6 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]

5.6.1 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 olyan csoportosítást alkalmazunk, 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]

5.6.2 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]

5.6.3 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).

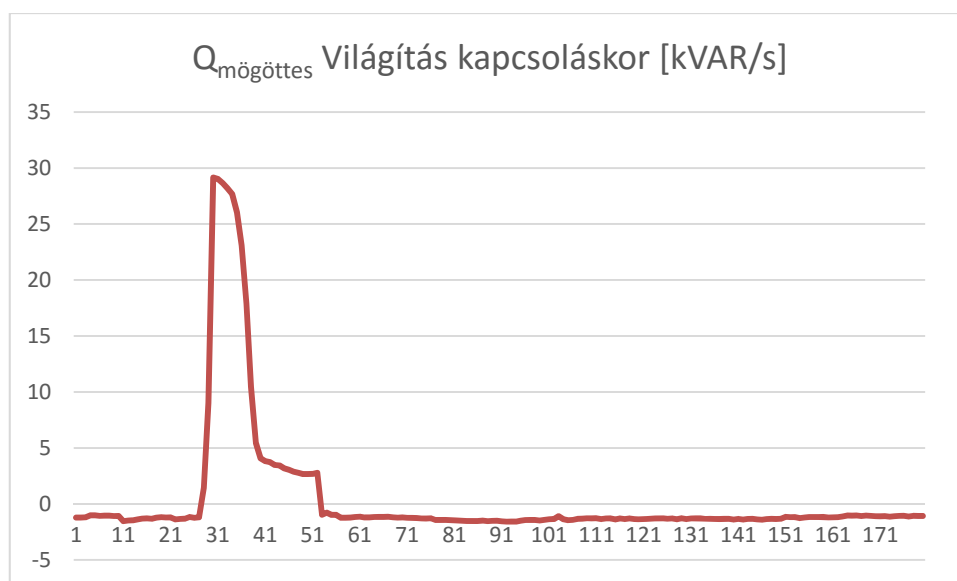
$$P_{össz} = \sum_{k=0}^T P_k, T \in \mathbb{Z}$$

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

5.7 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. Adaptívnek tekinthető emellett az aktuális áramlás követése is.

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.

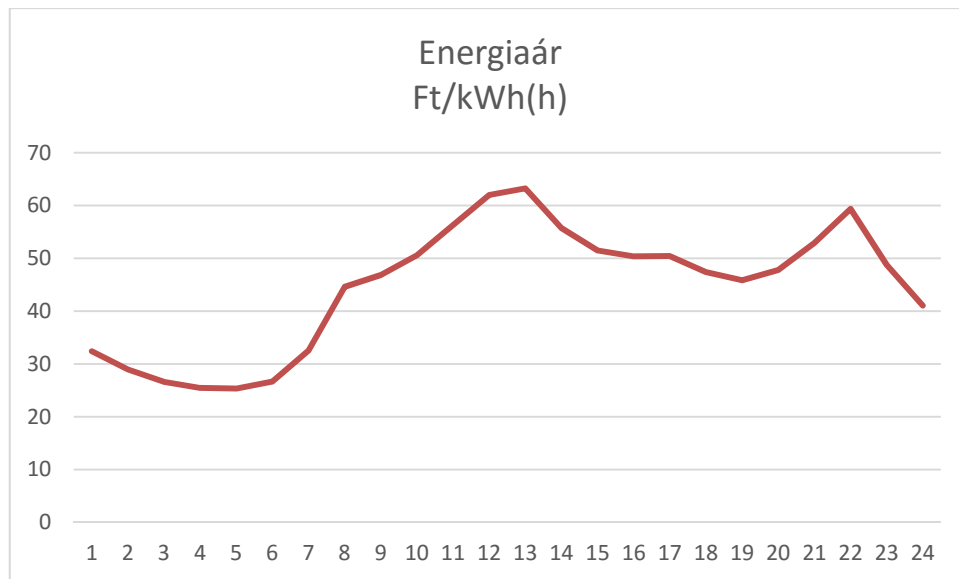


5-10. ábra: az ELMŰ mögöttes hálózatának meddőteljesítmény leadása a pályavilágítás bekapcsolásakor (30 perces mért adat)

5.8 Prediktivitás

Előrejelzések alkalmazása nagyon fontos a vezérlési stratégiák megfogalmazásakor, hiszen a csak tisztán reagálásra képes rendszer esetén gyakorlatilag csak késleltetett beavatkozások valósíthatók 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 elérhetők különböző időbontásokban, ezekből az adatokból pedig megfelelő módszertannal a valóságot jól közelítő becslések állíthatók elő.



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

5.9 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 eredmények, gyakorlati alkalmazás lehetősége

Az eredmények bemutatásakor a korábban megfogalmazott alapelvek szimulációs környezetben történő megvalósítása látható. Mivel a kiértékelés a későbbiekben a kimenet alapján történik, az eredmények grafikus reprezentálásával a működés helyességét ellenőrizhetjük. Néhány esetben olyan szimulációk is készültek, melyek kimenete nagyméretű adathalmaz (10 000 -50 000 mért érték egy változóra). 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 felépített vizsgáló script

A modell bemeneti paraméterei már bemutatásra kerültek. A Digsilent Programming Language (DPL) egy objektum orientált nyelvezet, mely igen sokrétű objektumokhoz rendelt változórendszerrel rendelkezik. A kimeneti változók mindig az adott stratégiához illeszkednek, egyszerűen bővíthető a vizsgált paraméterek listája. 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 (filter) kerültek implementálásra a könnyebb hozzáférhetőség és áttekinthetőbb implementálás érdekében. A ciklusokon belül pedig egy bemeneti változó alapján választódik ki, hogy mely vezérlés valósul meg.

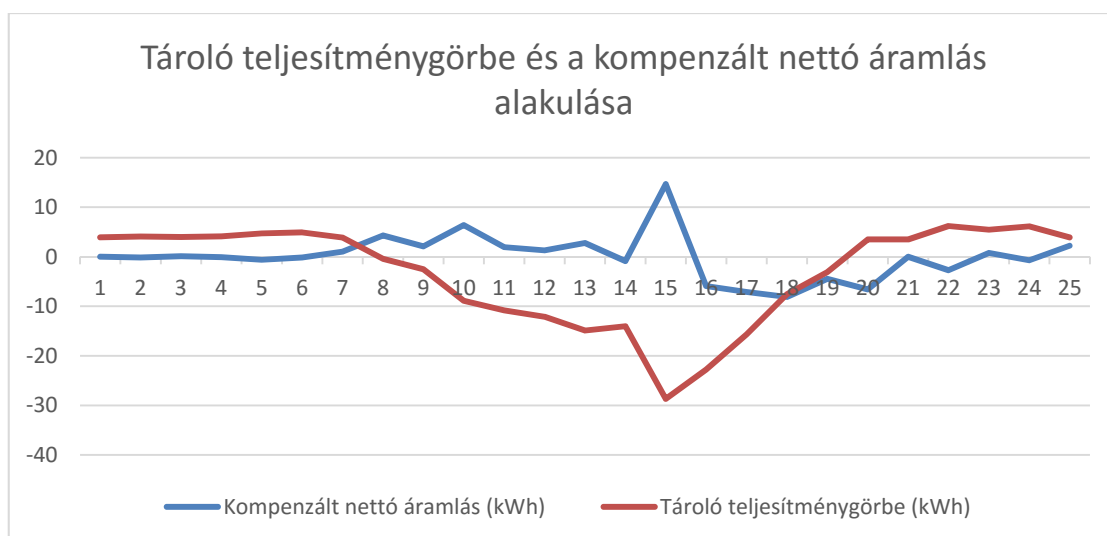
A szoftveres környezet használatának egyik legnagyobb előnye, hogy villamos mennyiségek széles palettája elérhető rajta keresztül plusz számítások implementálása nélkül. Így például kisebb változtatásokkal bármely stratégia esetén vizsgálhatjuk a feszültségviszonyokat, terheltségeket.

Minden vizsgálatot, mely a dolgozatban szerepel, a főtí Élhető Jövő Park általam elkészített villamos modelljén végeztem. A modellezéshez gyűjtött adatok és a felépítés lépései az F1 függelékben megtalálhatóak.

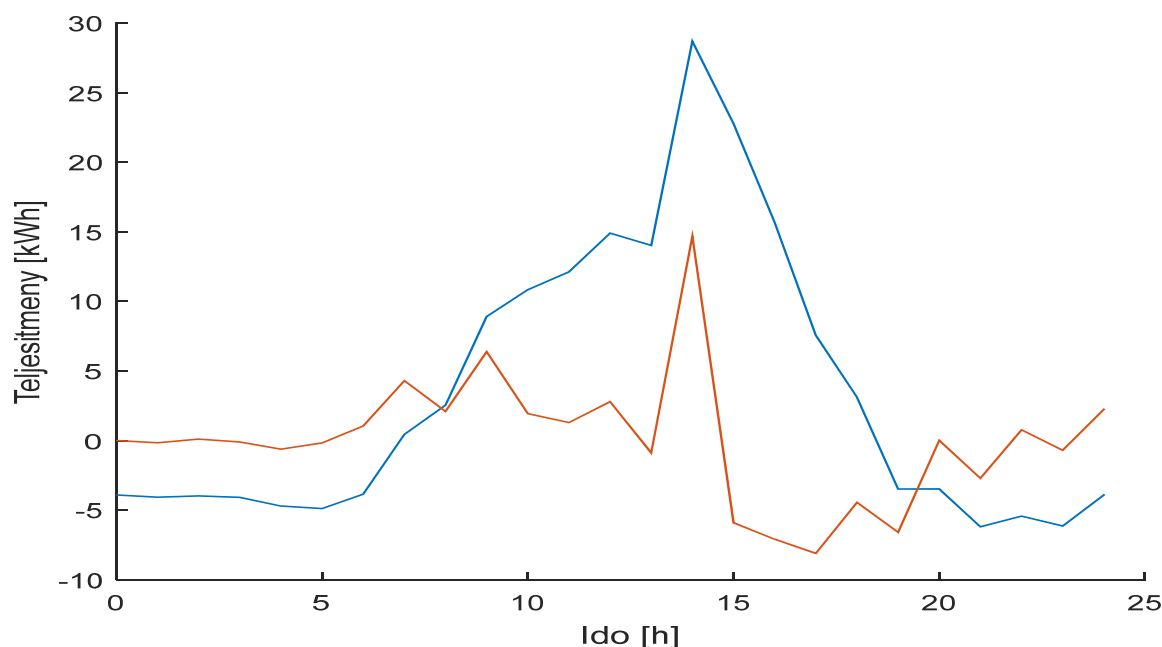
Az Élhető Jövő Park (F1) jelenlegi állapotához képest a karakterisztikákon egy módosítás történt. A korábbiakban ismertetett jelleggörbénél megfigyelhető, hogy a locsoló berendezéseknek rövid, akár egy 10 másodperces periódusú extrémén nagy (ezen a hálózaton levő terhelésekhez képest) teljesítményfelvétele 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 tüskéket eredményez. Mivel ezek a berendezések tipikusan jól ütemezhető cselekvést valósítanak meg (a legtöbb új ilyen méretű locsoló berendezésre létezik vezérelhető megoldás), 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 (gyakorlatilag figyelembe vehető, de a megjelenített adatok ezen megkötés mellett képződtek).

6.2 A tároló teljesítményének vezérlése

Első lépésben az elvi struktúra fő elemeinek megalkotása és a load flow parancsok csatolása után a modellezés és a script működését vizsgálhatjuk 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 végzési a gyakorlatban értelmetlen. Az alábbiakban néhány olyan számítás kerül bemutatásra, amely alapján megvizsgálható az időlépésekben eszközölt változtatások hatása az adatszolgáltatásra.

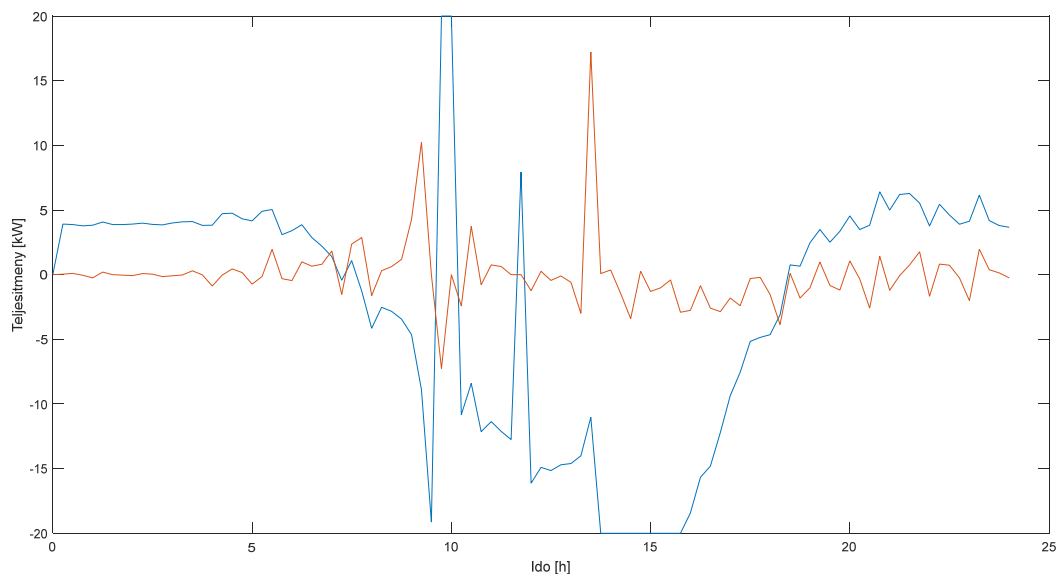


6-1. ábra: 1 órás időléptékkel megvalósított kompenzáció



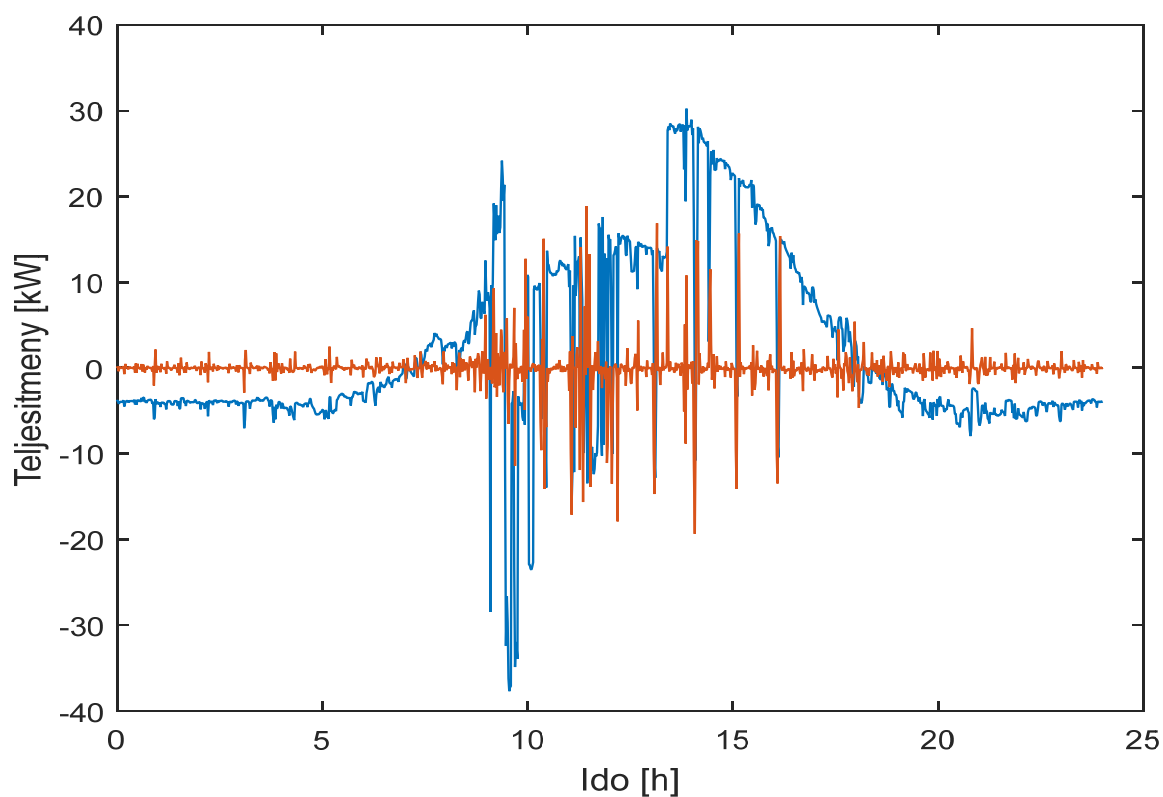
6-2. ábra: a nettóáramlás (narancs) és kompenzált áramlás (kék) különbségei órás lépték esetén

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 látszik, csökken az externális ponton az energiaforgalom, valamint a csúcserték is kisebb. Negatív hatásként megfigyelhető azonban, hogy van egy hosszú vételezési szakasz, mely a későbbi stratégiák esetében nem lenne helyes működési állapot.



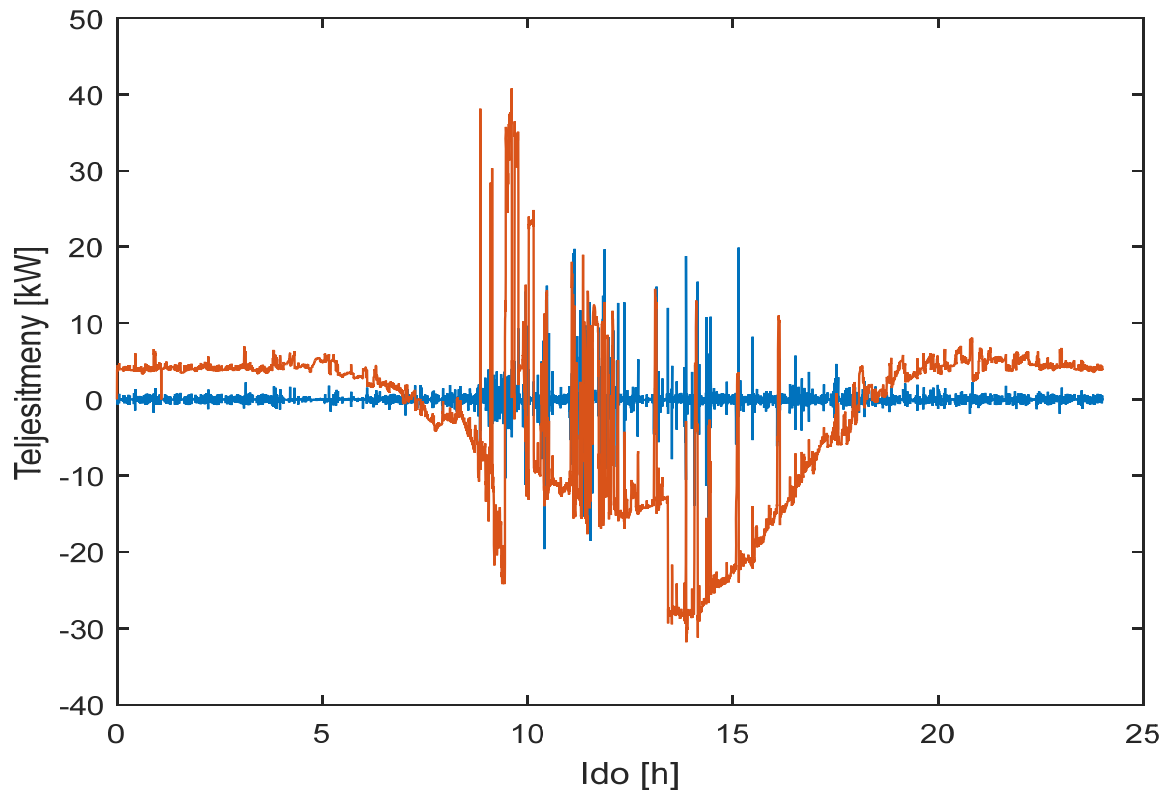
6-3. ábra: 15 perces időlépték esetén az energiatároló teljesítménye (kék) és a kompenzált teljesítményáram (narancs)

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.



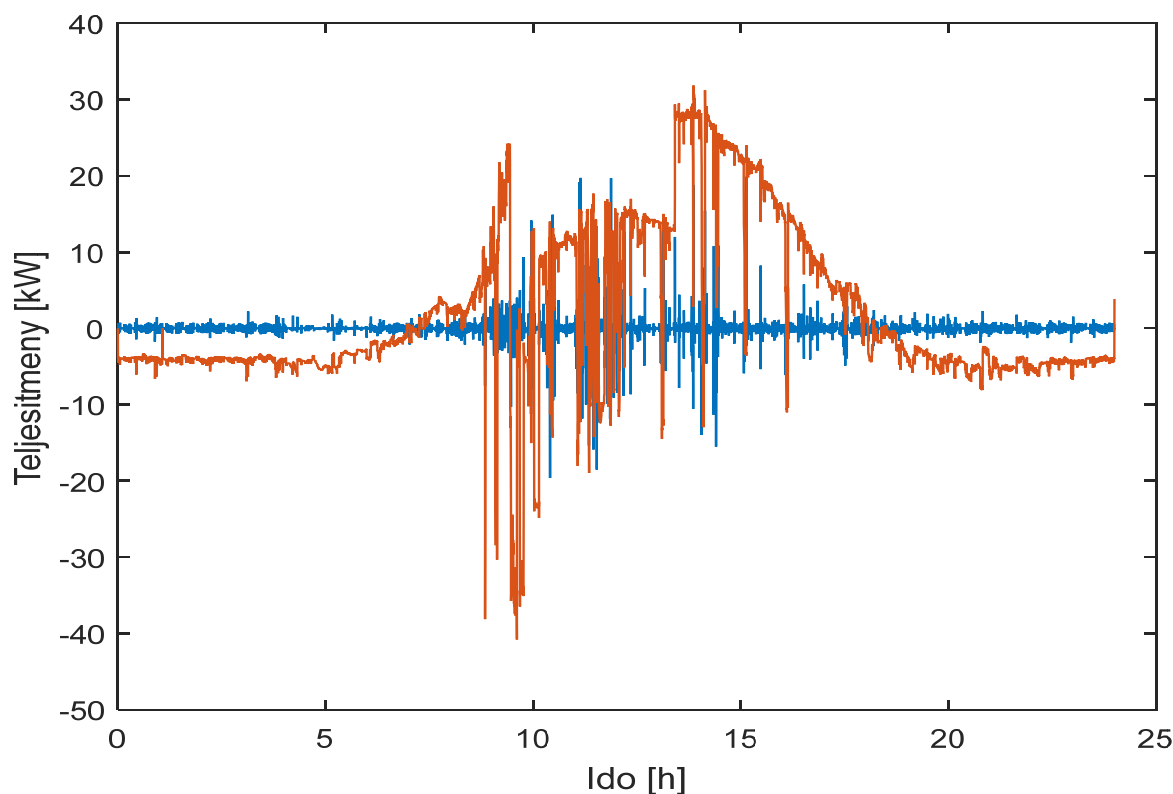
6-4. ábra: Perces nagyságrendű időlépés esetén a kompenzálás nélküli (kék) és kompenzálás utáni (narancs) teljesítményáram

Perces nagyságrendű feltétel kiértékelés esetén jól látható, hogy több az erős fluktuáció, amely a nettó áramlásban megjelent, a kompenzációval 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)

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.



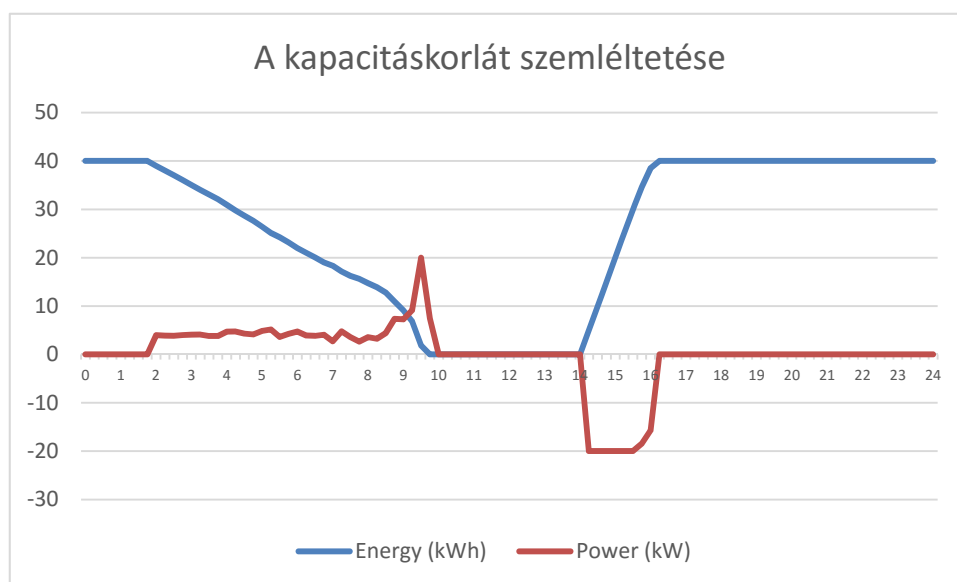
6-6. ábra: kompenzálás nélküli teljesítményáram (narancs) és a kompenzált teljesítményáram összevetése

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.

6.3 A tárolt energia számításának implementálása a kapacitás határfeltételek kiértékeléséhez

Mivel az energiatároló berendezést statikus generátorként implementáltuk (F1), így ugyanolyan változó készlettel rendelkezik, akár egy napelem vagy szélerőművi 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 szükséges biztonsági korlátokat bevezetni, a szimuláció feltételezi, hogy a bevitt kapacitásérték teljes mértékben kihasználható, azaz a biztonsági korlátokat tartalmazza a bevitt felhasználható érték.

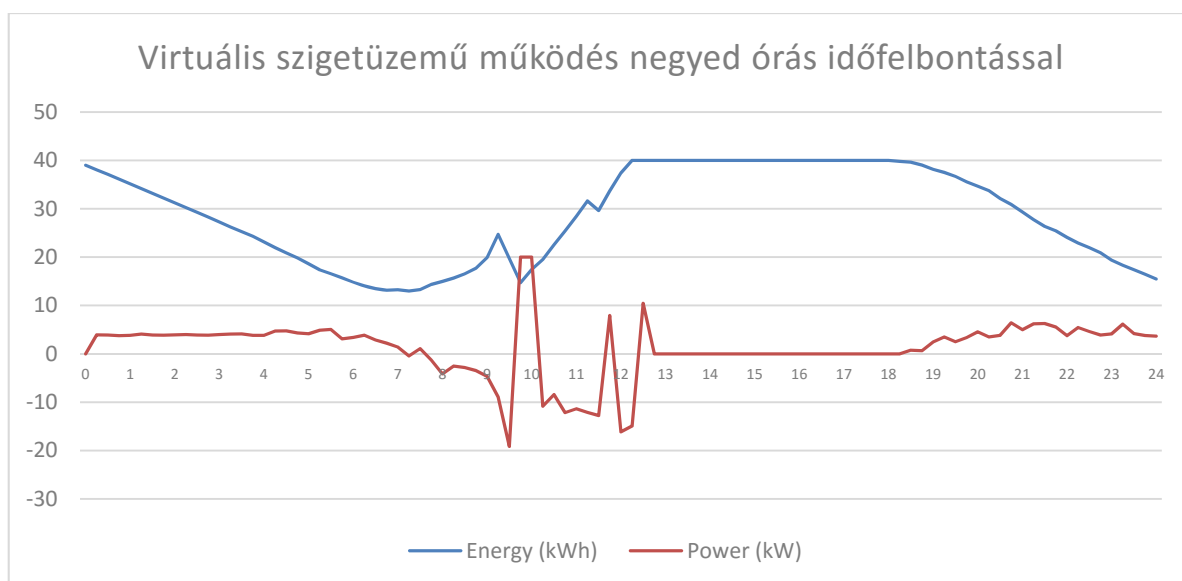


6-7. ábra: a kapacitáskorlát szemléltetése tartalékképzési üzemben, kimaradás és visszakapcsolás mellett: 40 kWh és 20 kW határok

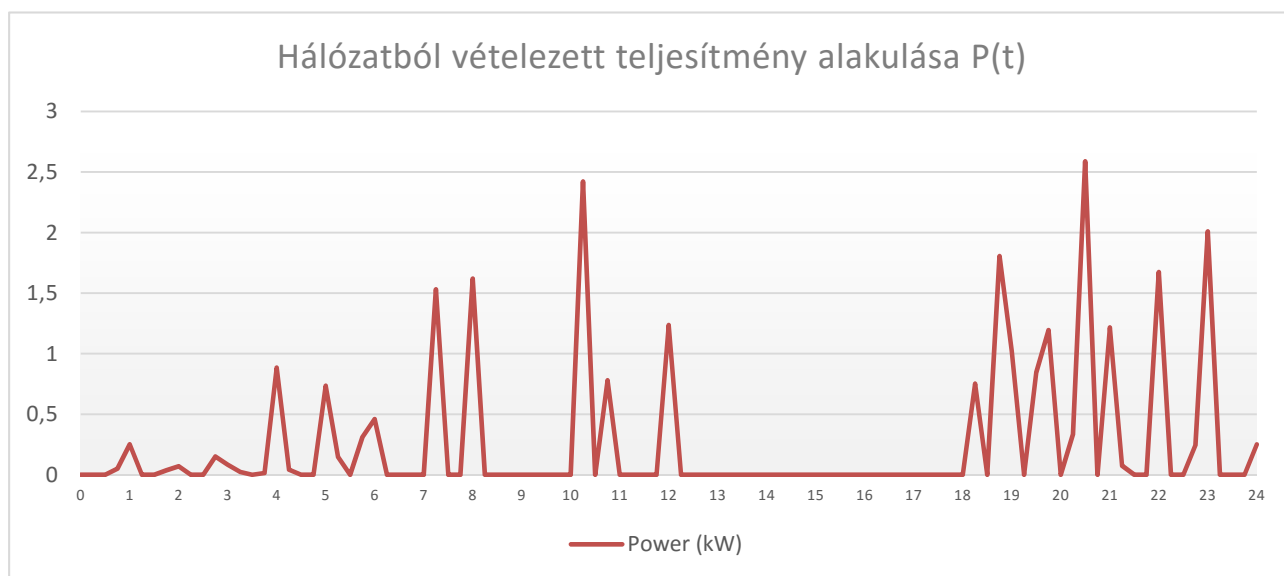
A megbízhatósági tartalékképzés esetén jól kivehető a kapacitásokkal kapcsolatos megkötések üze. A maximális kapacitás 40 kWh, a maximális teljesítmény pedig 20 kW. A helyi betáplálás visszakapcsolásakor látható egy feltöltési ciklus. A modellben az energia a teljesítmény idő szerinti integráljából nyerhető,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

6.4 1. Stratégia: virtuális szigetüzem megvalósítása

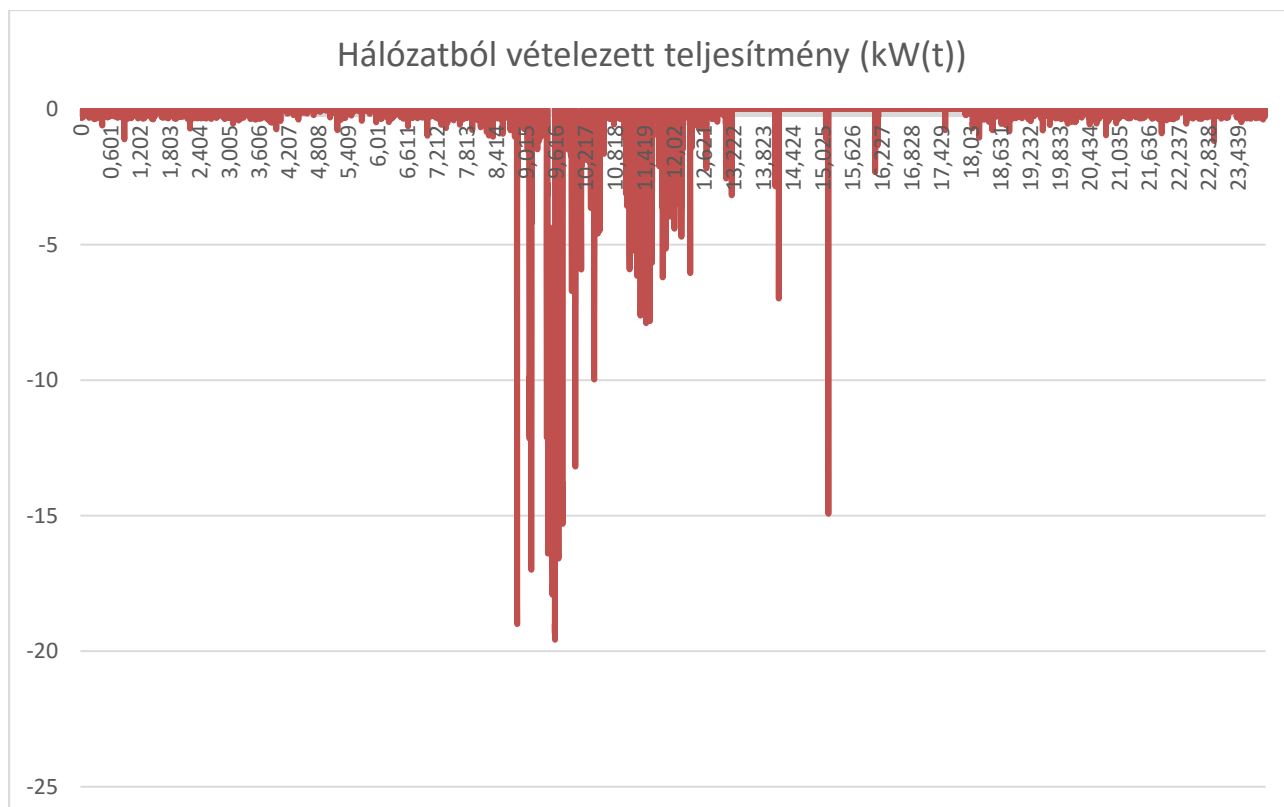
Az első megvalósított vezérlés célfüggvénye a hálózathoz vételezett energia minimalizálása (és emellett a visszatáplált energia minimuma is, a helybeni zöldenergia felhasználás is megjelenik. Az algoritmus lényege a nettó áramlás számításából adódó érték kompenzálása a tároló berendezés segítségével: 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 időléptékkel készültek számítási eredmények.



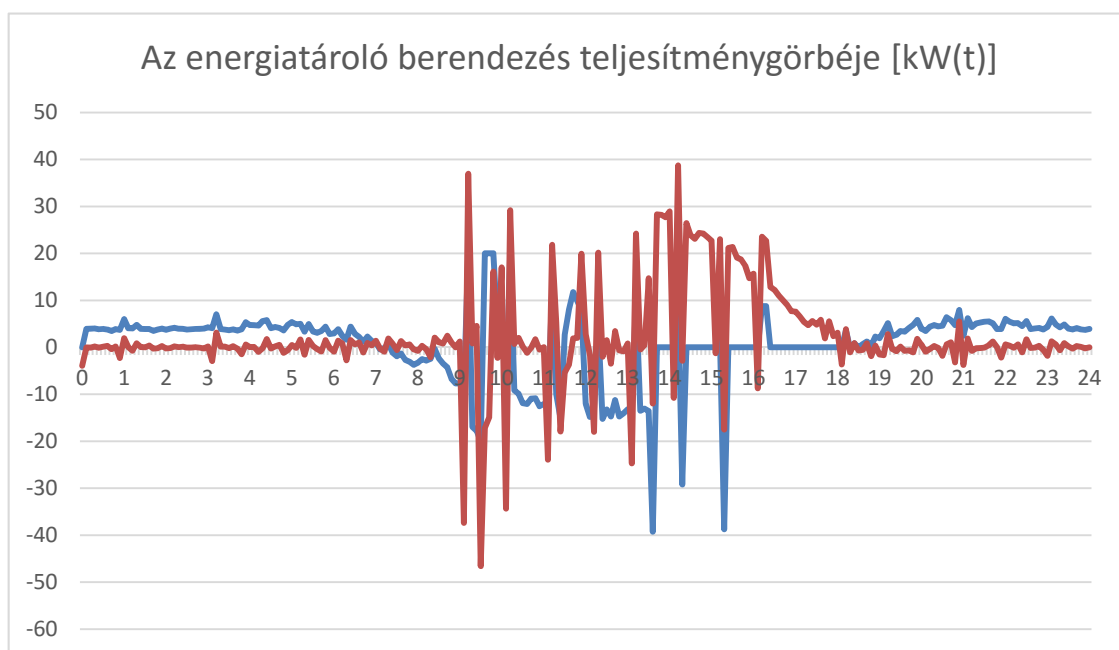
6-8. ábra: Energiatároló paraméterek változása 15 perces időléptékben megvalósított virtuális szigetüzem esetén



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



6-10. ábra: Hálózathál vételezett teljesítmény másodperces nagyságrendű időlépték esetén



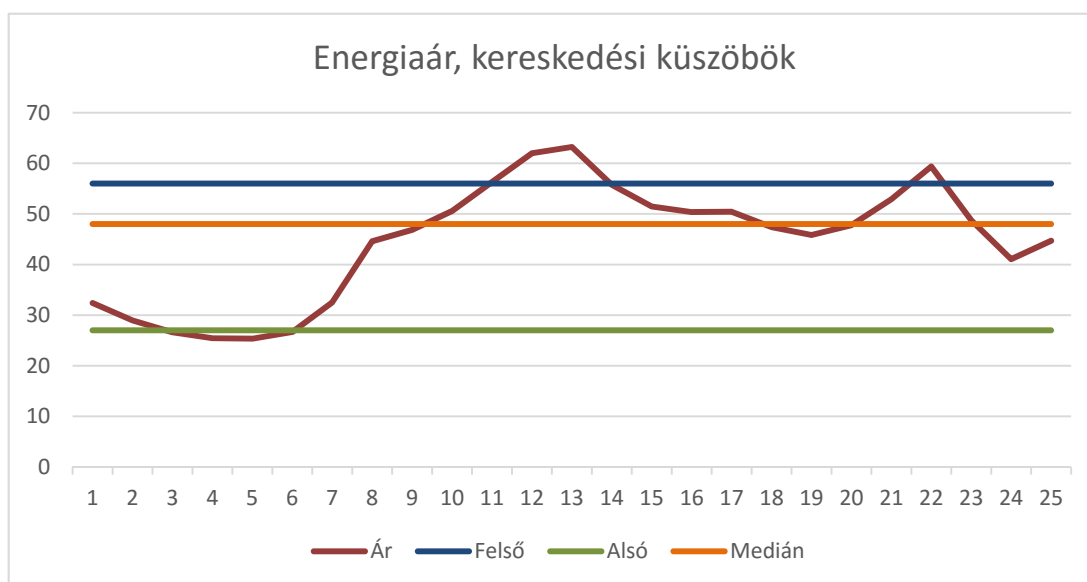
6-11. ábra: Energiatároló teljesítménye és a hálózati csatlakozási ponton történő áramlások összevetése (24 óra)

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.

6.5 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 (azaz a bemeneti görbe alapján megállapított árban) megadásában van figyelembe véve, de mint majd később említésre is kerül, a hatásfok is bekerült az energiatároló berendezés modelljébe.

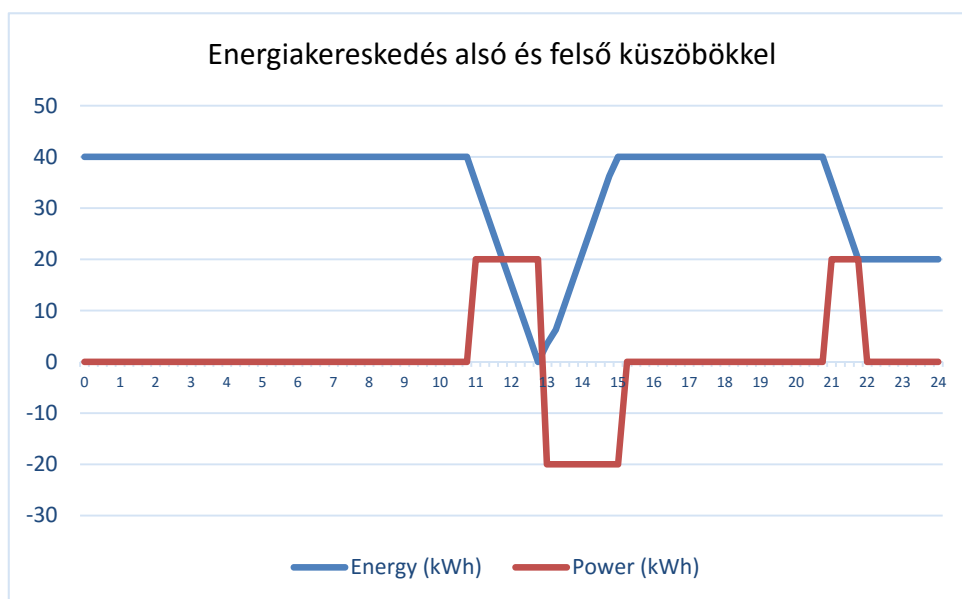


6-12. ábra: Energiaár alapú kereskedési küszöbök

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:

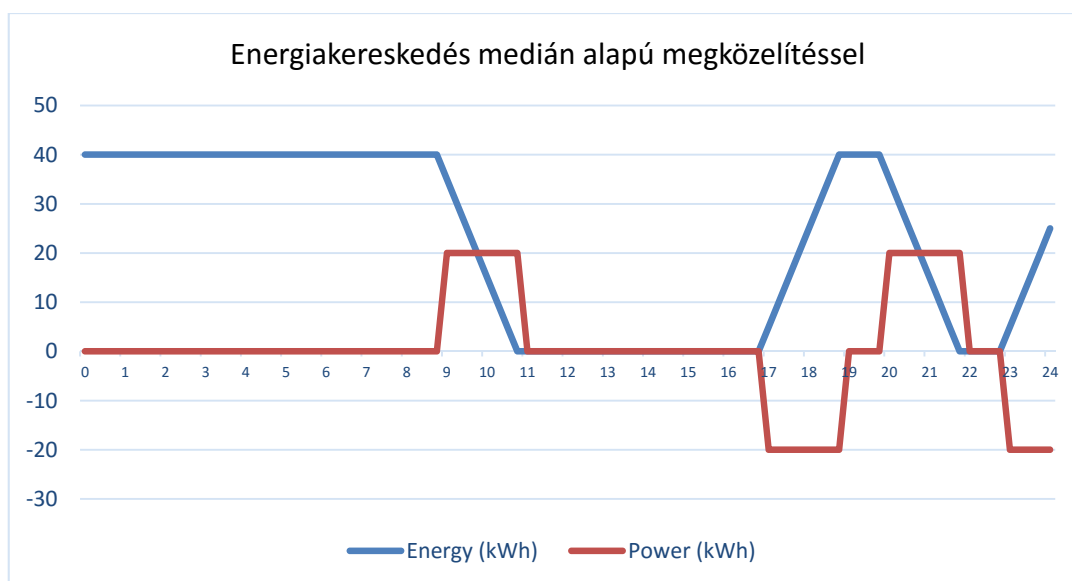


6-13. ábra: Energiakereskedés felső és alsó határértékekkel

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.

6.6 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).

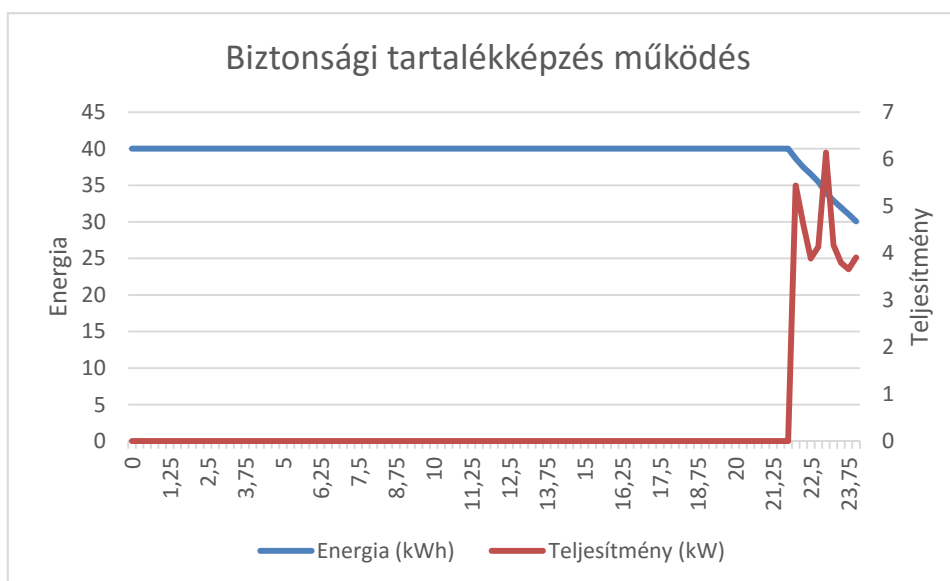


6-14. ábra: Energiakereskedés középértékes döntési küszöb alapján

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

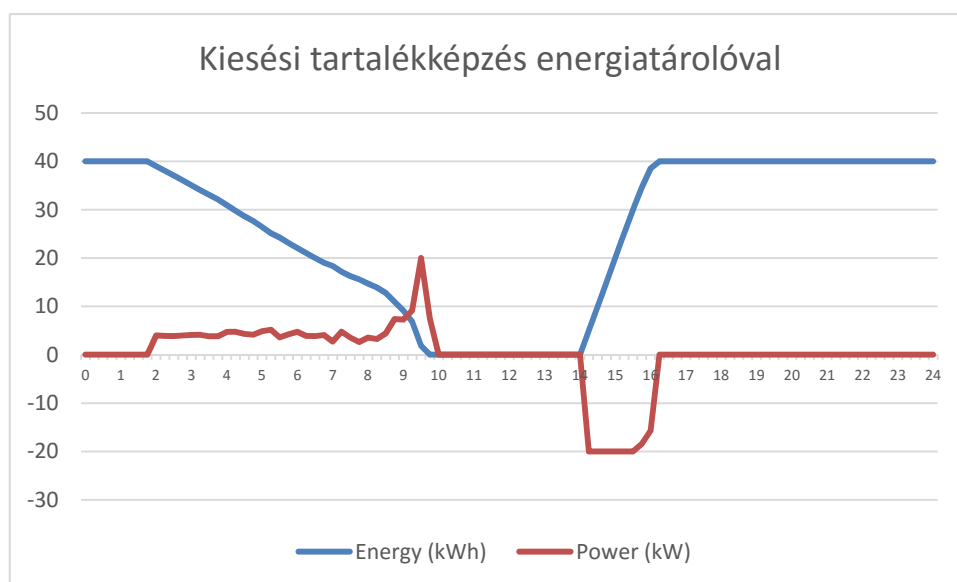
6.6.1 4. Stratégia: Biztonsági tartalékképzés a lokális termelés kiesésének kompenzálására

A helyi megújuló energiaforrások termelése kulcsfontosságú, meghibásodás esetén az ellátás komoly költségeket von maga után. Az algoritmus lényege, hogy figyeli egy kulcsfontosságú betáplálás (esetünkben napelemek) 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.

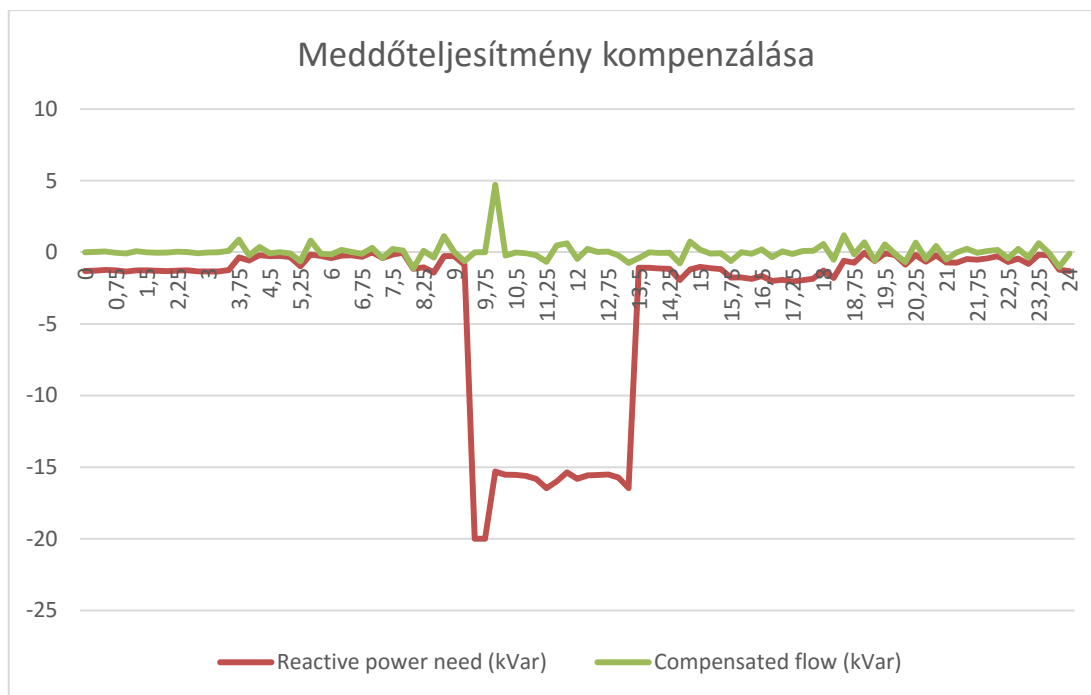


6-16. ábra: tartalékküzem egy korai kiesés és későbbi visszaállás esetén (24 óra)

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.

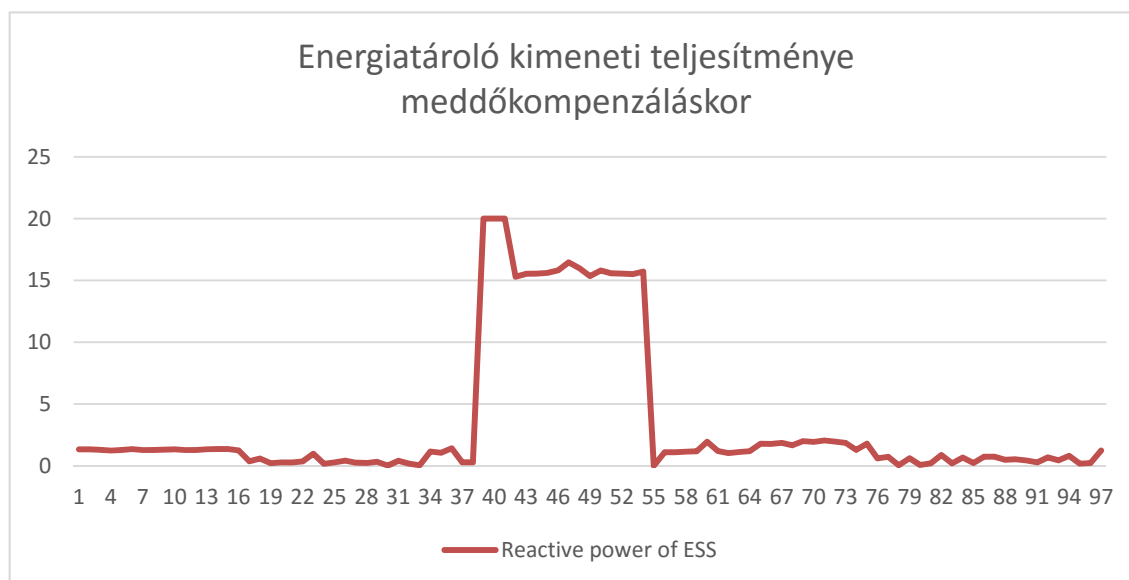
6.7 Menetrendszerű meddőteljesítmény-kompensáció

A vizsgált hálózaton a locsoló berendezések meddőteljesítmény felvétele meghatározó nagyságú. Ez kiváló környezetet biztosít egy kompenzálást végző algoritmus tesztelésére. A megvalósított stratégia nem kimondottan egy fogyasztó (vagy csoport) igényeit veszi figyelembe, hanem a teljes hálózaton létrejövő viszonyokat. A közvilágítás és pályavilágítás valamint az irodai csoport is rendelkezik Q karakterisztikával. A locsolók működésénél feltételezett a bekapcsolási időpont ismerete (az első ütemben egy tüske jelentkezne a kompenzált áramlásban) valamint a 20 kW-os korlát. A folyamat viszonylag egyszerűen adaptívva tehető, ha a bekapcsolási és kikapcsolási időpontok ismertek a kritikus fogyasztóra: a vizsgált időszakban a teljesítményértékeket változókból tároljuk, majd a következő ciklus (esetünkben nap) során figyelembe vesszük. A múltbeli értékek sorozatához akár súlyozott átlagolással is adhatjuk az aktuális értéket, ezáltal növelve a vizsgált időszakok számát. A stratégia megvalósításakor az energiatároló kimeneti teljesítménye tisztán reaktív, semmilyen más célt nem szolgál.



6-17. ábra: Meddőteljesítmény kompenzálás: az eredeti és a kompenzált görbe összevetése

A kiinduló meddőviszonyok és a kompenzált eset közt jelentős eltérés tapasztalható. Érdekes azonban, hogy a követés miatt a fluktuáció a kisebb igényű időszakokban jelentősebb (időlépés finomításával javítható). Az 5 kVar maximumérték igen jónak mondható az eredeti viszonyokhoz képest.

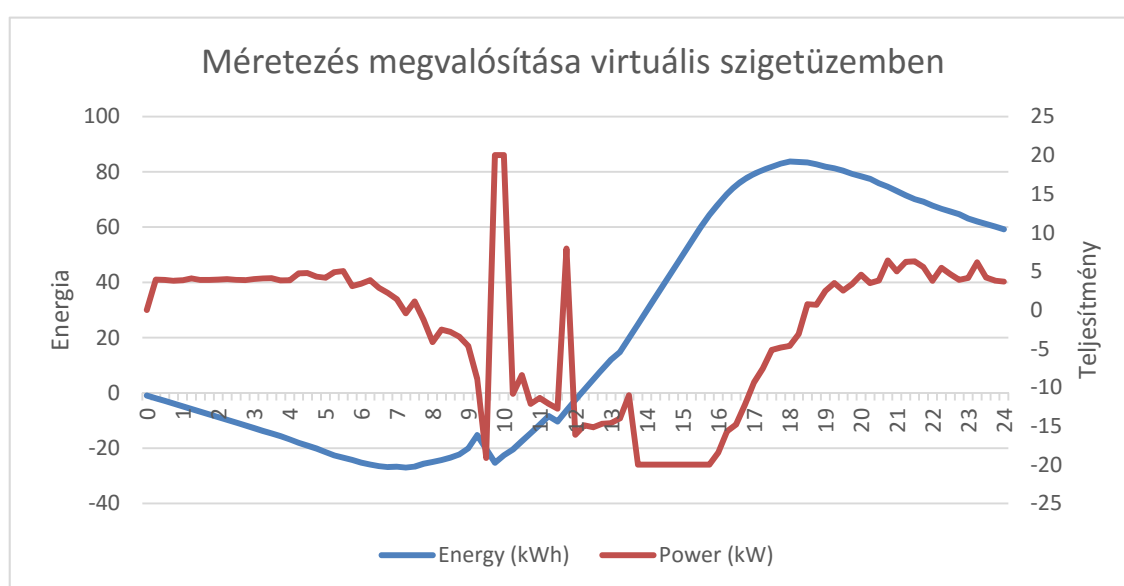


6-18. ábra: Meddőteljesítmény kompenzálása: az energiatároló berendezés kimeneti teljesítménye

Az energiatároló berendezés kimeneti teljesítményén jól megfigyelhető a locsoló berendezések igényének kompenzálása. A vizsgált hálózaton domináns értékek kiválóan alkalmasak egy eszközre specifikált kompenzálás működtetésének bemutatására. Ez a megoldás kiválóan alkalmazható lehet párhuzamosított műveletekben.

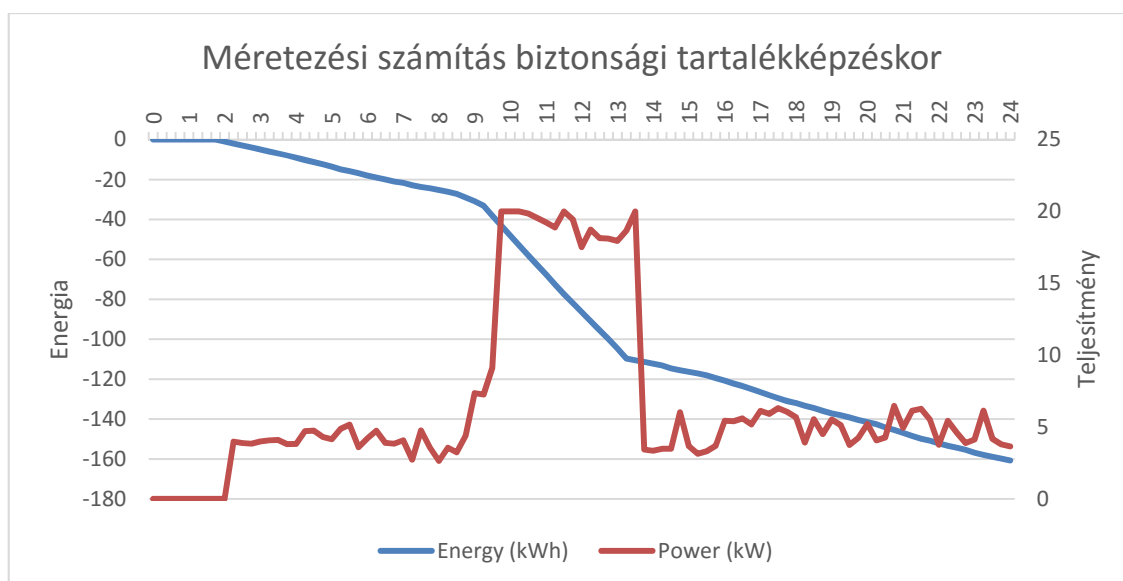
6.8 Méretezési műveletek

Az egyik legsarkalatosabb kérdés az energiatároló berendezések telepítésekor a szükséges méret definiálása. Ennek segítésére az alábbiakban egy rögzített teljesítményértékkel dolgozó kapacitásigény számítására alkalmas eljárás kerül bemutatásra. A lényeg, hogy az eddigiekkel ellentétben az energia változót másképp használjuk: a szimuláció kezdetekor értéke 0, majd minden korlát nélkül a teljesítményállítások alapján szabadon változik a folyamat során. Ez alapján kapunk egy olyan görbét, amelynek nagyobbik szélsőértéke megadja a szükséges kapacitást. Ebből az értékből alkothatunk egy számunkra szükséges kapacitásigényt: alkalmazható rá biztonsági tényező, vagy sztochasztikus adatok esetén többszöri ismétléssel alkothatunk egy várható optimális értéket.



6-19. ábra: Méretezési algoritmus virtuális szigetüzemben

Első esetben a virtuális szigetüzemű működés esetén szükséges kapacitás figyelhető meg. A napelemes túltermelés hatására a lényeges faktor az, hogy mennyi energiát szeretnénk tárolni a következő szakaszra. Ez a gondolatmenet a magas napelemes termelés mellett alapvetően elősegíti a valós szigetüzem kialakítását is, azonban gondolni kell a hosszabb távú alacsonyabb termelési időszakokra is. A szélerőmű hálózatra táplálásának megkezdésével a vizsgált demonstrációs hálózat szigetüzemű működésének lehetőségei sokkal bővebbek lesznek, egy hosszabb távú kapacitásigény a csatlakozás után érdekes (és gyakorlatban is jól felhasználható) eredménnyel is szolgálhat.



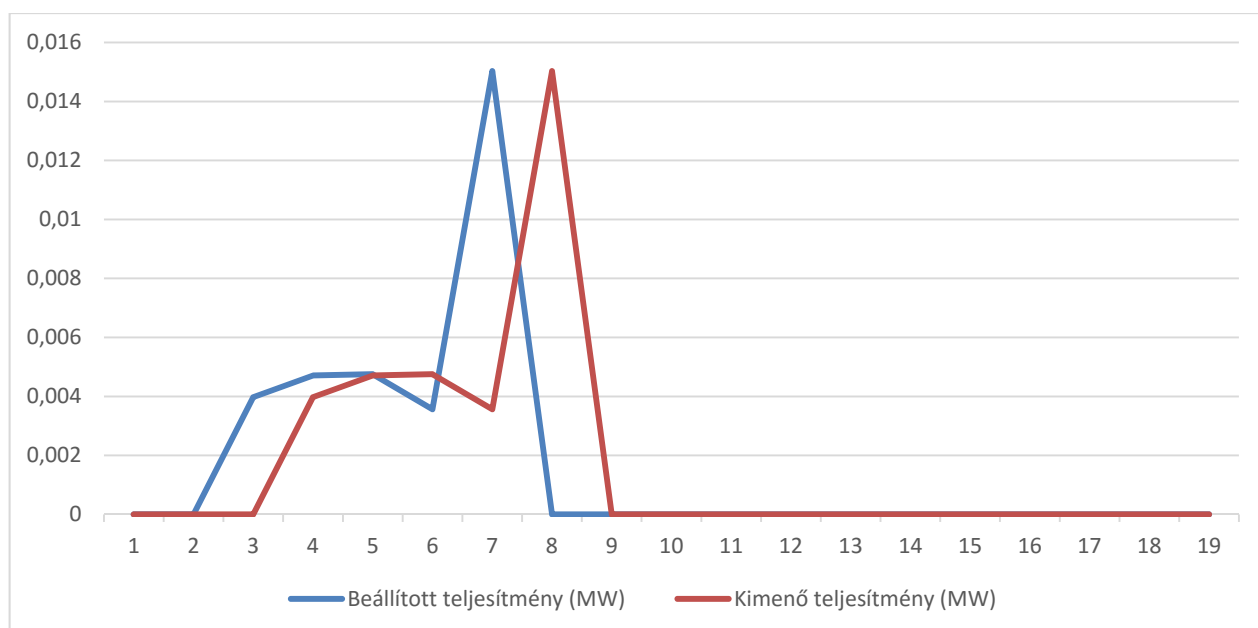
6-20. ábra: Méretezési algoritmus biztonsági tartalékképzéskor

A biztonsági tartalékképzés kapacitásigénye a 6-20. ábrán a következő körülmények közt számítódott: hajnali 2 órakor a fő betáplálás (napelemes rendszer: mivel éjszaka nincs lokális energiaforrás, így ez a gondolatmenet a legalkalmasabb a stratégia vizsgálatára, bár ekkor az inverteres önfogyasztás miatt a napelem gyakorlatilag fogyasztó a rendszerben) megszűnik, ezért az energiatároló hatásos teljesítmény-áramlás követést indít. A betáplálás ebben a szimulációban nem indult újra, így a nap végéig üzemelő kompenzálás végén egy igen nagy szükséges kapacitást kapunk (ez gyakorlatilag az összefogyasztás a 2-24 órai időszakban).

6.9 Fejlesztések a tapasztalatok alapján, továbblépési lehetőségek

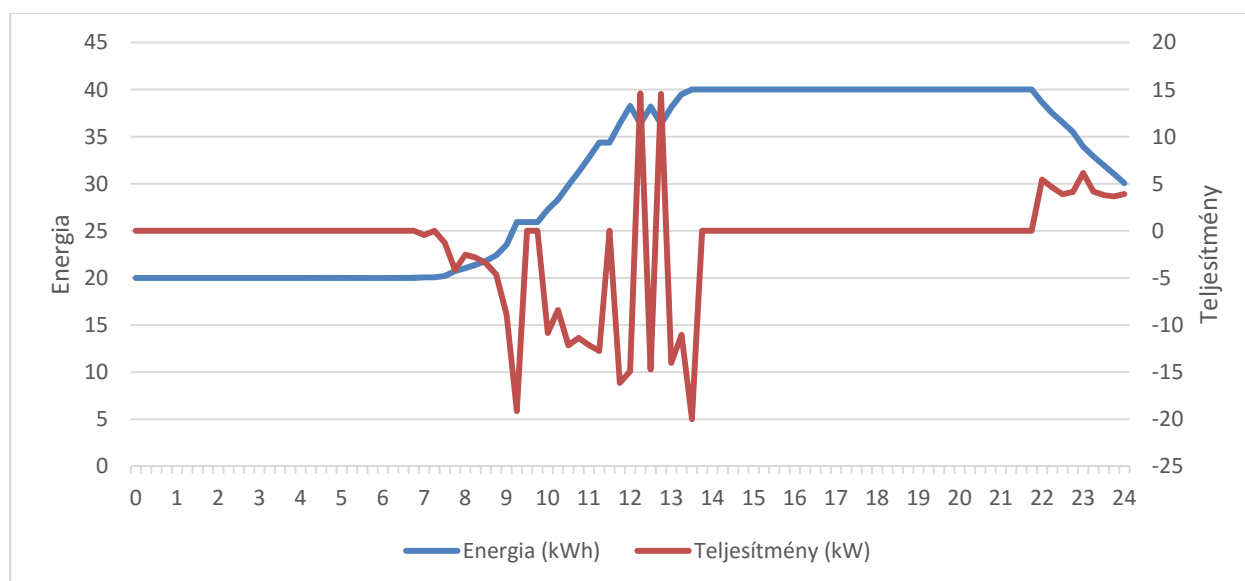
A leírt szimulációk alapján felvetődött néhány fejlesztési lehetőség, melyek közül több meg is valósult az első körös eredmények feldolgozása után. Az első ilyen fejlesztés a berendezések átalakítási veszteségeit figyelembe vevő hatásfok változó, melyet a felhasználó megadhat a felületen (alapértelmezett értéke 100%). Ez valóságosabbá teszi a viselkedést, műszaki és gazdasági szempontból elemezhetővé teszi a szimulációt. 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 válaszüthely eltelével mehet végbe a vizsgálat után. Ezért minden teljesítményváltoztatáskor be kell iktatni egy válaszüthely iterációt is.



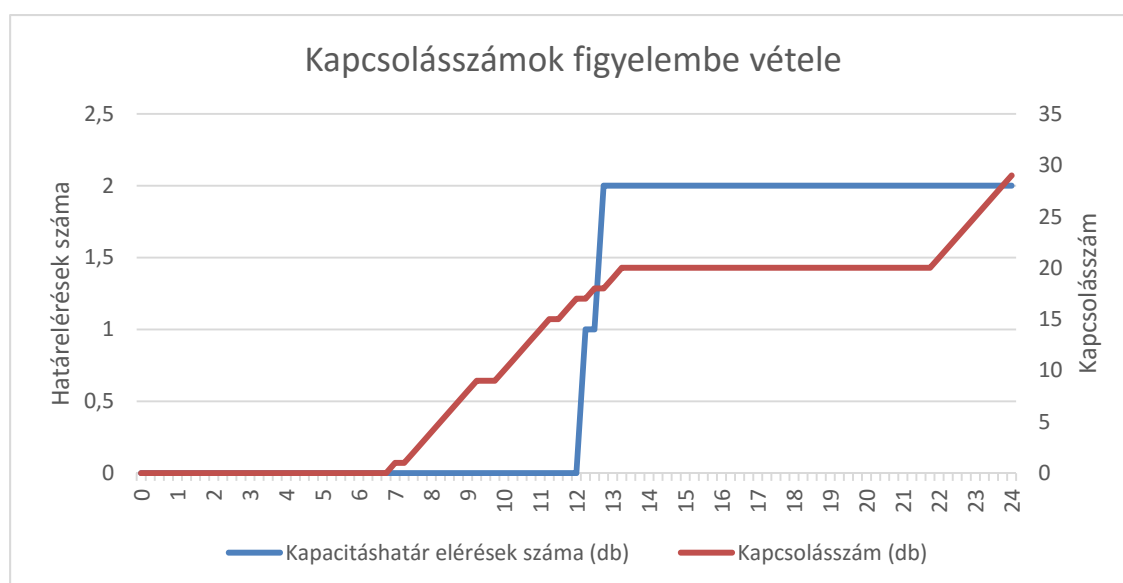
6-21. ábra: válaszidő ábrázolása adott eltolási idővel

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.



6-22. 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 meredekségű az energiaváltozás az egyes időlépésekben, mint a teljesítmény.



6-23. 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.

Jelenleg az adaptivitás az áramláskövetés elvében jelenik meg, erre a külső objektumokba való adatmentés és azok ciklusonkénti feldolgozása és frissítése lehet egy fejlettebb megoldást. Prediktív eljárásokra a szimulációs eredmények alapján egy menetrendkészítés alkalmas, ez például sok ismételt szimuláció alapján tesztelhető a konkrét hálózaton. Érdekes lehet hosszabb adatsorokkal vizsgálni, valamint a valóságos működés közelítésére sztochasztikus elemeket tartalmazó karakterisztikákat alkalmazni. A célom az eredmények közlésével egy áttekintés nyújtása volt a modellezés és szimuláció funkcióiról és képességeiről, a valóságosságot közelítő adatokhoz több bemeneti modell feldolgozása lehet járható út.

6.10 Gyakorlati felhasználás

A modell összességében alkalmas arra, hogy az elosztói engedélyes hálózati fejlesztéseinek terveit tesztelje, újragondolja, optimalizálja. A tárolók minden főbb, a 2. fejezetben felsorolt fizikai tulajdonságát befolyásolhatja, ezáltal összetetté, mégis átláthatóvá téve a kiválasztási folyamatot. 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, attól függően, hogy milyen igényeik vannak. A DigSilent Power Factory környezetében hozzáférhető változók lehetővé tesznek különféle összetett analíziseket. Ezáltal az eddig hosszadalmas fejlesztések előzetes megvalósíthatóságát vizsgáló tanulmányok gyorsabban és mélyebb tartalommal készülhetnek el. Fontos megemlíteni, hogy a technológiák leírásakor vizsgált paraméterek nagy része megjelenik a modellben, így a valóságos viselkedés jól közelíthető.

A dolgozat készítése során az ELMŰ Nyrt. szolgáltatta az adatokat számomra a modellezéshez. Emellett lehetőségem nyílt a felsorolt algoritmusok tesztelésére valós környezetben is, néhány megkötéssel. A vizsgált hálózatrészen SCADA folyamatirányító rendszer működik, az akkumulátor vezérlését a CiCode nyelvben lehet implementálni. Az algoritmusok elvi működése helyes, így a későbbiekben ésszerű megkötések mellett a gyakorlatban végzett tesztekől származó mérési eredményekkel is lehet a hatásokat vizsgálni. [21]

7 Kiértékelési lehetőségek

7.1 Műszaki paraméterek befolyásolása

Az előző fejezetben felvázolt jelleggörbék alapján megfigyelhető a hálózat teljesítményáramlási viszonyainak változása. A különböző esetekben a stratégiáknak megfelelően eltérő az, hogy pontosan milyen hatás volt a lényeges, de a működés alapvetően minden esetben szemléletes. Az alábbi kiértékelésekben minden esetben 15 perces szimuláció eredményeit dolgoztam fel. Az energiakereskedő stratégiák nem a hálózat optimalizálását tűzik ki célul, így hatásait csak gazdasági szempontból vizsgáltam.

7.1.1 Virtuális szigetüzem

Virtuális szigetüzem esetén a leglényegesebb paramétereink a hálózatról vételezett maximális teljesítmény és a teljes vételezett energia.

7-1. táblázat: Virtuális szigetüzem kiértékelése

	Teljes vételezett Energia (kWh)	Maximális teljesítmény* (kW)
Vezérlés nélkül	63,61	20
Vezérléssel	16,96	3

A maximális teljesítményadatok a vezérlés implementáltságát feltételezik (*). Jól látható a korábban már taglalt tény, hogy a szigetüzemű működés hatékonyságának növelésére csökkenteni kell az időlépéseket. Ennek ellenére az adott tároló méretek (amelyek a hálózaton ténylegesen működő berendezés alapján lettek a modellben megadva) mellett a működés jó irányba mozdult el.

7.1.2 Biztonsági tartalékképzés

Tartalékképzés esetén a legfontosabb az, hogy bizonyos ideig rendelkezésre álljon a kritikus infrastruktúrák számára az ellátás. A betáplálás visszakapcsolás gyorsaságának függvényében tehető mérhetővé a stratégia. Esetünkben a locsolási időszakról eltekintve a rendelkezésre álló teljesítmény és tároló kapacitás elégségesnek bizonyulna.

7.1.3 Meddőkompenzáció

A meddőteljesítmény áramlásában a csúcstértek körülbelül negyedére csökkent, valamint a locsolási időszak okozta huzamosabb nagy igény teljesen eltűnt.

7-2. táblázat: Meddőteljesítmény igények kompenzálása

	Teljes vételezett Energia (kVarh)	Maximális meddő-teljesítmény* (kVar)
Vezérlés nélkül	-78,36 (ind)	20 (ind)
Vezérléssel	3,84 (kap)	4,699 (kap)

7.2 Gazdasági elemzés lehetőségei

7.2.1 Egyszerű megtérülés-számítási modell

A stratégiák gazdasági vonzatait egyszerű megtérülés számítási modellel reprezentáltam. Az adatok a költségelemzésben LCOE adatként megjelenített irodalom és a már korábban felhasznált HUPX adatok alapján képződik. Az egyszerűség kedvéért az egynapos változások alapján extrapoláltam az eredményt hosszútávra. Ez azt jelenti, hogy a működés alapján készült teljesítményáramlásokat felbontottam vételezési és visszatáplálási részre. Mivel egy adott időlépésben a tároló teljesítménye konstans, így az időlépésben az energiamennyiség számítható táblázatosan. Ezután a már korábban bemutatott áradatokkal felszorozva az egyes órák energiaforgalmát megkaptam a költségeket. Ezek összegzésével a napi működés összbevétele megadható. Az alábbi táblázatban összegeztem a környezet változását, melyet a megtérülés során figyelembe kell venni.

7-3. táblázat: Hosszútávú adatok a számításhoz

	Inflációs faktor (kumulált, 3%)	Diszkont-faktor	Társasági adókulcs	Áram díja (kWh/Ft)
			27%	10%
2014	1,03	1	27%	30
2015	1,06	1,04	27%	33
2016	1,09	1,08	27%	42
2017	1,13	1,12	27%	46,2
2018	1,16	1,17	27%	43
2019	1,19	1,22	27%	47,3
2020	1,23	1,27	27%	44
2021	1,27	1,32	27%	48,4
2022	1,3	1,37	27%	45
2023	1,34	1,42	27%	49,5
2024	1,38	1,48	27%	46
2025	1,43	1,54	27%	50,6
2026	1,47	1,6	27%	47
2027	1,51	1,67	27%	51,7
2028	1,56	1,73	27%	48
2029	1,6	1,8	27%	52,8

	Inflációs faktor (kumulált, 3%)	Diszkont-faktor	Társasági adókulcs	Áram díja (kWh/Ft)
			27%	10%
2030	1,65	1,87	27%	49
2031	1,7	1,95	27%	53,9
2032	1,75	2,03	27%	50
2033	1,79	2,11	27%	50,55

A folyamatban a költségelemeket 2 csoportba soroltam: a tőke költség a berendezés telepítésének minden költségét (és az esetleges cikluson belüli cserét) tartalmazza. Emellett a működési és karbantatási költségek minden évre az adott árszinten számíthatók.

A számított működési bevételek és költségek a következőképp alakultak:

7-4. táblázat: Bevételek és költségek a vizsgált stratégiák esetén

	Virtuális szigetüzem	Energia-kereskedés alsó és felső küszöbökkel	Energia-kereskedés középső érték alapján
Bevétel (€)	6,433	8,085	14,476
Kiadás (€)	0,332	3,176	6,235
Nettó (€)	6,102	4,909	8,241

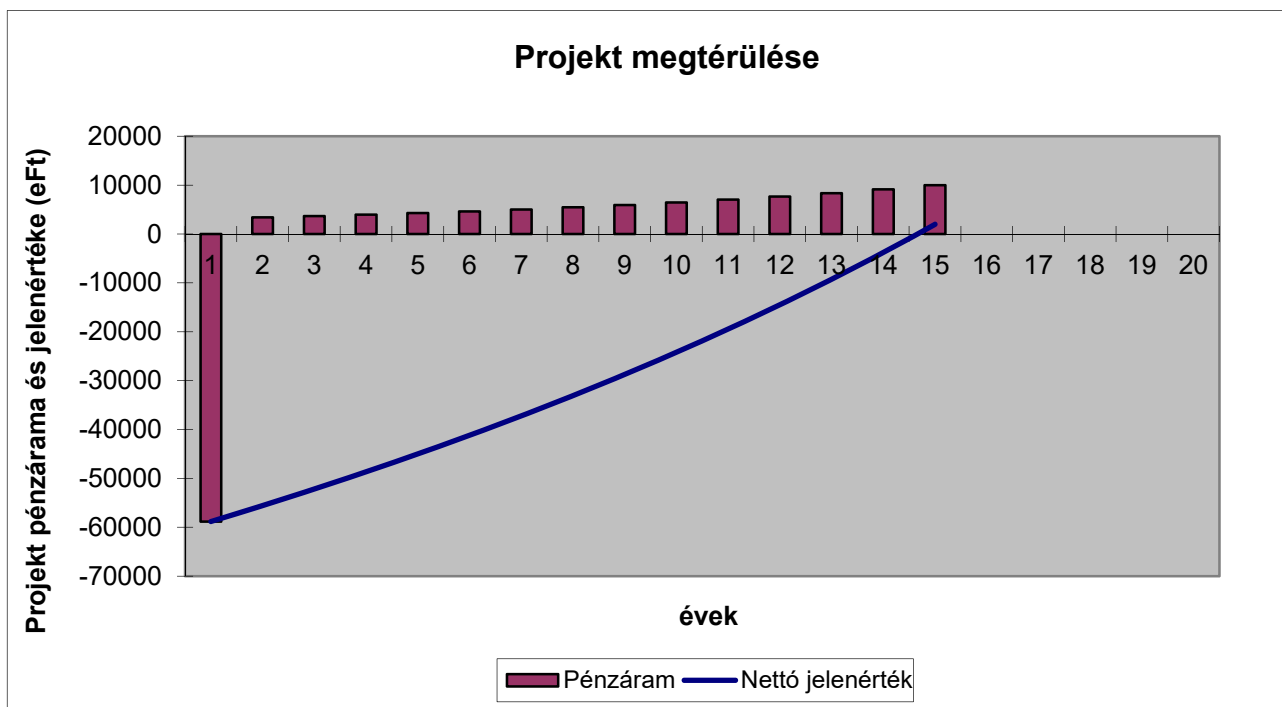
A technikai alapadatok (teljesítmény és energia) alapján a költségeket a következőképp határoztam meg: adott egy egységnyi tőke költség \$/kWh formában, ebből a kívánt méret alapján számítható a teljes tőke költség. A működési és karbantatási költségek hasonló elven működnek. A vizsgálat 15 éves időtartamot vesz figyelembe, ez a technológiai leírások alapján egy akkumulátor számára optimális. Li-ion technológiát választottam. Emellett a költségekben a napelemes rendszert is bevettem, hogy a hálózatrész által generált energiaforgalom alapján számíthatassak megtérülést. Alább bemutatom a 3 stratégia esetén felvett adatokat és a számítások eredményét.

7.2.2 Virtuális szigetüzem

7-5. táblázat: virtuális szigetüzem kiinduló adatai

Technikai alapadatok	
P [kW]	20
E [kWh]	50
Capital /kWh	350
O&M /kWh	9
Beruházás teljes költsége (USD)	75000
Capital	35000
Solar system	40000
Fixed O&M [USD/Year]	450
BEVÉTEL	
Energiaforgalom változtatás nyeresége [Ft/nap]	1891,3

A virtuális szigetüzemű működés a tesztek alapján 50 kWh kapacitással már nagy megbízhatósággal működik. A működési és karbantartási költségei alacsonyabbak, mint a microgrid vezérlés elv esetén. A bevételi érték 310-es forint/euró árfolyam mellett alakul ki. A megtérülés nagyjából a 15. év környékére várható ilyen premisszák mellett.



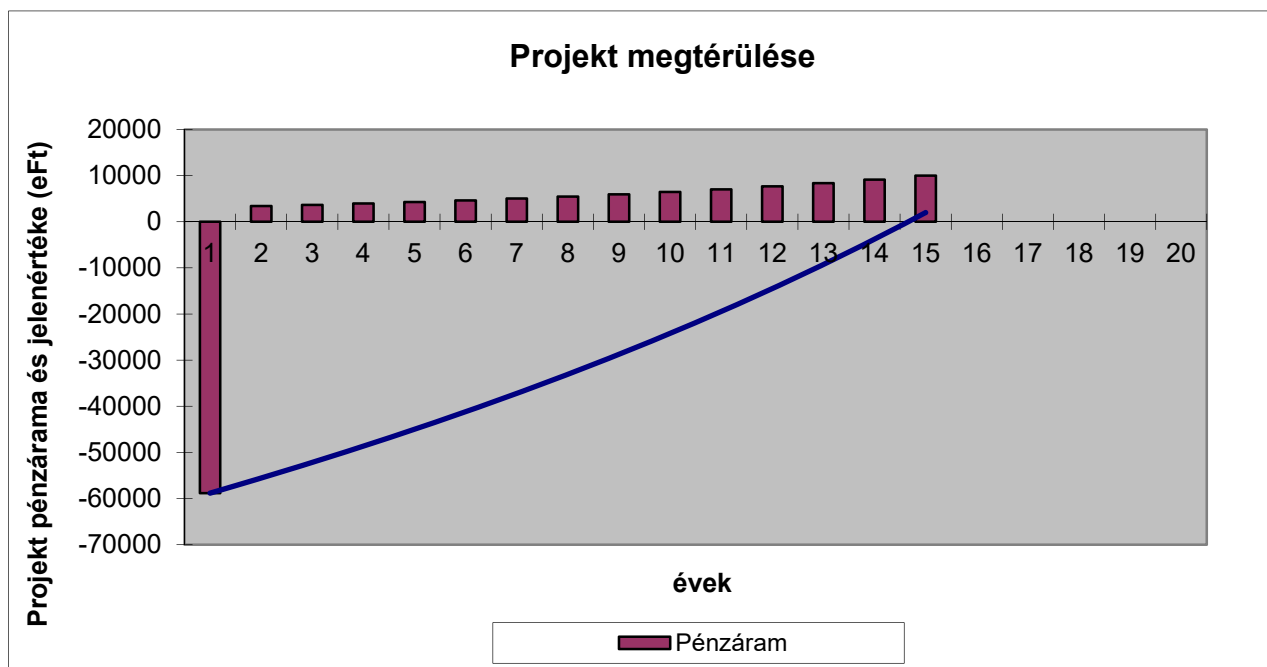
7-1. ábra: a telepítés megtérülése

7.2.3 Energiakereskedés 1.

7-6. táblázat: Energiakereskedés 1. kiinduló adatai

Technikai alapadatok	
P [kW]	20
E [kWh]	40
Capital /kWh	550
O&M /kWh	12
Beruházás teljes költsége (USD)	62000
Capital	22000
Solar system	40000
Fixed O&M [USD/Year]	480
BEVÉTEL	
Energiaforgalom változtatás nyeresége [Ft/nap]	1522,1

Az első stratégia alsó és felső határértékekkel dolgozik (3 legmagasabb és 3 legalacsonyabb ár: ez gyakorlati esetben előre nem ismert, de hasonló becslő algoritmus kialakítható), így kevesebb kapcsolást és teljes kisütést végez, kisebb méretigénye van. Megtérülését alapvetően ez okozza a választott kapacitásérték mellett.



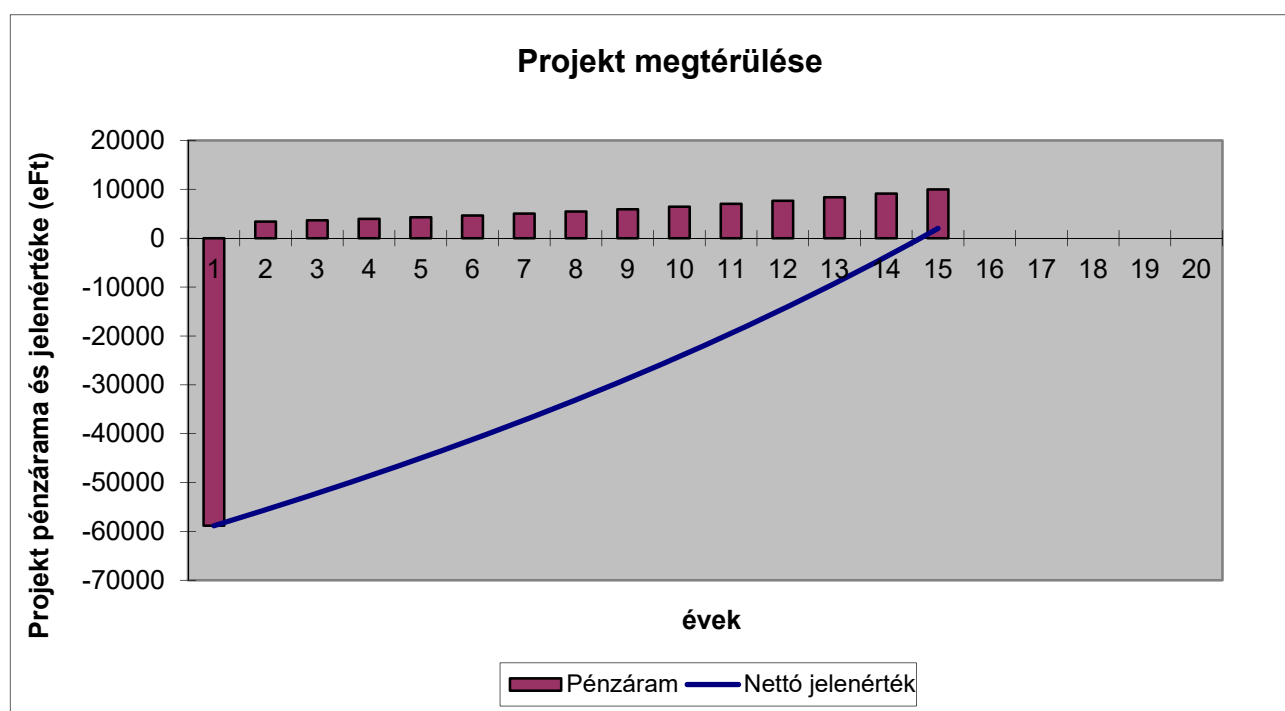
7-2. ábra: a telepítés megtérülésének szemléltetése

7.2.4 Energiakereskedés 2.

7-7. táblázat: energiakereskedés 2. kiinduló adatai

Technikai alapadatok	
P [kW]	20
E [kWh]	100
Capital /kWh	550
O&M /kWh	12
Beruházás teljes költsége (USD)	95000
Capital	55000
Solar system	40000
Fixed O&M [USD/Year]	1200
BEVÉTEL	
Energiaforgalom változtatás nyeresége [Ft/nap]	2554

A legmagasabb bevételt produkáló algoritmus a középső értéket döntési küszöbként felhasználó energiakereskedés volt. Ennek magas kapacitásigényéből és a kapcsolások gyakoriságából kifolyólag azonban magasabb költségei is vannak, ez okozza a megtérülés egybeesését a korábbiakkal.



7-3. ábra: a telepítés megtérülése

7.2.5 Továbblépési lehetőségek

A premissák kialakításakor viszonylag magas energiaár változást feltételeztem. Ahogy a 4. fejezetben szó esett róla, a technológiák költségeinél várható visszaesés, ez pozitív irányba mozdíthatja el a telepítési folyamatokat.

Észrevehető, hogy a kapacitásértékeket úgy választottam meg, hogy minden telepítés esetén a leírási idő végére a számítás elérje a pozitív mérleget. Ez az 1 napos adatok alapján reális kapacitásértékeket mutat, ilyen típusú elemzéshez azonban mind a bevétel realizálásában, mind a szükséges paraméterek meghatározásában több adatra lenne szükség ahhoz, hogy biztonsággal kijelenthessük, a projekt megtérül.

Fejlesztésként elképzelhető a rendelkezésre álló tartalék „beárazása”, vagyis az ellátásbiztonság gazdasági előnyként értelmezése. Ezentúl a hálózati veszteségekre való vizsgálatok is érdekes vonalat képezhetnek megtérülési szempontból.

A hosszabb időtartamot felölelő szimulációk jobb bemenet biztosíthatnak a bevételi oldalra, míg a költségek értelmezéséhez a méretezés többszöri futtatása szükséges. Ennek ellenére ez az egyszerű modell egy jó képet ad arról, hogy szabadpiaci változások mellett az energiatárolóval támogatott megújuló energiaforrás integrációban rejlenek valós gazdasági lehetőségek.

8 Konklúzió

Célom a dolgozatban egy olyan modellezési és szimulációs eljárás, vezérlési stratégia eszköztár és kiértékelési eljárás megalkotása volt, mely segítségével gyorsan és hatékonyan vizsgálhatóak az energiatárolás hálózatfejlesztésben rejlő lehetőségei. Mivel a villamosenergia-termelés decentralizációja a közeljövőben széles körben végbemenő folyamat, így érdemes az okozott hatásokra megoldási lehetőségeket keresni, azokat vizsgálni, emelezni. A globális mozgatóerők jelen vannak, de a lokális szintű megvalósítások is hasznosak lehetnek az elosztóhálózat támogatására.

A motiváció bemutatása után elsőként a bemeneti adatokat gyűjtöttem össze: a technológiai lehetőségek főbb paraméterei és a hálózattámogató alkalmazások széles palettája jól mutatja, hogy rendkívül sok variáció képzelhető el a megvalósításokra. Fontos tényező továbbá a költségelemzés, a gazdaságossági (megtérülés) számítások során ezen adatokra támaszkodtam. A hálózatrészeket reprezentáló modellek megalkotásakor a szükséges megkötések betartásával tetszőleges hálózaton elvégezhetjük a vizsgálatokat, ezáltal az eljárás széles körben alkalmazható.

A vezérlési stratégiák részletes bemutatása után a demonstrációs hálózaton végzett tesztekkel a működés helyességét vizsgáltam, a karakterisztikus elemek reprezentálását mélyítettem el a pontosabb tesztek érdekében. A bemutatott 5 különböző stratégia (virtuális szigetüzem, biztonsági tartalékképzés, meddőteltjesítmény kompenzálás és energiakereskedés kétféle alapelv szerint) és a hozzájuk tartozó méretezési eljárások elvi működése egyaránt helyes. A szimuláció során az időlépték és időtartam valamint a tároló paraméterek egyaránt változtathatóak. Megvalósítottam továbbá kapcsolási műveleteket is a biztonsági tartalékképzés vizsgálatához.

Végezetül a vizsgált műszaki paramétereken elért változásokat összegeztem táblázatosan az elért változtatások bemutatásához. Emellett a rentábilis megoldások kereséséhez egy egyszerű megtérülés számítási modellen keresztül elemeztem a lehetőségeket. A generált adatok alapján a működés megfelelő mennyiségű bemeneti adat rendelkezésre állása esetén lehet műszakilag és/vagy gazdaságilag hasznos. Az algoritmusok tartalmaznak adaptív megoldásokat és illeszthető hozzájuk prediktív megoldásokat tartalmazó bemenetet generáló eljárás.

Összességében elmondható, hogy a dolgozatban ismertetett eljárás alkalmazható a hálózatfejlesztési beruházások elbírálására, ha a szükséges adatok a szimulációhoz és kiértékeléshez elérhetőek. A teljes folyamatban bemutatok egyszerű megoldásokat az ötlettől egészen a megvalósult projekt eredményeinek feldolgozásáig.

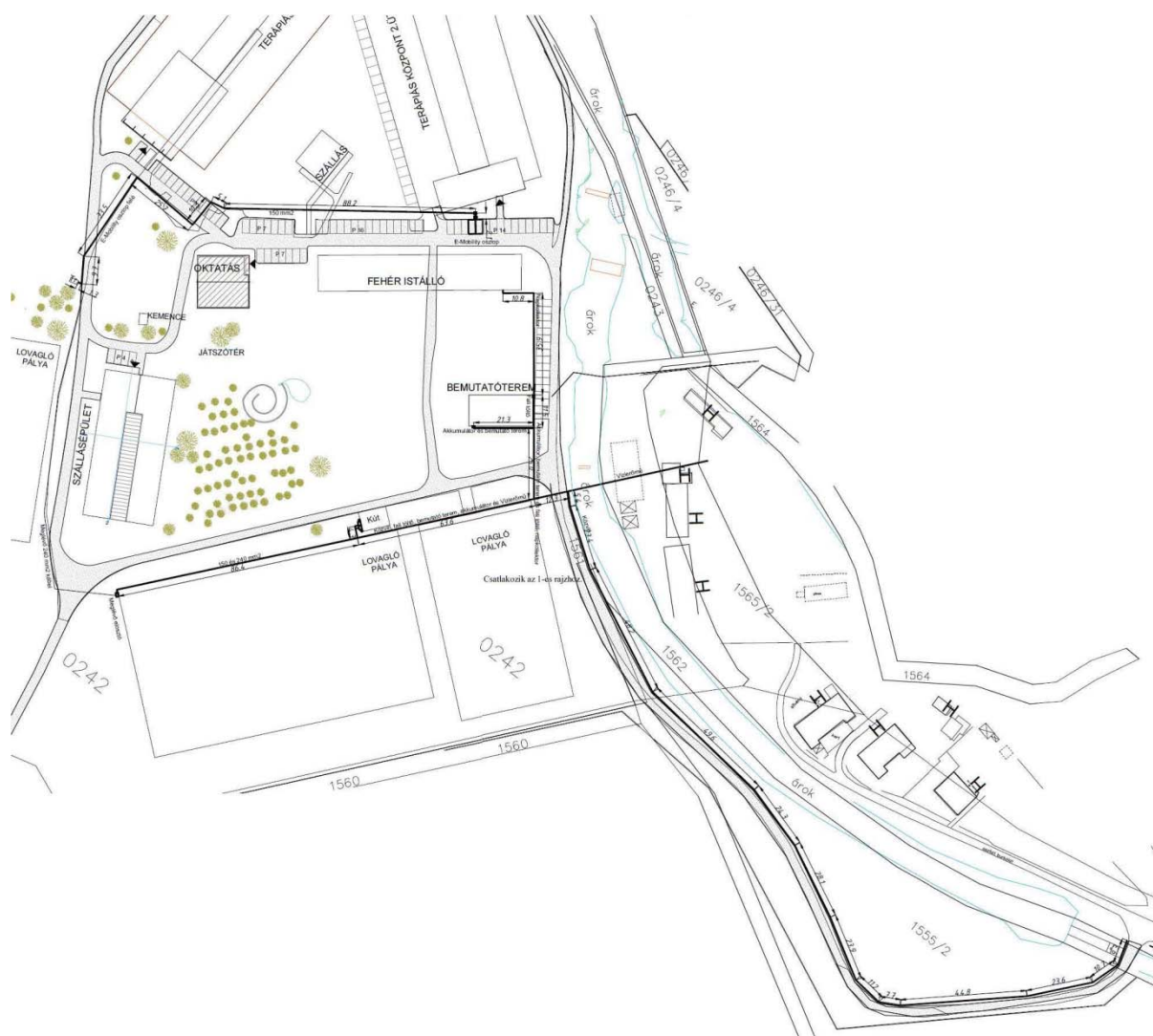
9 Irodalomjegyzék

- [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 implementáláshoz (Sasvári Gergely)
- [25] DigSilent Power Factory DigSILENT Programming Language User Manual (DigSILENT GmbH), 2003
- [26] Levelized Cost of Energy Storage Analysis, Lazard, 2015

F1 Demonstrációs modell: a fóti Élhető Jövő Park

F1.1 Az Élhető Jövő Park rövid jellemzése

A nagyjából 22 hektáros területen a Nemzetközi Gyermekekmentő 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]



9-1. ábra: a fóti hálózat helyszínrajza [22]

F1.2 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.

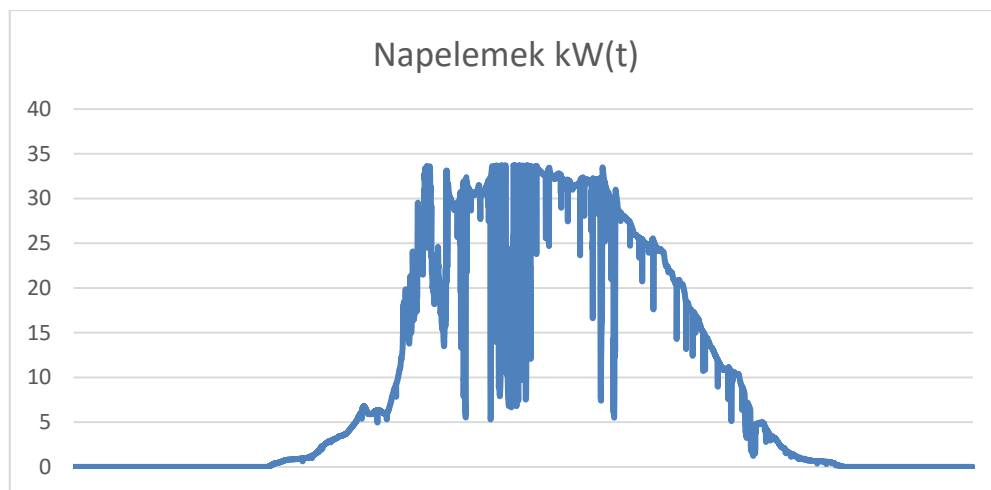
A következőkben a modell felépítésének lépésein keresztül megismerhető a vizsgálati lehetőségek komplexitása, a futtatható analízisek és a hozzájuk tartozó eredmények összessége, valamint a kiértékelési procedúrához szolgáltatott adatok formája. A hálózati elemekhez tartozó változók megadásával szolgáltatjuk 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 preprocesszáls 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 függvényvel 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.

F1.3 Villamos termelői egységek

F1.3.1 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.



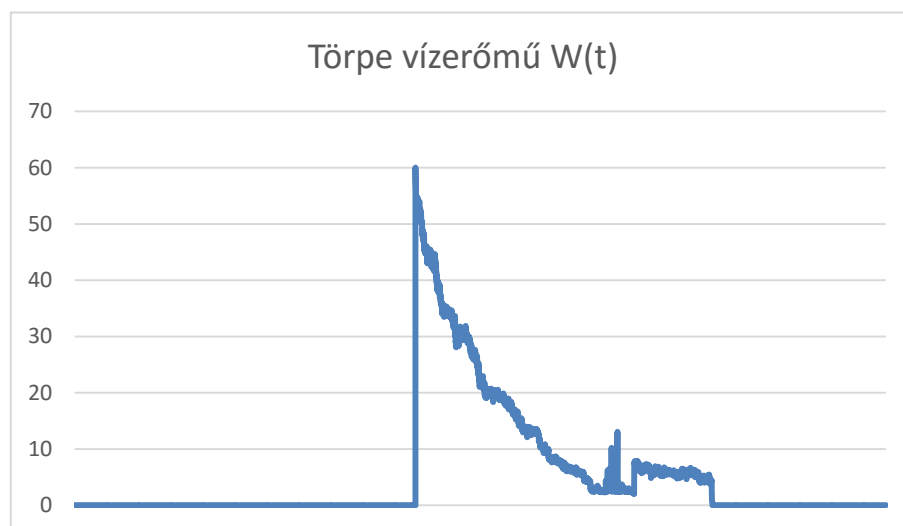
9-2. ábra: napelemek karakterisztikája (24 óra)

F1.3.2 Szélerőmű

Egy 20 kW névleges teljesítményű kínai gyártmányú (Ouyad) szélerőmű 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 fordulatszáma. Sajnos egyelőre inverter problémák miatt nem képes a hálózatra táplálni, a modellbe. azonban inaktív elemként bekerült.

F1.3.3 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.



9-3. ábra: törpe vízerőmű karakterisztikája (24 óra)

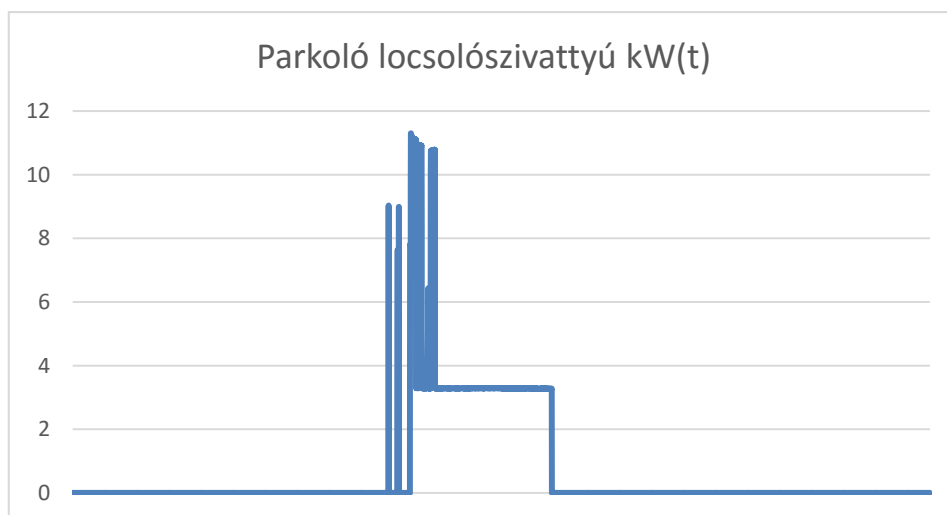
F1.4 Villamos fogyasztók

F1.4.1 Töltőoszlop

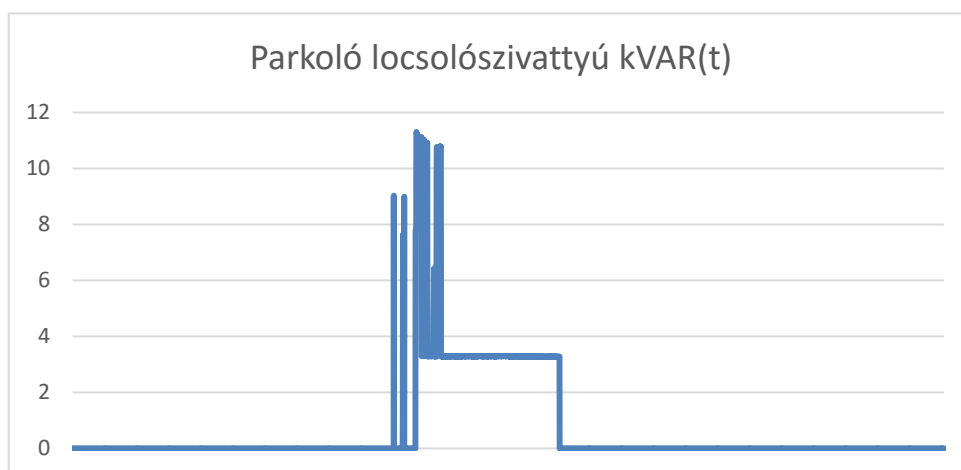
Egy elektromos autók számára fenntartott töltőoszlop található a parkoló területén, mely vezérelhető töltési ciklussal rendelkezik, így a későbbiekben a fogyasztói vezérlések tesztelésekor fontos elem lehet. Mivel kizárólag akkor üzemel, amikor az ELMŰ Nyrt. dolgozói elektromos autóval érkeznek a helyszínre,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

F1.4.2 Parkoló locsoló szivattyú

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



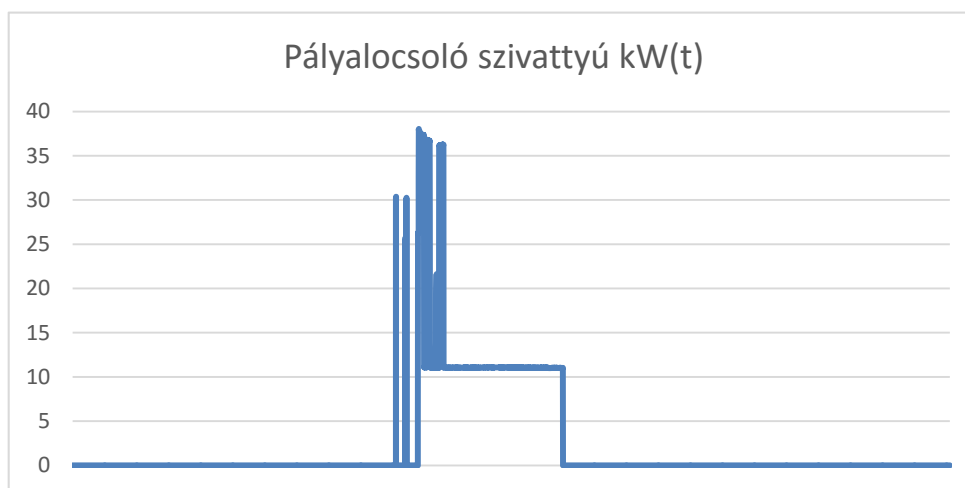
9-4. ábra: Parkoló locsoló hatásos teljesítmény felvétele (24 óra)



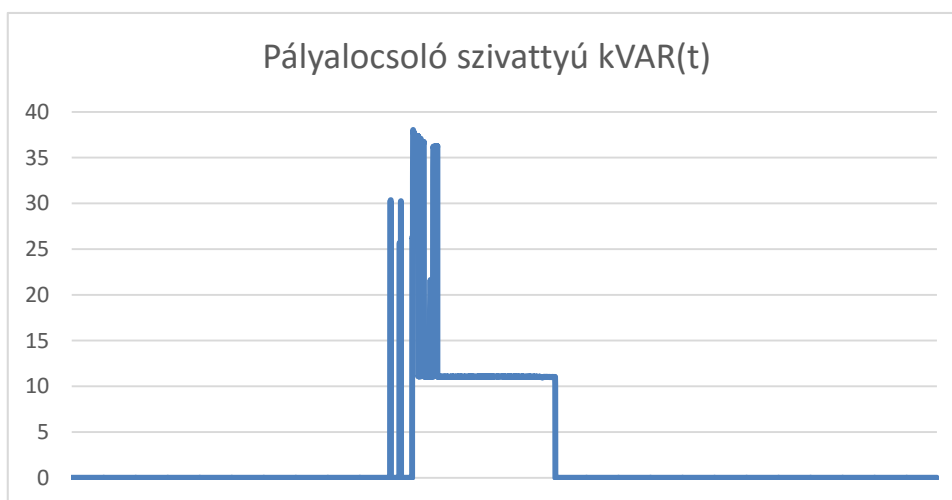
9-5. ábra: parkoló locsoló meddőteljesítmény felvétele (24 óra)

F1.4.3 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.



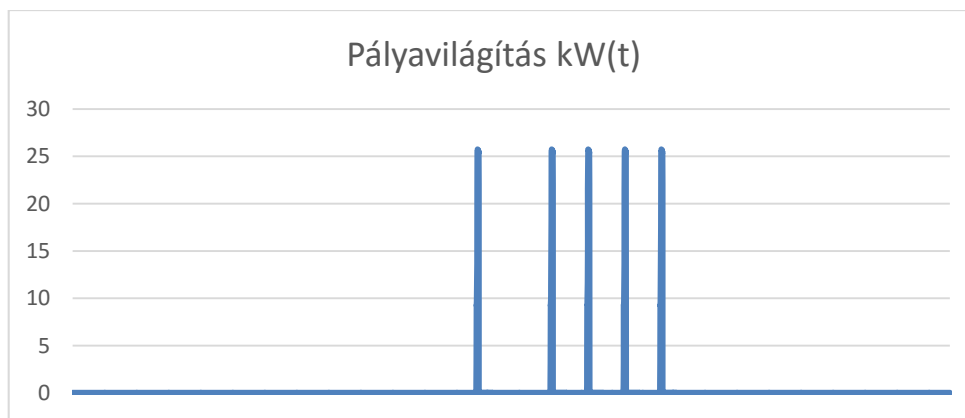
9-6. ábra: pályalocsoló hatásos teljesítmény felvétele (24 óra)



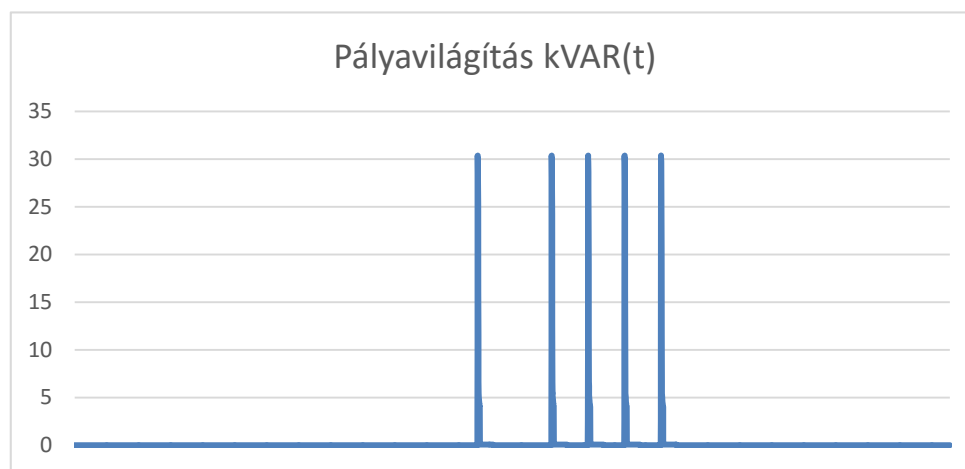
9-7. ábra: pályalocsoló meddőteljesítmény felvétele (24 óra)

F1.4.4 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.



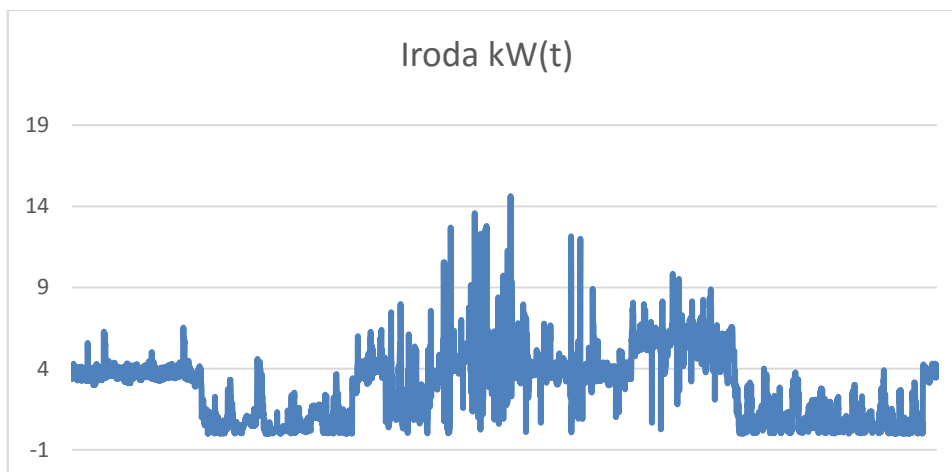
9-8. ábra: pályavilágítás hatásos teljesítmény felvétele (24 óra)



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

F1.4.5 Irodai fogyasztók csoportja

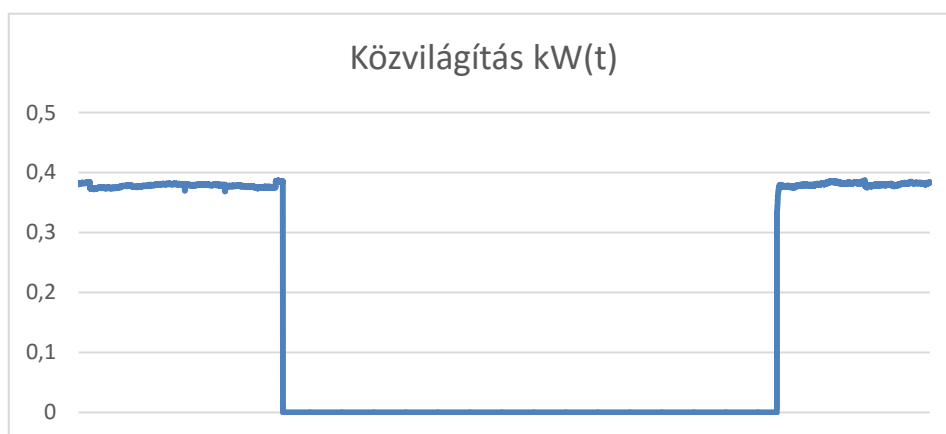
Az irodai fogyasztók nincsenek külön mérve a SCADA rendszerben, így karakterisztikájuk abból a feltételezésből számítható, hogy minden más teljesítmény mérve van a hálózaton. Ennek megfelelően 0,95-ös teljesítménytényezővel felvéve látható az alábbi számított érték, mely az iroda összes fogyasztóját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



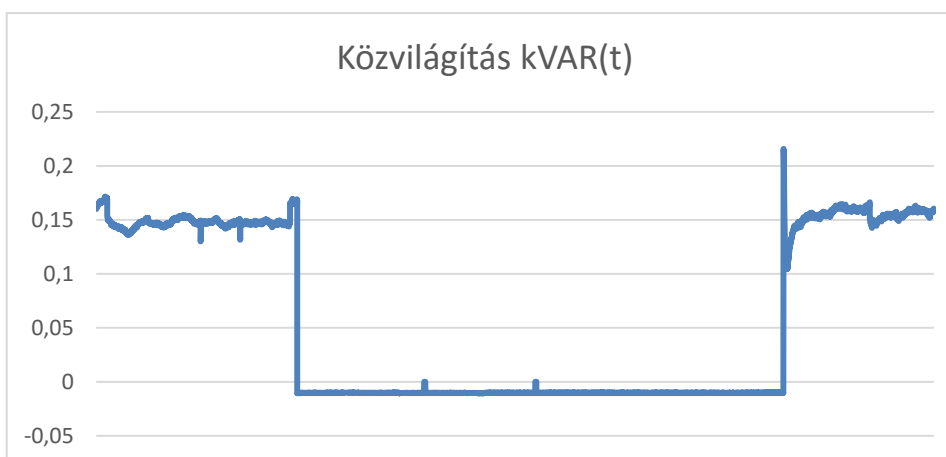
9-10. ábra: iroda teljesítményfelvétele (24 óra)

F1.4.6 Közvilágítás

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



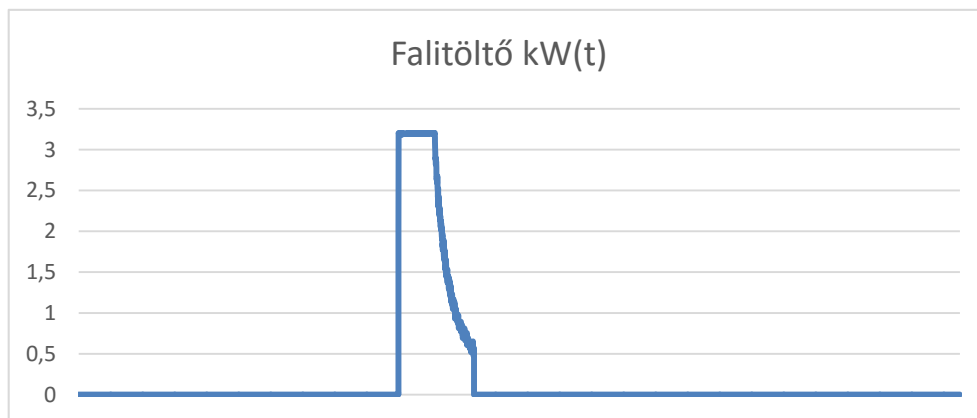
9-11. ábra: közvilágítás hatásos teljesítmény felvétele (24 óra)



9-12. ábra: közvilágítás meddőteljesítmény felvétele (24 óra)

F1.4.7 Falitöltő

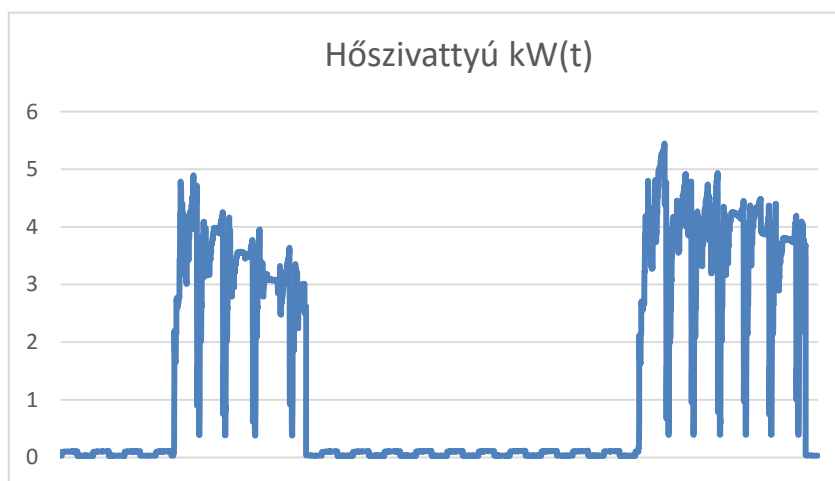
A bemutató teremben található egy elektromos autó falitöltő berendezés. 11 kW névleges teljesítménnyel bír. Egy autótöltés jellemző görbéje csatolva a modellhez.



9-13. ábra: falitöltő teljesítmény felvétele (24 óra)

F1.4.8 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.



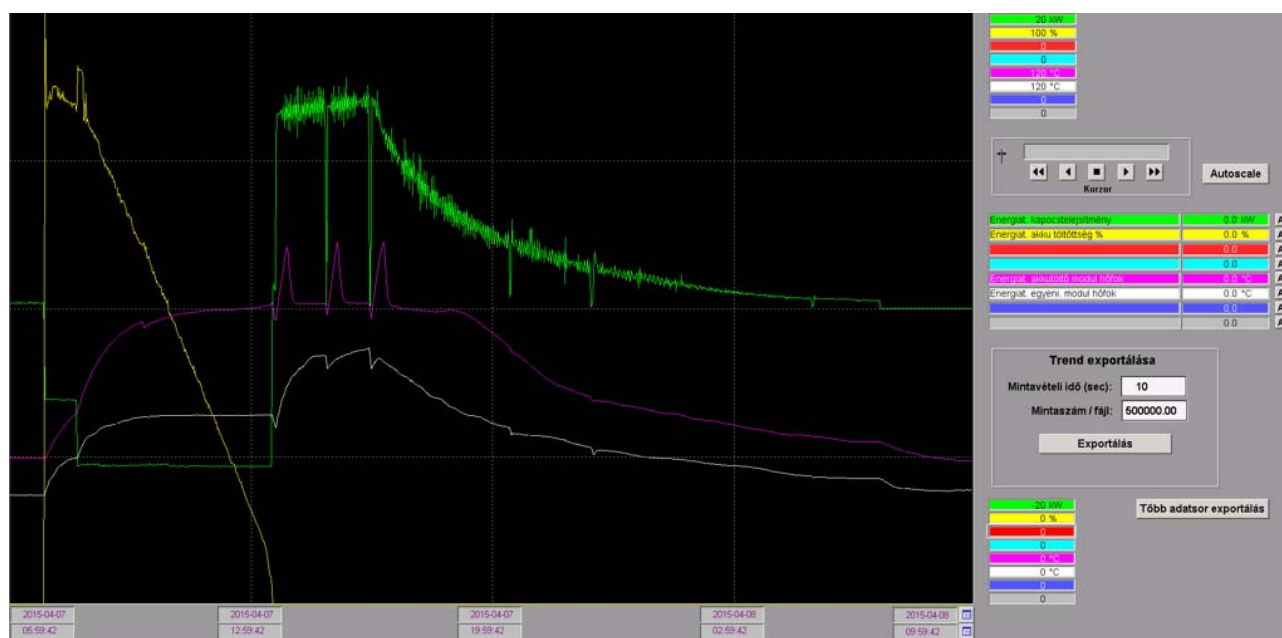
9-14. ábra: hőszivattyú teljesítmény felvétele (24 óra)

F1.4.9 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.

9-1. táblázat: akkumulátor mérendő paraméterei

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



9-15. ábra: akkumulátor jellemző töltési-kisütési görbéi

F1.5 Kábeles csatlakozások, gyűjtősínek, elosztók, externális hálózat

F1.5.1 Alkalmazott kábeltípusok

A modellalkotáskor a helyszíni adatok alapján két kábeltípus volt szükséges:

9-16. ábra: 240 mm² rézkábel adatainak felvétele

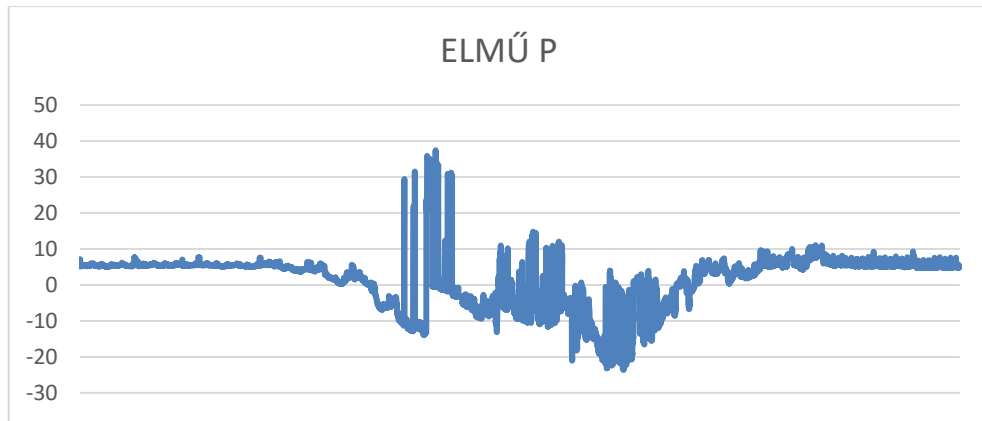
9-17. ábra: 150 mm² rézkábel adatainak felvétele

F1.5.2 Gyűjtősin és elosztó típusok

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

F1.5.3 Externális hálózat

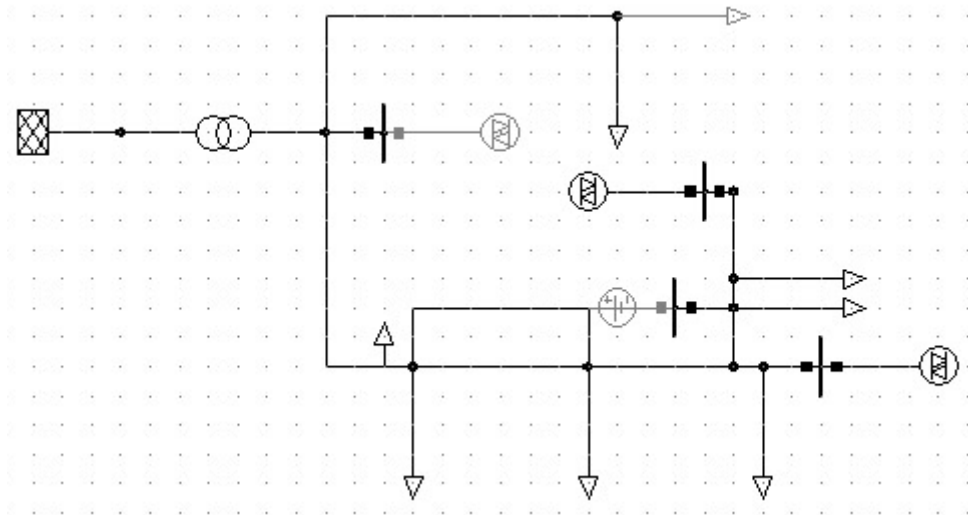
A mögöttes hálózat legfontosabb paramétere a zárlati teljesítmény. Esetünkben egy 20 kV névleges feszültségű elosztói hálózatrészről beszélünk, durva felső becsléssel 1000 MVA-nek vehető az érték. A jellemző teljesítményáramlás az alábbi görbén látható:



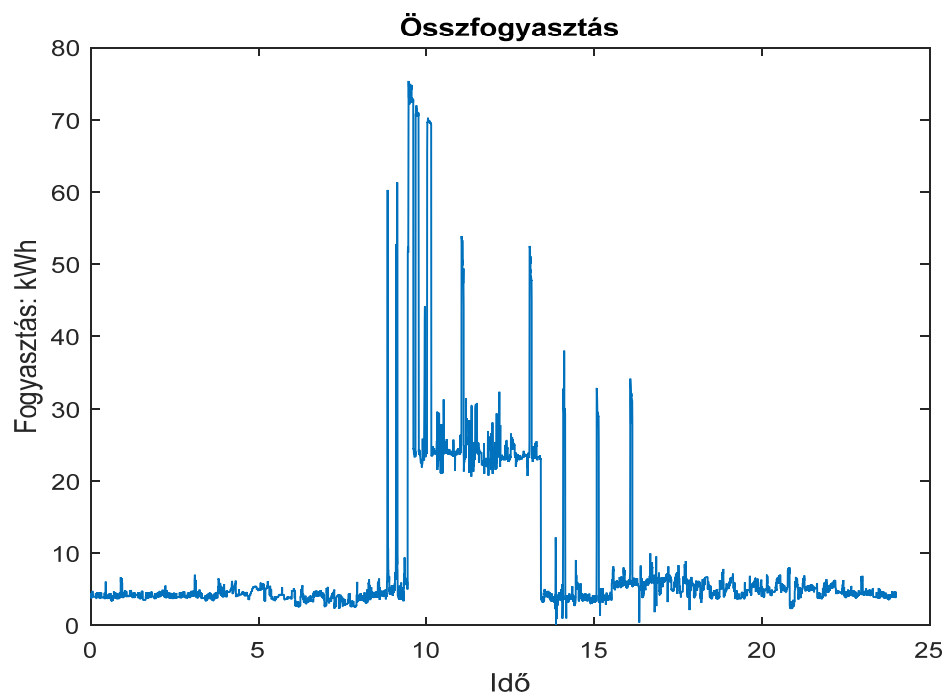
9-18. ábra: a mögöttes hálózat teljesítményáramlása (24 óra)

F1.5.4 Load flow szimuláció

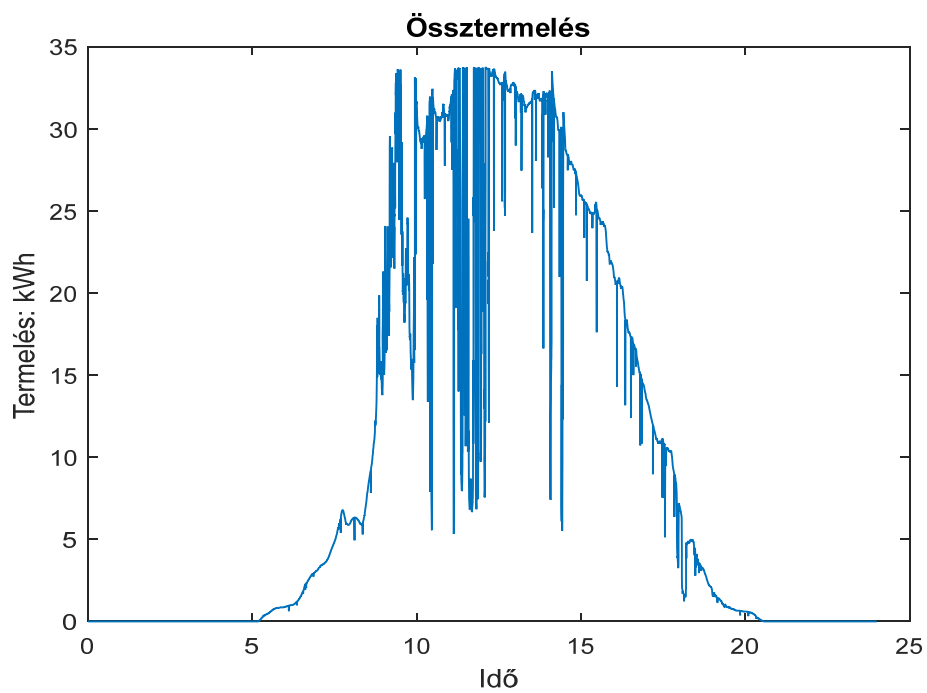
A megadott adatokkal és profilokkal a hálózat alkalmas teljesítményáramlás vizsgálatokra. Mivel a konkrét bevitt értékek felbontása 10 s, így ennél finomabb időközöket nem célszerű választani, a teljes szimulációs időtartam pedig 24 óra. Ezek alapján a hálózati analízis elvégezhető.



9-19. ábra: a megépített topológia



9-20. ábra: összfogyasztás görbe (24 óra)



9-21. ábra: össztermelés görbe (24 óra)

F2 Megtérülés számítási táblázat

F2.1 Virtuális szigetüzem cash flow

Gazdaságossági számítások				
CAPEX (USD)	OPEX (USD)	Bevétel/ megtakarítás (USD)	CF (USD)	Nettó jelenérték (USD)
75 000	450	4 495	-70955	-70955
	464	4 808	4345	-66778
	477	5 154	4676	-62454
	492	5 533	5041	-57972
	506	5 951	5444	-53319
	522	6 410	5889	-48479
	537	6 916	6378	-43438
	553	7 472	6918	-38181
	570	8 083	7513	-32691
	587	8 756	8168	-26952
	605	9 495	8891	-20946
	623	10 309	9686	-14653
	642	11 205	10563	-8056
	661	12 189	11529	-1132
	681	13 273	12592	6140

F2.2 Energiakereskedés 1. stratégia cash flow

Gazdaságossági számítások				
CAPEX (USD)	OPEX (USD)	Bevétel/ megtakarítás (USD)	CF (USD)	Nettó jelenérték (USD)
62 000	480	3 647	-58833	-58833
	494	3 899	3405	-55559
	509	4 177	3668	-52168
	525	4 483	3958	-48649
	540	4 819	4279	-44992
	556	5 189	4632	-41184
	573	5 595	5022	-37215
	590	6 043	5452	-33072
	608	6 535	5927	-28741
	626	7 076	6450	-24210
	645	7 672	7026	-19463
	664	8 327	7662	-14486
	684	9 047	8363	-9262
	705	9 840	9135	-3776
	726	10 711	9985	1990

F2.3 Energiakereskedés 2. stratégia cash flow

Gazdaságossági számítások				
CAPEX (USD)	OPEX (USD)	Bevétel/ megtakarítás (USD)	CF (USD)	Nettó jelenérték (USD)
95 000	1 200	5 956	-90244	-90244
	1 236	6 380	5144	-85298
	1 273	6 846	5573	-80146
	1 311	7 358	6047	-74770
	1 351	7 922	6572	-69153
	1 391	8 543	7152	-63275
	1 433	9 225	7792	-57116
	1 476	9 976	8500	-50657
	1 520	10 802	9281	-43875
	1 566	11 710	10144	-36748
	1 613	12 709	11096	-29251
	1 661	13 808	12147	-21361
	1 711	15 017	13306	-13050
	1 762	16 347	14585	-4291
	1 815	17 810	15995	4946