

基于 JMAG 的兆瓦级外转子永磁风力发电机的设计与分析

Design and Analysis of MW Grade Permanent Magnet Generator for Wind Turbine with External Rotor Based on JMAG

张巍

沈阳远大科技电工有限公司

摘要: 提出外转子永磁发电机的基本结构和工作原理,应用磁路法进行了 1.5MW 外转子永磁风力发电机的电磁设计,初步确定了电机的主要尺寸参数。利用 JMAG 软件中的 Express 和 Designer 模块建立了永磁同步发电机的仿真模型,采用有限元数值方法分析了其负载情况下的磁场分布规律,获得了永磁同步发电机的电磁特性并进行了性能计算;实验表明了 JMAG 软件分析结果的正确性,并可以为外转子永磁风力发电机的电磁设计提供有意义的指导。

关键词: 永磁风力发电机; 外转子; JMAG; 实验验证

Abstract: This paper proposes the basic structure and work principle of the permanent magnet generator for wind turbine with external rotor. The electromagnetic design for a 1.5 MW permanent magnet generator for wind turbine with external rotor was carried out using magnetic circuit method, the main parameters of which are obtained preliminarily. A simulation model of the permanent magnet generator for wind turbine was presented using Express and Designer module of JMAG. With finite element method, the magnetic field distributions under load were analyzed and the corresponding electromagnetic performances were calculated. The validity of analysis results based on JMAG is verified by the experimental results, which is meaningful for the electromagnetic design of the permanent magnet generator for wind turbine with external rotor.

Key words: permanent magnet generator for wind turbine; external rotor; JMAG; experimental verification

1 引言

风能作为一种可再生的清洁能源,近年来被人们所关注,风力发电更是受到人们越来越多的重视。一般大型风力发电系统都采用增速机构将风力机的转速提高后再驱动发电机,然而,采用多级齿轮的机械传动,不仅增加了振动和噪声,而且由于润滑系统和机械磨损需要定期维护,使增速机

构成为风电机组故障率较多的薄弱环节^[1]。目前现代风力发电技术的发展趋势一是无刷化，一是采用取消增速机构的风力机直接驱动低速发电机，其中最典型的是直驱永磁风力发电机。永磁发电机的优点是不需要电励磁，可实现无刷化，无励磁损耗，因而效率高，同时永磁体又可提高气隙磁通密度，使电机的功率密度提高。虽然发电机的成本有所增加，但对于降低机组的振动噪声和提高运行可靠性有着重要意义^[2]。

本文以公司研发的 1.5MW 直驱式永磁同步风力发电机作为研究对象，首先应用磁路法对电机进行了电磁设计，然后采用电磁场分析软件 JMAG 软件中的 Express 和 Designer 模块建立电机分析模型，通过瞬态分析计算了在满载额定转速情况下永磁同步发电机的电磁特性和主要性能参数，最后通过实验数据验证了 JMAG 软件分析计算结果的准确性。

2 外转子永磁发电机的结构特点和设计原则

2.1 外转子风力发电机的结构特点

外转子永磁同步发电机的结构与传统电机有明显的区别^[3]。定子固定在电机的中心，而外转子围绕着定子旋转。整个电机结构的关键部分是转子。永磁体沿圆周径向均匀安放在转子内侧，在电机运行时，磁体受到的离心力使其向外压迫，从而使磁体本身更牢固地结合在转子上。转子直接暴露在空气中，因此相对于内转子它具有更好的通风冷却条件。

这种外转子风力发电机在结构上有以下优点^[4]：1) 风叶直接安装在电机外壳上，电机和风叶之间无其他传动装置，风能得到充分利用。2) 传统电机的永磁体安装在内转子上，为能在低速运行时输出正常频率，磁极数目常常较多，相应的转子和定子的直径会更大，成本较高。外转子电机中，转子相对于传统电机来说直径较大，多极结构比较容易实现，在保证高效率的同时降低了成本。3) 外转子永磁风力发电机中没有增速齿轮箱和励磁线圈，结构简单，制造成本低；降低了振动和噪声，发生故障的几率减小，便于维护，增加了系统的可靠性。4) 由于外转子的惯性较大，在强风或者阵风的情况下，电机也可以平稳运行。因此，永磁风力发电机采用外转子的结构相对内转子而言，无论是对电机本体设计还是对风电机组的整体安装、运行维护都具有非常大的优势。

2.2 永磁发电机的设计原则

传统的研究和设计永磁同步发电机的方法是等效磁路法。等效磁路法的优点是计算简单，速度快，可以迅速确定电机的基本尺寸和初步电磁计算方案。当然，等效磁路法也有不足的地方：它主要是依赖于设计经验以及经验公式的计算，计算中的许多系数需要利用电磁场计算和实验得出；所以说，完全利用等效磁路法对永磁同步发电机的分析和设计并不合适。在数值算法中，有限元法是研究和设计永磁同步发电机的有力工具。通过使用有限元分析的方法，可以获得所需的性能曲线及分析结果数据，用来校核永磁发电机的方案设计。本文将介绍采用专业的电机电磁场分析软件 JMAG 作为永磁风力发电机的辅助设计工具分析的方法。

根据以往设计的经验，在初始设计中，一般先是采用经验法得到电磁设计变量和几何变量的范围，确定出几个相对合理的初始方案；然后应用有限元分析软件，用数值计算的方法求解电磁场问题，可以考虑磁路的非线性特征、详细几何尺寸和磁场分布影响。这样场路结合的方法，能确保最终得出较高精度的计算方案。发电机的设计过程如图 1 所示：

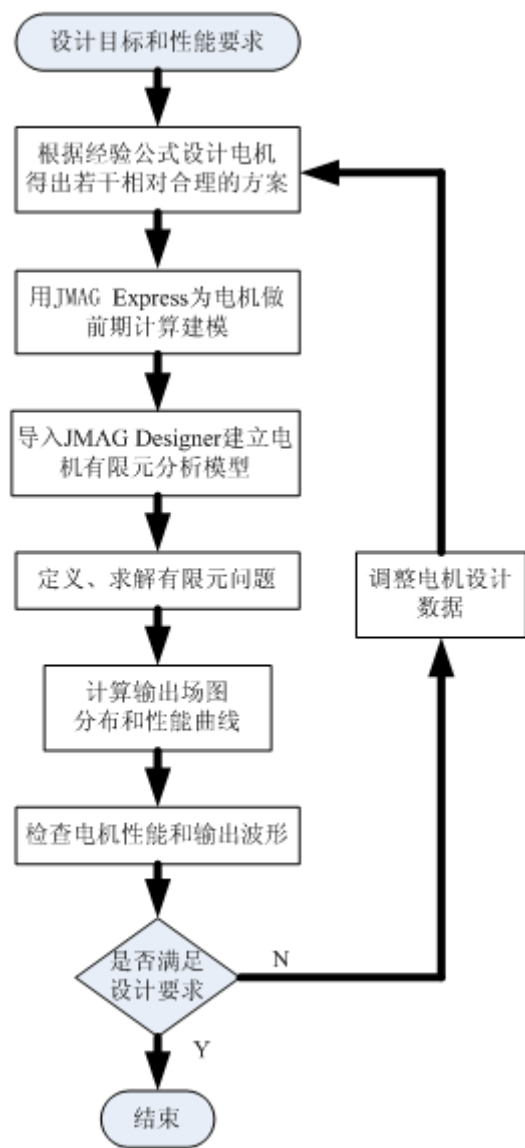


图 1 永磁风力发电机的设计过程

3 永磁风力发电机的电磁设计

3.1 主要技术指标

主要指标与技术参数是电机运行最基本的参数，为发电机设计所要达到的目标。表 1 给出了外转子永磁同步风力发电机的设计要求的主要技术指标和参数：

表 1 发电机主要技术指标和参数

名称	参数
发电机额定功率/kW	1500
相数	3
连接方式	定子 Y 接
额定电压/V	660
额定转速/(r • min-1)	17.3
功率因数	0.9(滞后)—0.9(超前)

3.2 基于等效磁路法的电机电磁设计

根据给定的主要技术指标，首先需要对电机进行电磁设计，主要包括电机电枢绕组的设计、定转子尺寸的确定等。采用等效磁路法对 1.5MW 永磁风力发电机进行初步计算，将永磁体等效成一个恒定磁通源，确定电机主要尺寸和绕组参数以及永磁体尺寸。考虑到电枢去磁反应和散热条件等问题，应选择直径大一些、轴向长度短一些、外形为粗而短的结构，然后进行电枢绕组设计和主要尺寸参数的计算。若电枢绕组设计不合理或永磁体尺寸不合适，应调整永磁体尺寸及土作点，再重新计算主要尺寸和设计电枢绕组。如此反复循环，直至满意为止。在选择永磁体土作点时，应从提高永磁体的利用率出发，选取永磁体的土作点应使永磁体向外磁路提供的有效磁能达到最大。经过电磁设计，优化调整后的一个方案中样机的部分尺寸及主要性能参数计算结果如表 2 所示：

表 2 发电机部分尺寸及性能参数

名称	参数
定子外径/mm	4300
定子内径/mm	3920
转子外径/mm	4430
气隙长度/mm	7
铁心长度/mm	800
永磁体磁化方向长度/mm	18
满载定子电流/A	1311.17
满载发电机电线电压/V	669.68

4 基于 JMAG 的永磁风力发电机的有限元分析

4.1 应用 JMAG Express 对电机初始模型的建立

JMAG 软件是由日本 JSOL 公司开发的功能齐全，应用广泛的电磁场分析软件。软件可以对各种电

机及电磁设备进行精确的电磁场分析，为用户提供设计上帮助，降低用户产品的开发周期，取得竞争优势。JMAG 软件在电机设计分析方面有两个比较重要的模块即 JMAG Express 和 JMAG Designer，其中 JMAG Express 的最新版本已经达到 4.0，JMAG Designer 的最新版本到达了 11.1。JMAG Express 为电机快速设计分析功能模块，辅助工程人员设计电机的初步方案，只需要输入简单的电机性能的基本需求，如额定功率、电机外径、输入电压或最大电流、最大转矩及转速范围等，Express 会自动给出较合理的电磁方案及基于磁路法计算电机的基本性能曲线及部分参数，如转矩-转速曲线、转速-电流曲线、效率曲线、DQ 轴电感参数、转矩系数等，同时还可以作为 JMAG Designer 电磁场分析的前期建模工具。由于 Express 的材料库暂时不支持自定义输入功能，这里主要是应用它作为 Designer 前处理建模工具，然后在 Designer 里重新定义材料进行精确的电磁场分析计算。

2012 年 7 月 31 日之后官方发布的公测版 ExpressPublic Ver. 4.00.0705 中，增加了可以自由组合定转子槽型的功能选择以得到合适的设计模版。设计外转子永磁电机，可以选择在 Brushless motor (Outer Rotor) 下的 Build New Combination 来通过自选定转子槽型后组合的方法得到需要的设计模版，如图 2 所示：

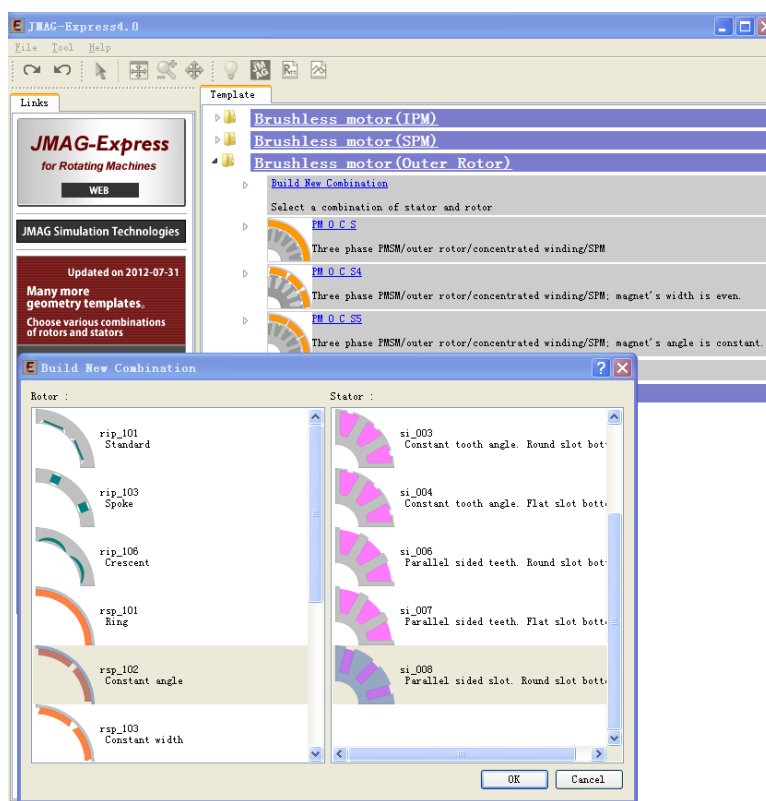


图 2 通过 Express 最新的自由组合定转子槽型功能建模

之后进行电机的几何尺寸、材料、绕组及驱动等基本参数的输入，可得到电机的初始计算模型。如图 3 所示：

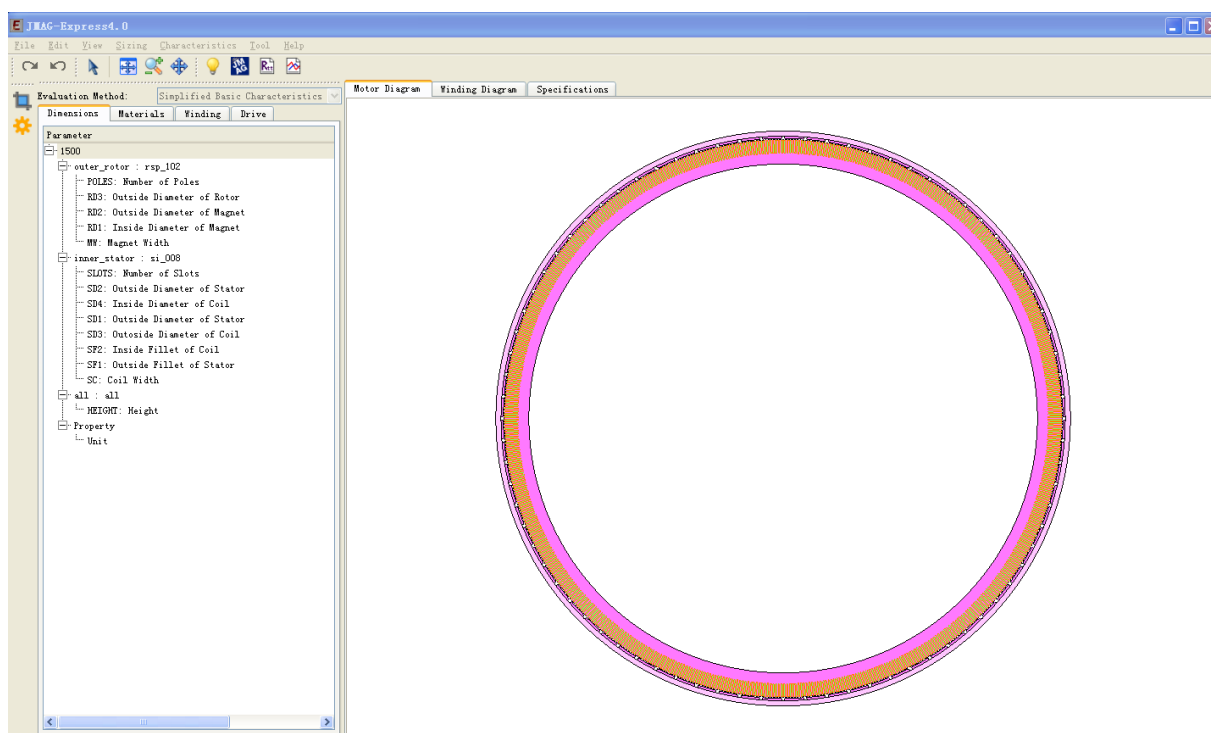


图 3 输入相关尺寸参数后得到的电机初始计算模型

通过 Express 的模型输出功能将所建电机模型发送到 JMAG Designer 的软件中, 得到单元电机模型如图 4 所示:

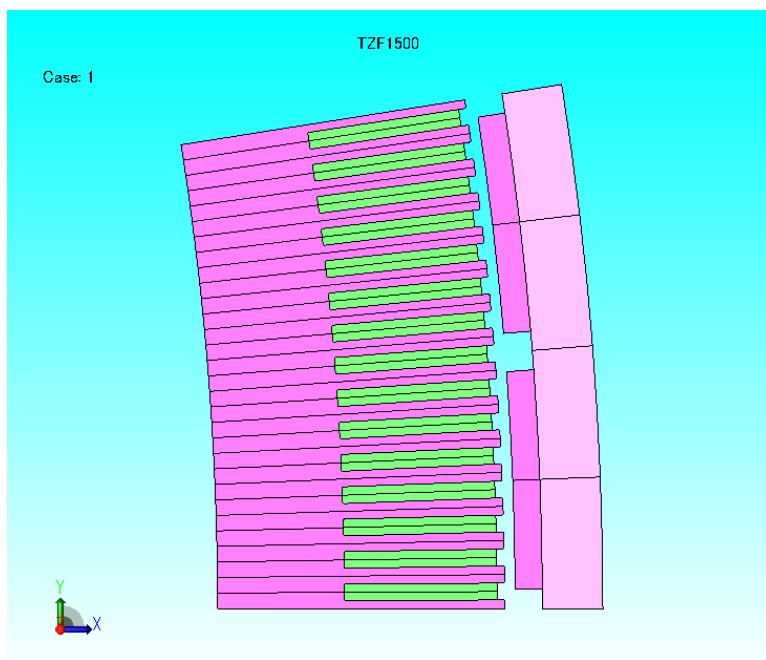


图 4 导入 JMAG Designer 后的单元电机模型

4.2 基于 JMAG Designer 的永磁风力发电机的性能分析

进行有限元分析的时候，发电机计算区域选取的是垂直于电机轴的平行平面场，这时电流密度和磁矢位只有 Z 轴方向的分量，所以采用矢量磁位 A_z 求解。对发电机做如下假设：

- 1) 采用二维场模拟实际磁场，选用 MSK 国际单位制，直角坐标系。
- 2) 不计交变磁场在导电材料中的涡流反应，因此永磁同步发电机的磁场可作为非线性稳定磁场来处理。
- 3) 忽略装配误差。
- 4) 铁心里的磁导率是各向同性的。

在以上假设的前提下，得到下列非线性泊松方程和边界条件：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\nu \frac{\partial A_z}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu \frac{\partial A_z}{\partial y} \right] = -J_z$$

式中， ν 为磁阻率， $\nu = \frac{1}{\mu}$ ， μ 为磁导率； A_z 为磁矢位， J_z 为等效面电流密度。求解区域 Ω ：

整个剖分区域；边界区域 Γ ：定子外圆边界 $B_{n1} = 0$ 。

由 JMAG Express 导入 Designer 的模型是电动机模型（Express 暂时只支持电动机的设计计算建模功能），所以还要进行外电路设置将电机模型转换为发电机模式。在 JMAG Designer 中添加自定义材料，对 Express 导入模型中的材料进行修改替换：定子冲片材料采用无取向硅钢片，定义为 50W470，永磁体采用高性能稀土永磁材料，定义为 N38SH，转子材料采用导磁型厚钢板，定义为 Q345D。在调整其他相关设置后，对发电机模型计算区域进行整体剖分，并对气隙附近进行网格加密，最后计算区域离散为大约 105532 个单元网格，如图 3 所示：

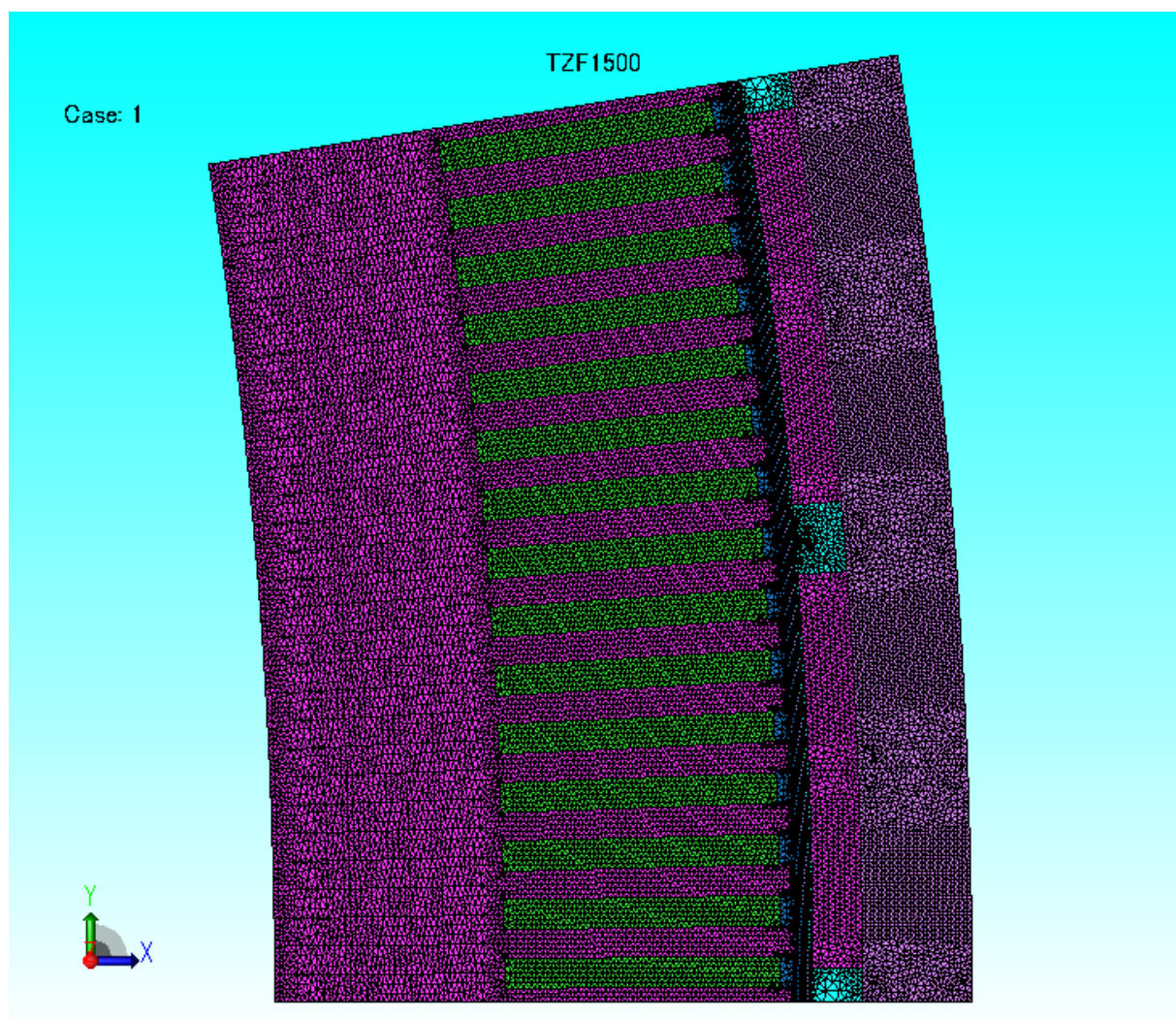


图 5 永磁风力发电机模型的网格划分

通过瞬态场的分析，可以得到发电机的磁场分布、磁密分布以及相关的矢量云图，见图 6-9：

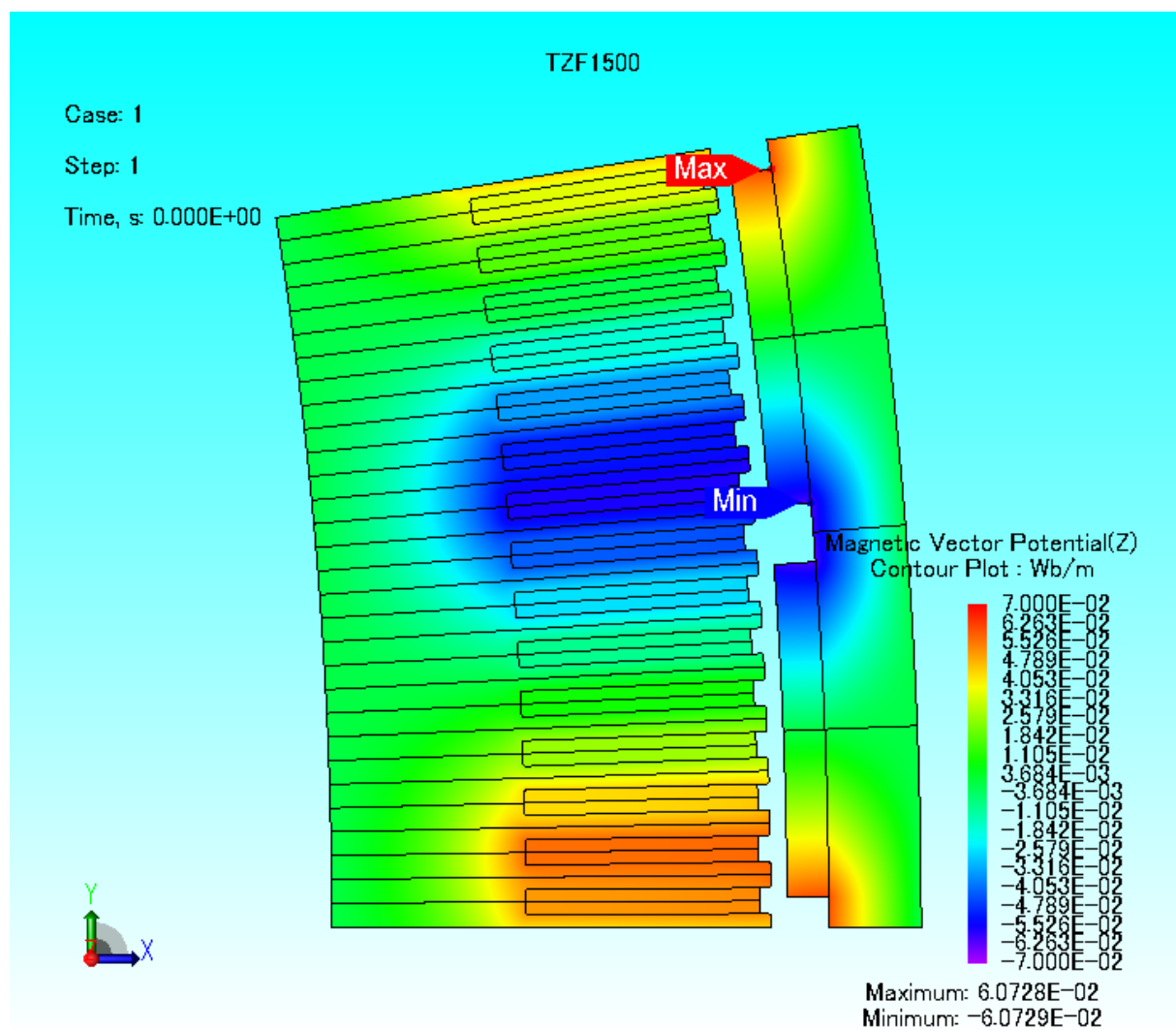


图 6 永磁风力发电机磁场分布云图

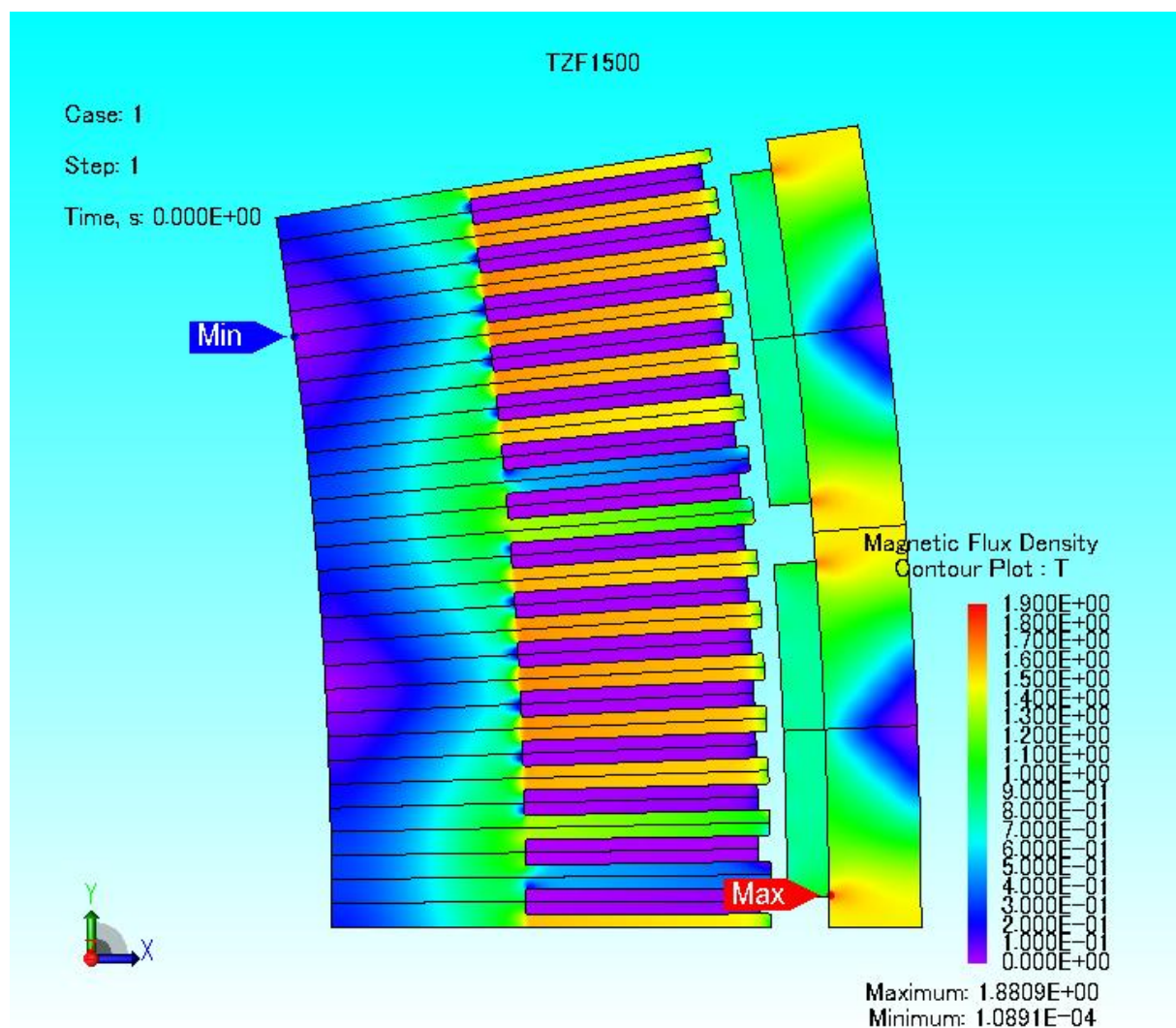


图 7 永磁风力发电机磁密分布云图

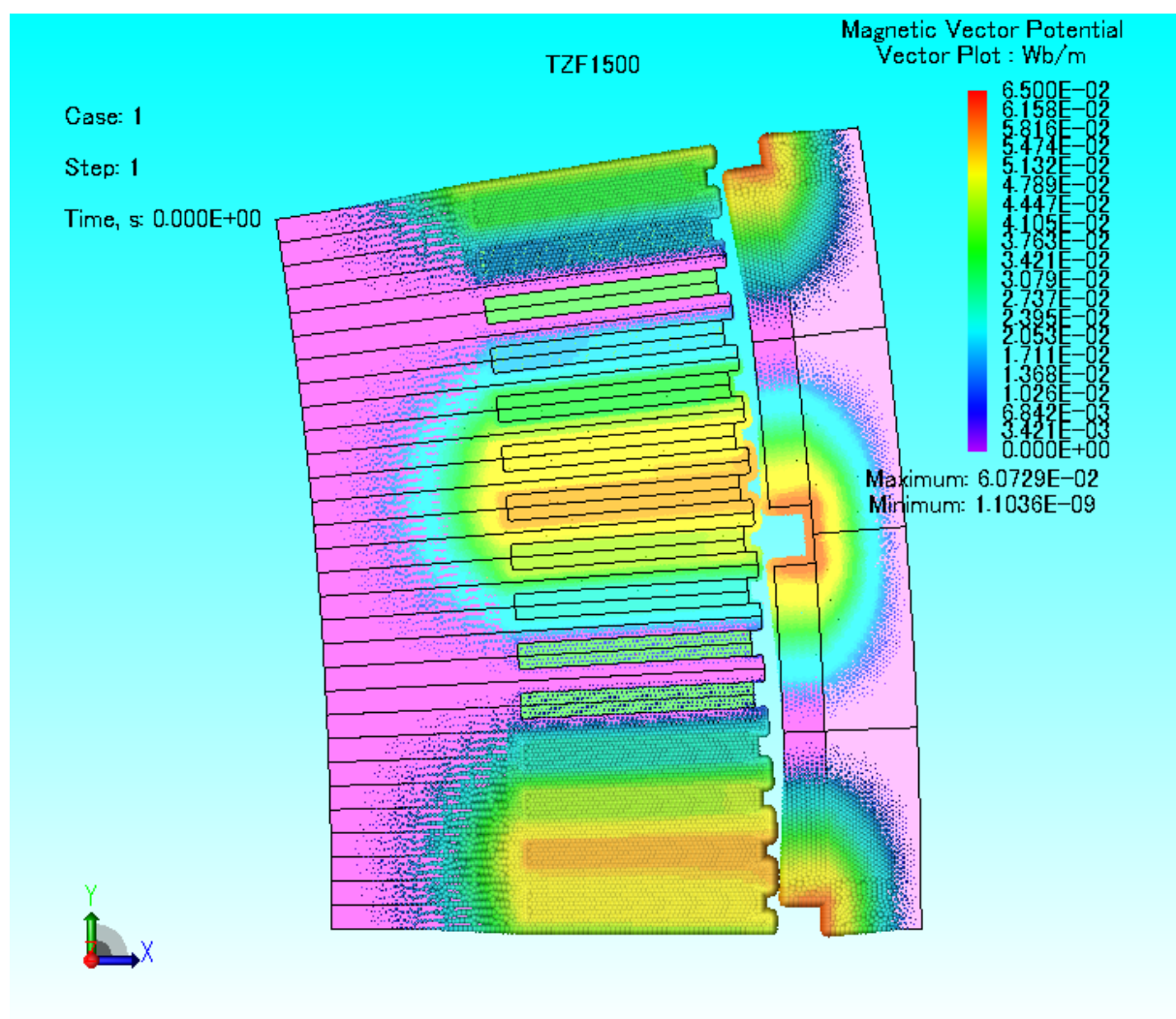


图 8 永磁风力发电机磁场分布矢量图

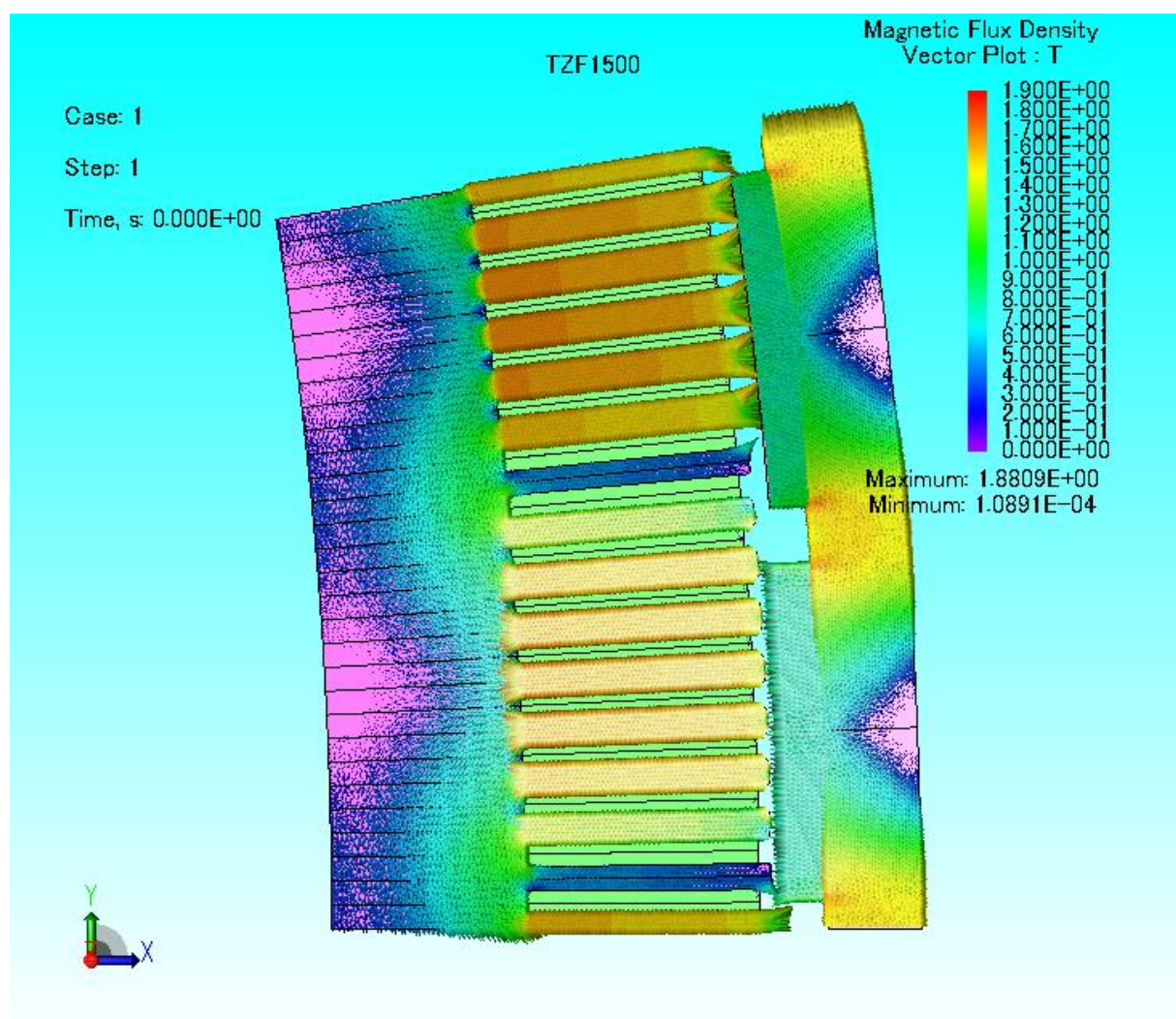


图 9 永磁风力发电机磁密分布矢量图

计算了发电机满载运行时的一些主要性能参数曲线，见图 10-图 12：

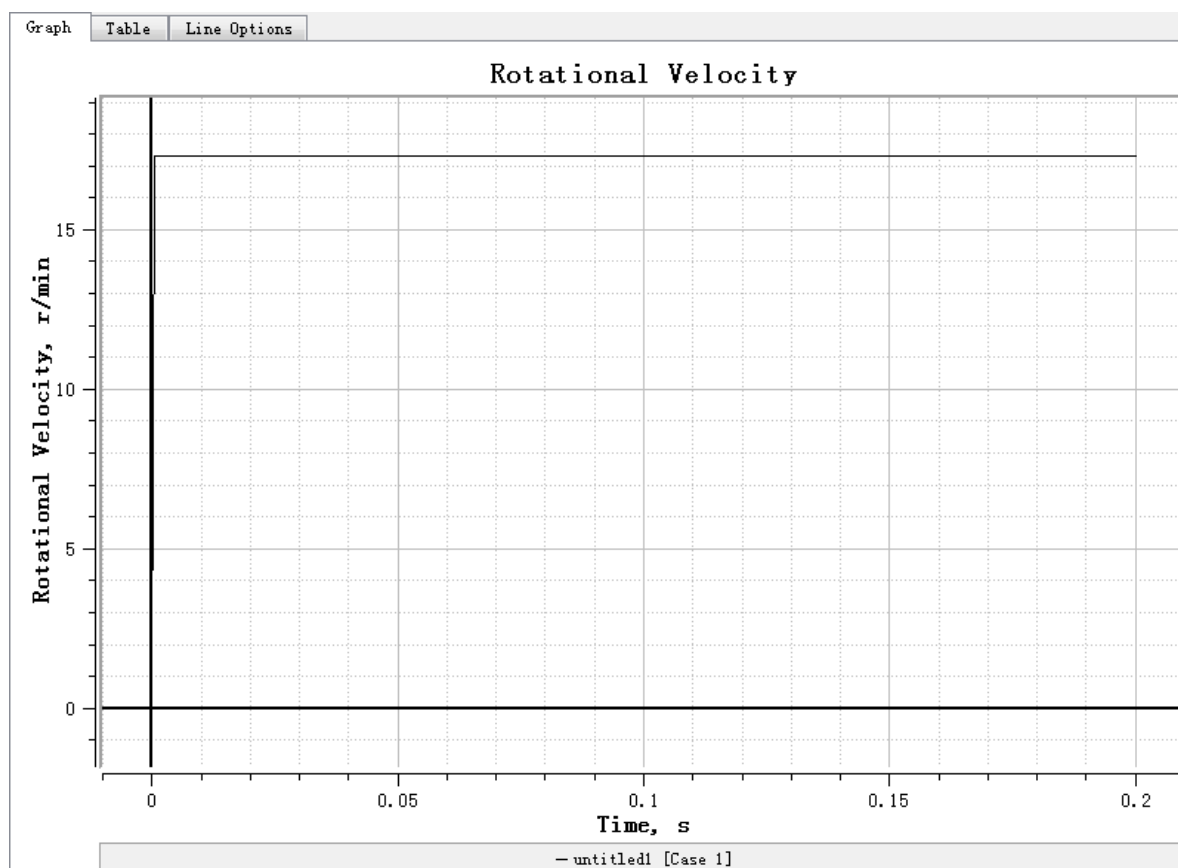


图 10 永磁风力发电机转速随时间变化的曲线

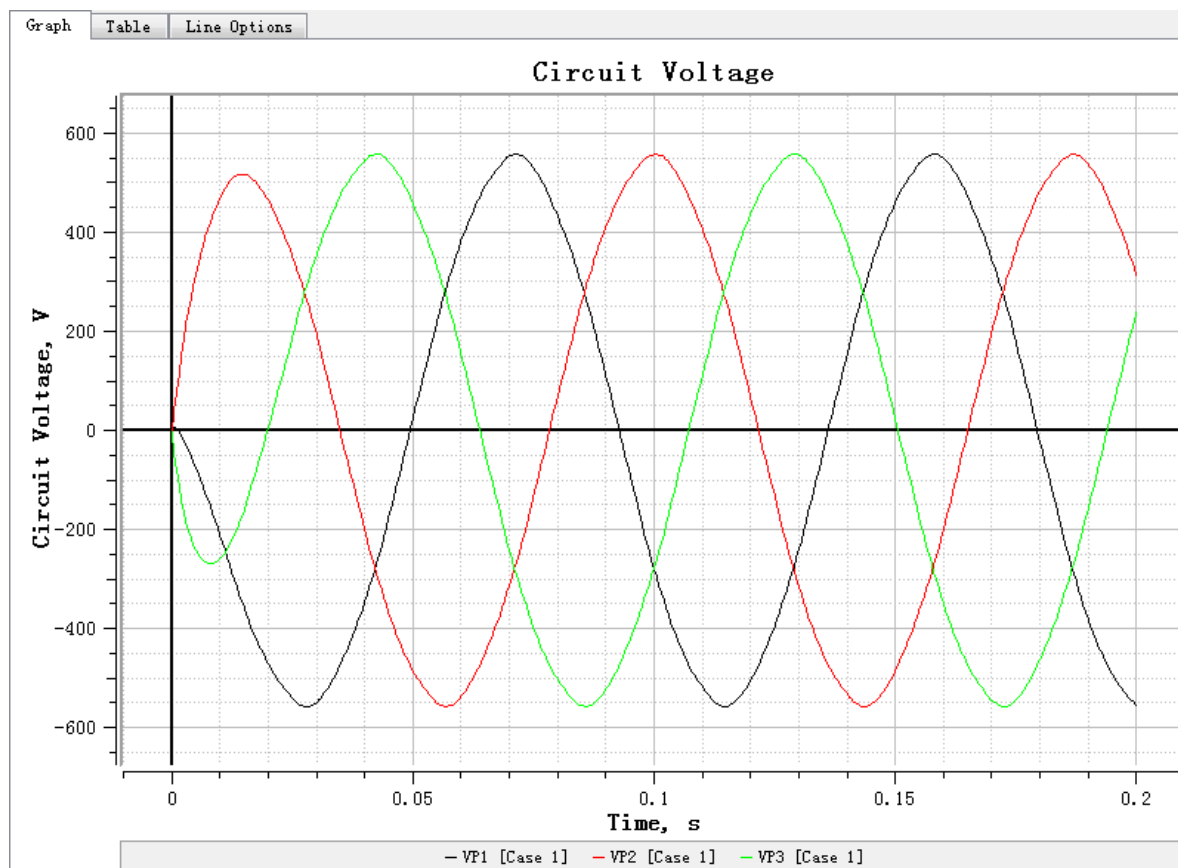


图 11 永磁风力发电机满载时定子相电压随时间变化的曲线

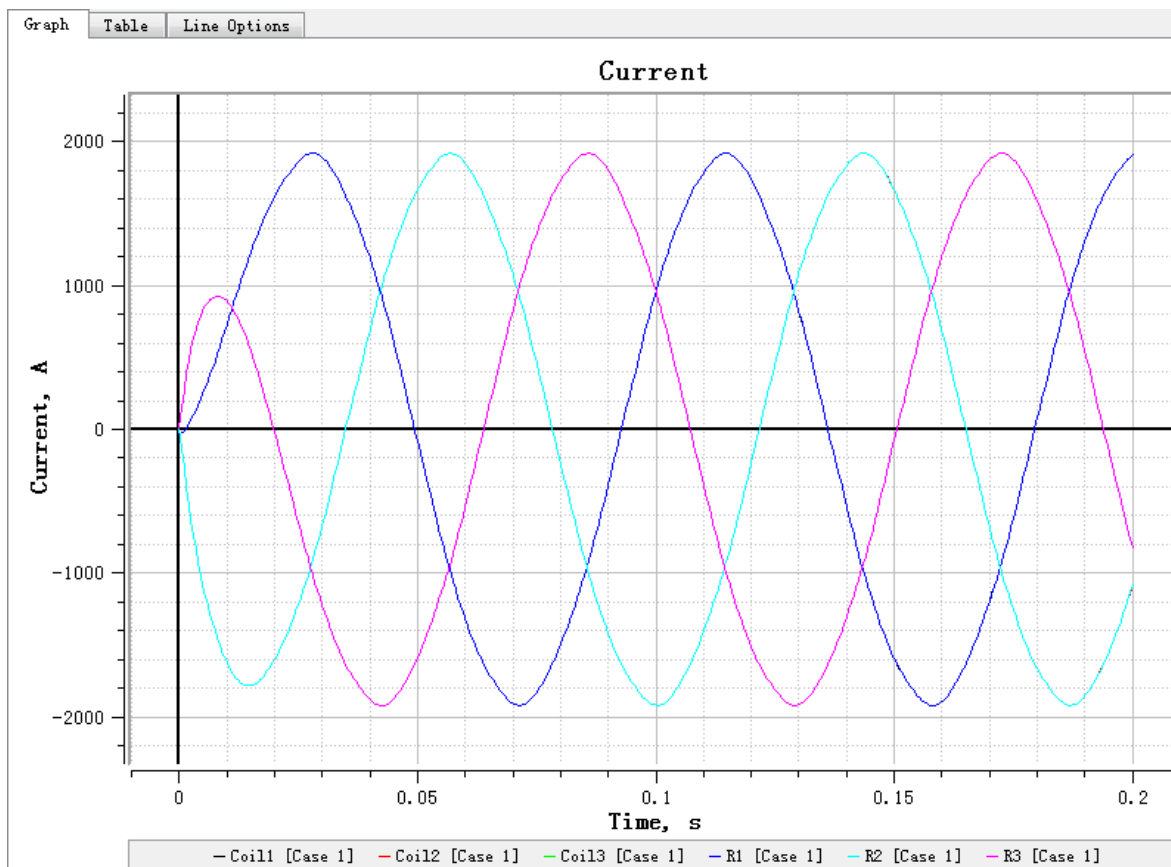


图 12 永磁风力发电机满载时定子电流随时间变化的曲线

由仿真曲线分析计算可知：发电机带额定负载，以 17.3r/min 的额定转速稳定运行时，定子线电压约为 682.44V，定子电流约为 1356.78A，满足设计要求。

5 实验结果

由以上电磁方案设计出图投产了一台样机，如图 13 所示：



图 13 外转子永磁风力发电机样机照片

用两组全功率变流器对样机进行了满载试验。驱动电机通过减速箱（变比为 100:1）-联轴器驱动发电机转动，通过改变输入转矩逐步提高发电机转速至额定转速（17.3r/min），同时用两组全功率变流器对发电机逐渐加载；满载时驱动端显示驱动变频电动机的情况如图 14 所示：



图 14 驱动端量表显示发电机已在额定转速下运行

通过示波器和功率表读取发电机在满载额定转速下运行时的电压、电流曲线波形以及数值见图 15、16：

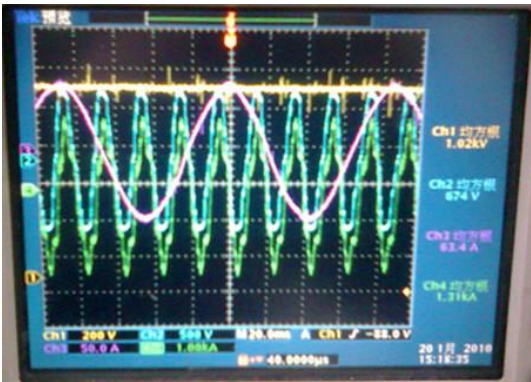


图 15 示波器采集的发电机线电压和线电流的波形



图 16 功率表采集的发电机主要性能参数的数值显示

由实验结果可知：设计的永磁发电机能够在额定转速下实现满发，满发功率为 1526kW；通过简单计算，得知此时发电机的定子线电流约为 1371A，线电压约为 679V。应用 JMAG 软件最终计算出的

发电机性能参数的数值与实验值的偏差在 2%以内, 说明了采用有限元分析软件 JMAG Designer 作为外转子永磁风力发电机电磁场分析工具得到的设计方案可以很好地满足工程上的精度需要。

6 结论

本文设计分析了一台兆瓦级外转子永磁风力发电机, 利用等效磁路法对 1.5MW 永磁风力发电机进行了电磁设计, 获得了发电机的主要尺寸及初始设计性能参数。采用电磁场分析软件 JMAG 建立了发电机的电磁场数值分析模型, 并计算了发电机在满载额定转速运行下的定子线电流、相电压等主要性能参数以及得到了磁场分布情况。样机的实验结果证明了 JMAG 软件应用于永磁风力发电机电磁设计分析结果的可靠性。

7 参考文献

- [1] 王承煦, 张源. 风力发电 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [2] W. Wu, V. S. Ramsden, T. Crawford, G. Hill A Low-Speed, High-Torque, Direct-Drive Permanent Magnet Generator For Wind Turbines[C]. Industry Applications Conference 2000, Volume 1, 147-154.
- [3] Jian Yi Chen, Chem V Nayar, Dave Baker, Determination of Parameter and Evaluation of Performance of an Out-Rotor Permanent Magnet Generator for Wind Energy Applications[J]. Power Electronic Drives and Energy Systems for Industrial Growth, 1998, (1): 353-358.
- [4] J. Y. Chen, C. V. Nayar, A Direct-coupled, Wind-driven Permanent Magnet Generator [J]. Energy Management Power Delivery, 1998, (2): 542-547.
- [5] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [6] GB/T 25389.1-2010, 风力发电机组 低速永磁同步发电机 第 1 部分: 技术条件 [S].
- [7] GB/T 25389.2-2010, 风力发电机组 低速永磁同步发电机 第 2 部分: 试验方法 [S].
- [8] JMAG-Designer Version 11.1 User's Manual. JSOL Corporation.
- [9] JMAG Version 11 User's Manual Solver. JSOL Corporation.