永磁同步电机振动噪音分析

郭小强

2020.07.23

1　磁场分析

永磁同步电机中，由定、转子磁场相互作用产生的径向电磁力是振动噪音的主要来源。故首先对定、转子磁场相互作用后的气隙磁密进行分析，进而基于气隙磁密计算径向电磁力。

1.1　定子基波电流激励下的磁场分析

永磁同步电机的气隙磁密可近似表示为：

$$b(\theta,t)=f(\theta,t)\lambda(\theta,t) \tag{1}$$

式中：$f(\theta,t)$ 为气隙磁动势，$\lambda(\theta,t)$ 为气隙比磁导。

1.1.1　磁动势

(1) 定子基波磁动势

$$f_0(\theta,t)=F_0\cos\left(p\theta-\omega_0 t-\varphi_0\right) \tag{2}$$

(2) 定子谐波磁动势

$$\sum f_v(\theta,t)=\sum_v F_v\cos\left(v\theta-\omega_0 t-\varphi_1\right) \tag{3}$$

(3) 转子永磁体磁动势

$$\sum f_\mu(\theta,t)=\sum_\mu F_\mu\cos\left(\mu\theta-\mu\omega_0 t/p-\varphi_2\right) \tag{4}$$

所以当正弦波供电时，即电流中仅存在基波，无谐波电流时，永磁同步电机磁动势为：

$$\begin{aligned} f(\theta,t)=&f_0(\theta,t)+\sum_v f_v(\theta,t)+\sum_\mu f_\mu(\theta,t)\\ =&F_0\cos\left(p\theta-\omega_0 t-\varphi_0\right)+\sum_v F_v\cos\left(v\theta-\omega_0 t-\varphi_1\right)+\sum_\mu F_\mu\cos\left(\mu\theta-\mu\omega_0 t/p-\varphi_2\right) \end{aligned} \tag{5}$$

1.1.2 气隙磁导

当考虑齿槽效应时，气隙比磁导可近似表示为：

$$\lambda(\theta,t)=\Lambda_0+\sum\lambda_{l1} \tag{6}$$

式中，Λ_0 为单位面积气隙磁导的不变部分。

$$\Lambda_0=\frac{\mu_0}{k_\delta\delta} \tag{7}$$

λ_{l1} 为定子开槽引起的谐波比磁导的周期分量。

$$\lambda_{11}=\Lambda_{11}\cos\left(l_1Z_1\theta\right) \tag{8}$$

$$\Lambda_{11}=\frac{\mu_0\left(k_\delta-1\right)}{k_\delta\delta}\left|\frac{\sin\left(l_1\frac{k_\delta-1}{k_\delta}\pi\right)}{l_1\frac{k_s-1}{k_\delta}\pi}\right| \tag{9}$$

式中 k_δ 为气隙因数，δ 为气隙长度，Z_1 为定子槽数，$l_1=1,2,3\cdots$。

1.1.3 气隙磁密

将式 (2) ~ (6) 带入式 (1) ，可得仅在基波电流作用下的气隙磁场表达式为：

$$\begin{aligned}b(\theta,t)=&f(\theta,t)\lambda(\theta,t)=\left[f_0(\theta,t)+\sum f_v(\theta,t)+\sum f_\mu(\theta,t)\right]\cdot\left[\Lambda_0+\sum\lambda_1\right]\\
\approx&F_0\Lambda_0\cos\left(p\theta-\omega_0t-\varphi_0\right)+\sum F_v\Lambda_0\cos\left(v\theta-\omega_0t-\varphi_1\right)\\
&+\sum F_\mu\Lambda_0\cos\left(\mu\theta-\mu\omega_0t/p-\varphi_2\right)\\
&+\sum\frac{F_0\Lambda_{11}}{2}\cos\left(\pm l_1Z_1+p\right)\theta-\omega_0t-\varphi_3\Big]\\
&+\sum\sum\frac{F_\mu\Lambda_{11}}{2}\cos\left[\left(\pm l_1Z_1+\mu\right)\theta-\mu\omega t/p-\varphi_4\right]\\
=&B_0\cos\left(p\theta-\omega_0t-\varphi_0\right)+\sum B_v\cos\left(\nu\theta-\omega_0t-\varphi_1\right)\\
&+\sum B_\mu\cos\left(\mu\theta-\mu\omega t/p-\varphi_2\right)\\
&+\sum B_{0\lambda_1}\cos\left[\left(\pm l_1Z_1+p\right)\theta-\omega_0t-\varphi_3\right]\\
&+\sum\sum B_{\mu\lambda_1}\cos\left[\left(\pm l_1Z_1+\mu\right)\theta-\mu\omega_0t/p-\varphi_4\right]\end{aligned} \tag{10}$$

式中，

B_0 为定子基波磁动势作用于气隙磁导不变部分的磁密；

B_v 为定子谐波磁动势作用于气隙磁导不变部分的磁密；

B_μ 为转子永磁体磁动势作用于气隙磁导不变部分的磁密；

$B_{0\Lambda_1}$ 为定子基波磁动势作用于谐波比磁导的磁密；

$B_{\mu\Lambda_1}$ 为转子永磁体磁动势作用于谐波比磁导的磁密；

公式 (10) 仅为近似表达式，仅考虑了气隙磁导不变部分与定子基波磁动势、定子谐波磁动势、转子永磁体磁动势的作用效果，以及谐波比磁导与定子基波磁动势、转子永磁体磁动势的作用效果。

1.2　定子基波电流激励下的定子谐波磁场分析

1.2.1　整数槽永磁电机气隙磁场的谐波极对数

$$v = (2mk_1 + 1)\,p \tag{11}$$

1.2.2　分数槽永磁电机气隙磁场的谐波极对数

每极每相槽数为：

$$q = \frac{Z_1}{2mp} = b + \frac{c}{d} = \frac{bd + c}{d} \tag{12}$$

单元电机数为：

$$t = \begin{cases} 2p/d, & d\text{为偶数} \\ p/d, & d\text{为奇数} \end{cases} \tag{13}$$

1) 三相分数槽

谐波磁场阶数为：

$$v = \begin{cases} (3k_1 + 1)\,t, & d\text{为偶数} \\ (6k_1 + 1)\,t, & d\text{为奇数} \end{cases} \tag{14}$$

式中 $k_1 = 0, \pm1, \pm2, \pm3\cdots$。

2) 六相 (双 Y 移 30°) 分数槽

谐波磁场阶数为：

$$v = \begin{cases} (3k_1 + 1)\,t, & d\text{为偶数} \\ (6k_1 + 1)\,t, & d\text{为奇数} \end{cases} \tag{15}$$

式中 $k_1 = 0, \pm1, \pm2, \pm3\cdots$，且 $v \neq (12k_1 - 5)\,p_1 t$，$p_1$ 为单元电机极对数。

1.2.3　案例分析

以一台 24 槽 22 极六相双 Y 移 30° 的分数槽绕组为例，其每极每相槽数 $q = \frac{2}{11}$，其分母为奇数。利用公式 (15)，可计算出定子谐波次数，如表 1 所示。

表 1: 六相 24 槽 22 极永磁电机谐波次数和绕组因数

谐波次数	1	-5	7	-11	13
谐波绕组因数	0.2161	0.1576	0.2053	0.9577	0.9577

定子谐波磁动势的幅值可以表示为：

$$F_v = \frac{m\sqrt{2}}{\pi v} I_{N1} N K_{dpv} \tag{16}$$

定子磁场谐波幅值可以表示为：

$$B_v = F_v \frac{\mu_0}{K_\delta K_s \delta} \tag{17}$$

下面分析永磁体产生的谐波磁场，永磁体产生的气隙磁密表达式为：

$$b_m(\theta, t) = \sum f_\mu(\theta, t) \lambda(\theta) \tag{18}$$

由式 (18) 可看出，永磁体产生的气隙磁密为转子磁动势与气隙比磁导的乘积。永磁体谐波磁动势为：

$$f_\mu(\theta,t)=\frac{B_\mu\delta k_s k_\delta}{\mu_0}\cos\left(\mu\omega_0 t/p-\mu\theta\right) \tag{19}$$

其中，μ 为永磁体的谐波极对数，B_μ 为永磁体谐波气隙磁密的幅值，其表达式分别为：

$$\mu=\left(2k_2+1\right)p \tag{20}$$

$$B_\mu=k_{\mu\delta}k_\mu k_c B_\delta \tag{21}$$

式中，B_δ 为气隙磁密的幅值，$k_{\mu\delta}$ 为开槽因数，k_μ 为空间谐波因数，k_c 为斜极因数，其表达式分别为：

$$k_{\mu\delta}=1-\sum\frac{\Lambda_{l1}}{\Lambda_0}\frac{\mu^2}{\mu^2-\left(\frac{l_1Z_1}{p}\right)^2} \tag{22}$$

$$k_\mu=\frac{4}{\mu\pi}\sin\frac{\mu\alpha_i\pi}{2} \tag{23}$$

$$k_c=\frac{\sin\left(\mu\frac{\alpha_{skev}}{2}\right)}{\mu\frac{\alpha_{skev}}{2}} \tag{24}$$

式中，α_i 为极弧因数，α_{skew} 为斜极角度。

将式 (19) $\sim$ (24) 代入式 18，可得永磁体产生的气隙磁密表达式为：

$$b_m(\theta,t)=\sum_\mu B_\mu\Lambda_0\cos\left(\mu\omega_0 t/p-\mu\theta\right)+\sum_\mu\sum_{l_1}(-1)^{j_1+1}\frac{B_\mu\Lambda_{l1}}{2}\cos\left[\mu\omega_0 t/p-\left(\mu\pm l_1Z_1\right)\theta\right] \tag{25}$$