



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamos Energetika Tanszék
Villamos Gépek és Hajtások Csoport

Horváth Sándor Rajmund

**TOPOLÓGIA-ELEMZŐ RENDSZER
KAPCSOLT RELUKTANCIA GÉPEK
MODELLEZÉSÉHEZ**

TDK DOLGOZAT

Konzulens:

Dr. Vajda István, egyetemi tanár

Dr. Számel László, egyetemi docens

Budapest, 2016. október

Tartalomjegyzék

Hallgatói nyilatkozat	ii
Tartalmi összefoglaló	iii
Abstract	iv
Fontosabb jelölések jegyzéke	2
Ábrák jegyzéke	2
1. Bevezetés	3
2. A kapcsolt reluktancia gépek sajátos tulajdonságai	4
2.1. Konstrukciók változatossága	4
2.2. Az öninduktivitás és a nyomatékképzés kapcsolata	6
2.3. Általános nyomatékképzés leírása	11
3. Topológia-elemző rendszer összeállítása	12
3.1. Motiváció	12
3.2. A rendszer felépítése és működése	12
3.3. Főbb méretek	14
3.4. Adatbevitel	15
3.5. Topológia számítása	15
3.6. Geometria szerkesztése	16
3.7. Tekercselés kialakítása	16
3.8. Anyagi jellemzők felvétele	16
3.9. Térszimuláció	17
4. Összehasonlító vizsgálat	19
4.1. Profilok	19
5. További feladatok, fejlesztési lehetőségek	22
5.1. Különböző pólusgeometriák implementálása	22
5.2. Nyomatéklüktetés csökkentése többfázisú gerjesztéssel	23
5.3. Szabályozott hajtás szimulációja	23
Összefoglalás, eredmények	24
Irodalomjegyzék	25

Hallgatói nyilatkozat

Alulírott Horváth Sándor Rajmund, villamosmérnöki MSc szakos hallgató kijelentem, hogy ezt a TDK dolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, csak a megadott forrásokat (szakirodalom, eszközök stb.) használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint, vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Hozzájárulok, hogy a jelen munkám alapadatait (szerző(k), cím, angol és magyar nyelvű tartalmi kivonat, készítés éve, konzulens(ek) neve) a BME VIK nyilvánosan hozzáférhető elektronikus formában, a munka teljes szövegét pedig az egyetem belső hálózatán keresztül (vagy hitelesített felhasználók számára) közzétegye.

Kelt: Budapest, 2016. október 26.

.....
Horváth Sándor Rajmund

Tartalmi összefoglaló

Manapság a villamos hajtásokban alkalmazott forgógépek többsége a gerjesztési (hengeres) nyomaték elvén működik. Az energiahatékonyság iránti igény növekedésével egyre nagyobb szerephez jutnak a mágneses ellenállás változását hasznosító forgógépek.

Egy kapcsolt reluktancia gép esetében a mágneses ellenállás kerület menti változásának leírására különböző profilok használatosak. Ezek a profilok az adott gép egyedi karakterisztikái, amelyeket a topológia és a vezető fázis árama egyaránt befolyásol. Topológia alatt a gép geometriai kialakításának, anyagi jellemzőinek és tekercselésének együttese értendő.

A gépspecifikus karakterisztikák számítógéppel támogatott leképezése numerikus térszimuláció segítségével lehetséges. Jelen dolgozatban egy olyan eljárás kerül bemutatásra, amely a topológia nevezetes paraméterei alapján önműködően előállítja az adott gépre jellemző fluxuskapcsolódás- és nyomaték-profil.

Kulcsszavak: kapcsolt reluktancia gép, FEMM, nyomaték-profil, fluxuskapcsolódás-profil.

Abstract

Nowadays the majority of rotating machines applied in electric drives operate by the principle of excitation (cylindrical) torque. Growing demand on energy efficiency increases the role of other type of rotating machines, which exploit the change of magnetic reluctance.

In case of a switched reluctance machine, different profiles are used to describe the change of reluctance around its perimeter. These profiles are unique characteristics of the given machine, influenced both by the topology and by the current of the conducting phase. Under topology, the combination of machine geometry, material properties and winding is meant.

Computer-aided determination of machine-specific characteristics can be done by finite element analysis. In this paper an algorithm is presented, which automatically generates the flux-linkage profile and torque profile, based on the given parameters of the topology.

Keywords: switched reluctance machine, FEMM, torque profile, flux-linkage profile.

1. táblázat Fontosabb jelölések jegyzéke

Mennyiség jele	Megnevezés
α	pozíció
α_{min}	szimuláció alsó pozíció határa
α_{max}	szimuláció felső pozíció határa
$\Delta\alpha$	szimuláció pozíció léptéke
β_r	forgórész pólusív / pólusszög
β_s	állórész pólusív / pólusszög
d_{i_s}	furat átmérő
d_{o_s}	koszorú átmérő
δ	légrés
d_{sh}	tengely átmérő
\mathcal{F}	gerjesztés
h_s	állórész fogmagasság
h_r	forgórész fogmagasság
i_{min}	szimuláció alsó áramerősség határa
i_{max}	szimuláció felső áramerősség határa
Δi	szimuláció áramerősség léptéke
L_{min}	öninduktivitás kitérő helyzetben
L_{max}	öninduktivitás illeszkedő helyzetben
$L(\alpha, i)$	öninduktivitás-profil
M	nyomaték
m^*	fázisok száma
$m(\alpha, i)$	nyomaték-profil
N	pólusonkénti menetszám
p	póluspárok száma
ϕ	fluxus
$\psi(\alpha, i)$	fluxuskapcsolódás-profil
\mathcal{R}_{ps}	állórész pólustest reluktancia
\mathcal{R}_{pr}	forgórész pólustest reluktancia
\mathcal{R}_c	koszorú reluktancia
\mathcal{R}_g	légrés reluktancia
$slip$	„aszinkron jellegű” konstrukció szlipje
S	lépésszám
sl	lemezcsomag hossza
τ_r	forgórész pólusosztás
ω	szögsebesség
W'	koenergia
W_f	tárolt energia
W_m	mechanikai energia
W_v	villamos energia
Z_s	állórész fogsám / pólusszám
Z_r	forgórész fogsám / pólusszám

Ábrák jegyzéke

2.1.	Egy 8/6 konstrukció álló- és forgórésze	4
2.2.	Erővonalak záródása a szélsőséges helyzetekben, 8/6 konstrukció	6
2.3.	Erővonalak záródása a szélsőséges helyzetekben, 6/4 konstrukció	7
2.4.	A geometria és az öninduktivitás-profil kapcsolata	7
2.5.	A k -adik fázis villamos helyettesítő képe	8
2.6.	Részleges nyomaték-profil eltérő konstrukciók esetén	10
2.7.	A nyomatékképzés szemléltetése energiák segítségével	11
3.1.	A topológia-elemző rendszer sorrendi működése	13
3.2.	A topológia előállításához szükséges főbb méretek	14
3.3.	Az adatbeviteli feladatot szolgáló GUI	15
3.4.	Példa topológiák I.	17
3.5.	Példa topológiák II.	17
3.6.	Egy munkapont egyszerűsített mágneses helyettesítő képe [16, 3. o.]	18
4.1.	A FEMM szimuláció főbb műveleteinek időigénye	19
4.2.	Fluxuskapcsolódás-profilok	20
4.3.	Nyomaték a pozíció függvényében, $i = 6$ A esetén	20
4.4.	Nyomaték a pozíció függvényében, $i = 8$ A esetén	21
4.5.	Teljes nyomaték-profil	21
5.1.	Különböző pólusgeometriák [8, 48. o.]	22
5.2.	Profil alapú dinamikus gépmodell [17, 1317. o.]	23

1. Bevezetés

A forgó mozgású reluktancia gépek működése kizárólag a mágneses ellenállás forgórész pozíciójával összefüggő változásán alapszik. Kapcsolt reluktancia gép (KRG) esetében ez a változás a kétszeresen-fogazott kialakításból ered: az állórész valamely fogának egy rögzített pontja és a forgórész körvonala között mérhető légrés periodikusan változik. A „kapcsolt” jelző arra utal, hogy működtetéséhez a forgórészhez illesztett elektronikus kommutáció szükséges. Helytelenül illesztett táplálás esetén jelentős nyomatéklüktetés jöhet létre, üzemelése a koncentrált radiális erőhatások miatt zajjal is jár.

A konstrukciók változatossága és az illesztett táplálás igénye hátrányt jelent a KRG számára a gerjesztési (hengeres) nyomaték elvén működő forgógépekkel szemben. Alkalmazása mellett szól egyszerű (kefék és állandó mágnesek nélküli) felépítése, alacsony nyersanyagszükséglete és a széles fordulatszám-tartományon elérhető magas hatásfoka. A KRG nagy fordulatszámú üzemeltetéséhez nincs szükség mezőgyengítő áramra, változtatható polaritású feszültségről táplálva ellenáramú és regeneratív féküzemre is alkalmas.

Előnyös tulajdonságai miatt a KRG különösen a járműhajtások területén jelent ígéretes alternatívát. Ezt támasztja alá az ausztrál nemzeti kutató ügynökség (CSIRO) és a helyi járműipar együttműködésében, a 2000-es évek elején kifejlesztett, [1]-ben bemutatott koncepcióautó példája. A jármű párhuzamos hibrid hajtásláncába egy folytonos üzemben 25 kW névleges teljesítményű KRG került beépítésre. A gép hatásfoka motoros üzemben, névleges fordulatszámon 89% volt. A veszteségek jelentős része a rézvesztésből ($\approx 1,5\text{ kW}$) adódott, a vasvesztés pedig elenyészőnek ($\approx 163\text{ W}$) bizonyult. A mérések során kiderült, hogy az állórész lemezelése és a köpenyben futó folyadékcsövek közötti hőátadás javításával növelhető lenne a gép hatásfoka kb. 92% -ra. A korabeli alacsony energiasűrűségű akkumulátorok miatt ez a jármű nem jelentett valós közlekedési alternatívát, viszont rámutatott a KRG gyakorlati jelentőségére.

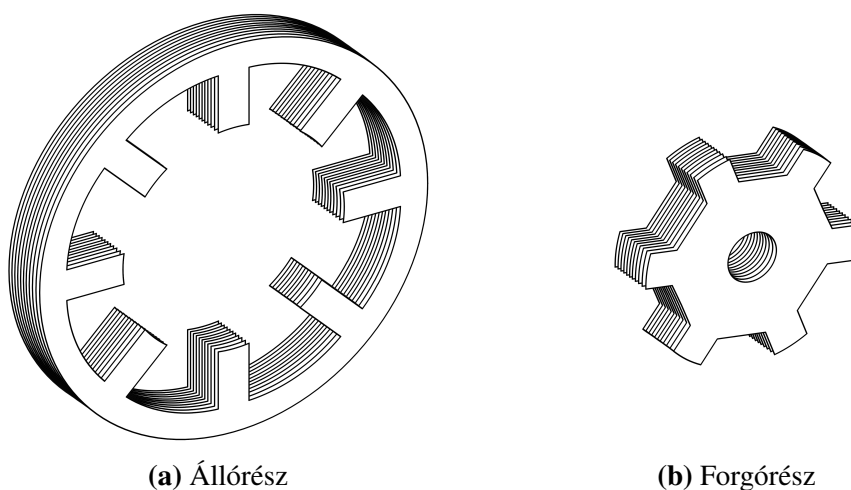
Napjainkban a KRG-ek témakörében folyó kutatások és fejlesztések olyan konstrukciós kérdésekre és irányítási stratégiákra irányulnak, amellyel a jó hatásfok megtartása mellett elérhető az áramlengés és a nyomaték lüktetésének (felharmonikus tartalmának) csökkentése. A feladat megvalósítása szoros együttműködést kíván a géptervezés és a hajtásirányítás területei között.

A KRG-es hajtások hazai fejlesztéséhez kapcsolódóan nagy aktualitású tanszéki Diplomatervek is születettek a közelmúltban. A KRG-ek [3]-ban lendkerekes alkalmazásra képezték vizsgálat tárgyát. [4]-ben részletesen bemutatásra kerültek a géptervezés főbb lépései és a tervezett konstrukción végrehajtott szimulációk eredményei. [5]-ben járműipari felhasználás céljából egy szinkron reluktancia gép koncepcionális tervezése valósult meg, emellett a KRG alkalmazásának lehetősége is megvizsgálásra került.

2. A kapcsolt reluktancia gépek sajátos tulajdonságai

2.1. Konstrukciók változatossága

Felépítés szempontjából a KRG általában belső forgórészű, álló- és forgórésze egyaránt fogazott kialakítású, de fogszámuk eltérő. A mágneses pólusokat az állórész koncentrált tekercselése hozza létre, a forgórész pedig gerjesztetlen. Az 2.1. ábra egy 8/6 konstrukció lemezcsomagját vázolja, a szerkezeti kötések elhagyásával.



2.1. ábra Egy 8/6 konstrukció álló- és forgórésze

Eltérő irányítási stratégiájuk és teljesítményszintjük ellenére, a működési elv és a felépítés hasonlóságai miatt a KRG-ekre is kiterjeszhető a [6]-ban ismertetett, változó reluktanciájú (VR), fogsokszorozás nélküli léptetőmotorokra vonatkozó tárgyalásmód és összefüggések.

Jelölje Z_s az állórész és Z_r a forgórész fogszámát. Egy adott konstrukcióra általában Z_s/Z_r módon hivatkoznak. Az állórész fogszámára (2.1) általános érvényű:

$$Z_s = 2pm^* \quad (2.1)$$

ahol p a póluspárok számát, m^* a fázisok számát jelöli. A $4/4$ -es üzem megvalósításához legalább 3 fázis szükséges. A tetszőleges pozícióból indíthatóság $Z_s \neq Z_r$ esetén teljesül.

Alacsony állórész fogszám esetén a fogak közötti tér kihasználásával, nagyobb keresztmetszetű tekercselést alkalmazva csökkenthető a rézveszteség. A KRG veszteségei közül a vasveszteség domináns, amely főleg a forgórész átmágnesezéséből adódik és jelentősen függ a forgórész fogak számától és a fordulatszámától. A veszteségek visszaszorítása tehát alacsony póluspárosszámmal lehetséges, emiatt általában $p = 1$ és $p = 2$ konstrukciók terjedtek el a gyakorlatban. A koncentrált radiális erőhatásokból fakadó akusztikus zaj és a nyomatékklüktetés csökkentésére viszont esetenként $p = 3$ konstrukciót is alkalmaznak.

A forgórész Z_r fogszáma szerint a konstrukciók két csoportja különböztethető meg. A csoportosításhoz szükség van a villamos forgógépek alapegységeként is számon tartott frekvenciafeltételre, speciálisan (2.2) szerint léptetőmotorokra megfogalmazva:

$$\Delta\alpha_1 = \Delta\alpha_2 + \Delta\alpha \quad (2.2)$$

ahol $\Delta\alpha_1$ az állórész mágneses mező elfordulása, $\Delta\alpha_2$ a forgórész mágneses mező elfordulása a forgórészhez képest és $\Delta\alpha$ a forgórész elfordulása. A VR léptetőmotorokhoz hasonlóan a gép forgórésze az állórész mező léptetésével kényszeríthető elfordulásra.

$\Delta\alpha_2 = 0^\circ$ esetén a forgórész elfordulása és az állórész mező elfordulása megegyezik, így „szinkron jellegű” KRG-ről beszélhetünk, amelyre $Z_r = 2p$ jellemző. Az ilyen konstrukciókat – mint pl. 6/2 – extrém nagy fordulatszámú hajtásokban célszerű alkalmazni. A gyakorlatban elterjedtebb „aszinkron jellegű” KRG-ekre $\Delta\alpha_2 \neq 0^\circ$ és (2.3) vonatkozik.

$$Z_r = Z_s \pm 2p \quad (2.3)$$

A vázolt csoportosítási módszer legfőbb előnye, hogy „aszinkron jellegű” konstrukciók esetében a *slip* fogalmának (2.4) módon történő bevezetésével egyértelműen meghatározható a gerjesztési sorrend és a tengely forgásirányának viszonya.

$$slip = \frac{n_2}{n_1} = \frac{Z_s}{Z_r} \quad (2.4)$$

Az aszinkron gépes analógiából eredően n_1 az állórész mező fordulatszámát, n_2 a forgórész mező forgórészhez képesti fordulatszámát jelöli. Ha $slip < 1$, akkor a forgórész az állórész mezővel megegyező irányban forog; $slip > 1$ esetén pedig a gerjesztési sorrenddel ellentétes forgásirány alakul ki. Az 2.1. ábrán látható 8/6 konstrukció esetében $slip = 1,33$, vagyis a forgórész az állórész mezővel ellentétes irányba, az állórész mező léptetésének 1/3 részével fordul el.

VR léptetőmotorok további fontos jellemző az (2.5) szerinti S lépésszám,

$$S = m^* Z_r \quad (2.5)$$

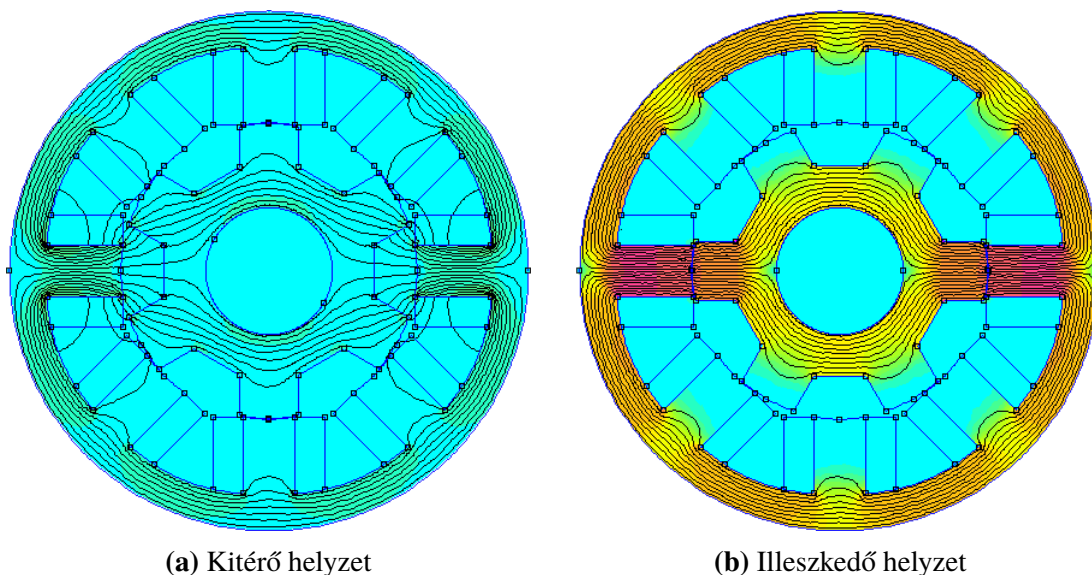
amely KRG esetében is megadja a körülforduláshoz szükséges kommutációk számát.

2.2. Az öninduktivitás és a nyomatékképzés kapcsolata

A mágneses ellenállás változásának hatását a villamos mennyiségek oldaláról az öninduktivitás segítségével írhatjuk le, melyet az adott gépet jellemző topológia és az áramerősség egyaránt befolyásol. A „topológia” kifejezés alatt a geometria, az anyagi jellemzők és a tekercselés együttes struktúrája értendő. Az öninduktivitás topológiától való függése végső soron a forgórész pozíciójától való függésnek feleltethető meg, ezért jelölésére az $L(\alpha, i)$ kifejezés használatos. Az adott gépet jellemző teljes karakterisztikát öninduktivitás-profilnak nevezik. Az irányítás szempontjából egy KRG-ről a legtöbb információt a $\psi(\alpha, i)$ fluxuskapcsolódás-profil és az $m(\alpha, i)$ a nyomaték-profil hordozza.

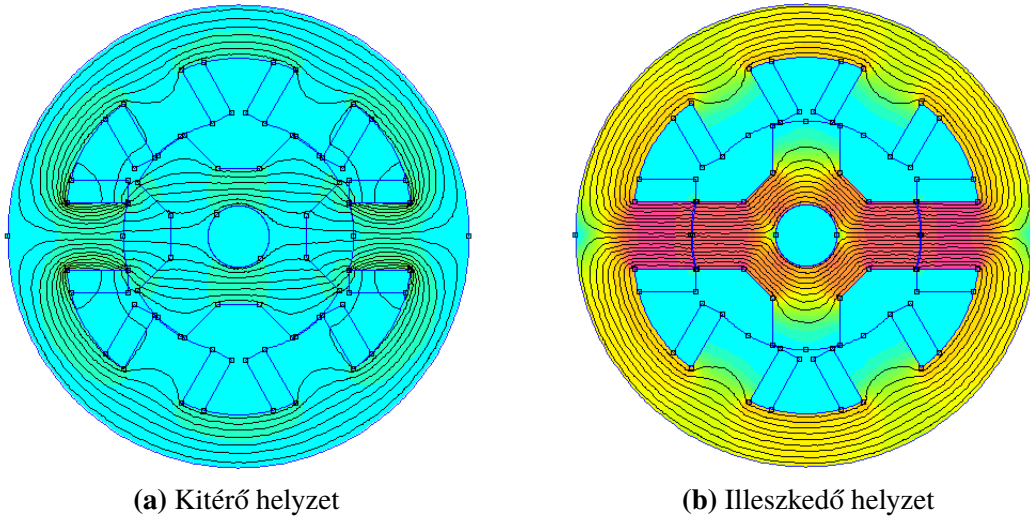
A vizsgálat a továbbiakban legyen megszorítva az ún. reguláris konstrukciókra. Az ilyen KRG-ekre [13, 49. o.] szerint az jellemző, hogy az állórész és a forgórész pólusai a középvonalukra nézve szimmetrikusak és elosztásuk egyenletes a gép kerülete mentén. A gyakorlatban szinte csakis ilyen KRG-eket alkalmaznak. Az irreguláris konstrukciók általában $m^* = 1, 2$ fázisszámúak.

A pozíciótól függően valamely fázis öninduktivitása a legnagyobb légrésű (kitérő) helyzethez tartozó L_{min} és a legkisebb légrésű (illeszkedő) helyzethez tartozó L_{max} között változik. Az illeszkedő helyzet egyben stabil egyensúlyi pont is, ahol a fogfejek telítődésre hajlamosak. Az 2.2. ábra egy 8/6 konstrukción, a 2.3. ábra egy 6/4 konstrukción keresztül mutat példát az erővonalak szélsőséges helyzetekben történő záródására, egyfázisú gerjesztés esetén, melegebb színnel a nagyobb fluxussűrűséget jelölve.



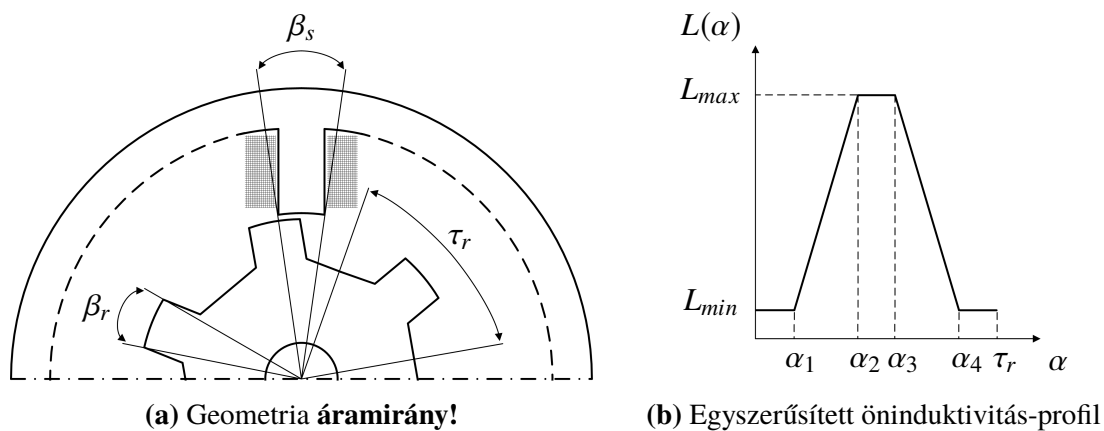
2.2. ábra Erővonalak záródása a szélsőséges helyzetekben, 8/6 konstrukció

A szélsőséges helyzetek ismétlődése miatt az öninduktivitás változása $\tau_r = 360^\circ/Z_r$ forgórész pólusosztás szerint periodicitással rendelkezik.



2.3. ábra Erővonalak záródása a szélsőséges helyzetekben, 6/4 konstrukció

Az öninduktívitás-profil jellegét az 2.4.(a) ábrán feltüntetett β_s állórész pólusszög és β_r forgórész pólusszög is jelentősen befolyásolja. Az áramerősségtől való függés elhanyagolásával felrajzolható az egyszerűsített öninduktívitás-profil, amelyet az 2.4.(b) ábra szemléltet $\beta_r > \beta_s$ pólusszög-viszony esetére.



2.4. ábra A geometria és az öninduktívitás-profil kapcsolata

Az egyszerűsített profil a vasmag telítődését elhanyagolja, az $\alpha_1:\alpha_2$ csökkenő légrésű és az $\alpha_3:\alpha_4$ növekvő légrésű szakaszokat szimmetrikusnak feltételezi. Az elérhető maximális nyomaték jelentősen függ L_{max} és L_{min} arányától.

Szimmetrikus tekercselést feltételezve, illetve a fázisok közötti kölcsönhatást (mágneses csatolást) elhanyagolva a KRG minden fázisa ugyanazzal a profillal jellemezhető. KRG esetében a mágneses csatolás elhanyagolása jó közelítés kis póluspárszámok esetén: a 2.2.(b) ábrán megfigyelhető, hogy a gerjesztetlen fázisokhoz tartozó fogak és a forgórész fogai között nem fut erővonal, még fedésbe került fogak esetén sem.

Az áramerősség növekedésével a valóságban csökken az illeszkedő helyzetben elérhető öninduktivitás értéke, míg kitérő helyzetben szinte változatlan. A pólusosztáson belül értelmezett $\alpha_1 \dots \alpha_4$ szakaszok végpontjai [9] alapján, az (2.6)...(2.9) összefüggések segítségével határozhatóak meg. A szakaszok hossza befolyásolja a nyomatékképzést.

$$\alpha_1 = \frac{1}{2} [\tau_r - (\beta_s + \beta_r)] \quad (2.6) \quad \alpha_3 = \alpha_2 + (\beta_r - \beta_s) \quad (2.8)$$

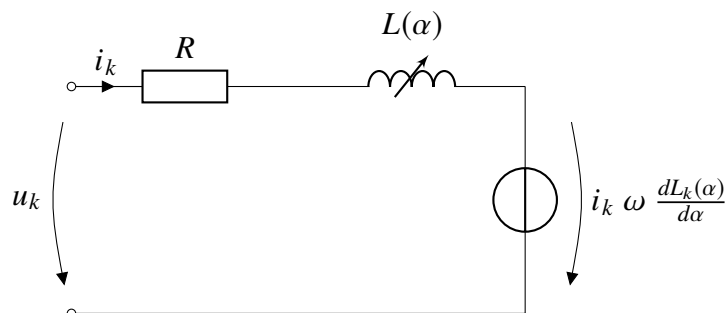
$$\alpha_2 = \alpha_1 + \beta_s \quad (2.7) \quad \alpha_4 = \alpha_3 + \beta_s \quad (2.9)$$

Az öninduktivitás és a nyomatékképzés közötti kapcsolat feltárásához meg kell vizsgálni a KRG energiaátalakításának folyamatát. Fogazott kialakításából és koncentrált tekercseléséből fakadó mágneses aszimmetria miatt az indukció térbeli eloszlása nem szinuszos, ezért a váltakozó áramú gépeknél bevált Park-vektoros módszer nem használható.

A [10]-ben is alkalmazott munkatétel bármilyen elektromágneses elven működő forgógépre érvényes, így az időegység alatt bekövetkező energiaváltozás (2.10) módon kifejezhető a teljesítményekkel:

$$p_t = p_v + p_e + p_m \quad (2.10)$$

ahol p_t a tápláló, p_v a veszteségi, p_e az elektromágneses és p_m a mechanikai teljesítményt jelöli. Az öninduktivitás és a nyomatékképzés közötti alapvető összefüggések az öninduktivitás áramerősségtől való függésének és a fázisok közötti kölcsönhatás elhanyagolásával határozhatóak meg. Ebben az esetben a KRG k -adik fázisára, a forgórész valamely α pozíciójában az 2.5. ábra szerinti helyettesítő kép vonatkozik.



2.5. ábra A k -adik fázis villamos helyettesítő képe

Fontos megemlíteni, hogy valóságos esetben a KRG öninduktivitásnak pozíciótól és áramerősségtől való függése miatt általános helyettesítő kép nem létezik. [14, 4. o.] úgy fogalmaz, hogy a helyettesítő kapcsolás egy soros RL-kör, illetve egy belső feszültséget és ellenállást tartalmazó áramkör között változik.

Az 2.5. ábra szerinti egyszerűsített esetben, a k -adik fázis kizárólagos gerjesztésével és tisztán rezisztív veszteségi összetevőt feltételezve a teljesítménymérleg (2.10) alapján (2.11) szerint alakul.

$$u_k i_k = i_k^2 R_k + i_k L_k(\alpha) \frac{di_k}{dt} + i_k^2 \omega \frac{dL_k(\alpha)}{d\alpha} \quad (2.11)$$

Mivel az induktivitás nem állandó, ezért p_e és p_m nem különválasztható mennyiségek. Az elektromágneses energiát kifejező $w_e = \frac{1}{2}Li^2$ összefüggés felhasználásával (2.12) adódik az egyfázisú gerjesztés által kifejezhető nyomatéokra.

$$M_k = \frac{1}{2} i_k^2 \frac{dL_k(\alpha)}{d\alpha} \quad (2.12)$$

Az öninduktivitás áramerősségtől való függésének elhanyagolásával felírt (2.12) a valóságban csak egy nem telítődő, lineáris vasmag esetében lehetne általános összefüggés. Egy ilyen konstrukció gyakorlati megvalósításához például olyan nagy légrésre volna szükség, amely jelentősen lerontaná a térfogatra vetített fajlagos nyomaték értékét, emellett a teljesítményelektronika túlméretezését igényelné [8, 19. o.]. A nem telítődő KRG tehát egy elméleti eszköz az öninduktivitás és a nyomaték közötti kapcsolat feltárásához, mivel (2.12) a KRG-ek néhány fontos tulajdonságát fejezi ki:

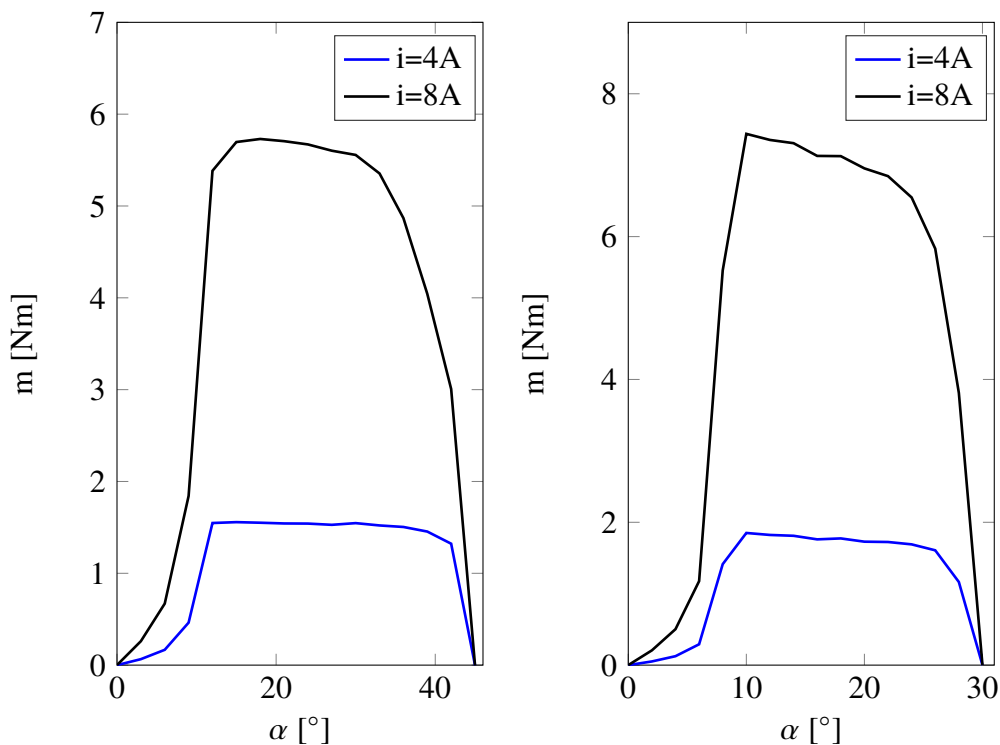
- a nyomaték iránya független az áram irányától;
- az előállítható nyomaték mindenképpen függ a forgórész aktuális pozíciójától;
- motoros üzem az $\alpha_1:\alpha_2$, növekvő öninduktivitású szakaszon valósítható meg;
- féküzem az $\alpha_3:\alpha_4$, csökkenő öninduktivitású szakaszon lehetséges.

A nyomaték előjelének (irányának) pozíciótól való függése okozza a KRG-ek esetében az illesztett táplálás igényét. Bár a nyomaték iránya független az áram irányától, a járműipari alkalmazásoktól elvárt regeneratív féküzem megvalósításához mindenképp bipoláris táplálásra van szükség, ahogyan azt [11, 214. o.] is tárgyalja.

Az 2.4.(b) ábra és az (2.12) összevetésével felismerhető, hogy a nyomatékképzés és a kommutációs jelenségek szempontjából a $\beta_r > \beta_s$ tulajdonságú konstrukció előnyös. Ennek magyarázata, hogy az $\alpha_2:\alpha_3$ konstans öninduktivitású szakaszon leépíthető az adott fázis által létrehozott mágneses tér egy bizonyos része, így csökkenthető a létrejövő fékkehézés. A fogak szimmetriatengelyének egybeeséséhez közeledve a vezető fázis által kifejezhető nyomaték értéke hirtelen csökken, a mágneses tér leépítéséhez rendelkezésre álló idő függ a gép fordulatszámától. A lemágnesezési folyamat ellentétes polaritású feszültséget kapcsolva gyorsítható, tehát a bipoláris táplálás ebből a szempontból is indokolt.

Az (2.8) alapján belátható, hogy $\beta_r = \beta_s$ esetén $\alpha_3 - \alpha_2 = 0$, vagyis az illeszkedő helyzet csak pillanatszerűen áll fenn a forgás közben, az induktívitas profil ezáltal trianguláris. Mivel a tekercselés árama nem szüntethető meg pillanatszerűen, ezért $\beta_r = \beta_s$ megoldás már a konstrukció szintjén megnöveli a gép nyomatékklütketésre való hajlamát.

Az illesztett táplálás megvalósításához tehát a forgásirány és gerjesztési sorrend viszonyának ismeretében abban a fázisban kell kialakítani a megfelelő áramalakot, amellyel a legnagyobb kívánt előjelű nyomaték fejthető ki. A kiválasztás történhet például az adott gépre jellemző nyomaték-profil alapján, amellyel az aktuális pozíció függvényében meghatározható a kívánt nyomaték előállításához szükséges áramerősség. A nyomaték-profil ugyancsak $\tau_r = 360^\circ / Z_r$ forgórész pólusosztás szerint mutat periodicitást. Az $\alpha_1:\alpha_2$ és $\alpha_3:\alpha_4$ szakaszok szimmetriája esetén elegendő a profilokat $\frac{\tau_r}{2}$ fél pólusosztásra meghatározni. Az 2.6. ábra különböző KRG konstrukciók nyomatékképzését szemlélteti.



(a) 6/4, [4, 48. o.] szerinti geometria

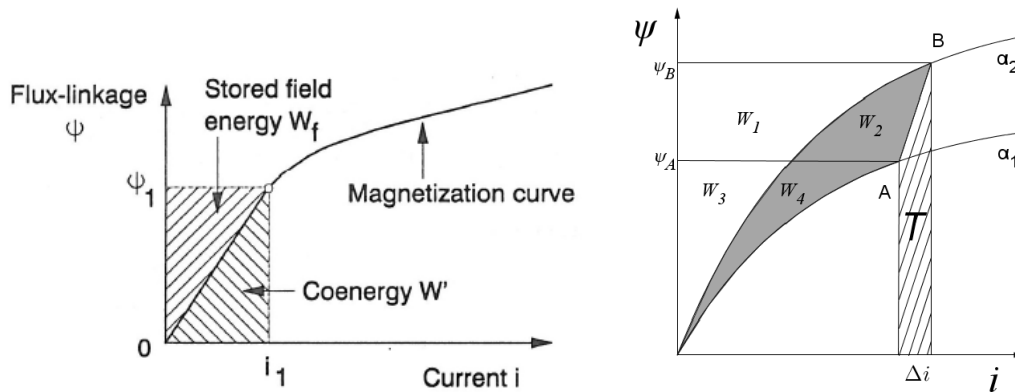
(b) 8/6, [7, 532. o.] szerinti topológia

2.6. ábra Részleges nyomaték-profil eltérő konstrukciók esetén

A 2.6. ábrán szereplő konstrukciók esetében megfigyelhető, hogy kétszeres áramerősség hatására közel négyszeres nyomaték jön létre, vagyis a gépek (2.12) szerinti módon, lineáris tartományban üzemelnek. A pozíció függvényében mutatott ugrásszerű változásai miatt különösen fontos a nyomaték-profil és az aktuális pozíció pontos ismerete.

2.3. Általános nyomatékképzés leírása

Az általános nyomatékképzés leírásához szükség van a W' koenergia és a W_f tárolt energia definíciójára. A koenergia 2.7.(a) ábrának megfelelően $W' = \int_0^{i_1} \psi di$ módon számítható, a pozíciótól függetlenül mindig a mágnesezési görbe alatti területtel egyezik.



(a) Energiamennyiségek definiálása [8, 15. o.] (b) Energiaviszonyok $\psi - i$ síkon [4, 13. o.]

2.7. ábra A nyomatékképzés szemléltetése energiák segítségével

Általános esetben – ha $\psi \neq \text{áll.}$ és $i \neq \text{áll.}$ – a 2.7.(b) ábra mutatja az energiaviszonyokat, ahol α_1 egy nagyobb légrésű, α_2 egy kisebb légrésű mágneses körhöz tartozó mágnesezési görbéket reprezentálja. Feltételezve, hogy az α_1 és α_2 pozíciók közötti átmenet az AB-szakaszon történik, felírható a (2.13) szerinti ΔW_v betáplált villamos energia:

$$\Delta W_v = W_1 + W_2 \quad (2.13)$$

amelynek hatására (2.14) szerint a tárolt energia is megváltozik:

$$\Delta W_f = W_{fB} - W_{fA} = (W_1 + W_3) - (W_3 + W_4) = W_1 - W_4. \quad (2.14)$$

A mechanikai munkavégzésre fordítódó energia (2.15) módon írható:

$$\Delta W_m = \Delta W_v - \Delta W_f = W_2 + W_4 \quad (2.15)$$

amely megegyezik az α_1 és α_2 pozíciók mágnesezési görbéi által közrefogott területtel:

$$\frac{\Delta W_m}{\Delta \alpha} = \frac{\Delta W' - T}{\Delta \alpha} = \frac{\Delta W'}{\Delta \alpha} - \frac{\psi_A + \psi_B}{2} \frac{\Delta i}{\Delta \alpha} \quad (2.16)$$

A pozíció infinitezimális változására ψ_A és ψ_B egy közös ψ -hez tartanak, a nyomaték:

$$M = \frac{\partial W'}{\partial \alpha} - \psi \frac{\partial i}{\partial \alpha} \quad (2.17)$$

3. Topológia-elemző rendszer összeállítása

3.1. Motiváció

A KRG széleskörű alkalmazásához, elterjedéséhez olyan leírási módszerre van szükség, amely lehetővé teszi az adott konstrukció sajátos tulajdonságainak figyelembevételét. Erre a feladatra a linearizált összefüggések csak közelítő jelleggel alkalmasak. Egy konstrukciók egyediségét, szigorúbban véve a fluxuskapcsolódás- és nyomaték-profil pozíciótól és áramerősségtől való függését részletesen feltárva, az így nyert többletinformáció felhasználásával lehetőség nyílik az üzem közben jelentkező nyomatékklütketés és zajkibocsátás csökkentésére. Bizonyos (pl. fázisszámra és teljesítményszintre vonatkozó) megkötések mellett kivitelezhető válik a forgógép és digitális hajtásirányítás szétcsatolása, illetve utólagos összekapcsolása is. A telítés hatásának figyelemvétele és a nemlineáris tartományon való üzemeltetés a teljesítményelektronika jobb kihasználásának érdekében is célszerű.

A gépspecifikus profilok mérési úton történő meghatározásához mágneses érzékelőkre, nagy nyomaték kifejtésére alkalmas szervóhajtással ellátott mérőpadra, mérésadatgyűjtő eszközökre és kiértékelő szoftverre, illetve emberi felügyeletre volna szükség.

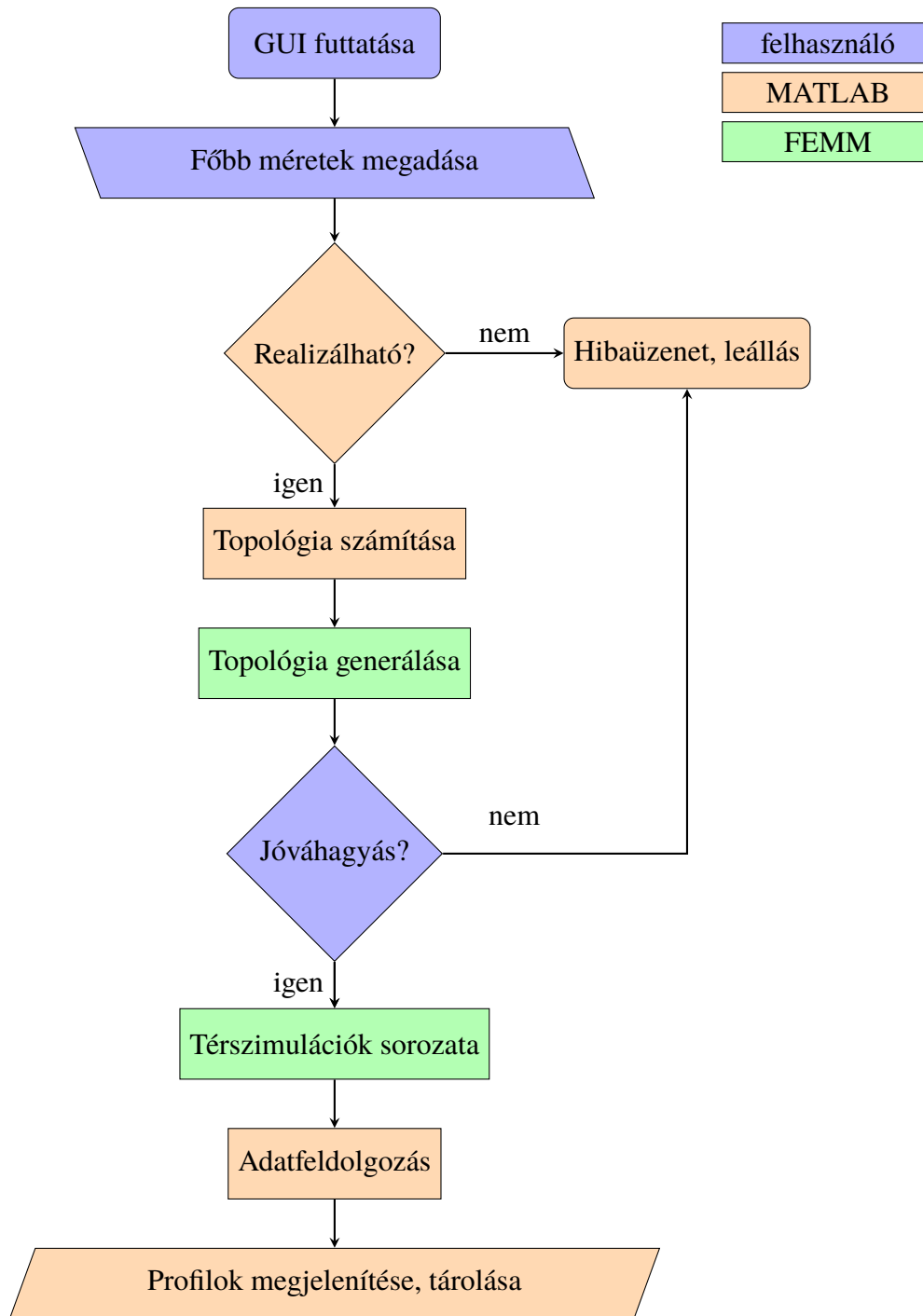
Egy konstrukció főbb méretei alapján elvégezhetőek olyan térszimulációs vizsgálatok, amelyek kellő részletességű információval láthatják el a hajtásirányítás tervezőjét. A profilok eltárolása többdimenziós keresőtáblázat formájában történhet. Az összeállított topológia-elemző rendszer fő célja ezen táblázatok leképezése.

3.2. A rendszer felépítése és működése

A topológia-elemző rendszer szoftveres eszközei és azok főbb feladatai:

- MATLAB R2014a (vezérlés, topológia számítása, adatkezelés);
- FEMM v4.2 (topológia leképezése, térszimuláció);
- OctaveFEMM v1.2 és Lua szkriptnyelv (kétirányú kommunikáció).

A topológia-elemző rendszer teljes működése MATLAB-on keresztül vezérelt, a FEMM által végzett szimuláció a háttérben futnak. A kétirányú kommunikációt az OctaveFEMM beépülő modul teszi lehetővé, amely [12, 2. o.] szerinti módon tehető kompatibilissá a MATLAB környezettel. A kommunikáció vezérlése a FEMM saját, ún. Lua szkriptnyelven történik. Felhasználói interakciót csak az adatbevitel és a generált topológia jóváhagyása kíván. A felhasználói jóváhagyásra, mintegy megerősítésként van szükség, hogy elkerülhetőek legyenek a téves adatbevitel, de egyébként realizálható geometria alapján végzett felesleges számítások. A rendszer sorrendi működését az 3.1. ábra szemlélteti.

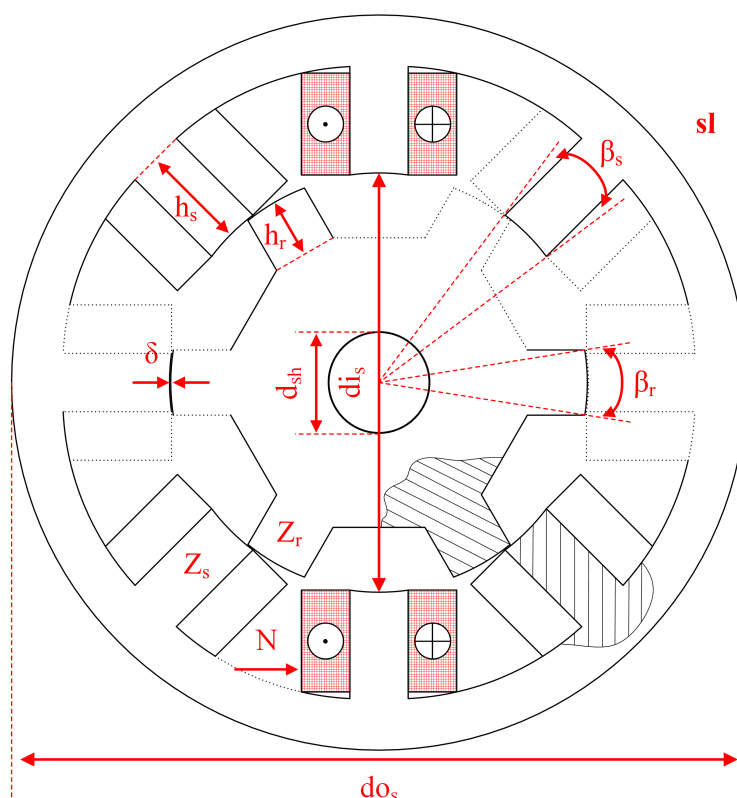


3.1. ábra A topológia-elemző rendszer sorrendi működése

A 3.1. ábrán eltérő szín jelöli az egyes folyamatok szereplőit. A grafikus felhasználói felület (GUI) indítását követően a felhasználó feladata a fizikai konstrukció előre meghatározott méreteinek megadása. A realizálhatósági vizsgálatot a MATLAB végzi, amely szükség esetén jelzi és megnevezi a hibát a konzolon keresztül. Ha a generált topológiát a felhasználó jóváhagyja, nincs több feladata. A térszimulációkat a FEMM, az adatok feldolgozását a MATLAB végzi, az adatok munkapontként kerülnek átadásra.

3.3. Főbb méretek

A topológia előállításának módja függ az adatbevitel fejlettségétől, bonyolult geometria és/vagy különböző konstrukciók összehasonlítása esetén különösen időigényes feladat lehet. Célszerű tehát a topológiát automatizált módon, például 3.2. ábrán látható főbb méretek és egyéb jellemzők alapján előállítani. A fizikai gépben és a szoftveresen generált topológiában ezek a mennyiségek azonosak lesznek. A vizsgálatnak alávethető konstrukciókkal szembeni követelmény a reguláris felépítés. A topológia-elemző rendszer aktuális verziója a következő adatokat várja bemenetként:



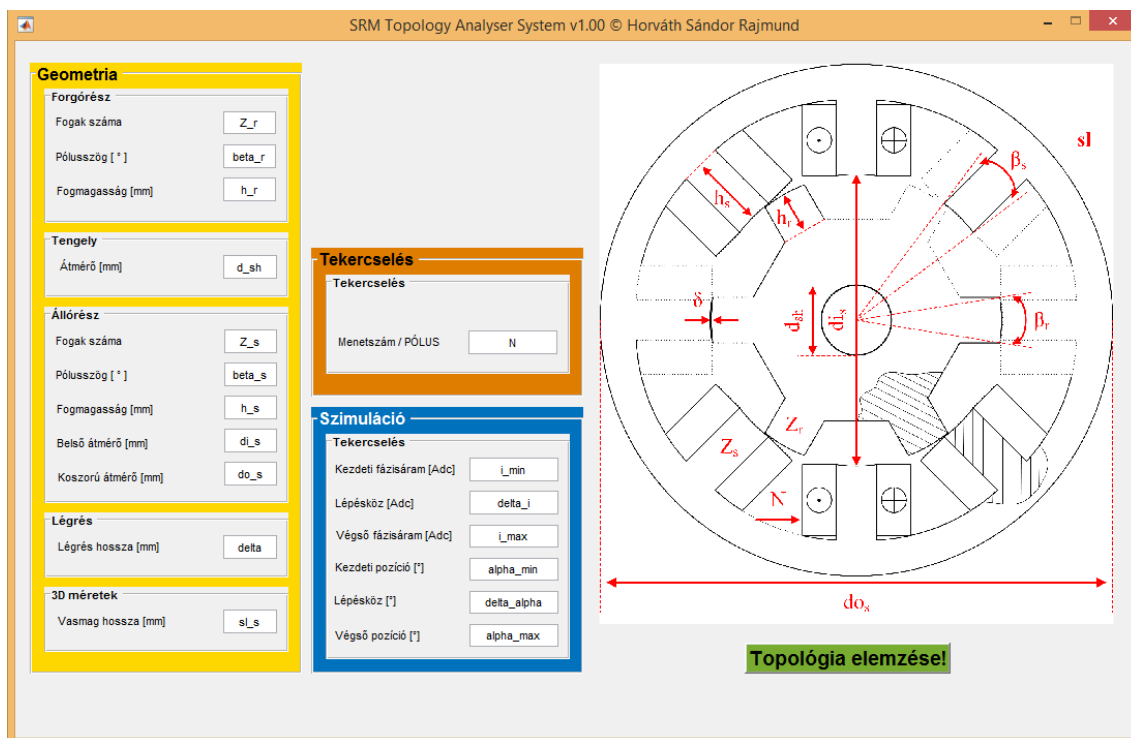
3.2. ábra A topológia előállításához szükséges főbb méretek

1. Forgórész méretei: Z_r – fogak száma; β_r – pólusszög; h_r – fogmagasság.
2. Tengely méretei: d_{sh} – tengely átmérő.
3. Állórész méretei: Z_s – fogak száma; β_s – pólusszög; h_s – fogmagasság;
 d_{i_s} – furat átmérő; d_{o_s} – koszorú átmérő.
4. Légrés: δ – légrés mérete.
5. Tengelyirányú dimenzió: sl – lemezcsomag hossza.
6. Tekercselés: N – pólusonkénti menetszám.

A főbb méreteket például [15, 24. o.] is hasonló módon tárgyalja, ezek egy KRG topológia legfontosabb jellemzői, alapvetően befolyásolják a fluxuskapcsolódás- és nyomaték-profil.

3.4. Adatbevitel

Az egyszerűbb adatbevitelt szolgálja az 3.3. ábrán látható grafikus felhasználói felület (GUI), amely lehetővé teszi, hogy az alprogramok működését nem ismerő felhasználó is kezelhesse a topológia-elemző rendszert.



3.3. ábra Az adatbeviteli feladatot szolgáló GUI

A topológia előállításához szükséges adatokon kívül ezen a felületen kell megadni a térszimuláció egészértékű áram- és pozíciótartományát, a vonatkozó lépésközökkel egyaránt. A topológia-elemző rendszer aktuális verziójában a $\Delta i = 1 \text{ A}$ és $\Delta \alpha = 1^\circ$ a lehetséges legkisebb egész értékű lépésköz.

3.5. Topológia számítása

Az adott gépet jellemző profilok számítógéppel támogatott meghatározásához mindenkéltől szükség van a topológia előállítására, amely három lépésből áll:

1. geometria szerkesztése: a gép tengelyirányú keresztmetszetének leképezése;
2. tekercselés kialakítása: menetszámok, huzalátmérő és kapcsolások megadása;
3. anyagi jellemzők felvétele: lemezcsomag (mágneselési görbe) kiválasztása.

A topológia előállítása néhány másodpercbe telik, a futásidő arányos a fogak számával.

3.6. Geometria szerkesztése

A 3.2. ábrán feltüntetett fizikai méretekből csúcspontok, élek, ívek származtathatók. Ehhez gyakorta szükség van a polár és derékszögű koordináta-rendszerek közötti átjárásra, egyéb koordinátagéometriai műveletekre, amiket a MATLAB hatékonyan támogat. Kihasználható a reguláris konstrukció geometriai szimmetriája, vagyis elegendő az elemi alakzatokat meghatározni, majd azokat sokszorosítani.

A geometria szerkesztésének első lépése a betáplált adatok konzisztenciájának ellenőrzése. Téves adatok megadása esetén előfordulhat, hogy a rendszer nem realizálható geometria előállítására kap utasítást. Ilyen eset lehet például, hogy a betáplált adatok alapján forgórész forgás közben hozzáérne az állórészhez. A felesleges műveletek megelőzésének érdekében ezért a MATLAB megvizsgálja a betáplált adatokat, majd a geometriai konzisztencia megsértését a konzolon hibaiüzenettel jelzi és a program leáll.

A betáplált adatok alapján további mennyiségek (pl. a fogak középvonala közötti szögeltérés; fogak talppontjainak sugara) származtathatóak, amelyekből meghatározható a fogak csúcspontja. Az összes számítás a MATLAB-ban kerül végrehajtásra. A fogak ismert pozícióban történő megszerkesztésével, majd sokszorozásával előáll a geometria.

3.7. Tekercselés kialakítása

Egy állórész tekercselését a fogak két oldalán szimmetrikusa elhelyezett, azonos méretű felületek anyagi és áramköri jellemzőinek megadásával alakítjuk ki.

Anyagi jellemzőnek FEMM-ben a rézhuzal átmérője minősül. Áramköri jellemző a pólusonkénti menetszám, illetve az azonos fázishoz tartozó tekercsek kapcsolása. Valamely tekercselés kezdete és vége a FEMM-ben eltérő menetszám-előjellel különböztethető meg. Alapértelmezésként az egy fázishoz tartozó tekercsek soros kapcsolása került beállításra.

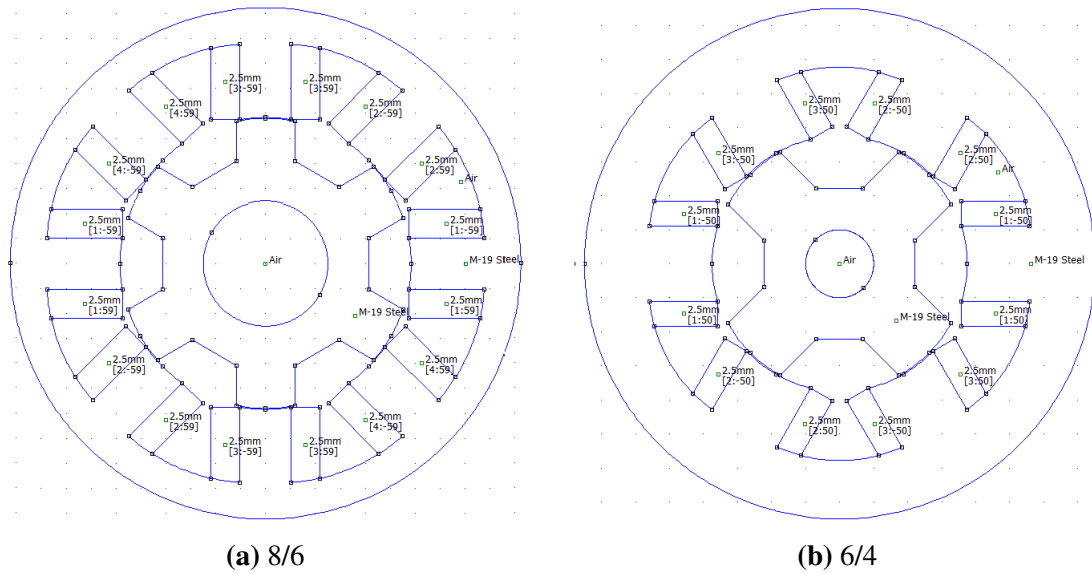
A tekercselés kiosztását minden esetben meg kell előznie az áramkörök definiálásának. Valamely fázis árama az adott munkapont szimulációja előtt kerül beállításra.

3.8. Anyagi jellemzők felvétele

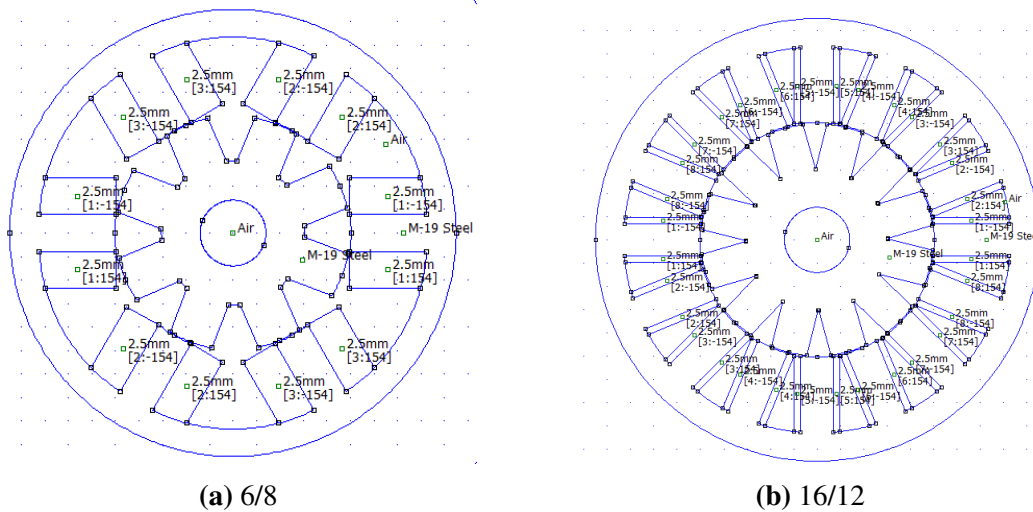
A FEMM előre definiált anyagi jellemzői közül az általánosan alkalmazható anyagtípusok rendelődnek hozzá a geometriához és tekercseléshez:

- állórész, forgórész: M-19 Si-ötözött elektromágneses acél (dinamólemez)
- légrész, tengely és külső környezet: levegő
- tekercselés: metrikus skálázású vörösréz, 2,5 mm huzalátmérő.

Az anyagi jellemzők hozzárendelésével előállításra kerül a topológia, amelyre a 3.4. ábra és 3.5. ábra mutat néhány példát. A topológia automatizált módon történő előállítása már önmagában is jelentős időmegtakarítás.



3.4. ábra Példa topológiák I.



3.5. ábra Példa topológiák II.

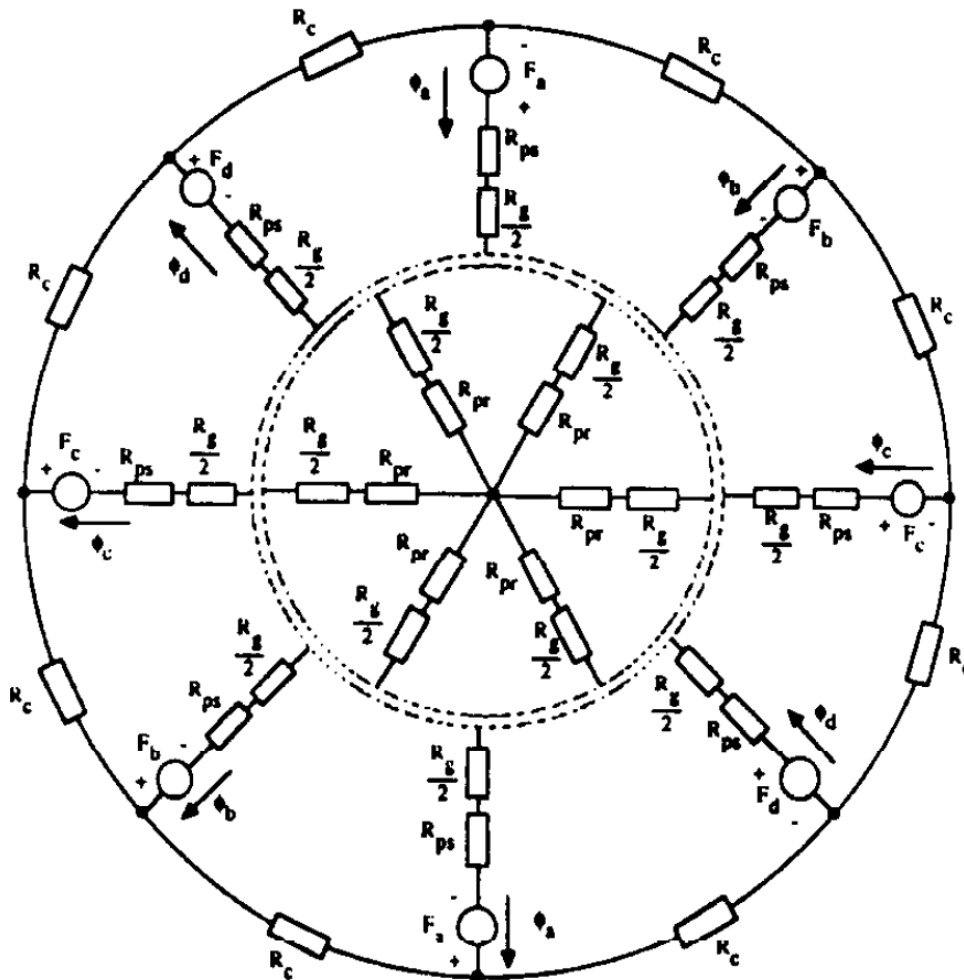
3.9. Térszimuláció

A FEMM olyan mágneses problémák megoldását támogatja, ahol az eltolási áram hatása elhanyagolható. A villamos gépekben, ipari frekvencián lejátszódó lassú változások tipikusan ilyen problémák: az időben változó villamos tér hatása elhanyagolható az aktív részekben és a szigetelésekben egyaránt.

Egy telítődő vasanyagban a permeabilitás nem állandó, a telítődés növelésével az anyag mágnesezhetősége erősen romlik, minőségileg egyre inkább megközelíti a levegő tulajdonságait. A FEMM ezt a nemlinearitást is kezelni tudja. A beállított peremfeltétel Dirichlet-típusú, $A = 0$ vektorpotenciál az állórész házán kívül.

A térszimuláció az előzetesen beállított egészértékű áram -és pozíciótartományon, munkapontonként kerül végrehajtásra, bemeneteként az előállított topológia szolgál.

Elhanyagolva a szórt fluxust, amely kölcsönhatást hozna létre a szomszédos pólusok között, felrajzolható egy munkapont egyszerűsített mágneses helyettesítő képe, amelyet egy általános 8/6 konstrukció esetére a 3.6. ábra szemléltet.



3.6. ábra Egy munkapont egyszerűsített mágneses helyettesítő képe [16, 3. o.]

Reguláris KRG konstrukciók esetében a mágneses ellenállások a 3.6. ábra szerinti módon, szimmetrikusan felbonthatóak a kerület mentén. Egyfázisú gerjesztés esetén, a k -adik fázis \mathcal{F}_k ($k = a, b, c, d$) gerjesztése által létrehozott ϕ_k fluxus az \mathcal{R}_{ps} állórész pólustest reluktanciákat, \mathcal{R}_g légrész reluktanciákat, \mathcal{R}_{pr} forgórész pólustest reluktanciákat és \mathcal{R}_c koszorú reluktanciákat látja maga előtt.

Akárcsak a 2.5. ábra szerinti villamos helyettesítő kép, a mágneses helyettesítő kép elemértékei sem állandóak. (Az ok-okozati viszony valójában fordított.) \mathcal{R}_g függ az állórész és forgórész fogai közötti légréstől. Belátható, hogy a pólusfejek telítődésével a pólustestek reluktanciája is változik. Az analitikus megoldás lépéseit [16] részletesen bemutatja.

4. Összehasonlító vizsgálat

Az összehasonlító vizsgálatok a topológia-elemző rendszer működésének, eredményeinek hitelesítése, illetve a bizonytalanságok feltérképezése érdekében kerültek elvégzésre. A bemutatásra kerülő vizsgálat a [7, 532. o.] -ban található főbb méretek alapján történt.

A választást az indokolta, hogy a KRG-ek mágneses szimulációjával kapcsolatos szakirodalmakban a közölt eredmények reprodukálásához szükséges adatok sok esetben hiányosak. Ezzel szemben az említett 7,5 kW teljesítményű, 8/6 felépítésű Oulton konstrukció már számos vizsgálat tárgyát képezte, így részletesen dokumentált. A vizsgálat eredményeinek bizonytalanságát csökkenti, hogy az eredeti és a szoftveresen generált topológiában a pólusfejek alakja megegyezik. A szimuláció időigényét a 4.1. ábra mutatja.

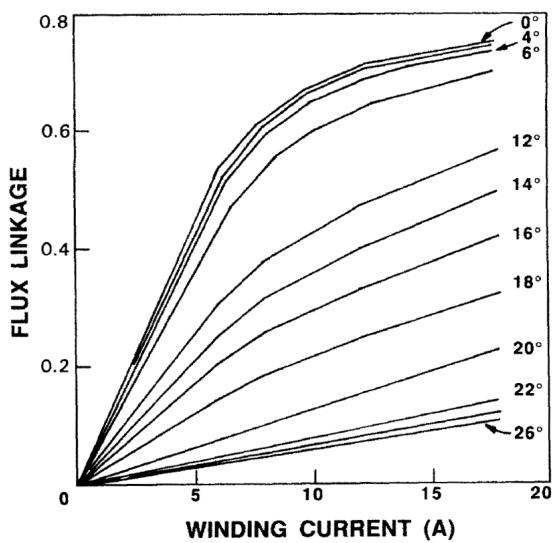
Function Name	Calls	Total Time	Self Time*	Total Time Plot (dark band = self time)
simulation	1	1377.045 s	1.006 s	
callfemm	2018	1374.317 s	1374.317 s	
mi_analyze	144	1092.794 s	0.008 s	
mo_savebitmap	144	118.103 s	0.004 s	
mo_groupselectblock	144	78.581 s	0.014 s	
mi_loadsolution	144	41.149 s	0.006 s	
mo_showdensityplot	144	17.617 s	0.024 s	
mo_blockintegral	144	8.844 s	0.009 s	

4.1. ábra A FEMM szimuláció főbb műveleteinek időigénye

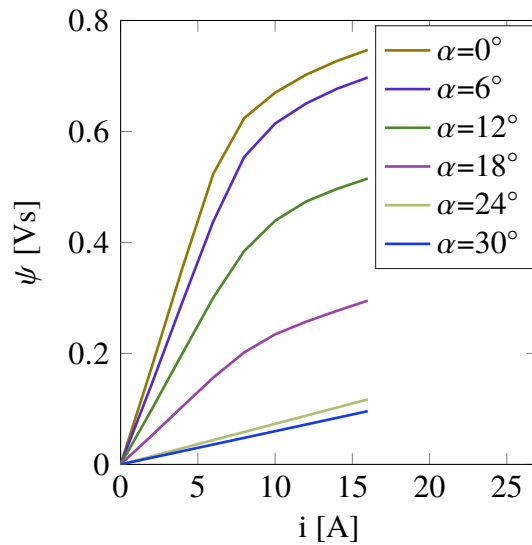
A vizsgálatok során $\alpha = 0^\circ$ referencia az illeszkedő helyzethez rögzített. A topológia-elemző rendszer [$i_{min} = 0 \text{ A} \div i_{max} = 16 \text{ A}$] és [$\alpha_{min} = 0^\circ - \alpha_{max} = 30^\circ$] tartományon, $\Delta i = 2 \text{ A}$ és $\Delta \alpha = 2^\circ$ léptékkal, azaz összesen 144 munkapontban vizsgálta meg betáplált adatok alapján generált problémát. A vizsgálat egyfázisú gerjesztéssel került végrehajtásra, a FEMM szimuláció teljes futásideje 23 perc volt. A rendszer működése gyorsítható a bitképek mentésének elhagyásával, a 144 munkapont erővonalképének eltárolásához 479 MB tárhely szükséges. A profilokat definiáló táblázatok mérete néhány kB.

4.1. Profilok

A fluxuskapcsolódásra vonatkozó profilok összehasonlítását az 4.2. ábra segíti. Megfigyelhető, hogy a fluxuskapcsolódás a légrés növekedésével csökken. A telítéses tartomány $\approx i = 10 \text{ A}$ közelében kezdődik az eredeti és a szimulált esetben is.



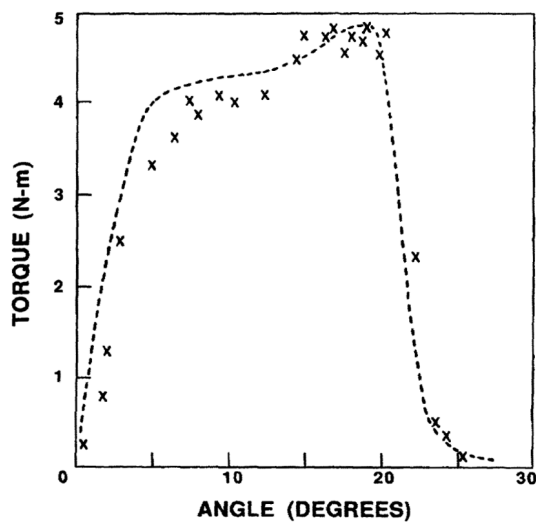
(a) [7, 532. o.] szerint



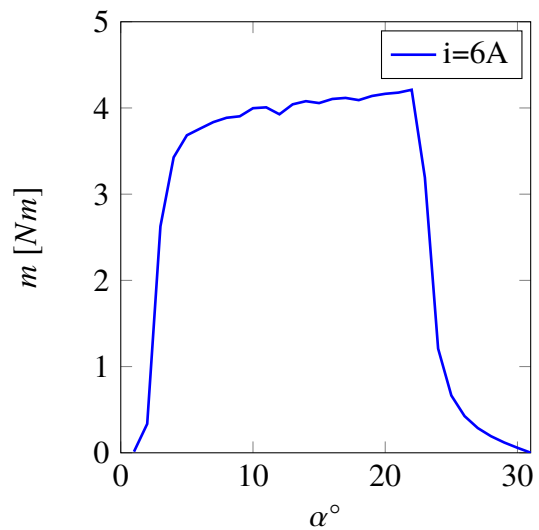
(b) Vizsgálat eredménye

4.2. ábra Fluxuskapcsolódás-profilok

A nyomatékot a pozíció függvényében a 4.3. ábra és a 4.4. ábra mutatja.



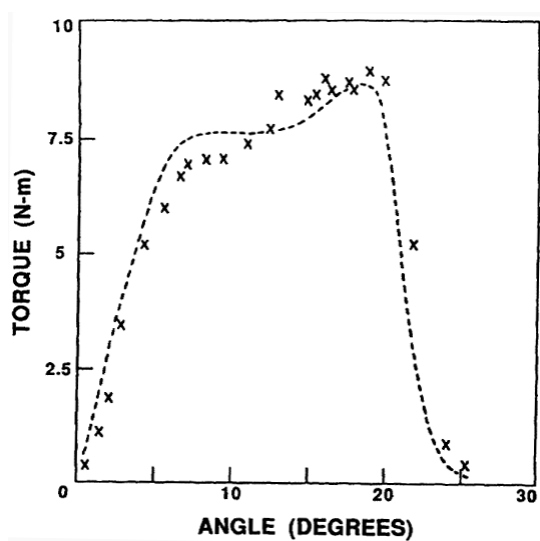
(a) [7, 532. o.] szerint



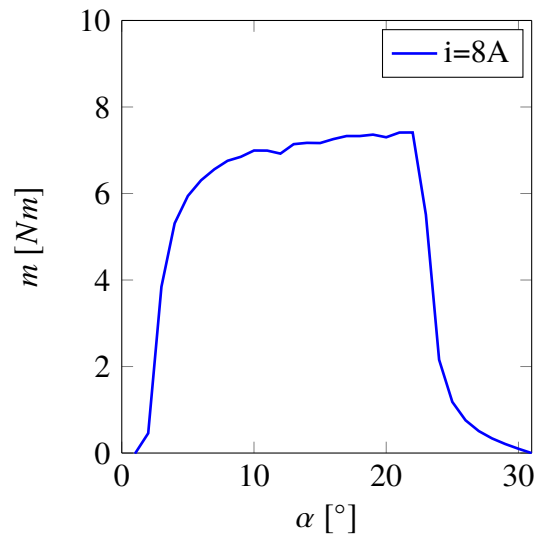
(b) Vizsgálat eredménye

4.3. ábra Nyomaték a pozíció függvényében, $i = 6 \text{ A}$ esetén

A nyomaték meredek változása mindkét esetben szembeűnő. Az elérhető maximális nyomaték közel azonos, az illeszkedő helyzet megközelítésével jelentkező eltérés leginkább a forgórész pólustalpai között lekerekítések elhanyagolásából származhat.



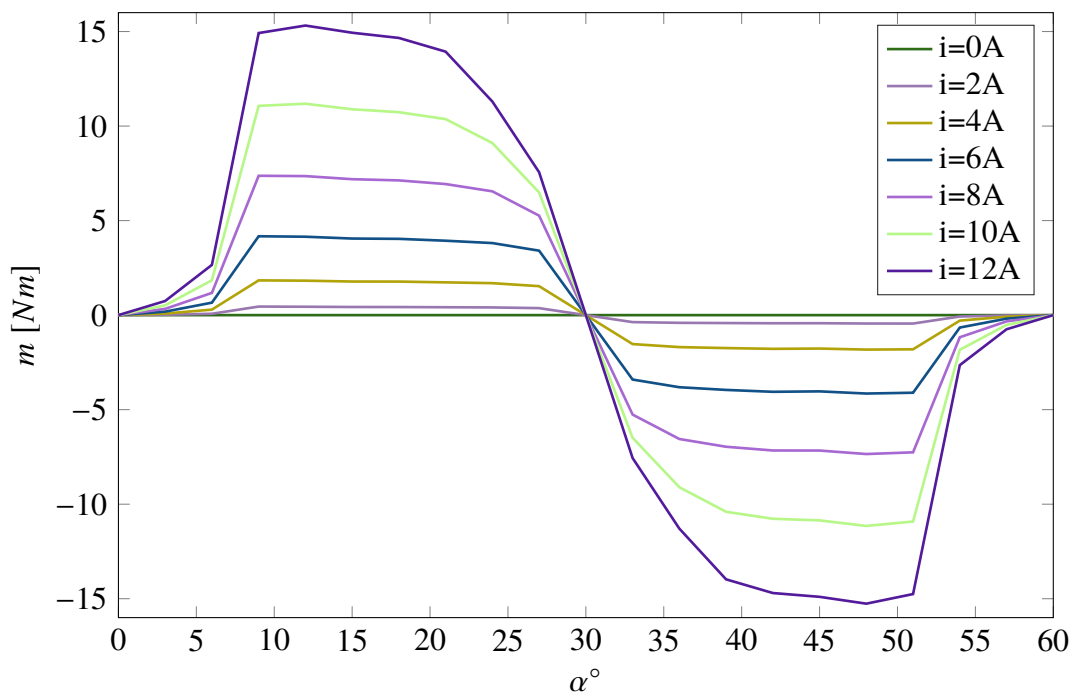
(a) [7, 532. o.] szerint



(b) Vizsgálat eredménye

4.4. ábra Nyomaték a pozíció függvényében, $i = 8 A$ esetén

Egy újabb vizsgálat keretében a teljes τ_p pólusosztásra vonatkozó nyomaték-profil is meghatározásra került, ezt a 4.5. ábra szemlélteti.



4.5. ábra Teljes nyomaték-profil

A 4.5. ábrán megfigyelhető a reguláris KRG konstrukciók tipikus tulajdonsága, miszerint a nyomaték $\tau_p/2$ -re előjelesen szimmetrikus. Ezt kihasználva jelentős szimulációs idő-takarítható meg. Az előállított adatok felhasználhatóak a hajtásirányítás paraméterezéséhez.

5. További feladatok, fejlesztési lehetőségek

Az összeállított KRG topológia-elemző rendszer aktuális verziója a statikus fluxuskapcsolódás- és nyomaték-profil meghatározására képes, a reguláris konstrukciókra korlátozva. A konstrukciók egyediségét kifejező jellemzők bővítésével, további vizsgálatok automatizálásával ez a rendszer géptervezési feladatok ellátására is felkészíthető.

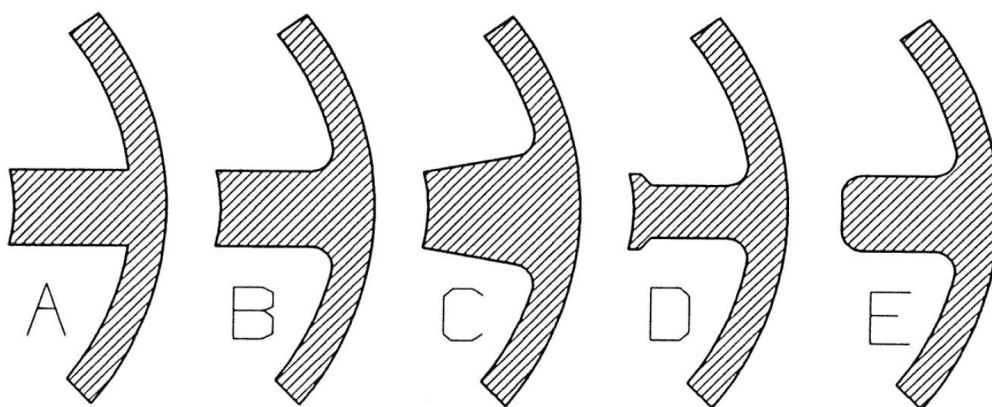
A topológia-elemző rendszer eredményeit bizonytalanság terheli, amelynek fő forrása az információhiány és a geometria leképezésekor alkalmazott egyszerűsítések.

Az információhiány elsősorban az adott gépben alkalmazott lemezelés tulajdonságai kapcsán játszik szerepet: nem ismert a lemezelések mágnesezési görbéje, sem a lemezelés vastagsága. A lemezelés vastagsága leginkább a veszteségek vizsgálatához fontos, viszont a mágnesezési görbe részletesebb ismerete javítaná a rendszer pontosságát.

A topológia előállításához alkalmazott geometriai egyszerűsítés a forgórész pólustalpakat összekötő ívek elhanyagolása. Ebből fakadóan lekerekített forgórészű konstrukciók esetén az eredményekben felfedezhető nyomatéklüktetés nagyobb lehet a valóságosnál.

5.1. Különböző pólusgeometriák implementálása

A pólusfejek és a pólustalpak kialakítása hatással van a létrehozható nyomaték változásának menetére. A lehetséges pólusgeometriákra a 5.1. ábra mutat példákat.



5.1. ábra Különböző pólusgeometriák [8, 48. o.]

A lehetséges pólusgeometriákról [8, 48. o.] tesz említést. A topológia-elemző rendszer aktuális verziója a 5.1. ábrán szereplő A-típus szerinti pólusgeometriát alkalmazza. A pólustalpak B-típus szerinti lekerekítésével növelhető a pólusok merevsége. C-típus a pólusfej telítődését a légrés irányába koncentrálja. D-típus enyhíti a fogak átlapolódásakor jelentkező nyomatéklüktetést. E-típus kevésbé elterjedt, mert az átlapolódás közelében fellépő nyomatéklüktetés csökkentéséhez megnövelt légrést alkalmaz.

Megfelelő álló-és forgórész pólusgeometria-kombináció segítségével tehát már a géptervezés során csökkenthető a KRG nyomatéklüktetési hajlama. A kialakítható pólusgeometriát a gyárthatósági szempontok is befolyásolják, mint pl. a tekercselés elhelyezése, rögzítése. Az optimális pólusgeometria-kombináció meghatározásához további kutatás szükséges.

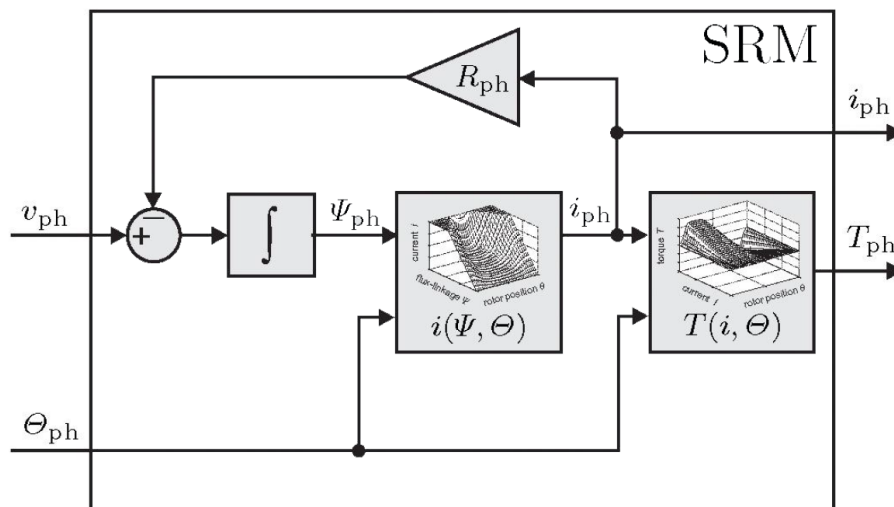
5.2. Nyomatéklüktetés csökkentése többfázisú gerjesztéssel

A topológia-elemző rendszer egyik lehetséges továbbfejlesztési iránya tehát az adott nyomaték-profil alapján a táplálás optimális áramalakjának kidolgozása. A nyomaték effajta simítását áram-profilozásnak is nevezik.

A KRG nyomatéklüktetésének csökkentése a hajtás oldaláról többfázisú gerjesztéssel is lehetséges. Ez nem csak azt jelenti, hogy több fázis egyidejű gerjesztésével nagyobb nyomaték fejthető ki, hanem a nyomaték-profil ismeretében, megfelelően illesztett táplálással a környező fázisoktól származó hirtelen nyomatékváltozások is kisimíthatók.

5.3. Szabályozott hajtás szimulációja

A 5.2. ábra a fluxuskapcsolódás- és nyomaték-profillal összeállított KRG dinamikus gépmodelljét szemlélteti. A pozíciót Θ_{ph} , a feszültséget v_{ph} , a nyomatéket T_{ph} jelöli.



5.2. ábra Profil alapú dinamikus gépmodell [17, 1317. o.]

A KRG feszültségegyenlete kibővíthető a fluxuskapcsolódás-profil átstrukturálásával kapott $i(\Phi, \Theta)$ taggal, így leképezhető a változó villamos helyettesítő kép. A profilok keresőtáblázatok formájában egyszerűen eltárolhatóak, ezáltal csökken a modell számításigénye.

Az topológia-elemző rendszer által előállított profilok közvetlenül alkalmazhatóak a 5.2. ábra szerinti gépmodellben, implementálása után hajtásszimuláció is végezhető.

Összefoglalás, eredmények

A dolgozatban ismertetésre kerültek a kapcsolt reluktancia gépek működésének és működtetésének legfontosabb összefüggései. A géptípushoz kapcsolódó aktuális műszaki kihívásokat felismerve elkészült a jelen dolgozatban bemutatott, nagyfokú automatizáltsággal rendelkező topológia-elemző rendszer első verziója. Fő célja, hogy a hajtásirányítás számára kezelhetővé tegye a KRG konstrukciók egyediségét.

Az összeállított topológia-elemző rendszer fluxuskapcsolódás- és nyomaték-profil számítógéppel támogatott leképezésén keresztül elősegíti a KRG működésének mélyebb megismerését, a főbb méretek nyomatékképzésre gyakorolt hatásának tanulmányozását, a gép-tervezési folyamatok felgyorsítását, illetve az optimális irányítási stratégia kidolgozását.

Bemutatásra kerültek a topológia-elemző rendszer összetevői, rávilágítva az esetleges bizonytalanságokra, fejlesztési lehetőségekre.

A további kutatások fő célja a nyomatéklüktetés csökkentését elősegítő konstrukciós és szabályozási megoldások kidolgozása.

Irodalomjegyzék

- [1] Wu, W ; Lovatt H.C. ; Dunlop J.B.
Optimization of Switched Reluctance Motors for Hybrid Electric Vehicles
PEMD International Conference on Power Electronics Machines and Drives, 2002
- [2] Faid, S. ; Debal, P. ; Bervoets, S.
Development of a Switched Reluctance Motor for Automotive Traction Applications
EVS25, 2010
- [3] Csaba, L.
Kapcsolt reluktancia gépes hajtás vizsgálata lendkerekes alkalmazásokhoz
BME-VET Diplomaterv, 2013
- [4] Révész, D.
Kapcsolt reluktancia gépek tervezése és szimulációja
BME-VET Diplomaterv, 2014
- [5] Molnár, M.D.
Reluktanciamotoros járműhajtás tervezése
BME-VET Diplomaterv, 2015
- [6] Számel, L.
A léptetőmotoros hajtások különleges tulajdonságai
Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, 2002
- [7] Dawson, G.E. ; Eastham A.R. ; Mizia J.
Switched-Reluctance Motor Torque Characteristics
IEEE Transactions On Industry Applications VOL. IA-23 NO. 3, 1987
- [8] Miller, T.J.E.
Switched Reluctance Motors and Their Control
Magna Physics Publishing and Clarendon Press, 1993
- [9] Krishnan, R.
Switched Reluctance Motor Drives
CRC Press, 2001

- [10] Schmidt, I. ; Veszprémi, K.
Hajtásszabályozások
BME-VET online digitális tananyag, 2012.
<https://vet.bme.hu/sites/default/files/tamop/vivem175hu/out/html/vivem175hu.html>
- [11] Ehsani, M. ; Gao, Y. ; Gay, S.E. ; Emadi, A.
Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles:
CRC Press, 2005
- [12] Meeker, D.
Finite Element Method Magnetics: OctaveFEMM v1.2, User's Manual
<http://www.femm.info/Archives/doc/octavefemm.pdf>
Letöltés dátuma: 2016. március 18.
- [13] Miller, T.J.E.
Electronic Control of Switched Reluctance Machines
Newnes Power Engineering Series, 2001
- [14] Számel, L.
*Egyenáramú és kapcsolt reluktancia motoros szervohajtások
dinamikus tulajdonságainak javítása*
BME-VET Doktori értekezés, 2005
- [15] Kentli, F. ; Çalik, H.
*Matlab-Simulink Modelling of 6/4 SRM with Static Data
Produced Using Finite Element Method*
Acta Polytechnica Hungarica Newnes Power Engineering Series, Vol. 8, No. 6, 2011
- [16] Lipo, T.A. ; Moreira, J.C.
*Simulation of a Four Phase Switched Reluctance Motor
Including the Effects of Mutual Coupling*
Wisconsin Electric Machines and Power Electronics Consortium, 1987
- [17] Carstensen, C.E. ; Fuengwarodsakul, N.H. ; Doncker, R.W.
*Flux Linkage Determination for Correct Modeling of Switched Reluctance Machines
- Dynamic Measurement versus Static Computation*
IEEE Electric Machines and Drives Conference, 2007