

3 MW 紧凑型低噪声异步风力发电机 电磁及冷却设计

胡雄辉

(中车株洲电机有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 以 3 MW 高效率低噪声笼型风力异步发电机为例, 针对笼型异步风力发电机的发展趋势: 高效、低噪声、高功率密度的要求展开工作。介绍了笼型异步风力发电机的电磁和冷却方案的计算过程, 通过电磁仿真技术对气隙谐波磁场在转子导条中产生的附加损耗进行了优化, 通过流体仿真技术计算通风噪声。最后, 根据型式试验数据进行对比和分析。结果表明, 电机设计方法可行, 电机整体性能较优。

关键词: 异步风力发电机; 高效; 紧凑; 电磁仿真; 流体仿真

中图分类号: TM 315 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)06-0058-06

doi: 10.12177/emca.2020.047

Electromagnetic and Cooling Design of 3 MW Low-Noise Compact Cage Asynchronous Wind Power Generator

HU Xionghui

(CRRC Zhuzhou Electric Co., Ltd., Zhuzhou 412001, China)

Abstract: The design of a 3 MW low-noise compact cage asynchronous wind power generator is performed aiming at the development trends of cage generator including high efficiency, low noise and high power density. The calculation process of the electromagnetic and cooling schemes of the cage generator is explained. The additional loss of rotor bar caused by the air gap magnetic field is reduced by electromagnetic simulation, and the ventilation noise is calculated by fluid simulation. The design is validated with type tests. The results show that the design method is feasible and the motor has a good performance.

Key words: asynchronous wind power generator; high efficiency; compact; electromagnetic simulation; fluid simulation

0 引言

随着变流器成本的降低和控制算法的发展, 笼型异步风力发电机组的经济性和高性能运行能力不断提升。当前风力发电机组主要采用电励磁同步电机、双馈异步发电机和永磁直驱发电机。笼型异步电机不存在滑环、碳刷等易损耗件, 可靠性高, 全生命周期成本低, 因此在风力发电领域具有良好的工程应用前景。

传统的电机设计多采用类比的方法, 设计余

量大, 设计难度低。随着社会的发展, 应用要求的加速提高, 传统的设计方法已经不再适用, 现代电机设计需要满足高功率、高效率、小型化、轻量化、低噪声、散热等多目标和多维度的要求。因此, 计时要平衡电磁、机械、温升、噪声等性能。

目前计算机仿真技术已经在电机行业得到了广泛应用。张文等^[1]采用磁路耦合三维非线性有限元计算模型进行了多相感应电机三维电磁分析与损耗计算; 孙传铭等^[2]采用 CFD 方法对高铁永磁同步牵引电机热设计进行了研究; 朱宇龙等^[3]

收稿日期: 2020-03-16; 收到修改稿日期: 2020-04-29

作者简介: 胡雄辉(1966—), 男, 高级工程师, 研究方向为电机设计。

对某型永磁牵引电机进行噪声试验分析及仿真优化;刘昌奇等^[4]基于有限元分析设计了一种超超高效异步电机。

本文采用数值仿真的方法,针对电磁设计、热设计以电机气动噪声进行目标优化,最终平衡电机各方面性能,使电机性能达到最优。本文以 3 MW 笼型异步发电机的电磁和通风冷却设计为例,概述了笼型异步发电机设计过程,并对计算结果和试验结果进行了对比分析。对电机的优化设计具有一定的参考价值。

1 设计目标

该项目用于 3 MW 风电机组,技术协议基本要求:额定功率为 2 930 kW;额定频率为 53.5 Hz;额定电压为 750 V;绝缘等级为 F/B;冷却方式为 IC31;额定转速为 1 612 r/min;噪声限值为 103 dB(A)(声功率);控制方式为转差控制。

由于电机采用箱式结构,可以和结构类似的 YX630-4 高效率电机(JB 11280—2013)进行对比,主要性能比较如表 1 所示。

表 1 主要性能比较

技术要求参数	YX630-4	项目发电机
中心高/mm	630	500
额定频率/Hz	50	53.5
功率/kW	2 800	2 930
冷却方式	IC01	IC31
功率因数	0.89	0.89
额定效率/%	96.9	96.9
最大转矩倍数	>1.8	>2.8
长×宽×高/m	3.1×1.8×2.1	2.3×1.6×1.85
噪声/dB(A)(声功率)	110	103
质量/kg	8 690	6 800

可以看出,与高效电机相比,该项目电机外形更为紧凑,中心高由 630 mm 降低到 500 mm,体积、质量大幅度减少,功率密度更大、转速高、噪声低。为此,必须对发电机的电磁方案和通风冷却结构进行全新设计。

2 电磁方案设计

2.1 电磁方案介绍

3 MW 发电机电磁方案设计主要考虑以下因素。

(1) 根据发电机外形限制和电机结构确定:定子铁心长度小于 1 000 mm,中心高 500 mm,定子外径 900 mm。

(2) 根据额定频率和电机转速的要求,发电电机极数采用 4 极。

(3) 槽配合选择:满足高效率、低噪声的要求,可采用少槽、近槽配合 72/58、60/47 等。

(4) 由于风力发电机系统采用转差控制,异步发电机需要具有较大转差率。因此,转子电阻损耗在总损耗中占比相对较高,需尽量降低转子附加损耗。

(5) 风力发电机安装在风塔顶部,维修成本高,需要极高的可靠性。由于磁性槽楔受到气隙磁场作用,长期运行存在脱落风险,不能采用磁性槽楔。因此,需合理选择电磁方案,降低附加损耗,保证发电机的高效率。

在此基础上进行电磁计算,得出初步方案,如表 2 所示。

表 2 初步电磁方案表

参数名称	参数值	参数名称	参数值
定子外径/mm	900	空载电流/A	588.3
定子槽数	60	气隙磁密/T	0.76
转子槽数	47	铁耗/kW	12.7
铁心长度/mm	980	风磨耗/kW	18
通风道数量	29	杂散损耗/kW	23.1
宽度/mm	8	额定电流/A	2 486
节距	13	额定效率/%	97
每槽导体数	6	功率因数	0.9
气隙/mm	2.6	额定转速/(r·min ⁻¹)	1 612
转子材料	H96	最大转矩倍数	2.95

2.2 电磁仿真

异步电机产生负载附加损耗的原因:(1) 由于绕组存在漏磁场,在绕组以及所有临近的金属结构件中感生了涡流损耗。(2) 由于定子绕组和铁心开槽在气隙中建立的谐波磁势所产生的谐波磁场以不同的速度相对于定子运动,在铁心和转子导条中感生涡流,产生附加损耗^[5-6]。

在电机临近绕组的金属结构件设计合理的情况下,气隙谐波磁场引起的附加损耗是负载附加损耗的主要成分,是电磁方案设计中需要尽量降低的部分。采用磁路法进行计算时,可以得到电机的基本性能,一般难以定量准确计算电机负载

杂散损耗,只能定义为输出功率的一定比例。但是,由于该发电机功率密度和效率要求高,需要对电机的电磁场进行进一步分析,定量计算气隙谐波引起的附加损耗。定子绕组采用多匝结构,定子铁心采用低损耗硅钢片叠片,可以有效削弱气隙谐波磁场导致的附加损耗。因为笼型转子导条是单根导条,所以气隙谐波磁场容易在导条顶部产生较为明显的涡流效应。

综上,本文通过采用 Maxwell 软件进行电磁仿真,对原方案进行校核,得到转子导条附加损耗值,再进行方案调整,找到最佳的方案。

2.2.1 原方案核算

额定负载下电机的磁场分布如图 1 所示。通过图 1 可以看出,电磁场分布合理,没有异常。

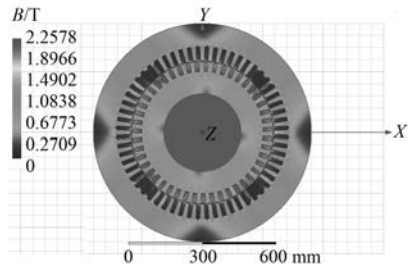


图1 额定点磁场分布

磁路计算与电磁仿真结果对比如表 3 所示。表 3 数据说明,磁路计算结果和电磁仿真结果基本一致,电磁仿真计算结果可信。

表 3 磁路计算与电磁仿真结果对比

参数名称	磁路计算值	仿真值
额定电流/A	2 486	2 467
空载电流/A	588.3	550
最大转矩倍数	2.95	3.20
功率因数	0.9	0.9
转速/(r·min ⁻¹)	1 612	1 612

同时,由于该电机采用非磁性槽楔,定子开槽引起的较强齿谐波可能在转子导条上部产生较强的涡流损耗,导条损耗仿真如图 2 所示。

由图 2 可以看到,导条上部有较强的涡流产生,且损耗主要集中在直角处。

2.2.2 减少转子涡流损耗的分析

转子导条中额外产生的涡流损耗是附加损耗的一部分,对效率有较大影响。主要来源是由于

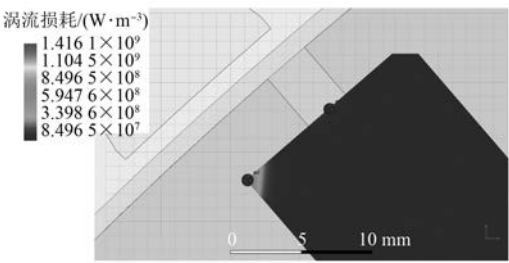


图2 导条涡流损耗

电机定子开槽引起气隙磁场在空间上的不连续,在普通高效电机中可以通过磁性槽楔削弱。本文发电机在采用非磁性槽楔的情况下,齿谐波幅值较大,可能在转子导条产生较大的损耗。通过电磁场仿真计算可以计算出损耗的数值,进而找到如何降低电机转子导条涡流损耗的方法,优化了原有方案,提升了电机效率。

由于损耗产生的位置在导条的直角处,可以考虑将导条顶部设计出较大圆角,避开这个位置,以降低涡流损耗。但是转子槽改为圆角后对转子槽漏抗有影响,因此还需对定子额定电流进行计算,判断是否会影响发电机的功率因数。对采用不同圆角 $r(0\sim 4\text{ mm})$ 的转子导条附加涡流损耗 $P_{\text{Cu}2}$ 和定子电流 I_1 进行对比计算,结果如图 3 所示。

由图 3 可以看出,在圆角为 4 mm 的时候,转子涡流损耗值最小,额定电流也能满足要求。但是在超过 2.5 mm 后,导条和冲片槽口位置的接触面积过小,会影响导条在槽内的固定可靠性。综合考虑,采用 2.5 mm 圆角比较合理。圆角 $r=2.5\text{ mm}$ 时的导条涡流损耗如图 4 所示。

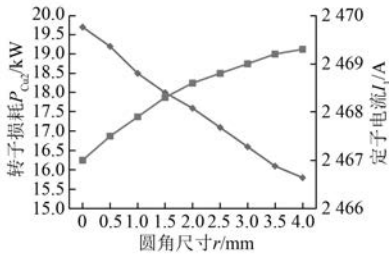
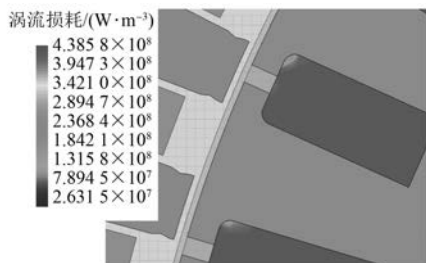


图3 不同圆角尺寸仿真计算对比

根据计算对比,在电机功率因数变化较小的情况下,导条的峰值损耗密度由 $1.4\times 10^9\text{ W/m}^3$ 下降至 $4.4\times 10^8\text{ W/m}^3$ 。导条总损耗由 19.7 kW 下降至 17.1 kW,导条附加损耗明显下降。定子电

图4 圆角 $r=2.5$ mm 时的导条涡流损耗

流由 2 467.0 A 增加至 2 468.6 A, 满足要求。

3 通风冷却设计

紧凑型异步发电机通风系统示意图如图 5 所示。电机一端内置离心风扇, 在离心风扇的驱动下, 冷却介质通过电机通风罩的进口进入电机内部, 流经电机转子和定子冷却风道冷却发热部件后, 从通风罩的出口流出, 将电机内部热量散出^[6]。电机通风罩一般布置在电机顶部, 结构设计形式多样, 一般是从防护等级、降噪和导流的角度设计。

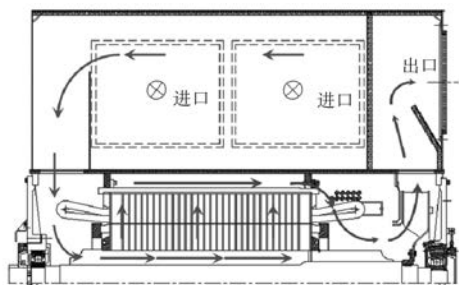


图5 紧凑型异步发电机通风系统示意图

电机通风系统的优化方向包括 3 个方面: (1) 通过合理设计风路系统, 降低风路风阻, 提高循环风量, 使电机温升满足冷却要求; (2) 降低系统的机械损耗, 提升电机效率; (3) 降低气动噪声。为了验证冷却设计方案的有效性, 进行温度场和流场耦合仿真计算。

3.1 电机通风模型特点

(1) 以空气作为冷却介质, 可以忽略浮力影响。

(2) 电机内流体马赫数 Ma 不大, 故可以不计流体的压缩性, 即可作为不可压缩流体运动处理。

(3) 只研究稳定状态即定常流动。

(4) 电机中局部阻力占总阻力的绝大部分, 沿程阻力相对较小, 且电机中雷诺数 Re 数值很大, 整个系统属于高紊流状态, 沿程阻力系数接近常数, 在一定范围内与 Re 无关^[7]。

3.2 计算模型与边界条件

为了更准确地分析电机内部流场和温度场, 对电机整机建立三维模型, 计算域包括固体域和流体域, 进行流固共轭换热分析。计算模型如图 6 所示。

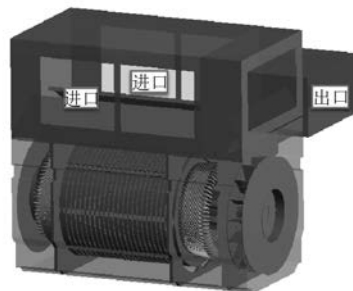


图6 计算模型

计算的边界条件按照实际运行工况选取, 环境温度为 $47\text{ }^{\circ}\text{C}$, 进出口压力设置为标准大气压。湍流模型选择 Realizable $k-\varepsilon$ 模型。由于计算域内同时包括旋转域和静止域, 计算采用 MRF 多重参考系模型, 旋转域内包含转子、转轴、风扇, 转速按照运行工况设置为 1 612 r/min。设置冷却介质的物理属性以及电机各部件材料属性, 包括密度、比热容、导热系数等。

3.3 热源加载

电机的温升计算涉及电机热源加载, 热源主要来自电机运行时产生的损耗。热源加载主要通过 2 种形式: (1) 根据电机发热部件的损耗值, 计算发热部件的热流密度, 认为损耗是均匀分布的; (2) 通过耦合计算加载热源, 将 Maxwell 软件计算的损耗值直接导入到 Fluent 软件中。通过耦合方法加载热源能够更好地模拟真实的损耗分布, 减少计算误差。

本文采用耦合方法进行热源加载, 这样更接近真实的热源分布, 并且考虑了电磁场引起的附加损耗, 有利于温度场仿真的准确性。

3.4 仿真计算结果

电机冷却设计的目的是降低电机温升, 以保证电机运行的安全性和可靠性。为了保证电机温

升不超过允许的限度,在电机设计中需要获得一些参数指导设计,例如速度、压力、流量、温升分布等,仿真计算能够将这些参数输出和显示。经过仿真分析,电机的总风量为 $2.2\text{ m}^3/\text{s}$,异步发电机各径向风道流量分布如图 7 所示。图 7 中, N 为定转子径向通风道编号,定转子铁心共有 29 个径向风道,从进口侧至出口侧依次编号为 1~29,受端部通风的影响,两侧定转子径向风道流量不一致。沿空气轴向流动方向,各风道风量逐渐增加。

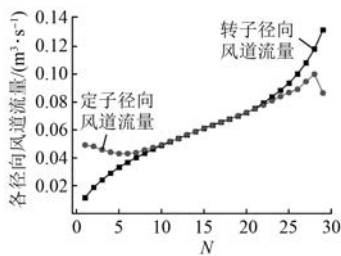


图 7 各径向通风道流量分布

定子绕组温度分布如图 8 所示。冷却介质沿程吸热,进行热量迁移,温度逐渐升高,因此两端绕组温差较大。线圈平均温升为 64 K,热点温升 73 K,满足 B 级考核要求。

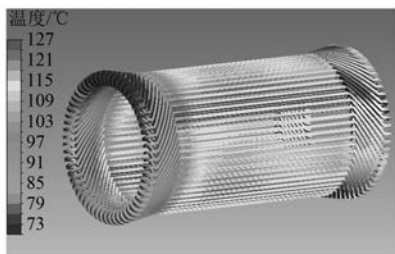


图 8 定子绕组温度分布

3.5 噪声评估方法

电机运转时通常有多种噪声源同时并存,涉及电磁噪声、机械噪声、空气动力噪声。本文为自通风式空冷电机,噪声源主要为电磁噪声和气动噪声。电磁设计时,通过优化排除了电磁的异常噪声,因此气动噪声为主要声源。

评估气动噪声有 2 种方法:(1) 工程算法,采用理论公式进行类比计算。(2) 采用计算流体力学的方法模拟由流体流动产生的噪声^[8]。

采用 CFD 方法进行电机流场的稳态计算,湍流模型选择 Realizable $k\text{-}\epsilon$ 模型,采用 LES 大涡模

拟计算瞬态场,计算域内设置一脉动压力监测点,当风扇旋转 2~3 圈后,压力脉动基本上呈周期性变化,噪声模型采用 FWH 模型,由此获得的声压信号可以作傅里叶变换和相关后处理计算总声压级。自通风电机气动噪声具有一定的方向性,出口的噪声较高。出口侧噪声监测点的频谱如图 9 所示。图 9 中 f 为频率, L_p 为各频率点的声压级。频率 187.5 Hz 时,声压最高,计算监测点的总声压级为 91.5 dB。

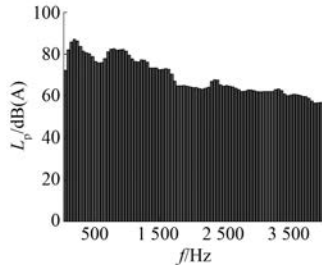


图 9 出口监测点频谱图

3.6 降噪措施

针对电机冷却系统的特点,本文主要从声源和声传播上进行降噪。采取的主要措施包括:(1) 冷却风扇的合理设计和选用,提高风扇效率,使风扇尽可能在高效率区域工作,采用圆弧形后倾风扇代替原有的径向离心式叶片,机械损耗减少了 7.2 kW,显著提高了风扇的效率。(2) 电机进出口通风罩设计过程中,在保证气流通过的同时,通过合理设计的隔板,控制风速,进出口斜板布置使冷却介质绕流后进入电机,削弱和阻止了噪声的传播。(3) 在电机进出口通风罩内壁覆盖吸声材料(如消音棉),以达到降噪的目的。

4 试验结果分析

4.1 性能试验验证

通过型式试验对电机的性能进行了验证,结果如表 4 所示。

表 4 型式试验结果

试验项目	试验值	试验项目	试验值
空载电流/A	592.4	效率	96.9
额定电流/A	2 505	功率因数	0.90
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 612	噪声/dB(A)	102.5
最大转矩倍数	3.0	电机温升/K	68

通过试验数据分析可以得到以下结论:

(1) 电机在中心高大幅度降低,且未采用磁性槽楔的情况下,额定点效率达到 96.9%,达到了高效电机的要求。电机其他主要性能指标也可以满足技术协议要求;功率因数、最大转矩等性能指标均达到或超过协议要求。与电磁计算结果相吻合。

(2) 电机噪声功率级不超过 102.5 dB(A),低于高效电机标准限值 110 dB(A),也达到了项目 103 dB(A)的低噪声要求。

(3) 电机温升值为 68 K,完全满足 B 级温升考核要求,并预留了一定的工艺裕量。

4.2 仿真算法试验验证

为了验证仿真分析方法的准确性,将仿真计算结果与试验结果进行对比分析,定子绕组测点温升、机械损耗、噪声的计算值与实测值的对比数据如表 5 所示。

表 5 计算值与实测值对比

参数名称	试验值	计算值	相对误差/%
绕组测点温升/K	68	73	+7.35
机械损耗/kW	21.0	20.8	-0.95
声功率/dB(A)	102.5	104	+1.46

通过计算值与实测值的对比可知,误差在工程允许范围内。电机通风散热的仿真分析为电机冷却设计提供了有力的理论依据。

5 结 语

本文主要以 3 MW 紧凑型高效率笼型异步发电机的电磁及冷却设计为例,介绍了电磁仿真和 CFD 仿真计算在大功率笼型异步发电机设计中的

应用,概述了仿真方法,对传统计算方法和仿真计算的结果进行了比较。在对 3 MW 笼型异步发电机设计中,应用电磁仿真和 CFD 仿真计算得到的参数对电机优化设计进行指导。最后,将试验结果和仿真结果进行对比和分析,验证了仿真准确性,并确认了该项目在高效、低噪、高功率密度等方面采取措施的有效性。

【参考文献】

- [1] 张文,郑晓钦,吴新振.多相感应电机三维电磁分析与损耗计算[J].电机技术学报,2018,33(增刊2): 331.
- [2] 孙传铭,杨金霞,吴江权,等.高铁永磁同步牵引电机热设计技术研究与应用[J].防爆电机,2019,54(4): 11.
- [3] 朱宇龙,尹爱平,李振鹏,等.某型永磁牵引电机噪声试验分析及仿真优化[J].电力机车与城轨车辆,2020,43(1): 16.
- [4] 刘昌奇,徐余法,李全峰,等.基于有限元分析的一种超超高效异步电机[J].电机与控制应用,2015,42(5): 75.
- [5] 顾德军,李光耀,汤慧明,等.高压高效率三相异步电动机的开发[J].电机与控制应用,2015,42(5): 81.
- [6] 魏永田,孟大伟,温嘉斌.电机内热交换[M].北京:机械工业出版社,1998: 5-13.
- [7] 鲍里先科,单科,亚科夫列夫.电机中的空气动力学与热传递[M].魏书慈,邱建甫,译.北京:机械工业出版社,1985: 114-117.
- [8] 王福军.计算流体力学分析——CFD 软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2004: 121-125.

《电机与控制应用》新网站启用

为了更好地服务于作者和读者,《电机与控制应用》建设了新的网站。服务升级,内容丰富,域名不变,仍为 www.motor-abc.cn。

新网站设有网刊系统。2018 年至今《电机与控制应用》发表的所有论文均可通过该系统检索、阅读、下载。

新网站同时开通了移动版。关注《电机与控制应用》微信公众号(djykyzy),即可在移动端阅读最新论文、查询稿件处理状态,并可登录投稿系统进行其他操作。

请扫码关注《电机与控制应用》微信公众号:

