

基于 6/8 开关磁链永磁电机不同约束条件下的优化设计比较*

高天鹤, 刘旭, 李尔平

(河北工业大学 省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室, 天津 300130)

摘要: 比较研究了开关磁链永磁电机(SFPMM)在不同约束条件下的优化设计。以 6/8 SFPMM 为例, 通过对电机参数的敏感度进行分析, 将电机的参数进行逐一优化。比较了其在固定定子铜耗、固定电流、固定电流密度等不同约束条件下以及不同负载约束条件下的优化结果。通过对优化结果的转矩性能、永磁体体积、损耗和运行效率等进行评价和对比, 得出该类电机优化设计中约束条件的选择方法。

关键词: 开关磁链永磁电机; 参数优化; 转矩性能; 效率

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2018)01-0099-08

Comparative Study of Optimized 6/8 Switched Flux Permanent Magnet Machine with Different Constraints*

GAO Tianhe, LIU Xu, LI Erping

(State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: The comparative study of optimized switched flux permanent magnet machine (SFPMM) with different load conditions and constrains was presented. By taken a 6/8 SFPMM as example, the sensitivity of parameters was investigated to decide the optimized sequence. With the different constrains, such as light-load, rated, over-load conditions, the 6/8 SFPMM was optimized at fixed copper loss, fixed current, fixed current density. By comparing the torque density, PM volume, losses and efficiency of the optimized designs, the effective constraint to optimize the SFPMM will be obtained.

Key words: switched flux permanent magnet machine (SFPMM); parameter optimization; torque performance; efficiency

0 引言

在开关磁链永磁电机(Switched Flux Permanent Magnet Machine, SFPMM)中, 由于永磁体放置在定子中, 非常容易散热, 电机具有较高的可靠性。与传统永磁电机一样, SFPMM 可以采用传统的交流同步电机的驱动方式进行控制^[1-4]。文献[5]中, 对 SFPMM 应用于电动汽车进行分析研究。文献[6-8]对不同拓扑结构的 SFPMM 进

行了研究, 包括绕组构造、定子和转子齿个数及具体尺寸参数的取值等。

目前, 常用的电机的优化设计方法有梯度法、边界搜索法、惩罚函数法等^[9-10]。文献[11-13]提出了模拟退火算法、遗传算法等智能算法。文献[14]对 SFPMM 采用基于遗传算法的全局优化方法, 与个体优化的结果进行了对比, 发现按照敏感度顺序对参数进行个体优化的效果相近于全局优化。此外, 在对电机参数优化过程中需要设置

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51507045); 天津市自然科学基金项目(16JCYBJC42100)

作者简介: 高天鹤(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为永磁同步电机设计。

刘旭(1984—), 男, 教授, 研究方向为电机及其控制。

一定的约束条件^[15-17]。文献[7, 14]对 SFPMM 在额定运行状态下以铜耗为约束条件进行了结构优化。以往文献只分析了单一工作状态下的优化, 没有考虑到一些需要长时间工作在轻载状态或过载状态的电机, 可能导致优化后电机在实际运行时的效率、输出转矩和成本不是最优。本文对电机进行了多工作状态、多约束条件的参数优化, 包括电机的轻载、额定、过载工作状态, 以及绕组铜耗、电流、电流密度 3 个约束条件。通过对这些约束条件下的优化结果进行性能比较和分析, 得到 SFPMM 优化过程中约束条件的选择方法。

本文以 6/8 SFPMM 为例, 首先介绍了电机的拓扑结构、工作原理及初始设计参数。其次, 在固定铜耗、电流、电流密度等不同的约束条件下, 对电机的定、转子尺寸等参数按照敏感度由高到低的顺序进行优化^[18]。最后对所有优化设计的性能, 如输出转矩、永磁体用量、损耗、运行效率等进行评价, 研究优化设计过程中约束条件对电机性能的影响。

1 电机结构和工作原理

6/8 SFPMM 的截面图如图 1 所示, 箭头代表永磁体磁化方向。转子旋转时永磁体产生的磁动势交替在电枢线圈中切换, 转子旋转 1/8 周期, 电枢线圈内的磁通变化一个周期。电机初始设计参数如表 1 所示。

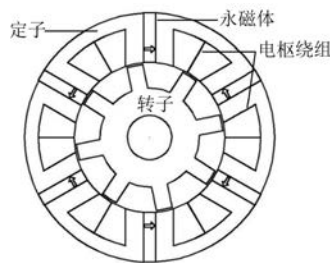


图 1 6/8 SFPMM

2 电机尺寸参数优化

图 2 所示为电机定子和转子铁心的部分结构图。定子参数包括定子外径 D_s 、定子内径 D_r 、定子齿宽 w_s 、定子轭部厚度 h_y 、永磁体厚度 w_{pm} 、永磁体长度 h_{pm} 。转子参数包括转子齿长度 h_r 、转子齿弧长 w_{r1} 、转子极弧长 w_{r2} 。在定子外径固定的

表 1 6/8 SFPMM 初始设计参数

参数名称	参数值
定子外径 D_s /mm	90
定子内径 D_r /mm	55
电机长度 L /mm	25
气隙长度 L_{gap} /mm	0.5
定子齿宽 w_s /mm	7
定子轭部厚度 h_y /mm	7
转子齿长度 h_r /mm	8
转子极弧长 w_{r1} /mm	—
转子极距 w_{r2} /mm	—
永磁体厚度 w_{pm} /mm	5
永磁体剩磁密度 B_r/T	1.2
永磁体相对磁导率 M_u	1.05
每槽导体个数 N_u	36
额定电流 I_{rms}/A	10
额定转速 $n/(r \cdot \min^{-1})$	400

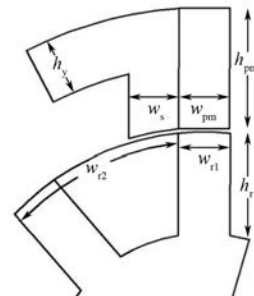


图 2 6/8 SFPMM 定子和转子铁心设计参数

前提下, 为了通过优化使电机的输出转矩最大化, 对参数 w_s 、 h_y 、 h_r 、 w_{pm} 、 α 和 γ 进行优化, 其中定子分割比 $\gamma = D_r/D_s$, 转子极弧系数 $\alpha = w_{r1}/w_{r2}$ 。

2.1 尺寸参数敏感度分析

在对尺寸参数的个体优化过程中, 应该依据敏感度高低对参数优化顺序进行排列, 优先对敏感度高的参数进行优化。6/8 SFPMM 的输出转矩对参数值的一阶导数 k_s , 即输出转矩随着参数值变化的变化率, 可以表示输出转矩对参数值的敏感度。令 T 为输出转矩, x 为尺寸参数, 则 k_s 可表示为

$$k_s = \left| \frac{\partial T}{\partial x} \right| \quad (1)$$

表 2 所示为对参数 w_s 、 h_y 、 h_r 、 w_{pm} 、 α 和 γ 进行

敏感度分析时的扫描范围与扫描间隔。通过计算得出如图 3 所示的参数敏感度对比图,可以看出敏感度由高到低依次为 γ 、 w_s 、 α 、 w_{pm} 、 h_y 、 h_r 。

表 2 6/8 SFPMM 敏感度分析范围

参数名称	变化范围	步长
定子齿宽 w_s /mm	3.0~9.0	0.6
定子轭部厚度 h_y /mm	3.0~9.0	0.6
转子齿长度 h_r /mm	4.5~13.5	0.9
永磁体厚度 w_{pm} /mm	3~9	0.6
极弧系数 α	0.2~0.6	0.04
定转子分割比 γ	0.45~0.75	0.05

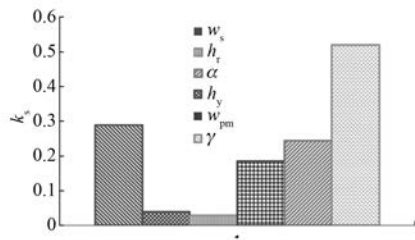


图 3 6/8 SFPMM 的输出转矩对主要尺寸参数的一阶导数 k_s

2.2 优化过程及结果

依据参数的敏感度顺序,分别在轻载、额定、过载运行状态以固定铜耗、电流、电流密度为约束

条件,对参数 γ 、 w_s 、 α 、 w_{pm} 、 h_y 、 h_r 进行个体优化。首先在其他参数均为初始值的条件下,对比 γ 在不同数值下(变化范围为 0.45~0.7,步长为 0.025)平均转矩的大小,然后在 γ 值为最优的基础上,对比 w_s 在不同数值下(变化范围为 1~10 mm,步长为 0.5 mm)平均转矩的大小,后面以此类推。6/8 SFPMM 的电流密度和铜耗计算公式为

$$J = \frac{N_a I}{k_p S} \quad (2)$$

$$P_{Cu} = \frac{3\pi N_a^2 I^2}{k_p S} \cdot (L + w_{pm} + 2w_s) \quad (3)$$

其中:每槽导体个数 $N_a = 36$,绕组填充因数 $k_p = 0.6$,铜的电阻率 $\rho = 0.0219 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ (80 °C)、 S 为单个定子槽面积。

依据 6/8 SFPMM 的初始模型:当其工作在额定状态, $P_{Cu} = 10.94 \text{ W}$ 、 $I = 10 \text{ A}$ 、 $J = 3.345 \text{ A}/\text{mm}^2$; 当其工作在轻载状态,取 $P_{Cu} = 2.73 \text{ W}$ 、 $I = 5 \text{ A}$ 、 $J = 1.673 \text{ A}/\text{mm}^2$; 当其工作在过载状态,取 $P_{Cu} = 43.74 \text{ W}$ 、 $I = 20 \text{ A}$ 、 $J = 6.690 \text{ A}/\text{mm}^2$ 。

图 4 为 6/8 SFPMM 在额定状态和 3 种约束条件下,平均转矩与 6 个设计参数的关系。图 4(b)、4(e),与其他两种约束条件不同,在电流约束下,当 w_s 、 h_y 达到一定值后,电机的平均转矩趋于稳定;图 4(f)可见, h_r 对电机平均转矩影响很小。

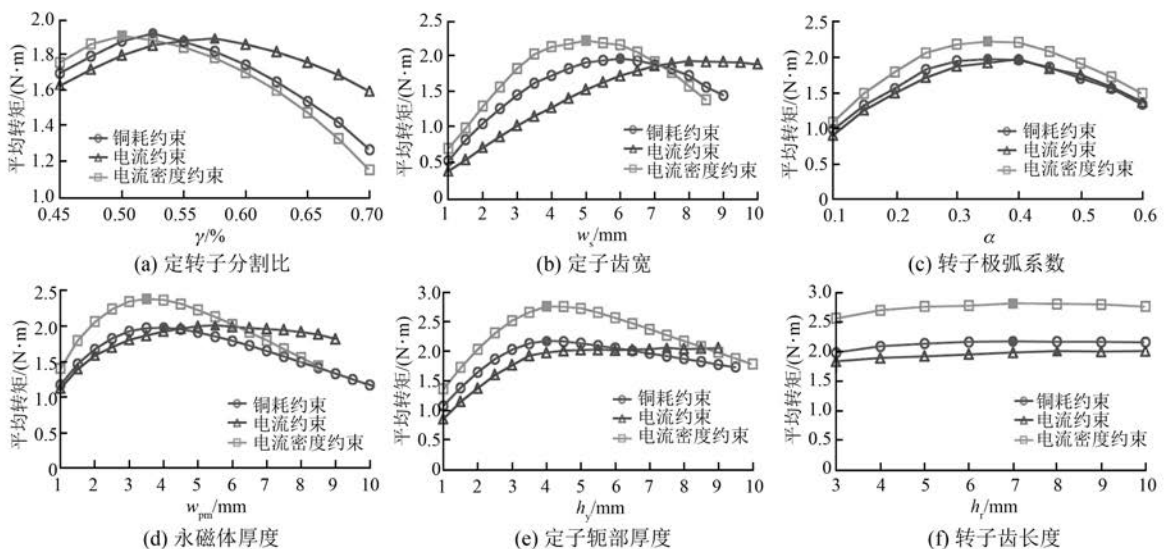


图 4 6/8 SFPMM 在额定运行状态下优化时平均转矩随各个参数的变化趋势

表 3、表 4 和表 5 分别为 6/8 SFPMM 在不同负载条件下的优化结果,其中 V_{PM} 为永磁体体积。

与初始模型相比,电流约束下的优化结果中 γ 、 w_s 、 w_{pm} 值均增大。在铜耗约束和电流密度约束下

的优化结果中 γ 、 w_s 、 w_{pm} 、 h_y 值均减小, 转子极弧系数 α 值随 w_s 不同而有所变化, 转子齿宽度趋向于与定子齿宽相等。图 5 所示为 6/8 SFPMM 在额定运行状态下优化结果的电机剖面图。与初始模型相比, 在电流约束下的优化结果中, 电机的定子槽面积更小, 永磁体体积更大, 而且随着轻载、额定、过载的顺序这种趋势更加明显。在铜耗约束和电流密度约束的优化结果中, 电机的定子槽面积均有增大, 而且随着轻载、额定、过载的顺序, 定子槽面积减小, 永磁体体积逐渐增大。在电流密度约束条件下的定子槽面积比铜耗约束条件下的稍大。

表 3 轻载工作状态下的优化结果

参数名称	初始模型	变化范围		
		P_{Cu} 2.73 W	I 5 A	J 1.673 A/mm ²
γ	0.55	0.525	0.575	0.5
w_s /mm	7.0	6.0	8.0	5.0
α	0.4	0.4	0.4	0.35
w_{pm} /mm	5.0	3.5	5.5	3.5
h_y /mm	7.0	4.0	4.5	3.5
h_r /mm	8.0	7.0	8.0	7.0
S /mm ²	179.4	315.7	187.7	378.1
V_{PM} /mm ³	15 187.5	11 221.9	15 778.1	11 812.5

表 4 额定工作状态下的优化结果

参数名称	初始模型	变化范围		
		P_{Cu} 10.94 W	I 10 A	J 3.345 A/mm ²
γ	0.55	0.525	0.575	0.5
w_s /mm	7.0	6.0	8.0	5.0
α	0.4	0.35	0.4	0.35
w_{pm} /mm	5.0	4.0	5.5	3.5
h_y /mm	7.0	4.0	7.5	4.0
h_r /mm	8.0	7.0	8.0	7.0
S /mm ²	179.4	306.8	130.6	363.2
V_{PM} /mm ³	15 187.5	12 825.0	15 778.1	11 812.5

表 5 过载工作状态下的优化结果

参数名称	初始模型	变化范围		
		P_{Cu} 43.74 W	I 20 A	J 6.690 A/mm ²
γ	0.55	0.525	0.575	0.525
w_s /mm	7.0	6.0	9.0	5.5
α	0.4	0.35	0.4	0.35
w_{pm} /mm	5.0	4.5	6.0	4.5
h_y /mm	7.0	5.0	8.0	5.0
h_r /mm	8.0	7.0	8.0	8.0
S /mm ²	179.4	272.0	92.0	288.9
V_{PM} /mm ³	15 187.5	14 428.1	17 212.5	14 428.1

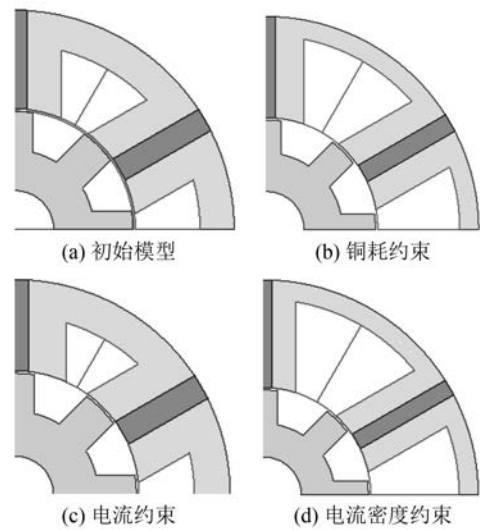


图 5 6/8 SFPMM 在额定运行状态下优化结果的电机剖面图

3 优化结果分析

3.1 平均转矩

图 6、图 7 和图 8 为 6/8 SFPMM 分别在轻载、额定、过载运行状态以铜耗、电流、电流密度为约束条件优化后的输出转矩。如图 6(b)、图 7(b)、图 8(b) 所示, 当以电流为变量时, 电流约束条件优化结果的输出转矩最大。由于定、转子齿宽和轭部厚度较小, 随着电枢电流增大逐渐在铁心内产生磁饱和。SFPMM 在铜耗约束下优化时的输出转矩大于其在电流密度约束下优化结果。如图 6(a)、图 7(a)、图 8(a)、图 6(c)、图 7(c)、图 8(c) 所示, 以铜耗或电流密度为变量时, 6/8 SFPMM 在轻载、额定、过载运行条件下优化结果

比较。在铜耗约束和电流密度约束下优化结果的输出转矩随着铜耗或电流密度逐渐增大, 逐渐大于初始模型和电流约束优化有结果。

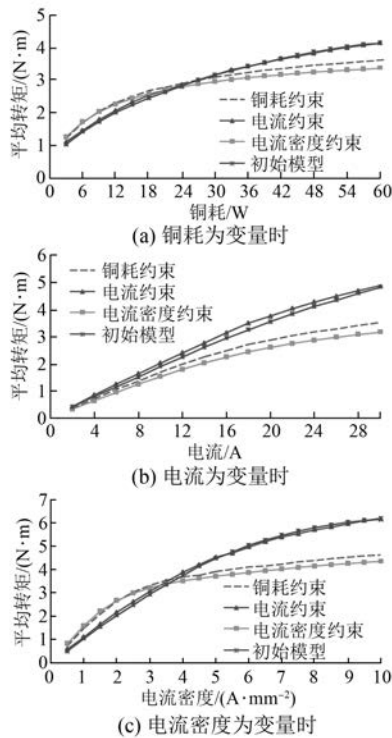


图6 6/8 SFPMM 在轻载运行状态下优化结果的输出转矩

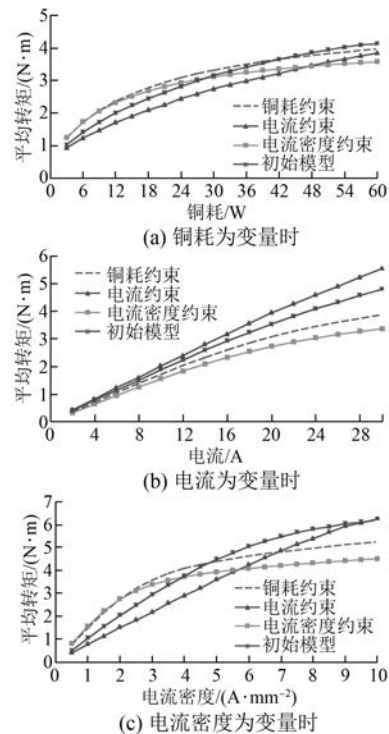


图7 6/8 SFPMM 在额定运行状态下优化结果的输出转矩

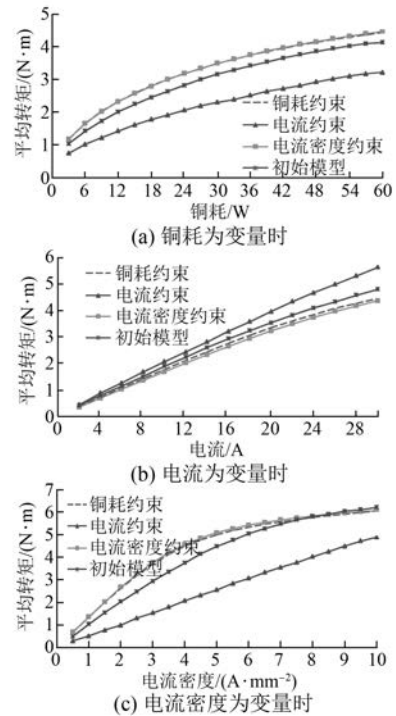


图8 6/8 SFPMM 在过载运行状态下优化结果的输出转矩

3.2 齿槽转矩

图9为6/8 SFPMM在3种约束条件下优化后的齿槽转矩对比。在电流约束下, 6/8 SFPMM的齿槽转矩最大。在铜耗约束和电流密度约束下, 6/8 SFPMM的齿槽转矩小于初始模型, 其中铜耗约束下优化结果的齿槽转矩最小。

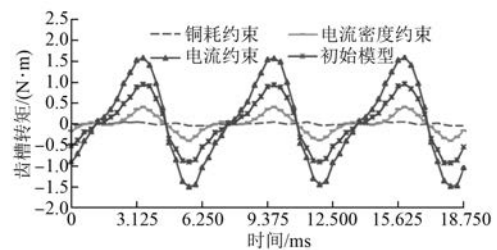


图9 6/8 SFPMM 电机在额定运行约束下后的齿槽转矩

3.3 磁链和反电动势

图10、图11为6/8 SFPMM在额定负载约束条件下优化结果。与初始模型的磁链和反电动势对比, 恒电流约束下, 6/8 SFPMM的磁链和反电动势基波分量最高。在铜耗约束和电流密度约束下, 6/8 SFPMM的磁链和反电动势基波分量均低于初始模型。

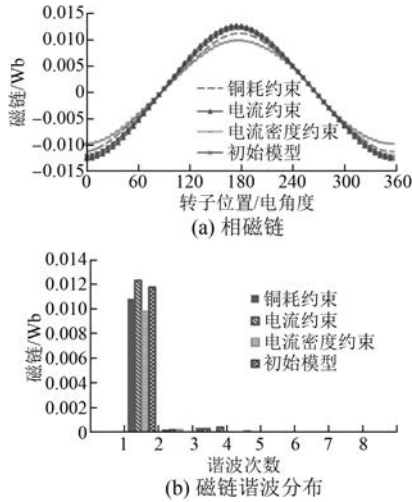


图 10 6/8 SFPMM 在额定运行状态下优化结果的磁链对比

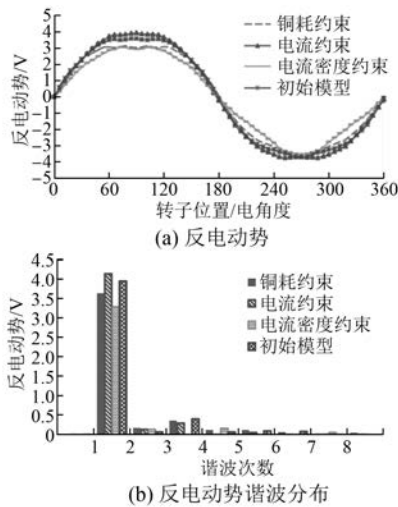


图 11 6/8 SFPMM 在额定运行状态下优化结果的反电动势对比

3.4 损耗

铁耗是由电机中的磁场在铁心中发生变化时产生的,是电机中主要损耗之一;与铜耗一样也是影响电机效率的主要因素,所以对优化结果的铁耗进行分析是很有必要的。铁耗的计算公式为

$$P_{Fe} = K_h f(B_m)^2 + K_c (fB_m)^2 + K_e (fB_m)^{1.5} \quad (4)$$

式中: B_m —— 正弦波磁通幅值;

f —— 频率;

K_h —— 磁滞损耗系数;

K_e —— 涡流损耗系数;

K_c —— 附加损耗系数。

本文电机所使用的铁心材料为 35w250, $K_h = 0.023 \text{ 17 W/kg}$ 、 $K_c = 4.925 \times 10^{-5} \text{ W/kg}$ 、 $K_e = 3.5108 \times 10^{-5} \text{ W/kg}$ 。图 12 所示为 6/8 SFPMM 在额定运行状态($I_{rms} = 10 \text{ A}$) 3 种约束条件下优化结果和初始模型的铁耗对比。表 6 所示为各个电机的铁耗和铜耗,其中铜耗的计算见式(3)。由于电机中的其他损耗相对于铁耗和铜耗很小,所以本文将总损耗近似为铁耗与铜耗之和 P_{loss} 。如表 6 所示,铜耗占总损耗的比例高于铁耗,电流约束下 6/8 SFPMM 的总损耗最高,而在铜耗约束和电流密度约束下,6/8 SFPMM 的总损耗低于初始模型。

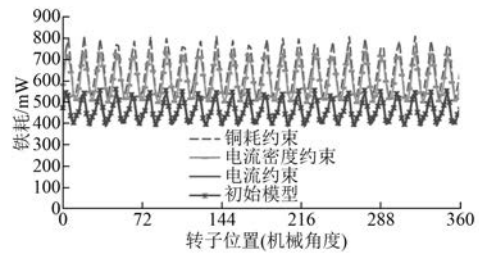


图 12 6/8 SFPMM 在额定运行状态下 3 种优化结果的铁耗对比

3.5 效率

表 7 为 6/8 SFPMM 在轻载、额定、过载运行状态下以铜耗、电流、电流密度为约束条件的优化结果对比。综合分析了各个优化结果的成本与转矩性能,包括输出转矩 $T(\text{N}\cdot\text{m})$ 、单位永磁体输出转矩 $T_{PM}(\text{mN}\cdot\text{m}/\text{mm}^3)$ 、电机效率 η 、永磁体使用量 $V_{PM}(\text{cm}^3)$ 、齿槽转矩 $T_{cog}(\text{N}\cdot\text{m})$,其中电机功率和电机效率的计算公式为:

$$P = 2\pi T \cdot n/60 \quad (5)$$

$$\eta = (p - p_{loss})/p \times 100\% \quad (6)$$

式中: P —— 电机功率;

n —— 电机转速。

从约束条件角度看,无论在轻载、额定还是过载运行状态下,在固定电流约束下优化的结果中,永磁体用量和齿槽转矩幅值最大,而单位永磁体的输出转矩和效率最小。固定铜耗与固定电流密度相比,永磁体用量相差不多($<1.1 \text{ cm}^3$)。固定铜耗约束下 6/8 SFPMM 的单位永磁体输出转矩更高,齿槽转矩幅值更小,但效率略小于电流密度

表 6 6/8 SFPMM 各个优化结果的铁耗、铜耗及总损耗

项目	电流=5 A			电流=10 A			电流=20 A			
	P_{Fe}	P_{Cu}	P_{loss}	P_{Fe}	P_{Cu}	P_{loss}	P_{Fe}	P_{Cu}	P_{loss}	
初始模型	0.45	2.73	3.18	0.46	10.94	11.40	0.69	43.74	44.43	
轻载运行状态下的优化结果	铜耗约束	0.58	1.43	2.01	0.66	5.72	6.38	0.94	22.87	23.81
	电流约束	0.64	2.76	3.40	0.66	11.04	11.70	0.84	44.17	45.01
	电流密度约束	0.58	1.14	1.72	0.63	4.54	5.17	0.88	18.16	19.04
额定运行状态下的优化结果	铜耗约束	0.62	1.49	2.11	0.65	5.96	6.61	0.89	23.83	24.72
	电流约束	0.45	3.97	4.42	0.46	15.88	16.34	0.65	63.52	64.17
	电流密度约束	0.54	1.18	1.72	0.61	4.73	5.34	0.93	18.90	19.83
过载运行状态下的优化结果	铜耗约束	0.54	1.70	2.24	0.56	6.80	7.36	0.85	27.21	28.06
	电流约束	0.43	5.93	6.36	0.44	23.74	24.18	0.64	94.95	95.59
	电流密度约束	0.49	1.56	2.05	0.51	6.25	6.76	0.79	25.00	25.79

表 7 6/8 SFPMM 优化结果的成本与性能分析

项目	电流=5 A			电流=10 A			电流=20 A			V_{PM}/mm^3	$T_{cog}/\text{N}\cdot\text{m}$	
	T	T_{PM}	$\eta/\%$	T	T_{PM}	$\eta/\%$	T	T_{PM}	$\eta/\%$			
初始模型	0.96	0.063	92.1	1.95	0.129	86.0	3.54	0.244	71.3	15 187.5	0.95	
轻载运行状态下的优化结果	铜耗约束	0.85	0.076	94.3	1.69	0.151	91.0	2.85	0.254	80.1	11 221.9	0.18
	电流约束	1.03	0.066	92.1	2.02	0.132	86.2	3.71	0.235	71.1	15 778.1	1.51
	电流密度约束	0.79	0.067	94.8	1.52	0.129	91.9	2.59	0.220	82.4	11 812.5	0.41
额定运行状态下的优化结果	铜耗约束	0.88	0.069	94.3	1.73	0.135	90.9	3.09	0.241	80.9	12 825.0	0.05
	电流约束	1.01	0.064	89.5	2.03	0.128	80.7	3.81	0.242	59.8	15 778.1	1.59
	电流密度约束	0.79	0.067	94.8	1.55	0.131	91.8	2.73	0.231	82.7	11 812.5	0.40
过载运行状态下的优化结果	铜耗约束	0.89	0.062	94.0	1.77	0.123	90.1	3.35	0.233	80.0	14 428.1	0.08
	电流约束	0.99	0.057	84.7	1.99	0.115	71.0	3.89	0.226	41.4	17 212.5	1.24
	电流密度约束	0.84	0.058	94.2	1.67	0.116	90.4	3.20	0.222	80.7	14 428.1	0.15

注：转矩 T 的单位为 $\text{N}\cdot\text{m}$ ，单位永磁体转矩 T_{PM} 的单位为 $\text{mN}\cdot\text{m}/\text{mm}^3$ 。

约束下的优化结果 (<2.3%)。综上,6/8 SFPMM 使用电流约束优化方法最差,选取铜耗约束在轻载、额定运行状态下的优化结果最好。

4 结 语

本文比较研究了 6/8 SFPMM 在多种运行状态和多种约束条件下优化结果。包括:(1)对电机主要尺寸参数进行敏感度分析;(2)主要尺寸参数的优化方法和步骤。(3)对优化结果的转矩性能、永磁体体积、损耗和运行效率等进行评价和对比。

通过对优化结果比较分析后,发现在固定电

流约束条件下进行优化时,6/8 SFPMM 的定子槽面积较小、转矩密度和效率较低、齿槽转矩较大。这是由于在该约束条件下,优化过程忽略了定子槽面积的影响。在固定铜耗和电流密度下进行优化时,由于计及定子槽面积的影响,所得到的优化结果与固定电流时相比,具有更高的转矩密度和效率。选取固定铜耗为约束条件,在轻载、额定运行条件下的优化结果具有较高的转矩、相对较高的效率及相对较小的齿槽转矩。

【参考文献】

[1] 董剑宁,黄允凯,金龙,等.高速永磁电机设计与分

- 析技术综述[J].中国电机工程学报,2014,34(27):41-53.
- [2] 费伟中,沈建新.新型永磁开关磁链电机[J].微特电机,2006,34(8):1-3.
- [3] 杨玉波,王宁,王秀和.E型铁心开关磁通电机的电磁性能解析计算[J].电机与控制学报,2016,20(1):68-72.
- [4] CHENG M, HUA W, ZHANG J. Overview of stator-permanent magnet brushless machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(11): 5087-5101.
- [5] RAUCH S, JOHNSON L. Design principles of flux-switching alternators [J]. AIEE Transactions on Industrial Electronics, 1995, 74(3): 1261-1268.
- [6] ZHU Z Q, CHEN J T. Advanced flux-switching permanent magnet brushless machines [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46(6): 1447-1453.
- [7] LI Y, XU W. Optimization and performance analysis of E-core and C-core flux-switching permanent-magnet machines for electric vehicle applications [C] // Proceedings of the 17th International Conference on Electrical Machines and Systems, HangZhou, PR China: ICEMS, 2014: 53-59.
- [8] CHEN J T, ZHU Z Q. Winding configurations and optimal stator and rotor pole combination of flux-switching PM brushless AC machines [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(2): 293-302.
- [9] 曹先庆.一种快速的永磁同步电动机效率优化方案[J].微电机,2013,46(10):69-73.
- [10] 刘景林,李钟明.混合罚函数法在永磁同步发电机优化设计中的应用[J].微特电机,1997,25(5):6-8.
- [11] 汪友华,颜威利.自适应模拟退火算法在电磁场逆问题中的应用[J].中国电机工程学报,1995,15(4):234-238.
- [12] 杨仕友,倪光正.模拟遗传退火算法的改进及其在电机电磁场逆问题数值计算中的应用[J].电工技术学报,1998,13(2):21-23.
- [13] 李立毅,唐永斌,刘家曦,等.多种群遗传算法在无铁心永磁直线同步电机优化设计中的应用[J].中国电机工程学报,2013,33(15):69-77.
- [14] ZHU Z Q, LIU X. Individual and global optimization of switched flux permanent magnet motors [C] // Int Conf on Electrical Machines and Systems (ICEMS2011), Beijing, China, 2011: 1-6.
- [15] 李鲲鹏,胡虔生.遗传算法电机优化设计简介[J].微特电机,2001,29(4):32-33.
- [16] 朱孝勇,刘修福,全力.新型磁通切换电机优化设计与动态建模仿真[J].电机与控制应用,2012,39(12):1-6.
- [17] 陈云云,全力,朱孝勇.双凸极永磁双转子电机优化设计与电磁特性分析[J].中国电机工程学报,2014,34(12):1912-1921.
- [18] ZHU Z Q, PANG Y, CHEN J T, et al. Influence of design parameters on output torque of flux-switching permanent magnet machines [C] // IEEE Conf Vehicle Power and Propulsion, Sep 3-5, 2008 Harbin, China, 2008: 1-6.

收稿日期:2017-07-05

[期刊简介]

《电机与控制应用》(原《中小型电机》)创刊于1959年,是经国家新闻出版总署批准注册,由上海电器科学研究所(集团)有限公司主办的具有专业权威的电工技术类科技期刊。

期刊定位于电机、控制和应用三大板块,以中小型电机为基础,拓展新型的高效节能和微特电机技术,以新能源技术和智能控制技术引领和提升传统的电机制造技术为方向,以电机系统节能为目标开拓电机相关应用,全面报道国内外的最新技术、产品研发、检测、标准及相关的行业信息。

本刊每月10日出版,国内外公开发行人,邮发代号4-199。在半个多世纪的岁月中,该杂志为我

国中小型电机行业的技术进步与发展做出了巨大的贡献,在中国电机及其应用领域享有很高的影响。

依托集团公司雄厚的技术实力和广泛的行业资源,《电机与控制应用》正朝着专业化品牌媒体的方向不断开拓创新,在全国科技期刊界拥有广泛的知名度,是“中国学术期刊综合评价数据库来源期刊”、“中国科学引文数据库来源期刊”、“中国学术期刊(光盘版)全文收录期刊”,得到了业内人士的普遍认可,备受广大读者的推崇和信赖,多次被评为中文核心期刊、中国科技核心期刊、全国优秀科技期刊。