

考虑磁场饱和的双定子永磁同步发电机的磁路模型

陈 哲, 王爱元

(上海电机学院 电气学院, 上海 201306)

摘 要: 双定子永磁同步发电机(DS-PMSG)包括内外两个定子和中间的转子,一般的电磁场计算软件计算比较困难。建立 DS-PMSG 的磁路计算模型,利用铁磁材料的磁化特性曲线考虑磁场饱和,并同时考虑内外两套绕组电枢反应对永磁磁场的影响,可对电机的性能参数进行计算,便于设计变量的及时快速调整。通过对 1 台 3.3 kW 样机的磁路计算和有限元计算的比较,证明了该模型的有效性和实用性。

关键词: 双定子永磁同步发电机; 电枢反应; 磁路饱和; 仿真分析

中图分类号: TM 341 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)03-0046-04

Magnetic Circuit Model of Double-Stator Permanent Magnet Synchronous Generator with the Consideration of Magnetic Saturation

CHEN Zhe, WANG Aiyuan

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

Abstract: Double-stator permanent magnet synchronous generator (DS-PMSG) had two stators and one in-between rotor. It was not easy to carry out electromagnetic field calculation with common software. Magnetic circuit model for DS-PMSG was established. The model considered magnetic saturation according to the magnetization characteristic curve of ferromagnetic material, and took into account the influence of armature reaction of inner and outer windings on permanent magnet field. It was convenient for the timely adjustment of design variables. The calculation results using the magnetic circuit model of a 3.3 kW prototype met with the results of finite element calculation, which indicated the practicability and validity of the model.

Key words: double-stator permanent magnet synchronous generator (DS-PMSG); armature reaction; magnetic circuit saturation; simulation analysis

0 引 言

双定子永磁同步发电机(DS-PMSG)具有两套绕组。转子旋转时,2 个定子同时输出感应电压。该类电机具有精度高、响应快、加速度大、转矩波动小、过载能力高、机械集成度高、电机结构材料利用率高和驱动控制系统灵活多样等优点。表贴式串联磁路 DS-PMSG 对比内置式串、并联磁路结构具有结构简单、制造成本低、内外定子电磁耦合程度低、易于实现最优设计等特点,具有更广阔的研究前景^[1-3]。

等效磁路法在电机的磁路分析中具有快速方便、物理概念清晰等优点,但在设计永磁同步电机(PMSM)的磁场时,为了获得较高功率密度,铁心往往工作在接近磁饱和的状态,采用线性磁路分

析会带来较大的误差。有限元软件分析电机磁场给设计者带来了方便,但其软件价格高、计算周期长、磁路分析思想不够明确等缺点限制了其更广泛的应用^[4]。

文献[5]研究基于双电机模型连续极永磁电机(CPPM)电枢反应电感的计算原理和方法。文献[6]提出转子磁分路混合励磁同步电机的优化结构,探讨了磁场分布特性。文献[7]为 8 极 9 槽 PMSM 提出一种相对简单且准确的等效磁路法计算模型。文献[8]建立双凸极永磁型双定子电机参数化模型,采用多目标敏感度优化方法,选取最优结构尺寸参数。文献[9]设计了 1 台无铁心双定子永磁电机,并进行了有限元建模和仿真。文献[10]着重研究不同转子结构对内外定子磁耦合的影响。

作者简介: 陈 哲(1990—),男,硕士研究生,研究方向为电机设计与优化。

文献[11-12]对永磁电机的非线性电感进行了分析研究。本文利用铁磁材料的磁化曲线,建立 DS-PMSG 磁路饱和的数学模型,根据该模型,通过 MATLAB/Simulink 模块建立其仿真模型,并与有限元计算进行比较,证明仿真模型的有效性。该仿真模型可以帮助设计者在改变某一个或多个参数的情况下,快速计算出其他参数,且计算结果与有限元计算结果相差无几,具有线性磁路计算和有限元计算的优势以及一定的工程应用价值。

1 磁路饱和的数学模型

由于 DS-PMSG 的磁场有内外 2 套绕组和永磁体,在电枢反应的影响下,磁路比较复杂,因此利用 dq 轴系进行分析。在建立模型计算前,先假设忽略电枢反应的槽磁阻。

DS-PMSG 的电枢反应磁场在 dq 轴系可分为 d 轴磁场和 q 轴磁场。选择不同的电机起始旋转角度可以分别得到电枢反应的 d 轴磁场和 q 轴磁场,分别如图 1(a)、图 1(b)所示。从图 1(a)、图 1(b)中可以看出, d 、 q 轴磁场在内、外定子铁心轭部、转子铁心等处均存在交叉耦合现象^[13-14]。

图 1(c)所示为 DS-PMSG 在一对极下的磁路模型。其中: R_{osy1} 、 R_{osy2} 、 R_{osy3} 、 R_{osy4} 为外定子铁心轭部 1/4 极距的周向磁阻; R_{ostd1} 、 R_{ostd2} 均为外定子铁心 d 轴上一个极的齿部磁阻; R_{ostq1} 、 R_{ostq2} 均为外定子铁心 q 轴上一个极的齿部磁阻; F_{oad1} 、 F_{oad2} 为 d 轴外定子电枢反应磁势; F_{oaq1} 、 F_{oaq2} 为 q 轴外定子电枢反应磁势; R_{ogd1} 、 R_{ogd2} 均为 d 轴外气隙一个极的气隙磁阻; R_{ogq1} 、 R_{ogq2} 均为 q 轴外气隙一个极的气隙磁阻; R_{ordx} 为 d 轴外永磁体内侧转子轭部一对极的径

向磁阻; R_{orfqx} 为 q 轴外永磁体内侧转子轭部一对极的周向磁阻; F_{om1} 、 F_{om2} 均为一个极外永磁体的励磁磁势;将上述符号中的下标 o 换成 i ,即表示对应的内定子、 d/q 轴内或极内的磁阻或磁势; R_{rb1} 、 R_{rb2} 、 R_{rb3} 、 R_{rb4} 均为转子铁心一对极的径向磁阻。

当 DS-PMSG 工作在接近磁路饱和的状态时,其铁心磁阻非线性,此时铁心磁阻除了与铁心的尺寸有关外,还会随着磁通量的变化而变化。因此磁阻是磁通量的函数:

$$R_m = f(\Phi) \quad (1)$$

在同步发电机中,定子导体切割旋转磁场产生感应电动势,其瞬时值为

$$e_m = B_m l v \sin \omega t = \frac{\sqrt{\Phi_d^2 + \Phi_q^2}}{A_\delta} l v \sin \omega t \quad (2)$$

因此感应电动势有效值为

$$e = \frac{\sqrt{2(\Phi_d^2 + \Phi_q^2)}}{2A_\delta} l v \quad (3)$$

式中: B_m ——磁密;

ω ——角速度;

Φ_d 、 Φ_q —— d 、 q 轴磁通;

A_δ ——气隙有效面积;

l ——导体长度;

v ——同步转速。

2 饱和磁路的仿真模型

根据建立的 DS-PMSG 饱和磁路数学模型,可以利用 MATLAB/Simulink 把电压源当作磁势,电阻当作磁阻,电流当作磁通,至于非线性磁阻,可以利用铁心材料的磁化曲线作为非线性参数,用受电流控制的电压源替代,这样就把磁路问题转化为电路问题进行仿真计算。非线性磁阻的仿真模型如图 2 所示。

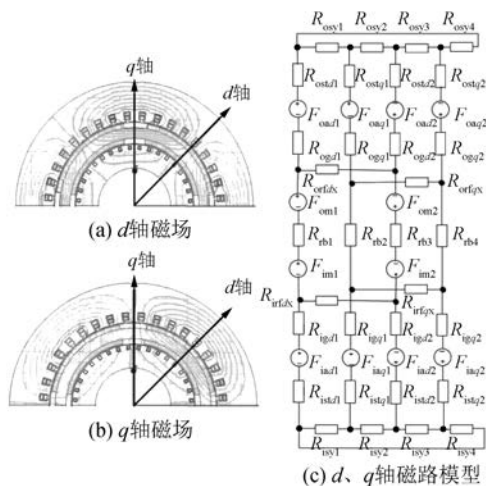


图 1 d 、 q 轴磁场及其磁路模型

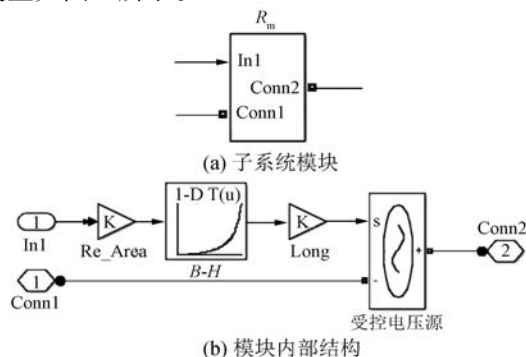


图 2 非线性磁阻仿真模型

图 2(a)是非线性磁阻的子系统模块,In1 是磁通输入端,Conn1 和 Conn2 均是接线端。图 2(b)是模块的内部结构,Re_Area 和 Long 作为控制参数,分别代表磁路平均面积的倒数和磁路平均长度; $B-H$ 为磁化特性曲线,以列表的形式输

入。图 3 所示为磁路饱和的系统仿真模型,每一个磁阻和磁势与图 1(c)一一对应;Cal_Te 和 Cal_Te1 中的函数 $f(u)$ 均代表求感应电动势的式(3);Display 用于显示所计算的感应电动势有效值。

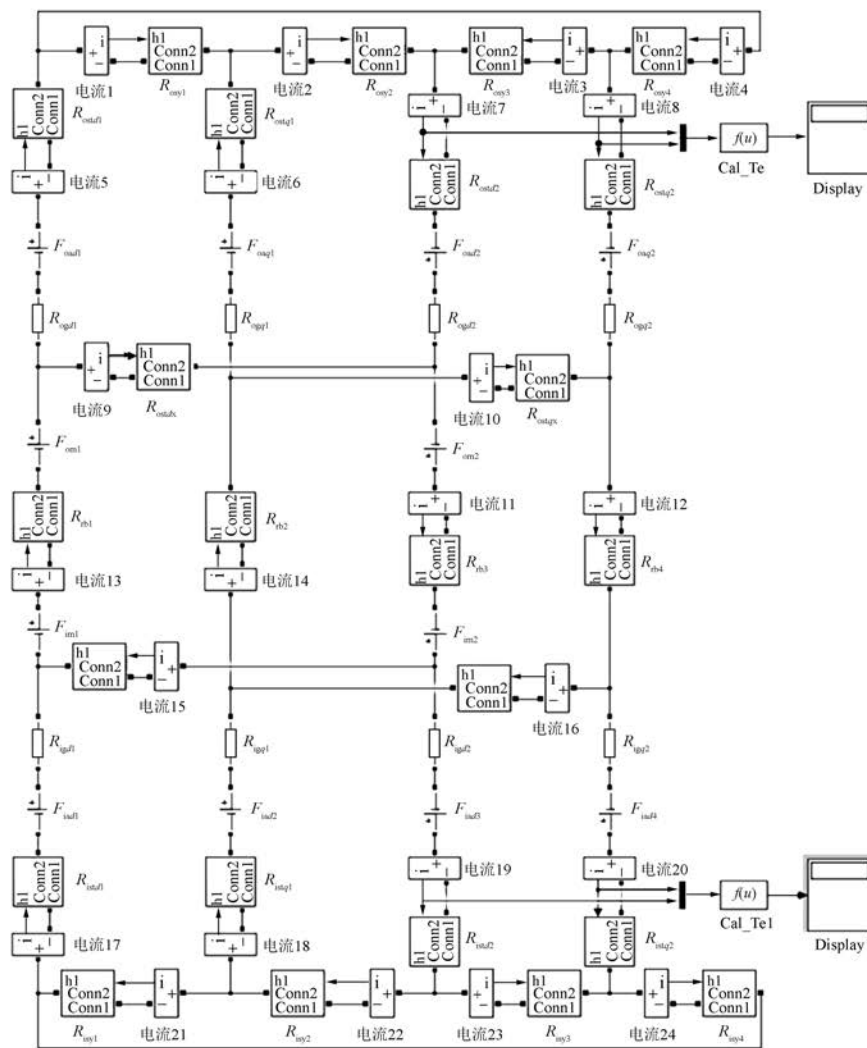


图 3 饱和磁路系统仿真模型

3 磁路仿真与有限元计算比较分析

为了验证磁路饱和模型的有效性,选取 1 台 4 极 3.3 kW,内、外定子均为 36 槽,额定电流为 4.81 A,采用双层径向充磁串联磁路结构的 DS-PMSG。在额定电流时,输入电机的结构尺寸、材料特性和电枢反应磁势等参数进行磁路仿真,并与有限元计算结果比较。

首先采用磁路仿真,经过计算得到电机的内

功率因数角。当电流为额定电流 4.81 A 时,根据电机的内功率因数角,分别得到 d 轴电流为 2.55 A, q 轴电流为 4.08 A。然后用有限元方法进行 3 次磁场计算,电流分别为① $I_d = 2.55$ A, $I_q = 0$; ② $I_d = 0$, $I_q = 4.08$ A; ③ $I_d = 2.55$ A, $I_q = 4.08$ A。其中,①、②的计算分别为 d 轴电流和 q 轴电流单独作用下的磁场,可计算 d 轴和 q 轴的气隙磁密,③的计算为 d 轴和 q 轴共同作用下的磁场,可计算额定电流下的感应电动势。

表 1 所示为额定电流时两种计算方法在各部分磁密和感应电动势等方面结果的比较。

表 1 磁路仿真与有限元计算比较
($I_d=2.55\text{ A}, I_q=4.08\text{ A}$)

项目	磁路仿真	有限元
d 轴外气隙磁密/T	0.839	0.817
d 轴内气隙磁密/T	0.853	0.824
q 轴外气隙磁密/T	0.796	0.781
q 轴内气隙磁密/T	0.811	0.798
外定子轭部磁密/T	1.374	1.361
内定子轭部磁密/T	1.472	1.406
外定子齿部磁密/T	1.315	1.286
内定子齿部磁密/T	1.344	1.303
转子铁心磁密/T	1.037	0.989
外定子绕组感应电动势/V	231.4	227.3
内定子绕组感应电动势/V	28.2	26.9
发电机感应电动势/V	259.6	254.2

从表 1 可以看出在额定电流时,磁路仿真的计算结果在各项参数上略高于有限元的计算结果,但相差不大,误差都在 5% 以内,能够满足工程需要。导致这种结果的主要原因是在磁路计算时忽略了内、外定子绕组电枢反应的漏磁路。

4 结 语

在考虑磁路饱和的情况下,利用材料的磁化特性曲线,建立了 DS-PMSG 磁路仿真模型,并将磁路仿真的计算结果与有限元计算结果进行比较,证明了磁路模型的有效性。在工程计算中,此磁路模型可以应用于 DS-PMSG 在磁饱和状态下磁场性能的快速分析。

【参 考 文 献】

[1] 柴凤,崔淑梅,程树康.双定子电机的发展状况及展望[J].微特电机,2001,29(5): 23.
[2] SMITH B H. Theory performance of a twin stator

induction machine [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1966, 85(2): 123.
[3] CHAI F, CUI S M, CHENG S K. Study of a novel double-stator permanent-magnet electric machine [C] // IEEE International Electric Machines and Drives Conference 2003, IEMDC 03, 2003, 3: 1375.
[4] 王爱元.基于磁场饱和的 IPM 电动机的磁路仿真[J].微特电机,2007,35(5): 23.
[5] 李新华,徐竟成,徐加贝,等.基于双电机模型 CPPM 电机电枢反应电感的计算[J].微特电机,2014,42(4): 8.
[6] 戴冀,张卓然,沐杨,等.转子磁分路混合励磁同步电机电枢反应磁场与电感特性研究[J].电工技术学报,2015,30(12): 276.
[7] 李桂丹,宋双利,李华,等.基于等效磁路法的永磁同步电机特性分析[J].微特电机,2016,44(9): 54.
[8] 陈云云,朱孝勇,全力,等.基于参数敏感度的双凸极永磁型双定子电机的优化设计和性能分析[J].电工技术学报,2017,32(8): 160.
[9] 阚超豪,汪晶,曹赢.低转动惯量无铁心双定子永磁电机研究[J].微电机,2015,48(11): 9.
[10] 李景琪.五相双定子永磁同步电机的优化设计与分析[D].北京:北京理工大学,2015.
[11] LEE J H, KIM J C, HYUK D S. Effect analysis of magnet on L_d and L_q inductance of permanent magnet assisted synchronous reluctance motor using finite element method [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1999, 35(3): 1199.
[12] 王宗培,葛新,韩光鲜.永磁无刷直流电动机非线性绕组电感研究[J].微电机,2004,37(5): 3.
[13] STUMBERGER B, STUMBERGER G, DOLINARETAL D. Evaluation of saturation and cross-magnetization effects in interior permanent-magnet synchronous motor [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(5): 1264.
[14] 曾令全,王志霞.考虑磁路饱和的永磁式同步电机计算[J].微特电机,2003,31(2): 10.

收稿日期: 2018-10-11