

时变载荷作用下永磁直驱发电机外转子铁芯机械响应研究

何玉灵^{1,2} 杨佳文¹ 孙凯¹ 吴学伟¹ 朱晓光¹ 罗浩然¹

(1. 华北电力大学 河北省电力机械设备健康维护与失效预防重点实验室, 保定 071003)

(2. 华北电力大学 苏州研究院, 苏州 215000)

摘要: 针对外转子直驱永磁发电机在时变磁拉力载荷作用下外转子铁芯机械响应进行理论解析、仿真计算和试验验证。首先,解析了外转子发电机转子铁芯磁拉力的来源及其随载荷变化规律,确定了转子磁拉力表达式以及时间阶次和空间阶次特征。同时分析了外转子铁芯基本振动模型,确定了外转子铁芯基本振动方程。然后,建立了外转子直驱发电机的仿真计算模型,得到了单位面积磁拉力的时空阶次特征和典型日下随时间变化规律。将电磁场得到的单位面积磁拉力密度作为输入载荷导入结构场,进行磁-固(结构)耦合仿真,计算分析了外转子铁芯在参考时刻的变形和应力的分布及振动噪声响应的变化规律。最后,用一台13 kW外转子直驱发电机模拟实例印证了解析和仿真的准确性。研究结果确定了外转子铁芯所承受的时变载荷及其作用下的机械响应分布规律,发现了发电机运行时转子铁芯应该重点检测的时刻和部位,同时分析了时变载荷下的噪声特性,为发电机的维护和设计提供了一定的参考依据。

关键词: 外转子直驱永磁同步发电机; 机械响应; 磁拉力; 时变载荷; 电磁噪声

中图分类号: TM31 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2025.04.004

0 引言

近年来,风能作为一种清洁的可再生能源得到广泛应用,风力发电技术也在全球范围内迅猛发展。新一代风力发电技术采用直驱替代传统的增速齿轮箱机构,具有效率高、结构简单、运行可靠等显著优点^[1],成为风力发电机的首选方案。

外转子永磁发电机是风力发电的核心装置,经常处于复杂且恶劣的工作环境中。同时,由于风速的随机性,风力机往往是在变转速工况下运行的^[2]。因此,不同时刻下发电机内部的电磁场也常处于不同的状态。在时变磁拉力作用下,转子结构产生随时间变化的机械响应,严重时可引起转子结构变形,使得气隙分布不对称,加剧发电机振动,造成发电机气隙动静偏心等故障,对发电机安全运行产生影响。同时转子振动状态的优劣直接影响整个机组安全运行^[3],引起的振动会产生时变电磁噪声,增加噪声污染,对人们身心健康造成影响。因此,研究风力发电机在日常运行时的振动特性及噪声,对发电机的健康维护和优化设计具有重要意义。

在发电机关键部件受力计算方面,当前学者主要

关注机电故障下定子和绕组的振动及机械响应。针对同步电动机电磁力,研究人员通常采用全局解析法^[4]、子区域法^[5-6]、等效剩磁法^{[7]5004-5013}^[8]等方法分析气隙磁密、电磁力,并研制样机进行试验验证,结果表明,电磁力新增的空间阶次将加剧电动机转子振动。边旭等^{[9]74-80}详细地理论分析了外转子电动机径向电磁力的来源和阶数,并通过齿顶偏心结构降低了电动机径向电磁力的各阶次幅值。ZHANG等^[10]基于无刷直流电动机的时空对称性和磁场叠加原理,提出两种计算径向电磁力密度分布的数值计算方法,并在10 kW样机上验证。以上研究主要针对内转子类型的电动机,由于直驱外转子结构的差异性,对外转子结构发电机在时变载荷下磁场和关键部件的受力演化规律研究存在较大空白。

在力学响应和振动方面,JIANG等^[11]通过对定子端部绕组在偏心故障前后的电磁力和机械响应仿真计算,获得了绕组疲劳失效和振动磨损的分布规律,为反向抑制端部绕组疲劳失效和绝缘磨损奠定了基础。唐友亮等^[12]对直流电动机定子系统进行模态仿真分析和试验测试,并提出一种基于模态频率的各向异性材料参数矫正方法。HE等^[13]研究了倾斜静气隙

收稿日期: 2024-05-11 修回日期: 2024-08-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(52177042); 高校基本科研业务费专项基金项目(2023MS128); 河北省第三批青年拔尖人才支持计划([2018]-27); 河北省高层次人才资助项目(B20231006); 苏州市社会发展科技创新项目(SS202134)

作者简介: 何玉灵,男,1984年生,福建龙岩人,教授,博士研究生导师; 主要研究方向为电力设备状态检测及其故障诊断; E-mail: heyuling1@ncepu.edu.cn。

孙凯(通信作者),男,1996年生,河南南阳人,博士研究生; 主要研究方向为电机特性分析和故障诊断; E-mail: 120222102025@ncepu.edu.cn。

引用格式: 何玉灵,杨佳文,孙凯,等.时变载荷作用下永磁直驱发电机外转子铁芯机械响应研究[J].机械强度,2025,47(4):27-38.

HE Yuling, YANG Jiawen, SUN Kai, et al. Analysis on mechanical response of external rotor core of direct drive permanent magnet generator under time-varying loads[J]. Journal of Mechanical Strength, 2025, 47(4): 27-38.

偏心对内转子力学性能(振动、变形、应变和应力)的影响。杨浩东等^[14]对不同齿槽配合的永磁电机电磁振动进行了比较和试验研究,为电动机齿槽配合选取提供了依据。韩孟媛等^[15]利用多物理场耦合计算了匝间短路故障前后定子铁芯温度和力学特征。LIN等^[16]分析出不同拓扑结构的径向电磁力的空间阶数,并通过有限元和试验分析了电磁力对内转子振动的影响。张立等^[17]基于有限元软件建立了风力发电机有限元模型,对其进行了结构模态、动力学及屈曲分析。周志刚等^[18]进行了电动机温度场与结构场耦合分析,研究了不同冷却方式下外转子轮毂电动机整体结构机械响应。HE等^[19]分析了同步发电机不同匝间短路位置下端部绕组的振动特性。

在电机噪声特性分析方面,FU等^[20]从多普勒效应出发,分析了外转子电动机的噪声特性,发现外转子电动机和内转子电动机噪声特性存在明显差异。ZUO等^[21]^[6204-6212]讨论了外转子电动机永磁体表面电磁力的空间频率特性,并通过开槽宽度优化达到降噪效果。MIN等^[22]研究了不同槽极配合下的电机电磁噪声。谢颖等^[23]比较了单/双层内置式转子的电磁振动噪声性能,结果发现转子永磁体双层比单层降噪效果更加明显。LIN等^[24]^[900-908]、KROTSCH等^[25]研究了外转子永磁同步电动机径向力的高频谐波对电动机噪声的影响。

综上所述,当前研究主要关注于内转子同步电机故障下定子和绕组等关键部件的受力及振动、永磁电动机噪声分析等方面,关于时变电磁载荷作用下外转子发电机转子机械响应特性及噪声计算方面的研究较少。作为补充,本文研究了典型日下永磁直驱发电机外转子磁拉力特性及力学响应,并分析了在不同风速下永磁直驱风力发电机的噪声变化规律。本文以一台13 kW外转子永磁发电机为研究对象,首先从理论分析了外转子直驱发电机磁拉力和振动特性,然后建立了外转子永磁发电机多物理场有限元计算模型,计算了典型日下的外转子磁拉力幅值;通过单向耦合计算得到了参考时刻的外转子铁芯力学响应和振动噪声;最后通过试验对理论分析和仿真结果进行了验证,结果证明了本文理论分析和仿真的准确性。

1 永磁直驱发电机外转子磁拉力

1.1 理论分析

外转子发电机的转子结构与内转子实心圆柱体不同,通常为壳结构,其径向刚度较小。在外转子发电机运行过程中,外转子铁芯的内表面受到均布磁拉力作用,外转子铁芯呈现周期性变形,即外转子铁芯表面机械振动,因此外转子内圆表面所受到的单位

面积磁拉力是激励转子径向振动的激振力。

1.1.1 磁拉力来源解析

发电机外转子铁芯磁拉力可分为径向磁拉力和切向磁拉力,其中径向磁拉力远大于切向磁拉力,且发电机振动的产生主要是由于径向磁拉力。根据麦克斯韦张量法,忽略切向磁通量密度,外转子铁芯径向单位面积磁拉力密度^[21]^[6205]为

$$P_r(\theta, t) = \frac{b_r^2(\theta, t)}{2\mu_0} \quad (1)$$

式中, $P_r(\theta, t)$ 为径向磁拉力密度, N/m^2 ; $b_r(\theta, t)$ 为气隙磁通量密度, T ; θ 为电角度, rad ; t 为时间, s ; μ_0 为真空磁导率, H/m 。

当忽略发电机铁芯磁路饱和效应时,径向气隙磁通量密度^[9]^[76]可表示为

$$b_r(\theta, t) = f(\theta, t)\lambda(\theta, t) \quad (2)$$

式中, $f(\theta, t)$ 为气隙磁动势, AT ; $\lambda(\theta, t)$ 为气隙磁导, H 。

外转子永磁同步发电机的气隙磁密度由永磁体磁场以及电枢绕组产生的磁场两者耦合决定。因此发电机气隙磁动势主要包含两部分,电枢绕组产生磁动势和永磁体产生的磁动势。气隙磁动势^[26]表示为

$$f(\theta, t) = f_0(\theta, t) + \sum f_v(\theta, t) + \sum f_\mu(\theta, t) \quad (3)$$

式中, $f_0(\theta, t)$ 为基波磁动势, AT ; $f_v(\theta, t)$ 为电枢绕组产生的 v 次谐波磁动势, AT ; $f_\mu(\theta, t)$ 为永磁体产生的 μ 次谐波磁动势, AT 。

在外转子永磁同步发电机中,以定子某齿中心线为坐标原点,同时考虑定子开槽的影响,则气隙磁导^[24]^[901]可表示为

$$\lambda(\theta, t) = \Lambda_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \Lambda_k(\theta, t) \quad (4)$$

式中, Λ_0 为定子开有齿槽时的基波磁导幅值, H/m ; Λ_k 为 k 次谐波磁导幅值, H/m ; $k=1, 2, 3, \dots$ 。

将式(2)~式(4)代入式(1),则径向磁拉力密度的表达式为

$$P_r(\theta, t) = \frac{b_r^2(\theta, t)}{2\mu_0} = \frac{1}{2\mu_0} [f_0(\theta, t) + \sum f_v(\theta, t) + \sum f_\mu(\theta, t)]^2 [\Lambda_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \Lambda_k(\theta, t)]^2 \quad (5)$$

外转子发电机相电流的表达式可根据法拉第电磁感应定律和欧姆定律推得:

$$i(\alpha_m, t) = \frac{b_r(\theta, t)lv}{Z} = \frac{b_r(\theta, t)l[2\pi R_s(n_r/60)]}{Z} \quad (6)$$

式中, α_m 为定子坐标系中衡量空间位置的角度, $(^\circ)$; l 为磁力线切割定子绕组的有效长度,通常近似取定子铁芯轴向长度, m ; R_s 为定子铁芯内径, m ; n_r 为转子转速, r/min ; Z 为定子绕组的阻抗, Ω 。

从式(6)中可以看出,发电机转速的变化会影响

相电流的变化,进而影响电枢绕组磁动势。如图 1 所示,发电机气隙磁势由永磁体产生的磁动势和电枢绕组产生的磁动势共同作用,电枢绕组磁动势的增大使气隙磁势增大。由式(5)可知,磁拉力密度会随气隙磁势增大而增大。

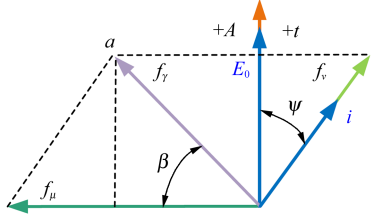


图 1 气隙磁动势示意图

Fig. 1 Air gap magnetomotive force diagram

1.1.2 磁拉力阶次分析

永磁同步电机的极槽配合及绕组结构影响电枢绕组磁动势的谐波含量。发电机每极每项槽数表达式为

$$q = \frac{Z_1}{2pm} = \frac{N_s}{d} \quad (7)$$

式中, Z_1 为发电机槽数; p 为发电机极对数; m 为发电机相数; N_s 与 d 为整数, 两者最大公约数为 1。

由电枢磁场产生的磁势谐波次数为

$$v = \left(\frac{2mh}{d} + 1 \right) p \quad (8)$$

式中, $h = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 。

由永磁体磁场产生的磁势谐波次数为

$$\mu = (2x + 1)p \quad (9)$$

式中, $x = 0, 1, 2, \dots$ 。

发电机电枢磁场产生的 v 次谐波磁动势与永磁体磁场产生的 μ 次谐波磁动势相互作用, 所产生的磁拉力阶数为

$$r = \mu \pm v \quad (10)$$

该阶数对应的磁拉力频率为

$$F = \left(\frac{\mu}{p} \pm 1 \right) f \quad (11)$$

式中, f 为发电机工作频率, Hz。

电磁振动主要受低阶力波影响, 因此, 本文忽略高阶力波, 仅计算分析低阶力波作用下激发的外转子发电机转子铁芯振动。通过式(8)~式(10)联立计算, 表 1 列出了 8 对极 54 槽外转子永磁同步发电机单位面积磁拉力的空间和时间阶次, 正、负号分别表示谐波磁场正向旋转、反向旋转。

1.1.3 振动分析

外转子发电机中外转子铁芯可等效为圆环结构, 外转子结构受到气隙内时空变化的径向电磁力波从而引起径向受迫振动。如图 2 所示, 将外转子机构力

表 1 磁拉力阶次

Tab. 1 Magnetic pull order

定子谐波次数 Harmonic order of stator v	转子谐波次数 Harmonic order of rotor μ		
	8	24	40
2	6/0	22/2	38/4
	10/2	26/4	42/6
	12/0	28/2	44/4
-4	4/2	20/4	36/6
	0/0	16/2	32/4
8	16/2	32/4	48/6
	18/0	34/2	50/4
-10	-2/2	14/4	30/6
	-6/0	10/2	26/4
14	22/2	38/4	54/6

学模型进行简化。

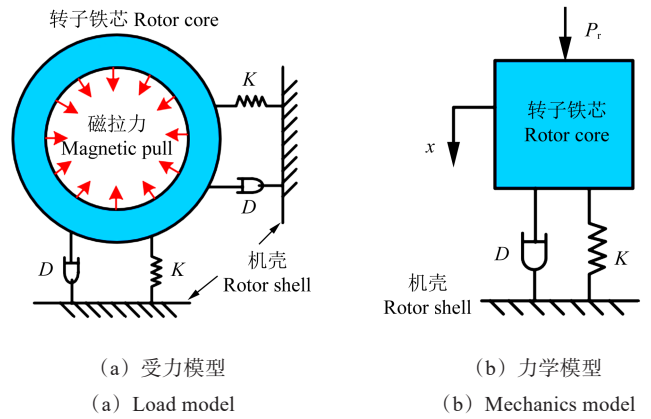


图 2 转子铁芯模型

Fig. 2 Stator core model

根据机械系统动力学模型可知, 外转子铁芯磁拉力和振动响应的关系式可表示为

$$Mx''(t) + Dx'(t) + Kx(t) = P_r(t) \quad (12)$$

式中, M, K, D 分别为外转子机构单自由度机构质量、弹性刚度和阻尼系数; $x(t)$ 为运动质量的位移; $x'(t)$ 为运动质量的速度; $x''(t)$ 为运动质量的加速度。此时令

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{M}} \cdot \xi = \frac{D}{2M\omega_n} = \frac{D}{2\sqrt{MK}} \quad (13)$$

式中, ω_n 为系统的固有频率; ξ 为系统的阻尼比; f_n 为模态对应频率。其中 ξ 可由以下经验公式^{[7]5010} 获得

$$\xi = \frac{1}{2\pi} (2.76 \times 10^{-5} f_n + 0.062) \quad (14)$$

将式(13)和式(12)联立可以将振动响应关系式表示为

$$x''(t) + 2\xi\omega_n x'(t) + \omega_n^2 x(t) = P_r(t)/M \quad (15)$$

式(15)即为外转子铁芯等效系统的运动微分方程, 方程的通解包括系统运动瞬态振动位移和系统稳态振动位移, 其中运动瞬态振动位移经过一段时间后衰减为 0。在发电机的振动噪声研究中只考虑稳态振

动位移,则稳态振动位移可表示为

$$x_1(t) = \frac{P_r(t-t_0)}{\sqrt{(1-\lambda^2)^2 + (2\xi\lambda)^2}} \quad (16)$$

式中, $x_1(t)$ 为外转子机构稳态振动位移; t_0 为相位位移; λ 为激振频率与固有频率比。

将式(1)与式(16)联立得

$$x_1(t) = \frac{b_r^2(t-t_0)}{2\mu_0\sqrt{(1-\lambda^2)^2 + (2\xi\lambda)^2}} \quad (17)$$

由式(16)、式(17)中可以看出,外转子等效系统受迫振动的表达式与激振力的表达式基本相同,只是幅值和相位发生变化。从前文理论分析可知,随着外转子转速升高和频率增加,磁密度也随之增加。在不超过共振频率时,振动幅值也会随之增加。

1.2 仿真计算

以一台 13 kW 外转子永磁直驱发电机为分析对象,其基本参数如表 2 所示。外转子永磁同步发电机仿真模型如图 3(a) 所示,在仿真和试验过程中,每相负载包括 4 Ω 电阻和 0.004 8 H 电感(对应内功率因数为 0.8)。对应电枢绕组耦合电路如图 3(b) 所示。

表 2 发电机基本参数

Tab. 2 Basic parameters of the generator

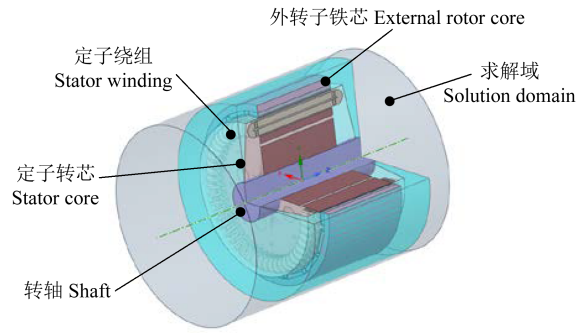
参数 Parameter	值 Value
额定转速 Rated speed/(r/min)	375
槽数 Number of slots	54
极对数 Pairs of poles	8
定子外径 Outer diameter of stator/mm	305
定子内径 Inner diameter of stator/mm	78
转子外径 Rotor outer diameter/mm	360
内功率因数 Internal power factor	0.8

风电出力的变化都具有一定季节周期性和日周期性,日时间尺度下的风速变化过程存在 24 h 的变化周期^[27-28]。对河北省某地一年内风速变化数据进行分析,选取冬季某工作日作为典型日,该日的风速变化趋势最接近一年内平均风速变化情况。通过分析典型日下发电机转速模拟实际中时变载荷,计算得到外转子永磁直驱发电机在典型日下的转速。进一步,把发电机的时间过程离散成若干个稳态转速点。典型日下不同时刻对应转速如表 3 所示。

1.2.1 额定转速下外转子铁芯磁拉力计算

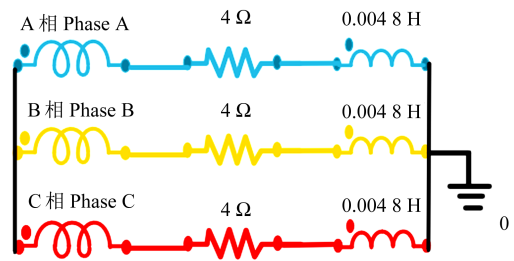
在仿真中设置外转子发电机的转速为 375 r/min (额定转速),计算得到了 5 个稳定运行周期内的气隙磁密度和外转子铁芯所承受的单位面积磁拉力,结果分别如图 4 和图 5 所示。

由图 4 和图 5(a) 可知,气隙磁密度和单位面积磁拉力随时间和空间均呈现周期分布。进一步对单位面积



(a) 仿真模型

(a) Simulation model



(b) 电枢绕组耦合电路

(b) Armature winding coupling circuit

图 3 有限元仿真模型

Fig. 3 Finite element simulation model

表 3 仿真转速设置

Tab. 3 Simulation speed setting

时刻 Time	转速 Rotate speed/(r/min)	时刻 Time	转速 Rotate speed/(r/min)	时刻 Time	转速 Rotate speed/(r/min)
1	78.3	9	112.1	17	171
2	83.4	10	140.5	18	141.2
3	85.3	11	156.1	19	172.8
4	82.5	12	140	20	148.7
5	112	13	158.6	21	126.8
6	115.6	14	169.9	22	124.8
7	120	15	204.7	23	132.5
8	130	16	192	24	98.7

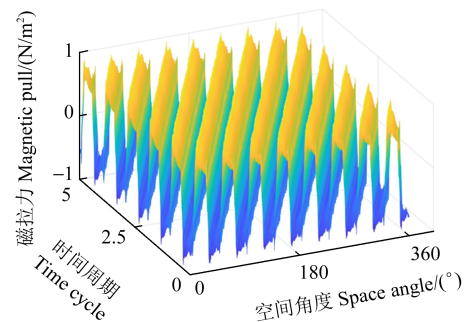


图 4 气隙磁密度波形

Fig. 4 Air gap magnetic density waveform

磁拉力进行频域分析,结果表明,单位面积磁拉力除 0 Hz 外,幅值较大的频率点为 100 Hz(2 倍)、200 Hz(4 倍)、300 Hz(6 倍)等偶次谐波;且随着频率的增加,

单位面积磁拉力的幅值逐渐减小。在外转子永磁同步发电机的气隙中,永磁体磁场和电枢磁场相互作用产生阶次和频率各不相同的单位面积磁拉力谐波,由图 5(c)可知,磁拉力幅值较大的谐波阶次主要分布在低阶次,且随着阶次的增加,单位面积磁拉力的幅值逐渐减小。

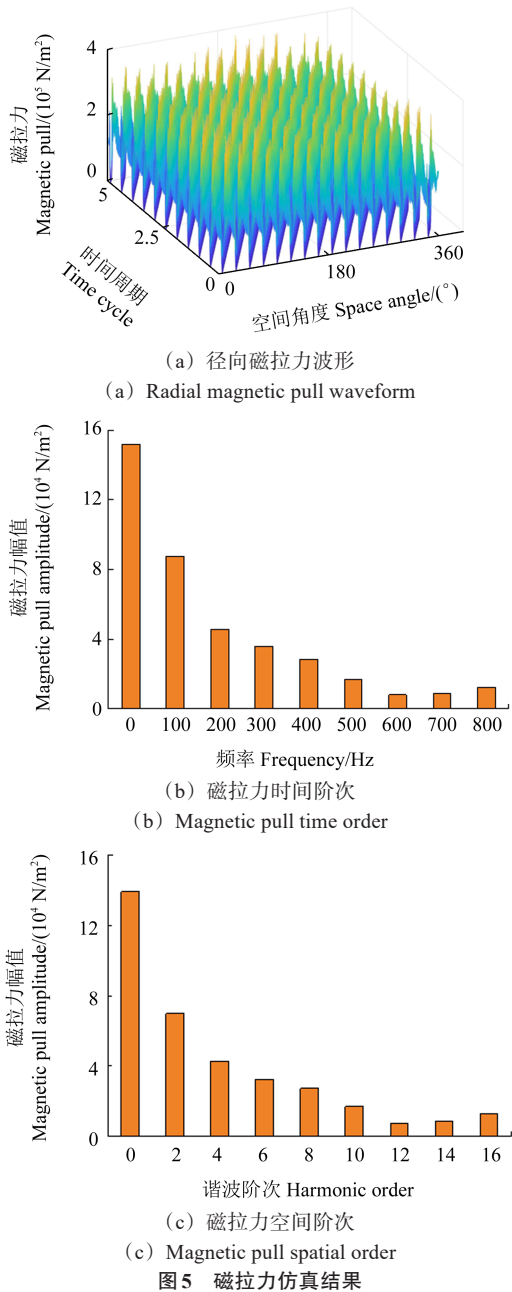


图 5 磁拉力仿真结果

Fig. 5 Magnetic pull simulation results

1.2.2 典型日下外转子铁芯磁拉力计算

本文根据典型日下发电机实际转速计算时变载荷,通过有限元计算得到典型日各个稳态转速点的磁拉力。取稳态周期磁拉力峰值,得到磁拉力密度和转速随时间变化,如图 6 所示。

由图 6 可以看出,单位面积磁拉力峰值和转速变化大体一致,单位面积磁拉力峰值跟随转速变化而变化。通过对仿真结果分析可知,从 1 时刻~15 时刻,单

位面积磁拉力密度和转速随着时刻的增加而呈现增大趋势,15 时刻径向单位面积磁拉力密度和转速出现最大值。15 时刻后呈现减小趋势。1 时刻出现最小值。其中 17 时刻、18 时刻单位面积磁拉力幅值大且变化相对较大。

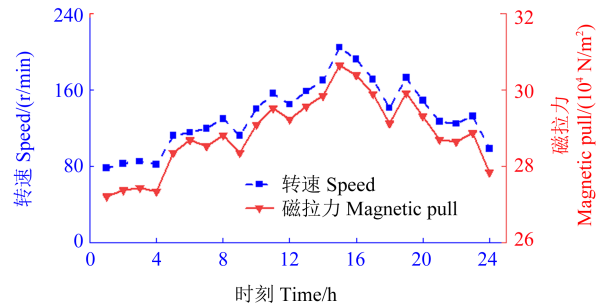
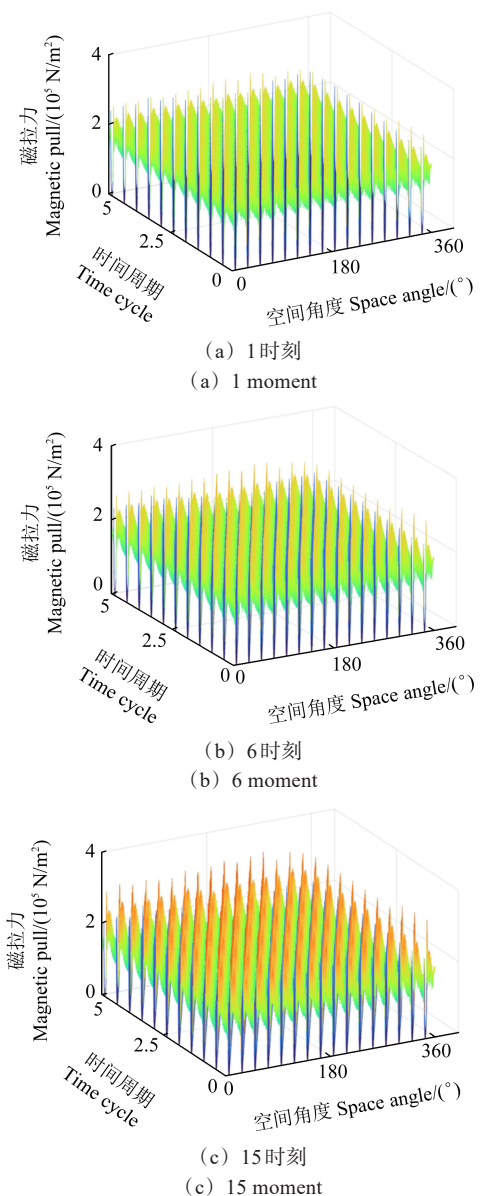


图 6 磁拉力变化示意图

Fig. 6 Schematic diagram of electromagnetic force changes

为进一步研究典型日内磁拉力变化规律,分别取 1、6、15、17、18、21 时刻作为参考时刻,通过有限元计算得到磁拉力随时间和空间变化结果,如图 7 所示。



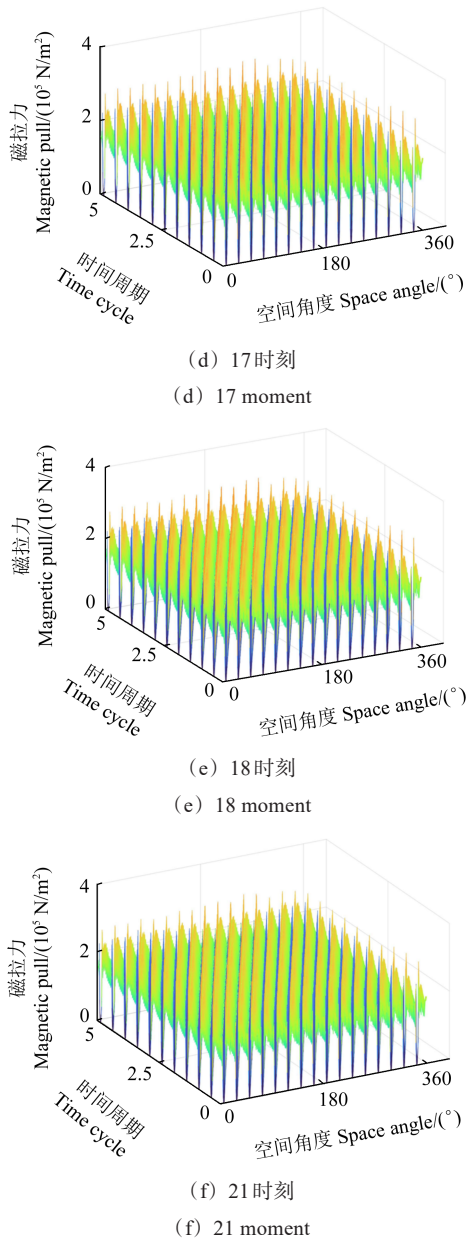


图7 参考时刻磁拉力波形示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the electromagnetic force waveform at reference moments

由图7可知,径向磁拉力呈周期性变化,15时刻对应的径向磁拉力整体水平最大,1时刻对应的径向磁拉力整体水平最小。对比17时刻、18时刻径向磁拉力幅值变化,整体相对于1时刻、15时刻变化不明显,6时刻与21时刻磁拉力波形图大体相同。这与式(5)分析结果相符合。

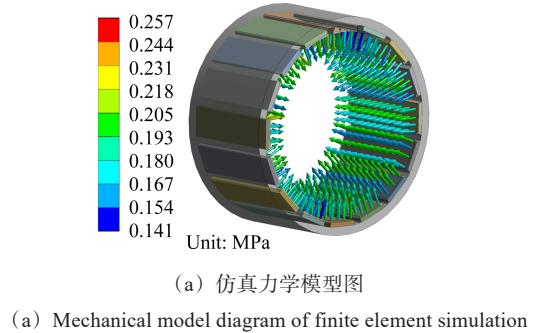
2 机械响应计算

2.1 时变载荷下外转子力学响应

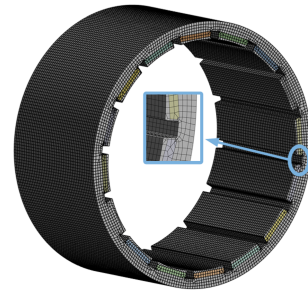
进一步研究外转子机构在时变工况下力学响应的变化情况,为外转子铁芯失效防护和健康维护提供参考,由于篇幅的限制,本文只对代表性时刻进行分析。

首先,在Ansys软件电磁场模块计算出磁拉力密

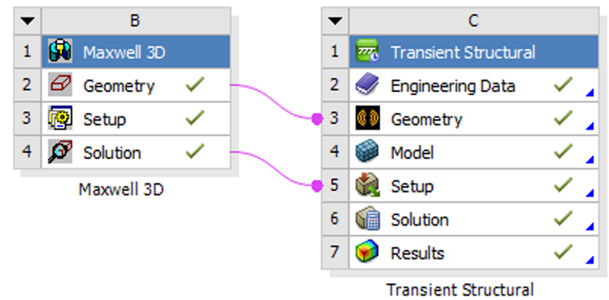
度,仿真力学模型如图8(a)所示,将磁拉力密度数据作为输入载荷导入Ansys-Workbench结构分析模块中。在Ansys-Mesh中对外转子结构进行全六面体网格划分,共生成202 380个网格,有限元网格模型如图8(b)所示。将外转子外表面设置为固定支撑来模拟发电机的实际工况,利用磁-固(结构)单向耦合方法,对发电机外转子力学响应进行研究,如图8(c)所示。



(a) Mechanical model diagram of finite element simulation



(b) Finite element mesh model diagram



(c) 耦合示意图

(c) Coupling diagram

图8 Ansys外转子力学求解

Fig. 8 Ansys external rotor mechanics solution

本文仿真计算出1、6、15、17、18、21时刻外转子变形和应力分布,分别如图9、图10所示。为了更加直观地对比不同时刻下铁芯力学响应变化,将代表性时刻变形和应力峰值列表,如表4所示。

由图9可知,在时变载荷作用下,外转子铁芯发生了一定程度的变形,外转子齿外表面边缘(图9中外转子齿深色部分)发生的变形最大,外表面几乎不发生变形,其原因为转子外壳对外转子铁芯的固定支撑。其中15时刻的变形峰值最大,1时刻变形峰值最小。17~18时刻变

形峰值减小,减小量小于15时刻和1时刻峰值的差值,其中21时刻和6时刻变形峰值介于最大峰值和最小峰值之间且峰值差值相对较小。典型日内不同时刻转速的变化,导致外转子铁芯变形随之变化。

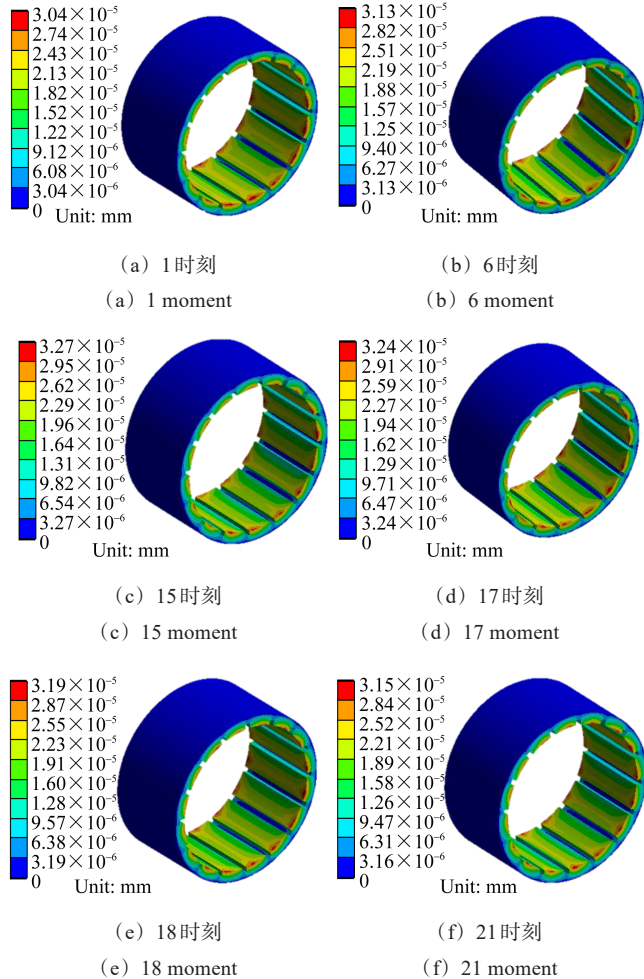


图9 参考时刻外转子变形示意图

Fig. 9 Diagram of the external rotor deformation at reference moments

由图10可知,外转子铁芯最大应力发生在外转子铁芯齿槽内表面边沿处(图10中放大部分),不同时刻应力峰值变化规律与变形一致。15时刻峰值最大,1时刻峰值最小。根据仿真结果可知,在典型日时变载荷作用下,外转子铁芯最大变形和最大应力都发生在15时刻,外转子铁芯最小变形和最小应力都发生在1时刻,这是由于15时刻对应转速最大,1时刻对应转速最小。因此,当外转子直驱风力发电机在实际运行中,转速随风速变化,将导致径向磁拉力密度、总体变形、等效应力的变化,使它们随转速的增加而增加,总体变形和等效应力峰值与转速成正相关。由此可知,在典型日下,1~15时刻发电力学响应对外转子机构影响越来越大。随着15时刻出现最大值后,呈减小趋势。

此外,外转子总体变形最大峰值均位于与气隙接

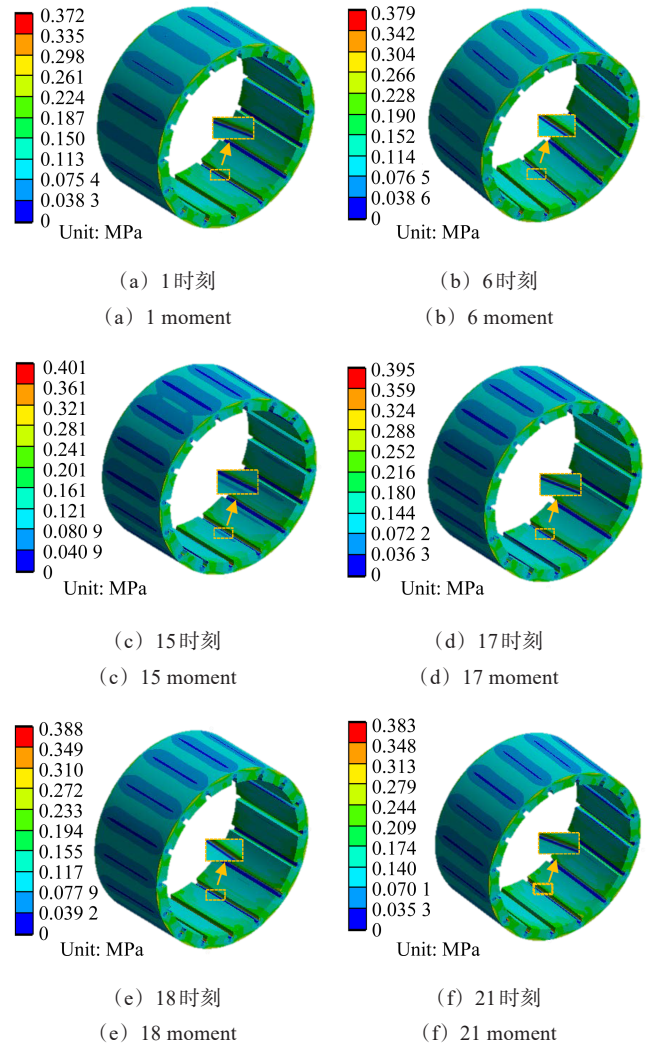


图10 参考时刻外转子应力示意图

Fig. 10 Diagram of external rotor stress at reference moments

表4 参考时刻下变形和应力峰值

Tab. 4 Deformation and stress peak values at reference moments

时刻 Time/h	转速 Rotate speed/ (r/min)	变形峰值 Deformation peak/ (10 ⁻⁵ mm)	应力峰值 Stress peak/MPa
1	78.3	3.04	0.372
6	115.6	3.13	0.379
15	204.7	3.27	0.401
17	171	3.24	0.395
18	141.2	3.19	0.388
21	126.8	3.15	0.383

触的外转子齿外表面边缘处,在长期服役过程中此位置不仅绝缘易被破坏,而且会造成外转子翘曲引起碰摩故障。外转子等效应力最大峰值均发生在外转子铁芯齿槽内表面边沿处,这是因为此处截面的几何形状突变,引起磁拉力力流方向急剧转折,力流在转折处过于密集导致应力集中。针对上述危险位置,可以在后期发电机设计制造时涂覆耐磨材料或者设计新的齿槽结构减少振动对铁芯的损伤。

2.2 典型载荷下振动噪声

2.2.1 模态分析

永磁同步发电机的噪声除了与径向磁拉力有关之外,还与发电机的固有频率相关。一般对永磁发电机的模态分析,有利于研究径向磁拉力频率与固有频率之间的数值关系,当两者的频率相差不大时,发电机就会发生共振,导致发电机噪声加剧。因此,在研究发电机噪声仿真时,对模态进行分析很有必要。

在保证计算结果准确性的前提下,本文对发电机外转子铁芯和永磁体进行模态仿真计算。通过前文分析得知,发电机转速频率不高,因此,本文在研究共振时,主要分析前5阶模态。发电机前5阶模态振型图 and 对应频率如表5所示。

表5 模态阶数对应频率和振型图

Tab. 5 Frequency and vibration mode diagram corresponding to the modal order

模态阶数 Modal order	模态频率 Modal frequency/Hz	振型图 Vibration mode diagram
2	333.9	
3	933.4	
4	1 765.1	
5	2 801.3	

由于本文篇幅有限,只选取典型日内具有代表性1时刻、15时刻和额定工况进行试验验证。通过对磁拉力分析可知,发电机在1时刻、15时刻、额定工况下基频分别为10.4、26.9、50 Hz,径向磁拉力谐波为基频的偶数倍,且对振动噪声影响较大的为低次谐波,与表5中的模态分析结果均不一致,不会发生共振现象。

2.2.2 振动噪声分析

本文在进行振动噪声分析时,在Ansys电磁场模块进行1时刻、15时刻和额定工况下磁拉力计算;然后将结果导入谐响应分析模块,进行外转子铁芯振动计算;最后将谐响应计算结果作为激励源导入噪声分析模块计算其噪声响应,其耦合关系如图11所示。从理论分析和仿真结果可知,2倍频磁拉力对发电机振动

噪声影响较大,受篇幅限制,只对额定工况、1时刻、15时刻2倍频的振动噪声进行分析。

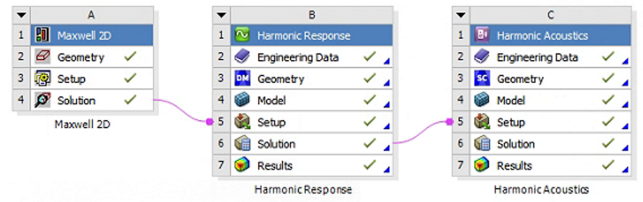


图11 噪声仿真耦合示意图

Fig. 11 Schematic diagram of noise simulation coupling

根据发电机参数可知,本文试验样机在额定工况下内功率因数为0.8,忽略磁场频率变化对永磁体磁化强度的影响,根据式(3)、式(6)和式(17)计算分别得到额定工况、1时刻、15时刻振动幅值变化。将额定工况下解析结果和仿真结果归一化,进行对比分析。对比结果如图12所示。仿真结果计算得到的A计权声压级云图如图13所示。

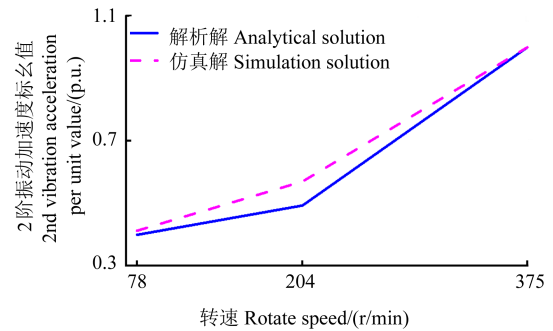
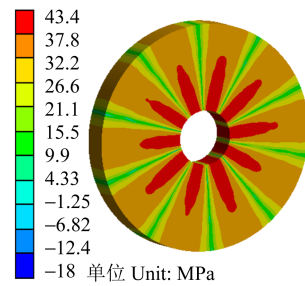


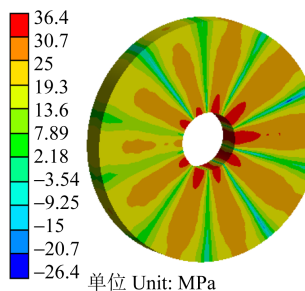
图12 振动幅值对比图

Fig. 12 Vibration amplitude contrast diagram



(a) 额定工况

(a) Rated condition



(b) 1时刻

(b) 1 moment

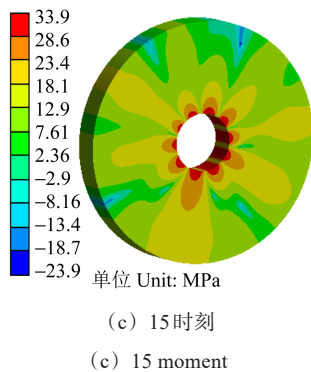


图 13 A 计权声压级云图

Fig. 13 A-weighted sound pressure level nephogram

将仿真结果和解析结果进行对比分析,受计算精度和其他因素的影响,采用理论解析所得的结果与有限元结果存在一定误差,但仍然能够比较准确地反映振动幅值变化规律。1时刻对应工况有最小幅值,额定工况有最大幅值,符合前文分析结果。解析结果与有限元结果变化整体一致。解析解与有限元数据吻合较好,验证了本文模型分析的准确性和有效性。

由图 13 可知,发电机外转子外表面附近声压级有最大值,随着距离发电机越来越远,声压级越来越小,符合客观规律。额定工况下声压级峰值为 43.4 MPa; 1时刻峰值为 36.4 MPa; 15时刻峰值为 33.9 MPa。峰值差别是因为转速不同所导致的。

3 试验验证

为了验证理论分析和有限元计算结果的准确性,本文以模拟试验的方式对前文得出的结果进行检验。

3.1 试验设置

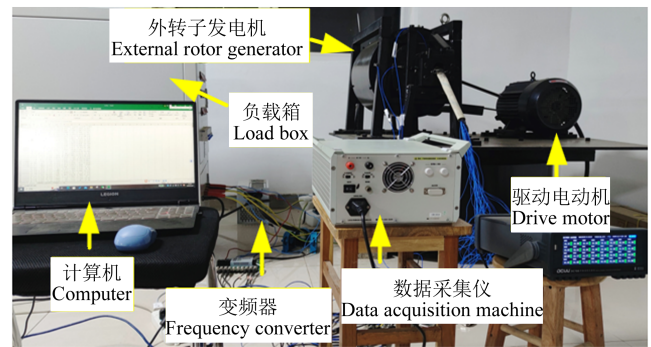
外转子永磁同步发电机机械响应试验验证在河北省电力机械装备健康维护与失效预防重点实验室的 1 台 13 kW 外转子永磁发电机上进行,如图 14 所示。受条件限制,外转子铁芯所受的单位面积磁拉力无法直接检测,因此用外转子振动特性来表征外转子铁芯在磁拉力作用下的机械响应。外转子产生的振动通过振动加速度传感器测量。试验过程中发电机永磁体材料、外接负载均与仿真一致。

振动信号的采样频率为 5 kHz,使用 DH8303 动态信号测试分析系统,实时进行信号的采集、储存、显示和分析等。试验通过变频器控制模拟发电机的转速。

3.2 试验结果与讨论

通过对外转子机壳振动数据的提取和处理,得到外转子铁芯在 78.3 r/min(1时刻)、204.7 r/min(15时刻)、375 r/min(额定工况)下振动加速度时域变化,如图 15 所示。将不同工况下的振动加速度实测结果,用

Matlab 软件作傅里叶变换,结果如图 16 所示。



(a) 试验系统总体外观

(a) Overall appearance of the test system



(b) 加速度传感器布置

(b) Acceleration sensor layout

图 14 试验装置示意图

Fig. 14 Schematic diagram of test setup

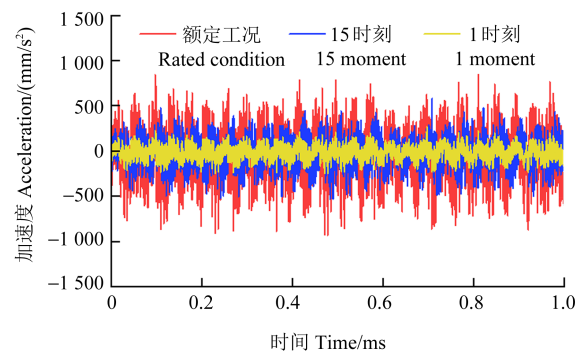


图 15 振动加速度时域图

Fig. 15 Time domain diagram of vibration acceleration

由图 15 可知,发电机在不同工况下振动加速度幅值是不同的,其中在额定工况下幅值最大,15时刻其次,1时刻最小。这是因为转速不同所导致,与前文磁拉力分析结果一致。在不同工况下,外转子铁芯的径向振动加速度均存在 2 倍频、4 倍频成分。从理论分析可知,径向磁拉力幅值较大的点均在发电机振动的偶次谐波,且幅值较大的为低次谐波分量,所以出现 2 倍频、4 倍频振动。除了 2 倍频、4 倍频成分,测得振动中还出现其他倍频成分,这是由于发电机内部结构的不对称以及外部的非故障环境因素影响出现的,其中基频成分由外转子本身振动产生。

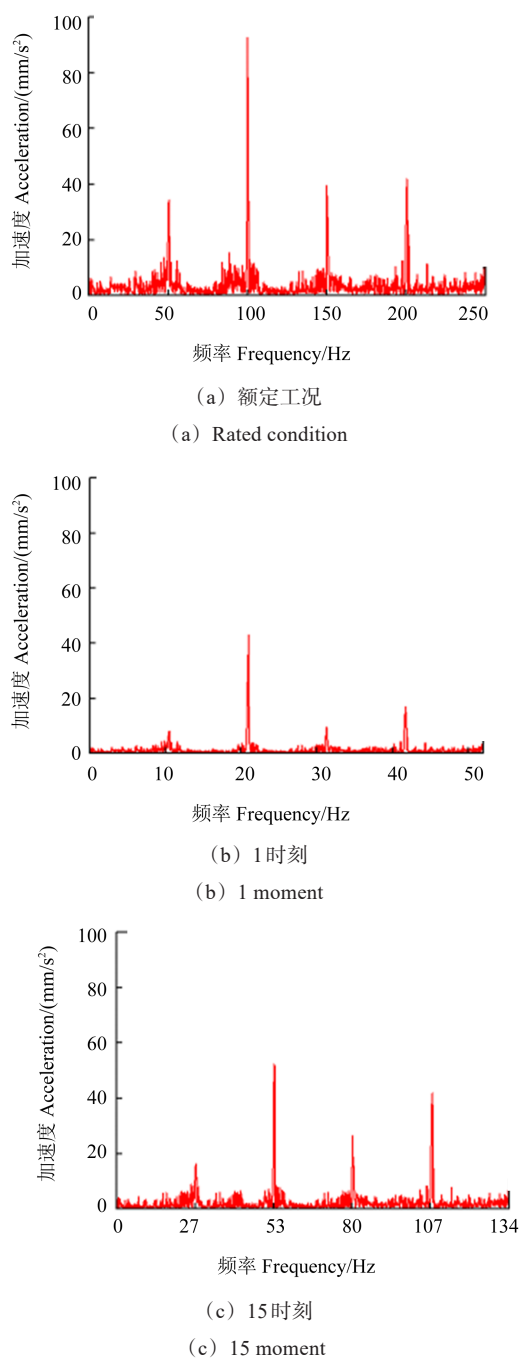


图16 振动加速度频域图

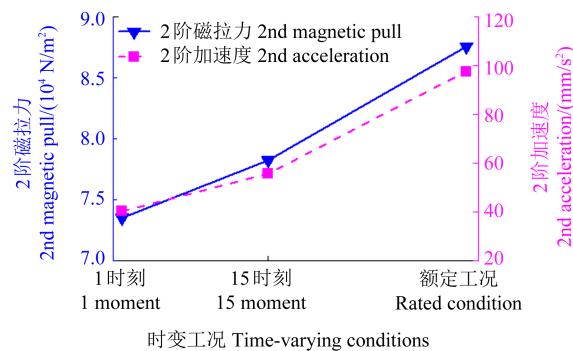
Fig. 16 Frequency domain diagram of the vibration acceleration

为了更好地验证试验的准确性,将仿真得到的外转子铁芯磁拉力和试验测得的振动加速度进行比较,如图17所示。随着工况的改变,2阶和4阶振动谐波和磁拉力谐波均会改变,即随风速的增加,磁拉力谐波和振动谐波幅值会增大。磁拉力谐波幅值变化和振动加速度谐波幅值变化整体一致。试验结果与有限元数据吻合较好,验证了本文的准确性。

4 结论

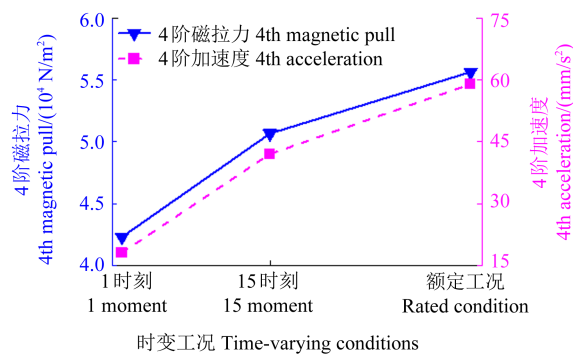
以13 kW直驱外转子永磁同步发电机为例,对外转子永磁发电机在典型日下的外转子铁芯所承受的

单位面积磁拉力及其产生的机械响应进行了理论分析、仿真计算和试验验证,得出结论如下:



(a) 2阶磁拉力和加速度比较

(a) Comparison of 2nd magnetic pull and acceleration



(b) 4阶磁拉力和加速度比较

(b) Comparison of 4th magnetic pull and acceleration

图17 磁拉力和振动加速度比较

Fig. 17 Comparison of magnetic pull and vibration acceleration

1)外转子铁芯单位面积磁拉力随着风速的增加而逐渐增大,其主要的时间和空间频率成分均以偶次谐波为主。在典型日中15时刻铁芯承受的单位面积磁拉力最大。

2)外转子铁芯力学响应和振动噪声在典型日下随时间发生变化,不同时刻的变形幅值和应力幅值不同,变形最大位于一天中风速最大的时刻。外转子铁芯总体变形峰值均位于与气隙接触的齿外表边缘处,等效应力峰值均发生在外转子铁芯齿槽内表面边沿。针对上述危险位置,可以在后期发电机设计制造时涂覆耐磨材料或者设计新的齿槽结构减少振动对铁芯的损伤。

本文主要研究分析了典型日下外转子永磁直驱发电机在稳态时的转子铁芯机械响应,后续将针对随机时变风速下风力发电机关键部件损伤机制进行研究。

参考文献(References)

- [1] JIA S F, QU R H, LI J, et al. Study of direct-drive permanent-magnet synchronous generators with solid rotor back iron and different windings[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,

- 2015, 52(2):1369-1379.
- [2] 崔诚,陈长征,吴焕杰,等. 变转速下的风力机行星齿轮箱故障诊断研究[J]. 机械强度,2022,44(2):263-270.
CUI Cheng, CHEN Changzheng, WU Huanjie, et al. Research on fault diagnosis of wind turbine planetary gearbox under variable speed[J]. Journal of Mechanical Strength, 2022, 44(2):263-270. (In Chinese)
- [3] 黄杨森,刘云平,王勇,等. 汽轮发电机组转子振动预警方法研究[J]. 机械强度,2023,45(3):541-547.
HUANG Yangsen, LIU Yunping, WANG Yong, et al. Research on early warning method of rotor vibration of turbogenerator unit[J]. Journal of Mechanical Strength, 2023, 45(3):541-547. (In Chinese)
- [4] LI Y X, LU Q F, ZHU Z Q, et al. Superposition method for cogging torque prediction in permanent magnet machines with rotor eccentricity [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52(6):8103710.
- [5] LI Y X, LU Q F, ZHU Z Q. Unbalanced magnetic force prediction in permanent magnet machines with rotor eccentricity by improved superposition method[J]. IET Electric Power Applications, 2017, 11(6):1095-1104.
- [6] 任杰,王秀和,赵文良,等. 永磁同步电机转子偏心空载气隙磁场解析计算[J]. 电机与控制学报,2020,24(8):26-32.
REN Jie, WANG Xiuhe, ZHAO Wenliang, et al. Open circuit magnetic field prediction in permanent magnet synchronous machine with rotor eccentricity[J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(8):26-32. (In Chinese)
- [7] 邢泽智,王秀和,赵文良,等. 表贴式永磁同步电机电磁激励力波计算与定子振动特性分析[J]. 中国电机工程学报,2021,41(14):5004-5013.
XING Zezhi, WANG Xiuhe, ZHAO Wenliang, et al. Calculation of electromagnetic force waves and analysis of stator vibration characteristics of surface mount permanent magnet synchronous motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(14):5004-5013. (In Chinese)
- [8] 吴喜桥,王立. 气隙偏心永磁电机绕组感应电势的快速计算与分析[J]. 机电工程技术,2018,47(4):120-126.
WU Xiqiao, WANG Li. Fast calculation and analysis of electromotive force of permanent magnet motors with air-gap eccentricity [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2018, 47(4):120-126. (In Chinese)
- [9] 边旭,纪毅,梁艳萍. 外转子永磁同步电机径向电磁力分析与抑制[J]. 电机与控制学报,2022,26(10):74-80.
BIAN Xu, JI Yi, LIANG Yanping. Analysis and suppression of radial electromagnetic force of external rotor permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(10):74-80. (In Chinese)
- [10] ZHANG Q H, JIA Z W, CHENG S W, et al. Analysis and calculation of radial electromagnetic force of circular winding brushless DC motor[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019:1.
- [11] JIANG H C, HE Y L, TANG G J, et al. Electromagnetic force and mechanical response of turbo-generator end winding under electromechanical faults [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2021, 2021(1):9064254.
- [12] 唐友亮,吕品德,张锦,等. 基于模态分析的定子各向异性材料参数矫正方法[J]. 机械强度,2022,44(2):503-508.
TANG Youliang, LÜ Pinde, ZHANG Jin, et al. Parameter equivalent method of stator anisotropic material based on modal analysis [J]. Journal of Mechanical Strength, 2022, 44(2):503-508. (In Chinese)
- [13] HE Y L, LI Y, ZHANG W, et al. Analysis of stator vibration characteristics in synchronous generators considering inclined static air gap eccentricity[J]. IEEE Access, 2022, 11:7794-7807.
- [14] 杨浩东,陈阳生,邓志奇. 永磁同步电机常用齿槽配合的电磁振动[J]. 电工技术学报,2011,26(9):24-30.
YANG Haodong, CHEN Yangsheng, DENG Zhiqi. Electromagnetic vibration of PM synchronous motors with different combinations of slot and pole number [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(9):24-30. (In Chinese)
- [15] 韩孟媛,赵仲勇,于跃强,等. 同步电机定子绕组匝间短路前后的温度及力学响应仿真分析[J]. 电测与仪表,2023,60(4):48-56.
HAN Mengyuan, ZHAO Zhongyong, YU Yueqiang, et al. Simulation analysis of temperature and mechanical response of synchronous machine stator winding before and after inter turn short circuit [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(4):48-56. (In Chinese)
- [16] LIN Y Q, SUN Y, WANG Y C, et al. Radial electromagnetic force and vibration in synchronous reluctance motors with asymmetric rotor structures[J]. IET Electric Power Applications, 2021, 15(9):1125-1137.
- [17] 张立,闫阳天,李春,等. 海上超大型风力机结构动力学响应及稳定性研究[J]. 机械强度,2022,44(1):175-183.
ZHANG Li, YAN Yangtian, LI Chun, et al. Study on structural dynamic response and stability of offshore super large wind turbine [J]. Journal of Mechanical Strength, 2022, 44(1):175-183. (In Chinese)
- [18] 周志刚,杨文豪,李争争,等. 外转子轮毂电机温度场及温度应力研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2022,41(5):142-150.
ZHOU Zhigang, YANG Wenhao, LI Zhengzheng, et al. Temperature field and thermal stress of external rotor in-wheel motor [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2022, 41(5):142-150. (In Chinese)
- [19] HE Y L, XU M X, ZHANG W, et al. Impact of stator interturn short circuit position on end winding vibration in synchronous generators [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 36(2):713-724.
- [20] FU F, ZUO S G, DENG W Z, et al. Modeling and analysis of acoustic noise in external rotor in-wheel motor considering Doppler effect [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(6):4524-4533.
- [21] ZUO S G, LIN F, WU X D. Noise analysis, calculation, and reduction of external rotor permanent-magnet synchronous motor [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(10):6204-6212.
- [22] MIN S G, SARLIOGLU B. Modeling and investigation on electromagnetic noise in PM motors with single-and double-layer concentrated winding for EV and HEV application[J]. IEEE Transactions

- on Transportation Electrification, 2017, 4(1):292-302.
- [23] 谢颖, 辛尉, 蔡蔚, 等. 内置式永磁同步电机不同转子拓扑结构的电磁性能及电磁振动噪声分析[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(1):110-119.
XIE Ying, XIN Wei, CAI Wei, et al. Electromagnetic performance and electromagnetic vibration noise analysis of different rotor topologies of interior permanent magnet synchronous motor[J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(1):110-119. (In Chinese)
- [24] LIN F, ZUO S G, WU X D. Electromagnetic vibration and noise analysis of permanent magnet synchronous motor with different slot-pole combinations[J]. IET Electric Power Applications, 2016, 10(9):900-908.
- [25] KROTSCH J, PIEPENBREIER B. Harmonic diversity and determining factors of radial forces in external rotor permanent magnet synchronous motors with concentrated windings [C]//The XIX International Conference on Electrical Machines-ICEM. New York: IEEE, 2010:1-7.
- [26] 唐任远, 宋志环, 于慎波, 等. 变频器供电对永磁电机振动噪声源的影响研究[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(3):12-17.
TANG Renyuan, SONG Zhihuan, YU Shenbo, et al. Study on source of vibration and acoustic noise of permanent magnet machines by inverter[J]. Electric Machines and Control, 2010, 14(3):12-17. (In Chinese)
- [27] WANG T, BI T S, WANG H F, et al. Decision tree based online stability assessment scheme for power systems with renewable generations[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2015(2):53-61.
- [28] 张充, 檀勤良, 汤石雨, 等. 基于风速变化周期的风电场功率分类组合预测模型[J]. 太阳能学报, 2017, 38(4):999-1006.
ZHANG Chong, TAN Qinliang, TANG Shiyu, et al. Classification and combination prediction model for wind power based on change period of wind speed[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2017, 38(4):999-1006. (In Chinese)

Analysis on mechanical response of external rotor core of direct drive permanent magnet generator under time-varying loads

HE Yuling^{1,2} YANG Jiawen¹ SUN Kai¹ WU Xuewei¹ ZHU Xiaoguang¹ LUO Haoran¹

(1. Hebei Key Laboratory of Electric Machinery Health Maintenance & Failure Prevention, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

(2. Suzhou Institute, North China Electric Power University, Suzhou 215000, China)

Abstract: The mechanical response of external rotor direct drive generator under time-varying loads is analyzed theoretically, calculated by simulation and verified by test. Firstly, the source of magnetic pull of the rotor core of the external rotor generator and its variation with load were analyzed. The expression of magnetic pull of the rotor and the characteristics of time and space order were determined. The basic vibration model of the external rotor core was analyzed, and the basic vibration equation of the external rotor core was determined. Then the simulation model of the external rotor generator was established, and the spatiotemporal order characteristics of the magnetic pull and the typical daily variation rule with time were obtained. The magnetic pull density obtained from the electromagnetic field was used as the input load to guide the structure field. The magnetic-solid coupling simulation was carried out, and the deformation and stress distribution and noise response of the external rotor core were calculated and analyzed. Finally, a simulation example of a 13 kW external rotor direct-drive generator proved the correctness of the analysis and simulation. The results of the study determined the time-varying load on the outer rotor core and its mechanical response distribution. It is found that the time and position of the rotor core should be tested emphatically when the generator is running. Noise characteristics under time-varying loads are also analyzed. The analysis provides reference for the maintenance and design of the generator.

Key words: External rotor direct drive permanent magnet synchronous generator; Mechanical response; Magnetic pull; Time-varying load; Electromagnetic noise

Corresponding author: SUN Kai, E-mail:120222102025@ncepu.edu.cn

Fund: National Natural Science Foundation of China (52177042); University Basic Scientific Research Operation Cost Special Fund (2023MS128); Third Batch of Youth Top Talent Support Plan in Hebei Province ([2018]-27); Hebei Province High level Talent Funding Project (B20231006); Suzhou Social Development Technology Innovation Project (SS202134)

Received: 2024-05-11 Revised: 2024-08-17