ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВИДА НА СТАТОРНАТА НАМОТКА НА СИНХРОН-НА МАШИНА С ПОСТОЯННИ МАГНИТИ ЗА ПОСТИГАНЕ НА МАК-СИМАЛНА ЕНЕРГИЙНА ЕФЕКТИВНОСТ

Радослав Спасов, Пламен Ризов, Цветомир Стоянов, Виктор Захариев

Резюме: В доклада е представено изследване за определяне на хармоничния състав на фазните е.д.н. и електромагнитния момент на синхронна машина с възбуждане от постоянни магнити разположени в ротора, във функция от токовото натоварване и вида на статорната намотка (стандартна трифазна, две независими намотки и шестфазна).

Изследванията са извършени чрез моделиране на магнитното поле чрез програмния продукт FEMM и собствени програмни модули в средата на Matlab и Excel за изчисляване на хармоничния състав на фазните е.д.н.

Ключови думи: метод на крайни елементи, синхронни двигатели с вътрешни магнити, Total Harmonic Distortion (*THD*)

RESEARCH OF THE STATOR WINDING TUPE'S OF SYNCHRONOUS MACHINE WITH PERMANENT MAGNETS TO ACHIEVEMENT MAXI-MUM ENERGY EFFICIENCY

Radoslav Spasov, Plamen Rizov, Tsvetomir Stoyanov, Victor Zahariev

Abstract: The report presents research for determining the harmonic composition of the phase electromotive force and electromagnetic moment of a synchronous machines with excitement from permanent magnets imbedded in the rotor by a function of the current density and the type of stator's winding (standart three phase, two independent windings and six phase). The study was made with modeling of the magnetic field by the software "FEMM", and the program modules that calculate the the harmonic composition and THD are created in the software environment MatLab and Excel.

Key words: Finite Element Method (FEM), Permanent Magnet Synchronous Machine, Total Harmonic Distortion (*THD*)

1. Въведение

При избора на електрическа машина за задвижване на превозни средства съществуват много възможности, използване на постояннотокови, асинхронни, реак-

тивни двигатели [4] Заедно с това към електрическите машини използвани в тях се налагат редица изисквания по отношение на получаваната мощност от единица обем, с което се цели намаляване на теглото на автомобила и постигане на максимална енергийна ефективност при работа на електрическата машина в двигателен и генераторен режим. В последните години в хибридните автомобили често срещани са синхронни електрически машини с така нареченото Vобразно вътрешно разположение на редкоземни постоянни магнити. Принципната конструкция на активната част на този вид двигатели е показана на фиг.1 [2].



Фиг.1. Напречен разрез на машина с "V" разположени в ротора магнити

Намаляването на масата на електрическите машини се постига по няколко начина, които основно са свързани с увеличаване на оборотите и токовите натоварвания на намотките: използване на високо енергийни постоянни магнити и висококачествени изолационни материали, специална конструкция на секциите на статорната намотка с цел постигане на висок коефициент на запълване на статорните канали, използване на вода или масла за директно охлаждане на секциите на статорната намотка, използване на електротехническа стомана с дебелина 0.35 мм и ниски специфичните загуби. По данни от литературни източници, при маслено охлаждане се допуска токова плътност в статорната намотка до 30 А/мм², което в голяма степен обуславя значителното топлинно натоварване на изолационната система на синхрония двигател. Високите обороти на ротора се постигат при честоти на захранващото напържените от порядъка до 2400 Hz.[3].

Друга важна характеристика на синхронните двигатели с постоянни магнити, използвани в автомобили е произвеждания от тях електромагнитен момент и неговото изменение при промяна на токовото натоварването.

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

- определи зависимостта на електромагнитния момент от токовото натоварване и вида на статорната намотка;

- определяне на хармоничния състав и THD на фазните е.д.н. в зависимост от токовото натоварване и вида на статорната намотка;

2. Използвани методи за анализ

За определяне на хармоничния състав на фазните е.д.н. и зависимостта на електромагнитния момент от токовото натоварване в статорната намотка при синхронни машини с постоянни магнити е приложено числено моделиране на магнитното поле. То е извършено посредством на метода на крайните елементи, като е разработен 2D стационарен модел на магнитно поле и анализ на хармоничен състав на фазните е.д.н. и резултатите са анализирани по метода на THD.

Допълнително са разработени софтуерни приложение в средата на Matlab и Excel за определяне на хармоничния състав на фазните е.д.н.

3. Обект на изследване

Като обект за изследване е синхронна машина с постоянни магнити с три вида статорни намотки:

- стандартна трифазна с q=2 (през два съседни канала обхванати от една полюсно фазна група тече ток с еднаква фаза и големина), показана на фиг.2

- две независими намотки (през два съседни канала от полюсно фазната група при трифазната намотка, тече фазен ток дефазиран на определен ъгъл. Разгледан е и случай при който в първия канал тече ток, а във втория токовата плътност е равна на нула (този вид намотка е изследвана само в генераторен режим), показана на фиг.3

- шестфазна с q=1, показана на фиг.4 Геометрията на статорния и роторния лист са показани от фиг.6 до фиг.8. Тази геометрия е изследвана подробно в [5].

Входните данни за изследването са дадени в таблица 1.

Гаолица								
		m=3	m=6			m=3		m=6
канали за полюс и фаза	-	2	1	стъпка на намотка- та	-	6		5
въздушна меж- дина	ММ	0,7	0,7	височина на стато- рен канал	ММ	18,	1	18,1
аксиална дължи- на	MM	90	90	широчина на ста- торен канал	MM	5,8		5,8
външен диаме- тър на статора	MM	242	242	външен диаметър на ротора	MM	182,8		182,8
вътрешен диаме- тър на статора	MM	184,2	184,2	брой магнити в ро- тора	-	20		20
брой на статор- ните канали	-	60		материал на магни- тите	NdF 40 M	FeB GOe 4		ldFeB MGOe







Фиг.3. Схема на две независими намотки с q=1



Фиг.4. Схема на шестфазна намотка с q=1

4. Разработени числени модели

Литературните източници описват много методи за определяне на електромагните сили и моменти, базирани на резултатите на метода на крайните елементи [1, 6, 7]. На фиг.5 е показан модела за определяне на зависимостта на електромагнитния момент от вида на статорната намотка при различни стойности на тока в статора и m=3. Моментът се изчислява по дъга с дължина равна на геометричните градуси на две полюсни деления и разположена в средата на въздушната междина по метода на тензора на напреженията [1].



Фиг.5. Модел във FEMM за определяне на електромагнитния момент при синхронен двигател

Разпределението на фазите в статорните канали при двигателя е показано на фиг.6 за стандартна намотка, на фиг.7 за намотка при която тока в втория канал от една полюсно фазна група е дефазиран (две независими намотки), аналогична е подредбата и в случая когато във втория канал токовата плътност е равна на нула. На фиг.8 е показано токовото разпределение при шестфазна намотка. За първоначален е приет момента от време, при който моментната стойност на тока във фазите A има стойност равна на максималната (като и фаза D, но там тока е с отрицателен знак), а моментните стойности на тока във фази В и F са равни на половината от максималната стойност (като и фази С и Е, но там тока е с отрицателен знак). Разработени са варианти за три стойности статорния ток, които съответстват на еквивалентна токова плътност в канала 30 A/мм², 20 A/mm^2 и 10 A/mm², както и режим на празен ход . Еквивалентната токова плътност в канала е определена спрямо цялото му сечение. За получаване на зависимостите на фазните е.д.н. от вида на статорната намотка за посочените погоре стойности на токовата плътност, са разработени варианти за всяка от тях, при които ротора последователно се завърта на 1.8 геометричени градуса (9 електрически съответстващи на време 0.0005s)



Фиг.6. Разпределение на фазите в статорните канали при трифазна намотка с q=2



Фиг.7. Разпределение на фазите в статорните канали при две независими намотки с q=1



Фиг.8. Разпределение на фазите в статорните канали при шестфазна намотка с q=1

На фиг.9 са показана зависимостта на е.д.н. от вида на намотката за три стойности на статорния ток (както и празен ход) на синхронния двигател, а на фиг.10 за по аналогичен начин за генераторен режим. Зависимостта на момента от вида на намотката е показан на фиг.11 в двигателен и фиг.12 в генераторен режим. При дефазираната намотка е избран за изобразяване случая, при ъгъл на дефазиране, осигуряващ максимално е.д.н,



Фиг.9. Е.д.н. на секция в зависимост от вида на намотката и токовата плътност в двигателен режим



Фиг.10. Е.д.н. на секция в зависимост от вида на намотката и токовата плътност в генераторен режим



Фиг.11 Зависимост на момента от вида на намотката и токовата плътност в двигателен режим



Фиг.12. Зависимост на момента от вида на намотката и токовата плътност в генераторен режим

На фиг.13 е показана зависимостта на процентния състав на висши хармоници от токовата плътност и ъгъла на дефазиране в двигателен режим. На фиг.14 е показана анал



Фиг.13. Зависимост на процентния състав на висши хармоници от токовата плътност и ъгъла на дефазиране в двигателен режим при две независими намотки



Фиг.14. Зависимост на процентния състав на висши хармоници от токовата плътност и ъгъла на дефазиране в генераторен режим при две независими намотки

7. Анализ и изводи

1.В двигателен режим по отношение на въртящ момент и големина на първи хармоник, най-добри работни резултати показва конструкцията на синхронна машина с две независими намотки следва шестфазната и стандартната намотка. Постигането на най-добри резултати с две независими намотки, изисква управление на ъгъла на дефазиране на тока във времето, както е показано на фиг.13, следователно реализирането на задвижване със синхронна машина с тази конструкция изисква два инвертора със значително по-сложни алгоритми за управление.

- 2. В генераторен режим същата конструкция има най-добри показатели, но както се вижда на фиг.14 е необходим дефазиращ елемент в една от намотките, който да осигури дефазиране на тока на втората намотка спрямо тока на първата на ъгъл тридесет градуса във времето Това изискване трудно би се осъществило, тъй като трябва да се променя големината на кондензатора при промяна на натоварването.
- 3. Като най-добър вариант по отношение на постигнатите характеристики и стойност на допълнителното оборудване е конструкцията с шестфазна намотка. Ако изискването за генерираната мощност е в порядъка 0-30 % от мощността при двигателен режим конструкцията с две независими намотки може да бъде с най-добра енергийна ефективност

ЛИТЕРАТУРА

- [1] D. Meeker, Finite Element Method Magnetics, Version 3.3, User's Manual
- [2] F. Libert, Royal Institute of Technology Department of Electrical Engineering Electrical Machines and Power Electronics, Stockholm 2004, Design, Optimization and Comparison of Permanent Magnet Motors for a Low-Speed Direct-Driven Mixer pp.7-24.
- [3] Y. Chen P Pillay, 0-7803-7420-7/02/\$17.00 (C) 2002 IEEE An Improved Formula for Lamination Core Loss Calculations in Machines Operating with High Frequency and High Flux Density Excitation
- [4] Михов, М., Д. Сотиров, А. Иванов, Индуктивности по осите d, q на синхронен реактивен двигател с разпределена статорна намотка -опитно и числено изследване, V Научна конференция ЕФ2013 Созопол 2.09.2014-5.09 2014, Том 63, книга 6, pp. 133-141.
- [5] Ризов, П., Р.Спасов, Ц. Стоянов, В. Захариев, Определяне на зависимостта на потокосцепленията от натоварването при синхронни машини с постоянни магнити за хибридни автомобили, ", VI Научна конференция ЕФ2014 – Созопол 15.09.2014-17.09 2014, Том 64, книга 6, pp. 97-105.
- [6].V.Spasov, So Noguchi and H. Yamashita. "Comparative analysis of the force computation methods in the 3D FEM with edge and nodal elements", Electrical Engineering Research Conference, Kita Kyushu, Japan, August 2-3, 2001, SA-01-22, RM-01-90, pp. 9-13.
- [7] В. Спасов. Изчисляване и визуализация на локална електромагнитна сила при метода с крайни елементи, *списание "Електротехника и електроника"*, кн. 11/12, 2007, стр. 39-43.

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