

实心圆柱式永磁同步电机转子偏心气隙磁场的空间和频率特性^{*}

张岩岩^{1,2}, 周 健^{1,2}, 耿海鹏^{1,2}, 虞 烈^{1,2}

(1. 西安交通大学 机械工程学院, 陕西 西安 710049;

2. 西安交通大学 机械结构强度与振动国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘 要: 针对两极平行充磁实心圆柱式永磁同步电机(SCPMSM), 分析转子偏心对气隙磁场空间和频率特性的影响。通过引入转子静态偏心和动态偏心磁导修正系数, 建立了转子偏心气隙磁场的数学模型, 分析了空载和负载情形下转子静态偏心以及动态偏心气隙磁场的空间和频率特性。以1台2极12槽SCPMSM为例, 对转子偏心气隙磁场特性进行了有限元分析, 验证了理论分析的正确性。

关键词: 实心圆柱式永磁同步电机; 两极平行充磁; 转子偏心; 气隙磁场; 空间特性; 频率特性

中图分类号: TM 341; TM 351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)12-0060-06

Spatial and Frequency Characteristics of Air-Gap Magnetic Field in Solid Cylindrical Permanent Magnet Synchronous Motor with Rotor Eccentricity^{*}

ZHANG Yanyan^{1,2}, ZHOU Jian^{1,2}, GENG Haipeng^{1,2}, YU Lie^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The two-pole parallelly magnetized solid cylindrical permanent magnet synchronous motor (SCPMSM) was taken as the study object and the effects of rotor eccentricity on spatial and frequency characteristics of air-gap magnetic field were analyzed. Introducing the air-gap permeance correction factors of rotor static and dynamic eccentricities, the mathematical models of the air-gap magnetic fields in the SCPMSM with rotor eccentricity were developed. The spatial and frequency characteristics of air-gap magnetic fields under both static and dynamic rotor eccentricity modes in no-load and load cases were analyzed. Taking a 2-pole 12-slot parallelly magnetised SCPMSM as example, the characteristics of rotor eccentric air-gap magnetic fields were analyzed by the finite element method, which verified the correctness of the theoretical analysis.

Key words: solid cylindrical permanent magnet synchronous motor (SCPMSM); two-pole parallel magnetisation; rotor eccentricity; air-gap magnetic field; spatial characteristic; frequency characteristic

0 引 言

永磁电机是电机领域的研究热点,在节能减排大背景下,其具有效率高、性能好、轻型化等优点。在电机制造、装配以及运行的过程中,转子偏心造成圆周气隙分布不均匀,引起不平衡磁拉力,

导致电机的振动、噪声、转矩脉动等问题,影响电机的稳定运行,严重时可能导致电机失效。因此,对永磁电机转子偏心磁场进行准确计算和分析具有重要的意义。转子偏心磁场的计算方法主要有正则摄动法^[1-2]、保角变换法^[3]、子区域法^[4]、磁导函数调制^[3,5-6]、磁导修正法^[7-10]、等效剩磁

^{*} 基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2017ZDXM-GY-054, 2017ZDXM-GY-013); 上海汽车工业科技发展基金项目(1709)

作者简介: 张岩岩(1986—),男,博士研究生,研究方向为高速永磁同步电机的设计和分析。

法^[11]、有限元法^[12]等。针对永磁电机转子偏心后气隙磁场特性的变化,已经有一些文献进行了分析^[8-9],指出气隙偏心影响磁场谐波的幅值、频率、空间阶次等。

高速/超高速永磁电机的设计与普通电机相比有很大的不同,常规的叠片转子难以承受高速旋转产生的离心力,因此需要采用实心转子,即采用实心圆柱式或内装心轴的圆环形的整块永磁体。两极平行充磁实心圆柱式永磁同步电机(Solid Cylindrical Permanent Magnet Synchronous Motor, SCPMSM)有很多优点,应用前景广阔,例如可以提供较高的磁势,使得气隙较大,有利于通风散热,又如永磁体磁场是标准的正弦波形,大大减少了气隙磁场的谐波含量等。SCPMSM 结构形式的独特性使得其气隙磁场成分与常见结构类型永磁同步电机不同,因此其转子偏心后,气隙磁场的空间和频率特性也有其自身特点。针对两极平行充磁 SCPMSM 转子偏心磁场特性的分析鲜有报道。本文以平行充磁的两极 SCPMSM 为研究对象,利用磁导修正法分析转子静态和动态两种类型的偏心对空载和负载气隙磁场空间以及频率特性的影响,并通过有限元分析方法对理论分析结果进行验证。

1 转子偏心气隙磁场的数学模型

1.1 转子无偏心时的气隙磁场

两极平行充磁 SCPMSM 如图 1 所示。



图 1 两极平行充磁 SCPMSM

该结构类型电机的永磁体外面一般增加保护套。保护套选用不导磁合金,相对磁导率与空气近似,故可将其作为空气处理。转子同步旋转时,永磁体产生的径向旋转磁场 B_{pdr} 可表示为

$$B_{\text{pdr}} = B_{\text{pdrm}} \cos(\omega_0 t - \theta) \quad (1)$$

式中: B_{pdrm} ——永磁体产生的径向气隙磁场幅值;

ω_0 ——电流基频, $\omega_0 = 2\pi f$, f 为电源频率;

θ ——空间角。

当定子三相对称绕组中通以三相对称电流时,三相绕组在气隙中产生的 v 次合成磁场的径向分量 B_{adr} 为

$$B_{\text{adr}} = \sum_v B_{\text{adrvm}} \sin(\omega_0 t + C_v v \theta) \quad (2)$$

式中: B_{adr} ——径向电枢反应气隙磁场的 v 次谐波幅值;

v ——谐波次数。

$$C_v = \begin{cases} -1, & v = 1, 7, 13, \dots \\ 1, & v = 5, 11, 17, \dots \end{cases} \quad (3)$$

电机负载条件下的气隙磁场应是永磁体磁场和定子电枢反应磁场的线性叠加,因此负载径向气隙磁密 B_{dr} 为:

$$B_{\text{dr}} = B_{\text{pdr}} + B_{\text{adr}} \quad (4)$$

1.2 转子偏心气隙磁场

1.2.1 磁导修正系数

在永磁同步电机中,不论是静态偏心还是动态偏心,主要影响气隙磁导的变化。

静态偏心情形下的气隙长度为

$$\delta_e = \delta - \varepsilon \cos(\theta - \gamma) \quad (5)$$

式中: δ ——理想情况下的有效气隙长度;

ε ——转子偏心距离;

γ ——转子偏心角度。

转子偏心时的气隙磁导分布函数为

$$\lambda_e = \frac{\mu_0}{\delta_e} = \frac{\mu_0}{\delta} \frac{1}{1 - \frac{\varepsilon}{\delta} \cos(\theta - \gamma)} = \frac{\mu_0}{\delta} \frac{1}{1 - e \cos(\theta - \gamma)} \quad (6)$$

式中: μ_0 ——真空磁导率;

e ——偏心率, $e = \frac{\varepsilon}{\delta}$ 。

可以看出,式(6)表示转子偏心前后磁导之间的关系。定义静态偏心和动态偏心时磁导修正系数分别为

$$E_{\text{ds}} = \frac{1}{1 - e \cos(\theta - \gamma)} \quad (7)$$

$$E_{\text{dd}} = \frac{1}{1 - e \cos(\theta - \gamma - \omega_0 t)} \quad (8)$$

将磁导修正系数进行傅里叶级数展开,可

得^[8,13]:

$$E_{\delta s} = E_{\delta s0} + \sum_{k=1}^{\infty} E_{\delta sk} \cos[k(\theta - \gamma)] \quad (9)$$

$$E_{\delta d} = E_{\delta d0} + \sum_{k=0}^{\infty} E_{\delta dk} \cos[k(\theta - \gamma - \omega_0 t)] \quad (10)$$

其中,

$$E_{\delta sn} = E_{\delta dn} = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{1-e^2}}, & n=0 \\ \frac{2}{\sqrt{1-e^2}} \left(\frac{1-\sqrt{1-e^2}}{e} \right)^n, & n=1,2,3,\dots \end{cases} \quad (11)$$

则计算转子偏心径向气隙磁密时,只需将无偏心径向气隙磁密与磁导修正系数相乘即可,即:

$$B_{\delta rs} = B_{\delta r} E_{\delta s} \quad (12)$$

$$B_{\delta rd} = B_{\delta r} E_{\delta d} \quad (13)$$

式中: $B_{\delta rs}$ 、 $B_{\delta rd}$ ——转子静态偏心和动态偏心径向气隙磁密。

1.2.2 转子偏心气隙磁场的解析表达式

根据式(12),可得转子静态偏心情形下永磁体径向气隙磁场的表达式为

$$B_{p\delta rs} = A + B + C \quad (14)$$

$$A = B_{p\delta rm} E_{\delta s0} \cos(\omega_0 t - \theta) \quad (15)$$

$$B = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{B_{p\delta rm} E_{\delta sk}}{2} \cos[\omega_0 t - (1+k)\theta + k\gamma] \quad (16)$$

$$C = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{B_{p\delta rm} E_{\delta sk}}{2} \cos[\omega_0 t - (1-k)\theta - k\gamma] \quad (17)$$

根据式(12),可得转子静态偏心情形下负载径向气隙磁场的表达式为

$$B_{\delta rs} = B_{p\delta rs} + A + B + C + D + E + F \quad (18)$$

$$A = \sum_{v_1} B_{a\delta rv_1m} E_{\delta s0} \sin(\omega_0 t - v_1\theta + \phi), \quad v_1 = 1, 7, 13, \dots \quad (19)$$

$$B = \sum_{v_2} B_{a\delta rv_2m} E_{\delta s0} \sin(\omega_0 t + v_2\theta + \phi), \quad v_2 = 5, 11, 17, \dots \quad (20)$$

$$C = \sum_{v_1} \sum_k \frac{B_{a\delta rv_1m} E_{\delta sk}}{2} \cdot \sin[\omega_0 t - (v_1 + k)\theta + \phi + k\gamma], k = 1, 2, 3, \dots \quad (21)$$

$$D = \sum_{v_1} \sum_k \frac{B_{a\delta rv_1m} E_{\delta sk}}{2} \cdot \sin[\omega_0 t - (v_1 - k)\theta + \phi - k\gamma] \quad (22)$$

$$E = \sum_{v_2} \sum_k \frac{B_{a\delta rv_2m} E_{\delta sk}}{2} \cdot \sin[\omega_0 t + (v_2 + k)\theta + \phi - k\gamma] \quad (23)$$

$$F = \sum_{v_2} \sum_k \frac{B_{a\delta rv_2m} E_{\delta sk}}{2} \cdot \sin[\omega_0 t + (v_2 - k)\theta + \phi + k\gamma] \quad (24)$$

式中: ϕ ——电枢反应磁场与永磁体磁场的夹角。

根据式(13),可得转子动态偏心情形下永磁体径向气隙磁场的表达式为

$$B_{p\delta rd} = A + B + C \quad (25)$$

$$A = B_{p\delta rm} E_{\delta d0} \cos(\omega_0 t - \theta) \quad (26)$$

$$B = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{B_{p\delta rm} E_{\delta dk}}{2} \cos[(1+k)\omega_0 t - (1+k)\theta + k\gamma] \quad (27)$$

$$C = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{B_{p\delta rm} E_{\delta dk}}{2} \cos[(1-k)\omega_0 t - (1-k)\theta - k\gamma] \quad (28)$$

根据式(13),可得转子动态偏心情形下负载径向气隙磁场的表达式为

$$B_{\delta rd} = B_{p\delta rd} + A + B + C + D + E + F \quad (29)$$

$$A = \sum_{v_1} B_{a\delta rv_1m} E_{\delta d0} \sin(\omega_0 t - v_1\theta + \phi) \quad (30)$$

$$B = \sum_{v_2} B_{a\delta rv_2m} E_{\delta d0} \sin(\omega_0 t + v_2\theta + \phi) \quad (31)$$

$$C = \sum_{v_1} \sum_k \frac{B_{a\delta rv_1m} E_{\delta dk}}{2} \sin[(1+k)\omega_0 t - (v_1 + k)\theta + \phi + k\gamma] \quad (32)$$

$$D = \sum_{v_1} \sum_k \frac{B_{a\delta rv_1m} E_{\delta dk}}{2} \sin[(1-k)\omega_0 t - (v_1 - k)\theta + \phi - k\gamma] \quad (33)$$

$$E = \sum_{v_2} \sum_k \frac{B_{a\delta rv_2m} E_{\delta dk}}{2} \sin[(1-k)\omega_0 t + (v_2 + k)\theta + \phi - k\gamma] \quad (34)$$

$$F = \sum_{v_2} \sum_k \frac{B_{a\delta rv_2m} E_{\delta dk}}{2} \sin[(1+k)\omega_0 t + (v_2 - k)\theta + \phi + k\gamma] \quad (35)$$

2 解析分析

2.1 静态偏心

由转子静态偏心气隙磁场的解析表达式可知,由于与 $E_{\delta sk}(k=1,2,3,\cdots)$ 相比较, $E_{\delta s0}$ 的值较大,空载静态偏心气隙磁密仍然以永磁体产生的1阶空间谐波为主,负载静态偏心气隙磁密仍然以永磁体产生的1阶以及电枢反应磁场产生的 $v_1(v_1=1,7,13,\cdots)$ 和 $v_2(v_2=5,11,17,\cdots)$ 阶空间谐波为主,但是在这些阶次的基础上会增加 $\pm k$ 阶谐波成分。另外,静态偏心磁导修正系数与空间角 θ 有关,与时间 t 无关,新产生的气隙磁密的频率仍然为 f ,因此一倍电源频率的时间谐波成分的幅值相比转子无偏心情形下会有所增加。

2.2 动态偏心

由转子动态偏心气隙磁场的解析表达式可知,与转子静态偏心情形类似,空载动态偏心气隙磁密以永磁体产生的1阶空间谐波为主,负载动态偏心气隙磁密以永磁体产生的1阶以及电枢反应磁场产生的 $v_1(v_1=1,7,13,\cdots)$ 和 $v_2(v_2=5,11,17,\cdots)$ 阶空间谐波为主,并且在原有的 i 阶空间谐波两侧会产生 $i\pm k$ 阶成分。与静态偏心情形不同的是,当原 i 阶气隙磁密正向旋转时,新增的谐波成分的频率为 $(1\pm k)f$,当原 i 阶气隙磁密反向旋转时,新增的谐波成分的频率为 $(1\mp k)f$ 。这是由于动态偏心磁导修正系数与空间角 θ 和时间 t 均有关。同样由于 $E_{\delta s0}$ 的值较大,转子动态偏心情形下,在气隙磁场所有的时间谐波分量中,仍然以一倍电源频率成分为主。

3 有限元仿真验证

以1台两极平行充磁 SCPMSM 为例,分析转子偏心气隙磁场的空间和频率特性。样机的相关参数如表1所示。在电磁场分析软件 Ansoft Maxwell 中分别建立转子无偏心、静态偏心和动态偏心电机的有限元模型。静态偏心情形下,偏心距 $\varepsilon=0.9\text{ mm}$ (偏心率 $e\approx 23.08\%$),偏心角度 $\gamma=30^\circ$;动态偏心情形下,偏心距 $\varepsilon=0.9\text{ mm}$,初始偏心角度 $\gamma_0=30^\circ$ 。进行电机运行在额定转速下二维电磁场的有限元仿真计算。

3.1 空间特性

在 $t=0.175\text{ ms}$ 时,电机空载径向气隙磁密

表1 样机相关参数

参数名称	参数值
额定功率 P_N/kW	20
额定转速 $n_N/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	100 000
极数 $2p$	2
槽数 Q_s	12
定子内半径 R_s/mm	17.4
永磁体外半径 R_p/mm	13.5
永磁体剩余磁通密度 B_r/T	1.07
永磁体相对磁导率 μ_r	1.038 4

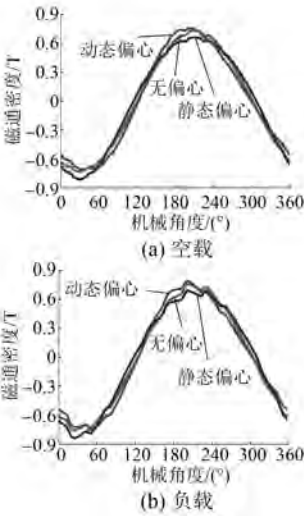


图2 径向气隙磁密空间分布波形

沿气隙中心 $[r=(R_p+R_s)/2]$ 的空间分布如图2(a)所示。转子旋转了 105.397 ° 机械角度(对于静态偏心,转子旋转 105° 机械角度时,永磁体磁极的中心线位于偏心方向上;对于动态偏心,最小气隙的位置也旋转了 105.397 ° 机械角度)。在 $t=0.174\text{ ms}$ 时,电机负载径向气隙磁密沿气隙中心的分布如图2(b)所示。转子旋转了 104.790 ° 机械角度。从图2可以看出,转子无偏心、静态偏心和动态偏心3种情形下气隙磁密的相位相同,并且转子偏心后,磁场在整个圆周范围内发生畸变,气隙减小处磁密增强,气隙增大处磁密减弱。

将图2中的径向磁密进行快速傅里叶变换,可得气隙磁场空间谐波的阶次数和幅值如图3和图4所示。可以看出:转子无偏心、静态偏心和动态偏心3种情形下,空载气隙磁场主要空间谐波

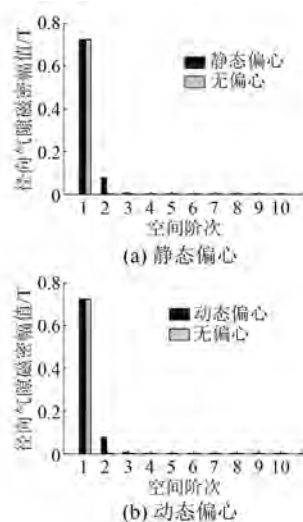


图3 空载条件下转子偏心径向气隙磁密的空间谐波

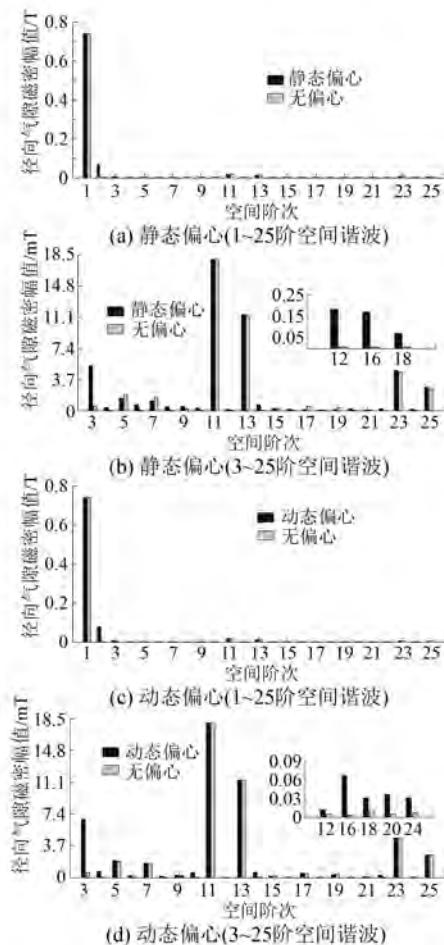


图4 负载条件下转子偏心径向气隙磁密的空间谐波

的阶次数都为1阶;对于负载气隙磁场,主要空间谐波的阶次数都为1、5、7、11、13、17、19、23、25阶

等,与理论分析结果一致。转子偏心时,空载条件下新增的主要谐波成分的阶次数为 ± 2 、 ± 3 等,负载条件下在主要谐波分量左右两侧出现了新的空间阶次,与理论分析结果相一致。

3.2 频率特性

气隙磁场是时间和空间函数,取极坐标系中气隙中心处一点($15.45, \pi/6$)为特征点,一个周期内该点径向气隙磁密随时间的变化曲线如图5所示。可以看出,转子无偏心时,径向气隙磁密的时间分布接近正弦曲线。另外,与空间分布类似,转子无偏心、静态偏心和动态偏心3种情形下,气隙磁密时间相位相同,转子偏向侧的磁场强度增强,而转子偏离侧的磁场减弱。

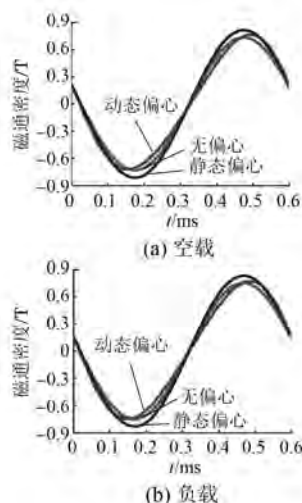


图5 特征点径向气隙磁密随时间变化曲线

对特征点随时间变化的径向磁密进行快速傅里叶变换,可得气隙磁密的幅频图如图6、图7所示。可以看出,静态偏心对气隙磁场的频率分布没有影响,频率仍然以一倍电源频率为主,幅值相比转子无偏心情形下有明显的增加。动态偏心时,不管是空载还是负载条件下,气隙磁密时间谐波的频率除了一倍电源频率外,增加了二倍电源频率和三倍电源频率等成分,但仍然以一倍电源频率为主。仿真结果与理论分析结果一致。

对于磁导修正系数的傅里叶级数,高阶项系数比较小,对气隙磁场影响不大,实心转子永磁同步电机的气隙较大,再加上永磁体外面一般增加保护套,通常情况下偏心率相对较小,磁导修正系数的傅里叶级数的系数也相对较小。结合前文有

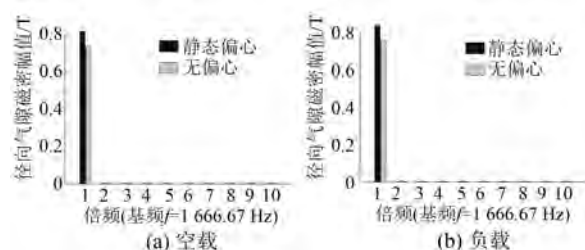


图6 静态偏心情形下特征点径向气隙磁密幅度频谱

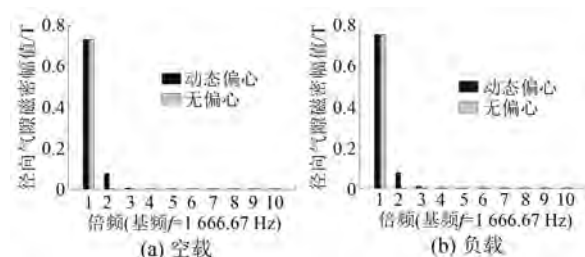


图7 动态偏心情形下特征点径向气隙磁密幅度频谱

限元仿真结果可知,分析转子偏心气隙磁场时,只需要考虑磁导修正系数的傅里叶级数的前3项($n=0,1,2$)即可。

根据转子偏心磁场的解析表达式还可以看出,与转子无偏心情形相比,转子偏心后气隙磁场之间相互作用,容易产生额外的低阶电磁力波,并且动态偏心时,力波频率成分还会增多,这些都会增大电机的电磁振动和噪声。另外,转子偏心后,气隙磁场谐波成分增加,电机产生的损耗也会随之增加,电机的效率和性能都将受到影响。

4 结 语

分析了两极平行充磁 SCPMSM 转子偏心气隙磁场的空间和频率特性,主要结论如下。

(1) 在转子静态偏心和动态偏心两种情形下,空载气隙磁密仍然以永磁体产生的1阶空间谐波为主,负载气隙磁密仍然以永磁体产生的1阶以及电枢反应磁场产生的 v_1 ($v_1=1,7,13,\dots$)和 v_2 ($v_2=5,11,17,\dots$)阶空间谐波为主。另外,两种偏心情形下,均会在原有的 i 阶空间谐波两侧产生 $i\pm k$ 阶成分。

(2) 转子静态偏心气隙磁密的时间谐波分量仍然以一倍电源频率成分为主,幅值相比转子无偏心情形下会有所增加,动态偏心气隙磁密的时间谐波分量同样仍然以一倍电源频率成分为主。当原 i 阶气隙磁密正向旋转时,在原有基础上产

生的时间谐波的频率为 $(1\pm k)f$,而当原 i 阶气隙磁密反向旋转时,在原有基础上产生的时间谐波的频率为 $(1\mp k)f$ 。

【参考文献】

- [1] KIM U, LIEU D K. Magnetic field calculation in permanent magnet motors with rotor eccentricity: without slotting effect [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1998, 34(4): 2243-2252.
- [2] KIM U, LIEU D K. Magnetic field calculation in permanent magnet motors with rotor eccentricity: with slotting effect considered [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1998, 34(4): 2253-2266.
- [3] LI J T, LIU Z J, NAY L H A. Effect of radial magnetic forces in permanent magnet motors with rotor eccentricity [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(6): 2525-2527.
- [4] FU J J, ZHU C S. Subdomain model for predicting magnetic field in slotted surface mounted permanent-magnet machines with rotor eccentricity [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(5): 1906-1917.
- [5] DORRELL D G, HSIEH M F, GUO Y G. Unbalanced magnet pull in large brushless rare-earth permanent magnet motors with rotor eccentricity [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(10): 4586-4589.
- [6] DORRELL D G, POPESCU M, IONEL D M. Unbalanced magnetic pull due to asymmetry and low-level static rotor eccentricity in fractional-slot brushless permanent-magnet motors with surface-magnet and consequent-pole rotors [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46(7): 2675-2685.
- [7] XIANG C L, LIU F, LIU H, et al. Nonlinear dynamic behaviors of permanent magnet synchronous motors in electric vehicles caused by unbalanced magnetic pull [J]. Journal of Sound and Vibration, 2016, 371: 277-294.
- [8] 左曙光,高丽华,吴旭东,等.电动车用永磁同步电机转子偏心对电磁力影响分析[J].佳木斯大学学报(自然科学版), 2014, 32(2): 166-170.
- [9] 宋志环.永磁同步电动机电磁振动噪声源识别技术的研究[D].沈阳:沈阳工业大学, 2010.
- [10] 岳二团,甘春标,杨世锡.气隙偏心下永磁电机转子系统的振动特性分析[J].振动与冲击, 2014, 33(8): 29-34.

(下转第92页)

种磁极连接线的典型设计结构进行了不同工况下的疲劳寿命分析,并基于疲劳分析结果,提出了适用于高转速发电-电动机磁极连接线的典型结构。另外,针对发电-电动机磁极连接线设计,提出了一些建议。本文研究成果可为抽水蓄能电站发电-电动机极间连接线选型及运行维护提供重要的技术支持。

【参考文献】

- [1] 李勇,王亮,张波,等.航空用盘式绕组旋转式音圈电机的热应力与热变形分析[J].电工技术学报,2015,30(12): 181-185.
- [2] 王小飞,代颖,罗建,等.电动汽车牵引用水冷异步电机耦合场分析[J].电机控制与应用,2018,45(4): 110-116.
- [3] 孙雪,代颖,王小飞,等.高速异步电动机转轴的疲劳特性分析[J].电机控制与应用,2018,45(3): 97-103.
- [4] 张忠明,邓智泉,孙权贵,等.铜屏蔽层对高速永磁

无刷直流电机转子涡流损耗和应力的影响分析[J].中国电机工程学报,2018,38(8): 2476-2485.

- [5] 刘晶石,姜铁良,庞立军,等.水泵水轮机导叶卡门涡数值模拟研究[J].大电机技术,2018,48(1): 71-74.
- [6] 戚彩梦,葛光男,郑吉伟,等.混流式水轮机叶片性能热处理变形的数值模拟预测[J].大电机技术,2018,48(3): 33-36.
- [7] 刘娅娟,张伟,洪玉萍,等.水轮发电机转子磁极悬挂动应力研究[J].大电机技术,2012,42(4): 1-5.
- [8] 李俊卿,王罗,李永刚,等.水轮发电机励磁绕组匝间短路转子热应力计算与分析[J].电机与控制应用,2018,45(8): 116-123.
- [9] 杨斌,柳洪水.电站发电机转子磁极引线损坏的原因分析及处理[J].华中电力,2010,23(4): 53-54.
- [10] 兰波,刘福,王建刚,等.高转速发电电动机极间连接线疲劳寿命分析[J].大电机技术,2015,45(2): 10-13.

收稿日期: 2018-07-08

(上接第 59 页)

- [11] BRETON C, BARTOLOME J, BENITO J A, et al. Influence of machine symmetry on reduction of cogging torque in permanent magnet brushless motors [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2000, 36(5): 3819-3823.
- [12] 李节宝,章跃进.永磁无刷电机转矩脉动分析及削弱方法[J].电机与控制应用,2011,38(4): 6-12.
- [13] 杨玉波,王秀和,张鑫,等.磁极偏移削弱永磁电机齿槽转矩方法[J].电工技术学报,2006,21(10):

22-25.

- [14] UMANS S D. 电机学[M].北京:电子工业出版社,2013.
- [15] 谭建成.永磁无刷直流电机技术[M].北京:机械工业出版社,2011.
- [16] 王秀和.永磁电机[M].北京:中国电力出版社,2017.

收稿日期: 2018-07-06

(上接第 65 页)

- [11] 张冉,王秀和,杨玉波,等.基于等效剩磁法的永磁电动机转子偏心磁场解析计算[J].电工技术学报,2009,24(5): 7-12.
- [12] 赵安东,杨期,钟志贤.永磁无刷直流电机转子偏心的有限元分析[J].装备制造技术,2017(6): 8-10.

- [13] GUO D, CHU F, CHEN D. The unbalanced magnetic pull and its effects on vibration in a three-phase generator with eccentric rotor[J]. Journal of Sound and Vibration, 2002, 254(2): 297-312.

收稿日期: 2018-07-15