

[发电机]

大型永磁直驱风力发电机齿槽转矩抑制措施研究

文/中国中车永济电机有限公司 米秀峰 罗慧强

大型永磁直驱风力发电机作为永磁电机的一种，理论上可以有多种方法如合理选择电机极槽数、改变磁极参数及改变电枢参数等对其齿槽转矩进行抑制，但考虑到该类电机体积庞大、不易加工，对机械强度及动力学特性要求高等特点，许多抑制措施并不适用于工程实践。因此，针对该类电机特点，提出极槽配合、永磁体削角及永磁体分段斜极等三种工程上易于实现的齿槽转矩抑制方法，并对抑制效果进行对比分析，找出使齿槽转矩得到有效抑制的决定性因素及次要因素。

大型永磁直驱风力发电机一般采用外转子表面式结构，因此，就其本质而言，属于表面式永磁电机的一种，理论上可以有多种优化齿槽转矩的方法。对于大型永磁直驱风力发电机来说，像开辅助槽、不等槽口宽、斜极及组合极弧系数等工程上工艺难度太大；而关于极弧系数的选取，大型永磁风力发电机采用表面式结构，为了减轻重量需要选取较高的磁负荷，同时为了固定永磁体，两个极之间还需要留有足够的间隙，因此极弧系数一般可调范围较小；因此，对于大型永磁直驱风力发电机，以上方法工程上难以实现。另外，一般主要针对某个单一方法对齿槽转矩的影响，并没有综合对比分析各个措施当中影响齿槽转矩的主要因素及次要因素。因此，本文针对极槽配合、永磁体削角、永磁体轴向分段斜极等三种方法对齿槽转矩的影响做详细分析，并对对比分析各种方法对齿槽转矩的影响程度，找出对齿槽转矩起决定性作用的影响因素。

齿槽转矩机理分析

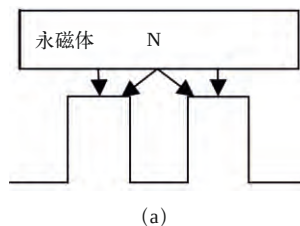
当永磁电动机在定子开路状态下，转子与定子发生相对运动时，由于定子齿槽的影响，当永

磁体与定子齿槽的相对位置不同时，会导致磁路磁导发生大的变化，进而引起磁场储能的变化，或者说引起磁场径向分量与切向分量的较大变化，从而产生齿槽转矩。根据麦克斯韦应力张量法，齿槽转矩可以认为是在电动机不供电的理想情况下，定转子相对运动时，磁场径向分量与切向分量相互作用会产生力矩，忽略气隙空气对磁导率的影响，力的密度近似表示如下

$$f_t = \frac{1}{\mu_0} B_n B_t \quad (1)$$

式中， μ_0 为真空磁导率， B_n 为气隙磁密的径向分量， B_t 为气隙磁密的切向分量。

直驱风力发电机基于结构工艺的考虑，一般采用表面式结构，定子采用矩形槽结构。为了仔细研究其齿槽转矩的产生机理，假设磁钢与齿槽的相对位置如图1a、b、c所示，箭头方向代表磁力线的近似方向。



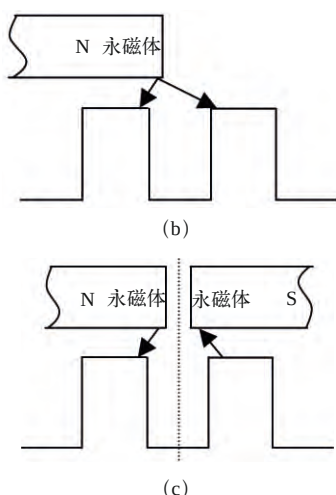


图1 磁极与齿槽相对位置示意图

图1a中,当齿槽全部覆盖在一个永磁体磁极下时,磁力线沿左右两侧的切向分量大致相等,方向相反,对应齿槽基本不产生齿槽转矩;图1b中,当齿槽的相对位置运动到一个永磁体磁极的边界时,磁力线到达左右齿部的距离不同,进而导致磁密不同、切向分量也不一定相同,有可能产生齿槽转矩;图1c中,当某个定子槽相对位置运动到两个磁极下时,由于磁力线方向的不同,则使得两个极发出的磁力线切向分量方向相同,对电动机的齿槽转矩产生较大影响。

1. 削角的影响

从前文分析可知,磁极两侧边缘位置对电动机齿槽转矩的影响较大。因此,通过永磁体削角可以改善电动机的齿槽转矩。当切削角度在一定范围内时,齿槽转矩可能随着切削角度的增加而变小,但继续增加切削角度时,被磁极包裹不产生齿槽转矩的齿槽数减少,可能使得齿槽转矩反而变大,需要通过有限元的定量分析选取合适的切削量。

2. 分段斜极的影响

当永磁体采用轴向分段斜极时,对某个齿槽而言,对应发生斜极偏移的不同永磁体块,所产生的齿槽力将会发生轴向上的相位偏移,总体叠加后的效果将会使得齿槽转矩幅值得到削弱。

3. 极槽配合的影响

定转子相对位置变化一个齿距的范围内,齿槽转矩是周期性变化的。周期数 N_p 可表示如下

$$N_p = \frac{2p}{\text{GCD}(z, 2p)} \quad (2)$$

式中, p 表示槽数GCD与极数 z 的最大公约数。周期数越多,齿槽转矩幅值越小。

齿槽转矩抑制措施分析

1. 永磁体削角对齿槽转矩的影响

以一台96极288槽的直驱风力发电机为例,电动机有限元模型如图2所示。

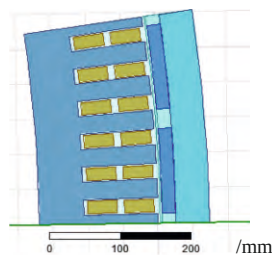


图2 电动机有限元模型

为了避免永磁体过薄导致局部失磁的可能性,充磁方向切削量约为1/3处,取5 mm;然后控制切削角度分别为70 °、75 °、80 °如图3所示,对比不同削角尺寸下的齿槽转矩。

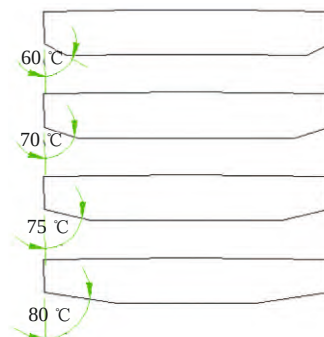
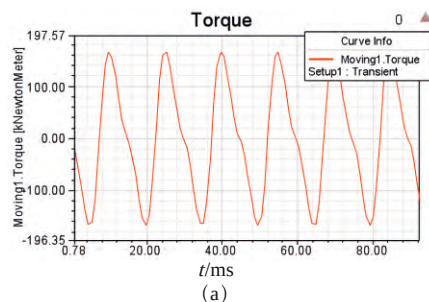
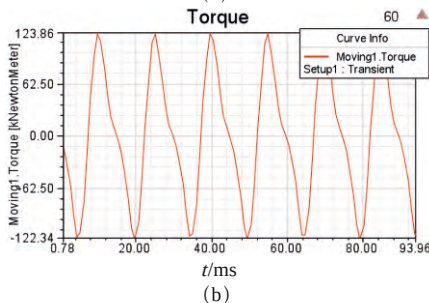


图3 永磁体削角方案示意图

图4a~e为永磁体不同切削角度下对应的齿槽转矩波形;表1为不同切削角度对应的齿槽转矩百分比;图5为齿槽转矩随永磁体切削角度的变化规律。



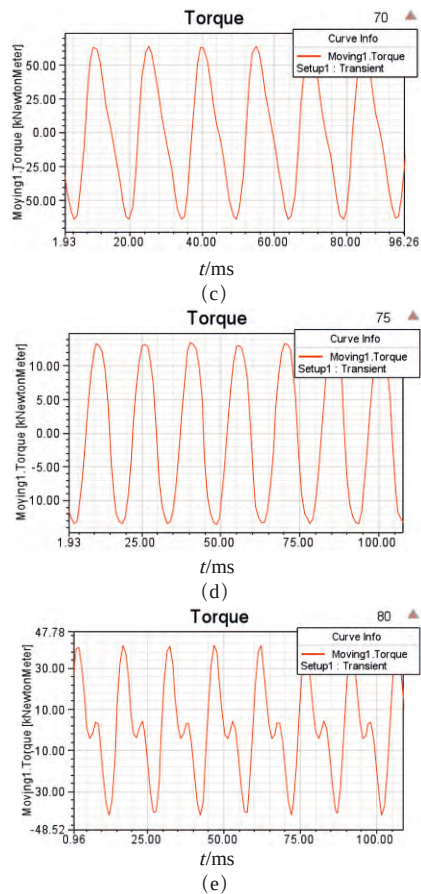


图4 不同削角角度对应的齿槽转矩

表1 不同切削角度齿槽转矩对比

切削角度	0°	60°	70°	75°	80°
Max/kN·m	166.2	123	63.8	13.4	41.4
Min/kN·m	-166.3	-122.9	-63.7	-13.5	-41.3
齿槽转矩百分比 (%)	20.8	15.4	8.0	1.69	5.2

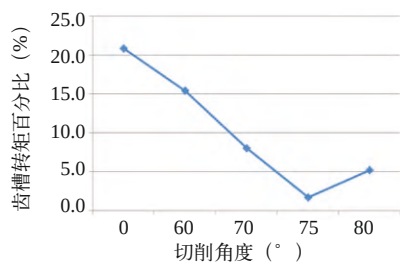


图5 齿槽转矩随永磁体切削角度的变化

从表1和图5可以看出,合理的永磁体切削角度可以有效削弱电动机的齿槽转矩,但是齿槽转矩随永磁体切削角度的变化呈先减小后增大的趋势。因此,在实际应用过程中,需要通过详细的有限元分析,找出抑制齿槽转矩的最优切削点。

2. 分段斜极对齿槽转矩的影响研究

依然以该96极288槽的直驱风力发电机为例,研究永磁体轴向分段对齿槽转矩的影响。总体控制每个极斜一个槽距,采用有限元法计算永磁体

不同分段数下的齿槽转矩。表2为永磁体不同分段数对应的齿槽转矩值。

表2 永磁体不同分段数对应的齿槽转矩值

分段数	6	8	10	12	14
Max/kN·m	122.7	96.8	75.7	52.2	28.3
Min/kN·m	-122.7	-97.5	-75.8	-52.7	-28.2
百分比 (%)	15.4	12.2	9.5	6.6	3.5

从表2可以看出,采用分段斜极措施可以有效削弱永磁电动机的齿槽转矩值,齿槽转矩随永磁体分段数的增加而减小。

3. 极槽配合对齿槽转矩的影响

对比研究96极288槽,88极288槽方案下的齿槽转矩分布。所选取的两个方案的每极每相槽数分别为 $q=1$ 和 $q=12/11$,是典型的整数槽方案和分数槽方案。计算得到88极288槽方案对应的齿槽转矩波形如图6所示;96极288槽方案及其优化方案与88极288槽方案齿槽转矩对比如表3所示。

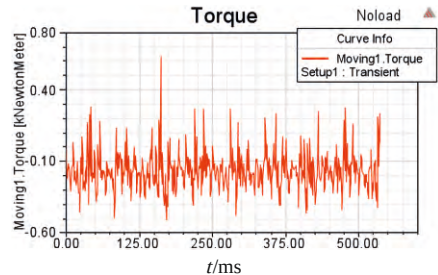


图6 88极288槽方案对应的齿槽转矩波形

表3 不同极槽配合方案齿槽转矩对比

	96/288	96/288 (75° 削角&斜极)	88/288
Max/kN·m	166.2	4.9	0.63
Min/kN·m	-166.3	-5.6	-0.51
百分比 (%)	20.8	0.66	0.075

从表3可以看出,96极288槽的整数槽方案,再采取永磁体削角以及分段斜极的优化措施之后,齿槽转矩削弱到0.66%;而采用88极288槽的分数槽方案后,无需对其他磁路参数进行优化,齿槽转矩即为0.075%,说明极槽配合对电动机的齿槽转矩起决定性作用。

结束语

(1) 齿槽转矩随永磁体削角角度的变化呈先减小后增大的趋势,选择合理的削角角度,方可有效削弱电动机的齿槽转矩。

(2) 采用分段斜极可有效削弱电动机的齿槽转矩,齿槽转矩随永磁体分段数的增加而减小。

(3) 极槽配合对大型永磁直驱风力发电机的齿槽转矩起决定性作用。EA

(收稿日期:2016.06.18)

(编辑:白文亭)