ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ЗАГУБИТЕ В РОТОРА НА СИНХРОННА МАШИНА С ПОСТОЯННИ МАГНИТИ ЗА ХИБРИДНИ АВТОМОБИЛИ

Радослав Спасов, Пламен Ризов, Цветомир Стоянов, Виктор Захариев

Резюме: Целта на настоящата статия е да се определят пулсационните загуби в ротора на синхронна машина с V-образно разположени постоянни използвана при хибридни автомобили. Те ще бъдат определени на базата на изменението на пространственото разпределение на индукцията в феромагнитните области на ротора при различни натоварвания.

Изследванията са извършени чрез моделиране на магнитното поле чрез програмния продукт FEMM и разработени програмни модули за изчисляване на магнитната индукция и загубите.

Ключови думи: метод на крайни елементи, синхронни двигатели с постоянни магнити, загуби.

ROTOR IRON LOSSES DETERMINATION IN PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MACHINE FOR HIBRID CARS

Radoslav Spasov, Plamen Rizov, Tsvetomir Stoyanov, Victor Zahariev

Abstract: The purpose of the work is to determine the rotor's iron losses in V-shaped permanent magnet synchronous machines, used in hybrid cars. They will be determined based on the variation of the spatial distribution of magnetic flux density in the ferromagnetic areas of the rotor at different loads.

The analysis is performed by finite element magnetic field modeling and program modules for of magnetic flux density and loss calculation.

Key words: Finite Element Method (FEM), Permanent Magnet Synchronous Machine, iron losses

1. Въведение

Броя на продадените хибридни автомобили в световен мащаб расте непрекъснато [3]. Това се дължи на предимствата, които те имат пред конвенционалните автомобили: по-нисък разход на гориво, максимален момент в целият скоростен диапазон, възможност за рекуперация и други [2] [4].Независимо от типа на използваната електрическа машина в задвижването на хибридния автомобил, към нея се налагат много, но и взаимно противоречащи си изисквания. Максимална мощност от единица обем, цели намаляване на теглото на автомобила и постигане на максимална енергийна ефективност, което от своя страна води до значителни електромагнитни и машината. Намаляването топлинни натоварвания на на масата на електрическите машини се постига като се увеличи скоростта на въртене, основно чрез повишаване на честотата на захранващото напрежение. Увеличаването на честота довежда и до увеличаване на загубите в машината [5].Поради редицата предимства, които има-висока ефективност и голяма мощност от единица обем [1], една от често срещаните електрически машини използвана при хибридните автомобили е синхронната машина с постоянни магнити.

Целта на настоящия доклад е посредством моделиране на магнитното поле в синхронни машини с V-образно разположени постоянни магнити да се определи:

- зависимостта на загубите от токовото натоварване;

- разпределението на магнитната индукция и загубите в рамките на роторния пакет;

- обработка на получените резултати за бъдещото им използване, при съставяне на топлинен модел на машината.

2. Използвани методи за анализ

За определяне на разпределението на магнитната индукция и загубите в рамките на роторния лист от токовото натоварване в статорната намотка при синхронни машини с постоянни магнити е приложено числено моделиране на магнитното поле. То е извършено посредством метода на крайните елементи, като е разработен 2D стационарен модел на магнитно поле и допълнително разработени софтуерни приложение в средата на Fortran и Excel за определяне на пространственото разпределение на магнитната индукция и загубите.

3. Обект на изследване

Като обект за изследване е синхронна машина с данни дадени в таблица 1

канали за полюс и фаза	_	3	стъпка на намотката	_	5
въздушна междина	MM	0,5	височина на статорен канал	MM	25,5
аксиална дължина	MM	176	широчина на статорен канал	MM	9,8
външен диаметър на статора	ММ	350	външен диаметър на ротора	ММ	269
вътрешен диаметър на статора	ММ	270	брой магнити в ротора	-	12

4. Разработени числени модели

В много литературните източници е описано определянето на загубите в стоманата, в различни части на СМПМ [8] [6] и други. Макар че различните автори използват различни формули за специфичните загуби в стоманата, те биха могли да бъдат представени в най-общ вид по следният начин:

(1)
$$p = f(B_m, f, k_h, k_v)$$

p- специфични загуби B_m - максимална магнитна индукция **f**- честота на захранващото напрежение k_h - коефициент определящ загубите от хистерезис k_v - коефициент определящ загубите от вихрови токове

Както загубите така и коефициентите $k_h k_v$ са честотно зависими [7]. Разделянето на изследваната област на големи участъци, би довело до значителна грешка при изчисленията, но и прекаленото раздробяване на изследваната област би изисквало много време, ако процеса не е автоматизиран. След намирането на специфичните загуби се намират и загубите в стоманата:

$$Pcm = \gamma V p$$

γ - специфична маса на стоманата V- обем на изследваната област

За определяне на загубите е създаден модел в среда на продукта FEMM. За първоначален е приет момент от време, при който моментната стойност на тока във фаза A има стойност равна на максималната, а моментните стойности на тока във фази B и C са равни на половината от максималната стойност. Разработени са варианти за три стойности статорния ток, които съответстват на еквивалентна токова плътност в канала 10 A/мм², 20 A/мм², 30 A/мм², както и празен ход . За всяка една стойност на токовите плътности са създадени и решени варианти заснемане на магнитната индукция при които ротора последователно се завърта на 3 геометрични градуса. За изчислението на магнитната индукция в модела бяха определени зони, границите на които са дефинирани с дъги както е показано на фиг.1.



Фиг.1. Дъги построени за снемането на магнитната индукция

В рамките на всяка дъга беше определена индукцията в 150 точки. За още по прецизни резултати, зоните с най-голямо изменение на магнитното поле, т.е. граничещите с въздушната междина, бяха намалени допълнително, както е показано на фиг. 2.



Фиг.2. Допълнителни дъги построени за снемането на магнитната индукция

Това помогна да се определи начина на разпределение на магнитната индукция. Получените резултати показват, че би могло да се приеме следното разпределение в областта между две дъги:

(3)
$$B_{121} = \frac{B_{\mathcal{A}11} + B_{\mathcal{A}21}}{2}$$

B₁₂₁- индукция в първа точка между първа и втора дъга **B**_{д11}- индукция в първа точка на първа дъга **B**_{д21}- индукция в първа точка на втора дъга

По аналогичен начин беше определена и индукцията между останалите дъги 2-3, 3-4, 5-6, 6-7, 7-8.



Фиг.3. Получените шест зони и разделянето им на елементарни обеми.

По този начин се получиха шест зони показани на фиг. 3. (при отчитането на аксиалната дължина на машината, се получават 150 елементарни обема), с по 150 точки, за които специфичните загуби бяха определени по формулата [9].

(4)
$$p = k_{h}B^{2}k_{f}f + \pi^{2}\frac{\sigma d^{2}}{6}B^{2}f^{2}k_{f} + 8.67k_{\nu}B^{1.5}f^{1.5}k_{f}$$

 K_{f} - коефициент на запълване на магнитопровода със стомана σ - проводимост на изолацията **d**- дебелина на статорния лист

След това бяха определени и загубите в стоманата по формула 2

5. Резултати от изследванията

На фиг.4 е показана зависимостта на загубите от положението на ротора и точка от зоната, за първа зона и празен ход. Аналогичната зависимост за четвърта зона е показана на фиг.5.



Фиг.4. Загуби в стоманата в зависимост от положението на ротора и мястото на елементарния обем за първа зона (oc q) и J=0A/mm².



Фиг.5. Загуби в стоманата в зависимост от положението на ротора и мястото на елементарния обем за четвърта зона (oc d) и J=0A/mm².

На фиг.6 е показана зависимостта на загубите от положението на ротора и точка от зоната, за първа зона и J=30A/mm². Аналогичната зависимост за четвърта зона е показана на фиг.7.



Фиг.6. Загуби в стоманата в зависимост от положението на ротора и мястото на елементарния обем за първа зона (oc q) и J=30A/mm².



Фиг.7. Загуби в стоманата в зависимост от положението на ротора и мястото на елементарния обем за четвърта зона (oc d) и J=30A/mm².

На фиг.8 е показана зависимостта на сумарните загубите в ротора, в зависимост от зоната и токовата плътност.



Фиг.8. Сумарни загуби в стоманата на ротора, в зависимост от зоната и токовата плътност.

В таблица 2 е показано разпределението на загубите в различните зони на ротора при различни токови плътности.

Таблица 2.

Зона/Ј	0	10	20	30
1	22.1	20.92	25.2	27.82
2	0.12	0.72	0.89	1.10
3	0.012	14.79	0.25	0.41
4	54.46	57.29	54.23	62.19
5	0.19	2.48	8.29	2.76
6	0.063	0.11	5.41	0.73

В таблица 3 са показани сумарните загуби в ротора, при различни токови плътности.

				Таолица 3.
J [A/mm ²]	0	10	20	30
Р _{ст} [W]	76.96	96.33	94.28	95.11

На базата на проведените изследвания е изведена зависимостта на $k_v = f(B_{\delta})$. Тя е показана чрез формула 5.

(5)

$k_v = 0.002 B \delta^{0.699}$

7. Анализ и изводи

- 1. От направените изследвания се вижда, че разликата в загубите в повърхностния слой на ротора, вследствие на пулсацията на магнитното поле, при празен ход и при натоварване е около двадесет процента. При празен ход максимума на загубите следва положението на ротора спрямо статорните зъби. По ос "d" при натоварване максимумът на загубите се премества към постоянните магнити като пиковите им стойности, дължащи се на неравномерната въздушна междина намаляват. По ос "q" загубите запазват положението си, но увеличават амплитудите си. Основната част от загубите се отделят в зоните, които са най-близко до въздушната междина.
- 2. Предложената формула за определяне на коефициента на загубите от вихрови токове достатъчно точно отразява физическите процеси в ротора на синхронна машина с "V" разположение на постоянните магнити, водещи до топлинни загуби.
- 3. Получените резултати за загубите могат да бъдат използвани при съставянето на топлинния модел на машината.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Тодоров Г., Стоев Б. Изследване на пулсациите на момента на синхронни двигатели с възбуждане от постоянни магнити. Годишник на Технически Университет София 2016, Том 66, книга 1, стр. 285-294.
- [2] Ломакин, В., А. Шабанов, А. Шабанов, К вопросу выбора мощности ДВС энергетической установки гибридного автомобиля, Журнал автомобильных инженеров, 2013.
- [3] Раков, В., Развитие парка гибридных автомобилей, Мир транспорта, 2011.
- [4] Adsani, A., HYBRID PERMANENT MAGNET MACHINES FOR ELECTRIC VEHICLES, University of Manchester, September 2011.
- [5] Bailey, C., D. Saban, D. Lopez, Design and experimental evaluation of a highspeed, directly-coupled, multi- megawatt permanent magnet machine, Proceedings of the thirty-eighth turbomachinery symposium 2009.
- [6] Jabbar, M., A. Khambadkone, L. Qinghua, DESIGN AND ANALYSIS OF EX-TERIOR AND INTERIOR TYPE HIGH-SPEED PERMANENTMAGNET MOTORS, Department of Electrical and Computer Engineering National University of Singapore.
- [7] Rilla, M., DESIGN OF SALIENT POLE PM SYNCHRONOUS MACHINES FOR A VEHICLE TRACTION APPLICATION – ANALYSIS AND IMPLE-MENTATION, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Yliopistopaino 2012.
- [8] Staunton, R., S. Nelson, P. Otaduy, J. McKeever, J. Bailey, S. Das, R. Smith, PM Motor Parametric Design Analyses for a Hybrid Electric Vehicle Traction Drive Application, OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, 2004.
- [9] Tariq, A., C. Baron, E. Strangas, Iron and Magnet Losses and Torque Calculation of Interior Permanent Magnet Synchronous Machines Using Magnetic Equivalent Circuit, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 46, NO. 12, DECEMBER 2010.

Автори: Радослав Лазаров Спасов доц. д-р инж. от ТУ-София, катедра "Електрически машини", e-mail: rls@tu-sofia.bg; Пламен Миланов Ризов, доц. д-р инж. от ТУ-София, катедра "Електрически машини", e-mail: pmri@tusofia.bg; , инж. Цветомир Методиев Стоянов докторант от ТУ-София, катедра "Електрически машини", e-mail cmetodiev@tu-sofia.bg;, инж. Виктор Захариев Захариев докторант от ТУ-София, катедра "Електрически машини", e-mail: sun_goko@gmail.com;