

基于粒子群优化算法的 TMPS-HESM 联合仿真设计方法

庞 亮, 张闻东, 胡豁达, 赵朝会
(上海电机学院 电气学院, 上海 201306)

摘 要: 混合励磁同步电机(HESM)是当前研究热点,其设计方法值得讨论。借助 ANSYS RMxpert 软件和传统磁路法设计电机定子,再通过 ANSYS Maxwell 软件设计 HESM 转子并进行电机参数化建模,进一步建立 8 极 48 槽 TMPS-HESM 的 Maxwell & Workbench & Optislang 联合仿真模型,最后运用粒子群优化(PSO)算法对电机进行全局多目标优化得到 Pareto 解集,并使用优劣解距离法(TOPSIS)从解集中客观选取最优设计方案。系统地提出了一种基于 PSO 的切向聚磁型并联结构混合励磁同步电机(TMPS-HESM)联合仿真设计方法。通过相关有限元仿真试验,验证了电机性能符合设计要求。

关键词: 混合励磁同步电机; 粒子群优化; 最优 TOPSIS 法; 有限元仿真

中图分类号: TM341 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2023)01-0062-09
doi: 10.12177/emca.2022.147

TMPS-HESM Co-Simulation Design Method Based on Particle Swarm Optimization Algorithm

PANG Liang, ZHANG Wendong, HU Huoda, ZHAO Chaohui
(School of Electrical Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Hybrid excited synchronous machine (HESM) is a research hotspot, and its design method is worth to discuss. The motor stator is designed by ANSYS RMxpert software and the traditional magnetic circuit method, and ANSYS Maxwell software is used to design the mixed excitation motor rotor and the motor parametric modeling is conducted. Furthermore, the Maxwell & Workbench & OptiSLang co-simulation model of 8-pole 48-slot TMPS-HESM is established. Finally, the Pareto solution set is obtained by global multi-objective optimization of the motor using particle swarm optimization (PSO) algorithm. The technique for order preference by similarity to an ideal solution (TOPSIS) method is used to objectively select the optimal design scheme from the solution set. A co-simulation design method of tangential magnetizing parallel structure hybrid excitation synchronous motor (TMPS-HESM) based on PSO algorithm is systematically proposed, and the performance of the motor is verified to meet the design requirements by the relevant finite element simulation tests.

Key words: hybrid excited synchronous machine (HESM); particle swarm optimization (PSO); optimal TOPSIS method; finite element simulation

0 引 言

一系列促进能源结构升级的政策,在工业领域大力发展以体积小、质量轻、高功率密度、高转矩密度为优点的永磁电机^[1-2]。然而永磁电机仅有单

近年来,为了保障能源和环境安全,我国提出

收稿日期: 2022-09-15; 收到修改稿日期: 2022-10-27
作者简介: 庞 亮(1996-),男,硕士研究生,研究方向为特种电机设计。
赵朝会(1963-),男,博士,教授,研究方向为电机与电器、电力电子与电力传动。

一励磁源,导致其气隙磁场调节困难,很大程度限制了电机弱磁调节下的升速能力和增磁调节下的增矩能力,以及发电运行时的稳定调压能力^[3],为实现永磁电机气隙磁场可调节性,混合励磁同步电机(HESM)逐渐成为了研究热点,并在新能源汽车、船舶推进、航空航天等领域具有非常广泛的应用前景^[4]。

文献[5-6]设计了一种磁分路式径向结构HESM,论述了该电机的结构和工作原理,分析了磁分流点和磁不分流点对应的气隙磁密大小,并研究了转子磁分路式HESM的空载特性,分别讨论了永磁部分和电励磁部分长度对电机空载特性的影响,通过仿真和试验表明,此类电机比较适合短粗结构。文献[7-8]提出了一种切向/径向并联磁路混合励磁发电机,对其磁场分布、静态特性和运行特性进行分析,结果表明该电机具有良好的调磁能力,但其气隙磁密谐波含量较高,影响了电机运行的稳定性。文献[9]讨论了混合励磁开关磁链电机转子极数对电机调磁性能的影响,分析了不同定转子极数电机的拓扑结构和工作原理,运用有限元算法比较了不同励磁电流密度对电机电磁性能的影响。文献[10]提出了一种双交错HESM,分析了电机等效磁路,通过建立等效磁路模型计算出电机磁路磁阻,求出了电枢绕组中的感应磁通。通过有限元仿真法得到了电机不同励磁电流条件下的电磁特性,验证了提出等效磁路模型的有效性。

综上所述,学者们对磁分路式径向结构、开关磁链结构和双交错结构等HESM研究较多,对于切向聚磁型并联结构混合励磁同步电机(TMPS-HESM)研究较少。TMPS-HESM对比传统HESM,其附加磁路少、气隙磁场调节范围广、容错能力好^[11-12],同时由于永磁磁路结构和电励磁磁路结构并联,TMPS-HESM的电励磁磁路不通过永磁体,电机励磁效率较高,以及不易发生永磁体退磁风险。

本文基于磁路法确定电机主要尺寸,借助ANSYS RMxpert 软件设计电机定子,再通过Maxwell & Workbench & Optislang 联合仿真软件建立8极48槽TMPS-HESM模型,运用粒子群优化(PSO)算法进行全局多目标优化得到Pareto最优解集,使用优劣解距离法(TOPSIS)从Pareto解

集中客观选取最优设计方案,并通过相关有限元仿真试验验证了电机性能符合设计要求。

1 TMPS-HESM 的拓扑结构

本文所设计的TMPS-HESM如图1所示。

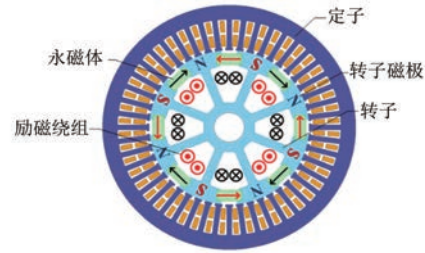


图1 TMPS-HESM 结构示意图

该电机的励磁绕组以集中式绕组方式绕在转子齿部,产生电励磁磁动势。在相邻转子极靴侧面的2个平行面形成矩形槽口,用于安装产生永磁磁动势的切向充磁永磁体。电机内部的气隙磁场可以通过改变励磁电流的大小进行调节,从而实现增磁、弱磁等多种工作状态。

在不考虑电机漏磁和磁饱和现象情况下,建立电机在不同励磁电流条件下等效磁路模型,分析电机调磁原理,为下文电机电磁设计和相关性能研究提供理论基础。

电机等效磁路模型如图2所示,其中, F_{PM} 为永磁磁势; Φ_{PM} 为永磁磁通; R_{PM} 为永磁磁阻; R_s 为定子磁阻; R_r 为转子磁阻; R_δ 为气隙磁阻; Φ_δ 为气隙磁通; F_f 为电励磁磁动势; Φ_f 为电励磁磁通; Φ_r 为转子铁心磁通; R_{rb} 为转子靴部磁阻; R_{ry} 为转子轭部磁阻; R_{rt} 为转子齿部磁阻; R_{ra} 为转子上齿部磁阻。当励磁绕组不通电,即励磁电流为0 A时,由于转子铁心磁阻远小于气隙磁阻,永磁磁通大部分在转子内形成磁短路,仅有少部分磁通通过电机气隙,提供少量气隙磁场。励磁绕组通入负方向电流时,励磁磁通同样在转子内形成磁短路,不通过电机气隙的励磁磁动势可忽略不计,此时的磁路等效模型与励磁绕组为0 A时近似。图2(a)的等效磁路方程如下所示:

$$\Phi_\delta = \Phi_{PM} - \Phi_r \quad (1)$$

由式(1)可知,电机气隙磁通 Φ_δ 较小,因为永磁磁动势仅有少部分通过电机气隙,大部分由于转子磁短路现象通过转子铁心,产生较大转子磁通 Φ_r 。当励磁电流为负方向时,电励磁磁通流

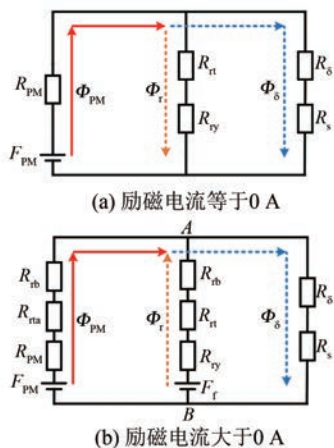


图2 TMPS-HESM 等效磁路模型

经转子铁心,增大电机转子磁通,进一步削弱电机气隙磁通,增加电机弱磁升速能力。

如图2(b)所示,当励磁绕组通入正向电流,励磁电流大于0 A时,电励磁磁通 Φ_f 和永磁磁通 Φ_{PM} 共同构成电机的气隙磁通 Φ_δ 。永磁磁通通过转子上齿部 R_{rt} 和转子靴部 R_{rb} 进入电机气隙,流经电机定子形成闭合回路。电励磁磁通通过整个转子进入电机气隙,流经定子形成闭合回路。设A与B之间的磁动势差为 F_1 ,永磁磁阻和转子部分磁阻组合为 R_z ,则图2(b)等效磁路方程如下:

$$\left(\frac{1}{R_z} + \frac{1}{R_r} + \frac{1}{R_\delta + R_s}\right) F_1 = \frac{F_{PM}}{R_z} + \frac{F_f}{R_r} \quad (2)$$

式中: $R_{rb} + R_{rt} + R_{PM} = R_z$; $R_{rt} + R_{ry} + R_{rb} = R_r$ 。

电机气隙磁通可表现为

$$\Phi_\delta = \frac{F_1}{R_s + R_\delta} \quad (3)$$

由式(3)可知,气隙磁通 Φ_δ 受磁动势差 F_1 的影响。而式(2)表明了 F_1 的大小由永磁磁动势 F_{PM} 和电励磁磁动势 F_f 决定。由于电机的永磁磁动势 F_{PM} 远大于电励磁磁动势 F_f ,永磁体磁阻 R_{PM} 远大于转子磁阻 R_r ,并且在图2(b)等效磁路模型中,永磁磁动势和电励磁磁动势互为并联,因此电励磁磁动势 F_f 决定了磁动势差 F_1 的大小。同时,根据等效磁路模型, F_1 的变化会导致永磁磁动势 F_{PM} 随之改变,因此推导出 F_{PM} 受控于 F_f 。

TMPS-HESM 具有较好的调磁能力。随着励磁电流增大,导致电励磁磁动势增大,从而影响永磁体工作曲线,增大永磁磁动势,使得电机气隙磁密和磁场强度增大,提升电机增磁增矩能力。当

励磁电流减小,电励磁磁通流经转子铁心,增大电机转子磁通,进一步削弱电机气隙磁通,增加电机弱磁升速能力。

2 TMPS-HESM 设计方法

该 TMPS-HESM 由于其特殊结构,无法用 ANSYS RMxpert、Motor-CAD 等现有电机磁路设计软件进行直接设计,故如何利用现有软件进行 TMPS-HESM 的设计是值得研究的,以表1电机参数为例,进行 TMPS-HESM 设计方法讨论。

表1 TMPS-HESM 主要参数设计范围

参数名称	参数值
功率/kW	2.5
额定转速/(r·min ⁻¹)	3 500
额定电压/V	60
调磁范围/T	0.2~0.9
转矩脉动/%	≤10
齿槽转矩/(N·m)	≤0.5
电机效率/%	≥90

2.1 基于 RMxpert 设计 TMPS-HESM 定子

根据功率和转速等额定数据来确定电机定子铁心内径 D 和定子铁心有效长度 l_{ef} 这2个电机主要尺寸,并由此来确定电机的其他尺寸^[13-14]。电机体积和主要尺寸的基本关系式如下所示:

$$D^2 l_{ef} = \frac{6.1 P'}{\alpha'_p K_{Nm} K_{dp} A_l B_\delta n} \quad (4)$$

式中: P' 为计算功率,规定 $P' = [(1 + 2\eta_N) / (3\eta_N)] \times P_N$, η_N 与 P_N 分别为电机效率和电机额定功率; α'_p 为极弧系数, $\alpha'_p = B_{\delta av} / B_\delta$; $B_{\delta av}$ 为气隙平均磁密; K_{dp} 、 K_{Nm} 分别为电枢绕组和气隙磁场波形系数, $K_{dp} = 0.96$ 、 $K_{Nm} = 1.1$; A_l 、 B_δ 和 n 分别为电机线负荷、磁负荷和电机转速,根据设计要求分别选取 $A_l = 26\,000$ A/m, $B_\delta = 0.8$ T, $n = 3\,500$ r/min。

根据式(4)可以计算出电机主要尺寸 $D^2 l_{ef} = 3.1 \times 10^{-4}$ m³,相同 $D^2 l_{ef}$ 的电机可以设计得细长,也可以设计成短粗型,为反映电机这种几何形状的关系,引入电机主要尺寸比 λ 如下:

$$\lambda = \frac{L_{ef}}{\tau} \quad (5)$$

式中: $\tau = \frac{\pi D}{2p}$ 。

本文所设计 TMPS-HESM 由于转子上同时存

在永磁磁动势源和电励磁磁动势源,为了放置电励磁绕组需要对转子开槽处理。因此,需要转子外径稍微大一些,电机呈现短粗型,从而选取 $\lambda = 1.06$ 。根据式(5)可得电机电枢直径 D 为 96 mm,电枢轴向长度 l_{ef} 为 40 mm。

在确定电机额定数据、电磁负荷、电机尺寸的条件下用 RMxpirt 软件设计了一个与本文所设计 TMPS-HESM 相同尺寸、相同定子结构、相同定子绕组、相同极槽配合的 8 极 48 槽永磁电机模型如图 3 所示。

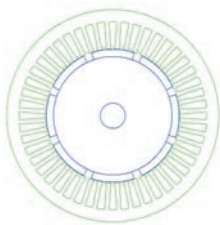


图 3 永磁电机模型

通过 RMxpirt 进行磁路计算,该永磁电机的定子齿部和轭部最大磁密为 2.0 T,符合定子铁心软磁材料 DW310_35 的 $B-H$ 曲线磁饱和规律;该永磁电机的电负荷和磁负荷分别为 26 858.2 A/m 和 0.801 T,符合 TMPS-HESM 电磁负荷分别为 26 000 A/m 和 0.8 T 的要求。图 4 所示,该电机定子绕组相数为 3,绕组层数为 2,平均节距为 5,符合本文所设计 TMPS-HESM 定子绕组要求。

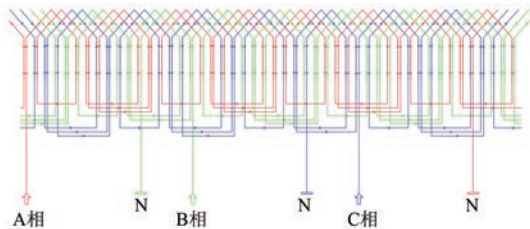


图 4 电机定子绕组接线图

因此,该永磁电机与本文所设计 TMPS-HESM 在电磁负荷、电机尺寸、定子结构、定子绕组均一致,则使用该永磁无刷电机的定子模型为本文所设计 TMPS-HESM 的定子模型。

2.2 基于 Maxwell 建立 TMPS-HESM 转子及参数化模型

使用 AutoCAD 对电机转子模型按照尺寸要求进行绘制,然后导入 Maxwell 2D 有限元仿真软件进行材料设置,电机转子模型如图 5(a) 所示。

将设置好的电机转子模型与用 ANSYS RMxpirt 软件设计好的定子模型进行组合并进行仿真前处理设置,可以得到完整的电机 Maxwell 有限元仿真模型如图 5(b) 所示。

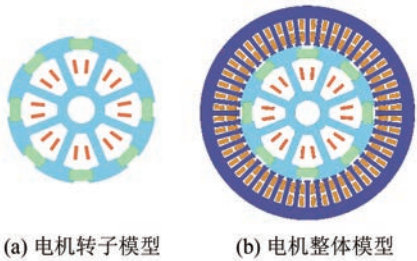


图 5 TMPS-HESM 有限元仿真模型

为了使所设计出的 TMPS-HESM 性能较好,需对 TMPS-HESM 进行多目标优化。如图 6 所示,对电机优化的参数进行参数化建模。转子部分的永磁体和转子极靴大小会对电机气隙磁密造成较大影响,从而影响电机输出转矩、齿槽转矩等性能,因此对电机永磁体长度 l 和宽度 b 以及转子极靴长度 d 和宽度 w 进行参数化建模。在定子和气隙部分,定子槽型的设计以及气隙大小也会对电机的性能造成较大影响,因此对电机槽口宽度 b_{s0} 、槽口深度 h_{s0} 、槽内深度 h_{s1} 和气隙大小 δ 进行参数化建模。根据电机实际结构尺寸对以上参数化变量规定优化范围如表 2 所示。

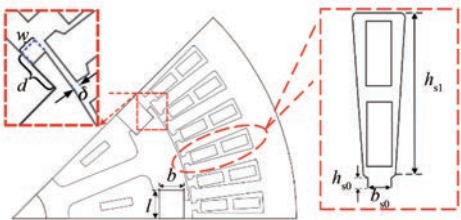


图 6 TMPS-HESM 参数化模型

表 2 参数化变量符号及优化范围		mm
参数名称	参数范围	
永磁体长度 l	6.3~8.3	
永磁体宽度 b	5.5~7.5	
极靴长度 d	0~4	
极靴宽度 w	1.0~2.5	
槽口宽度 b_{s0}	1.5~2.5	
槽口深度 h_{s0}	0.5~1.5	
槽内深度 h_{s1}	16~18	
气隙大小 δ	0.25~0.75	

2.3 基于 PSO 对 TMPS-HESM 设计分析

对于 TMPS-HESM 的优化设计涉及到 8 个输入变量和 3 个输出变量,如果采用有限元求解器的多参数优化需要大量运行时间和运算器内存。因此,将电机 Maxwell 有限元模型通过 Workbench 与 Optislang 进行联合仿真,使用 Optislang 中集成的智能算法对电机进行优化设计,联合仿真优化模块介绍如图 7 所示。为更有效寻找多输入变量和多输出优化目标的全局最优解集,采用具有收敛速度快、计算精度高和需调整参数少等优点的 PSO^[15]。分别设置初始种群为 10 个,PSO 最大种群规模为 400 个,最大迭代次数为 20 次,突变率设置为 30%。对粒子群进行变异操作,增强粒子群在迭代后期的突变能力,有利于其突破局部最优解。PSO 优化流程如图 8 所示。



图 7 联合仿真优化模块介绍

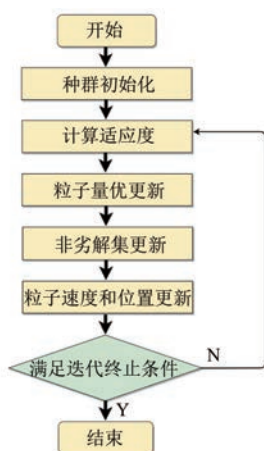


图 8 PSO 优化流程

在迭代过程中,每个粒子的速度和位置由局部最优点和全局最优点同时更新,PSO 优化算法基本方程如下:

$$\begin{cases} V_{id}^{k+1} = w_1 V_{id}^k + c_1 r_1 (P_{id}^k - X_{id}^k) + \\ c_2 r_2 (Q_{id}^k - X_{id}^k) \\ X_{id}^{k+1} = X_{id}^k + V_{id}^{k+1} \end{cases} \quad (6)$$

式中: V_{id} 和 X_{id} 分别为第 i 个粒子在 d 维空间的速度和位置; k 和 d 和 w_1 分别为迭代次数、粒子搜索空间大小和惯性权重系数; r_1 和 r_2 分别为在 $[0, 1]$ 之间的随机数; c_1 和 c_2 分别为加速系数; Q 和 P 分别为全局最优点与局部最优点。

为了加强优化初期的全局搜索,从而确保搜索后期的粒子收敛于全局最优解。将惯性权重系数 w_1 设置成从 $w_{1\max} = 0.9$ 到 $w_{1\min} = 0.4$ 线性下降^[16], w_1 表达式为

$$w_1 = w_{\max} - (w_{\max} - w_{\min}) \frac{k}{Nc_{\max}} \quad (7)$$

将加速系数 c_1 和 c_2 设置成采用异步时变的方式, c_1 、 c_2 表达式分别为

$$\begin{cases} c_1 = c_{1\max} - (c_{1\max} - c_{1\min}) \frac{k}{Nc_{\max}} \\ c_2 = c_{2\min} + (c_{2\max} - c_{2\min}) \frac{k}{Nc_{\max}} \end{cases} \quad (8)$$

采用 PSO 进行多目标优化,以永磁体长宽、极靴长宽、槽口宽度和深度、槽内深度以及气隙距离这 8 个参数为输入变量,为了确保平均转矩、齿槽转矩和转矩脉动这 3 个输出变量均得到一定程度优化。分别将平均转矩最大、齿槽转矩最小和转矩脉动最小作为优化目标进行约束,具体目标函数和约束条件如下:

$$F(x) = [\min(T_{\text{cog}}), \min(T_{\text{rip}}), \max(T_{\text{avg}})],$$

$$T_{\text{cog}} < T_{\text{cog}0}, T_{\text{rip}} < T_{\text{rip}0}, T_{\text{avg}} > T_{\text{avg}0} \quad (9)$$

式中: $F(x)$ 为多目标函数, $T_{\text{cog}0}$ 、 $T_{\text{rip}0}$ 分别为齿槽转矩、转矩脉动设置的数值上限, $T_{\text{avg}0}$ 为平均转矩设置的数值下限。

优化结果以 Pareto 3D 最优解集方式呈现,如图 9 所示,坐标轴分别表示齿槽转矩、平均转矩和转矩脉动。图 9 中数据点分别表示不同输入变量的粒子,深色圆点代表不符合约束条件的粒子,浅色圆点代表符合约束条件的粒子。三角形面代表 Pareto 前沿, Pareto 最优解集位于 Pareto 前沿上,得到符合优化要求的解集一共有 17 个解,具体结果如表 3 所示。

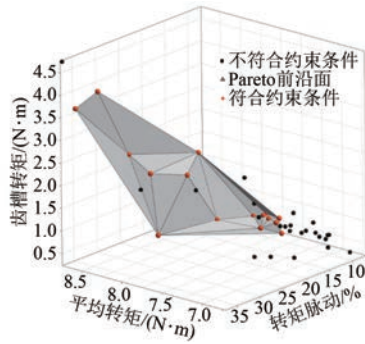


图9 Pareto 3D 最优解集

表 3 Pareto 最优解集

序号	齿槽转矩/(N·m)	转矩脉动/%	平均转矩/(N·m)
1	3.58	34.38	8.74
2	4.76	37.56	8.71
3	3.86	30.87	8.66
4	2.23	24.58	8.64
⋮	⋮	⋮	⋮
14	0.49	8.01	8.06
15	0.78	8.20	8.04
16	1.06	11.34	8.03
17	0.59	8.24	8.01

为了从 Pareto 最优解集中更客观地选取全局最优解,使用 TOPSIS 法对 Pareto 解集进行相对优劣评价^[17-18]。TOPSIS 法是一种客观高效的多目标决策分析方法,具体算法流程如下:

(1) 存在 n 个数据对象, m 个评价指标时,每个指标以矩阵的形式呈现:

$$X_j = [x_{1j} \ x_{2j} \ \cdots \ x_{nj}]^T, j = 1, 2, \cdots (10)$$

则初始矩阵为 $X = [X_1 \ X_2 \ \cdots \ X_j]$ 。

(2) 对评价指标趋势进行正向化处理,一般采用倒数法: $x'_{ij} = 1/x_{ij}$, 其中 $x_{ij} > 0$ 。采用正向化处理可以将数值越小越好的齿槽转矩、转矩脉动和数值越大越好的平均转矩全都正向量纲处理,让 3 种数据均保持越大越好的特性,方便后续筛选评价结果。

(3) 对数据进行归一化处理,一般采用平方和归一化,每个指标值消除量纲之后如下:

$$Z_j = [z_{1j} \ z_{2j} \ \cdots \ z_{nj}]^T, j = 1, 2, \cdots, m (11)$$

式中: $z_{ij} = x'_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^n (x'_{ij})^2}, i = 1, 2, \cdots, n。$

(4) 求解正负理想向量 z^+, z^- 如下:

$$\begin{cases} z^+ = [z_1^+ \ z_2^+ \ \cdots \ z_m^+] \\ z^- = [z_1^- \ z_2^- \ \cdots \ z_m^-] \end{cases} (12)$$

式中: $z_j^+ = \max\{z_{1j}, z_{2j}, \cdots, z_{nj}\}, j = 1, 2, \cdots, m; z_j^- = \min\{z_{1j}, z_{2j}, \cdots, z_{nj}\}, j = 1, 2, \cdots, m。$

(5) 计算正负理想解距离 D_i^+, D_i^- :

$$\begin{cases} D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (z_j^+ - z_{ij})^2} \\ D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (z_j^- - z_{ij})^2} \end{cases} (13)$$

(6) 根据正负理想解距离计算相对接近度 C_i 如下:

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-}, \quad 0 < C_i < 1 (14)$$

相对接近度 C_i 数值越大则表明 TOPSIS 法评价结果越好。

根据以上流程,对表 3 中的最优解集进行 TOPSIS 优化,以全局最优解为目标对象,评价指标分别为齿槽转矩、转矩脉动和平均转矩。通过对表 3 中数据正向化和归一化处理,将齿槽转矩、转矩脉动和平均转矩的最大值和最小值作为正负理想解,如表 4 所示。

表 4 正负理想解

评价指标	正理想解 z^+	负理想解 z^-
齿槽转矩	0.480	0.046
转矩脉动	0.430	0.092
平均转矩	0.253	0.232

根据正负理想解计算可得正负理想解距离和相对接近度如表 5 所示。由表 5 排序结果可知,应选定第 2 个解为全局最优解,从而确定最合理的永磁体长宽、极靴长宽、槽口宽度和深度、槽内深度以及气隙大小。

采用 PSO 和 TOPSIS 法得到全局最优解后电机输入参数和输出性能如表 6 所示,可以看出电机的各项参数取值合理,符合电机实际结构尺寸要求。同时在保持电机平均转矩满足要求的条件下电机齿槽转矩和转矩脉动较小,这对减少电机振动噪声和增强电机控制精度具有显著作用。

表 5 TOPSIS 评价计算结果

序号	正理想解距 D^+	负理想解距 D^-	相对接近度 C	结果
1	0.533	0.027	0.049	16
2	0.550	0.020	0.036	17
3	0.529	0.029	0.053	15
4	0.479	0.074	0.133	13
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
14	0.039	0.524	0.931	1
15	0.201	0.403	0.668	4
16	0.301	0.266	0.469	6
17	0.108	0.463	0.812	2

表 6 PSO 和 TOPSIS 法求得最优解对应的电机参数

参数名称	参数值
永磁体长度 l/mm	7.02
永磁体宽度 b/mm	6.70
极靴长度 d/mm	3.85
极靴宽度 w/mm	1.08
槽口宽度 b_{s0}/mm	2.08
槽口深度 h_{s0}/mm	1.00
槽内深度 h_{s1}/mm	17.67
气隙大小 δ/mm	0.50
齿槽转矩/ $(\text{N}\cdot\text{m})$	0.49
转矩脉动/%	8.01
平均转矩/ $(\text{N}\cdot\text{m})$	8.06

3 TMPS-HESM 电磁性能分析

为了验证本文所设计电机满足设计要求通过 Maxwell 有限元仿真软件研究了本文所设计的 TMPS-HESM 的电磁性能。

图 10 和图 11 分别为 TMPS-HESM 在不同励磁电流条件下电机的磁力线分布图和电机磁密云图,分别对其进行分析,验证等效磁路模型和调磁原理理论推导的正确性。

当励磁电流 $I_f=12\text{ A}$ 时,电机正向励磁时候,绝大多数磁力线到达电机气隙部分,通过电机定子形成闭环,此时电机磁密云图的气隙处磁场较大。

当励磁电流 $I_f=0\text{ A}$ 时,部分磁力线通过转子齿部形成转子磁短路现象,此时经过电机气隙处的磁力线较少,电机磁密云图的气隙处磁场也较小。

当励磁电流 $I_f=-12\text{ A}$ 时,由于电励磁绕组负

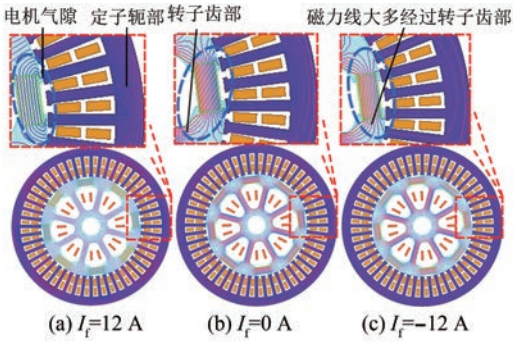


图 10 电机磁力线分布图

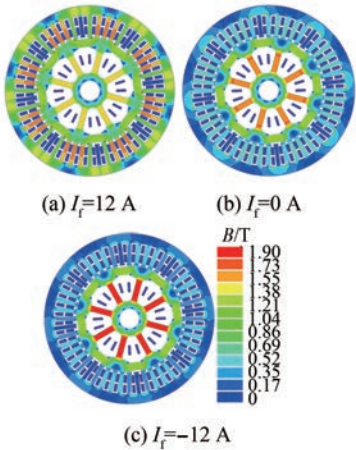


图 11 电机磁密云图

向励磁的作用,加剧了磁力线通过转子齿部形成的磁短路现象,磁力线会集中在转子齿部,形成饱和磁场,此外剩余的极少数磁力线仍会通过电机气隙部分,这也解释了当 $I_f=-12\text{ A}$ 时,气隙磁通密度仍有一个较小的幅值。

由图 12 电机效率 MAP 图可以看出,在额定转速 $3\ 500\text{ r/min}$ 的区域,电机效率高达 95%,并且电机高效率区域较广。电机在低转速区域可提供较大的转矩,同时电机具备良好的弱磁升速能力。

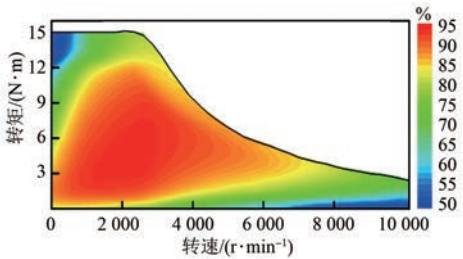


图 12 电机效率 MAP 图

由图 13 和图 14 可以看出,当电机通入正向励磁电流时,电机气隙磁密和空载反电动势显著

增大,该电机具有良好的增磁增矩能力。当电机通入负向励磁电流时,气隙磁密幅值减小的幅度很小,这是由于 TMPS-HESM 具有特殊的磁短路转子结构。电机气隙磁密的变化规律与上文等效磁路模型理论分析一致,且符合调磁范围 0.2~0.9 T 要求。

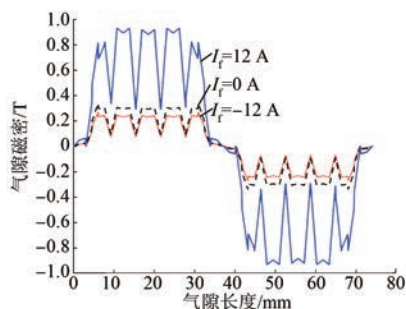


图 13 电机气隙磁密

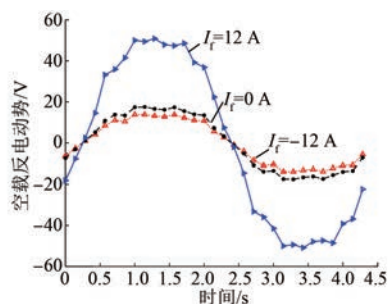


图 14 电机空载反电动势

由图 15 和图 16 可知,在电机通入正向励磁电流时平均转矩和齿槽转矩明显增加,平均转矩从 3.90 N·m 增至 8.06 N·m,齿槽转矩从 0.17 N·m 增至 0.49 N·m。电机通入负向励磁电流时平均转矩和齿槽转矩下降程度很小。电机的转矩脉动在 $I_f = -12$ A 时为 9.74%,在 $I_f = 0$ A 时为 9.26%,在 $I_f = 12$ A 时为 8.01%,电机转矩脉动和齿槽转矩均符合转矩脉动小于 10% 和齿槽转矩小于 0.5 N·m 的设计要求。

因此,本文所设计电机具有良好的调节磁场能力和效率,通过使用 PSO 和 TOPSIS 法,使设计的电机具有较为合适的平均转矩和较小的转矩脉动和齿槽转矩,总体方案满足 TMPS-HESM 的设计要求。

4 结 语

本文系统地提出了一种基于 PSO 的 TMPS-

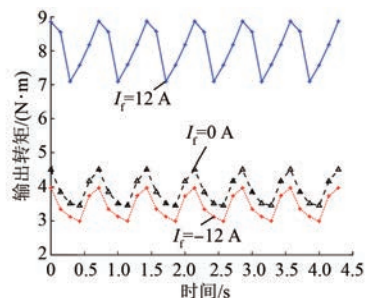


图 15 电机输出转矩

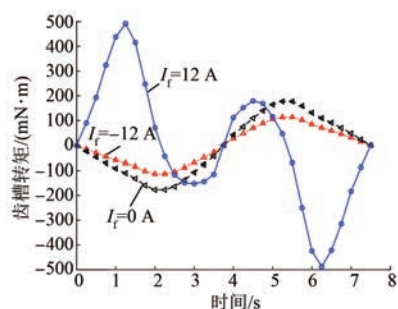


图 16 电机齿槽转矩

HESM 联合仿真设计方法,并通过相关有限元仿真试验验证了电机性能符合设计要求,可以得到以下结论:

(1) 基于 PSO 的 TMPS-HESM 联合仿真设计方法,解决了 ANSYS RMxpert、Motor-CAD 等现有电机磁路设计软件无法直接设计 TMPS-HESM 的问题,有效提升类似电机的设计效率和准确性。

(2) 通过 Maxwell & Workbench & Optislang 联合仿真,使用 Optislang PSO 对电机进行优化设计,有效提升了电机多目标优化设计的效率。

【参考文献】

- [1] FAN Y, QU G, TAN C, et al. Design and analysis of a new five-phase dual-stator consequent-pole brushless hybrid excitation machine [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 55 (1): 18365013.
- [2] AHN H, PARK H, KIM C. A review of state-of-the-art techniques for PMSM parameter identification[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2020, 15:1177.
- [3] 张卓然,王东,花为. 混合励磁电机结构原理、设计与运行控制技术综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(24):7834.
- [4] HE M, XU W, ZHU J, et al. A novel hybrid excited

- doubly salient machine with asymmetric stator poles [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(5): 4723.
- [5] 赵朝会,秦海鸿,张卓然,等. 磁分路式径向结构混合励磁同步发电机的结构及原理分析[J]. 中国电机工程学报,2008,28(11):145.
- [6] 赵朝会,姬少龙,王新威. 转子磁分路式径向结构混合励磁同步发电机的空载特性[J]. 电工技术学报,2012,27(9):198.
- [7] 徐轶昊,朱晓琴,刘闯,等. 新型切向/径向磁路并联混合励磁同步电机[J]. 中国电机工程学报,2010,30(36):53.
- [8] 朱姝姝,刘闯,宁银行,等. 一种新型混合励磁同步发电机的两级式无刷励磁方法[J]. 中国电机工程学报,2012,32(21):99.
- [9] 刘旭,王世永,王建飞,等. 混合励磁开关磁链电机转子极数对调磁性能的影响[J]. 电机与控制学报,2020,24(10):19.
- [10] 武洁,王一丁,闫浩,等. 交流调磁双交错混合励磁电机的等效磁路模型[J]. 微电机,2018,51(6):16.
- [11] PANG L, ZHAO C, SHEN H. Properties of adjust magnetic field of hybrid excitation synchronous machine with tangential accumulation of magnetic field shunt-wound magnetic path [C] //2021 24th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2021.
- [12] PANG L, ZHAO C, SHEN H. Research on tangential magnetization parallel magnetic path hybrid excitation synchronous machine [J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2022; 17: 2761.
- [13] 刘沛麟,赵朝会. 基于RMxprt磁路法的双定子永磁无刷直流电机设计方法[J]. 电机与控制应用, 2017,44(11):61.
- [14] 黄允凯,周涛. 基于等效磁路法的轴向永磁电机效率优化设计[J]. 电工技术学报, 2015, 30(2): 73.
- [15] 华逸舟,刘奕辰,潘伟,等. 基于改进粒子群算法的无轴承永磁同步电机多目标优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2022. doi: 10. 13334/j. 0258-8013. pcsee. 220039.
- [16] 李家祥,汪凤翔,柯栋梁,等. 基于粒子群算法的永磁同步电机模型预测控制权重系数设计[J]. 电工技术学报, 2021, 36(1): 50.
- [17] 姜雅男,于永进,李长云. 基于改进 TOPSIS 模型的绝缘纸机-热老化状态评估方法[J]. 电工技术学报,2022,37(6):1572.
- [18] 刘亚丽,王旭东,赵迎春,等. 基于 TOPSIS 法的充电机运行性能组合赋权评价方法[J]. 电力工程技术,2019,38(5):130.

(上接第 61 页)

- [11] HU J B, HU Q, WANG B, et al. Small signal instability of PLL-synchronized type-4 wind turbines connected to high-impedance AC grid during LVRT [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2016, 31(4):1676.
- [12] PEI J X, YAO J, LIU R K, et al. Characteristic analysis and risk assessment for voltage-frequency coupled transient instability of large-scale grid-connected renewable energy plants during LVRT[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(7):5515.
- [13] 康勇,林新春,郑云,等. 新能源并网变换器单机无穷大系统的静态稳定极限及静态稳定工作区[J]. 中国电机工程学报,2020,40(14):4506.
- [14] WU H, WANG X. Design-oriented transient stability analysis of PLL-synchronized voltage-source converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(4):3573.
- [15] 袁辉. 考虑振荡稳定约束的新能源承载能力分析 & 提升技术[D]. 杭州:浙江大学,2021.