

СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ НА ЕФЕКТИВНОСТТА МЕЖДУ АСИНХРОННА РАДИАЛНА ЕЛЕКТРИЧЕСКА МАШИНА И СИНХРОНЕН РЕАКТИВЕН ДВИГАТЕЛ (SYNRM)

Благовест Златев
bzlatev@3clab.com

лаб. CAD/CAM/CAE в индустрията, МТФ, ТУ – София, бул. „Кл. Охридски“ № 8, 1797 София, БЪЛГАРИЯ

Докладът се отнася до сравнително проучване между асинхронна радиална електрическа машина и синхронен реактивен двигател (SynRM). Имайки предвид, че двете машини нямат разлики в конструкцията на статорния пакет и се различават само по конструкцията на ротора е породен интересът към това как те се сравняват по различни параметри - основно тяхната ефективност. Освен това, конструкцията на ротора SynRM не се нуждае от заливане на роторен кафез и в нея не се индуцират токове, тъй като тя затваря магнитното поле с помощта на специално оформени въздушни междини, които създават силно магнитно съпротивление в дадена ориентация и слабо такова в друга..

Ключови думи: SynRM, синхронен реактивен мотор, асинхронна електрическа машина, Maxwell, FEM

1. Увод

Целта на изследването е да се създаде електрически синхронен реактивен двигател (SynRM), като се имат предвид присъщите им предимства и да се сравни с конвенционалните асинхронни радиални електрически машини. За постигането на тези цели са създадени два двумерни модела от крайни елементи, с които да се изчислят и сравнят 4-полюсна радиална асинхронна електрическа машина с 4-полюсен синхронен реактивен двигател (SynRM) чрез модифициране само на ротора между двете машини.

SynRM двигателите са известни още като синхронни електродвигатели с ротор с анизотропна магнитна проводимост [1]. Някои от основните им предимства се състоят в по-високата им ефективност (до 95% коефициент на полезно действие) [2], като по този начин имат висока IЕ класификация (обикновено IЕ4 или IЕ5). Това е така, защото роторът не се състои от магнитна сърцевина и роторен кафез на късо, в който се индуцират токове, като по този начин намалява топлината, генерирана в статора.

ABB групата се явяват лидер в областта с широко семейство синхронни реактивни двигатели от 17 до 350 kW, широко произвеждани от 2013 г. [3] ABB твърдят, че при сравнение на SynRM двигател с конвенционална асинхронна електрическа машина със същия размер с висок клас на енергийна ефективност IЕ2 (съгласно GOST IEC 60034-30-1-2016) постига между 10-20% по-висока ефективност.

2. Входни параметри на асинхронна радиална електрическа машина

За сравнение е избрана асинхронна радиална електрическа машина с мощност от 2,2 kW поради относително високия ѝ пазарен дял на електрически машини, като конкретно е избрана такава машина от Елпром Харманли с модел AT3 100 LK 4. Ламелните стекове за ротора и статора на електрическата машина са базирани на дефинираните в IEC.100/4.90 (SA150T, RA090M) – с външен диаметър на статора 150 мм и външен диаметър на ротора 90 мм.

Основните характеристики на двигателя са показани в таблица 1.

Табл. 1 – Характеристики на асинхронна радиална електрическа машина – Елпром Харманли AT3 100 LK 4

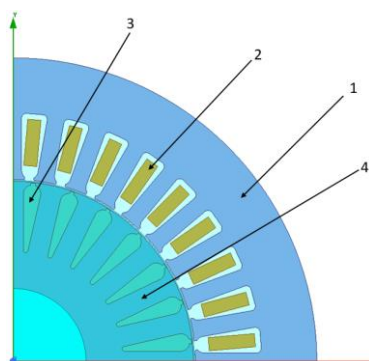
Брой полюси	4
Синхронна скорост	1500 min ⁻¹
Мощност	2.2 kW
Номинална скорост при 50 Hz	1420 min ⁻¹
Максимално КПД при пълен товар	86.7%
Фактор на мощността- cosφ	0.81
Брой слотове в статор	36
Брой слотове в ротор	28

3. Виртуален прототип на асинхронна радиална електрическа машина – AT3 100 LK 4

Виртуалното прототипиране чрез моделиране и симулация на продукти е по-бързо за постигане на добър резултат в процеса на проектиране в сравнение с физическото прототипиране и се използва за предсказване на динамични характеристики на прототипа. [4] [5]

Геометричен Модел

Виртуален прототип на радиална асинхронна електрическа машина е показан на фиг. 1 и е създаден от самото начало като повърхнинен (2D) модел с цел опростяване на модела от крайни елементи. Моделираната електрическа машина е 4-полусна със синхронна скорост 1500 об/мин. Машината е моделирана със статор (поз. 1) и ротор (поз. 4) от електротехническа стомана, статорни намотки (поз. 2) от мед, щанцовани канали в ротора (поз. 3) с отлят алуминиев кафез на късо в тях.



Фиг. 1 – Виртуален прототип на радиална асинхронна електрическа машина – AT3 100 LK 4

Гранични условия

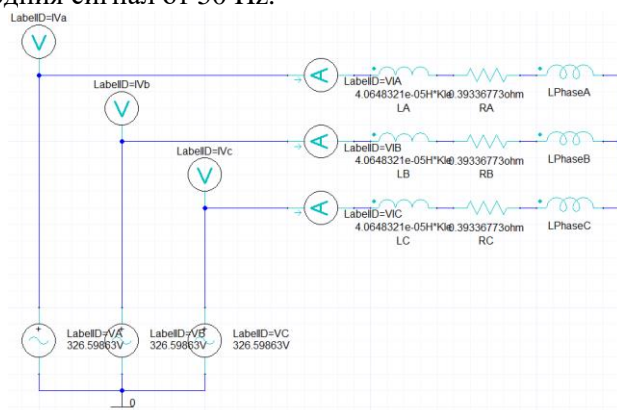
Като се има предвид, че се използва двумерен модел, е необходимо да се зададе дължина на модела по оста на асинхронната електрическа машина. Зададената дължина на изчисляваният модел е 140 мм.

Граничните условия на дадената електрическа машина се състоят от дефинирането на намотките за отделните фази на статора, окъсяването на ротора (необходимо, тъй като изчислителният модел е двуизмерен и няма начин да се окъси ротора през алуминиевите пръстени в двата края на ротора) и скорост на въртене на ротора. Скоростта на ротора е зададена на 1420 об./мин. Дефинирането на статорните намотки и крайната връзка на ротора са посочени на фиг. 2.



Фиг. 2 – Дефиниране на статорните намотки и окъсяване на ротор на радиална асинхронна електрическа машина – AT3 100 LK 4

Електрическата верига, която захранва машината е показана на фиг. 3 с честота на входния сигнал от 50 Hz.

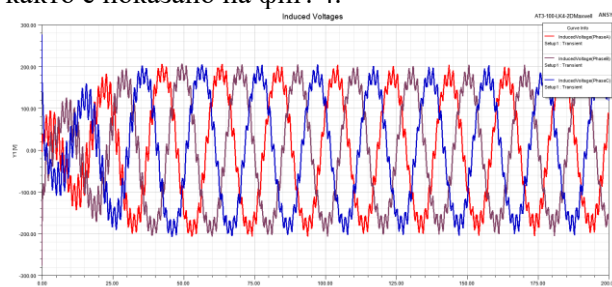


Фиг. 3 – Електрическа верига на радиална асинхронна електрическа машина – AT3 100 LK 4
Резултати от виртуален прототип на радиална асинхронна електрическа машина

Резултатите от виртуалния прототип са представени в следните аспекти – индуцирано напрежение в статора, статорни токове, въртящ момент, електрическа мощност и механична мощност, както и магнитен поток и плътност на тока в модела от крайни елементи.

Индуцирано напрежение

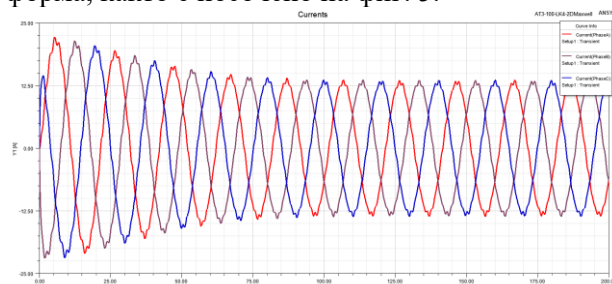
Индуцираното напрежение в статорните намотки е до 200 V със синусоидална форма, както е показано на фиг. 4.



Фиг. 4 – Индуцирано напрежение в статорни намотки на радиална асинхронна електрическа машина – AT3 100 LK 4

Статорни токове

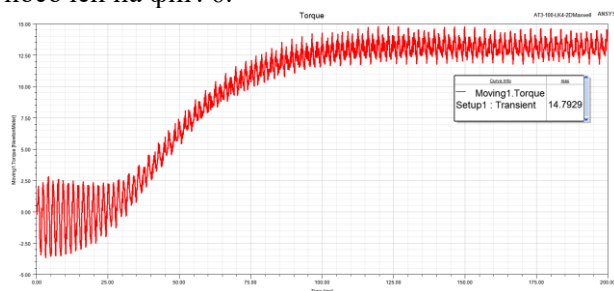
Токът в статорните намотки е с големина до 12 A след стабилизиране със синусоидална форма, както е посочено на фиг. 5.



Фиг. 5 – Ток в статорни намотки на радиална асинхронна електрическа машина – AT3 100 LK 4

Генериран въртящ момент

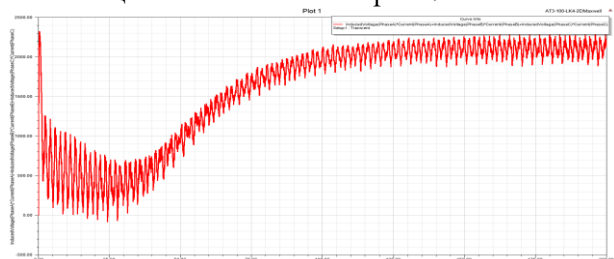
Генерираният въртящ момент на електрическата машина след стабилизиране на изчислителния модел е с максимум от 14,8 Nm и средна големина от 12-13 Nm. Този момент е посочен на фиг. 6.



Фиг. 6 – Генериран въртящ момент от радиална асинхронна електрическа машина – AT3 100 LK 4

Електрическа мощност

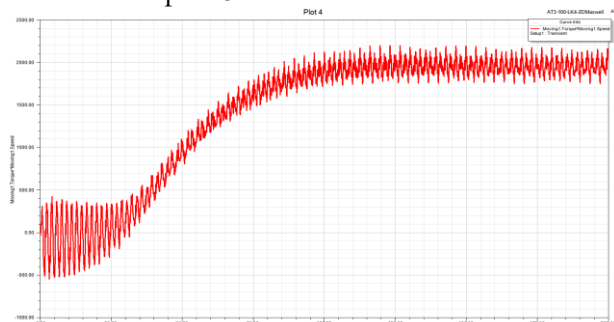
Електрическата мощност, пресметната от изчислителния модел на електрическата машина след стабилизиране на решението е около 2,1 kW. Тази мощност е посочена на фиг. 7.



Фиг. 7 – Електрическа мощност на радиална асинхронна електрическа машина – AT3 100 LK 4

Механична мощност

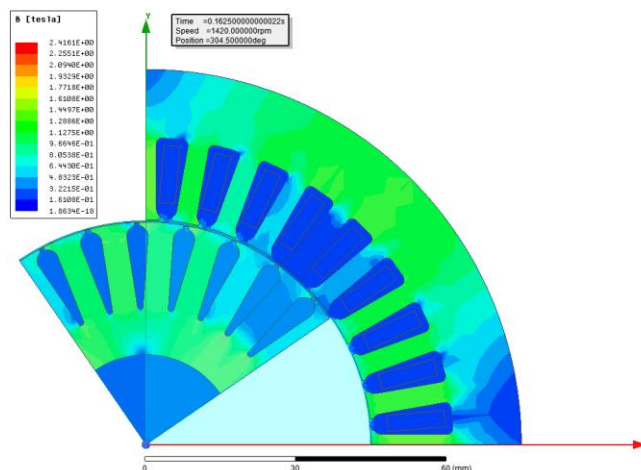
Генерираната механична мощност на електрическата машина след стабилизиране на решението е около 1,96 kW. Тази мощност е показана на фиг. 8



Фиг. 8 – Генерирана механична мощност на радиална асинхронна електрическа машина – AT3 100 LK 4

Плътност на магнитния поток

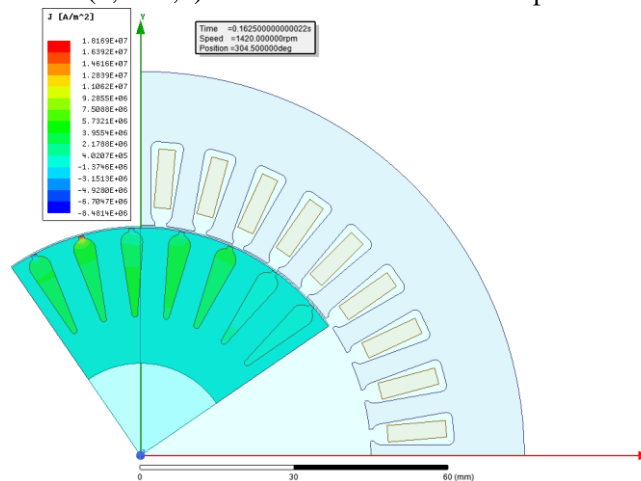
Плътността на магнитния поток е важна, за определяне затварянето на магнитните линии. На фиг. 9 е посочена плътността на магнитния поток. Плътността на магнитния поток е с големина средно 1,6-1,8 T.



Фиг. 9 – Плътност на магнитния поток на радиална асинхронна електрическа машина – AT3 100 LK 4

Плътност на индуциран ток в ротора

Плътността на тока от индуцираните токове в ротора е неизбежна при конвенционалните радиални асинхронни електрически машини, но те увеличават загубите на машината. Плътността на тока в асинхронния двигател AT3 100 LK 4 е около $(7,5-11,0) \times 10^6$ A/m² и е посочена на фиг. 10.



Фиг. 10 – Плътност на тока в ротора на радиална асинхронна електрическа машина – AT3 100 LK 4

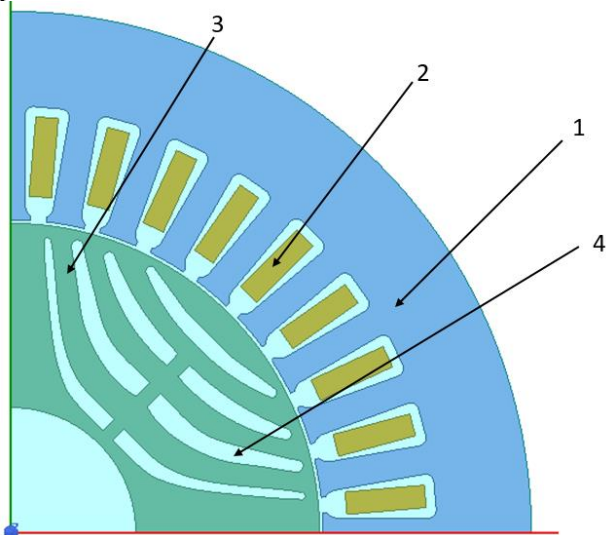
4. Виртуален прототип на синхронен реактивен мотор – Syn RM модификация на AT3 100 LK 4

Геометричен модел

Виртуален прототип на синхронен реактивен двигател е показан на фиг. 11 и е създаден като повърхнинен (2D) модел с цел опростяване на модела от крайни елементи. Моделираната електрическа машина е 4-полусна машина със синхронна скорост 1500 об/мин. Машината е моделирана със статор (поз. 1) и ротор (поз. 3) от електротехническа стомана, статорни намотки (поз. 2) от мед и специално оформени въздушни междини (поз. 4), които създават анизотропна магнитна пропускливост на ротора. За 4-полусна машина показаният сегмент от ротора трябва да

се умножи по 4, за 6-полюсен – 6 пъти и т.н., но запазвайки се в 360°.

Единствената модификация на двигателя е смяната на ротора и запазването на статора еднакъв като този в радиална асинхронна електрическа машина AT3 100 LK 4. Тази модификация води до това, че получената електрическа машина се счита за синхронна реактивна машина. [6]

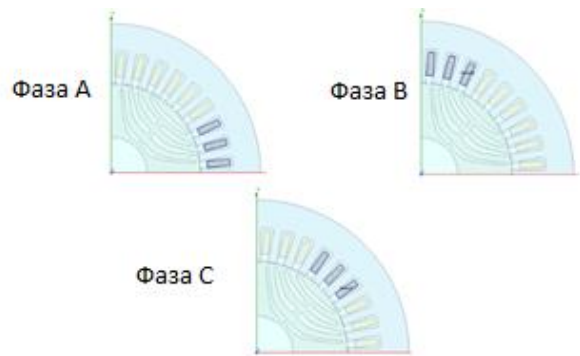


Фиг. 11 – Виртуален прототип на синхронен реактивен мотор – SynRM AT3 100 LK 4

Гранични условия

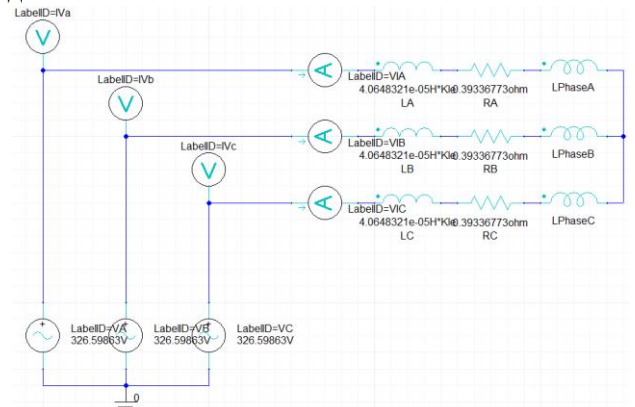
Като се има предвид, че се използва двуизмерен модел, е необходимо да се зададе дължината на модела по оста на асинхронната електрическа машина. Дължината на симулирания двигател е 140 мм.

Граничните условия на дадената електрическа машина включват определянето на намотките за отделните фази на статора, ъгловата ориентация в началния момент и скоростта на ротора. Ъгловата ориентация на ротора е изместена с 27,5° спрямо позицията, показана на фиг. 11. Освен това скоростта на ротора е зададена на 1500, тъй като се очаква двигателят да бъде синхронен. Не е необходимо гранично условие за окъсяване на ротора, като се има предвид, че магнитната проницаемост на двигателя е анизотропна и не е необходим статорен кафез като заради тази промяна не се очаква индуцирането на токове в ротора. Дефинирането на фазите в статорните намотки е посочено на фиг. 12.



Фиг. 12 – Дефиниране на фазови намотки на синхронен реактивен мотор – SynRM AT3 100 LK 4

Електрическата верига, която захранва машината е показана на фиг. 13 с честота на входния сигнал от 50 Hz.



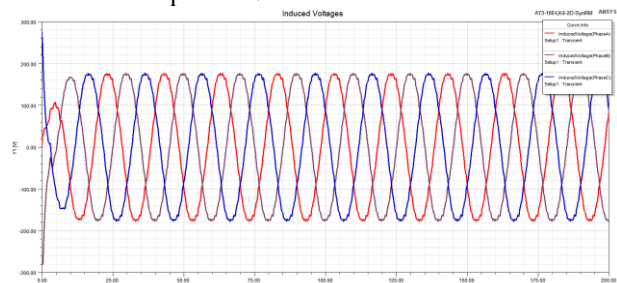
Фиг. 13 – Електрическа верига на синхронен реактивен мотор – SynRM AT3 100 LK 4

Резултати от виртуален прототип на Синхронен реактивен мотор – SynRM

Резултатите от виртуалния прототип са представени в следните аспекти – индуцирано напрежение в статора, статорни токове, въртящ момент, електрическа мощност и механична мощност, както и магнитен поток и плътност на тока в модела от крайни елементи.

Индуцирано напрежение

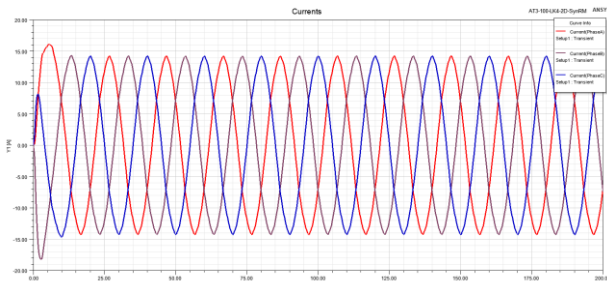
Индуцираното напрежение в статорните намотки е до 175 V със синусоидална форма, посочена на фиг. 14.



Фиг. 14 – Индуцирано напрежение в статорни намотки на синхронен реактивен мотор – SynRM AT3 100 LK 4

Статорни токове

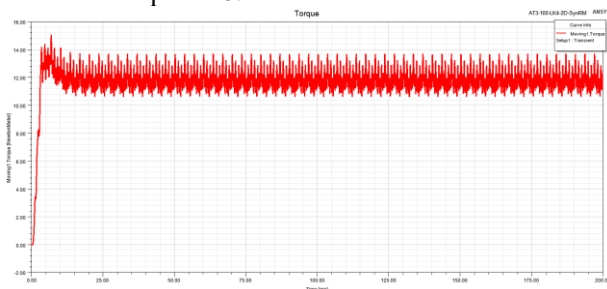
Токът в статорните намотки е с големина до 14,2 A след стабилизиране със синусоидална форма, както е посочено на фиг. 15.



Фиг. 5 – Ток в статорни намотки на синхронен реактивен мотор – SynRM AT3 100 LK 4

Генериран въртящ момент

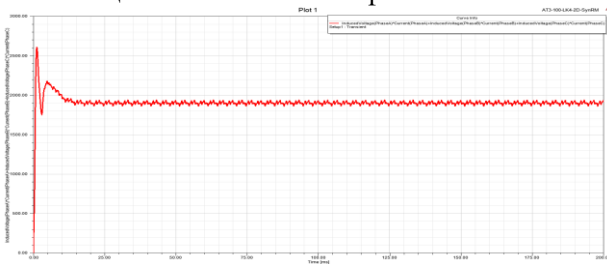
Генерираният въртящ момент на електрическата машина след стабилизиране на изчислителния модел е с максимум от 14 Nm и средна големина от 11.5-13 Nm. Този момент е посочен на фиг. 16.



Фиг. 16 – Генериран въртящ момент от синхронен реактивен мотор – SynRM AT3 100 LK 4

Електрическа мощност

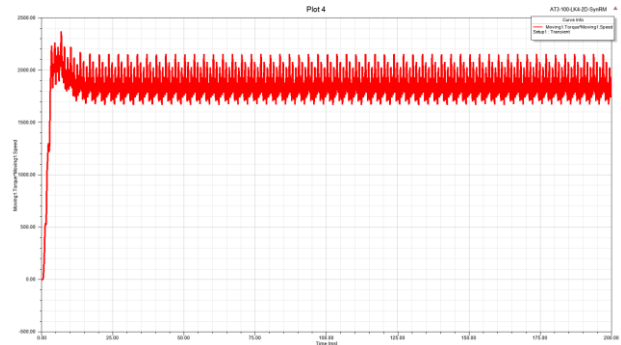
Електрическата мощност, пресметната от изчислителния модел на електрическата машина след стабилизиране на решението е около 1,9 kW. Тази мощност е посочена на фиг. 17.



Фиг. 7 – Електрическа мощност на синхронен реактивен мотор – SynRM AT3 100 LK 4

Механична мощност

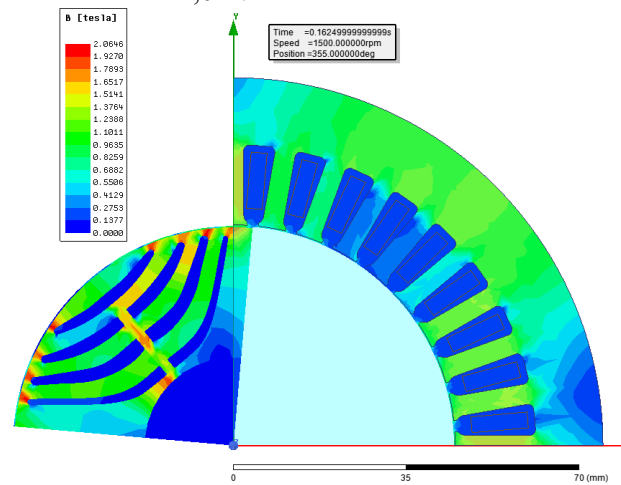
Генерираната механична мощност на електрическата машина след стабилизиране на решението е около 1,86 kW. Тази мощност е показана на фиг. 18



Фиг. 18 – Генерирана механична мощност синхронен реактивен мотор – SynRM AT3 100 LK 4

Плътност на магнитния поток

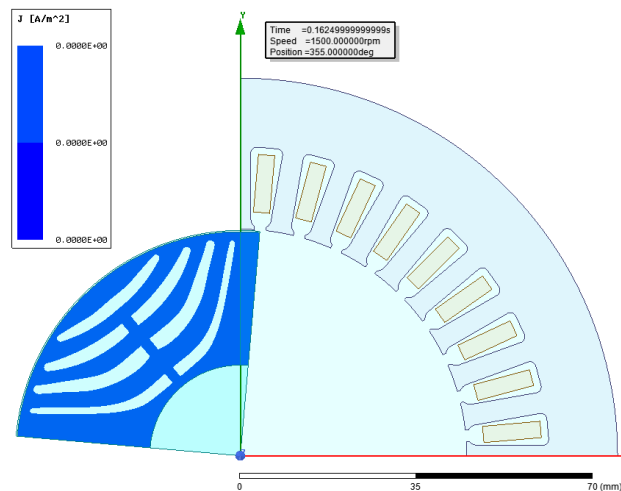
На фиг. 19 е посочена плътността на магнитния поток. Плътността на магнитния поток е с големина средно 1,2-1,6 T с максимални стойности от 2,0 T.



Фиг. 19 – Плътност на магнитния поток на синхронен реактивен мотор – SynRM AT3 100 LK 4

Плътност на индуциран ток в ротора

В ротора не се индуцират токове, тъй като няма кафез и двигателят работи в синхронно състояние. Това е показано на фиг. 20, където ясно се вижда, че роторът има плътност на тока от 0 A/m².



Фиг. 10 – Плътност на тока в ротора на синхронен реактивен мотор – Syn RM AT3 100 LK 4

5. Изводи

Въз основа на изследването са направени следните заключения за асинхронна електрическа машина АТЗ 100 LK 4:

- Моделираната асинхронна електрическа машина има електрическа мощност 2,1 kW и механична мощност 1,96 kW.
- Моделираната асинхронна електрическа машина има изчислена ефективност от 93,12%
- Разликата между моделираната и реалната ефективност е 6,9%, което е приемливо, като се има предвид, че не се отчитат аеродинамични и механични загуби.
- Индуцираният ток в клетката на ротора е очакван и създава допълнителни загуби.

Въз основа на изследването са направени следните заключения за **SynRM АТЗ 100 LK 4**:

- Моделираната SynRM машина има електрическа мощност от 1,9 kW и механична мощност от 1,86 kW.
- Моделираната SynRM машина има изчислена ефективност от 98,11%
- Скоростта на ротора е 1500 об/мин.
- В ротора не се индуцира ток.ю

Въз основа на изследването могат да се направят следните сравнения и изводи:

- Моделираната SynRM машина има 5,01% по-висока изчислена ефективност от изчислената ефективност на радиалната асинхронна машина.
- Като се има предвид, че в ротора на синхронният реактивен мотор SynRM не се индуцира ток, не могат да се генерират загуби от него.
- Позицията на ротора спрямо въртящото се магнитно поле е важна, за да бъде в състояние на ниско съпротивление. По този начин стартирането на този двигател трябва да се извършва бавно със задвижване с променлива честота или със сензори за положение посочващи ниско и високо съпротивление на ротора и сравнително проста задвижваща система, която взема предвид позицията на ротора.
- Въз основа на изследването се произвежда физически прототип на синхронен реактивен двигател (SynRM), за да се потвърди по-

високата ефективност на конструкцията в сравнение с радиалната електрическа машина с променлив ток.

- Освен това създаденият физически прототип ще бъде използван за оценка на реалната ефективност на SynRM, която се очаква да бъде с 5%-6% по-ниска от изчислената ефективност от 98,11%.

Благодарности

Настоящите изследвания са осъществени с финансовата помощ на научноизследователски проект в помощ на докторанти №202ПД0011-05 „Моделиране и изследване процеса на изграждане на дигитален близък чрез виртуален прототип“ и проект на Фонд „Научни изследвания“ с №КП-06-Н-47/8 „Изследване на иновативни АКСиални индукционни високоефективни двигатели с кафезен ротор от ново поколение за електроМОбили - АксМото“

Литература

- [1] P. Matyska, „Advantages of Synchronous Reluctance Motors,“ *Transactions on Electrical Engineering*, том 3, № 2, 2014.
- [2] T. E. Miller, A. Hutton, C. Cossar и D. Staton, „Design of a synchronous reluctance motor drive,“ *IEEE Transactions on Industry Applications*, том 27, № 4, pp. 741-749, 1991.
- [3] ABB Motors and Generators, „Low voltage IE4 synchronous reluctance motor and drive package,“ *ABB 9AKK105828 EN 06-2013*, p. 47, 2013.
- [4] В. Гълъбов, Я. Софронов и А. Милев, „Определяне на предавателните функции на механизми за ориентация на крайния ефектор на шестзвенни Q-манипулатори,“ *Механика на машините*, № №97, pp. 15-19, 2012.
- [5] В. Гълъбов, Я. Софронов и А. Милев, „Синтез на основния механизъм на робот екстрактор на отливки,“ *Механика на машините*, № №97, pp. 3-8, 2012.
- [6] A. Hughes и B. Drury, *Electric Motors and Drives (Fifth Edition)*, 2019.

A COMPARISON STUDY OF THE EFFICIENCY BETWEEN AN ASYNCHRONOUS RADIAL ELECTRICAL MACHINE AND A SYNCHRONOUS RELUCTANCE MOTOR

Blagovest Zlatev
bzlatev@3clab.com

lab. CAD/CAM/CAE in Industry, FIT, TU – Sofia, 8 „Kl. Ohridski” blvd , 1797 Sofia, BULGARIA

The study concerns a comparison study between an asynchronous radial electrical machine and a synchronous reluctance motor (SynRM). Given that the two machines have no differences in their stator construction and only differ in their rotor constructions it is of interest to see how they compare in different parameters - mainly their efficiency. Additionally, the SynRM rotor construction does not need the casting of a squirrel-cage and no currents are induced into it as it closes the magnetic field with the help of specifically shaped air gaps which create a strong magnetic reluctance in one direction and a weak one in a perpendicular direction.

Keywords: SynRM, synchronous, reluctance, motor, asynchronous, Maxwell, FEM