

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.12.021

# 基于Maxwell的六相双Y移30°风力发电机的仿真分析\*

罗华利, 李民生\*, 丁 亮

(海上风力发电技术与检测国家重点实验室(湘潭电机股份有限公司), 湖南 湘潭 411102)

**摘要:** 针对如何进一步降低永磁风力发电机的高次谐波含量,降低发电机铜耗和铁耗,以及有效地提高风力发电机性能的问题,在风力发电机设计研发中应用了六相双Y移30°绕组的多相绕组电机理论技术。利用Ansoft Maxwell 2D瞬态仿真功能,对采用相同定子结构的普通三相60°相带发电机与六相双Y移30°绕组发电机,仅改变定子绕组的连接方式,分别进行了二维瞬态场建模。进行了空载运行和额定负载运行工况的瞬态有限元仿真分析,并针对负载时气隙磁密等进行了谐波的傅里叶分析。依据仿真分析中电流、电压、磁场等结果数据,进行了二者性能的区别比较。研究结果表明,六相双Y移30°发电机相比普通三相60°相带发电机而言,具有高次谐波含量低、电压范围大、电机损耗低、效率高等优势。

**关键词:** 六相双Y移30°绕组; 风力发电机; 谐波分析

**中图分类号:** TM614; TH39 **文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-4551(2013)12-1536-04

## Simulation of six-phase double Y 30°-deflected applied in wind turbine based on Maxwell

LUO Hua-li, LI Min-sheng, DING Liang

(State Key Laboratory of Offshore Wind Power Generation Technology and Detection  
(Xiangtan Electric Manufacturing Company), Xiangtan 411102, China)

**Abstract:** Aiming at further decreasing the harmonic content of the PM wind turbine, reducing the loss and improving its performance, six-phase double Y 30°-deflected winding of multiphase winding theory was used in the research and development. Ansoft Maxwell 2D transient simulation function was used to model ordinary three-phase and six-phase dual Y shift 30° motor, which was the same structure but only changing stator winding connection. Simulated by the no-load and rated load, and the air gap flux density harmonic of Fourier was analyzed, etc.. Based on the difference of performance by simulation analysis data, the results indicate that compared with ordinary three-phase generators, six-phase double Y 30°-deflected generators have advantages such as less higher harmonic content, wider voltage range, lower loss, higher efficiency, etc..

**Key words:** six-phase double Y 30°-deflected winding ; wind turbine; harmonic analysis

## 0 引 言

目前,根据电力系统的划分,国内外常用的交流电机基本分为单相和三相电机。但随着现代电力电

子技术、变频技术的迅速发展,可靠性更高、性能更好的多相交流电机的理念被更多开发利用。与常规的三相电机相比,多相电机可以在不改变电机定转子结构的情况下扩大电压范围,增加电机容量,削弱高次谐波,提升运行性能,因此多相电机将获得广泛的发

收稿日期: 2013-08-26

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)资助项目(2012CB724403)

作者简介: 罗华利(1984-),男,北京人,主要从事电机设计方面的研究。E-mail: venpo@163.com

通信联系人: 李民生,男,高级工程师。E-mail: hdfkms@163.com

展。在风力发电机的应用中,六相双Y移30°是目前设计开发较多的一种多相电机应用<sup>[1-2]</sup>。

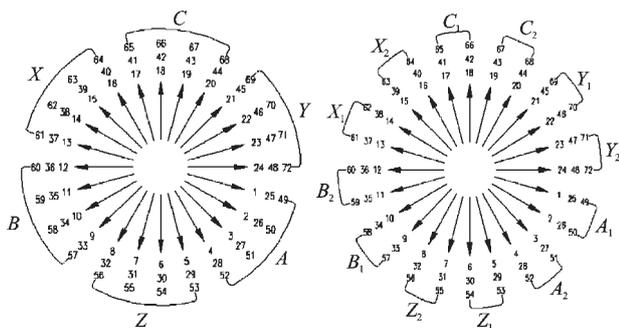
本研究将利用Ansoft Maxwell 2D瞬态场分析器,分别对三相风力发电机和六相双Y移30°风力发电机进行建模并分析,比较普通三相60°相带发电机与六相双Y移30°发电机的性能区别。

## 1 六相双Y移30°绕组构成原理

六相30°相带绕组的特点是:对电机内部来说,定子线槽沿内圆每对极距内等分为12个相带,每个相带宽度为30°电角度;对电机外部来说,把12个相带接成两个独立的Y形联接的对称三相系统,就是“六相30°相带绕组”。在发电机里,通常采用双Y互移30°电角度,所以也叫“双Y移30°绕组”<sup>[3-4]</sup>。如本研究中用到的永磁同步发电机的定子槽数 $Z=72$ ,极对数 $p=3$ ,则其槽距电角度为:

$$\alpha = \frac{p \times 360}{Z} = \frac{3 \times 360}{72} = 15 \quad (1)$$

按照该永磁同步发电机极对数和定子槽数,其三相60°相带槽电动势星形图如图1(a)所示,改变相带,将图1(a)中的60°相带一分为二,得到的槽电动势星形图如图1(b)所示。根据槽电动势星形图分相,将图1(b)中互差120°的相带连接成对称的两个独立的Y接三相绕组,两个三相绕组间对应相差30°。将两套绕组组合在一起就是六相双Y移30°绕组<sup>[5-6]</sup>。



(a) 三相60°相带绕组 (b) 六相双Y移30°相带绕组

图1 槽电动势星形图

## 2 2 000 kW 永磁同步发电机的建模

### 2.1 电机主要参数

为了更好地分析和比较两种绕组结构对电机性能的影响,本研究所分析的三相电机与六相电机采用相同的定转子结构,只改变定子绕组接法。同时考虑为了降低后续变频器的成本,本研究采用降低电压,而保证电机输出功率值基本不变。发电机的主要参数如表1所示。

表1 发电机主要参数

	三相	六相
额定功率/kW	2 000	2 000
同步转速/(r·min <sup>-1</sup> )	1 000	1 000
相数	3	6
极对数	3	3
定子槽数	72	72
额定线电压/V	690	365
额定电流/A	1 707.6	1 636.5
绕组接法	Y	双Y移30°
节距	10	11
额定转矩/(kN·m)	19.1	19.1
相电阻/Ω	0.002 1	0.001 1

### 2.2 电机绕组接法

根据电机绕组理论可知, $m$ 相对称绕组由基波电流产生合成磁势中存在谐波次数为:

$$V' = \pm(mn \pm 1) \quad (2)$$

式中: $n=0, 1, 2, \dots, \infty$ 。

对空间分布60°相带时,即三相60°相带整数槽绕组以 $m=6$ 代入式(2),可得其磁势谐波含量为:

$$V' = \pm(6n \pm 1) = 1, -5, 7, -11, 13, -17, 19, \dots \quad (3)$$

对空间分布30°相带时,即六相双Y移30°绕组,以 $m=12$ 代入式(2),可得其磁势谐波含量为:

$$V' = \pm(12n \pm 1) = 1, -11, 13, -23, 25, -35, \dots \quad (4)$$

从式(3)可知,三相电机采用三相60°相带绕组时,其谐波中幅值较强的为5次和7次谐波,这些谐波磁势都将在电机转子表面产生不同频率的涡流,引起转子表面发热,严重地影响电机寿命甚至使电机损坏无法运行。一般三相60°相带发电机在设计时采用5/6短距绕组的方法,尽可能地削弱5次、7次谐波电流对电机的影响。

从式(4)可知,六相电机采用六相双Y移30°绕组时,已削弱了5次和7次谐波磁势,其主要谐波为11、13次谐波,根据短距原理,该电机的整距槽数为 $\tau=12$ 槽,那么绕组系数(短距比)取11/12可以大大削弱11、13次谐波的幅值,而且提高了绕组系数。所以六相双Y移30°绕组采用节距为11的短距绕组接法,以更有效地削弱谐波含量<sup>[7]</sup>。

二者绕组系数分别为三相0.926,六相0.983,可见六相接法提高了铜的有效利用率。

### 2.3 2D仿真模型的建立

本研究利用Ansoft Maxwell 2D对电机进行仿真建模<sup>[8]</sup>、分配材料、设置边界条件等。为了使仿真结果尽可能最接近真实,需对网格最优化设置,本研究中所用模型利用二维静磁场的自适应网格剖分,得到最



### 3.3 负载理论计算

根据表1中发电机相电阻,可计算出三相时发电机铜耗为:

$$P_{cu} = mI^2R = 3 \times 1710.2^2 \times 0.0021 = 18.43 \text{ kW} \quad (5)$$

六相时发电机铜耗为:

$$P_{cu} = mI^2R = 6 \times 1634.4^2 \times 0.0011 = 17.63 \text{ kW} \quad (6)$$

由于考虑谐波磁密的影响,发电机铁耗计算公式为:

$$P_{Fe} = \sum_{k=1}^N [k_e (f_k B_{km})^2 + k_h f_k B_{km}^\alpha + k_a (f_k B_{km})^{1.5}] \quad (7)$$

式中:  $f_k$ —第  $k$  次谐波的频率;  $B_{km}$ —第  $k$  次谐波磁密的幅值;  $k_e$ ,  $k_h$ ,  $\alpha$ ,  $k_a$ —涡流损耗系数,磁滞损耗系数,附加损耗系数。

该发电机选用的硅钢片为DW465-50,故上述参数数值分别为  $5.6 \times 10^{-5}$ , 0.032 584, 1.778 5,  $1.191 9 \times 10^{-7}$ 。

结合图2的磁场分布图及图7的负载气隙磁密谐波分析,可得三相时发电机铁耗为20.2 kW,六相时发电机铁耗为16.6 kW。

以上理论计算与仿真分析结果基本接近,差别不大,由此表明发电机定转子结构不变,只改变定子绕组三相60°相带接法为六相移30°接法后,其优势主要体现在:

(1) 谐波含量减少,转矩和电流纹波系数降低。从图7的负载径向气隙磁密谐波分析中可看出,发电机的气隙磁密基波基本不变,但5次、7次谐波含量出现非常明显的减弱,这表明六相双Y移30°的绕组结构能够降低电机高次谐波的幅值,同时改善了电机转矩的纹波系数。

(2) 降低发电机损耗,提高发电机效率。结合图5及表2结果,可以看出在输入功率基本不变的运行情况下,发电机的谐波含量的减少可使发电机的铁耗减少了近20%,铜耗降低了约11%,从而有效地提高了发电机的效率。

(3) 可以降低发电机的相电压。三相改六相接法,发电机相电压降低约为原来的一半。对于电机而言,相电压的降低可以减少电机绝缘材料的使用量,也提高绝缘的有效寿命,延长电机的使用寿命,降低了电机的故障率,从而提高了电机的可靠性。在风电应用中,一般发电机输出后接变频器后并入电网,当发电机的输出电压降低了,变频器的功率元件的选型

时也可选择耐压等级稍低一些的,从而降低风力发电机整套系统的成本。

但由于电机的齿谐波的影响,无论三相还是六相发电机,其23次、25次谐波含量都比较高。

## 4 结束语

本研究所分析的风力发电机为永磁同步风力发电机,三相采用的为60°相带绕组,节距为10,六相采用的六相双Y移30°绕组,节距为11,其他定、转子结构不变,在Ansoft Maxwell 2D瞬态仿真下,分析了发电机的空载磁场、空载反电势以及额定负载运行时的电流、气隙磁密的谐波傅里叶分解,通过仿真分析结果可发现,六相双Y移30°绕组接法比三相60°相带绕组接法有着5次、7次等高次谐波含量少、电压范围大、电机损耗减少、效率高等优点。

为推动风力发电行业的逐日优化和完善,具有诸多优点的六相双Y移30°应用应得到越来越多的发展,为可持续发展的绿色能源注入新机。

### 参考文献(References):

- [1] 刘洪文,才庆龙. 六相双Y移30°绕组结构及其应用优势[J]. 防爆电机,2010,45(4):19-22.
- [2] 李勇,郑琦,郑瑜. 九相感应电机与三相感应电机的性能比较[J]. 机电工程,2010,28(10):1273-1276,1280.
- [3] 陈世元,黄土鹏. 交流电机的绕组理论[M]. 北京:中国电力出版社,2007.
- [4] 王玲文,赵荣国,艾永乐. 六相感应电机定子绕组设计与计算[J]. 湖南工业大学学报,2010,24(4):98-101.
- [5] 陈桂兰. 六相双Y移30°相带在变频调速同步电动机中的应用[J]. 华东科技,2012(11):27-27.
- [6] 黄辉,胡余生,陈东锁,等. 变频压缩机电机电感仿真与测试方法的研究[J]. 流体机械,2013,41(5):11-14.
- [7] 陈世坤. 电机设计[M]. 2版. 北京:机械工业出版社,2000.
- [8] 邓娅,吴智恒,石卫卫,等. 基于Maxwell 14.0的永磁同步电机有限元分析[J]. 机电工程技术,2011,40(9):47-49.
- [9] 朱秋媛,戴勇. 多相感应电机电磁场分析[J]. 船电技术,2008,28(2):105-107.
- [10] 刘国强. ANSOFT工程电磁场有限元分析[M]. 北京:电子工业出版社,2005.
- [11] 程玮,陈宏伟,石庆均. 永磁直驱风电系统建模及其机电暂态模型参数辨识[J]. 机电工程,2012,29(7):817-820.

[编辑:洪炜娜]

#### 本文引用格式:

罗华利,李民生,丁亮. 基于Maxwell的六相双Y移30°风力发电机的仿真分析[J]. 机电工程,2013,30(12):1536-1539.

LUO Hua-li, LI Min-sheng, DING Liang. Simulation of six-phase double Y 30°-deflected applied in wind turbine based on Maxwell[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2013, 30(12): 1536-1539.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>