

基于 Taguchi-PSO 的永磁同步发电机空载 气隙磁密波形优化^{*}

沈 亮¹, 袁 春¹, 杨宗平²

(1. 重庆理工大学 车辆工程学院, 重庆 400054;

2. 重庆交通职业学院 智能制造与汽车学院, 重庆 402260)

摘 要: 以某款增程器用 48 V 永磁同步发电机(PMSG)的空载气隙磁密波形畸变率为优化目标, 永磁体极弧系数、气隙长度、磁钢厚度、磁极偏心距为变量, 磁钢质量和电机效率为评价参考指标, 利用 RMXprt 参数化扫描功能和 Taguchi 方法建立正交试验矩阵, ANSYS Maxwell 二维有限元仿真分析得到数据样本。通过傅里叶模型拟合样本数据, 构造适应度函数。最后, 采用粒子群算法(PSO)进行寻优, 得到了一组最优的磁钢参数并进行有限元验证。结果表明, 采用 Taguchi-PSO 方法, 使空载气隙磁密波形得到了较大改善, 并减少了磁钢用量。

关键词: 永磁同步发电机; 波形畸变率; Taguchi 正交试验; 傅里叶拟合模型; 粒子群算法

中图分类号: TM 313 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)03-0042-07

doi: 10.12177/emca.2020.212

Optimization of No-Load Air Gap Flux Density Waveform of Permanent Magnet Synchronous Generator Based on Taguchi-PSO^{*}

SHEN Liang¹, YUAN Chun¹, YANG Zongping²

(1. Vehicle Engineering Institute, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;

2. School of Intelligent Manufacturing and Automobile, Chongqing Vocational College of Transportation, Chongqing 402260, China)

Abstract: Taking the no-load air gap flux density waveform distortion rate of a 48 V permanent magnet synchronous generator (PMSG) for a certain range extender as the optimization object, using the permanent magnet pole arc coefficient, air gap length, magnetic steel thickness, and magnetic pole eccentricity as variables, and the magnetic steel quality and the generator efficiency as the evaluation reference indices, the orthogonal experiment matrix is established by the RMXprt parameterized scanning function and the Taguchi method. The data samples are obtained by the ANSYS Maxwell two-dimensional finite element simulation analysis. Then, the sample data are fitted by the Fourier model to construct the fitness function. Finally, particle swarm optimization (PSO) is used for optimization, and a set of optimal magnetic steel parameters is obtained and verified by finite element method. The results show that using the Taguchi-PSO method, the no-load air gap flux density waveform is greatly improved and the mass of magnetic steel is reduced.

Key words: permanent magnet synchronous generator (PMSG); waveform distortion rate; Taguchi orthogonal experiment; Fourier fitting model; particle swarm optimization (PSO)

收稿日期: 2020-11-10; 收到修改稿日期: 2021-01-13

^{*} 基金项目: 重庆市教科委基金项目(KJZD-K201805701)

作者简介: 沈 亮(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为永磁同步电机电磁设计与优化。

0 引言

由于电池技术尚未完全成熟,采用增程器来弥补电动汽车续驶里程不足的问题是向纯电动汽车发展阶段中的一种过渡技术,目前增程器用发电机主要采用的是永磁同步电机(PMSM)^[1]。近年来,高性能永磁材料铁铈硼的出现,大大促进了永磁电机的发展,永磁同步发电机(PMSG)由于其结构简单、体积小、低噪声、高功率密度和高转矩密度而广泛应用于航空航天、海洋船舶、电动汽车、备用电源和可再生能源领域^[2-3]。气隙磁密波形的正弦度对电机输出转矩、反电动势波形、铁心损耗和电磁噪声具有很大的影响,如何降低气隙磁密波形的谐波畸变率一直是研究的重点^[4-5]。

胡鹏飞等^[6]研究了表贴式永磁电机不同磁极形状对气隙磁场谐波的影响,提出使用分段主副磁极可降低气隙磁场和反电动势谐波,但使得磁钢加工变得复杂。罗正豪等^[7]也提出采用分块永磁体替代单块永磁体的设计方案,选取极弧系数和偏心距为优化参数,达到了消除指定阶次的磁场谐波目标,使气隙磁场的谐波分量减少,同样会使永磁体加工和转子空间布置变得复杂。徐英雷等^[8]研究了永磁电机磁极偏心距与空载气隙磁密波形畸变率的关系,并使用有限元仿真得出了最优磁极偏心距,但是仅对某个磁极参数进行了优化,没有考虑其他参数的影响。李延升等^[9]从充磁方式的影响考虑,对比了3种充磁方式对电机气隙磁场影响的差异,并使用解析法和有限元相结合对内外转子的永磁电机进行了气隙磁场分析,提出不同转子形式的电机需要不同的充磁方式以改善气隙磁密波形的正弦度。杜刚等^[10]使用解析模型分析了不同极槽配合对电机负载气隙磁场的影响,证实了分数槽对表贴式永磁电机负载运行状态下气隙磁密波形谐波具有较好的改善效果。

本文以一款小型增程器用4极36槽PMSG为研究对象,通过Taguchi-PSO方法进行多参数优化,达到了降低气隙磁场谐波含量,优化电机性能的目的。

1 原理和模型

1.1 表贴式磁极结构

表贴式永磁电机,其作用在定子内表面的气

隙磁场径向分量使定子产生周期性波动和形变,当电磁力频率和电机定子系统的固有频率大小相等或者接近时,电机会产生电磁噪声和振动^[11]。电磁噪声的主要来源于电磁力径向分量的影响,根据麦克斯韦定律,电磁径向力密度表达式为

$$F_r = \frac{B_r^2 - B_t^2}{2\mu_0} \tag{1}$$

式中: B_r 、 B_t 为气隙磁场径向和切向的分量; μ_0 为真空磁导率。

本文研究的表贴式PMSG空载气隙磁密径向分量 B_r 的表达式为

$$B_r = B_r \frac{h}{h + \delta(\theta)} \tag{2}$$

式中: B_r 为永磁体剩磁密度; h 为永磁体的厚度; $\delta(\theta)$ 为有效气隙长度。

1.2 PMSG模型

首先在Maxwell中建立增程器PMSG初始模型,模型采用单层Y型绕组,以降低3次谐波的影响,减小电机的铁心损耗,提升效率。增程器PMSG初始模型如图1所示。PMSG主要参数如表1所示。

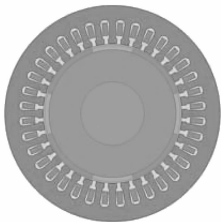


图1 增程器PMSG初始模型

表1 PMSG主要参数

参数名称	参数值
额定功率/kW	4
额定电压/V	48
定子槽数	36
定子铁心外径/mm	165
定子铁心内径/mm	110
极数	4
气隙长度/mm	0.8
极弧系数	0.65
永磁体厚度/mm	3.5
偏心距/mm	4

1.3 气隙磁密波形的影响因素

影响气隙磁密波形的因素包括:气隙长度、转轴材料、极弧系数、永磁体厚度、偏心距等,对于不同结构的永磁电机,其影响程度也不相同^[12]。

1.4 仿真分析

ANSYS Maxwell 是一款功能强大的 2D/3D 电磁场有限元分析软件,其分析结果精确,操作简便,可快速高效地对各类电机进行设计与性能分析^[13]。本文采用瞬态场对上述电机模型进行求解分析,利用后处理中的 Field calculator 功能可对电机气隙磁场进行径向分解,得到初始电机模型一个周期内的径向气隙磁密波形如图 2 所示。

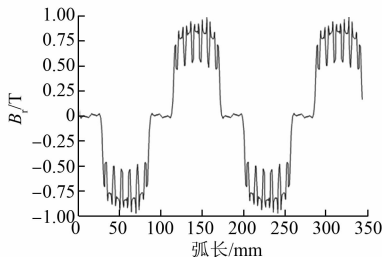


图 2 优化前气隙磁密波形

对其进行傅里叶分析,得到变换后气隙磁密谐波次数与基波幅值的结果。如图 3 所示,由于高次谐波幅值很小,故取前 15 次谐波进行分析。计算得到初始电机模型的空载气隙磁密波形畸变率(THD)为 25.33%,对输出转矩和空载反电势影响较大,需要对磁极参数进行优化,减少谐波对电机性能的影响。

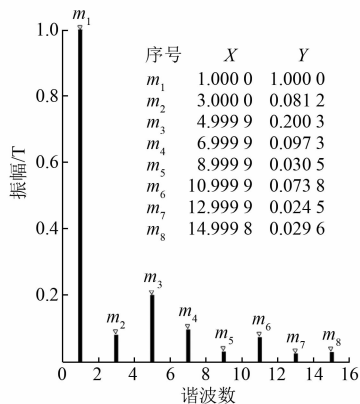


图 3 优化前气隙磁密谐波分量

优化前的空载反电势波形及效率 MAP 图如图 4 和图 5 所示。

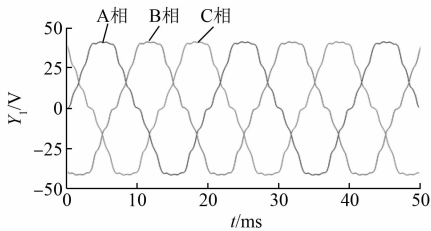


图 4 优化前空载反电势

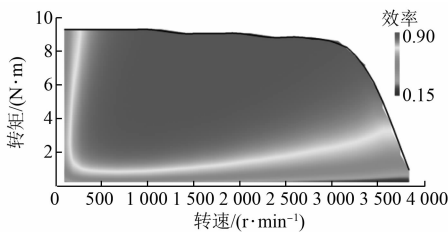


图 5 优化前效率 MAP 图

2 RMxpirt 与 Taguchi 方法建立数据样本

根据电机理论知识,由于转轴材料的导磁性对表贴式永磁电机的气隙磁场几乎没有影响,因此本文选取的影响因子包括:气隙长度、极弧系数、磁极偏心距、磁钢厚度。

2.1 RMxpirt 参数化扫描数据初选

RMxpirt 是 Maxwell 中快速参数化建模的模块,通过磁路计算可快速得到分析结果,但是精度较低,仅适用于电机参数初选调整阶段。一般而言,通过磁路计算方法选择的潜在最优模型需要通过有限元方法进行优化改进,使结果达到全局最优^[14]。本文利用 RMxpirt 的参数化扫描功能,初步选出 4 个变量的数值范围。在 RMxpirt 中扫描极弧系数的范围为 0.60~0.94,考虑加工精度,扫描步长设置为 0.02,经计算后确定其优化范围为 0.6~0.9。同理可确定其他 3 个参数的优化范围:磁极偏心距 5~11 mm,气隙长度 0.6~0.9 mm,磁钢厚度 3~6 mm。

2.2 Taguchi 方法建立正交试验表

Taguchi 方法是由日本学者田口玄一提出的,通过建立正交水平向量表来确定优化变量与目标,以最少的试验次数和计算量得到变量范围内的最佳组合,实现对目标的优化^[15]。对于电机的多参数优化,Taguchi 方法实现的步骤如下:

(1) 根据性能要求,确定电机优化的目标,并

通过 RMXprt 参数扫描,初步确定参数取值范围;
(2) 采用正交准则,根据参数变量水平值,建立正交式试验表;
(3) 通过 Maxwell 软件,根据正交矩阵中的不同参数组合,依次建立电机二维有限元模型仿真,仿真求解;
(4) 对仿真结果进行均值和方差值分析,并参考电机性能评价指标,选出一组最优的方案。
本文确定的优化目标为电机气隙磁密波形畸变率,对优化的 4 个磁极参数的取值范围取均匀步长,所建立的参数水平因素表如表 2 所示。

表 2 参数变量水平因素表				
水平因素	气隙长度 δ/mm	极弧系数 α	磁钢厚度 h/mm	偏心距 f/mm
1	0.6	0.6	3	5
2	0.7	0.7	4	7
3	0.8	0.8	5	9
4	0.9	0.9	6	11

从表 2 可以看出,4 个参数各有 4 个水平因素,最多可有 $4^4=256$ 种组合方案,传统有限元需要进行 256 次仿真,对计算机内存和时间成本要求太高。因此,采用 Taguchi 方法建立 L_{16} 的正交向量表,再使用 ANSYS Maxwell 依次建立电机二维有限元模型求解,以提高求解效率。考虑到永磁体的成本问题,将永磁体重量以及电机效率作为评价参考指标,兼顾电机的效率和经济性。表 3 为建立的正交试验向量表和有限元仿真结果, M 表示永磁体质量, η 表示发电机效率。

2.3 均值和方差分析

为了衡量 4 个参数变化时对于气隙磁密波形畸变率的影响以及重要程度的比例,需要对表 4 中的仿真结果数据进行均值和方差分析。首先分别计算 THD、 M 、 η 的总均值,表达式如下:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \tag{3}$$

式中: $\bar{X}$ 为性能参数均值; n 为样本数据的个数; P 代表电机性能参数,THD、 M 、 η 。

同时,电机性能在每个影响因子不同水平因素下的表现存在差异,为了更好地评估每个极参数对电机不同性能的影响,需要进一步计算不同水平因素下的均值。例如,气隙磁密波形畸变率在极弧系

数的第二个水平因素下的均值计算式为

$$\text{THD}(\alpha_2) = \frac{1}{4}[\text{THD}(2) + \text{THD}(6) + \text{THD}(10) + \text{THD}(14)] = 19.32\% \tag{4}$$

表 3 正交试验向量表和有限元仿真结果

序号	δ	α	h	f	THD/%	M/kg	$\eta/\%$
1	1	1	1	1	32.65	0.34	89.34
2	1	2	2	2	18.94	0.50	91.37
3	1	3	3	3	11.65	0.67	91.98
4	1	4	4	4	11.25	0.85	91.98
5	2	1	2	3	31.35	0.43	90.03
6	2	2	1	4	21.53	0.32	87.35
7	2	3	4	1	18.46	0.87	82.76
8	2	4	3	2	18.14	0.76	90.49
9	3	1	3	4	30.39	0.53	90.46
10	3	2	4	3	17.26	0.74	91.83
11	3	3	1	2	10.86	0.40	89.01
12	3	4	2	1	21.33	0.63	90.18
13	4	1	4	2	29.68	0.66	91.18
14	4	2	3	1	19.55	0.65	91.44
15	4	3	2	4	8.62	0.49	90.26
16	4	4	1	3	7.68	0.38	89.24

均值计算结果如表 4 所示。

表 4 均值计算结果

因素	水平	THD/%	M/kg	$\eta/\%$
δ	1	18.62	0.59	91.17
	2	22.37	0.60	87.66
	3	19.96	0.58	90.37
	4	16.38	0.55	90.53
α	1	31.02	0.49	90.25
	2	19.32	0.55	90.50
	3	12.40	0.61	88.50
	4	14.60	0.66	90.47
h	1	18.18	0.36	88.74
	2	20.06	0.51	90.46
	3	19.93	0.65	91.09
	4	19.16	0.78	89.44
f	1	23.00	0.62	88.43
	2	19.41	0.58	90.51
	3	16.99	0.56	90.77
	4	17.95	0.55	90.01
总均值 $P(X)$		19.33	0.58	89.93

为了得到各个磁极参数对气隙磁密波形畸变率、磁钢质量、电机效率的作用比例,需要对表 4 中的数据进行方差分析,方差分析计算式如下:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{j=1}^4 [P_{xj} - P(X)]^2}{4} \quad (5)$$

式中: j 为参数水平因素, $j=1,2,3,4$; P_{xj} 为各个变量对电机性能影响的计算均值,即表 5 中的 48 个数据; $P(X)$ 代表 3 个总均值。

共需计算 12 组方差值,结果如表 5 所示。

表 5 方差计算结果

因素	THD/%		M/kg		$\eta/\%$	
	方差	比重	方差	比重	方差	比重
δ	4.71	7.00	0.35	1.18	1.81	41.04
α	51.76	76.93	4.10	13.80	0.69	15.65
h	5.60	8.32	24.55	82.58	0.82	18.59
f	5.21	7.74	0.73	2.46	0.82	18.59

优化组合:由表 5 可知,对于本文研究的增程器用 PMSG,影响气隙磁密波形畸变率的 4 个参数的重要性占比为 $\alpha > \delta > f > h$; 对于磁钢重量,永磁体厚度是最主要的影响因素,影响比例高达 82.58%,而气隙长度对磁钢重量几乎没有影响,符合实际情况;电机效率的最主要影响因素为气隙长度,其他 3 个因素对电机效率也有着不同程度的影响,因此电机效率是一个需要综合考虑的问题。综合以上数据分析,Taguchi 组合方案中最优选择为 $(\delta_4, \alpha_4, h_1, f_3)$, 此时 $(\text{THD}, M, \eta)_{\text{best}} = (7.68\%, 0.38, 89.24\%)$, 而未优化的初始模型 $(\text{THD}, M, \eta)_{\text{start}} = (25.33\%, 0.43, 90.07\%)$, 气隙磁密波形畸变率降低了 69.68%, 永磁体质量减少了 10.81%, 而电机效率仅降低了 0.92%, 从电机性能和成本考虑,该优化方案可以满足要求。

3 傅里叶拟合及粒子群算法寻优

Taguchi 方法虽然可以得到一组方案,实现对目标性能的优化,但考虑到磁钢参数的连续变化与 THD 值之间的高度非线性化问题,本文将使用傅里叶模型对数据进行拟合,构造适应度函数,使用粒子群优化算法寻找最优解,以获得全局最优磁极参数组合。

3.1 傅里叶拟合模型

傅里叶拟合是通过傅里叶级数展开逼近数据,实现对离散数据的拟合,是一种高效的曲线拟合方法^[16]。傅里叶拟合曲线的模型表达式为

$$F(t) = a_0 + \sum_{i=1}^m a_i \cos(\omega_i t) + \sum_{i=1}^m b_i \sin(\omega_i t), \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

式中: $F(t)$ 为拟合曲线; a_0, ω 为傅里叶函数的不定系数,可通过最小二乘法求解; a_i, b_i 为各级系数; m 为展开级数; t 为 THD。

由式(6)可看出,当傅里叶展开级数 m 越高,所得拟合结果应更为平滑,相应的计算次数也会随之增加。

由于 16 组数据离散程度高,特别是当极弧系数 $\alpha=0.6$ 时,THD 值均约在 30%,超过了初始模型,对于优化模型而言,属于“异常数据”,会影响拟合精度。因此,选取 $\alpha=0.7 \sim 0.9$ 的 12 组数据进行拟合。经过反复验证,当 $m=5$ 时,拟合精度较高,如图 6 所示。

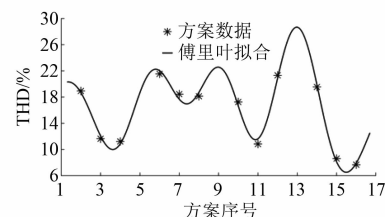


图 6 傅里叶拟合模型

采用误差平方和 SSE 与校正可决系数 AR 来评价拟合曲线的优劣程度,有:

$$\text{SSE} = \sum_{i=1}^n k_i (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (7)$$

$$\text{AR} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n k_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n k_i (y_i - \bar{y})^2} \cdot \frac{n-1}{n-p} \quad (8)$$

式中: n 为数据的个数; k_i 为权重系数; y_i 为实际值; $\bar{y}$ 为实际数据的均值; $\hat{y}$ 为输出的估计值; p 为拟合方程的总项数。

校正可决系数 AR 表示模型曲线拟合度的好坏,越接近 1 表示该曲线的拟合度越好,经计算 $\text{SSE}=4.1621$, $\text{AR}=0.9864$,说明拟合曲线与实际数据吻合度好。

3.2 粒子群算法寻优

PMSM 的优化设计是一个非线性、多参数、多目标的问题^[17]。粒子群算法(PSO)是一种简单高效,收敛较快,具备全局寻优能力的智能算法,已广泛用于处理多参数优化问题^[18]。群体中每个粒子的性质均分别用 3 个指标来描述:速度、位置、适应度。其中,速度和位置更新表达式为

$$V_{id}^{k+1} = \omega V_{id}^k + c_1 \cdot \text{rand1}(Q_{id}^k - X_{id}^k) + c_2 \cdot \text{rand2}(Q_{jd}^k - X_{id}^k) X_{id}^{k+1} = X_{id}^k + V_{id}^{k+1} \quad (9)$$

式中: ω 为权重因数; c_1 、 c_2 为加速度因数,取值范围一般为 0~4; Q_{id} 为个体最优位置; Q_{jd} 为群体最优位置;rand 取值为 0~1。

设置粒子位置为 $Q = (\delta, \alpha, h, f)$, $\omega = 0.9$, $c_1 = c_2 = 1.494\ 45$, 种群规模为 30, 进化次数为 100, 将傅里叶拟合模型作为寻优适应度函数,同时以永磁体质量和电机效率作为约束条件,结果如图 7 所示。结果显示,最优适应度值为 2.398 2, 即 THD 值为 2.398 2%, 此时 $Q_{\text{best}} = (\delta, \alpha, h, f) = (0.899\ 7, 0.900\ 0, 3.110\ 6, 9.201\ 5)$, 考虑实际情况,取 $Q_{\text{best}} = (\delta, \alpha, h, f) = (0.9, 0.9, 3.1, 9.2)$, 进行仿真验证。

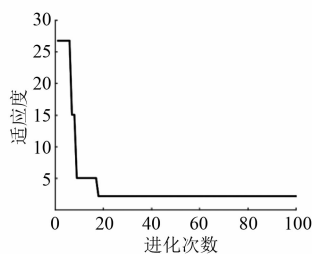


图7 PSO 寻优结果

3.3 有限元验证

在 ANSYS Maxwell 中,将磁钢参数设置为 PSO 寻优的结果,进行仿真验证,其空载反电动势和效率 MAP 图如图 8 和图 9 所示。气隙磁密波形如图 10 所示。对波形进行傅里叶变换,得到结果如图 11 所示。此时 THD 值为 2.53%, 与 PSO 得到的全局最优适应度基本一致,波形得到明显改善。同时,磁钢质量 $M = 0.39\ \text{kg}$, 下降了 8.31%, 电机效率 $\eta = 90.01\%$, 几乎没有变化。因此,确定的最终优化方案为 $Q_{\text{best}} = (\delta, \alpha, h, f) = (0.9, 0.9, 3.1, 9.2)$ 。

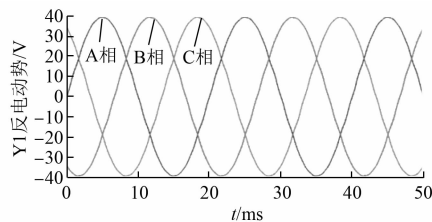


图8 优化后空载反电动势

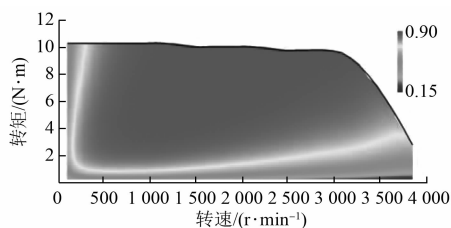


图9 优化后效率 MAP 图

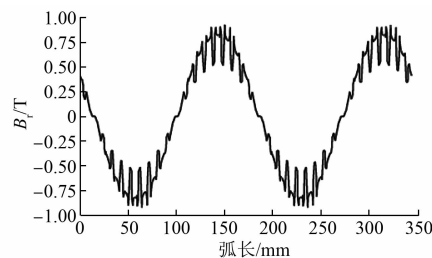


图10 优化后的气隙磁密波形

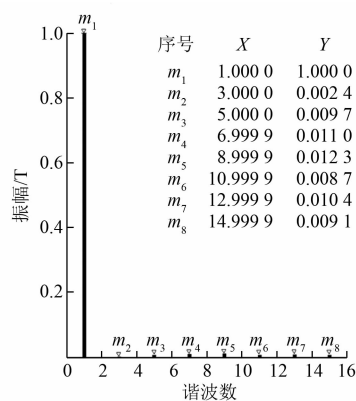


图11 优化后气隙磁密谐波分量

4 结 语

本文针对某增程器用 PMSG 空载气隙磁密度波形的畸变率实现了优化,以 4 个磁钢参数为变量,磁钢质量和电机效率为参考评价指标,利用 RMxpirt 参数扫描功能和 Taguchi 方法建立正交试

验矩阵,通过有限元仿真手段获取数据样本,并对其误差分析,获得组合方案内的一组最优解。再通过傅里叶模型拟合样本数据,结合 Taguchi 和 PSO 算法,获得了一组全局最优的磁钢参数,并进行仿真验证。结果表明,使用 Taguchi-PSO 方法,空载气隙磁密波形畸变率由 25.33% 降为 2.53%,波形得到了较大改善,磁钢质量减少了 8.31%,而对电机效率几乎没有影响。

【参考文献】

- [1] 王晓远,吕海英. 增程式电动汽车永磁同步发电机设计与改进[J]. 微特电机, 2016, 44(12): 1.
- [2] 张宏达,贾贵玺,郭锦波,等. 永磁同步电机的趋近律滑模控制[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2015, 29(3): 89.
- [3] CHAN T F, YAN L T, LOI L L. Permanent-magnet synchronous generator with inset rotor for autonomous power-system applications [J]. IET Proceedings-Generation Transmission and Distribution, 2004, 151(5): 597.
- [4] 贾佳. 基于 Taguchi-BBD 方法的 PMSM 齿槽转矩抑制[J]. 微电机, 2019, 52(4): 7.
- [5] 谭建成. 永磁无刷直流电机技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [6] 胡鹏飞,王东,靳栓宝,等. 偏心磁极永磁电机气隙磁场正弦优化模型[J]. 电工技术学报, 2019, 34(18): 3759.
- [7] 罗正豪,井立兵,高起兴. 分段偏心磁极表贴式永磁电机优化设计[J]. 微特电机, 2018, 46(10): 25.
- [8] 徐英雷,李群湛,王涛. 永磁同步电机空载气隙磁密波形优化[J]. 西南交通大学学报, 2009, 44(4): 513.
- [9] 李延升,窦满峰,骆光照. 不同充磁方式的对转永磁电机气隙磁场性能研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2014, 46(1): 140.
- [10] 杜刚,邓兆祥,张河山,等. 表贴式永磁同步电机解析建模与极槽配合选取[J]. 重庆大学学报, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1044.N.20191223.1738.008.html>.
- [11] 郑光泽,王振宇,王波. 永磁同步电机定子系统动态特性分析[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2019, 33(6): 53.
- [12] 赵朝会,李遂亮,王新威,等. 永磁同步电机气隙磁密影响因素的分析[J]. 河南农业大学学报, 2005, 39(3): 338.
- [13] 刘慧娟,上官明珠,张颖超. Ansoft Maxwell 13 电机电磁场实例分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [14] TIEGNA H, AMARA Y, BARAKAT G. Overview of analytical models of permanent magnet electrical machines for analysis and design purposes [J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2013, 90: 162.
- [15] 贾金信,杨向宇,曹江华. 基于田口法的内嵌式永磁电动机的优化设计[J]. 微电机, 2013, 46(6): 1.
- [16] 屈文星,李炎倍,李云祥. 采用傅里叶拟合的双天线信号端点识别方法[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(8): 92.
- [17] YU D, HUANG X, ZHANG X, et al. Optimal design of outer rotor interior permanent magnet synchronous machine with hybrid permanent magnet [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29(2): 0603105.
- [18] 孟大伟,张羽,赵成. 粒子群算法在电机优化设计中的应用[J]. 防爆电机, 2011, 46(5): 1.

声 明

本刊已许可万方数据、重庆维普、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司在其网站及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网

络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊相关费用抵消。如作者不同意文章被收录,请在来稿时向本刊声明,本刊将做适当处理。

《电机与控制应用》编辑部