

## Axiális fluxusú mágneses hajtómű tervezése

### Development of an axial flux magnetic gearbox

Mikula Brigitta MSc hallgató<sup>1</sup>, Sári-Barnácz Viktor vezető szakértő (Robert Bosch Kft.)<sup>1</sup>, Dr. Simonovics János egyetemi adjunktus<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Gép- és Terméktervezés Tanszék, H-1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3., MG épület 110., <https://gt3.bme.hu/>,  
Email: brigitta.mikula@gmail.com, viktor.sari@hu.bosch.com

#### Abstract

*Magnetic gearboxes offer several advantages, including friction- and therefore wear-free operation, low noise level, and inherent overload protection, however, their extensive use is often limited by the geopolitical aspects associated with rare-earth permanent magnets. This study presents the design and analysis of an axial flux magnetic gearbox employing ferrite magnets. To compensate for the lower magnetic performance of ferrite magnets, a Halbach array configuration is applied, which enhances the magnetic flux on the active side of the system. The design and performance evaluation are carried out using transient magnetic simulations.*

**Keywords:** Halbach, ferrit magnet, gearbox, simulation

#### Kivonat

*A mágneses elven működő hajtóművek előnyei közé tartozik a súrlódás- és kopásmentes működés, az alacsony zajszint és a túlterhelés elleni védelem, azonban elterjedésüket a ritkaföldfém mágnesek alkalmazása korlátozza. Jelen tanulmány ferrit mágnesek felhasználásával, egy axiális fluxusú mágneses hajtómű tervezését és vizsgálatát mutatja be. A gyengébb mágnesek kompenzálása miatt Halbach-elrendezés kerül alkalmazásra, amely a hasznos oldalon erősíti a mágneses fluxust. A tervezés és az értékelés tranziens mágneses szimulációk segítségével történt.*

**Kulcsszavak:** Halbach, ferrit mágnes, hajtómű, szimuláció

## 1. BEVEZETÉS

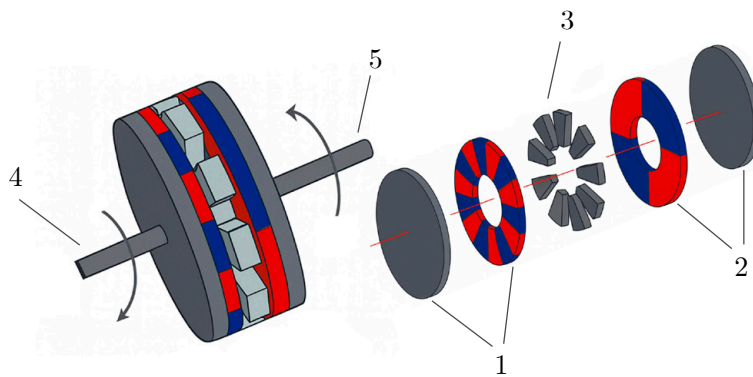
A mágneses elven működő hajtóművek gondolata a 20. század közepére nyúlik vissza, azonban az első prototípusok a ferrit mágnesek alacsony nyomatéksűrűsége és hatásfoka miatt korlátozott teljesítményt nyújtottak. A nagy energiasűrűségű neodímium mágnesek megjelenésével, valamint a végeselemes szimulációs eszközök fejlődése miatti költséghatékonyabb fejlesztések következtében a mágneses hajtóművek nyomatékátviteli képessége jelentősen javult. Előnyeik közé tartozik a súrlódásmentes működés, az alacsony zajszint és a túlterhelés elleni védelem, amelyek vonzó alternatívává teszik őket a hagyományos hajtásokkal szemben. A technológia egyik fő kihívása napjainkban a ritkaföldfém mágnesek áringadozása és a bennük rejlő különböző geopolitikai kockázatok. Ennek alternatívája lehet a ferrit mágnesek alkalmazása, amelyek Halbach-elrendezésben a mágneses fluxus aktív oldalon történő növelésével és a szivárgó fluxus csökkentésével képesek ellensúlyozni alacsonyabb energiasűrűségüket. Jelen tanulmány egy ferrit mágneseket alkalmazó, Halbach-elrendezésű axiális fluxusú mágneses hajtómű tervezését és végeselemes szimulációkkal történő vizsgálatát mutatja be, különös tekintettel a maximálisan átvihető nyomaték növelésére.

### 1.1. Axiális fluxusú mágneses hajtóművek

Az axiális fluxusú mágneses hajtóművek tipikus felépítése a 1. ábrán látható. Működésük és nyomatékátviteli mechanizmusuk funkcionális analógiát mutat a bolygóműves hajtásokkal: a két, egymással szemben elhelyezkedő tárcsarotor (1, 2) a nap- és gyűrűkerék szerepét tölti be, míg a köztük elhelyezett modulátor (3) a bolygókerékhez hasonlóan a mágneses tér modulációját végzi [1]. A szeparált behajtó (5) és kihajtó (4) tengelyre szerelt rotorokon váltakozó pólusú állandó mágnesek helyezkednek el, így a mágneses fluxus axiális irányban záródik. A bemenő és kimenő oldal elnevezése az adott alkalmazástól függ, hogy gyorsító vagy lassító

áttételt szeretnénk megvalósítani, de jellemzően a nagyobb fordulatszámú, kisebb pólusszámú rotor tekinthető bemeneti oldalnak, míg a kisebb fordulatszámú, nagyobb pólusszámú rotor a kimeneti oldal. Az álló helyzetű (tipikusan a házra szerelt) fluxusmodulátor feladata a mágneses tér újraszervezése és modulálása: ferromágneses pólusdarabokból (vasmagokból) áll, amelyek lehetővé teszik a két rotor közötti mágneses kölcsönhatást és a nyomaték átvitelét. A mágneses tér modulációja a légrésekben történik, amikor a rotorok által létrehozott mágneses tér áthalad a ferromágneses pólusdarabokon, és térbeli felharmonikusok jönnek létre. Ezek a modulált mezők kölcsönhatásba lépnek a másik rotor mágneses terével, lehetővé téve a nyomatékátvitelt a két rotor között, hasonlóan a mechanikus hajtóművekhez, de fizikai érintkezés nélkül. Ennek köszönhetően az erőátviteli veszteségek a légellenállásra, a csapágyakra és a ferromágneses anyagokra korlátozódnak, illetve a permanens mágnesek alkalmazása miatt az örvényáramok jelentik a legnagyobb veszteségforrást [1].

Neonídium mágnesek alkalmazásával a hajtómű prototípusok nyomatéksűrűsége jellemzően 20-200 Nm/L tartományban mozog, a jövőben nagy nyomatékú, alacsony fordulatszámú alkalmazásokban terjedhetnek majd el, mint például szélturbinák esetében, ahol jelenleg is folynak ilyen jellegű fejlesztési kísérletek. A ferrit mágnesek erősségéből kiindulva, egy nagyságrenddel kisebb nyomatéksűrűség realizálható konzekvencionális mágneselrendezés esetén, ugyanakkor az ezzel kapcsolatos fellelhető szakirodalom kifejezetten limitált.



1. ábra. Axiális fluxusú mágneses hajtómű felépítése 1 - magasabb pólusszámú tárcsa, 2 - alacsonyabb pólusszámú tárcsa, 3 - fluxus modulátor, 4 - kihajtó tengely, 5 - behajtó tengely

Mivel a mágneses hajtóművek működési elve megfeleltethető a bolygóművek működésének, az áttétel meghatározására a Willis-egyenlet alkalmazható:

$$G_r = \frac{p_2}{p_1}, \quad (1)$$

ahol  $p_1$  és  $p_2$  az egyes rotorok póluspárszáma. A maximális nyomaték eléréséhez a modulátor vastagságának meg kell egyeznie a két rotor póluspárjainak összegével [2]:

$$n_m = p_1 + p_2. \quad (2)$$

A mágneses tér által kifejtett nyomaték számítására a Maxwell-féle feszültségtenzor alkalmazható, amely a mágneses tér radiális és tangenciális komponenseiből határozható meg. A nyomaték a légrés felületén ébredő nyírófeszültség integrálásával számítható, ahol a szükséges fluxussűrűség-eloszlást jellemzően végeeselemes szimulációk segítségével határozzák meg. A mágneses téryomaték tehát:

$$T = \int_A \sigma_{rt} \cdot r \, dA = \frac{1}{\mu_0} \int_A B_r B_t \cdot r \, dA, \quad (3)$$

ahol  $\sigma_{rt}$  a Maxwell-féle feszültségtenzor komponense,  $B_r$  és  $B_t$  a mágneses tér radiális és tangenciális indukciókomponensei,  $r$  a sugár, ahol a feszültség hat,  $A$  a légrés területe és  $\mu_0$  a vákuum mágneses permeabilitása [3].

## 1.2. Halbach-elrendezés

A Halbach-elrendezés olyan mágneskonfiguráció, ahol egy-egy pólus magasabb számú mágnesszegmensekre van osztva. A mágnesszegmensek mágnesezettségi iránya egymáshoz képest adott szöggel elforgatott, így a mágneses fluxus az egyik oldalon felerősödik, míg a másikon nagymértékben kioltódik. Az egy pólusra jutó szegmensek számának növelésével a légrésben kialakuló fluxuseloszlás közel szinuszoszá tehető, ami csökkenti a fognyomatékot és a nyomatékingadozást. A két szegmensű, 90°-kal elforgatott mágneselrendezés

fluxusintenzitás-eloszlására mutat jó példát Winter és munkatársai tanulmánya, ahol mágneses végeelemes szimulációval történt vizsgálat [4]. A Halbach-elrendezés alkalmazásával növelhető a hasznos légrésfluxus, ezáltal a nyomatéksűrűség is, miközben a veszteségek csökkennek az egyenletesebb fluxuseloszlás miatt.

### 1.3. Szakirodalom alapján tett tervezési megfontolások

A Halbach-mágnesezés mindkét rotoron történő alkalmazása jelentősen növelheti a nyomatéksűrűséget és csökkentheti a nyomatékingadozást. Ugyanakkor a pólusonkénti mágnesszegmensek számát megfelelően kell megválasztani. A szakirodalomban jellemzően 2–3 szegmens/pólus elrendezést alkalmaznak, amely kedvező kompromisszumot jelent. A mágnesszegmensek rögzítésének megfelelő szilárdságú kialakítása elengedhetetlen, mivel terhelés hatására relatív elmozdulás léphet fel [5, 6].

Az áttétel és a pólusszám megfelelő megválasztása szintén kritikus. Halbach-konfigurációban a magasabb póluspár-szám választása megvalósítási nehézséget okozhat a geometriában. A tervezés során olyan pólusszám-kombinációkat célszerű választani, amelyek nagy értékű legkisebb közös többszöröst eredményeznek, ez kedvez a térbeli felharmonikusok kölcsönhatásának, ugyanakkor nem növelik túlzottan egyik rotor pólusszámát sem. Az egész és nem egész áttételek szintén hatással vannak a fognyomatéokra: az egész áttételű axiális mágneses hajtóművek általában nagyobb fognyomatékkal rendelkeznek [7].

A Halbach-elrendezés a csökkentett vasveszteségek és az alacsonyabb nyomatékingadozás révén kedvezőbb hőmérsékleti viszonyokat és kifáradási élettartamot eredményez. Ugyanakkor figyelembe kell venni az állandó mágnesekben keletkező örvényáram-veszteségeket is. Ferrit mágnesek alkalmazása esetén ezek a veszteségek elhanyagolhatók, azonban ilyenkor a ferromágneses modulátor nagyobb fluxuslengéseket szenvedhet el, ezért nagy fordulatszámú alkalmazásoknál előnyös lehet a modulátor lemezelése [6, 8].

## 2. MÁGNESES ELVEN MŰKÖDŐ HAJTÓMŰ TERVEZÉSE

Mivel az axiális mágneses hajtóműveknek még nincs ipari alkalmazása, a tervezési célkitűzések meghatározása szakirodalom alapján történt. A fő célok közé tartozik a magas nyomatéksűrűség elérése a túlterhelés elleni védelem megtartása mellett, a fognyomaték és az örvényáram-veszteségek csökkentése, valamint a hatásos légrés minimalizálása a nyomaték növelése érdekében. A célok alapján tervezési alapelvek kerültek megfogalmazásra. A maximális nyomatéksűrűség elérése érdekében mindkét rotoron Halbach-elrendezésű mágnesek kerülnek alkalmazásra, mivel ez a konfiguráció növeli a légrésben ébredő hatásos mágneses fluxust, csökkenti a szórt fluxust, és javítja a nyomatéksűrűséget. A pólusonkénti szegmensek számát legfeljebb háromra célszerű növelni, mivel ennél nagyobb érték már jelentősen bonyolítaná a szerkezetet és az összeszerelést.

A költségcsökkentés és az ellátási lánc stabilitása érdekében ritkaföldfém-mentes, ferrit mágnesek alkalmazása kerül előtérbe. Bár ezek energiasűrűsége alacsonyabb az NdFeB mágnesekénél, a Halbach-elrendezés és az egyéb tervezési döntések ezt részben kompenzálják. Mágneses hajtóművek esetében a bárium- és stroncium-ferrit alapú mágnesek bizonyulnak megfelelőnek, különösen a Y30 és Y35 ipari minőségek, amelyek jó koercitivitással és termikus stabilitással rendelkeznek.

A Halbach-elrendezés miatt a pólusszám megválasztása szigorú geometriai korlátokhoz kötött, ezért az alacsony póluspárszám előnyös. A vizsgált lehetőségek közül a 2 és 7 póluspár kombinációja került kiválasztásra, amely 3,5-ös áttételt eredményez, összesen 36 mágnes alkalmazásával. Az említett szempontok alapján követelményjegyzéket állítottunk fel (1. táblázat), amely alapján a koncepciótervek is készültek a tárcsák és fluxusmodulátor kialakítását illetően. A koncepcióterveket döntési mátrixban vizsgáltuk, amelyek különböző szempontok alapján pontszámokat kaptak, majd a győztes koncepció kiválasztásra került. Ilyen formában a rotor koncepciója a 2a. ábrán látható és a fluxusmodulátor kialakítása a 2b. ábrán szerepel.

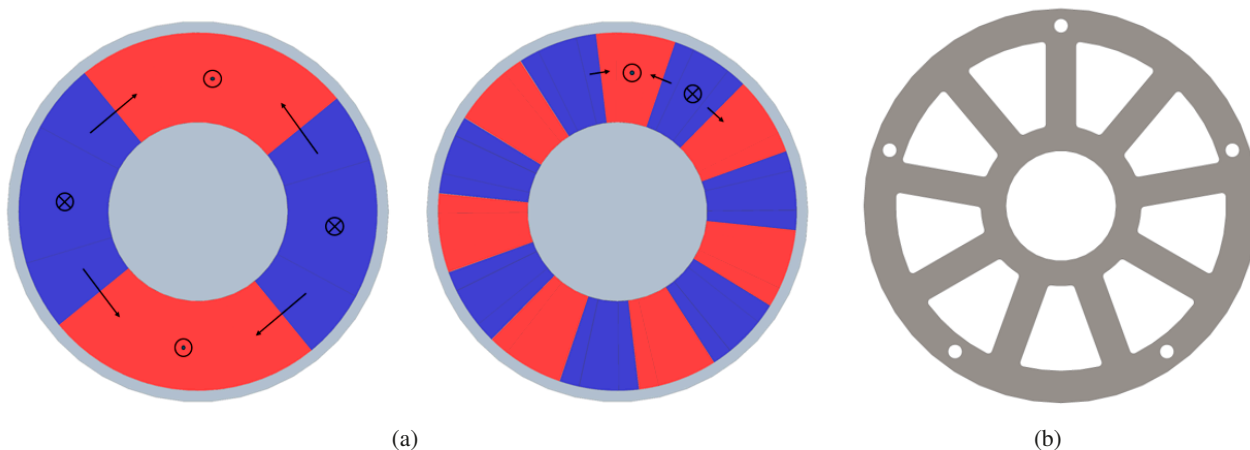
## 3. TRANZIENS SZIMULÁCIÓVAL TÖRTÉNŐ VÉGESELEMES VIZSGÁLAT

A tranziens 2D-s szimulációt JMAG-Designer Ver. 23.0 környezetben történt, lehetővé téve a dinamikus viselkedés vizsgálatát, például a nyomatékingadozás, a megcsúszási nyomaték, és a veszteségek forgó üzemi körülmények közötti meghatározását.

Mivel a Halbach-elrendezés tengelyirányban mágnesezett elemeket tartalmaz, a hajtómű nem modellezhető tárcsaként 2D-ben, ahogyan az általában a radiális hajtóművek vagy motorok esetében történik, ezért inkább a rotor kiterített geometriájával érdemes dolgoznunk. A modell (3. ábra) a teljes tárcsa felét tartalmazza, a mágnesek mágnesezési iránya 90°-al elfordított egymáshoz képest, két szegmensű Halbach-elrendezésben.

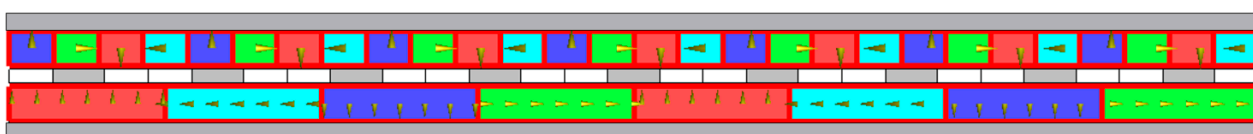
A mágnesek anyaga Y30 ferrit, míg a modulátor és a hátlap 50H470 jelű elektromos acél volt. A modell két oldalán pozitív periodikus peremfeltételt alkalmaztunk, a forgómozgást pedig a közepes sugárhoz

Kategória	Paraméter	Érték	Megjegyzés
<b>Állandómágnes</b>	Anyagtípus Mágnesezési elrendezés Mágnesszegmentálás	Y30 vagy Y35 ferrit Halbach-elrendezés max. 2–3 szegmens pólusonként	Ritkaföldfém-mentes, költségstabil Növeli a fluxussűrűséget Kisebb örvényáram-vesztés, könnyebb gyárthatóság
<b>Fluxusmodulátor</b>	Anyag Vastagság Vasmagok száma	Nagy permeabilitás 4–6 mm Póluspárszámból származtatva	Alacsony vasmagvesztés Telítődés elkerülése és merevség Lásd 2 egyenlet
<b>Légrés</b>	Névleges légrésméret Tűrés	1 mm oldalanként $\pm 0.05$ mm	Fluxusszórás minimalizálása Mégmunkálási és szerelési pontosság alapján
<b>Geometriai korlátok</b>	Szélesség x magasság x hossz	380x280x810 mm	Mérőrendszer méretkorlátja
<b>Mechanikai</b>	Rotor hátlap Csapágyazás	Alacsony széntartalmú acél O-elrendezés	Merev, zárja a fluxushurkot Nagy merevség a légrés megtartásához
<b>Hőtechnikai</b>	Max. üzemi hőmérséklet	100–120 °C	A ferrit Curie-hőmérséklete alatt
<b>Integráció</b>	Rögzítési felület Bemenő nyomaték	Mérőrendszerrel kompatibilis 7.2 Nm	Közvetlen integrációt tesz lehetővé Mérőmotor nyomatéka

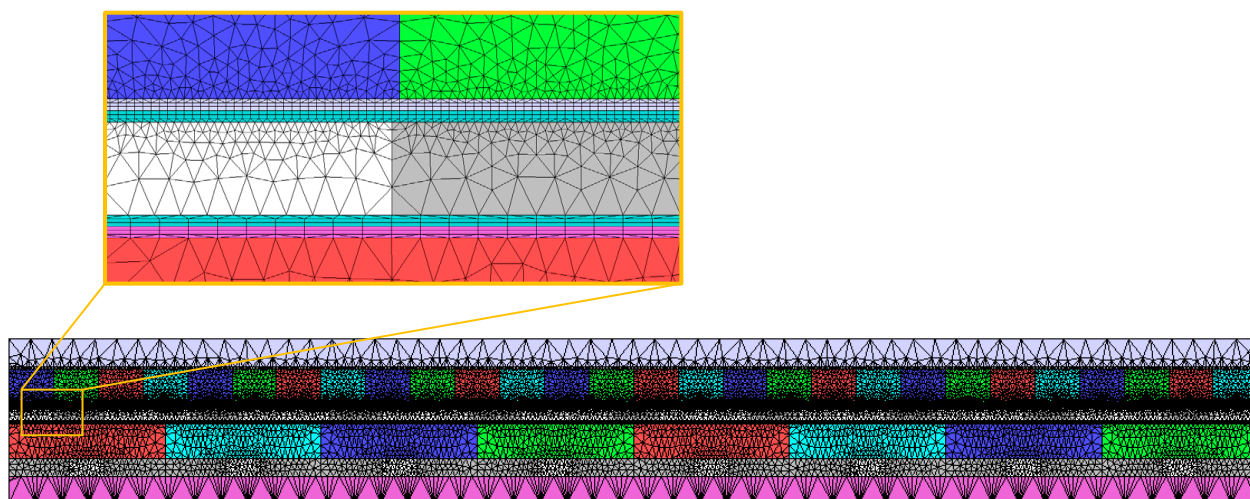


2. ábra. (a) rotor és (b) modulátor koncepcióterve

tartozó kerületi sebességnek megfelelő, x-irányú lineáris eltolással helyettesítettük, a rotorokat a mágneses áttétel szerinti, ellentétes irányú sebességgel mozgatva. A síkbeli erőkből a nyomatékot a  $T = R_{mean} \cdot F_{radial}$  összefüggéssel becsültük, lehetővé téve az időfüggő maximális átvihető nyomaték meghatározását. A háló strukturált, lokálisan finomított volt: az elemméret legfeljebb 1 mm, a mozgó és álló részek között csúszó interfésszel (minimum 5 elem), összesen 32 917 elemmel (4. ábra). A finomabb hálóval végzett tesztfuttatások nem okoztak számottevő eltérést az eredményekben.



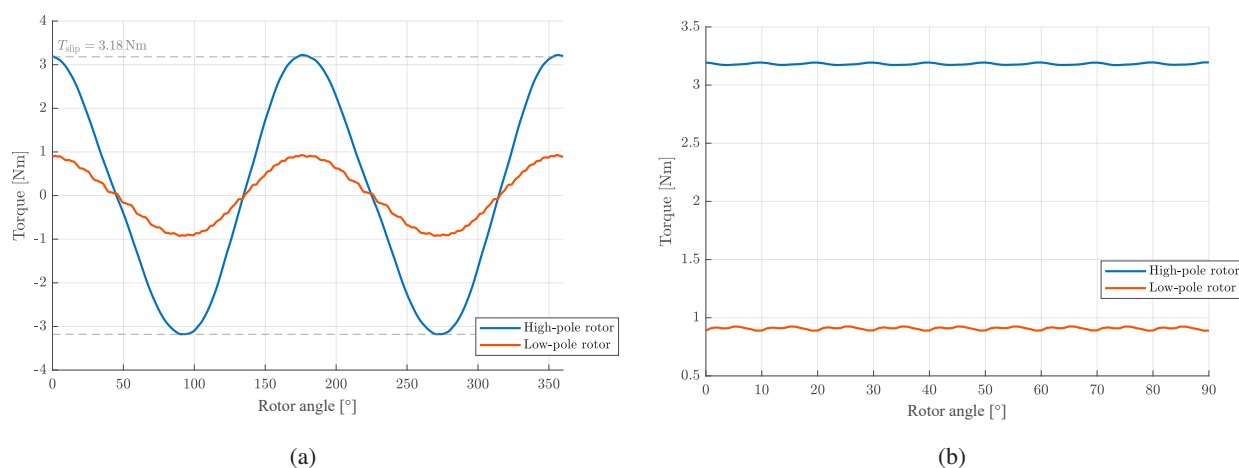
3. ábra. A mágneses hajtómű 2D-s kiterített metszeti modellje a feltüntetett mágnesezési irányokkal



4. ábra. A 2D modell hálószerkezete (kék/zöld/piros/türkiz – eltérő mágnesezési irányú ferritmágnesek, szürke – vas modulátor és hátlap, lila – levegő domain)

## 4. EREDMÉNYEK

A statikus nyomaték vizsgálata során a bemeneti oldalhoz tartozó rotort 500 RPM fordulatszámmal forgattuk, míg a másik tárcsa rögzítve volt. A nyomaték a rotor szögének függvényében közel szinuszos lefutást mutatott, nagyobb amplitúdóval a lassú oldali rotoron. A mágneses szétcsúszás előtti maximálisan átvihető nyomaték 3,18 Nm, amely a szinkron üzem határát jelenti. A 5a. ábra a hajtómű nyomatékgörbét mutatja a szögelfordulás függvényében.



5. ábra. (a) statikus nyomaték és (b) tranziens nyomaték a rotor szögelfordulásának függvényében

A tranziens nyomatékszimuláció során mindkét rotort 500 RPM állandó fordulatszámmal forgattuk. A 5b. ábra a stacionárius állapotban mért nyomatékokat mutatja. A nyomatékértékek időben közel állandók maradtak, ami azt jelzi, hogy a mágneses hajtómű szinkron üzemben működik, csúszás nélkül. A lassú oldali rotort átlagos nyomatéka megközelítőleg 3,18 Nm, míg a nagy fordulatszámú oldalon körülbelül 0,9 Nm adódik, amely megfelel a rendszer tervezett áttételének. A diagram viszonylag kis nyomatékingadozást mutat, ami stabil üzemállapotot jelez.

A veszteségszámítások alapján a modulátor vasvesztése 0,1 W, míg a mágnesek örvényáram-vesztése 0,005 W volt. Az alacsony veszteségek az alacsony üzemi frekvenciával, a mérsékelt fluxussűrűséggel, valamint a ferritmágnesek nagy fajlagos ellenállásával és a Halbach-mágnesezési elrendezéssel magyarázhatók.

## 5. ÖSSZEFOGLALÁS

A kutatás célja egy axiális fluxusú mágneses hajtómű koncepció terveinek elkészítése és elemzése volt, különös tekintettel az átvihető nyomaték maximalizálására a geometriai és mechanikai korlátok figyelembevételével. A konstrukció ferrit mágneseket tartalmaz, melyek alacsonyabb energiasűrűségét Halbach-elrendezés alkalmazásával kompenzáltuk, ezzel növelve az aktív légrésben kialakuló mágneses fluxussűrűséget és csökkentve a szivárgó fluxust.

A tervezési folyamatot részletes szakirodalmi áttekintés előzte meg, különösképpen a mágneses hajtóművekre való tekintettel. Ennek alapján kerültek meghatározásra a fő tervezési célok, a póluspár-kombinációk és a geometriai paraméterek. A kiválasztott konstrukció értékelése tranziens végelelemes szimulációkkal történt. A szimulációs eredmények igazolták a hatékony mágneses csatolást, az elméletileg számított áttétel megvalósulását, valamint az alacsony nyomatékingadozást és veszteségeket. Összességében a bemutatott megoldás igazolja, hogy megfelelő kialakítással a ferrit mágneses Halbach-elrendezés alkalmas nagy nyomatéksűrűségű axiális mágneses hajtóművek megvalósítására.

## 6. KONKLÚZIÓ

A ferritmágnesek alkalmazásából adódó átvihető nyomatékcsökkenését a Halbach-elrendezés és a hajtómű szerkezeti kialakítása hatékonyan ellensúlyozta. A javasolt konstrukció kedvező nyomatéksűrűséget és üzemi stabilitást mutatott, így ígéretes alapot biztosít a további kutatás és fejlesztés számára.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönet a Robert Bosch Kft.-nek és a BEST ösztöndíjprogramnak, hogy támogatták a kutatást, és megfelelő szakmai környezetet biztosítottak a tanulmány létrejöttéhez.

## HIVATKOZÁSOK

1. Ruiz-Ponce, G., Arjona, M. A., Hernandez, C. & Escarela-Perez, R. A Review of Magnetic Gear Technologies Used in Mechanical Power Transmission. *Energies* 16. köt. ISSN: 1996-1073. <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/4/1721> (2023).
2. Ruiz-Ponce, G., Arjona, M. A., Hernandez, C. & Escarela-Perez, R. Design Optimization of an Axial Flux Magnetic Gear by Using Reluctance Network Modeling and Genetic Algorithm. *Energies* 16. köt. ISSN: 1996-1073. <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/4/1852> (2023).
3. Nieto-Vesperinas, M. & Xu, X. *The complex Maxwell stress tensor theorem: The imaginary stress tensor and the reactive strength of orbital momentum. A novel scenery underlying electromagnetic optical forces. Light: Science Applications* (2022) 11:297 <https://doi.org/10.1038/s41377-022-00979-2>. October 12, 2022. 2022. okt.
4. Winter, O., Kral, C. & Schmidt, E. *Design study of magnet shapes for axial Halbach arrays using 3D finite element analyses 2012 XXth International Conference on Electrical Machines* (2012), 2660–2665. old.
5. Som, D. és tsai. Analysis and Testing of a Coaxial Magnetic Gearbox With Flux Concentration Halbach Rotors. *IEEE Transactions on Magnetics* 53. köt., 1–6. old. (2017).
6. Jian, L. & Chau, K. T. A Coaxial Magnetic Gear With Halbach Permanent-Magnet Arrays. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 25. köt., 319–328. old. (2010).
7. Dai, B., Nakamura, K., Suzuki, Y., Tachiya, Y. & Kuritani, K. Cogging Torque Reduction of Integer Gear Ratio Axial-Flux Magnetic Gear for Wind-Power Generation Application by Using Two New Types of Pole Pieces. *IEEE Transactions on Magnetics* 58. köt., 1–5. old. ISSN: 1941-0069 (2022. aug.).
8. Johnson, M., Gardner, M. C. & Toliyat, H. A. *Analysis of axial field magnetic gears with Halbach arrays 2015 IEEE International Electric Machines Drives Conference (IEMDC)* (2015), 108–114. old.