

Óbudai Egyetem

Doktori (PHD) értekezés



**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.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	4
1.1. Témakör aktualitása	4
1.2. Fognyomaték.....	5
1.3. Ripple.....	6
1.4. Mikor zavaró a fognyomaték?.....	6
1.5. Modellezéssel szemben támasztott igények.....	7
1.6. Tézisek szempontjából releváns források kritikai elemzése	9
1.7. Kutatás irányainak kitűzése	11
1.8. Alkalmazott elméleti és kísérleti módszerek.....	13
1.9. Új tudományos eredmények	14
1.10. Az egyes eredmények hasznosítási lehetőségei.....	16
2. A konstrukciós alapváltozatok azonosítása a fő alkalmazási területeknek megfelelően.....	17
2.1. Állórész kialakítás	17
2.2. Forgórész kialakítás	23
3. Fognyomaték modellezési módszerek vizsgálata.....	26
3.1. Analitikus módszerek	26
3.2. Végeselem módszer	28
3.3. Előkalkulációs szoftverek.....	30
3.4. Mérőrendszer	30
4. Gyártási szórások hatásának vizsgálata.....	34
5. Hibrid fognyomaték számítási módszer (1.tézis)	39
6. Cogging csökkentési módszerek.....	51
6.1. Adaptív controller.....	51
6.2. Pólus ferdítés.....	51
6.3. Dummy slot	54
6.4. Ripple csökkentés pólusív formázással	55
7. Pólusív optimalizálás (2.tézis).....	56
7.1. Pólusok aszimmetrikus elhelyezése	59
8. Lokális telítések alkalmazása (3.tézis)	64
8.1. Szegmentált állórész.....	69
9. Forgórész típusok összehasonlítása (4.tézis).....	71
9.1. Horonyszám választás, tekercselési lehetőségek.....	72

9.2.	Mágneses forrású húzóerő vizsgálata	75
9.3.	Forgórész típusok	78
9.4.	Héjmágneses rotor (spm)	81
9.5.	Besüllyesztett héjmágneses rotor (spm_bes)	82
9.6.	Tangenciális mágneselrendezésű rotor (tang)	83
9.7.	V elrendezésű rotor (v).....	85
9.8.	Küllős elrendezésű rotor	86
9.9.	A különböző forgórészekkel kapott eredmények összehasonlítása.....	90
9.9.1.	Cogging	90
9.9.2.	Ripple.....	90
9.9.3.	Rotor variánsból kivethető maximális nyomaték	93
9.9.4.	Fordulatszám-nyomaték görbék	94
9.9.5.	Induktivitások	98
9.9.6.	Mágnes veszteségek.....	100
9.9.7.	Vasvesztesség	103
9.9.8.	Beépített aktív anyagmennyiség	105
10.	Összefoglalás	106
	Irodalomjegyzék	107
	A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények	112

1.Bevezetés

1.1. Témakör aktualitása

A vizsgált jelenség, a fognyomaték az angol irodalomban cogging torque néven ismert. 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 igény jelentkezik az ipar részéről. Az autóiparban jelenleg is napi problémát okoz például elektromechanikus kormány szervó hajtások területén. A kezdetekben a cikkekben a fognyomaték csökkentésére koncentráltak, majd a hangsúly a tömeggyártás során fellépő fognyomaték növekedést okozó tényezők vizsgálata felé tolódott.

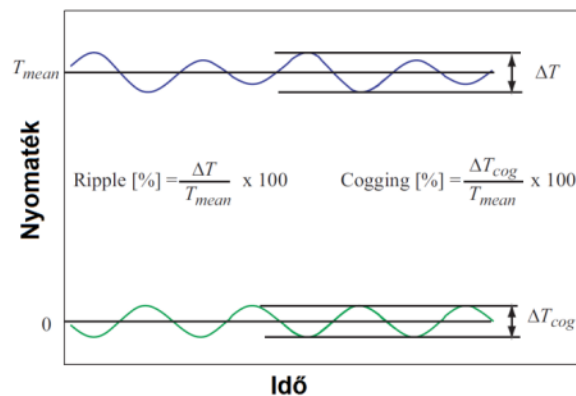
A publikációkban a szerzők részletesen bemutatják a fognyomaték jelenségét, áttekintést adnak a széles körben alkalmazható fognyomaték csökkentő módszerekről [1-10,12], mint a pólus- vagy horonyferdítés vagy lépcsős mágnespólus-ferdítés vagy a „dummy slot”, azaz „ál-horony” alkalmazása. Leírják a módszerek 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].

1.2. Fognyomaték

Dolgozatomban a fognyomaték számításával, modellezésével, csökkentésével foglalkozom. A fognyomaték magnetosztatikus hatáson alapul. Minden olyan gépben fellép, ahol a mágnesek olyan geometria előtt haladnak el, ahol különböző mágneses vezetőképességű régiók váltakoznak. Ilyen például, ha egy hornyolt állórészű, forgórészen rögzített mágnesű villamos gép forgórészét forgatjuk, de lineáris motorok esetén is jelentkezik.



1.1.ábra. Cogging és ripple értelmezése.

A jelenség a gép minden üzemállapotában fennáll, táplálás nélkül is jelentkezik (1.1.ábra). A fognyomaték több tényezőtől függ: befolyásolják a görbealakot a gyártási szórások, a lokális mágneses telítések, az anyagi jellemzők szórása, illetve alapvetően meghatározza a gép pólusszám-horonyszám kombinációja.

A fognyomaték alapharmonikusának periódusa:

$$T = \frac{2\pi}{LKT(2p, Z)} \quad (1.3)$$

ahol $2p$ a gép pólusainak a száma, Z a horonyszám, LKT a legkisebb közös többszörös.

A fognyomatékot általában a gép névleges nyomatékára viszonyítva adják meg. A specifikáció teljesítéséhez létezik számos fognyomaték csökkentési módszer. A gyártás során ellenőrzik a paramétereket, a specifikációt nem teljesítő gépeket ki kell válogatni. A gyártást úgy kell előkészíteni, hogy a gépek paraméterei a specifikációban meghatározott tartományon

belül legyenek, ennek megfelelően kell megadni a gyártási tűréseket. A jól definiált gyártási tűrésekkel komoly megtakarítás érhető el, ha ezáltal a sor végi mérési, minősítési procedúra jelentősen egyszerűsíthető, illetve a selejt arány is csökkenthető, illetve stabil szinten tartható.

1.3. Ripple

Ripple alatt az a nyomaték hullámosság komponens értendő, ami a táplálásból adódik, illetve a gép gerjesztett állapotában tapasztalható, így a fognyomatékot is magában foglalja. Szinuszos gép szinuszos áramú táplálásakor a ripple értéke elvileg nulla. Ha a táplálás nem ideális, vagy a gép nem tökéletesen szinuszos, nyomaték felharmonikusok jelennek meg. A gép ripple szintje általában telítés függő, azaz a kis áramú és a nagyobb áramú tartományban különböző. A mágneskörben fellépő lokális telítések felharmonikusokat hoznak létre, melyek a nyomaték görbén is megjelennek.

1.4. Mikor zavaró a fognyomaték?

A nyomaték hullámosság a legtöbb alkalmazás esetén nem specifikált jellemző, azonban bizonyos esetekben a termék minőségét, megítélését jelentősen befolyásolja. Az egyik ilyen széleskörű felhasználási terület például az autókban található elektromos kormány szervó. Sokan emlékeznek még a kormányrásegítés nélküli járművekre, hogy álló jármű esetén a kormányt nehéz tekerni, mozgó jármű esetén viszont ez megszűnik. Ebből adódóan két fő feladat hárul az elektromos rásegítésű rendszerekre: álló jármű esetén át kell venniük a nehéz kormányzást, míg mozgó jármű esetén bizonyos esetekben éppen gátolnia kell a veszélyes manővereket, hogy a jármű ne borulhasson fel.

A fognyomaték elektromos kormány szervó esetén főút, autópálya szakaszokon a leginkább zavaró, amikor jellemzően nagyon alacsony nyomaték szükséges a jármű sávon belüli helyzetének esetleges változtatásához. Az 1.1. ábrán is látható, hogy a fognyomaték nulla középértékű jelenség. Rászuperponálódik a mindenkori nyomaték görbére, a gép kisebb nyomatékú üzemi tartományában fokozottan jelentkezik zavaró hatása. Ha a fognyomaték akkora mértékű, hogy a kormány mozgása „darabossá” válik, azaz a kormány mozgásához szükséges nyomaték nagysága közel esik a fognyomatékhoz, nagyon rossz kormányérzetet

eredményez. A kormány szöghelyzet lépcsőzetesen módosítható, ezáltal előállhat olyan helyzet, hogy a vezető két szöghelyzet állapot között kormányoz folyamatosan, mivel nem tudja a kettő közötti kívánt pozíciót beállítani. A folyamatos cikk-cakk szerű haladásra sokan érzékenyek, kellemetlennek találják. Több gyártó 0,05..0,1Nm alatti fognyomatékokot követel meg.

1.5. Modellezéssel szemben támasztott igények

Munkám során a *Flux* nevű szoftvert használom napi rendszerességgel, amely egy végeeselemes, 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 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 optimalizálási eljárások alkalmazásával, utóbbi esetben a gép geometria paramétereinek meghatározott tartományon belüli változtatásával, azaz sok végeeselemes modell végigszámíttatásával. A futtatás történhet egy munkaállomáson vagy szétsztható 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 megadott 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 értékek összegzésével generálható áll össze az eredmény görbe. A futási idő modelfüggő: 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 motor geometria parametrizálható, a paraméterek kívánt tartományban és lépésközzel változtathatóak. A futtatás során a módosított végeleemes 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 módszerre, amely alkalmas a hosszadalmas számítás kiváltására. A nyomaték hullámosság csökkentés bonyolult feladat. A végeleemes 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 számos végeleemes modell építését, illetve megoldását igényli és nem garantálja az optimális motor geometria megtalálását.

Az optimálisnak ítélt 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 tűrések alkatrészenként lebontva, illetve az alkalmazandó gyártási technológia.

Kidolgoztam egy olyan számítási eljárást, amely a végeleemes módszer legfőbb erényét, a pontos térszámítási képességet ötvözi a nyomaték hullámosság fizikai modellezésével. A módszer végeleemes 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 megfelelő összevonásával a gép eredő fognyomaték görbéje is könnyen képezhető. Az eredmény egy jól használható, kis számítási kapacitást igénylő módszer, amely alkalmas a „találgatásra” pazarolt végeleemes számítások kiváltására.

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 számítás egy átlagos notebook esetén is percek alatt lefut. A fizikai háttér nyomonkövethető, így a geometria módosítása mérnöki döntésen alapul a fejlesztés során, és nagyságrendekkel rövidebb időt igényel, mint egy találgatással megadott tartományra futtatott végelelemes számítás sorozat.

1.6. 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. Több különböző pólusszám-horonyszám kombinációjú gép esetén összevetik az egyes módszereket, illetve a referencia számítást végelelem 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, viszont 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 végelelemes 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 mérésrel vagy véges elemes szimulációval igazolják a megoldás helyességét. A pólusív szélességének, pólusok pozícionálásának fognyomaték módosító hatására irányuló modellezési módszert, vagy a fizikai hátteret 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 vastestre ható szorítóerő átlép egy szintet, és a vasveszteség 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 vasveszteség növekedését jelentős súrlódás növekedésként lehet tévesen észlelni, értelmezni.

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 amplitúdó hatékonyan csökkenthető. A mágneses telítésből adódó fognyomaték komponensekkel az irodalomban 2011 után kezdtek foglalkozni, a saját 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 hullámosságot, megvizsgáltam a variánsok viselkedését a teljes üzemi tartomány esetén (vasveszteség, 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.

A publikációk a gyártási szórásokkal, illetve ezek hatásaival nem foglalkoznak. A hibrid modell egyik legnagyobb előnye a gyártási hibák hatásainak vizsgálhatósága, mivel képes a főbb hiba fajták, mint légrés excentricitás, mágnes pozíció hiba hatásának gyors vizsgálatára, az adott motor gyártási hibákra mutatott érzékenységére, illetve ebből fakadóan az alkatrészenkénti méret toleranciasáv meghatározására.

1.7. 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 végeeselemes 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 kapcsán. 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 végeelem 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 fognyomaték görbék minél nagyobb kioltása a cél. A témához kapcsolódó publikált módszerek ismertetése során a fizikai háttér nem jelenik meg. A tézis a fizikai háttér bemutatására, magyarázatára koncentrál, illetve egy számítási módszert ismertet, amely hatékonyan alkalmazható is.

A 3.tézisben egy fognyomaték csökkentő módszer szerepel. A módszer alapjaként lokális telítést hoztam létre a koszorú bizonyos szakaszain. Ez a lokális telítés új fognyomaték komponenszt hoz létre, mely a horonyszáj előtt elhaladó pólusátmenet által keltett fognyomaték 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 fognyomaték komponenszt, de nem fognyomaték kioltásra használja fel.

A fognyomaték megfelelő szintre csökkentése során azt az optimumot keresik a tervezéskor, hogy 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.

1.8. 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 végeselemes módon is, amely pontos eredményt ad, de még jobban elfedi a fizikai hátteret.

Célom egy olyan matematikailag korrekt, fizikai modellbe belátást engedő modellezési módszer megalkotása volt, amely hozzájárul bizonyos máig megoldatlan feladatok elvégzésére. Az egyik ilyen nyitott kérdés 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 kiterjeszthető, 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.

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

$$f_h(x) = \sum_{k=1}^n f_c(x + k\alpha) \quad (1.1)$$

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

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

$$f_{cogg}(x) = \sum_{k=1}^z c_z \cdot f_h(x + k\beta) \quad (1.2)$$

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

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

2. A hibrid módszer kiterjesztésével kidolgoztam egy fognyomaték csökkentő eljárást. A módszer azon alapul, hogy a mágnes pólusok szélességét, vagy a mágnes pólusok pozícióját úgy módosítom, hogy az egyedi fognyomaték görbék között részleges, vagy teljes kioltás jöjjön létre. A rotor- vagy állórész geometria megfelelő módosításával előállítható olyan elrendezés, illetve ebből adódó pólusonkénti – hornyonkénti fognyomaték 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 fognyomaték csökkentő módszert, mely az állórész lemezen tervezetten elhelyezett, átgondolt mértékű lokális telítés másodlagos hatásán alapul. Létrehozható olyan lokális telítés, amely által keltett fognyomaték görbe ellenfázisú a gép normál fognyomaték görbéjével, így a telítés mértékétől függően a görbék kioltják egymást. A módszer további előnye, hogy a lokális telítés a horonyterület növelését vonja maga után, ezáltal a gép ohmos vesztesége is csökkenthető. Ez különösen a kiefeszültségű, 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 anyag igényt, továbbá nyomaték hullámosság üzemállapottól való függését.

1.10. 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 tűrésmezők alapvetően meghatározzák a kész 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 fajtanként, 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 ismertetett 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 konstrukció.

2. A konstrukciós alapváltozatok azonosítása a fő alkalmazási területeknek megfelelően

Állandó mágneses motort széleskörűen alkalmaznak nagy energiasűrűségű hajtásokhoz. Ilyen terület pl. a szervohajtások, az akkumulátoros járművek főhajtása, hibrid autók, akkumulátoros kéziszerszámok, robotok, egyéb autóiipari hajtások, pl start-stop rendszerű indító motor-generátor, stb.

2.1. Állórész kialakítás

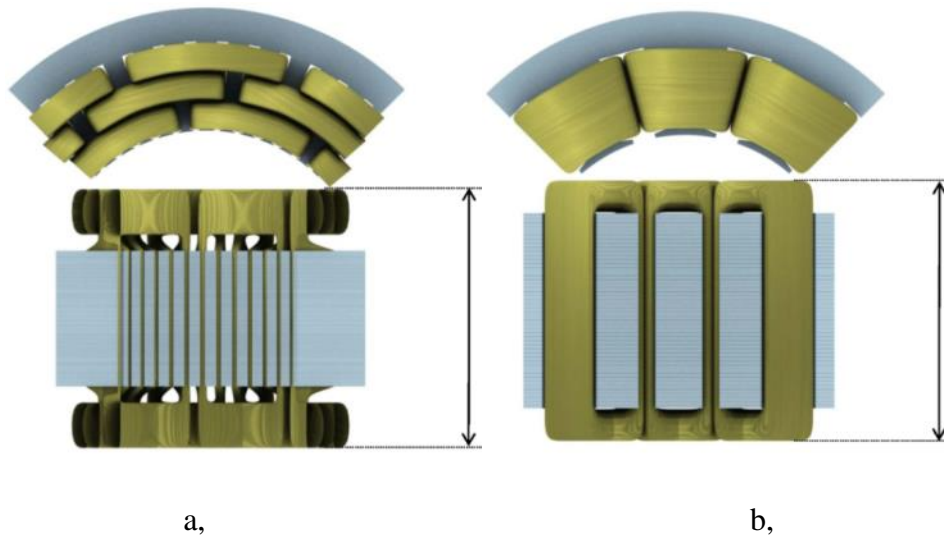


2.1.ábra. Elosztott tekercselésű állórészek.

Alapvetően meghatározza a gép üzemi viszonyait a tekercselési rendszer és a gép mérete, illetve a tápforrás feszültsége. Kisfeszültségű motorok esetén nagyobb az áramsűrűség, különösen a rövid – vagy impulzus üzemű gépek esetén. Tekercselés, állórész lemez kialakítás szempontjából jelentős az eltérés a négyszög illetve a kör keresztmetszetű huzal alkalmazása esetén.

A tekercselési rendszer szerint külön csoportba sorolandóak a hagyományos, egész horonyszámú elosztott tekercselésű illetve a fogratekercselt, tört horonyszámú gépek. A villamos gép nyomaték képzés szempontjából a tekercs aktív szakasza a horonyban lévő rész, a tekercsfej, azaz a tekercsüket összekötő szakasz inaktív. Elosztott tekercselésű gépek esetén a tekercsfej mérete nagy, rövid vastestű gépek esetén a tekercsfej hossza összemérhető az aktív hosszal. Elosztott tekercselés esetén a tekercsfej méret a horonyosztás többszöröse (2.2.a.ábra). A kisebb teljesítményű gépek esetén könnyen összemérhető méretűre adódhat a

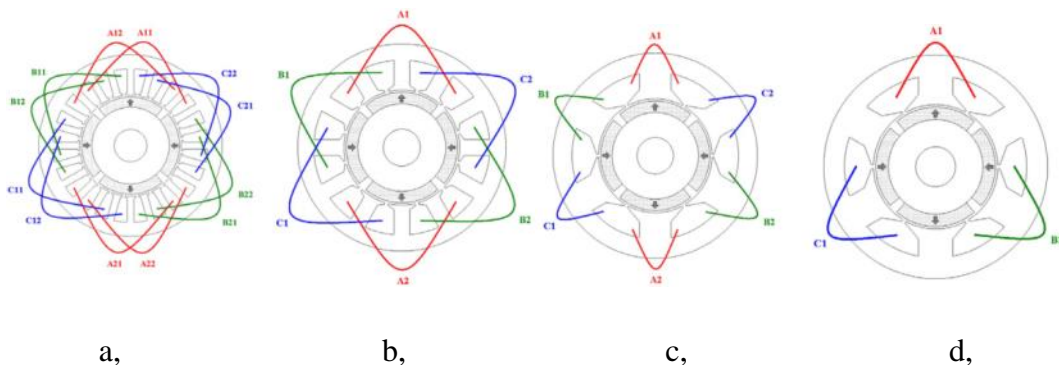
tekercsfej illetve a horonyban levő tekercs hossza, ilyen esetben a fogra tekercseléssel a gép ellenállása jelentősen csökkenthető, illetve gazdaságosabb a gyártás is.



2.2.ábra. a, elosztott b, koncentrált tekercselésű, fogra tekercselt állórész kialakítás.

Kisfeszültségű gépek (pl autóiipari alkalmazások) esetén az ellenállás és így az ohmos veszteségek minimalizálása kulcsfontosságú.

Egész horonyszámú elosztott tekercselés esetén (2.2.a és 2.3.a,b.ábra) a különböző fázishoz tartozó vezetők keresztezik egymást a tekercsfejben, lehetőséget adnak esetleges fáziszárlat kialakulására. Fogra tekercselés esetén a tekercsfej nem több rétegű, nem találkoznak különböző fázishoz tartozó tekercsek, így ez a hibalehetőség kizárható.

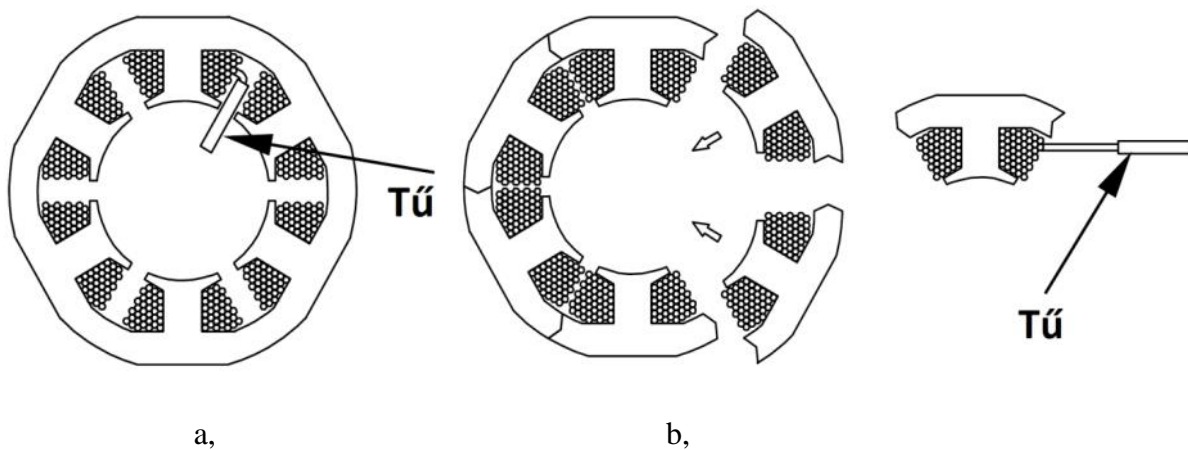


2.3.ábra. a,b, elosztott tekercselés többsíkú tekercsfejjel, c, egyréteges fogra tekercselt, d, kétréteges fogra tekercselt állórész kialakítás.

Fogra tekercselés esetén (2.2.b.ábra) az egy vagy két réteges kialakítás különböztethető meg. Egy réteges tekercselés esetén (2.3.d.ábra) minden második fogon van tekercs, mely a teljes hornyot kitölti. Két réteges tekercselés esetén minden fogon van tekercs, amely a horony felét tölti ki (2.3.c.ábra). Az egyréteges tekercselés esetén így a különböző tekercsek közti zárlat kizárható. Kétréteges tekercselés esetén a különböző fázisok kerülhetnek közös horonyba. A fázisok közé helyezett horonyszigetelő alkalmazásával a fáziszárlat kizárható. Testzárlat ellen minden tekercselési rendszer esetén horonyszigetelőt alkalmaznak.

Egész horonyszámú elosztott tekercselés esetén a tekercsek általában sablonon készülnek, majd a hornyszájakon át a megfelelő hornyokba sodorják őket, így a lemezalaktól függően a tekercsoldalak hossza nagyobb, mint a vastest hossz. A többsíkú tekercsfej egyes fázisokhoz tartozó részei közé gyakran fáziszigetelőt építenek be az esetleges zárlat elkerülése érdekében.

Fogra tekercselés esetén széleskörűen elterjedt a tű tekercselés, a huzalt vezető tűvel közvetlenül a fogra tekercselik. A tű megfelelő mozgatásával a szálkereszteződés kizárható, így a kitöltési tényező javítható. A tű tekercselés hátránya a relatív nagy horonyszáj igény, illetve a kis kitöltési tényező, mivel helyet kell biztosítani a tekercselő tű mozgásának (2.4.ábra).



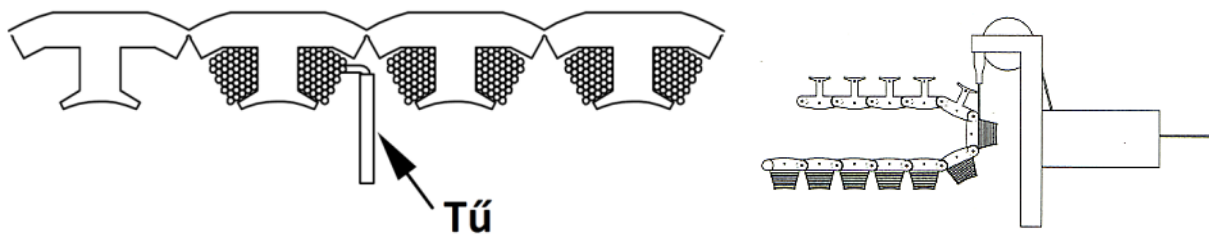
2.4.ábra. Tű tekercselés a, egy lemezből szaggatott, illetve b, szegmentált állórész lemez esetén.

Biztonságkritikus alkalmazások esetén duplikálják a motort illetve az invertert, vagy redundáns motort építenek be. A redundáns motor általában olyan tekercselésű, mely 2 vagy

több 3 fázisú tekercseléssel rendelkeznek, melyek egymástól galvanikusan függetlenek. A többszörözött tekercselési rendszert azonos állórészbe építik be.

A fogratekercselt motorok horonykitöltési aránya tovább javítható speciális állórész kialakítás alkalmazásával. Az állórész lemez állhat egy komponensből, vagy állhat több szegmensből is. A szegmentált állórész lemez kialakításra kidolgoztak több tömeggyártásban alkalmazható módszert. Az általánosan elterjedt megoldás szerint az állórész lemez olyan szegmensekből áll, amelyek a horony középső részénél, a koszorúnál illeszkednek egymáshoz. A kapcsolódó részen a szegmensek olyan alakzáró kötéssel csatlakoznak egymáshoz, amivel biztosítható a lehető legkisebb additív légrés.

A másik irányvonal szerint az állórész szegmensek „csuklóval” csatlakoznak egymáshoz (2.5.ábra), így a vastest az adott fog tekercselésekor széthajtható. A kihajthatóság mértéke is lehet változó.

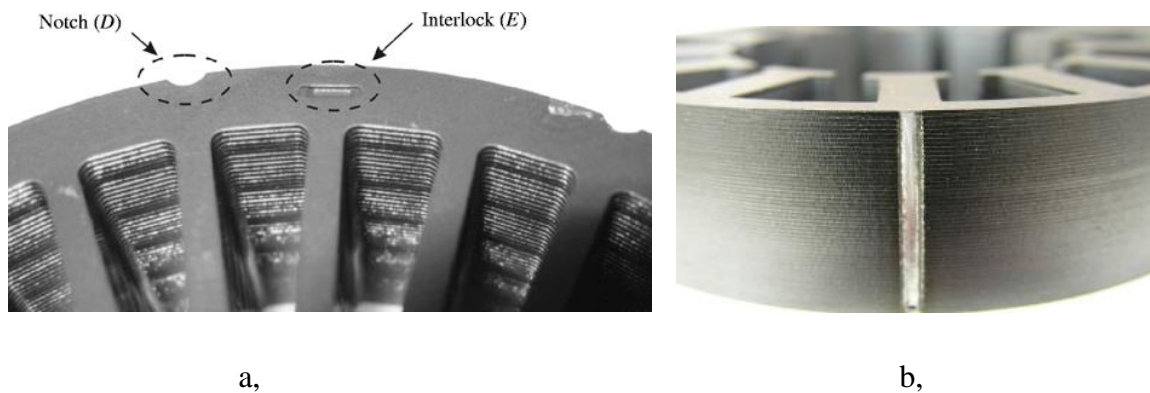


2.5.ábra. Tűs tekercselés kihajtható szegmentált állórész lemez esetén.

A szegmentált állórészű gépek tekercselés szempontjából több előnnyel rendelkeznek. A horonyszáj méretet a szomszédos fogak közti szórás határozza meg, nincs korlátozás (minimális határ, pl. tű méret miatt) a tekercselési technológia oldaláról. Az állórész szegmensek tekercselése az állórész szétnyitott vagy szétszerelt állapotában történik. A horonyszáj így nem korlátozza a maximálisan alkalmazható huzalméretet sem. A tűs tekercselés a 2-3mm keresztmetszetű huzalnál még jól alkalmazható, de nagyobb átmérők esetén a szálvezetés a huzal merevsége miatt nehézségeket okozhat. Tűs tekercseléssel a párhuzamos szálak alkalmazása sem megvalósítható. Ezt a tervezésnél figyelembe kell venni. A párhuzamos szálak alkalmazása kiváltható a fogankénti tekercsek megfelelő soros-párhuzamos kapcsolásával.

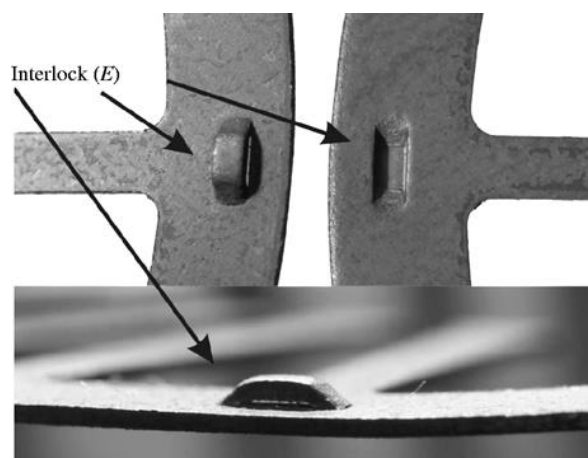
A horonyszáj méret szorosan összefügg a fognyomatékkal: nagyobb horonyszájhoz általában nagyobb fognyomaték tartozik, ugyanakkor a tekercselési technológiák is meghatároznak az alkalmazott huzal keresztmetszetéhez tartozó minimális horonyszáj méretet.

Elosztott tekercselés, vagy nem szegmentált állórészű fogra tekercselt gép esetén a gyakran fellépő szátkeresztesedések miatt a horony kitöltési tényező 35-40%, míg fogratekercselt, szegmentált állórész esetén akár 50-65% is elérhető.



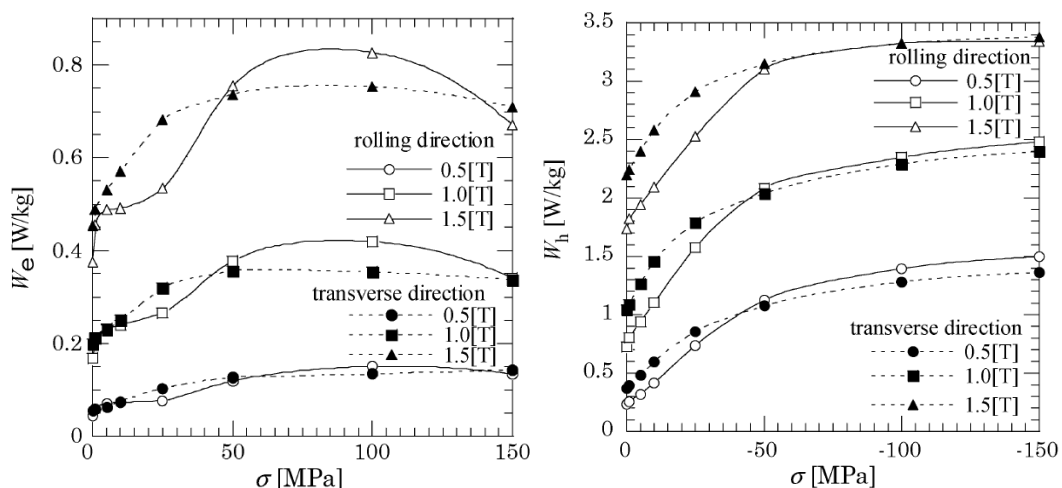
2.6.ábra. Állórész rögzítési módszerek: a, interlock alkalmazása, b, hegesztés [47].

Az állórész lemezeket kivágás után hegesztéssel, vagy noppolósos technológiával rögzítik egymáshoz. A noppolás széles körben alkalmazott technológia (2.6.ábra). A lemezen megfelelő geometriával egy tengelyirányú benyomást alakítanak ki, amit az angol irodalom *noppe* vagy *interlock* néven említ. Ez a geometria lehet kör alakú vagy hossz irányban elnyújtott (2.7.ábra). Az egymásra helyezett lemezeket egymásba lehet nyomni. A noppolással így a lemezekből tetszőleges hosszúságú lemezcsomag alakítható ki. Egy lemezalakkal széles teljesítmény tartományt le lehet fedni, nincs szükség lemezcsomaghosszonként más-más hegesztéshez használandó rögzítő-szorító szerszámra. A hegesztés elhagyásával a lemez vetemedése is kizárható, illetve a hegesztés következtében fellépő járulékos vasvesztés sem lép fel.



2.7.ábra.Állórész lemez interlock [47].

Az állórészt általában zsugorkötéssel rögzítik a motor házba. A ház anyaga illetve a gép üzemi hőmérséklet tartománya, névleges nyomatéka határozza meg az állórész és a ház közti túlfedés mértékét. Ha a ház pl. mélyhúzott acélból készül, közel azonos az állórész és a ház hőtágulása. Alumínium ház, belső forgórészes gép esetén az illesztési túlfedés meghatározása összetett feladat. Extrém hidegben nem hasadhat fel, extrém magas hőmérséklet esetén nem lazulhat le az állórészről a ház. Ha lelazul a ház a vastestről, a vastest szabadon elmozdulhat a házhoz képest.



2.8.ábra. Vasveszteség-mechanikus igénybevételtől való függése [46].

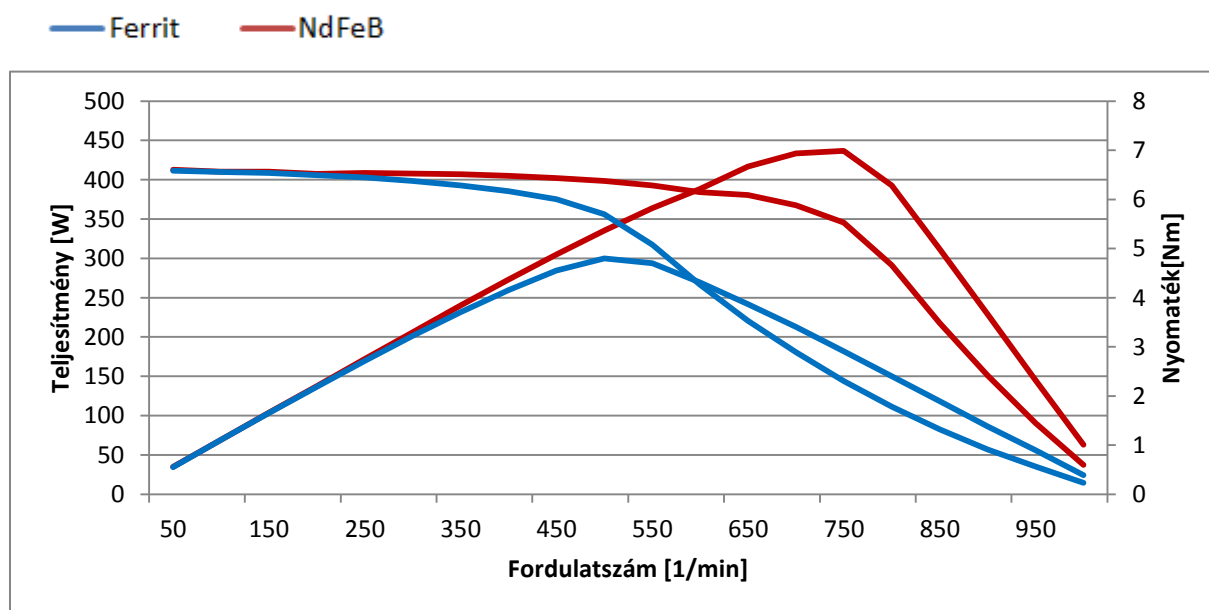
A 90-es évek óta egy új lemezcsomag lemezzögztési technika is megjelent. A lemez felületére olyan szigetelő bevonatot visznek fel, amely egyben ragasztó is. Hőkezeléssel az egymásra helyezett lemezekből lemezcsomag építhető (backlack technológia). A lemezek így teljes felületen egymáshoz vannak rögzítve, nem csak hegesztési varrat vagy interlock mentén, így a vastest merevebb lesz, ami a rezgés-zajszint, illetve lemezkitöltési tényező szempontjából is kedvező. A lemezalak tervezése során kevesebb a megkötés: nem kell hegesztési varrat számára hornyot kialakítani, illetve a noppolás pozíciója sem befolyásoló tényező.

Az elektrotechnikai acél mágneses jellemzőit a mechanikai erőhatások is befolyásolják. A zsugorkötéses állórész rögzítés túl nagy túlfedésből adódó mechanikus feszültség növeli a gép vasvesztését. A vasveszteség növekedés következménye a látszólagosan megnövekedett súrlódás (2.8.ábra).

2.2. Forgórész kialakítás

Az állandómágneses gép üzemi paramétereit alapvetően befolyásolja az alkalmazott mágnes fajtája. A ferrit mágnes alkalmazó gépek esetén a teljesítmény sűrűség alacsony, viszont magas lehet az üzemi hőmérséklet. Élelmiszeripari területen az előírások szerint csak ferrit mágnessel szerelt motor alkalmazható. A ritkaföldfém mágnesekkel lényegesen nagyobb teljesítménysűrűség érhető el. A ritkaföldfém mágnesek drágábbak, a NdFeB mágnesek közülük viszonylag olcsóbbak. Korrózióra hajlamosak, ezért csak bevonattal ellátva alkalmazhatóak. A hőmérsékletük alacsony, összetételétől-ötvezőktől gyártástechnológiától függően 80-200°C. Erre különösen figyelni kell a gép üzemeltetésekor, tervezésekor.

Célszerű összehasonlítani a ferrit és ritkaföldfém mágnes felhasználásával készített, közel hasonló paraméterű gépeket (2.9.ábra). Az állórész lemez, póluspár szám azonos. A maximális áram, nyomaték, fordulatszám és az inverter kapcsolófeszültség megegyezik.



2.9.ábra. Ferrit-ritkaföldfém mágnes anyag felhasználású gép összevetése.

A ferrites gép vastest hossz 90mm, míg NdFeB mágnes felhasználásával 30mm. A felhasznált anyagmennyiség az alábbi táblázatban található. A táblázatban csak az aktív

anyagok tömege szerepel, a ház, pajzsok, csapágy, tengely, stb nem. A mágnes tömegbeli különbség az eltérő sűrűségük következtében kisebb.

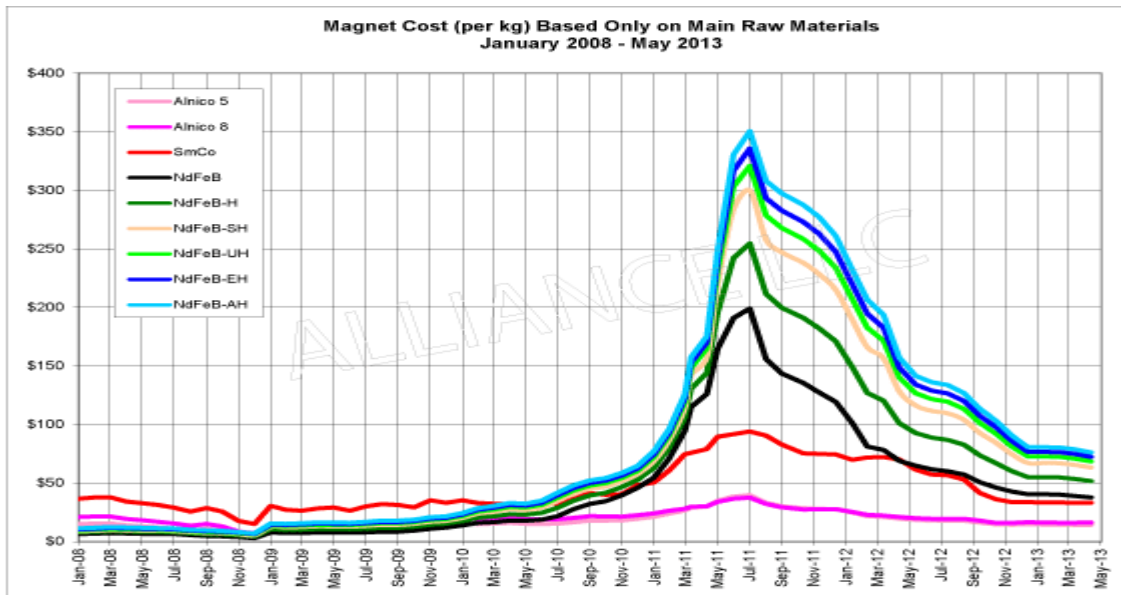
	NdFeB	Ferrit
lemezcsomag hossz [mm]	30	90
zománchuzal [kg]	0,82	1,51
vastest [kg]	2,053	6,16
mágnes [kg]	0,176	0,322

2.1.táblázat. Azonos nyomatékú ferrit, illetve ritkaföldfém mágnesű forgórészű, azonos lemezalakú és táplálású gépek összehasonlítása.

A ferrites gép ellenállása nagyobb, így a nagyobb fordulatszámú tartományban elfogy az inverter feszültség tartaléka, nem képes a névleges áram kiadására. A ferrites gép így kb 300/perc fordulatszám felett kisebb teljesítmény leadására képes, mint a ritkaföldfém mágnessel szerelt forgórészű. A ferrit mágnes ára lényegesen alacsonyabb, kevésbé változékony. Az NdFeB mágnesek ára érzékenyen reagál az egyes ötvözők árának változására. 2011-2012 között az árak jelentősen megugrott (2.10.ábra), így a gyártók egyre nagyobb hangsúlyt fektettek a gépek optimalizálására beépített mágnesmennyiség szempontjából.

A ferrit mágnes árkülönbsége jelentős, viszont a legtöbb esetben a nagyobb gépmérettel járó többlet huzal- és lemez, szigetelő anyag felhasználás, jelentősen nagyobb gépméret miatt a ritkaföldfém mágnesek alkalmazása előnyösebb.

A mágneseket általában ragasztóval, illetve utólagos bandácsolással rögzítik a forgórészre. Héjmágneses gép esetén a röperőt is figyelembe kell venni. Belső mágneses gépek esetén ez kevésbé problematikus, mivel a mágnes mechanikailag is rögzíti a forgórész lemez, a mágnes-vas közti vonzóerő, illetve a köztük fellépő súrlódás is gátolja az elmozdulást.



2.10.ábra. Mágnes alapanyagok árának változása.

(<http://www.electronicdesign.com/analog/4-things-you-should-know-about-magnets-electric-vehicles>)

A gépek gyártásának tervezésekor az alkalmazott ragasztó anyagok tulajdonságait is figyelembe kell venni. Egyes ragasztók gyors kötési idejűek (tizedmásodperc-másodperc nagyságrend), de az ütősszerű terhelésekre mutatott szilárdságuk alacsony, statikusra nézve nagy. A lassabb kötési idejű, epoxy alapú ragasztók szilárdsági mutatói kiegyensúlyozottabbak, viszont a kötési idejük lényegesen hosszabb: több perc-óra. A nagyobb hőállóságú epoxy ragasztók kötési ideje akár 24 óra is lehet.

3. Fognyomaték modellezési módszerek vizsgálata

Több analitikus elven működő számítási módszer létezik, melyek bizonyos megkötésekkel, megfelelő tartományban használhatóak. Használatuk akkor célravezető, ha a tervezési folyamat elején a megfelelően tűző irányvonal kitűzése a cél. Általában egyszerű, jól követhető fizikai modellt alkalmaznak bizonyos elhanyagolások mellett. A modellek egyre bonyolultabbak lettek, ami rontotta az alkalmazhatóságot, nehezítette a fizikai modell értelmezését.

A fognyomaték számítási módszerek két fő csoportra oszthatóak: analitikus és numerikus módszerre. A numerikus megoldás végeelem módszert alkalmaz. A geometria, a megfelelően finom hálózás létrehozása, majd a modell megoldása időigényes feladat.

A numerikus számítási módszerek pontos eredményt szolgáltatnak, viszont a fizikai háttér a számítás során nem jelenik meg. Az egyes variánsokra kapott eredményből lehet következtetni a mögöttes fizikai háttérre.

3.1. Analitikus módszerek

Az analitikus módszerek általában gyors futásidejű becslő alkalmazások. Legnagyobb előnyük az, hogy betekintést nyújtanak a jelenség fizikai háttérébe is.

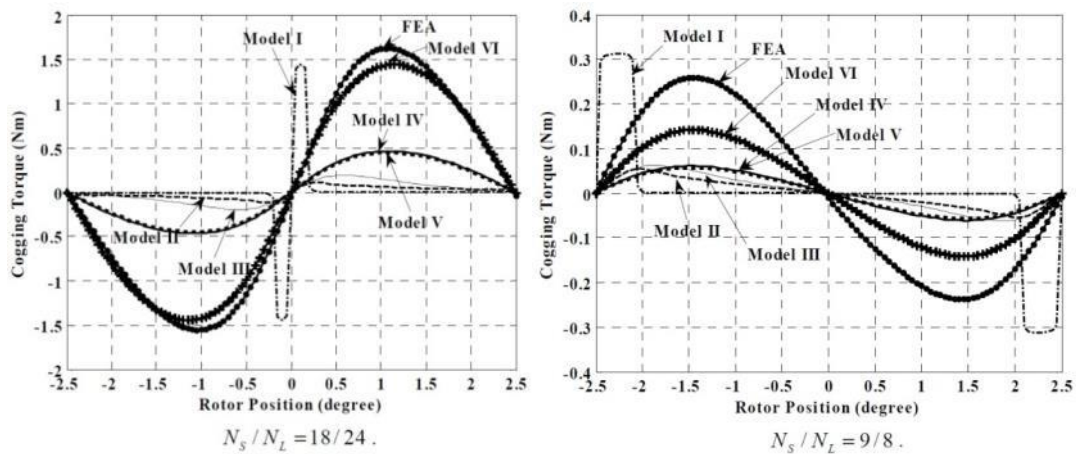
Általánosan kijelenthető, hogy a publikált modellezési módszerek a következő egyszerűsítésekkel élnek:

- a vas ideális, elhanyagolják a telítést, szórást,
- a mágnesek mágneszettségi irányának változását,
- sarok hatást.

A [22]-ben azonos motor geometriák esetére alkalmazva megvizsgálták több analitikus fognyomaték számítási módszert, majd az eredményt közzétették. Referencia számítást végelem módszerrel végeztek.

A vizsgálat az alábbi gépekre lett elvégezve a fenti különböző analitikus számítási módszerek alkalmazásával: külső átmérő 120mm, furat átmérő 75mm, lemezcsomaghossz 65mm.

A 3.1.ábra szerint a Model I-III alak és erősítési hibája is jelentős. A különböző pólusszám-horonyszám kombinációk esetén az alakhiba aránya változik.



3.1.ábra. Analitikus illetve végeleemes számítási módszerek összehasonlítása különböző pólusszám – horonyszámú gépek esetén [22].

A fenti módszerek sok esetben pontos eredményt adnak, de általános esetben a számítási hiba szórása nagy. Általában bizonyos maximális telítési szint, illetve bizonyos geometria esetén a hiba megfelelő konstansok alkalmazásával minimalizálható, stabilizálható.

Az összehasonlítást elvégezték 2008-ban [22], majd megismételték 2012-ben [23]. A két cikk egyik szerzője közös, a [23] társszerzői a *SPEED*, a jól ismert, analitikus elven alapuló motor szimulációs szoftver fejlesztői. A korábbi modellek tovább fejlődtek, a pontosság általában javult. A vizsgálatot elvégezték több pólusszám-horonyszám kombináció, eltérő pólusosztás illetve horonyosztás esetére. Az eltérő módszerek eredményei alapján útmutatást adnak, mikor melyik módszer alkalmazása előnyösebb.

3.2. Végeselem módszer

Az analitikus, vagy egyéb gyors számítási, becslési módszerek praktikusak, a fejlesztés korai szakaszában jelentősen gyorsíthatják a munkát. A geometria gyorsan módosítható, a számítási idő rövid. A későbbi fázisban viszont már az eredmények megbízhatósága fontosabb. Egy prototípus legyártása komoly költséggel jár, a szükséges alkatrészek megtervezése, dokumentálása, gyártásba vitele, gyártása sok időt igényel. A végeselemes programok ennek köszönhetően széleskörűen terjednek: a kívánt geometriát egy rajzoló programmal el kell készíteni majd bevinni a végeselemes programba. Az egyes térrészek anyagjellemzőinek megadása után következik a hálózás, majd a számítás.

Anyagi jellemzőként meg kell adni a mágnes anyag remanens indukció értékét és relatív permeabilitását, elektrotechnikai acél anyag esetén a hiszterézis görbét. Villamos áramkör megadásával vihető be általában a tekercselési rendszer, illetve felületrészenként, tekercsenként adható meg a menetszám. A háló generálás során figyelembe kell venni a geometria tulajdonságait. Célszerű másodrendű elemeket használni, illetve a csomópontok számát a légrés környezetében, vagy az esetleges lokálisan telített térrészek környezetében sűríteni, a kevésbé telített térrészekben pedig korlátozottan csökkenteni. A hálózás optimalizálásával jelentősen csökkenthető a számítási idő.

Motoros üzem esetén az állórész tekercselésre szimulált feszültség – vagy áraminverter köthető, a gép üzemi paraméterei megvizsgálhatóak, mint pl. cogging görbe, ripple görbe különböző terhelési szinten, mezőgyengíthetőség, fordulatszám-nyomaték, egyéb jelleggörbék, zárlati viselkedés, stb.

A szimuláció során a görbe várható alakjának megfelelően mintavételezendő az eredmény. $2p=10$ pólusú gép esetén pl. az indukált feszültség görbe periódusa $360^\circ/5=72^\circ$ mechanikus fok, ennél nagyobb tartományra célszerű a számítást elvégezni. A görbék felvétele a forgórész diszkrét szöggel történő sorozatos elforgatásával végezhető el. A számításokat automatizáltan ismételtelen elvégzi a végeselemes program, az így nyert értékek összekötésével kapható a kívánt görbe. A forgatást mechanikus szögben vagy időben lehet megadni. Időben megadni általában nem praktikus, mivel ekkor a forgatás pólusszám függő, ami az egyes jelenségek hatásának kiértékelését, a különböző pólusszámú gépek összehasonlíthatóságát nehezíti.

Az egyértelmű, könnyebb feldolgozhatóság érdekében a görbét minden esetben a rotor mechanikus szög függvényében veszem fel a szimulációk során. Fognyomaték görbe, ripple görbe esetén a fordulatszám kevésbé érdekes információ. A görbén csak a nyomaték és elfordulási szög szerepel, idő nem.

A pontok számát a kívánt felbontás határozza meg. Jelleggörbe esetén ritkább felbontás is elegendő, harmonikus tartalom elemzés esetén sűrűbb felbontás szükséges.

A számítási idő a görbe pontjainak számától függ. Egy pont számításának idejét maga a geometria határozza meg. Magasabb telítési szintű geometria esetén az iterációk száma nagyobb, így a számítás időigényesebb. Ilyen esetben a hálózást is célszerű sűrűbbre kialakítani. A háló csomópontszám növelésével jelentősen nő a számítási idő, de ez már programfüggő is. Általában több megoldót alkalmaznak a programok: van, amelyik kis elemszám esetén alkalmazható, és ott nagyon gyors, illetve vannak a lassabb működésű, de tetszőlegesen nagy csomópont számmal is dolgozni képes megoldó algoritmusok. Általában a 2D-s számítások esetén a számítási idő jelentős részén csak egy szálon fut a megoldás, így a mai korszerű többmagos processzorok nem használhatóak ki teljesen.

A számítási idő általában úgy csökkenthető a legjobban, ha a geometria részletességét annyira veszi figyelembe a számítás, amennyire szükséges. Korai stádiumban pl. a vastest és a mágnesek közti ragasztási, illesztési hézagok elhanyagolásával a hálózás jelentősen egyszerűsödik.

A számítás tovább gyorsítható, ha a geometria periódikusan ismétlődik, mechanikusan szimmetrikus. Ilyen esetben elegendő a geometriából csak egy periódust bevinni, majd a periódus határait a megfelelő, periódikusan ismétlődő peremfeltételt alkalmazni. Ez csak ideális geometria esetén alkalmazható, excentrikus légrés esetén már nem.

3.3. Előkalkulációs szoftverek

Egyre több olyan szoftver jelenik meg a piacon, melyek a tervezési folyamat rövidítését segítik. A *Flux*-hoz kiadták a *Fluxmotor*-t, mely egyszerű, jól kezelhető grafikus interfésszel rendelkezik. Megadhatóak a gép méretei, pontos horonyalak, forgórész kialakítás, ismeri a belső mágnesű rotor variánsokat is. A tekercselési sémát a szoftver automatikusan készíti.

A számítás eredményeként fordulatszám-nyomaték jelleggörbe, hatásfok, veszteség térkép, teljes dokumentáció kapható, továbbá a motor modell exportálható a *Flux*-ba további vizsgálatokhoz.

A *Fluxmotor* egy hatékony, felhasználóbarát szoftver, de gyártási szórások kezelésére alkalmatlan. A számítás során elkészíti a motor geometria legkisebb, szimmetrikus peremfeltételekkel előállítható modelljét, majd viszonylag ritka hálózattal megoldja. A futási idő rövid, a fognyomaték görbe általában rossz eredményt ad. A pontos fognyomaték számításához lényegesen sűrűbb hálózásra van szükség, de nem is ez a szoftver fő profilja.

3.4. Mérőrendszer

A motorok méréséhez gondosan meg kell tervezni a mérőrendszert. Az indukált feszültség, nyomaték hullámosság, terhelési jelleggörbe felvételéhez szükséges a vizsgált gépen kívül egy nyomaték mérő eszköz, tengelykapcsoló, terhelő, illetve hajtó gép, továbbá a gépek megfelelő rögzítése, illetve szükség van feszültség és árammérő, adatgyűjtő eszközökre.

A mérőrendszer kialakítása során törekedni kell a mérést befolyásoló tényezők kiküszöbölésére, hogy a mérés bármikor megismételhető legyen. Az egyik nehézség a különböző tengelymagasságú gépek összekapcsolása. Állítható koordináta-asztal (3.2.a.ábra) alkalmazása például egy jó alternatíva a tengelymagasság eltérés kompenzálására.



a,



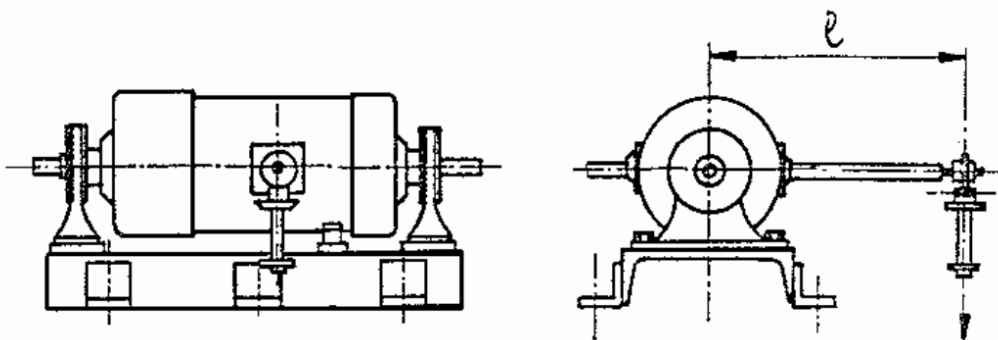
b,

3.2.ábra. a, koordináta asztal, b, rugalmas, egytengelyűségi hibát kompenzálni képes tengelykapcsoló

A minimális (0.01..0.1mm) egytengelyűségi hiba áthidalható speciális, torziós tengelykapcsoló alkalmazásával (3.2.b.ábra).

Ha az egytengelyűségi hiba nincs megfelelően kiküszöbölve, a mérésben meg fog jelenni egy fordulatszámmal arányos áram, illetve nyomaték harmonikus komponens.

Nyomaték mérésére alkalmazható egyszerűbb, illetve kifinomultabb megoldás is. Ha csak fordulatszám-nyomaték jelleggörbére van szükség, az kevés ponttal jellemezhető, a pontossági igény is általában kisebb. Ilyen megoldás lehet pl a mérleggép alkalmazása (3.3.ábra), mellyel a nyomaték középérték határozható meg, a nyomaték hullámosság, felharmonikus tartalom nem.



3.3.ábra. Mérlegdinamó.

A mérés során a mérlegdinamó forgórész körére terhelő ellenállást kell kapcsolni. A terhelő nyomaték a gép gerjesztőáramával szabályozható. Az állórész korlátozott tartományban képes elfordulni, az oldalán elhelyezett karra súly helyezhető. Az állórész két, egymáshoz képest mozogni képes része között egy nyelv található. A mérleggép tengelyére

ható nyomaték meghatározható az állórész kiegyenlítéshez szükséges nyomatékkal. Ehhez használható erőmérő cella (3.4.ábra), vagy egyszerűbb esetben karra akasztható súlyok. Erőmérő cella esetén a mérés egyszerűbb és pontosabb, súlyok alkalmazása esetén csak diszkrét nyomaték pontok vehetőek fel a súlykészletnek megfelelően.



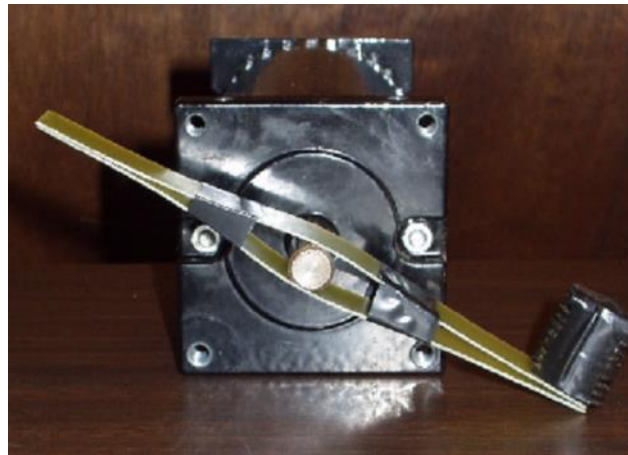
3.4.ábra. Erőmérő cella.

A mérlegdinamó súrlódása, tehetetlenségi nyomatéka, hatásfoka befolyásolja a mérést, különösen akkor, ha a mért motor lényegesen kisebb. A mérési hiba a súrlódás, vasveszteség kapcsán fordulatszám függő.

Ha pl fognyomaték mérésre lenne szükség bonyolult mérőrendszer alkalmazása nélkül, alkalmazható az 3.5.a.ábra szerinti elrendezés. Fognyomaték mérés esetén a nyomaték görbe forgórész pozíció szöghelyzet szerinti változását kell felvenni. Ez megvalósítható például egy konyhai mérleg, egy körasztal és egy tokmány alkalmazásával. A tokmányt a körasztalhoz kell rögzíteni, majd a tokmánnyal rögzíthető a motor állórésze. A forgórész tengelyre rögzíthető egy kar, ami nyomja egy erőmérő eszköz, például mérleg tányérját [9]. A körasztallal forgatható az állórész, így a fognyomaték görbe felvehető. A mérés előtt gondos beállítás szükséges, hogy a körasztal tengely és a motor forgórész tengely közötti egytengelyűségi hiba minimális legyen (tokmány körasztalra rögzítésekor, illetve állórész tokmányba befogásakor is felléphet hiba). A mérés reprodukálhatósága kérdéses.



a,



b,

3.5.ábra. a, cogging görbe, b, cogging csúcsérték felvételéhez alkalmazható egyszerű mérőeszköz [9].

Ha csak a fognyomaték görbe csúcsértékét kell meghatározni, elegendő a kar végére súlyt helyezni, majd a súlyt addig növelni, míg a forgórész a stabil ponton (csúcsértéken) túllendül. Ebben az esetben az egytengelyűségi hiba nem léphet fel, viszont csak a görbe maximális értékéről lesz adat (3.5.b.ábra).

Precíz mérések esetén ezek az eszközök nem alkalmazhatóak, ilyen esetben forgó nyomatékmérő cella alkalmazása célszerű. Lehetővé válik a nyomaték érték tetszőleges idejű mintavételezése, ezáltal a kérdéses nyomaték harmonikus komponensek vizsgálata is.



3.6.ábra. Forgó nyomatékmérő cella.

A meghajtó gép kiválasztása is megfontolást igényel. Alapvetően meghatározza a mérést a meghajtó gép üzemi fordulatszám és nyomaték tartománya, tehetetlenségi nyomatéka, illetve a gép nyomaték görbéje, fordulatszám tartománya is, illetve a hajtó motor saját nyomaték hullámossága.

4. Gyártási szórások hatásának vizsgálata

A gyártási szórásokra általában érzékenyen reagál a fognyomaték. A leggyakoribb a légrés excentricitás, mágnes pozíció hiba, mágnes anyagminőség szórása, de felléphet még horonyszáj deformáció, mágnes pólusív ferdítési hiba, állórész furat ovalitás, is. Az egyes hibaforrások érzékenység vizsgálata végeselemes szimulációval elvégezhető, így a felhasználó által elfogadható, illetve előírt nyomaték hullámossági szintnek megfelelő konstrukciós, gyártási tűrések meghatározhatóak. A túlzottan szűk gyártási tűrések jelentősen drágítják a gyártást: általában növeli a gyártási időt és a selejtarányt is, alkatrészenként és összeszerelés utáni végellenőrzéskor is.

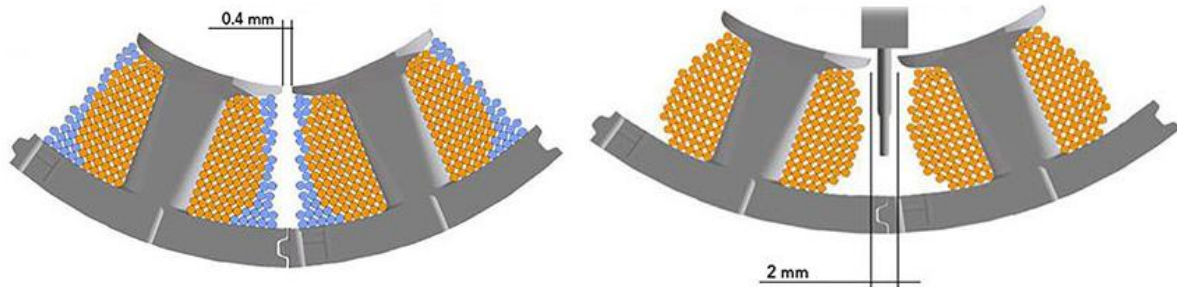
Szegmentált állórész esetén (4.1.ábra) újabb hibaforrás lehetőségeket is célszerű megvizsgálni: a kerület mentén a légrés változó lehet, a motor hőmérsékletének változásával változhat a szegmens-illesztések közötti hézag pl alumínium ház esetén. A szegmensek közötti hézag nem feltétlenül azonos, a fogak valamilyen mértékben elfordulhatnak, vagy radiális irányban kitolódhatnak a mezőből. Mechanikai oldalról is komoly elemzés szükséges, hogy milyen új gyártási hiba fajták léphetnek fel, melyek egy hagyományos, nem szegmentált állórészü gépnél kialakításukból adódóan kizárhatóak.



4.1.ábra. Szegmentált állórészü motor.

Az állórész lemez szegmenseket noppalással egymáshoz rögzítik, általában műanyag szigetelő réteget fröccsöntenek rá, majd megtekercselik és összeépítik a komplett állórészt. A technológia nagy előnye, hogy a tekercs kitöltési tényező jelentősen növelhető. Nem korlátozó tényező a horonyszáj méret. A horonyszáj tetszőlegesen kicsi lehet, csak a szomszédos fogak közti szórás korlátozza. A fogra tekercselt gépeket egy lemezből álló

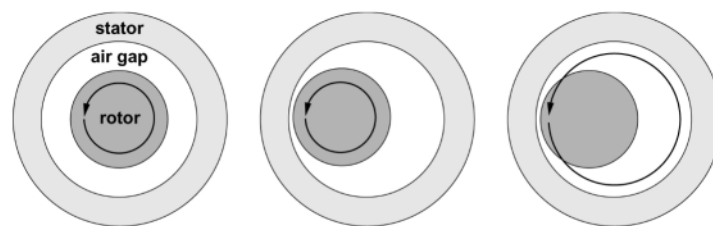
állórész lemezalak esetén általában tűs tekercseléssel alakítják ki. Ez gyors, jól automatizálható, viszont a horonyszáj minimális mérete korlátozott, illetve a horony kitöltés is: helyet kell hagyni a tekercselő tű számára (4.2.ábra).



4.2.ábra. Tűs tekercseléssel elérhető horonykitöltés szegmentált és nem szegmentált lemezből álló állórész geometria esetén.

Az egyben szaggatott állórész lemez esetén így rosszabb kitöltési tényező érhető el, viszont a fogak esetén csak extrém esetben lép fel ovalítás, míg szegmentált állórész esetén ez nagyobb valószínűséggel előfordulhat.

A légrés excentricitás több gyártási hibából is adódhat. A légrés excentricitás azt jelenti, hogy a forgórész forgástengely és az állórész origó nem egy pontba esik. Ha a két origó távolsága a forgórész forgása közben nem változik, statikus, ha a rotor forgása közben változik, dinamikus excentricitásnak nevezzük (4.3.ábra).

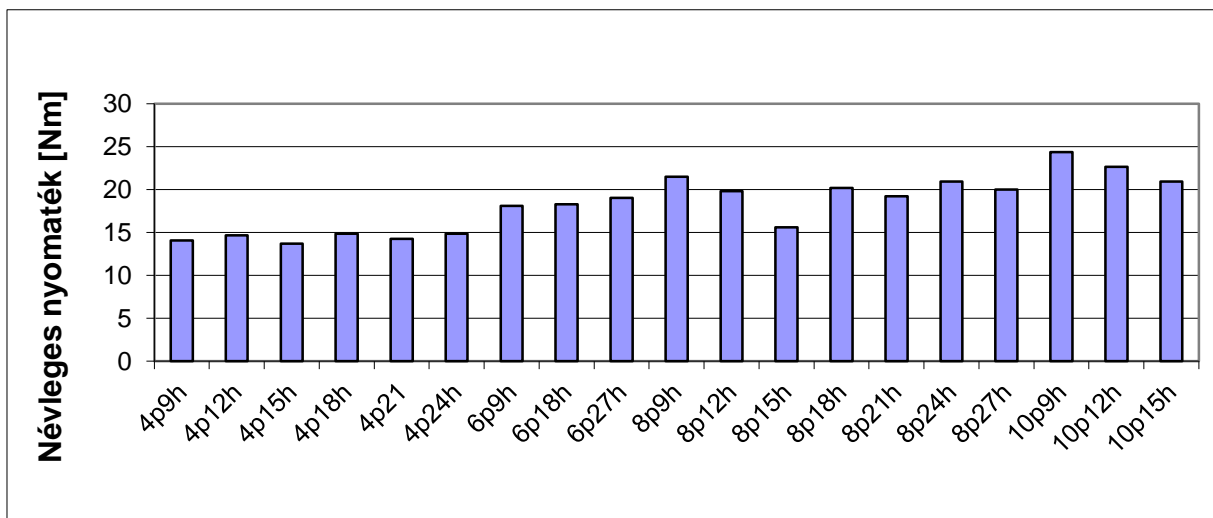


4.3.ábra. Helyesen szerelt gép, illetve statikus, dinamikus excentricitás esete.

Az excentricitásra a különböző motor konstrukciók más érzékenységgel reagálnak. A vizsgálatot 150mm külső átmérőjű, 100mm vastag hosszúságú, héjmágneses gépekre végeztem el 4-10 pólusszám, 9-27 horonyszám között. Ezekkel a pólusszám-horonyszám kombinációkkal a kis teljesítményű terület igényei rugalmasan kielégíthetőek (4.4.ábra). A vizsgált gépek esetén az áramsűrűség, mágnes pólusív, horonyszáj hasonló volt az összevethetőség érdekében. A mechanikus légrés oldalanként 1-1mm, a számítás hibamentes

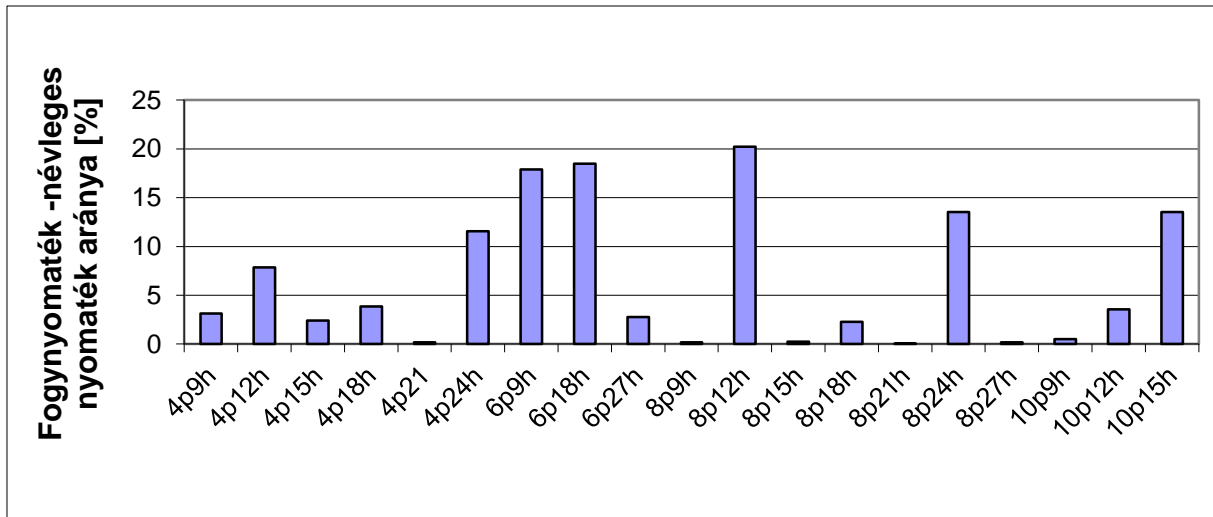
geometriára, 0,2mm és 0,4mm, azaz 20% és 40%-os excentricitásra lett elvégezve. Egyik esetben sem alkalmaztam semmilyen fognyomaték csökkentő módszert [74,76,77].

A gépek nem azonos nyomaték szintre lettek optimalizálva, a fordulatszám tartományra nem lett kiterjesztve a vizsgálat. Átfogó vizsgálat volt a céloom, hogy az egyes pólusszám-horonyszám kombinációk esetén milyen érzékenységgel reagál a gép a gyártási szórásokra, illetve mekkora az adott pólusszám-horonyszám kombinációra jellemző fognyomaték szint.



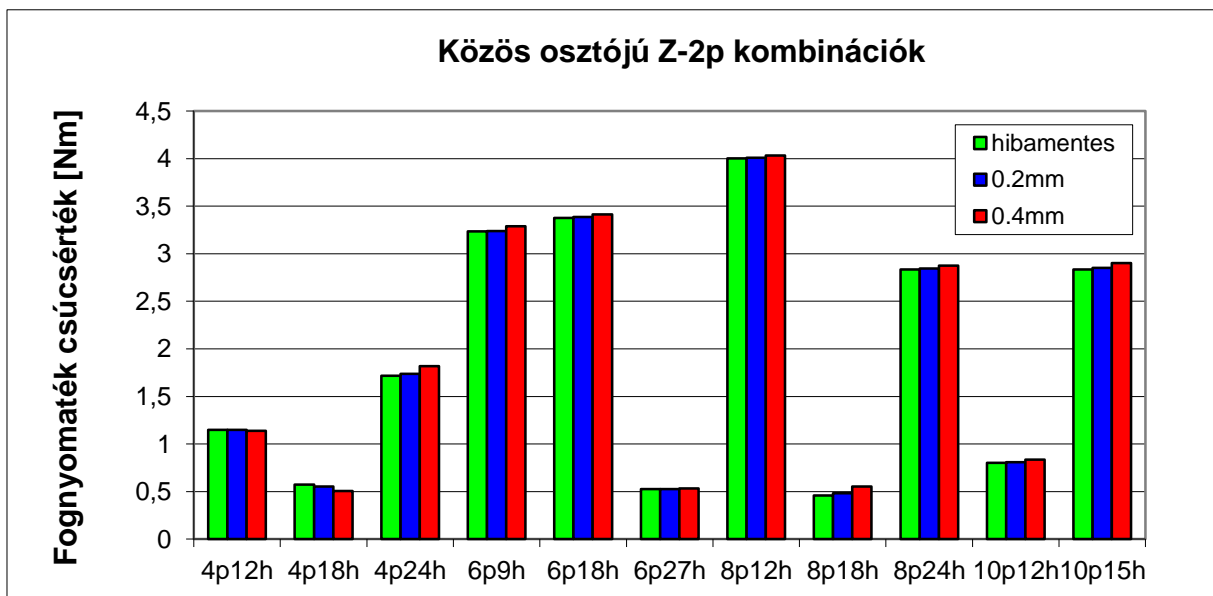
4.4.ábra. A vizsgált gépek névleges nyomatéka.

A gépek névleges nyomatéka így különböző lett, ezért célszerű megvizsgálni a névleges nyomatékra vetített fognyomaték értékeket (4.5.ábra). Megfigyelhető, hogy több gép esetén kiugróan alacsony a fognyomaték százalékosan is, ezek pl a 4p21h, 8p9h, 8p15h, 8p21h, 8p27h, 10p9h kombinációk. A pólusszám-horonyszám ezen gépek esetén relatív prím, azaz a geometria nem tartalmaz mechanikus szimmetriát.



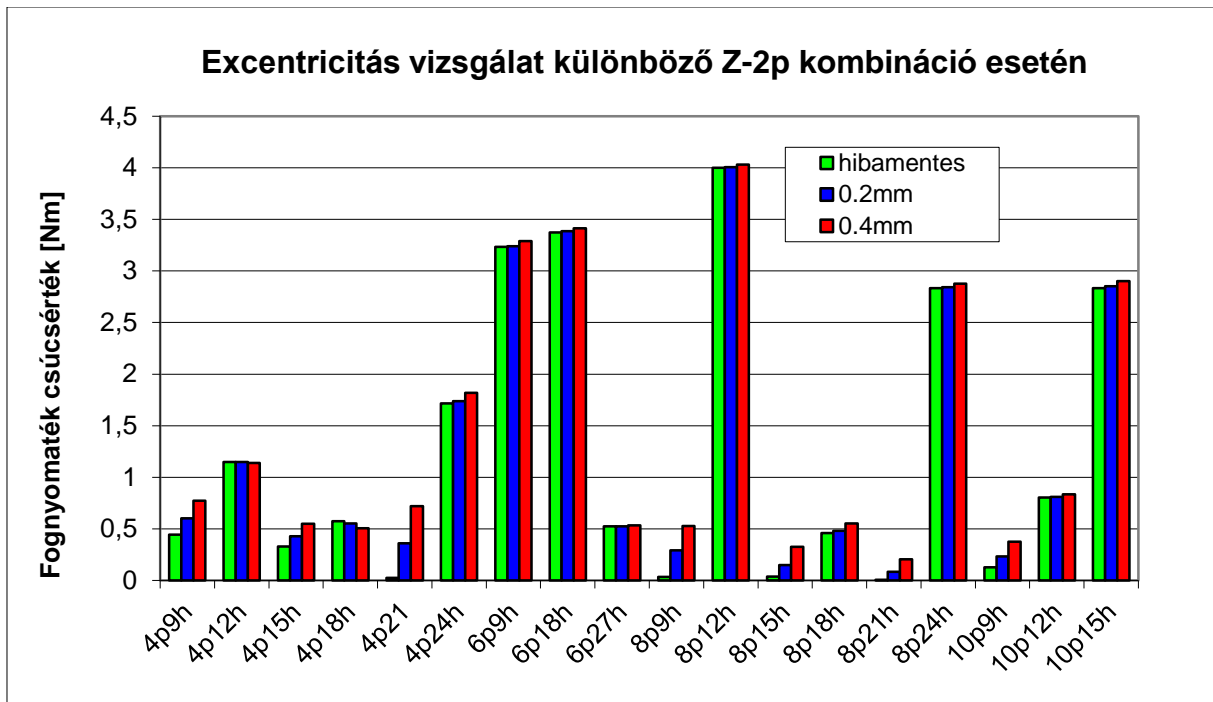
4.5.ábra. A vizsgált gépek névleges nyomómatékra vetített százalékos fogyómatéka.

Bizonyos gépek esetén kiugróan magas a fogyómaték érték, pl. a 4p12h, 4p24h, 8p12h, 8p24h, 10p15h kombináció esetén. A pólusszám, horonyszám között van közös osztó, azaz a forgórész és állórész geometria közös szimmetriatengellyel rendelkezik (4.6.ábra). Ez azt jelenti, hogy a pólusokhoz, vagy hornyokhoz tartozó cogging görbék egymáshoz viszonyított fázishelyzete a szimmetria tengelyek számának megfelelően periodikusan ismétlődik. Ezáltal az eredő cogging görbe úgy adódik, hogy több mágnes pólusra adódó cogging görbe fázishelyesen összegződik.



4.6.ábra. Excentricitás hatása a fogyómaték görbékre.

Megfigyelhető, hogy a gépek két fő csoportra oszthatóak: vannak, amelyek az excentricitásra érzékenyen reagálnak, mások kevésbé. Az érzékeny és kevésbé érzékeny pólusszám-horonyszám kombinációk között felfedezhető az összefüggés: ahol a pólusszám és horonyszám között van közös osztó, azaz van mechanikai szimmetria, a fognyomaték nagyobb amplitúdójú, viszont az excentricitásra kevésbé érzékeny (pl. 4p12h, 4p24h, 6p9h stb).



4.7.ábra. Közös osztójú pólusszám-horonyszám kombinációjú gépek.

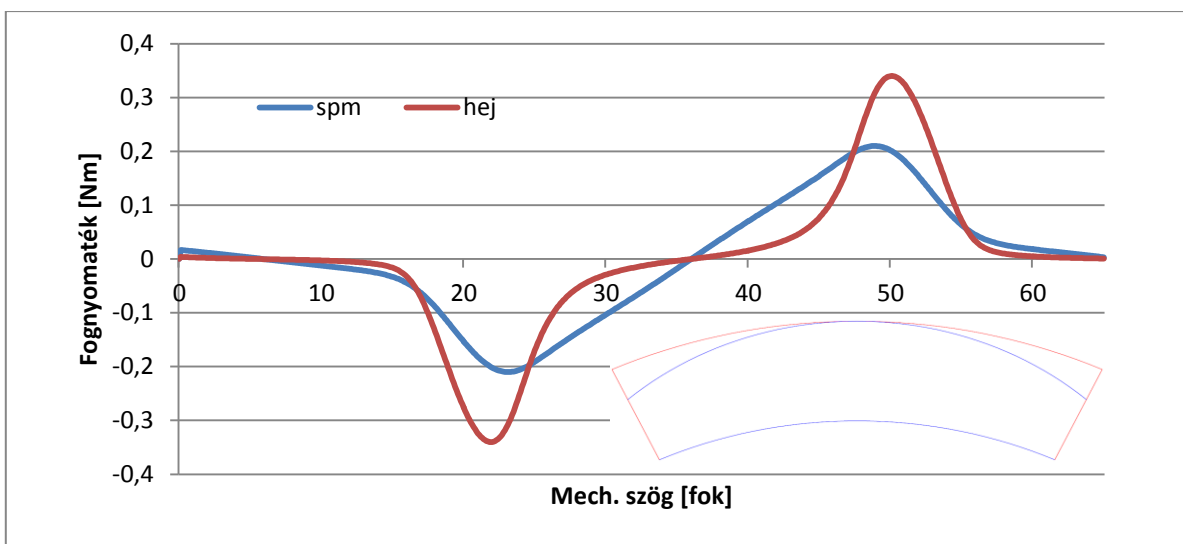
Ha a pólusszám és a horonyszám között nincs közös osztó, azaz nincs mechanikai szimmetria, a fognyomaték kisebb, viszont az excentrikus hibára érzékenyen reagál (4.7.ábra).

5. Hibrid fognyomaték számítási módszer (1.tézis)

A fognyomaték a horony előtt elhaladó mágnes pólusváltás által okozott mágneses energia változás eredménye. Bizonyos esetekben, pl jelentős lokális állórész telítésből vagy gyártási hibából adódóan járulékos fognyomaték komponensek is fellépnek.

A túlbonyolított analitikus számítási módszerek helyett a fognyomaték görbét egy mágnes pólus-horony kölcsönhatás esetére végeeselemes szoftverrel számítom, majd a számítás során ezt a görbét használom fel egyedi fognyomaték görbének. A görbe pontossága a végeredmény szempontjából kulcsfontosságú.

Ha egy mágnes pólus elhalad egy horony előtt, létrehoz egy egyedi $f_c(x)$ fognyomaték görbét (5.1.ábra). A komplett gép eredő fognyomaték görbéjét az összes horony és mágnes pólus együttesen képzeli. Az egyes mágnes pólusok a rotorhoz vannak rögzítve, a hornyok mechanikus pozícióját, rögzítését az állórész lemez határozza meg. A fellépő fognyomaték görbék összegzését így a rotor illetve állórész hozza létre. Az egyes mágnes pólusonként vagy hornyonként fellépő fognyomaték görbéket így vizsgálhatom külön-külön, majd ha összegezem őket, előáll a gép fognyomaték görbéje.



5.1.ábra. A horonyszáj előtt elhaladó, egy mágneshez tartozó cogging görbe. Kék-spm: mágnes szélei felé haladva vékonyodó pólusív, piros-hej: állandó vastagságú pólusív esetén.

Fognyomaték számító algoritmusok nagy számban szerepelnek a publikációkban. A gyártási szórások hatásának vizsgálatára alkalmas modellezési módszerre komoly igény jelentkezik az ipar részéről, ilyen algoritmusról viszont nem találtam publikációt. Olyan módszer kidolgozása volt a céloom, amely gyors futásidejű és alkalmas a gyártási szórások hatásának vizsgálatára, illetve a megengedhető gyártási toleranciák meghatározására.

A fognyomaték görbe számítása során a vasanyag telítése, nemlinearitása okoz nehézséget. Az egyedi fognyomaték görbe pontossága így alapvetően meghatározza a számítás eredményének minőségét. A pontos egyedi fognyomaték görbe meghatározható például végeselemes számítással. Az egyedi fognyomaték görbék összegzése analitikusan már elvégezhető. A továbbiakban az így kidolgozott módszert ismertetem [71,79].

A vizsgált gép geometriája meghatározza, hogy az egyedi fognyomaték görbék milyen fázishelyzetben vannak egymáshoz képest. Az egyedi fognyomaték görbét végeselem módszerrel számítva egy nyomaték-szöghelyzet görbét kapok eredményként.

A végeselem módszerrel számított egyedi fognyomaték görbét analitikusan dolgozom fel a továbbiakban, ezért kapta a módszer a hibrid elnevezést.

Az összegzést elvégezhetem úgy, hogy először meghatározom egy horonyra nézve az egy teljes rotor fordulat esetén fellépő fognyomaték görbét. Ezáltal figyelembe tudom venni külön-külön a mágnesek pozícióját, azaz az esetleges pólus pozíció hibát vagy pólusaszimmetriát.

A fognyomaték nulla középértékű nyomaték hullámosság komponens. Számítását, mérését a gép gerjesztetlen állapotában lehet elvégezni. A fognyomaték magnetosztatikus jellegéből adódóan így időtől nem függ a görbealak, csak a rotor pozíciótól.

Az így előállítható, egy horonyhoz tartozó cogging görbe: $f_h(x)$, egy teljes rotor fordulatra:

$$f_h(x) = \sum_{k=1}^n f_c(x + k\alpha) \quad (5.1)$$

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

Az egy horony előtt, egy teljes rotor fordulatra történő fognyomaték görbe felvétele azonos mágnes pólusok esetén elvégezhető pl. tömb struktúra alkalmazásával. Az egy-egy mágnes pólushoz tartozó egyedi fognyomaték görbéket a rotoron elfoglalt pozíciónak

megfelelő tömb szakaszra tárolom. A pólusonkénti fognyomaték görbéket egy teljes rotor fordulatra összegezve adódik az egy horonyra vonatkozó fognyomaték görbe. Az egyedi fognyomaték görbék közti fázistolás az α pólusosztási szög.

Lehetőség nyílik az esetleges mágnes pozíció hiba hatásának figyelembe vételére: mágnesenként a tényleges pozícióra módosítható az α szög.

A hornyokhoz tartozó fognyomaték görbék összegeként áll elő az eredő görbe:

$$f_{cogg}(x) = \sum_{k=1}^Z c_z \cdot f_h(x + k\beta) \quad (5.2)$$

ahol β a mágnes pólusok és hornyok közti relatív mechanikus szög.

A hornyonkénti összegzés lehetőséget ad a hornyonkénti légrés figyelembe vételére. Légrés excentricitás esetén a hornyonkénti légrés változó, hornyonként meghatározható. A c_z szorzó tényezővel figyelembe lehet venni az esetleges excentricitásból adódó hornyonként változó légrés méretet. A pólus rögzítési hiba, vagy horony deformációból adódó hornyok közti szöghiba esetén α , β helyére vektorban tárolt, gépre jellemző értéksort is meg lehet adni.

A pólusosztás mechanikus szögben:

$$\alpha = \frac{360^\circ}{2p} \quad (5.3)$$

β meghatározása:

$$\beta = \frac{360^\circ}{LKT(2p,Z)} \quad (5.4)$$

ahol LKT a legkisebb közös többszöröst jelenti. A horonyosztás mechanikus szögben:

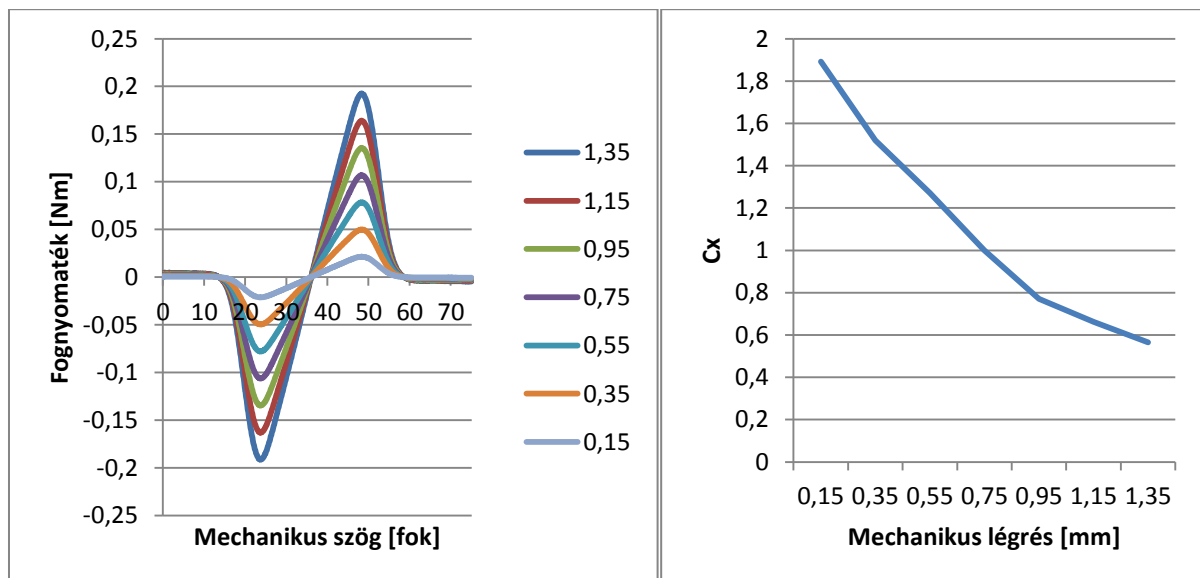
$$\gamma = \frac{360^\circ}{Z} \quad (5.5)$$

Az egyedi fognyomaték görbe meghatározható végeelem módszerrel az adott gép geometriája alapján. A görbealakot jelentős mértékben befolyásolja a geometriára jellemző telítés, illetve a mágnes pólus kialakítás, mágnes minőség. A mágnes minőség az anyagi jellemzőn túl a mágnesezettségi irányt is jelenti (diagonális vagy radiális). Megvizsgáltam, hogyan változik az egyedi fognyomaték görbe a főbb geometria jellemzők hatására, mint például pólusív forma, légrés méret.

A mágnes geometria például jelentősen befolyásolja a fognyomaték görbe alakját. A két héjmágneses cogging görbe közti különbség: a *hej* esetén a mágnes vastagság és a légrés állandó, míg az *spm* esetén a mágnes vastagság változó, a pólus középtől a szélek felé haladva a vastagság csökken, a légrés méret nő (5.1.ábra).

A szélesebb pólusív szélesebb cogging görbét eredményez. A változó mágnes vastagságnak köszönhetően a pólus átmenet, a mágneses energia változás lágyabb, lassabb, a fognyomaték csúcsérték kisebb, valamint a csúcsérték elérését követően lassabb lecsengésű. A görbealak a mágnes polaritásától nem függ.

A kisebb légrésű gépek érzékenyebben reagálnak a légrés változásra, a cogging-légrés csúcsérték meredekebben változik ebben a tartományban (5.2.ábra).



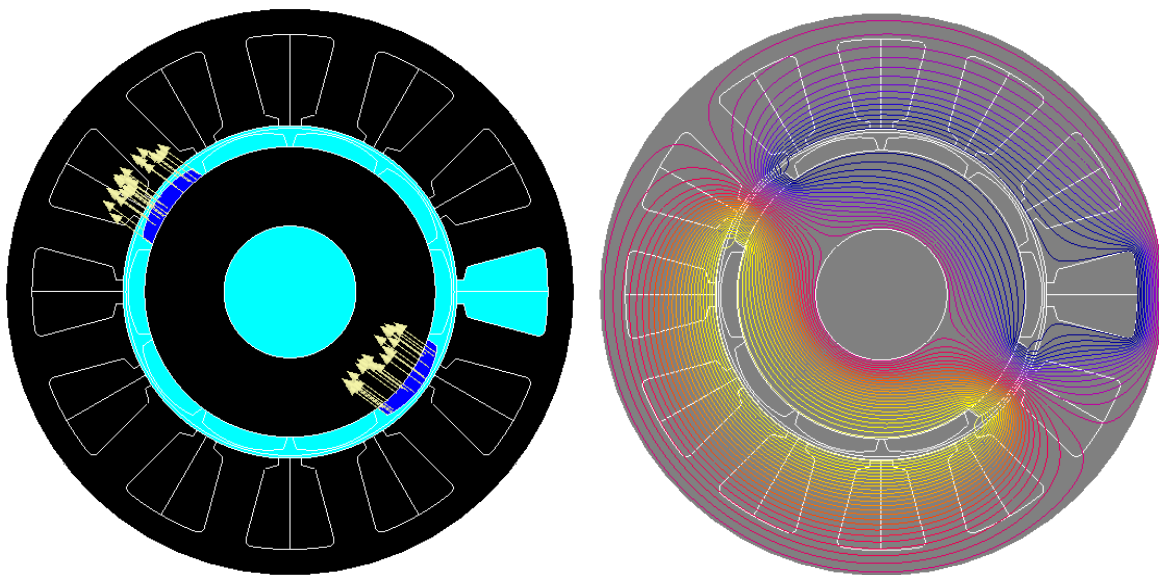
5.2.ábra. Légrésméret hatása az egy mágnes cogging görbéjére.

A hibrid módszer alap gondolatát, az eredő fognyomaték görbe tagokra, illetve összetevőkre bontását már több forrásban bizonyították [25-27]. Ha az egyedi fognyomaték görbék összegzésével előállítható az eredő fognyomaték görbe, akkor az összegzés művelet matematikai tulajdonságából adódóan tetszőleges sorrendben összeadva a komponenseket, az eredmény független a sorrendtől. A hibrid módszer ezt használja ki, megfelelően csoportosítva összegzi az egyedi fognyomaték görbéket.

Az eredő fognyomaték görbe számításán túl az excentricitás, illetve mágnes pozíció hiba mértékének fognyomaték görbe módosító hatása visszatérő kérdés a gépek gyártásba vitelének tervezése során. Komoly igény jelentkezik az ipar részéről egy olyan módszer iránt, amely alkalmas a gyártási hibák hatásának gyors, hatékony vizsgálatára. Ezért az egyedi fognyomaték görbék összegzését két szempont szerint rendezve végeztem el.

Egy horony esetére összegeztem az összes pólus, azaz egy teljes rotor fordulat esetére az egyedi fognyomaték görbéket, ezáltal a rotor póluskép szerinti változásokat tudom figyelembe venni. A hornyonként, egy teljes rotor fordulat esetére adódó fognyomaték görbéket összegeztem az összes horonyra, így megkaptam a gép eredő fognyomatékát. A hornyonkénti összegzéssel a légrés-aszimmetriával kapcsolatos jellemzők változását vizsgálhatom a hornyonkénti légrés méret szerinti c_z paraméter alkalmazásával.

Az egy horonyszáj előtt elhaladó, egy mágneshez tartozó görbét végeeselemes módszerrel határoztam meg. A számításhoz kis mértékben módosítom a geometriát (5.3.ábra). A mágnesekből egy póluspárt hagyok meg egymástól mechanikusan 180° -ra, illetve az állórész hornyokat egy kivétellel lemezanyaggal töltöm ki.



5.3.ábra. 1 horony-1 mágnes esetén fellépő fognyomaték számításához használt modell.

A számítás eredményeként adódik a kívánt görbe. A modellezési módszer alkalmaz bizonyos közelítéseket. A rotor vastest gerjesztése a kisebb mágnes darabszám miatt alacsonyabb, mint a teljes gép esetén. Az állórész vastestre is kisebb gerjesztés jut, továbbá a

koszorú keresztmetszet is jelentősen megnövekedett. A mágneskör legnagyobb ellenállású szakasza ugyanakkor továbbra is a légrés, melynek ellenállásához képest egy jól méretezett gép esetén a vaskör ellenállás változása által fellépő eltérés elenyésző. A vizsgálati módszer a mágnes pólusok közti szórások hatását nem veszi figyelembe.

Az eredményként előáll a keresett görbealak, amit egy mágnes-pólus kölcsönhatás eredményez. A mágnes pólusív, horonyszáj geometria változtatásának hatásai jól nyomomonkövethetőek. Az 5.2.ábra szerinti légréstől való függést a névleges légrés méret változás valószínűsíthető tartományán belül elegendő néhány pontban meghatározni, a köztes légrés értékek esete interpolációval meghatározható.

A modellezési módszer számítási idejének jelentős részét az 5.1.ábra szerinti illetve az 5.2.ábra szerinti görbe meghatározása teszi ki. Az egy pólus-horonyra jellemző fognyomaték görbéből ezután a fázistolásos összegzéssel a gép eredő fognyomaték görbéje, illetve a kívánt gyártási hibára jellemző eset percek alatt meghatározható. A művelet során a görbék megfelelő fázistolásos összegzése történik, amelyet a gép pólusszáma, horonyszáma határoz meg. Nagy számítási teljesítményű számítógépre csak a végelelemes számításokhoz van szükség, az eredő fognyomaték képzésére bármilyen számítógép alkalmas.

Példaként értelmezzük az α , β , γ változók jelentését 10p9h illetve 10p12h motor esetére. Mindkét motor $2p=10$ pólusú, azaz az α szög egyező lesz. A γ szög a horonyszámnak megfelelően eltérő lesz. A β szög a pólusszám-horonyszám kombinációból adódik (5.4) szerint.

10p9h gép esetén:

$$\alpha = \frac{360^\circ}{10} = 36^\circ, \beta = \frac{360^\circ}{90} = 4^\circ, \gamma = \frac{360^\circ}{9} = 40^\circ$$

Azaz a hornyok, mágnes pólus átmenetek közti mechanikus szög különbség:

$$\beta_i = 0^\circ, 4^\circ, 8^\circ, 12^\circ, 16^\circ, 20^\circ, 24^\circ, 28^\circ, 32^\circ$$

10p12h esetén:

$$\alpha = \frac{360^\circ}{10} = 36^\circ, \beta = \frac{360^\circ}{60} = 6^\circ, \gamma = \frac{360^\circ}{12} = 30^\circ$$

Azaz a hornyok, mágnes pólus átmenetek közti mechanikus szög különbség:

$$\beta_i = 0^\circ, 6^\circ, 12^\circ, 18^\circ, 24^\circ, 30^\circ, 36^\circ, 42^\circ, 48^\circ, 54^\circ, 60^\circ, 66^\circ$$

A mágnes pólusok $\alpha = 36^\circ$ -onként ismétlődnek, azaz:

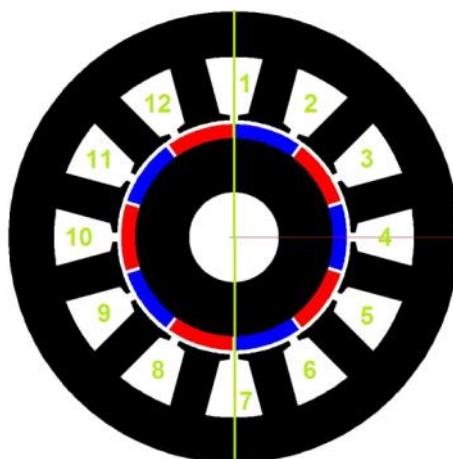
$$\beta_i = 0^\circ, 6^\circ, 12^\circ, 18^\circ, 24^\circ, 30^\circ, 0^\circ, 6^\circ, 12^\circ, 18^\circ, 24^\circ, 30^\circ$$

Megfigyelhető, hogy a közös osztójú pólusszám-horonyszám kombinációjú gépek esetén a hornyonkénti fognyomaték görbékből a mechanikus szimmetriának megfelelően több görbe fázisban egyezően összegződik (5.1.táblázat). A relatív prím pólusszám-horonyszám kombinációjú gépek esetén a hornyonkénti fognyomaték görbék egymástól fázisban eltolva összegződnek.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
9h	0	40	80	120	160	200	240	280	320			
12h	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
10p	0	36	72	108	144	180	216	252	288	324		
							0	6	12	18	24	30
10p12h	0	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60	72
10p9h	0	4	8	12	16	20	24	28	32			

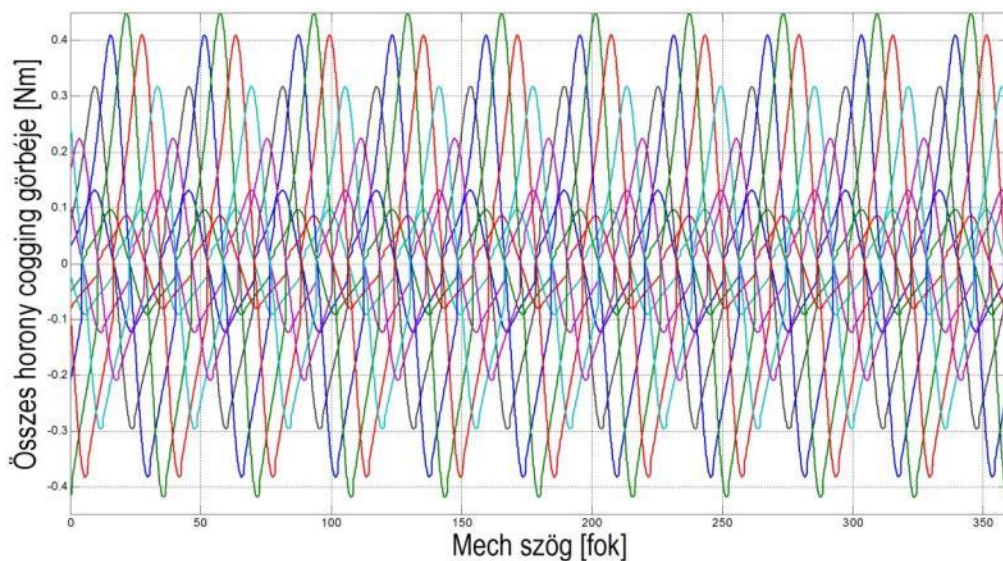
5.1.táblázat. Mechanikus szögben mért pozíció 10p12h, 10p9h gép, az egyes hornyok, pólusok esetén.

A 10p12h gép esetén a pólusok és hornyok mechanikus szög különbségei: 1. Pólus-1.horony: 0° , 2.pólus-horony 6° , 3.pólus-horony 12° , azaz 6° egész számú többszöröse. A 7. horonytól megfigyelhető a mechanikus szimmetria, ami a cogging görbe 36° -os fázistolásában jelentkezik. Ezáltal az 1.és 7.pólus, 2.és 8.pólus stb fognyomaték görbéje fázishelyesen összegződik (5.4.ábra).



5.4.ábra.10p12h motor esetén a mechanikus szimmetriatengely.

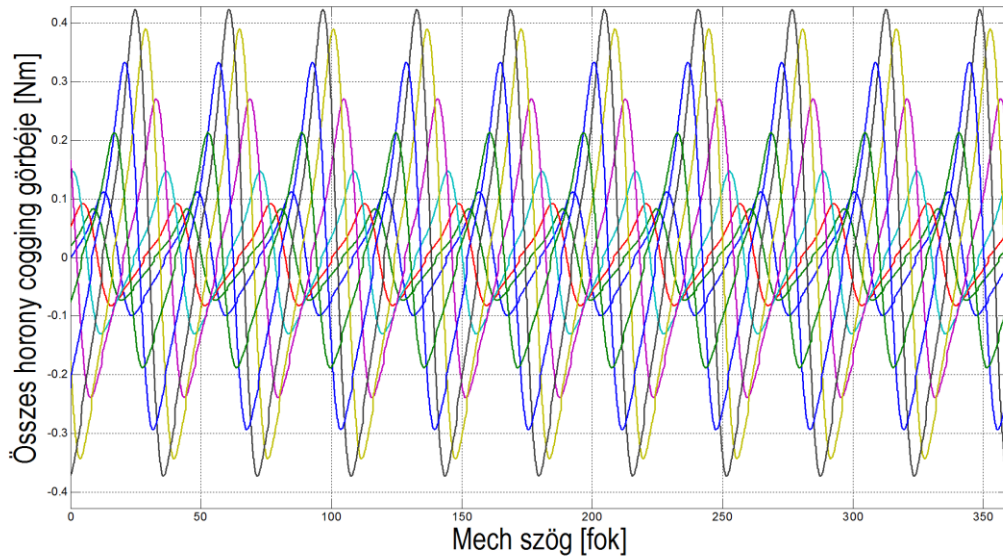
A hornyonkénti fognyomaték görbéket átskáláztam az 5.2.ábra szerinti módon. A légrés változása szerint a fognyomaték görbék amplitúdója változott. A 180° -os mechanikus szimmetria tengelynek megfelelően, statikus excentricitás esetén a gép szimmetrikus oldalain éppen egymással szemben áll a nagyobb, illetve kisebb légrésű horonyszáj. Az 5.5.ábrán látható, hogy fázisban összegződnek a légrés méret következtében megváltozott amplitúdójú görbék. A mechanikus szimmetriából adódóan így a névlegesnél nagyobb-kisebb légrés által módosított fognyomaték görbék kompenzáló hatást gyakorolnak egymásra.



5.5.ábra. 10p12h gép hornyonkénti cogging görbéi.

A 10p9h gép esetén a pólusok és hornyok esetén a mechanikus szög különbség: 1.pólus-1.horony: 0° , 2.pólus-horony 4° , 3.pólus-horony 8° , azaz 4° egész számú többszöröse. A cogging görbék közti fázistolás érték nem ismétlődik, azaz a pólusonkénti fognyomaték görbék egymástól különböző fázishelyzetben összegződnek (5.6.ábra).

Nincsen azonos fázishelyzetű görbe, nem lép fel a mechanikus szimmetriából adódó kompenzáló hatás, mint a 10p12h motor esetén. A hornyonként összegzett fognyomaték görbéket különböző szín jelöli, majd ezen görbék összegzéséből adódik az eredő fognyomaték görbe.

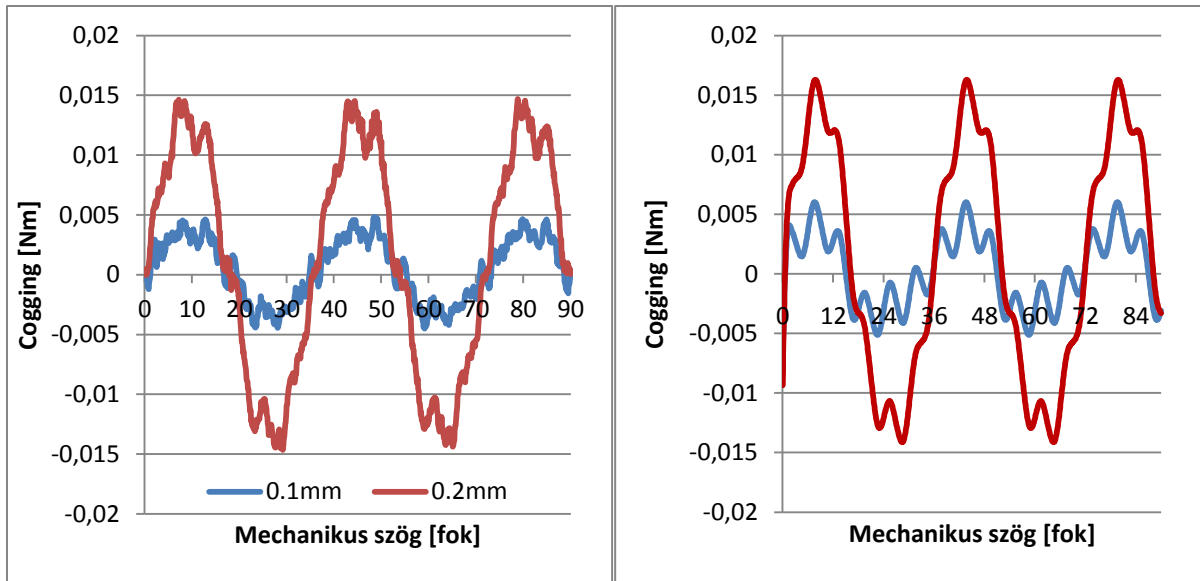


5.6.ábra. 10p9h gép hornyonkénti cogging görbéi.

A módszert ellenőriztem végeelemes szoftverrel, felvettem az egyedi fognyomaték görbét, illetve fognyomaték görbéket. A hibrid módszerrel, illetve végeelemes szoftverrel megvizsgáltam légrés excentricitás illetve mágnes pozíció hiba esetét. Az excentricitás mértéke 0,1mm illetve 0,2mm 0,75mm névleges légrés mellett, a mágnes pozíció hiba mértéke mechanikus $0,5^\circ$, 1° illetve $1,5^\circ$ volt.

A 10p9h gép esetén a pólusszám-horonyszám relatív prím, a hornyonkénti fognyomaték görbék mindegyike eltérő fázishelyzetű. A 10p12h gép esetén a pólusszám-horonyszám között van közös osztó, illetve a geometria is rendelkezik szimmetria tengellyel. A β_i értékeket megfigyelve a hornyonkénti fognyomaték görbék között vannak párok, amelyek megegyező fázishelyzetűek.

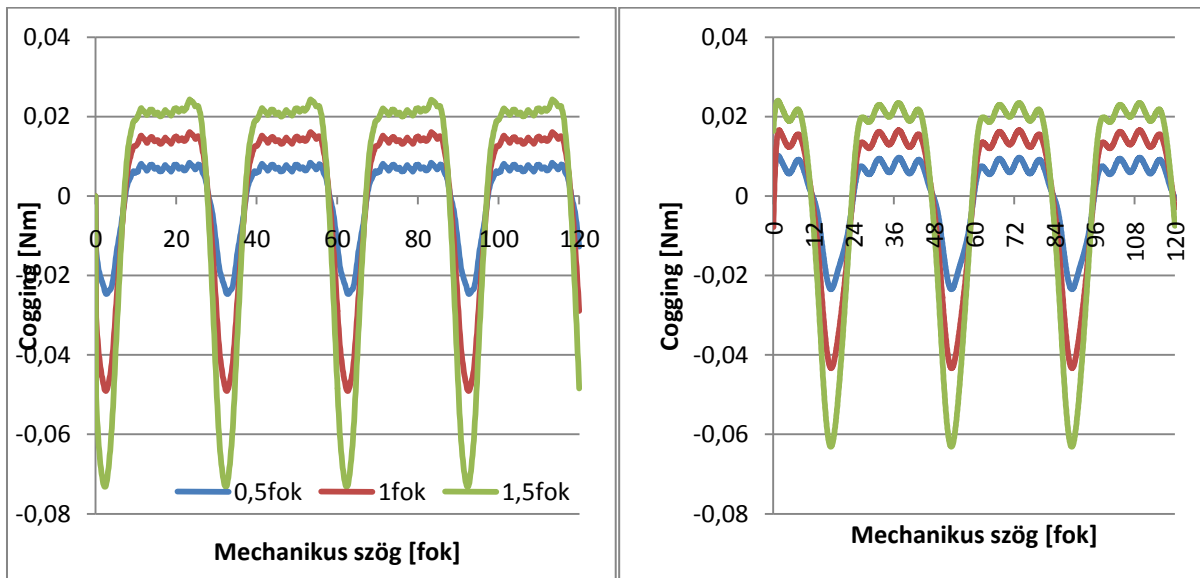
A végeelemes és a hibrid módszer által számított eredmény jó egyezést mutat. Az 5.7.ábrán légrés excentricitást, az 5.8.ábrán mágnes pozíció hiba érzékenységet vizsgáltam. Az eredmények amplitúdóra egyeznek, felharmónikus tartalommal van kis mértékű eltérés. Egyéb hiba esetekre vonatkozó eredmény a hibrid módszerrel pár perc alatt rendelkezésre áll, míg egy-egy hibamód-verzió számítása végeelemes módszerrel akár több órát igényel.



a,

b,

5.7.ábra. a, végeelem, b, hibrid módszerrel számított légrés excentricitás érzékenység vizsgálata azonos geometriára.



a,

b,

5.8.ábra. a, végeelem, b, hibrid módszerrel számított mágnes pozíció hiba érzékenység vizsgálata azonos geometriára.

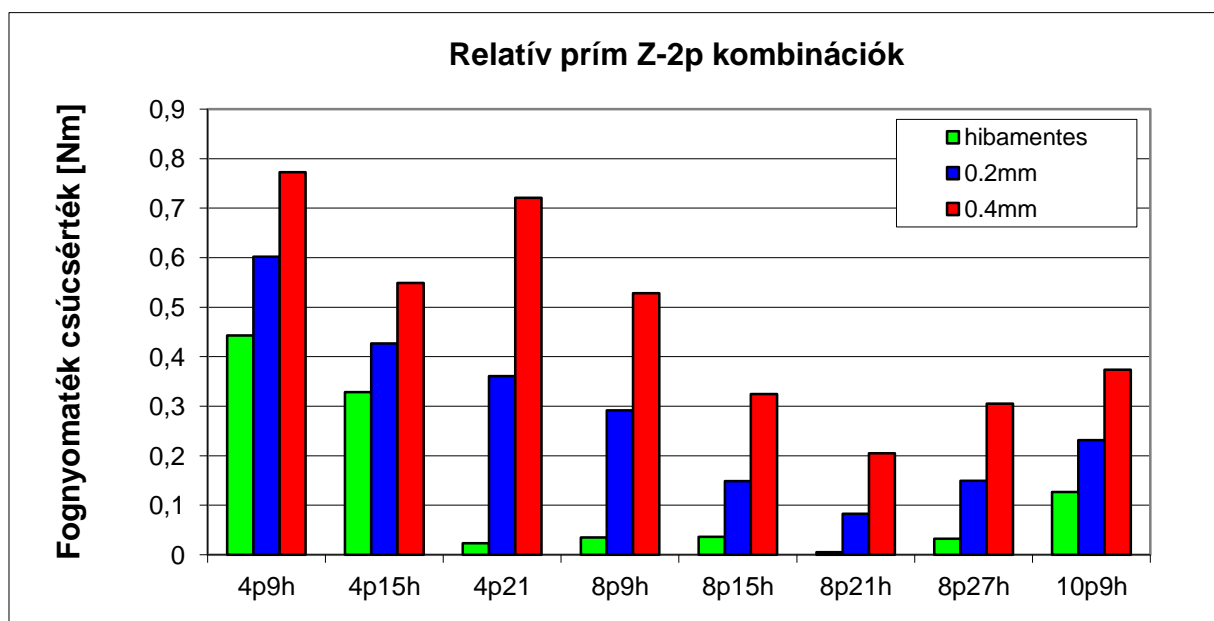
A pólusszám-horonszám megválasztásakor célszerű figyelembe venni a fenti jelenséget. A specifikációban meghatározott maximális fognyomaték szint, illetve a gyártási technológiából adódó várható gyártási tolerancia együtt határozza meg a várható selejtarányt. A szűkebb toleranciák tartása általában drágább technológiát igényel, a limitet túllépő

fogyomatékú gépek selejtezése, illetve a sor végi ellenőrzési folyamat is költség növelő tényező.

Ha a gyártósor alkalmas a kellően szűk toleranciák tartására, nagy darabszám esetén is érdemes relatív prím pólusszám-horonyszám kombinációt választani. Nagyobb toleranciájú technológia esetén célszerű közös osztós pólusszám-horonyszám kombinációt választani a stabil gyártási minőség érdekében.

Ez a jelenség is a hornyoként értelmezhető egyedi cogging görbékre vezethető vissza. Az egy horonyhoz tartozó cogging görbék amplitúdója az 5.2.ábra szerint hiperbola jelleg szerint változik a légréstől függően. Kisebb légrés esetén a görbe csúcserőke meredeken növekszik, nagyobb légrés esetén egyre kisebb mértékben, de csökken. Légrés excentricitás esetén a légrés méret hornyoként más és más. Így a hornyokénti fogyomaték görbék amplitúdóban, fázishelyzetben is eltérnek egymástól. Az eredő fogyomaték görbe a hornyokénti görbék összegeként áll elő.

A jelenség jól nyomon követhető például a 10p12h gép esetén. A pólusszám-horonyszám közös osztója 2. Ez azt jelenti, hogy a gép geometriája közös szimmetria tengellyel rendelkezik. A szimmetriából adódóan a hornyok is szimmetrikus csoportokra oszthatóak, melyek ebben az esetben 1-6. illetve 7-12. A horony párok pl 1-7, 2-8, stb (5.4.ábra).



5.9.ábra. Relatív prím pólusszám-horonyszám kombinációk excentricitás érzékenysége.

Légrés excentricitás esetén a hornyonkénti légrés méret változó lesz. A szimmetriából adódóan, a excentricitás mértékétől, irányától függetlenül egymással szemben lesz a maximális és minimális légrés érték. A mágneskörtől függően, az 5.2.ábra szerint változik az egyedi fognyomaték görbe amplitúdó csúcsértéke a légrés méret függvényében lineárisan vagy hiperbola szerint.

Az egymással fázishelyesen összegződő, de légrés méret miatt megváltozott amplitúdójú fognyomaték görbék a mágneskör telítettségétől függően részben kompenzálják egymást, így az eredő fognyomaték görbe változása kisebb mértékű marad.

Az 5.9.ábrán a közös osztóval nem rendelkező pólusszám-horonyszám kombinációjú gépek fognyomatékának excentricitás-függése látható. A fognyomaték növekedés jelentős a közös osztós gépekhez képest. Relatív prím pólusszám-horonyszám kombináció esetén nincs olyan horony páros, melyeknek fázishelyesen összegződne a hornyonkénti fognyomaték görbeserege, így a nagyobb és kisebb légrésű horony esetén fellépő kompenzáló hatás is elmarad.

6. Cogging csökkentési módszerek

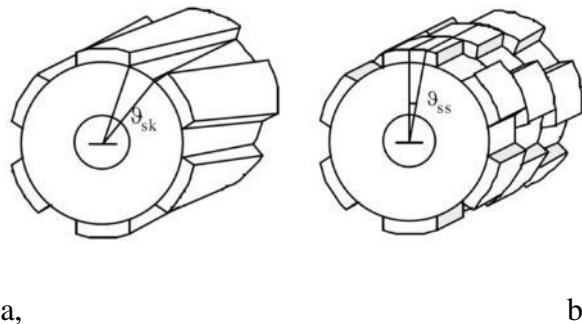
A fognyomaték csökkentésére számos megoldás létezik. Általában mindegyik módszer kompromisszumos megoldást jelent, általuk a gyártás költségesebb vagy bonyolultabb lehet. Bizonyos részük csak kis szériás gyártásra alkalmazható.

6.1. Adaptív controller

A hajtásszabályozási módszerek új lehetőségekkel bővülnek az egyre nagyobb számítási kapacitású mikroprocesszorok terjedésének köszönhetően. Ha rendelkezésre áll a gép nyomaték hullámosság görbéje és a forgórész pozíció jel, a nyomaték hullámosság pozíció függő szabályozással eliminálható. A módszer erősen motorfüggő, motoronként külön-külön ismerni kell a nyomaték hullámosság adatokat. A motorok közti eltérést a gyártási szórások okozzák. Nagyobb darabszám esetén az alkalmazhatósága kérdéses.

6.2. Pólus ferdítés

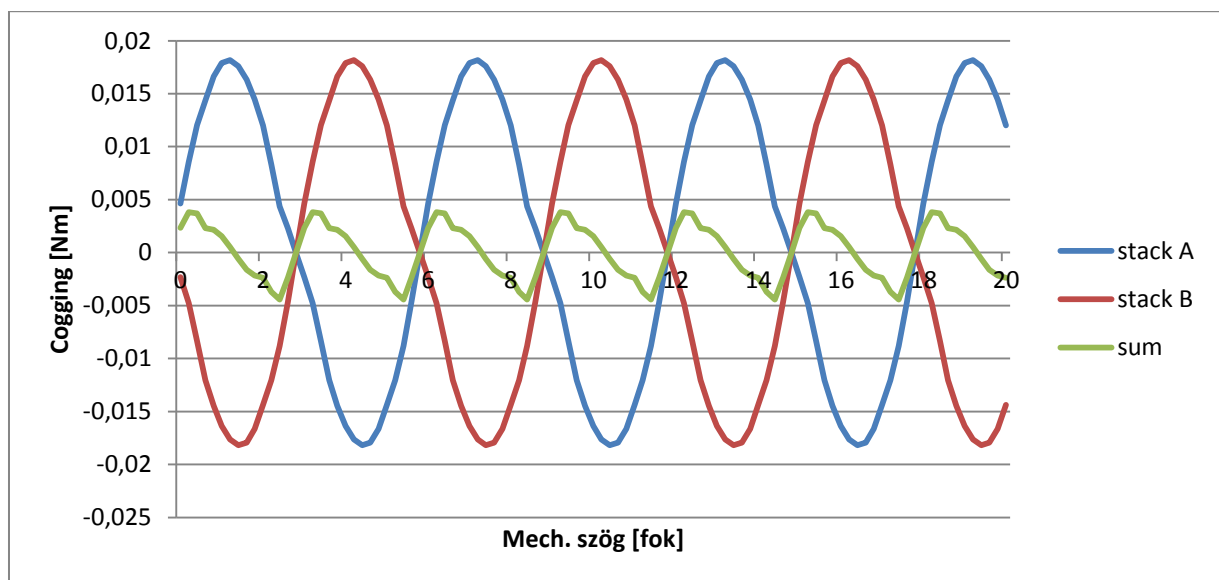
Az egyik legáltalánosabban ismert és alkalmazott fognyomaték csökkentési módszer a pólus- vagy horony ferdítés. Hatásuk ekvivalens. A ferdített állórész tekercselése nehezen automatizálható. A forgórész mágnes pólus ferdítés is nehézséget okoz: a megfelelő ívű mágnesek gyártása költségesebb, felmágnesezésük is bonyolultabb. Az ívesen ferdített mágnesek helyett alkalmazható lépcsős ferdítés is (6.1.ábra).



6.1.ábra. a, folyamatos ívvel, b, lépcsősen ferdített pólusú forgórész [4].

Az egyszerűbb gyártás érdekében a lépcsős ferdítés a gyakoribb megoldás. A folyamatos íven ferdített mágnesek gyártása drága, illetve más forgórész hosszúságú gép esetén nem használható fel. A héjmágnesek több szegmensből állnak, a ferdítési lépcsők hosszának megfelelően tetszőleges hosszúságú forgórész készíthető. A besüllyesztett mágnesű, pl küllős, v, egyéb belső mágneses gépek esetén a lépcsős ferdítés alkalmazható egyszerűen, hatékonyan.

A gép viselkedése szempontjából lényeges, hogy a cogging és a ripple együtt legyen minimális. Érdekes megvizsgálni pl. a pólus ferdítés hatását. A pólus ferdítéssel egy harmonikus komponens csökkenthető hatékonyan, a többit nem befolyásolja mértékadóan.

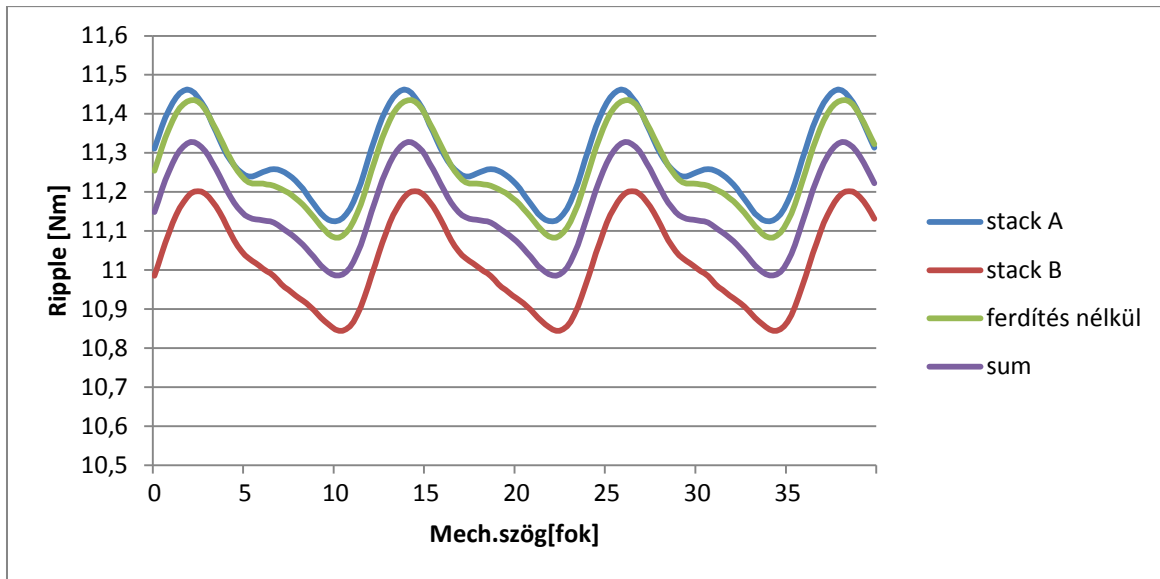


6.2.ábra. Kettő szegmensből álló lépcsős ferdítésű forgórész cogging görbéi. Stack A és stack B az egyes forgórész felek görbéje, sum az eredő cogging görbe.

A 6.2.ábrán egy 10 pólusú, 12 hornyos gép cogging görbéi láthatóak (az 5.1.ábrán hej néven). A stack A, illetve stack B a két forgórész fél görbéje, a sum az eredő, a két görbe összegzéseként kapható. A fognyomaték csökkenés jelentős. A két rotor fél közti forgatási szög mechanikus 3° .

Érdekes megvizsgálni a ripple görbét is. A szimuláció ebben az esetben összetettebb. Nyomaték képzés akkor lehetséges, ha a forgórész pozícióhoz rögzített, vele együtt forgó állórész mezőt hoz létre az inverter. Ferdtítés nélküli esetben a rotor pozíció egyértelmű, az egyik pólus középvonala. Lépcsősen ferdített forgórész esetén az egész pólus

középvonala lesz. A két forgórész fél esetén a rotor offset pozíció stack A-ra $+1,5^\circ$ míg stack B-re $-1,5^\circ$ lesz 3° ferdtítés esetén.



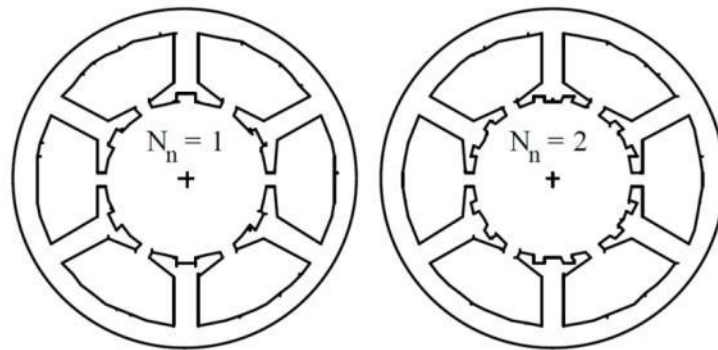
6.3.ábra. Kettő szegmensből álló lépcsős ferdtítésű forgórész ripple görbéi. Stack A és stack B az egyes forgórész felek görbéje, sum az eredő ripple görbe illetve a ferdtítés nélküli rotorhoz tartozó ripple görbe.

Lépcsős ferdtítés esetén az eredő nyomaték görbe a stack A és stack B görbe összege, a sum lesz (6.3.ábra). A ferdtítés nélküli forgórész nyomaték görbéje zölddel szerepel. A forgórész ferdtítés hatására a cogging csúcsérték lényegesen csökkent, a ripple csúcsérték nem változott, az eredő nyomaték csúcsérték, középerérték viszont csökkent.

Az inverteres hajtások egyik fontos bemeneti paramétere a rotor aktuális szöghelyzete, illetve ha a motor tengely végi jeladóval rendelkezik, akkor a jeladó referenciához képesti szöghelyzetet jelentő offset. Az offset érték fontos paraméter, a sima, egyenletes nyomaték képzés akkor lehetséges, ha az állórész gerjesztés az aktuális rotor pozíciót követi.

A nyomaték csökkenésen túl komolyabb probléma esélye is fennáll. A stack A és stack B esetén más a felharmonikus tartalom. Ebből az következik, hogy ha a rotor pozíció jeladó nem tökéletesen van beállítva, azaz a rotor szakaszokra nézve nem azonos az offset, akkor a két forgásirányú gépnek más lesz a nyomaték felharmonikus tartalma forgásirányonként. Zajkritikus alkalmazások esetén gondot okozhat.

6.3. Dummy slot



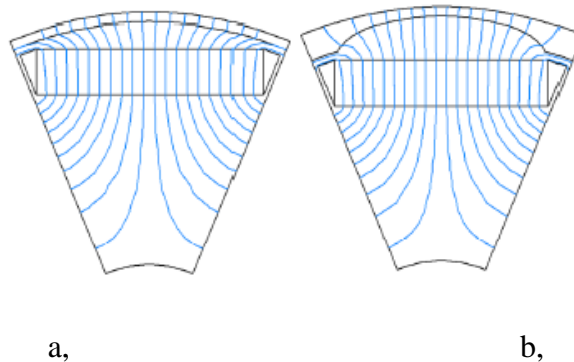
6.4.ábra. Dummy slot-os állórész lemez.

Széles körben elterjedt fognyomaték csökkentési módszer a „dummy slot” alkalmazása (6.4.ábra): a fogfejen általában horonyszáj méretű becsípést alakítanak ki [5]. Az így kialakított új hornyok azonos módon hoznak létre fognyomatékot, mint a teljes értékű horonyszájak, csak a köztük levő mechanikus szög miatt fázisban eltérőek lesznek, illetve a sok „járulékos” horony által keltett fognyomaték komponensek közti fázishelyzet következtében jelentős részleges kioltás léphet fel a görbék összegzésekor, így jelentősen csökkenhet az eredő fognyomaték.

A módszer előnye, hogy alkalmazásával a cogging hatásosan csökkenthető a lemezalak módosítása, áttervezése nélkül, illetve a forgórész geometria is változatlan marad. Hátránya, hogy túl nagy becsípések esetén a fogfejen lokális telítés keletkezhet, ami a ripple jellemzőket ronthatja, illetve az effektív légrés is nő, a nyomaték tényező romlik.

6.4. Ripple csökkentés pólusív formázással

A módszer szerint a mágnes vastagságát célszerű változtatni, a pólus közepétől a szélei felé haladva (6.5.ábra). Fognyomaték csökkentésre is jól használható, mert a mágnes sarkánál a pólusátmenetet lágyítja a nagyobb légrés. A módszer héjmágneses és besüllyesztett mágnesű gépek esetén is eredményesen alkalmazható.



6.5.ábra. Pólusív szélei felé haladva változó légrésű pólus kialakítás [55].

A ripple illetve cogging görbe harmonikus tartalma általában eltérő, így a pólusferdítéssel általában csak az egyik nyomtétel hullámosság komponens csökkenthető hatásosan.

A változó rádiuszú pólusív alkalmazása a cogging csökkentés szempontjából kedvezőbb, a pólus átmenet lágyabban megy végbe, így a cogging görbe is kisebb meredekségű lesz.

A nyomtétel hullámosság csökkentő módszer kiválasztásakor törekedni kell, hogy a gép többi paraméterének ne menjen a rovására a beavatkozás. A pólusív megválasztásakor a cogging görbe alakulása mellett folyamatosan figyelni kell az indukált feszültség görbe, illetve ripple görbe felharmonikus tartalmának változására is, közös ripple-cogging minimum keresés a feladat.

Ha az indukált feszültség görbe „túlzottan trapézos”, a változó rádiuszú pólusív kialakítás a trapézosságot csökkenti, így a nemkívánatos felharmonikus tartalmat is.

7. Pólusív optimalizálás (2.tézis)

A fognyomaték a forgórész mágnes pólus sarok állórész horonyszáj előtti elhaladásakor lép fel. Az egyes hatások fázishelyesen összegződnek, hornyok és mágnes pólusok közti mechanikus szög a mérvadó.

Az elhaladás során a horonyszáj alá beérkező, illetve a horonyszáj alól kifutó mágnes sarok ellentétes előjelű, de azonos abszolút értékű nyomaték lüktetést kelt (5.1.ábra). Így, ha a pólusív horonyszáj középtől horonyszáj közepig terjed, a pozitív és negatív fognyomaték hatás kompenzálja egymást minden mágnes esetén [79]. Az ebben rejlő lehetőség csak bizonyos pólusszám-horonyszám kombináció esetén alkalmazható a gép egyéb paramétereinek romlása nélkül. Túl szűk pólusív esetén a ripple görbe jelentősen romlik, és a nyomaték közéérték is csökken. A legtöbb pólusszám-horonyszám kombináció esetén túl szűk pólusív adódik. Ilyen esetben a gép indukált feszültség görbéje túl nagy felharmonikus tartalmú, a táplálásból adódó hullámosság jelentős mértékű lesz, az eredő nyomaték hullámosság nem lesz optimális.

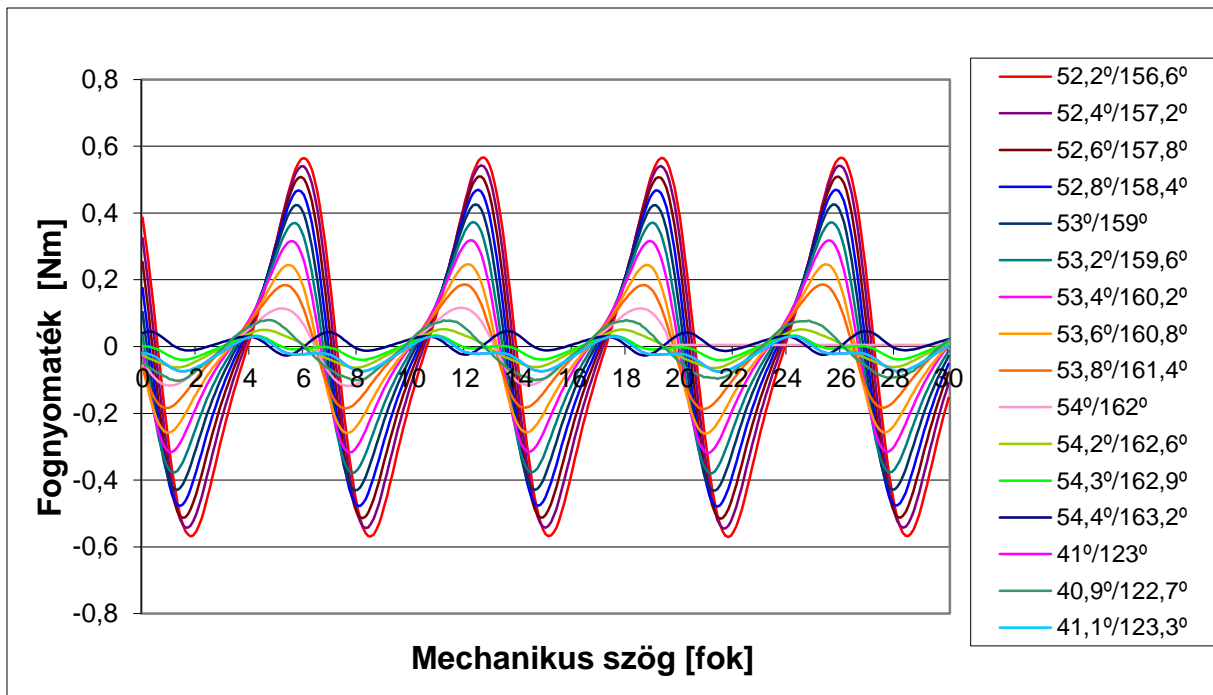
pólusszám	2	4	6	8	10	12
max.pólusív	180°	90°	60°	45°	36°	30°

horonyszám	9	12	15	18	21	24	27
szög*1	40°	30°	24°	20°	17,14°	15°	13,33°
szög*2	80°	60°	48°	40°	34,29°	30°	26,67°
szög*3	120°	90°	72°	60°	51,43°	45°	40°
szög*4	160°	120°	96°	80°	68,57°	60°	53,33°

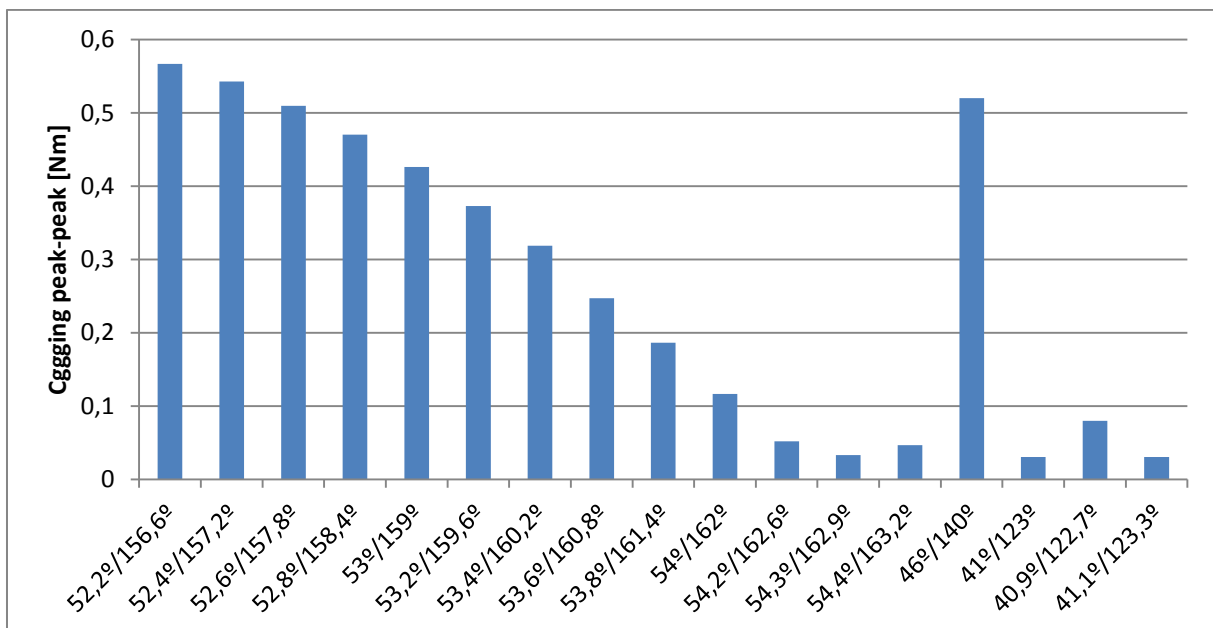
7.1.táblázat.

A mágnesenkénti húzó-toló hatások (pozitív-negatív lüktetés, 5.1.ábra) kiegyenlítése a konkrét mágneskörthől is függ. A $2p=6$ pólusú $Z=27$ horonyszámú gép esetén a minimális fognyomatékhoz tartozó pólusívet $53,3^\circ$ környezetében kell keresni. Ez természetesen bizonyos mértékben eltérhet a légrés méret, horonyszáj méret, illetve fogfej kialakítás, szórási viszonyok, illetve mágnesezettség függvényében.

Végelelemes analízissel megkerestem különböző pólusívű modellek elkészítésével és futtatásával, hogy milyen pólusív esetén lesz minimális a fognyomaték csúcsérték (7.1.ábra). A vizsgált gép 150mm külső átmérőjű, 100mm vastest hosszúságú, a légrés oldalanként 1mm.



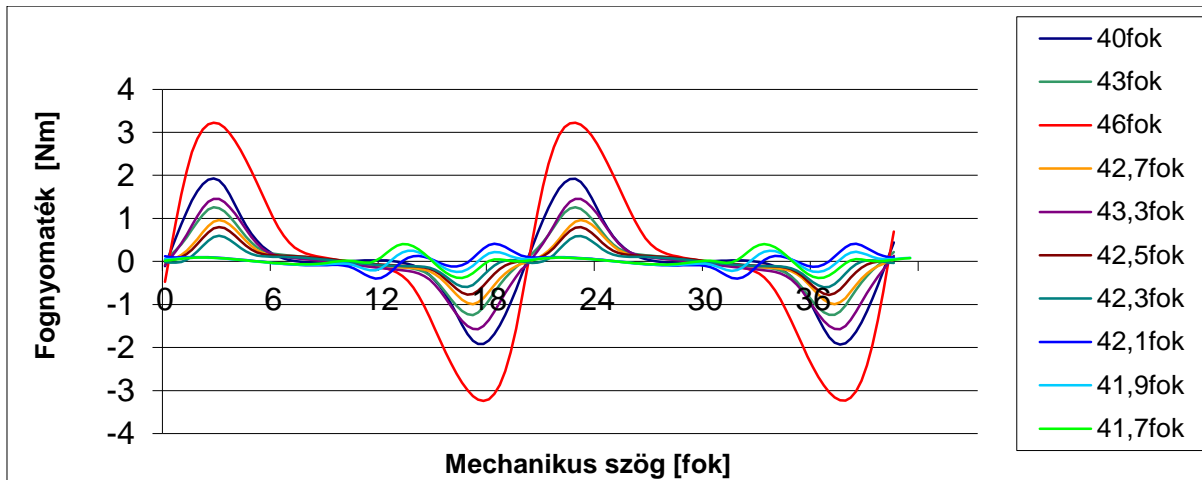
7.1.ábra. 6p27h-s motor cogging görbái különböző pólusív esetén.



7.2.ábra. 6p27h-s motor cogging csúcsértékei különböző pólusív esetén.

A vizsgált lemezalak esetén a fognyomaték minimum 54,3° mechanikus, azaz 162,9° villamos szögre adódott. Ha egy horonyosztással rövidítem a mágnes ívet, ugyanaz a fognyomaték görbe érhető el. A fognyomaték görbe szempontjából tetszőleges, hogy hány

horonyosztás szélességű a pólusív, a lokális minimum hely periódikusan ismétlődik, horonyosztásnyi periódussal (7.2.ábra). Ugyanezt a vizsgálatot 6p9h motorra is elvégeztem.



7.3.ábra. 6p9h-s motor cogging görbéi különböző pólusív esetén.

A minimális fognyomaték csúcérték 41,9° mechanikus pólusívre adódott. Villamos szögben 125,7°, ami nagyon szűk, nagy lesz a ripple, illetve felharmónikus tartalom (7.2.táblázat).

Pólusív [mech szög]	40	43	46	42,7	43,3	45,5	42,3	42,1	41,9	41,7
fognyomaték max [Nm]	1,93	1,26	3,23	0,96	1,45	0,80	0,60	0,41	0,25	0,40
arány 40 fok-ra	1,00	0,65	1,67	0,50	0,75	0,41	0,31	0,21	0,13	0,21

7.2.táblázat.

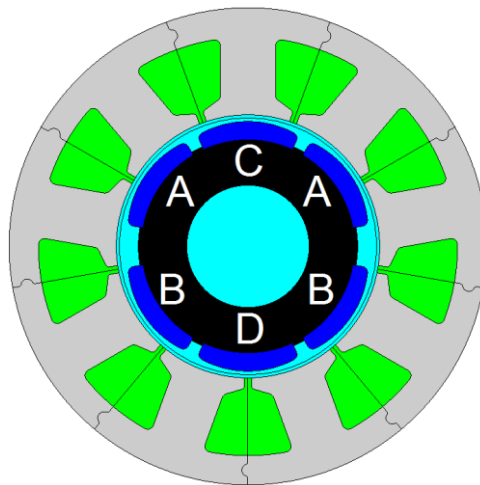
A 6p27h gép esetén található olyan pólusív, hogy a pólusonkénti egyedi fognyomatékok úgy lépnek fel, hogy a mágnes sarkain azonos amplitúdójú, de ellentétes előjelű fognyomaték lép fel. Ugyanez a 6p9h gép esetén is előidézhető megfelelő pólusív szélesség választással, viszont ez a pólusív a ripple görbe szempontjából nem ideális.

A végeelemes szimuláció a 7.1.ábra esetén időigényes feladat: 1-1 görbe futtatása kb. 14 órát igényelt (az akkor rendelkezésemre álló számítógép esetén), 17 görbe esetén ez jelentős időmennyiség.

A számítás a hibrid módszer kiterjesztésével is elvégezhető. Az eredmény lényegesen rövidebb idő alatt generálható, így elegendő az így kapott optimális forgórész kialakítást, illetve kis mértékben változtatott variánsait modellezni végeelemes szoftverrel.

7.1. Pólusok aszimmetrikus elhelyezése

Az egyedi fognyomaték görbék közti részleges kioltáson alapuló fognyomaték csökkentő módszer megfelelően elhelyezett mágnes párokkal is alkalmazható. Erre jó példa a 6p9h motor 7.4.ábra szerinti forgórész és állórész kialakítással. Az állórész külső átmérő 80mm, légrés méret 1,1mm, vastest hossz 33mm. A vizsgált motor névleges nyomatéka 3,5Nm. A cogging tolerancia (0,5%) 0,0175Nm, a ripple tolerancia (3%) 0,105Nm csúcstól csúcsig. Az állórész szegmentált kialakítású a nagyobb horonykitöltés elérése érdekében.

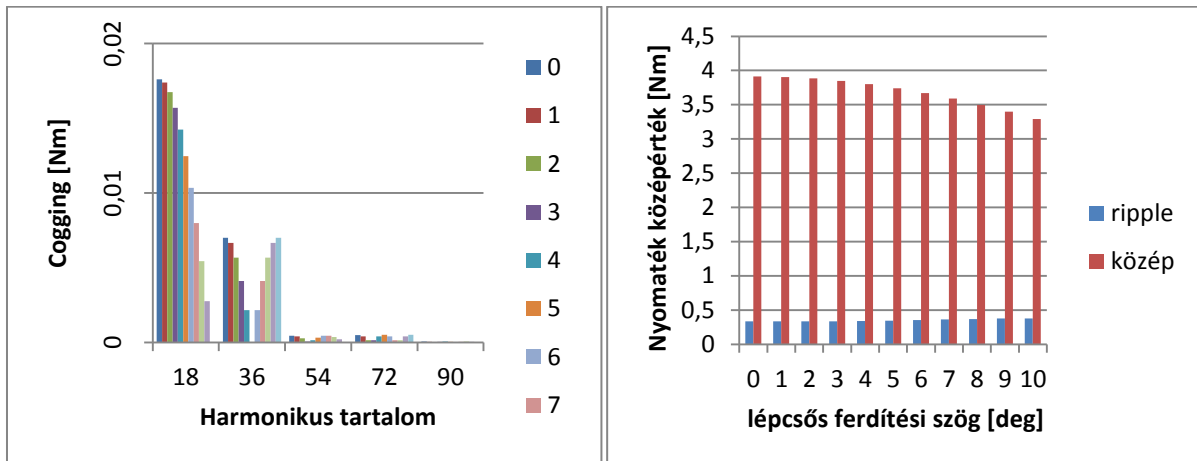


7.4.ábra. Szegmentált állórészű $2p=6$ pólusú $Z=9$ hornyos motor pólus ferdítés helyett pólus kitoláson alapuló cogging csökkentési módszer alkalmazásával.

A 7.4.ábrán megfigyelhető, hogy a C-D jelű mágnesek a szimmetrikus elrendezésnek megfelelő helyükön maradtak, az A jelű mágnesek a C jelű felé, illetve a B jelű mágnesek a D jelű felé közelebb tolva helyezkednek el. Az A-A illetve B-B mágnes párosok úgy helyezkednek el, hogy az együttes pólusív 4 horony osztás legyen. Az eltolás mértékét a horonyszám határozza meg: legyen a horonyosztás egész számú többszöröse. Amíg az egyik oldali A (vagy B) mágnes pozitív, addig a másik szélen levő pár negatív, azonos fázishelyzetű cogging hatást kelt. Ezáltal a két mágnes egymás cogging görbáját kioltja. A C-D mágnes páros cogging görbéi fázisban eltoltan adódnak össze, azaz a várható eredő fognyomaték görbe kis amplitúdójú lesz. A vizsgálatot hibrid módszerrel végeztem, majd az optimális pólus elrendezést végeselem módszerrel ellenőriztem.

Megvizsgáltam a pólusformálással, pozícionálással, illetve a forgórész pólusferdítéssel elérhető lehetőségeket, továbbá azt, hogy a pólus ferdtítés, vagy a pólus pozíció kitolások módszer alkalmazása optimálisabb a vizsgált 6p9h gép esetén.

A pólus ferdtítés egy harmonikus csökkentésére használható hatékonyan. Másodlagos hatásként csökken a gép névleges nyomatéka, így célszerű megvizsgálni az egyes ferdtítési szögek hatását.



7.5.ábra. A mechanikus ferdtítési szög hatása a fognyomatéokra (3 stack-es ferdtítés esetén).

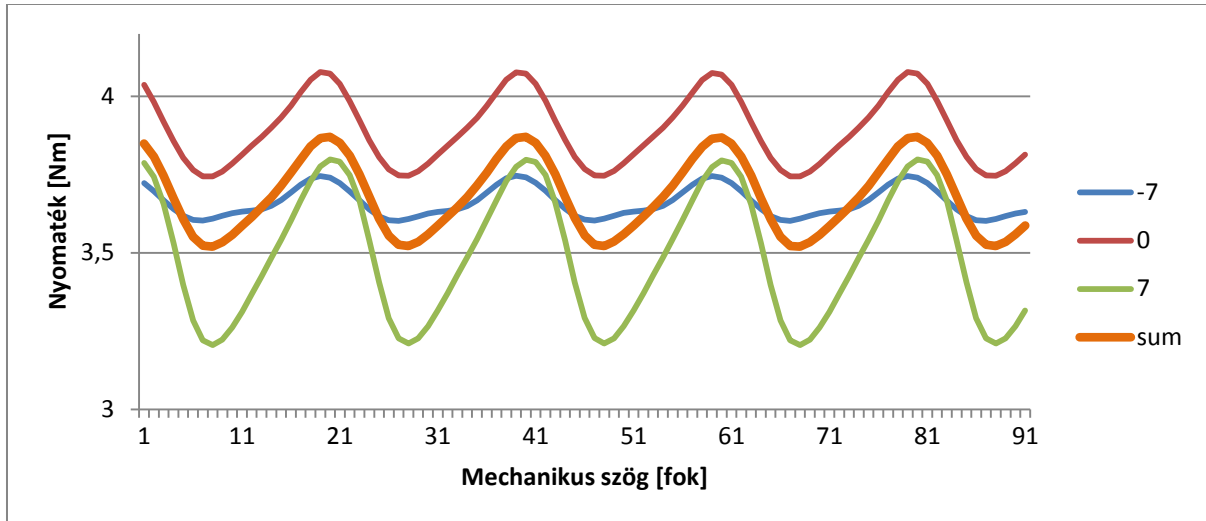
Nagyobb ferdtítési szög esetén hatékonyan csökken az alapharmonikus (18-as), a 2. harmonikus (36-os) hatásosan csökkenti a ferdtítés, mechanikus 7°-nál éri el a minimumot.

A pólus ferdtítés következtében a gép nyomaték középértéke is csökken a fognyomatékkal együtt, a lüktetés ugyanakkor kis mértékben növekszik a ferdtítési szög növelésével.

A 3 stack-es ferdtítés a 6.1.b.ábra szerint történt. A forgórész a tengely mentén 3 azonos szakaszra lett bontva. A középső szegmenshez a két szélső 7-7 fokkal el lett forgatva jobbra, illetve balra.

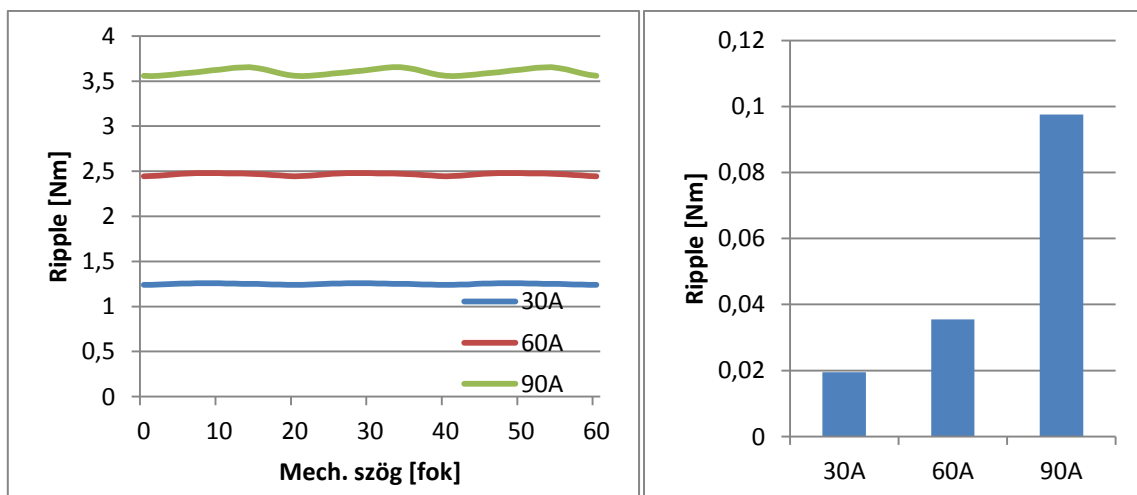
A szimulációt a komplett rotorra rotor stackenként végeztem el a meghatározott ferdtítési szögek alkalmazásával, majd az eredmény görbék számtani közepét vettem. Megfigyelhető, hogy a különböző forgórész stackek esetén jelentős eltérés van a ripple tartalomban: más az amplitúdó és a fázishelyzet is. Az eredő ripple görbe (sum) a 0, azaz a

középső stack fázishelyzetébe kerül. A görbék párhuzamosan futnak, azaz a felharmónikus tartalom azonos, de a középérték kisebb. A nyomaték középérték 3,52Nm, a ripple 0,35Nm.



7.6.ábra. 3 lépcsőben ferdített rotor ripple görbéje a ferdítetlen rotor, illetve balra-jobbra 7 fokkal ferdített rotor nyomaték görbéjének átlaga, sum néven ábrázolva.

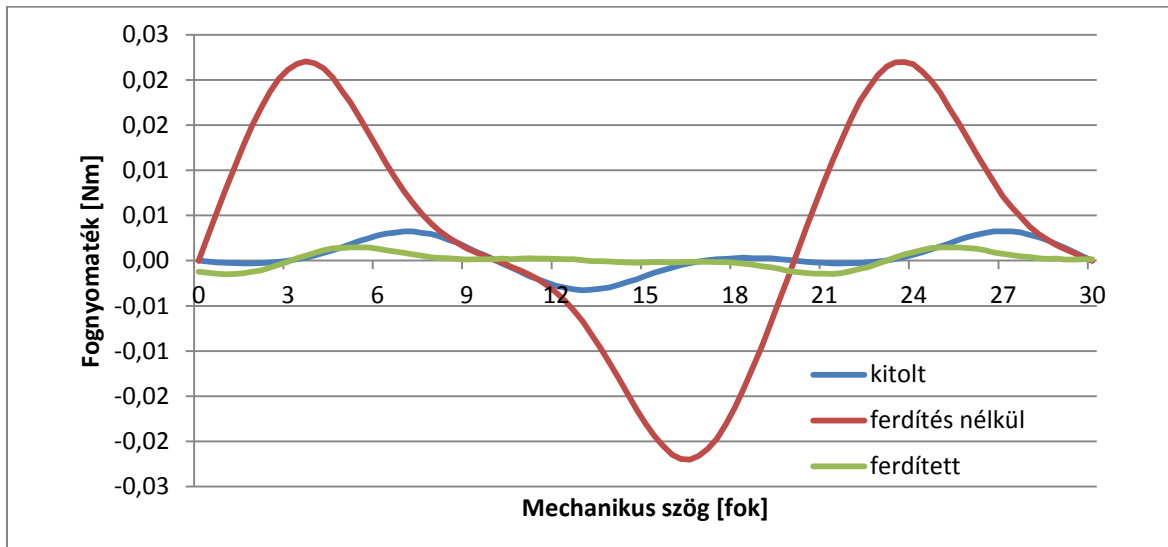
A ripple szimulációt elvégeztem a módosított pólus elrendezésű gép esetén is. A telítés hatása megfigyelhető a 7.7.ábrán. A szimulációt a névleges áram 33%-os lépcsőiben végeztem el: 30, 60, 90A esetén. A bal oldali ábrán a nyomaték középérték, a jobb oldali oszlop diagramon a ripple figyelhető meg.



7.7.ábra. Ripple görbe és csúcsértékek kitolt mágnes pólusú rotor geometria esetén a csúcsáram 33%-os lépcsőzése mellett.

A 7.8.ábrán a fognyomaték görbék láthatóak. A ferdítés nélküli (szabályos), szimmetrikus pólus elrendezéshez tartozó, a ferdített a pólusferdített verzió, a kitolt pedig a 6.4.ábra szerint módosított aszimmetrikus forgórész kialakításhoz tartozó fognyomaték görbe.

Pólus ferdítés nélkül a fognyomaték csúcstól csúcsig 0,044Nm, azaz határérték feletti. Lépcsős ferdítést alkalmazva 0,0033Nm érhető el. A pólus kitolással elérhető cogging szint 0,0064Nm. Pólus ferdítéssel vagy pólus kitolással is teljesíthető a cogging határérték.



7.8.ábra. Azonos állórész esetén szabályos elrendezésű, ferdített szabályos elrendezésű illetve a 7.4.ábra szerinti kitolt mágnesű geometriához tartozó cogging görbék.

A ripple határérték 0,105Nm. A ferdített forgórész esetén a lüktetés 0,35Nm, kitolt elrendezés esetén 0,097Nm. A ferdített mágnesű forgórész esetén a ripple határértéken túl van, nem teljesíti az előírást. A kitolt elrendezésű gép a 7.7.ábra szerint lokálisan telítődik, mert a ripple szint a 60-90A között jelentősen megugrik. További finom hangolással, a koszorú méret növelésével a ripple még tovább csökkenthető.

	cogging	ripple	középérték
előírás	0,0175	0,105	3,5
szabályos	0,0033	0,35	3,52
kitolt	0,0064	0,097	3,7

7.3.táblázat. Cogging-ripple előírt és elért értékek.

Ha szükséges, egyszerre több fognyomaték csökkentő módszer is alkalmazható. Bizonyos esetekben egyszerre alkalmaznak dummy slot-ot illetve forgórész mágnes pólus ferdítést, ha a specifikációt más módon nem tudják teljesíteni. Ilyen esetben kompromisszumként el kell fogadni a dummy slot alkalmazása miatt fellépő effektív légrés növekedést, illetve a pólus ferdítés hatását, együttesen jelentősen csökkentik a gépből kivehető nyomatékot. Ilyen esetben érdemes megvizsgálni a korábban bemutatott pólusszélesség optimalizáló módszert. A dummy slotoknak köszönhetően a horonyosztás távolság lényegesen finomabb, így a horonyszámból adódó pólusív méret finomabb léptékben változtatható.

Több forrás is foglalkozik a pólusív méret megfelelő választásán alapuló fognyomaték csökkentéssel [30-32, 34, 39]. Próbálgatásos módszerrel megkeresik a szerzők az optimális pólusív szélességet, a [42]-ben 13 verzió eredményét közlik, majd kiválasztják az optimális geometriát. A szerzők csak eredményeket közölnek, modellezési módszert nem.

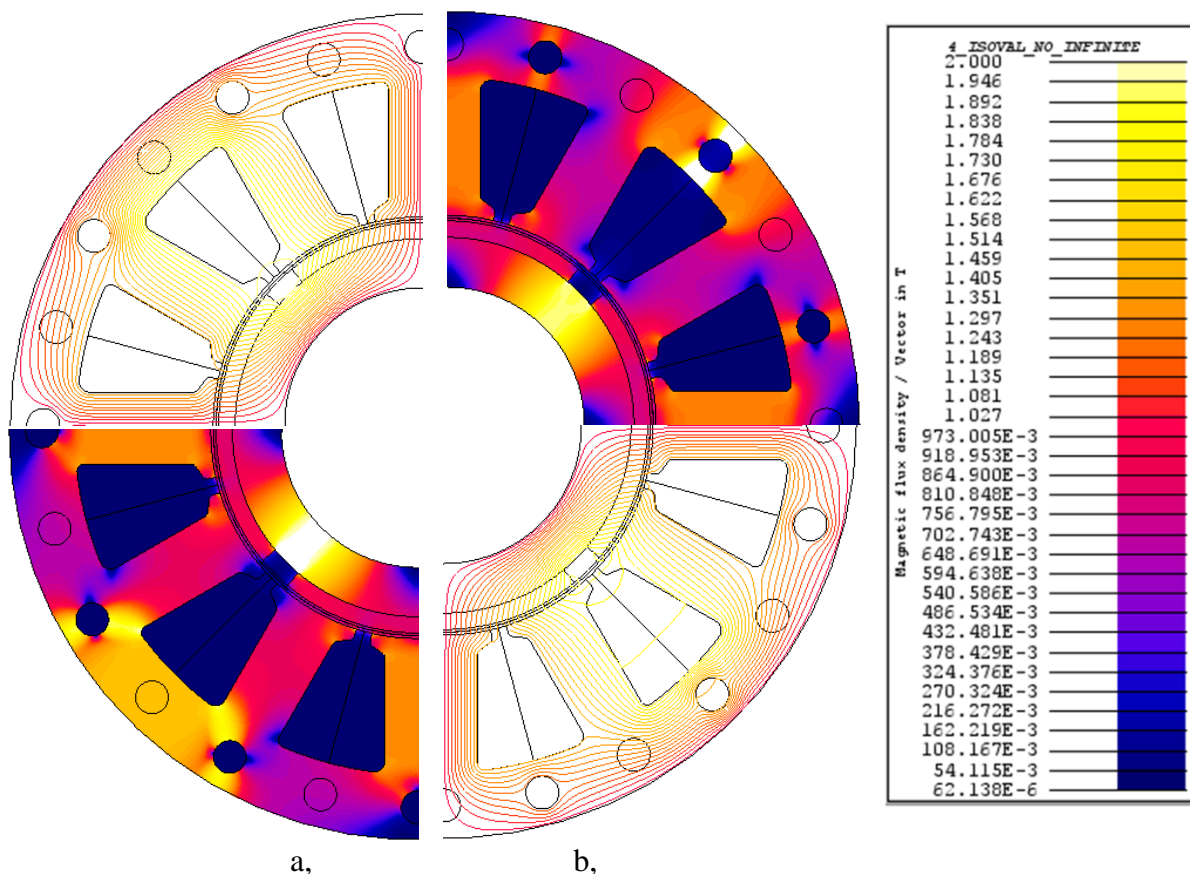
A mögöttes fizikai tartalmat nem ismertetik. A jelenség a hibrid módszer kiterjesztésével modellezhető, magyarázható.

Az egy horony előtt elhaladó mágnes pólusok egyedi fognyomaték görbéjével jól magyarázható, modellezhető a jelenség. A horonyszáj alá beforduló és a horonyszáj alól kiforduló mágnes pólus fognyomaték görbéje megegyező amplitúdójú, de ellentétes előjelű. Több forrás is ezt a hatást használja ki. Ideális esetben ez a feltétel pólusív horonyosztásnyi, illetve n *horonyosztásnyi ívszélességű mágnes esetén teljesül. A valóságban a szórás viszonyok, illetve a mágnesezettség miatt általában más pólusívhez tartozik a minimális fognyomaték érték.

Az optimális fognyomaték keresése így például elvégezhető próbálgatással, az optimálisnak sejtett méret közelében levő pólusív méretek változtatásával. Végeselemes szimulációval így több modell futtatásával idővel megtalálható az optimális pólusív. Ez a folyamat a hibrid módszer használatával jelentősen lerövidíthető. A végeselemes bemeneti függvény, az egy horonyszáj előtt elhaladó fognyomaték görbe esetén a szórások hatása a modell része. A pólusív változtatás fognyomaték szempontjából az egyedi fognyomaték görbe széthúzásával vagy összehúzásával modellezhető.

8. Lokális telítések alkalmazása (3.tézis)

Lokális telítés gyakran okozhat fognyomaték növekedést. Egyik ilyen tipikus eset például, ha az állórész lemez koszorú közepén furat található. A furat lehet összekötő csavar, vagy rögzítő szegecselés számára kialakított nyílás, esetleg hegesztési gyök számára kialakított horony. Az elhelyezése szempontjából az erővonalképet célszerű megvizsgálni. A fogból koszorúba átlépő erővonalak ívesen haladnak, a fog vonalában a fogtótól a koszorú felé az erővonalak sűrűsége csökken, a koszorú fogtóvel átellenes térrészére alig jut gerjesztés. Ha ide kerül a furat, a vas keresztmetszet változás arányában az itt fellépő fluxus sűrűsödés nem okoz telítést. A koszorú horonyfenék közelében lévő szakaszán teljes keresztmetszetben haladnak az erővonalak. Az ide kerülő furat jelentős keresztmetszet csökkenést, ezáltal jelentős lokális telítést eredményezne.



8.1.ábra. Lokális telítés hatása a, horony fogközép illetve fogtő furat esetén.

A 8.1.ábrán minden második kör levegő, illetve lemez anyaggal töltött állapotra vonatkozó végeleemes szimuláció erővonal, illetve színdiagram eredménye vizsgálható meg. A 8.1.a.ábrán a furatok a fogtőnél, a 8.1.b.ábrán a horonyközép pozícióban találhatóak. A

színdiagram esetén a sötétkéék a 0T, a fehér a 2T értéket jelzi. A horony közép pozícióba kerülő levegővel töltött rész által létrehozott lokális telítés hatása markánsan jelentkezik.

Hasonló jelenség lép fel a szegmentált állórész szegmensek közötti illeszkedési hézag hatására. A hézag a lokális telítéshez hasonlóan lokális mágneses ellenállás növekedést jelent.

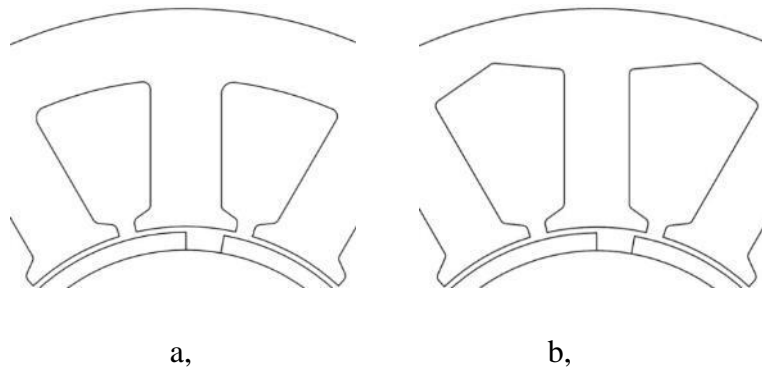
A fognyomaték a változó mágneses vezetőképesség hatására lép fel. A horonyszáj, illetve a koszorúban fellépő lokális telítés azonos periódusú, de eltérő fázishelyzetű fognyomaték komponens hoz létre [75]. A fázishelyzet különbség a forgórész mágnes pólusátmenetek relatív pozíciójától függ: horonyszáj esetén a horonyszáj előtti pólusváltás, a horonyfenék esetén a fogtest pólus váltása a mérvadó. Mágnes pólusátmenet szempontjából így a horonyszáj, illetve a fogtest közép előtti pólusváltás hatásaként jelentkező fognyomaték komponensek eredőjeként áll össze a gép fognyomatéka. A két komponens közti fázistolás fél periódusnyi, azaz ellenfázisban lépnek fel. Az egyes komponensek fognyomaték görbéje különböző, így részleges kioltás valósítható meg a komponensek megfelelő hangolásával.

A koszorú megfelelően, céltudatosan tervezett telítésével, azaz keresztmetszet csökkentésével horonyterület növelés érhető el. Az állórész lemezalak tervezése során célszerű olyan geometriát kialakítani, hogy a vasvesztés és a rézvesztés együtt legyen optimális. Ebben az esetben a horonyterület növelésével az ohmos veszteség is csökkenthető a fognyomaték csökkentésével együtt.

A horonyfenéket nem körívesen alakítottam ki, hanem az 8.2.ábra szerint, ezáltal számottevően növelhető a tekercselés számára rendelkezésre álló terület. Fogra tekercselés esetén különösen kedvező az új horonyalak.

A koszorú telítés fognyomaték csökkentő hatását egy elterjedten használt, nagy fognyomatékú pólusszám-horonyszám kombinációjú gép példáján vizsgáltam meg.

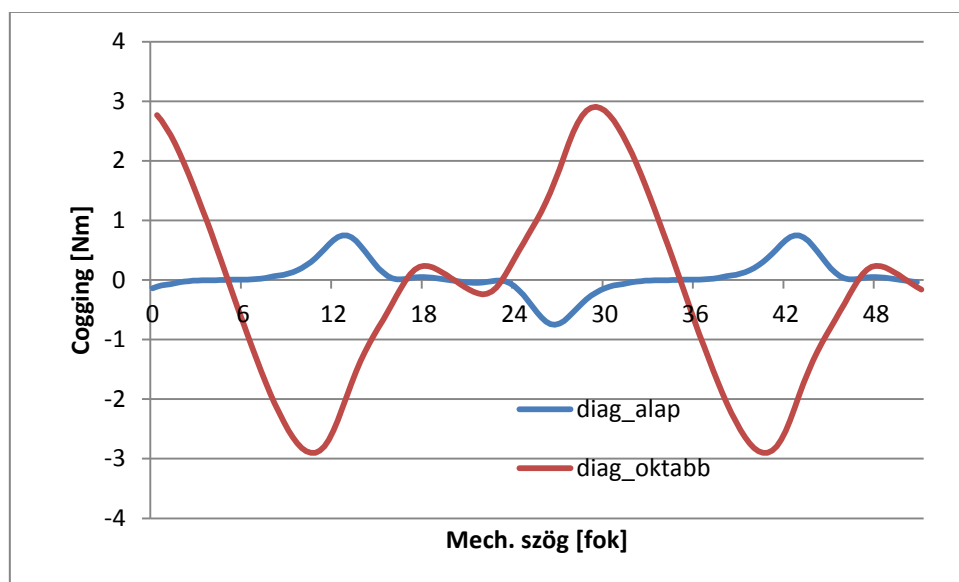
A motor paraméterek: $2p = 4$, $Z = 12$, külső átmérő $D_k = 150mm$, a lemezcsomag hossz $l = 100mm$, névleges nyomaték $M = 9,4Nm$. Az alap (8.2.ábra), illetve jelentős telítést okozó okta horonyalak (8.2.b.ábra) esetén fellépő fognyomaték görbe a 8.3.árán látható.



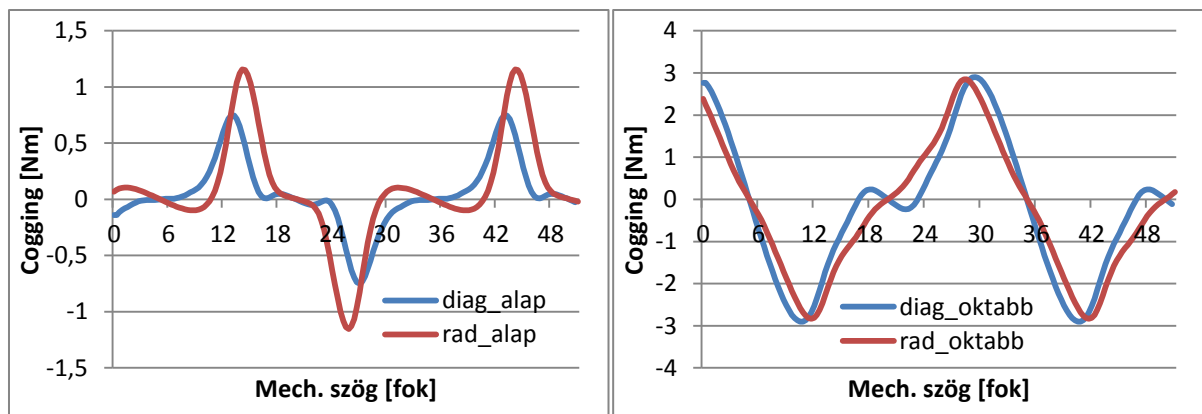
8.2.ábra. a, alap b, oktabb horonyalak

Megvizsgáltam radiális, illetve diagonális mágnesezettségű mágnesek esetén a viselkedést. A $2p=4$ pólusú gép esetén a mágnesezettség hatása jelentős szerephez jut. A széles mágnes pólusívnek köszönhetően a mágnesből kilépő erővonalak légrés középvonala viszonyított merőleges vetülete a pólusok szélei felé közeledve a diagonális mágnesek esetén jelentősen csökken.

A vizsgálatot végeelem módszerrel végeztem. A horonyfenék sarokpontnál fellépő lokális telítés hatása jól megfigyelhető a fognyomaték görbén. A szimuláció mindkét esetben azonos rotor pozícióból, azonos lépésközzel indult.



8.3.ábra. A 8.2.ábra szerinti horonyalakok esetén fellépő fognyomaték görbék.



a,

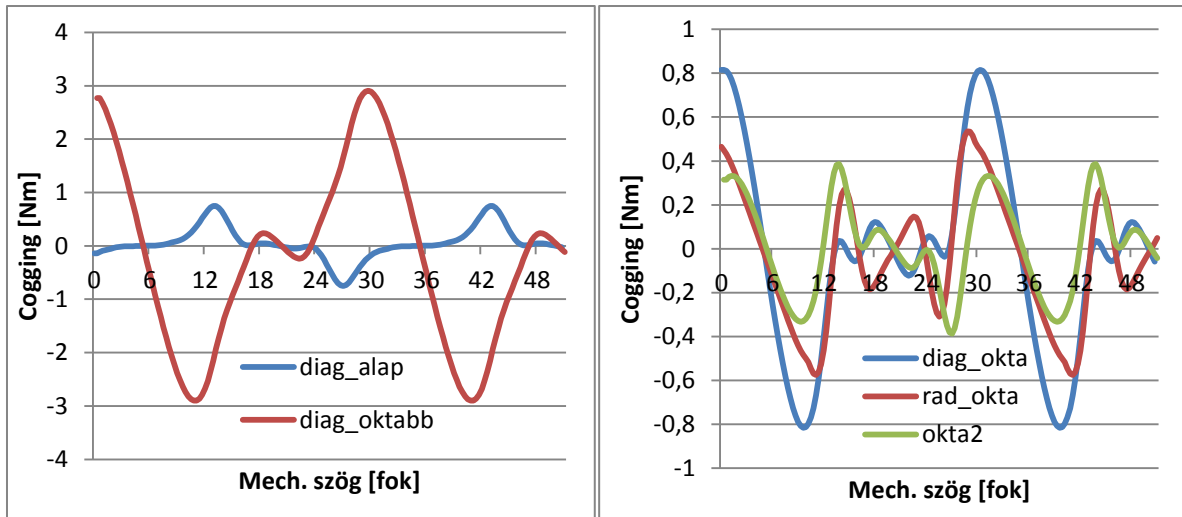
b,

8.4.ábra. Fognyomaték görbék radiális, diagonális mágnesezettségű mágnesek alkalmazása esetén.

A diagonális és radiális mágnesezettség hatására fellépő fognyomaték görbe markánsan eltérő. Diagonális mágnes esetén a légrésre merőleges sugárirányú indukció komponens a pólusív szélei felé haladva csökken. A pólusátmenet a szomszédos mágnes pólusok között így lágyabb, a változás meredeksége kisebb. Ennek köszönhetően a fognyomaték görbe diagonális esetben szélesebb, kisebb meredekségű a 8.4.a ábrán, amely a rádiuszos horonyfenekes modell vizsgálatából látható. A horonyközép környezetében lokálisan elteltett koszorú hatására létrejövő fognyomaték komponens jelformája a radiális-diagonális mágnesű forgórész variánsok esetén némileg eltér, de lényegesen kisebb a különbség, mint a horonyszáj hatására létrejövő komponens esetén.

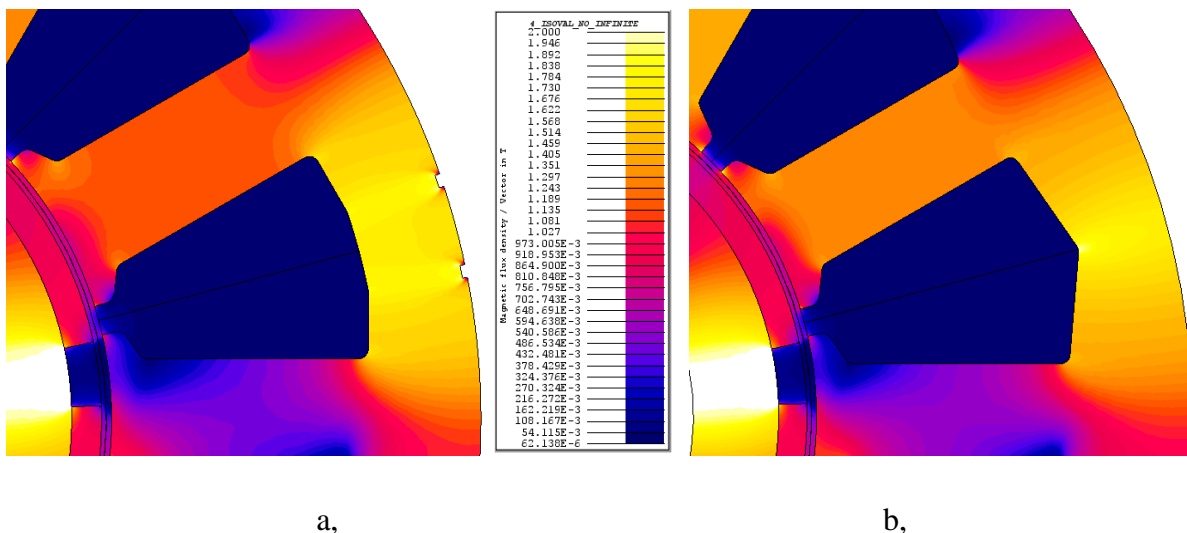
A két komponens egymáshoz képesti fázishelyzete a 8.4.ábrán figyelhető meg. A görbék részleges kioltása kihasználható, de a diagonális és radiális mágnesű forgórész variánsok esetén a fognyomaték minimumhoz eltérő horonyalak szükséges. Diagonális mágnesű rotor esetén a horonyszáj hatására képződő fognyomaték komponens lényegesen kisebb amplitúdójú, így a kompenzáló hatás érdekében elegendő kisebb lokális telítést létrehozni a koszorúban.

Radiális mágnesű forgórész esetén az okta nevű modell esetén értem el a minimális eredő fognyomatékot. Diagonális mágnesű rotor variánssal ugyanerre a lemezalakra nagyobb fognyomaték amplitúdó adódott, mivel a koszorú telítésből adódó komponens értéke ebben az esetben nagyobb, mint amekkora a kioltáshoz szükséges. A koszorú telítést kis mértékben csökkentve kaptam az okta2 modellt.



8.5.ábra. Kiindulási és optimális fognyomaték görbék.

A diagonális mágnesek gyártása egyszerűbb, így könnyebben beszerezhetőek. Az okta illetve okta2 horonyalak kis mértékben eltérő. Okta2 esetén kis tartományban lép fel magasabb értékű telítés, míg okta7 esetén nagyobb területrészen lép fel kisebb mértékű. Okta2 esetén a horonyterület növelés nagyobb arányú, illetve a fognyomaték görbe is kedvezőbb, így ez a modell előnyösebb. Az eredő fognyomaték görbe a módosított horonyalaknak köszönhetően 1,49Nm-ről 0,77Nm-re csökkenthető, míg a horonyterület 28,5%-al növekedett.



8.6.ábra. a, okta, b, okta2 lemezalak színdiagram.

Azonos áramú táplálás esetén megvizsgáltam, hogyan befolyásolja a gép fluxusát a koszorúban létrehozott lokális telítés.

A vizsgált gépek fognyomaték csúcserkéi a 8.1. táblázatban szerepelnek. A lokális, kis térrészt érintő telítés kis vastömeget jelent, így a gép vasvesztése nem nő számottevően. A tekercselés számára megnövekedett térrész kisebb fázisellenállást eredményez.

	alap		okta		okta2
	radiális	diagonális	radiális	diagonális	diagonális
mágnesezettség					
Horonyterület [mm ²]	34,4		38		44,2
cogg pp [Nm]	2,31	1,49	1,11	1,63	0,77
Bpeak [T]	1,285	1,42	1,817	1,75	2
Nyomaték [Nm]	20,98		20,22 (96,4%)		20,43 (97,4%)
horonyterület növelés			10,50%		28,50%

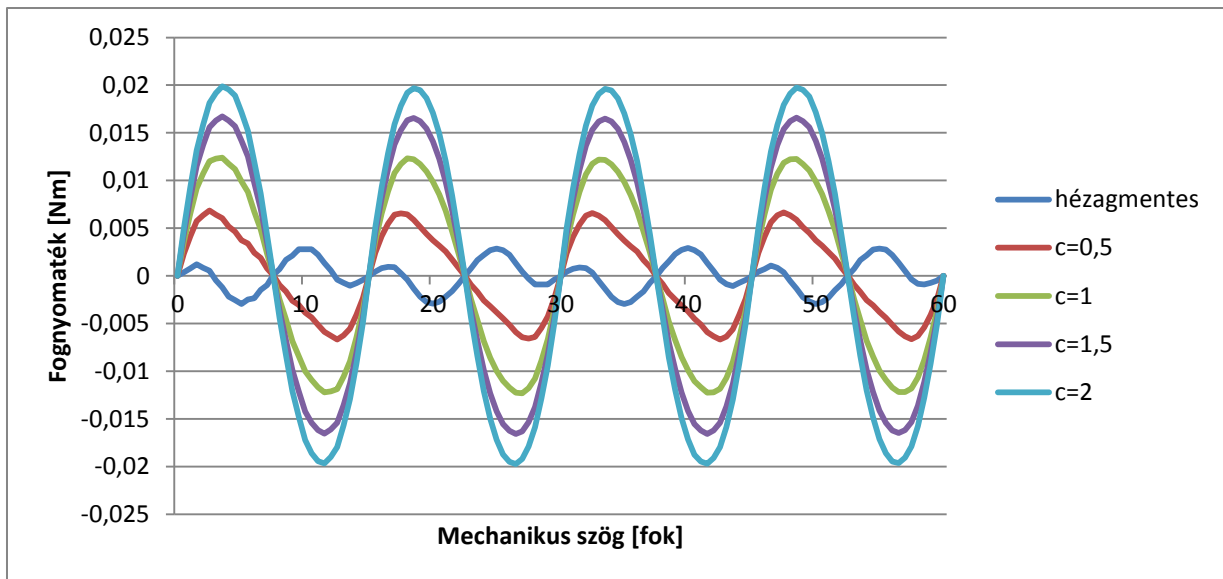
8.1.táblázat. A vizsgált gépek összevetése fognyomatékuk alapján.

Az okta2 nevű modell esetén a fognyomaték az 51%-ára csökken, míg a gép nyomatéka csak kis mértékben, 2,6%-al csökken, mindemellett a horonyterület 28,5%-al nő, így a hatásfok is jelentősen javul.

8.1. Szegmentált állórész

A koszorúban mágneses ellenállás változás más módon is felléphet. A szegmentált állórészű gépek esetén az egyes szegmensek közötti hézag, azaz légrés is hasonló módon befolyásolja a fognyomatékot. Z=12 hornyos, 2p=8 pólusú gép esetén megvizsgáltam a szegmensek közti hézag hatását. A hézag mentes állapot, illetve a c*0,1mm-es illesztési hézag esetei láthatóak a 8.7.ábrán.

A horony közepén fellépő mágneses ellenállás növekedés hatására a horony közepén létrehozott telítéshez hasonlóan képez egy fognyomaték komponenset. Az illesztési hézag minden horony közepén jelen van, így a horonyszáj által keltett fognyomatékkal egyező periódusú, de tőle eltérő fázishelyzetű fognyomaték keletkezik az illesztési hézagok által létrehozott mágneses ellenállás növekedés hatására.



8.7.ábra. Szegmentált állórész szegmensek közti illesztési hézag fognyomatékra gyakorolt hatása.

A fognyomaték görbe amplitúdóját nagy mértékben meghatározza a horonyszáj méret. Ha a gyártástechnológiából adódó, gyártásba vihető illesztési hézag várható tartománya ismert, meghatározható szimulációval a várható fognyomaték. Ha ez az érték túl nagyra adódna, a horonyszáj mérettel, illetve a horonyszáj által keltett fognyomaték komponenssel sok esetben kompenzálható az illesztési hézagból adódó fognyomaték a különböző komponensek fognyomaték görbéi közti fázistolásból, azaz a részleges kiejtésből adódóan.

9. Forgórész típusok összehasonlítása (4.tézis)

Egy villamos hajtás sokféle motorral kielégíthető, de az optimális motor kialakítása, tervezése összetett feladat. A tervezés korai fázisában a hajtási feladatot értelmezni kell, majd megalkotni a követelményeket, illetve ezek prioritási sorrendjét, melyek ismeretében az optimális motor kialakítás megtervezhető.

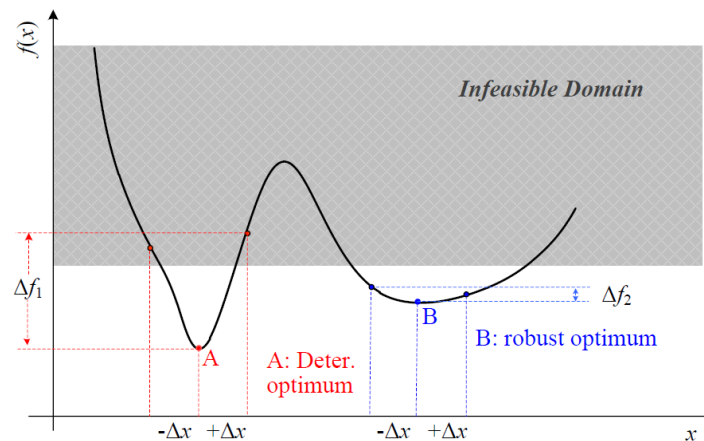
Az alapvető szempontok: beépítési méret, védettségi fok, környezeti hőmérséklet, fordulatszám-nyomaték jelleggörbe, üzemeltetési mód: szakaszos vagy állandó üzem, hűtési mód, tápforrás feszültsége. A fenti szempontok meghatároznak bizonyos egyéb követelményeket, pl mezőgyengítésre lesz-e szükség vagy nem, illetve a követelmények között szerepelhetnek speciális előírások, mint például limitált nyomaték hullámosság.

A motor optimalizálása során bizonyos paraméterek finomhangolása történik, ami lehet például horonyalak vagy mágnes pólusív forma módosítás, valamilyen fognyomaték csökkentő módszer alkalmazása, de ha esetleg ezek a módosítások nem elegendőek és ha például pólusszám-horonyszám módosítás válik szükségessé, az gyakorlatilag a tervezés újratezdését jelenti. Több optimalizációs módszer ismert [69-70], a multidiszciplináris optimalizáció célja globális optimum megtalálása:

$$\begin{aligned} \min: & \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_p(x)\} \\ \text{s. t. } & g_j(x) \leq 0, j = 1, 2, \dots, m \\ & x_l \leq x \leq x_u \end{aligned} \tag{9.1}$$

ahol x , f , g a tervezési paraméter vektor, szempontok, alsó x_l illetve felső x_u , felső határ a változókhöz. Szempont lehet például a nyomaték vagy hatásfok maximalizálás, vagy méret, súly minimalizálás. Változó lehet például a tápforrás feszültsége, vagy a maximális hőlépcső. Optimalizációs paraméter lehet anyagi minőség, horonyalak vagy egyéb méret, menetszám, stb. A 9.1.ábrán látható a determinisztikus (A pont) és robusztus optimum (B pont) közti különbség: a determinisztikus optimum egy globális optimum, amely érzékeny a paraméterek változására.

A tervezés elősegítéséhez az Altair cég több megoldási lehetőséget kíván. Az előkalkulációkhoz rendkívül jól használható a *Fluxmotor*: a geometria egy egyszerűen használható varázslóval megadható, majd eredményül szolgáltat fordulatszám-nyomaték jelleggörbét, hatásfok-veszteség térképet, stb. Egy variáns futtatása pár percet igényel. A további vizsgálathoz exportálható a modell *Flux*-ba. A *Got-it* pedig a paraméterezett végeelem modell futtatására alkalmas. A szoftveres háttér ugyanakkor nem biztosítja egyértelműen a sikert: rosszul megválasztott paraméterek, vagy változó határértékek esetén az eredményként kapott optimum nem globális optimum lesz.



9.1.ábra. Multidiszciplináris és robusztus optimum.

A továbbiakban megvizsgálom több tervezési szempontot, illetve azok lehetőségeit, hatását, korlátait, előnyös-hátrányos tulajdonságait. Az eredmények ismerete segíti a megfelelő kiindulási koncepció kiválasztását, illetve rámutat az egyes koncepciók korlátaira [81].

9.1. Horonyszám választás, tekerceselési lehetőségek

Tekercselés szempontjából a nagy áramú, kis feszültségű gépek esetén a fogratekerceselés előnyös (2.1.fejezet).

A gép viselkedése szempontjából sok esetben kedvező, ha van mechanikus szimmetria a geometriában, ennek köszönhetően a kiegyenlítettlen mágneses húzóerő kisebb mértékben lép fel. A túl nagyfokú szimmetria a nyomaték hullámosság szempontjából káros. 10p12h esetén a közös osztó 2, így egy szimmetria tengelye van. A 6p9h gép esetén a közös

osztó 3, azaz a geometria 120° –onként ismétlődik. A nagyobb fokú szimmetriából adódóan a mágnes-horony relatív helyzetek is szimmetrikusan ismétlődnek, azaz a szimmetriának megfelelően több mágnes esetén fog a mágnesenkénti fognyomaték görbe fázishelyesen összegződni. Fognyomaték szempontjából a relatív prím pólusszám-horonyszám a kedvező, excentricitás érzéketlenség szempontjából a szimmetriát tartalmazó geometria.

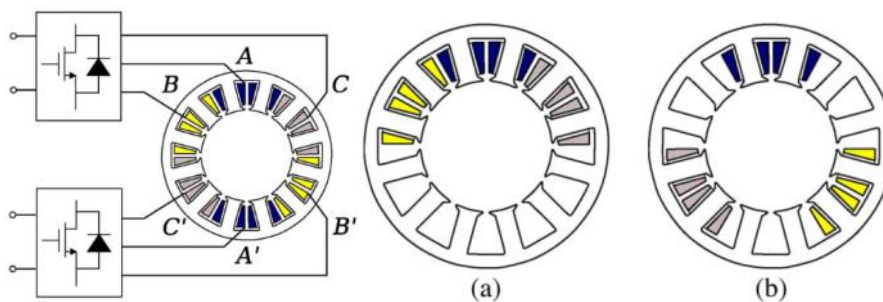
A 12 és 9 hornyos állórészre szűkítettem a kört. A tekercselési rendszer a 9.2.ábrán szerepel. A 10p9h esetén az egyes fázisokhoz tartozó fogak 3-3 egymás melletti fogon foglalnak helyet, nincs szükség köztük átkötésekre, ha a tekercsek sorba kötve üzemelnek. A 10p12h esetén 2 szomszédos fog, illetve a velük szemközti 2 fog tartozik 1-1 fázishoz. A 10p12h esetén a fázisonkénti 2 tekercspár sorosan, párhuzamosan is köthető, nagyobb a tervezői szabadság. A tekercsek párhuzamos-soros kapcsolhatósága fontos szempont lehet alacsony menetszámú, nagy áramú motorok esetén. Tűs tekercselés esetén a párhuzamos szálak, vagy a túl vastag huzal betekercselése nehézséget okoz. A 12 hornyos állórész tekercselése felbontható kettő szimmetrikus tekercselésre, így alkalmas redundáns, 2*3 fázisú tekercselés kialakítására is.

Coil No.	Coil Angle, °E	Phase A		Phase B		Phase C	
		In	Out	In	Out	In	Out
1	0	1	2	4	5	7	8
2	-20	1	9	4	3	7	6
3	20	3	2	6	5	9	8
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							

Coil No.	Coil Angle, °E	Phase A		Phase B		Phase C	
		In	Out	In	Out	In	Out
1	0	1	2	5	6	9	10
2	-30	3	2	7	6	11	10
3	0	8	7	12	11	4	3
4	-30	8	9	12	1	4	5
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							

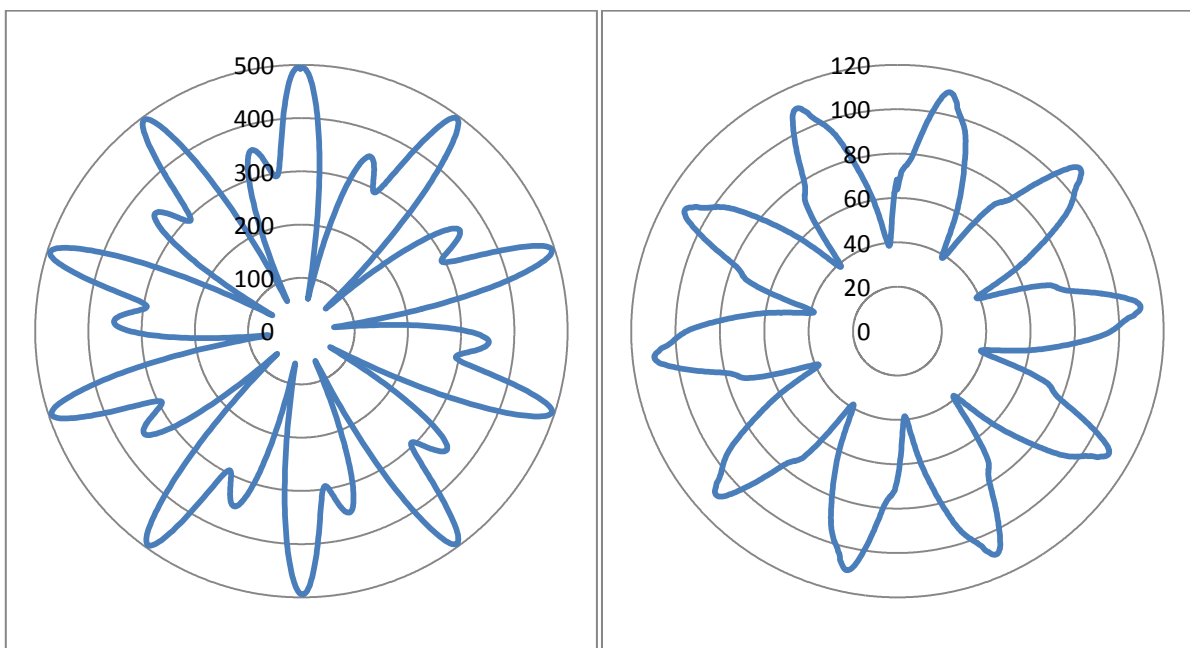
9.2.ábra. Tekercselési táblázat 10p9h illetve 10p12h gép esetén.

A 10p9h motor esetén is kialakítható redundáns tekercselés, de csak 3 tekercs csoport létrehozásával, azaz 3x3 fázisú motor kialakítására ad lehetőséget.



9.3.ábra. 10p12h esetén redundáns táplálási lehetőségek [57].

A 10p12h esetén a tekercselés több módon is kialakítható. Egy fázishoz 4 tekercs tartozik, 2-2 egymás melletti fogra tekercselve. A tekercselés felbontható kétféleképpen a 9.3.ábra szerint: a, 180 fokos szimmetria tengely mentén, a szomszédos fogakon levő, azonos fogak soros kapcsolása esetén, vagy az egymáshoz képest 120 fokra levő tekercs párok azonos inverterről történő táplálása esetén. Az (a) verzió egyszerűbb motor elköttést eredményez, de ha az egyik inverter kiesik, a motor táplálása során kiegyenlítetlen mágneses húzóerő lép fel. A motor 180°-os mechanikus szimmetriájának köszönhetően a két inverter fázisban azonos rotor pozícióval üzemel, az A és A' fázisok fázisban vannak. A (b) esetben a motor elköttése bonyolultabb, de lényegesen kisebb mágneses húzóerő lép fel.

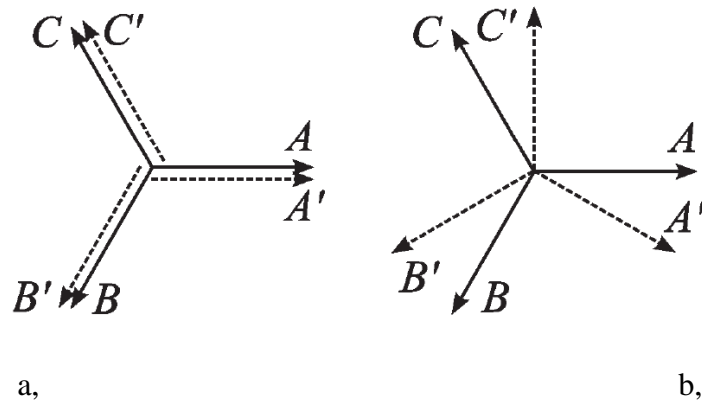


a,

b,

9.4.ábra. a, 9.3a, b, 9.3b szerinti elrendezés és egy inverteres táplálás esetén fellépő mágneses húzóerő eloszlás egy mechanikus rotor fordulat esetén.

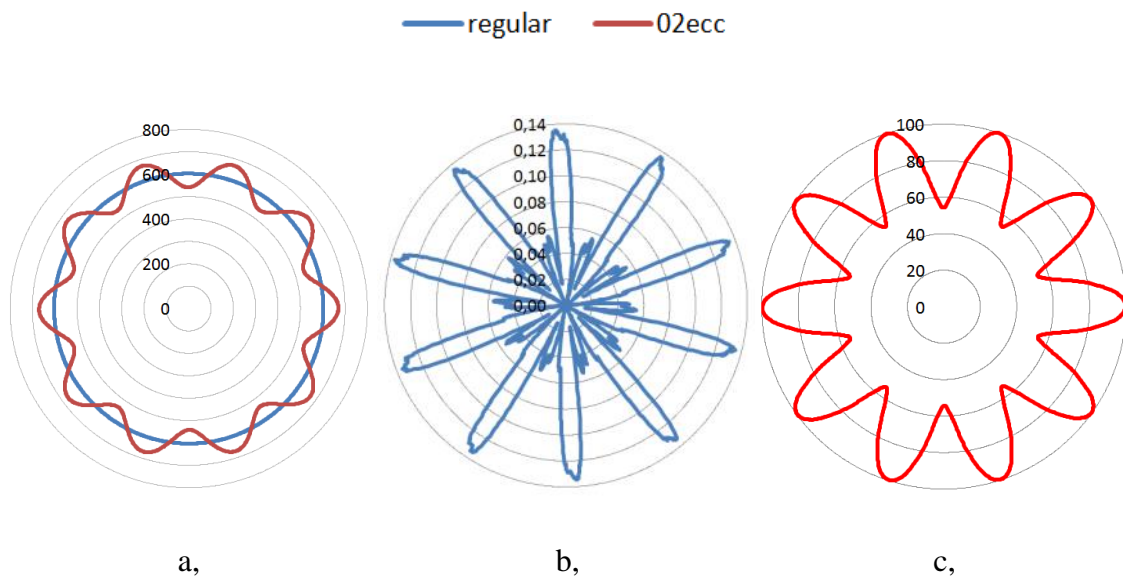
A tekercselési táblázat szerint az azonos fázishoz tartozó, szomszédos fogakra kerülő tekercsek között villamosan 30° fáziskülönbség van. Ezek a tekercsek így csak sorba köthetők egymással, vagy páronként, az azonos fázishelyzetűek köthetők párhuzamosan. Így a 9.3.a esetben a két inverteren azonos motorvezérlés futhat, a 9.3.b esetén fázisban eltolt vezérlés szükséges.



9.5.ábra. a, 9.3.a, b, 9.3.b elrendezés szerinti fázistekercsek közti fáziseltolás [57].

9.2. Mágneses forrású húzóerő vizsgálata

A mechanikai oldalról célszerű megvizsgálni a forgórészre, csapágyazásra ható mágneses forrású erőhatásokat (9.6.ábra). A 12 hornyos gép esetén a forgórész-állórész tetszőleges pozíciójában igaz, hogy pl. az x tengelyre nézve szimmetrikus a geometria. A 9 hornyos gép esetén nincs mechanikus szimmetria tengely, pl. x tengelyre nézve más lesz az egyik forgórész fél elhelyezkedése a hornyok-fogak viszonyában, mint a másikra.



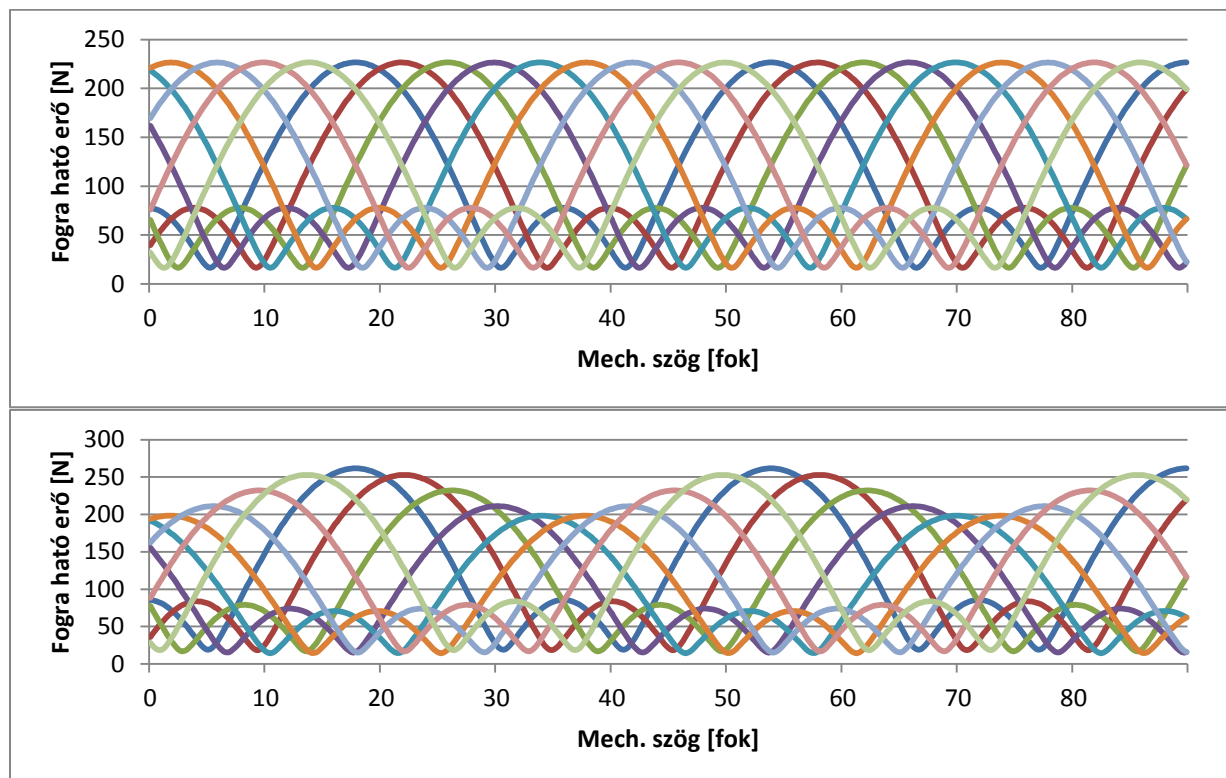
9.6.ábra. a, 10p9h motor hiba mentes és excentrikus, b, 10p12h hiba mentes, c, 10p12h excentrikus forgórész helyzet esetén forgórészre ható kiegyenlített mágneses húzóerő görbe egy mechanikus rotor fordulat esetén.

A mágneskörök különbsége miatt így a kiegyenlítettlen mágneses húzóerő is eltérő lesz. Azonos forgórészsel, azonos horonyszájú 9 és 12 hornyos gépre végeसेlemes szimulációval meghatároztam a fogankénti húzóerőt a rotor 360°-os leforgatásával.

Eredményül kaptam rotor pozícióként az egyes fogakra ható mágneses húzóerőt, amit x-y komponensként tudtam exportálni a végeसेlemes szoftverből. A rotorra ható mágneses húzóerő meghatározható a fogankénti húzóerők összegzéséből. A számított erők x, y komponensként előjelesen összegezhetőek azonos rotorpozíció esetére.

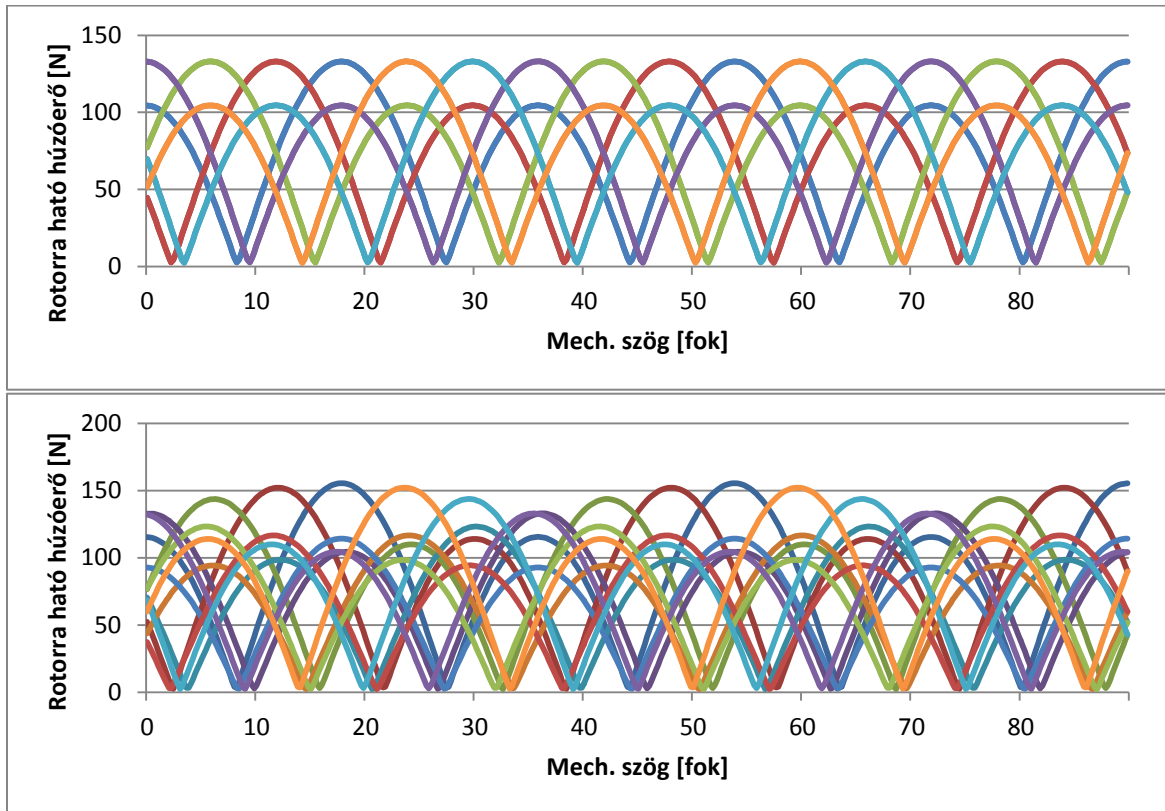
A szimulációt elvégeztem 0,2mm-es légrésexcentricitás esetén is. A 10p9h esetén hibamentes esetben is nagy az eredő húzóerő, 602N, de rotor pozíciótól független. A 10p12h esetén a hibamentes esetben a húzóerő pólusszám rendszámmal jelentkezik egy mechanikus rotor fordulat esetén, de az amplitúdó lényegesen kisebb, 0,014N. Excentrikus esetben a csúcsérték 99,81Nm.

10p9h gép esetén a fogankénti húzóerő szimmetrikus és excentrikus esetre a 9.7.ábra szerint alakul, az egyes fogakhoz tartozó húzóerő különböző színnel szerepel:



9.7.ábra. Az egyes állórész fogakra ható húzóerő 10p9h motor esetén, felül hiba mentes, alul 0,2mm statikus excentrikus esetben.

Szimmetrikus esetben a fogakra ható erő görbék szimmetrikusak, míg excentrikus esetben a fogaknál levő változó légrés miatt változik a fogankénti húzóerő görbe amplitúdója. A légrés növekedésével csökken a húzóerő. A húzóerő csúcsérték foganként 226N, excentrikus esetben 261..198N között változik.



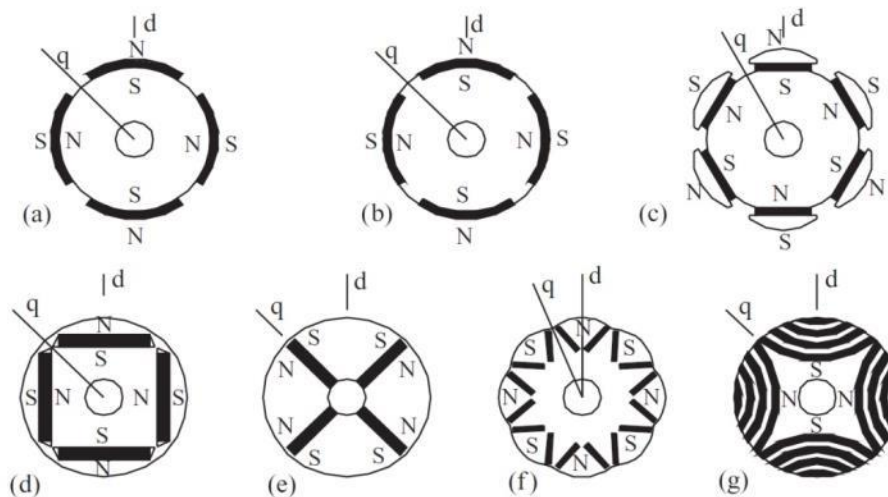
9.8.ábra. Az egyes állórész fogakra ható húzóerő 10p12h motor esetén, felül hibamentes, alul 0,2mm statikus excentrikus esetben.

A 12 hornyos állórész esetén a fogakra ható húzóerő eredője kisebb. A fogankénti eredő húzóerő csúcsérték 131N, az excentrikus esetben 155..132N között változik. A fogankénti erő görbék eredője a 9.7.ábrán látható.

Az eredő húzóerő görbe a fogankénti görbék fázishelyes összegződése szerint alakul ki. A 10p12h motor esetén a húzóerő hibamentes esetben lényegében elhanyagolható, mivel a fogankénti húzóerők egymással fázisban vannak az állórész pl vízszintes szimmetria tengelye szerint, de ellentétes irányúak, kiejtik egymást, mivel a forgórész és állórész is rendelkezik 180fokos szimmetria tengellyel. Az excentrikus esetben ez a szimmetria a fogankénti eltérő légrés méret miatt felbomlik, az eredő húzóerő görbe az egymással szemben álló fogakra ható erők közti különbség szerint alakul.

A 10p12h esetén a csapágyerő excentrikus esetben is lényegesen kisebb, a csapágyak méretezésénél figyelembe kell venni. A mágneses húzásból származó erő rezgés és zaj szempontból is fontos tényező.

9.3. Forgórész típusok



9.9.ábra. Állandó mágneses rotor variánsok.

A 9.9.ábrán szerepelnek a gyakrabban alkalmazott forgórész variánsok, melyek közül az (a) héjmágneses (spm), (b) besüllyesztett héjmágneses (spm_bes), (d) tangenciális elrendezésű belső mágnesű (tang), (e) küllős belső mágnesű (küllös), (f) v elrendezésű belső mágnesű forgórészű modelleket vizsgáltam. Olyan forgórész kialakításokat választottam, amelyeknek egyszerűbb a geometriája. A 9.9. (c) és (g) verziókat nem vizsgáltam. A (c) esetben a mágnes elválasztja a forgórész hengert és a pólusív felett levő íves pólussarut, röperők szempontjából instabil a kialakítás, illetve a pólussaruk megfelelő pozícionálása is kérdéses, további problémát jelent a pólussaruk telítése. A (g) esetben az íves kialakítású hornyokba kell íves kialakítású mágneseket helyezni: a pontos illesztések miatt szerintem nehezen gyártható.

A végeelemes szimulációk azonos légrés méretű, azonos vastest hosszúságú geometriára lettek elvégezve. A vastest geometria és hossz, tekercselés, tápfeszültség és maximális fázisáram a különböző variánsok esetén azonos. A lemezcsomag hossz 62mm, az állórész külső átmérő 86mm mindegyik variáns esetén. Az állórész furat, légrés, menetszám, tekercselési rendszer mindegyik modell esetén azonos [72,81]

Általában szervomotorok esetén a névleges nyomaték 0,5%-a elfogadott maximális cogging (csúcstól csúcsig) érték. 10Nm névleges nyomaték esetén ez 0,05Nm értéket jelent. A motor tervezése során figyelni kell, hogy a hibamentes eset cogging értéke ennél kisebb legyen, ugyanis a tartományon kívüli motorok már selejtnek számítanak. A gyártási szórások hatásának is tartalékot kell biztosítani. A vizsgált gépek indukcióeloszlása a 9.10. ábrán látható.

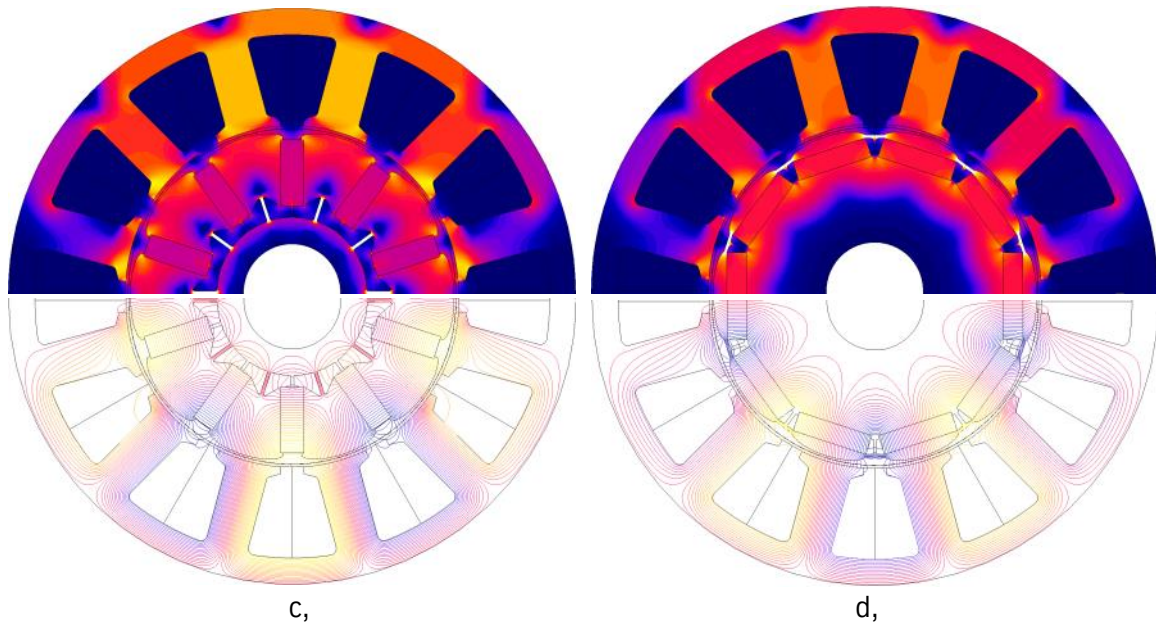
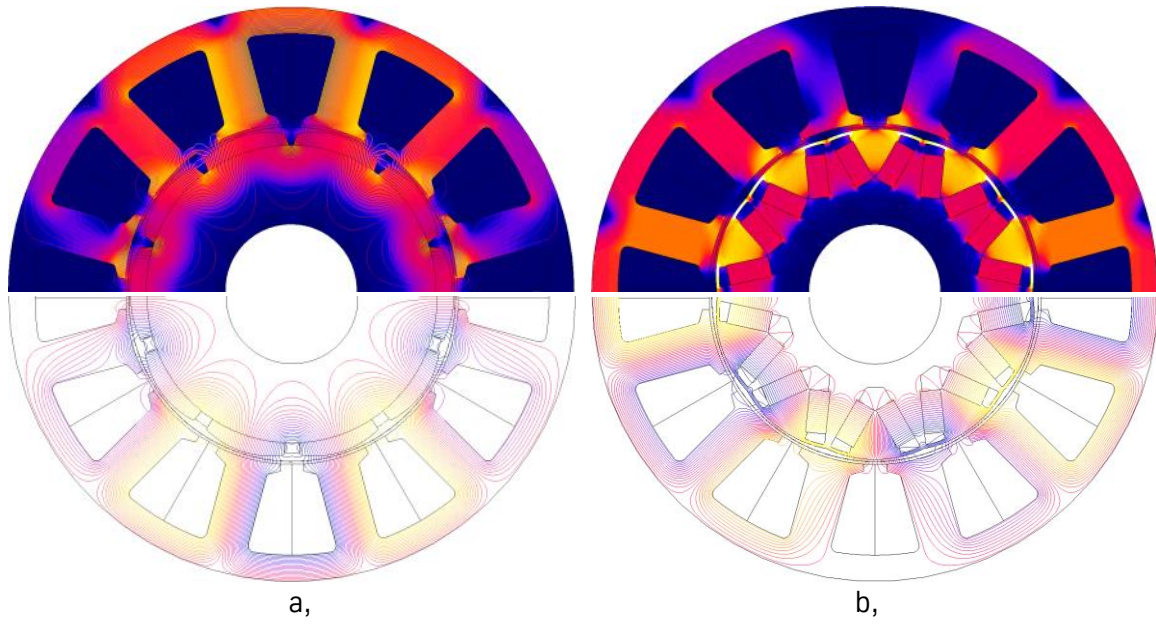
A mágnes pólusívék optimális méretének meghatározásához felhasználtam az 1. tézisben ismertetett hibrid módszert.

Forgórész geometriától függően a vastest többféle módon készülhet. Alapvetően a mágneses tér változása a vastestben kis mértékű, egy munkapont szűk tartományában mozog a hiszterézis görbén, átmágneseződés nem történik. Ezáltal a forgórész vastest lemezelése nem szükséges, ha a geometria anélkül is gyártható.

Az spm forgórész vastest például gyártható tömör vastestből forgácsolással is. A bonyolultabb belső mágnesű rotor vastest esetén a szaggatásos technológia előnyösebb. Az állórész lemez is szaggatással készül, a furatként kieső lemez megfelelő szerszám esetén felhasználható forgórész lemez szaggatáshoz. Ezáltal a gyártás költséghatékonysága javítható.

A héjmágneses variánsok (spm, spm_bes) az összeszerelés során komolyabb figyelmet igényelnek, mivel az állórész furatba helyezéskor fennáll a mágnesek sérülésének a veszélye, ha a furat valamelyik oldalához csapódik. Emiatt, valamint a mágnes korrózió kizárása céljából szokásos eljárás alumínium vagy rozsdamentes acél védőhüvely alkalmazása. A belső mágnesű verziók (küllős, tang, v) ilyen szempontból sokkal védettebbek.

A rotor geometria tervezésekor célszerű megvizsgálni üzemi fordulatszám tartománytól függően, hogy a rotor komponensekre, mágnesekre mekkora röperő hat: szükséges-e bandázsolás, vagy mechanikus szempontok miatti áttervezés.



9.10.ábra. A vizsgált konstrukciók erővonal- és indukcióeloszlás képei:

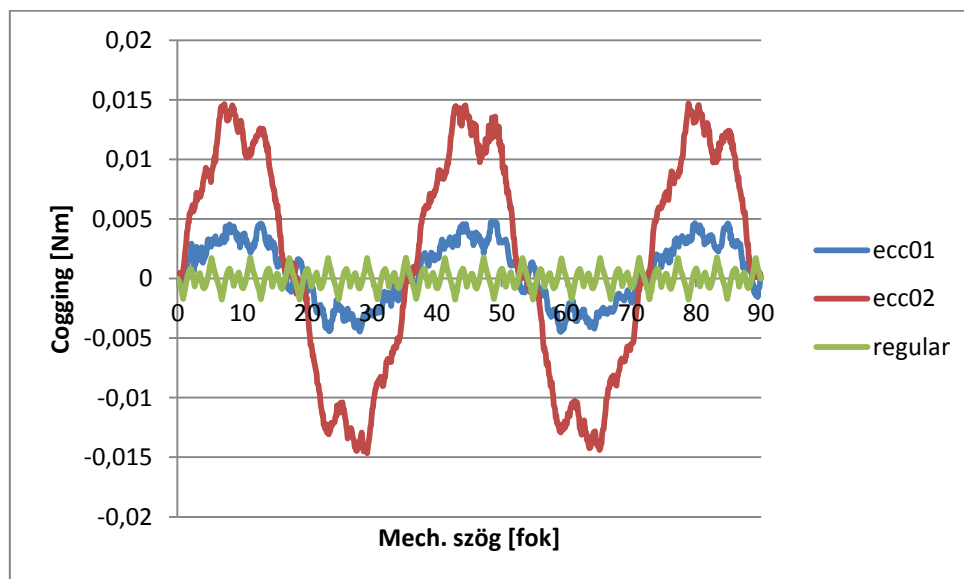
a,spm_bes b,v c,küllős d,tangenciális rotor kialakítás.

9.4. Héjmágneses rotor (spm)

A héjmágneses forgórészek esetén a vastest hengeres kialakítású. Porkohászati úton gyártott mágnesek esetén tetszőleges mágnes forma alakítható ki.

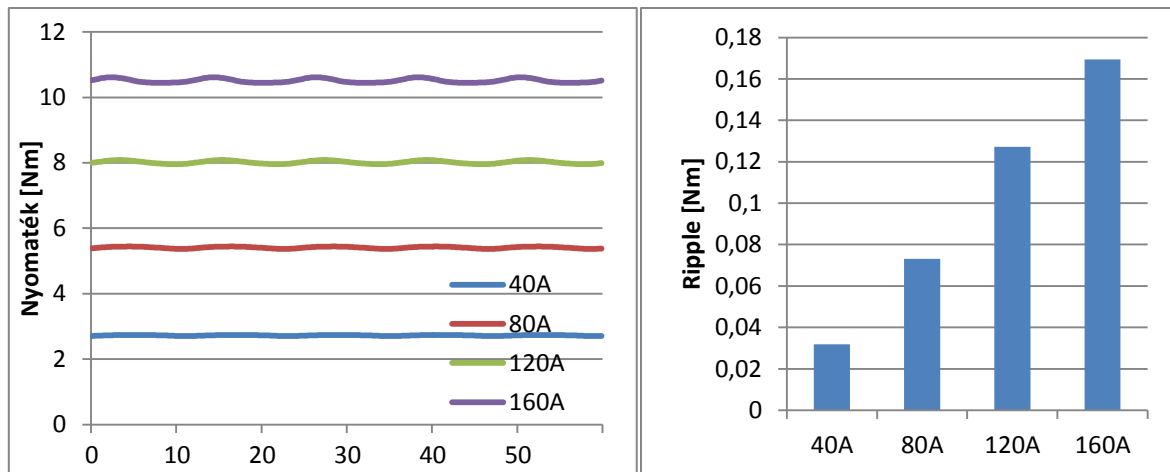
Ha a mágnes pólusok szöghelyzetét mechanikusan nem határozza meg semmi, mint például az spm variáns esetén, precíz ragasztó szerszámra van szükség, hogy a mágnesek az előírt pozícióba kerüljenek.

Megvizsgáltam a motor excentricitás érzékenységét is. A mechanikus légrés 0,75mm, regular, azaz hibátlan geometria, illetve 0,1 és 0,2mm excentricitással számítottam cogging görbét (9.11.ábra). Az excentricitás hatására megjelent a póluspár számnak megfelelő 10-es cogging harmonikus (36° periódussal).



9.11.ábra. Héjmágneses motor cogging görbéi.

A motor ripple vizsgálatát elvégeztem a névleges áram 25, 50, 75, 100%-a esetén, azaz 40A, 80A, 120A, 160A csúcsertékű szinuszos áramgenerátoros táplálás esetén (9.12.ábra).

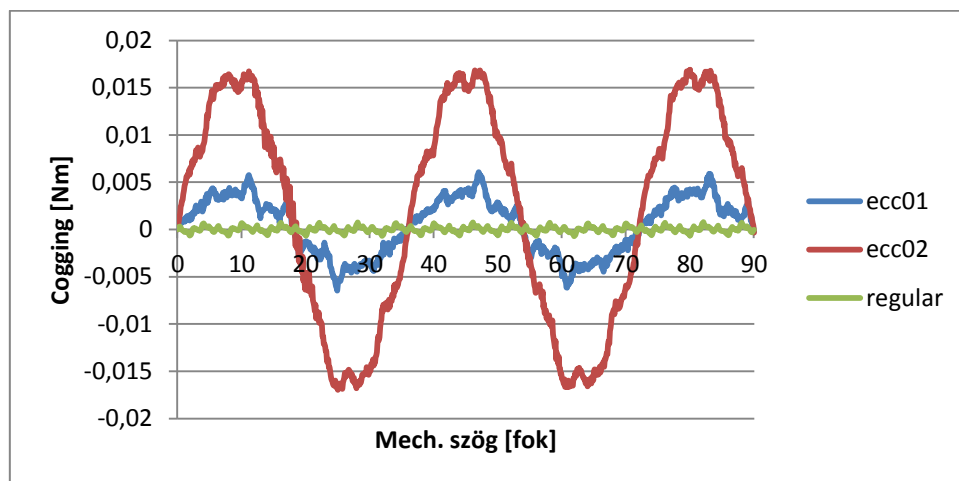


9.12.ábra. Héjmágneses motor ripple görbéi.

9.5. Besüllyesztett héjmágneses rotor (*spm_bes*)

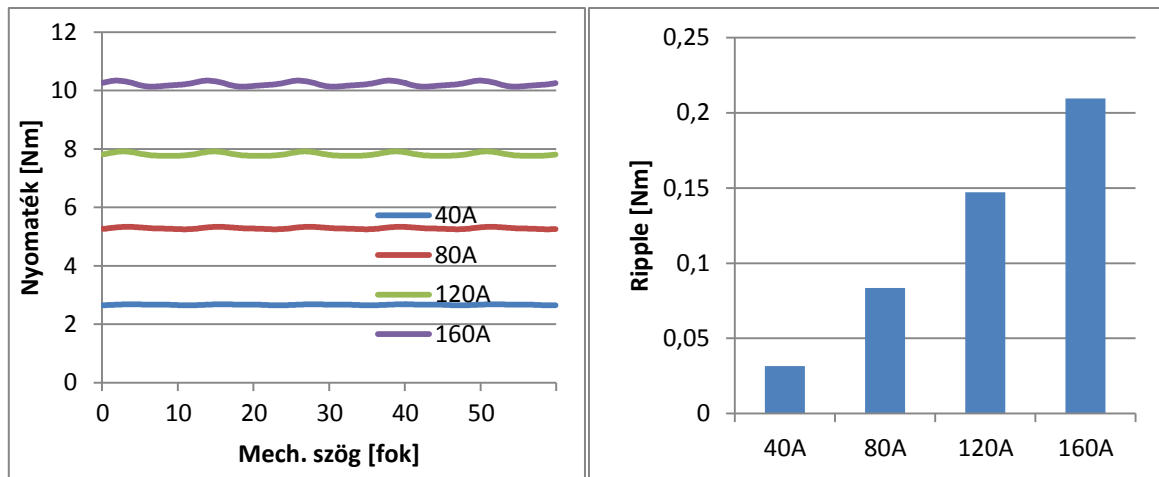
A forgórész geometria már valamivel bonyolultabb, viszont már mechanikusan pozicionálja a rotor lemez geometria a mágneseket. A rotor lemez kialakítás szaggatással készül, így a mágnesek közti lemez-híd mérete szűk tűrési tartományban tartható.

A mágnes pólusív ebben az esetben is optimalizálva lett cogging-ripple szerint. A cogging görbék a 9.13, ripple görbék a 9.14.ábrán szerepelnek.



9.13.ábra. Besüllyesztett héjmágneses motor cogging görbéi.

A cogging számítást elvégeztem tökéletes geometria (regular) illetve excentrikus esetre. A ripple görbékét 40A, 80A, 120A, 160A csúcsértékű szinuszos áramgenerátoros táplálás esetén szimuláltam. A ripple az árammal monoton nő.



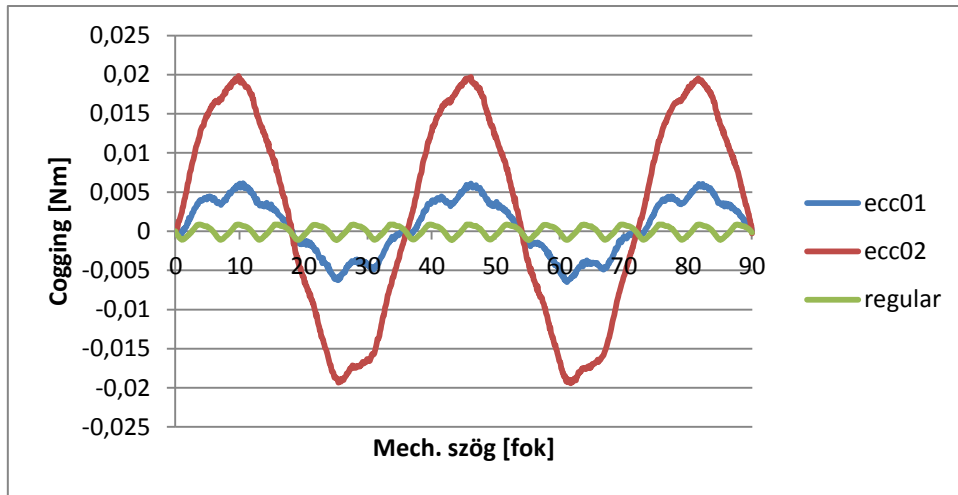
9.14.ábra. Besüllyesztett héjmágneses motor ripple görbéi.

9.6. Tangenciális mágneselezésű rotor (tang)

A mágnesek hasáb alakúak, így könnyen, pontosan gyárthatóak. A forgórész vastest geometria bonyolult, kivágó szerszámot igényel. A mágnesek a rotor lemezen belül helyezkednek el, így a lemezanyag körülveszi a mágneseket. A lemezalak kialakítása összetett feladat. Gondoskodni kell a mágnesek mechanikus pozícionálásáról, figyelve, hogy a mágnesek közti szórás minimális legyen.

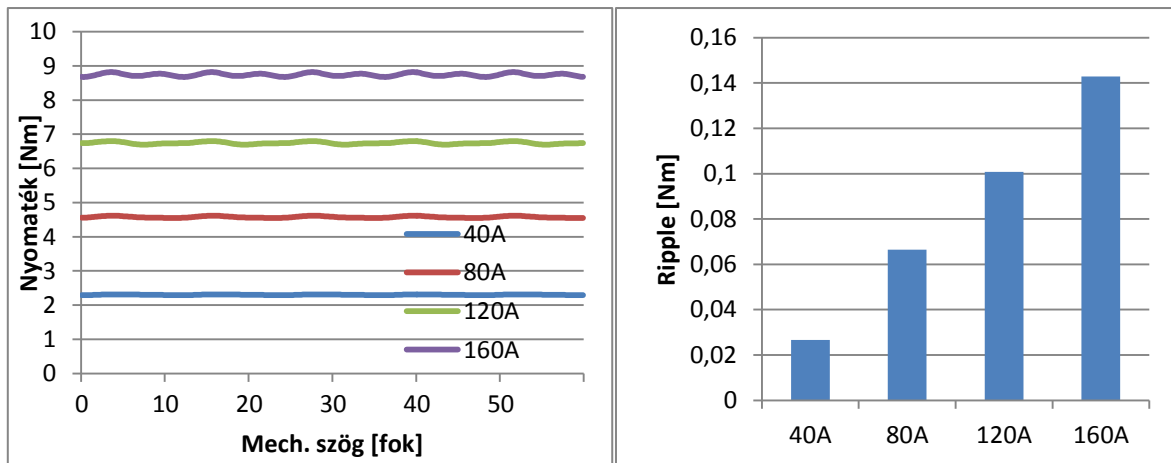
A pólusok közti szórás minimalizálása érdekében légrést, illetve vékony lemez hidakat kell kialakítani. A minimálisan kivágható, legvékonyabb szélességű lemez híd szélességet a lemezanyag vastagsága határozza meg (0,5 vagy 0,35mm-es lemez áll rendelkezésre, vastagabb lemezanyag a vasveszteség alacsony szinten tartása miatt nem ajánlott, illetve a kivágó szerszámot is jobban igénybe veszi). A röperő számítást követően, ha szükséges, a hídszélesség méretét növelni kell a mechanikai stabilitás érdekében a járulékos szórás növekedésének árán is.

A rotor geometria mechanikusan jól meghatározott. A mágnes hasábok általában nem sarkosak, hanem minimum 0,2-0,3mm rádiusszal lekerekítettek. A mágnesek megfelelő pozícionálása érdekében a lemez geometriát úgy célszerű kialakítani, hogy a hasáb oldalán mechanikusan megvezesse, pozícionálja a mágneseket, és ne a mágnes hasáb lekerekített sarka végezze a pozícionálást. Megfelelő kialakítás esetén a mágnes pozíció hiba kizárható, illetve szűk tartományban tartható.



9.15.ábra. Tangenciális elrendezésű motor cogging görbéi.

A cogging görbék a 9.15, a ripple görbék a 9.16.ábrán szerepelnek.



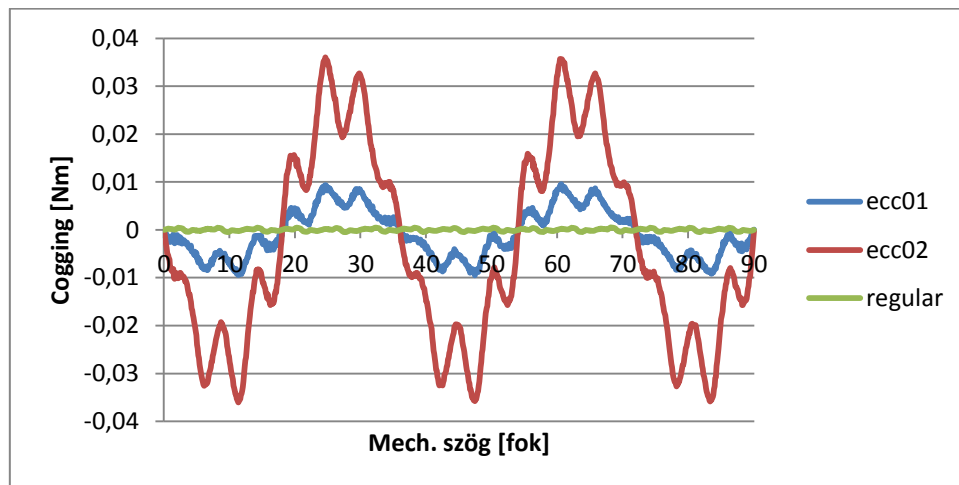
9.16.ábra. Tangenciális mágneselezésű motor ripple görbéi.

9.7. V elrendezésű rotor (v)

Egy-egy forgórész pólus 2 mágnesből áll. A forgórész mágnesek beépítése ennél a belső mágnesű rotor típusnál a legbonyolultabb: azonos pólusszám esetén kétszer annyi darabszámú mágneset kell pozícióhelyesen rögzíteni, mint a többi azonos pólusszámú variánsnál.

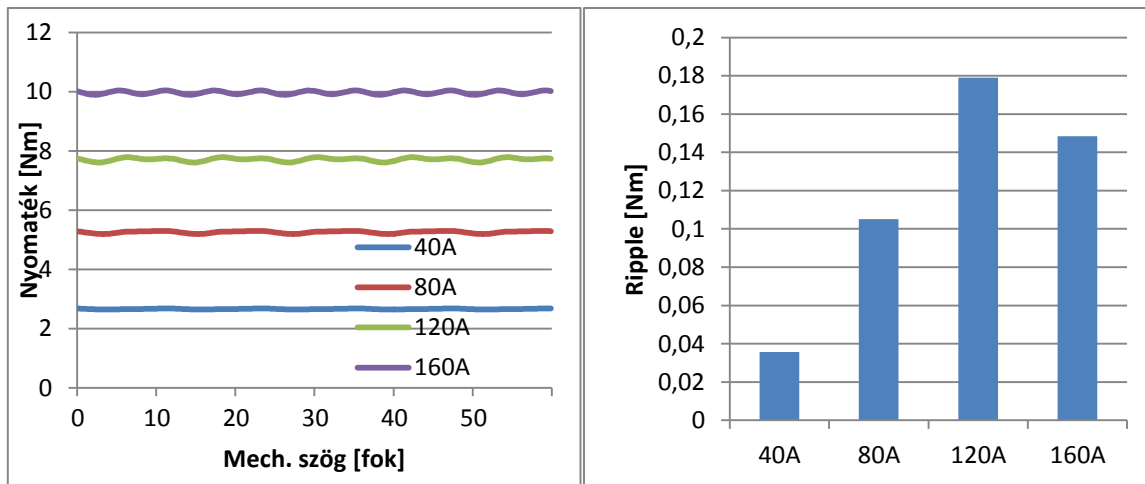
Cogging, ripple csökkentés szempontjából nagy szabadságot ad az elrendezés, szabadon változtatható a pólusív geometria, viszont a pólusív szélességet befolyásolja a mágnes szélesség és a V alak nyitási szöge. A pólusok között meg kell maradnia a gyártóeszközök által megkövetelt minimum szélességű lemez hídnak. A v elrendezésű mágnes pólus kialakításnál lép fel általában a legjelentősebb szórás a pólusok között. A lemez geometriából adódóan csak kivágó szerszámmal gyártható. A rotor lemez pontosan definiálja a mágnesek helyzetét, így pólus pozíció hiba nem léphet fel.

A szórás csökkentése érdekében a mágnesek légréshez közelebbi, illetve légréstől távolabbi végeihez célszerű kivágást helyezni. A pólusok közti telített híd szakasz így hosszabb, nagyobb mágneses ellenállású lehet.



9.17.ábra. Cogging görbe hiba mentes és excentrikus geometria esetén.

Optimalizáltam a lemezalakot cogging, illetve ripple szempontból, a cogging görbék a 9.17, ripple görbék a 9.18.ábrán láthatóak.



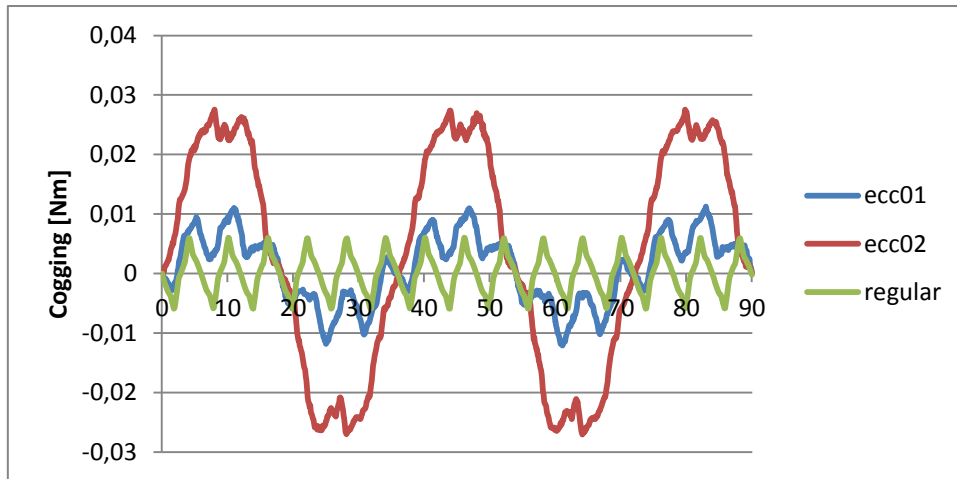
9.18.ábra. Nyomaték és ripple görbe különböző áramerősség esetén.

9.8. Küllős elrendezésű rotor

A forgórész geometria kialakítása során a pólusív is formázva lett, illetve a pólusív szélesség is úgy lett beállítva, hogy a pólusonkénti cogging görbék a szomszédos hornyoknál részlegesen kioltásuk egymást. A pólusonkénti fognyomaték görbe meredeksége nagy, ezért az eredő fognyomaték görbe csúcsos. Megfigyelhető, hogy a mágnes légrés felőli végén, a pólusok között nincs összeköttetés, csak a mágnes felső sarkainál található oldalanként 1-1 rögzítő perem, illetve a tengely felőli részén egy radiális lemez híd tartja pozícióban. A megtámasztás a mágnes egyenes szakaszán történik. Erre azért van szükség, hogy a pólusszórás kedvezőbb legyen.

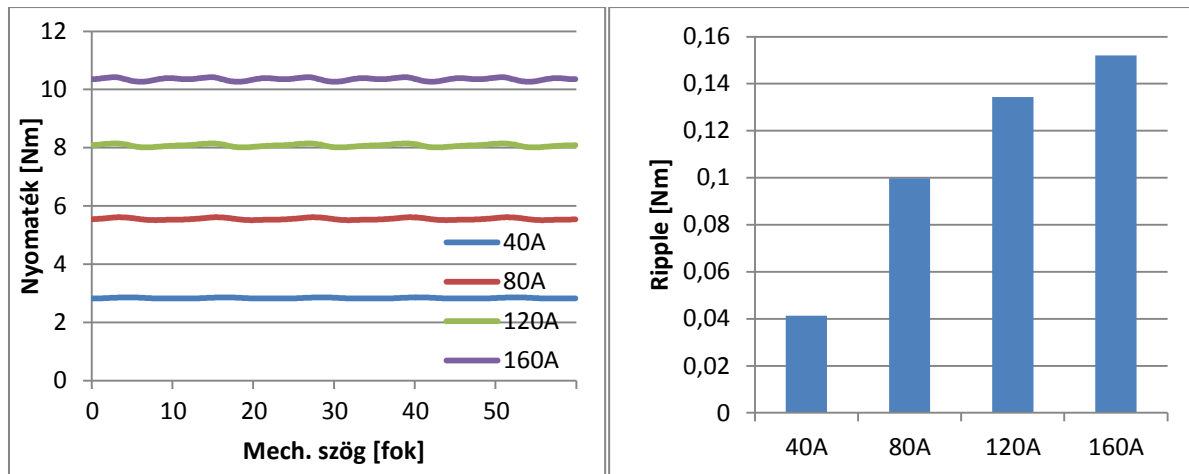
A pólusív optimalizálással, a részleges pólusonkénti fognyomaték kioltással így nem csak az eredő fognyomaték görbe lett kedvezőbb, de a pólus hiba érzékenység is jelentősen csökkent. A módszer alkalmazásával a pólus ferdítési művelet és szerszámozás, illetve gyártási hiba lehetőség is kimarad.

Az optimalizált forgórész esetén elvégeztem az excentricitás vizsgálatot. A mechanikus légrés 0,8mm, a szimulációt 0,1 és 0,2mm excentricitásra futtattam le (12,5 illetve 25%). A 0,2mm excentricitással éppen túllépi a megengedett cogging értéket.



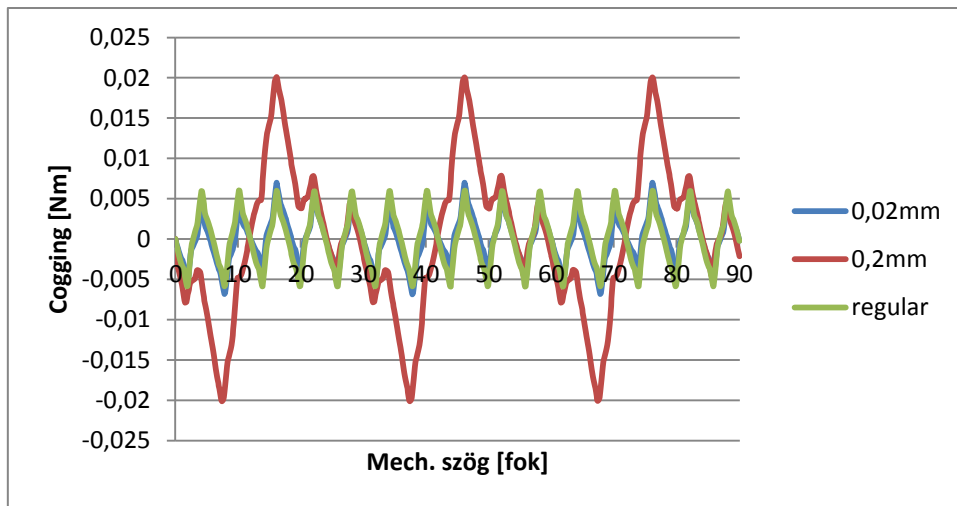
9.19.ábra. Cogging görbék hibamentes és excentrikus esetre.

A ripple vizsgálatot elvégeztem 40, 80, 120, 160A fázis csúcsáram esetén.



9.20.ábra. Nyomaték és ripple görbék.

A forgórész kialakításból adódóan a pólusok közti híd elhagyása miatt az egyes hornyok szélességének és a mágnes vastagsági méretének gyártási szórásai összeadódnak. Érdeemes megvizsgálni, hogyan reagál a gép a mágnesek méret szórására. Általában a hasáb mágnesek gyártási toleranciája $\pm 0,04\text{mm}$, a mágnes horony méret tolerancia H7. Egy extrém esetet vizsgáltam meg: az egyik mágnes vastagsága $+0,2\text{mm}$, az összes többi $-0,04\text{mm}$ körüli méretű. Illetve elvégeztem a vizsgálatot olyan esetre is, amikor a mágnesek közül 1 db $+0,02\text{mm}$ széles, a többi pedig névleges méretű (9.21.ábra). Mechanikusan a forgórész felépíthető, de pólus pozíció hiba lép fel. A számítást elvégeztem $0,02\text{mm}$ illetve $0,2\text{mm}$ pozíció hiba esetére is.

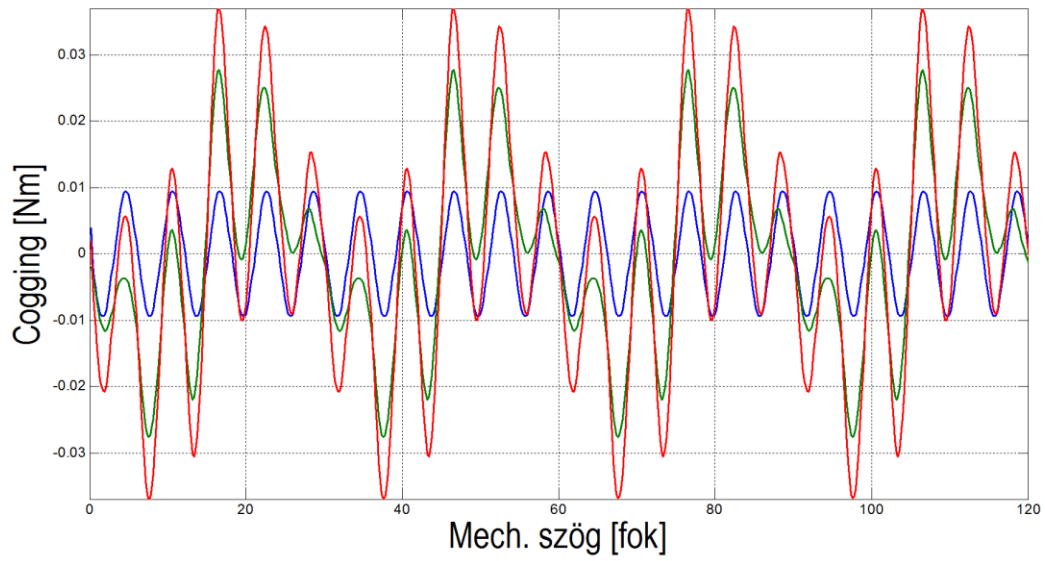


9.21.ábra. Cogging görbe hibamentes és mágnes méret miatt deformált, szétnyitott rotor lemez esetén.

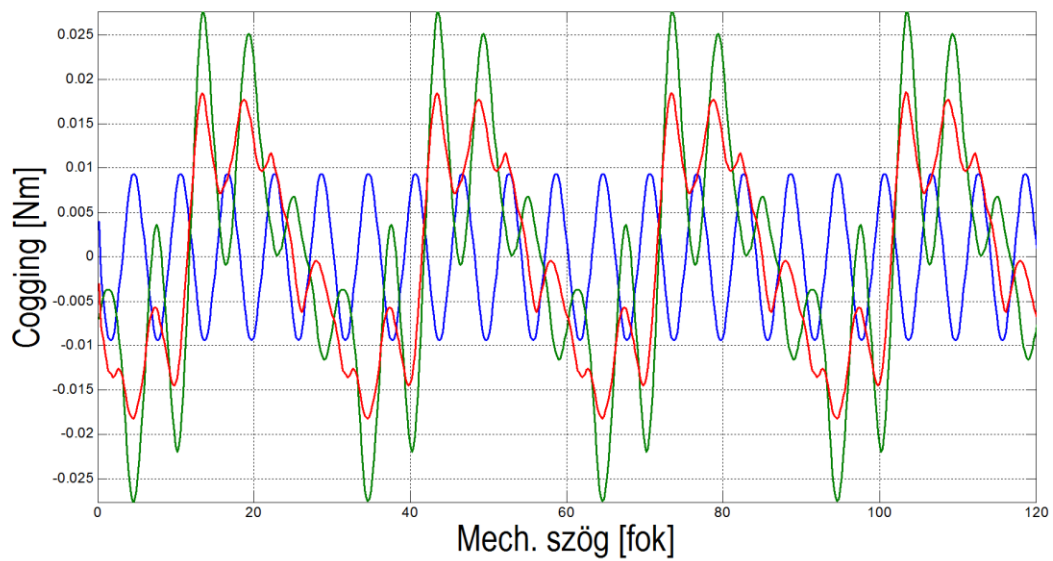
Az ábrán megfigyelhető egy új fognyomaték komponens, mechanikus 30° periódussal. A pólus pozíció hiba horonyszám harmonikust eredményezett ($360/12$).

A vizsgálatot elvégeztem más pólusív szélesség esetén is, amelynél már nem lép fel a részleges cogging kiejtés a szomszédos hornyoknál. A fognyomaték szint így már jelentős, teljes rotor hossza csúcstól csúcsig $0,04\text{Nm}$.

A pólus pozíció hiba így már speciális hatásokat hoz létre. Ismét $0,2\text{mm}$ pozíció hibát szimuláltam egy vastag és sok keskeny mágnessel, fele hosszúságú rotorra, lépcsősen ferdített rotor esetére. Pólus hiba csak az egyik forgórész fél esetén állt fenn a vizsgálat során. A hibás pólus tetszőleges mágnes esetén léphet fel. A 9.22-23.ábrán két különböző pozícióban helyezkedik el a pólus pozíció hiba. A két rotorfél cogging görbe fázishelyes összegzéseként adódik az eredő cogging görbe. A 9.22.ábrán fázisban maximumok összegződnek, míg a 9.23.ábra esetén ellenfázisban. Az eredő cogging görbe maximum így jelentősen különböző lett.



9.22.ábra. A kék a hibamentes, a zöld a pólushibás stack a piros az eredő cogging görbe ferdtítés nélkül. Ferdtítéssel még éppen tolerancián belül marad a gép.

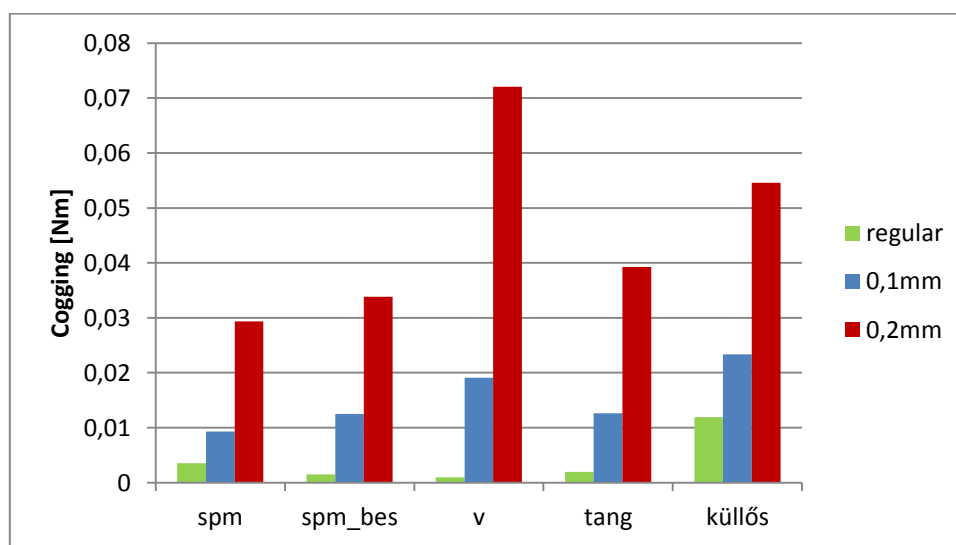


9.23.ábra. A kék a hibamentes, a zöld a pólushibás stack a piros az eredő cogging görbe ferdtítés nélkül. Ferdtítéssel még éppen tolerancián belül marad a gép.

9.9. A különböző forgórészekkel kapott eredmények összehasonlítása

9.9.1. Cogging

Az eredmények (9.24.ábra) szerint a küllős és a v elrendezésű rotor reagál legérzékenyebben az excentricitásra. Hibamentes esetben a v-s elrendezés esetén adódik a legkisebb, küllős rotor esetén a legnagyobb cogging érték a vizsgált gépek esetén. Mindegyik esetben megfigyelhető, hogy a cogging az excentricitás mértékétől nemlineárisan függ, megjelenik a 4.2.ábra szerinti hiperbola jelleg.



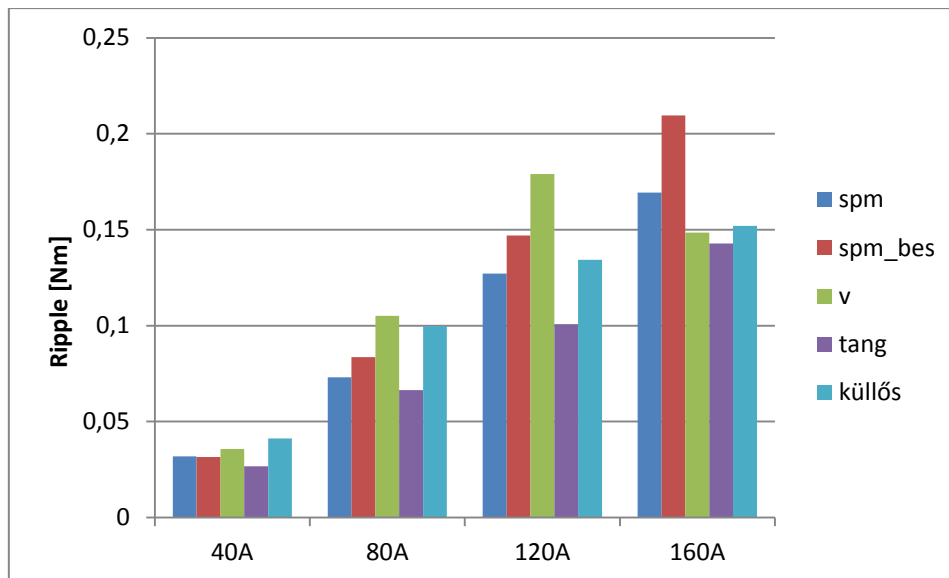
9.24. Cogging csúcsérték regular és excentrikus esetre.

9.9.2. Ripple

Általában szervomotorok esetén a névleges nyomaték 3%-a elfogadott maximális ripple csúcstól csúcsig értéknek. 10Nm névleges nyomaték esetén ez 0,3Nm értéket jelent. Mindegyik rotor esetén a határérték alatt marad a ripple ideális szinuszos táplálás esetén mellett. Inverterrel táplált motornál a nyomaték lüktetés szint általában magasabb, mivel a szinuszos táplálás, áram és rotor pozíció mérés általában nem ideális.

Ha a motor messzebb van a ripple tolerancia határtól, egyszerűbb inverter alkalmazásával is nagy valószínűséggel képes teljesíteni az előírást a teljes hajtás rendszer. Az egyszerűbb invertek általában olcsóbbak, robosztusabbak, egyszerűbb, olcsóbb rotor pozícióadót igényelnek.

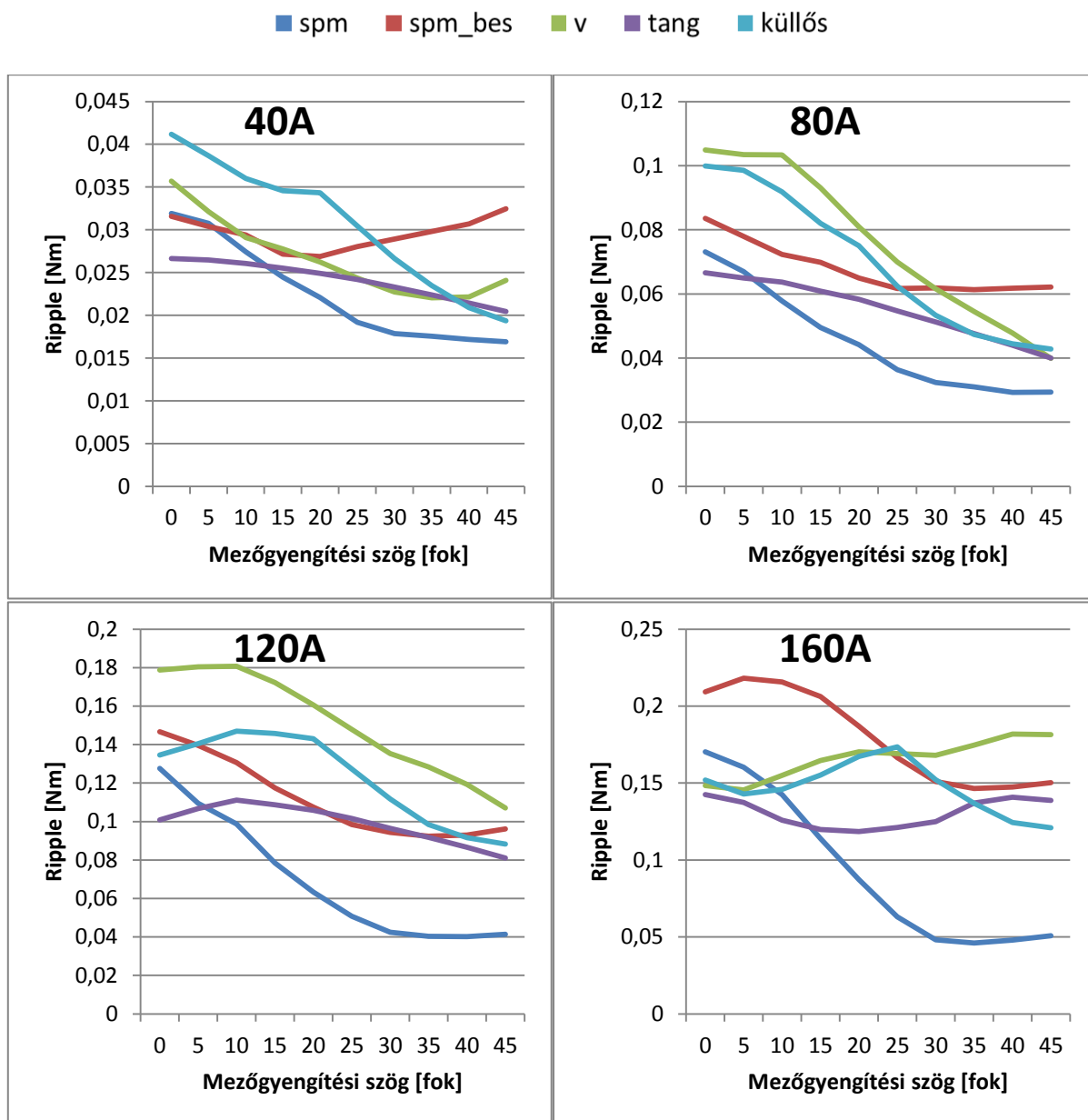
A ripple szint mindegyik rotor esetén terhelésfüggő, az árammal, mágneses telítéssel változik (9.25.ábra).



9.25.ábra. Ripple értékek fázis csúcsáram függvényében rotor típusonként.

A ripple érték 40A fázisáram csúcs táplálással a küllős rotor esetén a legnagyobb. 80A esetén a v variáns veszi át a helyét, a tendencia 120A esetén is megmarad. 160A esetén átrendeződik a sorrend. Az spm_bes ripple megugrik, a küllős, v elrendezésű rotor esetén fellépő ripple jelentősen csökken, a belső mágnesű variánsok esetén közel egyenlő lesz. A fázisáram változásával a ripple érték jelentősen változott, megvizsgáltam azonos áramerősség léptékben, mezőgyengítés esetére is.

A mezőgyengítési szöget $0-45^\circ$ tartományban, 5° -os lépcsőkben, a fázisáram csúcsértéket 40A-160A tartományban, 40A lépcsőkben változtattam. A 40A fázisáram esetén a minimum és a maximum közötti eltérés $0,02\text{Nm}$ -en belüli, ilyen alacsony változások esetén a variánsok összevethetősége számomra kérdéses. 80A fázisáram esetén a ripple a terhelési szög növelésével monoton csökken, hasonló tendencia figyelhető meg a 120A-es esetben is. 160A esetén a tendencia megváltozik. A v variáns esetén a ripple szint monoton nő, a többi variáns esetén a ripple érték $20-25^\circ$ -os mezőgyengítési szög értékig monoton csökken, majd növekedni kezd.

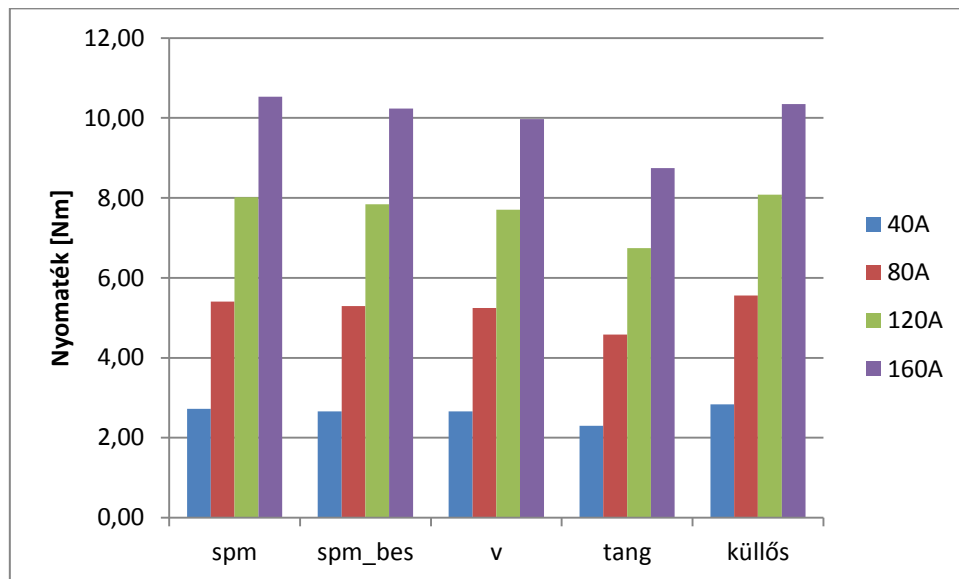


9.26.ábra. Ripple görbék mezőgyengítés esetén.

Üzemállapottól függően a ripple érték a megengedett tolerancia tartományon belül marad, folyamatosan változik (9.26.ábra).

9.9.3. Rotor variánsból kivehető maximális nyomaték

Célszerű összehasonlítani a rotor verziókat adott áramértékhez tartozó nyomaték középérték szempontjából. A motorok fázisárama 160A csúcsértékű, a vizsgálatot elvégeztem 40A, 80A, 120A, 160A csúcsérték esetén is (9.27.ábra). A tangenciális elrendezésű motorból kivehető nyomaték jelentősen elmarad a többi variánstól azonos vastest hossz mellett.



9.27.ábra. A különböző rotor verziókkal elérhető nyomaték.

A variánsok nyomaték középérték változásának tendenciája azonos. Hasonló módon reagálnak a nagyobb áramú tartományban: a fázisáram növekedésével az egységnyi áramhoz tartozó nyomaték érték egyre kisebb mértékben növekszik a mágneskör telítése következtében.

9.9.4.Fordulatszám-nyomaték görbék

A különböző rotor verziók esetén megvizsgáltam a fordulatszám-nyomaték jelleggörbéket. A vizsgálathoz a *Flux*-ban definiálható feszültséginvertert alkalmaztam. A feszültséginverteres táplálás esetén előírható változó a mezőgyengítési szög, fordulatszám, feszültségforrás feszültsége illetve frekvenciája, rotor fluxusvektorhoz képesti fázistolás, áramkorlát viszont nem.

A rotor fordulatszám növelése és a mezőgyengítési szög változtatásával számítható a motor variánsok fordulatszám-nyomaték jelleggörbéje. Áram szabályozó kör hiányában a munkapontok jól megközelíthetőek, de pontosan nem beállíthatóak. A 160A maximális áramhoz tartozó görbéket vettem fel a szimuláció során. A munkapontok megközelítése esetén a kívánt fordulatszám mellett kellett úgy megadnom a mezőgyengítési szöget, hogy a fázisáram 160A legyen. Ez ciklikus futtatást jelentett a modellre nézve.

Különböző rotor variánsú állandó mágneses szinkrongépek összehasonlítását célszerű azonos pólusszám-horonyszám kombináció, azonos állórész esetén végezni. A vasveszteség a fordulatszám, illetve ezzel együtt pólusszám függően változik. A pólusszám növelésével a pólusok közti szórás is növekszik.

Célszerű lemágneseződési vizsgálatot is végezni, például $I_d = -I_{\max}$ eset szimulációs vizsgálatával, vagy indokolt esetben ennek többszörösével. A mágnesekben nem léphet fel irreverzibilis lemágneseződés.

A görbék számítása során a mágneskörön kívül csak a tekercsek ohmos ellenállása lett figyelembe véve, a mágnesekben keletkező örvényáram veszteség és vasveszteség vizsgálatával a 9.9.6 illetve 9.9.7 fejezetben foglalkoztam. A vasveszteség, mágnes veszteség számítását külön végeztem el.

Az állandó mágnesű gépek üzemi tartománya két fő szakaszra osztható: áramkorlátos, maximális nyomatékú illetve az azt követő szakaszra. A maximális nyomatékot a gép üzemmódja (szakaszos vagy állandó üzemű), hűtési viszonyai befolyásolhatják. Meghatározó tényező a fordulatszám-nyomaték jelleggörbe könyökpontja is. A könyökpont az a maximális fordulatszámú üzemi pont, ahol még az adott tápforrásról működő inverter képes a maximális áramot áthajtani a motor tekercseken.

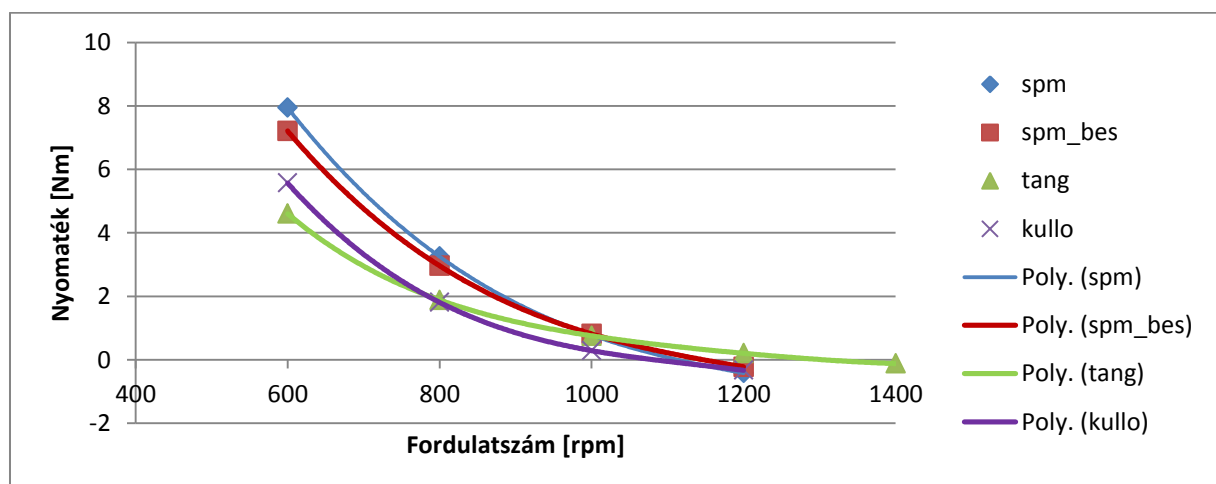
Nagyobb fordulatszám esetén a tápforrás határozza meg a gép üzemét: képes-e mezőgyengítésre, vagy sem. A könyökpontnál nagyobb fordulatszám esetén az indukált feszültség túl magas lesz, azaz nem képes akkora feszültség kiadására az inverter, hogy a maximális áramot áthajtsa a motor tekercseken.

Ha az inverter nem képes mezőgyengítésre, a 9.28.ábra szerinti természetes jelleggörbe szerint alakul a hajtásrendszer üzeme. Ha az inverter képes mezőgyengítésre, a 9.29.ábra szerint alakul a hajtás üzemi tartománya.

Mezőgyengítés esetén az inverter módosított gerjesztést ad az állórészre: a fázisáram egyik része nyomaték képzésben vesz részt, a másik része mezőt gyengít, azaz az indukált feszültség csökkentését szolgálja. Megfelelő szabályozás esetén a könyökpont feletti fordulatszám tartományban állandó teljesítményre szabályozható a hajtásrendszer. Ehhez szükséges egy mezőgyengítésre képes inverter, illetve egy megfelelően mezőgyengíthető motor.

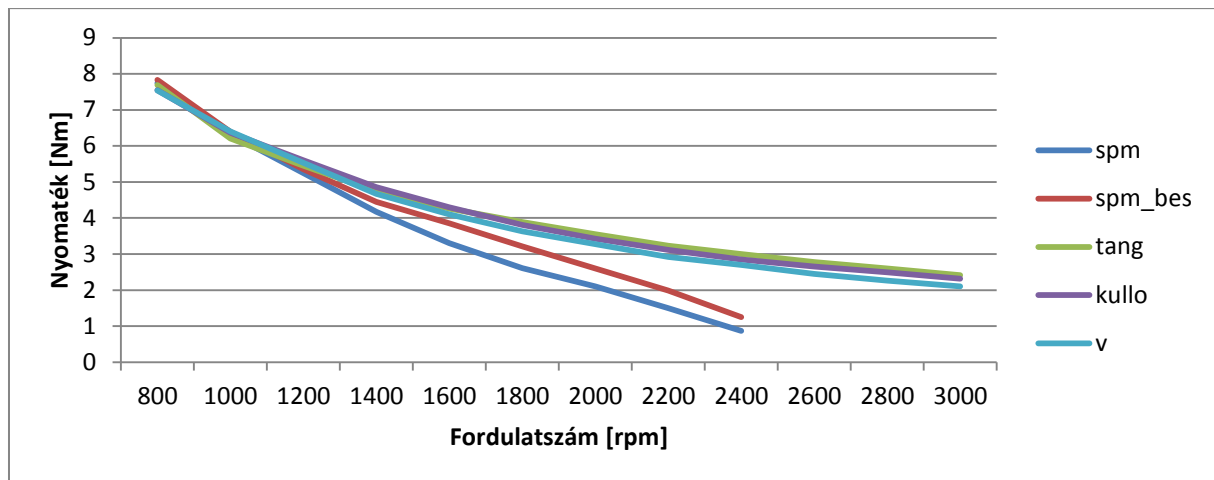
A rotor variánsokat így megvizsgáltam az áramkorlátos üzemi tartomány, illetve a mezőgyengítési üzemmód esetére is.

Az eredmények szerint a héjmágneses gépek (spm, spm_bes) a kisebb fordulatszám tartományban kis mértékben nagyobb teljesítmény leadására képesek, mint a belső mágnesű verziók, de a mezőgyengített üzemben a belső mágnesű motorok dominálnak. A héjmágneses gépek esetén is jelentkezik a tendencia: a rotorba süllyesztett mágnesű héjmágneses verzió (spm_bes) közelít jellegben a belsőmágnesű gépekhez, átmeneti szerepet tölt be.



9.28.ábra. Természetes jelleggörbe mezőgyengítés nélkül.

A kisebb fordulatszámú tartományban az spm, spm_bes gépek teljesítenek jobban. Üzemi tartománytól függően változik, melyik rotor variáns előnyösebb (9.29.ábra).



9.29.ábra. Mezőgyengítéssel kapott nyomaték görbék.

A gépek fordulatszám-nyomaték jelleggörbéin túl táblázatba foglaltam az áramkorlátos üzemi szakaszra jellemző maximális nyomaték értéket illetve a könyökponti fordulatszámot. Az spm variánsé a maximális nyomaték és a legmagasabb könyökponti fordulatszám. Az spm_bes nyomatéka kisebb, könyökponti fordulatszáma hasonló. A belső mágnesű gépek könyökponti fordulatszáma alacsonyabb.

	spm	spm_bes	v	tang	küllős
könyökpont [rpm]	480	460	420	430	430
Mmax [Nm]	10,4	10,13	10	8,67	10,2

9.1.táblázat. Könyökponti fordulatszámok és maximális nyomaték.

A héjmágneses, illetve belső mágnesű rotorok jelleggörbéi két különálló csoportot képeznek, a vasvesztés, mágnes veszteség elhanyagolása miatt együtt futnak. A veszteségek munkapont függőek, hatásukat külön vizsgálom meg, így az egyes forgórész típusok jobban összevethetőek. A vizsgálatot elvégeztem a könyökpont előtti, 400 illetve 2000 1/perc fordulatszám esetére, az áramkorlátos illetve mezőgyengített üzemi szakasz egy-egy pontjára.

A 400rpm-es munkapontban az spm motor adja le a legnagyobb teljesítményt, majd az spm_bes követi. Minél inkább közelít a geometria a belső mágnesű irány felé, annál kisebb az alacsony fordulatszámú tartományban leadott teljesítmény. Az ohmos veszteség gépenként azonos, mivel az állórész és a fázisáram és ellenállás megegyezik. A kis fordulatszámú

tartományban a vasvesztés, illetve a mágnesekben fellépő örvényáram veszteség elenyésző az ohmos veszteséghez képest.

400rpm	spm	spm_bes	tang	küllős	v
leadott telj. [W]	437,32	424,34	363,18	427,27	418,89
ohmos veszt. [W]	245,76	245,76	245,76	245,76	245,76
mágnes veszt. [W]	0,88	1,18	0,75	0,61	1,31
vasveszt [W]	1,39	1,13	0,66	0,71	0,76
hatásfok [%]	63,81	63,11	59,50	63,36	62,83

9.2.táblázat. Teljesítmény viszonyok 400rpm esetén.

A 2000rpm-es munkapontban a belső mágneses gépek dominálnak, az spm jelentősen kisebb teljesítmény leadására képes. A héjmágneses motorok mezőgyengíthetősége gyengébb. Az ohmos veszteség ebben a munkapontban is dominál. A vasvesztés illetve a mágnes örvényáram veszteség továbbra is jelentősen elmarad az ohmos veszteségtől, együttesen is csak kb 10%-át adják az ohmos veszteségnek.

2000rpm	spm	spm_bes	tang	küllős	v
leadott telj. [W]	537,11	689,89	804,92	807,02	789,48
ohmos veszt. [W]	245,76	245,76	245,76	245,76	245,76
mágnes veszt. [W]	13,3	18,8	14,1	12,4	28,1
vasvesztés [W]	21	17,94	12,5	14,5	16,37
hatásfok [%]	65,73	70,95	74,72	74,75	73,13

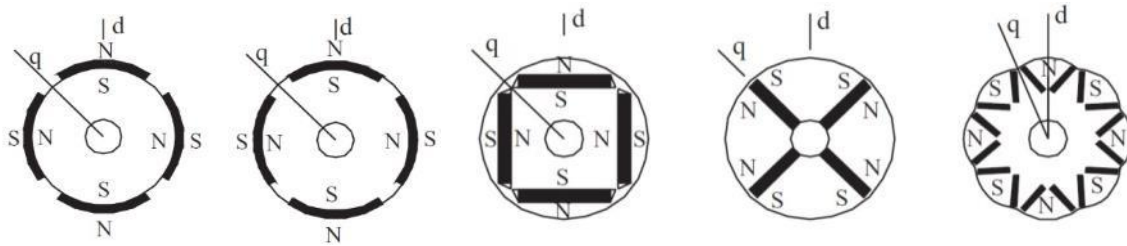
9.3.táblázat. Teljesítmény viszonyok 2000rpm esetén.

Az alacsony feszültségű, nagyáramú gépek esetén az ohmos veszteség dominál, még úgy is, hogy a lehetőségek szerint a legnagyobb horonyterület lett kialakítva.

A fenti motorok ismeretében kijelenthető, hogy mezőgyengítésre nem képes inverter esetén az spm kialakítás a legelőnyösebb. Hatásfok szempontjából az üzemidő arányában a legtávolabb fennálló üzemmód a mérvadó: magasabb fordulatszám felé tolódó üzemi tartomány esetén a belső forgórészű variánsok alkalmazása az optimálisabb.

9.9.5. Induktivitások

A mezőgyengített üzem, illetve a szabályozási algoritmusok szempontjából fontos az egyes rotor típusok L_d - L_q induktivitása. A d tengely a pólus közepén halad át, a q a pólusok határvonalán. A motor induktivitásait jelentősen meghatározza a rotor kialakítás illetve a tekercselési rendszer. Az egyes tengelyek mentén a mágneses ellenállás eltérő, ebből adódik a különböző rotor konstrukciók közti eltérés (9.30.ábra).



9.30.ábra. Rotor d-q tengelyek.

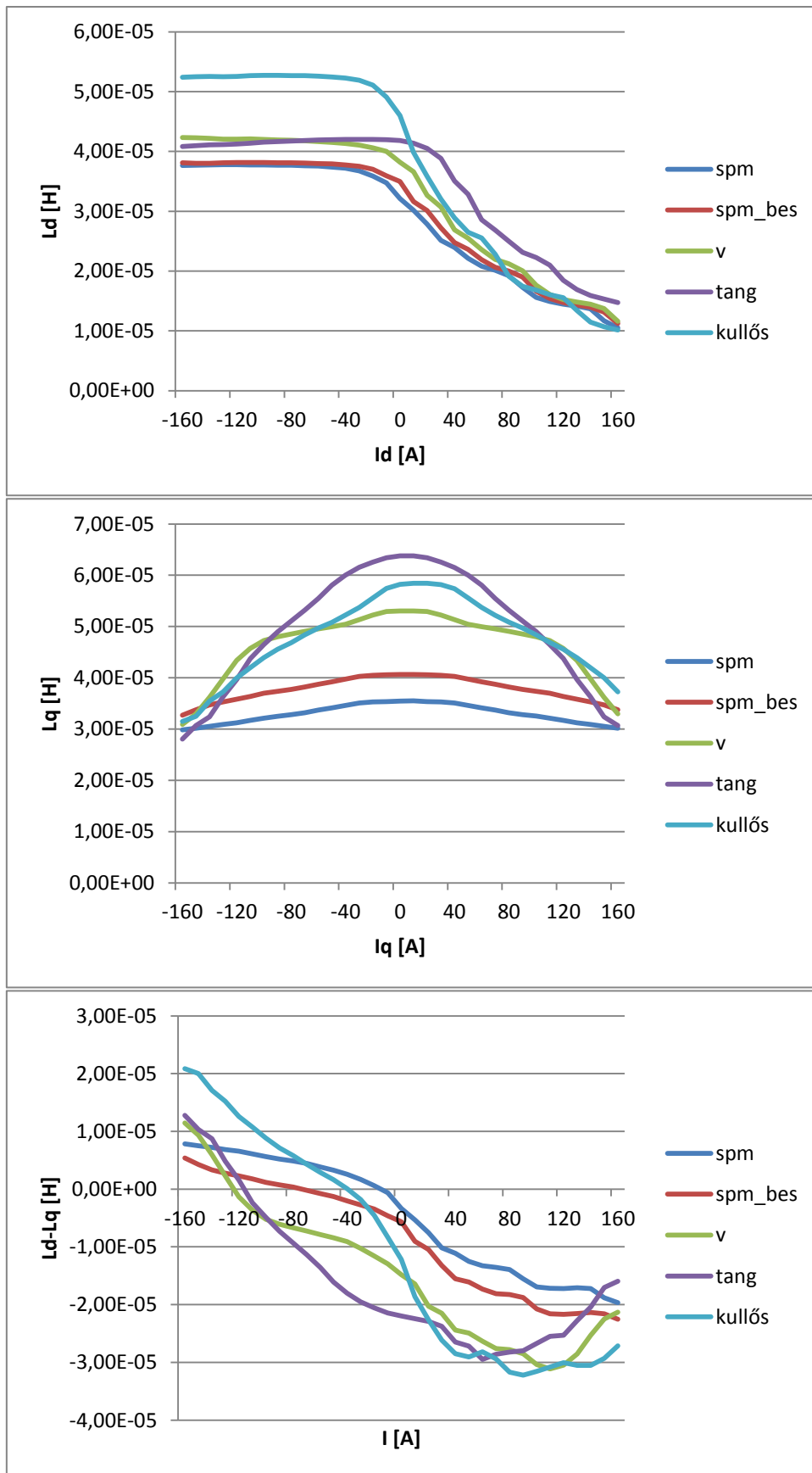
Az L_q jelleggörbe szimmetrikus az $I_q=0A$ tengelyre. A q irányú komponens hozza létre a gép nyomatékát, így motoros, generátoros állapotban a gép telítési szintje azonos. Az L_d görbe nem szimmetrikus az $I_d=0A$ tengelyre. Normál üzemállapotban az $I_d=0A$ értékű, mezőgyengített üzemben az $|I_d| > 0$. Ha az I_d komponens pozitív, erősíti a gép mezejét, egyúttal a telítéseket is fokozza, ritka üzemállapot.

$$T_{es} = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \Psi \cdot I \cdot \sin\delta \quad (10.1)$$

$$T_r = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \left[\frac{1}{2} (L_d - L_q) \right] \cdot I^2 \cdot \sin 2\delta \quad (10.2)$$

$$T = T_{es} + T_r \quad (10.3)$$

ahol p a póluspárok száma, Ψ a fluxuskapcsolódás, δ a terhelési szög, T_{es} a szinkron nyomaték, T_r a reluktancia nyomaték, T a gép eredő nyomatéka.



9.31.ábra. Ld, Lq inductivitás rotor verzióként.

A gép nyomatéka két komponensből áll, amelyet a szakirodalom szinkron T_{es} , illetve reluktancia T_r nyomaték komponensre bontva ismertet. A gép eredő nyomatéka a két komponens összege. A 9.30.ábrán az L_d illetve L_q induktivitás, illetve az $(L_d - L_q)$ komponens áramtól való függése látható. A mezőgyengítési tartományban a belső mágnesű rotor verziók esetén az $(L_d - L_q)$ komponens meredeken növekszik a mezőgyengítés növelése esetén, míg a héjmágneses verziók esetén ez a meredekség lényegesen kisebb. A jelenség a teljesítmény görbéken is megjelenik (9.29.ábra), a nagyobb fordulatszámú üzemi tartományban a mezőgyengítés a héjmágneses rotor verziók esetén kevésbé hatékony.

9.9.6. Mágnes veszteségek

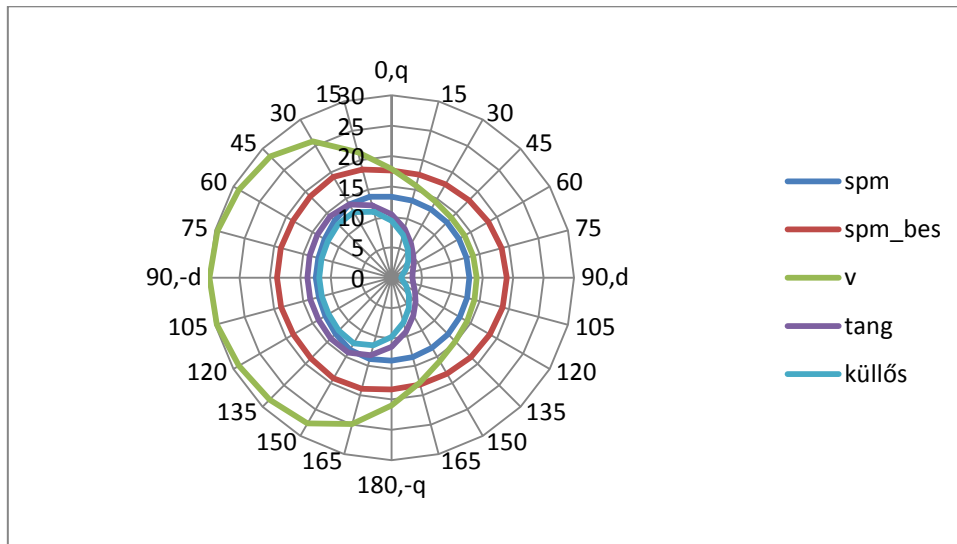
A forgórészen rögzített mágnesekben az állórész hornyoltság és a neodinium mágnesek jó villamos vezetőképessége miatt örvényáram veszteség lép fel. Az örvényáram jelentősen csökkenthető, ha a mágnes pólus több különálló mágnesből épül fel. A mágnesek szegmentálásával nem foglalkoztam. A 2D-s szimuláció nem alkalmas szegmentált mágnes elrendezés örvényáram veszteség vizsgálatára. A szegmentálás alkalmazhatósága rotor variáns függő: héjmágneses variánsok esetén szabadon alkalmazható, a mágnes pólus tetszőlegesen sok elemre bontható. Az alkotóelemek számát, méretét csak a gyárthatóság korlátozza. Belső mágnesű gépek esetén lényegesen korlátozottabbak a lehetőségek. A mágnes szegmensek méretét jelentősen meghatározza a lemez geometria kialakítása. Belső mágnesű rotor esetén általában a tengelyirányú bontás alkalmazható.

A rotor típusok esetén jelentősen eltér a mágnes örvényáramú veszteségi görbe. A héjmágneses forgórészek esetén a legnagyobbak a veszteségek, de az spm, spm_bes esetén is különböző a görbe. Jellemzően elkülönül egymástól a héjmágneses illetve belső mágnesű elrendezés.

Terhelési állapot esetén is megvizsgáltam az örvényáram veszteség alakulását. Az állandó mágneses gépek, különösen kisméretű tápellátás esetén gyakran előfordul, hogy mezőgyengítés szükséges a hajtási igények kielégítéséhez.

A terhelési vizsgálatot így egy fordulatszám, 2000/perc esetén végeztem el végelelemes szimulációval (9.31.ábra). A mezőgyengítés mértékét általában d-q koordináta rendszerben szokás jellemezni. A szimulációt 80A, illetve 160A csúcsertékű áramgenerátoros

táplálással végeztem el, 15°-os lépcsőkben. A 0° a tisztán q, 90° a tisztán -d állapotot jelenti. A -d a maximális mezőgyengítési állapot, a q a mezőgyengítés nélküli maximális nyomatékú motoros üzemmód.



9.32.ábra. Mágnes veszteség 160A csúcs fázisáram, 2000rpm esetén.

Megfigyelhető, hogy a héjmágneses, illetve belső mágnesű forgórészek veszteségi görbéi jelentősen eltérőek. A héjmágneses gépek esetén a veszteség értékét az áramerősség határozza meg döntően. A belső mágnesű gépek esetén az áramerősségen túl a mezőgyengítési szint is meghatározó.

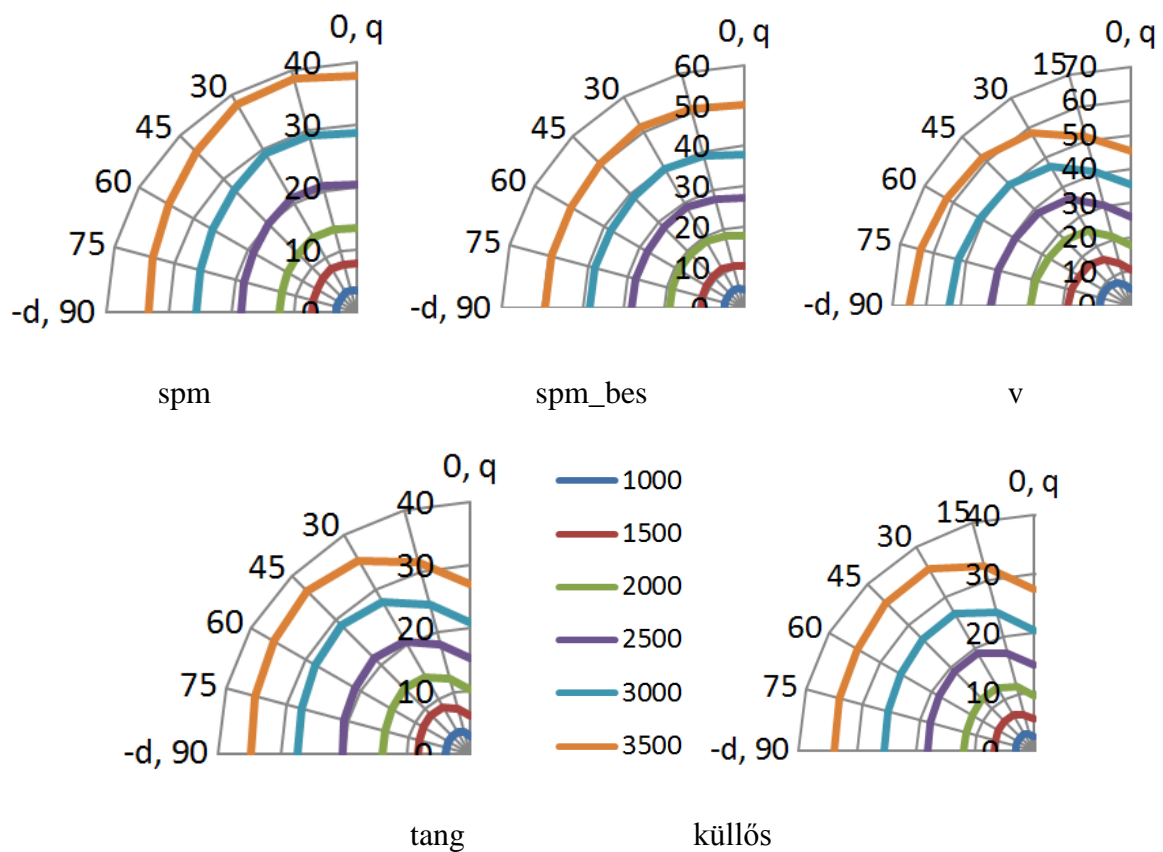
A belső mágnesű gépek közül a tangenciális áll a héjmágneses elrendezéshez legközelebb. A héjmágneses forgórész esetén a mezőgyengítési szint csak kis mértékben befolyásolja a mágnes veszteséget. A tangenciális rotor kialakítás esetén a mezőgyengítési szint a döntő tényező. Mezőgyengítés hatására jelentősen nő a mágnes veszteség, mezőerősítés esetén pedig jelentősen csökken.

A görbék a d tengelyre szimmetrikusak, a q tengelyre nem. A d tengely negatív oldala a mezőgyengítési, a pozitív szakasza a mezőerősítési szakasz. A hajtási alkalmazások terén a $\pm q$, -d tengelyek által határolt terület a gyakran használatos üzemi tartomány. A mezőerősítés csak ritka üzemmód.

A 9.32.ábrán a vizsgált rotor variánsok teljes üzemi szakasza szerepelt. A szimulációt megismétltem, de már csak a gyakoribb üzemi tartományra, a -d,q ténnyedre. A szimulációt 160A fázisáramra végeztem, 1000-3500 rpm tartományban 500 rpm-es

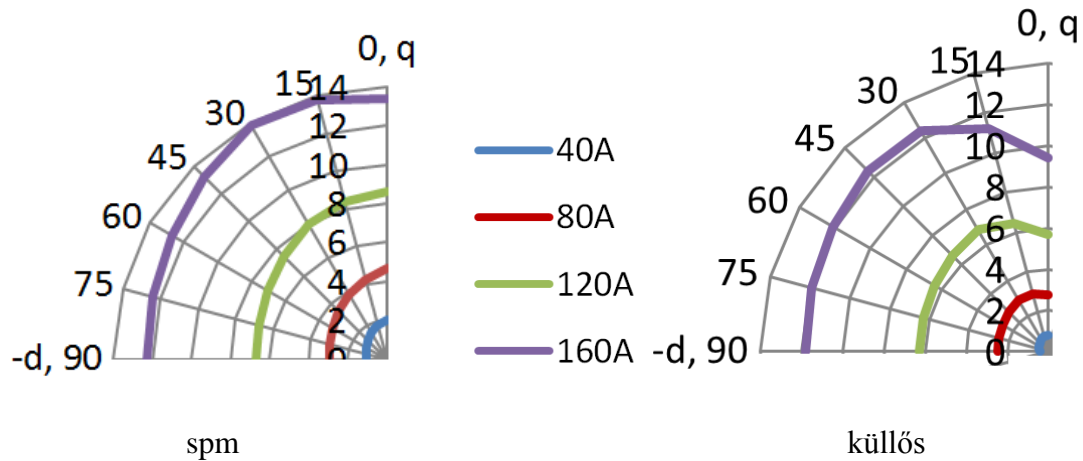
lépcsőkben (9.33.ábra). A várakozásnak megfelelően nagyobb fordulatszám esetén növekszik a mágnes örvényáram veszteség. A növekedés mértéke nemlineáris.

A szimulációt elvégeztem 2000 rpm, változó áramerősség esetére is. Az áram értéket 40-160A érték között változtattam, a $-d, q$ térnegyedre futtattam le. Az áram értékének növekedésére érzékenyen reagálnak a motorok, az spm illetve küllős gép esetén a 9.34.ábrán látható.



9.33.ábra. Mágnes veszteség görbék 160A, különböző fordulatszám értékek esetén.

A mágnes örvényáram veszteség nagy mértékben függ a motor kialakítástól, továbbá jelentős mértékben függ az üzemállapottól is.



9.34.ábra. Mágnes veszteség 2000rpm, különböző fázisáram értékek esetén.

9.9.7. Vasveszteség

A mágneses indukcióeloszlás a nagy kihasználtságú villamos gépek esetén általában nem tökéletesen szinuszos a lokális telítések miatt. A szinuszosan változó mágneses térre vonatkozó analitikus összefüggések alapján működő vasveszteség számítási módszerek alkalmazhatósága ezáltal kérdésessé válik. Különösen igaz ez jelentős mértékű felhomonikusok esetén.

A nem szinuszosan változó mágneses tér esetén a vasveszteség több komponensre bontható fel:

$$P = P_h + P_d = P_h + P_c + P_e \quad (10.4)$$

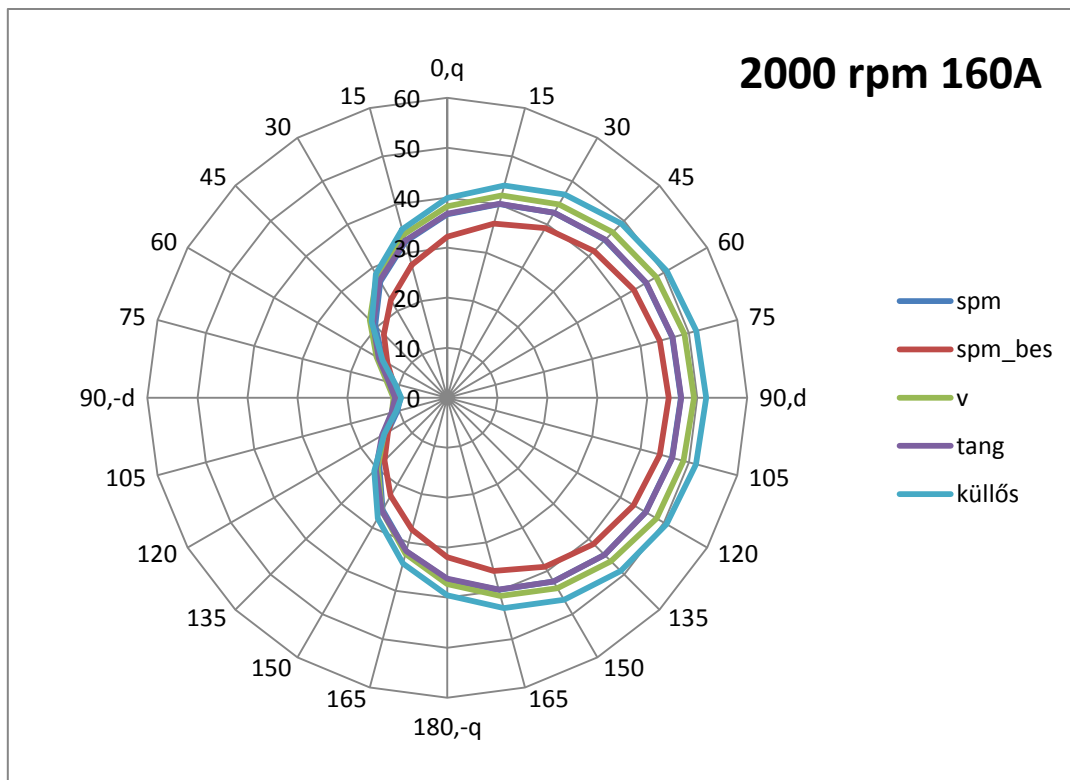
ahol P_h a hiszterézis veszteség, P_d a dinamikus veszteség, ami P_c klasszikus és P_e (excess=járulékos) komponensre bontható. Ha a lemez anyag tökéletesen homogén, a járulékos veszteség értéke nulla.

A vasveszteség számítását a *Flux*-ba integrált Bertotti-módszer szerint számítottam. Az egyes csomópontok indukció értékei, illetve az alkalmazott anyag paraméterei alapján a számítás az alábbi összefüggés szerint történt:

$$P = \left[k_h B_m^2 f + \frac{\pi^2 \sigma d^2}{6} (B_m f)^2 + k_e (B_m f)^{1,5} \cdot 8,67 \right] \cdot k_f \quad (10.5)$$

ahol k_h a hiszterézis tényező, k_e a járulékos veszteségi tényező, σ a fajlagos vezetőképesség, B_m az indukció csúcstéték, f a frekvencia, k_f a lemezkitöltési tényező. Az anyagjellemzőket a lemezanyag adatlapjából lehet meghatározni. Az egyes üzemmódokban egy villamos periódusra átlagolt értékeket ad eredményül a módszer a kívánt geometria szakaszokra. A számítás során nem választottam szét a számítást rotor és stator vasveszteségre.

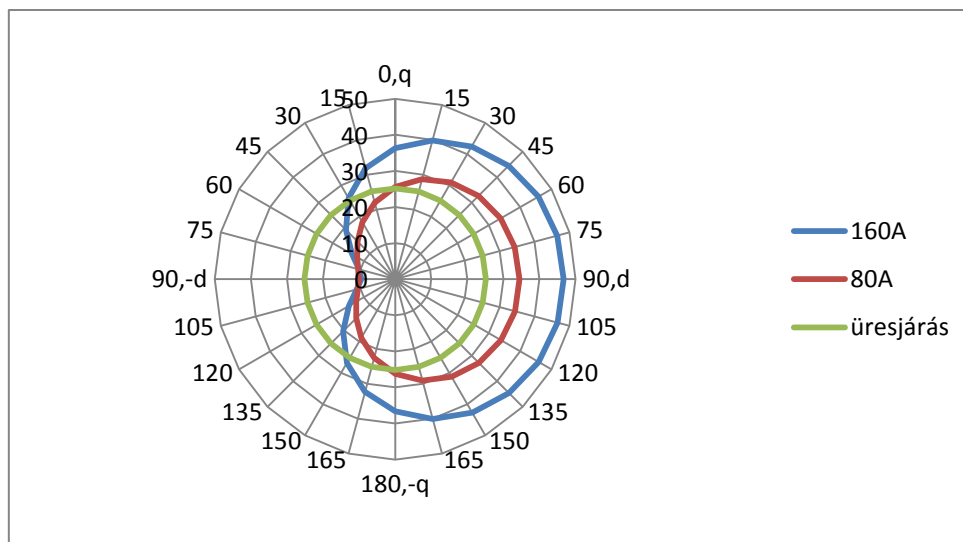
A terhelt üzemmódban fellépő vasveszteség 160A csúcsáram és 2000/perc fordulatszám esetén a 9.35.ábrán látható. Mezőgyengítés esetén a vasveszteség jelentősen csökken mindegyik forgórész típus esetén, mezőerősítés esetén lényegesen növekszik.



9.35. Vasveszteség-2000-es rpm-en, 160A fázisáramnál.

A tangenciális és az spm héjmágneses forgórészű gép vasvesztesége közel fut egymáshoz, a két görbe nehezen különíthető el.

Érdeemes megvizsgálni pl az spm héjmágneses motor esetén a mezőgyengítés hatását: mezőgyengítés esetén a vasveszteség kisebb, mint üresjárás esetén (9.36.ábra).



9.36.ábra. Spm variáns vasveszteség különböző fázis csúcsáram esetén.

9.9.8.Beépített aktív anyagmennyiség

A motor variánsok esetén az állórész azonos volt, így a tekercselési rendszer, beépített huzal mennyiség azonos. A felhasznált lemez anyag mennyiség kis mértékben különböző a forgórész lemezalak különbsége miatt. Kialakításból adódóan a belső mágnesű forgórészek esetén a mágnes beépítéséhez szükséges területet ki kell vágni, így a beépített lemez anyagmennyiség kevesebb.

A ház, tengely kialakítást nem vettem figyelembe, azonos aktív térfogat miatt azonos a vizsgált gépek esetén.

Lényegesebb eltérés a mágnes igényben jelentkezik, ami a legdrágább komponens. A belső mágnesű forgórészek esetén a mágnesek közti szórás nagyobb, így azonos nyomtaték szint biztosításához a szórást többlet anyag beépítéssel kell fedezni. A v elrendezésű forgórész esetén szükséges a legtöbb mágnes beépíteni (9.4.táblázat).

	spm	spm_bes	v	tang	küllős
mágnes [kg]	0,14	0,13	0,19	0,17	0,17
vas[kg]	0,63	0,65	0,49	0,67	0,60

9.4.táblázat. Felhasznált anyagmennyiség.

10. Összefoglalás

Az 1.tézis egy olyan fognyomaték számítási módszert ismertet, amely alkalmas a gyakori gyártási szórások hatásának vizsgálatára. Sokféle publikáció ismert, amely valamilyen fognyomaték modellező algoritmust tárgyal, de ezek vagy a hibátlan geometriára vonatkozó fognyomaték számításával foglalkoznak, vagy konkrét optimalizálási esetet mutatnak be. A gyártásba vitel folyamatáról, gyártási szórások, toleranciák megengedhető értékének meghatározásával foglalkozó publikációt nem találtam. Algoritmus, modellező eljárás híján csak például végeselemes módszerrel, hibás geometriák modellezésével lehet a különböző gyártási hibák hatását vizsgálni. A hibrid módszer erre a feladatra kínál jól követhető, gyors modellezési, számítási lehetőséget.

A 2.tézis egy állórész lemezalak optimalizálási módszert ismertet, amely hatékonyan alkalmazható fognyomaték csökkentésre. Alkalmazásával a horonyterület is növelhető. Bemutatom a kiindulási geometria fognyomaték görbéjét, illetve a geometria módosítással járó új fognyomaték komponens viselkedését. Az optimalizáció során az ismertett módszer alkalmazásának módját, mértékét kell megtalálni.

A 3.tézis a hibrid módszer alkalmazásának egy kiterjesztése. A pólusív szélesség, illetve a pólusok pozíciója megválasztható úgy, hogy az egyedi fognyomaték görbék között jelentős mértékű kioltás lépjen fel. A fizikai modell ebben az esetben is jól követhető.

A 4.tézis azonos állórész lemezalak, vastest hossz és tekercselési rendszer esetén állandó mágneses szinkrongép forgórész variánsok viselkedését vizsgálja. A fognyomaték vizsgálaton, optimalizáláson túl a gépek többi paramétere is összehasonlításra kerül, mint fordulatszám-nyomaték, eredő nyomaték hullámosság illetve annak terhelési ponttól való függése, veszteségek munkapont függése illetve a felhasznált alapanyagok (pl mágnes) mennyisége. Az eredmény útmutatást ad arra vonatkozólag, hogy egy adott alkalmazási feladatra melyik rotor geometriával lehet a legjobb eredő hatásfokot, legnagyobb nyomatékot elérni, ha ismert az egyes üzemmódok várható időtartama, előfordulási gyakorisága.

Irodalomjegyzék

- [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.Schlenzok, 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 Distributes 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 Otimization 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. Sopenen, 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

A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

[71] 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

[72] 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)

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

[74] Szilard 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)

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

[76] Szilard 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)

[77] Szilard 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)

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

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

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

[81] Szilard Jagasics, Istvan 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