

基于有限元法的无刷交流励磁机空载特性分析及额定励磁电流计算^{*}

姚维康, 徐余法, 黄厚佳, 闫鑫洋
(上海电机学院 电气学院, 上海 201306)

摘要: 针对无刷交流励磁机铁心结构的复杂性和铁磁材料饱和特性的影响, 采用非线性有限元法, 利用有限元软件 Maxwell, 建立无刷交流励磁机的二维模型, 对空载特性及额定励磁电流进行研究分析。以 1 台 28 kW 无刷交流励磁机为例, 对电机气隙磁场仿真分析并求取空载特性。计算所得的基波电势与实测结果相符, 为此类电机电磁场的设计提供理论依据。在此基础上通过场路耦合的方法, 用外电路来模拟额定负载工况, 计算出额定工况下的励磁电流。该方法具有实用性, 可为一般的交流励磁机励磁电流计算提供参考。

关键词: 无刷交流励磁机; 有限元法; 空载特性; 励磁电流

中图分类号: TM 34 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)03-0058-06

No-Load Characteristics Analysis and Rated Excitation Current Calculation of Brushless AC Exciter Based on Finite Element Method^{*}

YAO Weikang, XU Yufa, HUANG Houjia, YAN Xinyang

(College of Electrical Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China)

Abstract: In view of the complexity of the core structure of the brushless AC exciter and the influence of saturation characteristics of the ferromagnetic material, the finite element software Maxwell was used to create a two-dimensional model of the brushless AC exciter for the research and analysis of no-load characteristics and rated excitation current. Taking a 28 kW brushless AC exciter as an example, the simulation analysis of the air gap magnetic field of the motor and the calculation of the no-load characteristics were carried out. The calculated fundamental wave potential was consistent with the measured results, and a theoretical basis for the design of the electromagnetic field of this type of motor was provided. Based on this, through field-circuit coupling method, the external circuit was used to simulate the rated load condition, and the excitation current under rated condition was calculated. This method had practicality and could provided reference for the calculation of the general AC exciter excitation current.

Key words: brushless AC exciter; finite element method; no-load characteristics; excitation current

0 引 言

无刷交流励磁机作为给主发电机提供励磁电流的同步发电机, 在整个发电系统中具有重要作用。在同步发电机的设计中, 磁路设计是关键, 决定了电机的性能和质量。磁路设计又依赖于电磁

计算^[1]。通过对电机的空载特性计算, 可以判断电机的磁路设计是否准确。无刷交流励磁机主要运行数据之一的励磁电流, 也是电机设计中一重要环节, 额定励磁电流计算的准确性直接影响无刷交流励磁机的运行。大多数文献采用有限元法对永磁电机、同步电机、无刷直流电机进行相关分

^{*} 基金项目: 上海发电机厂核心技术重点研究项目(T-130717001.02)

作者简介: 姚维康(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机设计与控制。

徐余法(1964—), 男, 教授, 研究方向为电机优化设计。

析研究^[2-5],而对电枢旋转式的无刷交流励磁机的研究很少。文献[6]采用 Magnet 软件对无刷交流励磁机进行研究,建立二维瞬态运动场模型,仿真了在空载工况下的磁场空间分布、电磁参数、电路参数。文献[7]利用有限元软件对发电机的空载特性进行计算,得到相关特性曲线并计算额定负载下的励磁电流。文献[8]利用 ANSYS 软件建立二维静磁场仿真模型,运用额定功率因数和额定电压迭代的方法来确定额定工况下的励磁电流,并与西屋公司引进的设计值进行对比。文献[9]采用二维有限元多元化参数法建立交流励磁机的电磁场约束模型,定量计算励磁电流和电枢电流对瞬态电感矩阵的影响。

本文针对无刷交流励磁机,基于 Maxwell 软件对电机电磁场仿真计算,对气隙磁场分布进行分析,计算电机在不同励磁电流下的空载电势,从而得到空载特性曲线。计算所得基波电势与试验值对比,误差较小。用端电压和功率因数双重迭代的方法来计算励磁电流,会导致计算收敛性较差,故本文在外电路中采用等效阻抗法来模拟额定负载工况,有效避免了功率因数的迭代,提高了计算收敛性^[10]。

1 原理与计算方法

1.1 空载特性计算

每给定一个励磁电流 I_f ,就会得到对应的空载电势 E_0 ,由此可得交流励磁机的空载特性曲线 $E_0=f(I_f)$ 。

计算步骤如下。

(1) 选择 Transient 场,建立二维模型,定义定、转子铁心及磁极的材料属性,设定边界条件,设置剖分参数,加载求解时间。

(2) 给定励磁绕组初始电流值 I_m 。

(3) 开始剖分,计算磁场分布。

(4) 求得该给定值下的径向气隙磁密 B_r ,并进行谐波分析,提取基波 B_1 :

$$B_r(t) = \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \sin(n\omega t) + b_n \cos(n\omega t)] \quad (1)$$

$$B_1(t) = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} \cos(\omega t - \varphi) = B_m \cos(\omega t - \varphi) \quad (2)$$

式中: a_1, b_1 ——基波的正弦和余弦的傅里叶系

数,且 $\varphi = \arctan \frac{a_1}{b_1}$;

B_m ——磁密幅值。

(5) 计算基波气隙主磁通:

$$\varphi_0 = l_{\text{eff}} \int_0^{\tau} B_m \sin\left(\frac{\pi}{\tau} x\right) dx = \frac{\pi}{2} B_m \tau l_{\text{eff}} \quad (3)$$

式中: φ_0 ——电机的每极磁通;

l_{eff} ——电机铁心有效长度;

τ ——极距。

(6) 如果气隙磁密沿着圆周作正弦空间分布,则无刷交流励磁机转子绕组感应电势有效值为

$$E_0 = 4.44 f_1 k N \varphi_0 \quad (4)$$

式中: f_1 ——电源频率;

k ——绕组系数;

N ——绕组匝数;

φ_0 ——气隙磁通。

在交流励磁机的空载特性分析中,电压波形畸变率 K_{N1} 是一个比较重要的参数:

$$K_{N1} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} E_{mn}^2}}{E_{m1}} \times 100\% \quad (5)$$

式中: E_{mn} ——第 n 次谐波有效值。

1.2 额定励磁电流计算

为了避免端电压和功率因数角的双重迭代收敛性较差的影响,采用场路耦合的方法,运用等效阻抗法来模拟无刷交流励磁机的额定负载工况,无需对功率因数进行迭代,可以提高计算收敛性。搭建外电路,与电磁场有限元模型耦合,构成一个仿真系统。外电路如图 1 所示,其中 LWinding A、LWinding B、LWinding C 是与有限元模型耦合的三相绕组。根据式(6)可得等效的电阻 R 和电感 L 的值。端部漏抗远小于等效负载阻抗,可忽略不计。

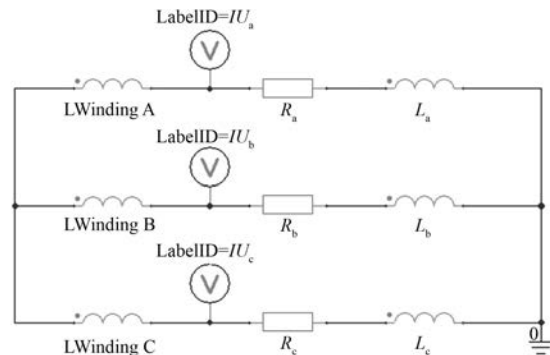


图 1 额定负载外电路

$$\begin{cases} Z = \frac{U_N}{I_N} = \sqrt{R^2 + \omega L^2} \\ \cos \varphi_N = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \omega L^2}} \end{cases} \quad (6)$$

式中： Z ——阻抗；
 $U_N、I_N$ ——额定电压和额定电流；
 φ_N ——功率因数角。

利用 Maxwell 设置参数化求解变量^[11]，将励磁电流设为变量，通过添加一系列励磁电流数值，使端电压基波分量与额定电压相符，使得端电压满足额定电压的同时也满足额定功率因数，此时的电流即额定励磁电流。

2 无刷交流励磁机有限元模型建立

2.1 计算模型

无刷交流励磁机基本参数如表 1 所示。

表 1 无刷交流励磁机基本参数	
参数名称	参数值
容量/kW	28
额定电压/V	100
额定电流/A	180
功率因数	0.9
频率/Hz	180
相数	3
额定转速/(r·min ⁻¹)	3 600

在有限元计算软件 Maxwell 2D 中建立无刷交流励磁机瞬态场二维仿真模型。以整个模型作为求解区域，定子外径和转子内径作为矢量边界。为了改善磁场分布和提高气隙磁密，对转子槽开口处进行 90°折线处理。无刷交流励磁机物理模型如图 2 所示。转子槽如图 3 所示。



图 2 无刷交流励磁机物理模型

2.2 无刷交流励磁机的材料属性

定子上有 6 个磁极冲片，每个磁极上绕有励磁绕组，磁极与磁轭的材料相同，采用 8 号钢板。

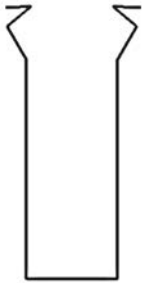


图 3 转子槽

转子有 54 个槽，嵌有双层电枢波绕组，极距 $\tau=9$ 的整距，将绕组上下层边分成 3 组串联绕组 A、B、C，并联支路数为 2。电枢冲片材料采用 50W310 硅钢片，气隙 $\delta=3\text{ mm}$ ，考虑铁磁材料的饱和性和非线性，铁心材料的磁化曲线如图 4 所示。

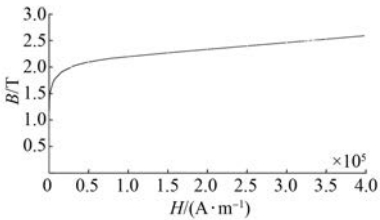


图 4 铁心材料磁化曲线

2.3 无刷交流励磁机的边界条件设定

Maxwell 2D 中常见的边界条件有自然边界条件、狄里克莱边界条件 and 对称边界条件。

自然边界条件又称为纽曼边界条件，求解时软件自动添加，无需人工定义，主要添加在 2 个接触的物体表面，在接触面上，磁场强度 H 的切向分量和磁感应强度 B 的法向分量保持连续。引入表面电流密度后，依然可以保证 H 的连续性。

狄里克莱边界条件主要施加在计算模型的边线上，定义该边线上的所有点都满足： $A_z = \text{const}$ 或 $rA_\theta = \text{const}$ 。前者适用于 XY 坐标系，后者适用于 RZ 坐标系。 A_z 为 Z 方向的矢量磁位， A_θ 为 θ 方向的矢量磁位， const 为给定常数。

对称边界条件适用的计算模型必须具有对称性，目的在于缩小计算模型区域。对称边界条件包括奇对称边界条件 (Odd) 和偶对称边界条件 (Even)。奇对称边界条件表示磁力线平行于边界条件，仅有磁场切向分量，法向分量为零。偶对称边界条件刚好相反，磁力线垂直于边界条件，仅

有法向分量,切向分量为零。

本文的无刷交流励磁机取外壳矢量磁位为零,采用狄里克莱边界条件,忽略端部效应,可得电机瞬态场的定解方程也就是边界条件:

$$\begin{cases} \Omega: \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -J_s + \sigma \frac{\partial A_z}{\partial t} \\ S: A_z = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: Ω ——求解区域;

S ——定子外圆和转子内圆边界条件;

μ ——磁导率;

A_z ——矢量磁位;

σ ——电导率;

J_s ——源电流密度。

2.4 无刷交流励磁机网格剖分

无论在实际工程应用还是仿真分析中,有限元的网格剖分都是一个重要环节,直接决定了最后的计算精度和准确度^[12]。设置网格数太多,则计算时间长、所需内存量大,将导致计算收敛度减小,甚至部分区域不收敛而得不到正确值;设置网格数太少,则一些重要的区域(比如带槽口的气隙)剖分三角形的数量将不够密集,导致计算结果精度差。因此选择合适的剖分单元很关键。

Maxwell 2D 有自适应剖分技术,不需要人工设定剖分参数,软件会根据间距、气隙和区域大小自动确定网格单元。图 5 所示为软件自动剖分结果。

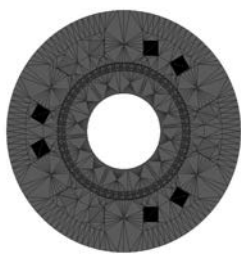


图 5 有限元自适应网格剖分图

由图 5 可见,自动网格剖分所得的网格质量不高,密度不够,需要设定每个部分的剖分参数,采取分区域局部细化,如图 6 所示。

3 有限元仿真结果分析

3.1 空载特性计算结果

无刷交流励磁机空载时的气隙磁密对电机的

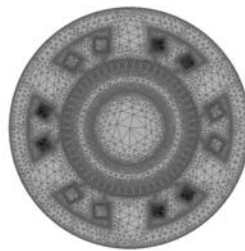


图 6 细化后的网格剖分图

电磁设计极其重要,对电枢绕组上感应电势以及功率和转矩都有一定影响。空载情况下的气隙径向磁密分布曲线如图 7 所示。交流励磁机计算区域磁密分布如图 8 所示。

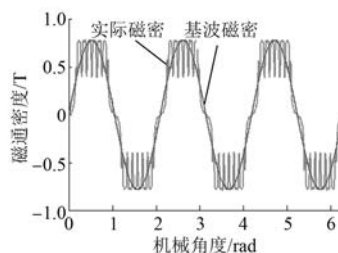


图 7 气隙径向磁密分布曲线



图 8 交流励磁机计算区域磁密分布

由于空载时没有电枢反应的影响,磁势只由励磁磁势提供,因此端电压的瞬态波形接近正弦曲线。图 9 所示为无刷交流励磁机 A 相绕组空载电压波形。对空载电压进行傅里叶分解,可得空载电压幅值为 102.7 V,误差约为 2.7%。B、C

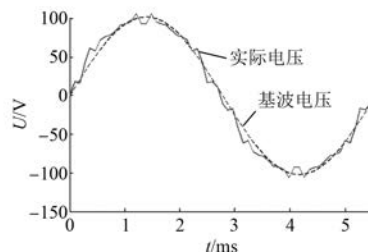


图 9 空载电压波形

相滞后 A 相 120° 、 240° , 不再赘述。

空载特性曲线如图 10 所示。将基波电势计算值和试验值相比, 其平均误差约为 4%, 在实际工程误差范围内。

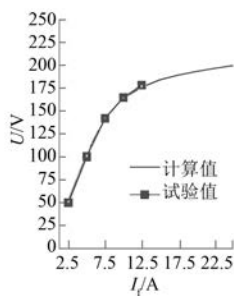


图 10 空载特性曲线

从图 10 可以看出, 用有限元法对无刷交流励磁机的空载特性分析符合实际情况, 具有良好的仿真性能。同时, 在研究空载特性的基础上还可以对励磁机其他性能进一步分析和计算。

3.2 额定励磁电流计算结果

利用 Maxwell 参数化设置, 对励磁电流进行数组定义, 使得端电压基波分量与额定电压一致, 同时也满足功率因数, 此时对应的励磁电流即额定励磁电流。图 11 所示为 $t=0.01$ s 时电机额定工况下的磁力线分布。分别提取 B 相一个周期内的电压和电流波形, 如图 12 所示。从图 12 可以看出, 电压第一次过零点在 2.4 ms, 电流第一次过零点在 2.8 ms, 电流滞后电压 25.92° , 即功率因数为 $\cos 25.92^\circ = 0.899$, 与额定功率因数 0.9 (滞后) 相符合。



图 11 额定负载磁力线分布

分析额定工况下的气隙磁密时, 由于转子上加了负载电流, 有电枢反应的影响, 导致计算的气隙磁密波形发生畸变, 如图 13 所示。励磁电流从 5 A 加到 30 A (步长为 5 A), 在电枢绕组上得到对应负载电压。额定励磁电流计算值 5.72 A, 试

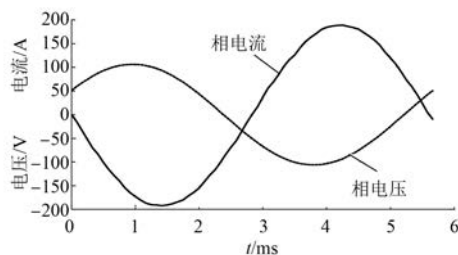


图 12 额定负载电压电流图

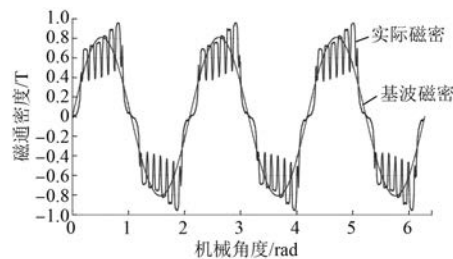


图 13 额定负载时气隙磁密

验值 5.8 A, 对比误差为 1.38%。

4 结 语

本文用有限元软件 Maxwell 对 28 kW 无刷交流励磁机进行建模、仿真和计算。研究了该电机在空载时的气隙磁密、空载电势和磁密分布, 计算出空载特性并绘制空载特性曲线。运用场路耦合的方法来模拟额定负载工况, 计算额定励磁电流, 结果与实际额定工况相符, 误差在有效范围内, 满足实际工程设计要求。此方法有较高的实用性, 可用于一般同步电机额定励磁电流的计算, 同时可以扩展到旋转式电动机和其他类型电机的研究分析, 还可以研究稳态短路和故障时的瞬态电路特性。

【参考文献】

- [1] 李隆平, 王宝玲, 周汝模. 电机设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 1992.
- [2] 彭涵, 张金华, 王近宇. 永磁副励磁机电磁场有限元分析应用[J]. 湖北工业大学学报, 2012, 27(1): 40.
- [3] HUO F Y, LI W L, WANG L K, et al. Numerical calculation and analysis of three-dimensional transient electromagnetic field in the end region of large water-hydrogen cooled turbogenerator[J]. IEEE Transactions

- on Industrial Electronics, 2014, 61(1): 188.
- [4] WANG L, HUO F, LI W, et al. Influence of metal screen materials on 3-D electromagnetic field and eddy current loss in the end region of turbogenerator [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 49(2): 939.
- [5] 许家群, 龙凤, 邢伟. 汽轮交错磁极无刷直流发电机的励磁电流计算[J]. 北京工业大学学报, 2016, 42(8): 1168.
- [6] 马晓荷, 沈颂华. 基于 Magnet 的无刷交流励磁机瞬态特性仿真研究[J]. 微特电机, 2008, 36(8): 23.
- [7] 杨海波, 周光厚, 李建富, 等. 60 Hz 汽轮发电机励磁电流的分析与计算[J]. 东方电气评论, 2015, 29(1): 25.
- [8] 咸哲龙, 汪耕, 袁建华, 等. 1 000 MW 级核电 4 极发电机励磁电流的有限元计算[J]. 上海大中型电机, 2009(2): 18.
- [9] 马晓荷, 沈颂华. 交流励磁机的有限元多元化参数计算及瞬态仿真[J]. 微电机, 2010, 43(3): 32.
- [10] 梁艳萍, 陈建清, 黄浩. 转子磁路结构对汽轮发电机励磁电流和磁场分布的影响[J]. 电机与控制学报, 2011, 15(4): 13.
- [11] 刘慧娟, 上官明珠, 张颖超, 等. Ansoft Maxwell 13 电机电磁场实例分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [12] 马晓荷, 沈颂华. 基于 Maxwell 2D 的航空电源交流励磁机空载特性研究[J]. 微电机, 2009, 42(2): 40.

收稿日期: 2018-10-11

(上接第 40 页)

- [6] VERHILLE J N, BOUSCAYROL A, BARRE P J, et al. Torque tracking strategy for anti-slip control in railway traction systems with common supplies [C] // Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference, 39th IAS Annual Meeting, 2004: 2738.
- [7] MATSUMOTO Y, OZAKI S, KAWAMURA A. A novel vector control of single-inverter multiple-induction-motors drives for Shinkansen traction system [C] // Sixteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2001: 608.
- [8] KELECY P M, LORENZ R D. Control methodology for single inverter, parallel connected dual induction motor drives for electric vehicles [C] // 25th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, 1994: 987.
- [9] 吴其华, 苏邦荃. 多电机同步控制系统[J]. 兵工自动化, 2003, 22(1): 20.
- [10] CHIASSON J, SETO D, SUN F P, et al. Independent control of two PM motors using a single inverter application to elevator doors [C] // Proceedings of the 2002 American Control Conference, 2002: 3093.
- [11] ZHANG F G, LIU G W, SHEN Y S, et al. Characteristic study on a novel PMSM with opposite-rotation dual rotors [C] // International Conference on Electrical Machines and Systems, 2007: 805.
- [12] 李崇坚. 交流同步电机调速系统[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2013.
- [13] 陈尔奎. 盘式永磁同步电动机的仿真研究[J]. 微电机, 2013, 46(10): 20.
- [14] 李春艳, 寇宝泉, 程树康. 永磁同步电动机弱磁扩速概况[J]. 微特电机, 2008, 36(1): 58.
- [15] 冯江华, 桂卫华, 许俊峰. 考虑参数变化的永磁同步电动机弱磁控制研究[J]. 微电机, 2008, 41(4): 20.
- [16] 江南. 浅析合理选用负荷率提高电机效率的途径[J]. 江苏冶金, 2008, 36(增刊): 81.
- [17] TIE S F, TAN C W. A review of energy sources and energy management system in electric vehicles [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2013, 20(4): 82.
- [18] 高仕红, 李善奎. 考虑铁耗时永磁同步电机的数学模型及其仿真研究[J]. 微电机, 2007, 40(1): 45.
- [19] 顾宇华. 牛顿插值法在测量数据处理中的应用[J]. 电测与仪表, 1994(8): 21.
- [20] 高仕红, 熊云槐. 一种精确的永磁同步电机数学模型及仿真模型的研究[J]. 湖北民族学院学报(自然科学版), 2008, 26(3): 341.

收稿日期: 2018-10-11