MEE 69. Vándorgyűlés, Konferencia és Kiállítás

Reluktancia gépek analízise és szabályozása

MSc Diplomaterv pályázat - I. díj

Horváth Sándor

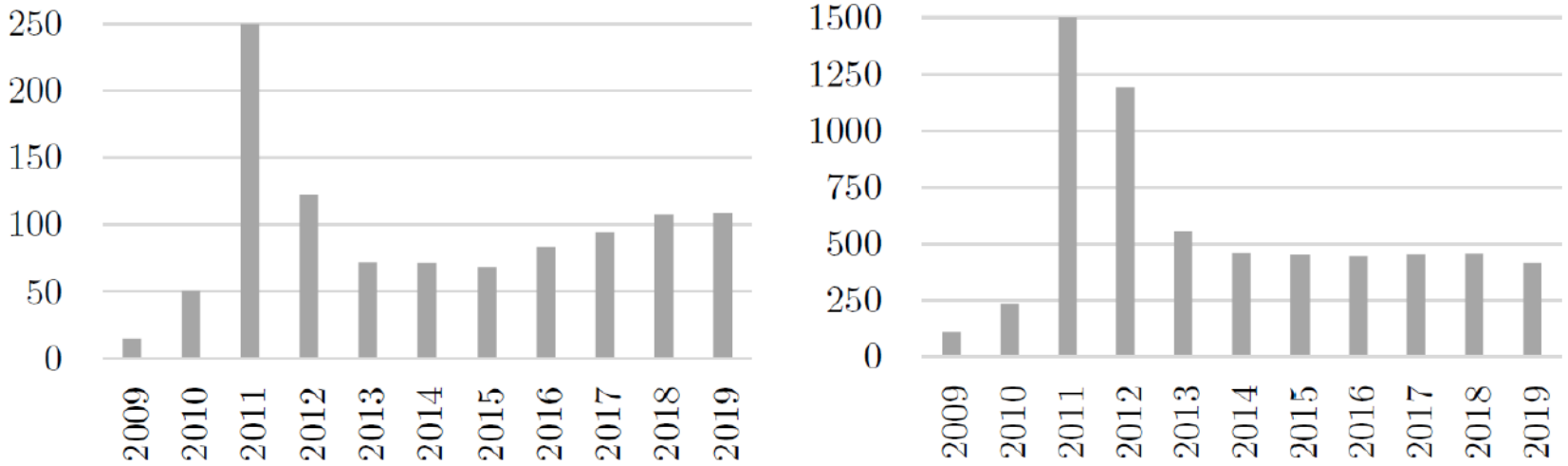
doktorandusz, BME-VET

Konzulens: dr. Számel László, dr. Vajda István

2019. szeptember 19.

Témaválasztás indoklása, a téma aktualitása

A reluktancia gépes hajtások ígéretes alternatívát jelentenek.



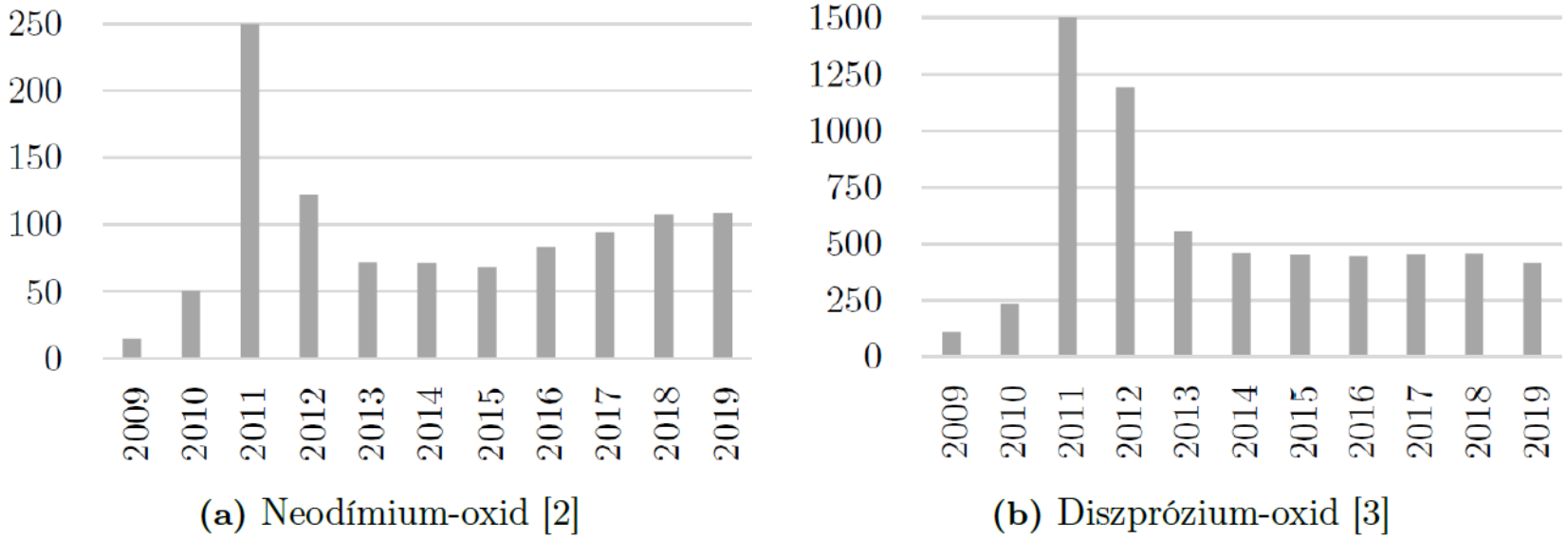
(a) Neodímium-oxid [2] **(b)** Diszprózium-oxid [3]

1. ábra Állandómágnes alapanyagok világpiaci átlagára [USD/kg]

- szabályozási és modulációs technikák fejlődése (e-mobilitás)
- szimulációs vizsgálati módszerek érettsége (végeselem analízis)
- szigorodó hatásfok követelmények (ipari hajtások, IE4...IE5)
- automatizálható gyártás, megbízhatóság, fenntarthatóság

Témaválasztás indoklása, a téma aktualitása

A reluktancia gépes hajtások ígéretes alternatívát jelentenek.



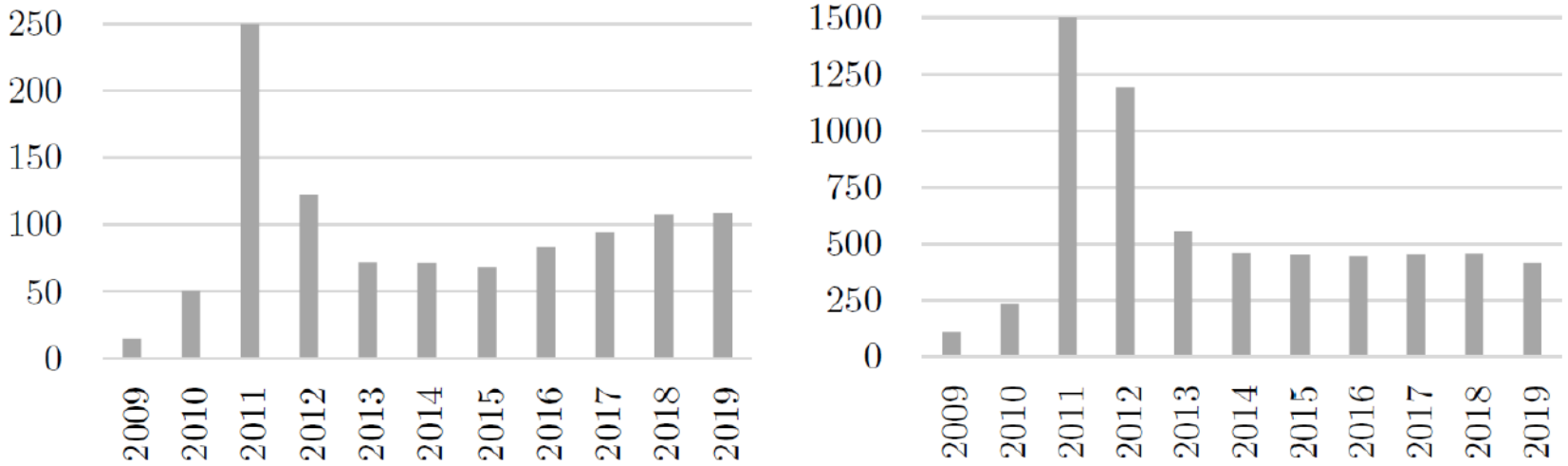
(a) Neodímium-oxid [2] **(b)** Diszprózium-oxid [3]

1. ábra Állandómágnes alapanyagok világpiaci átlagára [USD/kg]

- szabályozási és modulációs technikák fejlődése (e-mobilitás)
- szimulációs vizsgálati módszerek érettsége (végeselem analízis)
- szigorodó hatásfok követelmények (ipari hajtások, IE4...IE5)
- automatizálható gyártás, megbízhatóság, fenntarthatóság

Témaválasztás indoklása, a téma aktualitása

A reluktancia gépes hajtások ígéretes alternatívát jelentenek.



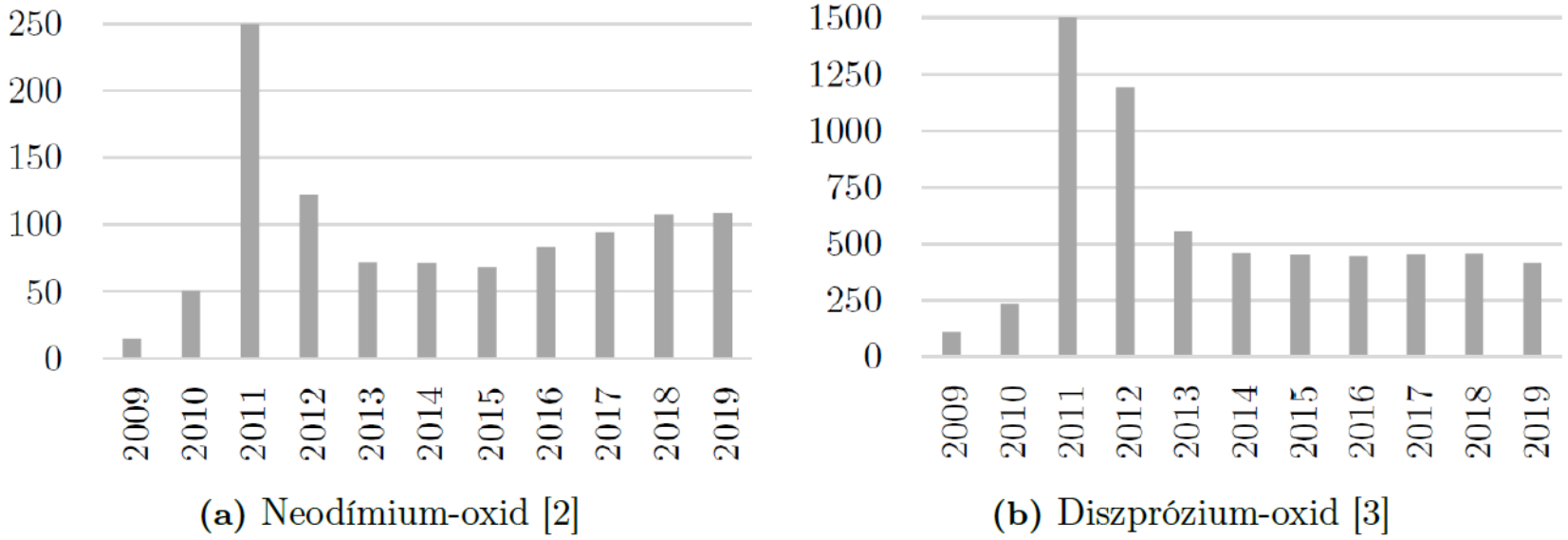
(a) Neodímium-oxid [2] **(b)** Diszprózium-oxid [3]

1. ábra Állandómágnes alapanyagok világpiaci átlagára [USD/kg]

- szabályozási és modulációs technikák fejlődése (e-mobilitás)
- szimulációs vizsgálati módszerek érettsége (végeselem analízis)
- szigorodó hatásfok követelmények (ipari hajtások, IE4...IE5)
- automatizálható gyártás, megbízhatóság, fenntarthatóság

Témaválasztás indoklása, a téma aktualitása

A reluktancia gépes hajtások ígéretes alternatívát jelentenek.



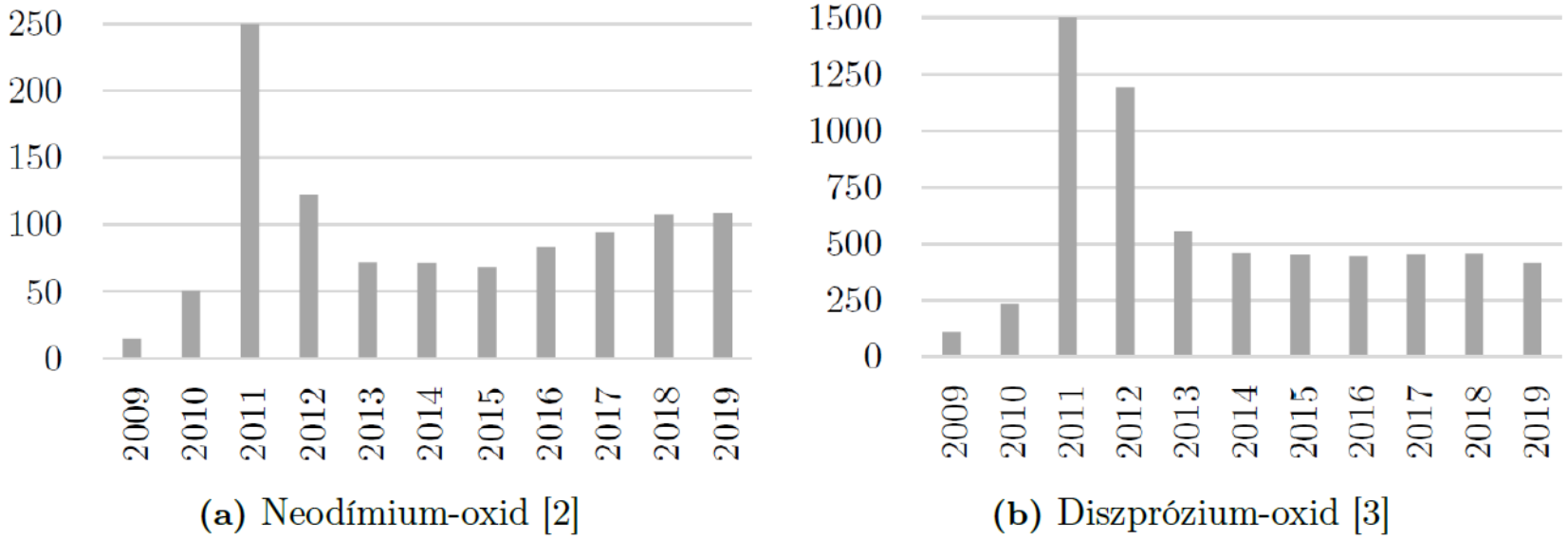
(a) Neodímium-oxid [2] **(b)** Diszprózium-oxid [3]

1. ábra Állandómágnes alapanyagok világpiaci átlagára [USD/kg]

- szabályozási és modulációs technikák fejlődése (e-mobilitás)
- szimulációs vizsgálati módszerek érettsége (végeselem analízis)
- szigorodó hatásfok követelmények (ipari hajtások, IE4...IE5)
- automatizálható gyártás, megbízhatóság, fenntarthatóság

Témaválasztás indoklása, a téma aktualitása

A reluktancia gépes hajtások ígéretes alternatívát jelentenek.



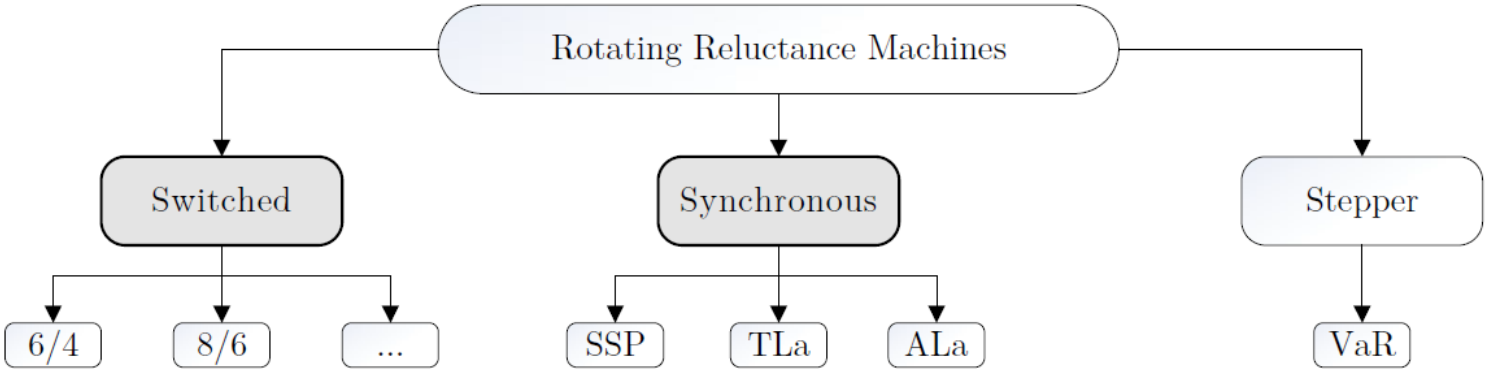
(a) Neodímium-oxid [2] (b) Diszprózium-oxid [3]

1. ábra Állandómágnes alapanyagok világpiaci átlagára [USD/kg]

- szabályozási és modulációs technikák fejlődése (e-mobilitás)
- szimulációs vizsgálati módszerek érettsége (végeselem analízis)
- szigorodó hatásfok követelmények (ipari hajtások, IE4...IE5)
- automatizálható gyártás, megbízhatóság, fenntarthatóság

Diplomaterv fókusza és feladatai

Kapcsolt és szinkron reluktancia gépek/hajtások témaköre.

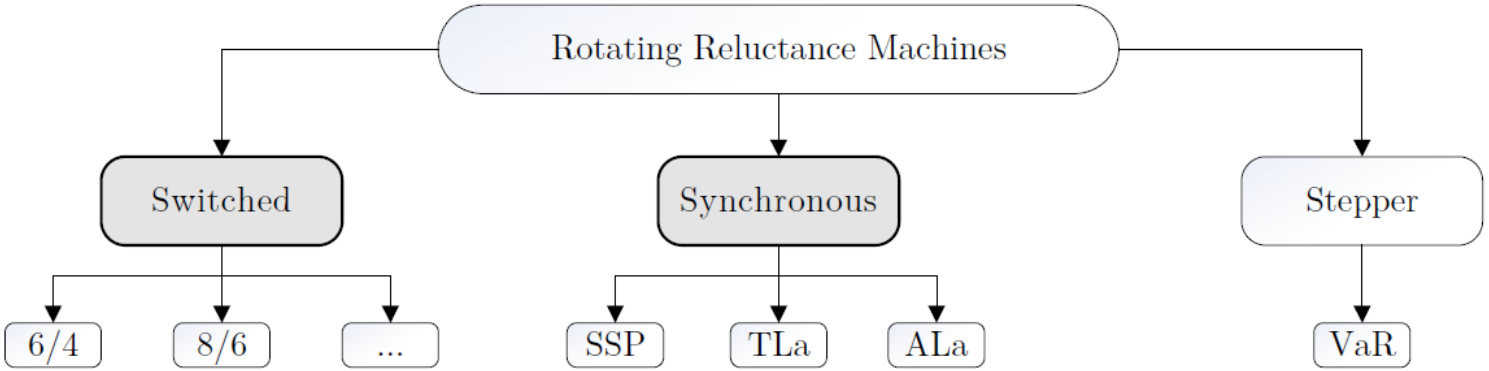


2. ábra A forgó mozgású reluktancia gépek egy lehetséges csoportosítása

- változatos topológiák → konstrukciók felépítésének tanulmányozása, a főméretek meghatározását szolgáló lépések bemutatása
- gép és hajtás illesztése → numerikus térszámításon alapuló, automatizált eljárás kidolgozása a különböző változatok elektromágneses jellemzőinek meghatározásához
- szabályozási módszerek vizsgálata szimulációs eszközökkel

Diplomaterv fókusza és feladatai

Kapcsolt és szinkron reluktancia gépek/hajtások témaköre.

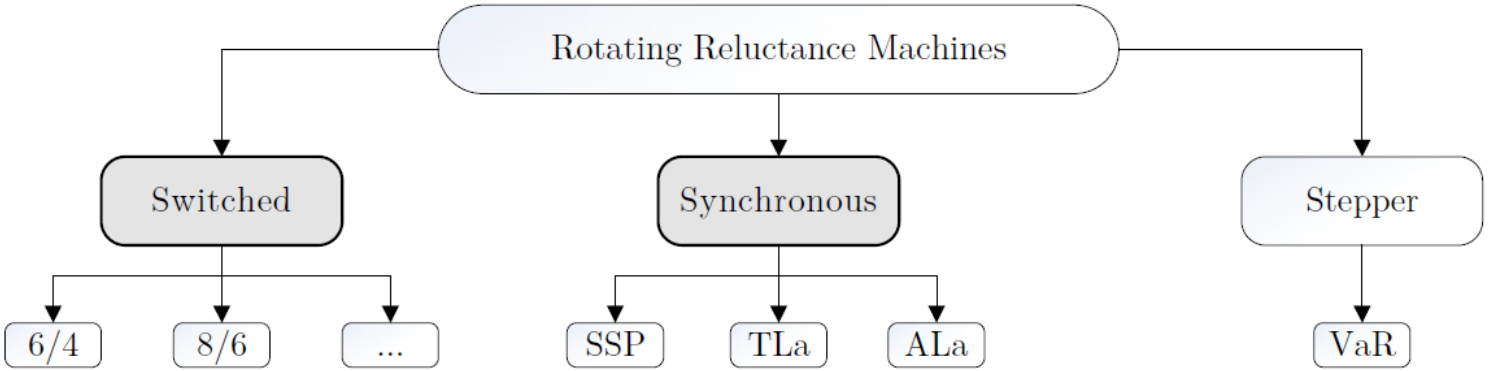


2. ábra A forgó mozgású reluktancia gépek egy lehetséges csoportosítása

- változatos topológiák → konstrukciók felépítésének tanulmányozása, a főméretek meghatározását szolgáló lépések bemutatása
- gép és hajtás illesztése → numerikus térszámításon alapuló, automatizált eljárás kidolgozása a különböző változatok elektromágneses jellemzőinek meghatározásához
- szabályozási módszerek vizsgálata szimulációs eszközökkel

Diplomaterv fókusza és feladatai

Kapcsolt és szinkron reluktancia gépek/hajtások témaköre.

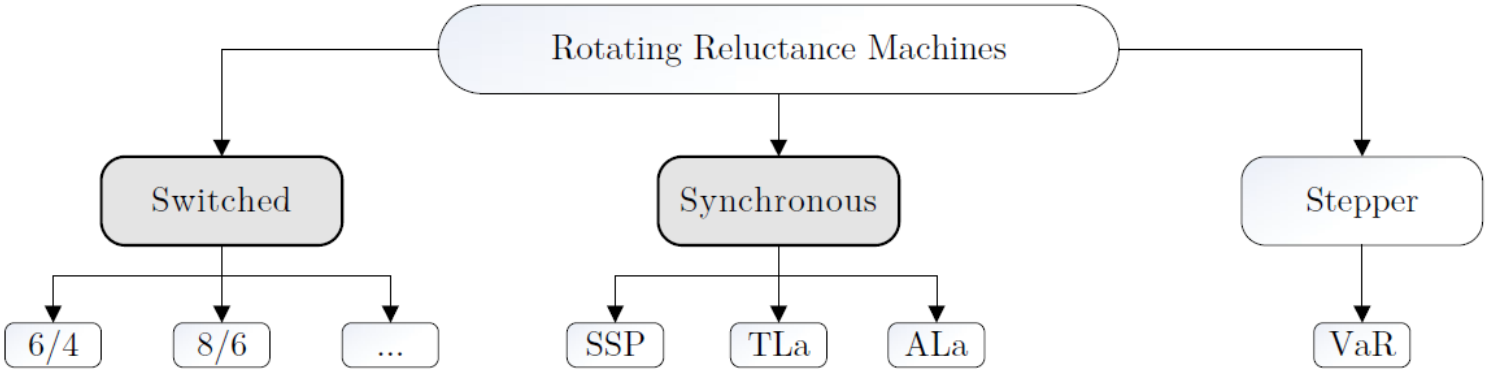


2. ábra A forgó mozgású reluktancia gépek egy lehetséges csoportosítása

- változatos topológiák → konstrukciók felépítésének tanulmányozása, a főméretek meghatározását szolgáló lépések bemutatása
- gép és hajtás illesztése → numerikus térszámításon alapuló, automatizált eljárás kidolgozása a különböző változatok elektromágneses jellemzőinek meghatározásához
- szabályozási módszerek vizsgálata szimulációs eszközökkel

Diplomaterv fókusza és feladatai

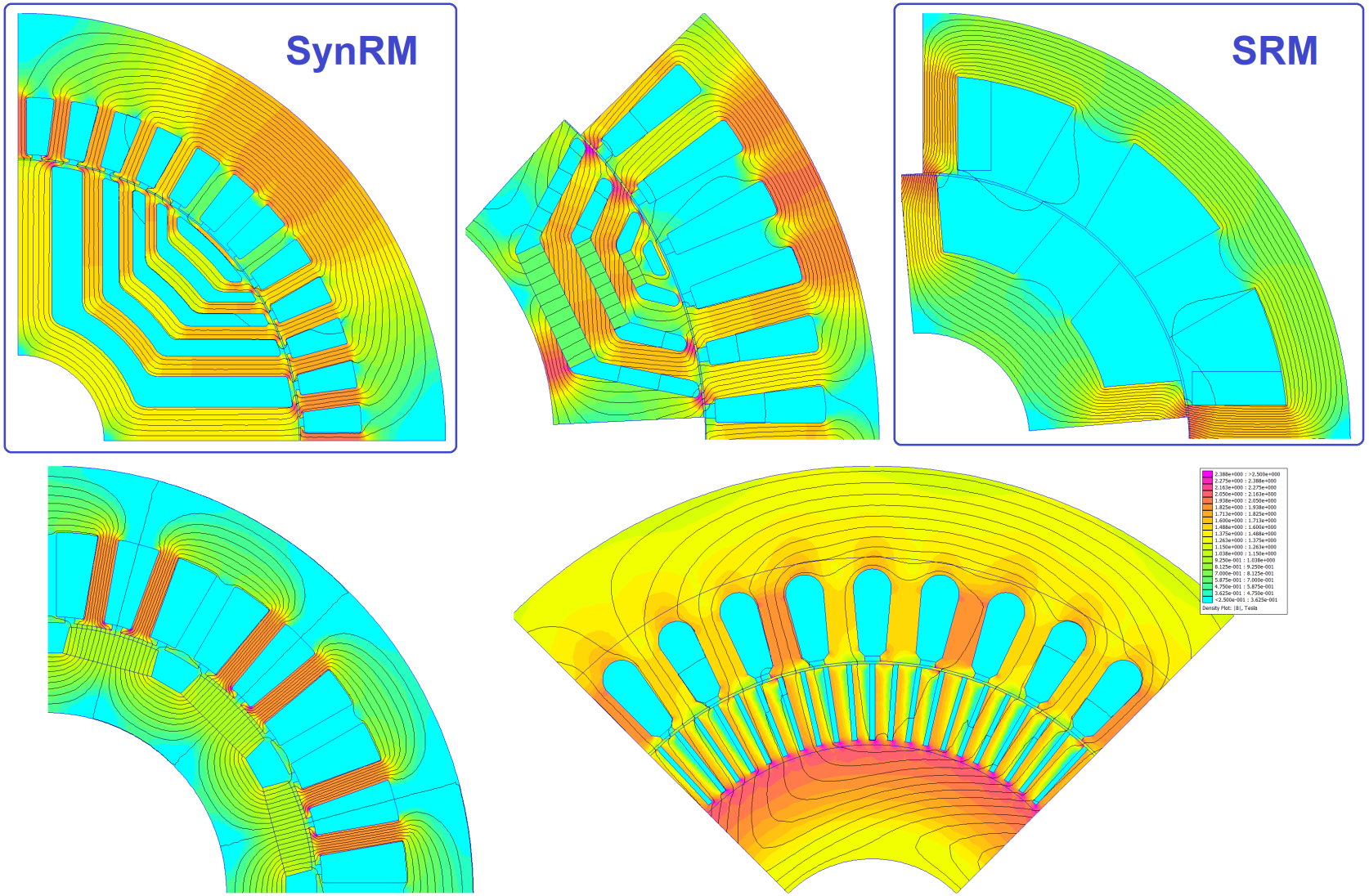
Kapcsolt és szinkron reluktancia gépek/hajtások témaköre.



2. ábra A forgó mozgású reluktancia gépek egy lehetséges csoportosítása

- változatos topológiák → konstrukciók felépítésének tanulmányozása, a főméretek meghatározását szolgáló lépések bemutatása
- gép és hajtás illesztése → numerikus térszámításon alapuló, automatizált eljárás kidolgozása a különböző változatok elektromágneses jellemzőinek meghatározásához
- szabályozási módszerek vizsgálata szimulációs eszközökkel

A reluktancia elvű gépekről általánosságban



3. ábra Radiális fluxusú géptípusok mezőképe

SynRM és SRM hajtások tulajdonságai

Számos hasonlóság gépoldalon:

- forgórészen rézveszteség nem keletkezik (vezetők hiányában);
- hosszabb csapágyélettartam (alacsonyabb tengelyhőm.);
- gyakori indíthatóság, tartós túlterhelhetőség (hőtolerancia);
- nincs szükség többletáramra a mezőgyengítéshez;
- jó hatásfok részleges terhelésen/fordulaton is;
- minimális karbantartásigény (nincs kommutátor és kefe);
- robbanásveszélyes környezetben is alkalmazhatók.

A szabályozott hajtásnak figyelembe kell vennie, hogy:

- a gépet és a hajtást komplett csomagként célszerű fejleszteni;
- az egyoldali gerjesztés növeli a látszólagos teljesítményigényt;
- a nyomatéklüktetés, rezgés és akusztikus zaj összetett eredetű.

SynRM és SRM hajtások tulajdonságai

Számos hasonlóság gépoldalon:

- forgórészen rézveszteség nem keletkezik (vezetők hiányában);
- hosszabb csapágyélettartam (alacsonyabb tengelyhőm.);
- gyakori indíthatóság, tartós túlterhelhetőség (hőtolerancia);
- nincs szükség többletáramra a mezőgyengítéshez;
- jó hatásfok részleges terhelésen/fordulaton is;
- minimális karbantartásigény (nincs kommutátor és kefe);
- robbanásveszélyes környezetben is alkalmazhatók.

A szabályozott hajtásnak figyelembe kell vennie, hogy:

- a gépet és a hajtást komplett csomagként célszerű fejleszteni;
- az egyoldali gerjesztés növeli a látszólagos teljesítményigényt;
- a nyomatéklüktetés, rezgés és akusztikus zaj összetett eredetű.

SynRM és SRM hajtások tulajdonságai

Számos hasonlóság gépoldalon:

- forgórészen rézveszteség nem keletkezik (vezetők hiányában);
- hosszabb csapágyélettartam (alacsonyabb tengelyhőm.);
- gyakori indíthatóság, tartós túlterhelhetőség (hőtolerancia);
- nincs szükség többletáramra a mezőgyengítéshez;
- jó hatásfok részleges terhelésen/fordulaton is;
- minimális karbantartásigény (nincs kommutátor és kefe);
- robbanásveszélyes környezetben is alkalmazhatók.

A szabályozott hajtásnak figyelembe kell vennie, hogy:

- a gépet és a hajtást komplett csomagként célszerű fejleszteni;
- az egyoldali gerjesztés növeli a látszólagos teljesítményigényt;
- a nyomatéklüktetés, rezgés és akusztikus zaj összetett eredetű.

SynRM és SRM hajtások tulajdonságai

Számos hasonlóság gépoldalon:

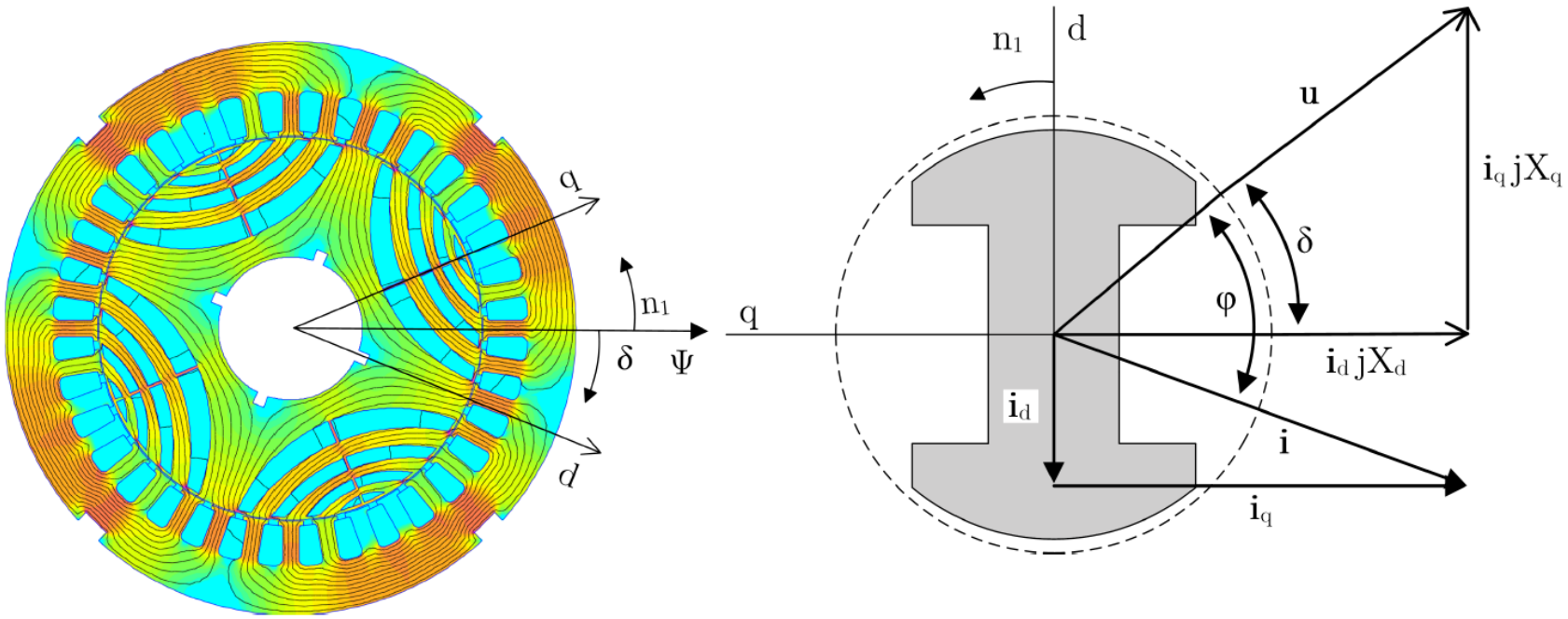
- forgórészen rézveszteség nem keletkezik (vezetők hiányában);
- hosszabb csapágyélettartam (alacsonyabb tengelyhőm.);
- gyakori indíthatóság, tartós túlterhelhetőség (hőtolerancia);
- nincs szükség többletáramra a mezőgyengítéshez;
- jó hatásfok részleges terhelésen/fordulaton is;
- minimális karbantartásigény (nincs kommutátor és kefe);
- robbanásveszélyes környezetben is alkalmazhatók.

A szabályozott hajtásnak figyelembe kell vennie, hogy:

- a gépet és a hajtást komplett csomagként célszerű fejleszteni;
- az egyoldali gerjesztés növeli a látszólagos teljesítményigényt;
- a nyomatéklüktetés, rezgés és akusztikus zaj összetett eredetű.

SynRM billenőnyomatéka

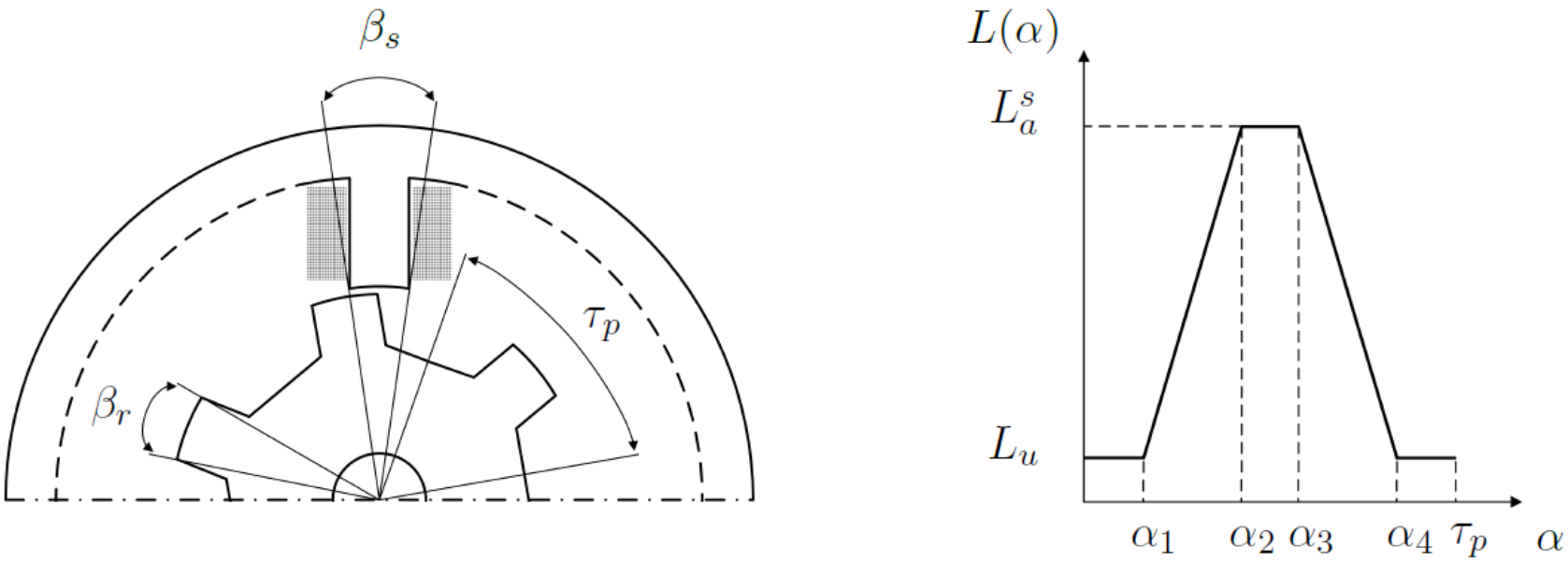
$$M_b = \frac{m \cdot U^2}{2 \cdot \Omega_0} \cdot \frac{X_d - X_q}{X_d \cdot X_q} \tag{1}$$



4. ábra SynRM egyszerűsített vektordiagramja

SRM egyszerűsített nyomatéka, egyfázisú táplálás esetén

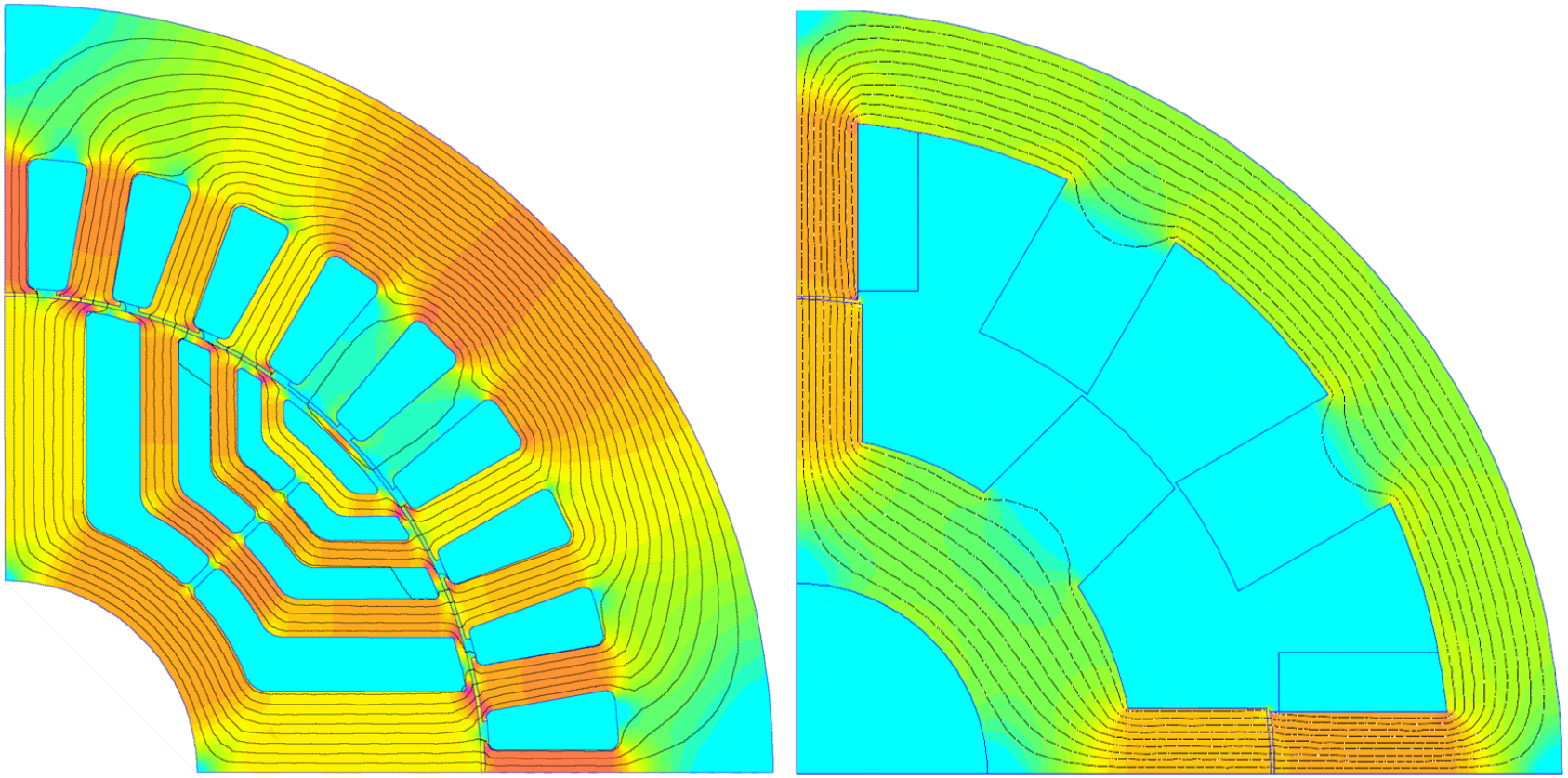
$$M_k = \frac{1}{2}\, i_k^2\, \frac{dL_k(\alpha)}{d\alpha} \tag{2}$$



5. ábra SRM: geometria és öninduktivitás

Főméretek meghatározása egy példán keresztül

- $P_n = 7.5\ kW$, $U_v = 400\ V$, $U_e = 565\ V$
- $SOD = 200\ mm$, $SID = 125\ mm$, $L = 170\ mm$
- $TRV = 23\ kNm/m^3$ (TEFC)



6. ábra A példaként megtervezett SynRM és SRM erővonalképe

ElektroMágneses Topológia Analizátor

- topológia = geometria + anyagjellemzők + tekercselés
- CÉL : a gépspecifikus karakterisztikák önműködő előállítása
- MÓDSZER : 2D magnetosztatikus végeselem analízis

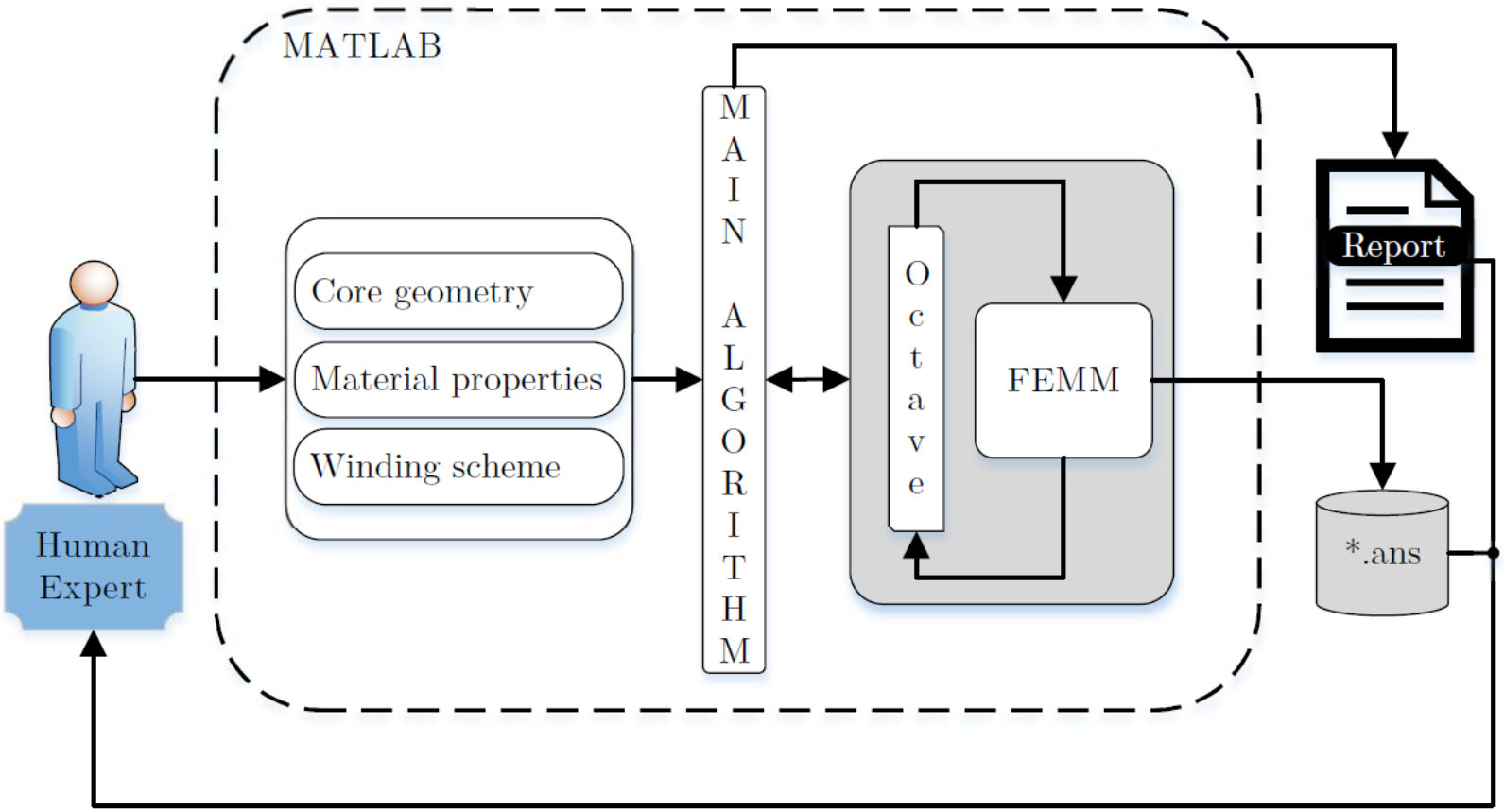
ElektroMágneses Topológia Analizátor

- topológia = geometria + anyagjellemzők + tekercselés
- CÉL : a gépspecifikus karakterisztikák önműködő előállítása
- MÓDSZER : 2D magnetosztatikus végeselem analízis

ElektroMágneses Topológia Analizátor

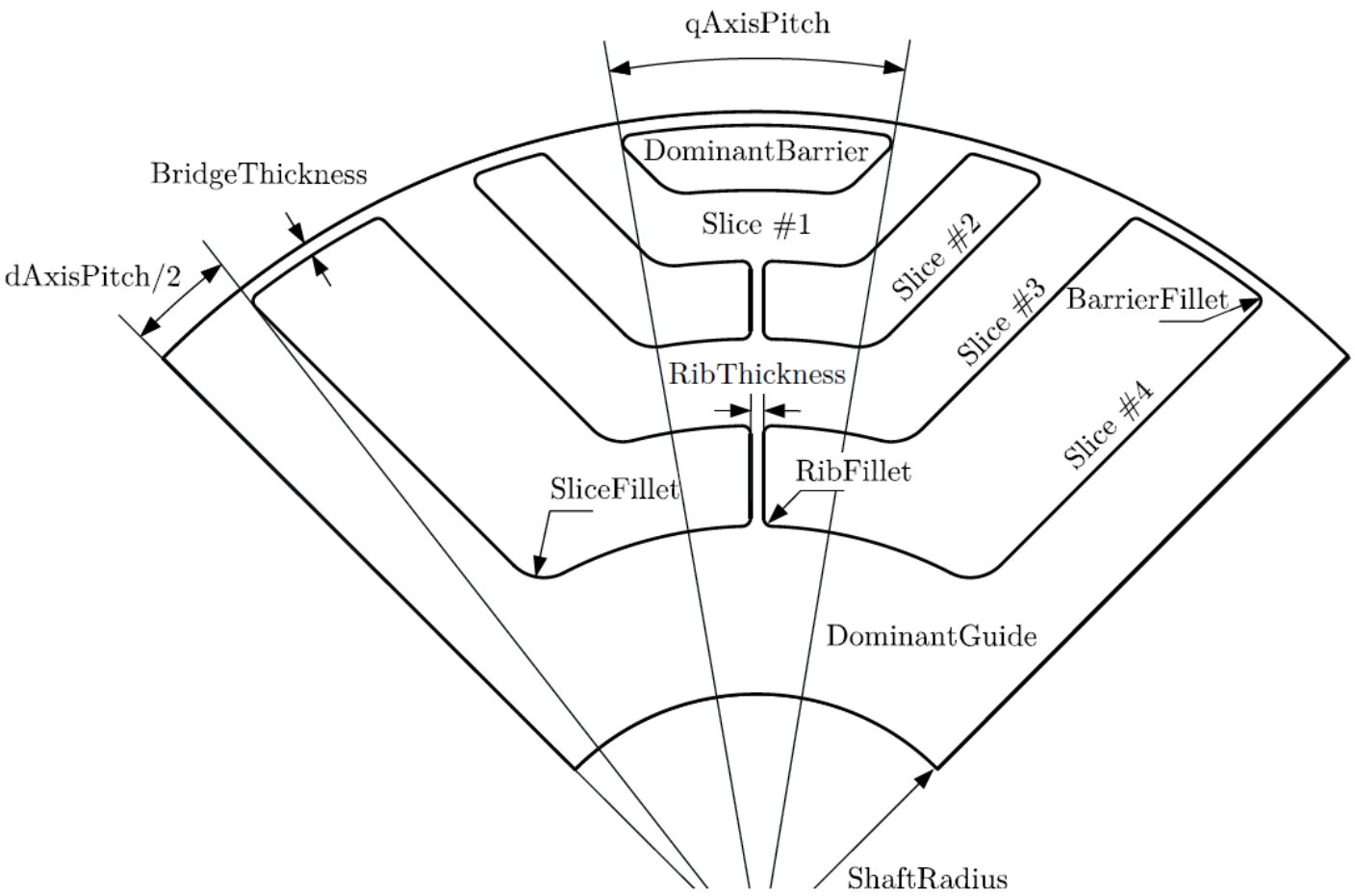
- topológia = geometria + anyagjellemzők + tekercselés
- CÉL : a gépspecifikus karakterisztikák önműködő előállítása
- MÓDSZER : 2D magnetosztatikus végeselem analízis

- topológia = geometria + anyagjellemzők + tekercselés
- CÉL : a gépspecifikus karakterisztikák önműködő előállítása
- MÓDSZER : 2D magnetosztatikus végeselem analízis



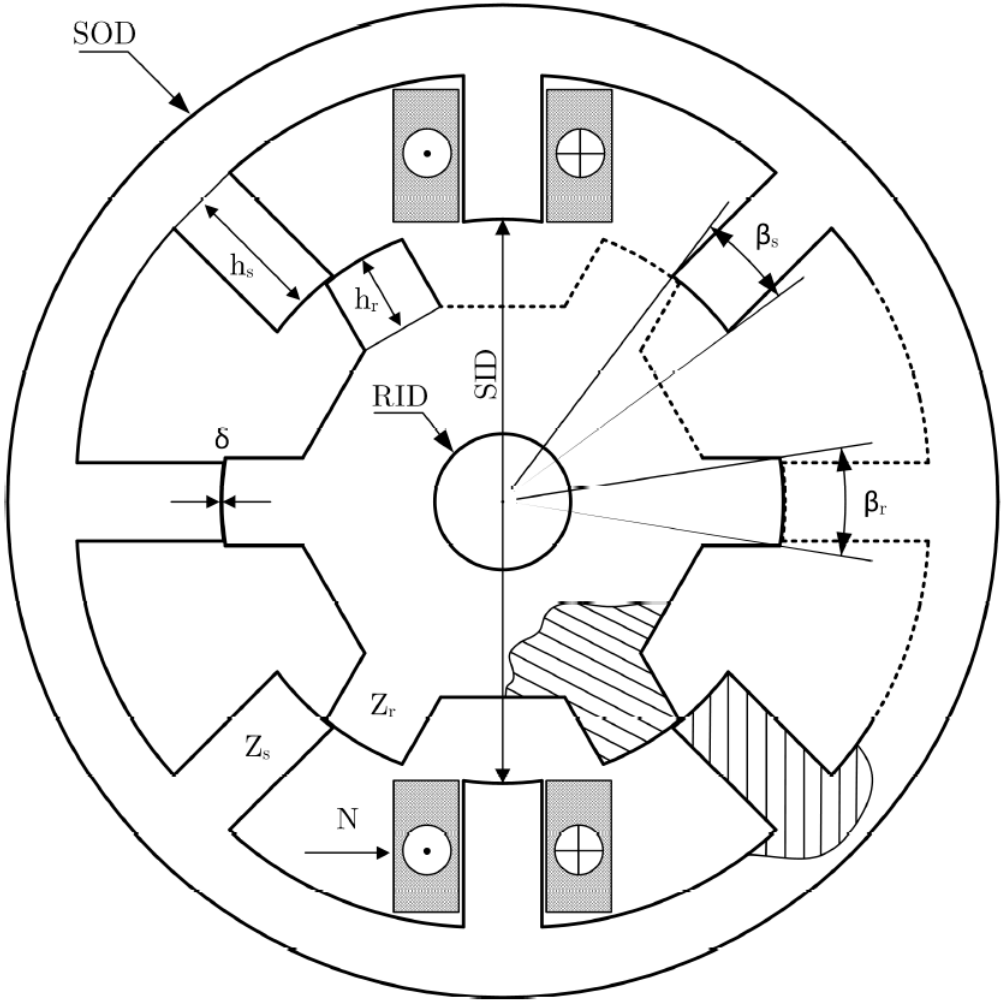
7. ábra EMTA rendszerterve és a szoftverkomponensek

- Parametrikus SynRM topológia



8. ábra Transzverzálisan laminált SynRM forgórész sablonja

- Parametrikus SRM topológia



9. ábra Főméretek az SRM topológia modellezéséhez

Hálózás

- a modell térbeli diszkretizálása (2D - háromszög elemek)
- a matematikai megoldás pontosságát alapvetően befolyásolja
- EMTA : az érzékeny térrészek hálósűrűsége programozható

Hálózás

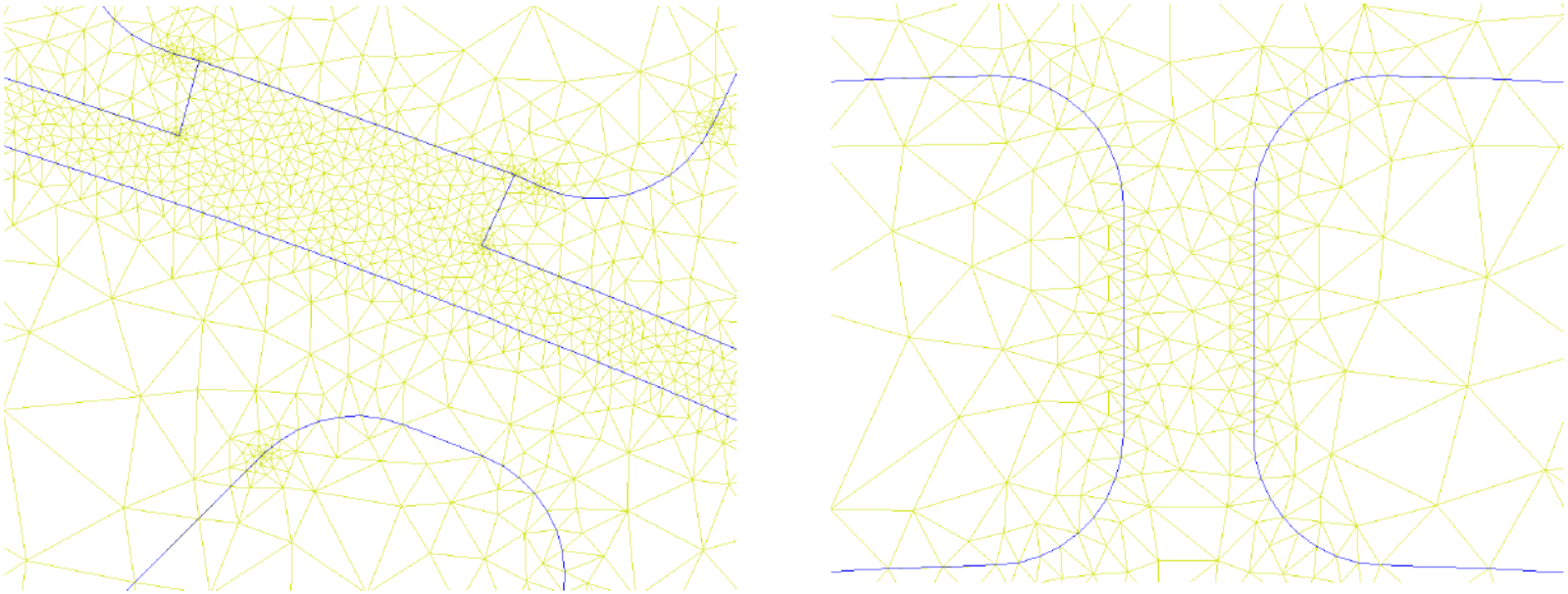
- a modell térbeli diszkretizálása (2D - háromszög elemek)
- a matematikai megoldás pontosságát alapvetően befolyásolja
- EMTA : az érzékeny térrészek hálósűrűsége programozható

Hálózás

- a modell térbeli diszkretizálása (2D - háromszög elemek)
- a matematikai megoldás pontosságát alapvetően befolyásolja
- EMTA : az érzékeny térrészek hálósűrűsége programozható

Hálózás

- a modell térbeli diszkretizálása (2D - háromszög elemek)
- a matematikai megoldás pontosságát alapvetően befolyásolja
- EMTA : az érzékeny térrészek hálósűrűsége programozható

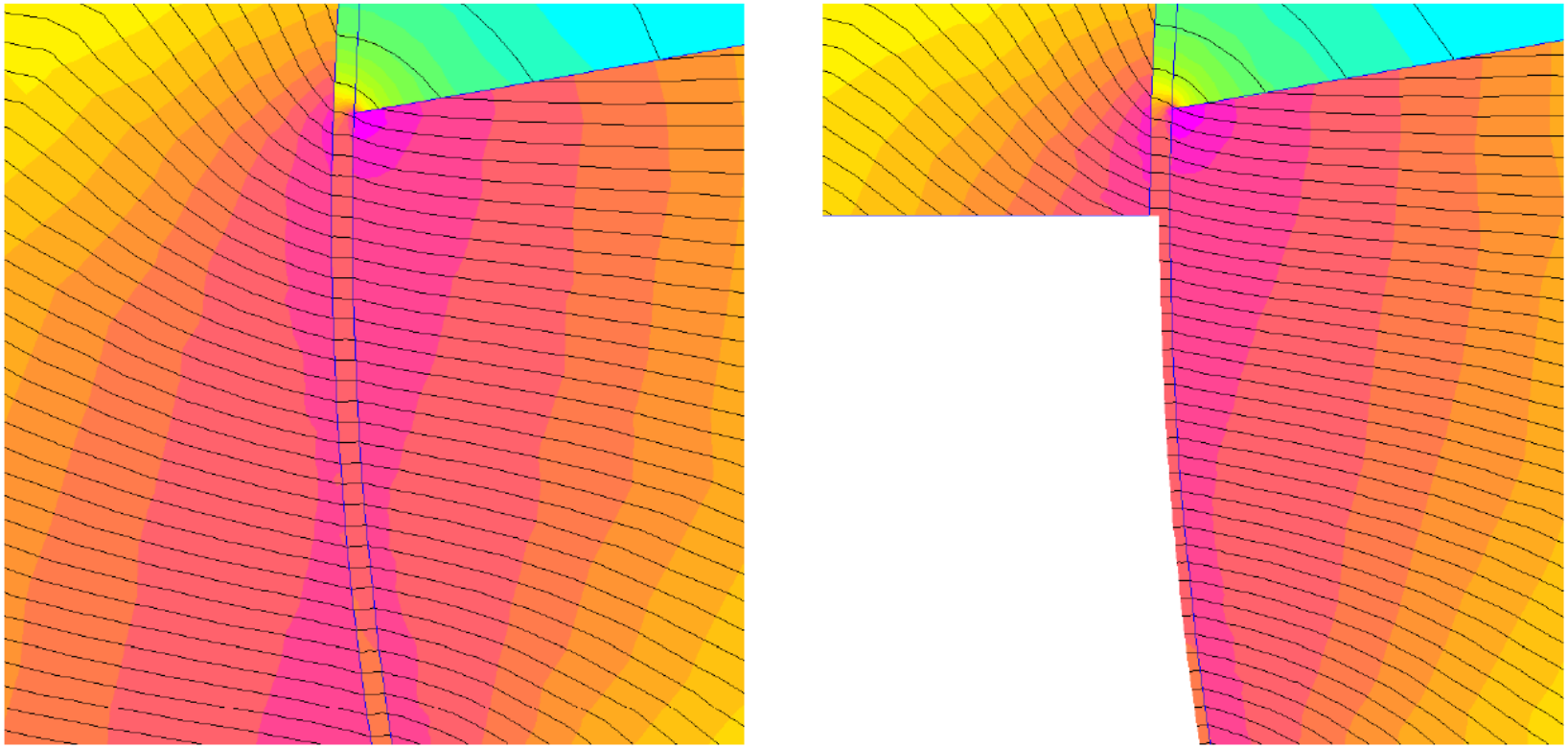


(a) Légrés környezetében (b) Borda környezetében

10. ábra SynRM hálózása a kritikus térrészekben

Szimmetria kihasználása

- a probléma mérete és a megoldás időigénye szorosan összefügg
- a legkisebb modellhányad a tekercselési szimmetriától függ
- antiperiodikus/periodikus szimmetriafeltételek definiálhatók

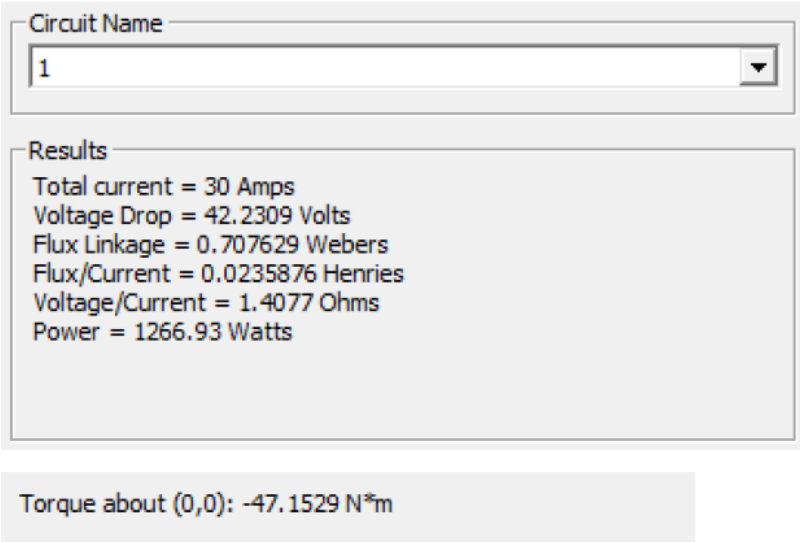


(a) Teljes modell (b) $\frac{1}{2}$ Parciális modell

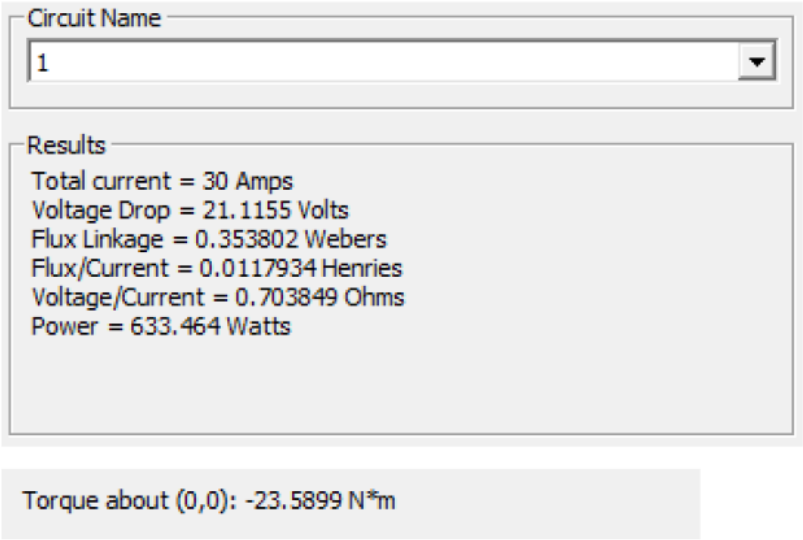
11. ábra SRM kinagyított erővonalképei azonos munkapontban

Szimmetria kihasználása

- a probléma jellege is befolyásolja, lehet-e szimmetrizálni
- a gerjesztéseket redukálni kell az aktuális modellhányadra
- fizikailag értelmetlen feltételekre is kaphatunk eredményt
- EMTA : a szimmetriafeltételek hozzárendelése automatikus



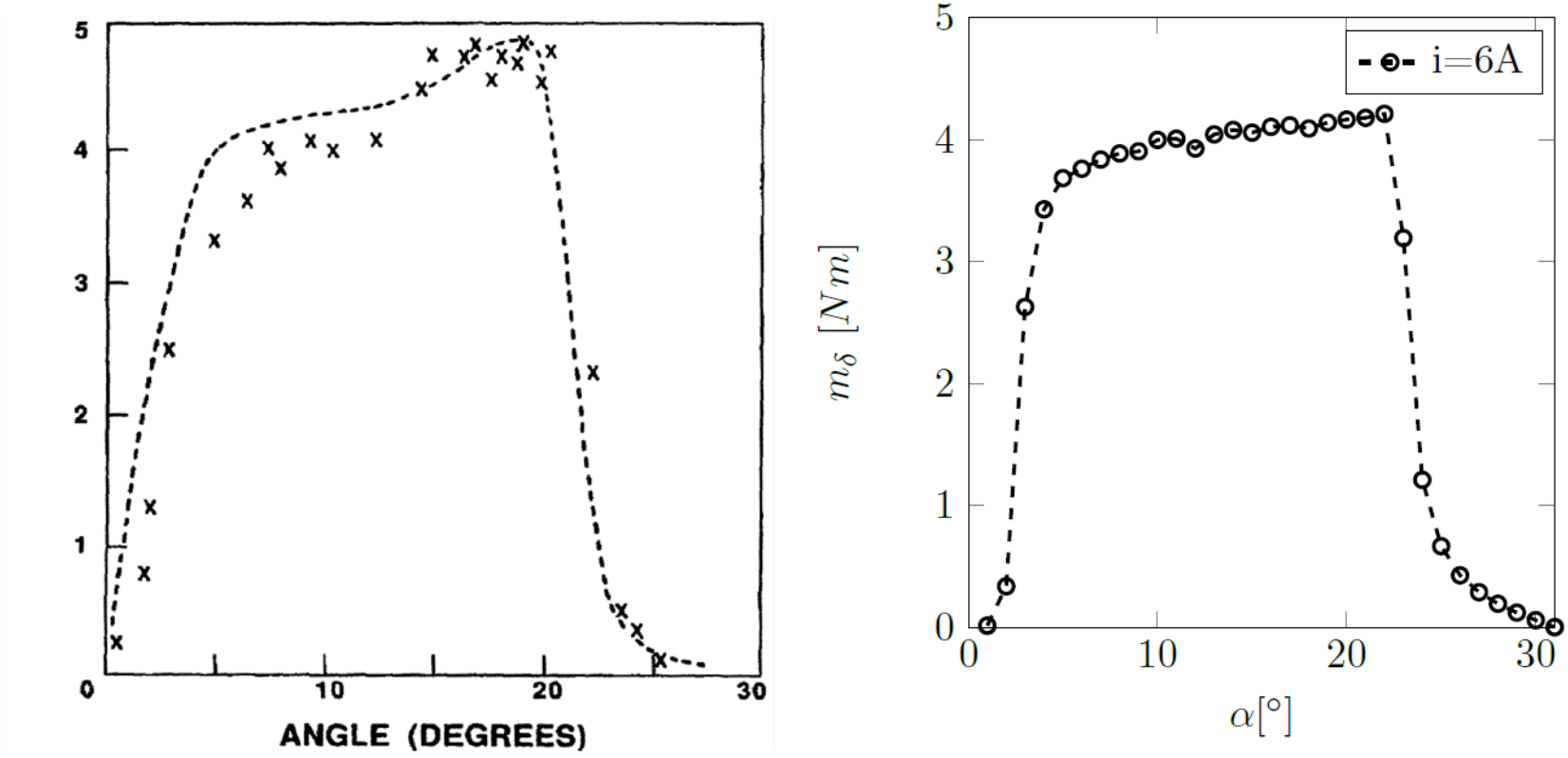
(a) Teljes modell



(b) $\frac{1}{2}$ Parciális modell

12. ábra Számszerű eredmények azonos munkapontban

SRM, 7.5 kW, 8/6 topológia

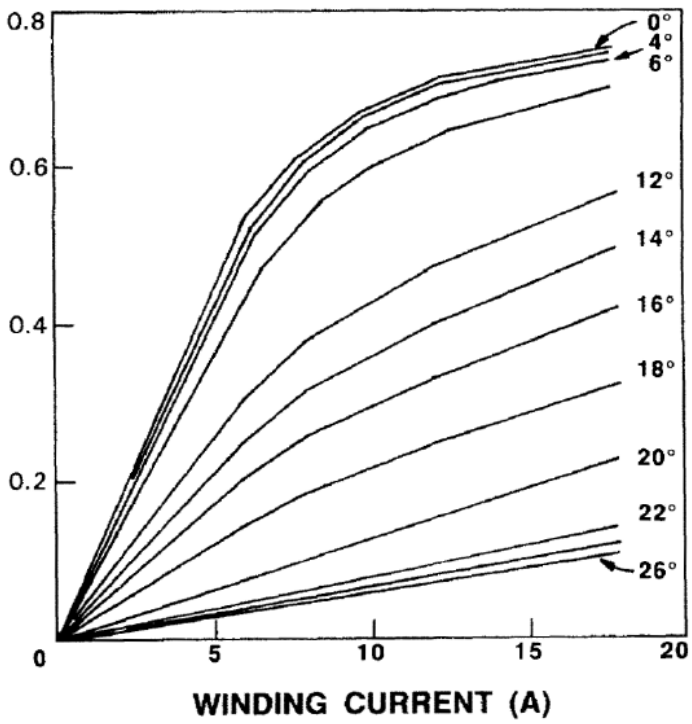


(a) Publikált eredmény [39, 532]

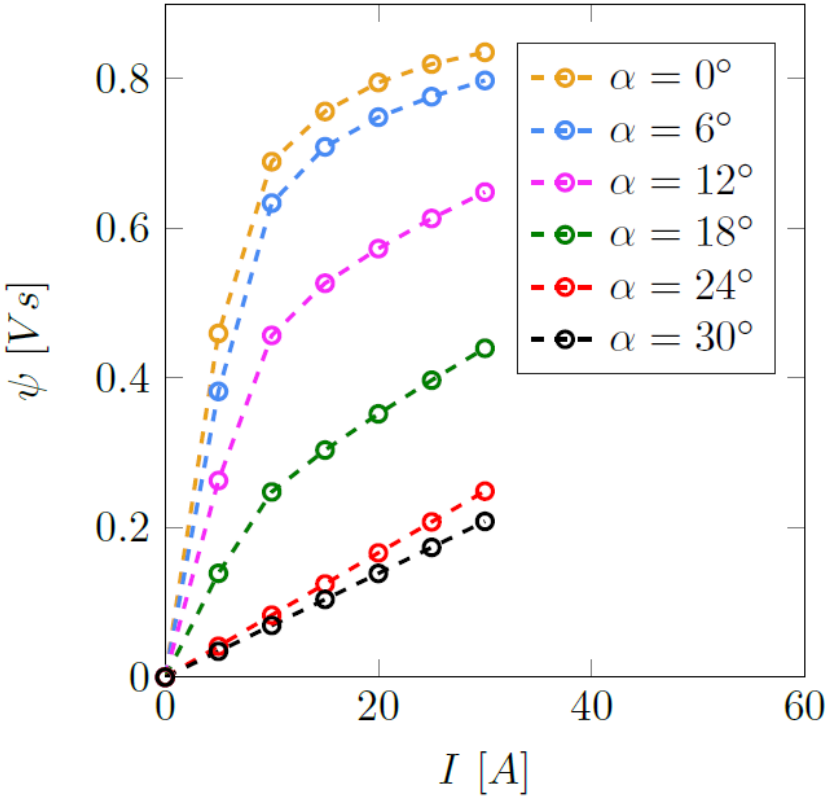
(b) EMTA futtatás eredménye

13. ábra Az eredeti és a számított nyomatékprofil

SRM, 7.5 kW, 8/6 topológia



(a) Publikált eredmény [39, 532]



(b) EMTA futtatás eredménye

14. ábra Az eredeti és a számított fluxuskapcsolódás-profil

Eredmények

- A Diplomatervezés során a kapcsolt és a szinkron reluktancia gép **koncepcio**nális, **tervezés**i, **térszámítás**i és **szabályozás**i kérdéseit vizsgáltam. A vállalt feladatok teljesítéséhez **korszerű szoftver**es megoldásokat alkalmaztam.
- Bemutattam a kapcsolt és szinkron reluktancia gépek felépítését, konstrukciós jellemzőit. Ismertettem a **főméretek** meghatározásának lépéseit egyszerű **példák**on keresztül, kitérve a legfontosabb géptervezési és szabályozási kérdésekre.
- A térszámítási feladatokhoz implementáltam az **ElektroMágneses Topológia Analizátor** névre keresztelt szoftvereszközt MATLAB 8.5 környezetben, amely egy magas szintű keretrendszerként (a FEMM v4.2 végeselem program integrálásával) hatékonyan támogatja a reluktancia gépek **automatizált karakterizálás**át.

Eredmények

- A Diplomatervezés során a kapcsolt és a szinkron reluktancia gép **koncepcio**nális, **tervezés**i, **térszámítás**i és **szabályozás**i kérdéseit vizsgáltam. A vállalt feladatok teljesítéséhez **korszerű szoftver**es megoldásokat alkalmaztam.
- Bemutattam a kapcsolt és szinkron reluktancia gépek felépítését, konstrukciós jellemzőit. Ismertettem a **főméretek** meghatározásának lépéseit egyszerű **példák**on keresztül, kitérve a legfontosabb géptervezési és szabályozási kérdésekre.
- A térszámítási feladatokhoz implementáltam az **ElektroMágneses Topológia Analizátor** névre keresztelt szoftvereszközt MATLAB 8.5 környezetben, amely egy magas szintű keretrendszerként (a FEMM v4.2 végeselem program integrálásával) hatékonyan támogatja a reluktancia gépek **automatizált karakterizálás**át.

Eredmények

- A Diplomatervezés során a kapcsolt és a szinkron reluktancia gép **koncepcio**nális, **tervezés**i, **térszámítás**i és **szabályozás**i kérdéseit vizsgáltam. A vállalt feladatok teljesítéséhez **korszerű szoftver**es megoldásokat alkalmaztam.
- Bemutattam a kapcsolt és szinkron reluktancia gépek felépítését, konstrukciós jellemzőit. Ismertettem a **főméretek** meghatározásának lépéseit egyszerű **példák**on keresztül, kitérve a legfontosabb géptervezési és szabályozási kérdésekre.
- A térszámítási feladatokhoz implementáltam az **ElektroMágneses Topológia Analizátor** névre keresztelt szoftvereszközt MATLAB 8.5 környezetben, amely egy magas szintű keretrendszerként (a FEMM v4.2 végeselem program integrálásával) hatékonyan támogatja a reluktancia gépek **automatizált karakterizálás**át.

További fejlesztési lehetőségek

- SynRM és SRM tervezése visszacsatolt térszámítással
  $\rightarrow$ optimálás, pl. forgórész geometria
- EMTA összekapcsolása a hajtás dinamikus modelljével
  $\rightarrow$ tranziens analízis (tetszőleges időbeli lefolyás)
- Eredmények hasznosítása az oktatásban
  $\rightarrow$ elmélet, gyakorlat

Köszönöm megtisztelő figyelmüket!

További fejlesztési lehetőségek

- SynRM és SRM tervezése visszacsatolt térszámítással
  $\rightarrow$ optimálás, pl. forgórész geometria
- EMTA összekapcsolása a hajtás dinamikus modelljével
  $\rightarrow$ tranziens analízis (tetszőleges időbeli lefolyás)
- Eredmények hasznosítása az oktatásban
  $\rightarrow$ elmélet, gyakorlat

Köszönöm megtisztelő figyelmüket!

További fejlesztési lehetőségek

- SynRM és SRM tervezése visszacsatolt térszámítással
  $\rightarrow$ optimálás, pl. forgórész geometria
- EMTA összekapcsolása a hajtás dinamikus modelljével
  $\rightarrow$ tranziens analízis (tetszőleges időbeli lefolyás)
- Eredmények hasznosítása az oktatásban
  $\rightarrow$ elmélet, gyakorlat

Köszönöm megtisztelő figyelmüket!

1. kérdés

1) Van arra lehetőség, hogy a FEMM-be az örvényáramokat időtartományban figyelembe vegye?

Nincs erre lehetőség, mivel a FEMM jelenleg ,,csak" magnetosztatikus vagy időharmonikus problémák megoldására alkalmas.
Az időharmonikus (más néven örvényáram) probléma megoldása során a FEMM az adott frekvenciájú, szinuszos gerjesztésre ugyanolyan frekvenciájú, amplitúdójában és fázisában eltérő választ szolgáltat, de nem az időtartományban!
Az időharmonikus megoldó alkalmazásával lehetséges pl. egy aszinkron gép nyomatékképzésének vizsgálata az adott szlip-frekvencián. A forgásból indukálódó feszültséget viszont így sem tudjuk figyelembe venni, ezért az időharmonikus megoldó csak pl. egy lefogott forgórészű aszinkron gép vizsgálatára alkalmas fizikailag. Meghatározható így a gép indítónyomatéka.

2. kérdés

2) Ha nem, hogyan lehetne a nem egyértékű nemlinearitást figyelembe venni például egy külső modellel?

A forgómezős váltakozóáramú gépek állandósult állapotban összekapcsolt pólusrendszere miatt a hiszterézisveszteséget leginkább az SRM forgórészére lenne érdemes vizsgálni. (Az átmágnesezés gyakorisága nagyban függ a fordulatszámtól.)

A lokális indukció és a táplálási frekvenciaspektrum ismeretében alkalmazható pl. a Steinmetz-féle veszteségszámítás:

Eredő vasveszteség számítása a Steinmetz-formula alapján

$$p_v = K_h f(B_m^2) + K_c(fB_m)^2 + K_e(fB_m)^{1.5} \tag{3}$$

ahol K_h, K_c és K_e együtthatók arányát az adott dinamólemez anyagtulajdonságainak kimérésével lehetne meghatározni.

3) Van lehetőség az örvényáramokból fakadó veszteség számítására?

A tömör anyagban kialakuló örvényáram nagyságát a villamos vezetőképesség, kiterjedését a behatolási mélység befolyásolja. Erre a célra nem csak a FEMM időharmonikus megoldóját, hanem egy kereskedelmi szoftvert is alkalmaznék. Tapasztalatom szerint a megbízható veszteségszámításhoz mindenképpen érdemes többféle szoftvert vagy többféle kiértékelési módszert használni. Az örvényáramú veszteségeket Ansys Maxwell 3D-ben, pl. egy lemezvastagságnyi térrészt kiragadva is vizsgálnám, amellyel becsülhető a forgórész felületi vesztesége (ha nincsenek axiális szellőzőrések). PWM táplálás esetén az alap- és felharmonikusokra is el kell végezni a veszteségszámítást. Fontos ezt ellenőrizni pl. egy nagy fordulatszámú, felületre szerelt PMSM esetén. A táplálás harmonikustartalmát sorba kapcsolt feszültségforrásokkal képezném le, a mintavételi időt a legnagyobb frekvencia-összetevőhöz illeszteném.