



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

**Szupravezetős csapágyazású, kompakt lendkerekes energiatároló  
optimalizálása**

**PhD értekezés tézisei**

**Kohári Zalán**

**Konzulens:**

**Dr. Vajda István**  
egyetemi tanár, tanszékvezető  
Villamos Energetika Tanszék

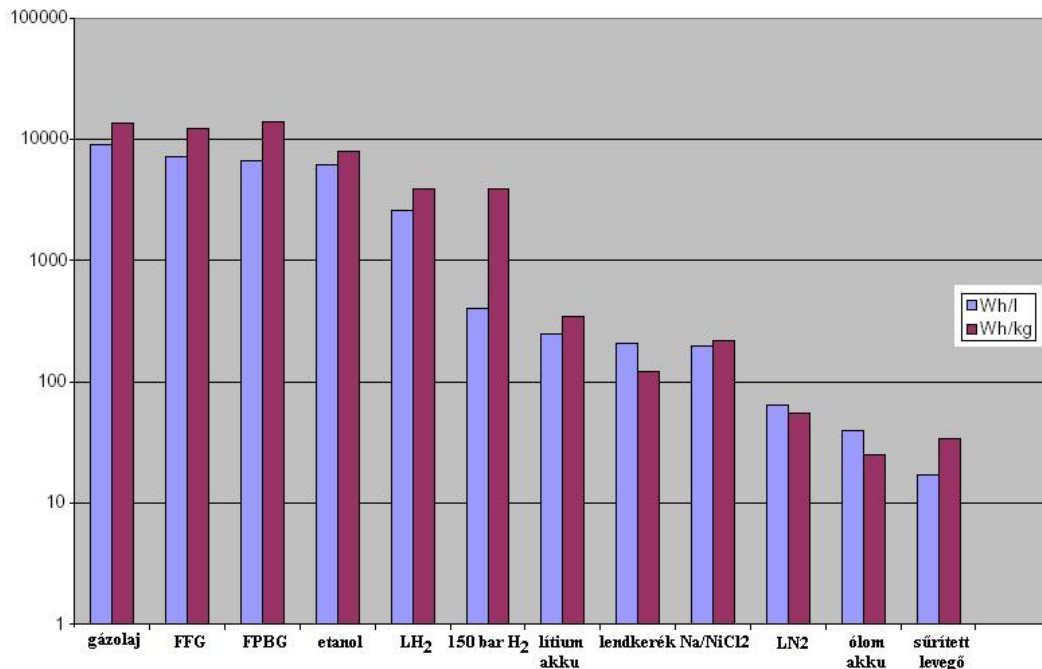
**Budapest, 2010**

## 1. Bevezetés és célkitűzések

Doktori munkámban napjaink egyik égető problémájának, a villamos-energia hatékony tárolásának egyik lehetőségével, a lendkerekes energiatárolókkal foglalkozom. Bár a lendkerekes technológia (fazekaskorong) már az ókori Egyiptomban is ismert volt, kompakt, gazdaságos, jó hatásfokú rendszer megvalósítása villamos energiatárolás céljára ma is komoly nehézségekbe ütközik.

A lendkerekes energiatárolók mozgó alkatrészt tartalmaznak, és egyre inkább elektronizálódó világunkban a mechanikára, - egy forgó tömegre – bízva a tárolási feladatot. Ennek azonban olyan előnyei vannak (élettartam, teljesítménysűrűség), melyeket együttesen semmilyen más technológiával nem lehet elérni.

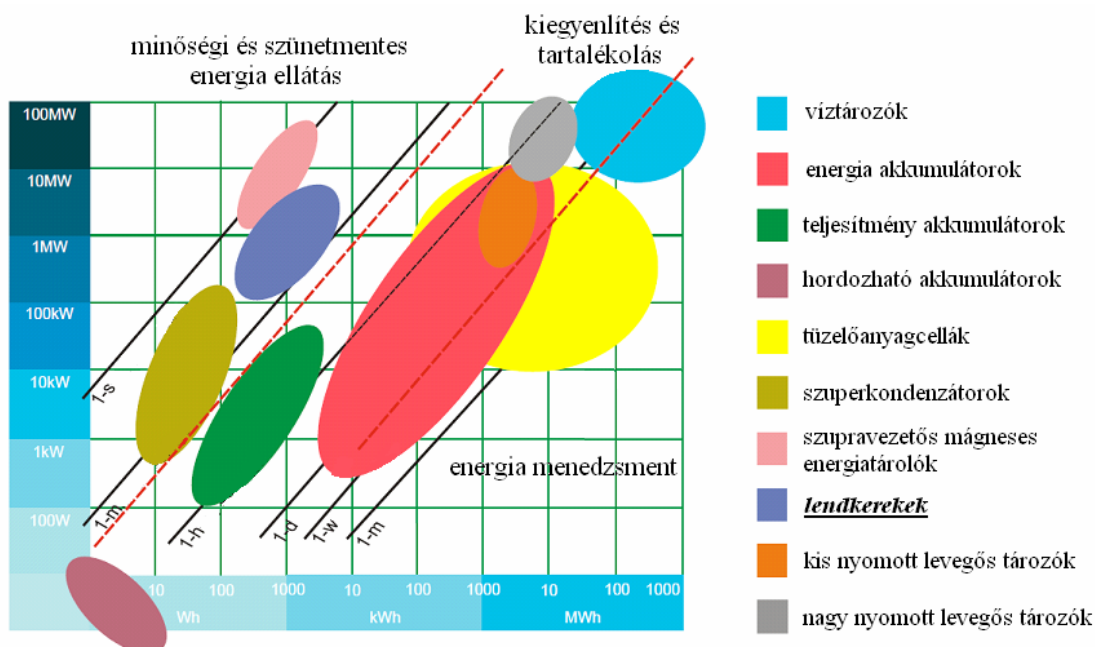
Az energiatárolásnak napjainkban számos módja van, amelyet a lenti ábra a maximálisan elérhető energiasűrűség alapján szemléltet.



1. ábra A különböző energiatárolókkal és üzemanyagokkal megvalósítható tömegre illetve térfogatra vetített maximális energia sűrűség [1]

Az ábra alapján a lendkerekes energiasűrűség szempontjából előkelő helyet foglalnak el az akkumulátorok között, amihez még számos előnyük (hosszú élettartam, kisütés mélységére és környezeti hatásokra való érzéketlenség, jó monitorozhatóság, kisebb környezeti terhelés) társul. Ugyanakkor a fenti ábra nem veszi figyelembe a lendkerék köré építendő rendszert, ami az elérhető maximális energiasűrűséget nagyban csökkenti. Doktorimban erre is kerestem a választ, hogy rendszerszinten mi érhető el.

Alkalmazási szempontból a következő ábra mutatja be a lendkerekes energiatárolás helyzetét.



2. ábra A különböző energiatárolók alkalmazási területei a tárolt energia és a kivehető teljesítmény alapján [2]

Az ábra jól mutatja a jelenlegi helyzetet, hiszen manapság lendkerekes energiatárolókat elsősorban az úgynevezett dinamikus szünetmentes rendszerekben alkalmaznak energiatárolóként, melyek tipikusan 10-60 s áthidalási idővel rendelkeznek. A hosszabb távú tárolásnak elsősorban a nagy veszteségek szabnak határt, hiszen a névleges teljesítmény 1%-nak megfelelő (állandónak feltételezett) üresjárás veszteség már elegendő ahhoz, hogy az energiaellátás nélkül maradt lendkerekes rendszert a névleges áthidalási idejének 100-szorosának megfelelő idő alatt teljesen kisűsse.

Kutatásaim kezdetén tehát két céllal indultam el. Meg akartam mutatni azt, hogy milyen energiasűrűség érhető el lendkerekes energiatárolók esetén, illetve olyan rendszerszintű megoldást akartam találni, amellyel az üresjárás veszteségek igen jelentősen csökkenthetők.

A szupravezetős csapágyazású lendkerekes energiatároló azonban a tárolási elv egyszerűsége ellenére egy igen összetett rendszer, így tervezése és analízise számos különböző mérnöki és fizikus terület ismeretét teszi szükségessé. A legfontosabbak ezek közül:

- vákuumtechnika (légsűrűség csökkentésére)
- alacsony hőmérsékletű technika ( $-180\text{ °C}$  alatti hőmérsékletek előállítása és fenntartása)
- szupravezetők fizikája (lebegtetőerők, csillapítás meghatározása)
- villamos gépek tervezése (energia-átalakító)
- villamos hajtások tervezése (hálózati kapcsolat, motor és generátor üzem)
- áramlástan (légsűrűségi veszteségek folytonos közegben és szabad molekula folyamban)
- szilárdságtan (lendkerék tervezése)
- rotor dinamika (dinamikus mozgások és veszteségek)

Ezek részletes vizsgálatára természetesen nem volt lehetőségem az értekezés keretein belül, így a fontosabb komponensek közül a lendkerék, energia-átalakító, szupravezetős csapágy részletesebb vizsgálatát végeztem el úgy, hogy közben az általam részletesen nem vizsgált egységek működése se váljon lehetetlenné.

Megvizsgáltam magában a lendkerékben rejlő lehetőségeket izotróp és anizotróp (szálerősítésű) anyagok esetén, valamint azt, hogy ezekhez hogyan illeszthető a motor/generátor egység anélkül, hogy az jelentős mechanikai problémákat okozna.

A veszteségek elemzése során arra jutottam, hogy a legnagyobb veszteségforrás az energia-átalakító, ezért kiválasztottam egy vasmentes állórészrel rendelkező, tárcsa konstrukciót, amely teljesítménysűrűség, reagálási idő és a veszteségek szempontjából is megfelelő. E géphez tervezési eljárást dolgoztam ki, valamint több kísérleti modellt is készítettem és teszteltem. Az általam javasolt konstrukcióval az üresjárás veszteségeket a szokásos, névleges teljesítményhez viszonyított 1-2 %-os arányhoz képest több nagyságrenddel lehet csökkenteni, miközben a teljesítménysűrűség a hagyományos, közepes fordulatszámú villamos gépeknek megfelelő szinten marad.

## 2. Motiváció

A fent vázolt rendszer nagy bonyolultságú, sokféle terület ismeretét követeli meg. Kezdő mérnökként éppen ez a sokszínűség fogott meg. Az, hogy olyan részekkel foglalkozhatom, amelyekkel itt az egyetemen is ismerkedtünk, (pl. villamos gép, szupravezetős csapágy), és olyan összetevők is vannak, amelyek számomra akkoriban a misztikum határát súrolták (pl.  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  körüli hőmérsékletek, vákuumtechnika). Gyakorlatilag bárhová nyúltam, csupa érdekességet találtam. A szupravezetőkkel akkoriban számos hallgató és doktorandusz társam is foglalkozott, évente többször is voltak közös nyári iskolák, szemináriumok, amelyek a tudományos célok mellett a barátkozásról, kapcsolatokról, „bulizásról” is szóltak. Ilyesmi, itt Magyarországon, de a számos külföldi meghívott miatt mégis nemzetközi környezetben nagyon felemelő és biztató volt. Már doktori éveim elején Dr. Vajda István konzulensem jóvoltából hosszabb tanulmányutakon vehettem részt. A 2001-es év volt az első nagy próba. A fagyos tél közepén (nem ritkán  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ban több mint fél órát vártunk buszunkra, persze, aki szupravezetéssel foglalkozik, ne rettenjen meg egy kis hidegtől) egy hónapot töltöttem Moszkvában a repüléstani intézetben Lev Kovaljev professzor tanzékén, ahol szupravezetős hiszterézismotorok analitikus számításában működöttünk közre barátommal és akkor még doktorandusz társammal Benkő Lászlóval.

Ugyanezen év végén Oxfordba kerültem 3 hónapos „Supermachines” ösztöndíj keretében, ekkor ismerkedtem meg a véges elem módszer alapjaival, és végeselemes térszámító programot készítettem szupravezetős gépek számításához.

Később jártam Jénában (IPHT), ahol német barátainkkal sok közös mérést végeztünk csapágyakon és szupravezetőkön. Az eredmények alapján távolabbra is eljutottam, az ASC (Applied Superconductivity Conference - legrangosabb amerikai szupravezetős konferencia) és a EUCAS (European Conference on Applied Superconductivity – az európai megfelelője) konferenciákon rendszeresen részt vettem. Jártam Indiában is kétszer. A szupravezetős csapágyazású lendkerekes energiatároló modell, amit demonstrációs célra készítettem hallgatóimmal (elsősorban Nyári Zoltánt illik itt megemlítenem), annyira sikeres lett, hogy Indiába és Izraelbe is eladott belőle egy-egy példányt a tanzék.

Nagyon sokat köszönhettem svéd barátainknak is Sárossy Györgynek és Lars Sjunnesjon-nak akik az elmúlt tíz évben szellemben és pénzügyi támogatásban is folyamatosan a tanzéki szupravezetős csoportunk mögött álltak. Rajtuk keresztül jutottam ki a malmöi Bo01 kiállításra, ahol egy a csoportunk szupravezetős demonstrációs eszközének – ember lebegtető - üzemeltetője és karbantatójaként a gyakorlatban is megtapasztalhattam az emberek újdonság iránti vágyait és kíváncsiságát, valamint ezen újdonságokkal járó gyakorlati nehézségeket is.

Az előbbieket, melyek jó része a doktori munkám első 3-4 évében történt, mind-mind sok lelkesedést öntöttek belém, és rengeteg hasznos tapasztalattal láttak el az elméleti ismeretek mellett.

A későbbi években már egy működő komplett rendszer létrehozásán fáradoztam, amely az ipari hasznosítás első lépése lenne. Ekkor már komoly nehézségekbe ütköztem, sok számomra kezdetben idegen szakterületre kellett bemerészkednem, és a gyártások során gyakran szembesültem elhúzódo, nem megfelelő minőségű teljesítésekkel. Közben a tanszék helyzete is egyre nehezebbé vált a fogyatkozó oktatói és hallgatói létszám miatt egyaránt. A kezdeti játékosság és lelkesedés helyét a komoly elméleti és kísérleti munka váltotta fel, amely kevésbé szórakoztató, ámde jóval eredményesebb és hosszú távon inkább megtérül. Amennyire látom, e munkát csak abbahagyni lehet, befejezni nem. A fejlesztés soha nem áll meg, mindig lesznek részletek, melyeken javítani lehet, és bár egyelőre olyan ifjú követőm nem akadt, aki elkötelezetten együtt folytatná velem azt, amibe belefogtam, de bízom benne, hogy a közeljövőben ilyen személyt vagy szervezetet is találok majd. A célom maradt ami eredetileg is volt, működő ipari rendszer létrehozása.

### 3. A kutatás módszertana

Kutatásaim során minden komponens vizsgálata során a vonatkozó, már ismert analitikus egyenletekből indultam ki. Ezek alapján készítettem analitikus tervezési eljárásokat, modelleket, amelyeket szükség esetén pontosabb, numerikus (végeselemes) modellekkel ellenőriztem, illetve gyakorlati modelleket is készítettem, amelyeket különféle körülmények között a tanszéki laboratóriumban mértem.

Izotróp lendkerekek vizsgálata során a szilárdságtan vonatkozó egyenleteit alkalmazva terveztem lendkerekeket, melyeket véges elemes módszerrel ellenőriztem. Így állapítottam meg, hogy „hasonlósági tétel” fogalmazható meg az egyenszilárdságú tárcsák esetére, ami nagyban megkönnyíti a tervezési eljárást.

Anizotróp lendkerekek vizsgálata során a különféle lendkerék rétegekre vonatkozó szilárdságtani egyenletekből kiindulva állítottam fel egyenletrendszereket megfelelő határfeltételek alapján, és ezek felhasználásával tervezőprogramot is készítettem, amely képes tetszőleges rétegszámú lendkerék analízisére, illetve a szükséges tűréseinek meghatározására (rétegek közötti átfedések). Ennek elsősorban a gyakorlati jelentősége nagy, hiszen a tervezést (esetemben a gyakorlati modellek elkészítését) gyorsítja.

A villamos gép (energia-átalakító) tervezési módszerét a hagyományos, villamos és mágneses igénybevételeken alapuló Liska-Asztalos féle módszer alapján, azt továbbfejlesztve dolgoztam ki. Az üresjárású veszteségek számításához közelítő analitikus képleteket használtam.

A szupravezetős csapágyak méretezéséhez a mágneses tér egyenleteinek különleges peremfeltételek melletti megoldását alkalmaztam, és egy könnyen használható, oktatási célokra is kiválóan alkalmas közelítő számítási módszert hoztam létre.

Az elkészült kísérleti modellekkel elsősorban a veszteségmodellek helyességét tudtam ellenőrizni üresjárású mérések alapján, illetve általában hagyományos csapággal végzett mérésekből pedig a villamos gép megfelelőségét tudtam igazolni.

Doktori munkám talán legnehezebb feladata éppen a gyakorlati részekhez kapcsolódott. Egy összetett rendszer ugyanis rendszerszinten csak akkor vizsgálható a gyakorlatban sikeresen, ha annak minden komponense működik. Emiatt egy lendkerék laboratóriumot kellett felszerelnem vákuumkamrával, hidegtechnikával, mérőberendezésekkel, hogy a kísérleteimet el tudjam végezni. E labor kiépítése sikeresen megtörtént és folyamatos fejlesztés alatt áll.

## 4. Új tudományos eredmények összefoglalása

### 1. tézis (energia-átalakító):

Kéttárcsás forgórészű, vasmentes állórészrel készülő állandómágneses szinkrongépek különböző szempontú optimalizálását végeztem el, kidolgoztam és bemutattam az ehhez szükséges mögöttes elméletet. Megadtam, hogy különböző peremfeltételek mellett az optimum célok eléréséhez hogyan kell megválasztani a gép fontosabb jellemzőit.

(a) Bevezettem a pólusarány és a mágnesarány fogalmát, melyek alapján megmutattam, hogy maximális nyomatók/aktív térfogat arány akkor érhető el, ha a pólusok mágneses fluxusának szórása csekély és ha a mágnesarány  $a_{m, opt} = \frac{\mu_{mr} - \sqrt{\mu_{mr}}}{\mu_{mr} - 1}$ , ahol  $\mu_{mr}$  az alkalmazott állandómágnes relatív permeabilitása [9].

(b) Az általános tervezési egyenletbe a kerületi áram helyére bevezettem az áramsűrűséget és a kitöltési tényezőt, mint igénybevételeket. Megmutattam, hogy ebben az esetben az aktív rész belső és külső átmérőjének optimumát, illetve – átlapolatlan, koncentrikus tekercselés esetén – a tekercsszám és a pólusszám arányát, valamint az általam bevezetett tekercsoldal és tekercsszélesség tényezőket hogyan érdemes megválasztani. Az optimum a fentiekben az aktív térfogatra vonatkoztatott maximális teljesítménysűrűséget illetve maximális hatásfokot jelenti. Az előbbi arányokat több fázisszám egy tartományában adtam meg 2-től 12-ig bezárólag [9].

(c) Közelítő számításokkal és mérésekkel is igazoltam, hogy az általam javasolt vasmentes állórészrel készített villamos gép konstrukció esetében az üresjárási veszteségek több nagyságrenddel csökkenthetőek a hagyományos gépeknél szokásos értékekhez képest. Így azonos nagyságrendbe hozhatóak az üresjárási veszteség komponensek; a villamos gépben keletkező örvényáramú veszteségek, a csapágyveszteségek és - megfelelő mértékű vákuum alkalmazása mellett – a légsúrlódási veszteségek [1], [2], [3], [4].

### 2. tézis (lendkerék):

A lendkerekek lehetséges alakjait vizsgálva bemutattam, hogy homogén, egyenszilárdságú típusú tárcsák esetében a gyakorlatban kialakuló maximális egyenértékű mechanikai feszültség és a 2 D modell szerinti elméleti maximális egyenértékű feszültség aránya csak a tárcsaprofil leíró függvény hely szerinti deriváltjának minimumától függ (a derivált mindenhol negatív). A minimum függvényében a fentiek alapján általánosan, tetszőleges anyagú és alakú, homogén egyenszilárdságú típusú tárcsára megadható egy korrigált maximális energiasűrűség érték. Ezt összevetve az állandó szélességű típusú tárcsával kijelenthető, hogy -0,6-nál kisebb minimális derivált érték esetén a ballasztal lezárt egyenszilárdságú tárcsaprofil alkalmazása az elérhető maximális energiasűrűség szempontjából hátrányosabb mint az állandó szélességű tárcsaprofil [6].

### 3. tézis (szupravezetős csapágyazás):

(a) Általános, fizikai alapokon álló modellt dolgoztam ki egyszerű szupravezetős csapágyak mechanikai viselkedésének leírására, amely megfelelő kifutási egyenlettel párosítva képes visszaadni a gyakorlatban mért kifutási görbéket. A modell jellegre helyesen, kis hibával adja vissza a görbében a kritikus fordulatszám környékén tapasztalt •-jelenséget. A modellhez használható kifutási egyenlet általános alakját is megadtam, illetve megadtam a konkrét alakot nagyvákuum (szabad molekulafolyam) és lamináris áramlás (folytonos közeg) esetére is [1], [5], [7], [8].

(b) Analitikus, a magnetosztatika Maxwell-egyenleteinek közvetlen megoldásán alapuló, közelítő számítási eljárást dolgoztam ki axiális fluxusú szupravezetős csapágyak lebegtető erejének számításához [2].

## 5. Fontosabb publikációim jegyzéke

- [1] Kohári Z, Schmidt I, Veszprémi K: Korszerű lendítőkerekes energiatárolók fejlesztése, Kutatási jelentés, EON-Északdunántúli Áramszolgáltató Zrt., BME VET, 2008
- [2] Kohári Z, Schmidt I, Veszprémi K: Korszerű lendítőkerekes energiatárolók fejlesztése, Kutatási jelentés, EON-Északdunántúli Áramszolgáltató Zrt., BME VET, 2010
- [3] Kohari Z: Test results of a compact disk-type motor/generator unit with superconducting bearings for flywheel energy storage systems with ultra-low idling losses, kivonat elfogadva, ASC 2010, várható megjelenés IEEE Trans App Sup, 2011
- [4] Kohari Z: Test results of a compact superconducting flywheel energy storage with disk-type, permanent magnet motor/generator unit, IEEE Trans App Sup, 19 (3), pp. 2095-98, 2009
- [5] Kohari Z, Tihanyi V, Vajda I: Loss Evaluation and Simulation of Superconducting Magnetic Bearings IEEE Trans App Sup 15 (2) pp2328-31, 2005 (hivatkozások: 1)
- [6] Z Kohari: A lendőkerekes energiatárolás lehetőségei, Elektrotechnika 101:(1) pp10-14, 2008
- [7] Vajda I, Kohari Z, Porjesz T, Benko L, Meerovich V, Sokolovsky, Gawalek W: Operational Characteristics of Energy Storage High Temperature Superconducting Flywheels Considering Time Dependent Processes, Physica C – Superconductivity, 372:(3) pp1500-1505, 2002 (hivatkozások: 4)
- [8] Kohari Z, Vajda I: Spin-down Measurements and Loss Calculation of Multi-layer, Multi-pole HTS Magnetic Bearings, SUPERCONDUCTOR SCIENCE & TECHNOLOGY 18:(2) ppS105-S110, 2005 (hivatkozások: 1)
- [9] Z Kohari: Axiális fluxusú gépek tervezése, Elektrotechnika, 2010, beadás alatt, (a tervezési módszer felhasználásával több diplomamunka is készült)

## 6. Rövid statisztika BME Publikációs Adattár alapján

Saját közlemények száma:13 Független idézetek száma:15 Összegzett impakt faktor:7,004

## 7. A téziszüzetben szereplő ábrákhoz felhasznált irodalmak

---

- 1 John T. S. Irvine The Bourner lecture: Power sources and the new energy economy, Journal of Power Sources, Volume 136, Issue 2, 1 October 2004, Pages 203-207
- 2 „DynaStore” – Energiesparender Schwungmassenspeicher mit HTSL Lagerung für dezentralen Einsatz”, kutatási jelentés, 2007