

高速隐极同步发电机电磁振动分析及抑制^{*}

苏 武, 郭云珺, 苏振中, 孟繁庆

(海军工程大学 舰船综合电力技术国防科技重点实验室, 湖北 武汉 430033)

摘 要: 对高速隐极同步发电机气隙磁场以及径向电磁力波进行有限元仿真计算与分析, 研究并总结了不同磁导率磁性槽楔和不同槽分度数对电机电磁激振力的影响规律, 形成抑制该类电机电磁振动的优化方案。通过开展高速发电机机脚实测振动频率与电磁激振力波频谱对比研究, 验证了径向电磁力波计算与分析的正确性。在此基础上, 对优化方案下的电机电磁振动进行预估分析, 转子齿谐波振动加速度级降低达 13.5 dB, 总振级降低 4.6 dB, 从而验证了优化方案的有效性, 相关分析方法和优化措施为抑制该类发电机的电磁振动提供可靠的参考。

关键词: 高速隐极同步发电机; 径向电磁力波; 磁性槽楔; 槽分度数; 电磁振动

中图分类号: TM 341 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2018)01-0069-08

Analysis and Suppression of Electromagnetic Vibration of High Speed Non-Salient Pole Synchronous Generator^{*}

SU Wu, GUO Yunjun, SU Zhenzhong, MENG Fanqing

(National Key Laboratory of Science and Technology on Vessel Integrated Power System, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: As the high speed non-salient pole synchronous generator electromagnetic vibration was prominent, the air gap magnetic field and the radial electromagnetic force wave of the synchronous generator were analyzed and calculated by the finite element method. The influence of different magnetic permeability slot wedges and different number of slots on the electromagnetic vibration force of the motor was studied and summarized, and the optimization scheme of reducing the electromagnetic vibration was formed. The correctness of the analysis and calculation of the radial electromagnetic force wave was verified by the comparison of the vibration frequency of the motor foot and the electromagnetic vibration force wave spectrum. On the basis of this, the electromagnetic vibration under the optimization scheme was estimated, the rotor tooth harmonic acceleration was reduced by 13.5 dB and the total vibration level was reduced by 4.6 dB, and the validity of the optimization scheme is verified. The relevant analytical method and optimization measure provided a reliable reference for suppressing the electromagnetic vibration of the high speed generators.

Key words: high speed non-salient pole synchronous generator; radial electromagnetic force wave; magnetic slot wedge; number of slots; electromagnetic vibration

0 引 言

电机的噪声水平是衡量其性能的一项重要指标^[1]。机械振动、空气动力振动以及电磁振动是电机的主要噪声源, 其中电磁振动对电机

的影响较大。电机气隙中各次谐波磁场相互作用产生随时间和空间变化的径向电磁力波是电磁振动与噪声最主要的振源。目前有较多的文献利用有限元法对异步电机电磁激振力进行研究^[2-5]。文献[6-8]利用解析法以及有限元法

^{*} 基金项目: 国家重点基础研究发展项目(973 计划)(2013CB035601); 国家自然科学基金项目(51690181, 51407192)

作者简介: 苏 武(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高速发电机电磁振动。

对永磁电机电磁激振力进行了研究,有限元法能考虑较多因素,计算较为精确。但是,深入研究隐极同步发电机电磁振动的文献较少,尤其是对于高速发电机,电磁振动主要分布在中高频段,对总振级影响较大。由于电磁振动为电机固有属性,不可能消除,因此需在前期设计阶段对其进行抑制,因而研究高速隐极同步发电机电磁振动及其抑制方法十分重要。

隐极同步发电机由于定子、转子铁心表面均开槽,且转子大齿表面开有阻尼槽,导致气隙磁导分布急剧变化,气隙磁密谐波含量增大,尤其是定子、转子齿谐波分量较大,由此产生的电磁振动与噪声将对电机的运行性能产生较大的影响。文献[9-11]对降低异步电动机电磁噪声进行了探讨,通过改变定、转子槽配合,转子斜槽或斜极,采用磁性槽楔,改变气隙宽度等措施降低电机电磁振动。但是对于高速隐极发电机而言,转子一般为整体实心锻造,不便采用转子斜槽或斜极;若减小气隙宽度,同步电抗增大,短路比减小,电机运行稳定性降低;若增大气隙宽度,转子用铜量增大,制造成本增加。因此,本文将重点研究采用磁性槽楔以及改变转子槽分度数来降低电机电磁振动。

文献[12-14]研究了磁性槽楔对电机性能的影响,但只是定性指出采用磁性槽楔可以降低电机径向电磁力波。文献[15-17]研究了转子采用不同槽数对电机性能的影响,但都没有分析改变转子槽分度数对电机电磁激振力的影响。

本文以1台高速整流隐极同步发电机为例,利用解析法以及场路耦合时步有限元法对气隙磁密及径向电磁力波进行分析,研究了转子采用不同相对磁导率磁性槽楔及不同槽分度数对电机电磁激振力的影响,选取合适的优化方案降低电机电磁振动。通过开展电机机脚实测振动频率与电磁激振力波频谱对比研究,验证了径向电磁力波计算与分析的正确性,在此基础上,对优化方案下的电磁振动进行了预估和分析。

1 研究对象主要参数及有限元模型

以某型号高速整流隐极同步发电机为研究对象,其主要参数如表1所示。

表1 隐极同步发电机主要电磁参数

电磁参数	数值	电磁参数	数值
励磁方式	无刷励磁	转子槽分度数	36
极对数	2	励磁绕组槽数	24
电频率基频/Hz	216.67	定子槽数	96

如图1所示为该电机结构图。利用Ansoft电磁场软件建立该电机二维模型如图2所示。

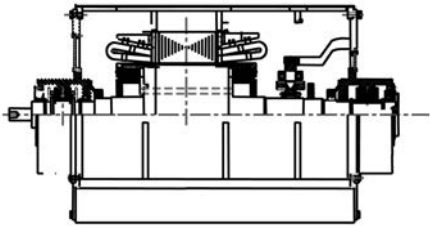


图1 隐极同步发电机结构图

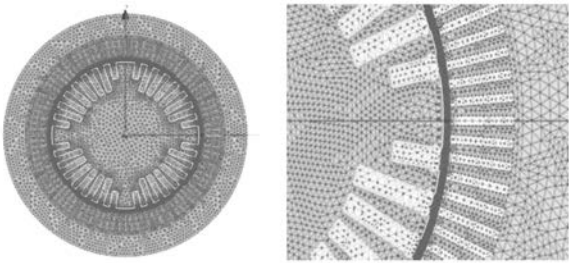


图2 有限元仿真模型及为剖分细节

利用Ansoft maxcir模块建立电机外电路仿真模型,如图3所示。在直流侧加载不同的电阻、电感模拟电机在不同负载工况下运行,将电阻值设为无穷大即可对空载工况进行仿真。

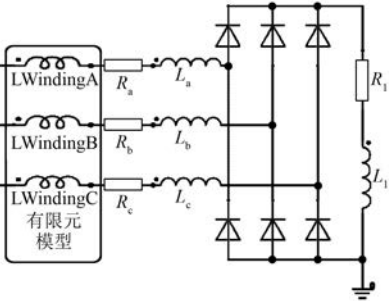


图3 外电路模型

2 气隙磁密分析

电机运转时,气隙中定、转子各次谐波磁场相互作用产生随时间和空间变化的电磁力波,其中,径向电磁力波为电磁振动与噪声最主要的振源。

由于隐极同步发电机径向气隙磁密远大于切向气隙磁密,因而可以忽略切向气隙的影响,下文提到的气隙磁密均是指径向气隙磁密。

2.1 气隙磁密解析分析

隐极同步发电机负载工况时,气隙磁场由励磁磁场以及电枢反应磁场组成,即负载时气隙磁密为^[9]

$$b_r(\theta, t) = [f_1(\theta, t) + f_2(\theta, t)] \cdot \lambda(\theta, t) \quad (1)$$

式中: $f_1(\theta, t)$ ——电枢反应磁动势;

$f_2(\theta, t)$ ——励磁磁动势;

$\lambda(\theta, t)$ ——包含定子、转子开槽以及铁心饱和的气隙磁导。

由文献[9]可得 $f_1(\theta, t)$ 、 $f_2(\theta, t)$ 、 $\lambda(\theta, t)$ 三者的具体表达式。

由式(1)得到气隙磁密谐波主要分量如表2所示。表2中 p 为极对数, Z_1 为定子槽数, Z_2' 为转子槽分度数, m 为定子绕组相数, f_1 为电频率基频, k_1 、 k_2 、 k_3 均为 ± 1 , ± 2 , $\pm 3 \cdots$, r 、 k_4 均为 $0, 1, 2 \cdots$ 。当阶数与频率同号时为正转波,异号时为反转波。表2中编号1表示气隙磁密基波分量;编号2表示气隙磁导不变部分产生的磁密分量;编号3表示转子磁导齿谐波分量, $k_2 = \pm 1$ 表示转子一阶齿谐波;编号4表示定子磁导齿谐波分量, $k_1 = \pm 1$ 表示定子一阶齿谐波;编号5表示定子绕组相带谐波分量;编号6表示铁心饱和时磁密分量。气隙磁密中基波分量以及定、转子齿谐波分量对电磁振动影响较大,尤其是定、转子一阶齿谐波。

表2 径向气隙磁密谐波主要分量

编号	阶数	频率/Hz	编号	阶数	频率/Hz
1	p	f_1	4	$k_1 Z_1 + p$	f_1
2	$(2r+1)p$	$(2r+1)f_1$	5	$(2mk_3+1)p$	f_1
3	$k_2 Z_2' + p$	$(k_2 Z_2'/p+1)f_1$	6	$(2k_4+1)p$	$(2k_4+1)f_1$

2.2 气隙磁密仿真分析

利用第1节建立的时步有限元仿真模型,以空载为例,气隙中径位置处的径向磁密分布如图4所示, I 为转子大齿表面受定子开槽影响出现的凹坑; II 为大齿表面受阻尼槽影响产生的凹坑,该凹坑最深,说明阻尼槽对气隙磁场的影响最大; III、IV、V 均为励磁绕组槽产生的凹坑,励磁绕组离大齿侧越近,凹坑越深,即对气隙磁场的影响程度越大。

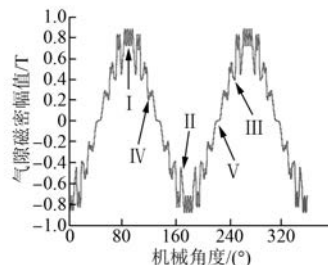


图4 径向气隙磁密空间分布

对气隙磁密分布进行傅里叶分解,以基波幅值为基准,各次谐波相对幅值如图5所示。17次与19次谐波幅值最大,由解析分析可知其为转子一阶齿谐波。47次与49次谐波为定子一阶齿谐波。

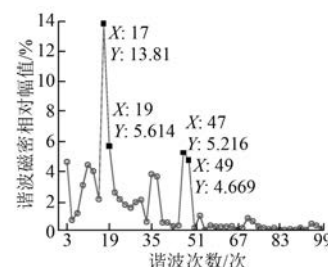


图5 径向气隙磁密谐波相对幅值

设定瞬态时长为电机一个旋转周期,得到气隙中径处某点磁密随时间变化波形,利用傅里叶分解得到频谱如图6所示。受定子、转子开槽的影响,磁密谐波含量较多,幅值最大的1倍频与17倍频,分别为基波与转子一阶齿谐波。负载工况时气隙磁密计算方法类似。

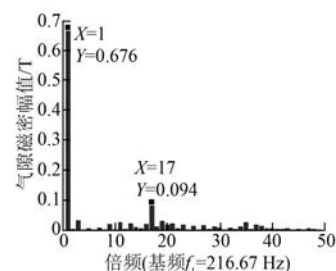


图6 径向气隙磁密时间频谱

3 径向电磁力分析

电磁力波切向分量产生电磁转矩,而径向电磁力波使定子铁心和机座产生周期性的振动变形,这是电磁振动与噪声最主要的振源。

3.1 径向电磁力解析分析

根据麦克斯韦应力张量法,作用于定子铁心内表面的单位面积的径向电磁力为

$$p_r(\theta,t) = \frac{b_r(\theta,t)^2}{2\mu_0} \tag{2}$$

式中: $b_r(\theta,t)$ ——径向气隙磁密;
 μ_0 ——空气磁导率。
将径向气隙磁密表达式(1)代入式(2)中,当忽略恒定分量以及次要分量时径向电磁力为

$$p_r(\theta,t) = \frac{1}{2\mu_0} \left\{ \begin{aligned} &\frac{B_1^2}{2} \cos(2p\theta - 2\omega_1 t) + \sum_{v_z} \frac{B_1 B_{v_z}}{2} \cos[(v_z + p)\theta - 2\omega_1 t] + \\ &\sum_{\mu_z} \frac{B_1 B_{\mu_z}}{2} \cos\left[(\mu_z \pm p)\theta - \left(\frac{\mu_z}{p} \pm 1\right)\omega_1 t\right] + \\ &\sum_{\mu} \sum_v B_{\mu} B_{av} \cos\left[(\mu + v)\theta - \left(\frac{\mu}{p} + 1\right)\omega_1 t + 90^\circ\right] + \\ &\sum_v B_{v_{z1}} B_{av} \cos[(v + p \pm Z_1)\theta - 2\omega_1 t + 90^\circ] + \\ &\sum_v B_{v_{z1}} B_{av} \cos[(v - p \pm Z_1)\theta + 90^\circ] + \\ &\sum_v B_{\mu_{z1}} B_{av} \cos\left[(v + p \pm Z'_2)\theta - \left(2 \pm \frac{Z'_2}{p}\right)\omega_1 t + 90^\circ\right] + \\ &\sum_v B_{\mu_{z1}} B_{av} \cos\left[(v - p \pm Z'_2)\theta - \left(\pm \frac{Z'_2}{p}\right)\omega_1 t + 90^\circ\right] \end{aligned} \right. \tag{3}$$

式(3)中每一项表达式的阶数及频率如表3所示。第1项是主极磁场基波磁密自身产生的力波分量,该力波幅值最大;第2项与第3项分别是定子、转子磁导齿谐波产生的力波分量,该力波对电机电磁振动的影响较大,尤其是定子、转子一阶磁导齿谐波;第4项是电枢反应磁场与励磁磁场作用产生的力波分量;第5项与第6项是电枢反应磁场与定子一阶磁导齿谐波作用产生的力波分量;第7项与第8项是电枢反应磁场与转子一阶磁导齿谐波作用产生的力波分量。

表3 径向电磁力谐波主要分量		
编号	阶数	频率/Hz
1	$2p$	$2f_1$
2	$k_1 Z_1 + 2p$	$2f_1$
3	$k_2 Z'_2 + p \pm p$	$(k_2 Z'_2/p + 1 \pm 1)f_1$
4	$(r + mk_3 + 1)2p$	$(r + 1)2f_1$
5	$(mk_3 + 1)2p \pm Z_1$	$2f_1$
6	$2mk_3 p \pm Z_1$	0
7	$(mk_3 + 1)2p \pm Z'_2$	$(Z'_2/p + 2)f_1$
8	$2mk_3 p \pm Z'_2$	$(Z'_2/p)f_1$

3.2 径向电磁力仿真分析

将径向气隙磁密数据代入式(2)中,利用傅

里叶分解得到径向电磁力空间频谱如图7所示,由于定、转子开槽的影响,径向电磁力空间分布不均匀,谐波含量较多。由频谱可知,4阶力波幅值最大,为基波分量;36阶与32阶力波为转子一阶齿谐波;96阶力波为定子一阶齿谐波。

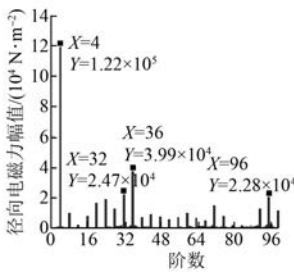


图7 径向电磁力空间频谱

图8所示为径向电磁力波时间频谱,幅值最大的为2倍频、16倍频与18倍频,其中2倍频除

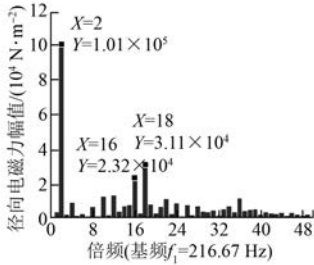


图8 径向电磁力时间频谱

了基波分量还包含了定子一阶齿谐波分量,16 倍频与 18 倍频均为转子一阶齿谐波分量。

由于径向电磁力波是随时间与空间变化的二维函数,径向力波为行波。由旋转磁场谐波理论,将径向力波二维傅里叶分解,得到多个正转或者反转的力波,则径向电磁力波即为这些力波的叠加^[3]:

$$p_r(\theta,t)=\sum_m\sum_nP_{r,mn}\cos(\omega_nt-m\theta+\theta_{r,mn})\tag{4}$$

式中: $P_{r,mn}$ ——力波幅值;
 m ——力波空间阶数;
 n ——时间谐波次数;
 θ ——空间圆周机械角度;
 ω_n ——时间角频率, $\omega_n=2\pi f_n$, f_n 为力波旋转频率;
 $\theta_{r,mn}$ ——初始角。

将径向电磁力波数据二维离散傅里叶分解,幅值靠前的力波频率、阶数、幅值及相位如表 4 所示,阶数为正是正转波,为负是反转波。表 4 中,2 倍频 4 阶力波为基波分量,且不能降低,但是该电机定子固有频率远远大于 2 倍频,因此降低 2 倍频电磁振动并不特别重要;0 倍频力波只使定子铁心产生静变形,并不产生振动与噪声。对电磁振动影响最大的为 18 倍频 36 阶力波,其为转子一阶齿谐波,且与电机固有频率较为接近,因此降低 18 倍频即降低转子齿谐波尤为重要。

表 4 主要的径向电磁力波分量

序号	倍频(基频 f_1)	阶数	幅值/($\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$)	相角/($^\circ$)
1	2	4	1.213 2e5	2.808 2
2	0	0	1.127 3e5	0
3	18	36	3.743 2e4	-154.789 5
4	16	32	2.277 5e4	-157.631 5
5	0	96	2.210 4e4	-162.745 8
6	12	24	1.760 8e4	16.820 0
7	10	20	1.528 7e4	13.992 5
8	14	28	1.249 9e4	19.691 4
9	2	-92	1.207 3e4	-159.918 0
10	2	100	1.175 3e4	165.596 2
11	4	8	1.004 6e4	5.507 6
12	36	72	9.915 3e3	-129.469 8

4 电磁激振力抑制方法

根据第 3 节的分析,转子一阶齿谐波 18 倍频对该电机电磁振动的影响最大。由文献[9-11],可以通过改变转子槽分度数,转子斜槽,采用磁性槽楔,改变气隙宽度等措施降低转子齿谐波。由于该电机转子为整体实心锻造,不便采用转子斜槽;同时,减小气隙宽度,同步电抗增大,短路比减小,电机运行稳定性降低;增大气隙宽度,转子用铜量增大,制造成本增加,因此,本文研究采用磁性槽楔以及改变转子槽分度数来降低转子齿谐波。

4.1 磁性槽楔对电磁激振力的影响

当忽略磁性槽楔磁饱和的影响,假定其相对磁导率是常数,根据文献[13],国内外对于槽楔相对磁导率常数的值一般选用 3~10,本文研究转子采用相对磁导率为 3、5、7、9 磁性槽楔对转子齿谐波的影响。

不改变发电机的其他参数,以空载为例,利用有限元仿真计算得到径向电磁力空间及时间频谱如图 9 所示。采用磁性槽楔后力波基波幅值增大,这是由于将磁性槽楔嵌入转子槽口后,转子由开口槽等效为半开口槽或闭口槽,气隙磁导分布变得均匀,气隙磁阻减小,使得电机主磁通增加,气隙磁密基波幅值增大。

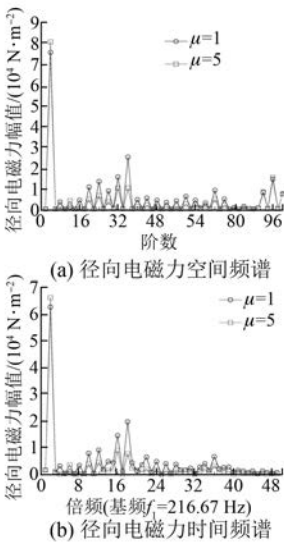


图 9 径向电磁力空间及时间频谱

力波各次谐波幅值减小,尤其是 36 阶以及 18 倍频力波幅值下降得最明显,而 96 阶力波幅值无明显变化,说明转子采用磁性槽楔明显降低

转子齿谐波,但对定子齿谐波无明显影响。

对力波进行二维傅里叶分解,基波以及转子一阶齿谐波幅值如表 5 所示。采用磁性槽楔后力波基波幅值增大,但相对于其本身则增大的幅度并不大,而转子一阶齿谐波幅值明显减小,但相对磁导率为 5 之后减小的幅度逐渐降低。

表 5 主要的转子齿谐波力波幅值

径向电磁力 幅值/(N·m ⁻²)	槽楔相对磁导率				
	1	3	5	7	9
2 倍频 4 阶	7.506e4	7.908e4	8.018e4	8.049e4	8.050e4
18 倍频 36 阶	2.369e4	1.351e4	9.544e3	7.451e3	6.177e3

4.2 槽分度数对电磁激振力的影响

对于传统槽楔的隐极同步发电机,转子线槽数与槽分度数的比值一般都在 0.64~0.75^[17]。由于该电机转子表面线速度较高,优化方案对转子槽数、尺寸等不能有较大变化。不改变线槽数,本文研究槽分度数 33、34、36 对转子齿谐波的影响。

以空载为例,利用有限元法得到不同槽分度数径向电磁力空间及时间频谱如图 10 所示。随着槽分度数的减小,4 阶力波基波幅值减小;槽分度数 33 能明显降低 36 阶力波幅值,而 28、32 阶力波幅值较大,这是由于气隙磁密转子一阶磁导齿谐波阶数为电机极数 2p 的整数倍,当槽分度数为 33 时,转子一阶磁导齿谐波阶数不是 33,而是

离槽分度数最接近的电机极数 2p 的整数倍,即 32,由第 3 节解析分析可知,28、32 阶力波均为槽分度数 33 的转子一阶齿谐波;槽分度数 34 中 28、36 阶力波幅值较大,但分别小于槽分度数 33、36 对应的阶次力波幅值。96 阶力波仍为定子一阶齿谐波,改变槽分度数对定子齿谐波影响不大。

随着槽分度数减少,2 倍频力波幅值也减小。槽分度数 33 能明显降低 18 倍频力波幅值,虽然其转子一阶齿谐波 14 倍频幅值增大,但对于该电机而言,18 倍频电磁振动影响较大。槽分度数 34 的 14 倍频与 18 倍频力波幅值均较大。

对电磁力波进行二维傅里叶分解,得到基波及转子一阶齿谐波如表 6 所示。随着槽分度数的减少,力波基波幅值逐渐减小,槽分度数 33 的 18 倍频 36 阶力波幅值明显减小。

表 6 主要的转子齿谐波力波幅值

槽分度数	力波类型	倍频	阶数	幅值/(N·m ⁻²)
33	基波	2	4	7.033 0e4
	转子一阶齿谐波	14	28	2.550 6e4
	转子一阶齿谐波	16	32	1.966 0e4
	转子一阶齿谐波	18	36	3.364 1e3
34	基波	2	4	7.214 8e4
	转子一阶齿谐波	14	28	2.346 6e4
	转子一阶齿谐波	18	36	1.489 0e4
	转子一阶齿谐波	16	32	8.325 2e3
36	基波	2	4	7.505 6e4
	转子一阶齿谐波	18	36	2.368 8e4
	转子一阶齿谐波	16	32	1.427 9e4
	转子一阶齿谐波	20	40	4.312 0e3

综合磁性槽楔以及转子槽分度数对转子齿谐波的影响。由于槽楔相对磁导率为 5 之后转子齿谐波降低的幅度逐渐减小,且相对磁导率较大时会引起槽楔的涡流损耗,加速槽楔老化^[14],因此,本文降低 18 倍频即转子一阶齿谐波的电磁振动优化方案如表 7 所示。

表 7 转子一阶齿谐波优化方案

方案	原方案	优化方案
转子槽分度数	36	33
槽楔相对磁导率	1	5

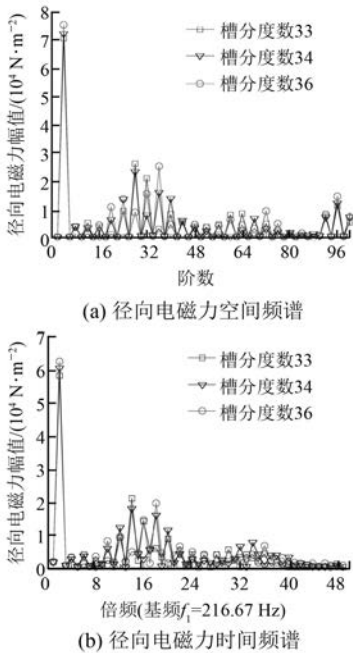


图 10 不同槽分度数径向电磁力空间及时间频谱

5 优化方案电磁振动预估

5.1 原方案电磁激振力试验验证

由于直接测量电机电磁力非常困难,对振动影响较大的电磁力波的频率与电磁振动的频率存在对应关系,本文通过测量电机机脚振动频谱特征频率与电磁激振力波的频谱对比,间接验证径向电磁力波分析的正确性。该电机由于转速较高,所以机械振动比较突出。图 11 所示为试验平台,试验测得空载稳态电机机脚振动加速度频谱如图 12 所示。图 12 中标记的是 95 dB 以上的振动加速度级。

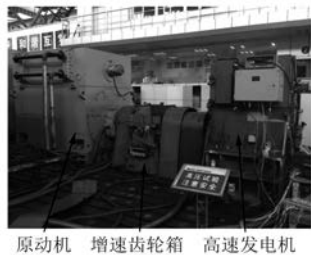


图 11 试验测量平台

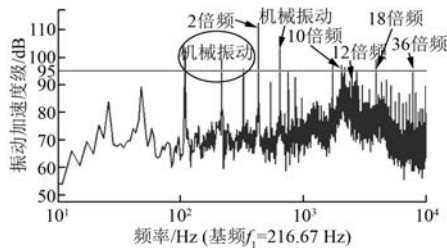


图 12 电机机脚振动加速度频谱

主要的电磁振动与径向电磁力波对应关系如表8所示,主要的电磁振动均与相应频率的电磁

表 8 电磁振动与力波对比(基频 f_1 ,力波幅值单位 N/m^2)

实测电磁 振动倍频	径向电磁力波 (有限元法)			径向电磁力波 (解析法)	
	倍频	阶数	幅值	倍频	阶数
2	2	4	1.213 2e5	2	4
	2	-92	1.207 3e4	2	-92
	2	100	1.175 3e4	2	100
10	10	20	1.528 7e4	10	20
12	12	24	1.760 8e4	12	24
18	18	36	3.743 2e4	18	36
36	36	72	9.915 3e3	36	72

激振力相对应,且电磁振动中以 2 倍频与 18 倍频影响最大。2 倍频包括基波以及定子一阶齿谐波,其中基波分量最大,且不能降低;18 倍频主要为转子一阶齿谐波分量。试验结果表明,实测电磁振动的特征频率与第 3 节径向电磁力波分析结果一致,验证了其正确性。

5.2 优化方案电磁振动预估

同样以空载为例,利用有限元法得到额定空载工况下优化方案径向电磁力波,对其二维离散傅里叶分解,将同频率不同阶次的力波有效值取平方和得到力波频谱如图 13 所示。由图 13 可知,主要倍频力波幅值均有一定程度的降低,其中 18 倍频下降得最为明显。

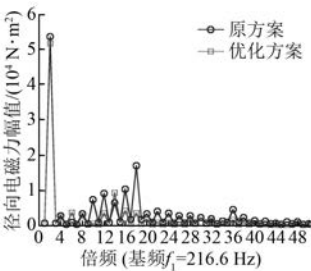


图 13 径向电磁力频谱

由文献[18]中利用径向电磁力对电磁振动预估方法,对额定空载工况下优化方案电磁振动进行预估。表 9 所示为原方案与优化方案振动加速度级对比,原方案为实测值,优化方案为预估值。

表 9 原方案与优化方案对比

振动加速度级/dB	原方案	优化方案
2 倍频	107.37	107.11
18 倍频	109.74	96.19
电磁振动总振级	114.73	110.08

从表 9 可知,采用优化方案后,2 倍频电磁振动变化不大,但 18 倍频由 109.74 dB 降为 96.19 dB,下降幅度达到 13.55 dB,减振效果比较明显,总振级也由 114.73 dB 降为 110.08 dB,从而验证了电磁振动优化方案的有效性。

6 结 语

本文以 1 台高速整流隐极同步发电机为例,利用解析法以及场路耦合时步有限元法对气隙磁

密及径向电磁力波进行分析,分别研究了转子采用不同相对磁导率磁性槽楔及不同槽分度数对电磁激振力的影响。分析表明转子采用磁性槽楔后可以明显降低转子齿谐波,但对定子齿谐波无明显影响,随着磁导率的增大,转子齿谐波逐渐减小;另一方面,改变转子槽分度数可以改变转子一阶齿谐波频率以及阶数,槽分度数减小使转子一阶齿谐波频率降低,使得电机远离共振频率,同时对定子齿谐波无明显影响。综合两者的优势最后形成电磁振动优化方案。

通过对电机机脚振动测量的频谱与电磁激振力波的频谱进行对比,验证了径向电磁力波分析的正确性,同时对优化方案电磁振动进行了预估,采用优化方案后电磁振动基频无明显变化,但转子一阶齿谐波 18 倍频明显降低,下降幅度达 13.55 dB,且电磁振动总振级降低 4.65 dB,从而验证了电磁振动优化方案的有效性,为高速隐极发电机降低电磁振动提供了可靠的参考。

【参考文献】

- [1] 陈世坤.电机设计[M].北京:机械工业出版社,1990.
- [2] 吴旭升,胡风革,史振宇.逆变器-异步电机电磁噪声的分析与研究[J].海军工程大学学报,2014,26(5): 1-5.
- [3] 王荀,邱阿瑞.笼型异步电动机径向电磁力波的有限元计算[J].电工技术学报,2012,27(7): 109-117.
- [4] MARTINEZ M D, LAI J C S. Acoustic noise prediction in a vector controlled induction machine [C] // IEEE Inter Conf on Electric Machines and Drives, 2003: 104-110.
- [5] SCHLENSOK C, HENNEBERGER G. Calculation of force excitations in induction machines with centric and excentric positioned rotor using 2-d transient FEM[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40(2): 782-785.
- [6] ZHU Z Q, XIA Z P, WU L J, et al. Analytical modeling and finite-element computation of radial vibration force in fractional-slot permanent-magnet brushless machines [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46(5): 1908-1918.
- [7] ZHU Z Q, XIA Z P, WU L J, et al. Influence of slot and pole number combination on radial force and vibration modes in fractional slot PM brushless machines having single and double layer windings[C] // In 2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2009: 3443-3450.
- [8] WANG J, XIA Z P, LONG S A, et al. Radial force density and vibration characteristics of modular permanent magnet brushless AC machine[J]. IEEE Proceedings: Electric Power Applications, 2006, 153(6): 793-801.
- [9] 陈永校,诸自强,应善成.电机噪声的分析和控制[M].杭州:浙江大学出版社,1987.
- [10] 刘吾林,贾玉清.降低笼型三相异步电动机电磁噪声的探讨[J].防爆电机,2005,40(5): 42-43.
- [11] 刘彦华,乔建伟,胡大团.降低小型异步电动机电磁噪声的探讨与实践[J].防爆电机,2005,40(6): 46-48.
- [12] 梁艳萍,陈晶,刘金鹏.磁性槽楔对高压感应电动机电磁参数和性能的影响[J].电机与控制学报,2010,14(3): 1-5.
- [13] 李军丽,胡春雷.磁性槽楔在电机节能技术中的应用[J].中小型电机,2005,32(2): 57-59.
- [14] 孟大伟,刘慧敏,冯守智,等.发电机用磁性槽楔对电磁参数与性能的影响[J].防爆电机,2014,49(3): 1-5.
- [15] 刘超.1 000 MW 级半速汽轮发电机电磁性能分析与计算[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2010.
- [16] 王晓远,赵玉双,高森.转子槽数对电动汽车用异步电机性能的影响[J].天津大学学报,2016,49(5): 450-456.
- [17] 汪耕,李希明.大型汽轮发电机设计、制造与运行[M].上海:上海科学技术出版社,2000.
- [18] 孟繁庆,王东,张贤彪.高速同步发电机电磁振动预估方法研究[G] // 电机工程学会年会,2015.

收稿日期: 2017 -06 -08

欢迎投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告