

[风力发电]

全分瓣式永磁风力发电机不同绕组形式分瓣方法分析

文/李 华
中车株洲电机有限公司

针对全分瓣式永磁直驱风力发电机不同绕组形式分瓣方法展开分析,分别阐述了单层链式绕组、齿绕式绕组、空槽绕组及不等跨距绕组的分瓣原则。以一款4.5 MW永磁直驱风力发电机为例,分别利用以上分瓣方法对发电机进行设计与仿真分析,在保证其力能指标满足要求的条件下,着重对气隙磁场谐波与反电势谐波展开分析,对比不同绕组分瓣方式差异性,为全分瓣发电机的设计提供参考与依据。

随着永磁直驱风力发电机单机容量的增加,考虑到我国风区资源的分布状况,布置于Ⅲ类、Ⅳ类风区的风力发电机对低速特性提出了更高要求。风力发电机的体积大幅度的增加,对发电机的制造、加工及运输造成困难。针对这一困境,大功率发电机的全分瓣化设计是一条行之有效的解决途径。针对全分瓣发电机而言,转子分瓣实质上仅是结构上的分瓣,兼顾结构的可靠性与工艺的可行性即可;定子分瓣要同时兼顾结构与电气两方面因素,如何实现定子绕组的模块化设计是实现全分瓣设计的核心任务。本文针对全分瓣设计中的绕组模块化问题展开分析,详细阐述了四种不同模块化绕组的具体分块形式与分块原则,并以某款4.5 MW发电机为例,展开设计与仿真分析。

绕组模块化分块原则

1. 单层链式绕组

单层绕组通常使用于10 kW以下的小型交流发电机中,将该绕组形式应用于全分瓣式永磁直驱风力发电机中,首先需对其分块原则进行分析,发电机基本电磁关系为

$$Q = 2mpq \quad (1)$$

式中, p 为发电机电极对数; m 为相数; q 为每极每相槽数; Q 为发电机槽数。

若将发电机均分为 K 个单元块,则每个单元块在电气特性上应完全相同,那么每个单元块即是一个单元发电机,由此最大单元块数必须与发电机电极对数相等,即 $K=p$ 。那么每个单元发电机的有效槽数 Q' 为

$$Q' = 2mq \quad (2)$$

兆瓦级永磁直驱风力发电机通常选取为3相、6相及12相,那么为了保证单元发电机的槽数 Q' 为整数,则每极每相槽数 q 须为整数或以3、6及12为分母的分数,根据发电机理论,当每极每相槽数 $q = b + \frac{c}{d}$ 为分数时,若 $d=3n$ 则无法构成三相对称绕组,由此可推断,采用单层链式绕组条件下,每极每相槽数的选取必须为正整数。根据永磁直驱风力发电机的转速特性,发电机会采用多极化结构,考虑到槽型的加工与绕组嵌线的可行性,在满足分块原则的前提下,每极每相槽数 $q=1$ 是在工程设计中的最优选择。

另外由发电机理论,采用单层绕组情况下,绕组仅可采用整距形式。因此单层链式绕组仅可采用

整距集中形式。

整距集中绕组形成的磁动势在空间上为矩形波，谐波含量相比于短距分布绕组要高得多，因此，在设计中需要采用其他手段对谐波进行抑制，后续文中结合实际案例进行讨论。 $q=1$ ， $\tau=3$ 最小单元发电机的绕组展开图如图1所示。

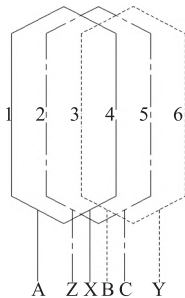


图1 单层链式绕组最小单元发电机绕组展开图

由图1分析可知，采用单层链式绕组结构，每个单元发电机可直接构成独立的三相绕组，这就使得单元发电机的组合十分灵活，每个电气模块可以由一个或多个单元发电机构成。

2. 齿绕式绕组

齿绕式绕组属于真分数槽类型绕组，这类绕组跨距 $y=1$ ，每个线圈可直接缠绕于定子齿部而共同构成一个单齿模块，这使得模块间的组合形式更加灵活。继续对分块原则进行分析。根据电机理论，绕组跨距为

$$\tau = \frac{Q}{2p} = mq \tag{3}$$

根据齿绕式绕组特点，令绕组节距 $y=1$ 。当采用整距绕组时，即 $y=\tau=1$ ，以三相为例， $q=\frac{1}{3}$ ，显然无法构成三相对称绕组。为规避此问题，通常令定子槽数 Q 略大于转子极数 $2p$ ，以伺服发电机中常用的8极9槽发电机为代表（ $q=0.375$ ）；当采用 $5/6$ 短距时， $y=\frac{5}{6}\tau \Rightarrow 1.2 < mq < 1.8$ ，仍以三相为例，则每极每相槽数可选取 $0.4 \sim 0.6$ 之间的真分数。以绕组节距为1作为前提条件，对常见的每极每相槽数与绕组因数间关系汇总见表1。

表1 绕组基本参数汇总

q	单元极槽数	短距系数	分布系数	绕组因数
0.375	8p9s	0.984 8	0.959 8	0.945 2
0.4	10p12s	0.963 9	0.965 9	0.933 0
0.5	2p3s	0.866	1.0	0.866 0
0.6	10p18s	0.766	0.989 5	0.735 2

随着每极每相槽数增加， $\frac{y}{\tau}$ 越小，导致了绕组短距系数出现了较大幅度的减小。因此，若采用单齿模块分瓣形式，则每极每相槽数 $q=0.4$ 在工程上是最优选择，此时绕组因数在真分数槽范围内是一个相对较高的状态，并且通过 $5/6$ 短距可以有效削弱电动势中的5、7次谐波。

但采用齿绕式绕组，空间磁动势中谐波含量仍十分丰富，磁动势谐波对永磁体的涡流损耗影响尤为明显，针对于永磁体涡流损耗的削弱后文中将有所涉及。

3. 不等跨距绕组

不等跨距绕组与常规双层叠绕组槽内有效边的布置形式完全相同，差别仅在于绕组的端部整形方式。因此，此绕组形式完全继承了传统双层叠绕组的优势，双层叠绕组中常用的移相、短距分布等抑制磁动势谐波的方式可完全沿用。同时，考虑到绕组的对称性问题，每极每相槽数应选取为3的整数倍或分数倍。以最小单元发电机10极36槽（ $q=1.2$ ）为例，发电机绕组展开图如图2所示。

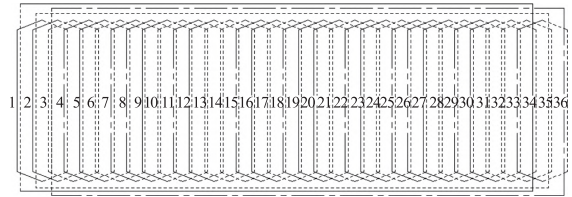


图2 10极36槽最小单元发电机绕组展开图

由图2分析可知，在该最小单元发电机中，每相均由11个3跨距线圈与1个33跨距线圈构成，此时三相绕组保持对称状态。

但是在发电机尺寸较大的条件下，长跨距绕组在实际加工过程中存在困难。首先，端部绕组的整形占据大量空间；其次，长跨距绕组的端部漏抗相比于短跨距绕组要大得多，在电流出现冲击的条件下，长跨距绕组端部所受到的电磁力相比于短跨距绕组明显得多，由此增加发电机的运行风险点。因此，不等跨距绕组在理论层面具有可行性，但在大尺寸发电机的实际应用中仍存在风险。

4. 空槽绕组

空槽绕组与传统叠绕组具有类似的特征，但是二者仍有明显差别。空槽绕组的分瓣数具有严格的

限制，以下讨论具体分瓣原则。

发电机总槽数 $Q=2mpq$ ，发电机绕组跨距 $\tau=\frac{Q}{2p}=mq$ 。出于对发电机电气分块的考虑，发电机每个模块产生 τ 个空槽，那么发电机有效槽数减少为

$$Q'=Q-K\tau=Q-Kmq$$

将有效槽数平均分摊给 K 个模块，则每个模块的有效槽数为 $Q''=\frac{Q'}{K}=\frac{Q}{K}-mq$ ，其中 Q'' 必须为一整数，且 K 必为 Q 的约数。进一步分析 q 是否必须为整数，考察发电机实际的相数通常为3相或6相（ $m=3$ 或 $m=6$ ），若 Q'' 为整数， q 须为整数或以3、6为分母的分数，那么由发电机理论每极每相槽数 $q=b+\frac{c}{d}$ ，且 $d\neq 3n(n\in N^+)$ ，由此可以判断 q 必须为整数。

再考察每个模块中转子有效极数，在每个模块中每极每相槽数必须保持不变，现分析两种情况。

1) 情况1。转子 p 对极均匀分布在 K 个模块中，每个模块对应有有效极对数为 $p'=\frac{p}{K}$ 。

每个模块的有效槽数与有效极对数的关系必须满足 $Q''=2mp'q$ ，将以上各式代入，可得

$$\frac{Q}{K}-mq=2mq\frac{p}{K}\Rightarrow\frac{Q}{K}-mq=\frac{Q}{K}\quad(4)$$

若该等式成立，则 $mq=0$ ，显然不合理，故情况1是不存在的。

2) 情况2。转子 p 损失 $\frac{K}{2}$ 对极后，再均匀分布至 K 个模块中，则每个模块对应有有效极对数为 $p'=\left(p-\frac{K}{2}\right)/K$ ，若需要该分式为整数， K 必须为 $\left(p-\frac{K}{2}\right)$ 的约数且 K 必须为偶数。则每个模块的有效槽数与有效极对数的关系必须满足 $Q''=2mp'q$ ，将以上各式代入，可得

$$\frac{Q}{K}-mq=2mq\left(\frac{p}{K}-\frac{1}{2}\right)\Rightarrow\frac{Q}{K}-mq=\frac{Q}{K}-mq\quad(5)$$

此时式(5)恒等，说明情况2合理。

由以上理论分析可以得到如下两点结论。

结论1：空槽绕组分瓣数的选取与极槽数的选取直接相关。

结论2：空槽绕组在分瓣后，槽数与极数均有一定程度的损失，因此分瓣数不宜过多。

方案设计与分析

1. 发电机基本参数

基于一台4.5 MW永磁直驱风力发电机，结合以上分析的分瓣原则展开设计，发电机主要输入参数见表2。针对不同绕组结构计算方案的主要参数见表3。考虑到不等跨距绕组在大尺寸发电机中可行性不强，因此在方案计算中仅针对空槽绕组、单层链式绕组及齿绕式绕组展开分析。

表2 永磁直驱风力发电机主要输入参数

参数名称	参数值
额定功率/kW	4 500
额定电压/V	≤ 950
额定转速/(r/min)	9.5
功率因数	≥ 0.75
效率/(%)	≥ 90

表3 4.5 MW永磁风力发电机方案主要参数

参数名称	参数值		
绕组形式	空槽绕组	链式绕组	齿绕式绕组
极槽配合	108p648s	108p324s	120p144s
模块数	4	18	6
相数	2×3	3	2×3
移相角度/(°)	30	/	30
定子外径	7 300		
定子内径	6 860		
气隙长度	7.5		
铁心长度/mm	880	870	850
绕组跨距	5	3	1
线规尺寸	13.65×4.25	15.4×2.42	15×3.52
并联路数	每块1支路	18	3
永磁体宽/mm	165	180	166
永磁体厚/mm	19	25	22
计算功率/kW	4 504	4 556	4 505
计算端电压/V	950	950	949
计算电流/A	1 825	3 650	1 825
功率因数	0.75	0.76	0.75
计算效率/(%)	91	91	92

2. 不同绕组分块方案仿真分析

(1) 空槽绕组

设计方案中空槽绕组采用108极648槽配合，根据上文针对绕组分块原则的分析，可行的分瓣数只能有4瓣和12瓣。因此在方案设计中将定子均分为4瓣；另外每个模块采用绕组双Y移相30°设计，根据发电机设计理论，双Y移相30°绕组相比于三相绕组可有效削弱磁动势谐波，对于抑制转子涡流损

耗具有积极意义；另一方面采用双Y移相设计，实质上是将 60° 相带缩小为 30° ，相带减小可有效提升绕组分布系数，从而提高绕组利用率。空载反电动势分析如图3~图5所示。负载径向气隙磁密分析如图6~图8所示。永磁体涡流损耗分布如图9~10所示。

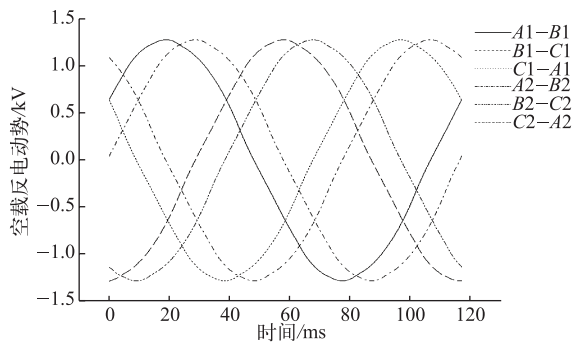


图3 双Y移相 30° 空载反电动势波形

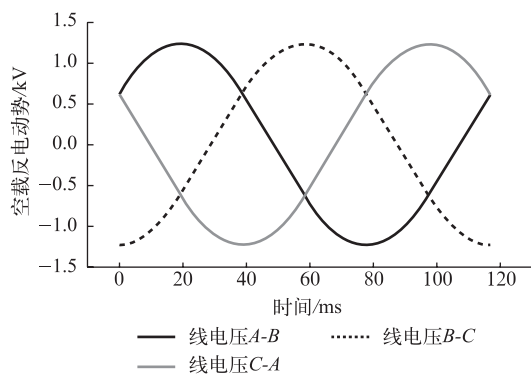


图4 三相绕组空载反电动势波形

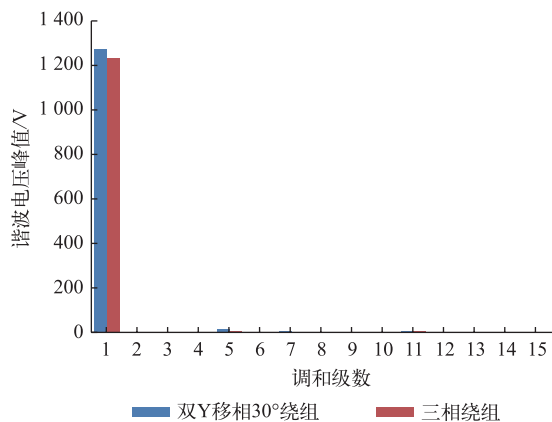


图5 不同绕组形式空载反电动势傅里叶分解

通过计算分析，双Y移相 30° 绕组相比于三相绕组，空载反电动势基波幅值更高，但是5、7及11次谐波电压幅值也有所升高。说明双Y移相绕组在提

高基波绕组因数的同时，也会相应地提高谐波绕组因数。

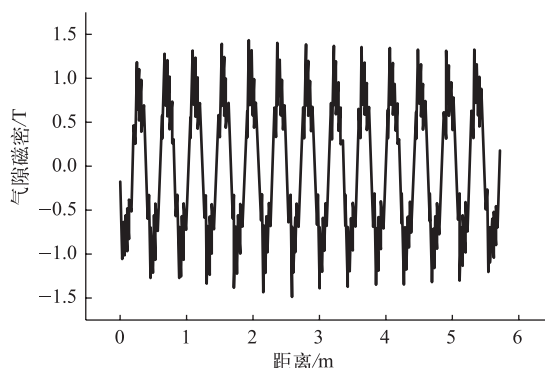


图6 双Y移相 30° 绕组负载径向气隙磁密

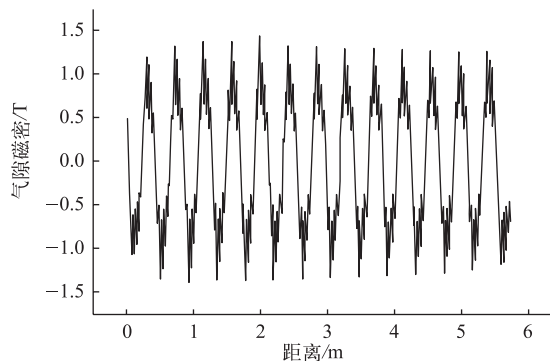


图7 三相绕组负载径向气隙磁密

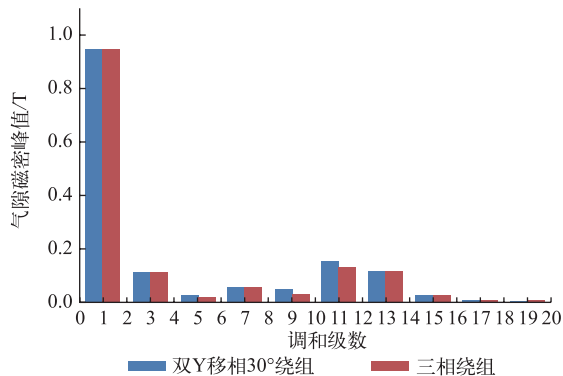


图8 不同绕组形式负载径向气隙磁密傅里叶分解

首先分析负载径向气隙磁密波形，虽然每个模块下径向气隙磁密有27次波动（即27个极），但是在空间上每个模块仅有26个磁极构成了空间整周期，相当于每个模块损失掉了1极，这与前文的理论分析一致。

另外每极每相槽数选取为整数，那么负载径向气隙磁密谐波成分以奇次谐波为主，偶次谐波与分数次谐波含量很低；当采用双Y移相绕组后，高频

次的径向气隙磁密谐波相比于三相绕组得到一定程度抑制，对于控制永磁体涡流损耗具有积极意义。

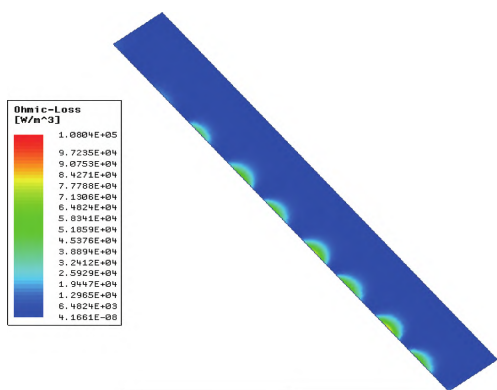


图9 三相绕组永磁体涡流损耗分布云图

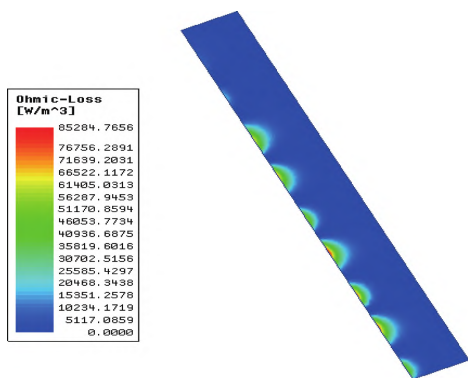


图10 双Y移相30°绕组永磁体涡流损耗分布云图

采用双Y移相30°绕组之后，集中在永磁体表面的涡流损耗密度呈现出一定程度的下降，永磁体整体涡流损耗具有一定程度的降低，这与双Y移相绕组对于空间磁动势谐波的抑制能力具有很大关系。

(2) 单层链式绕组

单层链式绕组不能进行移相或短距分布处理，为了获得较好的电气特性，对转子磁极进行修形与斜极处理。

由仿真分析可以看出，通过转子磁钢修形与转子斜极相配合的方式，可有效对空载反电动势波形进行优化。通过仿真分析，空载反电动势波形正弦度良好，谐波成分中5、7及13次谐波略高，总波形畸变率0.62%。

负载径向气隙磁密中以3、5及7次谐波为主导，各次谐波占基波百分比均不超过20%。

永磁体涡流可通过轴向分段方式加以控制，依据有限元中2D涡流向3D涡流折算公式

$$\text{solidloss}_{3D} = \frac{6\pi^2 y^2}{70(x^2 n^2 + y^2)} \text{solidloss}_{2D} \quad (6)$$

式中， x 为磁钢宽度； y 为永磁体计算长度； n 为磁钢分段数。由2D有限元计算永磁体涡流损耗为16.97 kW，永磁体轴向按20段分布，则折算后的永磁体涡流损耗为1.1 kW，说明轴向分段对于削弱永磁体涡流损耗具有明显效果。

(3) 齿绕式绕组

为了抑制分数槽绕组的空间磁动势谐波，方案设计中沿用了绕组双Y移相30°形式；为了抑制反电动势谐波，对转子磁极进行了修形处理。

单齿模块绕组采用双Y移相30°方式之后，可以得到与空槽绕组采用相同移相方式后一致的结论。

综合分析不同绕组形式下径向气隙磁密谐波成分与永磁体涡流损耗分布。采用齿绕式绕组与整数槽绕组不同，气隙磁密中除含有整数次谐波之外，还含有丰富的分数次谐波，谐波成分的复杂化与多样化是造成永磁体涡流损耗偏大的原因之一；另外采用双Y移相30°绕组对于高次径向气隙磁密谐波的抑制具有积极作用，这也是采用双Y移相绕组后，永磁体涡流损耗密度出现降低的主要原因。

同样，为了抑制永磁体涡流损耗，仍然可采用永磁体轴向分段的方式，鉴于有限元计算中永磁体涡流损耗占总损耗的比例极大，因此在方案设计中尝试采用轴向25段，每段永磁体长度为34 mm，代入式(6)进行计算，涡流损耗可由266 kW削弱至9.1 kW。

结束语

本文针对全分瓣永磁直驱风力发电机空槽绕组、单层链式绕组、齿绕式绕组及不等跨距绕组四种绕组分瓣形式展开了分析。总结如下：

1) 通过对分块原则的阐述以及设计方案的计算，印证了绕组分块方法的合理性与可行性。

2) 为了改善全分瓣永磁直驱风力发电机电气性能，可采用多相绕组、短距分布绕组及转子斜极或定子斜槽、转子永磁体修形等方法，来达到抑制空间磁动势谐波与时域电动势谐波的目的。

3) 针对永磁直驱风力发电机低速多极特性，文中已给出了不同绕组形式推荐的每极每相绕组数选取，可以为后续类似发电机的设计提供参考。EA

(收稿日期：2022-08-12)