

[风电]

一种半直驱永磁风力发电机的设计研究

文/谭 勇
哈尔滨电机厂有限责任公司

提出了一种发电机转子极靴优化与分数槽绕组结合的设计方法。对一台5.43 MW的半直驱永磁风力发电机进行了设计，并将其有限元仿真分析结果与试验测试结果进行了对比。结果表明，该设计方式可有效改善气隙磁密波形，降低定子绕组空载反电动势谐波畸变率，并可显著抑制发电机的齿槽转矩，保证发电机性能。

半直驱系统既降低了双馈风力发电系统齿轮箱的高损耗，又降低了直驱风力发电系统带来的塔架结构设计难度和安装制造成本。随着风力发电的长期发展，大功率器件的成本显著降低，拥有全功率变流器和直驱低速同步发电机的发电系统渐渐开始加入风电行业，并大面积占有市场，介于双馈风力发电系统和直驱风力发电系统之间的半直驱永磁风力发电系统在风力发电市场中广受欢迎。根据兆瓦级半直驱永磁风力发电系统的运行特点，半直驱永磁风力发电机具有较高的功率因数，较高的效率，较宽的转速变化范围，同时满足较低的起动转速、运行稳定、高可靠性和良好的散热性等要求。

由于起步较晚，半直驱风力发电机的设计研究相对较少。特别是在目前的发电机设计过程中，因气隙磁密谐波含量过大，导致的发电机空载反电动势谐波含量过高和齿槽转矩过大突出。谐波含量过大使发电机的谐波损耗增大，导致发电机振动和噪声。而齿槽转矩是在发电机设计过程中必须考虑的因素，齿槽转矩引起电机速度的波动、振动和噪声，可能使风轮在转动过程中与轴承及发电机本体部分发生共振，影响风力发电

系统的控制精度和运行。不利于发电机的推广运行，必须对发电机的谐波和齿槽转矩加以抑制。

本文对一台5.43 MW的半直驱永磁风力发电机进行设计，在设计过程中采取转子磁极的极靴优化与定子分数槽绕组设计相结合，选择合理的极槽配合方式，实现了发电机电磁设计的优化，降低了发电机的电压谐波畸变率和齿槽转矩。对其进行有限元分析，通过试验测试数据对比，验证了该设计方法的可靠性。

新型优化磁极的型式

本文采用的磁极是一种新型内置型磁极，在每个磁极上将永磁体分为两段，磁极经叠压，模块化装配，通过鸽尾固定于转轴上，如图1所示。转子凸极表面为偏心圆弧设计，不均匀气隙改善气隙磁场的分布，降低发电机电压谐波畸变率和谐波损耗，并抑制发电机的齿槽转矩。采用该磁极设计方法一定程度上降低了永磁体的加工成本和发电机的生产制造成本。该设计方法主要优点：
①磁极采用模块化设计，直接套入轴上，非常便于批量生产和装配；
②永磁体嵌入磁极，不存在固定难的问题。

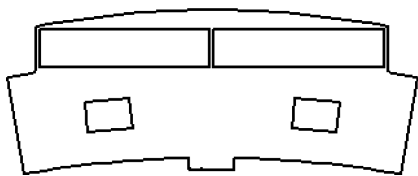


图1 新型磁极模型图

分析表明,合理选择极弧系数可以大幅降低半直驱永磁风力发电机的电压谐波畸变率,并大幅削弱其齿槽转矩。极弧系数 α_p 是极靴宽度 b_p 与极距 τ 之比,极弧系数选择合适,使主极磁场的波形更加接近于正弦波,减小磁场中高次空间谐波和齿谐波分量的幅值,达到改善电动势波形的目的。确定极弧系数 α_p 后,发电机的极靴宽为

$$b_p = \alpha_p \tau \quad (1)$$

规定极靴边缘处的最大气隙长度为 $\delta_{\max}$,极靴中心处的最小气隙长度为 $\delta_{\min}$,为使主极磁场更接近正弦分布,在进行极靴设计时, $\frac{\delta_{\max}}{\delta_{\min}}$ 一般选为1.5,并使 $\frac{\delta_{\min}}{\tau}$ 有合理的数值范围0.02~0.045,极靴半径为

$$R_p = \frac{D_i}{2 + \frac{8D_i(\delta_{\max} - \delta_{\min})}{b_p^2}} \quad (2)$$

另一方面,因为永磁发电机气隙磁密波只有 $nZ/2P$ 次傅里叶分解系数对齿槽转矩有影响,沿圆周区间 $[-\pi/2P, \pi/2P]$ 分布永磁体剩磁密经傅里叶分解的对齿槽转矩有影响的谐波为

$$Br_{nZ/2P} = \frac{2}{(nZ/2P)} B_r^2 \sin\left(\frac{nZ}{2P} \alpha_p \pi\right) \quad (3)$$

式中, Z 为定子槽数; $2P$ 为极对数; n 为使 $nZ/2P$ 为整数的整数。

若发电机的极数和槽数确定,选择合适的极弧系数,使很小的 $Br_{nZ/2P}$ 对齿槽转矩起作用,就可以大幅削弱永磁发电机的齿槽转矩。

根据设计经验,对永磁同步发电机磁极结构而言,只有选择合适的气隙偏心距,选取合适的极弧系数,才可以大幅降低发电机的电压谐波畸变率,削弱发电机的齿槽转矩,需要在设计过程中对发电机的极弧进行优化。一般情况下,在实际设计中极弧系数不能选择较小或太大,发电机结构各方面需要兼顾统筹,不能单因为削弱齿槽转矩而选择不适合发电机实际结构的极弧系数。无论是减小发电机谐波,还是削弱发电机的齿槽转矩,都是一个相对统筹的概念,因此单优化极弧系数,调整极靴表面

形状,一般很难达到目的。理论表明,采用特殊的极靴设计,利用不等极弧系数可进一步削弱齿槽转矩,但工艺复杂,因此在实际生产制造中,转子极靴表面的形状很难做到正弦形,削弱永磁同步发电机的齿槽转矩还需配合其他措施。

分数槽绕组设计

斜槽和斜极的方法虽然抑制永磁同步发电机齿槽转矩效果非常明显,但对于半直驱永磁风力发电机而言,使用斜槽和斜极,工艺上极其不便,增加了整个发电机的制造成本。本文采取合理的磁极优化加分数槽绕组方式,通过选择合适的极槽配合,进一步削弱发电机的齿槽转矩。

在永磁电机中,发电机槽数 Z 和极数 $2P$ 对发电机的齿槽转矩有相当大的影响。根据齿槽转矩的产生原理可知,在定转子相对位置变化一个定子齿距的范围内,齿槽转矩呈周期性变化,其周期数 N_p 取决于极槽配合,周期数 N_p 越大,齿槽转矩的幅值越小,即

$$N_p = \frac{2P}{\text{GCD}(Z, 2P)} \quad (4)$$

式中, $\text{GCD}(Z, 2P)$ 为定子槽数 Z 和极数 $2P$ 的最大公约数。

而在半直驱永磁风力发电机的绕组设计中采用分数槽绕组,有效解决发电机极数较多与槽数有限无法同时成立的矛盾,选择合理的极槽配合,使定子槽数 Z 和极数 $2P$ 的最大公约数 $\text{GCD}(Z, 2P)$ 取最佳值。一方面可以减小绕组中的谐波,尤其是齿谐波,改善发电机电压波形,降低电压谐波畸变率,降低发电机的谐波损耗;另一方面通过选取合理的极槽配合削弱齿槽转矩,这是选择分数槽绕组的优势所在。

分数槽绕组的每极每相槽数 q 的定义为

$$q = \frac{Z}{2Pm} = b + \frac{c}{d} \quad (5)$$

式中, m 为相数; b 为整数部分; c/d 为分数部分,是不可约的分数。

次数与主波成 $(2mqk \pm 1)$ 倍的谐波为齿谐波,其绕组系数总是等于主波的绕组系数,谐波的幅值较大。尤其是一阶齿谐波,即与主波次数成 $(2mq \pm 1)$ 倍的谐波,幅值最大。对整数槽, $2mq$ 必然为偶数,则齿谐波 $(2mq \pm 1)$ 必然为奇数,每

阶齿谐波都与转子谐波相遇。而对于分数槽绕组，只有在 k 为 d 的倍数时， $2mq$ 为偶数， $(2mqk \pm 1)$ 倍为奇数，减少了定子齿谐波与转子同次谐波相遇的机会。 q 的分母 d 越大，则齿谐波出现奇数的机会越少，对改善电动势波形有利。

对半直驱永磁风力发电机，采用分数槽绕组设计主要有以下优点。

1) 分数槽绕组可使发电机的定子槽数取得相对较少，减小了发电机槽绝缘的用量和空间。

2) 分数槽绕组使发电机内部的元件数相对减少，简化了发电机嵌线、接线，降低了发电机的成本。

3) 转速较低，极数较多，采用分数槽绕组的设计正好可以解决槽数有限而不易凑成整数槽的矛盾。

4) 分数槽绕组减小发电机的齿槽效应和发电机的高次谐波，尤其是齿谐波。对同步发电机来说，在定子绕组设计中应注意控制与主波次数成奇数倍数的谐波。选择合适的极槽数，有利改善发电机的电动势波形。分数槽绕组后发电机的定子不必采用斜槽设计，简化了发电机的工艺。

5) 分数槽绕组可通过合理的极槽数配合选择较大的定子槽数 Z 和极数 $2P$ 的最大公约数，明显抑制齿槽转矩。

6) 选择合适的分数槽绕组和极槽配合，可以选择出更加合理的极弧系数，从极弧系数优化的角度看，抑制了发电机的齿槽转矩，即从两种组合的角度抑制齿槽转矩。采用分数槽绕组的优势十分明显。

发电机有限元仿真分析

综合考虑上述因素，5.43 MW半直驱永磁风力发电机选取定子槽数为 $Z=132$ ，极对数为 $2P=20$ 。

5.43 MW半直驱永磁风力发电机基本设计参数为：额定功率为5.43 MW，额定电压为1 380 V，额定转速为650 r/min，额定转矩为79 780 N·m，额定功率因数为0.92，转速范围为360~650 r/min，效率为97.5%，环境温度为-20~50℃，工作制为S1。

采用场路耦合时变电磁场有限元方法，仿真得到发电机的气隙磁密波形曲线如图2所示，空载反电动势波形如图3所示。对空载线电压进行傅里

叶分解，得到各次波形频谱如图4所示，经谐波计算，发电机的空载线电压谐波畸变率为0.52%，从曲线可以看出，采用该方法设计的发电机电压谐波含量是很低的，有效地降低了发电机电压谐波畸变率。

发电机的齿槽转矩曲线如图5所示，发电机的额定转矩为79 780 N·m，齿槽转矩幅值仅为23.5 N·m，占额定转矩的0.03%，该设计满足了发电机齿槽转矩小于额定转矩占比2%的要求。

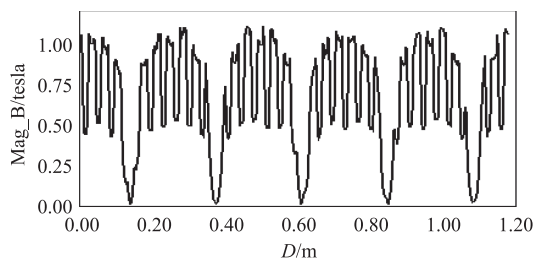


图2 发电机气隙磁密波形曲线

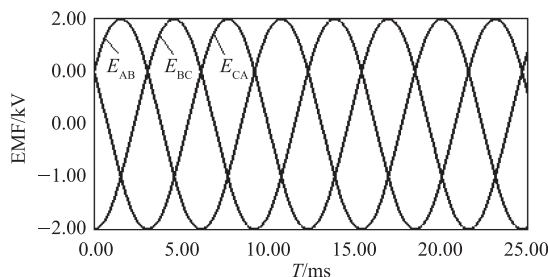


图3 发电机空载反电动势波形曲线

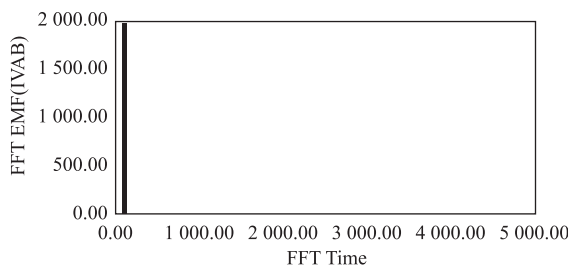


图4 空载反电动势傅里叶频谱

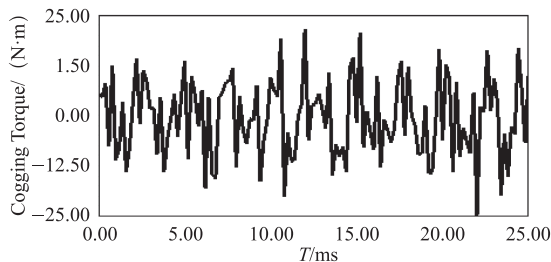


图5 发电机齿槽转矩波形曲线

对发电机在额定工况的负载特性进行有限元仿真，得到发电机定子电压波形曲线如图6所示，定子电流波形曲线如图7所示。

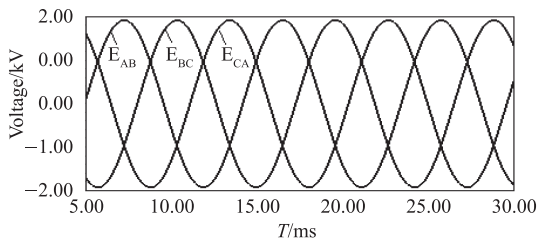


图6 额定负载时定子电压波形曲线

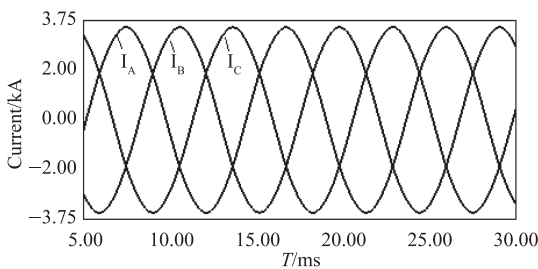


图7 额定负载时定子电流波形曲线

试验结果对比

设计表明，采用磁极优化加分数槽绕组设计，选择合适的极槽配合的设计方法，各方面设计的考量并不是孤立单一的。在半直驱永磁风力发电机电磁方案设计时，需要在电机的极靴设计和分数槽绕组的槽数、极数选择上相互配合统筹。不能一味地以最优的极弧系数、最优化的极靴为先，或以最佳的极槽配合为目的，同时还需综合发电机的各方设计指标，才能更大限度地抑制发电机谐波，削弱发电机的齿槽转矩，设计出最佳的电磁方案，达到改善发电机运行性能的目的。

将发电机的设计数据和试验数据进行对比，见表1。

表1 额定工况下设计值和实测值对比

	功率/kW	电压/V	电流/A	转速/(r/min)
设计值	5 430	1 380	2 445.7	650
试验值	5 437.1	1 381.4	2 459.3	650
	反电动势/V	电压畸变率/(%)	齿槽转矩/(N·m)	功率因数
设计值	1 405.9	0.52	23.5	0.929
试验值	1 412.6	0.59	29.2	0.924

通过设计值和试验实测值对比分析，可以得

出，采用新型磁极和分数槽相结合，选择合适的极槽配合的方法可以有效改善发电机空载电压波形，降低发电机电压谐波畸变率，并抑制其齿槽转矩，保证发电机性能，得到合理的负载输出。同时也说明了该设计方法的可靠性和合理性。

结束语

本文以5.43 MW半直驱永磁风力发电机的电磁设计作为优化对象，重点研究和探讨了转子极靴设计优化和分数槽绕组相结合的设计方式在半直驱永磁风力发电机的电磁设计的应用。对其进行有限元仿真计算，将计算结果和试验测试结果对比分析。结果表明，合理的极靴设计加上分数槽绕组相结合，选择合适的发电机的极槽配合，可有效减小半直驱永磁风力发电机的电压谐波畸变和齿槽转矩的脉动，为半直驱永磁风力发电机的开发设计积累了宝贵的经验。EA

(收稿日期：2023-04-23)

参考文献

[1] 祝令帅. 1.5 MW永磁半直驱风力发电机电磁场与温度场计算与分析[D]. 哈尔滨：哈尔滨理工大学，2010.

[2] 袁世鹏. 兆瓦级永磁半直驱风力发电机电磁与传热的数值计算[D]. 哈尔滨理工大学，2011.

[3] 何思源. 2.64 MW级半直驱永磁同步风力发电机的设计与分析[D]. 长沙：湖南大学，2016.

[4] 王秀和. 永磁电机[M]. 第2版. 北京：中国电力出版社，2011.

[5] 何庆领，王群京. 永磁同步发电机齿槽转矩削弱方法研究[J]. 电子测量与仪器学报，2013，27(5)：461-466.

[7] 付学敏. 分数槽永磁电机空间谐波定量分析及转矩波动抑制研究 [D]. 合肥：安徽大学，2013.

[8] 邓秋玲，黄守道，彭磊. 直驱低速2 MW永磁同步风力发电机设计和有限元分析 [J]. 微电机，2009，42(7)：9-12.

[9] 杨世强，何信林，王团结，等. 大型发电机转子绕组匝间短路故障诊断研究与应用[J]. 电气应用，2021，40(9)：30-34，40.