



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Villamos Energetika Tanszék

Bereczki Bence

Lítiumion-akkumulátoros energiatároló rendszerek alkalmazása ipari környezetben

TDK dolgozat

KONZULENS

Dr. Hartmann Bálint

BUDAPEST, 2018

Összefoglaló

A szinkrongenerátorok helyett invertereken keresztül termelő, sokszor pillanatszerűen változó teljesítményt leadó szél- és naperőművek a kis- és középfeszültségű elosztóhálózatra termelve számos problémával állítják szembe az elosztói engedélyeseket. Lokálisan a betáplált felharmonikusok, a fordított irányú teljesítményáramlás, illetve a csatlakozási pont feszültségének megemelkedése, míg globálisan a villamosenergia-rendszer inerciájának csökkenése, ezáltal frekvenciaváltozásokra való érzékenységének növekedése, valamint a volatilitás miatti pontatlan menetrendezés jelentik a legnagyobb kihívásokat.

A közcélú villamosenergia-hálózatról vételezett teljesítmény minőségi problémái különösen nagy gondot okozhatnak azoknak az ipari berendezéseknek, melyek érzékenyek a feszültségingadozásokra. Az energiatárolási technológiák gyors költségcsökkenése lehetővé teszi, hogy a már korábban is használt ipari alkalmazások (például a szünetmentes ellátás) mellett új funkciókat (feszültségjavítás, meddőkompenzálás) töltsenek be ezek a rendszerek. Megfelelő energiatároló telepítésével megoldható a fogyasztói csúcsigények csökkentése, napon belüli elosztása (peak-shaving). A peak-shaving funkció alkalmazásával a hálózat üzemeltetői és a lakossági fogyasztók mellett a legjelentősebb költségmegtakarításra az ipari fogyasztók körében nyílik lehetőség, hiszen azok az igényelt és lekötött teljesítmény mellett előre megjelölt csúcspoyasztásra is fizetnek az áramszolgáltatóknak.

A dolgozat célja, hogy bemutassa az iparvállalati környezetben alkalmazott akkumulátoros energiatárolási funkciókat, kiemelve a jelentős gazdasági és műszaki potenciállal rendelkező peak-shaving alkalmazást. Röviden bemutatásra kerülnek a releváns energiatárolási technológiák, majd az ipari környezetben is egyre gyakrabban alkalmazott lítium-akkumulátoros energiatárolásra kerül a hangsúly. A dolgozat átfogó képet ad a típus hálózati felhasználásának módjairól, majd részletesen ismerteti a peak-shaving, a feszültségszabályozás, a szünetmentes ellátás és a meddőkompenzálás funkciókat. Ezek után bemutatja a peak-shaving funkcióhoz tartozó méretezési és tárolási algoritmus létrehozásának menetét, illetve egy, az ipari gyakorlatból vett fogyasztói adatbázis segítségével ismerteti annak működését.

Abstract

The wind and solar power plants which are connected to the LV and MV distribution systems and produce fluctuating power through inverters instead of synchronous generators are causing many problems to the distribution system operators. The main concerns are the high harmonic input, reverse power flow and voltage rise locally and the sensibility to frequency changes (which is the impact of decreasing system inertia) and inaccurate scheduling globally.

The quality problems of power purchased from the public electricity grid may affect the performance of industrial equipments that are sensitive to voltage fluctuations. The rapid cost reduction of energy storage technologies allows for the addition of new features (e.g. voltage and reactive power control) in addition to industrial applications (such as UPS) that have been used before. By installing the appropriate energy storage system (ESS) peak loads can be reduced and spread throughout the day (peak-shaving). With the peak-shaving ESS application significant cost saving are available to both retail consumers and grid operators but the ones that could profit the most are industrial consumers as they not only pay for fixed power but for predetermined peak loads as well.

The purpose of this dissertation is to demonstrate the battery energy storage system (BESS) applications used in industrial environment, highlighting the peak-shaving function which has significant economic and technical potential. The relevant energy storage technologies are discussed briefly, then lithium-ion based ESSs are presented in detail: commonly used industrial applications such as peak-shaving, voltage control, UPS and reactive power control are demonstrated. The design of the peak-shaving function is described then explained using the consumption data of an industrial consumer.

Tartalomjegyzék

Összefoglaló	i
Abstract	ii
Tartalomjegyzék	iii
1 Bevezetés.....	5
1.1 Alapvető fogalmak.....	5
1.2 Tárolók főbb típusai.....	6
1.2.1 Mechanikus tárolók.....	6
1.2.2 Elektrokémiai tárolók	9
1.2.3 Elektromos tárolók	11
2 Lítiumion-akkumulátoros rendszerek felépítése.....	13
2.1 Akkumulátorcellák működése	13
2.2 Cellatípusok összehasonlítása	13
2.3 Stacioner energiátároló rendszerek felépítése	14
2.3.1 Modul	14
2.3.2 Rack	15
2.3.3 BMS.....	15
2.3.4 Teljesítményelektronika	15
2.3.5 Hálózati csatlakozás.....	15
2.3.6 Irányítástechnika (EMS, SCADA).....	16
3 Akkumulátoros rendszerek hálózati alkalmazásai.....	17
3.1 VER-támogatás	17
3.1.1 Frekvenciaszabályozás.....	17
3.1.2 Black-start.....	18
3.2 Mérőóra mögötti alkalmazás (Behind the Meter – BTM)	18
3.2.1 Time-shifting (PV-BESS)	18
3.2.2 Peak-shaving.....	19

3.2.3	UPS	19
3.2.4	Teljesítmény kiegyenlítés (Ramping control)	20
3.3	Kereskedelmi alkalmazás.....	20
3.3.1	Arbitrázs	20
3.4	Minőségi energiaellátás	20
4	Akkumulátoros rendszerek iparvállalati alkalmazása	21
4.1	UPS	21
4.1.1	A rendszer felépítése.....	21
4.1.2	Lítiumion akkumulátoros UPS rendszerek értékelése.....	21
4.2	Feszültségszabályozás	22
4.3	Meddőkompenzálás	23
5	A peak-shaving rendszer bemutatása	24
5.1	A fogyasztási adatsorok kiértékelése	24
5.2	Az ipari fogyasztók villamosenergia-árának meghatározása	25
5.3	A tervezett BESS rendszer felépítése és költségei.....	26
5.3.1	Rendszer paraméterek	26
5.3.2	Költségszámítás	26
5.4	A peak-shaving rendszer méretezésének ismertetése.....	28
5.4.1	P_{inv} - E_{bat} meghatározása.....	28
5.4.2	A küszöbtejesítmények meghatározása	30
5.5	Működési algoritmus.....	31
5.6	Eredmények.....	32
6	Konklúzió	35
7	Irodalomjegyzék	36

1 Bevezetés

A váltakozó áramú villamosenergia-rendszer stabilitásához szükséges, hogy a termelés és fogyasztás egyensúlya minden pillanatban fennálljon. A jelenleg üzemelő rendszerben ezt az egyensúlyt a termelés fogyasztási igények szerinti szabályozásával érik el. A napjainkban jellemző decentralizációs folyamatok rengeteg új kihívás elé állítják a rendszerirányítókat. A különböző energiatárolási technológiák segítségével egyszerűbbé válik a termelés megfelelő idő- és térbeli allokálása, valamint számtalan új lehetőség nyílik meg mind az átviteli- és elosztóhálózati rendszerirányítók (TSO, DSO), mind a fogyasztók számára. Ezekről a lehetőségekről, alkalmazásokról a dolgozat későbbi fejezeteiben értekeznek. Az alábbi fejezetben a teljesség igénye nélkül kerülnek bemutatásra az energiatárolás ismert és alkalmazott formái.

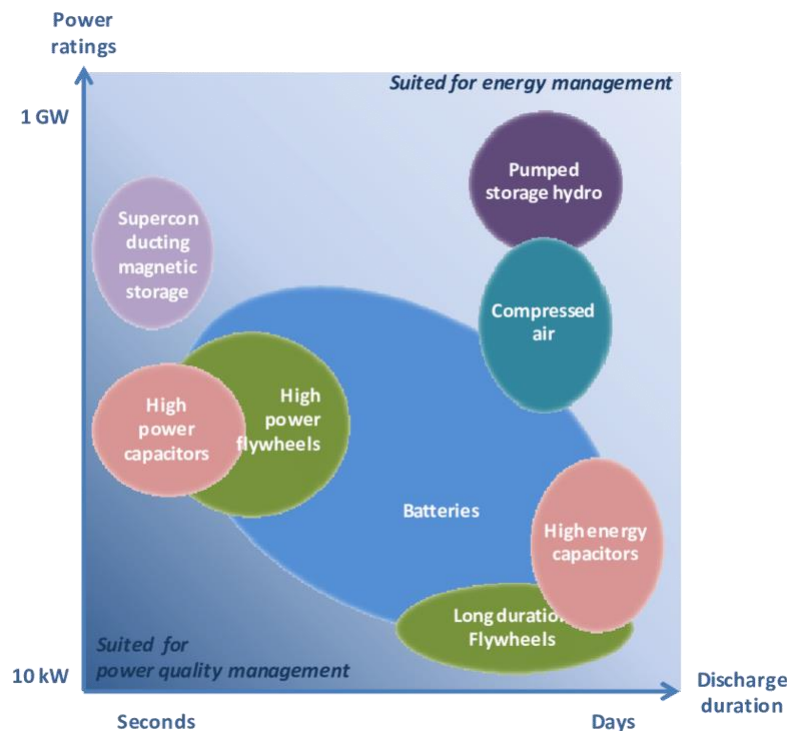
1.1 Alapvető fogalmak

A tárolási technológiák részletes ismertetése előtt érdemes áttekinteni pár, az energiatárolók működésének leírását segítő alapfogalmat, kiegészítve a későbbiekben részletesen vizsgált akkumulátoros rendszerekre vonatkozó definíciókkal. A *gravimetrikus energiasűrűség* [Wh/kg] határozza meg, hogy adott tömegegységre vonatkoztatva mennyi energiát tud eltárolni a rendszer. Ez az érték akkumulátorok esetében 25 °C üzemi hőmérsékleten, névleges áramú egyenletes kisütési folyamatra vonatkozik. Az energiasűrűséget néha megadják térfogategységre vonatkoztatva is, ez a *volumetrikus energiasűrűség* [Wh/l]. A *teljesítménysűrűség* [W/kg] mutatja meg, hogy egységnyi tömegű energiatároló mekkora dinamikus terhelést tud elviselni. Az tároló pillanatnyi töltöttségi állapotát leíró szám az *state of charge*, vagyis *SOC [%]*, a kisütöttség mértékét pedig a *depth of discharge*, vagyis *DOD [%]* jellemzi, melyet általában folyamatokra szoktak megadni. [1]

Az akkumulátorok *névleges kapacitása* [Ah] az I_n névleges töltőárammal, 25 °C hőmérsékleten kivehető töltésmennyiséget jelenti, a kapacitás fogalmát azonban gyakran alkalmazzák egyéb technológiák esetében is a maximálisan tárolható energia mennyiségére [kWh]. Fontos megjegyezni, hogy a kapacitás értéke függ a töltőáram mértékétől, illetve az üzemelési hőmérséklettől! Az akkumulátor *névleges áramát* úgy kell megválasztani, hogy a rendszer a tervezett $P_n = U_n \cdot I_n$ névleges teljesítményt le tudja adni. A kisütési áram mértéke sokszor a kapacitáshoz mérten van megadva, ez a bizonyos *C-rate*. A *C* értéke mutatja meg, hogy adott akkumulátor kapacitását mennyi idő alatt képes kisütni. Példaképpen egy 50 Ah kapacitású cella kisütése $1C$ -vel 1 óráig, $2C$ -vel fél óráig, $0,5C$ -vel pedig 2 óráig tart. Az akkumulátor élettartamát többféleképpen is leírhatjuk: a *cycle life* [db], magyarul ciklusszám azt mutatja meg, hogy 100% SOC-től 0% -ig kisütve, majd újra feltöltve hány ciklusig képes üzemelni az akkumulátor, ezzel szemben a *life cycle* [év] (élettartam) az üzemképesség időtartamát jelenti. Az akkumulátor a használatlal degradálódik, kapacitása folyamatosan csökken. A rendszer pillanatnyi kapacitásának annak kezdeti értékéhez mért viszonyát jelzi a *state of health*, *SoH [%]*, melynek megengedett minimális értéke alkalmazásonként különbözik. [1]

1.2 Tárolók főbb típusai

Az energiatárolókat többféleképpen is csoportosíthatjuk. Az alábbiakban [2] felhasználásával kerülnek bemutatásra a tárolás módja szerint megkülönböztetett mechanikus, elektrokémiai, valamint elektromos tárolók.



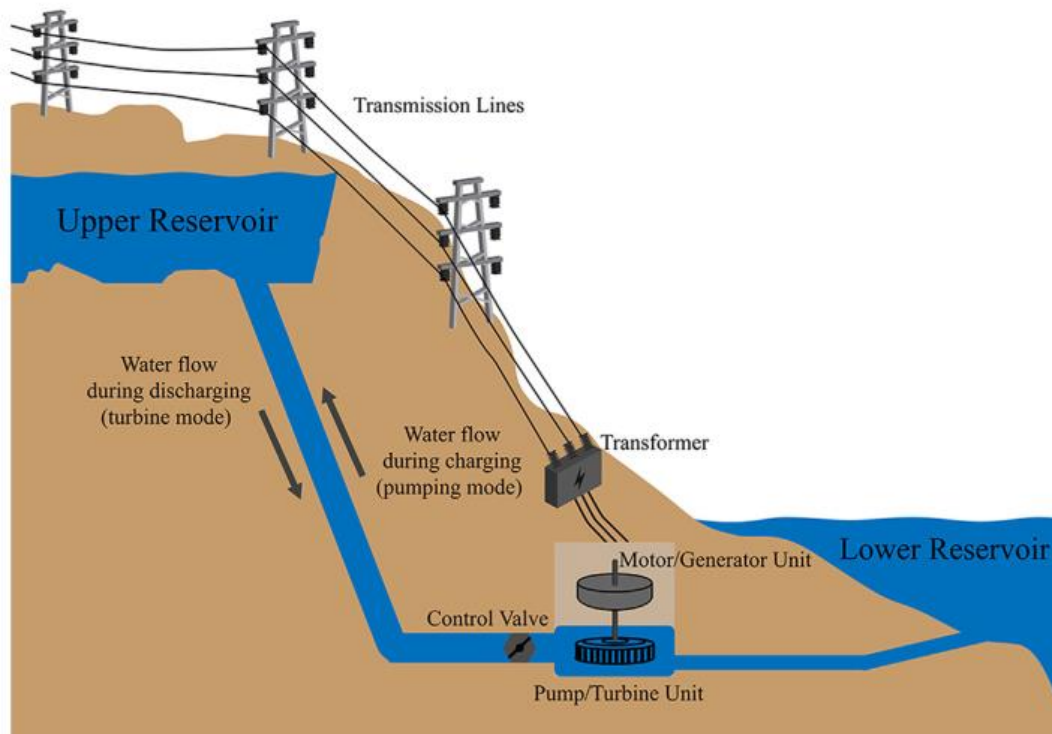
1. ábra: Energiatárolási technológiák összehasonlítása [3]

1.2.1 Mechanikus tárolók

1.2.1.1 Szivattyús energiatároló

Az első szivattyús-tárolós erőművet az 1890-es években építették az Alpokban, és elmondható, hogy a mai napig ez a típus teszi ki a villamosenergia-rendszerekbe beépített energiatároló-kapacitások döntő többségét (~95%). A szivattyús energiatároló (SZET) működésének alapelve, hogy a villamos energiát helyzeti energiává alakítja. Völgyidőszakban az alsó tározóból felszivattyúzzák a vizet a felső tározóba, ilyenkor a villamosenergia-rendszerben a SZET fogyasztó, csúcsidőszakban pedig leeresztik, és egy turbinán keresztül hajtanak meg vele egy generátort, ami a villamos energiát állítja elő. A SZET kialakítása többféle lehet: négygépes rendszerben külön szivattyú, turbina, a szivattyút meghajtó motor és generátor működteti a szerkezetet, míg kétgépes rendszer esetén egy turbina-szivattyú és egy motor-generátor kétirányú egységből áll össze a rendszer. Speciális esetben úgynevezett háromgépes, szivattyú, turbina és motor-generátor egységekből álló rendszert is telepítenek. A SZET tárolási hatásfoka 65-85% közé tehető a rendszer kialakításától, a felhasznált gépek minőségétől függően. Pénzügyi haszon abból származik, hogy a rendszer völgyidőszakban olcsóbban vételez áramot a villamosenergia-piacon, mint amennyiért csúcsidőszakban

eladja azt. A szivattyús-tározós erőművek beépített teljesítménye többszáz, esetenként több ezer MW is lehet, reakcióidejük perces nagyságrendű, élettartamuk az 50-60 évet is elérheti. A magas beruházási költség (500-4600 USD/kW) és a hosszú létesítési idő mellett a technológia legnagyobb hátrányait a működéshez megfelelő helyszín (kellő szintkülönbség, szükséges úrtartalomú víz-rezervoárok) megtalálása, valamint a létesítéshez szükséges különböző természetvédelmi engedélyek megszerzése jelentik.

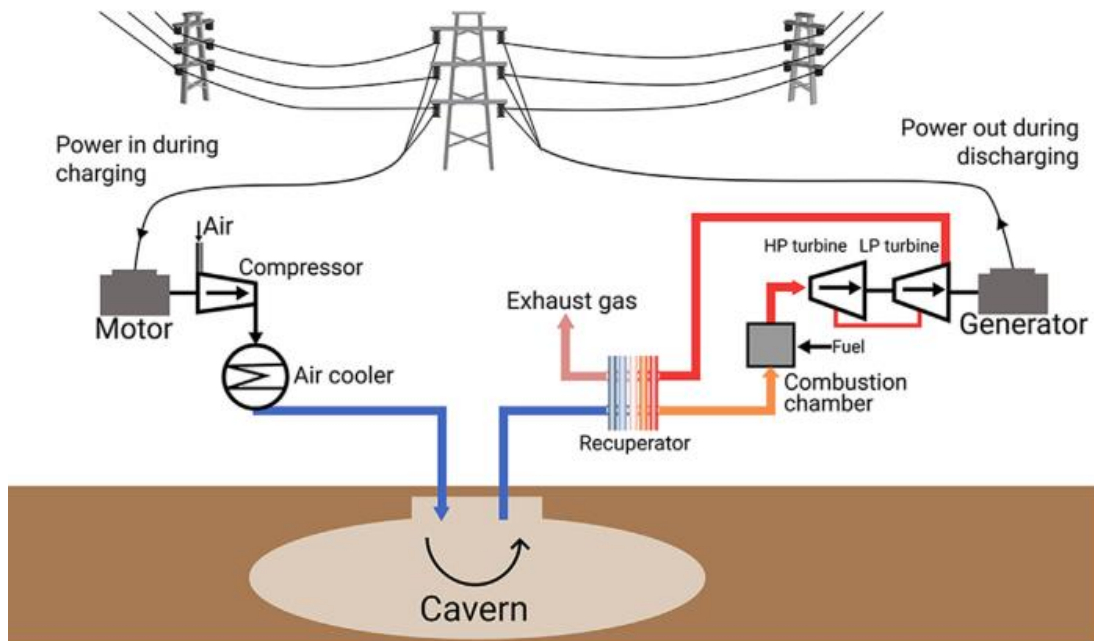


2. ábra: SZET felépítése [2]

1.2.1.2 Sűrített levegős tároló

A sűrített levegős energiatároló (Compressed Air Energy Storage, CAES) működése során a légkörből beszívott levegő nagy nyomásra komprimálásával tárol energiát. A sűrített levegő tárolása természetes vagy mesterséges barlangokban történik. A CAES egy gázturbinás rendszerrel együttműködve tudja felvenni és leadni tárolandó/tárolt energiát; völgyidőszakban egy kompresszor segítségével tárolják be a levegőt, míg csúcsideőszakban (megfelelő tüzelőanyag és gyújtás mellett) egy gázturbinát hajt meg a kiáramló, nagy nyomású gáz. A CAES tároláskor a hálózatról vesz fel villamos energiát a kompresszort meghajtó motor segítségével. A komprimált levegő ezután egy léghűtő rendszeren keresztül kerül az üregbe, ahol a tárolás történik. A kisütéskor távozó levegő egy, a gázturbinából távozó gáz hőjét felhasználó előmelegítőn halad át, majd az égőtérben megtörténik a tüzelőanyag (földgáz) hozzáadása, begyújtása. Ezek után egy nagy- és egy kisnyomású turbinán halad át a munkaközeg, melyek közös tengelye a villamosenergia-rendszerbe tápláló generátort hajtja meg. A CAES technológiára jellemző a nagy tárolási kapacitás, és a hosszú tárolási időtartam, mely elsősorban a kis önkisülésnek köszönhető (0,5%/nap). A rendszer reakcióideje másodperces

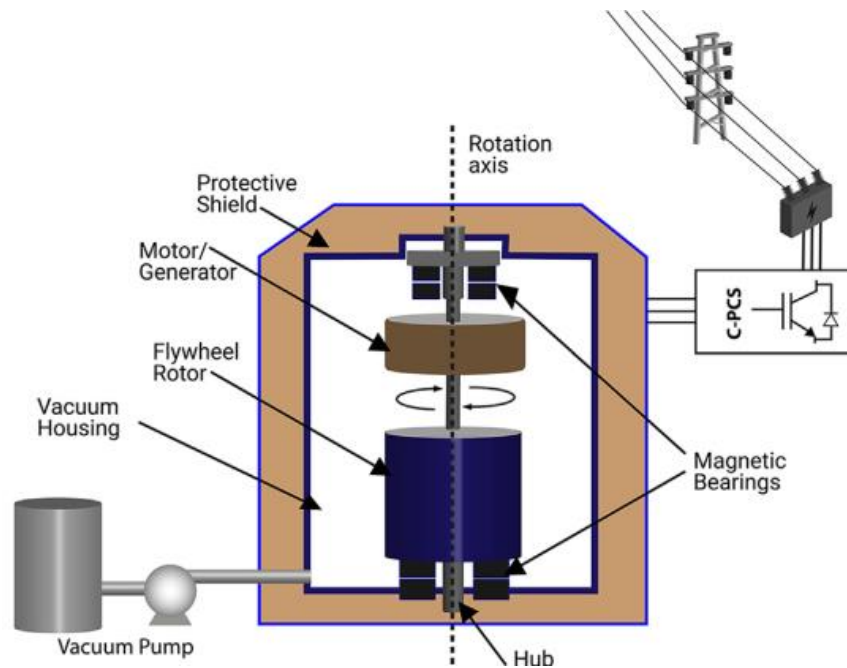
nagyságrendű, beruházási költsége a SZET-ekénél kisebb (400-800 USD/kW), hatásfoka nagyságrendileg megegyezik (70-80%), élettartama 40 év körüli. A sűrített levegős energiatárolók legnagyobb hátránya a típus alacsony energiasűrűsége (12 kWh/m³), valamint a telepítés fizikai és jogi nehézségei. Az első CAES technológiával működő tároló 1978-ban épült Németországban (290 MW), ezt a nagyobb teljesítményűek közül csak az 1991-es, alabamai rendszer követte (110 MW).



3. ábra: CAES felépítése [2]

1.2.1.3 Lendítőkerék

A lendítőkerék (flywheel energy storage – FES) mozgási energia formájában tárolja a hálózatról felvett villamos energiát, melyet az előzőekben bemutatott technológiákhoz hasonlóan egy motor/generátor egységgel vételez és táplál vissza. Tároláskor a motor egy, a súrlódás csökkentése miatt általában mágneses csapágyak közé fogott, vákuumkamrába zárt rotort hajt meg, kisütéskor pedig az ilyen módon tárolt forgási energia hajtja meg a generátort. A tárolt energia nagyságát az $E = J * \omega^2$ képlet írja le, ahol J a rotor tehetetlenségi nyomatéka, ω pedig a szögsebessége. A lendítőkerékes technológia rövidtávú tárolási megoldás, a kisütési idő perces nagyságrendbe esik. Megkülönböztetünk lassú ($n_{max} = 6000 \frac{1}{perc}$) és gyors ($n_{max} = 60000 \frac{1}{perc}$) lendítőkerekeket. Míg az előbbi technológia általában acélrotort és hagyományos csapágyazást alkalmaz, utóbbi esetében jellemző a kompozit rotor, és a mágneses csapágyazás. A fajlagos energia értéke lassú lendkerék esetén 10-30 Wh/kg, gyors lendkerék esetén 100 Wh/kg. A FES rendszerek előnye a hosszú élettartam (15-20 év), magas ciklusszám (10000-100000 ciklus) és a magas hatásfok (90-95%), ám hosszú idejű tárolásra 20%/óra körüli önkisülésük miatt nem alkalmasak.



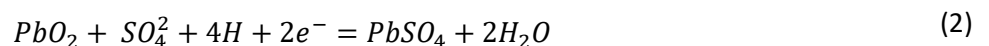
4. ábra: FES felépítése [2]

1.2.2 Elektrokémiai tárolók

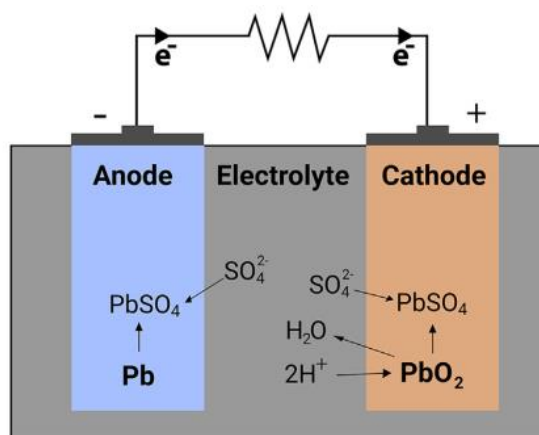
Az elektrokémiai tárolási technológiák rendkívül széles spektrumot fednek le; a különböző akkumulátoros tárolók tulajdonságai jelentősen eltérnek egymástól az elektródák és az elektrolit anyagától, a rendszerek szerkezetétől függően. A cellák különböző sorrendű soros és párhuzamos kapcsolásával rugalmasan alakítható a modulok feszültsége és teljesítménye, így könnyű a különböző alkalmazásokhoz igazítani a rendszert. Az akkumulátorcellák működésének részletes ismertetésével a dolgozat későbbi fejezetekben foglalkozik. A műszaki és piaci monopolhelyzetük miatt a továbbiakban részletesebben tárgyalt lítium ionos és ólomsavas tárolókön kívül említést érdemelnek a nikkel-, a nátrium-kén-, és a nátrium-nikkel-klorid alapú akkumulátorok is.

1.2.2.1 Ólomsavas és lítium ionos akkumulátorok

Az ólomsavas akkumulátorok a legrégebb óta használatban lévő energiatárolási technológiák közé tartoznak (ilyen volt az első újratölthető akkumulátoros egység is 1859-ben). Teljes feltöltöttség esetén az anód fémes állapotú ólomból, a katód ólom-oxidból áll, míg a két elektróda közti teret kitöltő elektrolit kénsav. Az anódon és a katódon végbemenő kémiai folyamatokat az alábbi egyenletek írják le:



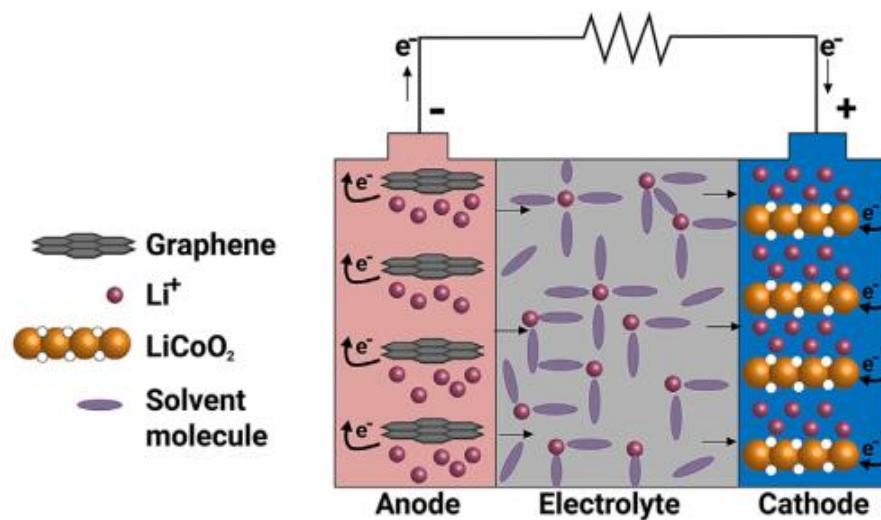
A cellafeszültség ólomsavas akkumulátorok esetében 2 V körül mozog, egy-egy cella élettartama pedig (alkalmazástól függően) a 12 évet is elérheti. Rendkívül vonzó tulajdonság az alacsony bekerülési költség (150-500 USD/kWh) és a magas hatásfok (65-80%), az alacsony önkisülés (0,3%/nap) és a gyors reakcióidő (<5 ms) pedig azt is jelenti, hogy hálózati alkalmazásra (pl. feszültségminőség javítása, szabályozási tartalék) kiválóan alkalmas ez a technológia. A negatív attribútumok közé tartozik az alacsony energia- (25-45 Wh/kg) és teljesítménysűrűség (180-200 W/kg), a viszonylag kis ciklusszám (200-1800 ciklus), a magas karbantartási költségek, a lehetséges káros környezeti hatások (ilyen lehet robbanékony gázok és savas gőz kiszivárgása), valamint a lassú töltés. Mindezek mellett jellemző az alacsony hőmérsékletre való rendkívüli érzékenység; ennek kiküszöbölésére fejlett hőkezelő rendszer kialakítása szükséges. Összességében elmondható, hogy az ólomsavas akkumulátorok sok területen alkalmazhatóak, de technológiai korlátaik miatt például megújuló energiaforrások integrációjára csak korlátozottan alkalmasak.



5. ábra: Ólomsavas akkumulátor felépítése [2]

A kilencvenes évek elején kerültek kereskedelmi forgalomba az első lítium alapú akkumulátorok, térnyerésük pedig azóta is rendületlen. Manapság a legkülönbözőbb hordozható elektronikai eszközökben (laptopok, mobiltelefonok) való alkalmazás mellett egyre nagyobb szerepet kapnak az e-mobilitásban és a különféle hálózati alkalmazásokban. A katód anyagától függően a lítium ionos akkumulátorok tulajdonságai és lehetséges alkalmazásai rendkívül széles skálán mozognak. A katódot valamilyen lítium tartalmú ötvözet alkotja (például LiCoO₂, LiMnO₂, LiFePO₄), az anód pedig általában grafit. Az elektrolit anyagát jellemzően egy nemvizes, folyékony szerves oldószer keverék alkotja oldott lítium sókkal. A lítium-ionos akkumulátorcellák névleges feszültsége 3,7-4,2 V körülire tehető, ez igen magasnak számít. A korábban ismertetett technológiákkal szemben előnyt jelent a nagyobb teljesítmény- (500-2000 W/kg) és energiasűrűség (80-200 Wh/kg), a magas hatásfok (90-97%), az alacsony önkisülés (<5%/hónap), a gyors reakcióidő (<5 ms), a széles skálán mozgó üzemelési hőmérséklet (-20-60 °C közötti üzemképesség töltésnél, -40-65 °C közötti kisütésnél), az akár 10000 ciklust is elérő élettartam, valamint az alacsony karbantartási igény. A lítium-akkumulátorok legnagyobb hátránya, hogy töltés és kisütés közben rendkívül érzékenyek a hőmérsékletre; a fém-oxid

elektrodák termikusan instabilak, magasabb hőmérsékleten bomlásnak indulnak, közben oxigént és hőt felszabadítva. A nem kívánt tüzesetek, robbanások, elkerülése végett ennél a típusnál speciális monitoring rendszert alkalmaznak, amely folyamatosan vizsgálja a cellák paramétereit, és meggátolja a túltöltést és a mélykisülést.



6. ábra: Lítiumionos akkumulátorok felépítése [2]

1.2.2.2 Áramlásos-akkumulátorok

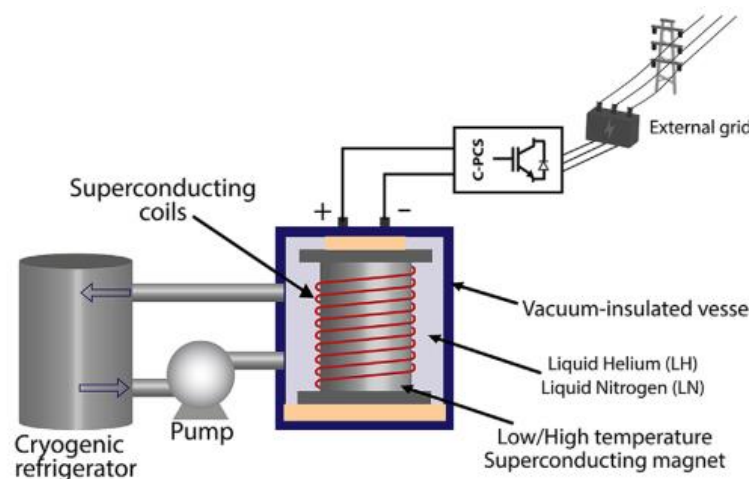
Az áramlásos akkumulátorok (flow battery) két elektrolit-oldat egyenárammal való töltésével, majd ezek kisütésével végzik a tárolási feladatokat. Az elektrolitokat egymástól elkülönített csőrendszerben áramoltatják, a két folyadék csak egy elektrokémiai cellában találkozik egymással egy mikroporózus szeparátoron (vagy ionvezető membránon) keresztül, az ilyenkor történő redoxireakciók során történik az energiaátalakítás. Ebben az esetben a hagyományos akkumulátorokhoz képest az elektrokémiai folyamatok során nem keletkeznek szilárd melléktermékek, így az ezek által okozott öregedési jelenségek sem jelentkeznek. Az áramlásos akkumulátorokban rengeteg lehetőség rejlik, hiszen az önkisülés jelensége egyáltalán nem jellemző rájuk, a mélykisüléstől nem degradálódnak, élettartamuk a szilárd elektrodák hiányában hosszú, a karbantartási költségek pedig alacsonyak. A magas beruházási költségek, illetve a technológiával kapcsolatos tapasztalatok hiányában tömeges elterjedésükre még várunk kell, az ismertetett jellemzők alapján viszont kiválóan alkalmasak lehetnek nagy volumenű, stacioner tárolási feladatok ellátására.

1.2.3 Elektromos tárolók

1.2.3.1 Ultrakapacitás

Az ultrakapacitás, vagy szuperkapacitás felépítésében nagyon hasonlít a hagyományos kondenzátorhoz, a két fegyverzet között azonban a dielektrikum helyett egy ionvezető elektrolit található, amely lehetővé teszi az ionok vándorlását az áramszedő elektrodák között. Az elektrodák anyaga általában nagy fajlagos felületű

porózus szén, az elektrolit pedig lehet valamilyen szerves, vagy vizes alapú anyag. Töltés során az elektrolitban található ionok az ellentétes polaritású elektróda felé mozdulnak el a fegyverzetek között létrejövő elektromos tér hatására. Az elektrolit és az elektróda közti vékony réteg és a nagy elektródafelület miatt a szuperkapacitás energiasűrűsége sokszorosa a hagyományos kondenzátorénak. Egy-egy cella kapacitása a többszáz, vagy akár több ezer farádost tartalmazó tartományba is elérheti. A tárolt energia az $E = \frac{CV^2}{2}$ képlettel számolható, ahol C a cella kapacitása, V pedig a cella vagy modul feszültsége. Az ultrakapacitások számos előnnyel rendelkeznek a többi energiatárolási technológiával szemben, magas hatásfokuk (85-98%) és ciklusszámuk (>10000 ciklus), nagy teljesítménysűrűségük (500-5000 W/kg), és gyors reakcióidejük (<5 ms) mellett viszont rövid töltési és kisütési idejük (maximum pár perces nagyságrend) és alacsony energiasűrűségük (0,1-5 Wh/kg) csak rövid távú alkalmazásukat teszi lehetővé. Használatuk elsősorban gépjárművekben jellemző.



7. ábra: SMES felépítése [2]

1.2.3.2 SMES

A szupravezető-mágneses energiatárolás (SMES) alapja, hogy egy szupravezető tekercsben indukálunk DC áramot, az energiát pedig az ez által keltett mágneses tér formájában tároljuk. Az SMES egy szupravezető egységből, és egy hűtőrendszerből áll. A tárolt energia nagyságát az $E = \frac{LI^2}{2}$ képlet írja le, ahol L a tekercs induktivitása, I pedig a rajta folyó áram nagysága. Az SMES rövid távú tárolásra alkalmas, működési költsége igen magas (1000-10000 USD/kWh). A szupravezető tekercs gyakorlatilag nincsen igénybevételnek kitéve, így élettartama rendkívül hosszú, hatásfoka pedig igen magas (90-95%). Gyors reakcióideje alkalmassá teszi a villamosenergia-rendszer stabilitását segítő feladatokban.

2 Lítiumion-akkumulátoros rendszerek felépítése

A dolgozat a következőkben az egyre több alkalmazási területen megjelenő lítiumion-akkumulátorokkal foglalkozik. Az alábbiakban a hálózati energiatárolás különböző funkcióinak leginkább megfelelő LiFePO_4 (LFP) és NMC akkumulátorok kerülnek előtérbe. A fejezet [3] és [4] feldolgozásával készült.

2.1 Akkumulátorcellák működése

Az akkumulátorcella legfontosabb alkotóelemei a pozitív elektród (katód), a negatív elektród (anód), illetve a két elektród közötti teret kitöltő pozitív (kation) és negatív (anion) ionokból álló közeg, az elektrolit. Amikor az akkumulátor kivezetéseire terhelést kapcsolva zárjuk az áramkört, feszültség jelentkezik a katód és az anód között, melynek hatására elektronáram indul az anód felől a terhelés által zárt áramkörön keresztül a katód felé. Az elektronvándorlás hatására az elektródok és az elektrolit közt oxidációs, illetve redukációs folyamatok indulnak meg. Az akkumulátor töltése során a katódon kationok redukálódnak (elektront vesznek fel), míg az anódon anionok oxidálódnak (elektront adnak le). Kisütéskor a leírt folyamat fordítottja játszódik le. A redoxireakciók hatására (az elektróda mentén a terhelés akkumulátorra való kapcsolásáig egyenletesen elosztott ionok elmozdulása miatt) az elektrolitban koncentrációkülönbség lép fel, amely a töltött részecskék elektródok közti áramlását idézi elő.

2.2 Cellatípusok összehasonlítása

A LiFePO_4 típusú akkumulátorok katódja vas-foszfát, anódja pedig általában grafit állapotú szén. A vas és a foszfát akkumulátor alapanyagok közti relatív gyakorisága miatt az LFP akkumulátorok nyersanyagköltsége a legtöbb lítiumos technológiánál olcsóbb, a cellák alacsony energiasűrűsége (amely az alacsony feszültségből és cellakapacitásból adódik) azonban azt jelenti, hogy egységnyi energiára vonatkoztatva a drágább típusok közé tartozik. A merev katódanyag hatására jellemző a rendkívül nagy teljesítménysűrűség és hosszú élettartam, azonban több alkalmazásban kezdik felváltani a nagyobb teljesítménysűrűségű, gyorsan fejlődő akkumulátortípusok (pl. NMC), mivel az LFP technológiai korlátait közel elérte.

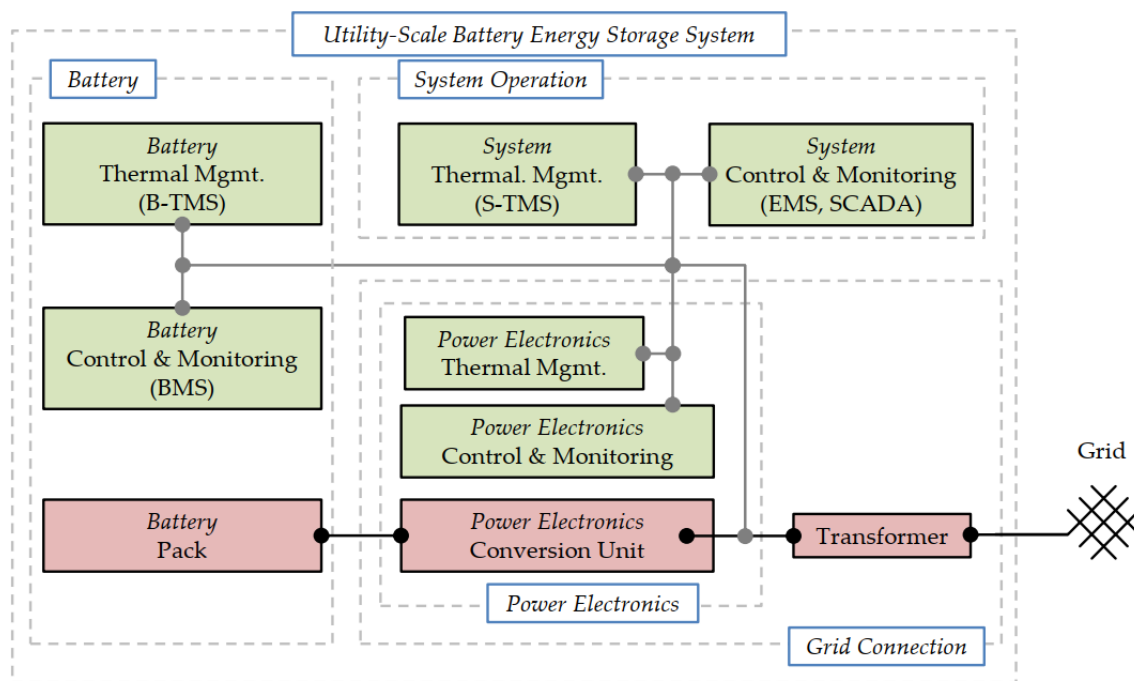
Az NMC *család* gyűjtőfogalom, a lítium mellett nikkell, kobalt és mangán ötvözete alkotja a katódot (az anód grafit állapotú szén). Az utóbbi három fém arányától függően más és más jellemzők dominánsak a cellák esetén: 1-1-1 arányú ötvözet esetén ideálisak nagyteljesítményű üzemre, magas nikkeltartalom mellett (5-3-2, 6-2-2) energiasűrűségük kiemelkedően magas. A legtöbb elektromos autó gyártó ezt az akkumulátortípust használja, ám egyre több hálózati alkalmazásban kezdik felváltani az ólomsavas, illetve LFP technológiákat. Az alábbi táblázatban néhány konkrét cellatípus paraméterei figyelhetők meg.

Parameter	Unit	LIB Cell Data-Sheet Values			
Cell Identification	-	SDI94Ah	NCR18650B	US26650FTC1	SCiB Titanate
Manufacturer	-	Samsung	Panasonic	Murata	Toshiba
Cell Chemistry	-	NMC:C	NCA:C	LFP:C	MO _x :LTO
Cell Format	-	Prismatic	Cylindrical	Cylindrical	Prismatic
Cell Capacity	Ah	94.0	3.2	3.0	20
Vol. Energy Density	Wh/L	355	676	278	177
Cont. Power Cap. (DCH/CH)	C-rate	3 C/1 C	2 C/0.5 C	6 C/1 C	8 C/>3 C
Cycle Life (80% SOH)	FEC	>5.000	320	>6.000	10.000
Voltage Range	V	2.70–4.15	2.50–4.20	2.0–3.6	1.5–2.7
Nominal Voltage	V	3.7	3.6	3.2	2.3

1. táblázat: Cellatípusok összehasonlítása [4]

2.3 Stacioner energiatároló rendszerek felépítése

Az alábbiakban részletes bemutatásra kerül a stacioner, hálózati alkalmazásban használt akkumulátoros rendszerek felépítése.



8. ábra: BESS felépítése [4]

2.3.1 Modul

Az akkumulátorcellák egymással összekapcsolódva, fiókszerű borítással ellátva *modulokba* rendeződnek. Egy-egy modulban a cellák egymással sorosan és párhuzamosan is össze lehetnek kapcsolva; soros kapcsolás esetén feszültségük, párhuzamos kapcsolás esetén pedig kapacitásuk adódik össze. A gyakorlatban általában maximum 2-3 cella párhuzamos kapcsolásával, majd ezek soros kapcsolásával adódnak a modul paraméterei. Egy-egy modul feszültsége 60-130 V között mozog. A lítiumionos technológia biztonsági kockázatainak

kiküszöbölésére egyes gyártók már a modulok szintjén is rendkívül fejlett hőtechnikai és tűzvédelmi rendszert alkalmaznak. Minden modul külön ventilátoros hűtőrendszerrel van ellátva, melyet a később részletesebben is bemutatott modul BMS (Battery Management System) irányít. Tűz esetén a hibás modulok lezárnak, gátolják annak továbbterjedését.

2.3.2 Rack

Az úgynevezett rackek leginkább egy szekrényhez hasonlíthatók. A rackeket az egymás alatt vagy mellett elhelyezkedő, egymással sorba kötött modulok, illetve a rendszer tetején található rack BMS alkotja, névleges feszültsége a modulok számától függően 500 és 1500 V közötti értéket vesz fel. A nagyobb méretű, jellemzően primer frekvenciaszabályozásra alkalmazott akkumulátortelemek villamos konténerre a rackek párhuzamos kapcsolásával éri el a szükséges kapacitást.

2.3.3 BMS

A BMS a celláktól kezdve figyeli és továbbítja a rendszer paramétereit az inverter és az irányítástechnikai berendezések felé. A modul BMS egyesével vizsgálja a modul celláinak feszültségét, hőmérsékletét, majd ezeket az adatokat egy CAN buszra felfűzve továbbítja a rack BMS felé, amely az egész rack adatait vizsgálja. A rendszer BMS a szintén CAN buszon felfűzött rack BMS-ekkel kommunikál, hogy megvédje az akkumulátorokat a rendszert veszélyeztető vezérlési módoktól. A BMS a mért paraméterek alapján meghatározza és továbbítja a rendszer SOC és SoH értékét, valamint a maximális, minimális és átlagos hőmérsékleteket, feszültségeket, áramokat.

2.3.4 Teljesítményelektronika

Az akkumulátoros rendszer DC árama és a hálózati váltóáram közti kapcsolat 4Q inverterek segítségével megvalósított. Ezek az inverterek képesek hatásos és meddő teljesítmény leadására és hálózathoz való felvételére is, ezáltal számos alkalmazási funkciót tesznek lehetővé a BESS számára (pl. meddőkompenzálás, droop control). Az inverter választásakor különösen nagy figyelmet kell fordítani az akkumulátor maximális és minimális feszültségére. Nagyobb rendszerek esetében előfordulhat, hogy a BESS rackenként külön inverterrel csatlakozik a hálózathoz, ebben az esetben előny, hogy a rack-ek egyesével szabályozhatóak, ezáltal nagyobb biztonságot jelentenek a rendszer számára, míg közös inverter és DC sín esetén a rendszer veszteségei kisebbek.

2.3.5 Hálózati csatlakozás

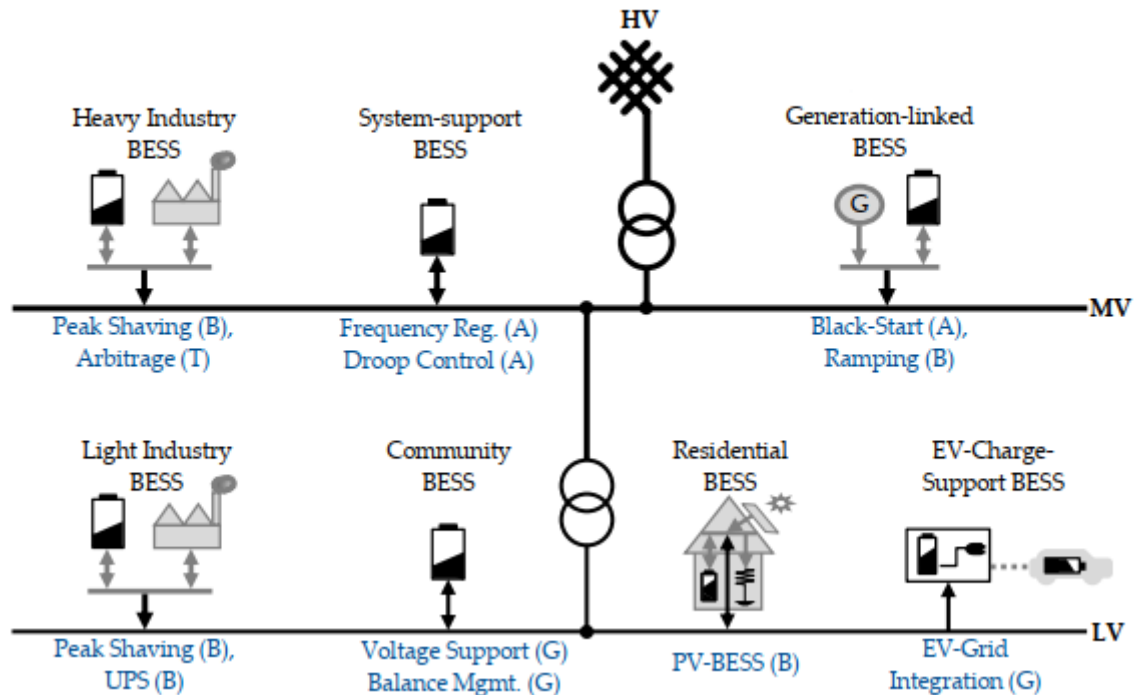
KIF hálózati csatlakozás esetén az inverter segítségével közvetlenül megoldható a 0,4 kV-ra való hálózati csatlakozás, magasabb feszültség szinteken azonban külön transzformátor szükséges, hogy az inverter által kiadott, nem szabványos váltófeszültséget a hálózati értékre emelje.

2.3.6 Irányítástechnika (EMS, SCADA)

A BESS rendszeren belül, lokálisan elhelyezett EMS (Energy Management System) vezérlő folyamatosan kommunikál az akkumulátorfelügyeleti rendszerrel, valamint az inverterrel, szabályozza azok működését. Az EMS-ben tárolt adatokat a felhasználó a SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) monitoring állomásban tudja végigkövetni, illetve innen tudja kiadni a BESS működésére vonatkozó parancsokat.

3 Akkumulátoros rendszerek hálózati alkalmazásai

Az alábbiakban [4] alapján, a teljesség igénye nélkül kerülnek bemutatásra a lítium-ion alapú akkumulátoros energiatárolók villamosenergia-rendszerben betöltött feladatai, alkalmazásai.



9. ábra: Akkumulátoros rendszerek hálózati alkalmazásai [4]

3.1 VER-támogatás

A váltóáramú villamosenergia-rendszerek megfelelő működéséhez elengedhetetlen, hogy a termelés és a fogyasztás minden időpillanatban egyensúlyban legyen egymással. Ezen egyensúly fennállását jelzi a rendszer frekvenciájának állandósága, mely az összefüggő európai villamosenergia-rendszerben 50 Hz, melytől a jelenleg hatályos jogszabályok szerint 200 mHz eltérés megengedett.

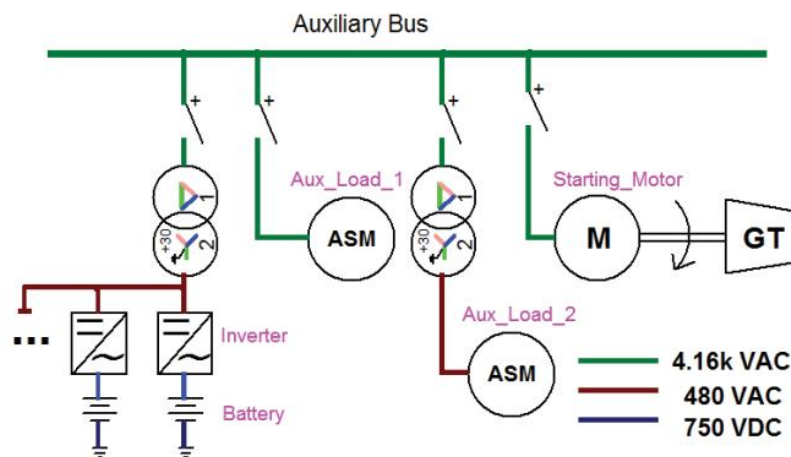
3.1.1 Frekvenciaszabályozás

A növekvő mértékű inverteres betáplálás (a rendszer inerciájának csökkenése és az ezáltal okozott fokozott frekvenciaérzékenysége miatt), valamint az időjárásfüggő megújuló erőművek termelésének fluktuációi szükségessé teszik az egyre gyorsabb rendszerszintű szabályozást. Az lítiumion-akkumulátoros energiatároló rendszerek gyors reakcióidejűek, valamint a cellák, modulok és rackek soros és párhuzamos kapcsolásával rugalmasan alakítható névleges teljesítményének köszönhetően kiválóan alkalmazhatóak ezekre a primer szabályozási feladatokra. Az akkumulátorok a szabályozás során túlermelés esetén fogyasztóként, túlfogyasztás esetén termelőként jelennek meg a hálózaton, így fel- és leszabályozási feladatokat is meg

tudnak oldani. A technológiai előnyök mellett az akkumulátoros technológiák árcsökkenése lehetővé teszi, hogy a rendszerirányító által kiírt (leginkább) primer szabályozási tendereken felvegyék a versenyt a hagyományos szabályozási tartalékokkal. 2018 őszén az ELMŰ-ÉMÁSZ csoport hasonló célokkal Soroksáron egy 10 MW-os, 6,095 MWh-s BESS rendszert helyezett üzembe, a Magyar Energetikai és Közmű-szabályozási Hivataltól Magyarországon elsőként megkapva a tárolói engedélyt.

3.1.2 Black-start

A villamosenergia-rendszer összeomlása esetén szükséges, hogy a termelő egységek egy része képes legyen a hálózatról vételezett villamos energia nélkül újraindulni, és a többi termelő generátor újraindításához is elegendő áramot előállítani. Ebben az úgynevezett black-start tevékenységben az akkumulátoros rendszerek fontos szerepet játszhatnak, hiszen az indítás során (korlátozott ideig) képesek a szinkronfrekvenciára forgatáshoz szükséges energiát biztosítani a jellemzően gázturbinás black-start erőművek számára. A ritka használat miatt fontos, hogy ezek az akkumulátorok folyamatosan üzemkészen, kellő mértékig feltöltve álljanak, így ebben az alkalmazásban a lítiumionos technológiák alacsony önkisülésük miatt előnyt élveznek.



10. ábra: Black-start rendszerfelépítése [5]

3.2 Mérőóra mögötti alkalmazás (Behind the Meter – BTM)

3.2.1 Time-shifting (PV-BESS)

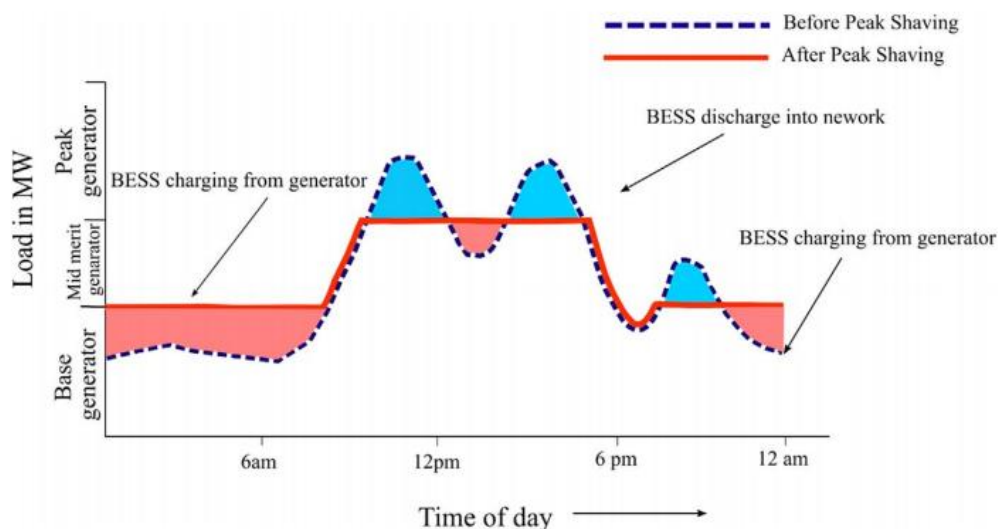
Egyre gyakrabban tárgyalt témakör a háztartási méretű kiserőművek (HMKE) akkumulátoros rendszer kiegészítésével való alkalmazása (PV-BESS). Az energiatárolóval lehetőség nyílik a volatilis termelésű, jellemzően napelemes rendszerrel megtermelt energia napon belüli allokálására, ezzel csökkentve a hálózatba való visszatáplálás mértékét. Ezzel a megoldással kiküszöbölhetőek a kiefeszültségű elosztóhálózatra való termelés olyan negatív hatásai, mint a fordított teljesítményáramlás, vagy a csatlakozási ponton való feszültség megemelkedése. A rohamosan terjedő lítium-ionos technológia a korábban népszerű ólomsavas rendszerekhez képest hosszabb várható élettartammal, magasabb

ciklusszámmal, jobb teljesítmény- és energiasűrűséggel rendelkezik, ez segítheti a PV-BESS rendszerek elterjedését. A PV-BESS rendszerek beruházási költségeinek megtérülése csak olyan szabályozási környezetben lehetséges, amelyben a HMKE által megtermelt villamos energia átvételi ára jóval alacsonyabb a lakossági árnál, hiszen ebben az esetben a tárolással kiküszöbölhetőek az árbeli különbségek.

Magyarországon a HMKE (50 kVA csatlakozási teljesítmény alatti) rendszerekre éves szaldóelszámolás vonatkozik, ami annyit jelent, hogy amíg a termelés mértéke nem haladja meg a fogyasztást az elszámolási időszakban, a villamosenergia-kereskedő a betáplált energiát a teljes végfogyasztási áron vásárolja meg. Ellenkező esetben a rendszerhasználati díj levonásával, a lakossági ~38 Ft/kWh körüli ár helyett csak nagyjából 15 Ft/kWh-t fizet. A HMKE-k tervezésénél célszerű tehát a háztartás éves fogyasztását célszámként venni a rendszer méretezésénél.

3.2.2 Peak-shaving

Az akkumulátoros energiatárolók völgyidőszakban való betárolásával, majd csúcsidőszakban való kisütésével a napi fogyasztási csúcsok csökkenthetők. Az úgynevezett peak-shaving funkció alkalmazásával valós idejű villamosenergia-piac esetén a lakossági fogyasztók számára is lehetőség nyílik a hálózathoz vételezett energia költségeinek csökkentésére, a legnagyobb gazdasági potenciál azonban az ipari fogyasztók körében jelentkezik, hiszen esetükben a lekötött teljesítmény mellett az előre megadott csúcspotasztás után is fizetni kell (a megadott érték túllépése esetén pedig büntetésben részesülnek).



11. ábra: Peak-shaving rendszer működése [6]

3.2.3 UPS

A szünetmentes ellátás (UPS) az egyik legrégebb óta alkalmazott akkumulátoros funkció. Azon kritikus fogyasztók (például kórházi berendezések, szerverszobák, biztonságtechnikai eszközök) esetében, melyek folyamatos villamos ellátást igényelnek, a hálózati csatlakozás nem közvetlenül van megoldva: egy

akkumulátoros rendszeren keresztül vételeznek a betáplálási pontról. Hálózati kimaradás, üzemzavar esetén az üzemi állapotok visszaálltáig a fogyasztót a tároló rendszer látja el. Az UPS gazdasági értékelése nehéz, hiszen profit nem származik belőle, egy-egy üzemzavar azonban milliárdos károkat, adatvesztést okozhat, emberi életekbe is kerülhet. A lítiumion-akkumulátorok megbízhatósága a korábban is alkalmazott ólomsavas rendszerekhez hasonló, karbantartási költségei azonban alacsonyabbak, így a jövőben ebben az alkalmazásban is nagyobb szerephez juthatnak.

3.2.4 Teljesítmény kiegyenlítés (Ramping control)

A volatilis termelésű erőművekhez (jellemzően szélturbinák és PV rendszerek) telepített akkumulátorok segíthetnek a generált teljesítményfluktuációk kiegyenlítésében. A *ramping* segítségével jelentősen javítható a menetrendezés pontossága és a hálózatba táplált energia minősége.

3.3 Kereskedelmi alkalmazás

A villamosenergia-piacon – ahogy minden szabadpiacon – a kereslet és a kínálat határozza meg az árakat. Az energiatárolók gazdaságos működéséhez (amennyiben alkalmazásukkal egyéb megtakarítási lehetőségekre nincsen lehetőség) szükséges, hogy a tárolási veszteségeket a villamosenergia-ár fluktuációinak kihasználásával fedezzék.

3.3.1 Arbitrázs

Az elmúlt évtizedek villamosenergia-rendszereiben a fogyasztásra jellemző nappali csúcsok, valamint az éjszaka is stabilan, olcsón termelő zsinórerőművek hatására olyan piaci minta alakult ki, melyet az éjszakai betárolással és nappali kisütésekkel kiválóan ki tudtak használni a szivattyús tározós erőművek. A naperőművek rohamos terjedésével és a fogyasztói szokások megváltoztatásával (pl. demand side management – DSM) azonban ezek a trendek is változni látszanak; a megszokott, napszak szintű árváltozásokat egy sokkal nehezebben kiszámítható, gyorsabban változó piac váltja fel. Ebben a gazdasági környezetben a lassú reakcióidejű SZET-ek helyett sokkal profitábilisabb megoldást jelentenek a lítium-ion akkumulátorok.

3.4 Minőségi energiaellátás

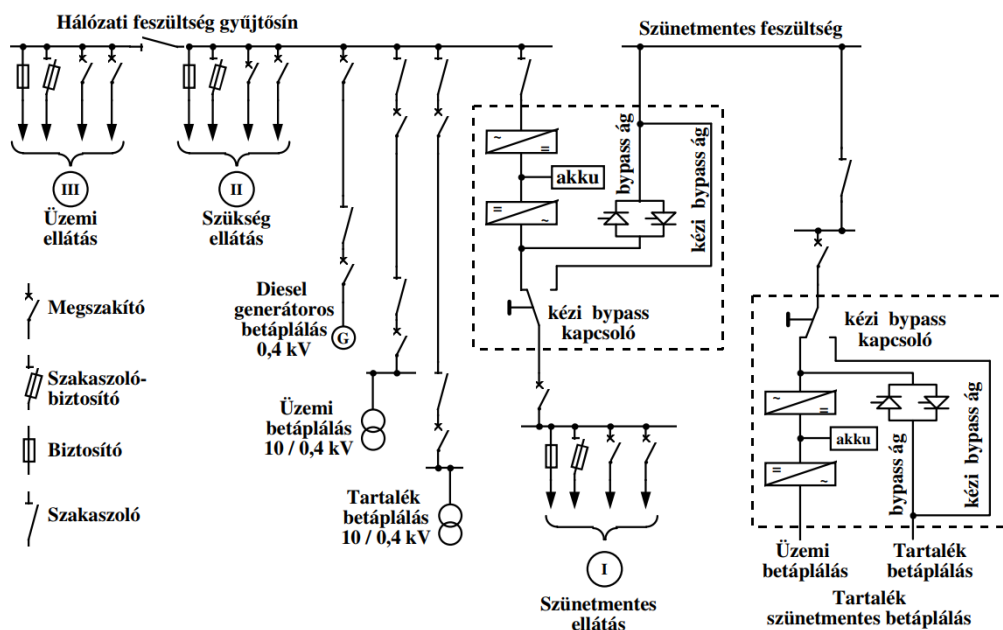
A villamosenergia-rendszernek minden pillanatban ki kell tudnia elégíteni a fogyasztók igényeit, ennek megfelelően új csatlakozási igények esetén sokszor hálózatfejlesztés, -bővítés szükséges ahhoz, hogy rendelkezésre álljon a kellő kapacitás. Ezek a beruházások igen költségesek, hiszen sokszor vezeték-, vagy akár transzformátorcserével, új vonalak, betáplálási pontok kiépítésével járnak együtt. A fogyasztóknak szolgáltatott villamos energia feszültségminőségének javítására telepített energiatárolók sok esetben segíthetnek ezen hálózatfejlesztési költségek megspórolásában.

4 Akkumulátoros rendszerek iparvállalati alkalmazása

4.1 UPS

4.1.1 A rendszer felépítése

Napjainkban a leggyakrabban az alábbi ábrán látható összeállításban megoldott a fogyasztók villamosenergia-ellátása. A fogyasztókat három csoportba sorolhatjuk aszerint, hogy egy esetleges üzemzavar esetén milyen hosszú kimaradást bírnak elviselni. A szünetmentes ellátást igénylő fogyasztók gyakorlatilag 0 s kiesési időt tolerálnak, a szükség ellátást igénylő fogyasztók nagyjából 1 perces kieséseket is elviselnek, a normál üzemi fogyasztók kiesési időtartamára pedig nincs előírás. A legtöbb esetben a szünetmentes ellátást igénylő fogyasztók külön, független betáplálási ponttal rendelkeznek, míg az üzemi és szükség ellátás közös gyűjtősínről történik. A szünetmentes fogyasztóhoz az alábbi ábra szerint az UPS-en keresztül jut el a villamos energia: a rendszer a váltakozó feszültséget először egyenárammá alakítja, ezzel feltöltve tartja az akkumulátort, majd egy inverter segítségével visszaalakítja váltóárammá, amivel ellátja a fogyasztót. Hálózati kimaradás, üzemzavar esetén egy kapcsoló segítségével az UPS lecsatlakozik a hálózatról, a fogyasztót szigetüzemben látja el. Az UPS rendszer így az elosztó- és átviteli hálózatokon történő zárlatok, illetve a hirtelen terhelésváltozások által okozott feszültség-ingadozások ellen is védi a fogyasztót. [7,8]



12. ábra: UPS rendszer kialakítása nagyfogyasztók esetén [8]

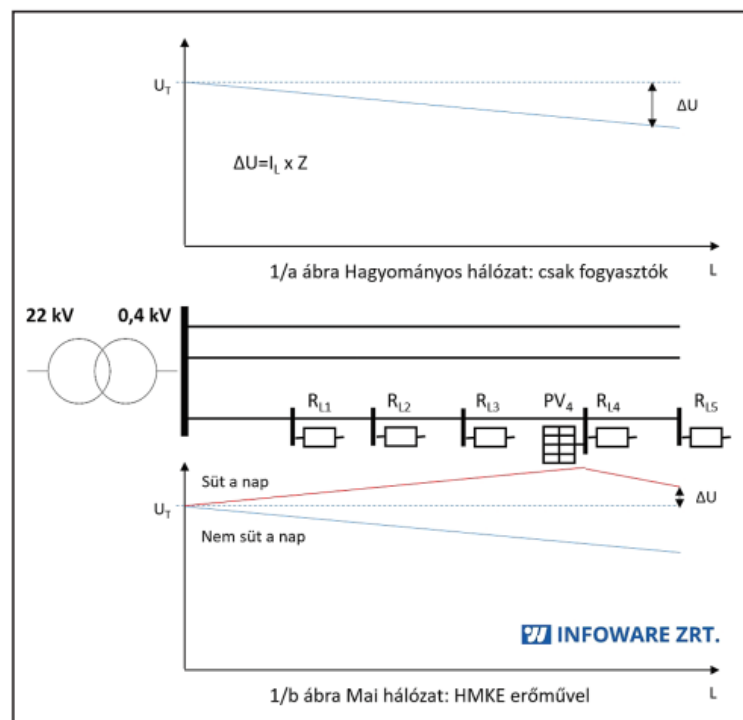
4.1.2 Lítiumion akkumulátoros UPS rendszerek értékelése

Ahogy az a korábbiakban már elhangzott, az UPS rendszerek gazdasági értékelése rendkívül összetett. A digitalizáció térnyerésével egyre nagyobb igény merült fel a folyamatos, biztonságos és minőségi energiaellátásra. A távközlésben, közlekedésben, gyárakban, kórházakban elengedhetetlen egyes elektromos

berendezések folytonos működése, az esetleges üzemzavar felbecsülhetetlen károkat jelentene. Az UPS létjogosultsága tehát megkérdőjelezhetetlen, a megfelelő rendszer (és energiatároló) kiválasztásával azonban jelentős megtakarítások érhetőek el. A korábban jellemzően ólomsavas technológiát alkalmazó UPS rendszereket hamarosan felválthatják a lítiumion akkumulátorok. A savas technológiákhoz képest kisebb helyigényű, hosszabb élettartamú akkumulátorok karbantartási költségei alacsonyabbak, környezetszennyező hatásuk kisebb. Az utóbbi években megfigyelhető rohamos árcsökkenés azt jelenti, hogy a közeljövőben piaci alapon is kiszoríthatják az egyéb, tradicionális technológiákat. [4,9]

4.2 Feszültség szabályozás

Hazánkban is egyre gyakoribb, hogy az ipari létesítmények tetejére napelemet telepítenek, hogy csökkentsék a hálózatról vételezett villamos energiára fordítandó költségeket. Ezek a napelemek különösen nagy problémát okozhatnak a kisméretű elosztóhálózaton. A sugarasan kiépített elosztóhálózat betáplálási pontjától a vonal végéig a hálózat impedanciáján feszültségesés jelentkezik. Ahhoz, hogy az elosztói engedélyesek a vonal végén található fogyasztókat is szabványos feszültségszinten tartsák, sokszor kénytelenek a betáplálási ponton feljebb csapolni a transzformátort. A napelemes termelés hatására a PV rendszer csatlakozási pontján megemelkedik a hálózati feszültség, ami a déli órákban – amikor a termelés a legnagyobb mértékű – a fogyasztás hiánya, valamint a felcsapolt KIF oldali transzformátorfeszültség miatt túllépheti a szabványos értékeket. Ilyenkor a feszültségvédelem lekapcsolja PV invertert a hálózatról, amely termelés kiesést és komoly megtérülési problémákat okozhat. [10]



13. ábra: Feszültségviszonyok a KIF elosztóhálózaton [10]

A hálózat feszültség-ingadozásait lekövetni képes lítiumion-akkumulátoros rendszerek telepítésével könnyedén áthidalható a kialakult probléma. A rendszer kialakítás szempontjából lehet BTM, ez lehetővé teszi az ipari fogyasztó számára az egyéb funkciókban való alkalmazást is (peak-shaving, UPS) és az ezekkel járó potenciális költségcsökkentést. A BESS telepítését végezheti a DSO is, ilyenkor azonban az arbitrázs lehetőségek kihasználatlanok maradnak, hiszen a jelenleg hatályos Európai Uniói irányelvek szerint a DSO piaci alapon nem tulajdonolhat, fejleszthet, irányíthat és üzemeltethet energiatárolót. [10,11]

4.3 Meddőkompenzálás

A legtöbb ipari fogyasztó esetében elengedhetetlen a különböző forgógépek, transzformátorok üzemeltetése. Az ezen gépek működéséhez szükséges mágneses terek gerjesztéséhez a fogyasztó a hálózathoz inaktív energiát vételez, melynek hatására áramfelvétele megnő, növelve ezzel a hálózat soros elemein eső veszteségeket. Az áramszolgáltatók ezen veszteségek elkerülése érdekében a hálózathoz vételezett inaktív energia mennyiségét korlátozzák, a megszabott határok túllépést büntetik. Az ipari fogyasztók inaktív áramfelvételének kompenzálása lokálisan megoldható, ezzel elkerülve a mögöttes hálózat felesleges terhelését. Az ipari fogyasztók meddőkompenzálása tehát a fogyasztó és az elosztói engedélyes közös érdeke.

A hagyományos fázisjavító berendezések (torló fojtós fázisjavító, tirisztor kapcsolású fázisjavítók, stb.) mellett a 4Q inverterek $\cos\phi$ -szabályozásával az akkumulátoros rendszerek előtt is nyitott a lehetőség a meddőkompenzálásra. Külön erre az alkalmazásra értelem szerűen nem éri meg akkumulátoros rendszert telepíteni, azonban UPS és feszültség szabályozó funkciókkal ellátott rendszerek algoritmusainak fázisjavítással való bővítése lehetővé teszi a fogyasztó minőségi energiaellátását. [12]

Az akkumulátoros rendszerek meddőkompenzálásra való felhasználásáról részletesebben [13] értekezik.

5 A peak-shaving rendszer bemutatása

Az elosztói engedélyesek kötelessége, hogy a hálózatra csatlakoztatott fogyasztók igényeit minden pillanatban ki tudják elégíteni. A nagyfogyasztók maximális terhelései általában naponta csak néhány alkalommal és rövid ideig fordulnak elő, így a hálózatot jelentősen túl kell méretezni az ipari fogyasztók maximális teljesítményigényeinek egyidejűségéhez képest. A hálózatüzemeltetők a nagyfogyasztókkal a magas csúcsok lehetőség szerinti elkerülésére való ösztönzése végett a lekötött teljesítmény mellett általában havi vagy éves szinten a maximális teljesítményigényt is megfizettetik (kapacitásdíj). Az ipari fogyasztó számára a peak-shaving BESS rendszer kiépítésével lehetőség nyílik ezen csúcsok levágására, ezzel az éves/havi kapacitásdíj csökkentése mellett arbitrázslehetőséget teremtve, hiszen a levágáshoz szükséges energiát a völgyidőszakokban olcsóbban vételezhetik, mint amennyiért a csúcsok idején a hálózatból tudnák. A peak-shaving rendszer kiépítése az elosztói engedélyes érdeke is lehet, hiszen a fogyasztó maximális teljesítményének csökkentésével hálózatfejlesztési költségeket spórolhat meg, igaz, így eszik a kapacitásdíjból származó bevételektől. A beruházás leginkább ipari üzemek létesítésénél, bővítésekor érheti meg, különösen olyan esetben, ha (például helyhiány miatt) hálózatfejlesztésre nincs lehetőség, vagy csak nagyon drágán megoldható. Ezekben az esetekben a hálózat üzemeltető érdeke lehet anyagilag is támogatni a beruházást.

Az alábbiakban az Infoware Zrt. által szolgáltatott két ipari üzem fogyasztási profilja segítségével kerül bemutatásra a lítiumionos peak-shaving BESS rendszerek méretezése, gazdasági értékelése, működése.

5.1 A fogyasztási adatsorok kiértékelése

Az Infoware Zrt. két fogyasztási profilt bocsátott rendelkezésemre: a saját telepének fogyasztási adatait 2017. szeptember 11. és 2018. szeptember 10. között, valamint egy nevén nem nevezett, nagyobb méretű ipari fogyasztó adatait 2018. január 1. és 2018. október 1. között. A nagyfogyasztó (a továbbiakban NF) egész évre vonatkozó adatait lineáris interpolációval állapítottam meg. Az adatsorok fontosabb jellemzőit az alábbi táblázat tartalmazza:

	Infoware	Nagyfogyasztó
$P_{max,ig}$	60 kW	1 120 kW
P_{max}	48,49 kW	1 061 kW
$E_{éves}$	118 011 kWh	4 526 740 kWh
$E_{napj,átl}$	323 kWh	12 404 kWh
LF_{max}	74,4%	89,5%
$LF_{átl}$	52,1%	76,9%
LF_{min}	28,5%	31,9%

2. táblázat: Az összehasonlítandó fogyasztók fontosabb adatai

$P_{max,ig}$ az éves igényelt maximális teljesítmény, P_{max} a valós éves maximális teljesítmény, $E_{éves}$ az év energiafogyasztása, $E_{napi,átl}$ az átlagos napi energiafelhasználás, LF pedig az úgynevezett teljesítménytényező (load factor), amely az alábbi képlet alapján került meghatározásra minden napra külön:

$$LF (\%) = \frac{P_{átl}}{P_{max}} \quad (3)$$

ahol $P_{átl}$ a napi átlagos, P_{max} pedig a napi maximális teljesítményigény. A teljesítménytényező nagysága jelzi a villamos energia felhasználásának hatékonyságát (alacsony LF esetén kevésbé, magasabb LF esetén hatékonyabb a fogyasztó). Peak-shaving BESS rendszer telepítésével LF növelhető, hiszen a csúcsok levágásával a fogyasztói profil szélsőértékei a BESS nélküli esethez képest közelebb kerülnek az átlagteljesítményhez. A táblázatban olvasható adatok alapján várható eredmény, hogy az Infoware fogyasztási profilja esetén jobb lehetőség nyílik a peak-shaving funkcióra, NF csúcsai csak nagyobb energiáról kapacitás beépítésével vágathatók le. [6]

5.2 Az ipari fogyasztók villamosenergia-árának meghatározása

Mivel a fogyasztási adatsorokon kívül semmilyen információ nem állt rendelkezésemre, a fogyasztók által vételezett villamosenergia-árakat egy általam választott kereskedő tarifáival vettem figyelembe. A 2007. évi LXXXVI. törvény (VET) alapján a lakossági fogyasztók mellett a kiszervezésen vételező, összes felhasználási helyük tekintetében 3x63 A-nél nem nagyobb csatlakozási teljesítményű felhasználók vehetnek részt egyetemes szolgáltatásban. [14]

Az Infoware telephelye ugyan kiszervezésen csatlakozik a hálózathoz, de csatlakozási teljesítménye meghaladja a 3x63 A-es határértéket, így szabadpiaci árakon vételez energiát. NF esetében a hálózati csatlakozás középfeszültségű. A választás mindkét fogyasztó esetén az E.ON Energiakereskedelmi Kft. tarifacsomagjaira esett: a dolgozat az Infoware Zrt. esetén az E.ON Mix (KIF csatlakozás esetén ajánlott), a NF esetén pedig az E.ON Medium (KÖF csatlakozás esetén ajánlott) csomagot veszi alapul a fogyasztók villamosenergia-költségeinek számításánál, figyelmen kívül hagyva a meddőenergia díjat. [15]

	E.ON Mix	E.ON Medium
$C_{csúcs}$	57,36 Ft/kWh	51,12 Ft/kWh
$C_{völgy}$	34,56 Ft/kWh	27,48 Ft/kWh
C_{kap}	7 788 Ft/kW/év	5 028 Ft/kW/év

3. táblázat: Az E.ON tarifacsomagjaiban ajánlott árak [15]

Az éves fogyasztási profilok segítségével meghatározható a két fogyasztó éves kiadása:

	Infoware	Nagyfogyasztó
C_{fogy}	5 451 717 Ft	197 198 722 Ft
C_p	467 280 Ft	5 631 360 Ft

5.3 A tervezett BESS rendszer felépítése és költségei

Az alábbiakban a figyelembe vett peak-shaving rendszer műszaki paramétereit, élettartamának vizsgálata, illetve költségei kerülnek bemutatásra.

5.3.1 Rendszer paraméterek

A peak-shaving alkalmazáshoz a Samsung SDI által gyártott NMC akkumulátormodulok kerültek kiválasztásra. A gyártó által javasolt rendszerek közül az alkalmazáshoz leginkább illő, Medium Platform (M2-M076) modulok paramétereit az alábbi táblázat tartalmazza:

Samsung SDI M2-M076 modul	
K_n	94 Ah
E_{modul}	7,61 kWh
$U_{n,min}$	70,4 V
$U_{n,max}$	91,3 V
Tömeg	55 kg
Ciklusszám	6000 db
Élettartam	15 év

4. táblázat: A modellhez használt akkumulátormodul adatai

A rendszer egyéb elemei esetében (inverter, BMS, irányítástechnika stb.) nem vettem konkrét termékeket figyelembe.

5.3.2 Költségszámítás

A kiépítendő rendszer beruházási költségeit az alábbi egyenlet tartalmazza:

$$C_0 = C_{fix} + C_{bat,var} \cdot E_{bat} + C_{inv,var} \cdot P_{inv} \quad (4)$$

ahol C_{fix} a rendszer kialakításához szükséges költségeket (hőkezelő rendszer, hálózati csatlakozás, stb.), $C_{bat,var}$ az akkumulátorok egységköltségét, E_{bat} az akkumulátor kapacitását, $C_{inv,var}$ a teljesítményelektronika egységköltségét, P_{inv} pedig az inverter teljesítményét jelzi. A számításokhoz [17] és [18] által prezentált adatokat használtam fel, ezeket az alábbi táblázat tartalmazza:

C_{fix}	190 000 Ft
$C_{batt,var}$	186 875 Ft/kWh
$C_{inv,var}$	58 500 Ft/kW
r	2%
DOD	75%
η	90%

5. táblázat: A vizsgált akkumulátoros rendszer költség számításához felhasznált paraméterei [17,18]

Lítiumionos akkumulátorok esetében az üzem során a minimális SOC megengedett értéke 20%, ez alatt mélykisülés következik be, amely rohamosan gyorsítja a rendszer degradációját. Ennek elkerülése végett a működés során a megengedett maximális DOD értéket (a biztonság kedvéért túlméretezve a rendszert) 75%-ra vettem. NMC akkumulátorok esetén a karbantartási költségek alacsonyok, így ezeket elhanyagoltam. Nem vettem figyelembe továbbá a rendszer degradációját, valamint önkisülését sem. A kamatláb (r) 2%, a teljes rendszer tárolási hatásfoka 90%.

A peak-shaving által évente megtakarítható költség az éves kapacitásdíj csúcsok levágása általi csökkentéséből, valamint a betározáshoz a csúcsidőszak helyett a völgyidőszakban vételezett (feltételezve, hogy az akkumulátorokat ilyenkor töltik) villamos energia alacsonyabb árából számolható:

$$C_{megt} = P_{PS} \cdot C_{kap} + E_{PS} \cdot C_{csúcs} - E_{tölt} \cdot C_{völgy} \quad (5)$$

ahol P_{PS} a csúcsból maximálisan levágható teljesítmény, E_{PS} a csúcsok levágásához szükséges energiamennyiség, $E_{tölt}$ pedig a töltéshez szükséges energiamennyiség. A következő fejezetben ismertetett méretezési algoritmus célja a lehető leggyorsabban megtérülő rendszer kiválasztása volt, ehhez a beruházás nettó jelenértékét vizsgáltam:

$$NPV = \sum_{i=1}^{clt} \frac{C_{megt}}{(1+r)^i} - C_0 \quad (6)$$

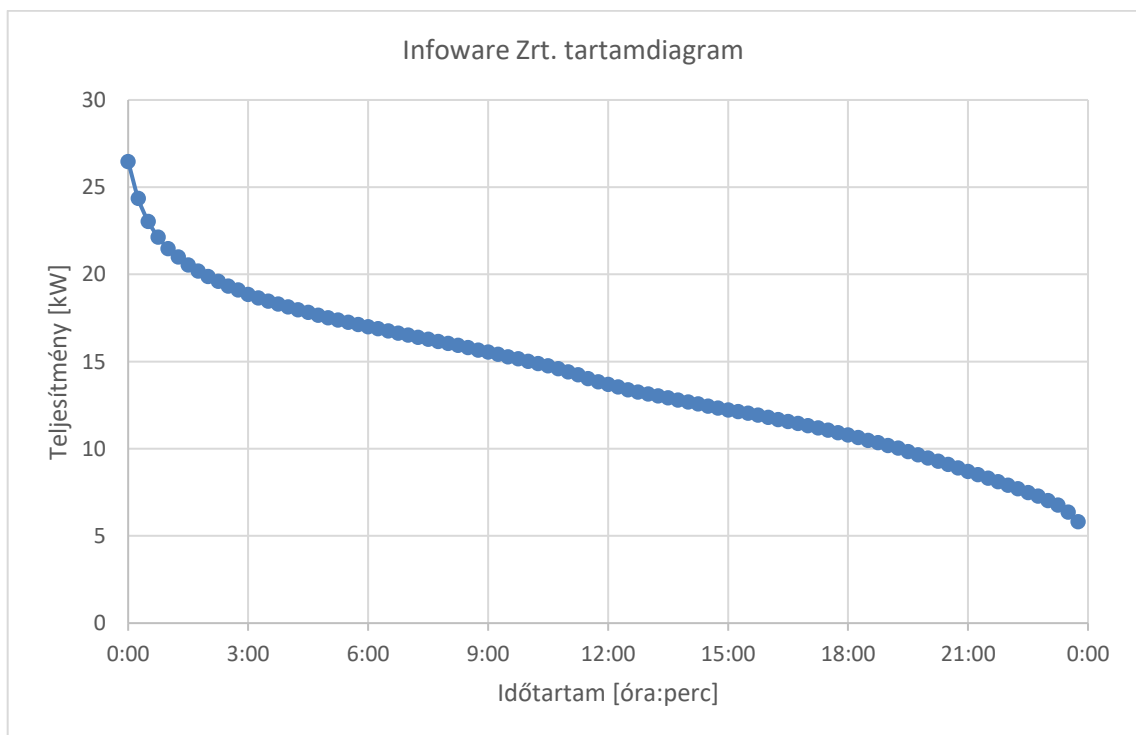
ahol clt a rendszer élettartama (15 év).

5.4 A peak-shaving rendszer méretezésének ismertetése

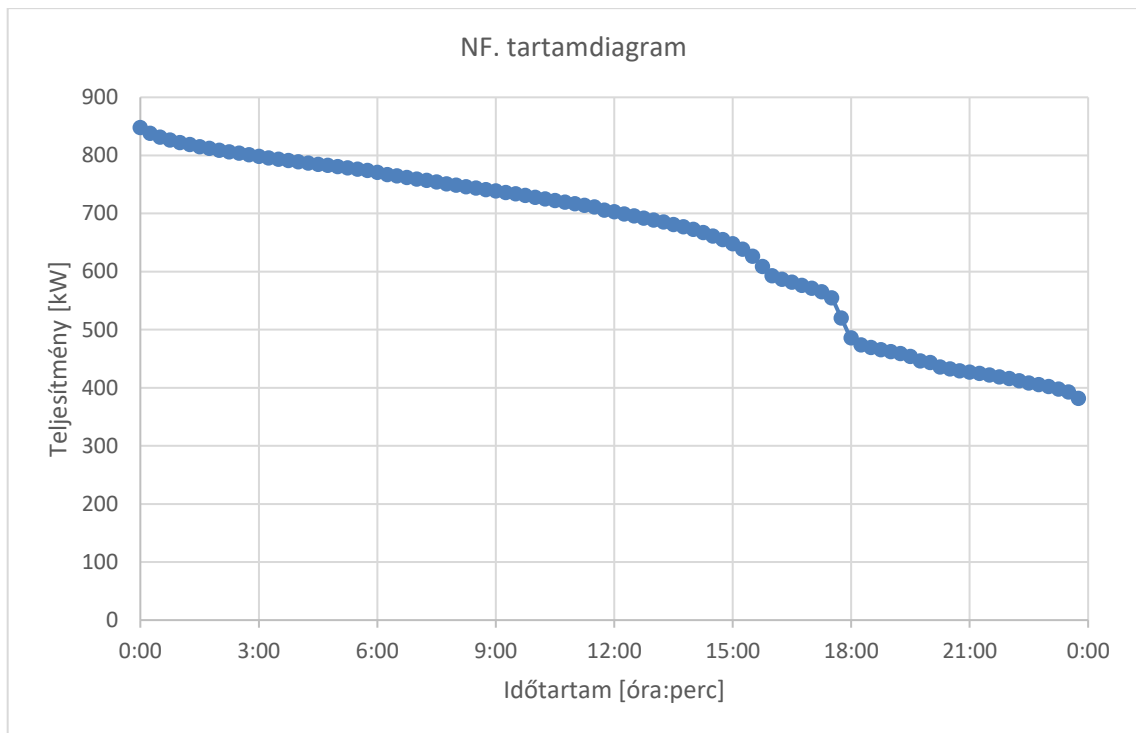
A méretezési algoritmust saját magam által készített excel makrók segítségével hoztam létre [17] alapján.

5.4.1 P_{inv} - E_{bat} meghatározása

A méretezés első lépése a funkcióhoz tartozó inverterteljesítmény és akkumulátorkapacitás összefüggésének meghatározása, ezt a kapott fogyasztói adatsorok alapján, empirikus úton végeztem el. A cél egy általános napi jelleggörbe létrehozása volt, amely azokat a napokat jellemzi, amelyek során szükség lehet peak-shaving-re. Ipari fogyasztók esetén a teljesítményigény a hétvégén jelentősen kisebb a hétköznapi értékeknél, ennek megfelelően a méretezéshez csak az adatsorok hétköznapi fogyasztását használtam fel. Mivel mindkét fogyasztó esetében egymástól jelentősen eltérő időpontokban jelentkeznek a napi csúcsok, nem célszerű az adatsorok negyedórás adatainak átlagolása. Ehelyett minden hétköznapra létrehoztam egy úgynevezett tartamdiagramot (a negyedórás bontású fogyasztási adatokat csökkenő sorba rendeztem), majd ezeket átlagoltam. Az alábbi diagramok mutatják a kapott tartamgörbéket:



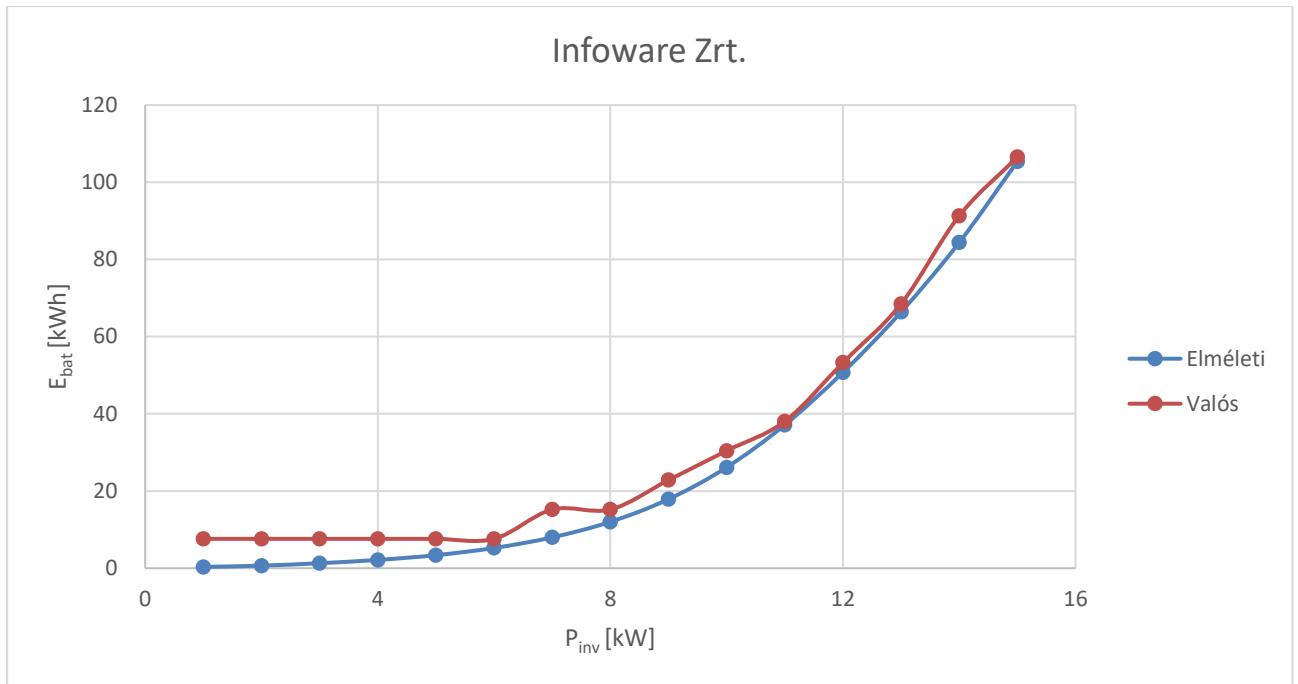
14. ábra: Az Infoware Zrt. hétköznapi fogyasztásának tartamdiagramja



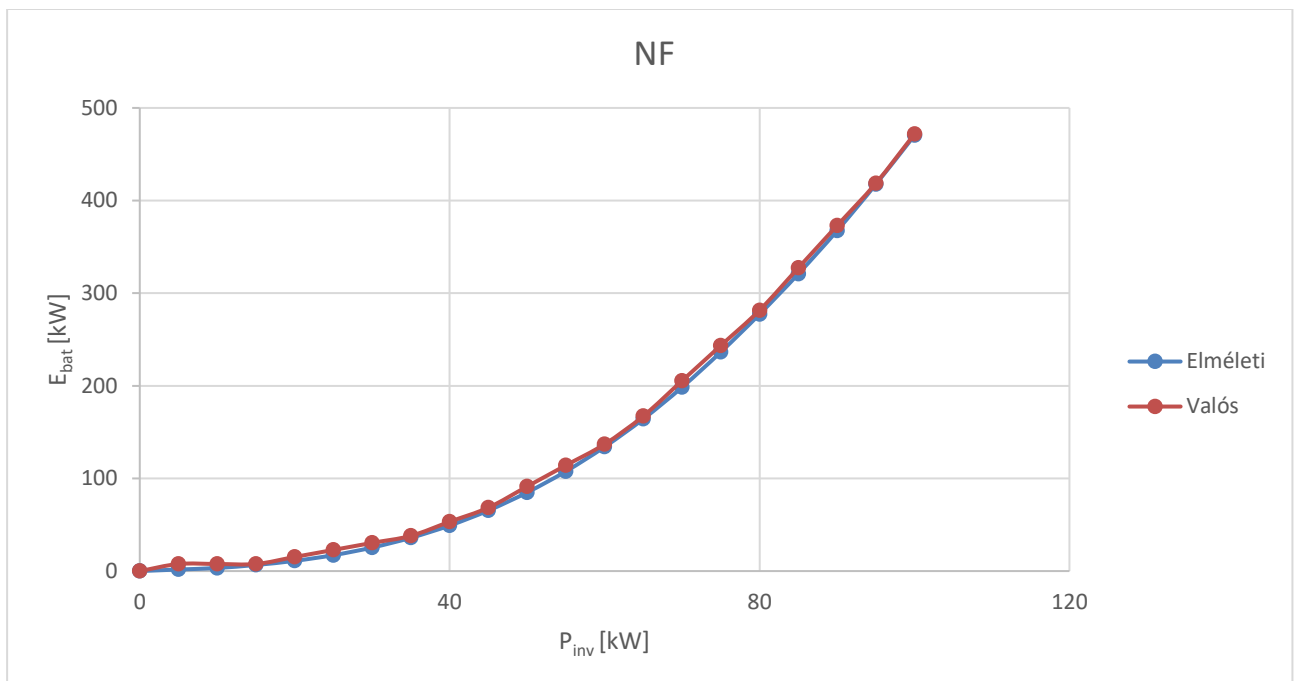
15.ábra: A nagyobb ipari fogyasztó hétköznapi fogyasztásának tartamdiagramja

A kapott tartamdiagramok alapján látható, amit már a teljesítménytényezők alapján is várható volt: míg az Infoware esetében rövid idejű, viszonylag magas csúcsok vannak, NF esetében ezek laposak, idejük hosszabb.

Az excel makró a tartamdiagram segítségével 1 kW-os kezdeti inverterteljesítménytől $P_{max} - P_{\text{átl}}$ értékig meghatározza, hogy hány kWh villamosenergia eltárolása szükséges az adott teljesítménycsúcs levágásához. A méretezési algoritmus meghatározza, hogy az adott csúcs által levágott terület mekkora, majd ezt a DOD értékkel leosztva a korábban említett mélykisülés ellen védekezve túlméretezi a szükséges kapacitást. A kapacitásértékek esetében beszámításra kerül, hogy konkrét akkumulátormodulokra tervezzük a rendszert: a valóságban minden esetben a választott modul kapacitásának (7,61 kWh) egész számú többszöröse lehet a rendszer kapacitása, így a számolt elméleti értékeket helyett a hozzájuk legközelebb eső, de náluk nagyobb rendszerméretet kell figyelembe venni.



16. ábra: Inverterteljesítmény-akkumulátorkapacitás jelleggörbe az Infoware Zrt. tartamdiagramjára létrehozva



17. ábra: . ábra: Inverterteljesítmény-akkumulátorkapacitás jelleggörbe a nagyfogyasztó tartamdiagramjára

5.4.2 A küszöbteljesítmények meghatározása

A peak-shaving funkció paramétereinek meghatározását egy külön makró segítségével végeztem el. A számolási algoritmus bemeneti paraméterei az előzőekben meghatározott inverterteljesítmény és BESS kapacitás. A számítás első lépése a felső levágási küszöbteljesítmény, P_{UTh} meghatározása volt, melynek kezdeti értékének a profil (tartamdiagram) maximális teljesítményigényét vettem. A program addig csökkenti

P_{UTh} értékét, amíg a $P_{max} - P_{UTh}$ érték el nem éri az inverter maximális teljesítményét, vagy a csúcs levágásához szükséges energia meg nem haladja a BESS maximális kapacitását. Ezek után az alsó küszöbtejesítmény, P_{LTh} meghatározása következett, ennek kezdeti értéke a minimális teljesítményigény lett. Ezt úgy kell megválasztani, hogy a P_{LTh} és a fogyasztói profil közé eső terület (az akkumulátorba töltött energia) kiegyenlítse a peak-shavinghez szükséges energia mennyiségét. A számítás során figyelembe lett véve a rendszer hatásfoka, így a két terület nem egyenlő, $E_{PS} = E_{tölt} \cdot \eta$. Ezzel a módszerrel bármely nap fogyasztói profilja alapján meghatározható az aznapi maximálisan levágható csúcs nagysága.

Egyes esetekben (ha egy-egy pontban kiugróan alacsony a teljesítményigény) előfordulhat, hogy a töltéshez nagyobb inverterteljesítmény szükséges, mint a levágáshoz, ezekre az esetekre korrekciót alkalmaz a megírt program: a töltéshez és peak-shavinghez szükséges energiaegyensúly fenntartása mellett kis lépésekben addig növeli P_{UTh} és csökkenti P_{LTh} értékét, míg a maximális töltési teljesítmény az inverter meghatározott teljesítménye alá nem kerül.

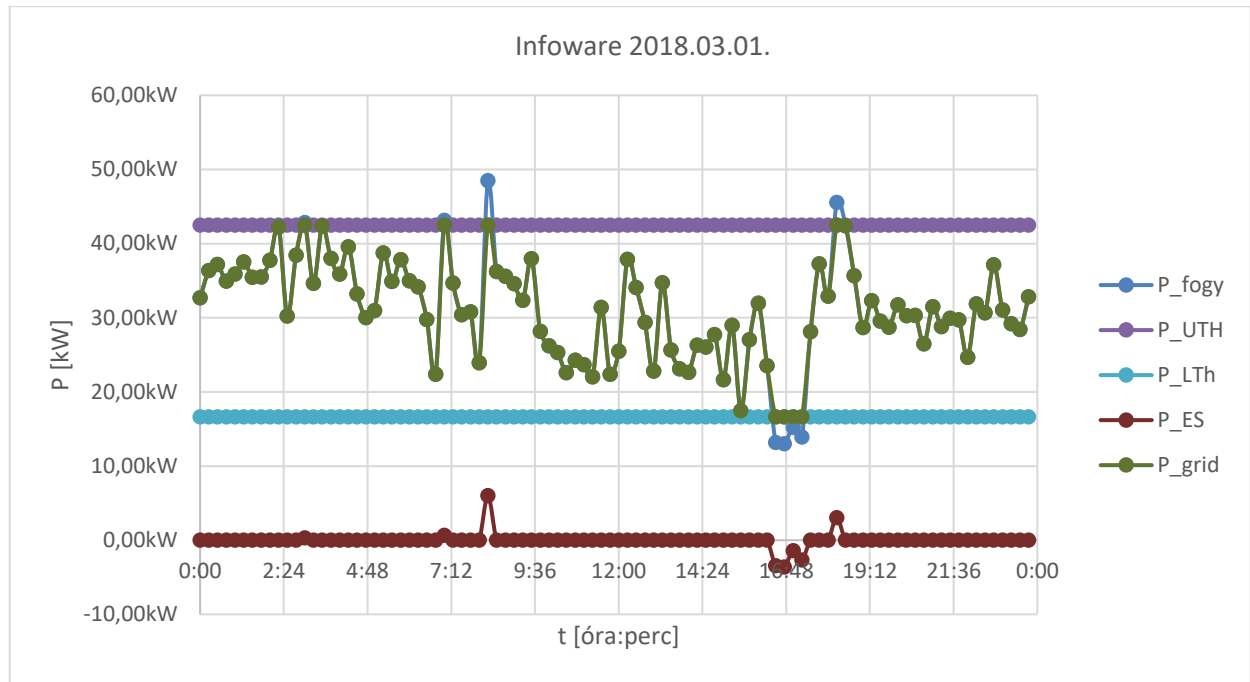
A program ezek után (5) és (6) alapján meghatározza a kialakított rendszerhez tartozó NPV értéket. Ehhez az alábbi feltételezésekkel éltem:

- A BESS minden, a fogyasztó által újonnan leadott maximális teljesítmény feletti csúcsot képes levágni az inverter maximális teljesítményével
- Az átlagos napi tartamdiagram alapján meghatározott töltési és kisütési energiamennyiségek az év minden hétköznapjára megegyeznek, vagyis éves szinten a tartamdiagram alapján számolt értékek 261-szeresei alkotják az akkumulátor által felvett és leadott energiát (a modellben az év 52 hétvégéjén nem történik peak-shaving).

A program egy for ciklus segítségével lefuttatja a leírt méretezési algoritmust minden, az előző pontban felírt P_{inv} - E_{bat} párosra $P_{inv} = P_{atl}$ értékig, ez a peak-shaving határa, a *load levelling* funkció. Az így meghatározott NPV értékek közül a legnagyobb értékűhöz tartozó rendszer telepítése éri meg a legjobban.

5.5 Működési algoritmus

A dolgozatban szemléltetett rendszer a lehető legegyszerűbb működési algoritmussal számol: amennyiben a fogyasztó teljesítményigénye P_{LTh} alá esik, az akkumulátor tölteni kezd, amennyiben pedig P_{UTh} felé emelkedik, a betárolt energia kisütésével elégíti ki az igényeket. Oda kell figyelni, hogy az akkumulátor töltöttségi szintje ne haladja meg a maximálisan megadott SOC értéket, illetve a mélykisülés elkerülése érdekében ne essen 20% alá sem. Fontos továbbá, hogy az SOC értéke minden nap elején az előző napi végérték legyen, ezért a pontos működési modellhez egy egész évre felállított algoritmus szükséges. A jelen dolgozat kiegészítésével készül további munkáimban ezen paraméterek mellett beszámításra kerülnek a rendszer degradációjának hatásai, valamint a karbantartás költségei is.



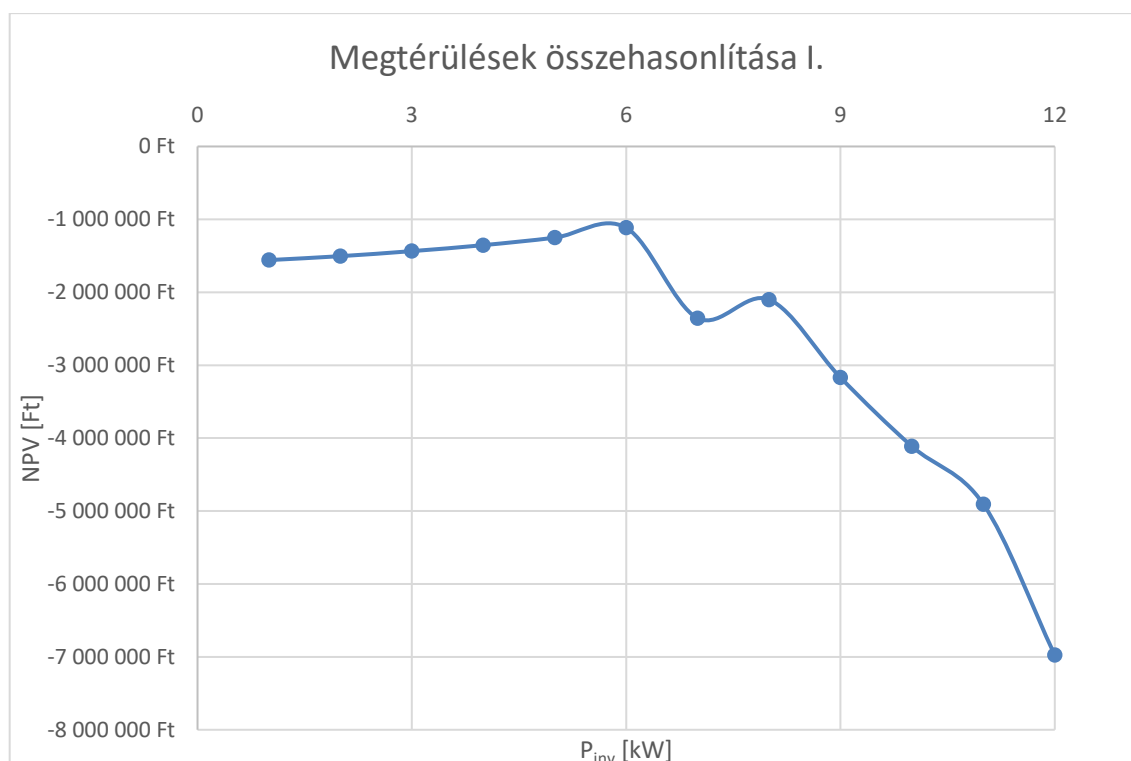
18. ábra: A legoptimálisabb BESS rendszer működése az év egy tetszőlegesen kiválasztott napja esetén

5.6 Eredmények

Az alábbiakban a két fogyasztó esetében meghatározott akkumulátoros rendszerek paramétereit, megtérülése kerülnek kiértékelésre. A szimuláció eredményeit a táblázatok és diagramok mutatják:

P_{inv}	$E_{elméleti}$	$E_{valós}$	C_0	C_{megt}	NPV
1,00kW	0,33kWh	7,61kWh	1 670 619 Ft	9 289 FT/év	-1 558 160 Ft
2,00kW	0,67kWh	7,61kWh	1 729 119 Ft	18 545 FT/év	-1 504 604 Ft
3,00kW	1,30kWh	7,61kWh	1 787 619 Ft	29 104 FT/év	-1 435 275 Ft
4,00kW	2,15kWh	7,61kWh	1 846 119 Ft	40 688 FT/év	-1 353 537 Ft
5,00kW	3,38kWh	7,61kWh	1 904 619 Ft	53 967 FT/év	-1 251 284 Ft
6,00kW	5,24kWh	7,61kWh	1 963 119 Ft	70 016 FT/év	-1 115 482 Ft
7,00kW	8,00kWh	15,22kWh	3 443 738 Ft	89 966 FT/év	-2 352 617 Ft
8,00kW	12,02kWh	15,22kWh	3 502 238 Ft	115 836 FT/év	-2 099 898 Ft
9,00kW	17,88kWh	22,83kWh	4 982 856 Ft	149 791 FT/év	-3 169 451 Ft
10,00kW	26,14kWh	30,44kWh	6 463 475 Ft	194 135 FT/év	-4 113 234 Ft
11,00kW	37,15kWh	38,05kWh	7 944 094 Ft	250 932 FT/év	-4 906 245 Ft
12,00kW	50,75kWh	53,27kWh	10 846 831 Ft	319 714 FT/év	-6 976 288 Ft

6. táblázat: Az Infoware Zrt-nek tervezett BESS rendszerek összehasonlítása

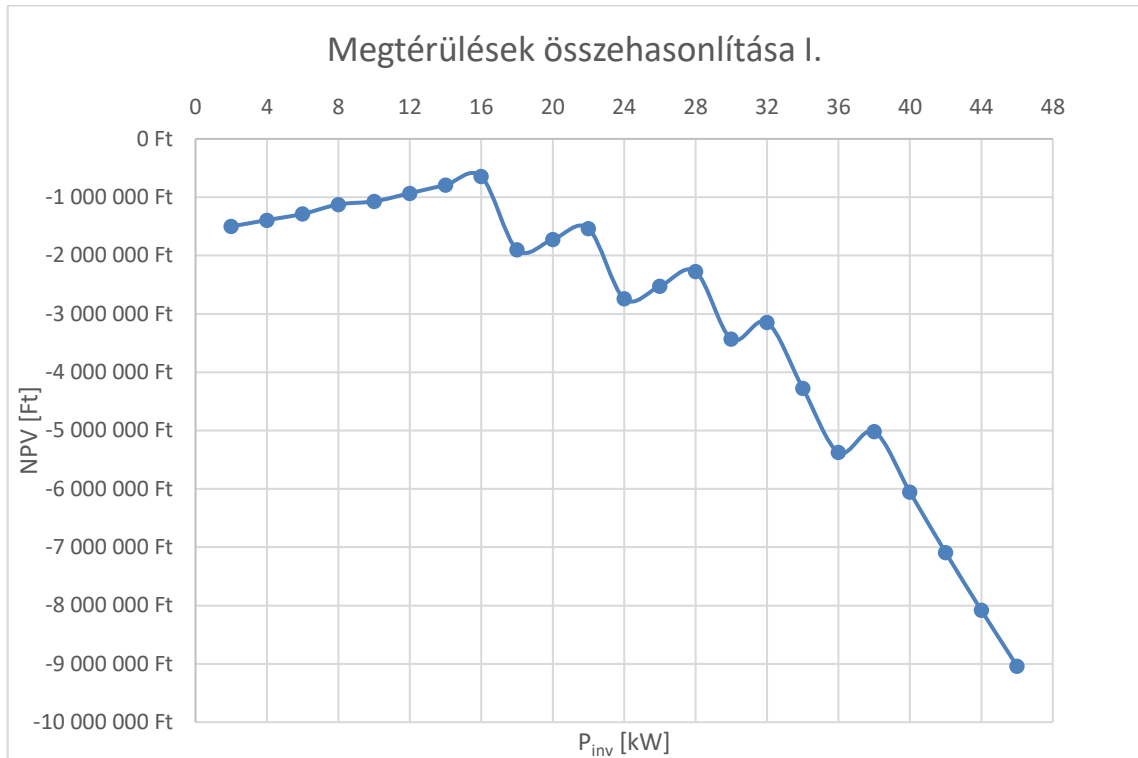


19. ábra: Különböző rendszerek megtérülésének összehasonlítása az Infoware Zrt. esetében

P_{inv}	$E_{elméleti}$	$E_{valós}$	C_0	NPV	C_{megt}
2,00kW	0,67kWh	7,61kWh	1 729 119 Ft	-1 500 691 Ft	18 869 FT/év
4,00kW	1,33kWh	7,61kWh	1 846 119 Ft	-1 392 557 Ft	37 465 FT/év
6,00kW	2,00kWh	7,61kWh	1 963 119 Ft	-1 285 651 Ft	55 960 FT/év
8,00kW	2,67kWh	7,61kWh	2 080 119 Ft	-1 123 463 Ft	79 022 FT/év
10,00kW	3,33kWh	7,61kWh	2 197 119 Ft	-1 071 274 Ft	92 997 FT/év
12,00kW	4,60kWh	7,61kWh	2 314 119 Ft	-931 377 Ft	114 217 FT/év
14,00kW	5,93kWh	7,61kWh	2 431 119 Ft	-789 133 Ft	135 631 FT/év
16,00kW	7,26kWh	7,61kWh	2 548 119 Ft	-644 937 Ft	157 207 FT/év
18,00kW	9,03kWh	15,22kWh	4 087 238 Ft	-1 899 917 Ft	180 677 FT/év
20,00kW	11,03kWh	15,22kWh	4 204 238 Ft	-1 724 697 Ft	204 815 FT/év
22,00kW	13,15kWh	15,22kWh	4 321 238 Ft	-1 535 888 Ft	230 075 FT/év
24,00kW	15,81kWh	22,83kWh	5 860 356 Ft	-2 741 369 Ft	257 634 FT/év
26,00kW	18,53kWh	22,83kWh	5 977 356 Ft	-2 526 666 Ft	285 034 FT/év
28,00kW	21,86kWh	22,83kWh	6 094 356 Ft	-2 274 721 Ft	315 509 FT/év
30,00kW	25,39kWh	30,44kWh	7 633 475 Ft	-3 433 289 Ft	346 944 FT/év
32,00kW	29,39kWh	30,44kWh	7 750 475 Ft	-3 144 777 Ft	380 440 FT/év
34,00kW	33,59kWh	38,05kWh	9 289 594 Ft	-4 273 825 Ft	414 312 FT/év
36,00kW	38,26kWh	45,66kWh	10 828 713 Ft	-5 373 323 Ft	450 626 FT/év
38,00kW	43,56kWh	45,66kWh	10 945 713 Ft	-5 018 063 Ft	489 635 FT/év
40,00kW	49,17kWh	53,27kWh	12 484 831 Ft	-6 056 552 Ft	530 989 FT/év
42,00kW	55,17kWh	60,88kWh	14 023 950 Ft	-7 092 006 Ft	572 592 FT/év

44,00kW	61,84kWh	68,49kWh	15 563 069 Ft	-8 081 897 Ft	617 960 FT/év
46,00kW	69,04kWh	76,10kWh	17 102 188 Ft	-9 037 999 Ft	666 118 FT/év

7. táblázat: NF esetére tervezett BESS rendszerek összehasonlítása



20. ábra: Különböző rendszerek megtérülésének összehasonlítása NF esetében

Mindkét fogyasztó esetén megfigyelhető, hogy a legmagasabb nettó jelenértékek a kisebb rendszerekre jellemzőek. Ez azzal magyarázható, hogy bár az inverter és az akkumulátor költségei is lineárisan vannak beszámítva, a funkcióhoz az 5.4.1 bekezdésben meghatározott parabolikus jellegű $P_{inv}-E_{bat}$ összefüggés tartozik. Az Infoware Zrt. telephelyét hiába tenné alkalmassá a peak-shaving funkcióra az alacsony LF érték, a telep kiadásaiban túl kis arányban szerepelnek a teljesítménycsúcsok miatti kiadások, a csúcs-völgy time-shifting pedig nem hoz elég profitot az élettartam alatti megtérüléshez. NF esetében várhatóbb volt a kapott eredmény, hiszen a magas LF értékek is jelezték, hogy kevés a levágható csúcs.

6 Konklúzió

Összességében elmondható, hogy a vizsgált piaci körülmények között a dolgozatban elemzett ipari fogyasztók esetében nem éri meg a peak-shaving funkció önmagában való alkalmazása. A dolgozatban vizsgált két fogyasztó és konkrét tárolási technológia nem enged széles körű következtetésekre, ezért a jövőben érdemes lehet megvizsgálni egyéb fogyasztókat és BESS kialakításokat. A BESS megtérülési idejét rövidítheti a funkció ötvözése például a dolgozatban is részletezett UPS, feszültségszabályozás vagy meddőkompenzálás funkciókkal. A dolgozatban vizsgált piaci körülményeknél a peak-shaving szempontjából kedvezőbb lehet, ha a fogyasztó napon belüli piacon vételez energiát, ezzel nagyobb teret nyitva az arbitrázs lehetőségeknek. A kombinált funkciók mellett érdemes megvizsgálni a DSM és a peak-shaving BESS, vagy éppen a PV-BESS közös alkalmazását. A peak-shaving funkció elterjedését segítheti a lítiumionos akkumulátorok következő években várható árcsökkenése, valamint a technológia folyamatos fejlődése és az új típusok megjelenése.

A dolgozat egy lehetséges továbbfejlesztési iránya az Infoware Zrt. telephelyén telepített akkumulátoros rendszer peak-shaving algoritmusának létrehozása, valamint tesztelése lehet.

7 Irodalomjegyzék

- [1] Dr. Balázs Gergely György: Akkumulátoros energiatároló egységek (I), Energiatárolók tantárgy diasor, 2018
- [2] Maria C. Argyrou, Paul Christodoulides, Soteris A. Kalogirou: Energy storage for electricity generation and related processes: Technologies appraisal and grid scale applications, 2018
- [3] Infoware Zrt.: Akkumulátoros Energiatároló Rendszerek, diasor, 2018
- [4] Holger C. Hesse, Michael Schimpe, Daniel Kucevic, Andreas Jossen: Lithium-Ion Battery Storage for the Grid—A Review of Stationary Battery Storage System Design Tailored for Applications in Modern Power, 2017
- [5] Ian Beil, Alicia Allen, Askhat Tokombayev, Michelle Hack: Considerations when using Utility-Scale Battery Storage to Black Start a Gas Turbine Generator, 2017
- [6] Moslem Uddina, Mohd Fakhizan Romliea, Mohd Faris Abdullaha, Syahirah Abd Halimb, Ab Halim Abu Bakar, Tan Chia Kwang: A review on peak load shaving strategies, 2018
- [7] Szöllösi Kristóf: Feszültségletörések okainak elemzése és csökkentési lehetőségeinek vizsgálata ipari fogyasztói környezetben, Diplomaterv, 2017
- [8] Dr. Szandtner Károly: Szünetmentes áramforrások alkalmazása és hálózataik kiépítése a nagyfogyasztóknál, Jegyzet
- [9] ABB: Lithium-ion battery systems for ABB UPS solutions, Brosúra
- [10] Kertész Sándor: Akkumulátoros Energiatároló Rendszerek (BESS) alkalmazása, Elektrotechnika, 2018. október
- [11] Táci István: Az E.ON hálózati célú energiatároló projektjének bemutatása, Előadás diasor, REKK Energy Storage Day, 2018
- [12] www.mvmpartner.hu/hu-HU/Szolgalatasok/Villamos-energia/Erdekessegek/Meddokompenzalasvizsgalatakisfeszultseguiparifogyasztokeseten
- [13] Wenxi Wang, Weiguo He, Junzhao Cheng, Xiaojian Huang, Haoming Liu: Active and Reactive Power Coordinated Control Strategy of Battery Energy Storage System in Active Distribution Network, 2017
- [14] 2007. évi LXXXVI. törvény a villamos energiáról
- [15] <https://www.eon.hu/hu/uzleti/aram/arak-tarifadijak.html>
- [16] Samsung SDI: ESS Batteries by Samsung SDI – Top Safety & Reliability Solutions, Brosúra, 2018
- [17] Dr. Hartmann Bálint, Dr. Divényi Dániel, Dr. Vokony István: Evaluation of business possibilities of energy storage at commercial and industrial consumers – A case study, 2018
- [18] Holger C. Hesse, Rodrigo Martins, Petr Musilek, Maik Naumann, Cong Nam Truong, Andreas Jossen: Economic Optimization of Component Sizing for Residential Battery Storage Systems, 2017
- [19] Kein Huat Chua, Yun Seng Lim, Stella Morris: Energy storage system for peak shaving, 2016