

# Topológia-elemző rendszer kapcsolt reluktancia gépek modellezéséhez

## Horváth Sándor Rajmund

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,  
Villamos Energetika Tanszék, Villamos Gépek és Hajtások Csoport;  
Egry J. u. 18.; 1111; Budapest; Magyarország;  
e-mail: horvathsandorraimund@gmail.com

---

*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. Kapcsolt reluktancia gép esetén a mágneses ellenállás kerület menti változásának leírására a fluxuskapcsolódás- és nyomaték-profil használatos. Ezek a profilok az adott gép egyedi karakterisztikái, melyeket a topológia és az áramerősség egyaránt befolyásol. A „topológia” kifejezés alatt a geometria, az anyagi jellemzők és a tekercselés struktúrája értendő. A kapcsolt reluktancia gépekhez fűződő lehetőségeket és műszaki kihívásokat felismerve, elkészült egy nagyfokú automatizáltsággal rendelkező topológia-elemző rendszer. Fő célja, hogy a hajtásirányítás számára kezelhetővé tegye a konstrukciók egvediségét. Bizonyos feltételek mellett így kivitelezhetővé válik a gép és digitális hajtásirányítás szétcsatolása. A topológia-elemző rendszer működésének alapja egy általánosított leírási módszer, amellyel a főbb méretek ismeretében, elektromágneses térszimuláció útján meghatározhatóak a gépet jellemző statikus profilok. A létrehozott topológia-elemző rendszer elősegíti a kapcsolt reluktancia gépek működésének mélyebb megismerését, a főbb méretek nyomatékképzésre gyakorolt hatásának tanulmányozását, a géptervezési folyamatok felgyorsítását és az optimális irányítási stratégia kidolgozását.*

*Kulcsszavak: kapcsolt reluktancia gép; fluxuskapcsolódás-profil; nyomaték-profil;*

---

## 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 nyomatéklükktetés alakulhat ki.

A konstrukciók változatossága és az illesztett táplálás igénye hátrányt jelent a KRG számára a gerjesztési (hengeres) nyomaték elvén működő forgógépekkel szemben. A fellépő koncentrált radiális erőhatások miatt üzemelése akusztikus zajjal is jár. Alkalmazása mellett szől 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 polarítású feszültségről táplálva ellenáramú és regeneratív féküzemre is alkalmas.

Előnyös tulajdonságai miatt a KRG különösen a járműhajtások területén jelent ígéretes alternatívát. Ezt támasztja alá az [1] szerinti, párhuzamos hibrid hajtásláncú koncepcióautó példája. 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 vonatkoznak, 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.

## 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. Eltérő irányítási stratégiájuk és teljesítményszintjük ellenére, a működési elv és a felépítés hasonlóságai miatt a KRG-ekre is kiterjeszhető a [2]-ben ismertetett, változó reluktanciájú (VR), fogsokszorozás nélküli léptetőmotorokra vonatkozó tárgyalásmód és összefüggések. Az állórész  $Z_s$  fogszámára (1) általános érvényű:

$$Z_s = 2pm^* \quad [2](1)$$

ahol  $p$  a póluspárok számát,  $m^*$  a fázisok számát jelöli. A forgórész  $Z_r$  fogszáma szerint a konstrukciók két csoportja különböztethető meg. A csoportosításhoz szükség van a villamos forgógépek alapegyenleteként is számon tartott frekvenciafeltételre, speciálisan (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 (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 (4) módon történő bevezetésével egyértelműsíthető a gerjesztési sorrend és a tengely forgásirányának viszonya.

$$slip = \frac{Z_s}{Z_r} \quad [2](4)$$

Ha  $slip < 1$ , akkor a forgórész az állórész mezővel megegyező irányban forog;  $slip > 1$  esetén pedig a gerjesztési sorrenddel ellentétes forgásirány alakítható ki. Például egy 8/6 konstrukcióra  $slip=1,33$ , vagyis a forgórész az állórész mezővel ellentétes irányba, az állórész mező léptetési szögének 1/3 részével fordul el.

VR léptetőmotorok további fontos jellemző az (5) szerinti  $S$  lépésszám,

$$S = m^* Z_r \quad [2](5)$$

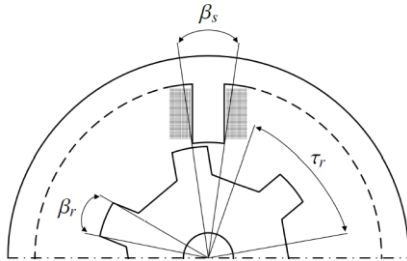
amely KRG-re is megadja a körülforduláshoz szükséges kommutációk számát.

## 2.1 Az öninduktivitás és a nyomatékképzés kapcsolata

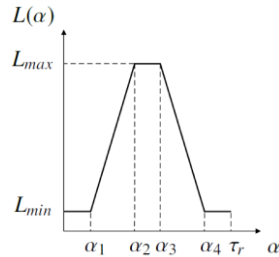
A mágneses ellenállás változásának hatása a villamos mennyiségek oldaláról az öninduktivitás segítségével írható le, melyet a topológia és az áramerősség egyaránt befolyásol. A „topológia” kifejezés alatt a geometria, az anyagi jellemzők és a tekercselés struktúrája értendő. Az öninduktivitás topológiától való függése a forgórész pozíciójától való függésnek feleltethető meg, ezért jelölésére az  $L(\alpha, i)$  kifejezés használatos és ilyen formában 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 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 pólusfejek telítődésre hajlamosak. A szélsőséges helyzetek ismétlődése miatt az öninduktivitás változása  $\tau_r=360^\circ/Z_r$  forgórész pólusosztás szerint periodicitással

rendelkezik, jellegét a 1.(a) ábrán feltüntetett  $\beta_s$  állórész pólusszög és  $\beta_r$  forgórész pólusszög is jelentősen befolyásolja. Az áramerősségtől való függés elhanyagolásával felrajzolható az egyszerűsített öninduktívitás-profil, amelyet az 1.(b) ábra szemléltet  $\beta_r > \beta_s$  pólusszög-viszony esetére.



(a) Főbb geometriai méretek



(b) Egyszerűsített öninduktívitás-profil

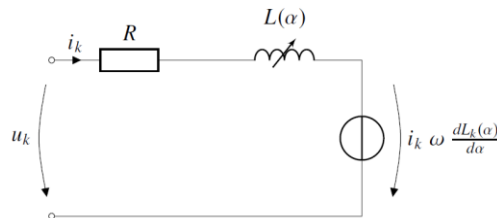
1. ábra

A geometria és az öninduktívitás kapcsolata

Az egyszerűsített öninduktívitás-profil a vastest 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. Az áramerősség növekedésével a valóságban csökken az illeszkedő helyzetben elérhető öninduktívitás értéke, míg kitérő helyzetben szinte változatlan.

A nyomatékképzés leírásához a Park-vektoros módszer nem használható, mivel a KRG fogazott kialakításából és a koncentrált tekercseléséből fakadó mágneses aszimmetria miatt az indukció térbeli eloszlása nem szinuszos.

Szimmetrikus tekercselést feltételezve, illetve a fázisok közötti kölcsönhatást elhanyagolva a KRG minden fázisa ugyanazzal az egyszerűsített (áramfüggetlen) öninduktívitás-profillal jellemezhető. Ebben az esetben a KRG  $k$ -adik fázisára, a forgórész valamely  $\alpha$  pozíciójában az 2. ábra szerinti helyettesítő kép vonatkozik.



2. ábra

A  $k$ -adik fázis villamos helyettesítő képe

Fontos megemlíteni, hogy a valóságban a KRG öninduktívitásának pozíciótól és áramerősségtől való függése miatt általános helyettesítő kép nem létezik. [3] úgy fogalmaz, hogy a helyettesítő kapcsolás egy soros RL-kör, illetve egy belső feszültséget és ellenállást tartalmazó áramkör között változik.

A 2. ábra alapján, tisztán rezisztív veszteségi összetevőt feltételezve felírható valamely  $k$ -adik fázis (6) szerinti teljesítménymérlege:

$$u_k i_k = i_k^2 R_k + i_k L_k(\alpha) \frac{di_k}{dt} + i_k^2 \omega \frac{dL_k(\alpha)}{d\alpha} \quad (6)$$

A 2. ábra szerinti villamos helyettesítő kép felrajzolásához alkalmazott egyszerűsítések megtartásával, a (6) teljesítménymérleg alapján (7) adódik a  $k$ -adik fázis kizárólagos gerjesztésével kifejezhető  $m_k$  nyomatékra [4].

$$m_k = \frac{1}{2} i_k^2 \frac{dL_k(\alpha)}{d\alpha} \quad (7)$$

Az öninduktivitás áramerősségtől való függésének elhanyagolásával felírt (7) a valóságban csak egy telítődésre nem hajlamos konstrukció 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 [5]. A nem telítődő esetre felírt (7) összefüggés kifejezi viszont KRG-ek alapvető tulajdonságait:

- 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 [6].

A 1.(b) ábra és (7) összevetésével az is 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 része, így csökkenthető a visszamaradó fékezőhatás. A lemágnesezési folyamat ellentétes polaritású feszültséget kapcsolva gyorsítható, tehát a bipoláris táplálás ebből a szempontból is indokolt.

Az illesztett táplálás megvalósításához szükséges egyrészt a forgásirány és a gerjesztési sorrend (4) szerinti viszonyának ismerete, másrészt az adott gépre jellemző  $m(\alpha, i)$  nyomaték-profil alapján, az aktuális pozíció függvényében meg kell határozni a kívánt nyomaték előállításához szükséges áramerősséget. A kommutációt az elérhető legkisebb nyomatékváltozáshoz kell időzíteni, ehhez pedig a nyomaték-profil ismeretére van szükség. Az  $\alpha_1:\alpha_2$  és  $\alpha_3:\alpha_4$  szakaszok szimmetriája és a periodicitás miatt elegendő a profilokat  $\tau_r/2$  fél pólusosztásra előállítani. Erre a feladatra az összeállított topológia-elemző rendszer alkalmazható.

## 3 A topológia-elemző rendszer működésének bemutatása egy példán keresztül

### 3.1 Motiváció, célkitűzés

A KRG széleskörű alkalmazásához, elterjedéséhez olyan leírási módszerre van szükség, amely lehetővé teszi az adott konstrukció sajátos tulajdonságainak figyelembevételét. Erre a feladatra a (6), (7) linearizált összefüggések csak közelítő jelleggel képesek, az egyszerűsített öninduktivitás-profil alkalmazása nem támogatja hatékonyan a nyomatékklütketés csökkentését szolgáló megoldásokat. Egy konstrukció egyediségét, szigorúbban véve a fluxuskapcsolódás és a nyomaték pozíciótól és áramerősségtől való függését feltárva, majd az így nyert többletinformációt felhasználva javítható a táplálás illesztettsége, ezáltal a nyomatékklütketés is mérsékelhető. Egy konstrukció egyediségének feltárásával bizonyos (pl. a fázisszámra és a teljesítményszintre vonatkozó) megkötések mellett kivitelezhetővé válik a forgógép és digitális hajtásirányítás szétcsatolása is. A telítődés hatásának figyelemvétele és a nemlineáris tartományon való üzemeltetés a teljesítményelektronika jobb kihasználásának érdekében is célszerű.

A gépspecifikus fluxuskapcsolódás- és nyomaték-profil mérési úton történő meghatározásához mágneses érzékelőkre, nagy nyomaték kifejtésére alkalmas szervóhajtással ellátott mérőpadra, mérésadatgyűjtő eszközökre és kiértékelő szoftverre, valamint emberi felügyeletre volna szükség. Egy másik megoldás, hogy az adott konstrukció főbb méreteinek ismeretében topológia generálható, amelyen elektromágneses térszimulációs vizsgálatot végrehajtva leképezhetőek az adott konstrukció egyediségét leíró profilok. Eltárolásuk többdimenziós keresőtáblázat formájában történhet. Az összeállított topológia-elemző rendszer fő célja ezen táblázatok leképezése, amelyek egy hajtásirányítás tervezéséhez szükséges egyedi gépmo­dell előállítására használhatóak.

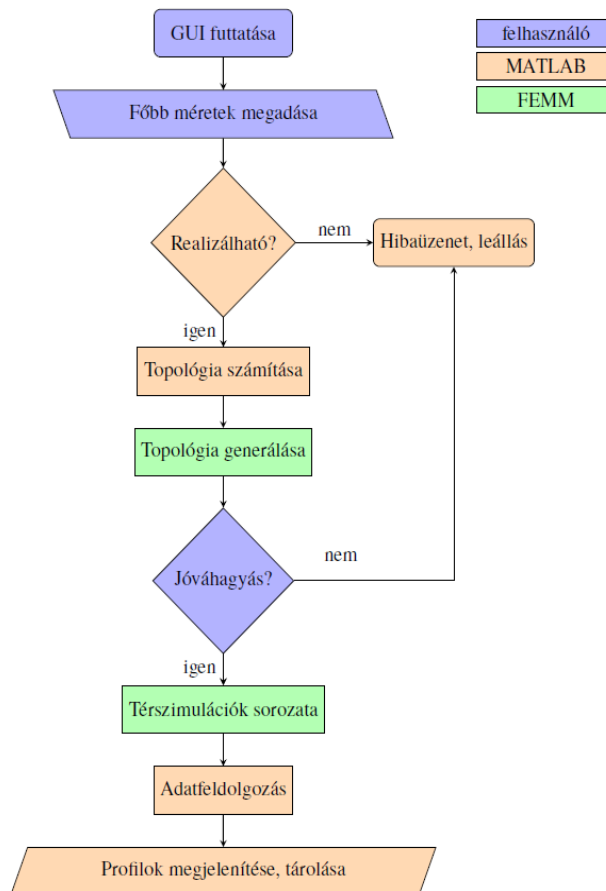
### 3.2 A rendszer felépítése

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

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

A topológia-elemző rendszer működése MATLAB-on keresztül vezérelt, a FEMM által végzett szimuláció a háttérben futnak. A kétirányú kommunikációt az OctaveFEMM teszi lehetővé, amely kompatibilis a MATLAB környezettel.

A kommunikáció vezérlése az ún. Lua szkriptnyelven történik. Felhasználói interakciót csak az adatbevitel és a generált topológia jóváhagyása kíván. A felhasználói jóváhagyás által elkerülhetőek a téves adatbevitel, de egyébként realizálható geometria alapján végzett felesleges számítások. A rendszer sorrendi működését az 3. ábra szemlélteti.



3. ábra

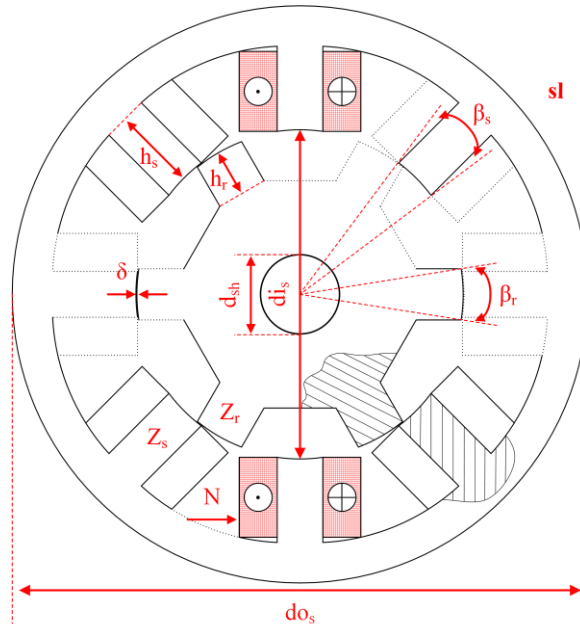
A topológia-elemző rendszer sorrendi működése

A 3. ábrán eltérő szín jelöli az egyes folyamatok szereplőit. A grafikus felhasználói felület (GUI) indítását követően a felhasználó feladata a fizikai konstrukció előre meghatározott méreteinek és jellemzőinek 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, neki nincs több feladata. A térszimulációkat a FEMM, az adatok feldolgozását, megjelenítését és tárolását a MATLAB végzi.

### 3.3 Főbb méretek és jellemzők

A topológia előállítása az adatbeviteli lehetőségektől függően időigényes feladat lehet, célszerű ezért automatizált módon, például 4. ábrán látható főbb méretek és egyéb jellemzők alapján előállítani. A topológia-elemző rendszer aktuális verziója a 4. ábrán feltüntetett adatokat várja bemenetként.



4. ábra

A topológia előállításához szükséges főbb méretek és jellemzők

- Forgórész:  $Z_r$  – fogak száma;  $\beta_r$  – pólusszög;  $h_r$  – fogmagasság.
- Tengely:  $d_{sh}$  – tengely átmérő.
- Állórész:  $Z_s$  – fogak száma;  $\beta_s$  – pólusszög;  $h_s$  – fogmagasság;  $d_{is}$  – furat átmérő;  $d_{os}$  – koszorú átmérő.
- Légrés:  $\delta$  – légrés mérete.
- Tengelyirányú dimenzió:  $sl$  – lemezcsoomag hossza.
- Tekercselés:  $N$  – pólusonkénti menetszám.



A főbb méreteket például [7] is hasonló módon tárgyalja, ezek egy KRG topológia legfontosabb jellemzői, melyek alapvetően befolyásolják a fluxuskapcsolódás- és nyomaték-profil. A vizsgálatnak alávethető konstrukciókkal szembeni követelmény a reguláris felépítés, amelyekre [5] szerint az jellemző, hogy az állórész és a forgórész pólusai a középvonalukra nézve szimmetrikusak és elosztásuk egyenletes a gép kerülete mentén.

A topológia-elemző rendszer működésének bemutatása a [8] szerinti konstrukción keresztül történik, amely már számos további vizsgálat (pl. [9], [10], [11]) tárgyát képezte, így részletesen dokumentált. Az elvégzett topológia-elemzés eredményeinek bizonytalanságát csökkenti, hogy a [8] szerinti fizikai konstrukcióban és a szoftveresen generált topológiában a pólusfejek alakja megegyezik.

### 3.4 Adatbevitel

Az egyszerűbb adatbevitelt szolgálja egy MATLAB GUIDE-dal készített grafikus felhasználói felület, amely lehetővé teszi, hogy az alprogramok működését nem ismerő felhasználó is kezelhesse a topológia-elemző rendszert. 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  $\Delta i = 1A$  és  $\Delta \alpha = 1^\circ$  a lehetséges legkisebb egészértékű lépésköz (felbontás).

### 3.5 A topológia előállítása

A betáplált adatok alapján a topológia előállítása három lépésben történik:

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

A topológia automatizált előállításához néhány másodperc szükséges, a műveletek időigénye arányos a fogak számával.

#### 3.5.1 Geometria szerkesztése

Az 4. ábrán feltüntetett fizikai méretekből csúcspontok, élek, ívek szerkeszthetőek. Ehhez gyakorta szükség van a polár és derékszögű koordináta-rendszerek közötti átjárásra, koordinátageometriai műveletekre, melyeket a MATLAB jól támogat. A geometria szerkesztésének első lépése a betáplált adatok konzisztenciájának ellenőrzése. Téves adatok megadása esetén előfordulhat, hogy a rendszer nem realizálható geometria előállítására kap

utasítást (pl. a betáplált adatok alapján a forgórész súrolná az állórészt). A felesleges műveletek megelőzésének érdekében a MATLAB megvizsgálja a betáplált adatokat, a felmerülő geometriai ellentmondást a konzolon hibaüzenettel jelzi és a program leáll. Helyesen betáplált adatokból további mennyiségek (pl. a fogak középvonala közötti szögeltérés; fogak talppontjainak sugara) származtathatóak, az összes számítás a MATLAB-ban kerül végrehajtásra. Kihasználható a reguláris felépítés geometriai szimmetriája: elegendő az elemi alakzatokat egy ismert pozícióban megszerkeszteni, majd azokat sokszorosítani.

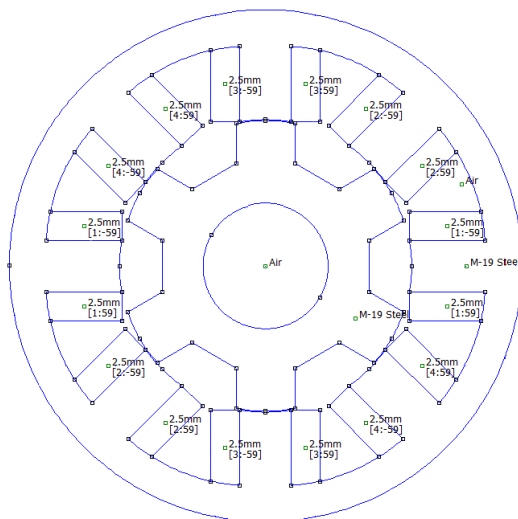
### 3.5.2 Tekercselés kialakítása

FEMM-ben a tekercselés kiosztását meg kell előznie az áramkörök definiálásának, viszont a fázis árama közvetlenül a térszimuláció előtt kerül beállításra. Az állórész tekercselése a fogak két oldalán szimmetrikusan elhelyezett, azonos méretű felületek áramköri jellemzőinek megadásával alakítható ki. Áramköri jellemző a pólusonkénti menetszám, illetve a fázistekercsek kapcsolása.

### 3.5.3 Anyagi jellemzők felvétele

A tekercselés anyagi jellemzőjének a huzalátmérő minősül. (A példában 2,5mm értékűre választott.) A lemezelés anyaga adott: M19 nem-orientált elektromágneses acél. A légrés, a tengely és a külső környezet levegőként kerül definiálásra.

A 3.5.1 – 3.5.3 lépések végrehajtása a 6. ábra szerinti topológiát eredményezi.



5. ábra

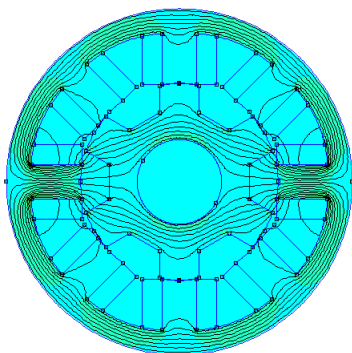
[8] szerinti bemenet alapján előállított topológia

### 3.6 Térszimuláció futtatása

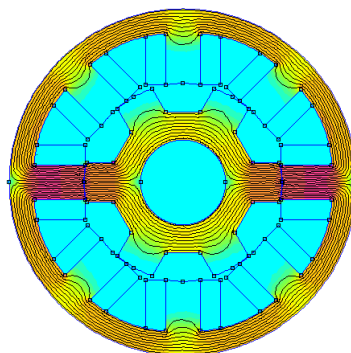
A FEMM olyan mágneses problémák megoldását támogatja, ahol az eltolási áram hatása elhanyagolható. A villamos gépekben, ipari frekvencián lejátszódó lassú változások tipikusan ilyen problémák: az időben változó villamos tér hatása elhanyagolható az aktív részekben és a szigetelésekben egyaránt.

Egy telítődő vastestben a permeabilitás nem állandó, az áramerősség növekedésével a mágnesezhetősége csökken, minőségileg egyre inkább megközelíti a levegő tulajdonságait. A FEMM ezt a nemlinearitást is kezeli. A beállított peremfeltétel Dirichlet-típusú,  $A=0$  vektorpotenciál az állórész házán kívül.

A térszimuláció a felhasználó által előzetesen beállított egészértékű áram- és pozíciótartományon, diszkrét lépcsőkben kerül végrehajtásra, bemenetként az előállított topológia szolgál. A 6. ábra a [8] szerinti példának választott konstrukció erővonalképét mutatja a szélsőséges helyzetekben, egyfázisú gerjesztés mellett, melegebb színnel a nagyobb fluxussűrűséget jelölve.



(a) Erővonalkép kitérő helyzetben



(b) Erővonalkép illeszkedő helyzetben

6. ábra

Erővonalak záródása a szélsőséges helyzetekben

A 6. ábrán megfigyelhető, hogy a gerjesztetlen fázisokhoz tartozó állórészfogak és a forgórész fogai között szinte átlapolódáskor sem haladnak erővonalak. A fázisok közötti kölcsönhatás elhanyagolása – amely feltételezés a 2. ábra szerinti villamos helyettesítő kép felrajzolásához volt szükséges – eszerint valóban jó közelítés.

A bemutatott vizsgálat során  $\alpha=0^\circ$  referencia az illeszkedő helyzethez rögzített. A topológia-elemző rendszer  $[i_{min}=0A : i_{max}=16A]$  és  $[\alpha_{min}=0^\circ : \alpha_{max}=30^\circ]$  tartományon,  $\Delta i=2A$  és  $\Delta \alpha=2^\circ$  léptékkal, azaz összesen 144 esetben vizsgálta meg betáplált adatok alapján generált problémát. A vizsgálat egyfázisú, egyenáramú gerjesztéssel került végrehajtásra, a FEMM alapú térszimuláció futása 23 percig tartott, a főbb műveletek időigényét a 7. ábra mutatja.

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

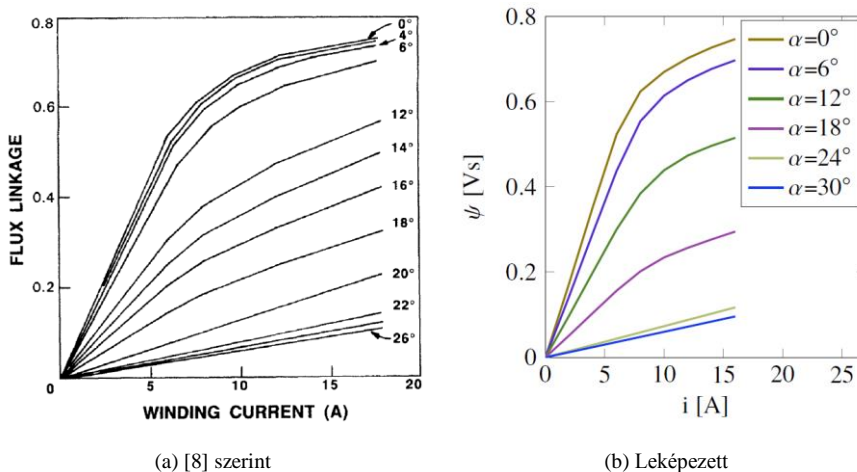
7. ábra

A FEMM alapú térszimuláció főbb műveleteinek igénye

A rendszer működése gyorsítható az erővonalképek mentésének (mo\_savebitmap) elhagyásával. A feldolgozás után a profilokat tároló táblázatok mérete néhány *kB*.

### 3.7 Profilok megjelenítése

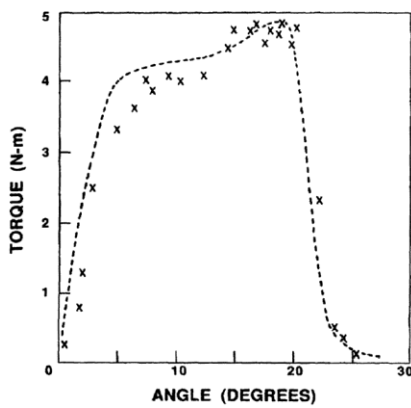
A feldolgozást követően a MATLAB elvégzi a profilok megjelenítését, így a topológia-elemző rendszer grafikus kimenettel is rendelkezik. A választott példa esetében a fluxuskapcsolódást leképező profilt a 8. ábra mutatja.



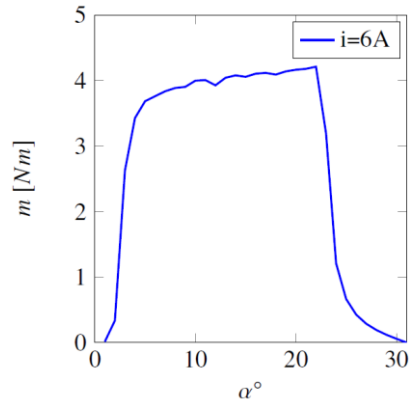
8. ábra

Az eredeti és a leképezett fluxuskapcsolódás-profil

A 9. ábra a nyomaték változását mutatja a pozíció függvényében egy kiragadott áramértékre vonatkozóan, az összehasonlíthatóság érdekében.



(a) [8] szerint



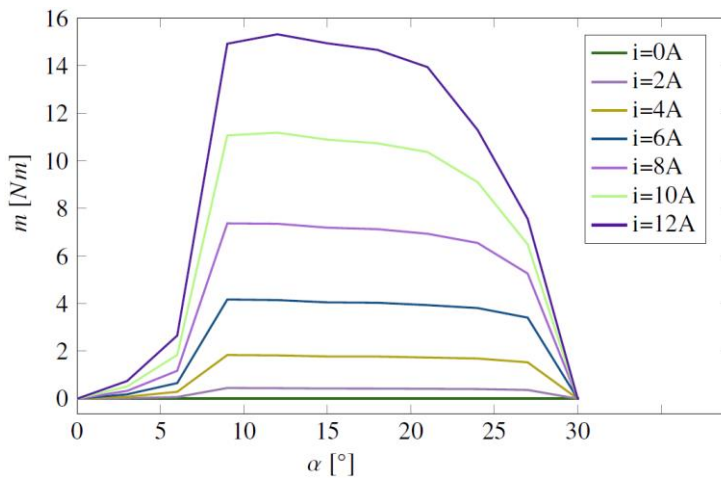
(b) Leképezett

9. ábra

Nyomaték a pozíció függvényében,  $i=6A$  esetén

A nyomaték meredek változása a 9. ábra szerinti mindkét esetben szembevetendő, az elérhető maximális nyomaték közel azonos. A görbék menetében megfigyelhető eltérés a forgórész pólustalpak közötti lekerekítés elhanyagolásából származhat.

A vizsgálat tartományára előállított nyomaték-profil a 10. ábra szemlélteti.



10. ábra

A leképezett nyomatékprofil

Az előállított statikus fluxuskapcsolódás- és nyomatékprofil felhasználható az adott KRG dinamikus gépmodelljének összeállításához, efféle alkalmazásra [7] és [12] mutat részletesen dokumentált példát.

## Összegzés

Kidolgozásra került egy általános módszer, amely képes a reguláris KRG konstrukciók egyediségének leírására a topológia mágneses elemzésével. A módszer implementálásra került MATLAB és FEMM környezetben, nagyfokú automatizáltsággal működik, a bizonytalanságok nagy része ismert és kezelhető. A rendszer tesztelése folyamatban, az eredmények jól közelítik a szakirodalmi példákat.

Az összeállított topológia-elemző rendszer alkalmas a reguláris kapcsolt reluktancia gépek statikus fluxuskapcsolódás- és nyomaték-profiljának meghatározására, kezelhetővé téve ezzel a konstrukciók egyediségét a hajtásirányítás számára. A 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 géptervezési folyamatok felgyorsítását, illetve az optimális irányítási stratégia kidolgozását. A konstrukciók egyediségét kifejező jellemzők körének bővítésével, további vizsgálatok automatizálásával ez a rendszer géptervezési feladatok ellátására is felkészíthető.

A topológia-elemző rendszer eredményeit bizonytalanság terheli, amelynek fő forrása a geometria leképezésekor alkalmazott egyszerűsítések. A bizonytalanság csökkentésére elérhetővé kell tenni különböző pólusgeometriák kiválasztását. Ez a géptervezési folyamatok támogatásának szempontjából is fontos, hiszen egy megfelelő pólusgeometria-kombináció kialakításával már konstrukciós szinten csökkenthető a KRG nyomatéklüktetésre való hajlama.

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

## Köszönetnyilvánítás

Köszönet illeti Prof. Dr. Vajda Istvánt és Dr. Számel Lászlót, akik felkeltették a Szerző érdeklődését a kapcsolt reluktancia gépek iránt, majd folyamatosan hasznos tanácsokkal és előremutató kérdésekkel látták el munkája során.

## Hivatkozások

- [1] Wu W. et al., Optimization of Switched Reluctance Motors for Hybrid Electric Vehicles, International Conference on Power Electronics Machines and Drives, 2002, doi: 10.1049/cp:20020110
- [2] Számel L., A léptetőmotoros hajtások különleges tulajdonságai, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, 2002
- [3] Számel L., Egyenáramú és kapcsolt reluktancia motoros szervohajtások dinamikus tulajdonságainak javítása, BME-VET Phd értekezés, 2005, pp 4
- [4] Schmidt, I. ; Veszprémi, K., Hajtásszabályozások, BME-VET online digitális tananyag, 2012.
- [5] Miller T.J.E., Switched Reluctance Motors and Their Control, Magna Physics Publishing Press, Oxford University, USA, 1993 pp 19
- [6] Ehsani M. et al, Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles, CRC Press, 2005, pp 214
- [7] Kentli F. ; Çalik H., Matlab-Simulink Modelling of 6/4 SRM with Static Data Produced Using Finite Element Method, Acta Polytechnica Hungarica, Vol. 8, No. 6, 2011
- [8] Dawson G.E. et al., Switched-Reluctance Motor Torque Characteristics, IEEE Trans. On Industry Applicat. VOL. IA-23 NO. 3, 1987, pp 532-537
- [9] 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
- [10] Chancharoensook P ; Rahman M.F., Machine's Characteristics Identification: A Preliminary Study On Direct Torque Control For Switched Reluctance Motor Drives, 2000
- [11] Bal G. ; Uygun D., An Approach to Obtain an Advisable Ratio between Stator and Rotor Tooth Widths in Switched Reluctance Motors for Higher Torque and Smoother Output Power Profile, Gazi University Journal of Science, 23(4):457-463, 2010
- [12] Carstensen C.E. et al., Flux Linkage Determination for Correct Modeling of Switched Reluctance Machines – Dynamic Measurement versus Static Computation, IEEE Electric Machines and Drives Conference, 2007