

Experimentálna charakterizácia strát nízkorýchlostným pasívnym vybíjaním systému ukladania energie do zotrvačníka

Experimental Characterization of Low-Speed Passive Discharge Losses of a Flywheel Energy Storage System

Katedra strojárstva, University of Alberta, 9211-116 St., Edmonton, AB T6G 1H9, Kanada

Autor, ktorému treba adresovať korešpondenciu.

Appl. Mech. 2021, 2 (1), 1-15; <https://doi.org/10.3390/applmech2010001>

Prijaté: 9. novembra 2020 / Upravené: 8. januára 2021 / Prijaté: 8. januára 2021 / Zverejnené: 12. januára 2021

(Tento článok patrí do špeciálneho vydania [exkluzívnych článkov členov redakčnej rady \(EBM\) aplikovanej mechaniky](#))

Abstraktné

Skladovanie energie zotrvačníka má široké využitie v energetických sieťach a doprave. Prijatie vysokovýkonných komponentov urobilo z tejto technológie životaschopnú alternatívu na nahradenie alebo doplnenie iných úložných zariadení. Systémy akumulácie energie zotrvačníka podliehajú pasívnemu vybíjaniu spôsobenému predovšetkým stratami elektrického stroja, valivým trením ložiska aerodynamickým odporom rotora zotrvačníka. V tejto štúdii sú prezentované merania pre experimenty s úplným výbojom pomocou systému zotrvačníka svákuovým krytom. Najvhodnejšie rovnice sa použili na testovacie údaje a porovnali sa s analytickými modelmi. Analýza najvhodnejších rovníc naznačuje, že môžu slúžiť ako empirické modely na aproximáciu pasívneho výboja za daných podmienok. Straty ložísk, ktoré sa menili lineárne s rýchlosťou, ale inak neboli ovplyvnené počas experimentov, boli väčšie ako aerodynamický odpor pri nízkych tlakoch vzduchu a nízkych rýchlostiach. Aerodynamický odpor sa stal významným, keď rýchlosť prekročila približne 3400 ot./min. Zistilo sa, že elektrický stroj je najvýznamnejším zdrojom pasívneho výboja pri všetkých rýchlostiach a tlakoch. Na základe týchto zistení sa odporúča udržiavať nízkotlakové prostredie v kryte zotrvačníka a vždy, keď je to možné, odpojiť elektrický stroj od rotora, aby sa eliminovali súvisiace straty. Zistilo sa, že elektrický stroj je najvýznamnejším zdrojom pasívneho výboja pri všetkých rýchlostiach a tlakoch. Na základe týchto zistení sa odporúča udržiavať nízkotlakové prostredie v kryte zotrvačníka a vždy, keď je to možné, odpojiť elektrický stroj od rotora, aby sa eliminovali súvisiace straty. Zistilo sa, že elektrický stroj je najvýznamnejším zdrojom pasívneho výboja pri všetkých rýchlostiach a tlakoch. Na základe týchto zistení sa odporúča udržiavať nízkotlakové prostredie v kryte zotrvačníka a vždy, keď je to možné, odpojiť elektrický stroj od rotora, aby sa eliminovali súvisiace straty.

Kľúčové slová: [ukladanie energie zotrvačníka](#) ; [pasívny výboj](#) ; [experimentálna charakterizácia](#)

1. Úvod

Kvôli prerušovaniu výroby veternej a solárnej energie je na uspokojenie dopytu potrebná značná kapacita skladovania energie. Nekonzistentná výroba energie predstavuje výzvy v oblasti vyrovnávania záťaže, spoľahlivosti elektrickej siete a kvality energie. Očakáva sa, že systémy skladovania energie poskytnú riešenie týchto problémov, ale sú veľmi málo využívané a chýba im rozmanitosť. V Spojených štátoch len 2,5 % dodanej elektrickej energie využíva skladovanie energie ako kritickú zložku na udržanie spoľahlivej dodávky energie, zatiaľ čo ostatné vedúce krajiny sú bližšie k 10 % a 15 %, Nemecko a Japonsko. Ďalej, prevažná väčšina akumulácie kapacity je v prečerpávacích vodných elektrárnach, pričom stlačený vzduch a elektrochemické batérie výrazne zaostávajú [1 , 2].

Systémy akumulácie energie zotrvačníka (FESS) boli implementované v elektrických sieťach na zníženie výkonových špičiek, zabezpečenie regulácie frekvencie, zlepšenie kvality energie a slúžiacie ako systémy neprerušovaného napájania (UPS) vďaka niekoľkým výhodným vlastnostiam technológie FESS. To zahŕňa vysoké rýchlosti nabíjania a vybíjania, životnosť v rozmedzí od 10 do 20 rokov a vysokú špecifickú energiu [3]. Okrem toho nezaznamenávajú účinky hĺbky vybitia a majú relatívne vysokú účinnosť cyklu – až 95 % v závislosti od elektrických komponentov [2].

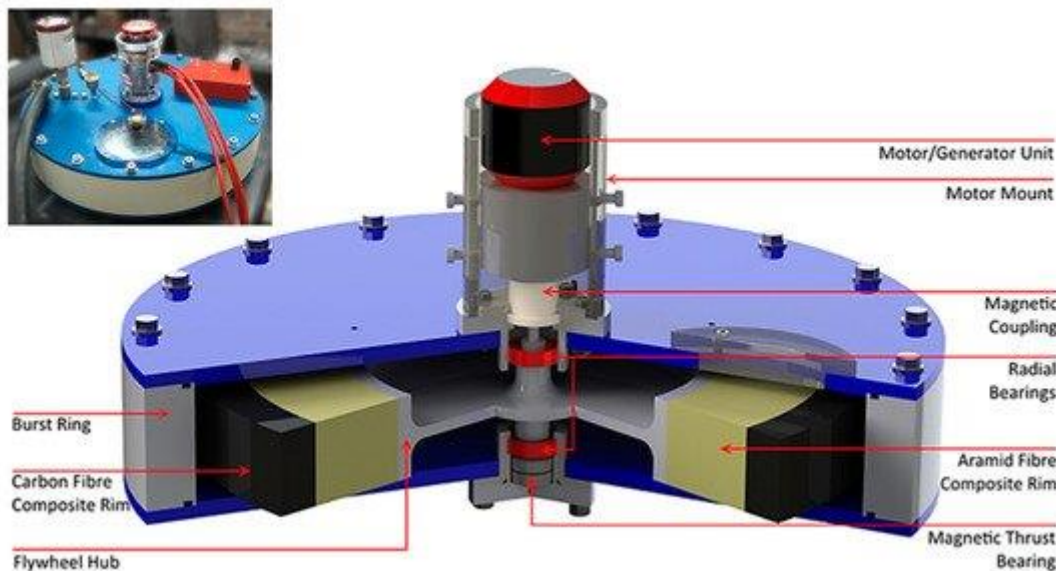
Aj keď má FESS širokú škálu aplikácií v mnohých odvetviach, technológia sa stále vyvíja. Mnohé súčasné štúdie FESS sa zamerali na maximalizáciu hustoty energie, času skladovania alebo iných metrik výkonu pomocou špecializovaných zariadení, ako sú vysokovýkonné vákuové pumpy a supravodivé

magnetické ložiská (SMB). Toto úsilie umožnilo vysoké alebo ultra vysoké úrovne vákua a nízke pasívne výbojové ložiská [4 , 5]. Aj keď sa takéto úrovne vákua a ložiská správne posudzujú tak, aby maximalizovali výkon systému, v súčasnosti to nie je ekonomicky uskutočniteľný prístup k rozšíreniu adaptácie FESS do oblastí, ako je doprava, domáca energia, mikrosiete a malé komerčné systémy. dodatočné náklady, elektrické a finančné, na prevádzku tohto zariadenia.

Nízkonákladové FESS v malom meradle predstavujú niekoľko jedinečných výziev, ktoré sa neobjavujú v systémoch úžitkového rozsahu. Mechanické ložiská sú napríklad najpraktickejšou voľbou pre nízkonákladové FESS, pretože magnetické ložiská, najmä aktívne alebo SMB, pravdepodobne bránia realizovateľnému dizajnu. Nízkonákladové FESS si nemôžu dovoliť potrebné vybavenie na dosiahnutie úrovne vákua, o ktorej sa hovorí v [5], alebo využiť SMB diskutované Coombsom a kol. [6] a Xia a kol. [7]. Je preto žiaduce prevádzkovať lacné FESS pri nižších úrovniach vákua a s mechanickými ložiskami. Kvôli týmto obmedzeniam je pasívne vybíjanie v nízkonákladových systémoch vyššie v porovnaní s vysokovýkonnými systémami diskutovanými vyššie. Aj keď je dôležité uznať prínos predchádzajúcich štúdií [4 , 8], výskum zameraný špecificky na nízkonákladové straty pasívnym výbojom FESS sú zriedkavé. Táto štúdia charakterizuje tieto straty tým, že najprv lepšie pochopí každý primárny zdroj pasívneho výboja a potom experimentálne izoluje každý zdroj a analyzuje ich charakteristiky.

2. Experimentálne nastavenie

Experimentálna štúdia sa uskutočnila s použitím zariadenia na ukladanie energie zotrvačníka vyrobeného na mieru, znázomeného na [obrázku 1](#) . Tento FESS je zmenšený technologický demonštrátor pre jednotku na uskladnenie energie s nominálnou kapacitou 1,0 kWh pre aplikáciu rekuperačného brzdenia v ľahkej koľajovej doprave. Konkrétne, rotor zobrazený na [obrázku 1](#) je zmenšený na 24 % v axiálnej výške, pričom má rovnaký vonkajší priemer rotora ako dizajn plnej veľkosti. Zatiaľ čo konštrukčná maximálna rýchlosť rotora je 30 000 ot./min ($3\,141\text{ s}^{-1}$), zariadenie bolo prevádzkované pri nižších rýchlostiach kvôli bezpečnosti. Ďalej sú opísané primárne komponenty tohto FESS, tj kryt, rotor, ložiská a elektrický stroj (jednotka motor/generátor), ako aj prístrojové vybavenie a pomocné vybavenie.



Obrázok 1. Zariadenie na uchovávanie energie zotrvačníka použité v tejto štúdii: pohľad v reze s označenými primárnymi komponentmi a vložkou zobrazujúcou fotografiu skutočného zariadenia.

2.1. Bývanie

Puzdro zotrvačníka má tri hlavné funkcie: (i) poskytovanie montážnych plôch pre elektrický stroj, zostavu nosného rotora, prístrojové vybavenie a akékoľvek ďalšie potrebné komponenty; (ii) udržiavanie rotora a iných rotujúcich komponentov vo vákuovom prostredí; a (iii) slúži ako bezpečnostný prvok v prípade katastrofického zlyhania rotora alebo ložiska. Kryt znázomený na [obrázku 1](#) je skonštruovaný z

horného a spodného hliníkového plechu poskytujúceho všetky montážne plochy a 30 mm hrubého valcového oceleového krúžku pre bezpečnosť. Spodná doska má dvojdielny ložiskový prípravok, videný ako dve spojené časti obklopujúce spodnú ložiskovú zostavu, pozostávajúce z radiálneho ložiska a magnetického axiálneho ložiska. Horná doska obsahuje jednodielny prípravok s horným radiálnym ložiskom, ako aj elektrický stroj a nástroje.

2.2. Rotor

Rotor zotrvačníka je konštruovaný ako zalisovaná zostava z troch komponentov, tj dvoch kompozitných ráfikov a hliníkového náboja. Táto konštrukcia sviacerými okrajmi zvyšuje špecifickú hustotu energie rotora a znižuje náklady na materiál [9, 10, 11], čo sú kľúčové ciele pre nízkonákladový FESS. Celková hmotnosť rotora je 7,75 kg a maximálny polomer 200 mm. Vonkajší ráfik je vyrobený z epoxidového polyméru vystuženého uhlíkovými vláknami (CFRP). Vnútorný ráfik je zložený z epoxidového polyméru vystuženého aramidovými vláknami (AFRP). Náboj je vyrobený z hliníka. Náboj je vybavený integrovaným hriadeľom s radiálnymi ložiskovými montážnymi plochami na vrchnej a spodnej strane, magnetickým prítlačným ložiskovým držiakom naskrutkovaným do spodnej časti a magnetickým spojovacím stĺpikom v hornej časti. Základné vlastnosti komponentov primárneho rotora sú zhrnuté v [tabuľke 1](#).

Tabuľka 1. Rozmery rotora zotrvačníka a vlastnosti materiálu.

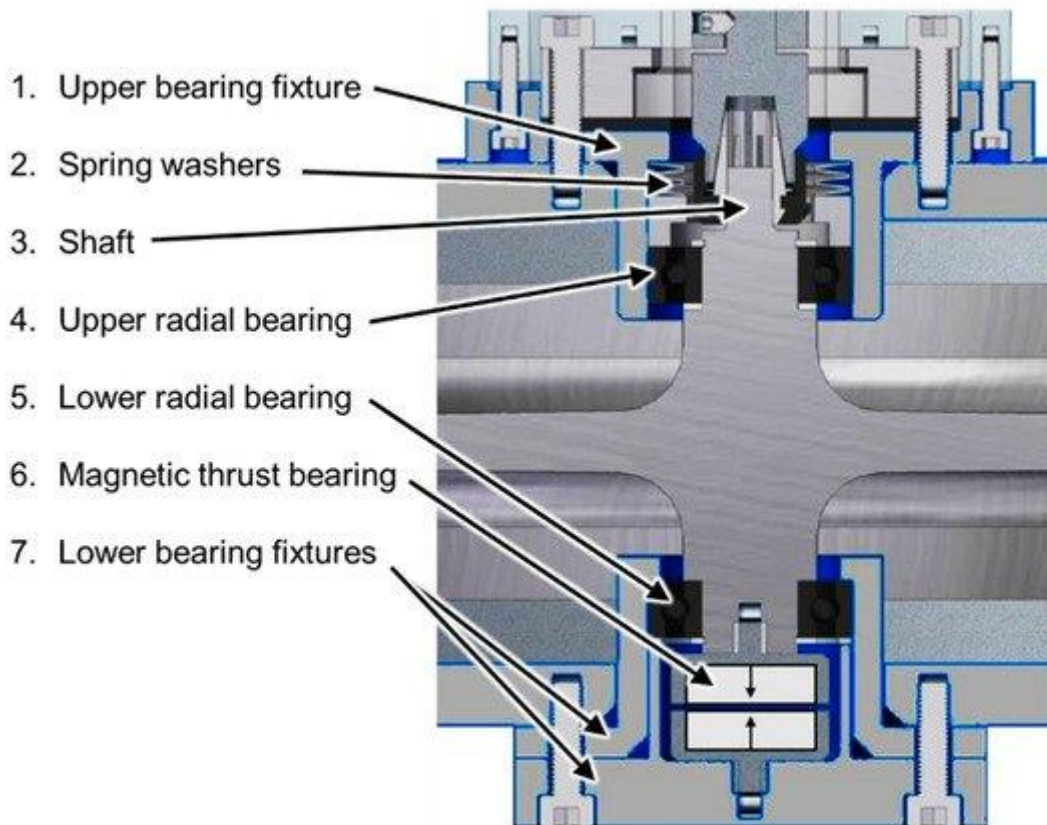
Table 1. Flywheel rotor dimensions and material properties.

Component ¹	Inner Radius	Density
Outer CFRP rim	0.170 m	1569 kg/m ³
Inner AFRP rim	0.110 m	1380 kg/m ³
Aluminum hub rim	0.100 m	2700 kg/m ³

¹ Axial height of rims and hub is 0.050 m.

2.3. Ložiská

Detailný pohľad v reze na nosný systém je znázomený na [obr. 1](#). Rotor je axiálne podopretý dôveryhodným ložiskom pozostávajúcim z dvoch permanentných neodýmových magnetov s protihľými magnetickými poľami a radiálne dvoma guľkovými ložiskami z nitridu kremíka 6002 (Bearings Canada, Concord, ON, Kanada) s kľetkou z PTFE. Zostava horného ložiska má sériu pružných podložiek, ktoré tlačia na vonkajší krúžok ložiska, aby vytvorili malé, približne 60 N, axiálne predpätie, ktoré je dôležité na stabilizáciu horného ložiska a minimalizáciu vibrácií.



Obrázok 2. Schéma soznačenými komponentmi horných a spodných podzostáv ložísk.

Magnety axiálneho ložiska, položka 6 na [obrázku 2](#), nesú väčšinu, ale nie celú hmotnosť rotora, aby sa znížilo valivé trenie v guľkových ložiskách. Podobne ako pri funkcii pružných podložiek pôsobí na spodné ložisko axiálna sila zodpovedajúca približne 30 % hmotnosti rotora. Axiálne magnetické ložiská nie sú samostrediace, takže výsledná nestabilita vytvára malú radiálnu silu, ktorá okrajovo zvyšuje straty trením a cyklické zaťaženie ložísk.

2.4. Elektrický stroj

Elektrický stroj je bezkomutátorový synchrónny stroj s permanentným magnetom (Pyro 850-50L, Kontronik, Rottenburg-Hailfingen, Nemecko). Motor má menovité otáčky 30 000 ot./min., maximálny krútiaci moment 2 Nm a maximálny výkon 6 kW. Energia je dodávaná do motora prostredníctvom elektronického regulátora otáčok Kontronik Kosmik 160LV, ktorý je napájaný napájacím zdrojom RT2000 s výkonom 2 kW pri 56 V (Lucent Technologies Inc., Murray Hill, NJ, USA). Elektrický stroj, ktorý beží v okolitých podmienkach (tj mimo vákuového krytu), je spojený s rotorom cez kryt pomocou pasívnej magnetickej spojky (pozri [obrázok 1](#)). Magnetická spojka je namontovaná na kryte, aby poskytovala vákuotesný systém.

2.5. Prístrojové vybavenie a pomocné vybavenie

Vo vnútri krytu FESS sa udržiava vákuum, ktoré pracuje na alebo pod 133 Pa (1 Torr). Vákuový systém v kombinácii s mechanickou vákuovou pumpou (Trivac D8A, Leybold, Kolín nad Rýnom, Nemecko)

poskytuje účinný tlakový rozsah 4 Pa až 1,33 kPa, ktorý možno presne udržiavať v rámci 0,01 Pa, keď je v rovnováhe. K FESS sú pripojené dva vákuové senzory na nepretržité monitorovanie tlaku vo vnútri krytu počas testovania. Na monitorovanie tlaku od atmosférického tlaku (101,3 kPa) do 133,3 Pa sa používa vákuomer Baratron (MKS Instruments, Andover, MA, USA), ktorý je pripojený k regulátoru tlakomeru (CA SR5 SP411 11 0, Wika Instruments, Edmonton, AB, Kanada). Po druhé, termočlánkový vákuomer sa používa pre tlaky od 133,3 Pa do 0,133 Pa (prevodník č. 270006 pripojený k regulátoru ionizačného tlakomeru Series270, Granville Phillips, Longmont, CO, USA). Rýchlosť rotora FESS je monitorovaná na mieru vyrobeným optickým snímačom rýchlosti, ktorý deteguje okolité svetlo odrážajúce sa od jedného reflexného bodu na rotore. Meracie zariadenie je pripojené k systému zberu dát NI USB-6009 (National Instruments, Austin, TX, USA). Pre túto štúdiu bola vzorkovacia frekvencia 1 mss presnosťou 1 Hz. Údaje boli zaznamenané pomocou osobného počítača.

3. Experimentálna metodika

S prevádzkou uvažovaného FESS sú spojené tri primárne zdroje pasívnych výbojových strát: (i) elektromotorické a mechanické straty v elektrickom stroji, (ii) valivé trenie ložiska a (iii) aerodynamický odpor pôsobiaci na spriadací rotor. známy ako vietor. V tejto štúdii magnetická väzba umožňuje úplné odpojenie elektrického stroja od rotora, takže elektrický stroj neinteraguje s rotorom a súvisiace straty sa tak znížia na nulu. Preto môžu byť ložiskové a aerodynamické straty charakterizované izolovaným spôsobom pri rôznych úrovniach vákuu. [Tabuľka 2](#) poskytuje prehľad experimentálneho plánu.

Tabuľka 2. Experimentálne kombinácie liečby pre všetky uskutočnené experimenty.

Table 2. Experiment treatment combinations for all experiments conducted.

Test Case	Motor Position	Vacuum Level (Pa (torr))	Vacuum Level and Flow Regime
1	Uncoupled	27 (0.2)	Medium vacuum, Knudsen
2		67 (0.5)	Medium vacuum, Knudsen
3		133 (1)	Rough vacuum, continuum
4		1333 (10)	Rough vacuum, continuum
5	Coupled	27 (0.2)	Medium vacuum, Knudsen
6		67 (0.5)	Medium vacuum, Knudsen
7		133 (1)	Rough vacuum, continuum

Experimenty sa uskutočňovali tak, že sa najprv nastavil podtlak v kryte na špecifikovanú úroveň. Skúšobné vákuové tlaky boli v rozsahu stredného (väčšieho ako 3 kPa) a hrubého vákuu (3 kPa až 0,1 Pa), čo zodpovedalo režimom kontinua a Knudsenovmu prúdeniu, čo umožňuje zväziť, že vzduch obklopujúci rotor spĺňa predpoklady kontinua pre analýzy.

Akonáhle bol stanovený požadovaný vákuový tlak, elektrický stroj bol napájaný, kým rotor nedosiahol maximálnu skúšobnú rýchlosť 5000 ot./min. (524 s⁻¹). Po dosiahnutí cieľovej rýchlosti sa systém nechal voľne točiť, až kým sa uložená energia úplne nevybila. Pri pokusoch s elektrickým strojom v odpojenej polohe bol elektrický stroj po dosiahnutí cieľovej rýchlosti odpojený od rotora. Počas experimentov sa rýchlosť rotora a podtlak v kryte monitorovali a zaznamenávali systémom zberu údajov.

4. Modely skladovania a vybijania energie

4.1. Ukladanie a strata energie

Energia uložená FESS závisí od momentu zotrvačnosti rotora I a uhlovej rýchlosti ω . Moment zotrvačnosti sa určuje pomocou:

$$j_{\text{celkom}} = j_{\text{stredisko}} + \sum j_{\text{ráfik}}$$

(1)

Ak vezmeme do úvahy každý ráfik ako valec s vonkajším polomerom r_o , vnútorným polomerom r_i a axiálnou výškou h , moment zotrvačnosti každého ráfika sa zistí ako:

$$j_{\text{ráfik}} = \frac{1}{2} \rho \pi h (r_o^4 - r_i^4),$$

(2)

kde ρ_m je hustota materiálu. Podobne komplikovanejšia geometria náboja, aproximovaná ako hrubostenný valec spojený s centrálnym tenkým diskom, je daná ako:

$$j_{\text{astrydisko}} = 12\rho_m\pi(h(r^4_0 - r^4_i) + h_{\text{disk}}r^4_i),$$

(3)

kde h_{disk} je hrúbka centrálnej časti náboja. Kinetická energia uložená rotujúcim rotorom v akomkoľvek časovom okamihu je teda:

$$E_{\text{rotor}}(t) = 12j_{\text{astrydisko}}\omega(t)^2.$$

(4)

Pretože uhlová rýchlosť rotora je monitorovaná nepretržite počas experimentov s pasívnym výbojom, uloženú energiu možno nájsť kedykoľvek počas experimentu pomocou rovnice (4). Ďalej, energetické straty v dôsledku pasívneho výtok, E_{PD} , po danom časovom intervale je rozdiel medzi počiatočnou energiou, E_0 , a uložené energie v období, špecifické, tj:

$$E_{\text{PD}}(t) = E_0 - E_{\text{rotor}}(t),$$

(5)

kde $E_0 = E_{\text{rotor}}(t=0)$. Strata energie v dôsledku pasívneho vybíjania sa ďalej delí na tri primárne zdroje, o ktorých sa uvažuje v tejto štúdií:

$$E_{\text{PD}} = E_{\text{AD}} + E_{\text{MB}} + E_{\text{EM}},$$

(6)

kde E_{AD} , E_{MB} a E_{EM} sú straty v dôsledku zodpovedajúco aerodynamický odpor od zostávajúceho v puzdre, valivého trenia v mechanických ložiskách a otáčajúceho sa elektrického stroja vzduchu. Straty pripisované každému zdroju sa rozlišujú systematickým vykonávaním experimentov a vyhodnocovaním zozbieraných testovacích údajov.

Celková strata energie počas určitého časového okamihu je pasívny výboj (miera straty energie), ako je opísané v rovnici (7). V tejto štúdií bol pasívny výboj aproximovaný z testovacích údajov pomocou rozdielového kvocientu. Podobné výrazy možno odvodiť pre každú z vyššie uvedených zložiek straty:

$$dE_{\text{PD}}/dt = PP_{\text{PD}} \approx E_{\text{PD}}(t_2) - E_{\text{PD}}(t_1) / t_2 - t_1.$$

(7)

4.2. Straty trením ložísk

Hertzov model valivého trenia je dobre zavedenou metódou na určenie povrchových kontaktných síl, ako je veľmi podrobne diskutované v odkaze [12]. Existujú aj iné modely valivého trenia, pozri napr. [13], a sú podobné Hertzovmu modelu kontaktu v tom, že využívajú aplikované zaťaženie a vlastnosti materiálu na určenie kontaktnej plochy valivého prvku, deformácie a trenia. Hertzov model je tu stručne diskutovaný, hoci podobná analýza by sa mohla vykonať s inými modelmi.

Aplikované zaťaženie, F , na povrchy valivých telies a krúžkov ložísk sa používajú na analytické určenie kontaktnej plochy pre každé rozhranie na základe deformácie povrchov. Kontaktná oblasť v guľôčkovom ložisku je definovaná ako eliptická oblasť s hlavným polomerom a a menším polomerom b . Normálne napätie v akomkoľvek bode kontaktnej oblasti je:

$$F_N = 3F_{\text{na ložisko}} \frac{2}{3} \pi a b \sqrt{1 - (X/a)^2 - (r/b)^2}^{1/2}.$$

(8)

Z rovnice (8) je trecia sila F_F na kontaktnej oblasti každej guľôčky jednoducho integrálom normálovej sily nad kontaktnou oblasťou krát koeficient trenia μ , tj:

$$F_F = 3F_{\text{na ložisko}} \frac{2}{3} \pi a b \int \int \mu \sqrt{1 - (X/a)^2 - (r/b)^2}^{1/2} dx dr.$$

(9)

Pasívny výboj v dôsledku trenia ložísk je teda:

$$P_{\text{MB}} = \mu F_N \omega$$

(10)

alebo:

$$P_{MB} = T_{MB} \omega,$$

(11)

kde krútiaci moment T_{MB} je funkciou aplikovaného zaťaženia (zloženého z radiálnej a axiálnej zložky), koeficientu trenia a umiestnenia radiálneho kontaktu. V súčasnom systéme aplikované zaťaženie, F , sa skladá z predpätí axiálneho ložiska (od čiastkovej hmotnosti rotora a pružín pôsobiacich na spodné a horné ložisko) s menším príspevkom precesie rotora a radiálnych síl vyplývajúcich z nesúososti magnetického axiálneho ložiska. Za predpokladu dokonalého súososti mechanických ložiska podmienok minimálnych strát, tj odpojený elektrický stroj a dokonalé vákuum, strata energie priamo súvisiaca s ložiskami sleduje lineárny vzťah, naznačený rovnicou (11). Aj keď nie je možné merať zaťaženia v súčasnom FESS, približne lineárne správanie spojené so stratami v ložiskách uľahčuje oddelenie trenia vzduchu a strát v ložiskách, čo je podrobnejšie diskutované v nasledujúcich častiach.

4.3. Straty aerodynamického odporu

Analytický prístup k určovaniu strát aerodynamického odporu pre spriadací rotor v zriadenom plyne je netriviálny proces závislý od stupňa zriadenia, mechanických vlastností plynu, geometrie povrchu a veľkosti prostredia, ako to opísal Shen. [14]. Tieto aspekty ovplyvňujú charakteristické gradienty, ako je hustota vzduchu a gradienty rýchlosti vzduchu, ktoré nie je možné merať súčasným experimentálnym nastavením. Teoretický prístup prezentovaný Broeckerom [15] sa však považuje za uskutočniteľnejší prístup k hodnoteniu strát aerodynamického odporu. Tento model bol navrhnutý pre diskrotujúci v prostredí so vzácnym plynom. Vzhľadom na blízku podobnosť podmienok v zotrvačníku, Ertz [9] prijali tento model. Všeobecná rovnica pre pasívnu stratu výboja na trenie vzduchu je daná ako:

$$P_{AD} = M_{Celkom} \omega,$$

(12)

kde M_{total} je ťahový moment.

Účinky zriadenia na trecí moment sa zohľadňujú v nasledujúcich parametroch: hustota plynu ρ , kinematická viskozita ν a znížený súčiniteľ krútiaceho momentu c_m . Ertz [9] upravil Broeckerov model [15] pre súčasný systém a predpokladal turbulentné prúdenie okolo rotora pri vysokej rýchlosti. Preto trecí moment pôsobiaci na rotor je:

$$M_{Celkom} = M_{top} + M_{dno} + M_{strana},$$

(13)

kde M_{vrch} , M_{spodok} a M_{strana} sú momenty pôsobiace na horný, spodný a vonkajší priemer rotora. Horný a spodný povrch sú zhodné a možno ich nájsť s,

$$M_{top} = M_{bot} = 1.2 c_m Re^{1.5} \rho (r^{235o} - r^{235i}) (\mu \rho)^{1.5} \omega^{0.95},$$

(14)

kde Re je Reynoldsovo číslo dané rovnicou (15) a μ je dynamická viskozita. Koeficient krútiaceho momentu c_m závisí od Reynoldsovho čísla, ale možno ho považovať za približne konštantný v rámci daného rozsahu rýchlosti a tlaku [15]:

$$Re = r^{2o} \omega \rho \mu.$$

(15)

Preto je možné prepísať rovnicu momentu trenia vzduchu, pričom treba poznamenať, že mnohé parametre sú konštantné, čo dáva:

$$M_{top} = M_{bot} = 1.2 c_m \rho^{2.5} (r^{245o} - r^{235i}) \omega^2 = C_1 \omega^2,$$

(16)

kde C_1 je konštantná. Hustota vzduchu sa nachádza so zákonom ideálneho plynu,

$$\rho = p M_m R T,$$

(17)

kde p je tlak vzduchu, M_m je molárna hmotnosť vzduchu a R a T sú plynová konštanta a teplota. Trecí moment pôsobiaci na stranu rotora je definovaný ako:

$$M_{\text{strana}} = 2 \pi r^2 \omega h \tau.$$

(18)

Ako ukázal Broecker [15], τ možno odvodiť ako:

$$\tau = M_{\text{top}} 2 \pi (\omega^2) (r_3^3 - r_1^3),$$

(19)

tj. M_{strana} je závislá od M_{top} , takže má rovnaký tvar ako M_{top} , čo znamená, že trecí moment má tvar,

$$M_{\text{celkom}} = 2 C_1 \omega^2 + C_2 \omega^2 = C_{AD} \omega^2,$$

(20)

kde C_2 a C_{AD} sú konštanty. Nakoniec kombináciou rovníc (12) a (20) získame

$$P_{AD} = C_{AD} \omega^3.$$

(21)

Vzhľadom na to, že geometria rotora sa počas experimentu nemení a podtlakový tlak je konštantný, pasívny výboj v dôsledku aerodynamického odporu sa kubicky zvyšuje s uhlovou rýchlosťou. Preto s elektrickým strojom v odpojenej polohe možno straty aerodynamického odporu identifikovať ako kubický pojem vo vzťahu analogickou rovnicou (6).

4.4. Straty elektrických strojov

Elektrický stroj ovplyvňuje straty pasívnym výbojom iba v spojenej polohe. Keď je zapojený, použitý elektrický stroj môže fungovať (i) ako motor, dodávajúci energiu do systému; (ii) ako generátor, ktorý odstraňuje energiu; (iii) alebo v pohotovostnom režime, pričom nerobíte ani jedno ani druhé. Posledný prípad (prevádzka bez zaťaženia) je tu uvažovaný. Pasívny výboj elektrického stroja sa nachádza ako rozdiel medzi pasívnym výbojom, keď je motor v spojenej a odpojenej polohe, tj.

$$P_{EM} = P_{PD} \text{ . spojené } - P_{PD} \text{ . odpojený.}$$

(22)

Pasívny výboj elektrického stroja je charakterizovaný aerodynamickým odporom v elektrickom stroji (P_{EMAD}), ktorý je potrebný na chladenie, a valivým trením (P_{EMMB}) z ložísk stroja, podľa analýz podobných predchádzajúcim častiam. P_{EM} ďalej zahŕňa straty vírivým prúdom a hysterézne straty (P_{jadro}) a straty permanentnými magnetmi (P_{pm}) [16], teda:

$$P_{EM} = P_{EMAD} + P_{EMMB} + P_{\text{jadro}} + P_{\text{popoludnie}}.$$

(23)

Straty vírivými prúdmi a hysterézne straty sú opísané ako,

$$P_{\text{jadro}} = K_H B^2 f + K_e V_c B^2 f^2,$$

(24)

kde K_H a K_e sú konštanty určené z materiálových a strojných parametrov, V_c a B sú objem feromagnetického jadra a indukcia magnetického vrcholu, v danom poradí, a f je frekvencia magnetizácie, ktorý je úmerný stroja uhlovej rýchlosti.

Straty spojené s permanentnými magnetmi možno nájsť napr.

$$P_{\text{popoludnie}} = K_{\text{popoludnie}} V_{\text{popoludnie}} B^2 f^2,$$

(25)

kde K_{pm} je opäť konštanta určená z parametrov materiálu a stroja a V_{pm} je objem magnetu. Ďalšie podrobnosti o rôznych parametroch v rovniciach (24) a (25) možno nájsť v odkaze [16]. Zatiaľ čo parametre spojené s elektrickým strojom použitým v experimentoch nie sú známe, rovnice (23) až (25) odhaľujú vzťahy sohľadom na kľúčové konštanty spojené s pasívnym výbojom elektrického stroja, čím sa získava tvar polynómu tretieho rádu, ako je znázomené na obrázku Rovnica (26), kde T_{EM} súvisí s trením

ložisk, C_{EM1} a C_{EM2} s elektromagnetickými javmi a $C_{EM,AD}$ na aerodynamický odpor. Konštanty týkajúce sa trenia ložiska aerodynamického odporu sú podobné odvodeniu pre rovnice (11) a (21).

$$P_{EM} = T_{EM\omega} + C_{EM1}\omega + C_{EM2}\omega^2 + C_{EM,AD}\omega^3$$

(26)

5. Výsledky a diskusia

V tejto štúdii sa charakterizácia strát FESS začína identifikáciou prípadu minimálnych strát, tj experimentálnych podmienok s najnižšími stratami podľa [tabuľky 2](#), ktoré sa tu označujú ako základný prípad. Potom sa pasívny výboj na aerodynamický odpor oddelí od základného prípadu na základe vzťahov stanovených v predchádzajúcich častiach. Nakoniec, s charakterizovanými základnými stratami a aerodynamickým odporom, sa skúmajú straty elektrického stroja.

5.1. Straty základnej línie

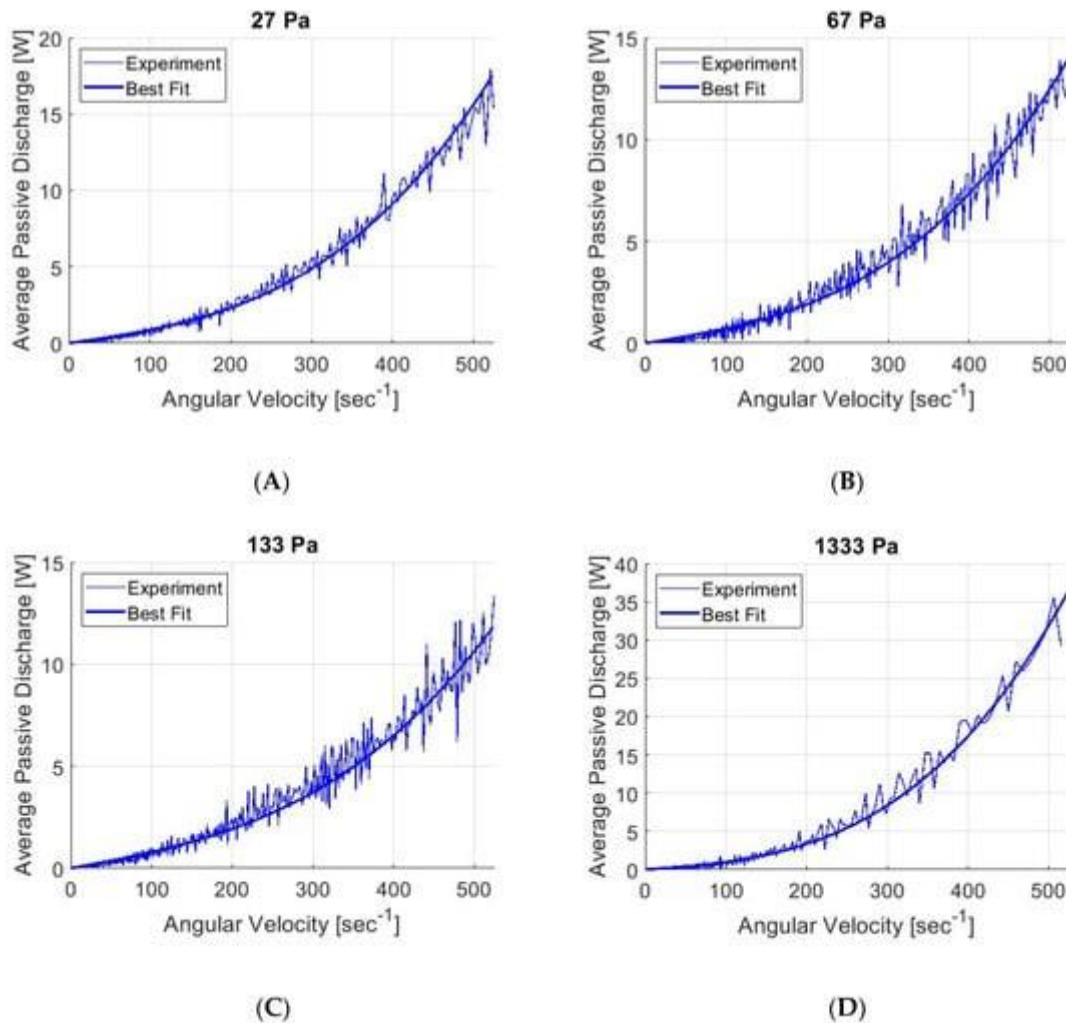
Tieto východiskové straty sú charakterizované kombináciou liečebných # 1 až # 4 v [tabuľke 2](#), ktorá má elektrický stroj oddelené tak, že $P_{EM} = 0$. V nasledujúcom texte, úrovne tlaku 27 Pa, 67 Pa, 133 Pa a 1333 Pa sa označujú ako stavy minimálneho, nízkeho, stredného a vysokého tlaku. Priemerný celkový čas vybíjania a polčas rozpadu, tj bod, v ktorom sa vybije polovica kinetickej energie, sú zhrnuté v [tabuľke 3](#). Z údajov je možné pozorovať, že ani polčas rozpadu, ani celkový čas vybíjania priamo nekorelujú s veľkosťou aplikovaného tlaku, tj nižší tlak nevyhnutne nespôsobuje dlhší polčas rozpadu a celkový čas vybíjania. Dôvody tohto správania sú uvedené nižšie.

Tabuľka 3. Polčas kinetickej energie rotora a celkový čas vybíjania pre všetky tlakové stavy s odpojeným elektrickým strojom.

Table 3. Rotor kinetic energy half-life time and total discharge time for all pressure states with the electrical machine decoupled.

Test Case	Vacuum Level (Pa (torr))	Half-Life Time (min)	Total Discharge Time (min)
1	27 (0.2)	37	276
2	67 (0.5)	49	450
3	133 (1)	55	357
4	1333 (10)	20	250

Pripomeňme, že rýchlosť rotora bola počas testovania nepretržite monitorovaná, čo umožnilo vypočítať uloženú energiu pomocou rovnice (5) a nájsť pasívny výboj ako rozdielový kvocient, ako je znázornené v rovnici (7). Pasívny výboj je vynesý proti uhlovej rýchlosti na [obrázku 3](#), aby sa uľahčilo porovnanie medzi rôznymi testovacími prípadmi. Pretože výsledky pasívneho vybíjania sú po diferenciacii relatívne hlučné v dôsledku náhodných chýb počas testovania, vykonali sa tri opakovania každého testovacieho prípadu a spriemerovali sa spolu v snahe minimalizovať rozptyl údajov.



Obrázok 3. Priemerný pasívny výboj a približné hodnoty pre štyri testované úrovne vákuua: (A) minimálne, (B) nízke, (C) stredné a (D) vysoký tlak.

Určenie prípadu, minimálne straty, údaje výbojovej vrchol pasívne boli vypočítané pre každú tlakovú stáť za vákuua pri štyrrotorový uhlových rýchlostí, t.j. 500 otáčok za minútu (52 sec^{-1}), 1000 otáčok za minútu (105 sec^{-1}), 2500 otáčok za minútu (262 s^{-1}) a 5000 ot./min (524 s^{-1}). Údaje pre špičkový pasívny výboj sú vynesené proti tlaku na [obrázku 4. Obr](#). Najnižší pasívny výboj, t.j. základný prípad, bol konzistentne identifikovaný pre strednú úroveň vákuua 133 Pa, zatiaľ čo pasívny výboj sa opäť zvýšil pre nižšie testované tlakové stavy. Toto správanie, ktoré tiež ovplyvnilo polčas a celkové časy vybíjania uvedené v [tabuľke 3](#), nie je intuitívne a pôvodne sa predpokladalo, že je spôsobené poruchou prístrojového vybavenia. Dôkladné skúmanie zariadenia však ukázalo, že senzory fungujú správne. Okrem toho sa tlakovo vyvolaná deformácia telesa FESS a tým možné účinky na trenie ložísk považujú za zanedbateľné pre pomere malé rozdiely v aplikovaných tlakoch. Konkrétne, ak vezmeme do úvahy zaťaženia pôsobiace na kryt jeho evakuáciou z atmosférického tlaku (101,3 kPa) na aplikované úrovne vákuua, rozdiel v záťažach pôsobiacich na kryt je asi 0,1 % medzi minimálnym (27 Pa) a stredným (133 Pa) tlakom. štátov. Dá sa tiež špekulovať, že pozorovaný nárast pasívneho výboja pri nižších hladinách vákuua súvisí so zmenou režimu prúdenia v oblasti prechodu vákuua so znižujúcimi sa vlastnosťami plynu kontinua a potenciálnymi účinkami na účinnosť použitej vákuovej pumpy. Presná príčina pozorovaného účinku a potenciálne nápravné opatrenia však v tomto bode nie sú známe a zostávajú predmetom budúcej práce. Preto sú pre túto štúdiu výsledky pre stavy minimálneho (27 Pa) a nízkeho tlaku (67 Pa) vylúčené z následných analýz a diskusií.

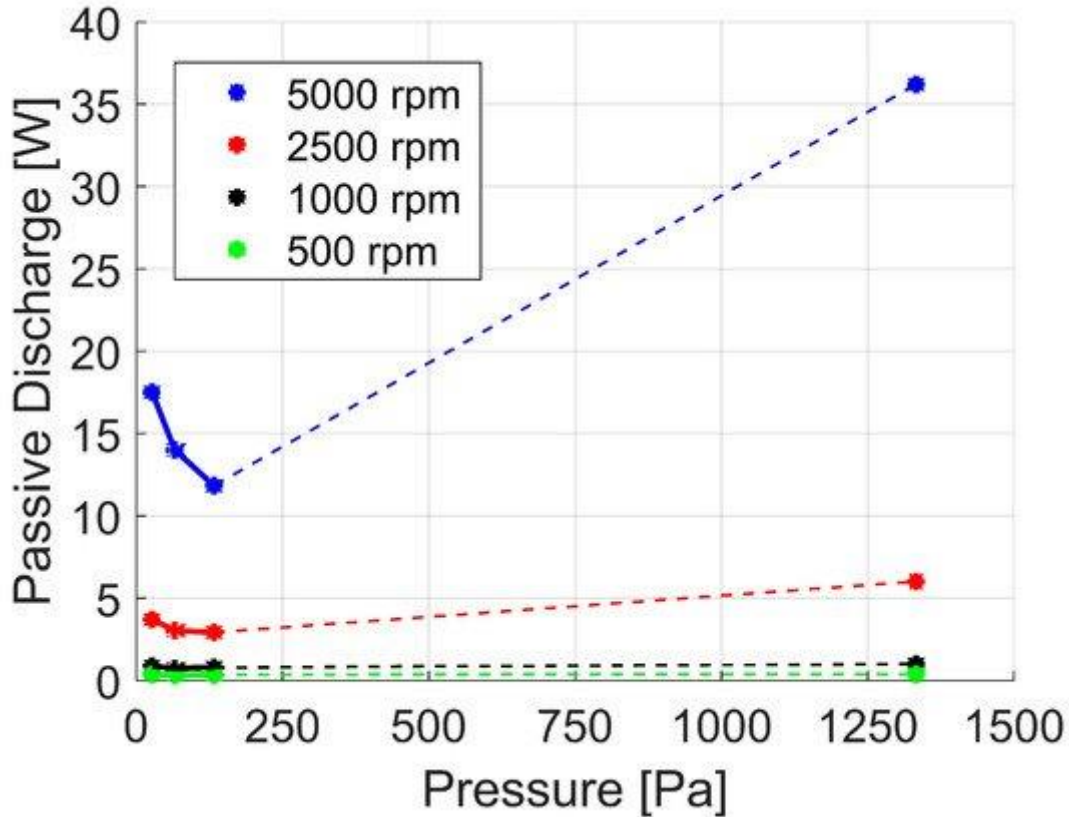


Figure 4. Total rotor passive discharge versus pressure at four distinct rotor speeds. Dashed lines are included to indicate trends in the measured data.

5.2. Discerning Sources of Passive Discharge

Best fit approximations of the test data were computed, as shown in [Figure 3](#). Considering Equations (6), (7), (11), and (21), and recalling the electrical machine was decoupled, the best-fit equation can be defined as

$$PPD = \alpha_1 \omega + \alpha_2 \omega^3 \quad (27)$$

where α_1 and α_2 are constant coefficients that define bearing rolling friction and aerodynamic drag, equivalent to T_{MB} from Equation (11) and C_{AD} from Equation (21), respectively. The curve fitting tool in the numerical computing environment MATLAB was used (MathWorks, Natick, MA, USA). Specifically, the robust nonlinear least-squares regression method was employed as it uses the least absolute residuals (LAR) method, which minimizes the absolute difference of the residuals to minimize the influence of outliers. This method is preferred when the data have few outliers [17], as shown in [Figure 3](#), where data are noisy but contain few outliers. Hence, the LAR method is considered appropriate.

From Equation (27), the bearing friction and drag components can be separated, and the magnitude of energy losses to each component can be clearly identified. Considering the baseline case (intermediate vacuum level) and the high-pressure state, the coefficients were computed as listed in [Table 4](#) along with goodness of fit statistical parameters (SSE: error sum of squares, Adj-R2: adjusted R-squared, RMSE: root-mean-squared error). The statistical parameters indicate that the best-fit approximations accurately represent each dataset, suggesting the best-fit approximations are appropriate for modeling and predictions. Specifically, SSE values indicate small random error effects, and values for Adj-R2 and RMSE approaching unity and zero confirm a good fit and small standard deviation, respectively.

Table 4. Best fit coefficients for the baseline and high-pressure test cases along with goodness of fit statistical parameters (SSE: error sum of squares, Adj-R2: adjusted R-squared, RMSE: root-mean-squared error).

Table 4. Best fit coefficients for the baseline and high-pressure test cases along with goodness of fit statistical parameters (SSE: error sum of squares, Adj-R2: adjusted R-squared, RMSE: root-mean-squared error).

Parameter	Baseline Case (133 Pa)	High-Pressure (1330 P)
$\alpha_1 \equiv T_{MB}$	0.0074 Ws	0.0078 Ws
$\alpha_2 \equiv C_{AD}$	$5.536 \times 10^{-8} \text{ Ws}^3$	$2.238 \times 10^{-7} \text{ Ws}^3$
SSE	1.006	1.809
Adj-R2	0.9995	0.9997
RMSE	0.0529	0.0852

The rolling friction coefficients shown in [Table 4](#) are nearly equal, i.e., they are within approximately 5% of each other. This finding indicates that rolling friction is indeed independent of pressure. It further suggests that the assumptions and derivation made for establishing Equation (11) are proper for describing this loss component.

In terms of aerodynamic drag losses, the corresponding best-fit coefficients increase by nearly an order of magnitude between the baseline and high-pressure cases (i.e., $5.536 \times 10^{-8} \text{ Ws}^3$ versus $2.238 \times 10^{-7} \text{ Ws}^3$). When deriving Equation (16), it was discussed that the torque coefficient, c_m , is approximately constant within a small pressure range. Therefore, only the air density ρ , is nonconstant, that is, density varies linearly with pressure according to the ideal gas law, Equation (17). Hence, considering the aerodynamic drag coefficient to be a function of pressure, as in Equation (28), the linear term shown in Equation (29) can be assumed for approximating aerodynamic drag for pressures above 133 Pa.

$$P_{AD} = \alpha^2(p)\omega^3$$

(28)

$$P_{AD} = (1.404 \times 10^{-10}p + 3.664 \times 10^{-8})\omega^3$$

(29)

where P_{AD} , p and ω are in Ws, Pa and sec^{-1} , respectively.

The various components of passive discharge are predicted and plotted in [Figure 5](#) for the baseline case. As expected, bearing losses are the largest source of passive discharge at low rotor speeds where aerodynamic drag is small. The latter dominates losses at higher rotor speeds. The point where aerodynamic drag exceeds bearing friction is 3486 rpm (365 sec^{-1}). Aerodynamic drag is usually considered the most significant source of passive discharge due to the sustained rotor speed being quite high in FESS. Nevertheless, the analysis confirms that passive discharge due to bearing friction is not insignificant for low-cost FESS systems. In fact, bearing losses can be a significant source of passive discharge even in FESS with magnetic bearings if regular deep discharge situations occur. Magnetic bearings rely on eddy currents to maintain stability, requiring a larger magnetic field to stabilize the rotor at lower rotor speeds [\[18\]](#).

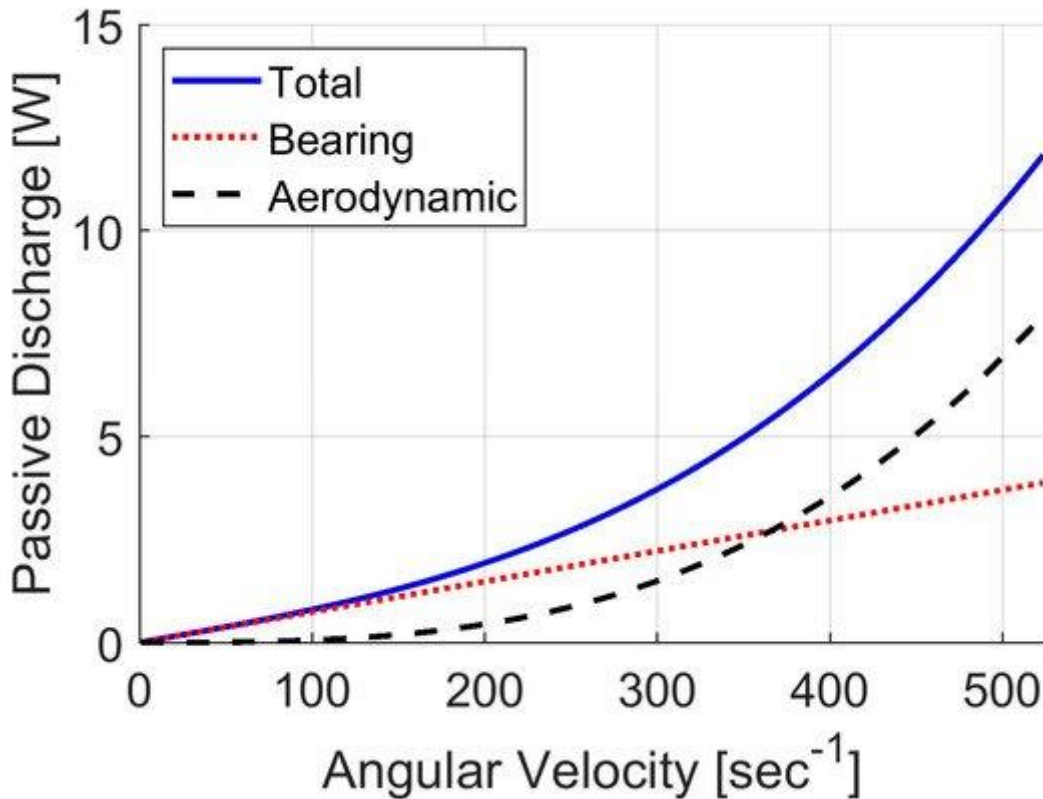
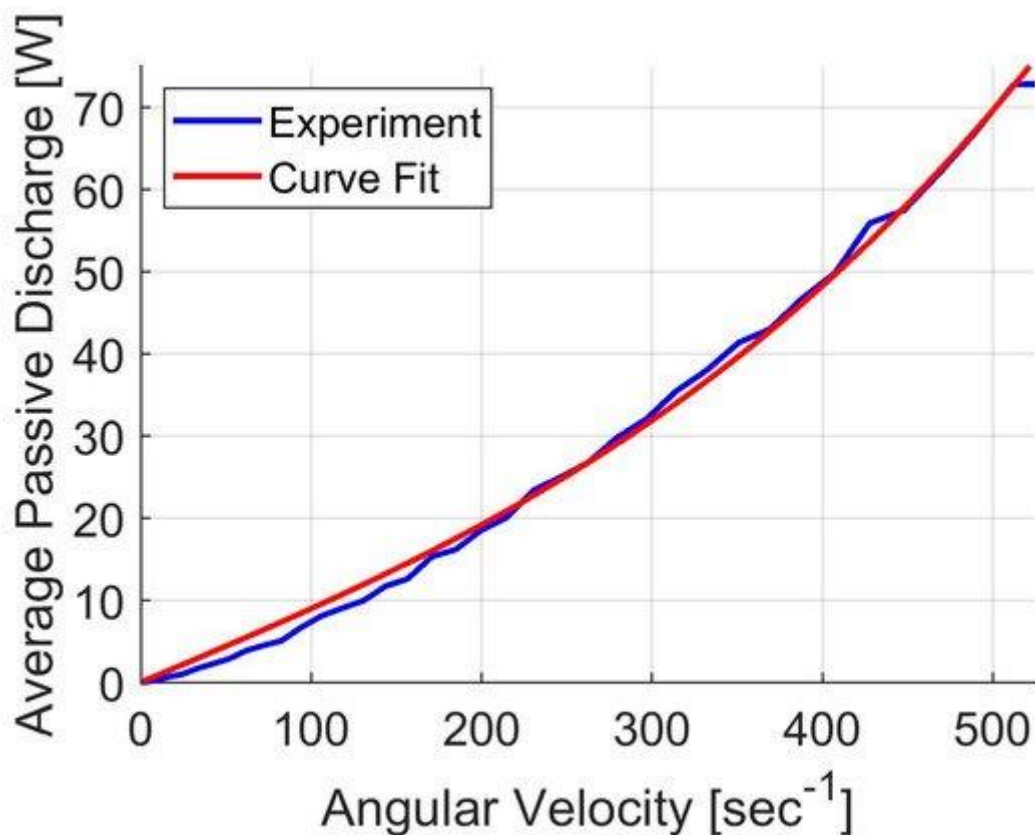


Figure 5. Predictions of the total rotor passive discharge and the components related to aerodynamic and bearing losses for the baseline case (intermediate vacuum level).

When coupled to the FESS, the electrical machine introduces its own passive discharge, from forced air cooling, bearing friction, and core and permanent magnet losses, as discussed above. These sources are collectively discussed because, as demonstrated by Equation (26), it is not possible to decouple each source of passive discharge losses while operating the electrical machine in standby mode. The data for this analysis is collected from treatment case #7 in [Table 2](#). Subtracting the baseline losses (treatment case #3) from these data yields the passive discharge caused by the electrical machine. Given that Equation (26) includes linear and higher-order polynomials, it is interesting to again apply Equation (27) to generate an approximation for the electrical machine losses. In this approach, the linear and cubic terms collectively represent mechanical and electromagnetic loss sources, i.e., the linear term captures bearing rolling friction and core losses, while the cubic term represents the aerodynamic drag and the losses associated with the permanent magnets. The experimental data and best-fit results are depicted in [Figure 6](#), and the coefficients α_1 and α_2 are listed in [Table 5](#). Tesná zhoda medzi krivkami v grafe na [obrázku 6](#) a dobrou zhodou štatistických parametrov v [tabuľke 5](#) naznačuje, že rovnica (27) je primeraným prostriedkom na vytvorenie aproximácie pasívneho výboja pre elektrický stroj.



Obrázok 6. Experimentálne údaje a aproximácia preloženia krivky pre pasívny výboj elektrického stroja pre stav základného tlaku (stredná úroveň vákuu).

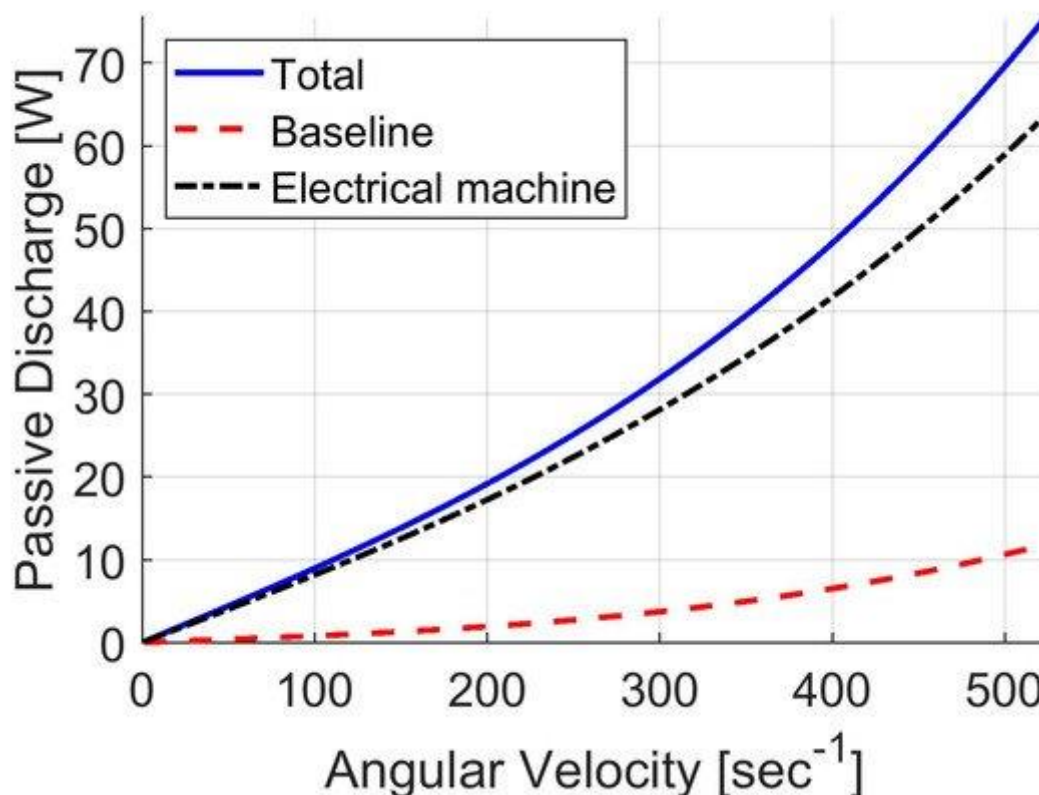
Tabuľka 5. Koefficienty najlepšej zhody pre aproximáciu pasívneho výboja elektrického stroja spolu s dobrou zhodou štatistických parametrov (SSE: súčet chýb štvorcov, Adj-R2: upravená R-kvadrátúra, RMSE: odmocnina-stredná-kvadratická chyba).

Table 5. Best fit coefficients for the electrical machine passive discharge approximation along with goodness of fit statistical parameters (SSE: error sum of squares, Adj-R2: adjusted R-squared, RMSE: root-mean-squared error).

Parameter	Baseline Case (133 Pa)
α_1	0.0864 Ws
α_2	$2.004 \times 10^{-7} \text{ Ws}^3$
SSE	4.058
Adj-R2	0.9999
RMSE	0.2443

Celkový pasívny výboj a jeho komponenty pre elektrický stroj (bez zaťaženia) a mechanické straty podľa základného prípadu sú znázornené na [obrázku 7](#). Je zrejmé, že elektrický stroj použitý v tomto experimentálnom usporiadaní je so značným náskokom najväčším zdrojom pasívneho výboja. Z konštrukčného hľadiska prevádzka elektrického stroja mimo vákuového krytu, hoci je to cenná funkcia pre túto štúdiu, je veľmi škodlivé pre výkon FESS, keď sa vykonávajú operácie nepretržitého nabíjania a vybíjania, čo si vyžaduje, aby bol elektrický stroj trvalo spojený s rotorom. Okrem zahmutia elektrického stroja do vákuového krytu môže byť stroj navrhnutý tak, aby minimalizoval mechanické straty, napríklad integráciou so samotným rotorom [19]. Aj keď by stroj stále trpel stratami v dôsledku elektromagnetických účinkov, jeho celkový podiel na stratách by bol minimalizovaný. Pre operácie prerušovaného nabíjania a vybíjania je však súčasná konštrukcia FESS atraktívna pre svoju schopnosť takmer eliminovať straty v

elektrickom stroji (kvôli jeho funkcii odpojenia rotora), pričom tiež umožňuje ľahké chladenie elektrického stroja pri operáciách prenosu vysokého výkonu.



Obrázok 7. Predpovede kombinovaného celkového pasívneho výboja pre rotor s pripojeným elektrickým strojom, ako aj komponenty súvisiace so stratami naprázdno elektrického stroja a stratami základného prípadu (stredná úroveň vákua, elektrický stroj oddelený).

6. Závěry

Nízkonákladové systémy na ukladanie energie zotrvačníka v malom meradle, ako sú tie, ktoré sú vhodné pre obytné, malé komerčné a dopravné aplikácie, vyžadujú riadenie kompromisov medzi cenou, veľkosťou, hmotnosťou a výkonom. Je preto dôležité porozumieť účinkom, ktoré majú konštrukčné parametre na straty energie, a teda pasívny výboj, ktorý možno pripísať predovšetkým valivému treniu ložísk, aerodynamickému odporu rotora zotrvačníka a elektrickému stroju použitému na prenos energie do a z rotora. .

V tejto štúdii sa experimenty s pasívnym výbojom uskutočnili so skutočným zariadením na ukladanie energie zotrvačníka na meranie pasívneho výboja pri rôznych vákuových tlakoch v kryte zotrvačníka. V tejto štúdii boli použité vákuové tlaky zodpovedajúce režimom kontinua a Knudsenovmu prietoku. Zotrvačník umožňuje úplné odpojenie elektrického stroja od rotora, čím umožňuje štúdium jednotlivých zdrojov strát. Boli vyvinuté analytické modely týkajúce sa každého zdroja pasívneho výboja, čím sa získal relatívne jednoduchý súbor rovníc, ktorý umožnil rozlíšiť zložky straty z experimentálnych údajov. Tieto zistenia sa považujú za cenný príspevok kvôli vývoju a zlepšeniu prístupov k modelovaniu, ktoré sa majú použiť pri navrhovaní a optimalizácii systémov zotrvačníkov.

Analýzy odhalili, že valivé trenie ložísk bolo konzistentné vo všetkých experimentoch (tj vákuové tlaky), pričom súvisiaci pasívny výboj sa lineárne zvyšoval s rýchlosťou rotora. Štúdia ďalej potvrdila, že aerodynamický odpor na rotore je hlavným zdrojom pasívneho výboja, dokonca aj v prostredí so stredným vákuom, pretože pasívny výboj sa kubicky zvyšuje s rýchlosťou rotora. Zistilo sa, že straty elektrického stroja sú najvýznamnejšie pre dizajn FESS použitý v tejto štúdii. Tieto zistenia vedú k odporúčaniu znížiť

straty elektrického stroja integráciou stroja do vákuovej skrine a možno aj samotného rotora zotrvačníka. Pri operáciách prerušovaného nabíjania a vybíjania však

Autorské príspevky

Konceptualizácia a metodológia, MS a PM; validácia, formálna analýza, vyšetovanie, MS; zdroje, PM; spravovanie údajov, MS; písanie – príprava pôvodného návrhu, MS; vizualizácia, písanie – kontrola a úprava, MS a PM; supervízia, administrácia projektov, PM; získavanie financií, PM Všetci autori si prečítali a súhlasili sverejnou verziou rukopisu.

Financovanie

Tento výskum bol financovaný kanadskou technologickou sieťou pre prírodné vedy a inžinierstvo (NSERC) a nadáciou Canada First Research Excellence Fund sčísom grantu Future Energy Systems T06-P03. APC bol financovaný z fondu Canada First Research Excellence Fund sčísom grantu Future Energy Systems T06-P03.

PodĎakovanie

Autor by rád poďakoval Berniemu Faulknerovi za jeho technickú podporu pri vykonávaní experimentálnej práce.

Konflikt záujmov

Autori nedeklarujú žiadny konflikt záujmov.

Referencie

1. Dunn, B.; Kamath, H.; Tarascon, JM Elektrické úložisko pre rozvodnú sieť: Batéria možností. *Science* **2011**, *334*, 928–935. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
2. Luo, X.; Wang, J.; Dooner, M.; Clark, J. Prehľad súčasného vývoja technológií akumulácie elektrickej energie a aplikačného potenciálu v prevádzke elektrizačnej sústavy. *Appl. Energia* **2015**, *137*, 511–536. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
3. Hadjipaschalis, I.; Poullikkas, A.; Efthimiou, V. Prehľad súčasných a budúcich technológií skladovania energie pre aplikácie elektrickej energie. *Obnovit. Výdrž. Energia Rev.* **2009**, *13*, 1513–1522. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
4. Mulcahy, T.; Hull, J.; Uherka, K.; Abbound, R.; Juna, J. Výsledky testu 2-kWh zotrvačníka s pasívnymi ložiskami PM a HTS. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **2001**, *11*, 1729–1739. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
5. Schulz, A.; Sima, S.; Hinterdorfer, T.; Wassermann, J. Innovative Schwungradspeicher mit hoher Energieeffizienz und Zuverlässigkeit. *Elektrotech. Informationstechnik* **2015**, *132*, 481–490. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
6. Coombs, TA; Campbell, AM; Cardwell, DA Vývoj aktívneho supravodivého magnetického ložiska. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **1995**, *5*, 630–633. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
7. Xia, Z.; Chen, QY; Ma, KB; McMichael, CK; Lamb, M.; Cooley, RS; Fowler, PC; Chu, WK Návrh supravodivých magnetických ložísk s vysokou levitujúcou silou pre systémy akumulácie energie zotrvačníka. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **1995**, *5*, 622–625. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
8. Filatov, AV; Maslen, EH Pasívne magnetické ložisko pre systémy akumulácie energie zotrvačníka. *IEEE Trans. Magn.* **2001**, *37*, 3913–3924. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
9. Ertz, G. Vývoj, výroba a testovanie multi-ráfkového (hybridného) rotora zotrvačníka. Magisterská práca, Leibniz University Hannover, Hannover, Nemecko, 2014. [[Google Scholar](#)]
10. Ha, SK; Han, HH; Han, HY Návrh a výroba kompozitného zotrvačníka lisovaného multi-ráfkového rotora. *J. Reinf. Plast. Comp.* **2008**, *27*, 953–965. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
11. Krack, M.; Secanell, M.; Mertiny, P. Optimalizácia nákladov hybridných kompozitných rotorov zotrvačníka na skladovanie energie. *Struct. Multidiscip. Optim.* **2010**, *41*, 779–795. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

12. Harris, TA; Kotzalas, MN *Advanced Concepts of Bearing Technology* , 5. vydanie; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2006. [[Google Scholar](#)]
13. Flom, GR; Bueche, AM Teória valivého trenia pre gule. *J. Appl. Phys.* **1959** , 30 , 1725–1730. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
14. Shen, C. *Dynamika vzácneho plynu* ; Jar: Berlín, Nemecko, 2005. [[Google Scholar](#)]
15. Broecker, VE Theorie und Experiment zum Reibungswiderstand der glatten rotierenden Scheibe bei turbulenter Strömung. *Z. Angew. Mathematik Mech.* **1959** , 39 , 68-76. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
16. Tong, W. *Mechanický dizajn elektromotorov* ; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2014. [[Google Scholar](#)]
17. Metóda najmenších štvorcov. Dostupné na internete: <http://www.mathworks.com/help/curvefit/least-squares-fitting.html> (prístup 6. novembra 2020).
18. Traxler, A. Straty v magnetických ložiskách. v *magnetických ložiskách* ; Maslen, EH, Schweitzer, G., Eds.; Jar: Berlín, Nemecko, 2009; s. 135–150. [[Študovňa Google](#)]
19. Amiryar, ME; Pullen, KR Prehľad technológií akumulácie energie zotrvačníka a ich aplikácií. *Appl. Sci.* **2017** , 7 , 286. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Poznámka vydavateľa: MDPI zostav a neutrálny, pokiaľ ide o jurisdikčné nároky v publikovaných mapách a inštitucionálnych pridruženíach.

© 2021 od autorov. Držiteľ licencie MDPI, Bazilej, Švajčiarsko. Tento článok je článkom s otvoreným prístupom distribuovaným za podmienok licencie Creative Commons Attribution (CC BY) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Zdroj pre preklad <https://www.mdpi.com/2673-3161/2/1/1/htm>