

同步磁阻电机转子结构优化设计*

许东滢¹, 鲍晓华^{1,2}, 徐翌翔¹, 孙跃³

(1. 合肥工业大学 电气工程与自动化学院, 安徽 合肥 230009;

2. 合肥工业大学 智能制造技术研究院, 安徽 合肥 230009;

3. 安徽皖南电机股份有限公司, 安徽 宣城 242500)

摘要: 同步磁阻电机(SynRM)具有效率高、成本低、结构简单等优点,但其存在转矩脉动大等问题,会影响电机的平稳运行。为了降低 SynRM 的转矩脉动,需要对转子结构进行优化。以一台 22 kW 四极的 SynRM 为例,采用田口法对不同电流负载下的 SynRM 转子结构进行优化。确定 SynRM 的转子拓扑,探究 SynRM 转子结构的关键参数对转矩性能的影响,初步确定转子关键参数的范围。利用田口法对不同电流负载下的电机进行试验分析,得到最优转子结构参数组合,利用有限元仿真验证优化结果。为了增强转子的机械强度,在转子结构中添加径向磁桥,探究径向磁桥对电机转矩性能的影响。

关键词: 同步磁阻电机; 电流负载; 田口法; 径向磁桥

中图分类号: TM 352 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)07-0044-07

doi: 10.12177/emca.2021.051

Rotor Structure Optimization Design of Synchronous Reluctance Motor*

XU Dongying¹, BAO Xiaohua^{1,2}, XU Yixiang¹, SUN Yue³

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology,

Hefei 230009, China;

2. Intelligent Manufacturing Institute, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

3. Anhui Wannan Electric Machine Co., Ltd., Xuancheng 242500, China)

Abstract: Synchronous reluctance motor (SynRM) has the advantages of high efficiency, low cost and simple structure, but the large torque ripple has an effect on its smooth operation. In order to reduce the torque ripple of SynRM, it is necessary to optimize the rotor structure. A 22 kW four-pole SynRM is taken as an example, and Taguchi method is used to optimize the rotor structure of SynRM under different current loads. The rotor topology of SynRM is determined, the influence of key parameters of SynRM rotor structure on torque performance is explored, and the range of key parameters is preliminarily determined. Then, based on Taguchi method, the experimental analysis on motor is conducted under different current loads to obtain the optimal combination of rotor structure parameters, and the finite element simulation is used to verify the optimization results. In order to enhance the mechanical strength of the rotor, a radial magnetic bridge is added to the rotor structure, and the influence of the radial magnetic bridge on the torque performance of the motor is studied.

Key words: synchronous reluctance motor; current load; Taguchi method; radial magnetic bridge

收稿日期: 2021-05-10; 收到修改稿日期: 2021-05-27

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51977055);安徽省科技重大专项项目(201903a05020042)

作者简介: 许东滢(1996—),女,硕士研究生,研究方向为同步磁阻电机优化设计。

鲍晓华(1972—),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为电机设计理论及技术、电机电磁场理论分析和计算、大型电机及高速电机的可靠性技术。(通信作者)

0 引言

近年来,由于稀土永磁材料的开采限制,使得供应量有限,购买价格逐年上涨,越来越多的科研工作者开始寻找和探究能够替代永磁同步电机的电机,探究采用低性能永磁体如铁氧体等材料或者不需要永磁体的高性能电机。发现了同步磁阻电机(SynRM),其电磁转矩中只有磁阻转矩。SynRM具有成本低、调速范围宽、效率和转矩密度高等优点,具有广阔应用前景^[1]。

转矩脉动较大一直是SynRM的一个问题,电负载的空间谐波和转子各向异性之间的相互作用导致转矩脉动,在大多数驱动应用中是无法接受的^[2]。对于抑制转矩脉动的方法,基本上从优化控制策略^[3-4]和优化电机本体^[5-7]的2个角度切入。对电机本体的优化主要集中在对转子结构进行优化^[8-10],一般采用试验设计方法、优化算法、试验设计与算法相结合等。

文献[8]采用有限元法和模拟试验设计相结合的方法,对SynRM的转子结构进行优化设计。文献[9]提出了一种基于转矩/体积的SynRM转子自动优化设计策略,以磁障层数、磁障总宽度与导磁总宽度之比、额定功率和转子直径为参数进行SynRM转矩密度和功率因数的优化设计。文献[10]在保证各层磁障宽度与圆弧曲线部分宽度相等的条件下,建立正交表,利用田口法优化SynRM转子结构参数,得到低转矩脉动的SynRM转子结构参数组合。但上述对转子结构的优化均是在额定电流下,并未考虑电机在不同工作点下的情况。在不同电流负载下电机的运行状况会有所变化。

本文针对一款22 kW的SynRM,固定其定子部分不变,采用田口法对不同电流负载下的SynRM转子结构进行优化。基于各向异性理论确定了转子结构拓扑,探究了转子关键结构参数对电机转矩性能的影响,初步确定关键参数及其范围。再进行正交试验,对试验结果进行方差分析,得到最优化的转子结构组合。为了增强转子的机械强度,在转子结构中添加径向磁桥,探究径向磁桥对电机转矩性能的影响。有限元仿真结果表明,优化后的SynRM在不同电流负载下转矩脉动下降明显,转矩密度有所提升。

1 SynRM 模型及参数

本文对一台22 kW四极的SynRM进行研究。SynRM的定子部分与异步电机的定子部分类似,其定子设计可参考同功率的异步电机。图1展示了SynRM的二维有限元(2D-FEA)仿真模型,定子采用双层绕组,用三相交流对称的电流源进行励磁。

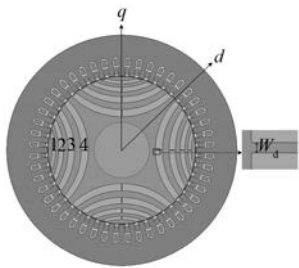


图1 SynRM 仿真模型

每个转子结构参数组合均通过仿真软件的2D-FEA求解稳态时的瞬时转矩 T ,从而获得平均转矩和转矩脉动。定义平均转矩 T_{avg} 为瞬时转矩 T 在包含 N 个采样点的一个电周期内的数学平均值,转矩脉动 T_{rip} 为相对于 T_{avg} 的峰峰值,即瞬时转矩的最大值与最小值之差比上平均转矩:

$$T_{avg} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i \tag{1}$$

$$T_{rip} = \frac{\max(T) - \min(T)}{T_{avg}} \tag{2}$$

仿真时,调整转子初始角使 d 轴与A相轴线重合;采用最大转矩电流比的控制方式,通过调节电流超前角,使输出转矩最大,转矩脉动最小。

本文主要对上述SynRM的转子结构优化进行研究,该电机的固定参数如表1所示。

表1 电机基本参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
额定电压/V	380	定子外径/mm	290
额定频率/Hz	50	铁心长度/mm	205
额定电流/A	48.6	转子外径/mm	185.8
定子槽数	48	气隙长度/mm	0.6

SynRM转子由2部分组成:空气磁障和导磁块。空气磁障是SynRM转子内部的绝缘层。导磁块是SynRM转子内部的磁性层。SynRM转子结构复杂,优化过程涉及很多几何参数。如何合

理地选择通用的转子拓扑结构,减少待优化的几何参数十分重要。基于解析各向异性理论的一些最佳分布规则^[11],给出了选定的转子拓扑,如图2所示。

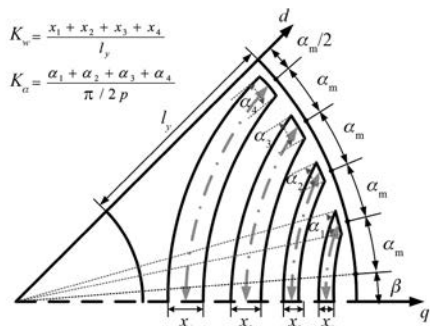


图2 SynRM的转子拓扑

本文取磁障末端的距离一致,类似均匀地在转子上开槽。定义2个磁障末端的距离对应的角度 α_m 为

$$\alpha_m = \frac{\frac{\pi}{2p} - \beta}{\frac{1}{n_{\text{air}}} + \frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中: p 为SynRM的极对数; β 为第一层磁障控制角度; n_{air} 为磁障总层数。

由式(3)可得,当SynRM的极对数 p 和磁障总层数 n_{air} 确定后,只需调节第一层磁障控制角 β ,就可以调整转子相邻磁障末端的距离。

定义 l_y 为转子的外圆半径与转轴半径之差, x_i 为第 i 层磁障在 q 轴上的宽度, $i=1, 2, \dots, n_{\text{air}}$;定义 q 轴磁障占比 K_w 为每层磁障宽度 x_i 之和与 l_y 的比值。定义 α_i 为转子虚拟槽宽度对应的角度, K_α 为转子虚拟槽宽度的占比:

$$K_w = \frac{\sum_{i=1}^{n_{\text{air}}} x_i}{l_y} \quad (4)$$

$$K_\alpha = \frac{\sum_{i=1}^{n_{\text{air}}} \alpha_i}{\pi/2p} \quad (5)$$

在本文中取转子虚拟槽宽度对应的角度 α_i 均相等(即 $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4$),通过调节 K_α 的大小来控制转子虚拟槽宽度。 q 轴磁障占比 K_w 与每层磁障宽度之和相关,当 K_w 的取值相同时,

即每层磁障宽度之和相同时,每层磁障宽度有多种组合,不同的磁障宽度组合对电机转矩的影响不同, q 轴磁障占比对转矩性能的影响研究较困难,故本文选择分别对每层磁障宽度进行仿真分析。

根据上述分析得到SynRM转子结构的关键参数为空气磁障总层数 n_{air} ,第一层磁障控制角度 β ,转子虚拟槽宽度的占比 K_α ,每层磁障宽度 x_i ($i=1, 2, \dots, n_{\text{air}}$)。

2 待优化转子结构参数的确定

2.1 空气磁障总层数的确定

空气磁障总层数对电机性能影响很大,某些特定的磁障总层数产生的转矩脉动很大^[12];磁障总层数决定了转子虚拟槽的数目,类似于某些特定的定转子槽组合会使电机产生较大的转矩脉动。为了避免不必要的仿真,先研究磁障总层数对电机性能的影响。在这一过程中,保证其他参数不变。

为了保证一定的凸极率,同时考虑加工难度, n_{air} 取2~6层,平均转矩和转矩脉动的仿真结果如图3所示。平均转矩随 n_{air} 的增大而增大,转矩脉动随 n_{air} 的变化呈现波动,开始时随着 n_{air} 增加逐渐下降,在 n_{air} 为5层时,转矩脉动突然增大,当 n_{air} 继续增加时转矩脉动又下降了。 n_{air} 为4层和6层时转矩脉动较小。考虑到层数越多加工成本越大,后续还可以对转子结构进行优化,使转矩脉动继续减小,选择磁障总层数为4层。

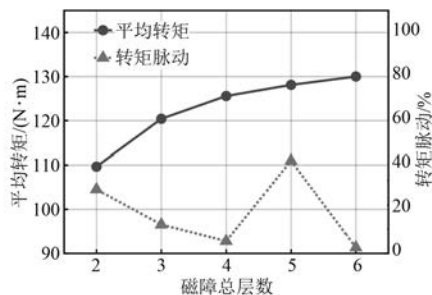


图3 磁障总层数对转矩性能的影响

2.2 第一层磁障控制角对转矩的影响

对第一层磁障控制角 β 进行分析。 β 取 $2^\circ \sim 10^\circ$,每隔 1° 取一个点,其他转子结构参数保持不变,通过仿真得到其对应的平均转矩和转矩脉动

如图 4 所示。随着 β 的增加,平均转矩逐渐下降。转矩脉动随 β 的变化呈现波动,开始时随着 β 增加逐渐下降,当 β 大于 4° 时,转矩脉动开始增大; $\beta > 6^\circ$ 时的转矩脉动较大, β 值为 $3^\circ \sim 5^\circ$ 时的转矩脉动较小。综合考虑平均转矩和转矩脉动,取第一层磁障控制角的值为 $3^\circ \sim 5^\circ$ 。

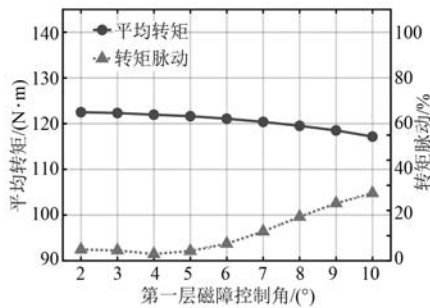


图 4 第一层磁障控制角对转矩性能的影响

2.3 转子虚拟槽宽占比对转矩的影响

对转子虚拟槽宽占比 K_α 进行分析。 K_α 取值为 $0.2 \sim 0.6$,每隔 0.1 取一个点,其他转子结构参数保持不变,通过仿真得到对应的平均转矩和转矩脉动如图 5 所示。平均转矩随 K_α 的增加呈下降趋势,转矩脉动随 K_α 的增加呈现波动,先是随着 K_α 增加逐渐增加,当 $K_\alpha > 0.5$ 时,转矩脉动开始减小。综合考虑平均转矩和转矩脉动,取转子虚拟槽宽占比为 $0.2 \sim 0.4$ 。

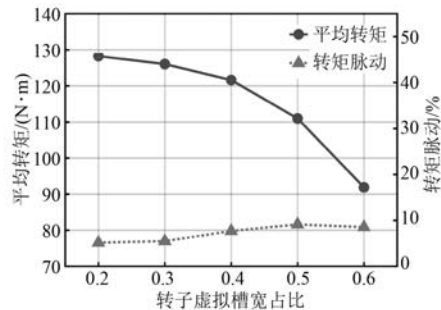


图 5 转子虚拟槽宽占比对转矩性能的影响

2.4 每层磁障宽度对转矩的影响

分别对每层磁障宽度进行分析, x_1 取 $2 \sim 6$ mm, x_2 取 $4 \sim 9$ mm, x_3 取 $7 \sim 12$ mm, x_4 取 $7 \sim 13$ mm,均每隔 1 mm 取 1 个点,通过仿真得到对应的平均转矩和转矩脉动如图 6 所示。随着每层磁障宽度 x_1, x_2, x_3, x_4 的增加,平均转矩有不同程度的降低。转矩脉动随着 x_1, x_2, x_3 的增加逐渐增

大;随 x_4 的变化呈现小范围波动,先增加后减小。综合考虑平均转矩和转矩脉动的变化趋势,取 x_1 为 $2 \sim 4$ mm, x_2 为 $4 \sim 6$ mm, x_3 为 $7 \sim 9$ mm, x_4 为 $7 \sim 9$ mm。

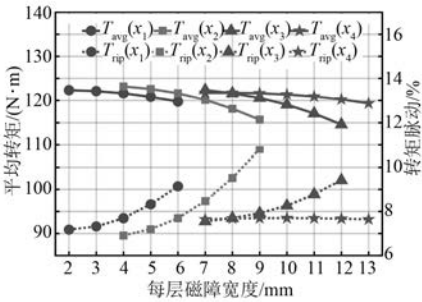


图 6 每层磁障宽度对转矩性能的影响

根据图 4~图 6 可得,平均转矩随着本文研究的转子结构参数的增加而减小,但变化不大,本文研究的转子结构参数对平均转矩的影响有限。转矩脉动随着本文研究的转子结构参数的增加呈现波动状态,变化较大,本文研究的转子结构参数对平均转矩的影响较大,尤其是第一层磁障控制角 β ,其取值对转矩脉动的影响很大; $K_\alpha, x_1, x_2, x_3, x_4$ 对转矩脉动均有不同程度的影响;根据图 6 可以看出, x_4 对转矩脉动的影响有限,转矩脉动波动不大,但是其他 5 个参数变化时,组合出来的转子结构有可能对转矩脉动产生较大影响,故也选择其进行下一步的研究。转子结构关键参数取值范围如表 2 所示。

表 2 转子结构关键参数的取值范围

参数名称	最小值	最大值
$\beta/(^\circ)$	3	5
K_α	0.2	0.4
x_1/mm	2	4
x_2/mm	4	6
x_3/mm	7	9
x_4/mm	7	9

3 基于田口法优化不同工作点下电机的转矩性能

为了模拟 SynRM 在不同工作点下的运行条件,定子绕组以额定电流的 $50\%、100\%、200\%$ 励磁。SynRM 采用最大转矩电流比控制策略,使 $t=0$ 时的转子 d 轴与 A 相绕组轴线重合,通过调整

电流超前角,使不同给定电流水平下的转矩脉动降至最低。根据表 2 给出的转子关键参数的取值范围,得到 6 因素/3 水平试验设计表如表 3 所示。

表 3 6 因素/3 水平试验设计表

参数名称	水平 1	水平 2	水平 3
$\beta/(^{\circ})$	3	4	5
K_{α}	0.2	0.3	0.4
x_1/mm	2	3	4
x_2/mm	4	5	6
x_3/mm	7	8	9
x_4/mm	7	8	9

基于田口法优化不同电流负载下的转子结构参数,先进行正交试验,得到 $L18(3^6)$ 正交表及仿

真结果如表 4 所示。表 4 中的 T_{avg1} 、 $T_{\text{avg0.5}}$ 、 T_{avg2} 代表额定电流 100%、50%、200% 时的平均转矩; T_{rip1} 、 $T_{\text{rip0.5}}$ 、 T_{rip2} 代表额定电流 100%、50%、200% 时的转矩脉动。

然后基于表 4 中获得的数据来计算方差。以第一层磁障控制角 β 对平均转矩影响的计算式为例,具体表示如下:

$$S_{\beta} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 (\bar{T}_{\text{avg}}(\beta^j) - \bar{T}_{\text{avg}})^2 \quad (6)$$

式中: S_{β} 为第一层磁障控制角 β 对应平均转矩的方差; $\bar{T}_{\text{avg}}(\beta^j)$ 为第一层磁障控制角 β 在因子水平 j 下平均转矩的平均值, $\bar{T}_{\text{avg}}$ 为平均转矩在所有正交试验中的平均值。

表 4 $L18(3^6)$ 正交表及仿真结果

试验次数	$\beta/(^{\circ})$	K_{α}	x_1/mm	x_2/mm	x_3/mm	x_4/mm	$T_{\text{avg1}}/(\text{N}\cdot\text{m})$	$T_{\text{rip1}}/\%$	$T_{\text{avg0.5}}/(\text{N}\cdot\text{m})$	$T_{\text{rip0.5}}/\%$	$T_{\text{avg2}}/(\text{N}\cdot\text{m})$	$T_{\text{rip2}}/\%$
1	3	0.2	2	4	7	7	129.03	9.16	44.98	7.52	298.08	13.23
2	3	0.2	3	5	9	9	128.66	8.62	44.74	7.36	300.94	11.90
3	3	0.3	4	4	8	9	127.54	8.20	44.59	7.64	303.35	11.80
4	3	0.3	2	6	9	8	126.07	8.76	44.34	8.17	299.38	10.17
5	3	0.4	4	5	7	8	123.75	8.50	43.64	6.71	297.42	10.16
6	3	0.4	3	6	8	7	122.78	8.58	43.46	6.70	294.21	9.21
7	4	0.2	4	4	9	8	129.05	7.14	44.82	4.73	301.34	10.68
8	4	0.2	2	6	8	9	128.81	6.25	44.80	4.33	300.94	9.29
9	4	0.3	3	5	8	8	127.23	6.09	44.57	5.25	302.44	9.45
10	4	0.3	4	6	7	7	126.42	5.97	44.42	5.21	299.98	9.77
11	4	0.4	3	4	7	9	124.07	6.02	43.67	5.86	298.75	7.97
12	4	0.4	2	5	9	7	122.69	6.00	43.40	6.23	294.35	6.64
13	5	0.2	4	5	8	7	128.91	4.20	44.82	5.19	300.54	5.16
14	5	0.2	3	6	7	8	129.10	4.74	44.87	5.63	301.23	4.49
15	5	0.3	3	4	9	7	127.08	4.56	44.52	6.60	301.46	4.55
16	5	0.3	2	5	7	9	127.71	4.83	44.65	7.08	303.28	4.32
17	5	0.4	2	4	8	8	123.44	6.73	43.51	10.41	296.50	4.25
18	5	0.4	4	6	9	9	120.55	7.92	43.10	13.54	291.00	5.57

类似地,可以获得其他转子结构参数对电机性能的方差。表 5 显示了每个因素对不同工作点下 SynRM 平均转矩和转矩脉动的影响。

根据表 5 可得,在不同电流负载下, K_{α} 对 SynRM 的平均转矩影响很大,其次是 x_2 和 x_3 ,而 x_1 、 x_4 、 β 影响相对较小。在不同电流负载下, β 对 SynRM 的转矩脉动影响较大,其次是 K_{α} ,磁障宽度 x_1 、 x_2 、 x_3 和 x_4 对 SynRM 的转矩脉动有不同程度的影响。

综合考虑不同工作点下的电机的运行状况,在不降低平均转矩 T_{avg} 和最小化转矩脉动 T_{rip} 为

优化目标的情况下,提出多目标优化函数:

$$F = \left[\frac{T_{\text{avg1}}}{T_{\text{rip1}}} \cdot \frac{T_{\text{avg0.5}}}{T_{\text{rip0.5}}} \cdot \frac{T_{\text{avg2}}}{T_{\text{rip2}}} \right] \quad (7)$$

根据表 4 和式(7)计算在转子结构参数在不同水平下 F 的平均值,结果如图 7 所示。在图 7 中, β 、 K_{α} 、 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 表示转子结构参数,其上标 1、2、3 表示水平 1、2、3。

根据图 7 可以得到,使输出性能 F 最好的转子结构参数组合为 β^3 、 K_{α}^1 、 x_1^2 、 x_2^2 、 x_3^1 、 x_4^1 ,对应的值具体为 5° 、0.2、3 mm、5 mm、7 mm、7 mm。利用有限元仿真对上述参数组合进行建模,验证其有效性。

表 5 转子结构参数对转矩的相对重要性

转子结构参数		β	K_{α}	x_1	x_2	x_3	x_4
T_{avg1}	方差/(N·m) ²	0.010 7	6.358 5	0.034 1	0.218 8	0.182 7	0.015 1
	占比/%	0.156 9	93.234 5	0.500 0	3.208 3	2.678 9	0.221 4
T_{rip1}	方差/(%) ²	1.802 0	0.134 5	0.063 1	0.087 6	0.073 9	0.071 4
	占比/%	80.716 7	6.024 6	2.826 4	3.923 9	3.310 2	3.198 2
$T_{avg0.5}$	方差/(N·m) ²	0.000 4	0.344 0	0.000 9	0.006 1	0.008 1	0.000 2
	占比/%	0.111 2	95.635 2	0.250 2	1.695 9	2.251 9	0.055 6
$T_{rip0.5}$	方差/(%) ²	1.415 1	1.027 7	0.223 1	0.179 8	0.392 4	0.326 9
	占比/%	39.694 2	28.827 5	6.258 1	5.043 5	11.007 0	9.169 7
T_{avg2}	方差/(N·m) ²	0.106 1	7.456 7	0.223 6	0.963 6	0.607 1	0.575 7
	占比/%	1.068 2	75.071 5	2.251 1	9.701 2	6.112 1	5.795 9
T_{rip2}	方差/(%) ²	6.983 4	0.558 9	0.180 8	0.123 8	0.002 8	0.025 9
	占比/%	88.671 3	7.096 6	2.295 7	1.571 9	0.035 6	0.328 9

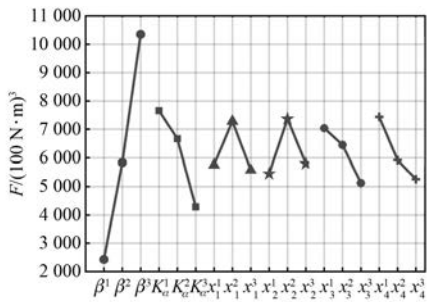


图 7 转矩因子反应图

4 优化结果

出于对转子结构机械强度的考虑,在转子中加入径向磁桥,根据文献[13],在图1中所示的位置3、4同时添加径向磁桥,磁桥宽度 W_d 为1 mm。探究添加径向磁桥对不同电流负载下的SynRM转矩性能的影响。不同电流负载下的有限元仿真结果如图8所示。平均转矩和转矩脉动的具体值如表6所示。

在额定电流下,优化后的电机平均转矩显著提升,转矩脉动明显下降。在50%额定电流下,优化后的电机平均转矩有所提升,转矩脉动下降明显。在200%额定电流下,优化后的电机平均转矩有所提升,转矩脉动有所下降。除了50%的额定电流下,优化后的电机在添加径向磁桥后,转矩脉动有所下降;在不同电流负载下,加入径向磁桥后,电机的平均转矩下降,转矩脉动增加。但添

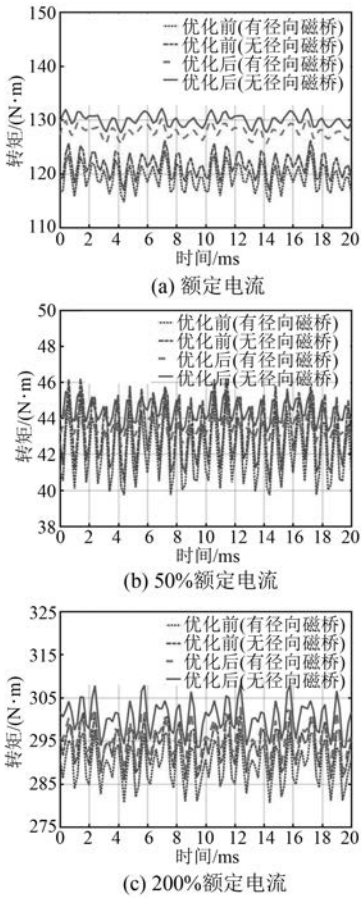


图 8 不同电流负载下优化前后转矩对比

加径向磁桥的优化后的电机还是比优化前的转矩性能要好。

表 6 不同电流负载下优化前后的转矩性能

状态	转矩性能	额定 电流	50% 额定 电流	200% 额定 电流
优化前有磁桥	$T_{avg}/(N \cdot m)$	119.37	42.21	289.50
	$T_{rip}/\%$	8.07	12.55	5.95
优化前无磁桥	$T_{avg}/(N \cdot m)$	121.63	43.32	293.98
	$T_{rip}/\%$	7.70	13.23	5.48
优化后有磁桥	$T_{avg}/(N \cdot m)$	127.81	43.44	295.37
	$T_{rip}/\%$	3.68	4.80	4.96
优化后无磁桥	$T_{avg}/(N \cdot m)$	129.94	44.37	300.37
	$T_{rip}/\%$	3.52	5.31	4.85

综上所述,采用田口法优化后的 SynRM,在不同电流负载下的转矩性能均有所提升,平均转矩有所增加,转矩脉动显著下降。优化后的电机在不同工作点下均能良好运行。添加径向磁桥会使电机的转矩性能轻微下降。

5 结 语

本文针对 SynRM,研究了通过田口法优化不同电流负载下电机转矩性能的可行性。以一台 22 kW SynRM 为例,研究了转子结构关键参数对转矩性能的影响,利用田口法得到不同负载电流下电机的最优转子结构参数组合,同时为增强转子的机械强度添加径向磁桥。有限元仿真结果表明,不同电流负载下优化后的 SynRM 的平均转矩提升了 6.8%、2.4%、2.2%,转矩脉动下降了 54.3%、59.9%、11.5%。此外,添加径向磁桥会使电机的转矩性能轻微下降,但优化后带径向磁桥的电机依然比优化前的转矩性能好。本文采用的方法能够显著提升 SynRM 的转矩性能。

【参 考 文 献】

- [1] 朱焜秋,丁海飞,黄磊. 无轴承同步磁阻电机系统及其关键技术发展综述[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 261.
- [2] MOHAMMADI M H, RAHMAN T, SILVA R, et al. A computationally efficient algorithm for rotor design optimization of synchronous reluctance machines[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52(3): 8200804.
- [3] 杨丁贵,汤宁平,戴熠晨. 同步磁阻电机定子电流最优控制[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(8): 32.
- [4] 徐心愿,王云冲,沈建新. 基于最大转矩电流比的同步磁阻电机 DTC-SVM 控制策略[J]. 电工技术学报, 2020, 35(2): 246.
- [5] 张志耿,汤宁平,许共龙. 新型同步磁阻电机的转子结构设计与特性分析[J]. 电机与控制应用, 2016, 43(1): 42.
- [6] MOGHADDAM R, GYLLENSTEN F. Novel high-performance SynRM design method: an easy approach for a complicated rotor topology[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(9): 5058.
- [7] WANG S, MA J, LIU C, et al. Design and performance analysis of a novel synchronous reluctance machine [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2020, 63(2): 249.
- [8] KIM K, AHN J S, WON S H, et al. A study on the optimal design of SynRM for the high torque and power factor[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(6): 2543.
- [9] MUN S J, CHO Y H, LEE J H. Optimum design of synchronous reluctance motors based on torque/volume using finite-element method and sequential unconstrained minimization technique[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44(11): 4143.
- [10] 董砚,颜冬,荆锴,等. 磁障渐变同步磁阻电机低转矩脉动转子优化设计[J]. 电工技术学报, 2017, 32(19): 21.
- [11] VAGATI A, FRANCESCHINI G, MARONGIU I, et al. Design criteria of high performance synchronous reluctance motors[C]//Conference Record of the 1992 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 1992.
- [12] 沈建新,蔡顺,郝鹤,等. 同步磁阻电机分析与设计(连载之六)转子均匀分布磁障的参数优化[J]. 微电机, 2016, 49(12): 84.
- [13] 沈建新,蔡顺,郝鹤,等. 同步磁阻电机分析与设计(连载之八)转子磁桥分析[J]. 微电机, 2017, 50(1): 87.