

Óbudai Egyetem

Tézisfüzet



**Állandó mágneses szinkrongépek számítógépes modellezése,
elemzése, nyomaték hullámosság csökkentő eljárások**

Jagasics Szilárd

Témavezető: Dr Vajda István

Alkalmazott Informatikai és Alkalmazott matematikai Doktori Iskola

Budapest 2018.március 1.

I. A kutatás előzményei

Témakör aktualitása

A vizsgált jelenség, a fognyomaték az angol irodalomban cogging torque néven található meg. A téma a 80-as évektől kezdett központba kerülni.

A fognyomaték egymáshoz képest mozgó állandó mágnes és hornyolt állórész esetén lép fel, nulla középértékű nyomaték hullámosság formájában jelentkezik a gép gerjesztésétől, üzemállapotától függetlenül. A zavaró nyomaték-hullámosságot, így a fognyomatékot is igyekeznek a gyártók, tervezők elfogadható szintre csökkenteni. Az igényesebb hajtások esetén a fognyomaték specifikációban szereplő jellemző, így a téma kutatására napi igény jelentkezik az ipar részéről. Az autóiparban jelenleg is napi problémát okoz például elektromechanikus kormányszervo hajtások területén. A kezdetekben a cikkekben a fognyomaték csökkentésére koncentráltak, majd a hangsúly a tömeggyártás során fellépő fognyomaték növekedést okozó tényezők vizsgálata felé tolódott.

A publikációkban a szerzők részletesen bemutatják a fognyomaték jelenségét, áttekintést adnak a széles körben alkalmazható fognyomaték csökkentő módszerekről [1-10,12], mint a pólus- vagy horonyferdítés vagy lépcsős mágnespólus-ferdítés vagy a „dummy slot”, azaz „ál-horony” alkalmazása. Leírják a módszerek előnyeit és hátrányait, a gyártással kapcsolatos járulékos nehézségeket. A horonyferdítés tekercselési nehézségeket okoz, a pólusferdítés rontja a gép teljesítménysűrűségét, a „dummy slot” alkalmazásával az effektív légrés növekszik, romlanak a gép teljesítmény viszonyai. A fognyomaték csökkentésre változatos módszereket mutatnak be, melyek általában kompromisszumos megoldások és a gépek egyéb paramétereit is befolyásolják. Esetenként alkalmaznak fognyomaték kompenzációt mikroprocesszoros hajtás esetén, de ilyen esetben motoronként identifikációra van szükség, ami kisebb darabszám esetén is időigényes feladat.

Az analitikus módszereket általában azért kedvelik, mert egyszerű, bizonyos elhanyagolásokkal megalkotott modellre épülnek. A számítás módját, útját pontosan nyomon lehet követni. A kezdetekben közelítő függvényeket alkalmaztak, majd a modellek egyre bonyolultabbak lettek, konkrét példára való alkalmazhatóságuk romlott.

A fognyomaték számítás a végeselemes szoftverek számára is komoly kihívást jelent. Ha a hálózás nem megfelelő, a számított eredmény hibája jelentős lehet, bizonyos esetekben az eredmény pontossága kérdéses [11].

Munkám során a Flux nevű szoftvert használom napi rendszerességgel, amely egy végeselemes, villamos gép számításra kifejlesztett szoftver, melyet pl. a NASA, több autóiipari illetve villamos gép gyártó cég is elterjedten használ. A számítás célja az adott alkalmazás igényeihez legjobban testreszabott konstrukció megalkotása. A kormány szervó alkalmazások esetén a nyomaték hullámosság szint elfogadhatóan alacsony szintre csökkentése, illetve a gép méretének minimalizálása jelenti a kihívást, amit tovább nehezít a 12V-os tápellátás is. A nyomaték hullámosság adódhat magából a motor konstrukcióból, illetve a gyártási szórások is jelentősen növelik a nyomaték hullámosság szintet. Tömeggyártás esetén a selejtarány minimalizálása is fontos tényező.

Az optimalizálási folyamat elvégezhető megfontolt mérnöki döntések alapján, vagy találgatással, utóbbi esetben a gép geometria paramétereinek meghatározott tartományon belüli változtatásával, azaz sok végeselemes modell végigszámíttatásával. A futtatás történhet egy munkaállomáson vagy szétszórható több munkaállomásra, szerverre is az adott szoftver fejlettségétől függően. Ha a modell átlagos részletességű, 10-20GB RAM elegendő, bonyolultabb geometria esetén gyakran előfordul, hogy 64GB memória is kevés a kellően finom hálózású modell kezeléséhez.

Jelenleg egy HP Z440 workstation-t használok, mely az alábbi kiépítésű: Intel Xeon E5-1650 v4 (6 mag, 3,6GHz), 64GB DDR4 (8*8GB, 2400MHz), 1TB SSD, 3*2GB HDD, NVIDIA Quadro M4000 8GB. Összetett feladatok megoldása a fenti konfiguráció esetén is napokig, hetekig tarthat. A szoftver használata is komoly ismereteket igényel. Hibásan felépített modell esetén az eredmény használhatatlan és a számítási idő is elvesztegetett.

A megoldás során a szoftver a kívánt lépésközzel automatikusan leforgatja a rotort a felhasználó által megadott szögelfordulási tartományban. Az egyes rotor pozíciókban elvégzi a számítást, majd az egyes pontokban kapott pl. nyomaték értékekből áll össze az eredmény görbe. A futási idő modell függő: a felbontás és a görbe periódus határozza meg az elvégzendő számítások darabszámát. A modell elemszáma meghatározza az egy-egy lépéshez tartozó számítási időt, amit a mágneskör nemlinearitásából adódó iterációk is bonyolítanak. A sok pontból álló görbe számítása eredményezhet végül hosszú időt igénylő számítást.

A Flux-hoz kiadták a Got-It kiegészítőt, melynek alkalmazásával a geometria parametrizálható, a paraméterek kívánt tartományban és lépésközzel változtathatók. A futtatás során a módosított végeselemes modellek számítása automatikusan végbe megy, nincs szükség modellek építésére. A geometria automatikusan, a paraméterek változtatása szerint módosul, a hálózás is automatizált. A felhasználó feladata az optimális megoldás kiválasztása.

Az ipar részéről komoly igény jelentkezik egy olyan számítási módszerre, amely alkalmas a hosszadalmas számítás kiváltására. A nyomaték hullámosság csökkentés bonyolult feladat. A végelelemes szoftver az egyes modellek esetén sok információt bocsájt a felhasználó rendelkezésére, mint az adott geometriához tartozó nyomaték hullámosság szint, térrészenkénti indukció értékek, stb, de tapasztalt mérnökök sem tudják sok esetben eldönteni, mit és hogyan lenne szükséges változtatni a geometrián a nyomaték hullámosság szint további csökkentéséhez. A próbálkozással történő geometria módosítás sok modell építését, illetve megoldását igényli és nem garantálja az optimális motor geometria megtalálását.

Az optimálisnak talált geometriát ezt követően meg kell vizsgálni gyártási szórásokra mutatott érzékenység szempontjából, azaz meg kell vizsgálni különböző mértékű gyártási szórások hatását, amely egyik oldalról jelentős számítási időt igényel, viszont az eredmények birtokában specifikálhatóak az alacsony selejtarányhoz tartozó tőrészek alkatrészenként lebontva, illetve az alkalmazandó gyártási technológia.

Kidolgoztam egy olyan számítási eljárást, amely a végelelemes módszer legfőbb erényét, a pontos térszámítási képességet ötvözi a nyomaték hullámosság fizikai modellezésével. A módszer végelelemes szoftver által számított eredményt használ fel, majd analitikus elven működik tovább, így kiváltható általa több hosszadalmas számítási folyamat. A módszer a vizsgált gép fizikai modelljén alapul. A gép eredő fognyomaték görbét több komponensre bontva kezeli. Az egyes komponensek viselkedése jól megfigyelhető, megvizsgálható a gyakoribb gyártási szórások hatása. A módszer továbbgondolásával fognyomaték csökkentésre is alkalmazható. Az egyes komponensek analitikus elven vannak kezelve, így megfelelő összevonásukkal a gép eredő fognyomaték görbéje is könnyen képezhető. Az eredmény egy jól használható, kis számítási kapacitást igénylő módszer, amely alkalmas a „találgatásra” pazarolt végelelemes számítások kiváltására, megspórolására.

Alkalmazásával a gyártási szórások hatása, az egyes hiba fajtákra mutatott érzékenység gyorsan, jó pontossággal modellezhető. Bizonyos esetekben a nyomaték hullámosság optimum keresésére is alkalmas. Az egyes geometria verziókhoz tartozó fognyomaték meghatározása órák helyett csak kb egy percet igényel egy átlagos notebook esetén is. A fizikai háttér nyomonkövethető, így a geometria módosítása mérnöki döntésen alapul a fejlesztés során, és nem találgatáson.

Tézisek szempontjából releváns források kritikai elemzése

Megvizsgáltam több analitikus elven működő fognyomaték számító módszert [13-18]. Többségük esetén nehéz értelmezni a változók jelentését, alkalmazhatóságuk így megkérdőjeleződik.

A [22-23]-ben a szerzők összegyűjtöttek számítási módszer szerint kategorizálva az egyes analitikus elven alapuló módszereket, rövid levezetésben részletezve a módszerek alapelveit. Az írás végén több különböző pólusszám-horonyszám kombinációjú gép esetén összevetik az egyes módszereket, illetve a referencia számítást végeelem módszerrel is elvégezték. A különböző módszerek által szolgáltatott eredmények markánsan eltérőek. A számítási hiba mértéke sztochasztikus, jelentősen geometria függő. A [22]-ben a referencia és az analitikusan számított jelalakok formára is eltérőek, bizonyos esetekben a görbealak hasonló, de jelentős az amplitúdóbeli differencia. A [23]-ban olyan modelleket ismertetnek, melyek pontos eredményt szolgáltatnak: kevesebb elhanyagolással élnek, egyik modell sem foglalkozik a gyártási szórások hatásával.

A [22, 23] alapján kijelenthető, hogy a tisztán analitikus elven működő módszerek pontossága kérdéses, ami vagy a modellezési algoritmusok korlátaiból, vagy a modellek változóinak értelmezhetőségéből fakad.

A végeelemes szoftverek terjedésével egyre több cikkben található átfogó analízis különböző optimalizálási megoldásokról, amelyek nyomaték hullámosság csökkentésre, illetve rezgés-zaj analízisre irányulnak. Megjelent több publikáció, amelyek a gyártási szórások hatásait vizsgálják [19-21], általában egy motor geometria esetén ismertetik az adott gyártási hiba hatását.

Több fognyomaték számításra kifejlesztett módszert publikáltak az utóbbi években. Egyes forrásokban az egy horony előtt egy mágnes elhaladása során fellépő fognyomaték görbék összegzéséből határozzák meg a komplett gép fognyomaték görbét [25-29]. A [24-25] bebizonyítja, hogy az eredő fognyomaték görbe az egy horonyhoz tartozó fognyomaték görbéből összegzéssel meghatározható. A [26,27,29] analitikusan határozza meg az egy horonyhoz tartozó fognyomaték görbét, majd ebből képezi a gép eredő fognyomatékát. A [28] egy belső mágnesű gép esetén ismerteti a szuperpozíció módszerét. A hivatkozott cikkek egyike sem foglalkozik a gyártási szórások érzékenység vizsgálatának modellezésével.

A gyakrabban alkalmazott fognyomaték csökkentő megoldások [30-35], mint a pólusferdítés vagy dummy slot alkalmazása rontja a gép teljesítménysűrűségét, több szerző olyan módszert keresett, mely minél kisebb mértékben befolyásolja a gép egyéb üzemi

paramétereit a hatékony fognyomaték csökkentés mellett. Az egyik ilyen lehetőség a mágnes pólusok ívszélességének, illetve alakjának optimalizálása, vagy a szimmetrikus pozíciójukból történő elmozdítása, azaz aszimmetrikus póluselrendezés alkalmazása [39-45]. A legtöbb esetben egy motor geometriára bemutatva elemzik, majd méréssel vagy véges elemes szimulációval igazolják a megoldás helyességét. A pólusív szélességének, pólusok pozícionálásának fognyomaték módosító hatására irányuló modellezési módszert, vagy a fizikai háttérrel ismertető publikációt nem találtam.

A gyártás, tervezés során előfordul, hogy korábbi ismeretekkel nem magyarázható jelenség okoz nehézségeket. Meleg egyesítéssel történő állórész rögzítés esetén, amikor a felmelegített alumínium házba hidegen helyezik be a vastestet, a ház belső furat átmérő meghatározása komoly feladat. Túl szűk ház esetén a vastesttre ható szorítóerő átlép egy szintet, és a vasvesztesség hirtelen többszörösére növekedhet [46]. A lemeztet szegecseléssel, noppolással történő rögzítése esetén a koszorúban lokális telítés keletkezhet, mely egy telítési szintet átlépve új fognyomaték komponens hoz létre [47]. Ez a telítés fázisáram függően is jelentkezhet, ha a koszorú bizonyos szakaszai a telítés határán vannak [48-49]. A vasvesztesség növekedését jelentős súrlódás növekedésként lehet tévesen észlelni.

A tervezetten, célzottan beállított, a koszorú megfelelő szakaszán elhelyezett telítési szinttel olyan fognyomaték komponens hozható létre, amely az eredeti lemezalakhoz tartozó fognyomaték görbével azonos periódusú, de eltérő fázishelyzetű. A fázishelyzet beállítható úgy, hogy jelentős mértékű kioltás lépjen fel a két fognyomaték komponens között, ezáltal az eredő fognyomaték görbe hatékonyan csökkenthető. A mágneses telítésből adódó fognyomaték komponensekkel az irodalomban 2011 után kezdtek foglalkozni, az eredményeimet 2009-ben publikáltam.

A hibrid modell adta lehetőségeket alkalmaztam a gyakorlatban. Azonos állórészű gép esetén terveztem öt variánst azonos állórész lemezalak és tekercselés esetén különböző forgórész geometriával, melyek héjmágneses illetve belső mágnesű elrendezések. Optimalizáltam a fognyomatékot és nyomaték hullámosságát, megvizsgáltam a variánsok viselkedését a teljes üzemi tartomány esetén (vasvesztesség, mágnes örvényáram veszteség, természetes jelleggörbe, mezőgyengítés elemzése, nyomaték hullámosság).

A pólusszám-horonyszám kombináció kiválasztásához alkalmaztam az irodalomban talált ismeretanyagot: zaj- és rezgésszint minimalizálása [51-55], mágnes veszteségek csökkentése [57-58], tekercselési rendszer optimalizálás [59-64], nyomaték lüktetés szempontjából [65-66], elemeztem más publikációk teljesítmény viszonyokkal kapcsolatos eredményeit [67-68].

A források egy-egy témakör elemzésével foglalkoznak. Ezen túlmenően felsorolt szempontok figyelembe vételével, globálisan optimalizált motor variánsokat terveztem és hasonlítottam össze.

II. Kutatás irányainak kitűzése

Az irodalmi áttekintés alapján kijelenthető, hogy a fognyomaték számítás, modellezés napi szinten előforduló, aktuális probléma az ipar számára. A gyártási szórások hatásának vizsgálata központi téma, az egyik legismertebb szerző, Z. Q. Zhu legfrissebb publikációja 2016.júniusában jelent meg [29].

A publikációk a gyártási szórások hatásait említik, a szórások hatásának vizsgálatára irányuló modellezési módszert nem találtam.

A publikált fognyomaték modellező módszerek többsége nehezen követhető, bizonyos változók jelentése nehezen azonosítható, ami az alkalmazhatóságot korlátozza. Az irodalmi áttekintésből, ipar igényeiből adódóan olyan témát választottam, amire nem találtam megoldást, így alkottam meg munkahipotéziseimet, amelyek az alábbiak:

Az 1.tézisben kidolgozott hibrid számítási módszer az egy horonyhoz tartozó fognyomaték görbét végeselemes számítás kimeneteként kapja meg. A számítás további szakaszában ez a görbe kerül feldolgozásra.

Az 1.tézisben ismertetett számítási módszer eltér a [25-29] irodalmaktól. Az összegzést először egy horony esetére, egy rotor fordulatra végzem el. Ezáltal figyelembe vehető az esetleges pólus aszimmetria, illetve mágnes pozíció hiba. Az így kapott görbék összegezhetőek hornyonként, azaz a légrés excentricitás esete is vizsgálható a hornyonkénti változó légrés útján. A görbék összegzése analitikus módon történik, gyors lefutású, jól követhető.

A numerikus módszerek egyik hátrányának sokan azt tartják, hogy a mögöttes fizikai háttér nem jelenik meg. A követhetetlenül bonyolult összefüggéseket alkalmazó analitikus módszerek is épp a követhetőséget veszítik el. A hibrid módszer az analitikus és a numerikus számítási módszerek előnyös tulajdonságait ötvözi: visszaadja az egyszerű modellek követhetőségét, ugyanakkor megőrzi a végeselem módszer részletgazdagságát.

A 2.tézis egy fognyomaték csökkentő módszert mutat be, amely az első tézisben bemutatott hibrid számítási módszeren alapul. Lehet olyan eltolt mágnes elrendezést kialakítani, amely során az egyes pólusátmenet – horonyszáj kölcsönhatás esetén fellépő

fogyomaték görbék minél nagyobb fokú kioltása a cél. A témához kapcsolódó publikált módszerek ismertetése során a fizikai háttér nem jelenik meg. A tézis a fizikai háttér bemutatására, magyarázatára koncentrálna, illetve egy számítási módszert ismertet, amely hatékonyan alkalmazható is.

A 3.tézisben egy fogyomaték csökkentő módszer szerepel. A módszer alapjaként lokális telítést hoztam létre a koszorú bizonyos szakaszain. Ez a lokális telítés új fogyomaték komponenszt hoz létre, mely a horonyszáj előtt elhaladó pólusátmenet által keltett fogyomaték görbével egyező periódusú, de eltérő fázisú, így részleges kioltás érhető el a görbékkel jól meghatározott, tervezett telítés esetén. A jelenséget [48-49] is tárgyalja, bizonyítja mint terheléstől függően fellépő fogyomaték komponenszt, de nem fogyomaték kioltásra használja fel.

A fogyomaték megfelelő szintre csökkentése során azt az optimumot keresik a tervezés során, melyik módszer, milyen mértékű csökkentő hatás mellett, hogyan befolyásolja a gép egyéb paramétereit. Ez a folyamat általában próbálgatással történik többszöri szimuláció elvégzésével. A mai számítástechnikai adottságokkal, szoftveres háttérrel ez a folyamat már automatizálható.

A 4.tézisben a hibrid módszert célirányosan alkalmazva kerestem az optimumot, azonos állórész és öt forgórész geometria esetén. A lemezalak meghatározásán túl megvizsgáltam a gépek veszteségeit, üzemi tartományait. Az eredmények ismeretében adott alkalmazásra nézve meghatározható, melyik variáns lenne a megfelelő választás az igények legmegfelelőbb kielégítésére.

III. Alkalmazott elméleti és kísérleti módszerek

A villamos gépek számítása összetett feladat, mai napig számos megoldatlan nehézség vár megoldásra.

A számítás során a mágneskör nemlinearitása okoz nehézséget. Az analitikus számítási módszerek a pontosabb eredmény érdekében egyre bonyolultabbak lettek, ami az értelmezhetőség, alkalmazhatóság rovására válik a legtöbb esetben.

A számítás elvégezhető végeeselemes módon is, amely pontos eredményt ad, de még jobban elfedi a fizikai hátteret.

Céлом egy olyan matematikailag korrekt, fizikai modellbe belátást engedő modellezési módszer megalkotása volt, amely hozzájárul bizonyos máig megoldatlan feladatok elvégzésére. Az egyik ilyen nyitott kérdés például a gyártási szórások hatásának vizsgálata, mint például a légrés excentricitás, mágnes pozíció hiba esete. Olyan modellezési eljárást nem találtam, amely alkalmas lenne adott geometria esetén becslést adni a specifikációhoz tartozó megengedhető gyártási szórások meghatározására.

Kidolgoztam egy egyszerű, jól követhető számítási módszert, amely analitikus elven működő, végeselemes számítással összekapcsolt hibrid eszköz. A modell egyszerűségéből fakadóan több probléma megoldására is kiterjeszhető, alkalmazható, amelyek az irodalomban ismertek, megoldhatóságuk bizonyított. A publikált megoldások eredményeket közölnek, vagy nagyon bonyolult elméleti levezetést mutatnak be, melyben az összetettségéből fakadóan a fizikai háttér elvész. A hibrid módszer ezzel szemben olyan megoldást kínál, amely több problémára is alkalmas, ugyanakkor nyomon követhető is.

IV.Új tudományos eredmények

1. Kidolgoztam egy hibrid fognyomaték számítási módszert. A fognyomaték számítás folyamatát felbontottam két főbb részre. Azonosítottam a fognyomaték görbe összetevőit, majd ezeket összegezve meghatároztam a gép eredő fognyomaték görbáját. A mágneskör gerjesztését a modellben a forgórész mágnesek hozzák létre. Az egyes mágnes pólusok az egyes hornyok előtt elhaladva létrehoznak egy-egy egyedi fognyomaték görbét, mely legyen $f_c(x)$. Az egyedi fognyomaték görbék összegzése a gép eredő fognyomaték görbáját eredményezi. A pontosság szempontjából meghatározó az egyedi fognyomaték görbe minősége, ezért végeselemes szoftverrel számítom. Az így rendelkezésre álló egyedi fognyomaték görbéket összegezve elő tudom állítani a gép eredő fognyomaték görbáját. Az összegzést úgy végzem, hogy vizsgálhassam a gyakoribb gyártási hibákra mutatott érzékenységet, melyek például a légrés excentricitás, mágnes pozíció hiba. A hornyonként, pólus-átmenetenként fellépő egyedi fognyomaték görbék összegzése kommutatív művelet, tetszőlegesen csoportosítva végezhető. Egy horonyra nézve összegezhető egy teljes rotor fordulat összes pólusátmenetéhez tartozó egyedi

fogyomaték görbe, ezáltal figyelembe vehető a póluskép: a mágnes pólusok pozíciója, azaz az esetleges mágnes pozíció hibák:

$$f_h(x) = \sum_{k=1}^n f_c(x + k\alpha)$$

ahol n a pólusok száma, α pólusok közti relatív mechanikus szög.

Az így megkapott, egy horonyra vonatkozó fogyomaték görbék megfelelő fázistolásával adódik a többi horony fogyomaték görbéje:

$$f_{cogg}(x) = \sum_{k=1}^z c_z \cdot f_h(x + k\beta)$$

ahol β a mágnes pólusok, hornyok közti relatív mechanikus szög. A fogyomaték görbék hornyonkénti összegzése lehetővé teszi a hornyonként eltérő légrés figyelembe vételét c_z faktorról, így a légrésszimmetria vizsgálatát.

A gép eredő fogyomatékát, illetve gyártási szórásokra mutatott érzékenységét az egyedi fogyomaték görbék összegződésének módja határozza meg. A pólusok-hornyok relatív pozíciójától függően a görbék fázistolással összegződnek, amely alapvetően meghatározza a gép fogyomaték szempontjából mutatott viselkedését.

2. A hibrid módszer kiterjesztésével kidolgoztam egy fogyomaték csökkentő eljárást. A módszer azon alapul, hogy a mágnes pólusok szélességét, vagy a mágnes pólusok pozícióját úgy módosítom, hogy az egyedi fogyomaték görbék között részleges, vagy teljes kioltás jöjjön létre. A rotor- vagy állórész geometria megfelelő módosításával előállítható olyan elrendezés, illetve ebből adódó pólusonkénti – hornyonkénti fogyomaték görbe fázishelyzet, hogy a görbék egy része ellenfázisú párral rendelkezzen és az összegzés során kompenzálják, kioltásuk egymást. A kompenzáló hatás az ellenfázisú görbepárosok számával fokozható. A kioltás módja lehet teljes vagy részleges.
3. Kidolgoztam egy olyan fogyomaték csökkentő módszert, mely az állórész lemezen tervezetten elhelyezett, átgondolt mértékű lokális telítés másodlagos hatásán alapul. Létrehozható olyan lokális telítés, amely által keltett fogyomaték görbe ellenfázisú a gép normál fogyomaték görbéjével, így a telítés mértékétől függően a görbék kioltják egymást. A módszer további előnye, hogy a lokális telítés horonyterület növeléssel is járhat, ezáltal a gép ohmos vesztesége is csökkenthető. Ez különösen a kisfeszültségű, nagyáramú motorok esetén előnyös.

4. Az elméleti tézisek eredményeit a gyakorlatban is alkalmaztam. Azonos pólusszám-horonyszám kombinációjú állandó mágneses szinkrongép esetén megvizsgáltam a gyakrabban alkalmazott öt forgórész variánst. Megkerestem a nyomaték hullámosság szempontjából (cogging és ripple) optimális forgórész geometriákat. A fognyomaték csökkentés során azt az állapotot kerestem, mely esetén a fognyomaték a legkisebb, de a gép egyéb paraméterei sem romlanak. Azonos állórész lemezt, tekercselési rendszert, mágnes anyagjellemzőt alkalmaztam. Megvizsgáltam a gépek teljesítmény viszonyait, különböző üzemmódokban fellépő veszteségeit, gépenkénti fajlagos alapanyag igényt, továbbá nyomatékhullámosság üzemállapottól való függését.

V. Az egyes eredmények hasznosítási lehetőségei

Az ipar részéről komoly igény jelentkezik olyan számítási, modellezési módszerre, amely alkalmas a tömegtermelés során fellépő gyártási szórások hatásának vizsgálatára. Az alkatrészenkénti tűrésmező alapvetően meghatározza a készre szerelt gép légrés excentricitását, az esetleges mágnes pólus pozíció hiba mértékét, melyek jelentős mértékben növelik a fognyomaték szintet.

Az általam kidolgozott hibrid fognyomaték számítási módszer gyors futású, alkalmas légrés excentricitás, pozícióhiba, mágnes póluserősség szórás vizsgálatára. Alkalmazásával hiba fajtánként, vagy kombinált esetekre is meghatározható a megengedhető maximális gyártási hiba, amivel a specifikáció még éppen tartható, ezáltal a gyártási tűrések is meghatározhatóak. A módszert gyakorlatban is alkalmaztam több motor tervezése során.

A maximális tűrésmező alkatrészenkénti meghatározásával optimalizálható a gyártás, egyszerűsödhet a minőség-ellenőrzés, csökken a selejtarány.

Az ismertett mágnes pólusív illetve pozíció optimalizálási módszer bizonyos esetekben hatékonyan alkalmazható fognyomaték csökkentésre. Nem igényel a szokásos szerszámozásnál bonyolultabb megoldásokat, az egyéb fognyomaték csökkentő eljárásoktól eltérően nem rontja a gép teljesítménysűrűségét.

A tervezetten, állórész koszorúban kialakított lokális telítéssel hatékonyan csökkenthető a fognyomaték. A módszer további előnye, hogy a lokális telítés a legtöbb esetben horonyterület növeléssel is jár, így a hatásfok is javul. A mai modern, szegmentált

állórészű gépek esetén is hatékonyan alkalmazható a módszer: a szegmensek közti hézag, illetve a horonyszáj méret megfelelő megválasztásával beállítható a fognyomaték szint, mivel megfelelő tervezés esetén a két komponens egymást gyengítve lép fel.

A forgórész típusok vizsgálatával meghatároztam az egyes variánsok számára előnyös üzemi tartományt, teljesítményviszonyokat, veszteségeket. A várható, leggyakrabban előforduló üzemi tartomány, illetve a tápforrás ismeretében így könnyebben kiválasztható az applikáció számára legelőnyösebb megoldás.

VI. Irodalmi hivatkozások listája

- [1] S. Hwang, D. K. Lieu: Design Techniques for Reduction of Reluctance Torque in Brushless Permanent Magnet Motors, IEEE Transactions on Magnetics, nov 1994, pp4287-89
- [2] S. M. Hwang, D. K. Lieu: Reduction of Torque Ripple in Brushless DC Motors, IEEE Transactions on Magnetics, nov 1995 pp 3737-39
- [3] T. M. Jahns, W. L. Soong: Pulsating Torque Minimization Techniques for Permanent Magnet AC Motor Drives – A Review, IEEE Transactions on Industrial Electronics, april 1996, pp 321-330
- [4] N. Bianchi, S. Bolognani: Design Techniques for Reducing the Cogging Torque in Surface-Mounted PM Motors, IEEE Transactions on Industry Applications, sept/oct 2002, pp 1259-65
- [5] M. Dai, A. Keyhani, T. Sebastian: Torque Ripple Analysis of a PM Brushless DC Motor Using Finite Element Method, IEEE Transactions on Energy Conversion, march 2004, pp 40-45
- [6] M. S. Islam, S. Mir, T. Sebastian: Issues in Reducing Cogging Torque of Mass-produced Permanent Magnet Brushless DC Motor, IEEE Industrial Applications Conference, 2013 oct, pp 393-400
- [7] Z. Q. Zhu, D. Howe: Influence of Design Parameters on Cogging Torque in Permanent Magnet Machines, IEEE Transactions on Energy Conversion, dec 2000, pp 407-412
- [8] Ch.Schlenk, D. Riesen, e. al: Cogging-Torque Analysis on Permanent-Magnet Machines by Simulation and Measurement, Technisches Messe 74, 2007, pp 393-401
- [9] Z. Q. Zhu: A Simple Method for Measuring Cogging Torque in Permanent Magnet Machines, Power & Energy Society General Meeting, 2009

- [10] Z. Gawecki, R. Nadolski: Construction Methods of Reducing Cogging Torque of a DC Brushless Motor, Proceedings of Electromechanical Institute, Issue 253, 2011, pp 39-50.
- [11] J. Skoczylas, R. Tresch: On the Reduction of Ripple Torque in PM Synchronous Motors without Skewing. Accuracy Problems, Electromotion, Number 2-3 April-September 2005. pp. 106-113
- [12] T. Srisiriwanna, M. Konghirun: A Study of Cogging Torque Reduction Methods in Brushless DC Motor, Transactions on Electrical Engineering, Electronics, and Communication, nr.2/2012 pp 146-152.
- [13] Z. Q. Zhu, D. Howe: Analytical Prediction of the Cogging Torque in Radial-field Permanent Magnet Brushless Motors, IEEE Transactions on Magnetics, march 1992, pp 1371-1374
- [14] Z. Q. Zhu, D. Howe, C. C. Chan: Improved Analytical Model for Predicting the Magnetic Field Distribution in Brushless Permanent-Magnet Machines, IEEE Transactions on Magnetics, jan 2002, pp 229-238
- [15] A. B. Proca, A. Keyhani, et.al: Analytical Model for Permanent Magnet Motors With Surface Mounted Magnets, IEEE Transactions on Energy Conversion, sept 2003, pp 386-391
- [16] D. Zarko, D. Ban, T. A. Lipo: Analytical Calculation of Magnetic Field Distribution in the Slotted Air Gap of a Surface Permanent-Magnet Motor Using Complex Relative Air-Gap Permeance, IEEE Transactions on Magnetics, july 2006, pp 1828-1837
- [17] Li Zhu, Z. Q. Zhu, C. C. Chan: Analytical Methods for Minimizing Cogging Torque in Permanent-Magnet Machines, IEEE Transactions on Magnetics, apr 2009, pp 2023-31
- [18] A. Kiyomarsi: Prediction of Torque Pulsations in Brushless Permanent-Magnet Motors Using improved Analytical Technique, Journal of Electrical Engineering, 2010, pp 37-43
- [19] L. Gasparin, R. Fiser: Impact of Manufacturing Imperfections on Cogging Torque Level in PMSM, IEEE PEDS 2011 dec Singapore, pp 1055-60.
- [20] L. Gasparin, R. Fiser: Cogging Torque Sensitivity to Permanent Magnet Tolerance Combinations, Archives of Electrical Engineering, 2013/3, pp 449-461.
- [21] L. Gasparin, R. Fiser: Sensitivity of Cogging Torque to Permanent Magnet Imperfections in Mass-produced PM Synchronous Motors, Przegląd Elektrotechniczny 2013 pp 80-83.
- [22] Li Zhu, S. Z. Jiang, Z. Q. Zhu, C. C. Chan: Comparison of Alternate Analytical Models for Predicting Cogging Torque in Surface-Mounted Permanent Magnet Machines, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, sept 2008, Harbin, China, pp 1-6

- [23] L. J. Wu, Z. Q. Zhu, D. A. Staton, M. Popescu, D. Hawkins: Comparison of Analytical Models of Cogging Torque in Surface-Mounted PM Machines, IEEE Transactions on Industrial Electronics, june 2012, pp 2414-25
- [24] A. Jabbari: An Experimental and Finite Element Analysis of radi and skew effects on interior permanent magnet motor performance, International Journal of Innovation and Applied Studies, jan. 2013, pp.50-60.
- [25] Z. J. Liu, J. T. Li, M. A. Jabbar: Cogging Torque Prediction by Superposition of Torque due to Pole Transition over slot, IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, 2005: 1219-1224.
- [26] Z. Q. Zhu, S. Ruangsinchaiwanich, D. Howe: Synthesis of Cogging Torque Waveform from Analysis of a Single Stator Slot, IEEE Transactions on Industry Applications, may 2006. Pp 650-57.
- [27] Z. Q. Zhu, S. Ruangsinchaiwanich, Y. Chen, D. Howe: Evaluation of Superposition Technique for Calculating Cogging Torque in Permanent-Magnet Brushless Machines, IEEE Transactions on Magnetics, may 2006 pp 1597-1603
- [28] Chun-Yu Hsiao, Sheng-Nian Yeh, Jong-Chin Hwang: A Novel Cogging Torque Simulation Method for Permanent-Magnet Synchronous Machines, Energies 2011, 4, 2166-2179.
- [29] Y. Li, Q. Lu, Z. Q. Zhu: Superposition Method for Cogging Torque Prediction in Permanent Magnet Machines With Rotor Eccentricity, IEEE Transactions on Magnetics, june 2016.
- [30] T. Li, G. Slemon: Reduction of Cogging Torque in Permanent Magnet Motors, IEEE Transactions on Magnetics, nov 1988, pp 2901-03.
- [31] B. Ackermann et.al: New technique for Reducing Cogging Torque in a Class of Brushless DC Motors, IEE Proceedings-B, Vol 139 july 1992 pp 312-320.
- [32] T. Ishikawa, G. R. Slemon: A method of Reducing Ripple Torque in Permanent Magnet Motors Without Skewing, IEEE Transactions on Magnetics, march 1993 pp. 2028-31.
- [33] C. Breton, et.al: Influence of Machine Symmetry on Reduction of Cogging Torque in Permanent-magnet Brushless Motors, IEEE Transactions on Magnetics, sept 2000, pp 3819-23.
- [34] S. Hwang, et.al: Cogging Torque and Acoustic Noise Reduction in Permanent Magnet Motors by Teeth Pairing, IEEE Transactions on Magnetics, sept 2000, pp 3144-46.

- [35] Z. Q. Zhu, S. Ruangsinchaiwanich, D. Howe: Reduction of Cogging Torque in Interior-magnet Brushless Machines, IEEE Transactions on Magnetics, sept 2003 pp 3238-40.
- [36] Z. Q. Zhu, S. Ruangsinchaiwanich, D. Howe: Analysis of Cogging Torque in Brushless Machines Having Nonuniformly Distributed Stator Slots and Stepped Rotor Magnets, IEEE Transactions on Magnetics, oct 2005 pp 3910-12.
- [37]. Y. Yang, et.al: The Optimization of Pole Arc coefficient to Reduce Cogging Torque in Surface-Mounted Permanent Magnet Motors, IEEE Transactions on Magnetics, april 2006, pp 1135-38.
- [38] A. Kumar et.al: Comparison of Methods of Minimization of Cogging Torque in Wind Generators Using FE Analysis, J. Indian Institute of Science, july-aug 2006 pp 355-62.
- [39] J. A. Güemes P. M. Garcia et al: Influence of Slot Opening Width and Rotor Pole Radius on the Torque of PMSM, International Conference on Renewable Energies and Power Quality, apr 2009
- [40] A. Jabbari M. Shakeri S. A. Nabavi Niaki: Pole Shape Optimization of Permanent Magnet Synchronous Motors Using the Reduced Basis Technique, Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering, mar 2010 pp 48-55.
- [41] D. Wang, X. Wang, Y. Yang, R. Zhang: Optimization of Magnetic Pole Shifting to Reduce Cogging Torque in Solid-Rotor Permanent-Magnet Synchronous Motors, IEEE Transactions on Magnetics, may 2010, pp 1228-34.
- [42] A. Saygin, A. Dalcali et.al: Influence of Pole Arc Offset on the Field and Output Parameters of Brushless DC Motors, Proc. Of the Intl. Conf on Future Trends in Electronics and Electrical Engineering-FTEE 2013, pp 16-20.
- [43] Z. Ferkova: Influence of Arrangement and Sizes of Magnets Upon Cogging Torque and EMF of Two-Phase PMSM, Maszyny Elektryczne Nr 4/2014 pp 43-48.
- [44]. A. N. Patel, A. P. Naik: Influence of Magnet Pole Arc Variation on The Cogging Torque of Radial Flux Permanent Magnet Brushless DC (PMBLDC) Motor, International Journal of Current Engineering and Scientific Research, 7/2015, pp 25-29.
- [45] Ion Trifu: Research on Reducing Cogging Torque in Permanent Magnet Synchronous Generators, U. P. B. Sci. Bull, 3/2015 pp 225-34.
- [46] D. Miyagi, K. Miki, N. Nakano, N. Takahashi: Influence of Compressive Stress on Magnetic Properties of Laminated Electrical Steels, IEEE Transactions on Magnetics febr 2010. pp 318-321.

- [47] Lovrec Gasparin, Rastko Fischer: Influence of Asymmetries in Stator Back Iron of PMS Motors to the Level of Cogging Torque Components, *Przeglad Elektrotechniczny* 3/2011, pp 53-56.
- [48] Z. Azar, Z. Q. Zhu, G. Ombach: Influence of Electric Loading and Magnetic Saturation on Cogging Torque, Back-EMF and Torque Ripple of PM Machines, *IEEE Transactions on Magnetics*, oct 2012., pp 2650-58
- [49] Ki-Chan Kim, Seung-Ha Jeon: Analysis on Correlation Between Cogging Torque and Torque Ripple by Considering Magnetic Saturation, *IEEE Transactions on Magnetics* may 2013, pp 2417-20.
- [50] D. Wu, Z. Q. Zhu: Design Tradeoff Between Cogging Torque and Torque Ripple in Fractional Slot Surface-Mounted Permanent Magnet Machines, *IEEE Transactions on Magnetics*, nov 2015
- [51] D. C. Hanselman: Effect of Skew, Pole Count and Slot Count on Brushless Motor Radial Force, Cogging Torque and back EMF, *IEE Proc. Electr. Power Appl.* Sept 1997, pp 325-330.
- [52] U. Kim, D. K. Lieu: Effects of Magnetically Induced Vibration Force in Brushless Permanent-Magnet Motors, *IEEE Transactions on Magnetics*, june 2005 pp 2164-72.
- [53] D. G. Dorrel, M. Popescu: Odd Stator Slot Numbers in Brushless DC Machines-An Aid to Cogging Torque Reduction, *IEEE Transactions on Magnetics* oct 2011 pp 3012-15.
- [54] Z. Q. Zhu, M. L. Mohd Jamil, L. J. Wu: Influence of Slot and Pole Number Combinations on Unbalanced Magnetic Force in Permanent Magnet Machines, *IEEE Transactions on Industry Applications*, jan/feb 2013 pp 19-30.
- [55] T. Sun, J. M. Kim et.al: Effect of Pole and Slot Combination on Noise and Vibration in Permanent Magnet Synchronous Motor, *IEEE Transactions on Magnetics*, may 2011 pp 1038-41.
- [56] M. Kanematsu et.al: Modeling and Control of Radial Force due to Electromagnetic Force in IPMSMs, *EVTec 2014 Society of Automotive Engineers of Japan*
- [57] R. Lateb, N. Takorabet, F. M. Tabar: Effect of Magnet Segmentation on the Cogging Torque in Surface-Mounted Permanent-Magnet Motors, *IEEE Transactions on Magnetics*, march 2006 pp 442-45.
- [58] Qi Li, Tao Fan, Puqi Ning: An Analytical Approach to Magnet Eddy-Current Losses for Interior Permanent-Magnet Synchronous Machines During Flux Weakening, *IEEE Transactions on Magnetics* aug 2015

- [59] T. Kanayama, T. Morita: Comparative Study on Pole-Slot Combinations for Interior Permanent Magnet Synchronous Motors with Concentrated Windings, The Electrical Conference on Electrical Engineering 2008 pp 1-6.
- [60]. A. EL. Refaie, Z. Q. Zhu, T. M. Jahns, D. Howe: Winding Inductances of Fractional Slot Surface-Mounted Permanent Magnet Brushless Machines, IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 2008
- [61] M. Barcaro, N. Bianchi, F. Magnussen: Analysis and Tests of a Dual Three-Phase 12-Slot 10-Pole Permanent-Magnet Motor, IEEE Transactions on Industry Applications, nov/dec 2010, pp 2355-62.
- [62] G. H. Lee et.al: Inductance Measurement of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor in Stationary Frame of Reference, Journal of Magnetics 2011 pp 391-397.
- [63] E. Fornasiero, L. Alberti, N. Bianchi, S. Bolognani: Considerations on Selecting Fractional-Slot Nonoverlapped Coil Windings, IEEE Transactions on Industry Applications, may/june 2013, pp 1316-24.
- [64] Steven A. Evans: Salient Pole Shoe Shapes of Interior Permanent Magnet Synchronous Machines, XIX ICEM 2010 Rome
- [65] S. K. Lee et.al: Stator and Rotor Shape Designs of Interior Permanent Magnet Type Brushless DC Motor for Reducing Torque Fluctuation, IEEE Transactions on Magnetics, nov 2012 pp 4662-65.
- [66] K. Wang, Z. Q. Zhu, G. Ombach: Optimal Rotor Shape with Third Harmonic for Maximizing Torque and Minimizing Torque Ripple in IPM Motors, ICEM 2012 XXth Conference pp 397-403
- [67] T. Finken, M. Hombitzer, K. Hameyer: Study and Comparison of Several Permanent-Magnet Excited Rotor Types Regarding Their Applicability in Electric Vehicles, Emobility-Electrical Power Train, 2010
- [68] T. Gundogdu, G. Komurgoz: Design of Permanent Magnet Machines with Different Rotor Type, International Journal of Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering, 10/2010 pp 1510-15.
- [69] G. Lei, J. Zhu, Y. Guo , C. Liu, B. Ma: A Review of Design Optimization Methods for Electrical Machines, Energies 2017, 10,1962 pp 1-31.
- [70] N.Uzhegov, E. Kurvinen, J.Nerg, J. Pyrhönen, J. T. Sopanen, S. Shirinskii: Multidisciplinary Design Process of a 6-Slot 2-Pole High-Speed Permanent-Magnet

Synchronous Machine, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume 63, Issue 2, 2016 Feb

VII.A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

[69] Jagasics Szilárd, Vajda István: A Hybrid Method for Cogging Torque Calculation for Mass Produced Permanent Magnet Machines, Budapest, Magyarország, 2015.10.19-2015.10.21. (Computational Intelligence and Informatics (CINTI), 2015 16th IEEE International Symposium on; 1., ISBN: 978-1-4673-8520-6/15

[70] Szilárd Jagasics, István Vajda: Comparison of Different PMSM Rotor Configurations, Electric Vehicle Conference (IEVC), 2014 IEEE International, Florence, Olaszország, 2014.12.17-2014.12.19. Florence: IEEE, 2014. (ISBN:978-147996075-0)

[71] Jagasics Szilárd: Villamos gép tervezés végeelem módszer alkalmazásával, Elektrotechnika, (ISSN: 0367-0708) 2010/1: (1) pp. 8-9. (2010)

[72] Szilárd Jagasics: Comprehensive Analysis on the Effect of Static Air Gap Eccentricity on Cogging Torque: Robotics in Alpe-Adria-Danube Region (RAAD), 2010 IEEE 19th International Workshop on, 2010: pp. 447-449. (2010)

[73] Jagasics Szilárd: A lokális telítés fognyomatékra gyakorolt hatása, Elektrotechnika, (ISSN: 0367-0708) 2009: (2) pp. 11-14. (2009)

[74] Szilárd Jagasics: The Effect of Mechanical Misalignments on Cogging Torque in Mass Produced Permanent Magnet Synchronous Motors, Science In Practice 26th International Conference, Osiek, Horvátország, 2008.05.05-2008.05.07. pp. 49-52. (ISBN:86-85409-03-9)

[75] Szilárd Jagasics: The effect of mechanical misalignments on cogging torque in mass produced PMSM machines, IYCE 2007. International Youth Conference on Energetics, Budapest, Magyarország, 2007.05.31-2007.06.02. (BME) pp. 219-222. (ISBN:978-693-420-908-0)

[76] Jagasics Szilárd: Fognyomaték csökkentési módszerek állandó mágneses szinkron szervomotorok esetén, Elektrotechnika (ISSN: 0367-0708) 2007: (1) pp. 7-9. (2007)

[77] Szilárd Jagasics, István Vajda: Cogging Torque Reduction by Magnet Pole Pairing Technique, Acta Polytechnica Hungarica folyóirat 13:(4) pp. 107-120. (2016)

[78] Jagasics Szilárd, Vajda István: Forgórész típusok összehasonlítása állandó mágnesű szinkron gépek esetén, Elektrotechnika, 2017. 5-6. szám, pp.13-17.

[81] Szilárd Jagasics, István Vajda: Optimization of a Permanent Magnet Synchronous Motor, The International Journal of Engineering and Science (IJES) Volume 7 Issue 3 Ver. PP 30-35 2018 ISSN (e):2319–1813 ISSN (p): 23-19–1805