

外转子永磁辅助同步磁阻电机设计及优化分析

张浩霖¹, 李国帅², 邓猛², 孙会琴²

(1. 国网河北省电力有限公司元氏县供电分公司, 河北 石家庄 051130;

2. 河北科技大学电气工程学院, 河北 石家庄 050000)

摘要 随着全球能源需求的日益增长, 风能作为清洁能源得到了人们的关注, 目前风力发电机常用永磁电机, 稀土能源消耗较大, 通过设计外转子永磁辅助同步磁阻电机恰能解决这一问题, 具有广阔的应用前景。本研究基于 Maxwell 软件平台, 介绍了电机结构的设计过程, 对磁通密度、电磁转矩、反电动势、输出功率进行有限元仿真分析; 基于 Workbench 软件平台, 对电机结构参数进行优化, 提升电磁转矩, 削弱转矩脉动, 为同类电机设计提供了分析手段。

关键词 永磁辅助同步磁阻电机; 外转子; 电磁仿真

中图分类号: TM3

文献标识码: A

文章编号: 2097-3365(2023)11-0010-03

永磁辅助同步磁阻电机(Permanent magnet assisted synchronous reluctance motor, 简称 PMASYNRM)结合了同步磁阻电机(Synchronous reluctance motor, 简称 SYNRM)和内置式永磁同步电机(Permanent magnet synchronous motor, 简称 PMSM)的特点, 是一种新型的高效率、低成本电机, 具有电磁转矩大、响应速度快等优点, 用于风力发电可以减少稀土利用, 降低电机设计成本, 而外转子电机用于风力发电, 可以直接驱动运转, 因此, 外转子 PMASYNRM 是一款经济型与实用型一体化的产品, 具有较大的研究价值。

在永磁转矩和磁阻转矩的共同作用下, 外转子 PMASYNRM 可以保持旋转, 且运转过程中磁阻转矩起主要作用, 永磁转矩起辅助作用。选用 Y30 铁氧体材料作为永磁体可以实现这一要求, 且代替了传统的稀土钕铁硼, 不仅有效解决了能源消耗大的问题, 还能减少开采能源对环境造成的破坏。

由于磁通总是遵循沿着磁阻最小回路流通的原理, PMASYNRM 的外转子在旋转时会引起回路磁阻发生变化, 进而会产生相应的磁拉力, 在该力的作用下, 输出电磁转矩中会产生磁阻转矩^[1]。本文以实现较大的输出磁阻转矩为总目标, 介绍电机结构的设计过程并进行有限元仿真; 此外, 对结构参数进行优化, 提高电磁转矩, 减小转矩脉动。

1 结构设计

以河北张家口居民冬季取暖用垂直轴风力发电为例, 结合工程实际需要确定本文电机基本参数。额定

功率 15kW, 额定转速 300 转, 额定电压 380V。再根据基本参数设计电机结构, 包括定子和转子, 建模依托 Maxwell 软件平台完成。

PMASYNRM 定子结构与永磁电机类似^[2], 采用 RMxpvt 自动生成; 转子结构复杂多样, 且未集成在数据库中, 故通过电子图版 CAXA 软件平台建模, 再导入 Maxwell 进行仿真。

根据传统电机设计经验, 选择 12 极 36 槽的极槽配合方式, 并计算得到定子内径为 125.0mm, 外径为 208.6mm。定子槽型选择传统的平行齿梨形槽, 各项尺寸 H_{s0} 、 H_{s1} 、 H_{s2} 、 B_{s0} 、 B_{s1} 、 B_{s2} 分别设计为 2、0.5、22、2.5、9.2、6.0, 单位为 mm。

选择电机的单边气隙长度为 0.7mm, 则可以得到转子内径为 210.0mm, 外径为 300.0mm。外转子 PMASYNRM 最大的设计难点在于转子冲片参数的确定。在转子冲片的诸多结构参数中, 主要制约电机性能的有磁障形状、磁障层数和永磁体层数。

磁障形状多种多样, 较为常见的有 U 型和 C 型, 也有少量的“一”字型等^[3], 不同形状的磁障有着不同的优缺点。转子磁障为 U 型结构的电机, 输出电磁转矩较高, 但由于 U 型结构机械特性较差, 容易在运转过程中发生结构损坏; 转子磁障为 C 型结构的电机, 可靠性较高, 但是电磁特性较差。为充分考虑电机的电磁性能和机械性能, 本文选择混合形状(U 型、C 型和“一”字型的结合)的磁障, 并设计了两种不同结构, 如图 1 所示。



图 1 两种不同混合形状的磁障结构

在磁障内不添加永磁体，层数为 3 层，每层之间距离相同，施加相同激励的前提下，基于有限元方法，对转子采用上述两种不同混合形状磁障结构的电机分别进行参数扫描，使得两台电机均取得最优的电磁特性。对比两台电机的转矩特性和应力特性，可以发现：采用左图混合形状的磁障结构时，电机的磁阻性能较好，且最大形变量与最大位移值均较小。综合考虑，选择左图所示的磁障结构。

对于磁障层数的选择，受转子几何模型内外径尺寸的限制，本文考虑 2 层磁障与 3 层磁障。在磁障内添加 2 层永磁体，采用与上述相同的方法，对转子采用两种不同层数磁障结构的电机分别进行参数扫描，使得两台电机均取得最优的电磁特性。对比两台电机的磁力线分布情况，可以发现：采用 3 层磁障结构时，由定子齿进入转子内部的磁力线受到转子磁障阻挡较少，综合考虑，选择 3 层磁障结构。

为使得输出的电磁性能符合设计目标，本文设计的外转子 PMASYNRM 采用 2 层永磁体，由于采用 Y30 铁氧体作为磁钢材料，占用体积较大，“一”字型磁障内不放置永磁体。

2 有限元仿真

基于 Maxwell 软件平台对设计的电机进行有限元电磁仿真。根据第 1 章介绍的内容建立电机有限元模型，定转子结构均采用 DW315_50 硅钢片，永磁体采用 Y30 铁氧体，充磁方向为径向充磁，绕组采用 copper 铜绕组，分为 3 相，施以正弦电流作为激励源；边界设置转子外边界，施加数值为 0 的矢量力；网格剖分应尽量精细；Band 面为稍大于外转子的空气域；转子初始位置角设为 0，工作频率 30Hz，求解总时长 300ms，仿真步长 3ms，选择磁通密度、电磁转矩、线反电动势以及输出功率进行求解。

2.1 磁通密度分析

对电机空载运行时的磁通密度进行有限元仿真，最大值为 2.32T，存在于转子部位，受永磁体作用，属于正常现象。定子齿部磁密最大值为 1.75T（一般不超过 2.0T），定子轭部磁密最大值为 1.35T（一般不超过 1.5T），表明电机在运转过程中不会产生过大的铁

心损耗和温升，设计合理。

2.2 电磁转矩分析

对电机负载运行时的电磁转矩进行有限元仿真，平均值为 477.17Nm，峰值为 660.45Nm。下式给出了额定负载转矩的计算公式。

$$T_N = 9.55 \frac{P_N}{n_N} \quad (1)$$

式中： P_N ——额定功率； n_N ——额定转速。

通过计算可以得出额定负载转矩为 477.5Nm，仿真数值与理论数值相差 0.33Nm，在误差允许范围内；但转矩峰值与转矩平均值相差 183.28Nm，差值较大，可见所设计的电机存在较大的转矩脉动，设计合理，但需进一步优化。

2.3 线反电动势分析

对电机空载运行时的线反电动势进行有限元仿真，数值为 373.56V，一般而言，电机空载运行时，反电势数值在额定电压附近，略低于额定电压。本文设计的电机额定电压为 380V，因此，线反电势符合要求，设计合理。

2.4 输出功率分析

对电机负载运行时的输出功率进行有限元仿真，数值为 14990.77W，略低于额定功率 15kW，存在一定的损耗，但总体符合基本要求，设计合理。

3 参数优化与分析

根据有限元仿真结果，电机的主要电磁性能均已达标，表明外转子 PMASYNRM 设计合理。但存在转矩脉动较大的问题，因此，需要对电机的结构参数进行优化，进一步完善相关性能。

对于风力发电而言，电机的输出功率将影响风能利用效率，进而影响发电的效率，因此，输出功率也是一项重要的设计指标。而在保持电机转速 300 转不变的前提下，输出功率的提高将直接体现为电磁转矩的提升。因此，本文以电磁转矩的提升以及转矩脉动的削弱为目标，对电机进行两次多参数单目标优化。其中，转矩脉动用转矩脉动系数表达^[4]。

参数优化依托 Workbench 完成。该平台高效连接了 Maxwell 和 Optislang 优化算法，使得优化设计的过程更加快捷方便，适合多参数单目标优化。

3.1 基本环境配置

本文选取对电机优化目标影响较大的参数作为优化变量，通过 Maxwell 有限元参数扫描确定取值范围。

定子外径、内径、 H_{s0} 、 H_{s1} 、 H_{s2} 、 B_{s0} 、 B_{s1} 、 B_{s2} 的取值范围分别为206~209.5、100.5~137.5、1.2~2.8、0.35~0.85、17.8~26.2、2.25~2.75、7.28~11.12、5.4~8.6,单位为mm。值得注意的是,在转子内径不变时,改变定子外径大小相当于调整电机气隙大小。

对于优化目标的设定,需要分两次分别设置电磁转矩平均值取最大、转矩脉动系数值取最小。选择PSO优化算法。为缩短模型拟合周期,且能够保证样本数据精确,选择最大种群数量为200,搜索策略配置为全局搜索。

3.2 电机模型拟合与优化

按照预设的配置进行样本数据的采集,每一次优化均会生成200组数据点。在对电磁转矩进行采样时,共生成成功点191组,失败点9组;在对转矩脉动进行采样时,共生成成功点194组,失败点6组。失败点的产生是因为不同优化变量之间存在冲突。在成功点数据占大多数时,失败点数据对拟合效果的影响可以忽略不计。

选择各自采样的成功点样本数据对电机模型进行拟合,搭建了2个电机优化设计平台,分别对电磁转矩和转矩脉动进行优化。

3.3 优化结果分析

由于优化平台存在一定误差,自动生成的最佳数据与真实的有限元数据存在偏差,需要提取对应最佳样本点的优化变量取值,导入Maxwell中进行有限元仿真,确定各自对应的最优设计方案。

3.3.1 电磁转矩对比分析

基于电磁转矩优化平台处理电机,优化后变量定子外径、内径、 H_{s0} 、 H_{s1} 、 H_{s2} 、 B_{s0} 、 B_{s1} 、 B_{s2} 的取值分别为208.5、120.5、2.5、0.5、19.9、2.5、9.5、5.5,单位为mm。将数据导入Maxwell中,分别对优化前后的电磁转矩进行仿真。优化后电磁转矩的平均值为527.15Nm,比优化前的477.17Nm有明显提升,表明优化过程提高了电机的电磁转矩性能。

3.3.2 转矩脉动对比分析

基于转矩脉动优化平台处理电机,优化后变量定子外径、内径、 H_{s0} 、 H_{s1} 、 H_{s2} 、 B_{s0} 、 B_{s1} 、 B_{s2} 的取值分别为206.0、132.7、1.3、0.5、17.9、2.6、10.6、5.4,单位为mm。将数据导入Maxwell中,分别对优化前后的电磁转矩进行仿真,并调取转矩脉动系数。优化后电机的转矩脉动系数值为9.24,比优化前的25.02降

低了15.78,有了明显的削弱作用,表明优化过程降低了转矩波动。

4 讨论

定义A电机为经电磁转矩优化处理的电机,B电机为经转矩脉动优化处理的电机。通过对比分析,可以得出:B电机在削弱转矩脉动方面具有较强的改善,但输出转矩为403.18Nm,明显低于额定转矩;A电机以提高电磁转矩为目标,但转矩脉动系数也减少到16.39,可见对转矩脉动也有一定削弱作用。因此,选择A电机作为最终的优化设计电机。

为验证本文设计的电机符合最初的设计总目标:电机输出的电磁转矩中,磁阻转矩占比较大。对电机分别在有无永磁体状态下进行仿真,计算输出转矩中的磁阻转矩占比。其中,无永磁体状态下进行仿真,输出的电磁转矩即为磁阻转矩^[5]。

仿真结果表明,无永磁体仿真时,原始设计电机的电磁转矩为329.25Nm,优化设计电机的电磁转矩为405.91Nm;有永磁体仿真时,原始设计电机的电磁转矩为477.17Nm,优化设计电机的电磁转矩为527.15Nm。可见,原始设计电机和优化设计电机均满足设计的总目标,且优化设计电机的磁阻转矩占比由原始设计电机的69%提升到77%,优化过程改善了电机的磁阻性能。

5 结语

总而言之,本文考虑实用性与经济性,以解决风力发电机稀土能源消耗过大的问题为出发点,以电机输出较大的磁阻转矩为总体目标,通过建模、仿真和优化等过程探讨了外转子永磁辅助同步磁阻电机的设计及优化方案,也为同类电机的优化设计提供了一种分析手段,具有较强的实践意义。

参考文献:

- [1] 王青,蒋宗文,王林强,等.开关磁阻电机无位置传感器控制策略研究[J/OL].电机与控制学报:2023-06-01:1-9.
- [2] 邵佳伟.永磁辅助同步磁阻电机非对称转子结构与优化[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2023.
- [3] 帅康.高效永磁辅助同步磁阻电机优化设计研究[D].武汉:华中科技大学,2022.
- [4] 王钧.降低永磁辅助同步磁阻电机转矩脉动的方法研究[J].电机技术,2022(04):22-25.
- [5] 邱小华,徐飞,尹华杰.动态冻结磁导率法用于波动负载电机磁场分析[J].微特电机,2021,49(06):8-11,21.