

## 收稿日期: 2006-06-20

宽度  $b$  因此对于简化后的电机模型在分析其齿槽转矩时,通过利用优化极弧系数  $\gamma$  定子爪极偏移(槽口宽度)等方法来削弱齿槽转矩  $b$

根据齿槽转矩的定义,可得:

$$T_{\text{cog}} = \frac{1}{2} \frac{dW}{d\theta} \quad (1)$$

式中:  $\theta$  为某一指定的齿的中心线和某一指定的永磁磁极中心线之间的夹角  $b$

文献 [6] 中已得出普遍情形下齿槽转矩的表达式:

$$T_{\text{cog}}(\theta) = \frac{1}{2} \frac{dW}{d\theta} = \frac{1}{2} \frac{d}{d\theta} \left( \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left( \frac{B_r}{\mu_0} \right)^2 \left( \frac{2\pi}{p} \right)^2 \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^{2n} \left( \frac{r_2}{r_1} \right)^{2n} \cos(n\theta) \right) \quad (2)$$

式中:  $n$  为使  $\frac{2\pi}{p}$  为整数的整数  $b$

根据上述情况下的齿槽转矩的傅里叶表达式,对于单相电机齿槽转矩进行离散傅里叶变换后的齿槽转矩可以统一表达:

$$T_{\text{cog}}(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left( \frac{B_r}{\mu_0} \right)^2 \left( \frac{2\pi}{p} \right)^2 \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^{2n} \left( \frac{r_2}{r_1} \right)^{2n} \cos(n\theta) \quad (3)$$

式中:  $\theta$  为转子的电角度;  $\frac{1}{n}$  为离散傅里叶的变换系数  $b$

由于三相聚磁式永磁爪极电机的三相之间互差  $120^\circ$  电角度,故三相齿槽转矩的基波也互差  $120^\circ$  电角度  $b$  三相齿槽转矩之和:

$$T_{\text{cog}}(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left( \frac{B_r}{\mu_0} \right)^2 \left( \frac{2\pi}{p} \right)^2 \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^{2n} \left( \frac{r_2}{r_1} \right)^{2n} \cos(n\theta) \quad (4)$$

由上式可以看出,三相电机的齿槽转矩合成后只剩下  $6$  次及  $6$  的倍数次谐波,且幅值为原来的  $6$  倍  $b$  其他次谐波均互相抵消,因此,三相电机的齿槽转矩比单相明显减小  $b$

## 3 聚磁式永磁爪极电机齿槽转矩实例分析

本文所研究的电机主要参数如表 1 所示  $b$

表 1 永磁外转子爪极发电机主要结构参数

参数/单位	值	参数/单位	值
定子外径 $C_{\text{da}}$	140 mm	磁极内径 $C_{\text{pa}}$	40 mm
定子内径 $C_{\text{di}}$	100 mm	极数	12
转子外径 $C_{\text{ra}}$	100 mm	气隙长度 $C_{\text{ga}}$	1 mm
转子内径 $C_{\text{ri}}$	40 mm	永磁体材料	NdFeB
磁极外径 $C_{\text{pa}}$	40 mm	齿宽 $C_{\text{da}}$	10 mm
单相长度 $C_{\text{sa}}$	20 mm	频率 $C_{\text{fn}}$	50 Hz
额定功率 $C_{\text{pi}}$	100 W		

## 3.1 不同极弧系数时电机的齿槽转矩

利用有限元软件中的参数化分析功能,以极弧系数  $\gamma_p$  为参数,变化范围为  $0.6 \sim 0.9$ ,步长  $0.05$ ,

通过仿真得到齿槽转矩的曲线,仿真后发现单相齿槽转矩曲线幅值均在  $10 \sim 20$  N·m 左右,因此具体曲线不再画出  $b$  图 1 是三相合成齿槽转矩曲线,其中横坐标  $\theta$  分别对应于  $0^\circ, 120^\circ, 240^\circ$

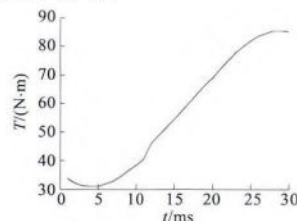


图 1 不同极弧系数时齿槽转矩变化曲线

观察图 1 的曲线可以发现,不同极弧系数时,电机的齿槽转矩出现明显差异,当  $\gamma_p = 0.6$  时,三相合成齿槽转矩最小,为  $10 \sim 20$  N·m;当  $\gamma_p = 0.9$  时,齿槽转矩达到最大,为  $80 \sim 90$  N·m  $b$   $\gamma_p$  为  $0.6$  和  $0.9$  时的齿槽转矩曲线分别如图 2 所示  $b$

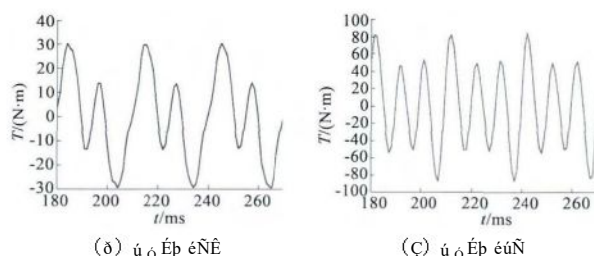


图 2 不同极弧系数时电机的齿槽转矩

由此可见,优化极弧系数可以削弱齿槽转矩,但仍然较大,需要采用其他方法进一步削弱齿槽转矩  $b$   $\gamma_p$  爪极偏移时电机的齿槽转矩

由以上分析可知,当  $\gamma_p = 0.6$  时,电机的合成齿槽转矩最小  $b$  现保持  $\gamma_p = 0.6$  不变,使电机的爪极偏移,具体偏移方法:  $12$  个爪极平均分为  $4$  组,每三个为一组,相邻两爪之间的槽口宽度为  $10$  mm,每组之间的距离可以通过计算得出  $b$

经过有限元分析,得到电机的齿槽转矩曲线如图 3 所示  $b$

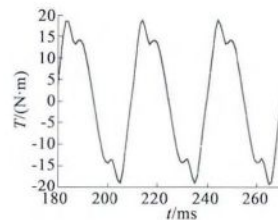


图 3  $\gamma_p = 0.6$ , 槽口宽  $10$  mm 时电机的齿槽转矩

从图 3 中可以看出,齿槽转矩最大值为  $10 \sim 20$  N·m,比爪极不偏移时电机的齿槽转矩明显减小  $b$  经过参数化分析发现,在上述条件下,当  $\gamma_p = 0.6$  时,齿槽转矩最小,为  $10 \sim 20$  N·m  $b$

## 3.2 $\gamma_p = 0.6$ 时,爪极偏移的优化分析

改变槽口宽度,分别使槽口宽度为  $10$  mm, (下转第 10 页)