

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2013.10.015

无刷双馈电机的转子导条不等间距优化设计

郑凌娟, 陈建生, 章 玮*

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 无刷双馈电机(BDFM)由于其特殊的结构,具有较高的谐波含量。针对转子导条分布对BDFM谐波含量的影响问题,通过绕组函数分析了类鼠笼型无刷双馈电机的气隙谐波磁场;并确立了转子导条分布(导条间距)对气隙磁场各次谐波含量的影响关系;结合3种不同转子结构的算例进行了理论分析。通过Ansoft有限元分析软件建立了3种转子结构的模型,分析对比了3种结构所得的气隙磁场谐波含量。研究结果验证了转子导条不均匀分布的内侧结构在抑制无刷双馈电机无用谐波、提高基波和有用谐波含量方面的有效性;所得结果为无刷双馈电机的进一步优化提供了很好的理论指导。

关键词: 无刷双馈电机; 不等间距导条; 绕组函数; 谐波磁场; 有限元设计

中图分类号: TH39; TM302

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2013)10-1229-04

Optimal design of brushless doubly-fed machine with unequal-distance conductor rotor structure

ZHENG Ling-juan, CHEN Jian-sheng, ZHANG Wei

(Department of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: As brushless doubly-fed machine (BDFM) is designed with special structure, the harmonic contents of BDFM are high. In order to research the relationship of rotor conductor distribution and BDFM's harmonic contents, winding function of the squirrel-cage BDFM was applied to analyze the effect of rotor conductor distribution to harmonic contents; and the relationship between the conductor distribution and harmonic contents was obtained; then the theoretical analysis of three different kinds of rotor structure was proposed. In the end, Ansoft finite element analysis software was applied to build different rotor structure, and their harmonic contents were compared. The result shows that the intensive-inner rotor conductor distribution structure has better effectiveness to restrain BDFM's useless harmonic wave, and improves the contents of basic wave and useful harmonic wave, which provides a good direction in BDFM's further optimization.

Key words: brushless doubly-fed machine (BDFM); unequal-distance conductor; winding function; harmonic magnetic field; finite element analysis design

0 引 言

无刷双馈电机(BDFM)是由两套不同极对数的定子绕组和一种特殊转子结构构成的电机。这种电机可以运行于不同模式,兼有异步电机和同步电机的特点。稳定运行时,控制绕组传递的能量较小且其没有感应电机的碳刷与滑环,因此具有可靠性高、功率因数可调、变频器容量小、成本低等优点,适用于交流调

速驱动和变速恒频发电领域,特别是对系统可靠性要求较高的海上风力发电系统。

无刷双馈电机通过对转子的结构进行特殊设计,使得定子绕组产生的两个不同极对数的旋转磁场间接作用,从而实现能量传递。因此,转子结构是影响无刷双馈电机性能的关键因素。目前,主要转子结构有两类:一类是磁阻型转子结构,电机能达到较高的效率,有优良的同步和双馈调制特性^[1],但其

收稿日期: 2013-05-10

作者简介: 郑凌娟(1988-),女,福建仙游人,主要从事电机设计方面的研究。E-mail: zhenglingjuan@zju.edu.cn

通信联系人: 章 玮,女,副教授,硕士生导师。E-mail: weizhang@zju.edu.cn

容量不易做大^[2];另一类是类鼠笼型转子结构^[3],其谐波含量较大^[4],但加工制造容易,成本低廉,具有较好的启动和异步运行性能。由于磁阻结构采用凸极式转子,类鼠笼型绕组转子采用相对较集中的分布绕组,这两种转子存在导体利用率低、谐波含量大等缺陷,阻碍了无刷双馈电机在工业应用的进一步应用。针对转子结构存在的上述问题,文献[5]提出采用不等匝线圈的转子结构能够提高导体利用率、降低谐波含量。但针对导条间距分布对谐波磁场的影响问题则没有进行分析。

大量文献表明,转子结构直接影响无刷双馈的极调制作用^[6-7],本研究在文献[5]的基础上,主要分析转子导条分布对气隙磁场的影响。首先基于绕组函数的推导,分析转子电流产生的各次谐波磁场与转子导条集合位置的关系,得到有利于提升有用谐波(气隙磁场中与定子两套绕组极对数对应的磁场)和抑制无用谐波(与两套定子绕组间能量转换无关的谐波)的转子结构。通过 Ansoft 有限元仿真,对上述理论结果进行验证。

1 无刷双馈电机工作原理分析

1.1 类鼠笼型无刷双馈电机工作原理

无刷双馈电机的定子具有功率绕组和控制绕组两套独立绕组,极对数分别为 P_1 和 P_2 。当两套绕组独立励磁时,分别在气隙中产生 P_1 和 P_2 对极的定子磁场,并在转子中感应出相同频率、相同分布的电流,产生稳定的电磁转矩,使电机运行在同步状态。根据绕组齿谐波原理^[8],为使转子绕组能同时感应出两种不同极对数,并且旋转方向相反的磁动势,转子单元数 N_r 和转子机械角速度 ω_r 将符合下式:

$$N_r = P_1 + P_2 \quad (1)$$

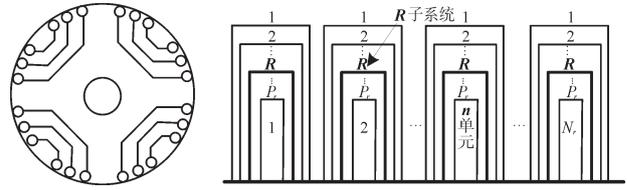
$$\omega_r = \frac{\omega_1 \pm \omega_2}{P_1 + P_2} = \frac{\omega_1 \pm \omega_2}{N_r} \quad (2)$$

式中:“+”,“-”一定子两套绕组同相序相连、反相序相连。

采用类鼠笼式结构时,其转子绕组结构如图 1(a) 所示(以 $P_1=3$ 、 $P_2=1$ 、 $N_r=4$ 为例),将转子沿空间 360° 展开,其导条结构如图 1(b) 所示。为了减少导条漏抗,转子导条改由 N_r 个单元组成,每个单元由 P_r 个环路形成,转子导条空间展开图如图 1(b) 所示。

1.2 定转子磁场分析

无刷双馈电机的两套定子绕组产生不同极对数的磁场,由于它们之间不发生直接耦合作用,可以独立分析。功率绕组和控制绕组产生的气隙基波磁场



(a) 类鼠笼型转子 (b) 转子导条空间展开图
图 1 类鼠笼型无刷双馈电机的转子结构图

b_{sp1} 、 b_{sp2} 分别为:

$$\begin{cases} b_{sp1}(\theta, t) = \text{Re} \left\{ \sqrt{2} B_{sp1} e^{j(\omega_r t - P_1 \theta)} \right\} \\ b_{sp2}(\theta, t) = \text{Re} \left\{ \sqrt{2} B_{sp2} e^{j(\omega_r t - P_2(\theta + \alpha))} \right\} \end{cases} \quad (3)$$

$$B_{spi} = j \frac{3\mu_0 d}{2P_i g} I_{spi} C_{Pi} \quad (i=1, 2) \quad (4)$$

式中: B_{sp1} 、 B_{sp2} —功率绕组、控制绕组基波磁密的有效值; C_{Pi} —定子绕组 P_1 或 P_2 空间分布的傅里叶展开式基波系数; α —功率绕组和控制绕组的相角差; μ_0 —气隙磁导率; d —气隙的平均直径; g —气隙宽度; I_{spi} ($i=1, 2$)—功率、控制绕组励磁电流有效值。

本研究将图 1(b) 中各个单元里跨距相同的环路合称为一个子系统,如图中第 R 个子系统。功率绕组产生的磁场在转子第 n 个单元的第 R 条导条环路中感应出的电压为:

$$u_{R,n}(t) = \pi l d \text{Re} \left\{ \sqrt{2} C_R^{-P_1} E_s e^{j(s, \omega_r t - (n-1)2\pi p_r / N_r)} \right\} \quad (5)$$

式中: $C_R^{-P_1}$ — R 子系统中由功率绕组在转子绕组上感应的磁场的空间傅里叶展开式系数。

类鼠笼式转子采用单导条结构,忽略转子导条的电感及端部电阻时,假定每个导条环路电阻值相等,可得电流正比于电压,故 I_R 正比于 $C_R^{-P_1}$, 设 $I_R = KC_R^{-P_1}$ (K 为一常数),得:

$$i_{R,n}(t) = \text{Re} \left\{ \sqrt{2} KC_R^{-P_1} e^{j(s, \omega_r t - (n-1)2\pi p_r / N_r)} \right\} \quad (6)$$

根据交流电机绕组理论,由定子绕组激励产生的磁场在转子导条中感应生成如式(6)的电流,该电流在气隙中生成 $\nu = p + qN_r$ ($q=0, \pm 1, \pm 2, \dots$) 次齿谐波,具体展开如下:

$$\begin{aligned} b_{gR}(\theta, t) &= \text{Re} \left\{ \sqrt{2} B_{gR}^\nu e^{j(\omega_r t - P_r \theta)} \right\} \\ B_{gR}^\nu &= \frac{j\mu_0 d}{2\nu g} N_r I_R C_R^\nu \end{aligned} \quad (7)$$

以 $P_1=3$ 、 $P_2=1$ 、 $N_r=P_1+P_2=4$ 为例,取 $p=P_1$ 。则基波和主要的齿谐波如下式所示:

$$\begin{cases} q=0, \nu = P_1, B_{gR}^\nu = B_{gR}^{P_1} \\ q=-1, \nu = -P_2, B_{gR}^\nu = B_{gR}^{-P_2} \\ q=-2, \nu = -(P_1+2P_2), B_{gR}^\nu = B_{gR}^{-(2P_2+P_1)} \\ q=1, \nu = 2P_1+P_2, B_{gR}^\nu = B_{gR}^{(2P_1+P_2)} \end{cases} \quad (8)$$

当 $q=0, -1$ 时,产生的谐波分别为功率绕组和控制绕组的基波磁场,实现了定子两套绕组之间的间接耦合,为“有用谐波”(基波和3次谐波); $q=1, -2$ 时,产生的谐波为“无用谐波”(5次谐波和7次谐波),可能恶化电机性能。因此,本研究从电机设计角度,通过对转子导条的优化设计,尽可能地提升“有用谐波”、抑制“无用谐波”。

2 转子结构的优化设计

本研究以功率绕组3对极、控制绕组1对极、转子4个单元的电机为例^[9],说明具体过程。转子绕组函数的具体确定如图2所示,横坐标 a_1, a_2, \dots, a_{p_r} 为第 $R(R=1, 2, \dots, P_r)$ 条环路对应的初始位置,纵坐标为第 n 个单元第 R 条环路对应的绕组分布函数。

将第 $i(i=1, \dots, P_r)$ 条转子导条环路进行空间傅里叶展开,其绕组函数为:

$$c_{R,n}(\theta) = \sum_v C_R^v e^{-j\nu(\theta - 2\pi(n-1)/N_r)} \quad (v \neq 0) \quad (9)$$

式中: C_R^v —第一个单元 v 次谐波对应的绕组系数。

可表示为:

$$C_R^v = \frac{1}{2\pi} \int_{a_i}^{\pi/2 - a_i} x_i e^{-j\nu\omega_0\theta'} d\theta' \quad (10)$$

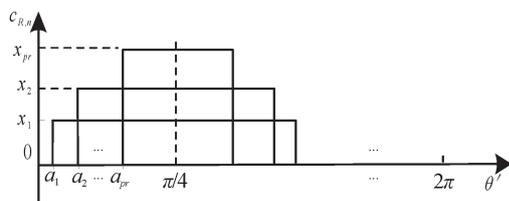


图2 转子绕组分布

当谐波次数 ν 取不同值时,式(10)有不同的展开形式,即:

$$C_R^v = -\frac{x_i}{j2\nu\pi} x_i (e^{-j\nu\pi/2} e^{j\nu\omega_0 a_i} - e^{-j\nu\omega_0 a_i}) = \begin{cases} \frac{-1}{j2\nu\pi} x_i (e^{j\nu a_i} - e^{-j\nu a_i}), \nu = 4k, k \in Z \\ \frac{-1}{j2\nu\pi} x_i (-je^{j\nu a_i} - e^{-j\nu a_i}), \nu = 4k + 1 \\ \frac{-1}{j2\nu\pi} x_i (-e^{j\nu a_i} - e^{-j\nu a_i}), \nu = 4k + 2 \\ \frac{-1}{j2\nu\pi} x_i (je^{j\nu a_i} - e^{-j\nu a_i}), \nu = 4k + 3 \end{cases} \quad (11)$$

由式(6,7)得:

$$B_g^\nu = j \frac{\mu_0 d}{2vg} N_r K \sum_{i=1}^{P_r} x_i C_R^{-P_1} C_R^\nu \quad (12)$$

将式(11,12)代入式(8),可得基波和主要的齿谐波为:

$$B_g^{P_1} = \frac{M}{3} \sum_{i=1}^{P_r} x_i^2 \sin^2(3a_i + \frac{\pi}{4}) \quad (13)$$

$$B_g^{-P_2} = -M \sum_{i=1}^{P_r} x_i^2 (2 \cos(4a_i) + 2 \sin(2a_i)) \quad (14)$$

$$B_g^{-(2P_2+P_1)} = \frac{M}{25} \sum_{i=1}^{P_r} x_i^2 (2 \cos(8a_i) - 2 \sin(2a_i)) \quad (15)$$

$$B_g^{(2P_1+P_2)} = \frac{M}{49} \sum_{i=1}^{P_r} x_i^2 (2 \cos(4a_i) + 2 \sin(10a_i)) \quad (16)$$

其中:

$$M = \frac{\mu_0 d N_r K}{12\pi^2}$$

转子结构的优化设计思想就是使式(13,14)的值尽可能大,而式(15,16)的值尽可能小。

本研究仅考虑导条分布对气隙谐波磁场的影响,即 $x_1=x_2=\dots=x_6$ 。按照 a_1, a_2, \dots, a_6 之间的间距呈比例的设计思想,对转子导条3种典型分布进行分析:

(1) 均匀分布, $a_1=0, a_2-a_1=a_3-a_2=a_4-a_3=a_5-a_4=a_6-a_5$;

(2) 外侧结构, $a_1=0, (a_2-a_1) : (a_3-a_2) : (a_4-a_3) : (a_5-a_4) : (a_6-a_5) = 1.5 : 1.5 : 2 : 2 : 2.5$;

(3) 内侧结构, $a_1=0, (a_2-a_1) : (a_3-a_2) : (a_4-a_3) : (a_5-a_4) : (a_6-a_5) = 2.5 : 2.25 : 2 : 1.75 : 1.5$ 。

3种不同转子结构下转子极调制后产生的气隙磁密比较值如表1所示,将基波磁密 B_1 定为100%。

表1 3种结构的理论FFT结果

	B_1	B_3	B_5	B_7
均匀	100%	66.67%	32.61%	4.92%
外侧	100%	66.04%	29.67%	5.06%
内侧	100%	62.81%	25.49%	2.31%

由表1可知,在减小无用谐波的作用方面,相比转子导条等间距的均匀分布结构,转子导条外侧结构与内侧结构均优于均匀分布的结构,外侧结构的5次谐波含量有所降低,内侧结构的5次、7次谐波含量均有所降低。因此,转子采用内侧结构时能够更好地降低无用谐波含量。

3 算例验证

为了验证以上的解析结果,本研究在Ansoft/Maxwell软件^[10]中建立以上3种转子结构的电机瞬态场分析模型,定子功率绕组开路,控制绕组加上频率10 Hz

的电流激励,转子绕组按图1(b)进行外电路连接设置,转子转速为590 r/min。

导条不同分布的3种转子结构的电机气隙磁场磁力线分布图以及气隙磁密 B_r 波形的FFT结果如图3所示。同样,与控制绕组极对数对应的气隙磁场设置为基波,将其磁密 B_{r1} 定为100%,得到的3种结构的磁密

FFT分析结果如表2所示。相比转子导条均匀分布的结构,该设计中的外侧结构提升了3次谐波,对5次谐波稍有改善,增加了7次谐波含量;外侧结构对磁密波形改善不佳,这与表1的结论一致。内侧结构对5次、7次谐波改善较多,即抑制了无用谐波,这与表1的理论分析结果也较为一致。

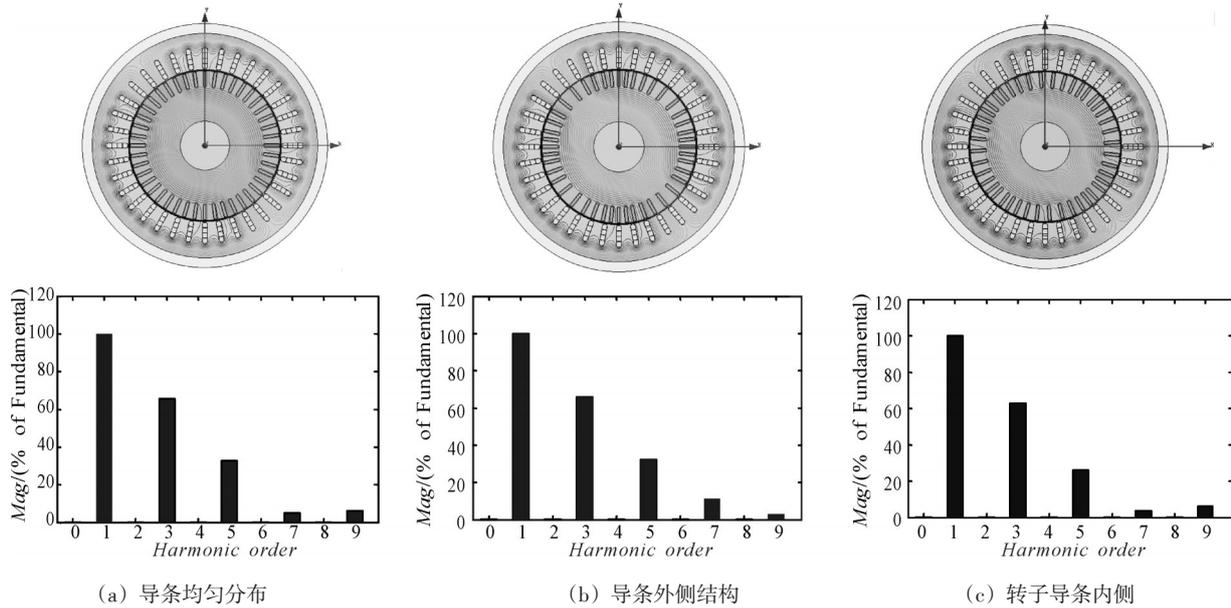


图3 转子结构不同的电机气隙磁场磁力线分布图和磁密 B_r 的FFT分析

表2 3种结构的Ansoft仿真FFT结果

	B_{r1}	B_{r3}	B_{r5}	B_{r7}
均匀	100%	65.67%	32.61%	4.92%
外侧	100%	66.04%	32.22%	11.17%
内侧	100%	62.81%	26.19%	3.66%

4 结束语

无刷双馈电机是一种基于磁场极调制理论运行的特殊电机。本研究针对转子结构在磁场调制过程中所起的作用,分析了转子导条的分布对气隙磁场中各次谐波的影响。理论分析和有限元的建模仿真结果都表明,当无刷双馈电机采用转子不均匀分布的内侧结构能够有效满足极调制所要求的“提升有用谐波,抑制无用谐波”的要求。基于绕组理论推导得出的磁密表达式为无刷双馈电机的进一步优化设计提供了很好的理论指导。

参考文献(References):

[1] 张凤阁,王凤翔,王正. 不同转子结构无刷双馈电机稳定运行特性的对比研究实验[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(4): 52-55.
 [2] BETZ R E, JOVANOVIĆ M G. Theoretical Analysis of Con-

rol Properties for the Brushless Doubly Fed Reluctance Machine[J]. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, 2002, 17(3): 332-339.
 [3] BROADWAY A R W. Self-cascaded Machine: A Low-speed Motor or High-frequency Brushless Alternator [J]. **Proceedings of the Institution of Electrical Engineers**, 1970, 117(7): 1277-1290.
 [4] WILLIAMSON S, FERREIRA A C, WALLACE A K. Generalized theory of the brushless doubly-fed machine, part 1: analysis[J]. **IEE Proceedings on Electrical Power Application**, 1997, 144(2): 111-122.
 [5] 熊飞,王雪帆,程源. 不等匝线圈转子结构的无刷双馈电机研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(36): 82-90.
 [6] 刘宪翔. 风力发电用无刷双馈电机的设计和仿真研究[D]. 杭州: 浙江大学电气工程学院, 2006: 17-29.
 [7] 韩力, 高强. 无刷双馈电机笼型转子结构对磁场调制的影响[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(2): 161-167.
 [8] 阙超豪, 王雪帆. 齿谐波法设计的无刷双馈发电机运行范围[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(24): 124-130.
 [9] LI Ru-qi, WALLACE A, SPEE R. Two-axis model development of cage-rotor brushless doubly-fed machines [J]. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, 1991, 6(3): 453-460.
 [10] 赵博, 张洪亮. Ansoft 12在工程电磁场中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.

[编辑: 李辉]