

一种带有空槽分瓣定子结构的直驱永磁电机

次元平, 俞文斌, 陈记春

(西安中车永电捷力风能有限公司, 陕西 西安 710018)

摘要: 随着风电市场的发展, 风力发电机功率逐渐提高, 电机体积越来越大, 体积增大为直驱电机运输带来困难。当电机外径大于 5 m 时, 运输成本会随着电机直径增加而迅速增加。为了解决这一问题, 需要考虑将电机沿着径向分为若干个模块, 运输到项目现场后再进行电机总装配。电机分瓣后同一个线圈无法同时存在于不同的两瓣电机上, 采用空槽结构可以有效解决这个问题。首先提出采用空槽结构实现直驱电机的分瓣技术。其次通过对比空槽与不空槽电机的电磁性能分析空槽的可行性。最后对比不同极槽配合下空槽对电机的电磁性能影响, 得出空槽方案的可行性。

关键词: 永磁同步电机; 空槽; 分瓣电机; 直驱

中图分类号: TM351; TM315 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)05-0060-04

doi: 10.12177/emca.2021.225

A Direct Drive Permanent Magnet Motor with Empty Slots Split Stator Structure

CI Yuanping, YU Wenbin, CHEN Jichun

(Xi'an CRRC Yonge Jieli Wind Energy Co., Ltd., Xi'an 710018, China)

Abstract: With the development of the wind power market, the power of the wind generator is gradually increased, and the volume is larger and larger, which brings difficulties to the direct drive generator transportation. When the outer diameter of the motor is greater than 5 m, the transportation cost will increase rapidly. In order to solve this problem, it is necessary to consider dividing the motor into several parts along the radial direction and transporting it to the project site for general assembly of the motor. After the motor is divided into segments, one coil cannot exist on two parts at the same time. The empty slot structure can effectively solve this problem. Firstly, the split technology of direct drive generator with the empty slot structure is presented. Secondly, the feasibility of the empty slot structure is analyzed by comparing the electromagnetic performance of the motor with and without the empty slot. Finally, the influence of the empty slot on the electromagnetic performance of the motor with different pole-slot combination is calculated. The feasibility of the empty slot scheme is proved.

Key words: permanent magnet synchronous motor; empty slot; split motor; direct drive

0 引言

目前风力发电机主要分为异步双馈风力发电机、异步笼型发电机、永磁半直驱发电机和永磁直驱发电机 4 种类型。永磁电机具有高功率密度、

高效率、高可靠性等优点, 是大功率风力发电机最具前景的解决方案^[1-2]。在电机转速和功率已经确定的情况下, 电机直径越大成本越低。不断增大电机的功率等级是降低机组成本的有效办法。直驱电机转速通常在 20 r/min 以内, 电机的体积

收稿日期: 2021-10-31; 收到修改稿日期: 2022-04-26

作者简介: 次元平(1988—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为风力发电机设计与分析。

俞文斌(1971—), 男, 高级工程师, 研究方向为特种电机设计与分析。

陈记春(1982—), 男, 高级工程师, 研究方向为风力发电机设计与分析。

不空槽和空槽结构电机在空载情况下由于绕组没有电流,电机的磁场没有受到影响,两种情况下气隙磁密波形相同。本文使用 Maxwell 有限元软件仿真计算该电机模型,空槽与不空槽时分瓣处磁密分布如图 2 和图 3 所示。

电机反电动势的计算公式为

$$E_0 = 4.44 \times f \times K_{dp} \times N \times \Phi_{\delta 0} \times K_{\phi} \quad (1)$$

式中: f 为频率; K_{dp} 为绕组因数; N 为每相绕组串联匝数; $\Phi_{\delta 0}$ 为空载主磁通; K_{ϕ} 为气隙波形系数。

本文设计的电机空槽和不空槽情况下基本尺寸相同,采用空槽结构后线圈串联数相应减少,因此空载反电动势会相应减少。

每相串联匝数 N 可以由下式求得:

$$N = \frac{N_s \times Q}{2 \times m \times a} \quad (2)$$

式中: N_s 为每槽导体数; Q 为电机槽数; a 为并联支路数; m 为相数。

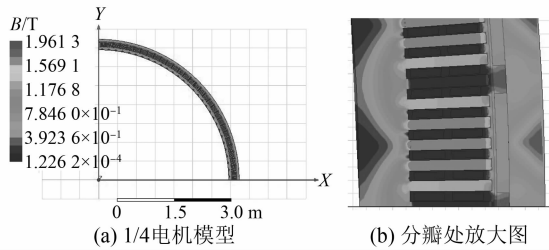


图 2 不空槽结构电机空载磁密分布图

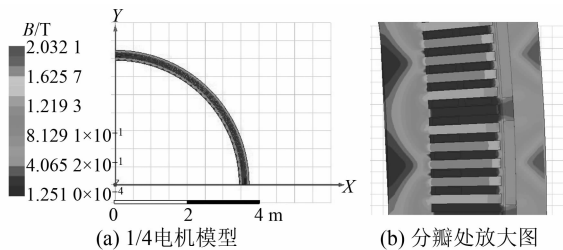


图 3 空槽结构电机空载磁密分布图

式(2)按照电机的每相串联匝数相同计算,但是电机采用空槽后该公式不再适用。应该依据下式计算电机串联匝数:

$$N = N_s \times Z \quad (3)$$

式中: Z 为单元电机每相所占虚槽数。

对于不空槽结构,单元电机所占槽数为 120,而空槽结构中单元电机的两个接缝处均有两个虚槽没有线圈,单元电机所占槽数为 116,因此两种

电机空载反电动势相差相应的比值。经过仿真计算空载情况下两种结构电机空载反电动势区别如图 4 和图 5 所示。两种情况下电机齿槽转矩不会发生变化,电机空槽时空载反电动势减小,反电动势谐波畸变率均为 0.55%,如图 6 所示,同时空载情况下电机的磁密分布基本相同。

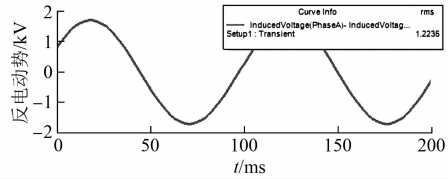


图 4 不空槽情况下电机空载反电动势

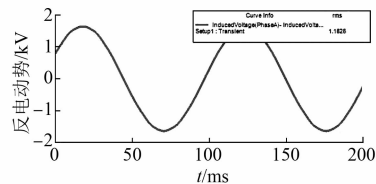


图 5 空槽情况下电机空载反电动势

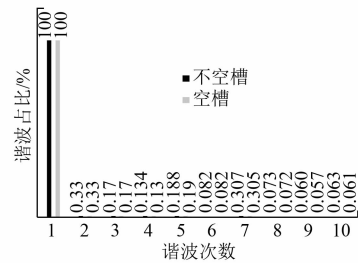


图 6 空载反电动势谐波畸变率对比

在电机负载的情况下,绕组中有电流,该电流对气隙磁密分布有一定的影响,电机远离分瓣处的位置受空槽影响较小。两种情况下的电机磁密分布如图 7 和图 8 所示。空槽时,由于空槽位置缺少一层线圈,接缝处磁场的分布仅受到一层电流的影响,从而与两层绕组电流对磁场的分布不再相同。经过对比分析得出不空槽结构的电机气隙磁

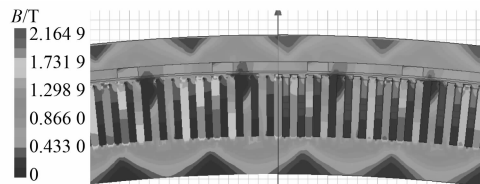


图 7 不空槽负载磁密分布

畸变率为 31.4%，空槽结构电机在空槽附近磁密畸变率为 32.6%。空槽对磁密影响小于 5%。

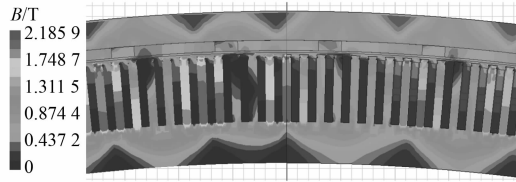


图 8 空槽负载磁密分布

本项目主要目的是验证空槽的可行性,因此对比两种情况下电机的转矩波动,如图 9 所示。经过对比发现电机的转矩波动有所增加。不空槽时转矩波动为 1.5%,而空槽后转矩波动增加到 2.5%。

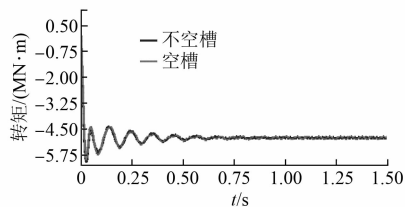


图 9 空槽与不空槽情况下电机转矩波动比较

3 不同槽数空槽分析

由上文分析可知,空槽和不空槽结构的电机性能有所变化,但是均在可接受范围。此处分析不同极槽配合时空槽与不空槽结构电机的电磁性能。电机定子外径均保持为 7 300 mm,轴向长度均为 900 mm,极弧系数保持相同,均为 0.78,永磁体牌号为 N46H,气隙长度为 7.5 mm 保持不变,电机分瓣数均为 4。几种模型的极槽配合如表 2 所示。

表 2 模型极槽配合表

模型编号	极数	槽数
1	100	600
2	104	624
3	108	648
4	112	672
5	120	720

在不同极槽配合下,空槽与不空槽结构电机的电磁性能如表 3 所示。由表 3 可以看出,不同极槽配合下空槽与不空槽的情况电机的齿槽转矩比值等于每个单元电机每相所占虚槽数的比值,同时电机空载与不空槽反电动势比值等于每相线圈虚槽数的比值。电机空槽后转矩波动为不空槽

情况的 1.3 倍以上。随着极数增多,空槽后转矩波动增加倍数减小。

表 3 不同极槽配合下电磁性能对比

模型编号	虚槽数 Z	反电动势 E_0/V	齿槽转矩/ (kN·m)	转矩波动/ %	$\cos\phi$
1	空槽 48	969	3.62	2.97	0.766
	不空 50	1 009	3.26	2.02	0.839
2	空槽 50	1 007	3.38	3.16	0.798
	不空 52	1 047	3.37	2.59	0.869
3	空槽 52	958	3.52	2.54	0.859
	不空 54	995	3.61	1.84	0.885
4	空槽 54	910	3.13	2.49	0.785
	不空 56	948	3.19	1.56	0.849
5	空槽 58	1 183	2.96	2.53	0.825
	不空 60	1 223	3.04	1.50	0.810

从表 3 可以看到不同极槽配合下转矩波动均在 5% 以内。因此以上几种极槽配合在电磁方面均满足电机设计的需要,具体选用怎样的极槽配合需要通过电机的固有频率计算而最终确定。

4 结 语

本文采用多极多槽的结构,研究一种带有空槽分瓣定子结构的直驱永磁电机。极槽配合电机采用空槽结构可以满足电机电磁性能的要求,转矩波动小于 5%,但电机最终方案需要考虑固有频率对电机的影响。对于每极每槽数固定的电机,空槽的转矩波动比不空槽情况下平均增加 50% 左右。电机反电动势与电机虚槽数成正比,因此空槽结构对于电机反电动势也有影响。综合评价,在分瓣处取消线圈可以在不降低绝缘强度的前提下,降低电机的制造难度和运输成本。

【参考文献】

- [1] 邢福超. 直驱式永磁风力发电机的设计与研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2018.
- [2] 赵祥,范瑜,夏静,等. 大型海上风力发电机组的可靠性设计[J]. 防爆电机,2019,54(4): 16.
- [3] 段志强,黄娜,米兴社,等. 9 MW 海上用半直驱永磁风力发电机电磁特性分析[J]. 微电机,2021,54(5): 39.

(下转第 81 页)

半矩形绕组端部结构较为简单,其圆弧段一般与电机同心,磁通面的建立以及绕组端部一维坐标的选取均比较容易,宜采用比能量法精度更高的 Boit-Savart 算法或矢量磁位算法。

5 结 语

本文以喇叭口形、半椭圆形以及半矩形端部绕组为例,采用能量法、Boit-Savart 定理、矢量磁位的端部漏感计算方法对 3 种不同形状端部的漏感进行计算,并将计算结果与试验测试结果进行比较,分析得出 3 种端部漏感计算方法的适用范围。

总结得出,当绕组端部不存在倾角且磁通面外轮廓规则时,可利用 Boit-Savart 算法或矢量磁位算法;当绕组端部存在倾角且绕组端部一维坐标的选取均比较容易时,宜采用矢量磁位算法;当绕组端部不规则,建模较为困难时,宜采用能量法。

【参 考 文 献】

- [1] 李强. 电动汽车用异步电机参数辨识及优化[J]. 电机与控制应用, 2014, 41(6): 51.
- [2] 崔连香. 异步电机参数静态辨识[J]. 电机与控制应用, 2013, 40(12): 39.
- [3] 袁阳, 额尔和木巴亚尔, 张伟. 三相笼型异步电动机起动电流的瞬态计算与分析[J]. 电机与控制应用, 2015, 42(6): 73.
- [4] BOLDEA I, NASAR S A. The induction machine handbook[M]. Boca Raton: CRC Press, 2002.
- [5] 陈世坤. 电机设计[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- [6] 高景德. 交流电机及其系统的分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [7] LIN R, ARKKIO A. Calculation and analysis of stator end-winding leakage inductance of an induction machine[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(4): 2009.
- [8] ARSHADW M, LENDENMANN H, PERSSON H. End-winding inductances of MVA machines through FEM computations and IEC-specified measurements [J]. IEEE Transactions on Industry Application, 2008, 44(6): 1693.
- [9] LIANG Y, GAO L, LI C, et al. Investigation of end leakage reactance and its influence on the accuracy in performance calculation of large double canned induction motors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(2): 1420.
- [10] 高莲莲, 梁艳萍. 双屏蔽电机定子端部漏抗计算及其影响分析[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(5): 53.
- [11] 吴新振, 王祥珩. 12/3 相双绕组异步发电机定子端部漏感的计算[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(24): 80.
- [12] 史振宇, 吴旭升, 高嵬, 等. 多相圈式绕组电机的定子端部漏感计算[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 119.
- [13] 王东, 吴新振, 马伟明, 等. 非正弦供电十五相感应电机定子漏抗计算[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(6): 41.
- [14] 张伟玲, 吴新振, 王东, 等. 基于矢量磁位法的多相感应电机定子端部漏感计算[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(30): 5401.
- [15] 张伟玲, 齐霞, 孙昊. 交流电机定子绕组半椭圆形端部的漏感计算[C]//中国电工技术学会、中国电机工程学会大电机专业委员会 2014 年学术年会, 2014: 261.
- [16] 韩正清, 许金, 芮万智, 等. 双边十二相直线感应电机端部漏感计算[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(7): 2519.

(上接第 63 页)

- [4] 张岳, 王凤翔. 直驱式永磁同步风力发电机性能研究[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(1): 78.
- [5] 佟文明. 大型低速永磁风力发电机的设计研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2012.
- [6] 李伟力, 程鹏, 张美巍, 等. 1.5 MW 永磁风力发电机电磁场与温度场计算与分析[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(12): 52.
- [7] 刘婷, 黄志文, 邓秋玲. 永磁直驱风力发电机齿槽转矩削弱方法应用研究[J]. 湖南工程学院学报(自然科学版), 2018, 28(3): 13.