

9. lecke

Komplex energetikai rendszerek

Energiatárolás

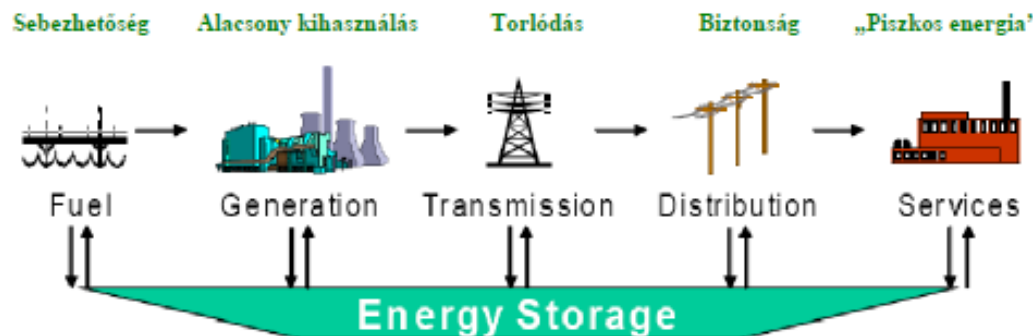
2018. április 10.

Motiváció

- Az energiatárolás legnagyobb előnye, hogy lehetővé teszi **az energiatermelés és az energia fogyasztás szétcsatolását**. Az energiarendszer irányítása megköveteli a teljesítmény egyensúlyt.
- Így az energiatárolás nagyléptékű alkalmazása jelentős **támogatást és lökést adhat** a megújuló energiafajták alkalmazásának.
- Az energiatárolás alkalmazásának **számos egyéb kedvező hatása van**.

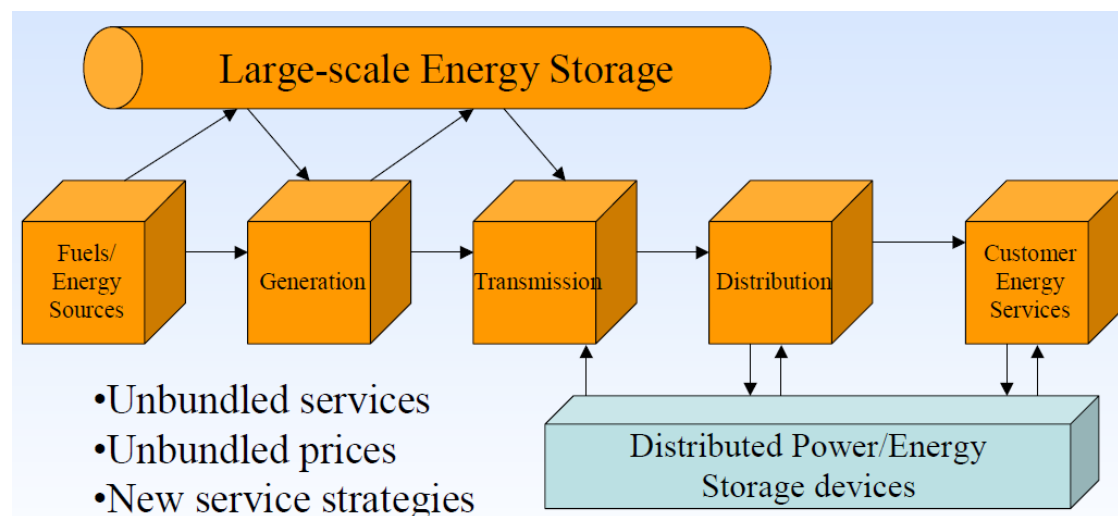
Az energiatárolás műszaki járulékos előnyei

KIHÍVÁSOK

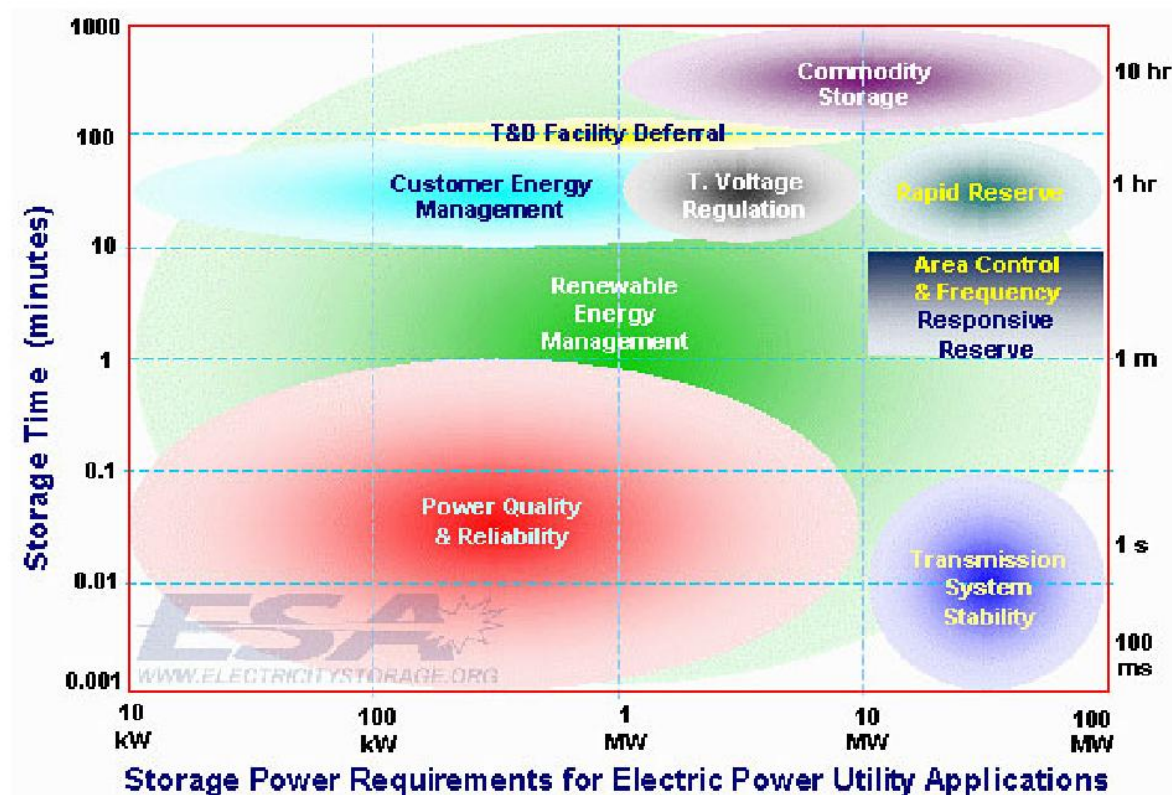


Korlátozott kockázat Alapterhelés Nagyobb kihasználtság Stabilitás Energia minőség

ELŐNYÖK

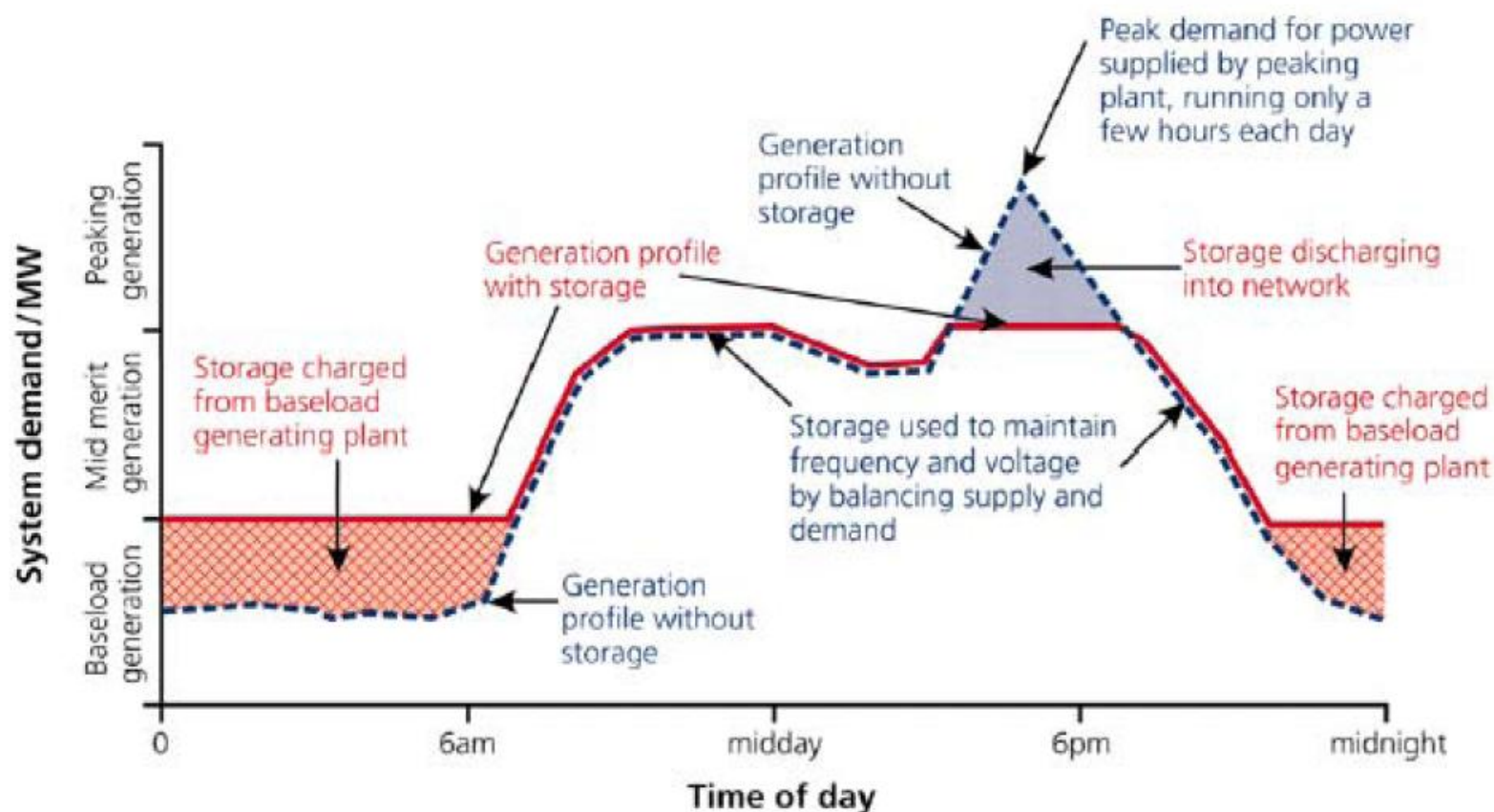


Az energiatárolás alkalmazásának területeit

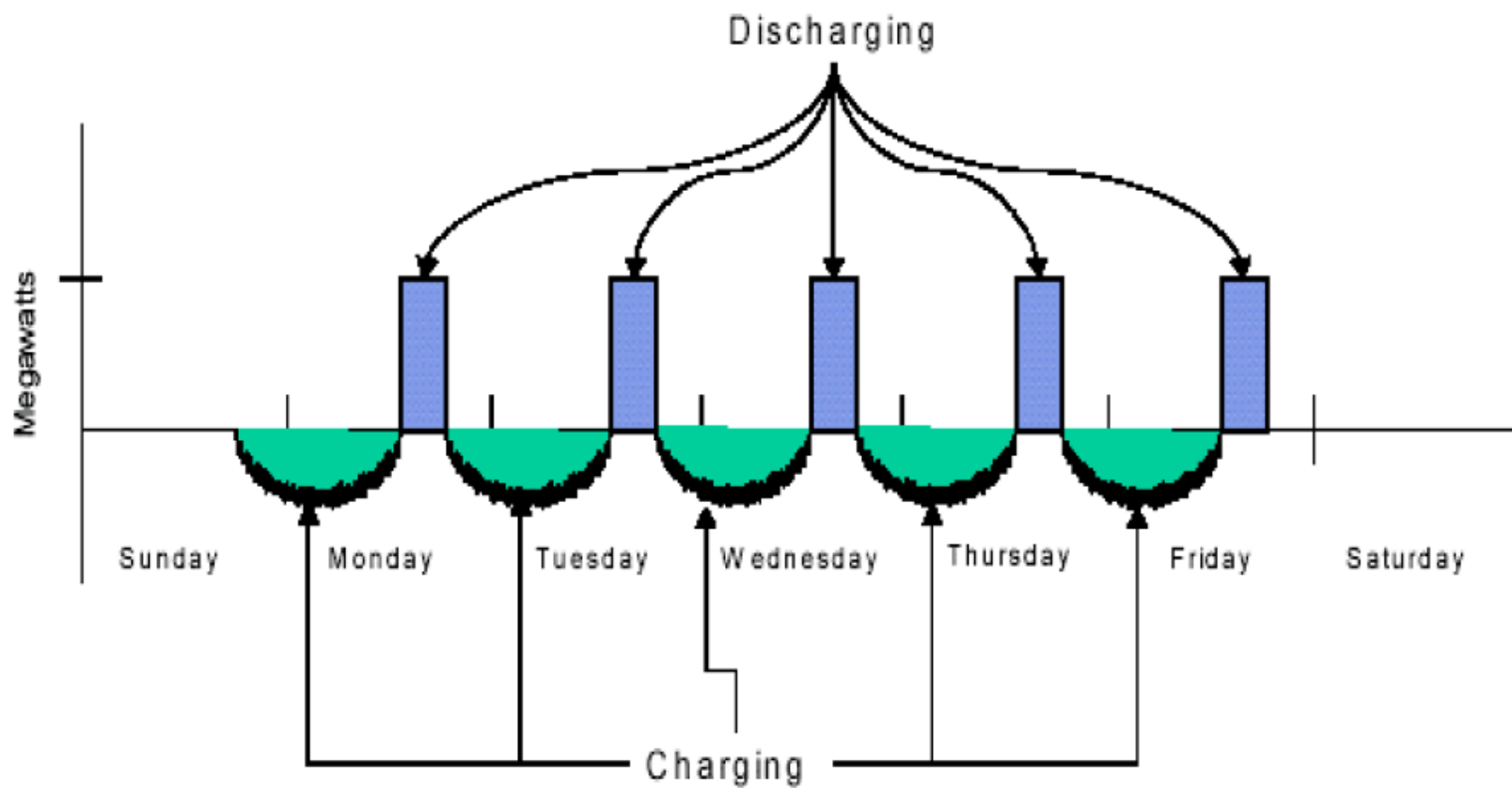


A terheléskiegyenlítés hatása

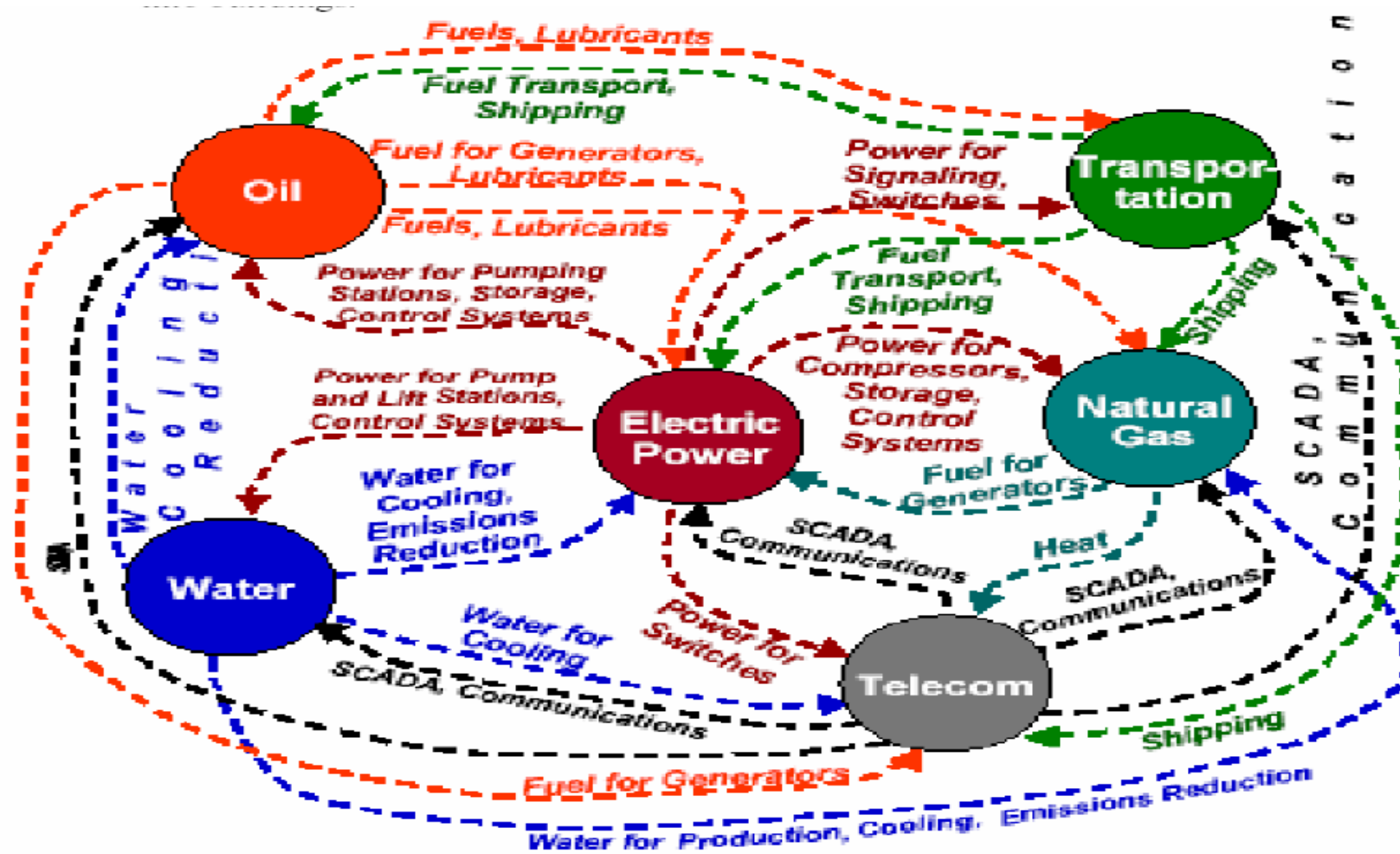
Load Profile of a Large-Scale Energy Storage Facility



A piaci hatás: csúcs ár érhető el



A rendelkezésre állás biztonsága fontos

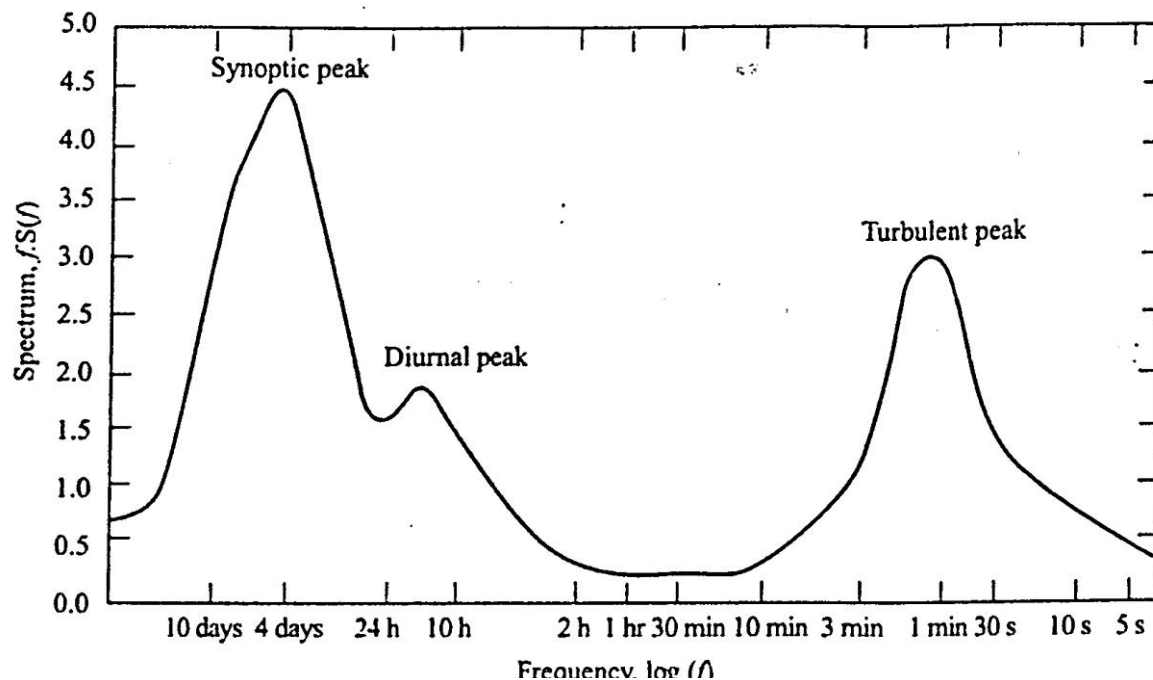


Az energiatárolással szembeni elvárások

- Alacsony költség: beruházás, működés, karbantartás
- Magas eredő hatásfok.
- Felügyelet-nélküliség.
- Üzembiztonság.
- Alacsony vagy nulla környezeti hatás.
- Illeszkedjen az energia változás spektrumához.

A szélenergia spektruma

- A két részletesen vizsgált energiatárolási mód a spektrum alapján lett kiválasztva:
 - A **pár napos** változások kiegyenlítésére a **hidrogén tárolási** technológia adhat megoldást.
 - A **turbulencia** okozta gyors változások kiegyenlítése **lendkerékkel** oldható meg.



Az energiatárolás hátrányai

- Amíg az egyes energiatárolási módoknak vannak egyéni korlátai hiányosságai és előnyei, ugyanakkor mindnek van két támadható Achilles sarka, különösen megújuló energetikai alkalmazásuk esetén:
- Az energiatároló rendszer **jelentős beruházási költsége**. A rendszer három jól elkülöníthető alrendszerre osztható:
 - Töltési,
 - tárolási és
 - kisütési alrendszerek (ez tartalmazza a váltakozó áramú hálózathoz való illesztést is).

Mindhárom alrendszernek jelentős beruházási költsége van.
- Az energiatároló rendszer **hatásfoka** mindig kisebb 100%-nál.

Összehasonlítási szempontok

- Az árat **fajlagosan** érdemes vizsgálni.
- A hatásfok szempontjából az **eredő hatásfok a legérdekesebb.**
- A **tárolási időtartamot** a technológia megköti, az átfogandó spektrum pedig igényli.
- Az alkalmazhatósági **teljesítménytartomány** függ a tárolási technológiától.
- A rendszer méretének jellemzésére a **fajlagos értéket kifejező energiasűrűség** alkalmas.
- A megtérülés szempontjából a **rendszer élettartama** alapvető adat.

Energia tárolási módok ismertetése

Kinetikai energia tárolása: Lendkerék

- **Működési elv, mechanizmus:**
 - A forgó tömegben tárolt energia a Θ inerciával és az ω szögsebesség négyzetével arányos: $\Theta\omega^2/2$
- **Előnyök:**
 - Elterjedt, főként a kisebb teljesítmény tartományban (1kW, 3h vagy 100kW, 30s).
 - Nagy ciklusélettartam.
 - Kis méret.
 - Környezetkímélő.
 - Kis karbantartási igény
 - Alacsony megsemmisítési költség élettartam végén.

- **Hátrányok:**

- Nagyobb teljesítményeken még fejlesztés alatt (250kW, 10-15min)
- A nagy energiájú forgó tömeget sokan veszélyesnek tartják

- **Tőkeigénye:** 400-800\$/kW.

- **Fejlesztési irányok:**

- Mivel a tárolt energia a **szögsebesség** négyzetével arányos, annak **növelésével** jelentős többlet érhető el.
- A légsúrlódás csökkentése **vákuum** alkalmazásával.
- A csapágsúrlódás csökkentése **lebegtetett mágneses csapágy** alkalmazásával (szupravezetős is lehet).
- **Integrált lendkerék**, ahol a villamos gép forgórésze képezi az energiatárolót.
- Különféle tárolási technológiák integrálása (levegő sűrítés, hőtárolás, lendkerék).

- **Hatásfok:**

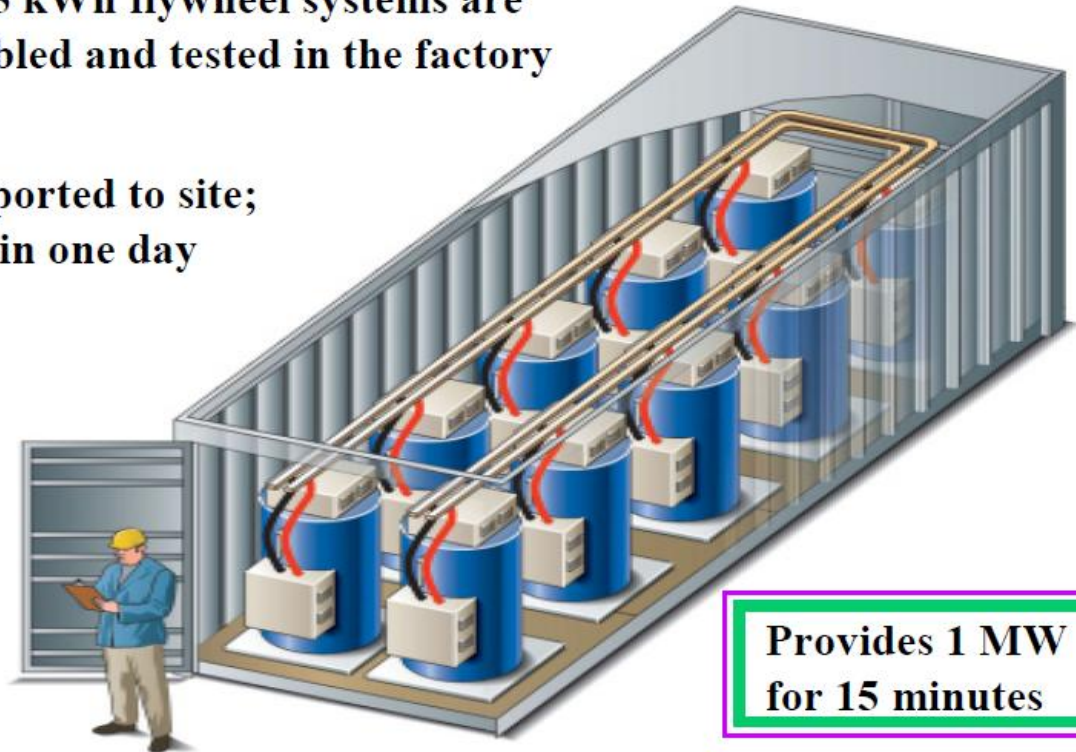
- Az eredő AC-AC hatásfok 80-85% körül van (függ a csapágyveszteségtől, légsúrlódástól).

- **Installálási példák:**

- USA, 1-MW vasúti hálózaton.
- Sorozat gyártmány: Beacon Energy, Többet összekombinálva MW-os tartomány érhető el.

10 x 25 kWh flywheel systems are assembled and tested in the factory

**Transported to site;
set up in one day**



**Provides 1 MW
for 15 minutes**

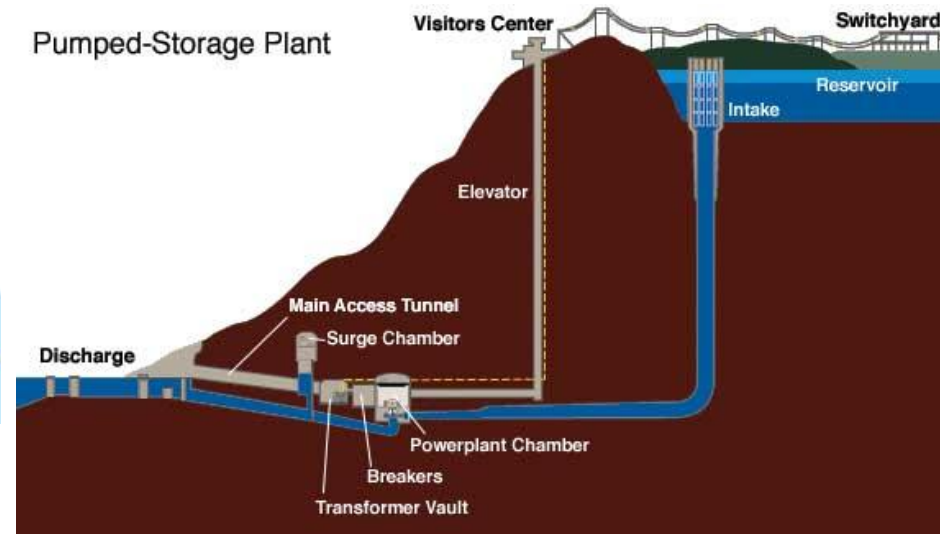
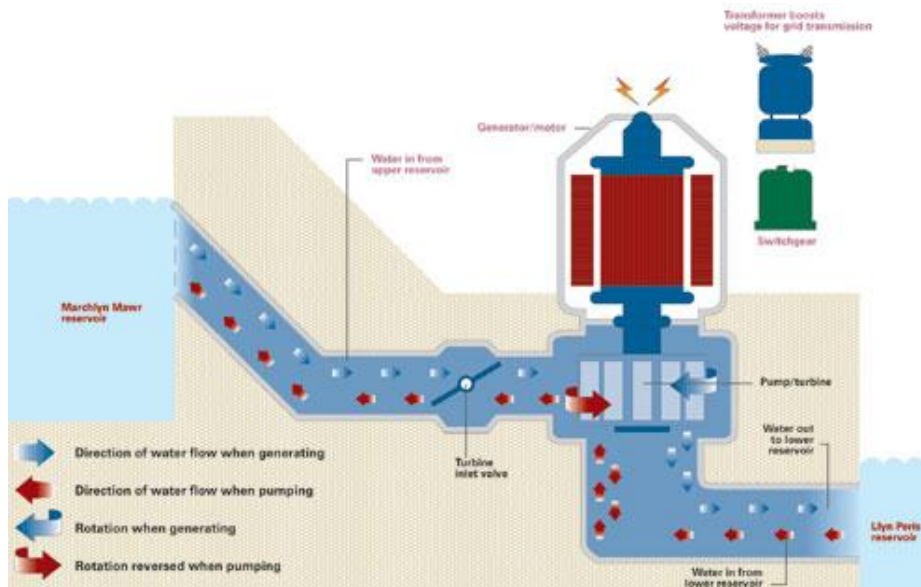
Smart Energy Matrix

Potenciális energia tárolása

Szivattyús tározók (Pumped Hydro)

- Működési elv, mechanizmus:**

- Csúcsidőn kívüli fölösleges energiát vagy megújuló energiafajtából előállított villamos energiát felhasználva ez a tárolási technológia **vizet szivattyúz** egy magasabban (hegytetőn) lévő tárolóba.



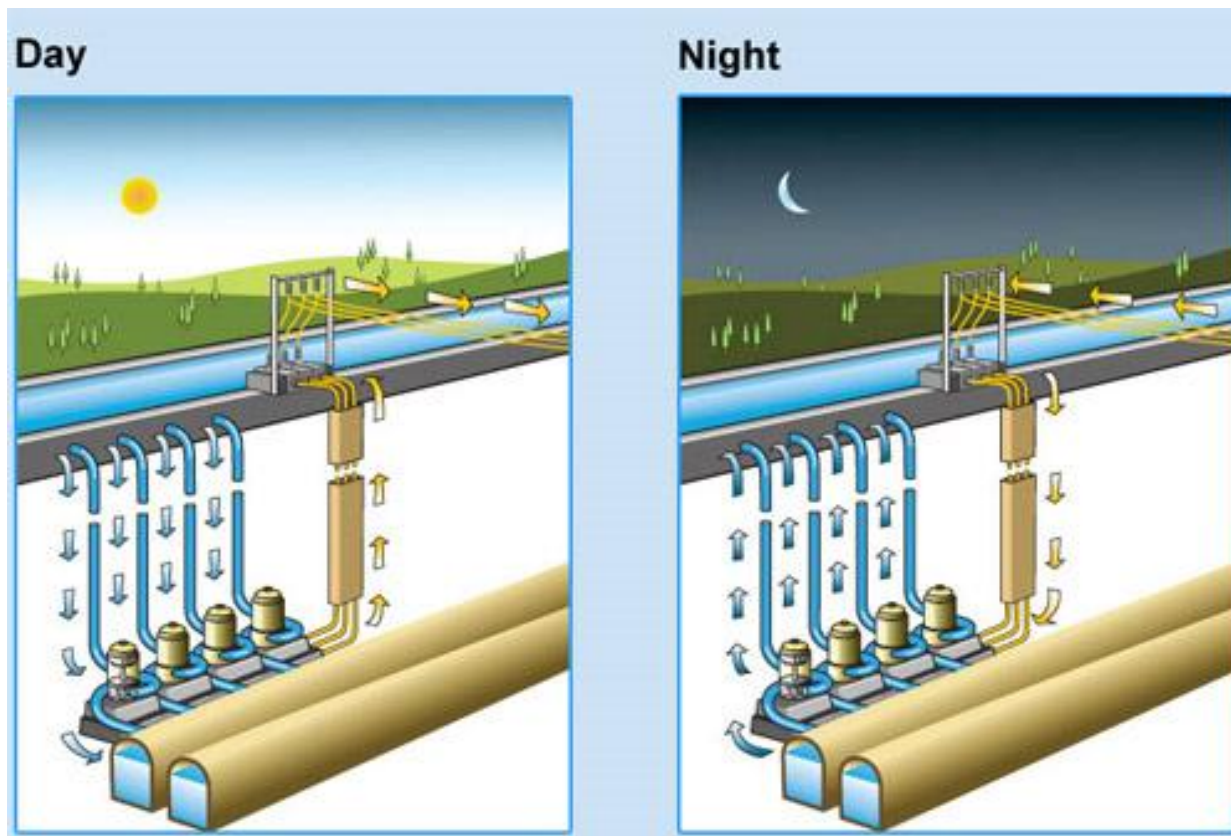
Okinava, tengerrel kombinálva



- **Előnyök:**
 - **Széles körben** használt (pl. 38 létező alkalmazás az USA-ban, akár 30-350MW teljesítménnyel), kiforrott és teljes egészében kidolgozott energiatárolási technológia.
 - Széles teljesítmény és energia **spektrum**. A tárolási idő nem korlátozott (tipikusan maximum pár nap).
- **Hátrányok:**
 - **Környezeti hatások** jelentősek.
- **Tőkeigénye:**
 - Az 1000-2000MW-os nagy teljesítmény tartományban szorítható le 1000\$/kW-os érték alá.
- **Hatásfok:**
 - Az eredő (teljes ciklusra vonatkozó) hatásfok 70-80%.

- **Fejlesztési irányok:**

- Földalatti kialakítás, akár mesterséges csövekben, tartályokban is. (RiverBankPower)

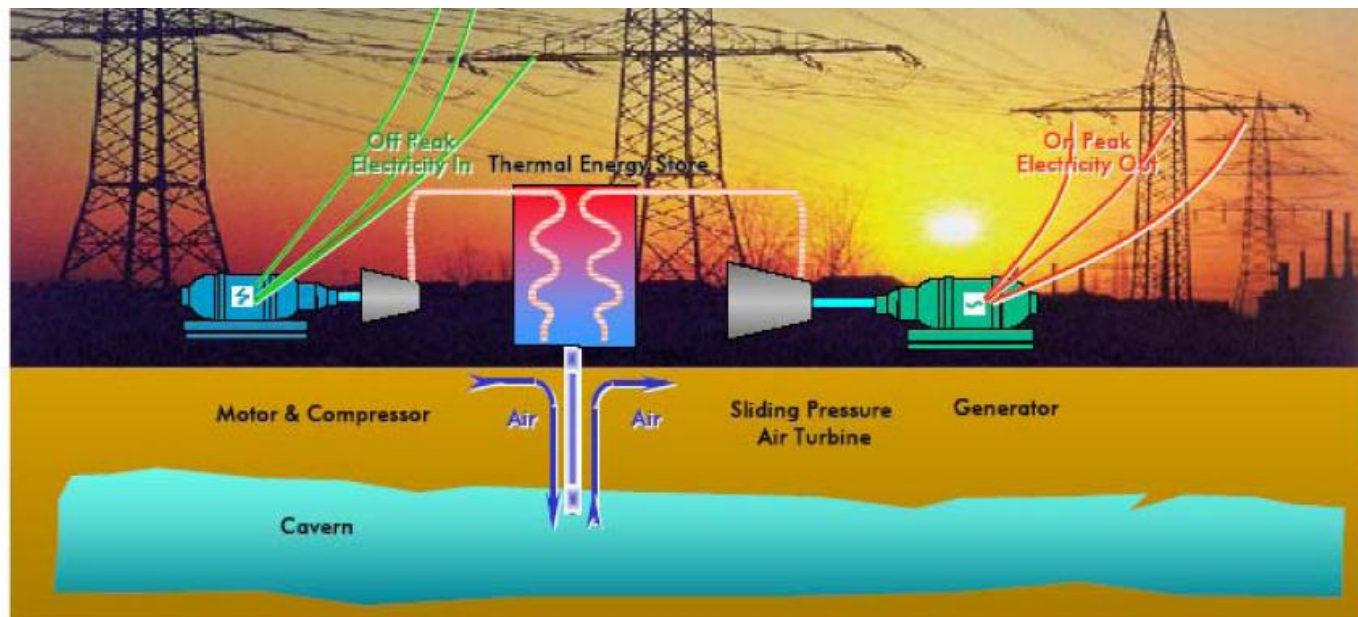


- Változtatható sebességű hajtások alkalmazása (ciklokonverter, kétoldalról táplált aszinkrongép).

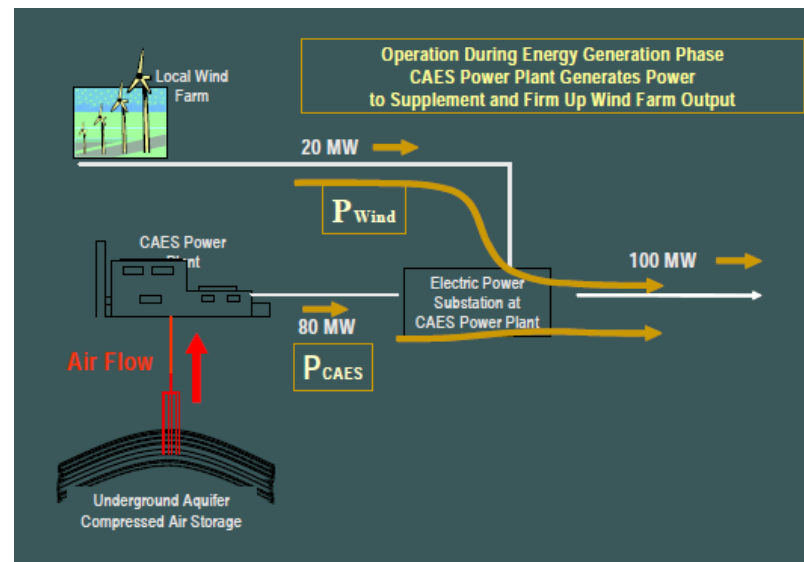
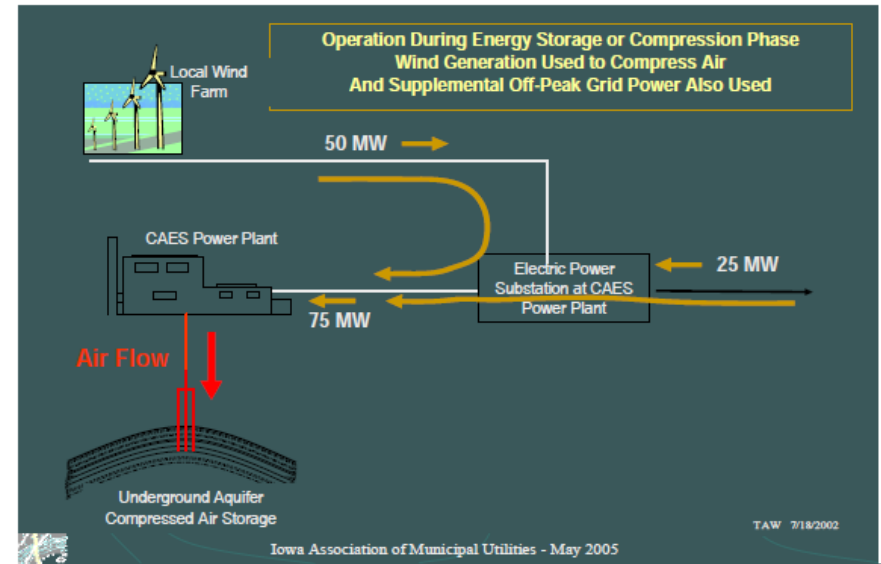
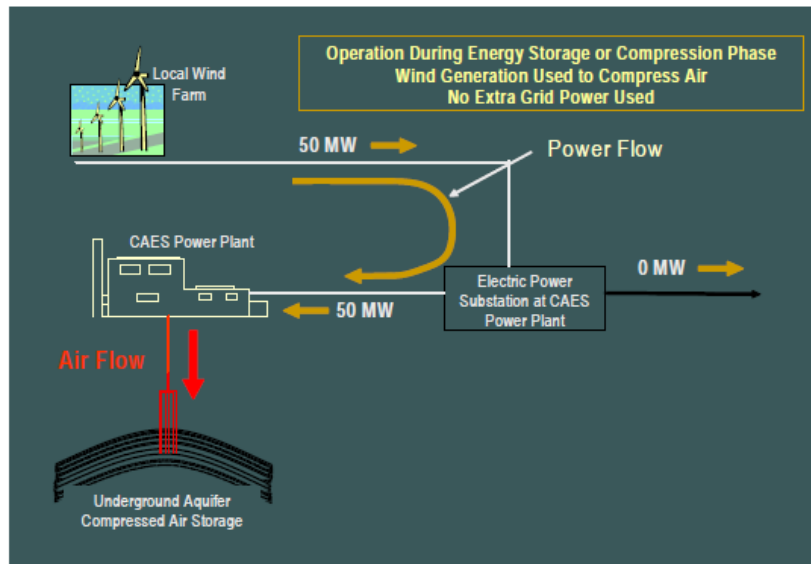
Levegő sűrítése Compressed Air Energy Storage: CAES

- Működési elv, mechanizmus:

- Csúcsidőn kívüli fölös energiát vagy megújuló energiafajtából előállított villamos energiát felhasználva ez a tárolási technológia **levegőt sűrít össze földalatti tárolóba** vagy csőrendszerbe. Az energia az összesűrített levegő **potenciális energiájában** tárolódik. Amikor az energiát használni akarjuk, a levegőt felmelegítve (bármilyen üzemanyaggal) és átvezetve expanziós turbinán **elektromos generátort hajtunk vele**.

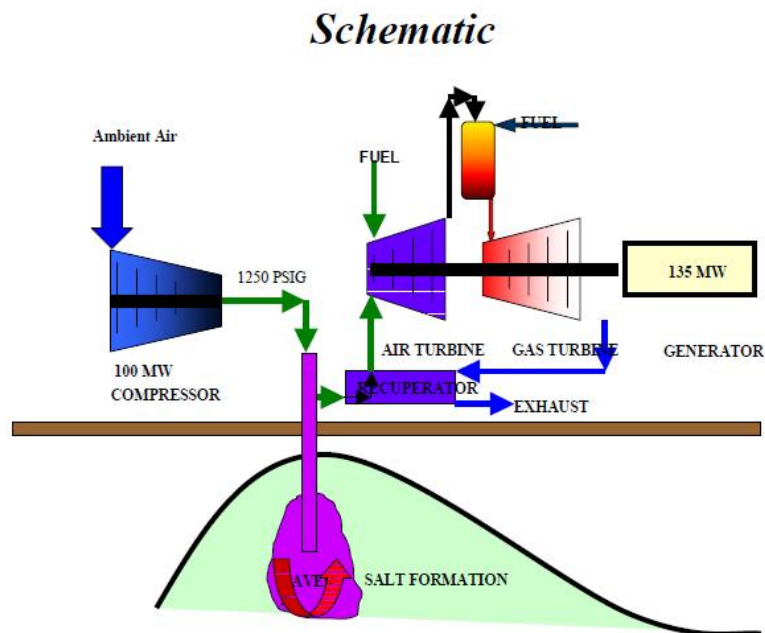


Komplex energetikai rendszerek



- Előnyök:
 - Használt, kiforrott technológia
 - Széles teljesítmény és energia spektrum. A tárolási idő nem korlátozott (tipikusan maximum pár nap).

Alabama Electric Cooperative - 110 MW Facility



- **Hátrányok:**

- **Nagy tőkeigény.** Pl. USA-ban 1991-ben épült rendszer 110MW 26 órás tároló 400\$/kW-os áron készült addig is gáztárolásra használt **kimerült olajmezőt** felhasználva.
- Viszonylag **hosszú kialakítási idő.** A fent említett rendszer 2,5 év alatt készült el.

- **Tőkeigénye:** Ld. fent.

- **Fejlesztési irányok:**

- A technológia fejlesztése minél kevesebb elsődleges energiahordozó felhasználására (pl. veszteségi hő felhasználása).
- **Csőrendszer** használata földalatti tárolók helyett.
- Pneumatikus motor-generátor használata sűrítésre és energia visszanyerésre.
- Maximális hatásfokra szabályozás.

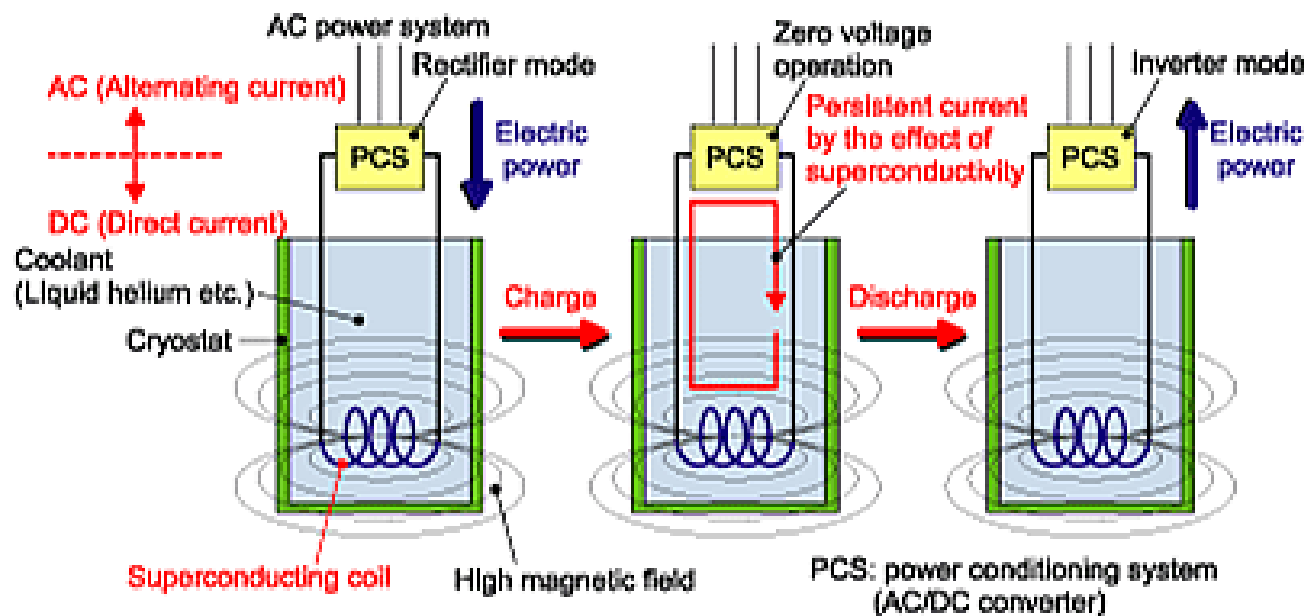
- **Hatásfok:**

- Az eredő (teljes ciklusra vonatkozó AC-AC) hatásfok körülbelül 85%.

Mágneses energia tárolás: Szupravezetős mágneses energia tárolás (SMES)

- Működési elv, mechanizmus:
 - A csúcsidőn kívüli megtermelt energiát egyenárammá alakítják, majd beinjektálják egy **elektromágnes szupravezetős tekercsbe**, a tárolás a **mágneses mezőben** történik.
- Előnyök:
 - Nagyon **gyors**, hálózati cikluson belüli átkapcsolás (17ms) lehetséges az energia betáplálás és az energia kivét között.
 - Rövid idő alatt nagy energia szabadítható fel.
 - **Kiforrott** technológia.

Energy Storage Method Using Superconducting Phenomenon (Mechanism of SMES)



$$E_{\text{tarolt}} = \frac{1}{2} LI^2$$

$$L = \mu_0 \mu_r N^2 \frac{A}{l_0}$$

Az áram a szupravezetés miatt (az ellenállás zérus) hosszú időn keresztül állandó!

- **Hátrányok:**
 - Főként **rövid idejű tárolásra-kisütésre** alkalmas (pár másodperc). Hosszabb időre tervezésnél jelentős a méretnövekedés: 1MW, 1s→1m átmérő; 1000MW, 5 óra→1000m átmérő.
- **Tőkeigénye:** 300\$/kW
- **Fejlesztési irányok:**
 - Magashőmérsékletű szupravezető anyagok használata.
 - AC-DC-AC átalakítók új topológiái.
- **Hatásfok:**
 - A fentemlített magas hatásfokot jelentősen csökkenti a hűtésre fordított energia: 21%.

Akkumulátoros energiatárolás (Battery Energy Storage)

- Működési elv, mechanizmus:
- Az energia tárolás **legrégebben ismert módja**, amely elektrokémia elven működik. Az elektródák folyékony, zselés vagy szilárd elektrolitban vannak és azzal elektrokémia reakcióba lépnek töltés és kisütés közben. A hagyományosnak mondható akkumulátor fajták a következők:
 - Savas ólomakkumulátor (Lead Acid) (legrégebbi),
 - Nickel-cadmium akkumulátor,
 - Lithium Ion akkumulátor,
 - Natrium-kén (Sodium Sulfur NaS) akkumulátor,
 - Natrium-Nickel-Klorid (Sodium Nickel Chloride) akkumulátor.

Főbb adatok az alábbi táblázatban láthatók:

	Lead acid	Nickel cadmium	Sodium sulphur	Lithium ion	Sodium nickel chloride
Achieved/demonstrated upper limit power	Multiple tens of MW	Tens of MW	MW scale	Tens of kW	Tens/low hundreds of kW
Specific energy (Wh/kg)	35 to 50	75	150 to 240	150 to 200	125
Specific power (W/kg)	75 to 300	150 to 300	90 to 230	200 to 315	130 to 160
Cycle life (cycles)	500 to 1500	2,500	2,500	1,000 to 10,000+	2,500+
Charge/discharge energy efficiency (%)	~80	~70	up to 90	~95	~90
Self discharge	2 to 5% per month	5 to 20% per month	#	~1% per month	#

Although there is no self discharge reaction, there is a parasitic loss associated with maintaining the battery temperature.

- **Előnyök:**

- A hagyományos elemek használata **kiforrott** és széles körben alkalmazott technológia, tartalmazva a környezetkímélő karbantartást, selejtezést, újrahasznosítást is.
- **Gyors reagálási képesség** a töltésre (kevésbé a kisütésre).
- Moduláris, csendes, nem környezetszennyező, így közvetlenül a terhelés közelébe helyezhető.

- **Hátrányok:**

- Érzékeny a hőmérsékletre.
- Érzékeny a mélykisütésre.
- Korlátozott töltési kisütési ciklusszám

- **Tőkeigénye:**

- Savas ólom akkumulátor: 200-300\$/kW
- A többi újabb technológia drágább.

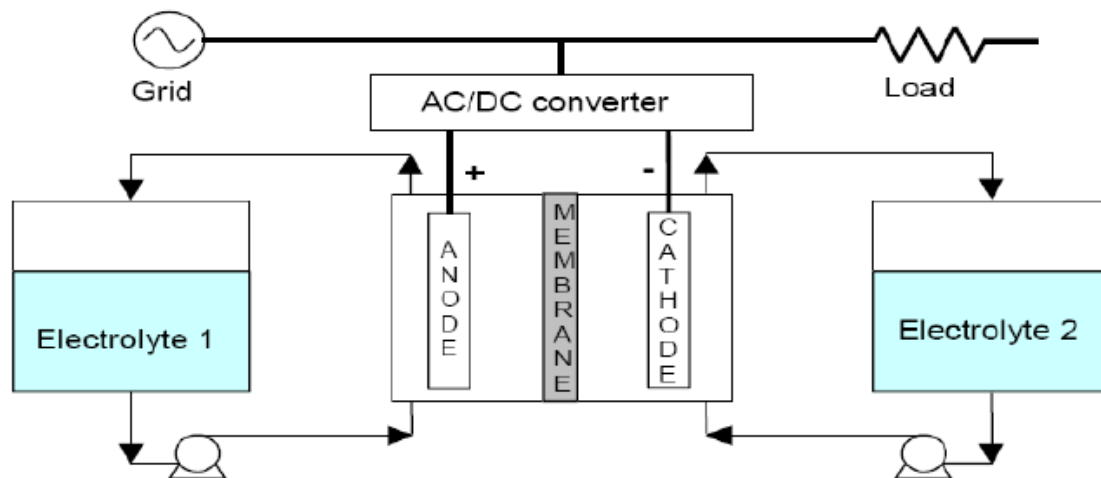
- **Fejlesztési irányok:**

- Az akkumulátor cellák, **töltés-kisütés optimalizálása** a karbantartási igény csökkentése, az élettartam növelése érdekében.
- **Integrálása** egyéb energiatárolási módokkal.
- Új technológiák alkalmazása: **Flow Batteries**. Az alkalmazott technológiák a következők:
 - Natrium-Bromid (Sodium Bromid),
 - Natrium- Polisulfid (Sodium Polisulfid: Regenesys),
 - Vanadium Redox, Zink Bromid.

- Tulajdonságaik a következő táblázatban láthatók:

	Vanadium	Zinc bromine	Regenesys™
Size range (MWh)	0.5 to 5	0.05 to 1	up to 120
Energy density (Wh/litre)	16 to 33	up to 60	
Cycle efficiency (%)	78 to 80	65 to 75	60 to 75
Cycle life (cycles)	> 12,000	> 2,000	
Unit design lifetime (years)	5 to 10	5 to 10	15

A Redox Flow Cell akkumulátor sematikus felépítése.



- **Az elektródák tisztán csak az átáramló elektrolitok közti ion átvitelt szolgálják.**
 - Így alapvetően nincs mélykisütési jelenség. Az energiatárolás az elektrolitban történik.
 - Így a **teljesítmény és az energia egymástól függetlenül befolyásolható.**

- **Hatásfok:**

- Az AC-AC eredő hatásfok 60-80% között van a típustól és a töltési-kisütési ciklus gyakoriságától függően.
- A Flow Battery-nél a hatásfok inkább 70% felett van:
- Vanadium Redox: 75%
- Zink bromide: 70%

- **Installálási példák:**

- Zinc Bromide 400kWh Battery, Advanced BESS - Host Detroit Edison (Sandia-Satcom-ZBB)
- VRB (Redox) 250 kW/520 kW/hr Battery (installed in 2000) VESS-Stellenbosch University, RSA. ESKOM Partner.
- Pacificorp - 250kW/2000kW/hr (8 hr) Mobile Unit (July 2002)
- Ni Cad-40 MW BESS - Largest Battery for Alaska. (GVEA)

Hidrogén alapú energiatárolás (kémiai energia tárolás)

- **Működési elv, mechanizmus:**
 - Villamos energiából elektrolízis útján **hidrogén állítható elő**. Tartályban tárolható.
- **Előnyök:**
 - Nagyon **tiszta üzemanyag**, az energiatermelés mellékterméke a víz. Környezetbarát.
 - **Nagy energiasűrűség.**
 - A teljes teljesítményskála átfogható vele.
 - A teljes energiaskála átfogható vele.
 - A tárolási idő **több hónap** is lehet.
 - A rendszer töltési sebessége, kisütési sebessége és tárolási kapacitása **egymástól függetlenül megválaszthatók.**
 - Moduláris konstrukcióra alkalmas, lehetővé téve további modulok hozzáadását, a rendszer újrakonfigurálását.
 - A hidrogén egyéb célokra is használható (pl. járművekben).
 - Flexibilisen használható akár helyhez kötött, akár hordozható kivitelben.

- **Hátrányok:**

- A hidrogén technológia egyes elemei még kidolgozásra várnak.
- Költséges.
- Alacsony nyomás alatti elektrolízissel az eredő hatásfok alacsony, 30-40% körüli.

- **Tőkeigénye:**

- Nagy tőkeigény elsősorban a még kidolgozatlan technológiák miatt.

- **Fejlesztési irányok:**

- Magas nyomású elektrolízis technológiájának kidolgozása.
- Az **üzamanyagcellák** fejlesztése, elsősorban a reverzibilis működés irányában.
- Megbízható, biztonságos (bár ezt néhányan megkérdőjelezzik), olcsó tároló rendszer.

- **Hatásfok:**

- Alacsony nyomású elektrolízissel az eredő hatásfok alacsony, 30-40% körüli.
- Magas nyomású elektrolízissel ezt 60-85% körül várják.

Termikus energiatárolás

- Ebben az esetben az energiát **hő formájában** tároljuk, pl. ellenállásos melegítéssel hővé alakítva a villamos energiát. Ennek viszonylag alacsony a hatásfoka.
- A levegősűréssel szokták kombinálni, tárolva a sűréskor keletkező hőt.

Elektromos energiatárolás: Szuper kapacitás (ultrakapacitás, Electric Double Layer Capacitor: EDLC)

- Működési elv, mechanizmus:

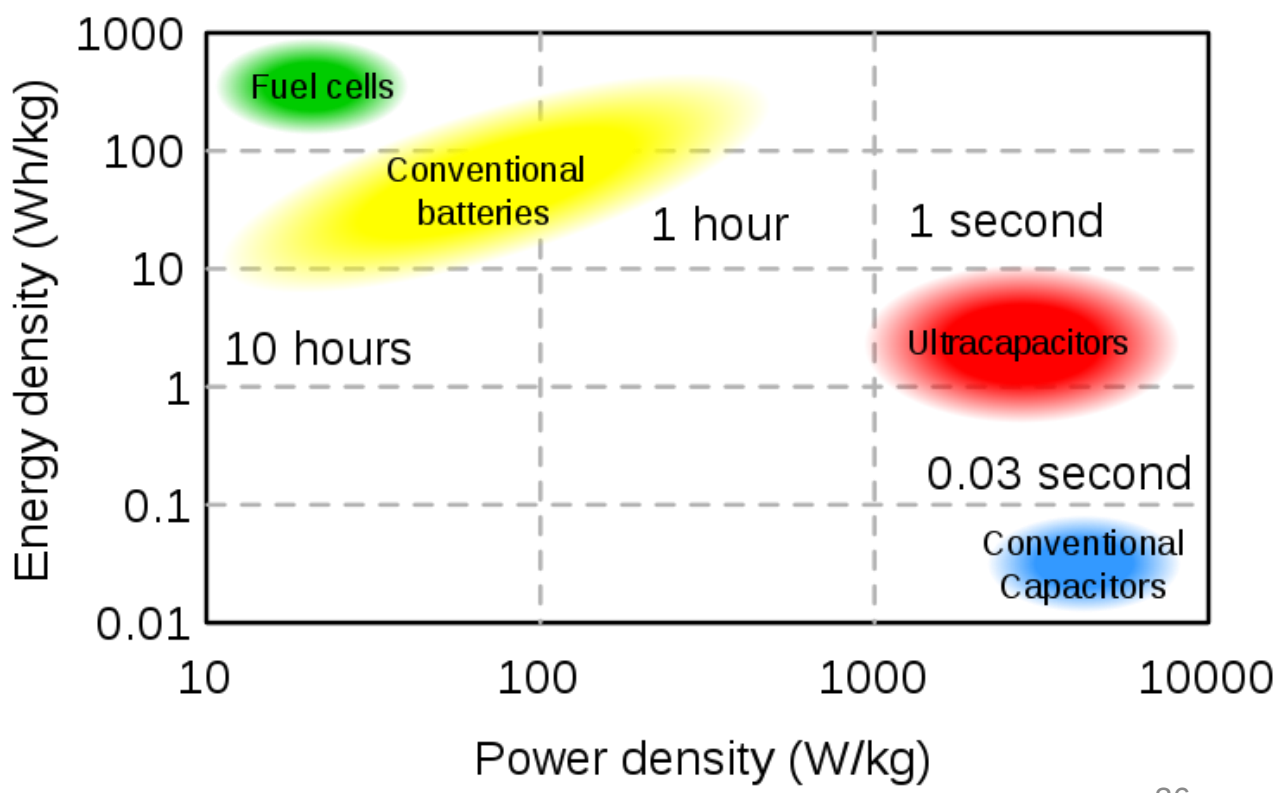
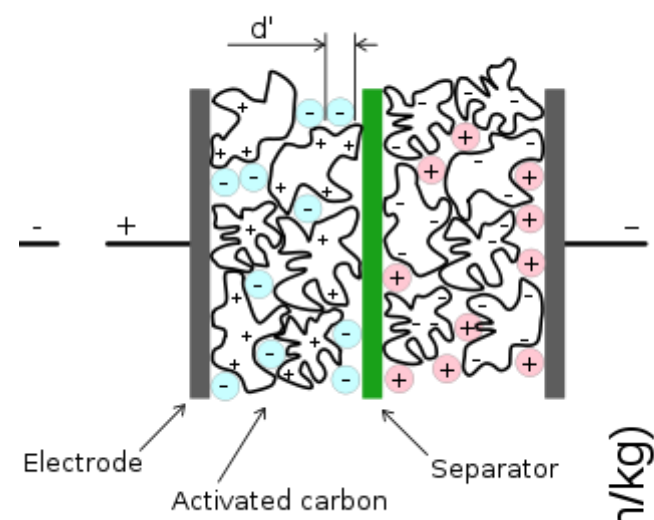
- Ez az egyetlen módszer, amely **közvetlenül villamos energiát tárol**, kondenzátorban. A tárolt $CU^2/2$ energia arányos a kondenzátor kapacitásával, az pedig a geometriai méretektől függ, **a felület nagyságával nő**.

- Előnyök:

- Kis méret.
- Jelentősen **gyorsabban tölthetők**, mint a hagyományos akkumulátorok.
- Az újratöltések száma csaknem végtelen, élettartama hosszú.
- Alacsony hőfokon is működőképes (akár -25C fokig).



Electrochemical double-layer



- **Hátrányok:**

- Egy cella feszültsége **2V** környékén van. Soros kapcsolással növelhető az eredő feszültség, de a modulfeszültség biztonsági okokból most még 200-400V környékén van.
- Tárolási képesség viszonylag kicsi: kisebb mint 100kW.
- **Rövid idejű energiaszolgáltatásra** képes: 10s körül.

- **Tőkeigénye:** Nincs adat.

- **Fejlesztési irányok:**

- Más energiatárolási módokkal való integrálás.
- Nagy feszültségű kialakítás fejlesztése.

- **Hatásfok:**

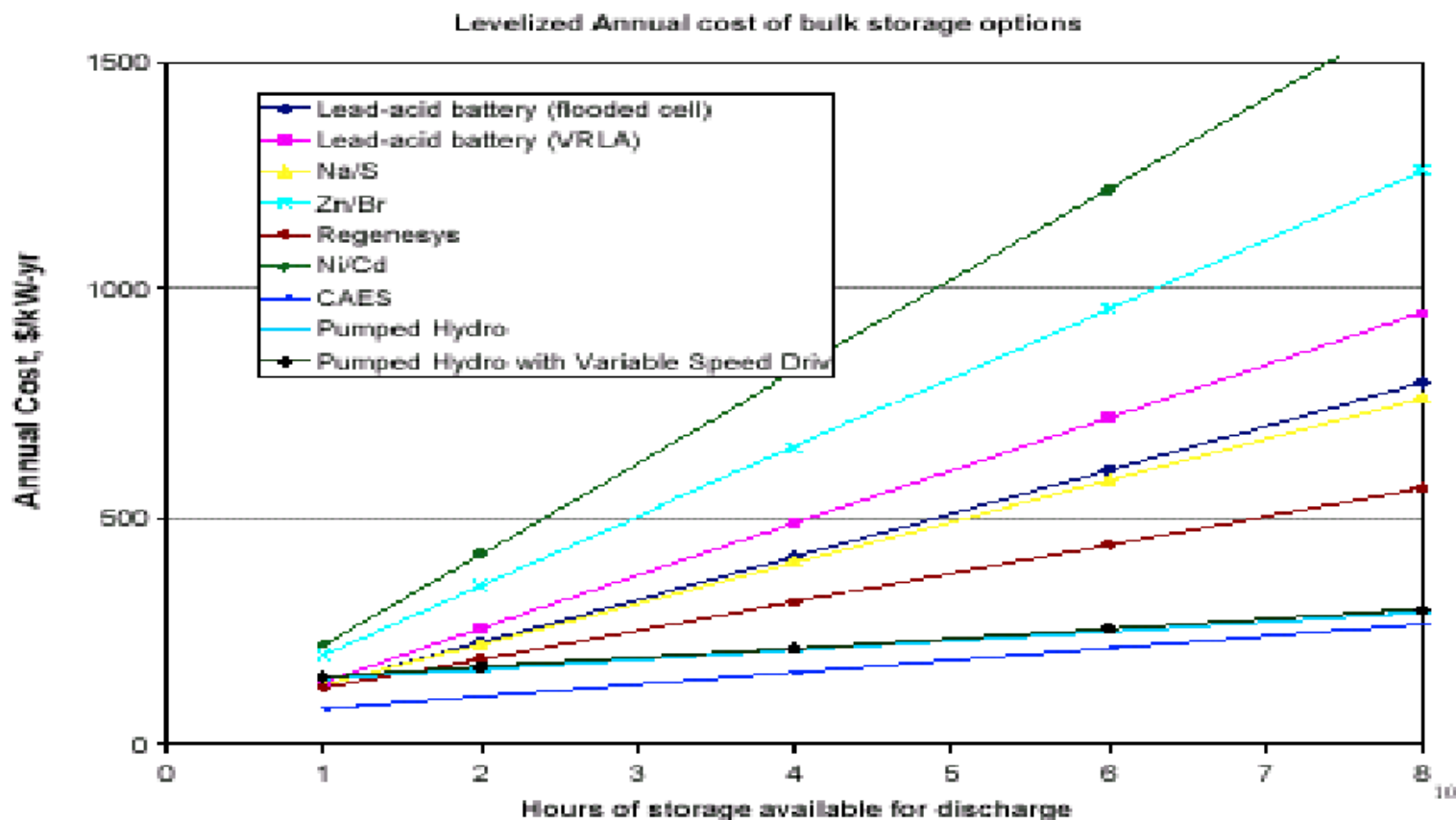
- A közvetlen elektromos energiatárolás miatt magas az eredő hatásfok: 86%.

Az ismertetett energiatárolási módszerek összehasonlítása

Típus	Lendkerék		Szivattyús tározó	Levegő sűrítés	SMES	Akkumulátor		Ultrakapacitás	Hidrogén +üzemanyag-cella**
Altípus	Kis sebességű	Nagy sebességű				Hagyományos	Flow cell		
Jellemző:									
Ár (energiára vetített) \$/kWh	300 [4]	25000 [4]	10 [4]	3 [4]	500 [4]	200 [4]		82000 [4]	
Ár (teljesítményre vetítve) \$/kW	280 [4]	350 [4] 400-800 [5]	1000 [1] 600 [4]	400 [1] 425 [4]	300 [4] >300 [5]	250 [4] 500-100 [5]		300 [4]	
Kisütési határfok	90% [4]	93% [4]	87% [4]	79% [4]	95% [4]	85% [4]		95% [4]	
Eredő határfok		80-85% [1] 89 [3]	70-80% [1] 75 [2]	85 [1]	21% [5]	60-80% [3] 70-90 [4]	60-80% [3]	86 [3]	30-50* [3] 65-85%** [3]
Tárolási idő		20s-20min [3]	3min-3nap [3]	20min-3nap [3]	20s [3]	20s-8h [3]	20s-3nap [3]	20s [3]	3h-4hó [3]
Teljesítmény tartomány MW		0,001-0,25 [1]	300-350 [2] -1000 [4]	20-350 [1] 100-300 [2] >100 [4]	1-3 [1] 1-2 [2]	több 10 [1,4]	75 [3]	-0,1 [1,2]	60-85** [1] 75 **[3] több 10** [4]
Energia sűrűség kWh/kg [10]		10				~28	~25	~15	
Ciklus élettartam (db)		>10000 [10]	>10000 [10]	>10000 [10]		500-pár1000 [4]	Pár 1000 [10]	>10000 [10]	
Élettartam (év)		>20 [5]			20-ig [5]	3-5 [5]			

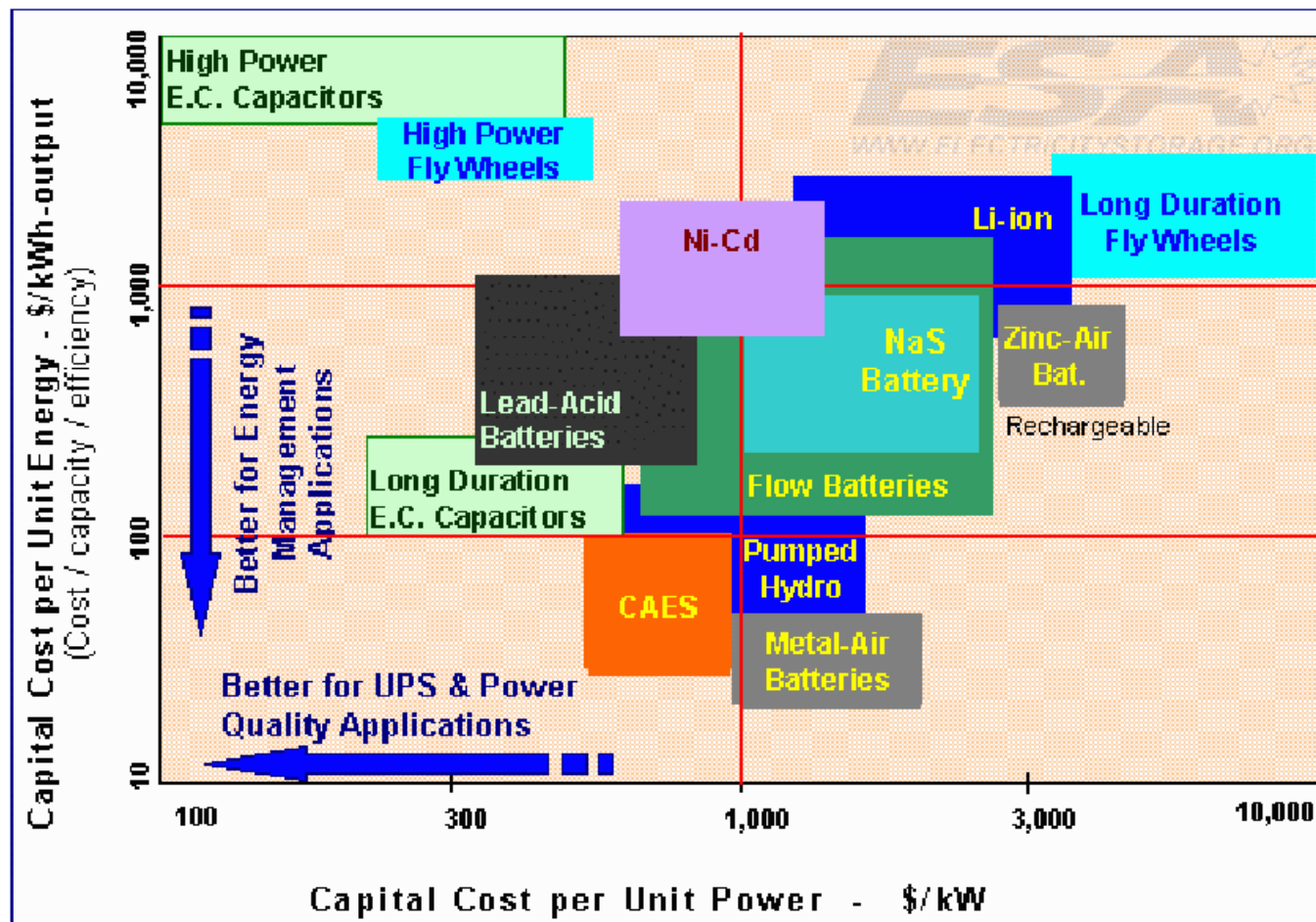
Ár összehasonlítás

Egyenértékű éves költségek összehasonlítása.

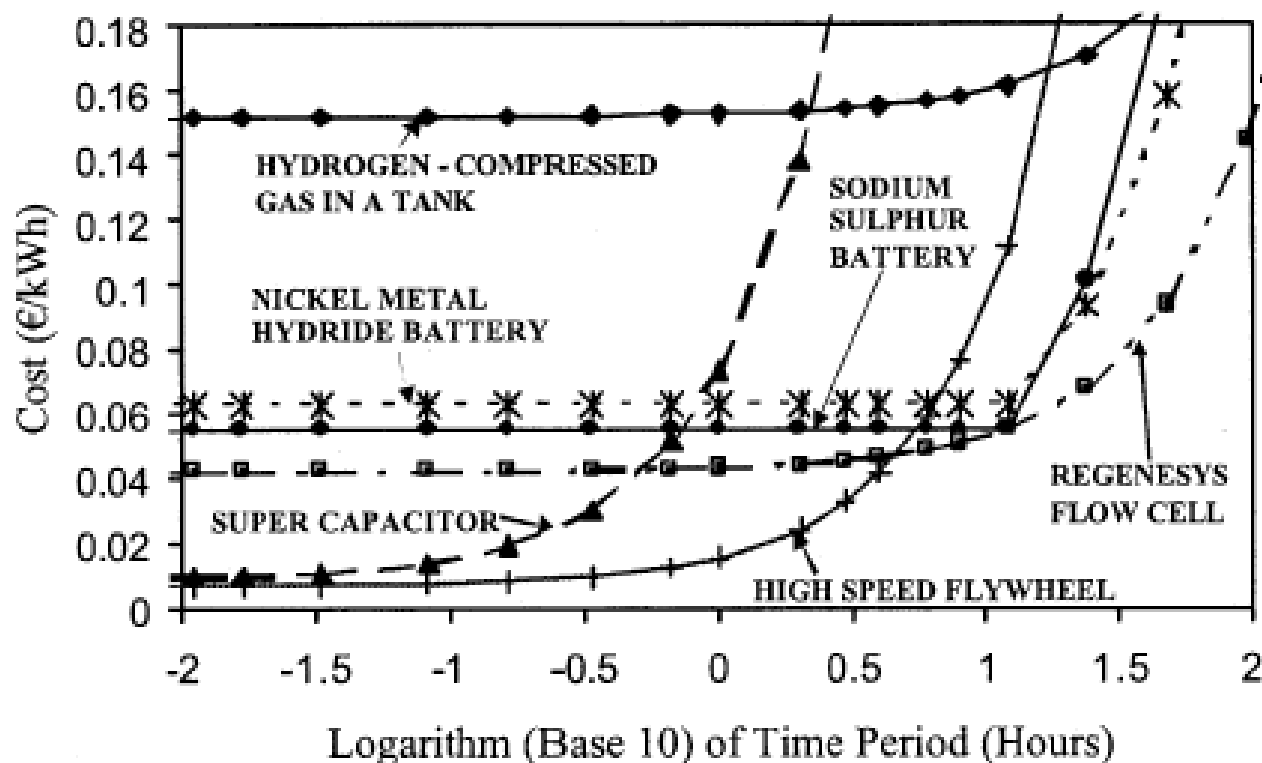


- Az egyenértékű költségek alapján történő összehasonlítás szerint a **legolcsóbbak a levegősűrités és a vízszivattyúzás technológiái**, míg a **legdrágábbaknak a NiCd és a ZnBr akkumulátorok adódnak**.

Beruházási költségek a fajlagos teljesítmény-energia síkon.

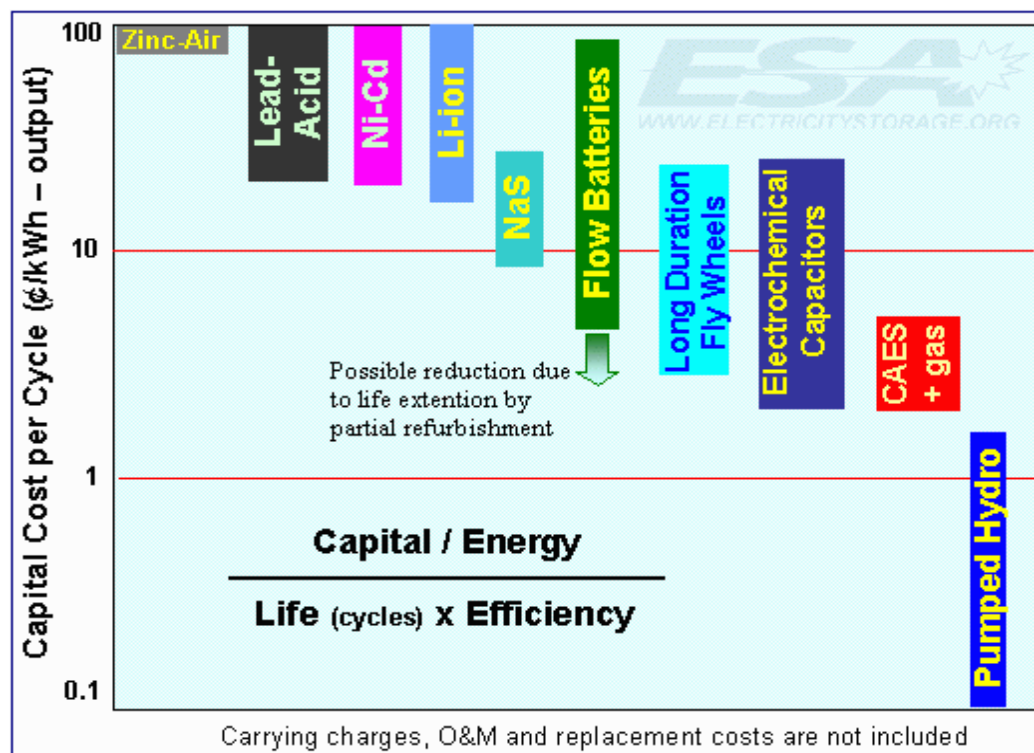


Az energiatárolás költségeinek összehasonlítása.



- Megkönnyíti az összehasonlítást, ha az energiatárolás költségét fejezzük ki a különféle tárolási módokra **a visszanyert energiára vonatkoztatva**.
- Csak a legolcsóbb technológiákat ábrázolták.

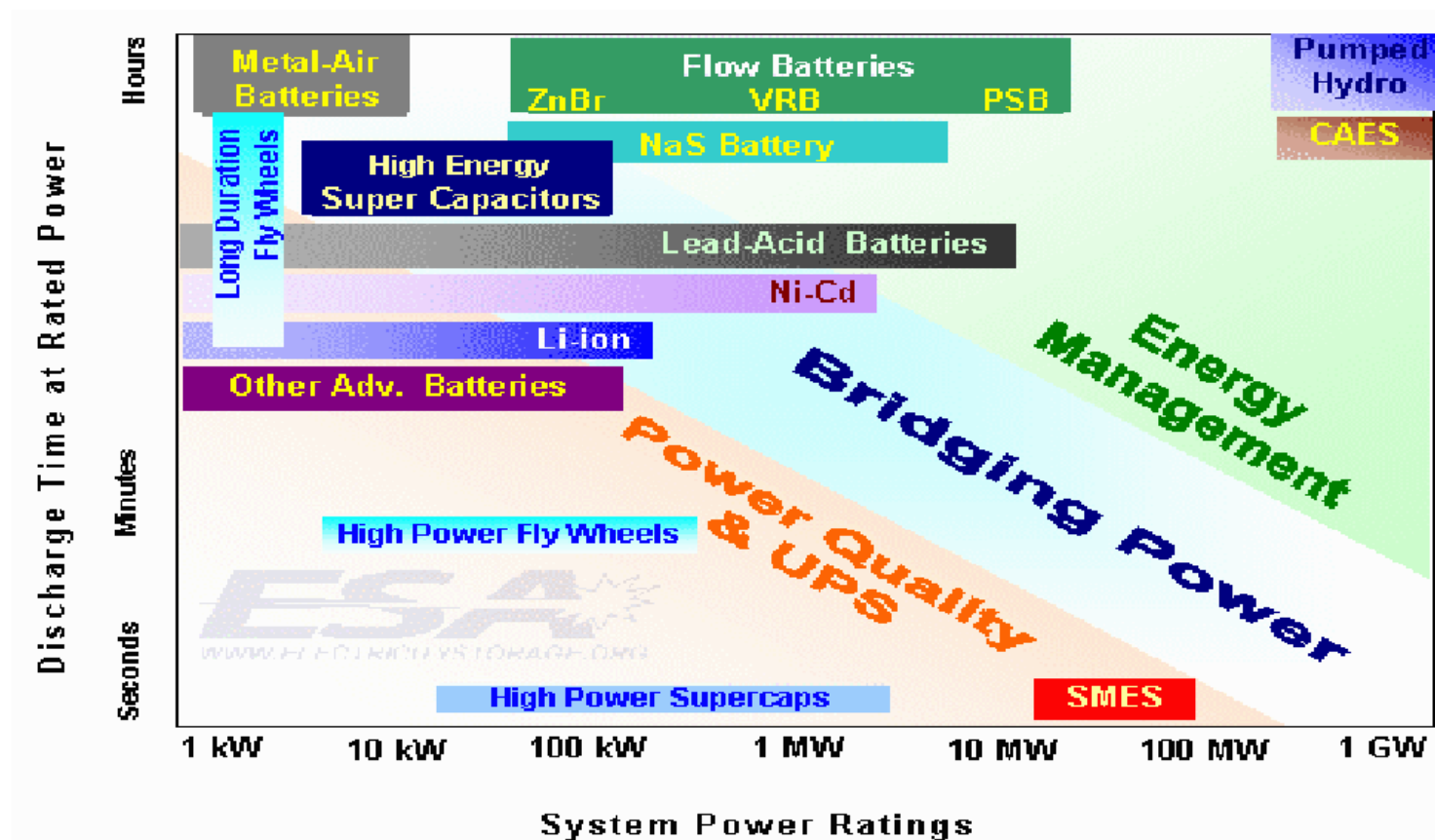
A különféle energiatárolási technológiák összehasonlítása a ciklusonkénti költségek alapján.



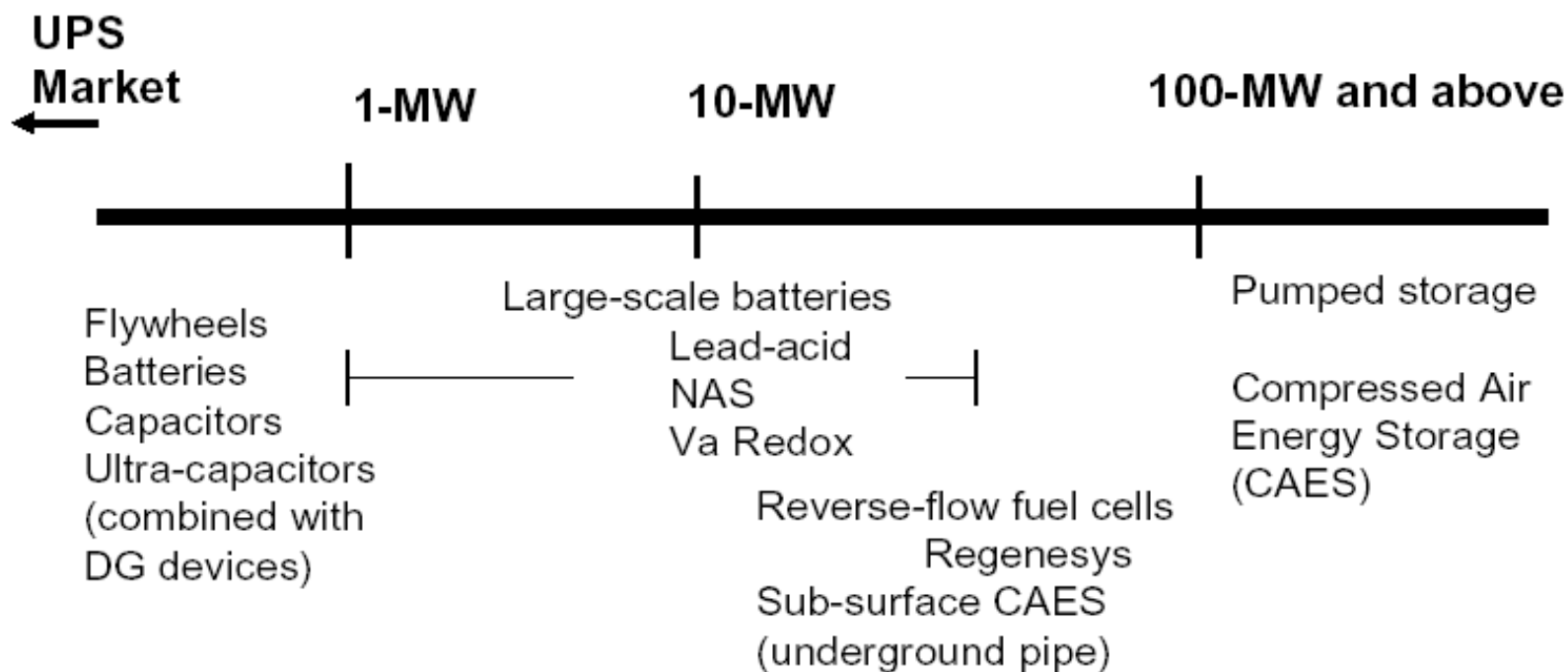
- Az összehasonlítás egyik legjobb szempontja lehet a **ciklusonkénti költség** gyakori ciklusok esetén.
- A vízzivattyúzás és a CAES itt is az alacsonyabb költségek tartományában van, a NiCd pedig ilyen szempontból is drága.

Műszaki paraméterek összehasonlítása

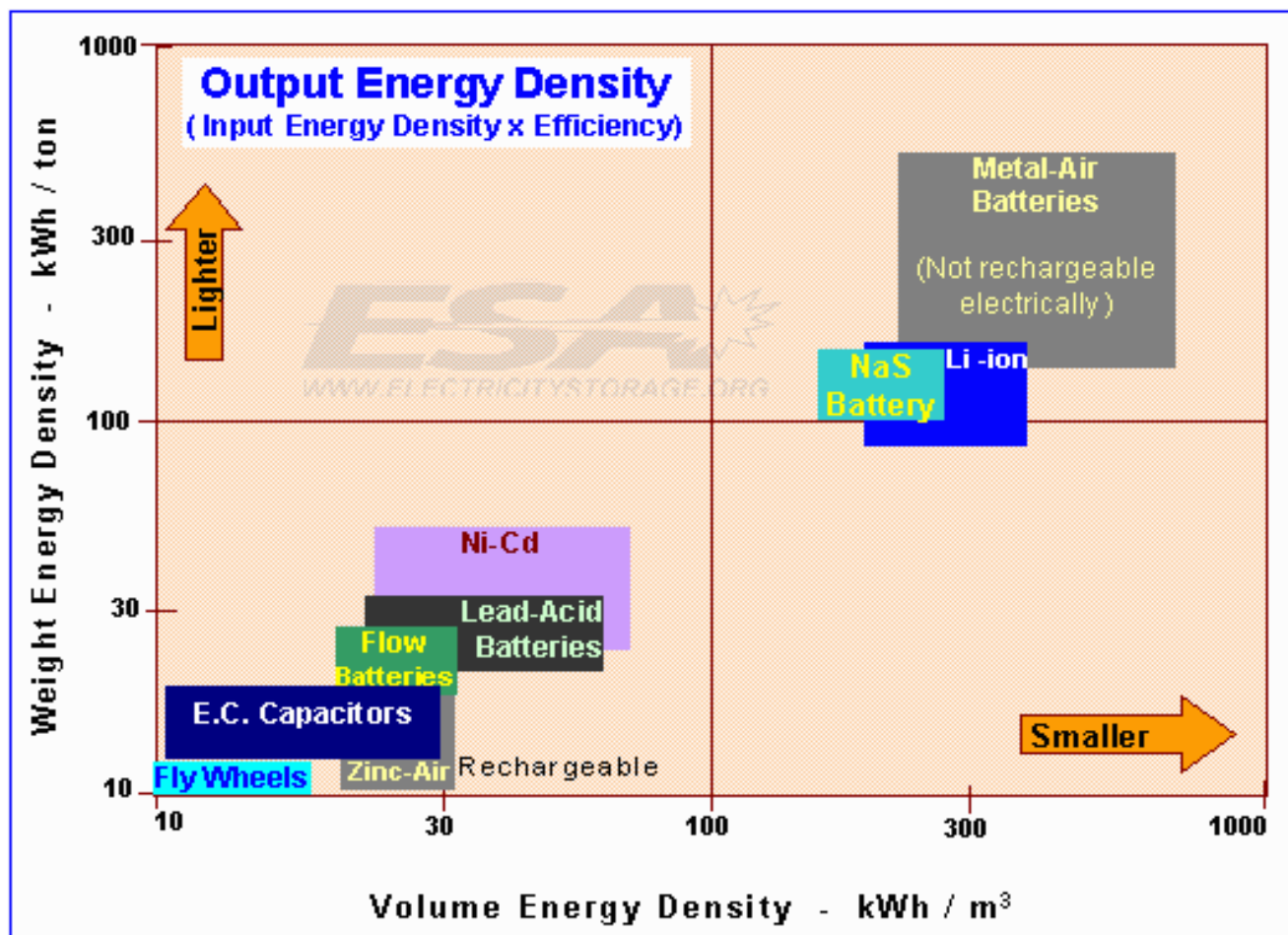
A különféle energiatárolási technológiák alkalmazási területére vetített spektruma a teljesítmény és kisütési idő dimenziókban.



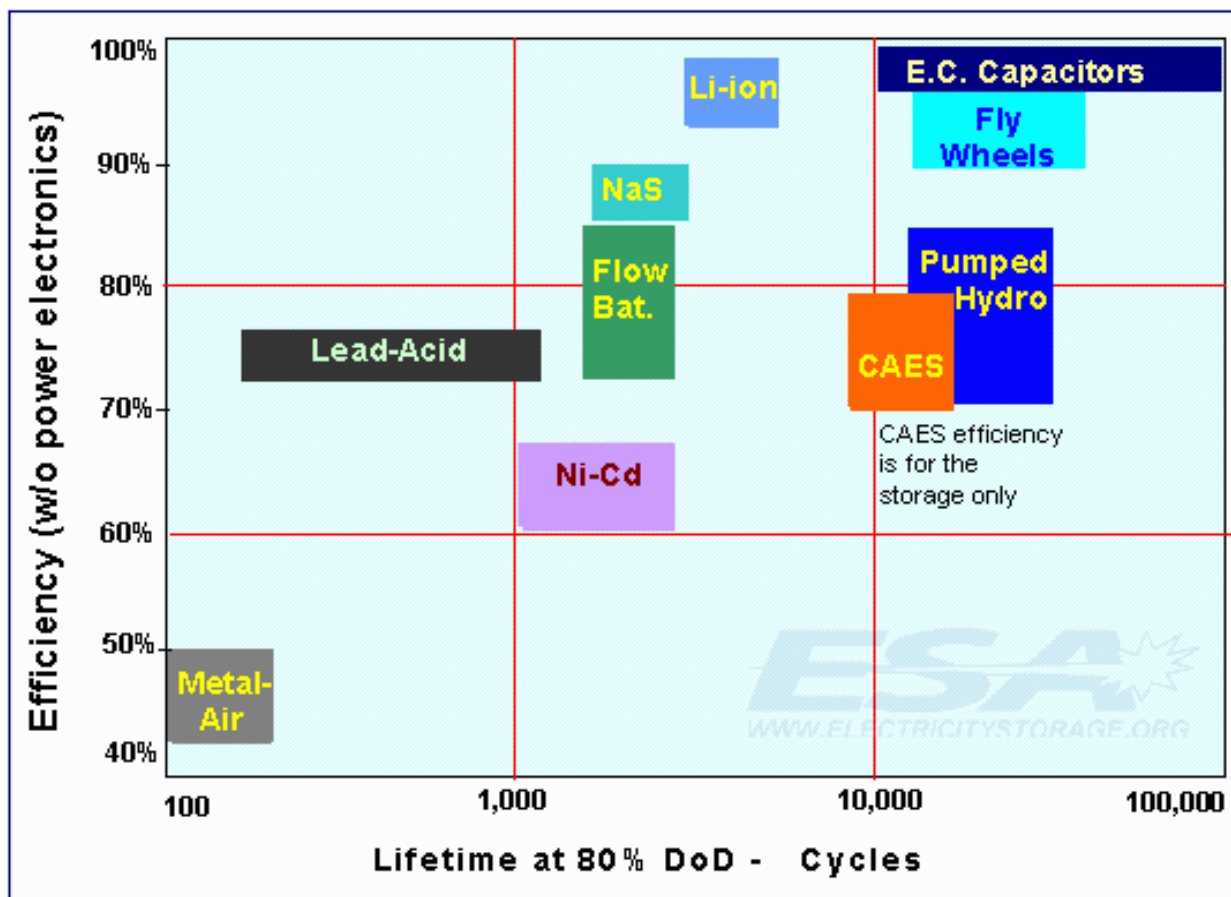
A különféle energiatárolási technológiák teljesítmény spektruma.



A különféle energiatárolási technológiák összehasonlítása a fajlagos súly és méret alapján.



A különféle energiatárolási technológiák összehasonlítása a ciklus élettartam (80% kisütési mélység ciklusokra) és a hatásfok alapján.



Irodalomjegyzék

- [1] Robert B. Schainker: Executive Overview: Energy Storage Options For A Sustainable Energy Future, IEEE, Electric Power Research Institute (EPRI)
- [2] Juan Manuel Carrasco, Leopoldo Garcia Franquelo, Jan T. Bialasiewicz, Eduardo Galván, Ramón C. Portillo Guisado, Ángeles Martín Prats, José Ignacio León and Narciso Moreno-Alfonso: Power-Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources: A Survey, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 53, NO. 4, AUGUST 2006. pp1002-1016.
- [3] John P. Barton and David G. Infield: Energy Storage and Its Use With Intermittent Renewable Energy, IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 19, NO. 2, JUNE 2004. pp441-448.
- [4] Advanced Electricity Storage Technologies Programme. Energy Storage Technologies: A Review Paper, Dec. 2005, Dept. Environ. Heritage, Australian Greenhouse Office. [Online]. Available: <http://www.greenhouse.gov.au/renewable/aest/pubs/aest-review.pdf>
- [5] Robert Hebner and Joseph Beno: Flywheel Batteries Come Around Again, IEEE Spectrum, April 2002. pp46-51.
- [6] James A. McDowall: Opportunities for Electricity Storage in Distributed Generation and Renewables, IEEE, Saft America Inc.
- [7] The wind resource.
- [8] Energy Storage. Why so few pay attention (and what we can do about it) Presented at EESAT 2005, San Francisco by Jason Makansi, President, Pearl Street Inc.
- [9] <http://www.energystoragecouncil.org/>
- [10] <http://www.electricitystorage.org/>