

MW级永磁同步发电机空载电势正弦畸变率分析

温嘉斌, 宋春杰

(哈尔滨理工大学 电气与电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 以内置式U型永磁同步发电机为例, 针对永磁同步发电机电势畸变率较高的问题, 分析其原因, 同时提出转子非均匀气隙方法与定子斜槽方法。通过有限元的方法进行仿真实验, 将转子采用均匀气隙与非均匀气隙下的空载电势、气隙磁密与齿槽转矩进行对比分析, 得出转子采用非均匀气隙后对电势畸变率的影响; 提出3D模型的2D分段法来提高有限元2D仿真准确度, 同时得出不同定子斜槽对齿谐的抑制效果, 并得出齿槽转矩在不同斜槽下的波形图及幅值表, 获得空载相电势波形的局部放大图, 并得出最佳的定子斜槽。在采用优化气隙及斜槽后, 电压畸变率由7.32%降为4.8%, 满足设计要求。

关键词: 有限元方法; 永磁电机; 电势畸变率; 非均匀气隙; 定子斜槽

DOI: 10.15938/j.jhust.2018.03.017

中图分类号: TM 301.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2018)03-0099-05

The Analysis of Permanent Magnet Synchronous Generator No-load Voltage Sine Distortion Rate

WEN Jia-bin, SONG Chun-jie

(School of Electrical and Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: In this paper, to solve the higher distortion factor of permanent magnet synchronous generator (PMSG), we discuss the reasons that result in the higher distortion factor and put forward two methods, including using the non-uniformity air-gap and skew slot of stator. To obtain corresponding conclusions, the no-loading EMF and the air gap flux density and cogging torque, which are respectively in the case of non-uniformity air-gap and uniform air-gap, are compared by the way of finite element; in the same time, put forward a 2D segmentation method to solve the 3D issue. Simultaneously, it is worked out that the different skewed slots have a suppression effect on the tooth harmonic. Also, the cogging torque waveform and amplitude table, as well as the waveform of the no-loading EMF in different skewed slots are obtained. According to these, the best stator chute is got. After taking the non-uniformity air-gap and skew slot of stator, the voltage distortion rate is reduced from 7.32% to 4.8%, which meets the design requirements.

Keywords: finite element method; permanent magnet generator; voltage distortion rate; non-uniformity air-gap; skewed stator slot

0 引言

随着国家对清洁能源开发力度的增加, 越来越

多的可再生能源出现在我们的视野当中, 水电、风电、潮汐能及地热能等等, 其中风力发电是除了水力发电以外技术最成熟的, 因此风力发电成为我国近期可再生能源开发利用的重点发展对象^[1-3]。而伴

收稿日期: 2016-06-12

基金项目: 国家自然科学基金(51275137); 黑龙江省教育厅科学技术研究项目(12541137)。

作者简介: 宋春杰(1988—), 女, 硕士研究生。

通信作者: 温嘉斌(1961—), 男, 教授, 硕士研究生导师, E-mail: wenjiabin@126.com。

着风电事业的发展,对风力发电机在质量与性能上的要求越来越高。在实际的工业生产中,考虑到风力发电机的工作环境,大多采用永磁同步发电机作为其机电转化部件。由于其励磁方式与传统电励磁方式不同,采用永磁磁钢进行励磁,大大减小了发电机的体积,提高了效率,方便了其高空作业的工作环境。

而永磁同步机的种类繁多,主要区别在于其转子磁路结构上。根据其转子磁路结构可以分为两大类:内置式和表贴式^[4]。而在实际的工业生产中,正如我们所知道的那样,对风力发电机电势波形有着严格的要求规范。

在以往的文献当中,大多数都是对表面式转子磁极结构进行优化^[5-8]。文[9-16]较为概括的总结了非均匀气隙和斜槽对切向和径向永磁同步发电机性能的影响。文[17]对切向永磁同步电机进行了非均匀气隙优化。文[18]利用田口法对径向式V型磁体结构的永磁电机进行优化。文[19]利用遗传算法对径向V型转子磁路结构进行优化。文[20]通过在不影响性能的条件下凿空转子铁心的方式进行转子结构优化。而针对由3段永磁磁钢构成的U型转子磁路结构永磁同步发电机的电压波形优化与具体实例分析是少见的。本文中主要采用内置式U型永磁磁钢型永磁同步发电机进行有限元仿真实验,来探讨永磁同步发电机的电动势波形的影响因素,同时提出了通过非均匀气隙进行转子优化与定子斜槽的改进措施。

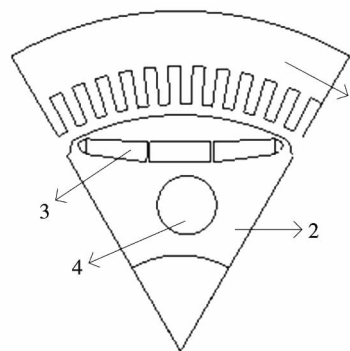
1 空载电势畸变原因

建立如表1所示的永磁同步风力发电机,其定子槽数为72,极对数为3,采用U型磁钢转子结构。三相双绕组结构,工作温度120℃,永磁风力发电机的参数列于表1。

均匀气隙永磁同步发电机转子模型如图1所示。

表1 永磁风力发电机的参数

项目	数值
额定功率/kW	2 935
额定频率/Hz	86.75
额定电压/V	690
额定转速/r/min	1 735
定子外径/mm	900
转子外径/mm	614



1-定子; 2-转子; 3-永磁磁钢; 4-转子通风道

1. 定子; 2. 转子; 3. 永磁磁钢; 4. 转子通风道

图1 均匀气隙模型

由图2是空载电势波形,可以看出的空载电势基本呈正弦性分布,但是其谐波含量丰富,在应用如图1所示的转子模型时,经计算可得出其谐波含量高达7.32%。空载电势正弦畸变率较大。电势波形正弦性畸变率是指各次谐波的有效值的平方和的平方根与基波有效值的比值,其表达式如下:

$$THD = \frac{\sqrt{E_2^2 + E_3^2 + \dots + E_r^2}}{E_1} \times 100\%$$

式中: E_r 为相电势中 γ 次谐波 ($\gamma = 1, 2, 3, \dots$); E_1 为相电势中基波的有效值。

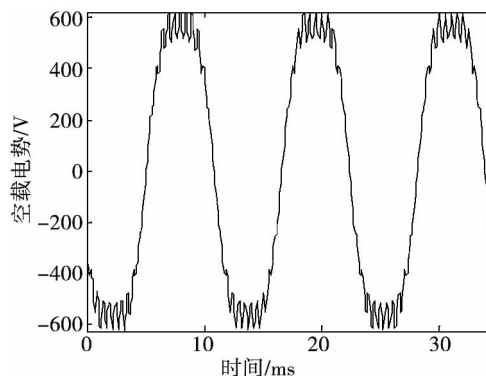


图2 均匀气隙空载相电势波形

上述问题是永磁同步发电机所存在的普遍问题,这是因为该种电机存在较大的齿槽转矩^[21]。齿槽转矩是在电枢绕组不通电的状态下,由永磁体产生的磁场同电枢铁心的齿槽作用在圆周方向产生的转矩。齿槽转矩的存在会引起转矩脉动、振动及噪声使得电机运行不平稳。由于齿槽的存在使得气隙不均匀,导致气隙磁场的畸变,同时电力电子设备的引用,磁路的非线性和磁极形状、绕组分布等原因,也会出现谐波电压电流。

同时,本电机当中槽型为开口槽、没有斜槽也是谐波含量较大的原因之一。

2 不均匀气隙对空载电势畸变率影响

转子均匀气隙是指转轴与转子外圆均以 A 点为圆心,而为了优化气隙磁密波形,将永磁磁钢所对应极距的范围以 B 为圆心,其他位置不变,AB 之间距离为偏心距,用气来衡量不均匀气隙程度。

如图 3 所示,是采用不均匀气隙后的转子模型,其偏心距为 10 mm。

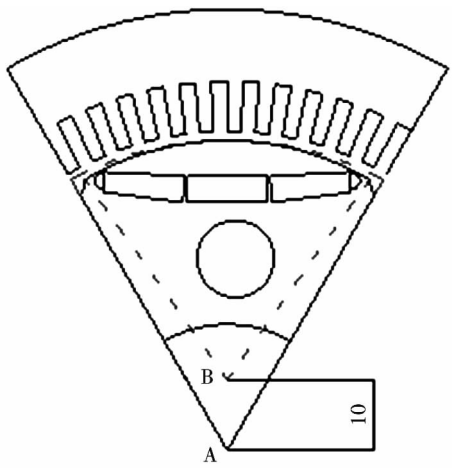


图3 不均匀气隙模型

图4和图5分别是采用均匀气隙和不均匀气隙时的气隙磁密波形,将二者相比较,可以明显的看出采用不均匀气隙后的气隙磁密波形的正弦性变得更好了,由此可以推出其空载电势的谐波含量有所减少。经计算,可以得出不均匀气隙的畸变率为5.87%,比均匀气隙的畸变率大大减小。

图6是采用不均匀气隙时的空载电势波形。与图2相比较,可以看到顶部波动较小。

图7为转子结构采用均匀气隙和不均匀气隙时的傅里叶谐波分析,可以看到,采用不均匀气隙后,各次谐波较均匀气隙时有所减小。

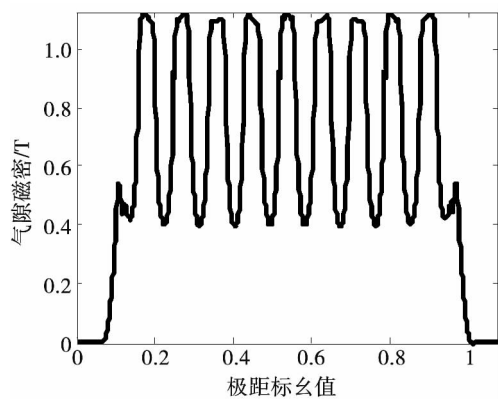


图4 均匀气隙气隙磁密波形

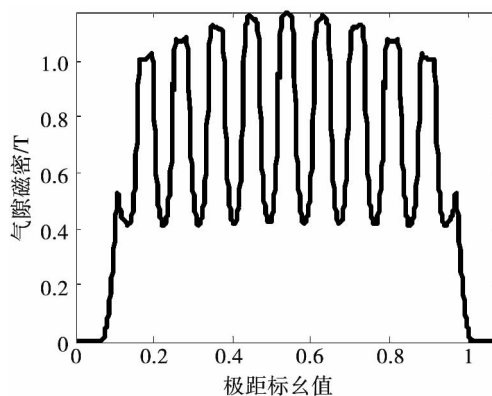


图5 不均匀气隙气隙磁密波形

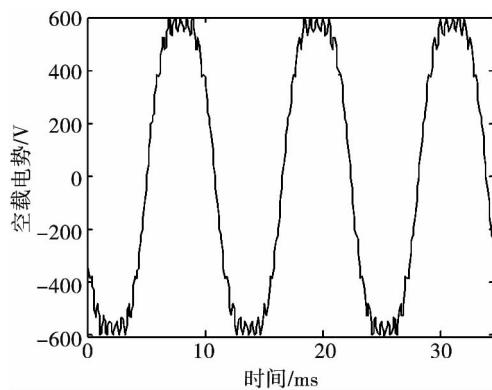


图6 采用不均匀气隙空载相电势波形

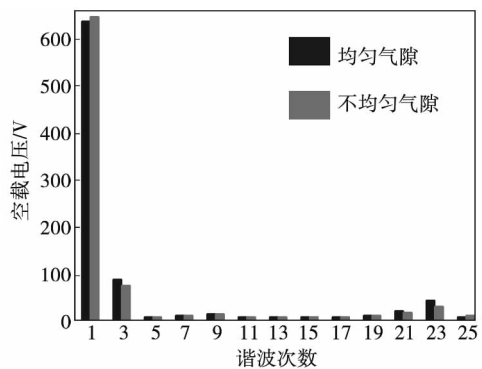


图7 傅里叶谐波分析

图8是均匀气隙与非均匀气隙这两种情况下的齿槽转矩,虚线为均匀气隙,实线为不均匀气隙,由图可见,不均匀气隙能够有效地减少齿槽转矩。

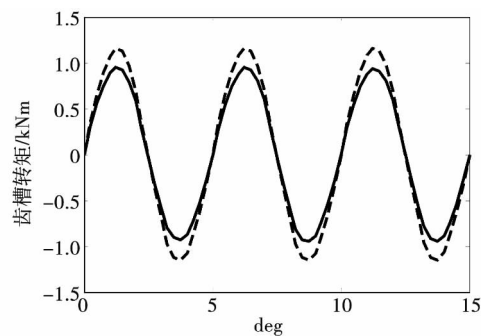


图8 齿槽转矩波形

3 定子斜槽对电势波形的影响

根据电机原理,绕组的分布和短距能够抑制电动势谐波,但是总有一些节距因数和分布因数与基波相同的谐波不能够有效的被抑制,而通常采用的方法为斜极或斜槽,在这里通过有限元参数化来求得最佳斜槽度数。

在一般情况下,由于定子斜槽的情况不满足有限元方法的轴向对称原则,大多采用3D有限元模型,然而,3D有限元模型仿真较为费时,因此,本模型机采用3D模型的2D分段法进行。2D分段法就是将所设定斜槽程度通过参数化的方法平均分成若干份,得出在不同位置时的电势参数,进行分解求取各次谐波平均值得出最终结果。如图9是不同位置时的电势波形。图9中的第一层转子初相角为0,最后一层转子初相角是所需转子斜槽程度的大小,每一层的转子初相角成等差。因此每一层的电势作和求平均值的大小等于斜槽后所对应电势大小。

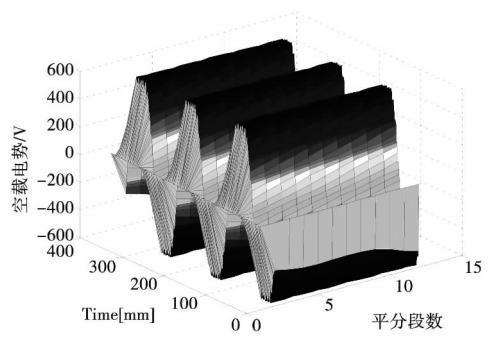


图9 不同位置时的电势波形

图10表示模型电机的一阶齿谐波(25次谐波)随斜槽度数变化的情况。图11是在各个斜槽程度下齿槽转矩波形图。由图10和图11可以分别看出随着斜槽程度的增加,一阶齿谐波呈减小趋势;在不同的斜槽下,齿槽转矩是变化的。

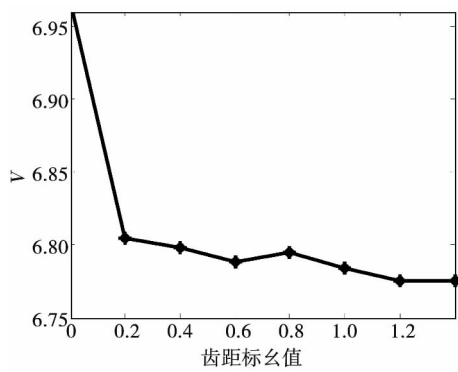


图10 一阶齿谐波随斜槽变化

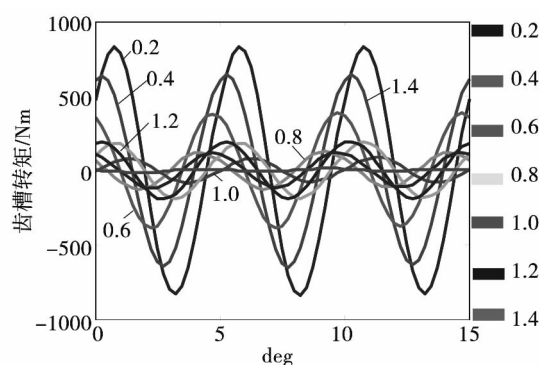


图11 在不同斜槽下的齿槽转矩波形图

表2为齿槽转矩幅值随斜槽程度变化而变化的情况表,可以看出齿槽转矩在斜槽宽度为一倍齿距时最小。

表2 齿槽转矩随定子斜槽的变化表

齿距标么值	齿槽转矩幅值/N·m
0	896
0.2	829
0.4	642
0.6	387
0.8	125
1	88
1.2	192
1.4	194

图12及图13分别是相应斜槽程度下的空载电势波形及其局部放大图。将通过2D分段法得出的电机各个小段内的对应部分的电势求平均值后,得到相应的斜槽度数下的空载电势波形图。可以看出,随着斜槽度数的增加,空载相电势波形趋于平缓,幅值有所下降。这是因为斜槽导致了磁耦合程度降低。

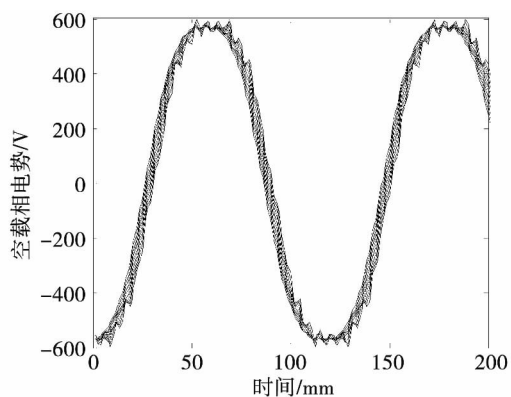


图12 相应斜槽下的空载相电势波形

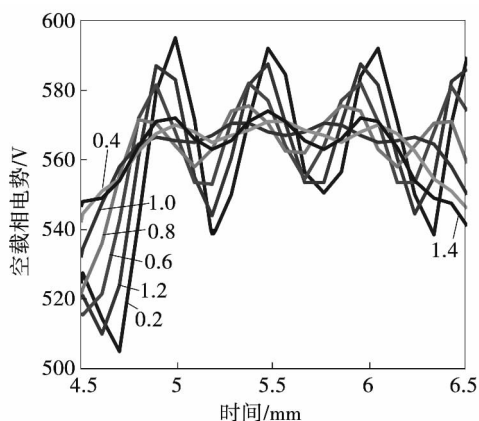


图 13 相应斜槽下的空载相电势波形局部图

根据图 10 ~ 13 及表 2, 经计算, 在该电机模型中选择一倍齿距为佳。此时的谐波含量为 4.8%, 满足设计要求。

4 结 论

通过有限元的方法进行建模分析, 得到了如下结论:

1) 永磁同步发电机中空载电势畸变率大、脉动大, 主要是由其齿槽转矩和其转子磁路结构的不同引起的, 在本模型机中槽型为开口槽、没有斜槽也是谐波含量较大的原因之一。

2) 采用非均匀的气隙, 即通过转子结构的优化, 可以使得气隙磁密波形的正弦性得以改善, 从而降低谐波含量, 改善电压波形; 同时可以有效地减少齿槽转矩。

3) 定子斜槽程度并不是越大越好, 在一定范围内, 可以有效抑制谐波含量, 减小齿槽转矩脉动。随着斜槽程度的变化, 齿槽转矩存在一个最小值。斜槽程度的增加将会使定子绕组切割磁力线的数量变少, 导磁耦合程度降低, 会引起空载相电势幅值变化。

4) 通过采用非均匀气隙与定子斜槽, 本文所采用模型机的谐波含量由最开始的 7.32% 降为 4.8%。

参 考 文 献:

- [1] 陈雯. 我国风力发电的现状与展望[J]. 应用能源技术, 2010(8): 49-51.
- [2] 赵祥, 张新丽, 张世福. 大型永磁同步发电机在风力发电中的

应用[J]. 电气技术, 2010(11): 23-27.

- [3] 陈炳森, 胡华丽. 我国风电发展概况及展望[J]. 电网技术, 2008, 32(S2): 272-275.
- [4] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [5] NAM Hyuk, HA Kyung-Ho, LEE Jeong-Jong, et al. A Study on Iron Loss Analysis Method Considering the Harmonics of the Flux Density Waveform Using Iron Loss Curves Tested on Epstein Samples[J]. IEEE Transactions on Magnetic, 2003, 39(3): 1472-1475.
- [6] ZHENG Ping, ZHAO Jing, HAN Jianqun, et al. Optimization of the Magnetic Pole Shape of a Permanent Magnet Synchronous Motor[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(6): 2531-2533.
- [7] MIN Hsieh Fu, SHENG Hsu Yu. An Investigation on Influence of Magnet arc Shaping upon back Electro Motive Force Waveforms for Design of Permanent-magnet Brushless Motors[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(10): 3949-3951.
- [8] CHAITHONGSUK S, TAKORABET N, MEIBODYTABAR F. On the Use of Pulse Width Modulation Method for the Elimination of Flux Density Harmonics in the Air-gap of Surface PM Motors[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(3): 1736-1739.
- [9] 徐英雷, 李群湛, 王涛. 永磁同步电机空载气隙磁密波形优化[J]. 西南交通大学学报, 2009(4): 513-516+540.
- [10] 杨玉波, 王秀和. 永磁体不对称放置削弱内置式永磁同步电动机齿槽转矩[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(12): 58-62.
- [11] 温嘉斌, 李金泽. 2.935 MW 永磁同步风力发电机电磁设计与仿真[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2016, 21(4): 101-105.
- [12] 张蕾, 李广. 基于 Ansoft 的永磁同步发电机空载反电势波形畸变率分析[J]. 防爆电机, 2012, 47(4): 28-30.
- [13] 陈超, 刘明基, 张健, 陈伟华, 罗应立. 利用不均匀气隙优化自启动永磁电机的气隙磁密波形[J]. 电机与控制应用, 2010(7): 1-5+49.
- [14] 刘长红, 杨平西. 定子斜槽同步发电机空载电压波形的数值计算[J]. 上海交通大学学报, 2007(11): 1891-1895.
- [15] 李全武, 窦满峰, 李兆杰. 改善永磁同步电机反电势波形的磁极宽度优化方法[J]. 微特电机, 2012(9): 6-8.
- [16] 龚建芳. 定子斜槽及非均匀气隙对永磁同步发电机的性能影响[J]. 大电机技术, 2008(4): 17-20.
- [17] 崔雪萌, 刘勇, 梁艳萍. 非均匀气隙对切向永磁同步发电机性能影响[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2014, 19(3): 100-104.
- [18] 刘明基, 韩志, 裴亚伟, 等. 基于田口法的永磁发电机气隙磁通密度优化[J]. 微特电机, 2014, 42(3): 29-32+35.
- [19] 陈超, 刘明基, 张健, 等. 利用不均匀气隙优化自启动永磁电机的气隙磁密波形[J]. 电机与控制应用, 2010(7): 1-5, 49.
- [20] 刘坚, 黄守道, 浦青云, 等. 内置式永磁同步电动机转子结构的优化设计[J]. 微特电机, 2011(3): 21-23, 27.
- [21] 赵朝会, 李遂亮, 王新威, 等. 永磁同步电机气隙磁密影响因素的分析[J]. 河南农业大学学报, 2005, 39(3): 338-343.

(编辑: 温泽宇)