

基于转子轴向通风孔尺寸及拓扑结构的电机性能研究

刘彦华¹, 刘玉宝², 孙庆玲², 乔建伟²

(1. 河南工业职业技术学院, 河南 南阳 473008;

2. 卧龙电气南阳防爆集团股份有限公司, 河南 南阳 473008)

摘要: 针对传统路法在定量分析转子轴向通风孔尺寸对电机性能影响时表现出的狭隘性, 以 1 台 400 kW、6 000 V 高压异步电动机为例, 建立了场-路耦合的二维瞬态电磁场时步有限元模型, 分别对不同的转子轴向通风孔尺寸拓扑结构下电机内的电磁场进行了计算, 分析了转子轴向通风孔尺寸及拓扑结构对电机内气隙磁密、损耗、径向电磁力等电磁特征量影响的演变规律。以此为基础, 探讨了转子轴向通风孔尺寸及拓扑结构对电机起动、运行性能的影响。最后, 通过对比电机有限元计算结果与试验结果, 验证了计算方法的准确性, 为转子轴向通风孔尺寸及拓扑结构的设计和优化提供了理论依据。

关键词: 异步电动机; 转子轴向通风孔; 电磁场; 性能

中图分类号: TM 343 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)10-0082-07

Research on Motor Performance Based on Rotor Axial Vent Hole Size and Topology Structure

LIU Yanhua¹, LIU Yubao², SUN Qingling², QIAO Jianwei²

(1. Henan Polytechnic Institute, Nanyang 473008, China;

2. Wolong Electric Nanyang Explosion Protection Group Co., Ltd., Nanyang 473008, China)

Abstract: Traditional circuit method was limited in quantitative analysis of the effects of rotor axial vent hole size on motor parameters. Based on a high-voltage (HV) asynchronous motor with output of 400 kW and voltage of 6 000 V, a field-circuit coupled time-stepping FEM model of 2-D transient electromagnetic field was established. With the variation of rotor axial vent hole size and topological structure, the influence on electromagnetic parameters such as air-gap flux density, losses, and radial electromagnetic force, was calculated and analyzed. Furthermore, the effect of rotor axial vent hole size and topology structure on starting and operating performance of the motor was also investigated. Finally, by comparing FEM simulation with experimental results, the correctness of this method was verified. A theoretical basis for the design and optimization of rotor axial vent hole size and topological structure was provided.

Key words: asynchronous motor; rotor axial vent hole; electromagnetic field; performance

0 引言

对于大、中型高压异步电动机而言, 转子轴向通风孔尺寸及拓扑结构的设计对电机本身至关重要, 将影响电机的电磁性能, 使转子轴向通风孔两

侧铁心磁密发生改变, 磁路饱和程度也会影响功率因数, 导致性能参数发生变化。同时, 不同的转子轴向通风孔尺寸及拓扑结构也会对电机通风孔处的风阻、电机冷却、电机温升带来较大的影响, 严重时会导致电机温升过高无法运行。因此, 有

作者简介: 刘彦华(1977—), 女, 硕士, 副教授, 研究方向为电机电气与自动控制技术。

刘玉宝(1984—), 男, 硕士, 研究方向为交流电机动态分析与电机电磁场数值计算。

孙庆玲(1986—), 女, 硕士, 研究方向为电机电磁理论与电磁场数值计算。

必要对转子轴向通风孔尺寸及拓扑结构对电机性能的影响进行分析,为电机轴向通风孔的尺寸设计和优化提供一定的理论帮助^[1-4]。

应用传统路法并不能精确地计算出转子轴向通风孔尺寸及拓扑结构对电机内磁场、电机参数特征量及性能的影响。时步有限元法可以充分考虑齿槽效应、饱和效应等影响电机性能的各种因素,从而准确获得气隙磁场分布,为分析转子轴向通风孔尺寸及拓扑结构电机性能的影响提供有效的计算方法。本文以 1 台高压异步电动机为例,建立二维场-路耦合的电机数学模型和物理模型,其中磁场与外电路采用直接耦合方式,对具有不同转子轴向通风孔尺寸及拓扑结构的电机进行了时步有限元分析。从理论分析和数值仿真两个角度详细分析转子轴向通风孔尺寸及拓扑结构对电机气隙磁密分布、电机运行性能以及损耗的影响,对比分析了电机参数随转子轴向通风孔尺寸及拓扑结构变化的趋势,所得结论为合理地选择转子轴向通风孔尺寸及拓扑结构提供了一定的理论依据。

1 电机二维全域电磁场模型

1.1 高压异步电动机的模型及基本数据

高压异步电动机基本数据如表 1 所示。

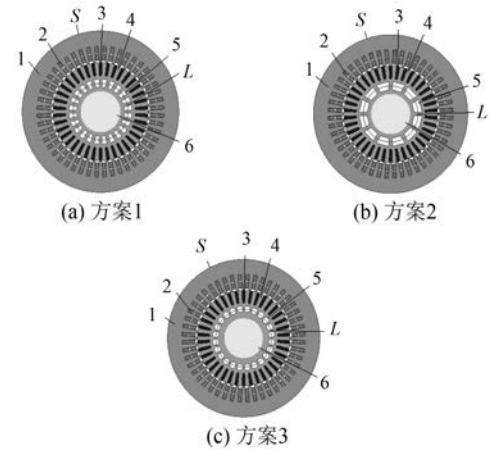
表 1 高压异步电动机基本数据

参数名称	参数值	参数名称	参数值
额定功率/kW	400	频率/Hz	50
额定电压/V	6 000	极数	4
定子外径/mm	620	定子槽数	48
定子内径/mm	380	转子槽数	38

本文目标是研究转子轴向通风孔尺寸及拓扑结构对电机性能的影响,同时考虑电机端部结构的复杂性。为减小计算模型尺寸及有限元剖分数量,分别建立了不同转子轴向通风孔尺寸及拓扑结构电机的二维电磁场计算模型,如图 1 所示。3 个方案如下。

方案 1:原图纸方案,没有改变转子轴向通风孔(梯形通风孔,数量 24)。

方案 2:将方案 1 中转子上的 2 个通风孔改为 1 个大的通风孔(改后仍为梯形通风孔,数量 12,总的通风面积比方案 1 大)。



1-定子铁心; 2-定子绕组; 3-转子导条; 4-转子铁心; 5-通风孔; 6-转轴; S-定子外边界; L-磁密轨迹线

图 1 高压异步电动机二维电磁场计算模型

方案 3:把方案 1 中的梯形通风孔改为圆孔(通风面积同方案 1,数量 24,目的是与方案 1、2 对比)。

1.2 电磁场的基本方程

首先建立场-路耦合时步有限元模型,磁场与电路直接耦合,端部效应以端部阻抗的形式在外电路中予以考虑,根据求解条件及要求作出如下假设^[5]:

- (1) 铁心轴向有效长度内的电磁场按照二维场来处理,计算模型中定、转子内外边界的漏磁忽略不计;
- (2) 忽略位移电流及其影响,忽略电网电压中的高次谐波分量及定子绕组中的集肤效应;
- (3) 不计相间和槽间绝缘的影响;
- (4) 材料为各向同性,材料的磁导率均匀且不计磁导率随温度的变化。

基于上述假设,在计算的二维场中,由矢量磁位表示的电机二维瞬态电磁场的边值问题为

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} = -\mu J_z + \mu\sigma \frac{\partial A_z}{\partial t} \\ S: A_z = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: A_z ——磁矢位;
 μ ——磁导率;
 J_z ——传导电流密度;
 σ ——电导率;
 t ——时间。

将式(1)依据变分原理化为条件泛函方程,

然后对条件泛函方程离散化,在满足相应边界条件的基础上对多元方程组进行求解。在实际求解时,为了提高计算精确度,对不同的区域采取不同的剖分精确度。高压电机的剖分图如图 2 所示。

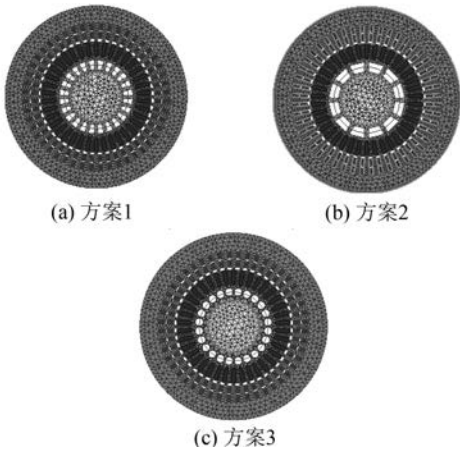


图 2 高压异步电动机剖分图

2 电机的起动性能计算及磁密分析

电机的起动性能主要包括起动电流和起动转矩。起动电流通过电磁场计算,迭代收敛后的定子电流即为电机的起动电流。由于起动时电机的转速为零,转差率为 1,需要对转差率进行迭代。不同转子轴向通风孔尺寸及拓扑结构的高压异步电动机起动时的磁场分布图如图 3 所示。

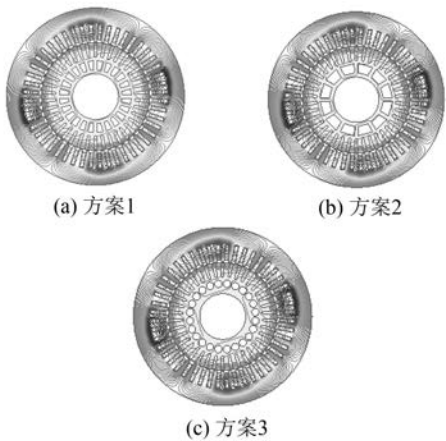


图 3 高压异步电动机起动时磁场分布图

由图 3 可以看出,电机起动时由于集肤效应作用,3 种方案转子上的磁力线都集中在转子的表面,而转子轴向通风孔之间的铁心几乎都没有磁力线通过^[6]。所设计的高压异步电动机(每槽

导体数 28 匝)的起动转矩、起动电流的计算值如表 2 所示。

表 2 不同轴向通风孔尺寸及拓扑结构时,电机的起动转矩、起动电流计算值

计算类型	不同轴向通风孔尺寸及拓扑结构		
	方案 1	方案 2	方案 3
起动转矩/(N·m)	2 995.1	2 985.8	2 983.7
起动电流/A	283.6	283.6	283.5

由表 2 中的数据可以得出,3 种方案时电机的起动转矩值、起动电流值彼此相差不大。由以上分析可知,只要转子上的轴向通风孔尺寸及拓扑结构设计相对合理,就对电机的起动性能没有太大影响。

3 电机负载下磁密、损耗、性能、转速、电磁力计算分析

3.1 额定工况下磁场分析

当电机旋转运行时,定、转子齿槽相对位置不断变化,气隙磁导会相应发生变化,磁动势的变化势必会影响气隙内磁密分布和磁密数值。同时,设计高压异步电动机时,为了降低铁耗、杂耗并得到良好的运行性能,降低电机运行时气隙中的谐波成分显得格外重要。本文分别对不同转子轴向通风孔尺寸及拓扑结构电机内电磁场进行了有限元数值计算,并对气隙磁密进行了提取以及数值的傅里叶分解。不同轴向通风孔尺寸及拓扑结构时,电机内气隙磁密值如图 4 所示。

从图 4 可以看出,气隙磁密波形由于齿槽的存在,导致气隙磁路对应的磁导大小不同,进而气隙磁密形成的并不是一个标准正弦波,而是呈现出锯齿状波形^[7]。由图 4 可见,具有不同的轴向通风孔尺寸及拓扑结构时的电机内气隙磁场数值波动大小不一,方案 2 电机内磁场数值波动较大。

为了考察不同的轴向通风孔尺寸及拓扑结构时电机谐波含量的分布,给出了 3 种方案时电机内气隙磁密的数值分解,如图 5 所示。

由图 5 可以看出,改轴孔后方案 2、方案 3 中谐波含量较高(主要是正转的转子齿谐波和反转的定子齿谐波含量较丰富),尤其方案 2 中 5 次谐波较大;同时,方案 2、方案 3 中的气隙磁密偏低。

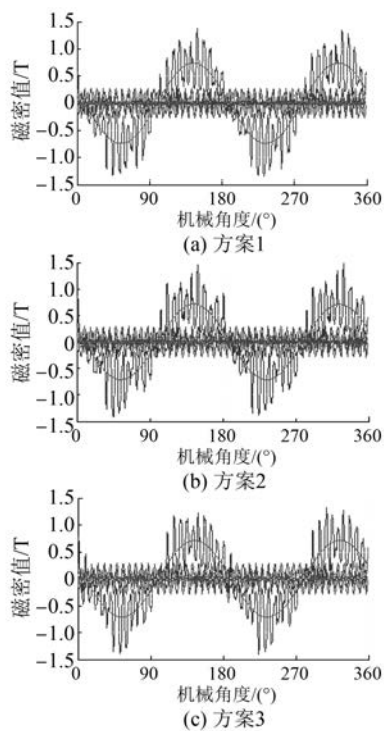


图4 不同轴向通风孔尺寸及拓扑结构时,电机内气隙磁密值

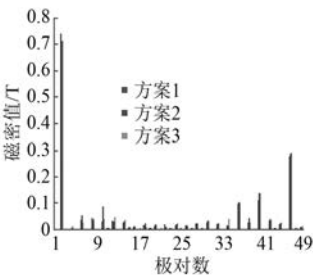


图5 不同轴向通风孔尺寸及拓扑结构时,电机内气隙磁密的谐波含量

为了更加直观地分析不同轴向通风孔尺寸及拓扑结构对电机气隙磁场的影响情况,本文通过对气隙磁密值进行傅里叶分解,定量地分析了不同气隙对电机内气隙磁密的影响。分析数据如表3所示。

由表3可知,电机额定负载运行时,方案2、方案3中气隙磁密基波幅值较方案1时分别降低了4.1%、3.8%。

方案1中,基波气隙磁密幅值0.742 3 T,极对数为10、14(5、7次谐波)的谐波含量占基波的

表3 不同轴向通风孔尺寸及拓扑结构时,电机内气隙磁密谐波含量幅值 T

计算类型	气隙内各谐波极对数与主波极对数的比值(谐波级次)									
	1	5	7	11	13	17	18	20	23	25
方案1	0.742 3	0.028 0	0.025 3	0.017 2	0.013 9	0.014 2	0.096 8	0.108 8	0.276 3	0.209 1
方案2	0.712 2	0.084 6	0.028 6	0.008 6	0.010 2	0.008 9	0.102 5	0.135 2	0.287 7	0.183 7
方案3	0.714 0	0.038 5	0.034 4	0.007 4	0.012 9	0.037 7	0.099 9	0.135 7	0.289 1	0.179 3

3.77%、3.41%,极对数为36、40的转子一阶齿谐波含量占基波的13.04%、14.66%,极对数为46、50的定子一阶齿谐波含量占基波的37.22%、28.17%。

方案2中,基波气隙磁密幅值0.712 2 T,极对数为10、14(5、7次谐波)的谐波含量占基波的11.88%、4.02%,极对数为36、40的转子一阶齿谐波含量占基波的14.39%、18.98%,极对数为46、50的定子一阶齿谐波含量占基波的40.40%、25.79%。

方案3中,基波气隙磁密幅值0.714 T。极对数为10、14(5、7次谐波)的谐波含量占基波的5.39%、4.82%,极对数为36、40的转子一阶齿谐波含量占基波的13.99%、19.01%,极对数为46、50的定子一阶齿谐波含量占基波的40.49%、

25.11%。

由以上分析数据可知,方案2、方案3中,气隙磁场的谐波含量较丰富,定、转子一阶齿谐波的含量较明显。

电机额定运行时,不同方案的转子轴向通风孔处磁力线分布如图6所示。

由图6可以看出,对应方案1、方案2中转子轴向通风孔两侧几乎为平行齿,磁力线分布较均匀,方案3中类似于双曲线齿型。方案1中通风孔内几乎没有漏磁,而方案2、方案3均有不同程度的漏磁。但是,方案1、方案2中的转轴中磁力线分布根数明显比方案3多。同时,方案1、方案3中磁力线经过的路径较为顺畅,而方案2中的磁力线走向较曲折,势必引起磁阻的增加,导致励磁磁动势增大、激磁电流增大。

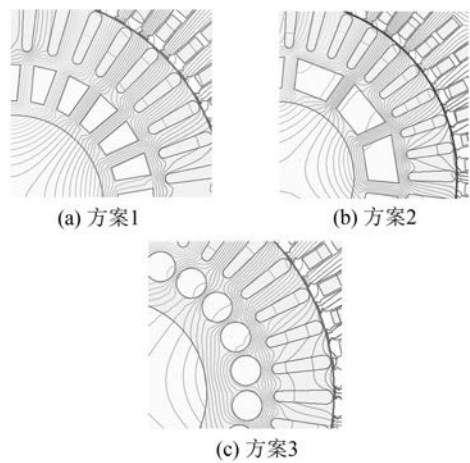


图6 高压异步电动机额定运行时磁场分布图

电机额定运行时,为了更好地观察转子通风孔两侧铁心处对应的磁密,取如图1所示的轨迹 L ,对应方案1、2、3稳态时的通风孔两侧的磁密如图7所示。

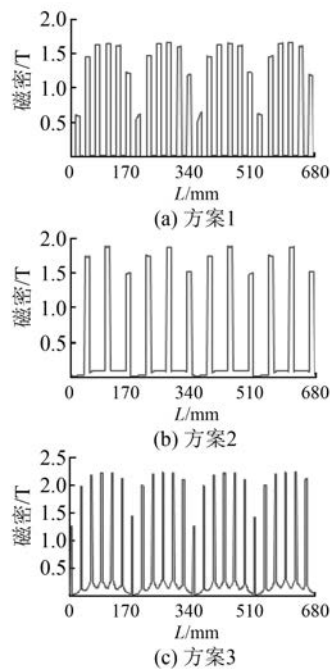


图7 转子轴向通风孔处轨迹线 L 对应的磁密值

从图7可以看出,3种方案通风孔两侧的磁密均呈柱状分布,磁密周期与电机周期相对应:方案1中通风孔两侧铁心最大磁密值为1.67 T,方案2中通风孔两侧铁心最大磁密值为1.90 T,方案3中通风孔两侧铁心最大磁密值为2.21 T。由此可以得出,方案2、方案3中转子轴向通风孔两

侧铁心处的磁密进入高度饱和状态,导致饱和磁路的磁阻增加,激磁磁动势增大,从而功率因数下降。

3.2 对电机铁耗、定子焦耳损耗的影响

具有不同转子轴向通风孔尺寸及拓扑结构的电机在额定工况运行时,电机内电磁场磁密分布及饱和程度的不同不仅会对电机的铁耗产生影响^[8],同时,磁密谐波含量、电流(包括谐波电流)的数值变化也会对定子绕组、转子导条的焦耳损耗产生影响。不同转子轴向通风孔尺寸及拓扑结构下电机内损耗如表4所示。

表4 不同转子轴向通风孔尺寸及拓扑结构下电机内损耗 W

计算类型	方案1	方案2	方案3
铁耗	5 527.8	5 768.6	5 652.2
定子绕组损耗	5 527.8	5 768.6	5 652.2
转子导条损耗	5 145.0	6 362.5	6 158.4
总损耗 Σ	16 490.1	20 763.3	20 027.5

由表4可得,方案2、方案3与方案1相比总损耗分别增加了25.9%、21.4%,而3种方案的铁耗数据基本相当,方案1中的铁耗相对较小,这是由于转子轴向通风孔尺寸及拓扑结构的更改主要影响到转子磁路,额定运行时转子的频率较低,铁耗主要在定子铁心上产生。定子铜耗增加较多,占比较大,方案2、方案3与方案1相比铜耗分别增加了48.4%、41.2%。同时,方案2、方案3中转子导条增加的损耗也较明显。定子绕组、转子导条对应损耗改变的主要原因是:转子轴向通风孔尺寸及拓扑结构的更改,导致磁路的磁阻发生变化,对应磁动势的改变而引起的功率因数降低,同时为了满足负载要求,定、转子电流势必然增加,从而引起焦耳损耗的增加。因此,不能单方面考虑增大通风孔尺寸或改为圆孔(目的是减小风阻),提高电机的换热能力,而是要综合考虑转子轴向通风孔尺寸及拓扑结构为不同数值时,电机的损耗增加量对电机温升的影响。

3.3 对电机性能的影响

不同转子轴向通风孔尺寸及拓扑结构对电机性能的影响如表5所示。

表 5 不同转子轴向通风孔尺寸及拓扑结构对电机性能的影响

性能指标	方案 1	方案 2	方案 3
额定功率因数	0.844	0.722	0.731
额定电流/A	49.9	59.8	58.3

由表 5 可知,方案 2、方案 3 相比方案 1 而言,功率因数降低得较多,功率因数分别降低了 14.45%、13.39%,电流值与方案 1 相比分别增加了 19.84%、16.83%,增加的电流会对绕组的损耗产生较大的影响(焦耳损耗与电流的平方成比例关系)。同时,电流数值的变化程度受到电机效率、功率因数的影响^[9-10]。

3.4 对转速的影响

图 8 所示为方案 1、方案 2、方案 3 下的速度响应图。由图 8 可以得出,方案 1、方案 2、方案 3 的电机额定运行速度分别为 1 483.1、1 479.8、1 480.2 r/min。方案 2 中的转速波动较大,方案 3 次之。

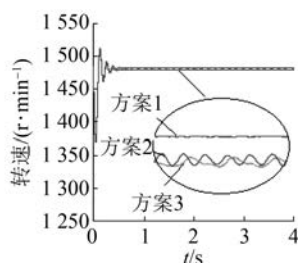


图 8 不同转子轴向通风孔尺寸及拓扑结构时速度响应

3.5 对径向电磁力波的影响

对于功率较大的高压异步电动机而言,振动和噪声也是备受关注的问题。振动和噪声不但影响电机本身的使用寿命,也影响其拖动设备的工作质量和效率,同时还严重地污染了人们的生活环境并对人体造成危害。

电磁噪声由电机运行过程中定、转子磁场相互作用产生的一系列电磁力波引起定、转子铁心振动而产生。不同气隙尺寸的选择可以有效地抑制电磁噪声。

根据麦克斯韦应力张量法,可得作用在电机定子或转子上的径向力密度和切向力密度为^[11-12]

$$f_n = \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{B_n^2}{2} - \frac{B_t^2}{2} \right) \quad (2)$$

$$f_t = \frac{1}{\mu_0} B_n B_t \quad (3)$$

其中,引起电机振动和噪声的主要是电磁力的径向分量。

根据式(2)计算电机负载运行时,不同气隙尺寸下电机一对极下电磁力波分布对比,如图 9 所示。

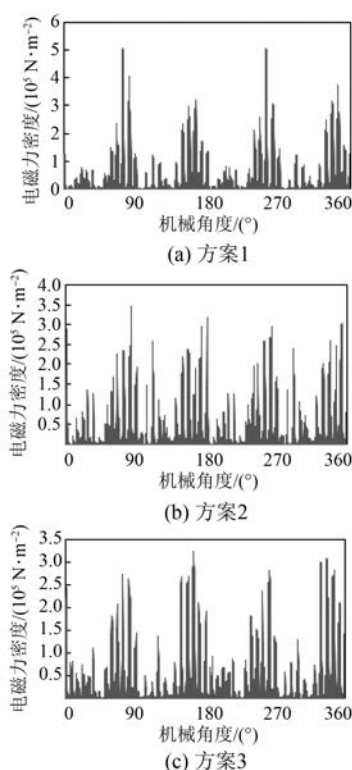


图 9 不同转子轴向通风孔尺寸及拓扑结构时,径向电磁力密度

由图 9 的数据得出,不同转子轴向通风孔尺寸及拓扑结构电机额定负载运行时:方案 1 径向电磁力波的幅值最大,达到 $5.1 \times 10^5 \text{ N/m}^2$; 方案 2、方案 3 中,虽然电磁力波的幅值比方案 1 中的小,但径向的电磁力波含量较丰富,对电机的振动和电磁噪声带来负面影响。同时,方案 3 中径向电磁力相比方案 2 好。由此可以得出,涉及转子轴向通风孔尺寸及拓扑结构的更改,不仅要考虑电机起动、额定运行时的基本性能,还要综合考虑电磁力对电机振动及电磁噪声的影响。

4 实测数据与计算结果的比较与分析

为了验证转子轴向通风孔尺寸及拓扑结构对

电机性能的影响,对方案 1、方案 2 进行了样机试制。基于场-路耦合时步有限元法对所建的电机的数学模型进行求解,可以获得样机稳态工况运行时的性能参数及起动性能的计算值。方案 1、方案 2 样机的额定运行时定子额定电流、功率因数、起动时的定子电流、起动转矩计算值及实测值如表 6 所示。

表 6 方案 1、方案 2 样机运行参数计算值和实测值

方案	物理量	计算值	实测值	误差/%
方案 1	额定电流/A	49.9	49.7	0.4
	功率因数	0.844	0.85	-0.71
	起动电流/A	283.6	279.5	1.47
	起动转矩/(N·m)	2 995.1	3 114.7	-3.84
方案 2	额定电流/A	59.8	57.5	4.0
	功率因数	0.722	0.745	-3.09
	起动电流/A	283.6	279.9	1.32
	起动转矩/(N·m)	2 985.8	3 114.7	-4.14

由表 6 可知,计算值与实测值比较接近,误差小于 5%,满足计算精度的要求,验证了所建模型的准确性。

5 结 语

通过场-路耦合的时步有限元法,定量分析了不同转子轴向通风孔尺寸及拓扑结构对电机内气隙磁场、电磁力波、损耗及性能的影响。计算结果表明,合理地更改转子轴向通风孔尺寸及拓扑结构对电机的起动性能几乎没影响。电机额定工况运行时,方案 2、方案 3 相比方案 1 而言,功率因数降低较多,定子电流值、定转子损耗值增加较明显,电磁力波含量也较丰富,转速波动较大。因此,在电机设计阶段选择转子轴向通风孔尺寸及拓扑结构的过程中,不能单方面考虑增大通风孔尺寸或改为圆孔(减小风阻),提高电机的换热能力,必须综合考虑转子轴向通风孔尺寸及拓扑结

构对电机电磁参数、损耗和性能的影响,使电机产品性能达到最优。

【参考文献】

- [1] 汤蕴.电机内的电磁场[M].2 版.北京:科学出版社,1998.
- [2] 胡敏强,黄学良.电机运行性能数值计算方法及其应用[M].南京:东南大学出版社,2003.
- [3] 段晓田,张新燕,张俊,等.双馈风力发电机电磁场计算与分析[J].电网技术,2012,36(2): 231-236.
- [4] MIKAMI H, IDE K, ARAI K, et al. Dynamic harmonic field analysis of a cage type induction motor when magnetic slot wedges are applied [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1997, 12 (4): 337-343.
- [5] 梁艳萍,陈晶.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.
- [6] 李隆年.电机设计[M].北京:清华大学出版社,1992.
- [7] B·海勒尔,V·哈马塔.异步电机中谐波磁场的作用[M].章名涛,俞鑫昌,译.北京:机械工业出版社,1982.
- [8] 李海成,王庆东,尹志华.中小型笼型异步电机杂散损耗的降低措施[J].电机与控制应用,2015,42(4): 70-74.
- [9] 严登俊,刘瑞芳,胡敏强,等.鼠笼异步电机起动性能的时步有限元计算[J].电机与控制学报,2003,7(3): 177-190.
- [10] 曹君慈,李伟力,张晓晨.高性能低谐波绕组感应电动机电磁性能的数值分析[J].电机与控制学报,2010,14(3): 97-103.
- [11] 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.
- [12] 刘海龙.大型感应电动机电磁力及振动特性分析[D].沈阳:沈阳工业大学,2007.

收稿日期: 2018-06-05