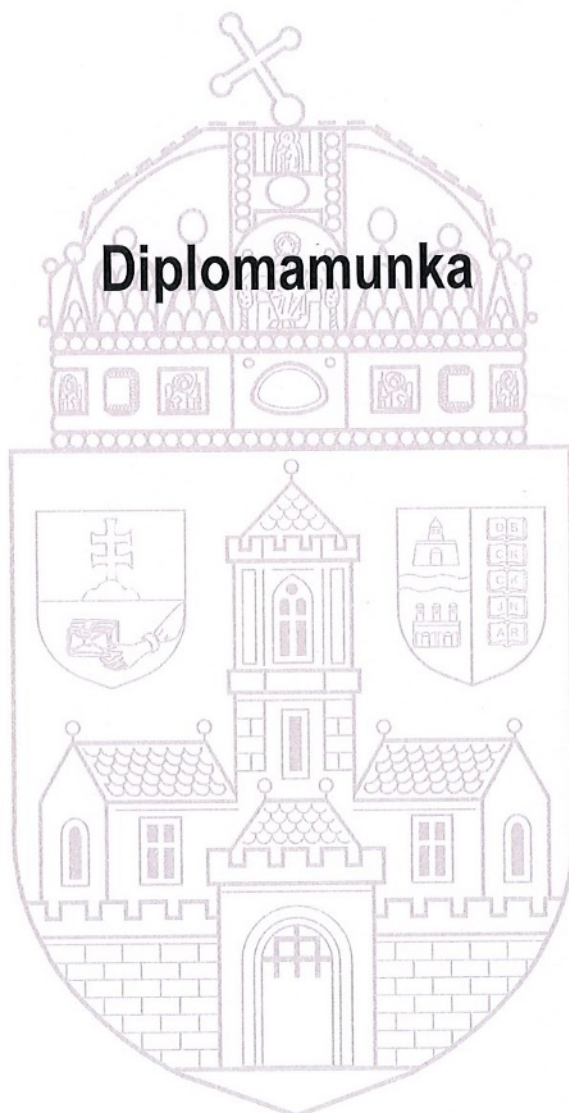




ÓBUDAI EGYETEM

Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar
Automatika Intézet



OE-KVK
2021

Kádár Levente
[REDACTED]
T009021/FI12904/K



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

Óbudai Egyetem
Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar
Villamosenergetikai Intézet

DIPLOMAMUNKA FELADATLAP

Hallgató neve: Kádár Levente

Diplomamunka száma: SZD21080907517259

Törzskönyvi száma: T009021/FI12904/K

Neptun kódja: XXXXXXXXXX

Szak: villamosmérnöki

Specializáció: Villamosenergia-átalakítók, -tárolók és irányítástechnika specializáció

A dolgozat címe: Primer szabályozásra alkalmas erőmű megvalósítása elektromos autók akkumulátorainak felhasználásával

A dolgozat címe angolul: Implementation of a power plant suitable for FCR control using electric car batteries

A feladat részletezése: A dolgozat tervezett tartalma két részből áll.

- Bemutatásra kerülnek a RES penetráció hatására kialakuló rendszer szintű problémák és a mérnöki módszerekkel megoldható feladatok. Egy műszaki alternatíva az energiatárolók alkalmazása, azok fajtái és lehetséges alkalmazási lehetőségei. Nagy hangsúlyt kap a dolgozatban az akkumulátoros energiatároló, illetve az akkumulátormaga.
- A dolgozat második részében egy valós, megvalósult akkumulátoros energiatároló rendszer megvalósítása kerül bemutatásra.

Intézményi konzulens neve: Szén István

A kiadott téma elévülési határideje: 2023. december 15.

Beadási határidő: 2021. 12. 15.

A diplomamunka: Nem titkos.

Kiadva: Budapest, 2021. 12. 13.



Intézetigazgató

A dolgozatot beadásra alkalmasnak találom: 2021. 12. 15.

.....
belső konzulens

.....
külső konzulens



HALLGATÓI NYILATKOZAT

Alulírott hallgató kijelentem, hogy a diplomamunka saját munkám eredménye, a felhasznált szakirodalmat és eszközöket azonosíthatóan közöltem. Az elkészült diplomamunkában található eredményeket az egyetem és a feladatot kiíró intézmény saját céljára térítés nélkül felhasználhatja, a titkosításra vonatkozó esetleges megkötések mellett.

Budapest, 2021.

.....
Hallgató aláírása

Primer szabályozásra alkalmas erőmű megvalósítása elektromos autók akkumulátorainak felhasználásával

Kádár Levente Miklós



Óbudai Egyetem
Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar
Villamosenergia-átalakítók, -tárolók és irányítástechnika specializáció
2021.

Tartalom

Bevezetés	5
1 A villamosenergia – rendszerek kialakulása	8
2 Villamosenergia-rendszer szabályozása	10
2.1 Az egyensúly	10
2.2 Primer szabályozás (FCR).....	11
2.3 Szekunder szabályozás (aFRR)	12
2.4 Tercier szabályozás (mFRR+RR)	12
3 Villamosenergia-rendszer átalakulása	13
3.1 Megújuló energiaforrások az Európai Unióban	13
3.1.1 Szélenergia hasznosítása Európában.....	14
3.1.2 Napenergia hasznosítása Európában.....	15
3.2 Megújuló energiaforrások Magyarországon	15
3.2.1 Napenergia hasznosítása Magyarországon	16
3.2.2 Szélenergia hasznosítása Magyarországon	19
3.3 A megújuló energiaforrások elterjedésének hatása a villamosenergia-rendszerre 20	
3.4 Aggasztó jelek	21
3.5 Lehetőségek a probléma megoldására.....	22
4 Villamosenergia tárolók	23
4.1 Villamosenergia tárolók alkalmazási lehetőségei	23
4.1.1 Szekunder és primer szabályozás.....	23
4.1.2 Fogyasztói csúcs levágása.....	24
4.1.3 Black-start kapacitás	24
4.1.4 Villamoshálózat minőségének javítása	25
4.1.5 Villamosenergia-beszerezés költségének csökkentése	25

4.1.6	Szigetüzemű hálózatok támogatása, hálózatfejlesztési beruházások elkerülése	25
4.2	Villamosenergia tárolók fajtái	26
4.2.1	Szivattyús-tározós verőmű	26
4.2.2	Lendkerekes energiatárolás	26
4.2.3	Sűrített levegős energiatárolás	27
4.2.4	Szuperkapacitás	27
4.2.5	Hidrogén energiatárolás (elektrolízissel)	27
4.2.6	Akkumulátoros (elektrokémiai) energiatárolás	27
4.3	Energiatárolók összehasonlítása	28
4.3.1	Paraméterek	28
4.3.2	Költségek	28
4.4	Energiatárolók kiépítettsége a világban	29
4.5	Energiatárolók Magyarországon	30
4.6	Összegzés	31
5	Akkumulátorok	32
5.1	Akkumulátorok legjellemzőbb tulajdonságai	32
5.1.1	Cellafeszültség	32
5.1.2	Kapacitás	32
5.1.3	Önkisülés	33
5.1.4	Belső ellenállás	33
5.1.5	Töltési és kisütési áramerősség	33
5.1.6	Energiasűrűség	33
5.2	Akkumulátorok osztályozása kémiai összetételük szerint	34
5.2.1	Ólom-savas akkumulátorok	34
5.2.2	Nikkel-kadmium akkumulátor (NiCd)	34
5.2.3	Nikkel metál-hidrid (NiMH) akkumulátorok	34
5.2.4	Lítium-ion alapú akkumulátor (Li-ion)	34
5.3	Lítium-ion akkumulátorok elterjedése	35
5.4	Lítium-ion akkumulátorok élettartamának vizsgálata	36
5.5	Lítium-ion akkumulátorok újra felhasználása	36
6	Bevezetés	40
6.1	Előkészületek	41
6.2	Helyszín kiválasztása	43

6.3	Versenyeztetés.....	45
7	BESS1 és BESS2 bemutatása.....	53
7.1	BESS1 bemutatása	53
7.1.1	Akkumulátor	53
7.1.2	Inverter	54
7.1.3	Transzformátor.....	55
7.2	BESS2 bemutatása	57
7.2.1	Akkumulátor	57
7.2.2	Inverter	57
7.2.3	Transzformátor.....	58
7.3	Hálózatra csatlakozás	60
8	Kivitelezés és megvalósulás	61
9	A megszerzett tapasztalatok bemutatása, jövőbeli fejlesztési lehetőségek	65
10	Összefoglalás	70
11	Summary.....	71
12	Ábrajegyzék.....	72
13	Forrás lista	74

BEVEZETÉS

Napjainkban napról-napra növekszik a megújuló energiaforrások térhódítása. Legdinamikusabb mértékben az időjárásfüggő energiatermelők részaránya emelkedik az energiamixben, azonban ezek villamos hálózatba való integrálása komoly kihívásokkal jár. A változékony időjárási viszonyoknak köszönhetően nem lehet pontosan előre megbecsülni a várható energiatermelésüket és szabályozhatósági képességük is korlátozott.

A villamos energiatárolók alkalmazása megoldást nyújthat a villamos hálózat átalakulásának következtében fellépő számos problémára. Alkalmazásukkal gazdaságosabb és biztonságosabb üzemeltetés érhető el, mivel nagyban növelik a villamosenergia rendszer szabályozási lehetőségeit. Segítségükkel az időjárásfüggő energiatermelők által termelt villamosenergia könnyebben integrálhatóvá válik a hálózatba, ezáltal a jelenleg igen környezetszennyező villamosenergia-ipar egyre inkább képes csökkenteni karbonlábnyomát.

Az akkumulátor technológia folyamatos fejlődésének köszönhetően az elektromos meghajtású autók száma is rohamosan növekszik. Nem csak az egy töltéssel megtehető hatótávolság emelkedik, de az akkumulátorok előállításának ára is folyamatosan csökken, így egyre több ember számára elérhetőek ezek a járművek. Pár éven belül várhatóan (a jelenlegi tendenciák alapján) legalább annyi elektromos autó lesz forgalomban, ahány hagyományos, robbanómotoros gépjármű. Az elektromos autók akkumulátorainak élettartalma használatuk közben folyamatosan csökken, becslések szerint 8 év eltelte, vagy 200.000 km megtétele után a kapacitásuk 30-40%-kal romlik. Ekkortól az autót már nem éri meg fenntartani, az akkumulátorok ekkor újrahasznosításra, vagy kidobásra kerülnek. Ezeket az akkumulátorokat azonban célszerű lenne ismét, egyéb területeken felhasználni, így meghosszabbítva élettartamukat.

Diplomamunkám első felében körüljáróm a megújuló energiaforrások jelenlegi térhódítását és az emiatt felmerülő villamosenergia-rendszerben fellépő szabályozási problémákat. Bemutatom az energiatárolók különböző, jelenleg elterjedt megoldásait, felhasználási lehetőségeit, majd közelebbről megvizsgálom az akkumulátoros energiatárolók fő alkotóelemét, magát az akkumulátort.

A dolgozatom második felében egy olyan akkumulátoros energiatároló rendszer koncepcióját és megvalósítását fogom bemutatni, mely jelenleg világviszonylatban is csak néhány projekt keretén belül valósult meg.

A hagyományos villamosenergia tározókra optimalizált akkumulátorok mellett, az energiatároló erőműben villamos meghajtású gépjárművek akkumulátorai is felhasználásra kerülnek. Az erőmű fő szerepe a villamosenergia-rendszer minőségének javítása, melyet primer szabályozással (frekvenciaszabályozás-FCR) ér el a létesítmény.

Az energiatároló diplomamunkámban leírt módon fizikálisan is megvalósításra került. Az Alteo Energiaszolgáltató Nyrt. erősáramú projektmérnökeként az én feladatom volt a projekthez kapcsolódó mérnöki feladatok elvégzése, ideértve az energiatároló koncepciójának kidolgozását, a technológiai szállítók minősítését, kiválasztását, a tervezőkkel való együttműködést, valamint a helyszíni kivitelezés felügyeletét, vezetését.

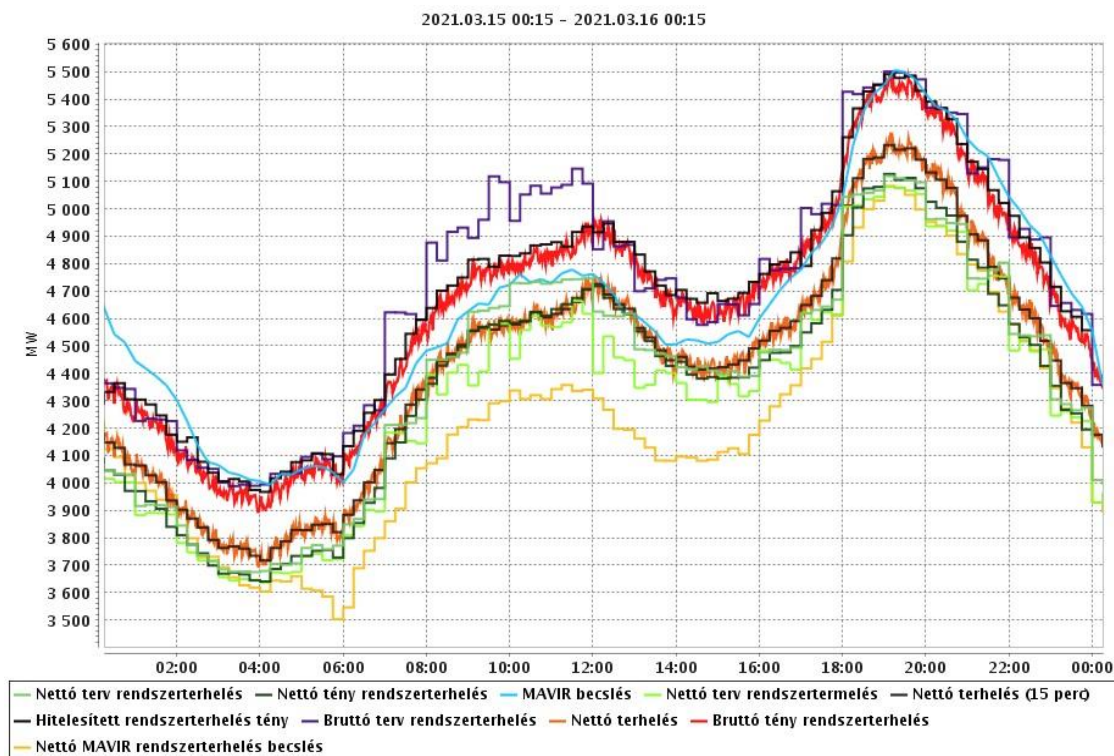
I. rész

Energiatárolók szükségessége

1 A VILLAMOSENERGIA – RENDSZEREK KIALAKULÁSA

A villamosenergia-termelő egységek kezdetben lokálisan épültek ki, azaz minden fogyasztó (jellemzően gyárak) saját maguknak termelték meg a szükséges villamos energiát. Később a növekvő fogyasztói igényeknek köszönhetően, célszerűvé vált e villamos termelők összekapcsolása, hálózatba foglalása. Az összekapcsolt rendszereken belül gazdaságosabbá vált az energiatermelés, megnövekedett az üzembiztonság és az ellátás minősége, ugyanis, ha egy adott generátor karbantartás vagy üzemzavar esetén nem tud megfelelő energiát szolgáltatni, a hálózatban lévő többi energiatermelő fedezni képes a kiesett kapacitást.

Magyarország az UTCE - ENTSOE, azaz az Európai Villamosenergia-átviteli Hálózat tagja, mely 1951-ben alakult. Mára 29 ország csatlakozott a hálózathoz és így a világ legnagyobb összefüggő villamosenergia hálózatává nőtte ki magát. A hálózat mintegy ~500.000 MW-os rendszert működtet, hazánk ~7.000 MW-os rendszerével ennek bő 1%-át teszi ki. [1] Minél nagyobb területű egy ilyen összekapcsolt energiarendszer, és minél több résztvevő szerepel benne, annál jobban kiegyenlítik egymást a különböző időpontokban fellépő energiaigények. Nem szükséges tehát a rendszerirányítóknak figyelembe venni a különböző kisfogyasztók eltérő fogyasztási igényeit, mivel azok a nagy rendszeren belül összegződnek. Elegendő a rendszeren belül fellépő összesített energiaigényt kiszolgálni. Fontos azonban előre megbecsülni ezt az értéket. Ezt az üzemirányítók országos szinten körülbelül 2-3 % pontossággal képesek előre megbecsülni, szezonális és hasonló-napi tapasztalati adatok alapján. Nem lehetséges tehát teljes pontossággal meghatározni a fellépő fogyasztást ezért kismértékű eltérések mindig fellépnek a villamosenergia-rendszerben. Ezt szemlélteti az 1.1. ábra, mely Magyarországon mért egy napi fogyasztási becslést és a hozzá tartozó tényleges fogyasztási görbét ábrázolja.



Ábra 1.1: Átlagos napi fogyasztási görbe Magyarországon [2]

A várható fogyasztás függvényében az erőműveket egy előre meghatározott menetrend szerint szabályozzák, különböző termelő típusú erőművek segítségével. [1] Az alaperőművek közel állandó teljesítményen üzemelnek, kevés szabályzással és nagy rendelkezésre állással. Ez általában meghaladja az évi 5500 órát. Ezek a korszerű és olcsó üzemeltetési költségű erőművek (például a Paksi Atomerőmű). Lassú és költséges szabályozhatóságuknak köszönhetően nem képesek a fogyasztói igények változásait pontosan lekövetni. [3] A menetrendtartó erőművek, mint már a neve is mutatja arra hivatottak, hogy kövessék az üzemirányítók által előre meghatározott termelési menetrendet. Viszonylag rugalmasak és adottságaiktól függően széles határok között tudnak alkalmazkodni az igényekhez. [3] Csúcserőműveket csak a csúcsfogyasztás időszakában üzemeltetjük. Az üzemóra idejük 1500-2000 óra/év értéket ritkán haladja meg. Ezek az erőmű típusok azok, amelyek alkalmasak az energiapiac kilengéseinek kezelésére. Építésüknél elsődleges szempont az alacsony beruházási költség és a gyors szabályozhatóság, másodlagos az üzemanyag ára és a hatásfok. Általában ezek gázturbinás erőművek. [3] Tartalékerőműveknek nevezzük azokat a termelőegységeket, melyek csak különleges helyzetben üzemelnek, évenkénti üzemidejük maximum 100-200 óra.

2 VILLAMOSENERGIA-RENDSZER SZABÁLYOZÁSA

2.1 Az egyensúly

A villamosenergia iparág egyik legfontosabb, központi alkotóeleme az egyensúly, a termelt és az elfogyasztott villamos energia között. A két energiának minden időpillanatban szinte azonosnak kell lennie, mivel a villamos hálózaton belül csak minimális mértékben tudunk energiát tárolni.

A tárolást legfőképpen a generátorok forgó részeinek kinetikus energiája biztosítja. Ha a rendszeren belül megbomlik a termelés- fogyasztás egyensúlya, az energiakülönbséget a mozgó gépek kinetikus energiája fedezi, így az csökken vagy nő. Ennek köszönhetően megváltozik a villamosenergia rendszer frekvenciája. Ha túlterheljük a rendszert, azaz az elfogyasztott energia nagyobb, mint a megtermelt villamos energia, akkor a rendszer lassul, a frekvencia lecsökken a névleges frekvenciához (50 Hz) képest. Ha viszont a fogyasztói igény kisebb, mint a megtermelt energia, a rendszer felgyorsul, a frekvencia megnő. A frekvencia változást a Swing egyenlet írja le az alábbiak szerint:

$$d\omega/dt = \omega_0/2H(P_m - P_e) \text{ ahol } \omega = 2\pi f \quad (2.1)$$

$$d f/dt = f_0/2H(P_m - P_e) \quad (2.2)$$

f a rendszer frekvenciája [Hz]

ω a körfrekvencia [rad/s]

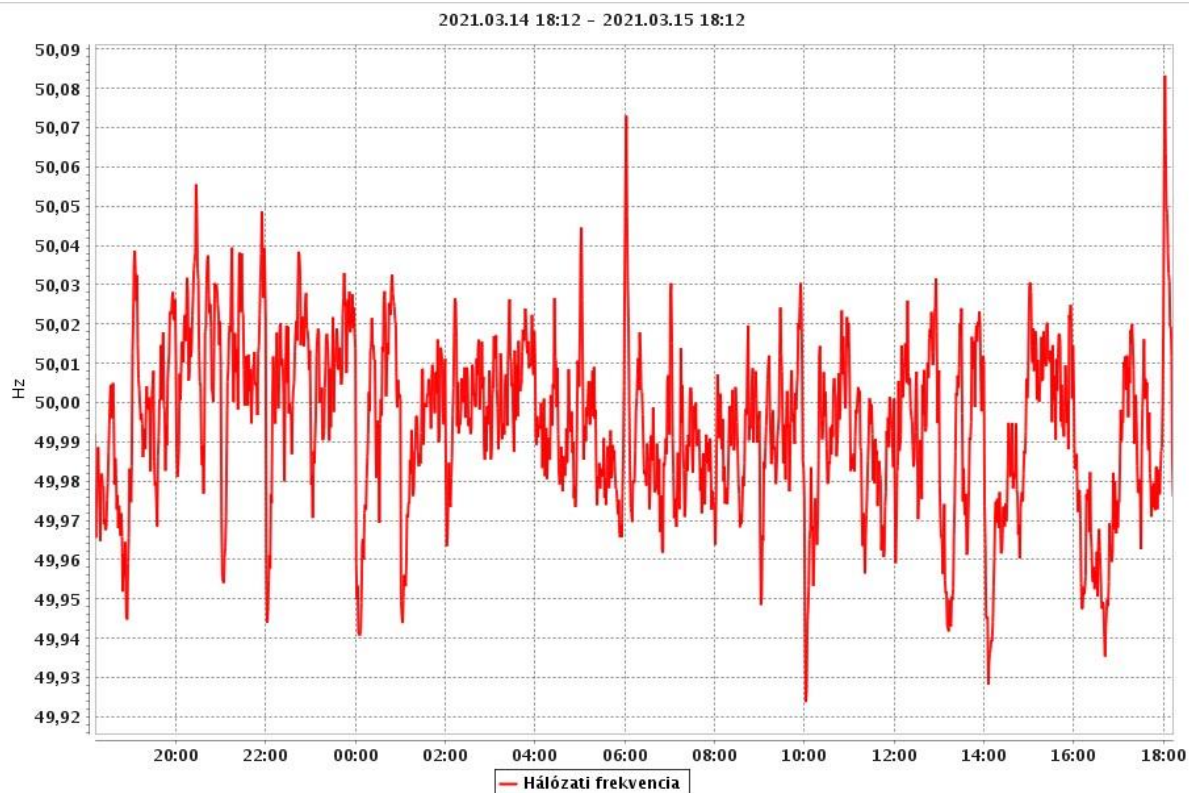
P_m mechanikai energia a forgógépben [W]

P_e villamos energia [W]

H a forgógép inercia állandója [s]

A villamosenergia-rendszert szigorú műszaki paraméterhatárok között, szűk frekvenciasávon belül (50 Hz $\pm$ 20 mHz; azaz $\pm$ 0,4%) szabályozzák, annak érdekében, hogy a fogyasztó megfelelő minőségű villamosenergia ellátásban részesüljön. Az üzemirányítók feladata a folyamatosan változó frekvencia különböző szabályozási módszerek segítségével megfelelő értékek közt tartása. A 2.1. ábrán látható egy átlagos nap frekvencia ingadozása.

Az üzemirányítók háromféle szabályozást alkalmaznak az egyensúly fenttartása érdekében. A primer, a szekunder és a tercier szabályozást.



Ábra 2.1: Átlagos napi frekvenciaingadozás az Európai hálózaton [2]

2.2 Primer szabályozás (FCR)

A primer szabályozás (*frequency containment reserve*) célja a kismértékű frekvenciaingadozások és névleges értéktől való eltérések folyamatos minimalizálása. Ez a leggyorsabb beavatkozási mód a rendszerbe, a szabályozás intervalluma másodpercen belüli. Mivel az érzékelésnek és a beavatkozásnak igen gyorsnak kell lenni, a szabályozás automatikusan történik, előre meghatározott karakterisztikák alapján. Magyarországon legelterjedtebb primer szabályozói megoldás a gőzturbinás erőműveknél a turbinára jutó gőz mennyiségének szabályozása, tehát a turbina teljesítményének változtatása. [4] Akkumulátoros energiatároló esetén, igény szerint a vezérlőegység az akkumulátorokat kisüti, (energiát juttatnak a villamos rendszerbe) vagy elkezdi azokat tölteni (ekkor fogyasztóként viselkednek). [5]

2.3 Szekunder szabályozás (aFRR)

A szekunder szabályozásnak (*frequency restoration reserve*) megegyezik a célja a primer szabályozás céljával: a névlegestől eltérő frekvenciaértékek minimalizálása. Ez a második lépcsőfok a frekvencia szabályozásban. A gépegységeknél vagy tárolóknál rendelkezésre álló forgó- és statikus teljesítménytartalékokat aktiválja olyan módon, hogy a gyakori parancs fogadására alkalmas egységek 0,5-5 perces válaszidőben követik a parancsot, és amely által - a kiadott parancs követése esetén – megszüntethető a frekvencia eltérés. Ezt zárt hurkú szabályozásnak nevezik, mert folyamatos a monitorozás és parancskiadás. A primer szabályozáshoz viszonyítva ez egy centralizált, lassabb, de nagy pontosságú szabályozás. [4]

A folyamatos szabályozást végző primer és szekunder szabályozók összehangolása fontos a zavarok elkerülése érdekében. Szekunder szabályozás megvalósításához nélkülözhetetlen, hogy az erre alkalmas erőműveket a maximális és minimális szabályozási szint között üzemeltessék, így, ha szükség van rá, mind két irányba lehessen szabályozni azokat. Egyes erőműveket célzottan erre a szabályozástípus kiszolgálására építik, ilyenek például a gázmotoros erőművek, melyek indulási idejük 4-10 percen belüli. [2]

2.4 Tercier szabályozás (mFRR+RR)

A tercier szabályozás (*replacement reserve*) a szekunder szabályozás mielőbbi tehermentesítésében, a szekunder szabályozás újbóli, lehetőség szerint 15 percen belüli elérhetőségének biztosításában játszik fontos szerepet. Amennyiben nagyobb mértékű, előrelátható hiány, vagy többlet van a villamosenergia-rendszerben, akkor tercier szabályozási szolgáltatás igénybevételével erre megfelelően lehet reagálni. Ez azért is célszerű, mert a szekunder tartalékok hosszú távú üzemeltetése költséges, valamint üzemelésük közben kisebb mennyiségű szabad szekunder szabályozási kapacitás áll rendelkezésre. A szabályozásban résztvevő gépegységek tekintetében a tercier szabályozási szolgáltatás igénybevétele az előző formáktól eltérően nem feltétlenül történik automatikusan, mivel a tercier tartalékmennyiség aktiválása során 15 perc áll rendelkezésre az utasított gépegység számára, hogy a kívánt célértéket elérje. Tehát ebben az esetben is a rendszer munkapontjának eltérítése történik, csak a primer és szekunder szabályozáshoz képest sokkal lassabban.[2]

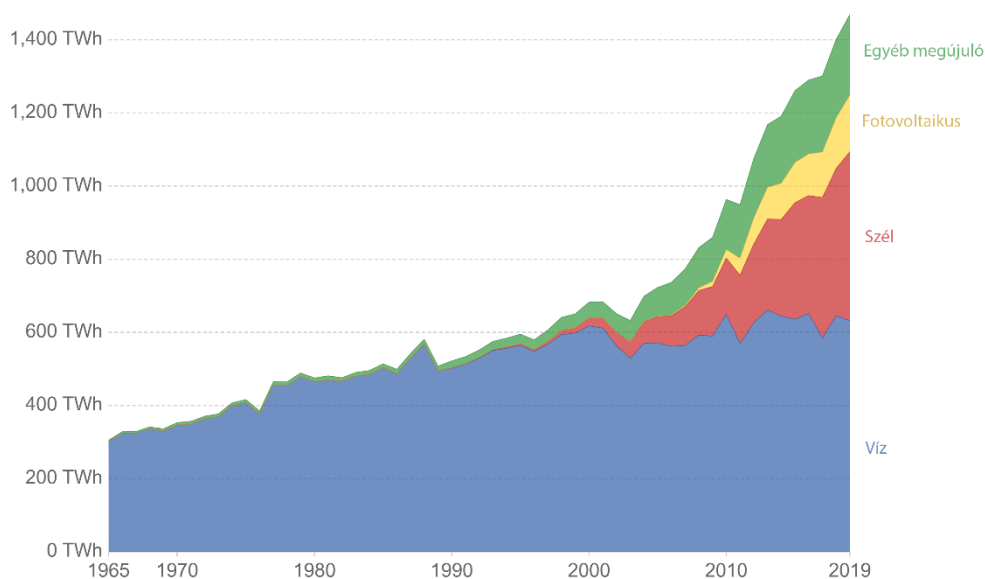
3 VILLAMOSENERGIA-RENDSZER ÁTALAKULÁSA

A 20. század kezdete óta, az emberiség CO² kibocsátása folyamatosan növekvő tendenciát mutat. A nagy mennyiségű károsanyag kibocsátásnak köszönhetően (2019-ben 57 Gt) földünk átlaghőmérséklete napról napra növekszik, a felmelegedés beláthatatlan és visszafordíthatatlan következményeket hordoz magában. [6] Az energiaipar a globális felmelegedés egy tagadhatatlan előidézője, egy 2015-ös felmérés szerint az üvegházhatású gázok 78%-át a szektor bocsátotta ki Európában. [7]

3.1 Megújuló energiaforrások az Európai Unióban

Az Európai Unió alapvető politikai célja a klímavédelem, ezért 2020-ban az Unió célként tűzte ki a tagállamok számára, hogy 2030-ig 55% alá csökkentsék az üvegházhatású gázok kibocsátását az 1990-ben mért szinthez képest (Green Deal). A végső célkitűzés a teljes klímasemlegesség elérése 2050-re, amely sikeressége esetén Európa a világ első klímasemleges kontinensévé válna. [8]

A megújuló energiaforrások potenciális megoldást jelenthetnek az üvegházhatást okozó gázok kibocsátásának csökkentésére. Az EU 2030-ra az összesített európai fogyasztás 32%-át megújuló energiából kívánja fedezni, illetve jelentős határfok-növekedést kíván elérni az európai hálózatokon. Ezen törekvéseket jól szemlélteti, hogy 2018-ban az energiatermelő beruházások 95%-a megújuló energiaforrásokon alapult, aminek 63%-a szél-erőművek telepítéséből állt. 2005. és 2015. között a megújuló energiatermelő erőművek kapacitása az EU-ban 71%-kal nőtt. [9]



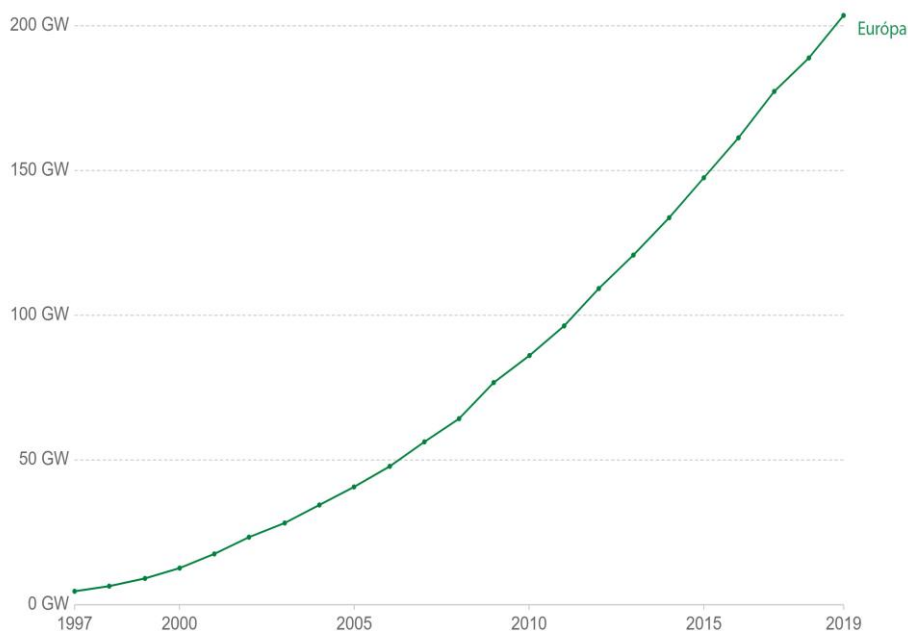
Ábra 3.1: Megújuló energiatermelés növekedése Európában [10]

Megújuló energiaforrásoknak nevezzük az energiahordozók azon csoportját melyek a felhasználásuk ütemében megújulnak. Ide soroljuk a fotovoltaiikus erőműveket, geotermikus, víz, biomassa, szél, hullám és árapály erőműveket. A geotermikus, hullám és árapály erőművek nagymértékben helyhez kötöttek. Jelenleg igen csekély mértékben szerepelnek az energiamixben. Habár a biomasszát használják villamos energia előállítására, napjainkban főleg üzemanyag készítésre alkalmazzák. A vízerőművek, ahogy a 3.1. ábra is mutatja jelentős részét képezik a megújuló energiatermelésnek. Új erőművek építése azonban igen költséges és megfelelő természeti adottságokat követel. Legnagyobb ütemben a szél és naperőművek fejlődtek az utóbbi évtizedben és várhatóan a jövőben is nagymértékben tovább fog nőni a beépített kapacitásuk.

3.1.1 Szélenergia hasznosítása Európában

Az első szélerőművek a XIX. században épültek, azonban a technológia csak az 1990-es években lett számottevő energiaforrás. Míg akkoriban a legmodernebb szélturbinának teljesítménye 300 kW volt, mára egy szélturbina teljesítménye elérheti a 8 MW teljesítményt is. A nagyfeszültségű egyenáramú technológia fejlődésének köszönhetően, a szélerőművek telepítése már nem csak a szárazföldre korlátozódik. Az utóbbi években megjelentek az úgynevezett offshore szélerőművek, melyek a partszakaszról elérhető közelségben, a vízen kerülnek telepítésre. Ez az elhelyezkedés több előnnyel is jár, többek között átlagosan nagyobb, kevésbé változékony szélereősség uralkodik, illetve rengeteg hely áll rendelkezésre a szélturbinák telepítéséhez. [11]

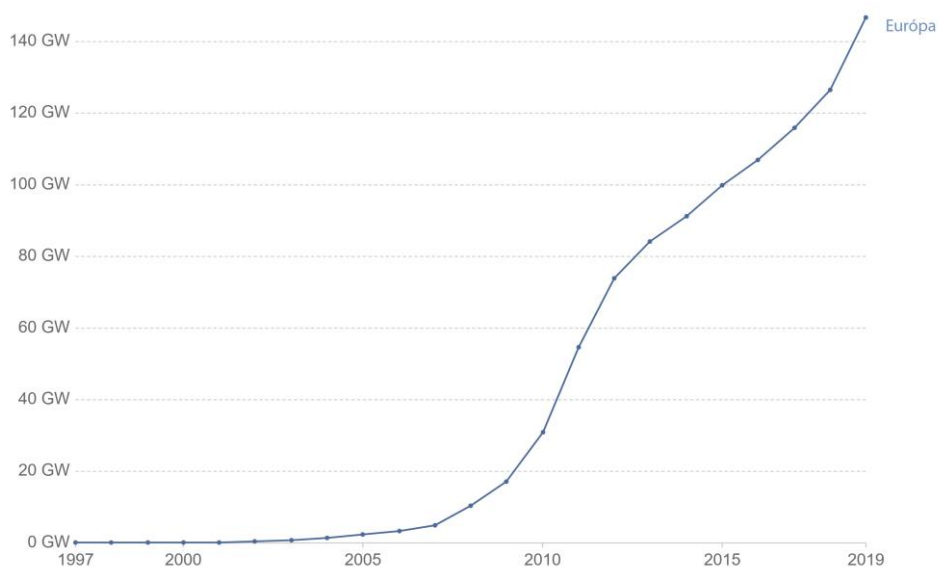
Míg 2010-ben az EU-ban termelt szélenergia az össztermelés 4.4% volt, 2018-ra ez az érték 18.8%-ra növekedett. Számszerűen ez 170 GW szárazföldi és 19 GW offshore teljesítményt jelentett. [12] A kapacitásnövekedést jól szemlélteti a 3.2. ábra.



Ábra 3.2: Telepített szélerőművek beépített teljesítménye Európában [10]

3.1.2 Napenergia hasznosítása Európában

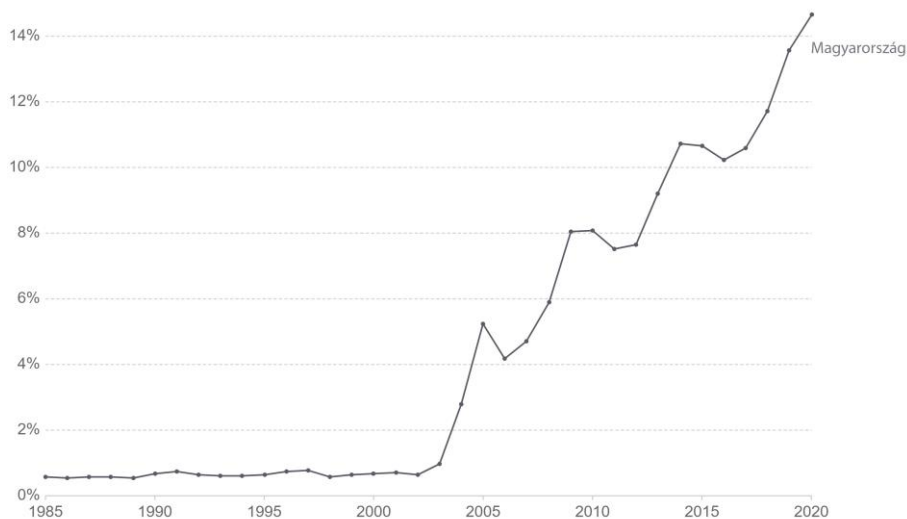
A fotovoltaikus erőművek rohamos elterjedését és fejlődését sem szabad figyelmen kívül hagyni. 2017-ben a villamosenergia termelés 17.5%-át naperőművek biztosították Európában, mely 110 GW energiát jelentett. Ez 2004-ben 8.5% volt. [13] A kapacitás növekedést jól szemlélteti a 3.3. ábra.



Ábra 3.3: Fotovoltaikus erőművek beépített teljesítménye Európában [10]

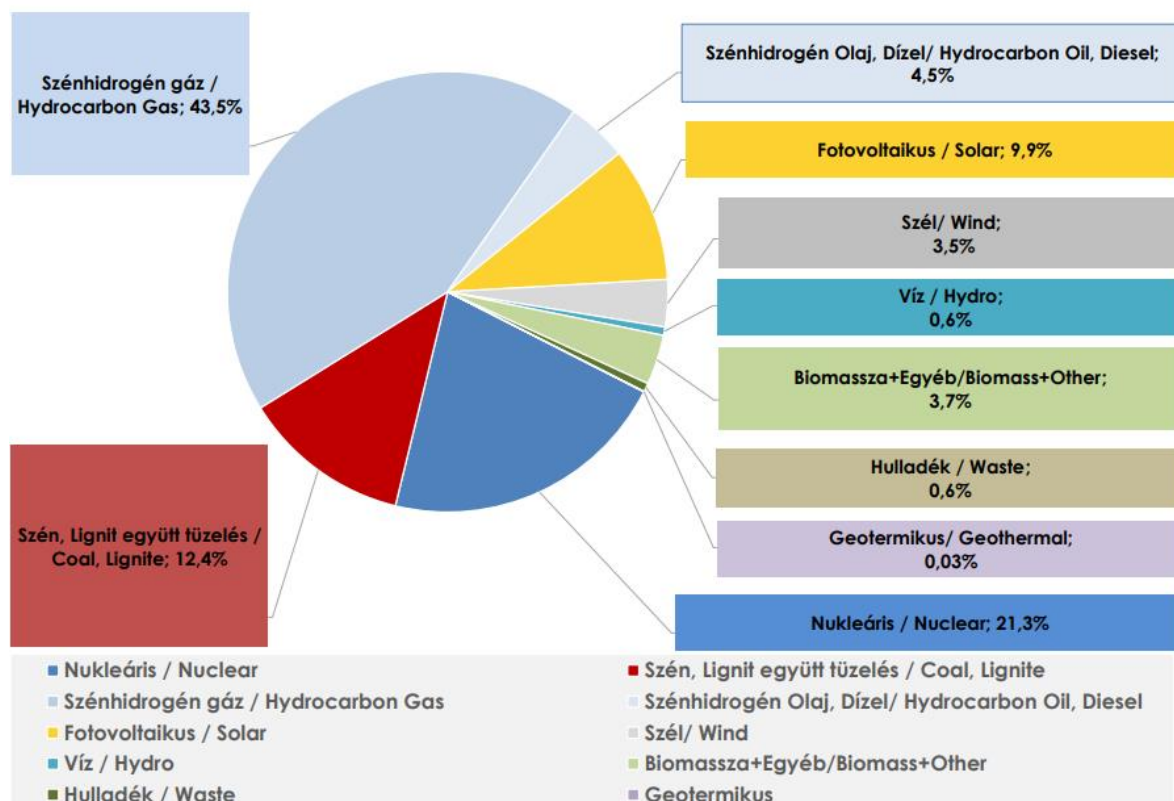
3.2 Megújuló energiaforrások Magyarországon

Az Európai tendenciát követve Magyarországon is jelentősen növekedett az utóbbi években a megújuló energiaforrások által termelt villamos energia mennyisége.



Ábra 3.4: Megújuló energiaforrások részaránya a magyar energiamixben [10]

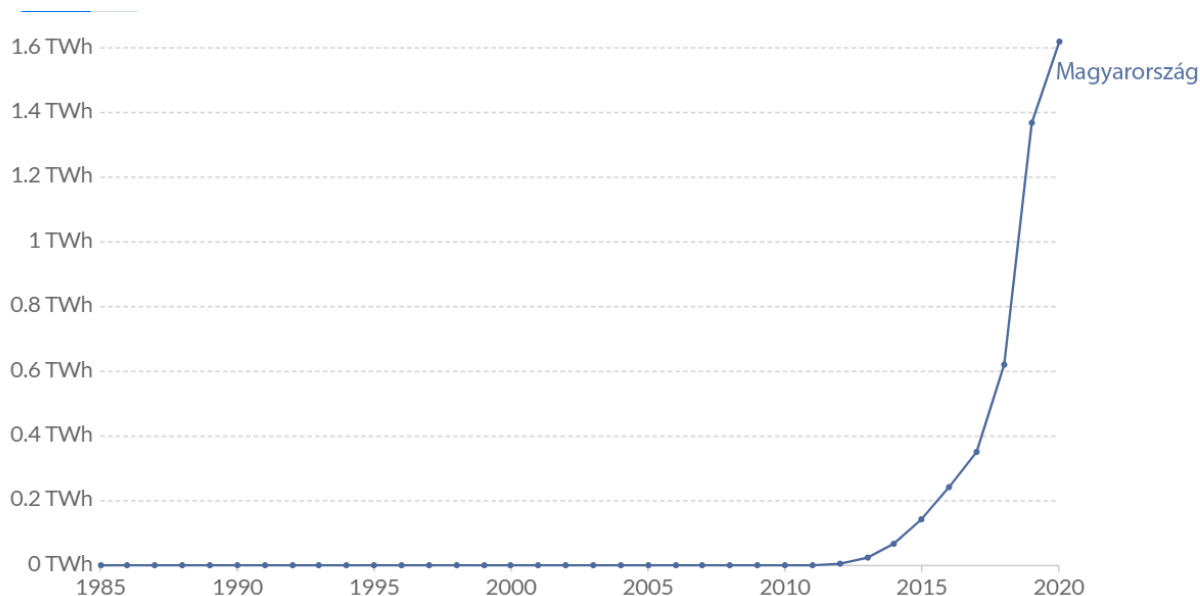
Mivel hazánk nem rendelkezik nagykapacitású vízerőművekkel, a megújuló energiatermelés nagy részét a fotovoltaikus energiatermelők, a szél erőművek és a biomassza erőművek teszik ki. A hazai energiatermelés 2020-as eloszlását a 3.5. ábra szemlélteti.



Ábra 3.5: Magyarország energiamixe 2020-ban [2]

3.2.1 Napenergia hasznosítása Magyarországon

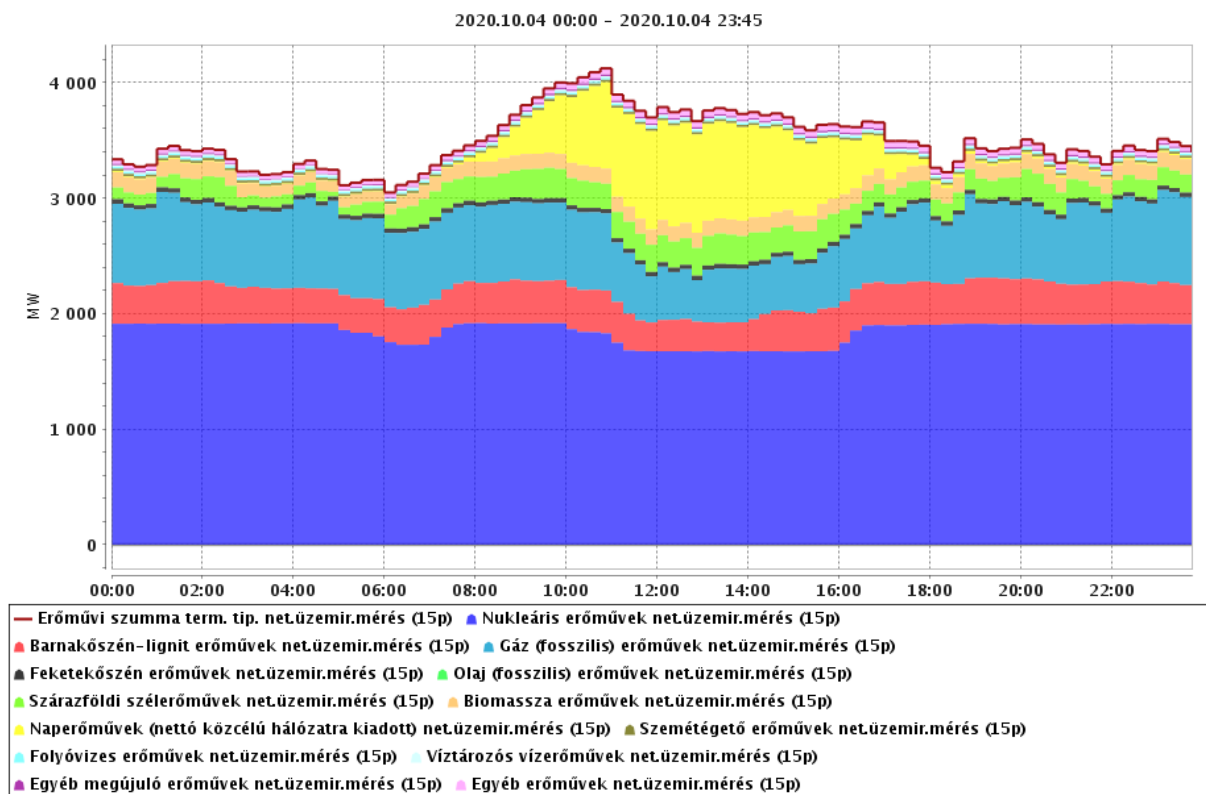
A fotovoltaikus erőművek jelenleg közel 10%-át teszik ki a hazai beépített teljesítménynek és ez a legnagyobb kapacitású megújuló energiaforrás hazánkban. A 3.6. ábra szemlélteti a napelemes erőmű kapacitások növekedését az utóbbi 12 évben. Látható, hogy az elmúlt három évben több mint négyszeresére nőtt a beépített kapacitás.



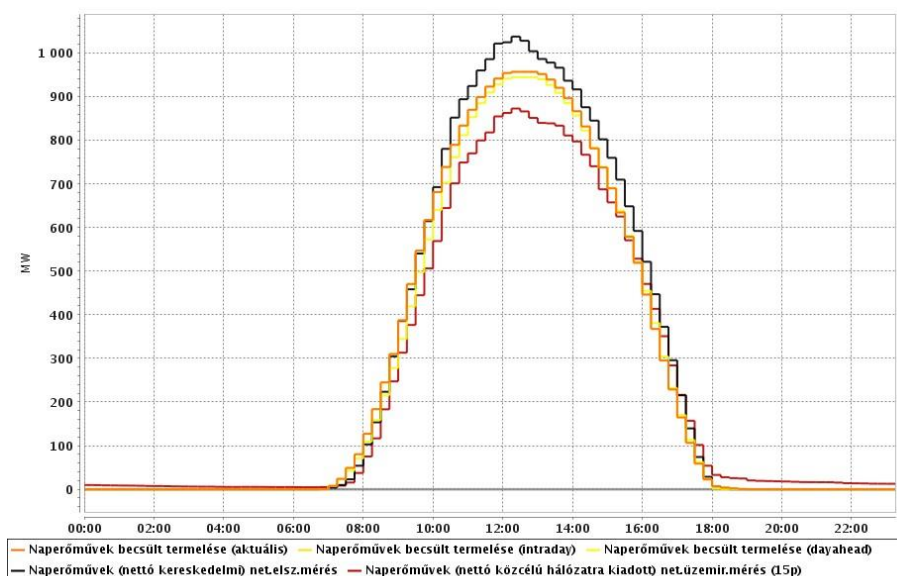
Ábra 3.6: Magyarországi photovoltaikus erőművek termelésnövekedése [10]

Hazánkban jelenleg is rengeteg fotovoltaiikus erőmű építése zajlik. Mivel Magyarország is elfogadta az Európai Unió által bevezetett Green Deal megállapodást, várhatóan a jövőben újabb beruházások fognak megvalósulni, melyek tovább növelik a fotovoltaiikus erőművek részarányát a magyarországi energiamixben.

A növekvő tendenciát jól bizonyítja, hogy évről évre rekord mennyiségű energiát állítanak elő a napelemerőművek az összesített energiatermelésben. 2020. október 4-én a fotovoltaiikus erőművek rekordmennyiségű energiát termeltek, ugyanis a Mavir adatai szerint aznap 1037 MW teljesítményt csupán naperőművek állítottak elő. Ez a csúcsidőszak negyedórájában az összesített termeléshez viszonyítva 26,27%-ot jelentett. Ha a nukleáris energia által termelt villamos energiát is figyelembe vesszük, akkor a széndioxid kibocsátás-mentes energiatermelés aznap meghaladta a 70%-ot. Ezt mutatja a 3.7. és a 3.8. ábra. A rendszerirányító adatai ráadásul nem tartalmazzák háztartási méretű kiserőművek (HMKE) termelését, mely körülbelül 400 MW beépített teljesítményt jelent.[2]



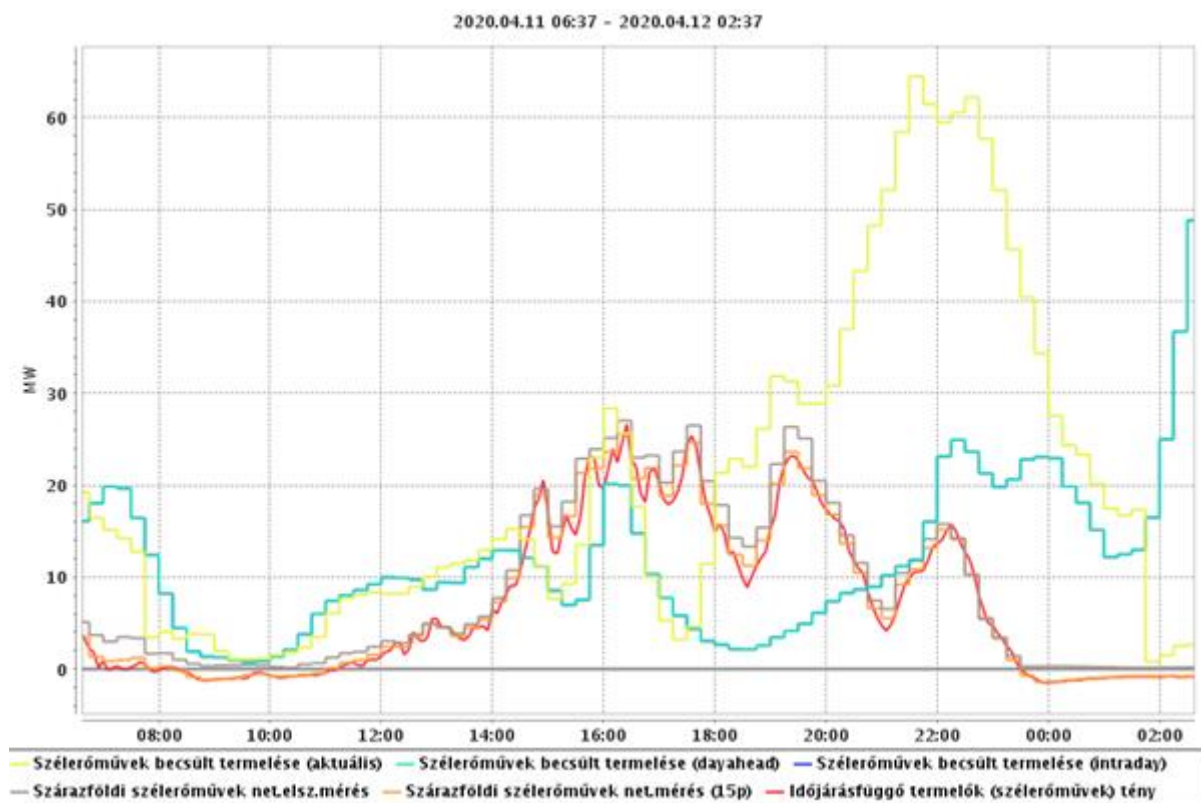
Ábra 3.7: 2020.10.04 Rekord mennyiségű fotovoltaiikus energiatermelés Magyarországon [2]



Ábra 3.8: 2020.10.04 Fotovoltaiikus erőművek termelése [2]

3.2.2 Szélenergia hasznosítása Magyarországon

A szélörművek világszerte egyre nagyobb szerepet kapnak a globális villamosenergia-termelésben. 2011 óta a Globális Szélenergia Egyesület adatai alapján a világon a szélörművek által termelt energia megháromszorozódott. Magyarország azonban az Európai átlaghoz képest igen le van maradva a szélenergia hasznosítása területén. Hazánkban összesen 330 MW szélörmű kapacitás érhető el, az utolsó szélturbina üzembe helyezés 2011-ben történt. Ez nem annak tudható be, hogy országunk nem rendelkezik megfelelő környezeti adottságokkal, az Északi, Észak-Nyugati területeken kellő erősségű szél áll rendelkezésre a szélturbinák gazdaságos üzemeltetéséhez. Az egyik probléma, hogy nem rendelkezünk olyan meteorológiai előre jelző rendszerrel, mely megbízhatóan meg tudja határozni a várható szélsébségeket. Mivel a szélsébség időben igen gyorsan képes változni, ez egy gyorsan fluktuáló, nehezen kiszámítható energiatermelést eredményez. A másik probléma, hogy Magyarország nem rendelkezik nagy szabályzó kapacitásokkal (főleg a lesabályozásban van hiány) melyek a változó termelést kompenzálni tudnák, ezért további szélörművek telepítése csökkentené a hálózat biztonságát. A 3.9. ábra egy napi termelési görbét ábrázol. Jól látható, hogy a várt termelés (sárga görbe) jóval eltér a valós termelési adatoktól (piros görbe). [14]



Ábra 3.9: Egy napra levetített becsült/valós szélenergia termelés Magyarországon [2]

2011 óta szélerőmű építésével kapcsolatos beruházás nem kapott engedélyt Magyarországon, ez főleg annak tudható be, hogy a szabályozási környezetet úgy alakították át, hogy annak feltételeit gyakorlatilag lehetetlen teljesíteni. Egy ilyen feltétel például, hogy egy szélturbina a lakott terület határához legközelebb 12 kilométerre építhető. [15]

3.3 A megújuló energiaforrások elterjedésének hatása a villamosenergia-rendszerre

Összességében elmondható, hogy a megújuló energiaforrások növekedése az utóbbi években globálisan és Magyarországon is jelentős volt, várhatóan ez a tendencia a jövőben is folytatódik. A legnagyobb probléma a két legelterjedtebb megújuló energiaforrással, hogy ezek erősen időjárásfüggőek, nem lehet a várható energiatermelést 100%-os pontossággal előre jelezni. A jelenleg hazánkban üzemelő meteorológiai előre jelző rendszerekkel a várható szélsőséget igen nehéz megfelelő pontossággal megállapítani. A naperőművek csak napközben termelnek villamos energiát, viszont a legnagyobb fogyasztási igény az esti órákban lép fel. Ráadásul, ha egy felhő eltakar egy napelemparkot, annak termelőképesége pillanatok alatt a nullára csökkenhet. Az ilyen időjárási változások a hálózatban nagyon gyorsan változó energiaingadozást eredményeznek. [4]

A hagyományos termelőegységek -ahogy azt a második fejezetben kifejtettem természetükből adódóan kinetikus energiával rendelkeznek, melyek szükség esetén képesek fedezni a termelés/fogyasztás egyensúlyának kismértékű megbomlását. A megújuló energiaforrások folyamatos térhódításának és a hagyományos erőművek előregedése miatti erőmű leállításoknak köszönhetően ezek a kinetikus tartalékok (inercia) egyre kevésbé állnak rendelkezésre.

A kiszámíthatatlan időjárásfüggő termelőegységek miatti gyors és nagymértékű teljesítményváltozások, illetve a természetes inercia csökkenésének köszönhetően több, eddig az üzemirányítók számára ismeretlen probléma jelent meg a villamosenergia-hálózaton.

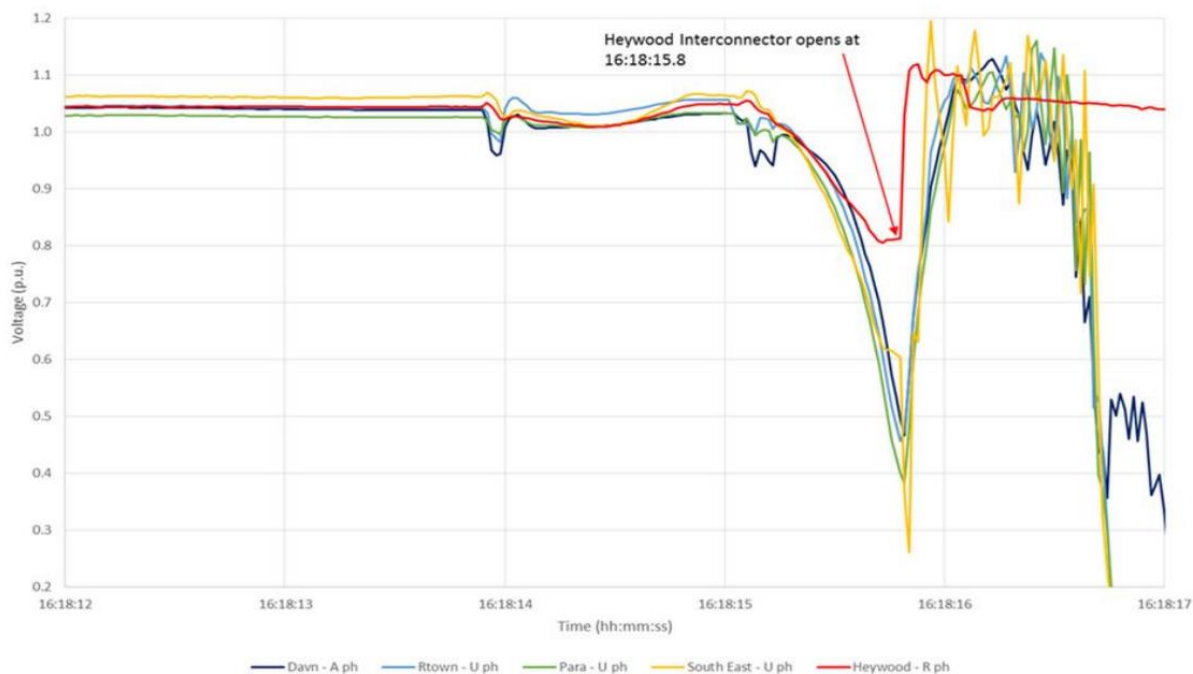
- A termelést annak változó trendje miatt az üzemirányítók nehezen tudják pontosan megbecsülni, nem állnak rendelkezésre hálózati tartalékok.
- A villamosenergia-rendszer stabilitási tartománya szűkül, új típusú, korábban ismeretlen lengések jelennek meg a hálózaton, melyek csillapítása még nem megoldott.
- A RoCoF (Rate of Change of Frequency), azaz a frekvencia változásának mértéke nagymértékben növekszik.
- Frekvenciaeltérések szélsőértékei kitolódnak.
- Feszültségstabilitás és a szögstabilitás csökken. [16]

3.4 Aggasztó jelek

Egy jó példa a megújuló energiaforrások okozta kiszámíthatatlan energiaváltozásokra Németország esete. Németországban jelenleg a termelés 24% -át szélenergia, 10%-át napenergia teszik ki. Az utóbbi években többször előfordult, hogy a szélenergia olyan nagy mennyiségben termeltek villamos energiát napközben egyik pillanatról a másikra, amire a fogyasztói oldal nem volt felkészülve. A többlettermelést a környező országoknak exportálták negatív áron, azaz Németország fizetett azért, hogy az általuk termelt villamos energiát elfogyasszák. 2018-ban összesen a termelés 134 órájában állt elő negatív villamos energia ár. [17]

Egy másik, jelentősebb problémát bemutató példa az ausztráliai hálózat összeomlásának esete. 2016. szeptember 28-án 850 000 fogyasztó maradt villamos energia nélkül, beleértve a lakosságot, a közlekedést és a gyárakat. Az összeomlás fő okozója, egy hatalmas vihar volt Ausztrália déli részén, amely 190 - 260 km/h szélsőséggel járt. A vihar megrongálta a 275 kV-os gerinchálózatot, amely 6 darab feszültségvezetőt eredményezett a hálózaton. A feszültséglengések következtében az összesen 9 szélenergia farmból 8 farmban aktiválódott a feszültség csökkenési védelem, mely leállította a szélenergia farmokat. Ennek következtében hét másodperc alatt 456 MW esett ki a rendszerből. [18]

A hiányzó energiát a rendszer a "Heywood" nevezetű átviteli hálózat próbálta fedezni, amely nem volt képes ekkora energiát elszállítani így 700 ms után védelmei lekapcsolták Ausztrália déli részének hálózatáról. [18]



Ábra 3.10: "Heywood" gerincvezeték leválása [18]

Ennek köszönhetően Ausztrália déli része teljes mértékben elsötétült. A rendszer visszaállítást délután 4:30-kor kezdték meg, 8:30-ra a fogyasztók 90% visszakapcsolásra került. A teljes rendszerösszeomlás az első villamos hibától számítva 88 másodperc alatt következett be, az ilyen dinamikus folyamatoknál tehát nincs idő az optimális beavatkozás meghatározásához.[18]

3.5 Lehetőségek a probléma megoldására

A problémák kiküszöbölésén folyamatosan dolgoznak a szakemberek, jelenleg is több módszert alkalmaznak a megoldásukra. Az egyik ilyen módszer a fogyasztó oldali befolyásolás (DSM: Demand Side Management), ekkor az üzemirányítók közvetlenül kapcsolnak le vagy fel szükség esetén bizonyos fogyasztókat azok előzetes beleegyezésével. Ennek a megoldásnak a fő hátránya a lassú beavatkozási idő.

Egy másik bevett megoldás a forgó tömeg közvetlen pótlása a szinkron kompenzátorok alkalmazása. Ezek olyan szinkrongépek melyek nem szolgáltatnak hatásos teljesítményt (üresen járnak), csupán szinkron fordulatszámokon üzemelnek. Hasonlóan egy hagyományos forgógéphez, a tömegükből kifolyólag önmaguk forgása biztosítja az inerciát. [16]

Egy előremutató megoldás a szintetikus inercia létrehozása teljesítményelektronikai eszközökkel. A különböző, inverteren keresztül csatlakozó termelők vagy energiatárolók aktív szerepet tudnak vállalni a rendszer stabilitásának megőrzésében. Ennek egyik módja az lehet, ha egy bizonyos RoCoF értéket meghaladó frekvenciaváltozás esetén az inverter egy

bizonyos ideig, rögzített értékű többlet hatásos teljesítményt táplál vagy vételez a hálózatról. Napelemes rendszerek esetén ennek előfeltétele, hogy az inverter energiatárolóval legyen összekapcsolva, vagy pedig ne a maximális teljesítményű munkapontban (MPP: Maximum Power Point) üzemeljen, azaz képes legyen növelni a betáplálását, amikor erre igény van. Általában a második feltétel nem áll rendelkezésre, a kedvező megtérülés érdekében a napelemes rendszerek teljes kapacitáson üzemelnek.

Egy további módszer a frekvenciafüggő hatásos teljesítmény válaszadási képesség (LFSM: Limited Frequency Sensitive Mode), amely a frekvencia aktuális értékétől függően változtatja az inverter által betáplált teljesítményt (holtsávval vagy anélkül). [19]

Dolgozatom második felében bemutatott akkumulátoros energiatároló fő feladata a frekvenciastabilitás megtartása az LFSM módszerrel. A következő fejezetben bemutatom mi is az az energiatároló, milyen fajtái, alkalmazási lehetőségei, és előnyei vannak.

4 VILLAMOSENERGIA TÁROLÓK

Az energiatárolási technológiák az elmúlt években nagymértékű fejlődésen mentek keresztül. Ahogy a következő fejezetben bemutatom, igen sokféle energiatároló megoldást alkalmaznak napjainkban. Először azonban ismertetem a tárolók nyújtotta különböző alkalmazási lehetőségeket a villamos energetikában.

4.1 Villamosenergia tárolók alkalmazási lehetőségei

A villamosenergia nagy mennyiségű és tartós tárolása egy régóta aktuális még mindig nem teljesen megoldott probléma. Legyen szó akár a hordozható elektronikai berendezésekről, vagy az energiaiparban felhasznált energiatárolókról, folyamatosan zajlik a verseny, hogy ki tudja még költséghatékonyabban, még effektívebben tárolni a villamos energiát. El se tudjuk képzelni mindennapjainkat telefonunk, számítógépünk nélkül, ugyanakkor a folyamatosan fejlődő és bővülő funkcióknak köszönhetően e berendezések energiaigénye folyamatosan nő. Ezzel ellentétben a berendezések méretét minden új típusnál csökkenteni kell az előzőhöz képest, hogy megfeleljen a piaci elvárásoknak.

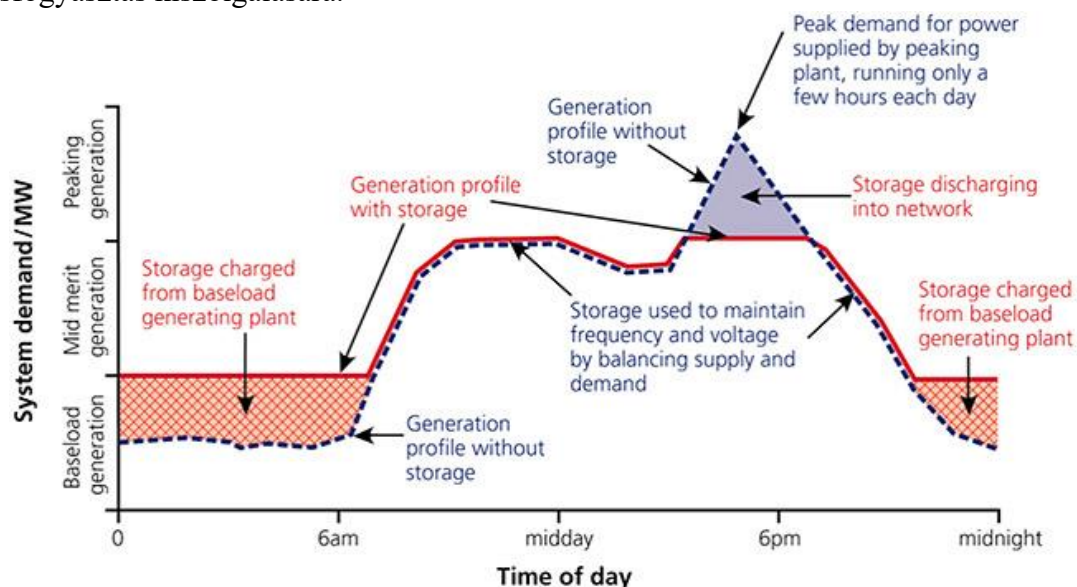
Az energiaiparban is hasonló elvárásokat állítottak a fogyasztók a szolgáltatók felé. A villamosenergia-hálózat minőségét folyamatosan megfelelő szinten kell tartani. Elég ha abba belegondolunk, mi lenne, ha egy napig villamos energia nélkül maradnának a városok. Szinte minden háztartási berendezésünk villamos energiával üzemel, ezek hosszútávú kiesése esetén komoly gondban lenne a modern társadalom. Habár nem jelent problémát, ha a hűtőszekrényünk egy órán keresztül villamosenergia nélkül marad, vannak olyan fogyasztók, melyek megszakítás nélkül, megfelelő minőségben igénylik az energiát. Ilyenek a kórházak, a különböző gyárak, az ipari létesítmények, ahol a villamosenergia megszűnése súlyos következményekkel járna. Ezeken a területeken mindenhol jelen van valamilyen módon az energia tárolása, mely biztosítja a folyamatos és minőségi energiaellátást.

4.1.1 Szekunder és primer szabályozás

A második fejezetben kifejtettem, hogy az üzemirányítók egyik fő feladata a termelés és fogyasztás egyensúlyának folyamatos fenntartása. Mivel a különbségek a frekvenciában jelentkeznek, ezt nyomon követve, illetve szabályozva fenntartható az egyensúly. Az energiatárolók nagy előnye, hogy képesek a fel, illetve le szabályozásra, azaz fogyasztóként és termelőként is tudnak viselkedni az adott igényekhez alkalmazkodva. Számos olyan energiatároló technológia igen gyors válaszidejű (pl.: akkumulátoros tároló) mely képes a primer szabályozásban részt venni, valamint találunk kellően nagy teljesítményű és megfelelően szabályozható megoldásokat is (pl.: szivattyúzott víz), melyekkel szekunder szabályozás is megvalósítható. [20] Erről az alkalmazási területről a későbbiekben bőven lesz szó.

4.1.2 Fogyasztói csúcs levágása

A villamos hálózatok üzemelésének, fejlesztésének fő szempontja a gazdaságosság mellett az üzembiztonság. A hálózatot a maximálisan fellépő csúcsterhelés fölé kell méretezni, hogy minden esetben biztosított legyen az energiaszolgáltatás. Ezek a fogyasztói csúcsok csak rövid ideig lépnek fel, általában előre megbecsülhető időpontokban. Az energiatárolók lehetőséget biztosítanak arra, hogy egy adott völgyidőszakban felkészüljenek a bekövetkező csúcsfogyasztásra és betáplálásukkal támogassák a fellépő energiacsúcsok kiszolgálását. Így a hagyományos erőműveket gazdaságosabban lehet üzemeltetni, kevesebb le/fel szabályozást igényelnek. [20] A tárolók e fajta használata nagyon előnyös tud lenni az időjárásfüggő energiatermelő egységek rendszerbe integrálásának segítésére. A naperőművek termelése a déli, kora délutáni órákban maximalizálódik, ezt az energiát el lehet tárolni az esti csúcsfogyasztás kiszolgálására.



Ábra 4.1: Energiatároló alkalmazása termelői csúcsok levágására [20]

4.1.3 Black-start kapacitás

Az előzőekben említésre került mennyire fontos napjainkban az ellátásbiztonság. Mivel szinte minden tevékenységünk kapcsolódik a villamos energiához, annak kiesése komoly problémákat jelentene a mindennapi életünkben. A hálózat üzemeltetése során nem várt események bármikor bekövetkezhetnek, melyek ritkán jelentős fogyasztói kiesésekkel járhatnak (black-out). Ekkor a legfontosabb szempont a fogyasztók újbóli villamosenergia-ellátása a lehető leggyorsabb idő alatt, a rendszer egyensúlyát szem előtt tartva. A hagyományos erőművek nagyrésze jelentős segédüzemi energiát igényel, azaz csak külső villamos energia megléte esetén indítható újra a termelésük. Az energiatárolók képesek önmaguk energiáját felhasználva a hálózatra termelni, így segítve a többi erőmű elindulását, azok rendszerbe szinkronizálását. Ezt a képességet nevezzük black-startnak, azaz külső energiaforrás nélküli indulási képességnek mely nagyon nagy hozzáadott értékkel bír a rendszerbiztonság területén. [20]

4.1.4 Villamoshálózat minőségének javítása

Az elosztott energiatermelés komoly hatással van a hálózat feszültségviszonyaira. Nem ritka manapság, hogy az energiaáramlás bizonyos területeken kétirányú, miközben a hálózat tervezésekor még nem kellett ezzel kalkulálni. Továbbá számos esetben az ellátásminőség romlása feszültségproblémákon keresztül észlelhető. Ezen problémák kezelésére az elosztott energiatárolás megoldást jelenthet. A nagyléptékű szabályozás mellett fontos a minőség lokális szintű biztosítása is. Ez különösen fontos azoknál a fogyasztóknál, melyek igen érzékenyek a hálózat minőségére. A feszültségletörések, pillanatnyi kimaradások sokszor észrevétlenek egy átlagos felhasználónak, de komoly gondokat okozhatnak egyes üzemeknél, laboroknál vagy egészségügyi intézményeknél. A gyors válaszidejű energiatárolók alkalmasak a rövid idejű fluktuációk kiküszöbölésére és a megfelelő hálózati minőség biztosítására. [20]

4.1.5 Villamosenergia-beszerezés költségének csökkentése

A villamosenergia-ár különböző fogyasztók esetén eltérő díjszabások alapján kerül meghatározásra. Ahol időben eltérő árak vannak, ott az olcsóbb időszakban a villamos energia eltárolható, majd felhasználható a drágább időszakokban. Sok esetben probléma, hogy egy gépegység indulása, bemelegedése során nagy energiaigény lép fel. Ezt a fogyasztó, csak plusz energia lekötésével tudja biztosítani, de ezt a többlet energiát a berendezés csak üzemidejének tört részénél használja fel. Megoldást jelent ilyenkor egy energiatároló alkalmazása, mely biztosítja a fellépő többletenergiákat, így elkerülve a növelt energia lekötésének költségeit. Összességében elmondható, hogy az energiatároló rendszerek lehetőséget adnak a villamosenergia gazdaságosabb felhasználására. [20]

4.1.6 Szigetüzemű hálózatok támogatása, hálózatfejlesztési beruházások elkerülése

A napelemes rendszerek és az akkumulátoros energiatárolásnak köszönhetően napjainkban könnyen megvalósíthatóvá vált a szigetüzemi, lokális villamos hálózatok kialakítása. Ez főleg azoknál a fogyasztóknak előnyös, ahol a fogyasztó messze helyezkedik el a villamos hálózatra csatlakozás lehetőségétől és a hálózatépítés költséges lenne (melyet a szolgáltató a fogyasztóra terhel). Ebben az esetben a tulajdonos önmagának termeli meg a szükséges energiát, ekkor azonban érdemes valamilyen energiatároló rendszert kiépíteni a folyamatos és biztonságos ellátás érdekében. [20]

4.2 Villamosenergia tárolók fajtái

A 4.1 fejezetben kifejtett előnyöknek, és a technológiák költségeinek csökkenése miatt egyre elterjedtebbek a különböző ipari energiatároló alkalmazások a világon. A következőkben bemutatom a jelenleg használt villamosenergia tárolására alkalmas ipari megoldásokat.

4.2.1 Szivattyús-tározós verőmű

A szivattyús energiatároló vízerőművek a víz mechanikai energiáját használják fel a villamosenergia tárolására. Csúcsfogyasztási időszakban termelőként üzemelnek, úgy, hogy két különböző szintmagasságú víztározó között a magasabban fekvőből az alacsonyabban fekvőbe vizet engednek át egy vízturbinán keresztül, és egy generátor segítségével villamos energiát állítanak elő. Völgyidőszakban, vagyis alacsony fogyasztás idején a vizet visszaszivattyúzzák a felső víztározóba, a generátort villanymotorként, a turbinát pedig szivattyúként használva. A technológia előnyei közé tartozik, hogy nagy mennyiségű energia tárolható alkalmazásával, viszonylag gyorsan szabályozható, és hosszú életű és olcsó energiatárolást biztosít. Hátránya, hogy a kiépítéséhez megfelelő területre van szükség, környezetre gyakorolt hatása jelentős. [20]

A szivattyús energiatárolókat csoportosíthatjuk felszíni és földalatti alkalmazásuk szerint, valamint megkülönböztethető nyílt és zárt hurkú erőműveket is annak alapján, hogy használ-e az adott erőmű természetes vizet. Adott esetben tengervíz felhasználásával is készülhet szivattyús energiatároló, viszont a felmerülő többlet építési- és fenntartási költségek ebben az esetben jóval magasabbak. [20]

4.2.2 Lendkerekes energiatárolás

lendkerék, ami lendítőkerékként is ismert, gyakorlatilag egy forgó tárcsa, mely mechanikai energia tárolására alkalmas. A berendezésben tárolt energia a tömegével egyenesen, szögsebességével pedig négyzetesen arányos, ezért általában nagy szakítószilárdságú, könnyű anyagból készítik. A korszerű lendkerék csapágyazása mágneses felfüggesztéssel van megoldva, valamint a minél jobb sűrűlátsági tényező elérése érdekében általában légritka, vagy vákuumos teret igyekeznek létrehozni a tokozáson belül. A nagyobb lendkerekek fordulatszáma a 20000/perctől akár az 50 000/percet is elérheti vákuumos közegben. A technológia nagy előnye, hogy gyors energiafelvételre és leadásra képes, kevés karbantartást igényel, környezetre gyakorolt hatása minimális. Hátránya, hogy az akkumulátoros tározókhoz képest kisebb energiasűrűség érhető el vele.[20]

4.2.3 Sűrített levegős energiatárolás

A sűrített levegős (sűrített gáz) tárolási technológiát a 19. század óta használják különböző ipari és mobil alkalmazásokra egyaránt. Ezt a tároló fajtát főleg a hálózati csúcslevágásra szokták alkalmazni. Többlet energia esetén, kompresszorok segítségével nagynyomású gázt állítanak elő, melyet a tároló egységekbe juttatnak. Ezek általában a föld alatt helyezkednek el, lehetnek természetes víztározók, kimerült gázmezők, korábbi só- vagy kőbányákból visszamaradt üregek. Az eltárolt nagynyomású gázból szükség esetén gázturbinák segítségével villamos energiát állítanak elő. [20]

4.2.4 Szuperkapacitás

A szuperkapacitás, mely ultrakapacitásként is ismert, rengeteg előnnyel bír a hagyományos kondenzátorokkal és az akkumulátorokkal szemben. Felépítése gyakorlatilag megegyezik a hagyományos kondenzátoréval, viszont a klasszikus dielektrikum helyett itt egy kettősréteg található, ami miatt a teljesítmény- és energiasűrűsége sokszorosa lehet a hagyományos kondenzátorokénak. A kettősréteg egy nagyon vékony térrész (10^{-9} méter nagyságrend) amely megfelelően nagy fegyverzet-felülettel kombinálva nagy kapacitásértéket ad. A szuperkondenzátor teljesítménysűrűsége viszonylag nagy, energiasűrűsége viszont nem éri el egy akkumulátor szintjét, mivel csak rövid idejű beavatkozásokra képes. A magas önkisülési ráta, bekerülési költség és alacsony energiasűrűség miatt nem éri meg alkalmazásuk, ha az energia hosszabb időtartamra való tárolására van szükség (csak rövid ideig gazdaságosak). [20]

4.2.5 Hidrogénes energiatárolás (elektrolízissel)

A hidrogénes energiatároló egy elektrolízist végző berendezésből (ami a vizet összetevőire bontja: hidrogén és oxigén), egy hidrogén tartályból (nyomás alatt tartott tartályból) és egy üzemanyagcellából áll. A bontás után az üzemanyagcellát egy gázturbinához, gázmotorhoz, vagy kombinált ciklusú gáz- és gőzturbinához csatolják, így állítható elő villamos energia. Az oxigén tárolása szükségtelen, mert az a levegőből kinyerhető, viszont a hidrogén ipari méretekben való biztonságos tárolása és elosztása egyelőre megoldandó feladat, ezért a technológiát még nem alkalmazzák széleskörűen. [20]

4.2.6 Akkumulátoros (elektrokémiai) energiatárolás

Már az 1980-as években is felmerült az akkumulátoros energiatárolók használata a villamos iparban. Az első ilyen rendszer 1986 és 1993 között üzemelt Berlinben. A tároló 17 MW/14 MWh teljesítményű volt, főként primer szabályozásra alkalmazták és ólom-savas akkumulátorokból épült fel. A projekt sikerességének ellenére a következő évtizedekben csak néhány új tároló épült ki a világban, ez főleg az akkori akkumulátor technológia korlátolt élettartamának és magas árának volt köszönhető. [21] Az utóbbi években, azonban fordulóponthoz ért az akkumulátor piac, ugyanis megjelentek a lítium-ion akkumulátorok. Felhasználásukkal, egyre nagyobb energiasűrűségű akkumulátorok válnak elérhetővé.

Mivel projektemben egy akkumulátoros energiatároló koncepcióját vizsgálom, a későbbiekben részletesebben kifejtem az akkumulátorok jellemzőit.

4.3 Energiatárolók összehasonlítása

4.3.1 Paraméterek

A következő táblázatban összehasonlítom a különböző energiatárolásra használt technológiák lényeges paramétereit.

Technológia	Teljesítmény (MW)	Válasz idő	Élettartam (év)	Energia sűrűség (Wh/I)	Hatásfok (%)	Napi Önfogyasztás	Környezetre gyakorolt hatás
Szivattyús-tározó	100-5000	Percen belüli	40-60	0.5-1.5	75 - 85	Elhanyagolható	Jelentős
Sűrített levegős tározó	5-1000	1-15 min	20-40	3 - 6	70-89	Elhanyagolható	Alacsony
Lendkerék	0.1-20	<0,004 sec	15	20-80	93 - 95	100%	Elhanyagolható
NaS akkumulátor	0.5 - 34	0,001 sec	10 - 15	150 - 250	85 -90	20%	Jelentős
Li-ion akkumulátor	0.1-100	0.02 sec	5 - 15	200 - 500	85 -90	Minimális	Alacsony
Áramlásos akkumulátor	0.1 - 20	1 sec	5 - 10	16 - 33	85 - 90	Minimális	Alacsony
Szuperkapacitás	0.01-0.3	0,008 sec	5-30	0,2 - 15	90 - 95	20 - 40%	Alacsony

Ábra 4.2: Különböző energiatárolók paramétereinek összehasonlítása [22]

4.3.2 Költségek

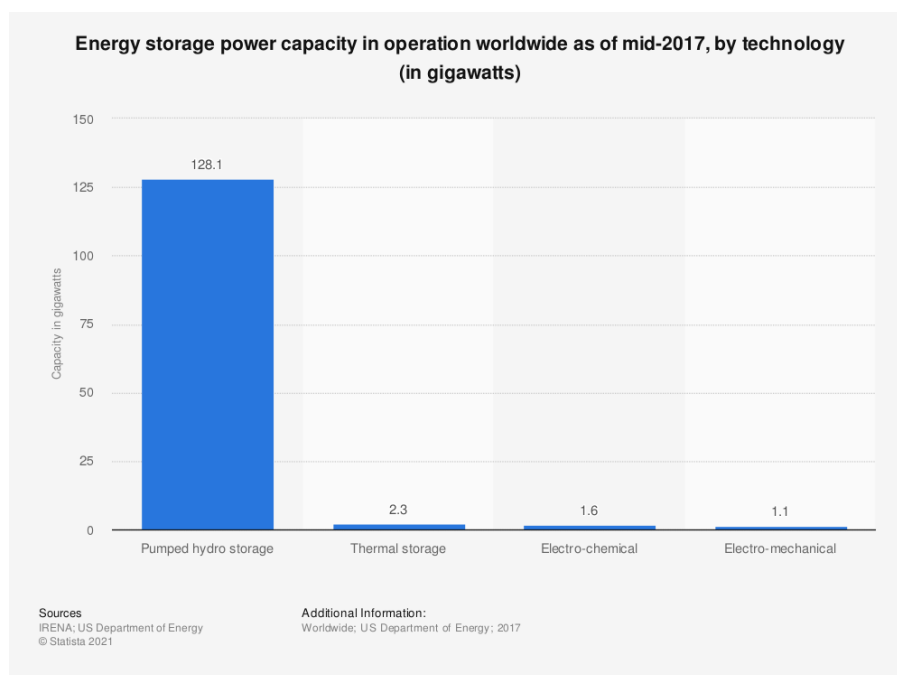
A 4.3. táblázat a különböző technológiák 2020-as átlagos költségeit hasonlítja össze. A folyamatos technológiai fejlődésnek köszönhetően a különböző energiatárolók megvalósítási költségei folyamatosan csökkenő tendenciát mutatnak. A jövőben a legnagyobb árcsökkenés valószínűleg az akkumulátor technológiáknál várható, azok tömeggyártása és folyamatos fejlesztésének köszönhetően.

Technológia	Egységnyi teljesítmény költsége (\$/kW)	Egységnyi kapacitás költsége (\$/kWh)
Szivattyús-tározó	2000 - 4300	5 - 100
Sűrített levegős tározó	400 - 1000	2 - 120
Lendkerék	250 - 350	1000 - 14,000
NaS akkumulátor	1000 - 3000	300 - 500
Li-ion akkumulátor	900 - 4000	600 - 3800
Áramlásos akkumulátor	600 - 1500	150 - 1000
Szuperkapacitás	200 - 489	1000 - 10,000

Ábra 4.3: Különböző energiatárolók költségeinek összehasonlítása [22]

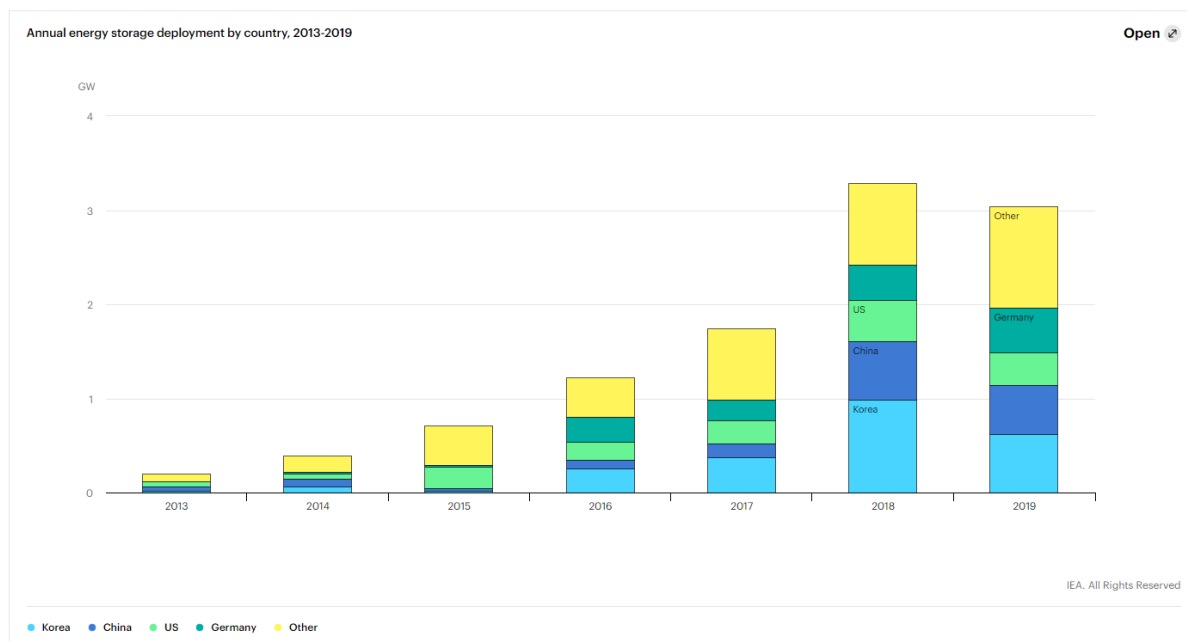
4.4 Energiatárolók kiépítettsége a világban

Jelenleg globálisan beépített energiatároló kapacitás több mint 96%-át szivattyús-tározós vízerőművek teszik ki. A 4.4. ábra szemlélteti a különböző technológiák megoszlását.



Ábra 4.4: Energiatároló technológiák megoszlottsága a világban 2017-ben [23]

A 4.5. ábra az évenként telepített energiatárolók teljesítményét szemlélteti. A jövőbeli várakozások szerint, évenkénti 30%-os teljesítménynövekedésre lehet számítani, és 2030-ra 741 GW energiát leszünk képesek eltárolni. [23]



Ábra 4.5: Energiatárolók beépített teljesítménynövekedése a világban [24]

4.5 Energiatárolók Magyarországon

A magyar villamosenergia-hálózat szabályozó kapacitási igénye (az európai trendekhez hasonlóan) folyamatosan növekszik. Hazánkban jelenleg működő erőműveink nagyrésze kevésbé alkalmas termelésük gyors változtatására, mivel alapüzemre, nem pedig rendszer-szabályozási funkciókra építették ki ezeket.

Jelenleg Magyarországon a szabályozási tartalékokat (főleg szekunder szabályozás) legnagyobb részben a gázturbinás gyors indítású erőművek fedezik. A rendszerszintű költségekből ezek az erőművek üzemeltetése teszi ki a legnagyobb részt, kihasználtságuk csak 10-25% közötti.[20]

A szomszédos országokkal ellentétben szivattyús tározós vízerőművel nem rendelkezik országunk. A hazai megvalósítás esélyeit rontja, hogy Magyarország vízenergia-potenciál szempontjából nem kiemelkedő, mivel nincsenek magas hegységeink, kevés a csapadék és a bővizű folyóink is lankás területeken folynak végig. Mindemellett egy tározó megvalósítására 5-8 alkalmas hely létezik hazánkban és ezek közül is kiemelkedő adottságokkal rendelkezők a Dunakanyarban és a Zemplén-hegységben található területek. [25]

Ha szivattyús víztározós erőművel nem is, de hazánk rendelkezik több ipari méretű akkumulátoros energiatárolóval. Ezek közül elsőként 2019-ben az Alteo Energiaszolgáltató Nyrt. üzemelte be erőművét, mely azóta is segíti a hazai primer szabályozást a maga 6 MW teljesítményével.



Ábra 4.6: Első magyarországi akkumulátoros energiatároló

4.6 Összegzés

Figyelembe véve azt, hogy a világon, így Magyarországon is jelentősen, szinte exponenciálisan növekszik a megújuló energiaforrások által termelt energia, a biztonságos és szabályozható villamos hálózat fenntartásához elengedhetetlen lesz a jövőben további energiatárolókat integrálni a hálózatba.

Jelenleg a legtöbb előnnyel járó energiatárolást megvalósító technológia a szivattyús tárolós vízerőmű, azonban hazánkban egy ilyen erőmű építése igen költséges lenne.

Megvizsgálva a különböző energiatárolási technológiákat, levonható a következtetés, hogy a legkézenfekvőbb és gazdaságosabb megoldás, az akkumulátoros energiatárolók létesítése. Tárolási kapacitásuk töredéke a szivattyús tározós erőműveknek, azonban minimális helyigényüknek köszönhetően, szinte bárhol megvalósíthatóak, akár területileg szétszórta, kisebb teljesítményű egységekkel is.

A következő fejezetben egy rövid kitekintést teszünk az akkumulátorok világába.

5 AKKUMULÁTOROK

Akkumulátoroknak nevezzük azokat az energiatárolókat, melyek a beléjük vezetett villamos energiát kémiai úton eltárolják, majd az így eltárolt energia szükség esetén kinyerhető belőlük. Minden akkumulátor alapegysége az úgynevezett akkumulátorcella, amelyben két különböző anyagú elektróda meghatározott összetételű folyadékba (elektrolitba) merül. Feltöltött állapotban az elektródák között villamos potenciálkülönbség lép fel. [26]

5.1 Akkumulátorok legjellemzőbb tulajdonságai

A megfelelő akkumulátorok kiválasztásához szükséges ismerni azok paramétereit, hogy a célra a leginkább megfelelő típust alkalmazzuk.

5.1.1 Cellafeszültség

A cellafeszültség egy cella két elektródája közötti potenciálkülönbség nagyságát adja meg. Az akkumulátor alapvető jellemzője, amelyet az akkumulátor kémiai reakciói, az akkumulátor alkatrészeinek koncentrációja és az akkumulátor polarizációja határoz meg. Az egyensúlyi viszonyokból számított feszültséget általában névleges akkumulátorfeszültségnek nevezzük. Mivel a legtöbb kémiai reakció elektromos potenciálja 2 V nagyságrendű, míg a terhelések által igényelt feszültség általában nagyobb, a legtöbb akkumulátorban számos egyedi akkumulátor cella sorba van kötve. Például ólom-savas akkumulátorokban mindegyik cella feszültsége körülbelül 2 V. Hat cellát sorba csatlakoztatva egy átlagos 12 V-os ólomakkumulátort kapunk.

Sok akkumulátortípusban, az akkumulátort nem meríthetjük egy bizonyos feszültség szint alá, ellenkező esetben az maradandó károsodással járhat. Ezt a feszültséget kisütési határfeszültségnek hívják, és az akkumulátor típusától, hőmérsékletétől és az akkumulátor kisütési sebességétől függ. [27]

5.1.2 Kapacitás

A cella kapacitása az egy cella által tárolt energia mértéke, amelyet a cellában lévő aktív anyagok tömege határoz meg. Az összekapcsolt cellák kapacitása összeadódik, összegük megadja az akkumulátor kapacitását. Az akkumulátor kapacitása a maximális energiamennyiséget képviseli, amelyet bizonyos feltételek mellett az akkumulátorból ki lehet nyerni. Az akkumulátor tényleges energiatárolási képességei azonban jelentősen eltérhetnek a névleges kapacitástól, mivel az akkumulátor felhasználható kapacitása nagymértékben függ az

akkumulátor életkorától és múltjától, az akkumulátor töltési vagy kisütési határfeszültségtől és a hőmérséklettől.

A kapacitást wattóraban (Wh), kilowattóraban (kWh) vagy amperórában (Ah) mérik. Az akkumulátor kapacitásának leggyakoribb mértéke az Ah, mely a töltött állapotból kiindulva a kisütési határfeszültségig tartó kisütési idő és az e közben fellépő áramerősség szorzata. A Wh-kapacitás megkapható az Ah-kapacitásból, ha megszorozzuk az Ah-kapacitást az akkumulátor névleges feszültségével. [27]

5.1.3 Önkisülés

Az önkisülés arra a tényre utal, hogy csatlakoztatott terhelés hiányában is kismértékben végbemegy a kisütési reakció, ezért az akkumulátor idővel magától lemerül. Az önkisülés sebessége elsősorban a kémiai reakcióban részt vevő anyagoktól és az akkumulátor hőmérsékletétől függ. [27]

5.1.4 Belső ellenállás

Az akkumulátor belső soros ellenállása határozza meg az akkumulátor maximális kisütési áramát. Következésképpen azokban az alkalmazásokban, ahol az akkumulátornak hirtelen nagy áramerősséget kell szolgáltatni, a belső soros ellenállásnak alacsonynak kell lennie. Ezenkívül a belső ellenállás befolyásolja az akkumulátor hatékonyságát, értéke az akkumulátor élettartama során folyamatosan növekszik. [27]

5.1.5 Töltési és kisütési áramerősség

A kisülési áramot jellemzően C besorolás szerint jellemzik. A C besorolás azt mutatja meg, hogy kisütés vagy töltés közben mekkora áramerősséget tud leadni vagy felvenni az akkumulátor a névleges kapacitásához viszonyítva. Az 1C besorolás azt jelenti, hogy egy 100 Ah akkumulátor egy óra alatt 100 A képes leadni. Egy azonos kapacitású 5C besorolású akkumulátor egy óra alatt 500 amper leadására képes. [28]

5.1.6 Energiasűrűség

Egy akkumulátor energiasűrűségét megkaphatjuk a kapacitásának és tömegének hányadosával (Wh/kg) vagy a kapacitás és az akkumulátor térfogatának hányadosával (Wh/dm^3). [27]

5.2 Akkumulátorok osztályozása kémiai összetételük szerint

Napjainkra az akkumulátorok fejlődésének köszönhetően több mint húsz fajta technológiát különböztetünk meg, a következőkben a teljesség igénye nélkül ismertetek pár meghatározó akkumulátor felépítést. A technológiák közötti fő különbséget, a különböző anyagok összetétele adja az akkumulátor cellákon belül. [29]

5.2.1 Ólom-savas akkumulátorok

Az ólomsavas akkumulátort 1859-ben találta fel Gaston Planté francia fizikus. Ez volt a világ első újratölthető akkumulátora. A pozitív elektróda aktív anyaga ólom-oxid, a negatív elektródáé tiszta ólom, az elektrolit pedig desztillált vízzel hígított kénsav. Energiasűrűsége 0,11-0,14 Wh/kg. Napjainkban főleg autóakkumulátoroknál és szünetmentes tápegységként alkalmazzák. [29]

5.2.2 Nikkel-kadmium akkumulátor (NiCd)

A hatvanas években jelentek meg az első nikkel-kadmium (NiCd, anód és katód) akkumulátorok. Akkoriban ezek kínálták az egyetlen alternatívát az ólom-savas akkuk mellett. Esetükben nagy probléma a kristályképződés, mely az a jelenség, hogy ha az akkumulátor aktív részecskéit sokáig nem mozgatják meg, hajlamosak nagyobb kristályokba összeállni, ami csökkenti az akku kapacitását. Energiasűrűsége 0,11 Wh/kg. Napjainkban már kevésbé elterjedt, főleg kisebb áramforrást igénylő berendezéseknél alkalmazták. [29]

5.2.3 Nikkel metál-hidrid (NiMH) akkumulátorok

Az elmúlt 5-6 évben a nikkel metál-hidrid (NiMH) technológia vette át a NiCd akkumulátorok helyét. Ezekben az akkukban a pozitív oldalon a NiCd akkukhoz hasonlóan nikkel található, a negatív oldalon viszont egy speciális hidrogén-megkötő fémötvözet veszi át a kadmium helyét. Töltéskor ez a fémötvözet megkötí a savas elektrolit hidrogénjét, kisütéskor pedig leadja azt. Energiasűrűsége 0,36 Wh/kg. [29]

5.2.4 Lítium-ion alapú akkumulátor (Li-ion)

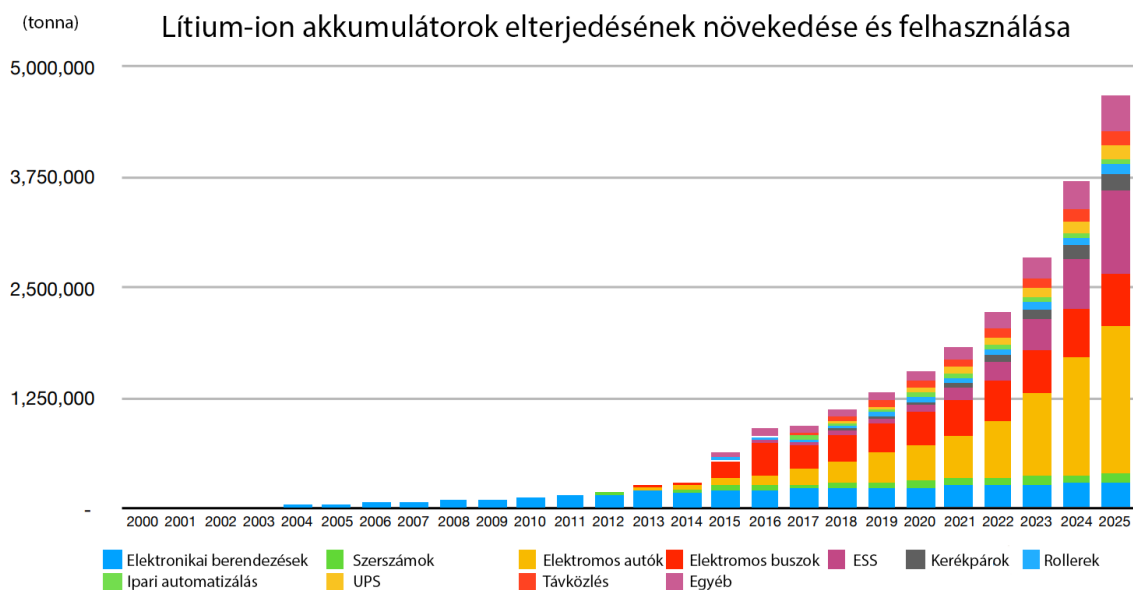
A legfiatalabb generációba tartozik a lítium-ion (Li-ion) technológia. Nevét onnan kapta, hogy a töltés tárolásáról lítium-ionok gondoskodnak, amelyek töltéskor a negatív, szén alapú elektródához, kisütéskor pedig a pozitív fémoxid elektródához vándorolnak. Az anódot és a katódot szerves elektrolit választja el egymástól. Jelenleg ez a legnagyobb energiasűrűségű akkumulátor. Különböző változatai ismertek, energiasűrűsége 0,5-2,81 Wh/kg is lehet. Jellemző rá a hosszú élettartam, a nagy teljesítmény és a jó energetikai hatásfok. Hátránya, hogy a többi akkumulátor típushoz képest a cellák kevésbé stabilak, ezért működtetése felügyeleti elektronikát igényel (BMS). Nem megfelelő használat esetén akár robbanást is okozhat. A lítium ritka előfordulásának köszönhetően igen drága akkumulátor, azonban kedvező tulajdonságai miatt felhasználása igen elterjedt. Az elektromos autó, mobilkészülék, valamint az villamos energetikában működő energiatárolók is jellemzően lítium-ion akkumulátort alkalmaznak.

Mivel a lítium-ion akkumulátorok napjainkban a leggazdaságosabb akkumulátorfajták és az elektromos autók többsége is ilyen technológiát alkalmaz, a továbbiakban ezt a típust fogom vizsgálni. [29]

5.3 Lítium-ion akkumulátorok elterjedése

A lítium-ion akkumulátorok beépített kapacitása a világban 500%-kal nőtt az utóbbi 10 évben. A kilencvenes évek elejétől főleg a hordozható elektronikai berendezésekben kezdték el alkalmazni az akkumulátortípust, viszonylag nagy energiasűrűségének köszönhetően.

A lítium-ion akkumulátorok legjelentősebb növekedése az elektromos járművek (főleg autók és buszok) elterjedése jelentette. 2018-ban az elektromos autók összesített száma már meghaladta a világon a 4 millió darabot és becslések szerint 2025-re az elektromos autó globális piaci részesedése el fogja érni a 20%-ot. Az elektromos autók és buszok mellett a lítium-ion akkumulátorokat egyre többféleképpen alkalmazzák, például elektromos kerékpárokból, robogókból, energiatárolókból, vagy akár elektromos fűnyírókban is. [30]



Ábra 5.1: Lítium akkumulátorok elterjedése [30]

5.4 Lítium-ion akkumulátorok élettartamának vizsgálata

A lítium-ion akkumulátorok a többi akkumulátorhoz viszonyítva igen hosszú élettartammal rendelkeznek. Azonban ezek élettartama is véges, mivel üzemelésük során olyan nem visszafordítható fizikai és kémiai változások történnek, melyek folyamatosan rontják az akkumulátorok egyes tulajdonságait. Az akkumulátorok degradációjának négy fő oka lehet.

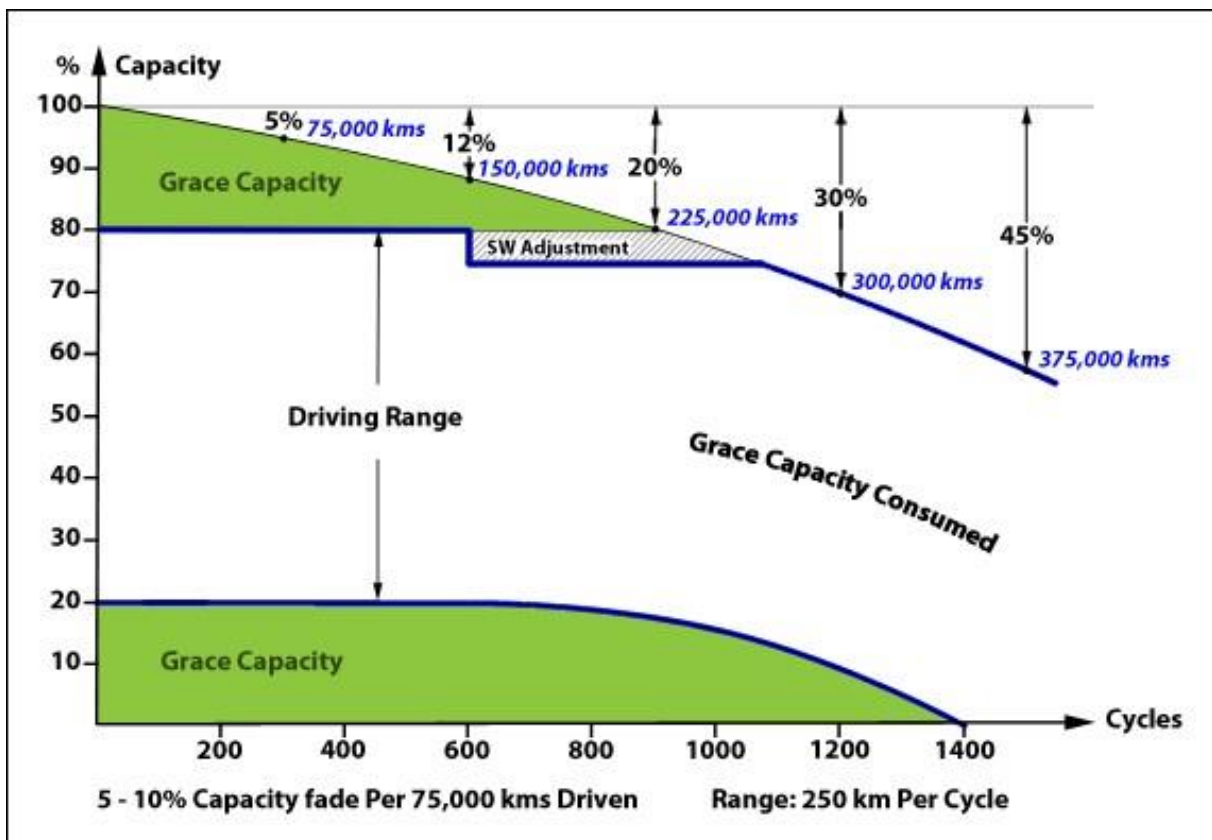
- Az elektródák mechanikai degradációja vagy a cellák nyomásának csökkenése a tasak típusú cellákban. A cella gondos kialakításával és a megfelelő elektrolit-adalékokkal minimalizálni lehet ezt a hatást.[31]
- A szilárd elektrolit felület (SEI) növekedése az anódon. Ekkor egy olyan gát képződik az anód és a katód között, mely a belső ellenállás növekedését eredményezi. Ez a fő okozója a lítium-ion alapú akkumulátorok kapacitásvesztésének. Az elektrolit adalékok csökkenthetik ezt a hatást.[31]
- Elektrolit oxidáció (EO) képződése a katódnál, ami hirtelen kapacitásvesztéshez vezethet. A cellák magas hőmérsékleten tartása elősegíti ezt a jelenséget.[31]
- Lítium galvanizálódása az anód felületén a magas töltési sebesség hatására. [31]

5.5 Lítium-ion akkumulátorok újra felhasználása

Jelenleg az elektromos autóipar használja fel legnagyobb mértékben a lítium akkumulátorokat, és a szükséges akkumulátor mennyiség a jövőben jelentősen nőni fog. A járművek akkumulátorainak újrahasznosítása még messze nem bontakozott ki, ennek oka, hogy egyelőre nincs olyan nagy mennyiségű akkumulátor, amelytől meg kellene szabadulni, valamint az akkumulátorgyárak még nem szenvednek komoly nyersanyag hiánnyal. [32] Becslések szerint azonban 2030-ra várhatóan az akkumulátoripar 200 millió köbméter hulladékot fog termelni évente, mely komoly problémát fog okozni a jövőben. [33]

A legtöbb elektromos autóban használt akkumulátor 8 évre vagy 160,000 km hatótávolság megtételére szóló garanciával rendelkezik. A különböző tanulmányok azt mutatják, hogy körülbelül minden 80,000 km megtétele után az akkumulátorok kapacitása 5%-kal csökken. [34]

Az átlagos gyártói szabály, hogy 8 év aktív használat alatt az akkumulátorok kapacitása nem csökkenhet le 70% körüli szint alá. Ez praktikus azt jelenti, hogy a 200 km-es hatótávot bíró autó még 8 évesen is meg kell, hogy fusson a 140 km-es hatótávot. E vállalás betartása érdekében az akkumulátort kezelő rendszer (Battery Management System - BMS) adaptív módon használja fel a rendelkezésre álló kapacitást. Ez azt jelenti, hogy az új akkumulátor egységeket a vezérlés csak 80% -ig engedi tölteni és csak 20%-ig engedi lemeríteni, tehát a rendelkezésre álló kapacitás 60%-át tudja felhasználni a jármű. A teljesítmény folyamatos szinten tartásához, ezeket a határokat a BMS a degradáció mértékétől függően folyamatosan szélesíti, ennek köszönhetően a garanciális időszak alatt sokkal kisebb mértékben érzi a felhasználó a járműének hatótávolság csökkenését. Miután a BMS már az akkumulátor teljes kapacitását használja, a hatótávolság csökkenés sokkal szembetűnőbbé válik és egy idő után nem éri meg fenntartani a járművet. [34]



Ábra 5.2: Az öregedő akkumulátor energiasávja elektromos járművekben [34]

Az autóakkumulátorok újrahasznosításában jelenleg két fő kihívás van. Az egyik, hogy kevés újrahasznosító üzem található a világban, ezért a nagy tömegű akkumulátorok szállítása igen költséges. A másik kihívás, hogy az újrahasznosításhoz szükséges kémiai bontás energiaigénye jelentős. [32]

A jelenlegi lítium-ion akkumulátorok 95%-a újrahasznosítás nélkül, valamilyen hulladéklerakóban kötnek ki, annak ellenére, hogy ezek 97%-ban újrahasznosíthatóak lennének. [33] A problémát teljes mértékben csak új újrahasznosító üzemek létesítésével lehet megoldani, viszont jó megoldás lehet az akkumulátorok újra felhasználása valamilyen egyéb energiatárolási célra. Ekkor jön képbe az ipari villamosenergia tárolás, ahol nem probléma, ha az egyes akkumulátorcellák kapacitása már csak 70 - 60%-ban áll rendelkezésre, sok használt akkumulátor összekapcsolásával nagy kapacitású tároló rendszert lehet elérni. Az autóakkumulátorok eféle újra felhasználása további 5-10 év aktív használatot tud eredményezni.

II. rész

A projekt leírása

6 BEVEZETÉS

Az Alteo Energiaszolgáltató Nyrt. Vállalkozás és Projektfejlesztés divízió erősáramú projektmérnökeként 2020. decemberében projektvezető kollégámmal azt a feladatot kaptuk, hogy dolgozzunk ki és valósítsunk meg egy akkumulátoros energiatároló rendszert mely növeli a vállalat szabályozás kapacitásait.

A vállalat közel 150 MW erőművi kapacitással rendelkezik, ezek nagy része gázmotoros erőmű, de vízerőmű, biogáz erőmű, napelemes erőmű, szélturbinás erőmű és akkumulátoros energiatároló is megtalálható a portfólióban. A cég 2018-ban Magyarországon elsőként valósított meg akkumulátoros energiatároló rendszert, mely azóta is folyamatosan üzemel. [35]

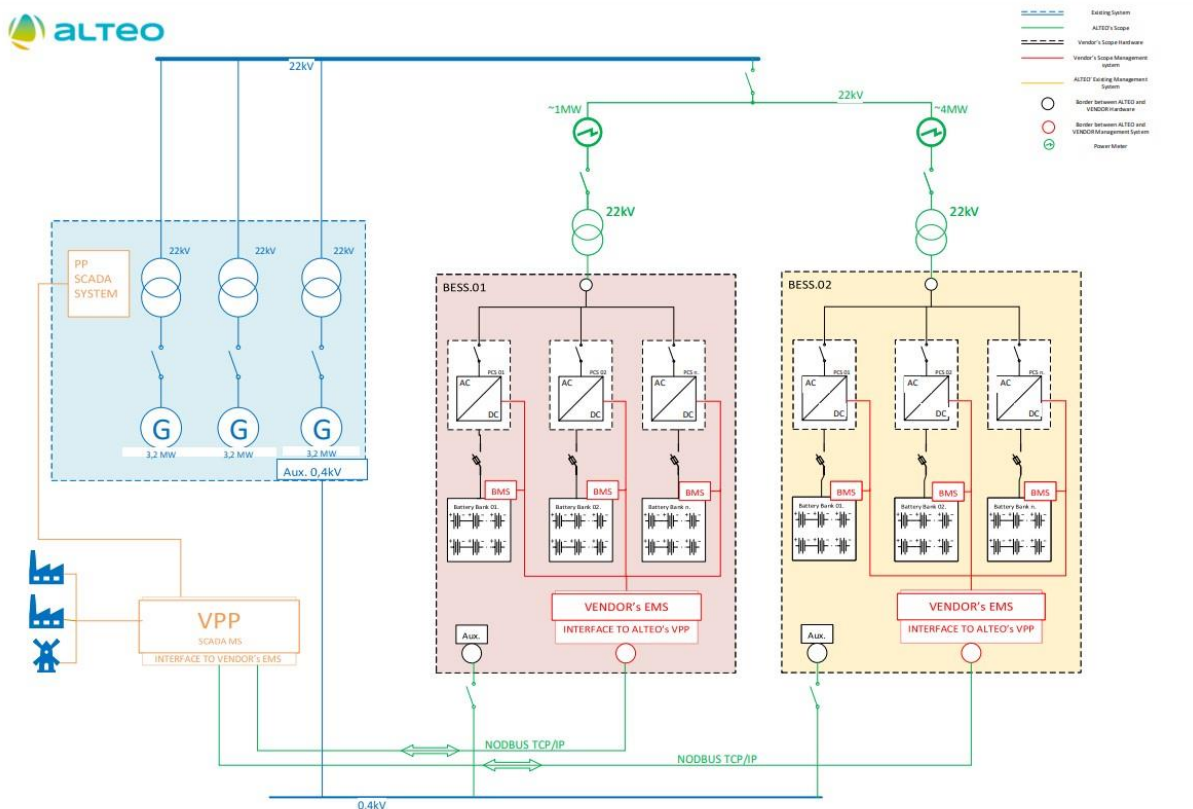
A naperőművek és a szélturbinák által termelt energia optimálisabb integrálása mellett, az energiatároló a portfólióban szereplő gázmotorok 4-6 perces indulási idejét is képes áthidalni, így azok részt tudnak venni a primer szabályozásban.

Az új akkumulátoros energiatároló Európai Unió kutatási és fejlesztési támogatást kapott, ugyanis célul tűztük ki, hogy egy olyan -Európában egyedülálló- rendszert valósítsunk meg, amelyben nem csupán az ipari energiatárolásra optimalizált akkumulátorokat használunk fel az energia tárolásra, hanem villamos hajtású autók akkumulátoros egységeit is. Ebből adódóan két különálló rendszert kellett megvalósítanunk. A kutatás és fejlesztés célja az volt, hogy megvizsgáljuk, hogy valóban alkalmasak-e a használt autóakkumulátorok primer szabályozás céljára és azokat mennyire tudjuk integrálni egy meglévő erőművi portfólióba. Erre a kérdésre határozott választ csak néhány év múlva, a vizsgálatok után fogunk tudni adni, diplomamunkám további részében a projekt előkészületeit, tervezését és megvalósulását kívánom bemutatni.

Az akkumulátoros energiatároló első koncepciója 2020. december elején született meg, 2021. október 19-én megtörtént az akkreditálás, majd november 1-én a két rendszer kereskedelmi üzembe került.

6.1 Előkészületek

A projekttel kapcsolatos első feladat az akkumulátoros rendszer koncepciójának kidolgozása volt. Mivel két különböző technológiájú rendszerben gondolkodtunk, különböző akkumulátor típusokkal és inverterekkel, valamint eltérő feszültségszinttel és teljesítménnyel, a két rendszert csak a közép feszültségű oldalon tudtuk közösíteni. BESS1 (Battery Energy Storage System) nevet kapta az autó akkumulátorokat tartalmazó rendszer, és BESS2-nek neveztük el az energiatárolókra optimalizált akkumulátorokat tartalmazó egységet. Az 6.1. ábrán a két egység koncepciójának legelső elgondolása látható



Ábra 6.1: Akkumulátoros energiatároló rendszer első koncepciója [36]

Az energiatárolónak három fő rendeltetést szántunk és jelenleg is e három üzemmódban működik.

- Erőmű reakció idejének gyorsítása (Spinning Reserve)

Gyors terhelésváltozási igényre lassú felfutással vagy lefutással reagáló erőművek támogatása. A turbina/generátor felfutási ideje alatt a tárolóból azonnal energia juttatható a hálózatba, ami lényegesen megnöveli a rendszer reagálási sebességét. A kazincbarcikai fűtőmében a gázmotorok indulási ideje 4 perc, az akkumulátoros rendszerrel ez áthidalható és másodpercen belüli válaszidon érhető el.

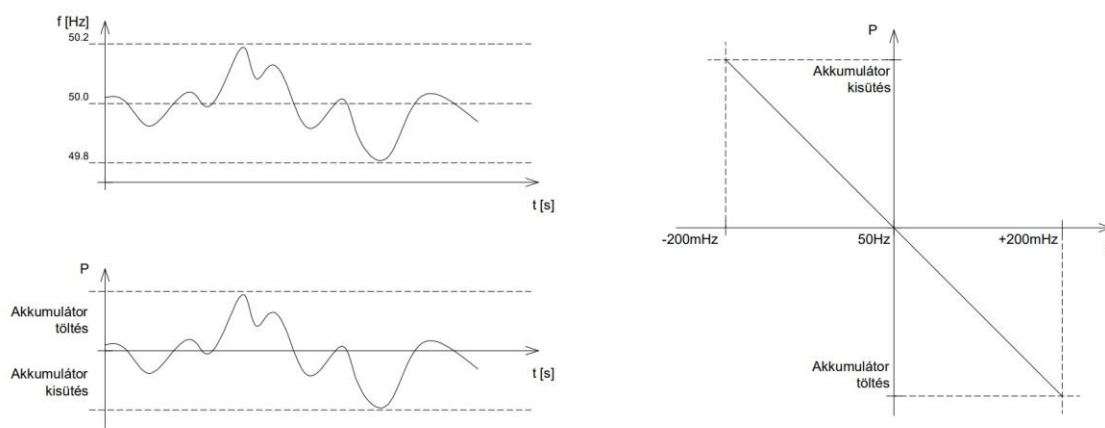
- Mérlegkör ad-hoc kiszabályozása

A menetrend és a valós termelés közötti eltérések kiszabályozása, menetrendtartás.

- Frekvenciaszabályozás

Az energiatároló olyan kiegyenlítő szabályozási tartalékot biztosít a rendszerben, ami automatikusan, azonnal aktiválódik, ha a hálózati frekvencia meghaladja a megengedett frekvencia tűrési tartományt.

A folyamatot a 6.2. ábra szemlélteti. Látható, hogy az energiatároló 50,2 Hz hálózati frekvencia esetén teljes teljesítményével töltődik - hálózatról vételez - 48,8 Hz frekvenciánál teljes teljesítménnyel kisüt. A két frekvencia érték között a töltés és a vételezés karakterisztikája lineáris. A folyamat teljesen automatikusan történik, 1 másodperces válaszidon belül.



Ábra 6.2: Primer [FCR] szabályozás akkumulátorok segítségével [36]

Ahogy azt a 6.1. ábra mutatja összesen 5 MW teljesítményű rendszert kívántunk megvalósítani. A gázmotorok összesített villamos teljesítménye 9,6 MW az erőmű 14,6 MW villamos teljesítmény kitáplálására képes. Mivel az áramszolgáltató csak 14 MW kitáplálást engedélyez, egy szoftveres védelmet, illetve egy hardveres fedővédelmet alakítottunk ki, hogy

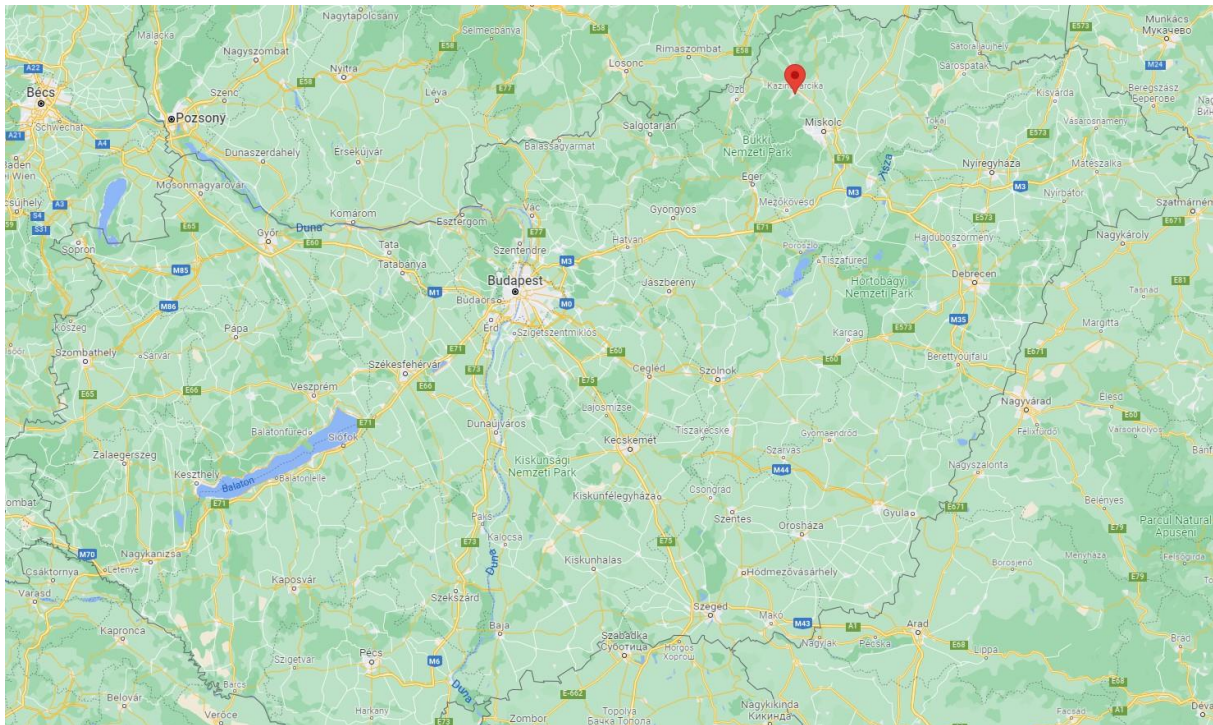
limitáljuk a teljesítményt 14 MW-ra. A szoftveres védelem az erőmű irányítási rendszerébe lett integrálva, amely figyeli a gázmotorok és az energiatárolók teljesítményét, szükség esetén korlátozza azokat. A fedővédelemért egy viszwatt védelem felel, mely a kitápláló cellában lévő SIPROTEC4 típusú védelemben lett beállítva. 14 MW feletti tartós kitáplálás esetén közvetlenül kiejti BESS1 és BESS2 megszakítóját.

A 6.2. ábrán látható, hogy az energiatároló rendszer csupán ± 200 mHz hálózati frekvencia eltérés esetén táplál ki a hálózatba maximális (5 MW) teljesítménnyel. Ez az állapot a historikus frekvencia adatok alapján 2-3 évente lép fel pár másodpercig, ekkor azonban igen valószínűtlen, hogy mind a három gázmotor teljes kapacitással üzemelne.

6.2 Helyszín kiválasztása

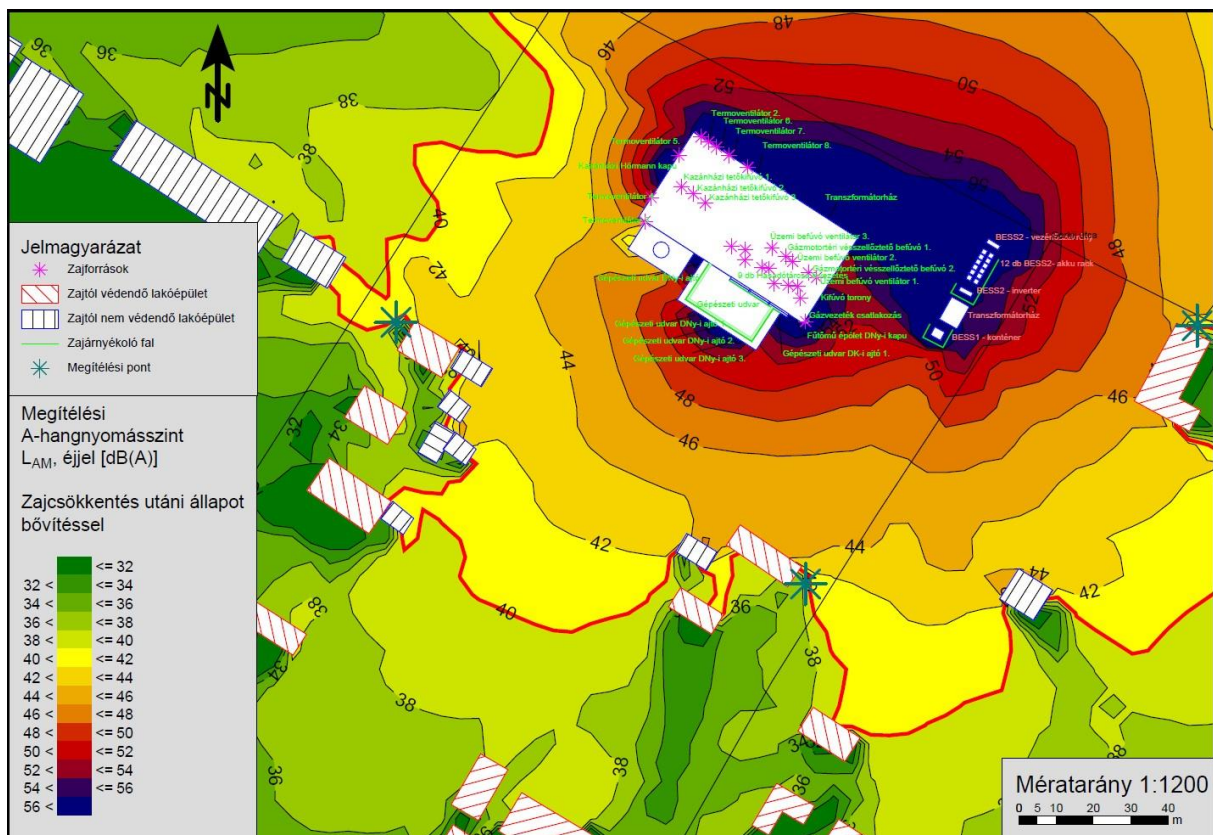
A koncepció kidolgozása után a következő feladat az energiatároló megvalósulási helyének meghatározása volt. Költségcsökkentés céljából mindenképpen meglévő telephelyeink egyikére kívántuk telepíteni az egységeket. Figyelembe kellett venni a rendelkezésre álló terület méretét, de a legfontosabb szempont a hálózatsatlakozási lehetőség volt. Így esett a választásunk az Alteo tulajdonában álló kazincbarcikai kiserőműre.

A meglévő gázmotoros kiserőmű egy 2002-ben létesített, a távhővel kapcsoltan villamos energiát termelő, 3 darab 3,2 MW beépített villamos teljesítményű gázmotor-generátor egységből álló létesítmény. A 6 kV-os feszültség szinten megtermelt villamos energiát 3 darab 4 MVA teljesítményű, 22/6,3 kV-os transzformátor alakítja át 22 kV-os feszültség szintre. A gázmotoros kiserőműben egy 22 kV-os kapcsolóberendezés biztosítja a kooperációs feladatokat, majd onnan egy 450 m hosszú ikerkábelrel történik a csatlakozás az Észak-Magyarországi Áramszolgáltató Kazincbarcika 132/22/11 kV-os alállomás 22 kV-os kapcsolóberendezésének 4-es számú (Fűtőmű) cellájába.



Ábra 6.3: A projekt megvalósulásának helyszíne: Kazincbarcika [37]

A meglévő fűtőerőmű az ipari övezet határán található, a szomszédos utcák már lakóövezetnek számítanak. Ez azt jelenti, hogy a lakóépületeknél mérve napközben 55 dB, éjszaka 45 dB hangerősség alatt kellet tartanunk a tároló zajkibocsátását. Ennek megoldása komoly kihívást jelentett számunkra, tekintettel arra, hogy az akkumulátor egységek, illetve az inverterek is aktív hűtéssel vannak ellátva, melyek hangereje körülbelül 85 dB(A) értékű. A meglévő fűtőmű és a várható energiatároló zajkibocsátásáról szimulációkat kellett készítenünk, a kapott eredmények alapján arra a következtetésre jutottunk, hogy mindenképpen kell zajvédő falat építenünk az új egységek köré.



Ábra 6.4: Az akusztikai szimuláció eredményei zajvédő falak figyelembevételével [36]

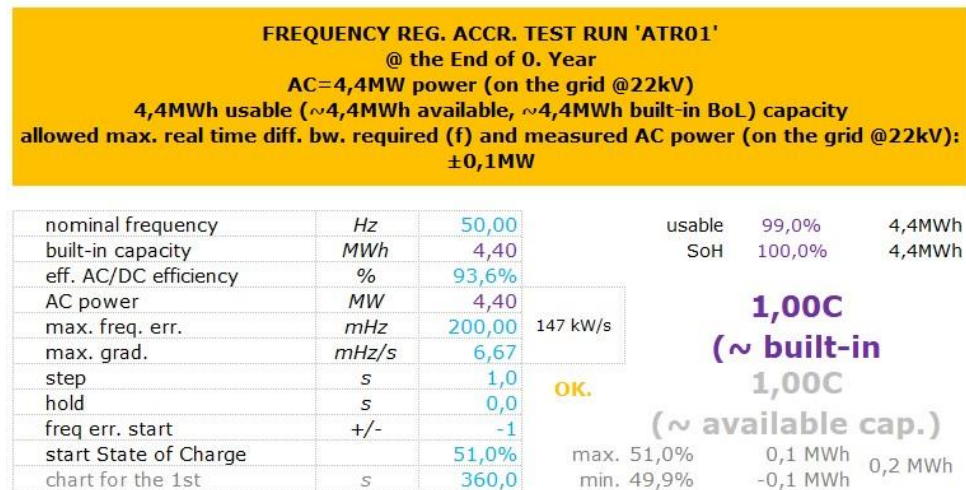
6.3 Versenyeztetés

Miután adott volt a kivitelezés helyszíne és az áramszolgáltatótól megkaptuk a hálózatra csatlakozás lehetőségéről szóló Műszaki - Gazdasági tájékoztatót, elkezdtünk technológiai beszállítók után kutatni. Ekkor ütköztünk az első nagy akadályba. Az akkumulátoros járművek nagymértékű elterjedése miatt egyre fokozódó akkumulátor hiány van jelen a világban. Egyetlen gyártó sem mutatott érdeklődést a projektünk iránt, nem szívesen biztosítottak használt akkumulátorokat számunkra, ezeket vagy nem álltak rendelkezésre, vagy a nyersanyag hiány miatt mindet házon belül újrahasznosították. Ekkor azt a döntést hoztuk meg, hogy új akkumulátorokat használunk fel mind a két rendszernél.

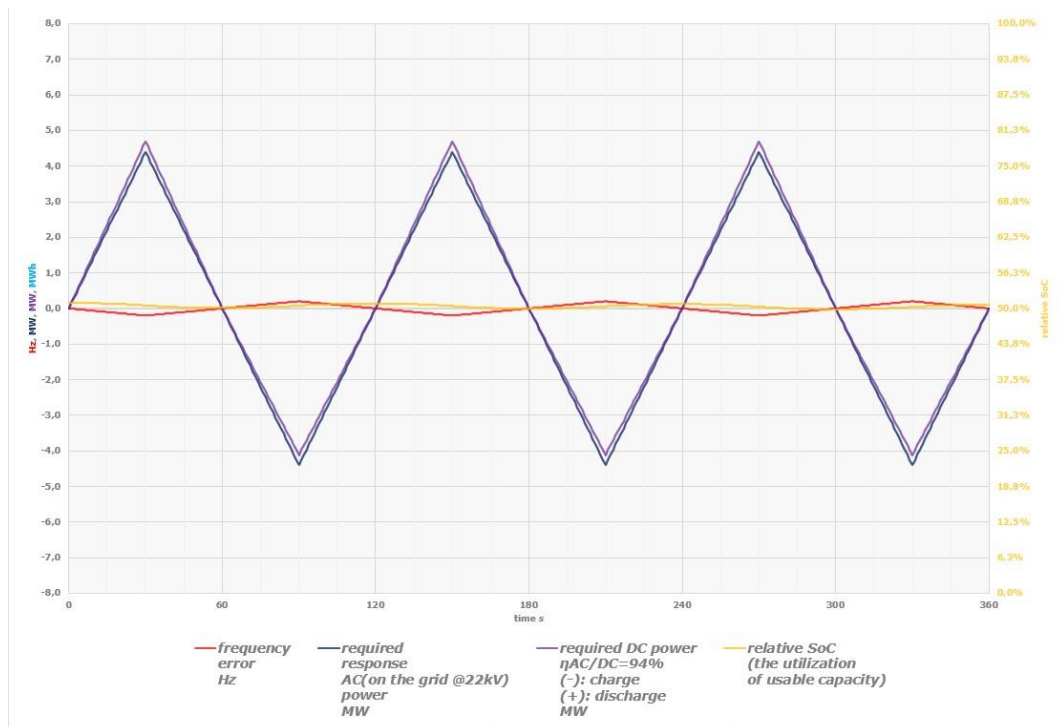
A versenyezettetés lényeges feladata volt a megvalósítani kívánt rendszer általunk elvárt paramétereinek pontos meghatározása. Három darab szimulálási módszert (majd később tesztelési módszert) dolgoztunk ki, melyek segítségével megbizonyosodhattunk arról, hogy a két rendszer kellő pontossággal szabályozható, valamint megfelelő kapacitással és teljesítménnyel rendelkezik. Az első szimuláció során, egyenletesen növeltük, majd csökkentettük a frekvencia értékét és vizsgáltuk a kiadott teljesítményt, töltöttségi állapotot. Ezzel a tesztel tudtunk megbizonyosodni arról, hogy a szállított rendszer megfelelő pontossággal és reakcióidővel képes önmaga szabályozására. A két akkumulátoros rendszernek 2 másodpercen belül bármilyen frekvencia változást 1%-os pontossággal kell lekövetnie. A

második és a harmadik szimuláció során 16-16 percig a névlegestől eltérő ± 200 mHz frekvenciát szimuláltunk, és szintén a kapacitás és a teljesítmény értékeket vizsgáltuk. Ezzel a két teszttel meggyőződünk, hogy valóban rendelkezik a rendszer az elvárt műszaki paraméterekkel.

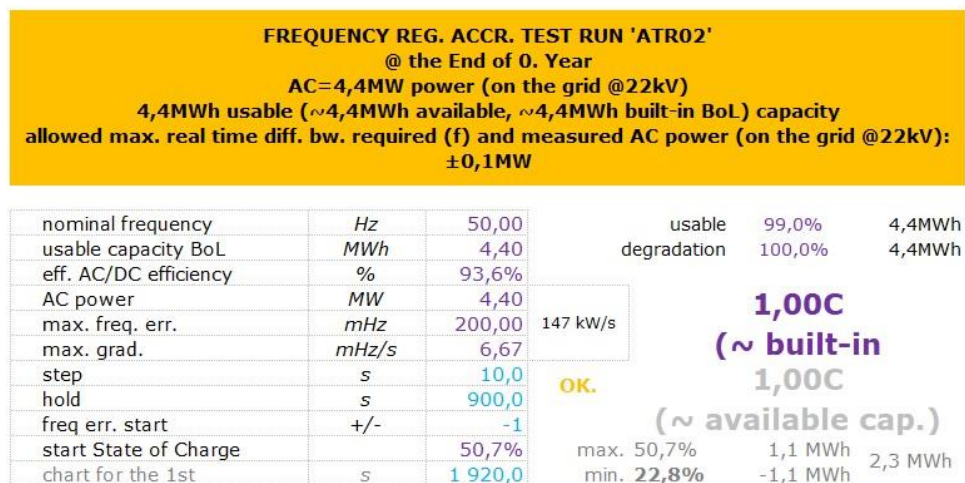
A lehetséges szállítóktól elvártuk, hogy a szállítandó energiatárolós rendszereken lefuttatott három teszt eredményeként az alábbi grafikonok által bemutatott értékeket kapjuk vissza.



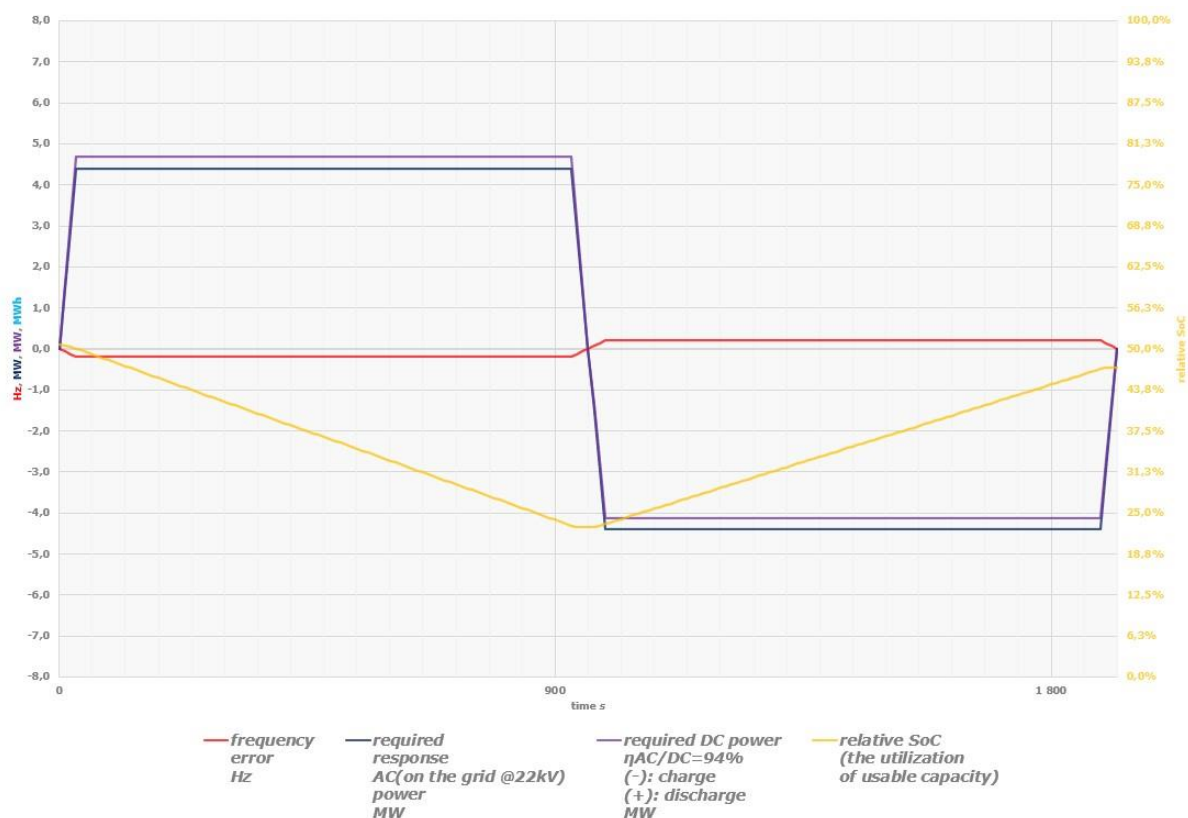
Ábra 6.5: Az első szimuláció kiinduló paramétereit BESS2 - 4,4MW [36]



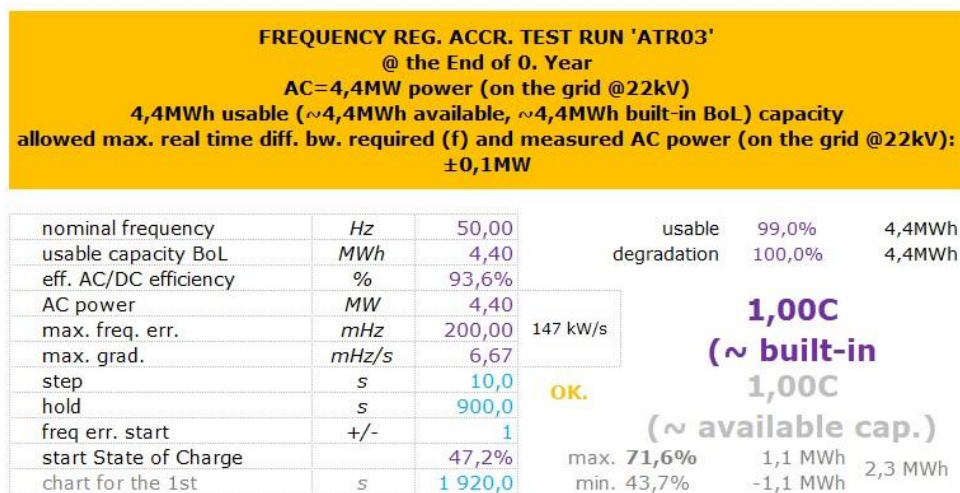
Ábra 6.6: Az első szimuláció elvárt értékei [36]



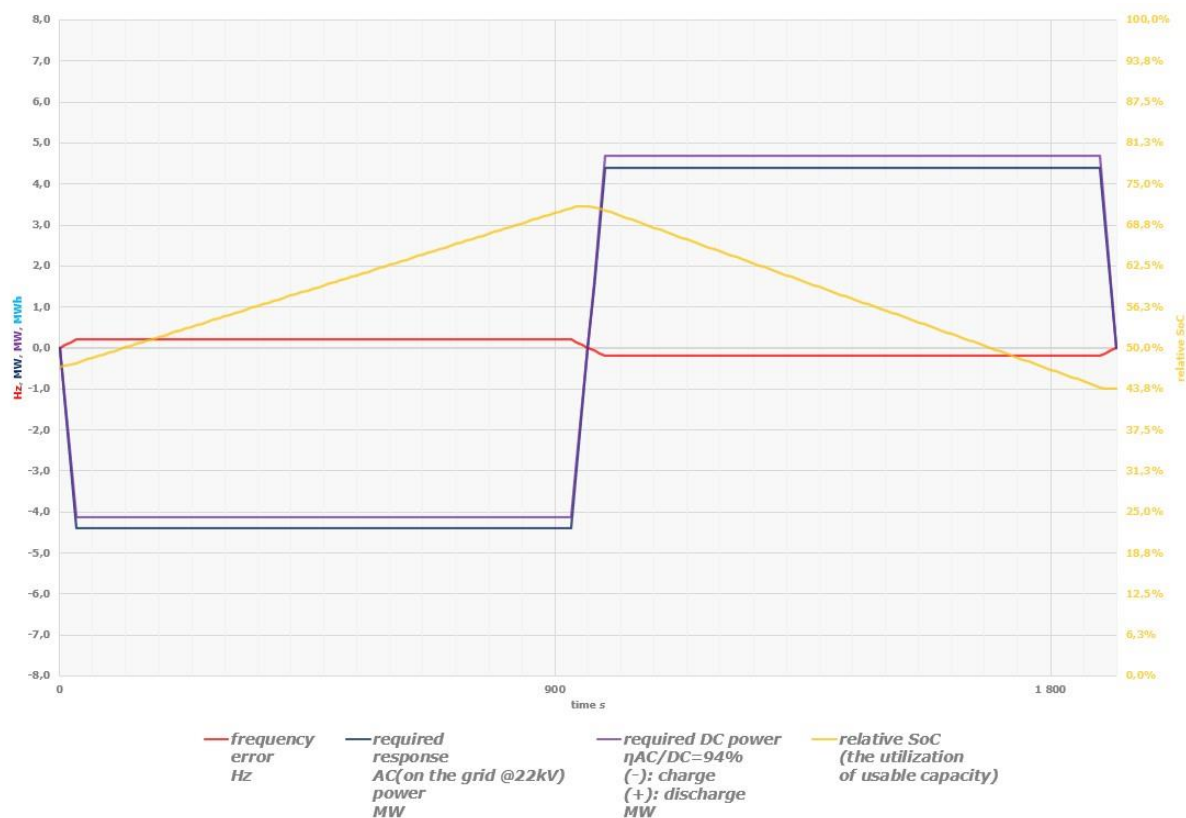
Ábra 6.7: Az második szimuláció kiinduló paramétereit BESS2 - 4,4MW [36]



Ábra 6.8: Az második szimuláció elvárt értékei [36]



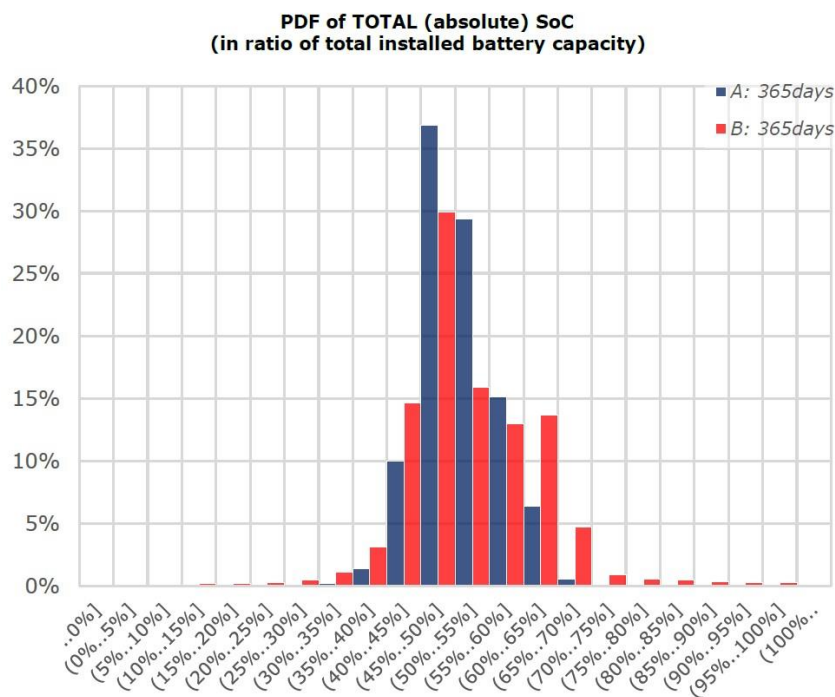
Ábra 6.9: Az harmadik szimuláció kiinduló paramétereit BESS2 - 4,4MW [36]



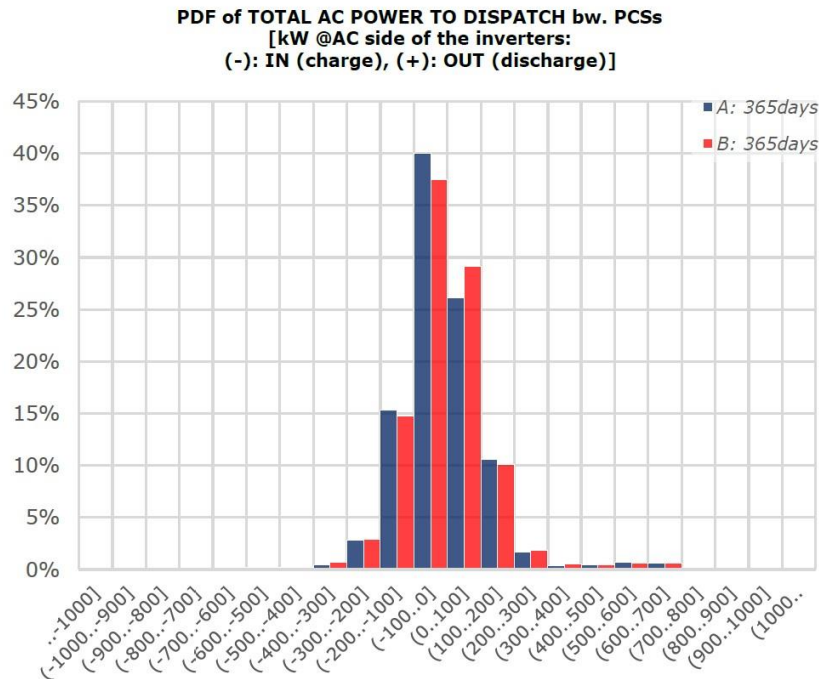
Ábra 6.10: Az harmadik szimuláció elvart görbéi [36]

Az előzőekben bemutatott szimulációknak köszönhetően pontos elvárásokat tudtunk támasztani, hogy milyen kapacitás és teljesítmény értékeket várunk el, illetve, hogy milyen pontosságú rendszert kell szállítaniuk. Nagyon fontos szempont volt a kiválasztás során, hogy az egyes rendszerek ezeket az elvárt értékeket hány évig képesek a biztosítani, azaz hány évig használható a rendszer a névleges teljesítménnyel. Az alapvető elvárásunk az volt, hogy 10 év elteltével az akkumulátor kapacitása maximum 70%-al csökkenhet, viszont a kiadott teljesítmény nagyságának, illetve a szabályozás pontosságának konstansnak kell lennie. Ahogy azt korábban bemutattam az akkumulátorok élettartama több változótól függ. Nem mindegy, hogy egy akkumulátoros energiatárolót 100%-ig töltünk, majd 0%-ig merítünk, majd ezt a folyamatot egymás után ismételjük, vagy 50%-os töltöttség környékén használjuk azokat. Fontos továbbá az energiáirány változásának gyakorisága, és annak gradiense (változás gyorsasága).

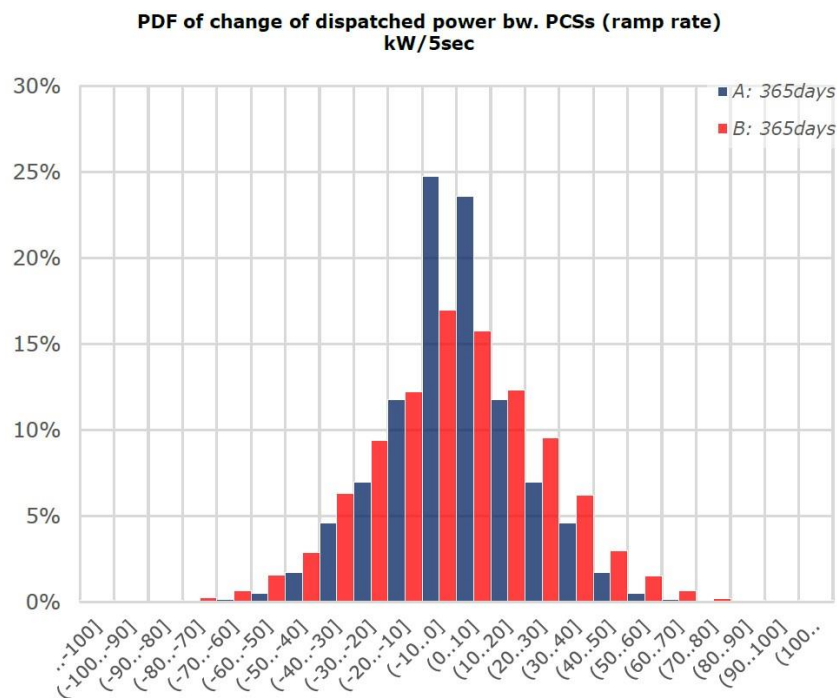
A várható igénybevétel meghatározása érdekében újabb szimulációkat kellett elvégeznünk mely során felhasználtunk egy évnnyi historikus frekvencia adatot egy másodperces felbontásban, valamint saját magunk is generáltunk fiktív frekvencia értékeket ($2 * 3,15 * 10^7$ adatpont). Mind két adathalmazmal leszimuláltuk a korábban ismertetett primer szabályozási karakterisztika, illetve egy akkumulátor töltésvezérlési algoritmus (SoC management) felhasználásával egy évnnyi aktív működést. A szimuláció eredményeként megvizsgáltuk, hogy az akkumulátorokat és az invertereket milyen módon és mértékben használnánk, ezek alapján tudtunk becsléseket adni a 10 év alatt várható igénybevételre. A grafikonon a kék oszlopok a historikus, a piros a szimulált frekvencia átlagértékeit ábrázolja.



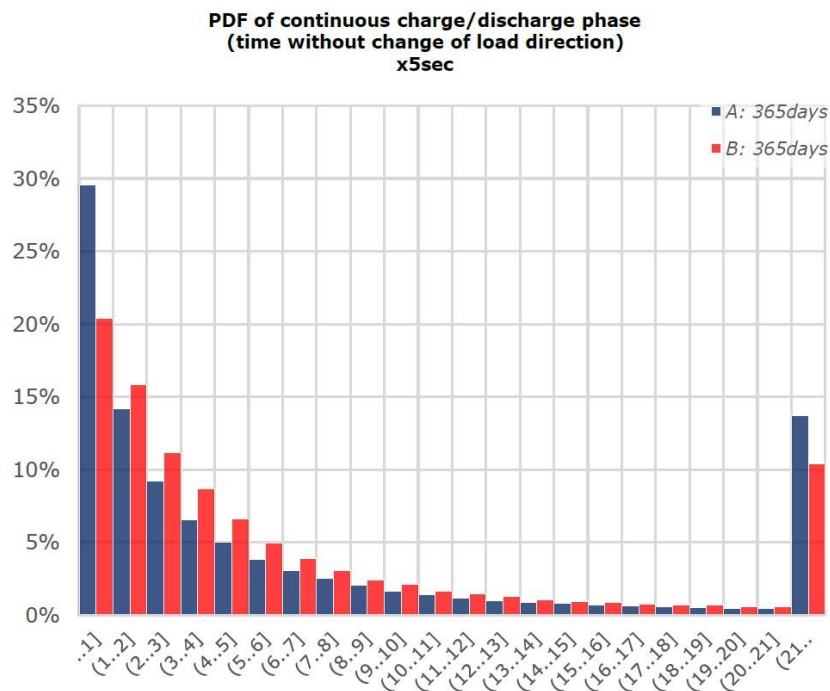
Ábra 6.11: Az akkumulátorok töltöttségének eloszlása egy év alatt [36]



Ábra 6.12: Az akkumulátorok által kitáplált/vételezett teljesítmény eloszlása 1000 kW teljesítményű akkumulátoros energiatárolót feltételezve [36]



Ábra 6.13: Az akkumulátoros energiatároló által termelt/vételezett energiaváltozás nagyságának eloszlása [36]



Ábra 6.14: A folyamatos töltés/kisütés idejének eloszlása [36]

A szimulációkat összegző grafikonokon látható, hogy milyen igénybevételek várnak az akkumulátoros rendszerekre. A 6.11 ábrán jól látszik, hogy az akkumulátorok töltöttségi szintje (State of the Charge - SoC) az év jelentős részében 40% és 70% között mozog. Ennek oka, hogy a frekvenciaeltérések körülbelül azonos mennyiségben térnek ki pozitív és negatív irányba, ezért körülbelül azonos ideig tölt és sűt ki az akkumulátor. A veszteségek és az önkisülés hatására egy idő után teljesen lemerülnének a telepek, ezért a két rendszer el van látva a korábban említett SoC managementel, mely folyamatosan törekszik a telepek 52%-os töltöttségi szinten tartására. Az is jól látszik az ábrán, hogy az akkumulátorok nagyon ritkán érik el a 90% illetve a 10%-os SoC-t. Erről szintén az SoC management tehet, a teljes kisütés vagy feltöltés csökkenti az akkumulátorok élettartamát.

A 6.12. ábrán látható, hogy ha egy 1 MW teljesítményű rendszert valósítanánk meg, akkor az egy év alatt átlagosan mennyi energiát töltene/vételezne a hálózatról. Az esetek túlnyomó részében az elérhető teljesítmény csupán 10-20%-át használja a rendszer. Azt gondolhatnánk, hogy ezért teljesen felesleges ekkora rendszert építeni, elegendő lenne a karakterisztikát módosítani. A frekvenciaszabályozás lényege, hogy ha ritkán is, de van olyan szituáció amikor +/-200 mHz frekvenciaeltérés lép fel a hálózaton, ekkor viszont azonnal, teljes kapacitással kell rendelkezésre állnia az erőműnek.

A 6.13. ábra azt szemlélteti, hogy a kitáplált/vételezett energia 5 másodperc alatt hány kW-ot változik. Látható, hogy a legtöbb esetben kismértékű energiaváltozások lépnek fel.

A 6.14. ábra azt mutatja be, hogy átlagosan mennyi ideig történik folyamatos töltés/kisütés az energiairány megváltozása nélkül. Látható, hogy exponenciálisan csökken az energiairány változásának gyakorisága az idő múlásával. A 105 másodpercnél gyakoribb egyirányú energiaáramlás nagy része annak köszönhető, hogy az akkumulátoros energiatárolót nem csupán FCR szabályozásra, hanem a mérlegkör kiszabályozására, illetve a gázmotoros erőművek reakcióidejének gyorsítására is alkalmazzuk.

7 BESS1 ÉS BESS2 BEMUTATÁSA

Több hónapos versenyeztetés és tárgyalás után megtaláltuk a megfelelő beszállítókat az akkumulátoros technológia szállítására. A 4,4 MW teljesítményű teljesítményakkumulátorokból épülő (BESS2) rendszert egy holland vállalat, a 0,6 MW teljesítményű autóakkumulátoros rendszer (BESS1) szállítását egy német cég nyerte meg.

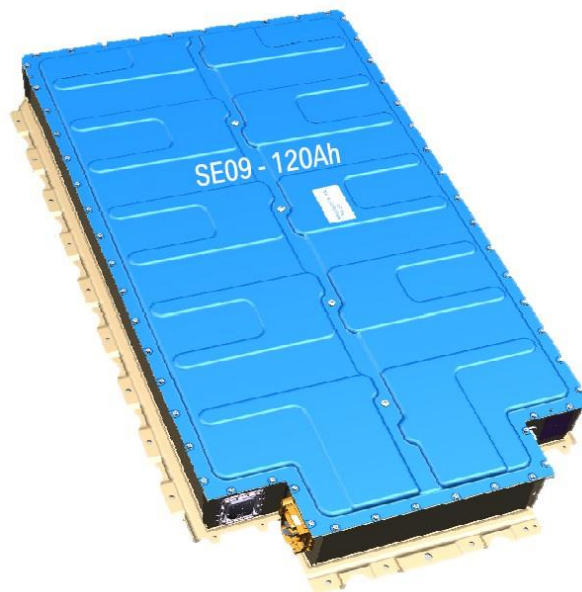
7.1 BESS1 bemutatása

A BESS1 0,6 MW teljesítményű 0,6 MWh kapacitású autóakkumulátorból felépített rendszer. Egy 10 lábas konténerbe került elhelyezésre 16 db BMW SE09 típusú akkumulátor, 8 darab Refustore inverter, illetve a rendszer működéséhez szükséges segédrendszerek, irányítástechnikai rendszerek, légtechnika, tűzoltórendszer.

7.1.1 Akkumulátor

Az akkumulátorok legalapvetőbb építőeleme az akkumulátor cellák. Bizonyos mennyiségű cella sorba kapcsolása esetén úgynevezett modulokat kapunk. A modulokat összekapcsolva megkapunk egy akkumulátor egységet, a racket. A modulok és a rackek különböző kapcsolási variációival - sorba vagy párhuzamosan - tudjuk az energiatároló egység DC feszültség szintjét a kívánt értékre kialakítani. A BESS1 energiatároló az alábbi akkumulátor paraméterekkel és elrendezéssel rendelkezik.

BMW I3 SE09	Érték
Cellakémia	Li NMC
Cellák száma modulonként	12 db
Cella kapacitás	120 Ah
Cella feszültség	3,7 V
Cella kapcsolási mód	12s1p
Modulok száma rackenként	8 db
Modul kapcsolási mód	8s1p
Összes rack a rendszerben	16 db
Rack kapacitás	42 kWh
Rack feszültség szint	259-403 V DC
Rack kapcsolási mód	2s8p
Rendszer össz. kapacitása	656 kWh
Rendszer teljesítménye	704 kW
Rendszer feszültség tartomány	660-780 V DC



Ábra 7.1: BESS1 akkumulátorai [36]

7.1.2 Inverter

A BESS1 egység összesen 8 darab REFUStore 88K invertert tartalmaz az alábbi paraméterekkel.



REFUstore 88K	Érték
Max DC feszültség	1000 V DC
Névleges DC feszültség	620 V DC
Névleges teljesítmény	88 kVA
AC feszültség szint	400 V
Max AC áram	128 A
Tranzisztor típusa	IGBT
Hatásfok	98,4 %
Mennyiség a rendszerben	8 db

Ábra 7.2: BESS1 inverter adatok [36]

7.1.3 Transzformátor

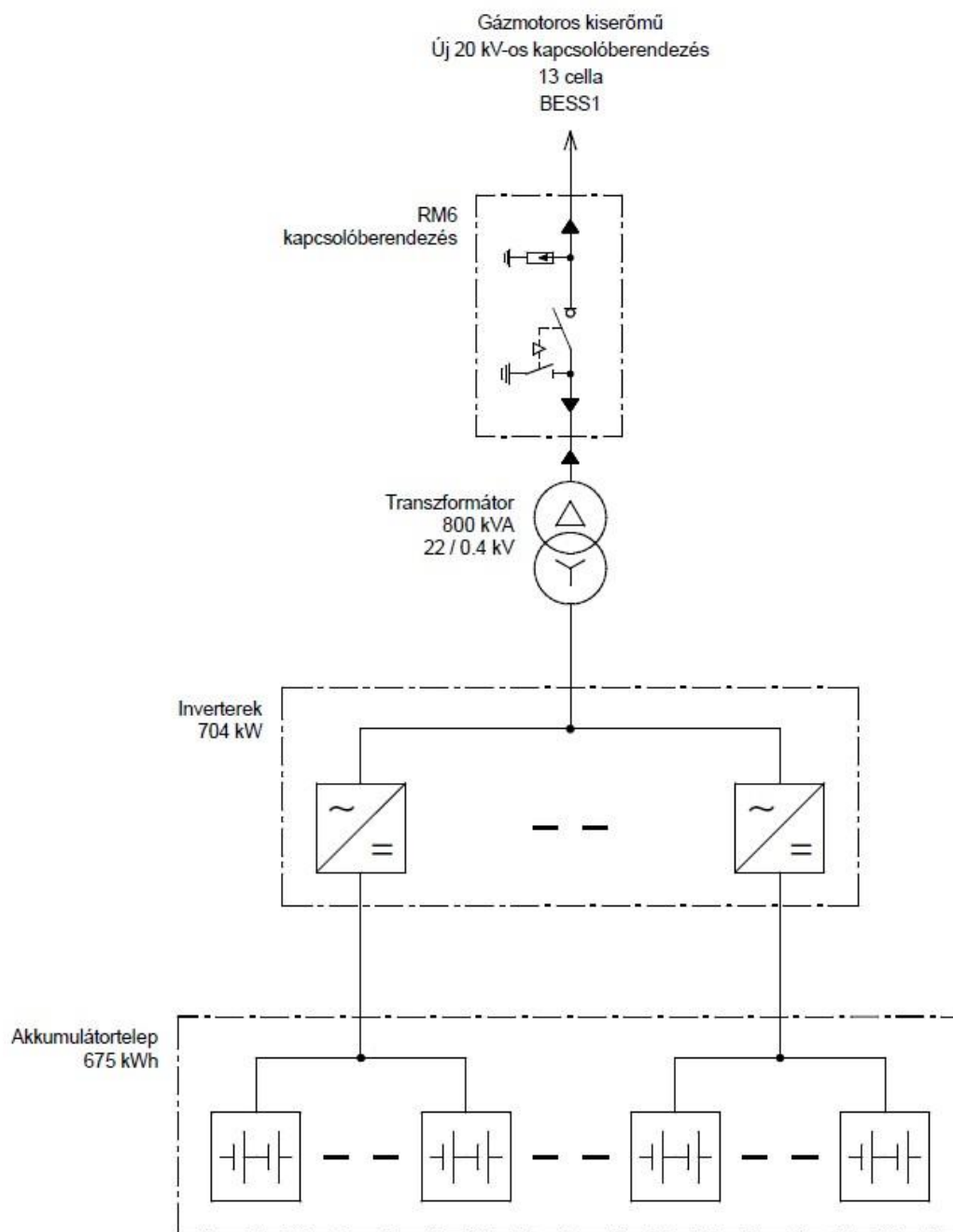
A két rendszer különböző feszültség szintjeinek és teljesítményének köszönhetően két különálló transzformátort szükséges alkalmaznunk a hálózatra csatlakozáshoz. A projekt folyamán összességében elmondható, hogy törekedtünk a legkörnyezetkímélőbb megoldások alkalmazására, így olaj szigetelésű transzformátorok helyett Ecodesign TIER2 besorolású száraz transzformátorokat telepítettünk. Ezzel a megoldással elkerültük, hogy kármentő olajteknőt, kavicságyat keljen létesítenünk, viszont a száraz transzformátorok IP00 beosztása miatt, egy külön transzformátorépületet volt szükséges megvalósítanunk.

A BESS1 rendszeréhez szükséges transzformátor méretezése és beszerzése a mi feladatunk volt, ezt nem tartalmazta a BESS1 szállítási terjedelme. A választásunk a 800 kVA teljesítményű SIEMENS Geafol Neo típusú száraz transzformátorra esett.

Siemens Geafol Noe	Érték
Névleges teljesítmény	800 kVA
Kapcsolási csoport	Dyn5
Szigetelés típusa	Műgyanta szigetelés
Primer feszültség	22000 V
Szekunder feszültség	400 V
Üresjárási veszteség	1170 W
Rövidzárási veszteség (120°C)	8000 W



Ábra 7.3: BESS1 transzformátor adatok [36]



Ábra 7.4: BESS1 egyvonalas rajza [36]

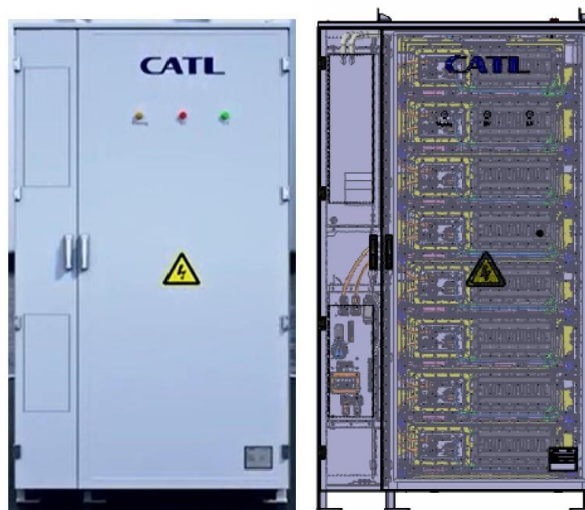
7.2 BESS2 bemutatása

A BESS2 rendszer 4,4 MW teljesítmény leadására képes és 4,4 MWh kapacitással rendelkezik. Lényegesen nagyobb rendszer lévén, nem is lehetett a különböző egységeket egy konténerbe elhelyezni, azok helyigénye miatt. Az akkumulátoros egységek 12 darab kültéri rack szekrényből állnak, melyekbe egyenként 8 darab akkumulátormodul helyezkedik el. A 12 rack szekrény földkábeleken keresztül csatlakozik az 5 MVA teljesítményű inverterhez, ahol megtörténik az AC/DC átalakítás. A komplett rendszer segédüzemi energia ellátásáért és szabályozásáért továbbá egy kültéri szekrény felel.

7.2.1 Akkumulátor

A BESS2 akkumulátorai CATL gyártmányú egységek, melyek kültéri, folyadékhűtéssel ellátott szekrényekben helyezkednek el.

CATL	Érték
Cellakémia	Li LFP
Cellák száma modulonként	52 db
Cella kapacitás	280 Ah
Cella feszültség	3,2 V
Cella kapcsolási mód	52s1p
Modulok száma rackenként	8 db
Modul kapcsolási mód	8s1p
Összes rack a rendszerben	12 db
Rack kapacitás	372 kWh
Rack feszültség szint	1164-1497 V DC
Rack kapcsolási mód	1s12p
Rendszer össz. kapacitása	4473 kWh
Rendszer össz. teljesítménye	4370 kW
Rendszer feszültség tartomány	1164-1497 V DC



Ábra 7.5: BESS2 akkumulátorok [36]

7.2.2 Inverter

Ellentétben a BESS1 rendszerrel BESS2 rendszerében egy darab 5 MVA teljesítményű WSTECH inverter található. Hasonlóan az akkumulátor rackekhez, ez az egység is folyadékhűtéssel rendelkezik. Az inverteren belül négy különálló vonalon történik az AC/DC átalakítás, egy vonalra három akkumulátor rack csatlakozik.



WSTECH	Érték
Max DC feszültség	1500 V DC
Névleges DC feszültség	1100 V DC
Névleges teljesítmény	5000 kVA
AC feszültség szint	690 V
Max AC áram	4x1050 A
Tranzisztor típusa	IGBT
Hatásfok	98,7 %
Mennyiség a rendszerben	1 db

Ábra 7.6: BESS2 inverter adatok [36]

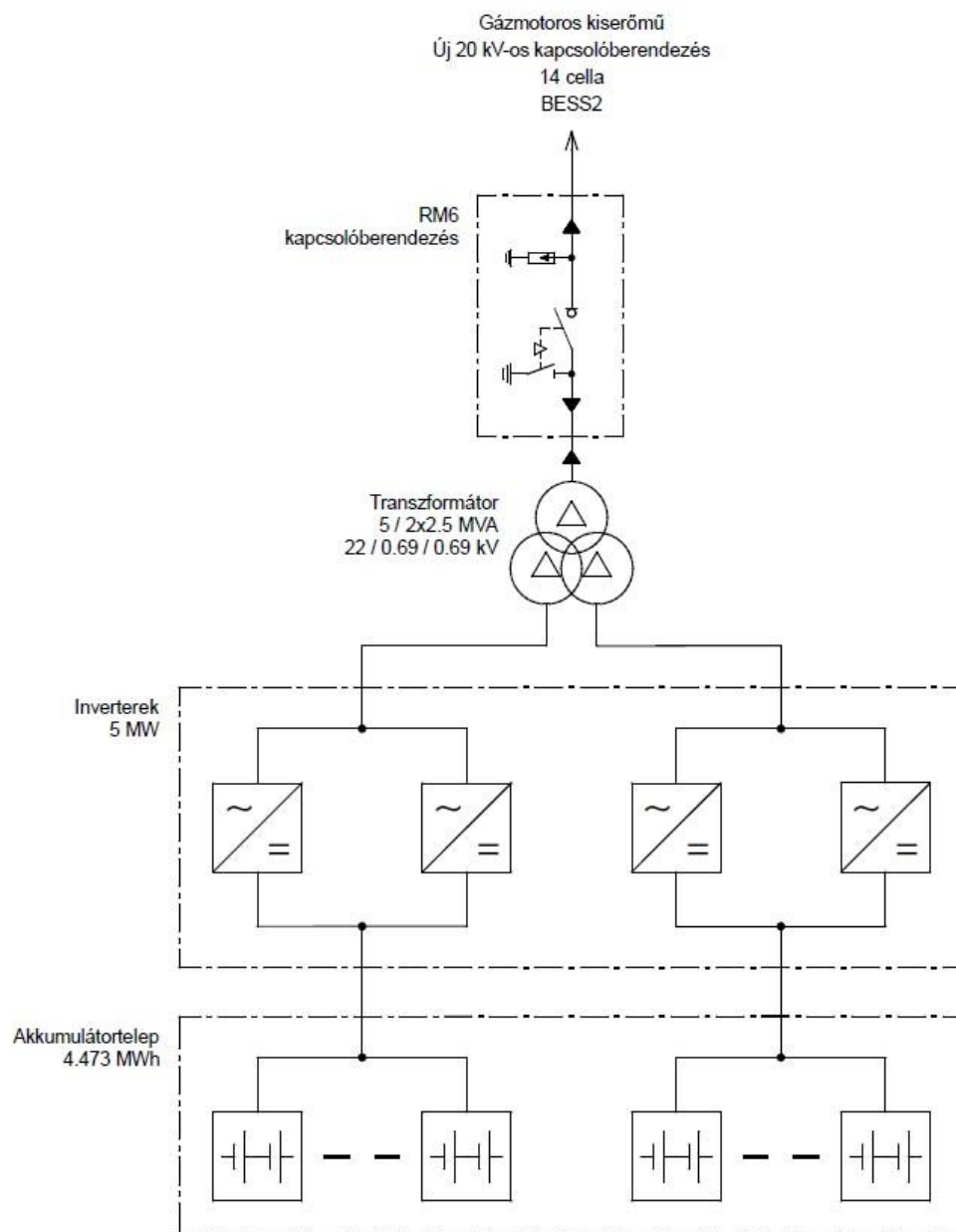
7.2.3 Transzformátor

A BESS2 szállítója szolgáltatotta számunkra a rendszerhez szükséges transzformátort, ezt külön erre a projektre gyártották. Mivel az inverterből két különálló vonalon jut el az energia a transzformátorhoz, ezért egy háromgombolyítású 5 MVA teljesítményű HTT gyártmányú száraz transzformátor került telepítésre.

HTT	Érték
Névleges teljesítmény	5000 kVA
Kapcsolási csoport	Dd0d0
Szigetelés típusa	Műgyanta szigetelés
Primer feszültség	22000 V
Szekunder feszültség(1)	690 V
Szekunder feszültség(2)	690 V
Üresjárási veszteség	8630
Rövidzárási veszteség (120°C)	27545 W



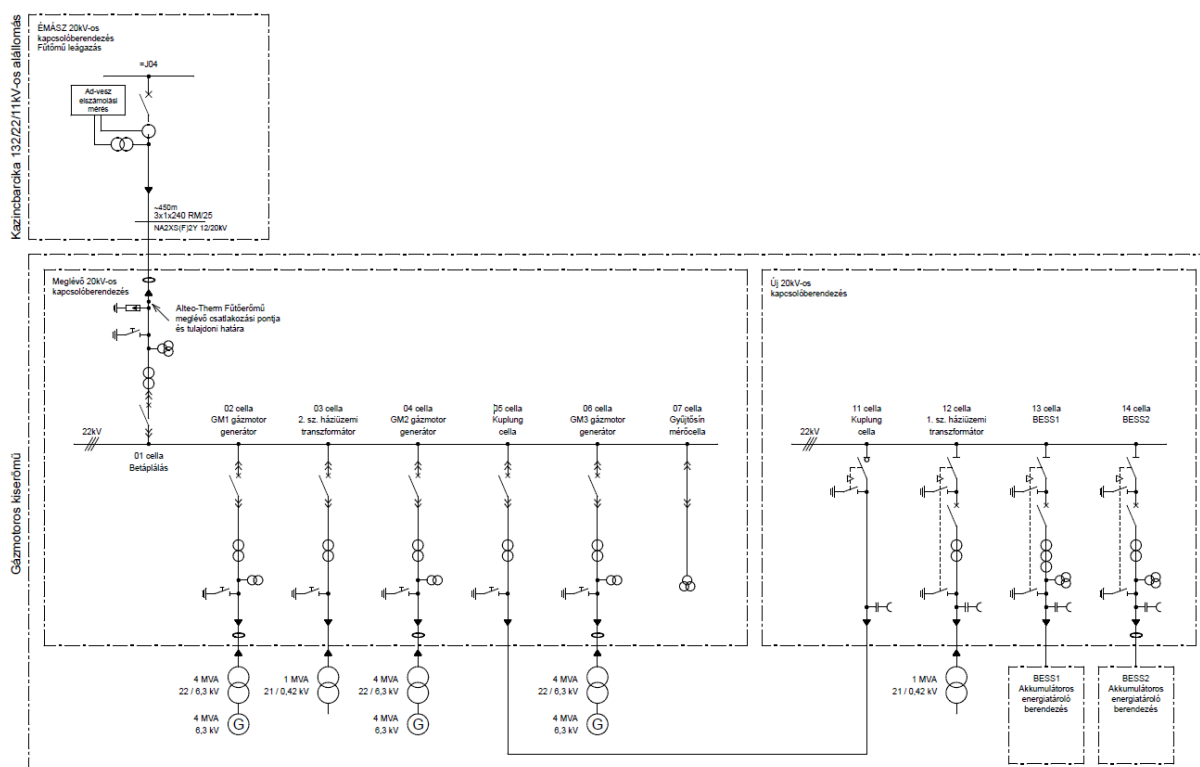
Ábra 7.7: BESS2 transzformátor adatok [36]



Ábra 7.8: BESS2 egyvonalas rajza [36]

7.3 Hálózatra csatlakozás

A két akkumulátoros energiatároló transzformátoraitól $3 \times 1 \times 95 \text{ mm}^2$ N2XS(F)2Y típusú 12/20kV feszültségintéző földkábelben csatlakozik az erőmű meglévő 20 kV-os hálózatára. A csatlakozás nagy kihívásnak bizonyult, ugyanis az erőmű nem rendelkezett tartalékcselelával. A meglévő SIEMENS NXAir típusú, 20 kV-os, 19 éves kapcsolóberendezések gyártói támogatása megszűnt, így nem lehetett azt bővíteni. A megoldást egy új, négycellás elosztóberendezés telepítése jelentette. Helyhiány miatt, ezt a meglévő elosztótól körülbelül 10 méterre tudtuk telepíteni. A meglévő elosztó 5. számú házi üzemi leágazása átalakításra került kuplungcellává, új 200 A-es áramváltók kerültek beszerelésre. A kuplungcella csatlakozik az új elosztóberendezés első cellájába. A második cellába átforgatásra került a korábban kikötött házi üzemi transzformátor, majd a harmadik, illetve a negyedik cella került kialakításra BESS1 és BESS2 csatlakoztatásához.



Ábra 8.1: Az energiatárolók 20 kV-os csatlakozásához szükséges módosítások [36]

8 KIVITELEZÉS ÉS MEGVALÓSULÁS

A kivitelezési munkálatokat kettő szakaszra lehet bontani. Az első szakaszba a fizikai munkálatok (3 hónap), a másodikba a programozás, paraméterezés, tesztelés (2 hónap) tartozott.

A fizikai kivitelezés első szakaszában egy komplett talajcsere történt 2 méter mélységben. Ezt követően megépültek az egyes gépegységek betonalapjai, majd elkezdődött az egyik legnagyobb kihívást jelentő munkafolyamat, a kábelezés - védőcsövezés.

Összesen ~1600 méter védőcső, ~1800 méter erőátviteli kábel, illetve ~2000 méter kommunikációs, jelátviteli kábel került lefektetésre. A kábelezéssel egyidőben megérkezett az új 20kV-os SM6 típusú elosztóberendezés, a 12 darab BESS2 akkumulátor rack, az inverter illetve a BESS1 konténere is. A transzformátorok helyére juttatása után, minden berendezés a helyén volt. Ezt követően történt meg a tároló körüli 3-4 méter magas zajvédő fal felépítése, majd zárásként megtörtént a talajrendezés, térkövezés.

A kivitelezés második szakasza főleg programozási feladatokról, és tesztelésből állt. Az energiatároló két különálló kommunikációs hálózatra lett rácsatlakoztatva. Az egyik egy technológiai internet, amely segítségével az Alteo belső rendszerével való kommunikáció jött létre, a másik egy nyílt internetkapcsolat, amely segítségével a két szállító eléri a saját rendszerét monitorozás, esetleges hibaelhárítás céljából. A tesztelések megkezdése előtt, körülbelül egy hónapig tartó paraméterezés, szoftveres beállítások finomra hangolása történt, illetve az erőmű irányítástechnikai rendszere implementálásra került az Alteo meglévő szabályozó központjába. A teszt időszak körülbelül egy hónapot vett igénybe.

Az elkészült akkumulátoros energiatároló erőmű megvalósult állapota az alábbi képeken látható.



Ábra 9.1: A megvalósult akkumulátoros energiatároló [36]



Ábra 9.2: BESS2 12 db rackje (két sorban) és az 5 MW-os inverter [36]



Ábra 9.3: BESS2 1 szekrényének belseje a 8 akkumulátor egységgel [36]



Ábra 9.4: BESS1 konténere, a 16-db BMW I3-mas akkumulátormodulokkal [36]



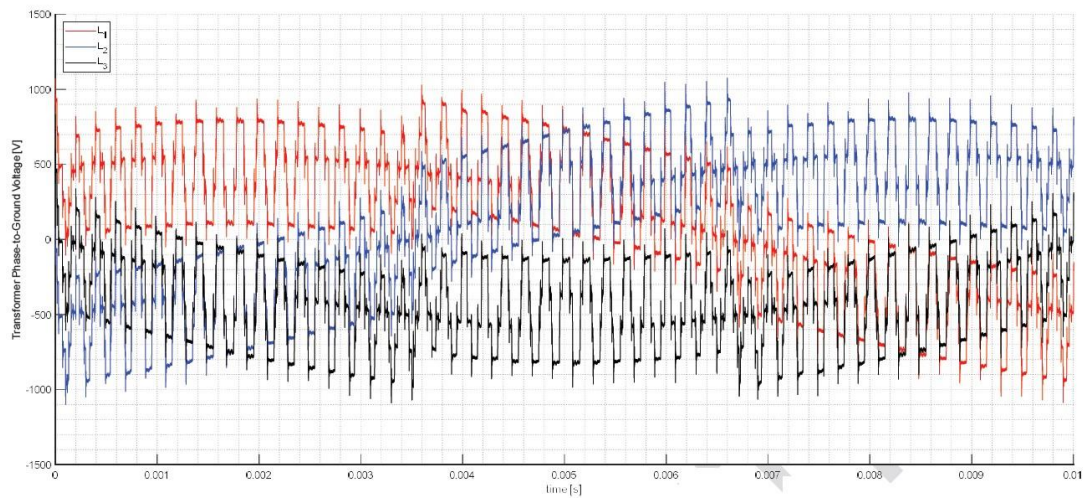
Ábra 9.5: BESS1 (jobbra) és BESS2 (balra) transzformátorai [36]

9 A MEGSZERZETT TAPASZTALATOK BEMUTATÁSA, JÖVŐBELI FEJLESZTÉSI LEHETŐSÉGEK

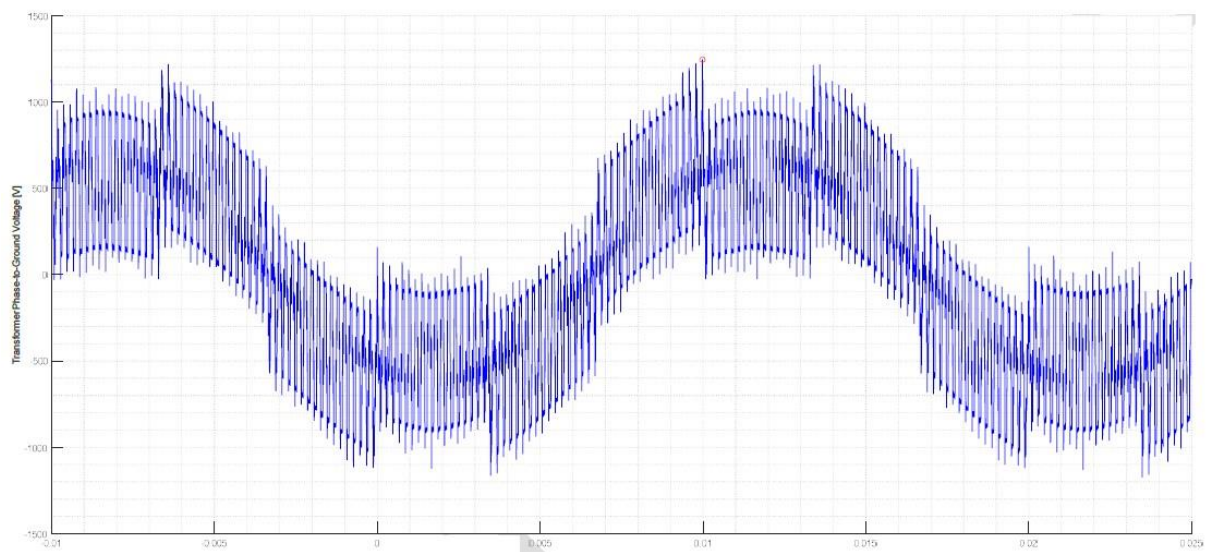
A projekt megvalósítása során rengeteg tapasztalatot szereztem. Nagy kihívás volt számomra a projekt versenyeztetési szakasza, amely során számos műszaki paramétert kellett értékelni, összehasonlítani, majd ezek alapján végleges döntést hozni. Sok mindent tanultam a projekt tervezési szakaszából is, a villamos tervezővel naponta kellett egyeztetni, mivel ez számára sem egy megszokott tervezési feladat volt. A villamos tervezésen kívül építész és gépész tervezés lebonyolítása is részben a feladatom volt, ezek kapcsán is sok új ismeretre tettem szert. A legnagyobb kihívást a kivitelezés jelentette, ahol folyamatosan a helyszínen kellett tartózkodnom és irányítanom a munkafolyamatokat. Természetesen, mint minden hasonló volumenű projektnél, itt is rengeteg probléma merült fel, melyet a helyszínen a lehető leghamarabb kellett megoldani annak érdekében, hogy a véghatáridő tartható legyen. A felmerülő problémák sokaságából, a következőkben kettő lényegeset emelnék ki, ezek megoldása alatt rengeteg mérés-technikai és adatelemzési tudásra tettem szert.

Az első lényeges műszaki probléma a BESS2 rendszerével kapcsolatban merült fel. Az 5 MW teljesítményű inverter két különálló rendszerre van osztva, mely a három-gombolyítású transzformátorra csatlakozik összesen 24 db (fázisonként 4 db) POWERFLEX RV-K 1x300mm² típusú földkábelén keresztül. A kábel névleges feszültsége 0,7 kV, a maximális feszültség csúcs 1,2 kV.

Az AC/DC konvertálás következtében fellépő felharmonikusokat az inverterben található ellenállás (R) és kondenzátor (C), valamint a transzformátor tekercse (L) szűri meg. Az inverter és a transzformátor közötti kábelszakasz mérésekor azonban egy elég súlyos hibát véltünk felfedezni. A mért feszültség jelalakok az alábbi ábrákon láthatóak.



Ábra 10.1: Mért 3f fázisfeszültségek jelalakja az transzformátor primer oldalán [38]



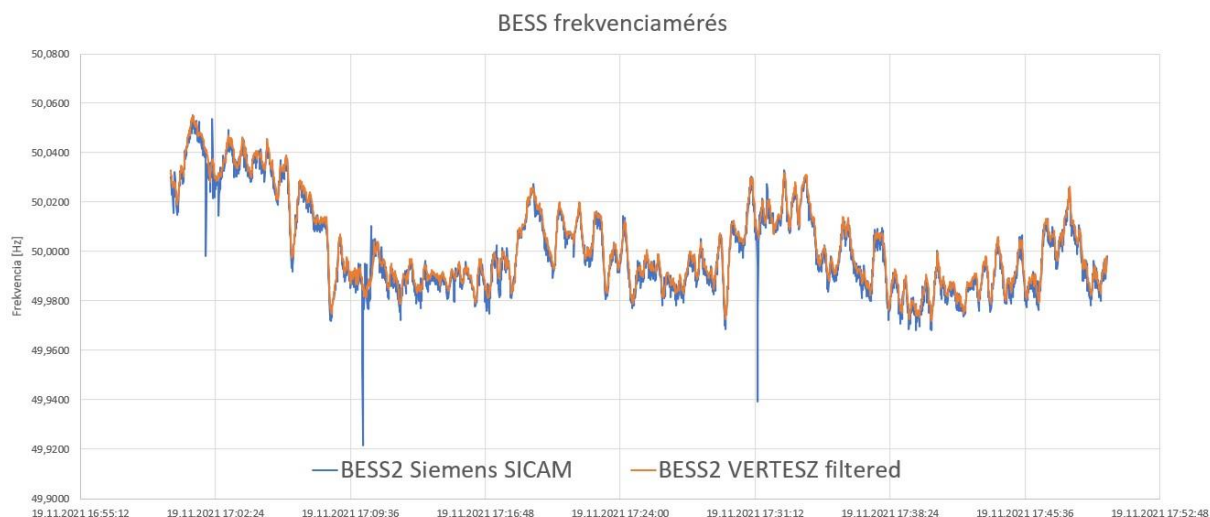
Ábra 10.2: Mért 1f fázisfeszültség jelalakja az transzformátor primer oldalán [38]

Látható, hogy a feszültség szinusz jele igen zavart, az inverterben található R-C szűrő nem végez teljes körű szűrést. A meglepetést az okozta, hogy olyan mértékű feszültségtűskék léptek fel a transzformátor és az inverter közötti kábelszakaszon, hogy azok meghaladták a kábel maximálisan megengedett feszültség szintjét. A mérés során a legnagyobb feszültségérték 1202.9 V AC, mely 1297 V DC akkumulátor feszültségénél lépett fel. Ezt az értéket extraponálva a lehetséges legnagyobb akkumulátor feszültség szinthez (1500 V), 1395,4 V AC feszültség is megjelenhet a kábelszakaszon. A kábelt 5 kV-os feszültség szinten tesztelték, azonban a megengedettől magasabb feszültség szint

alkalmazása várhatóan csökkentené a kábel élettartamát. Ennek elkerülése érdekében a teljes kábelszakasz lecserélése mellett döntöttünk. Ez decemberben meg is történt, az új kábel egy TECSUN(PV) típusú 1,8/3kV AC szigetelésű kábel lett.

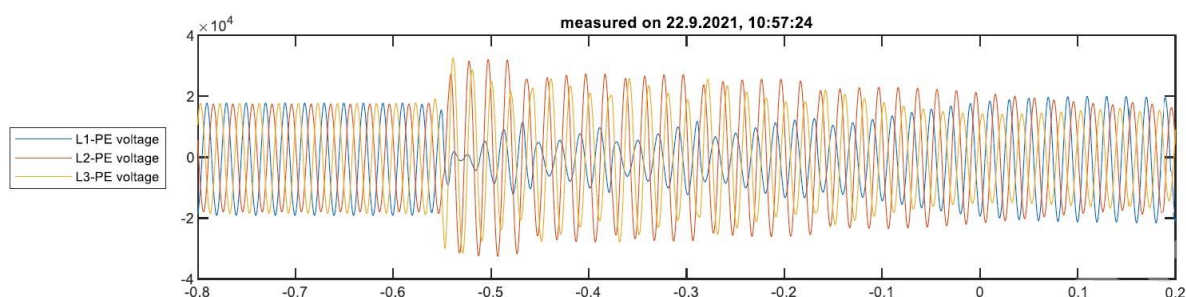
A transzformátor és az inverter megfelelő szűrésének megbizonyosodásáról, újabb méréseket hajtottunk végre a középfeszültségű cellákban. A mérés eredménye kimutatta, a teljes harmonikus torzítás legnagyobb mért értéke 0,89% volt. Az MSZ EN 50160 szabvány szerint a szolgáltatott villamos energia felharmonikus tartalmának 8% alatt kell lennie, tehát az inverter kapacitása és ellenállása, valamint a transzformátor tekercsei összességében megfelelő szűrést végeznek, nincs szükség további szűrőberendezés beépítésére. [39]

A második lényeges műszaki probléma szintén a BESS2 rendszerrel kapcsolatban lépett fel. Mind a BESS1 mind a BESS2 20 kV-os szekunder fülkéjébe telepítésre került 1-1 VERTESZ gyártmányú FRTD frekvencia távadó. E berendezés nagy pontosságú és nagy felbontású frekvenciamérést tesz lehetővé. A BESS1 rendszerét ennek az eszköz által szolgáltatott frekvenciajel alapján szabályoztuk, azonban BESS2 rendszerhez a holland szállító beépített egy saját, Siemens SICAM gyártmányú teljesítmény és frekvencia mérő berendezést. Az végleges beüzemelés követően, a két rendszer kereskedelmi forgalomba állt, azonban az első nap után egyértelművé vált, hogy a BESS2 rendszer nem képes megfelelően szabályozni. Az alábbi ábrán a kék adatpont a Siemens SICAM mérőeszköz által mért frekvenciát, a sárga adatpont pedig a Vertesz berendezés által mért értékeket mutatja.



Ábra 10.3: Siemens SICAM és VERTESZ FRTD mérőműszer mért frekvenciaadatai

Látható, hogy a két mért érték sok esetben teljes mértékben megegyezik, azonban körülbelül fél óránként a SICAM berendezés hatalmas frekvencia ugrásokat (jelen esetben eséseket) érzékel. Ezeket az ugrásokat a gyors beavatkozásokat az akkumulátorok is követi és sokszor előfordult, hogy egy másodperc alatt, pár másodpercig ± 3 MW teljesítményt táplált ki a rendszer a hálózatra. Első gondolatunk az volt, hogy a SICAM berendezés valamilyen okból kifolyólag hibásan mér. Ezt gyorsan elvetettük, mivel a grafikonon is látható, hogy sok esetben megegyezik a mért érték a Vertesz berendezéssel. A VERTESZ berendezés el van látva egy 8 kHz-es szűrővel, azonban a SICAM berendezésben nincs ilyen szűrés. Ezek után megvizsgáltuk a villamos hálózatot és egy érdekes jelenségre lettünk figyelmesek. Az alábbi ábrán a 20 kV-os hálózaton mért feszültség jelalakja látható.

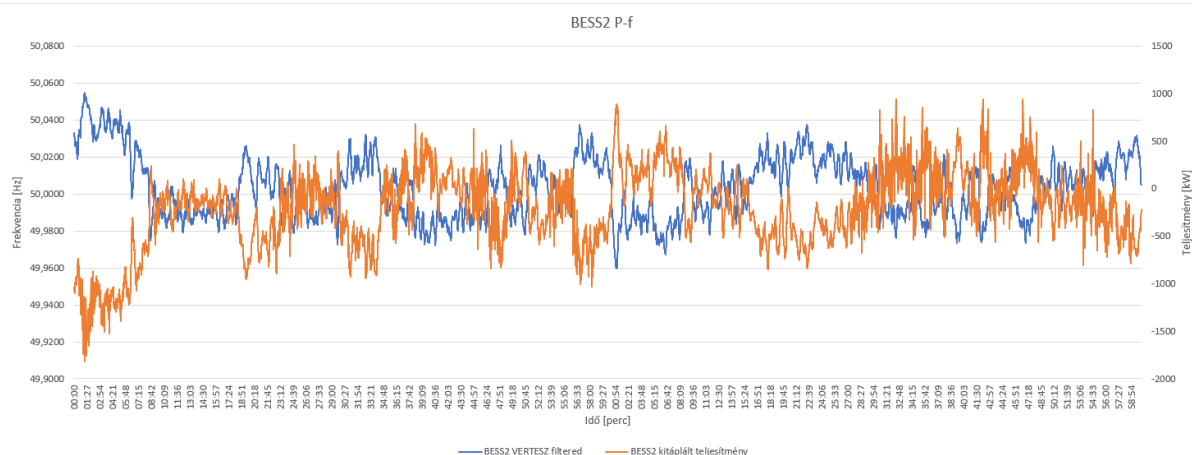


Ábra 10.4: 20kV-os hálózaton mért feszültség jelalakok [38]

A mérésből arra következtettünk, hogy a hálózatra körülbelül 20-30 percenként igen nagy tranziens feszültséglengetések kerülnek ki. Ennek pontos oka még ismeretlen, de valószínűleg a fűtőműtől körülbelül 5 kilométerre lévő BorsodChem, Magyarország egyik legnagyobb vegyipari üzeme a jelenség okozója.

Miután tisztába voltunk a hibával és annak lehetséges okával, a megoldás már könnyen jött. A BESS2 szállítóját megkértük, hogy a frekvencia mérését a VERTESZ frekvencia távadó berendezéssel végezzék, ennek szűrője megfelelően kiszűri a tranziens lengésekből származó frekvenciaugrásokat.

A szükséges programozási feladatok elvégzése után újra kereskedelmi üzembe helyeztük a BESS2 egységet, mely innentől kezdve megfelelően működött.



Ábra 10.5: BESS2 kitáplált teljesítménye a frekvencia függvényében

2021. december közepe óta a két rendszer folyamatosan, nagyobb probléma nélkül, automatikusan üzemel, de sok teendő van még a tárolók finomra hangolásán. BESS2 rendszere esetleges hálózati kiesés és visszaállás esetén nem indul automatikusan újra, azt kézzel kell elindítani. Ez a korábban bemutatott rossz hálózati minőségnek köszönhetően körülbelül kéthetente előfordul. Elkezdtünk a rendszer szállítójával tárgyalni a lehetséges megoldásokról. Felmerült egy olyan továbbfejlesztési lehetőség is, hogy az akkumulátoros energiatároló vezérlését és a védelmeit olyan módon alakítsuk át, hogy a hálózati kiesés esetén UPS-ként szolgáljon a fűtőműnek, ezáltal akár a gázmotorok is elindíthatóak lennének hálózati feszültség nélkül. Ha ez megvalósulna, a kazincbarcikai fűtőmű lenne az egyetlen olyan fűtőerőmű Magyarországon, mely földgáz megléte esetén folyamatos üzemet, tehát folyamatos meleg vizet tud biztosítani a lakosságnak, függetlenül a villamos hálózattól.

Nagyon izgalmas lesz pár év üzemelés után összehasonlítani a két akkumulátoros rendszert. Az eddigi 2 hónapos üzemelés alatt, az autóakkumulátorok és a teljesítményakkumulátorok között nem véltünk felfedezni semmilyen különbséget, mind két rendszer megfelelően alkalmazható primer (FCR) és szekunder (FFR) szabályozásra egyaránt.

Összességében kijelenthető, hogy a különböző paraméterű akkumulátorokból felépített energiatároló projekt kimagaslóan sikeres volt.

10 ÖSSZEFOGLALÁS

Diplomamunkám két fő egységre osztható. Az első részben bemutattam a villamosenergia – rendszer kialakulását, kitértem a jelenleg alkalmazott három fő szabályozási módra. Ezt követően bevezettem a megújuló energiaforrások elterjedésének tendenciáját Európában, illetve hazánkban. A rohamosan növekvő nap és szélenergia kapacitásokra a jelenlegi villamos hálózat nincsen megfelelően felkészülve, ezért az üzemirányítóknak napról napra nehezebb dolguk van a hálózat stabilitását, minőségét és üzemfolytonosságát az elvárt műszaki paraméterek között tartani.

Dolgozatomban felvázoltam a fő hálózati problémákat. Bemutattam a problémák lehetséges megoldásait, melyek közül véleményem szerint az egyik legmegbízhatóbb az energiatárolók létesítése. Bemutattam a különböző tározós technológiákat, majd levontam a következtetést, hogy Magyarország természeti adottságai miatt a legkézenfekvőbb megoldás lehet az akkumulátoros energiatárolók létesítése.

Az első rész második felében rátértem az akkumulátoros energiatárolókra. Bemutattam előnyeit, hátrányait, majd rátértem a rendszer alapvető építőelemére, magára az akkumulátorra.

Megvizsgáltam az akkumulátorok alapvető tulajdonságait, majd ezt követően a jelenleg legelterjedtebb akkumulátor technológiákat összehasonlítottam. Ezek után felvázoltam egy prognózist, a várható, jövőbeli akkumulátorok mennyiségéről. Jelenleg az autóipar használja fel a legtöbb lítium akkumulátort. Ezekben a járművekben 8-10 év után szükséges az akkumulátorok cseréje, ekkor már kapacitásuk 80-70% alá csökken, fenttartásuk nem gazdaságos.

Megvizsgáltam, jelenleg milyen módszereket alkalmaznak az akkumulátorok újra hasznosítására. Kutatásaim során megdöbbenve tapasztaltam, hogy az akkumulátorok 95%-a nem kerül újra hasznosításra. Bemutattam egy rendkívül praktikus újra felhasználási módszert, a használt autóakkumulátorokból felépített energiatárolót.

A dolgozatomban második felében bemutattam egy általam és munkatársam által végigvezetett akkumulátoros energiatároló projekt megvalósulását. A diplomamunkámban kifejtettem a projekt legelső lépéseit, a koncepció kidolgozását. Ezt követően bemutattam a projekt egyik legnehezebb szakaszát, a versenyeztetést. Pontos műszaki adatokat kellett szolgáltatni az egyes technológiai beszállítóknak, ezért több, igen komplex szimuláció elvégzését kellett elvégezni. Ezek eredményeit dolgozatomban ismertettem. Ezt követően bemutattam a két akkumulátoros rendszer főbb elemeit, majd rátértem a villamos hálózatra való csatlakozáshoz szükséges 20 kV-os erőművi átalakítások bemutatására. Ismertettem a rendszerek vezérlésének, menetét, majd bemutattam a projekt legizgalmasabb részét, a kivitelezést. Dolgozatomban végén ismertettem a projekt megvalósulása közben szerzett tapasztalatokat és kifejtettem véleményemet az energiatárolókról, azok jövőjéről.

11 SUMMARY

My thesis can be divided into two main parts. In the first part, I described the evolution of the electricity system and the three main types of regulation currently in use. I then introduced the trend of renewable energy penetration in the electricity grid in Europe and in our country. The current electricity grid is not adequately prepared for the rapidly growing solar and wind energy capacities, and therefore it is becoming more and more difficult for the TSO operators to keep the stability, quality, and continuity of the energy supply within the expected technical parameters.

In my thesis I have outlined the main network problems. I have presented possible solutions to these problems, of which I believe that one of the most reliable is the installation of energy storages. I have presented the different storage technologies and concluded that, due to Hungary's natural conditions, the most obvious solution would be to install battery storages. After that conclusion, I started to describe the different kind of battery storages. I presented its advantages and disadvantages and then turned to the basic building block of the system, the battery itself. I examined the basic characteristics of batteries and then compared the most common battery technologies currently in use. I then outlined a forecast of the expected future battery volumes.

At present, the automotive industry uses most lithium batteries. In these vehicles, the batteries need to be replaced after 8-10 years, at which point their capacity drops below 80-70%, making them uneconomical to maintain. I have investigated the current methods of battery recycling. During my research I was shocked to find that 95% of batteries are not recycled. I presented a very practical reuse method, an energy storage system built from used car batteries.

In the second part of my thesis, I presented the implementation of a battery energy storage project carried out by myself and my colleague. In my thesis, I explained the first steps of the project, the development of the concept. I then described one of the most difficult stages of the project, the tendering process.

Accurate technical data had to be provided to each technology supplier, which meant carrying out a series of very complex simulations. The results of these simulations are presented in my thesis. I then described the main elements of the two battery systems and then went on to describe the modifications needed to connect them to the 20 kV grid. I described the control of the systems, the process and then the most exciting part of the project, the execution. At the end of my thesis, I presented the experience gained during the project and expressed my views on the future of energy storage.

12 ÁBRAJEGYZÉK

1.1	Átlagos napi fogyasztási görbe Magyarországon [2]	5
2.1	Átlagos napi frekvenciaingadozás az Európai hálózaton [2]	7
3.1	Megújuló energiatermelés növekedése Európában [10]	10
3.2	Telepített szél erőművek beépített teljesítménye Európában [10]	11
3.3	Fotovoltaikus erőművek beépített teljesítménye Európában [10]	11
3.4	Megújuló energiaforrások részaránya a magyar energiamixben [10]	12
3.5	Magyarország energiamixe 2020-ban [2]	12
3.6	Magyarországi fotovoltaikus erőművek termelésnövekedése [10]	13
3.7	2020.10.04 Erőműve termelés tüzelőanyag szerinti bontásban [2]	14
3.8	2020.10.04 Fotovoltaikus erőművek termelése [2]	14
3.9	Egy napra levetített becsült/valós szélenergia termelés Magyarországon [2]	15
3.10	"Heywood" gerincvezeték leválása [18]	17
4.1	Energiatároló alkalmazása termelői csúcsok levágására [20]	20
4.2	Különböző energiatárolók paramétereinek összehasonlítása [22]	24
4.3	Különböző energiatárolók költségeinek összehasonlítása [22]	25
4.4	Energiatároló technológiák megosztottsága a világban 2017-ben [23]	25
4.5	Energiatárolók beépített teljesítménynövekedése a világban [24]	26
4.6	Első magyarországi akkumulátoros energiatároló	27
5.1	Lítium akkumulátorok elterjedése [30]	31
5.2	Az öregedő akkumulátor energiasávja elektromos járművekben [34]	33
6.1	Akkumulátoros energiatároló rendszer első koncepciója	36
6.2	Primer [FCR] szabályozás akkumulátorok segítségével	37
6.3	A projekt megvalósulásának helyszíne: Kazincbarcika [37]	38
6.4	Az akusztikai szimuláció eredményei zaj védő falak figyelembevételével [36]	39
6.5	Az első szimuláció kiinduló paraméterei. BESS2 - 4,4MW [36]	41

6.6	Az első szimuláció elvárt értékei [36]	41
6.7	Az második szimuláció kiinduló paraméterei. BESS2 - 4,4MW [36]	42
6.8	Az második szimuláció elvárt értékei [36]	42
6.9	Az harmadik szimuláció kiinduló paraméterei BESS2 - 4,4MW [36]	43
6.10	Az harmadik szimuláció elvárt görbéi [36]	43
6.11	Az akkumulátorok töltöttségének eloszlása egy év alatt. [36]	44
6.12	Az akkumulátorok által kitáplált/vételezett teljesítmény eloszlása 1000 kW teljesítményű akkumulátoros energiatárolót feltételezve [36]	45
6.13	Az akkumulátoros energiatároló által termelt/vételezett energiaváltozás nagyságának eloszlása [36]	45
6.14	A folyamatos töltés/kisütés idejének eloszlása[36]	46
7.1	BESS1 akkumulátorok [36]	49
7.2	BESS1 inverter adatok [36]	49
7.3	BESS1 transzformátor adatok [36]	50
7.4	BESS1 egyvonalas rajza [36]	51
7.5	BESS2 akkumulátorok [36]	52
7.6	BESS2 inverter adatok [36]	53
7.7	BESS2 transzformátor adatok [36]	53
7.8	BESS2 egyvonalas rajza [36]	54
8.1	Az energiatárolók 20 kV-os csatlakozásához szükséges módosítások [36] ...	56
9.1	A megvalósult akkumulátoros energiatároló [36]	58
9.2	BESS2 12 db rackje (két sorban) és az 5 MW-os inverter [36]	58
9.3	BESS2 1 szekrényének belseje a 8 akkumulátor egységgel [36]	59
9.4	BESS1 konténere, a 16-db BMW I3-mas akkumulátormodulokkal [36]	60
9.5	BESS1 (jobbra) és BESS2 (balra) transzformátorai [36]	60
10.1	Mért 3f fázisfeszültségek jelalakja az transzformátor primer oldalán [38] ...	62
10.2	Mért 1f fázisfeszültség jelalakja az transzformátor primer oldalán [38]	62
10.3	Siemens SICAM és VERTESZ FRTD mérő műszer mért frekvenciaadatai ...	63

10.4 20kV-os hálózaton mért feszültség jelalakok [38]	64
10.5 BESS2 kitáplált teljesítménye a frekvencia függvényében	65

13 FORRÁS LISTA

- [1] Dr. Kádár Péter. *Energetika - A villamosenergia-rendszer üzeme*. Tech. rep. ÓE-KVK 2122, 2014.
- [2] <https://www.mavir.hu>. Tech. rep. 2021.
- [3] Dr. Balla László. *XI. Az energiapiac kilengéseinek kezelése*. Tech. rep. 2013.
- [4] <https://www.mvmpartner.hu/hu-HU/Szolgáltatások/Villamos-Energia/Erdekessegek/Villamosenergia-taroloklehetesegfeladataiesrendszerbeilleszthetosege>. Tech. rep.
- [5] Topai Zsolt. *A magyar villamosenergia rendszer rendszerirányításainak alapjai*. Tech. rep. 2013.
- [6] J.G.J. Olivier és J.A.H.W. Peters. *TRENDS IN GLOBAL CO2 AND TOTAL GREENHOUSE GAS EMISSIONS*. Tech. rep. 2020.
- [7] Európai Parlament. *Üvegházhatású gázok kibocsátása az EU-ban*. Tech. rep. 2018.
- [8] Európai Parlament. *Az EU éghajlat-politikája és az európai zöld megállapodás*. Tech. rep. 2020.
- [9] Renewable energy directive. URL: https://ec.europa.eu/energy/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive/overview_en.
- [10] bp. *Statistical Review of World Energy*. 2020. URL: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>.
- [11] JUN LIANG DIRK VAN HERTEM ORIOL GOMIS-BELLMUNT. *HVDC Grids For Offshore and Supergrid of the Future*. Tech. rep.
- [12] Windeurope. 2019. URL: <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/statistics/WindEurope-Annual-Statistics2018.pdf>.
- [13] Európai Bizottság. 2019. URL: <https://ec.europa.eu>.
- [14] Mavir. *Szélmérőművi kapacitás bővítés lehetőségei és feltételei a magyar villamosenergiarendszerben*. Tech. rep. 2008.
- [15] 277/2016. (IX. 15.) Korm. rendelet a szélerőművekre vonatkozó szabályok módosításáról.

-
- URL: <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=A1600277.KOR×hift=20160923&txtreferer=00000001.txt>.
- [16] *A nem forgógépes energiatermelés hatása a villamosenergia-rendszer frekvenciastabilitás megőrzésére.* 2021, Dr. Vokony István.
 - [17] Clean Energy Wire. *German wholesale power prices turn negative less often in 2018.* 2019. URL: <https://www.cleanenergywire.org/news/germanwholesale-power-prices-turn-negative-less-often-2018>.
 - [18] AEMO. *PRELIMINARY REPORT – BLACK SYSTEM EVENT IN SOUTH AUSTRALIA ON 28 SEPTEMBER 2016.* 2017.
 - [19] Dr. Raisz Dávid. “Inerciacsökkenés hatása a rendszerstabilitásra”. In: *Elektrotechnika* (2020).
 - [20] MVM. *Az energiatárolás alkalmazási lehetőségei a villamosenergiarendszer teljes spektrumán.* URL: <https://www.mvmpartner.hu/Szolgáltatások/Villamos-energia/Erdekessegek/Azenergiatarolasalkalmazasilehetosegeiavillamosenergia-rendszerteljesspektrumon>.
 - [21] Fleer J. *Impact analysis of different operation strategies for battery energy storage systems (BESS) providing primary control reserve.* Tech. rep. 2015.
 - [22] Henok Ayele Behabtu. *A Review of Energy Storage Technologies’ Application Potentials in Renewable Energy Sources Grid Integration.* Tech. rep.
 - [23] Greentechmedia. URL: <https://www.greentechmedia.com/>.
 - [24] IEA. URL: <https://www.iea.org/reports/energy-storage>.
 - [25] mvm. *Szivattyús-tározós erőművek feladata és használata a villamosenergia - rendszerben.* URL: <https://www.mvmpartner.hu/hu-HU/Szolgáltatások/Villamos-energia/%20Erdekessegek/Szivattyus-tarozoseromuvekfeladataeshasznalataavillamosenergia-rendszerben>.
 - [26] *Lithium-Ion Batteries: Fundamentals and Applications.*
 - [27] pveducation.org. URL: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/battery-characteristics/battery-voltage>.
 - [28] *A Guide to Understanding Battery Specifications.*
 - [29] energiapedia. URL: <http://energiapedia.hu/akkumulator-felepitesi-es-mukodese>.
 - [30] Hans Eric Melin. *The lithium-ion battery end-of-life market.* Tech. rep.
 - [31] Battery University. URL: https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/bu_808b_what_causes_li_ion_to_die.
 - [32] b evmobil. URL: <https://b-evmobil.hu/blog/elektromos-autoakkumulator-ujrahasznositasa/>.

- [33] URL: <https://lionsmart.com/en/life-cycle-of-lithium-ionelectric-vehicle-batteries/>.
- [34] Battery University. URL: https://batteryuniversity.com/learn/article/bu_1003a_battery_aging_in_an_electric_vehicle_ev.
- [35] ALTEO. 2021. URL: <https://www.sinergy.hu/hu/#intro>.
- [36] Alteo Nyrt. “KF2 projekt”.
- [37] URL: <https://www.google.com/maps>.
- [38] Alfen B.V.
- [39] MSZ 50160. *A közcélúelosztóhálózatokon szolgáltatott villamos energia feszültségjellemzői.*