

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.09.012

基于 Taguchi 的高压自启动永磁同步电动机起动性能优化^{*}

张炳义¹, 冯 永¹, 冯桂宏¹, 张永生², 刘忠奇²

(1. 沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870; 2. 精基科技有限公司, 浙江 嘉兴 314000)

摘要:针对高压自启动永磁同步电动机起动过程中长时间低速爬行及大起动电流等问题,将 Taguchi 算法和有限元相结合,对高压自启动永磁同步电动机的起动性能进行综合优化。基于磁路法得到电机的基本设计参数和转子槽参数的水平值;利用 Taguchi 方法建立正交表,得到因子组合;利用有限元法对各组合进行分析,得到不同组合下的起动性能参数;利用极差和方差方法,就转子槽参数对起动性能的影响规律和所占比重进行分析,从而得到高压自启动永磁同步电动机起动性能优化最优组合方案,并进行了样机起动性能测试实验。研究结果表明:将 Taguchi 正交方法应用于高压自启动永磁同步电动机设计优化上,在保证全面分析的基础上减少分析次数,实现了多目标的同时优化,提高了起动性能,可以为高压自启动永磁同步电动机的设计提供指导方向。

关键词:高压自启动永磁同步电机;起动性能;Taguchi 优化;有限元分析;极差分析;方差分析

中图分类号:TH39;TM351

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)09-1013-06

Starting performance optimization of high voltage line start permanent magnet synchronous motor based on Taguchi

ZHANG Bing-yi¹, FENG Yong¹, FENG Gui-hong¹, ZHANG Yong-sheng², LIU Zhong-qi²

(1. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. Jingji Technology Co., Ltd., Jiaxing 314000, China)

Abstract: Aiming at the problems of long time low speed creep and large starting current in the starting process of high voltage line-start permanent magnet synchronous motor (HV-LS-PMSM), the starting performance of HV-LS-PMSM was optimized by using the Taguchi method and the finite element method. The basic design parameters and the value levels of the rotor slot were obtained based on magnetic circuit method. Then the orthogonal table was established by Taguchi method, and the combination of factors was obtained. The finite element method was used to analyze different combinations, through that the starting performance parameters were obtained. Using the method of extreme difference analysis and variance analysis, the influence law and the proportion of the rotor slot parameters on the starting performance were analyzed, so as to get the optimal combination scheme of HV-LS-PMSM starting performance. And the starting process was tested on the platform. The results indicate that the Taguchi orthogonal method applies to HV-LS-PMSM design and optimization, which can reduce the times of analysis on the basis of the comprehensive analysis, and achieve the multi-objective optimization, and improve the starting performance. And the conclusions provide guidance for the design of HV-LS-PMSM.

Key words: high voltage line-start permanent magnet synchronous motor; starting performance; Taguchi optimization; finite element analysis; extreme difference analysis; variance analysis

0 引 言

相比异步电机,自启动永磁同步电动机具有高功

率因数、高效率的优点,同时具备自起动能力,起动后具有同步电机特点,且经济运行范围广,其在工矿业等

收稿日期:2017-01-06

基金项目:国家高技术研究发展计划(“863”计划)资助项目(2012AA061303);国家重大科学仪器设备开发专项资助项目(2012YQ05024207)

作者简介:张炳义(1954-),男,教授,博士生导师,主要从事低速大转矩电机、特种电机及其控制等方面的研究。E-mail: zhangby@sut.edu.cn

领域越来越受到人们的重视。作为目前节能减排趋势下大力推广的产品,在其自身的设计上也存在诸多难点。自起动永磁同步电动机一方面要有自起动能力,另一方面又要有稳态同步运行能力,其基本原理为一个鼠笼式感应电动机结合永磁同步电动机^[1],这就要求其转子设计上同时存在用于自起动的起动笼和维持同步能力的永磁体,造成转子上起动笼与永磁体的空间竞争关系,结构较为复杂。

高压自起动永磁同步电动机主要包括起动过程、牵入同步过程以及稳态运行过程 3 个阶段。文献[2]基于二维时变涡流场记算了自起动永磁同步电机的起动过程问题,通过建立集中参数模型,并将计算出不同转差下的交一直轴电抗值作为已知带入到涡流场计算模型中,从而得到了自起动永磁同步电机的起动特性曲线;文献[3]通过对自起动永磁同步电机样机试验测试及仿真分析,得到了样机起动过程的转矩—转速曲线,同时进行了堵转试验以及最大起动转矩的测试和仿真,得到了起动转矩倍数和牵入转矩倍数,基于样机试验和仿真得到了一套自起动永磁同步电机起动性能的仿真计算方法,并基于此设计了一台较高品质因素的自起动永磁电机;文献[4]通过算法优化提高了自起动永磁同步电机起动速度的平滑性,并通过有限元仿真了自起动永磁同步电机得瞬态和稳态性能;文献[5]对自起动永磁同步电机的瞬态性能进行了研究,使用 Taguchi 方法在转子槽横截面积相同,不同槽型下进行了起动性能的优化,同时考虑了永磁体以及系统转动惯量的影响,得到永磁体影响瞬态和稳态性能,而转动惯量只影响瞬态性能,且转动惯量对瞬态性能的影响更大;文献[6]以内嵌式 PMSM 为载体,通过路一场的方法,对电机进行优化,降低了空载损耗,提高了效率;文献[7]将混合 Taguchi 遗传算法引入到永磁电机的优化设计中,同时具备局部寻优能力和全局寻优能力,快速、高效地对永磁电机进行优化设计。

本研究通过 HV-LS-PMSM 的基本方案,确定转子槽参数的变化范围,建立影响因子水平表和正交表,利用 Taguchi 正交方法分析转子槽参数对电机起动性能影响规律和比重,快捷有效地对电机进行优化,以便为 HV-LS-PMSM 的起动性能优化提供方向。

1 HV-LS-PMSM 起动分析及样机方案

HV-LS-PMSM 的工作状态由起动过程、牵入同步过程和稳态运行过程 3 个阶段组成,工作状态中的 3 个阶段都可以用各自的特征量来表征优劣,在起动过程可以用起动转矩和起动电流倍数以及起动时间,牵

入同步过程用牵入转矩和牵入同步时间,而稳态过程则可以用过载能力来评价。

在起动过程中,电磁转矩主要由平均转矩 T_{av} 决定^[8-9],即:

$$T_{av} = T_a + T_b + T_g \tag{1}$$

式中: T_a —异步转矩; T_b —磁阻负序分量转矩; T_g —由永磁体产生的发电制动转矩。

在 HV-LS-PMSM 中,转子槽及导条参数决定起动转矩。

基于传统的自起动永磁电机设计方法,根据给定的额定参数及性能要求,基于磁路法,利用 Matlab 及 RMxpirt 得到电机的设计参数,如表 1 所示。

表 1 HV-LS-PMSM 主要参数

参数	参数值	参数	参数值
额定功率/kW	400	定子槽数	72
额定电压/V	6 000	转子槽数	48
极数	8	定子外径/mm	740
定子连接方式	Y	定子内径/mm	540
铁心长度/mm	580	气隙长度/mm	2

样机定子为开口槽,转子采用内置径向式磁路结构,永磁体采用“V”字形结构,转子槽为开口矩形槽,均匀分布于转子圆周。

样机截面结构如图 1 所示。

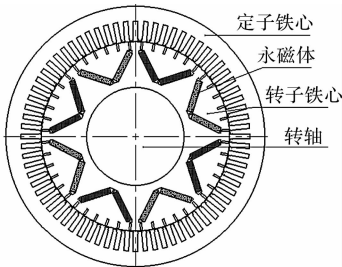


图 1 样机截面结构图

基于磁路法,本研究以 Matlab 和 Ansys 为工具,以转子槽参数为变量,计算在不同转子槽数、不同槽尺寸的情况下 HV-LS-PMSM 的起动性能,包括起动电流倍数、起动转矩倍数、牵入转矩倍数、起动时间、牵入同步时间等。依照电机的设计目标要求,选择最合适的电机设计方案,并得到转子槽参数的变化范围,作为 Taguchi 方法的因子水平,便于绘制因子水平表。

2 基于 Taguchi 法的起动性能参数优化

2.1 Taguchi 正交方案设计

Taguchi 正交原理最早由田口玄一提出,其基本原

理是通过控制可控因素的水平 and 组合,使产品和工艺对噪声因素的敏感程度降到最低,从而使噪声因素对产品质量的影响作用减少或消除。将此原理应用到永磁电机设计上,利用 Taguchi 正交表来组合分析条件和安排分析方案,减小电机对噪声因子的敏感度,从而优化电机设计方案。

正交方案包括两大部分:方案设计和结果分析。Taguchi 正交方案设计的详细流程如图 2 所示。

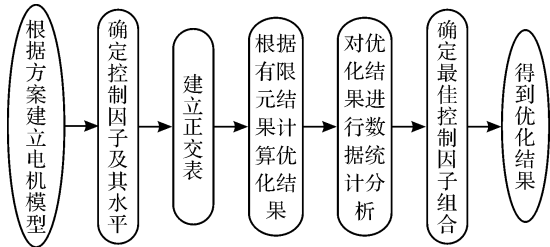


图2 Taguchi 正交方案设计流程

为了分析各个因素的改变对 HV-LS-PMSM 起动性能的影响,以 HV-LS-PMSM 起动电流倍数 I_{st} 、起动转矩倍数 T_{st} 、牵入转矩倍数 T_{pi} 、起动时间 t_r 、牵入同步时间 t_s 为优化目标,以转子槽数 Q_2 、槽口高 h_2 、槽口宽 b_2 、以及槽深 h_{r12} 作为优化因子,对每个优化因子选取 3 个水平值进行分析,各优化因子的水平值如表 2 所示。

表2 电机优化因子及其水平值

因子符号	因子名称	水平数	水平 1	水平 2	水平 3
Q_2	槽数	3	40	48	56
h_2	槽口高/mm	3	0.8	1	1.5
b_2	槽口宽/mm	3	1.5	2	2.5
h_{r12}	槽深/mm	3	18	23	28

对于表 2 中的 4 个因子及其水平值,本研究选用 $L_9(3^4)$ (4 变量 3 水平) 正交表^[10]。

对于传统的数据组合分析方法,每一个因子的变化都要做一次分析,共需要做 $3^4 = 81$ 次分析,而用 Taguchi 法建立正交表后,只需做 9 次分析即可完成对所有因子的组合分析,且具有很强的代表性。

笔者利用 Ansoft 有限元分析软件,对每个组合进行建模,分析各组的起动性能。其中,定义从 $s = 1$ 到 $s = 0.05$ 所经历时间为起动时间,用 t_r 表示;从 $s = 0.05$ 到 $s = 0$ 所经历时间为牵入同步时间,用 t_s 表示,而在 $s = 0.05$ 时刻的转矩值则被定义为牵入转矩,其与额定转矩的比值为牵入转矩倍数。

各因子正交组合以及依此组合进行有限元分析的结果如表 3 所示。

表3 $L_9(3^4)$ 正交表及分析结果

序号	组合矩阵				I_{st}	T_{st}	T_{pi}	t_r/s	t_s/s
	Q_2	h_2	b_2	h_{r12}					
1	1	1	1	1	8.13	2.403	1.891	0.636 1	0.363 9
2	1	2	2	2	7.76	2.362	2.182	0.661 0	0.515 9
3	1	3	3	3	7.55	2.389	2.387	0.761 0	0.445 2
4	2	1	2	3	8.76	2.712	2.748	0.668 8	0.391 2
5	2	2	3	1	8.71	2.652	2.273	0.563 2	0.615 8
6	2	3	1	2	8.77	2.506	2.502	0.699 4	0.454 0
7	3	1	3	2	9.22	2.624	2.987	0.575 7	0.291 7
8	3	2	1	3	9.58	2.552	3.102	0.653 2	0.525 0
9	3	3	2	1	9.22	2.472	2.563	0.580 2	0.248 0

从表 3 中可以看出,组合矩阵中任一列的各水平都出现且次数相等,任两列的所有水平组合都出现且不重合。

从表 3 中数据可以看出,在 1 ~ 9 组因子组合中,HV-LS-PMSM 在带额定负载的情况下都能够顺利起动,但对于不同的组合,起动时间以及牵入同步时间不尽相同。

2.2 极差分析

极差分析又称直观分析法,是正交设计常用的分析方法,它可以得到影响性能的主次顺序,选出优水平和优组合。为了分析各因子变化时对 HV-LS-PMSM 各性能指标的影响,以及各因子变化对 HV-LS-PMSM 某一性能指标影响所占的比重,现计算各因子在不同水平值时对 HV-LS-PMSM 优化结果的平均值,计算结果如表 4 所示。

表4 优化结果平均值

因子	水平	I_{st}	T_{st}	T_{pi}	t_r/s	t_s/s
Q_2	40	7.813	2.385	2.153	0.686 0	0.441 7
	48	8.747	2.623	2.507	0.643 8	0.487 0
	56	9.340	2.549	2.884	0.603 0	0.354 9
h_2	0.8	8.703	2.580	2.542	0.626 9	0.348 9
	1	8.683	2.522	2.519	0.625 8	0.552 2
	1.5	8.513	2.456	2.484	0.680 2	0.382 4
b_2	1.5	8.827	2.487	2.498	0.662 9	0.447 6
	2	8.580	2.515	2.498	0.636 7	0.385 0
	2.5	8.493	2.555	2.549	0.633 3	0.450 9
h_{r12}	18	8.687	2.509	2.242	0.593 2	0.409 2
	23	8.583	2.497	2.557	0.645 4	0.420 5
	28	8.630	2.551	2.745	0.694 3	0.453 8
性能平均值		8.633	2.519	2.515	0.644	0.427

例如,要计算因子 Q_2 在水平 2 下对起动电流倍数的影响,计算方式为:

$$I_{st(Q_2-2)} = \frac{1}{3}(I_{st}(4) + I_{st}(5) + I_{st}(6)) \quad (2)$$

式中: $I_{st(Q_2-2)}$ — Q_2 在水平 2 时的平均起动电流倍数;

$I_{st}(4), I_{st}(5), I_{st}(6)$ —组合 4、5、6 中的起动电流倍数 I_{st} 。

根据正交设计的特性,对某一因子来说,3 个组合的分析条件完全一样,可以进行直接比较。例如,对于因子 Q_2 ,如果它对起动电流倍数无影响,则 $I_{st(Q_2-1)}$ 、 $I_{st(Q_2-2)}$ 和 $I_{st(Q_2-3)}$ 应相等,但由表 4 知其值不等,说明 Q_2 对起动电流倍数有影响。通过比较 3 个平均值的大小既可以判断其对起动电流倍数的影响大小。起动电流倍数优化目标为取最小值:

$$I_{st(Q_2-3)} > I_{st(Q_2-2)} > I_{st(Q_2-1)} \tag{3}$$

即:9.340 > 8.747 > 7.813,由此可以判定 Q_{2-1} 为 Q_2 因子的优水平。

同理可以计算并判定 $h_2、b_2、h_{r12}$ 的优水平分别为

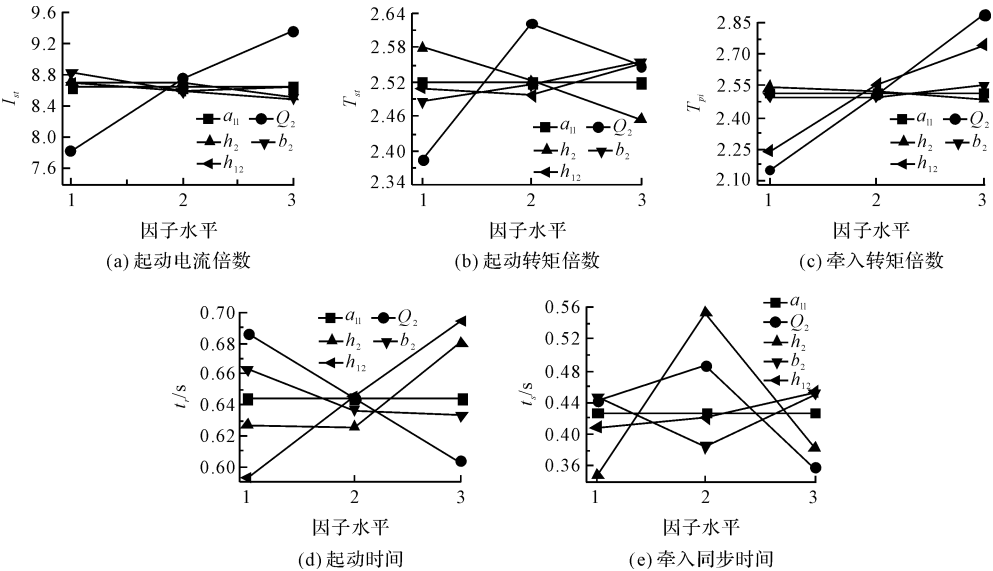


图 3 各因子对起动性能影响趋势图

其中,图 3 中水平线表示所有组合分析结果的平均值,折线表示各因子在各水平下对电机起动性能优化结果的平均值。由图 3 可以更直观地看出电机性能指标随因子水平变化而变化的趋势以及与所有组合分析结果平均值的差距,可以进一步的为 HV-LS-PMSM 起动性能优化提供方向。

2.3 方差分析

应用极差分析方法可以确定在各因子所给水平下的最优组合,但不能分析各因子对 HV-LS-PMSM 起动性能影响的重要性。本节利用方差思想,分析各因子对各起动性能指标影响的重要性。方差计算公式为^[11]:

$$S^2 = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 (m_x(s_j) - m(s))^2 \tag{5}$$

式中: x — $Q_2、h_2、b_2、h_{r12}$; s —电机起动性能指标; $m_x(s_j)$ —表 4 中 x 的第 j 个水平下优化性能 s 的平均

$h_{2-3}、b_{2-3}、h_{r12-2}$,4 个因子的优水平组合即为本方案起动电流倍数最短的最优水平组合。其他起动性能最优水平组合的分析同上。

为了比较各因子在不同水平值时优化结果的平均值与所有分析结果的平均值,需计算所有组合分析结果的平均值,并列于表 4 中最后一行。计算方法为:

$$m = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n S_i \tag{4}$$

式中: n —组合数; S_i —第 i 个组合分析所得电机起动性能指标值。

为了直观看各因子对电机起动性能的影响,本研究以各因子为横坐标,性能指标的平均值为纵坐标,根据表 4 绘制因子与指标趋势图,如图 3 所示。

值; $m(s)$ —表 4 中 s 所有分析结果的平均值。

计算结果如表 5 所示。

表 5 各因子对起动性能影响方差及比重

性能	方差	Q_2	h_2	b_2	h_{r12}	总计
I_{st}	$S^2 (\times 10^{-3})$	395.082	7.267	20.015	1.808	424.172
	比重 (%)	93.142	1.713	4.719	0.426	100
T_{st}	$S^2 (\times 10^{-3})$	9.890 7	2.863 3	0.778 7	0.536 0	14.068 7
	比重 (%)	70.303	20.352	5.535	3.810	100
T_{pi}	$S^2 (\times 10^{-3})$	89.090	0.566	0.578	43.064	133.298
	比重 (%)	66.835	0.425	0.434	32.306	100
t_s	$S^2 (\times 10^{-3})$	3.0041	7.920 6	0.919 2	0.358 4	8.749 9
	比重 (%)	24.619	64.911	7.533	2.937	100
t_r	$S^2 (\times 10^{-3})$	1.1483	0.644 6	0.174 9	1.704 1	3.671 6
	比重 (%)	31.267	17.556	4.764	46.413	100

从表 5 中可以看出,转子槽数对 HV-LS-PMSM 起

动电流倍数的影响最大;转子槽数对起动转矩倍数影响最大,其次为槽口高;转子槽数对牵入转矩倍数影响最大,次之为转子槽深,而转子槽口宽对牵入转矩倍数基本无影响;转子槽口高对起动时间影响所占比重最大,其次为槽数;槽深对牵入同步时间影响最大。根据方差分析结果,可以为 HV-LS-PMSM 的起动性能优化提供方向。

2.4 优化结果分析

以不同的起动性能为优化目标时,可以得到不同的最优因子水平组合,如表 6 所示。

表 6 优化因子组合				
优化目标	Q_2	h_2	b_2	h_{r12}
I_{st} —小	1	3	3	2
T_{st} —大	2	1	3	3
T_{pi} —大	3	1	3	3
t_r —小	3	2	3	1
t_s —小	3	1	2	1

由于本研究的优化目标是使各参数达到最优,需综合考虑各因子的最优水平组合。

首先,HV-LS-PMSM 在起动过程中,起动电流远远大于其额定电流,因此,起动电流倍数也成为起动性能中关注度最高的一项指标。过大的起动电流供电变压器输出电压发生明显的下降,甚至会出现跳闸现场,这样会影响变压器其他设备的正常用电,且对电机本身的起动也会产生不利影响。所以,对于转子槽数的选取,在保证能够顺利起动的前提下,应以起动电流最小为基准。

另外,由表 5 可知,转子槽深对起动时间影响所占比重较牵入转矩倍数所占比重更大,因此对于转子槽深的选择应以起动时间为基准。基于以上分析,HV-LS-PMSM 的综合起动性能优化因子组合为 Q_{2-1} 、 h_{2-1} 、 b_{2-3} 、 h_{r12-1} ,其对应的值依次为 40;0.8;2.5;18。

基于上述综合最优因子组合进行分析,与优化前进行对比,二者起动速度曲线对比如图 4 所示。

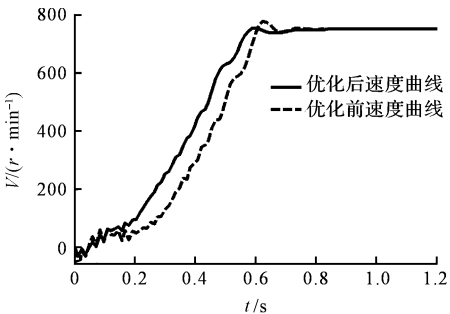


图 4 优化前后起动速度对比

在满载起动仿真分析时,起动瞬间电机转速出现负值情况,即电机反转,一方面是由于在仿真分析中电机带额定负载转矩,但是起动瞬间仿真电流却默认为零;另一方面,则是由电机的转子初始位置决定的。优化前后的对比分析过程中,电机的起动参数设置完全相同,包括电机及负载转动惯量、负载转矩、初始位置角等。从上图可以看出,优化后电机反转现象明显比优化前有所改善,说明优化后瞬间起动转矩提高,有助于更好的起动,且起动速度具有更好的平滑性。

优化前后起动性能参数对比如表 7 所示。

表 7 优化前后起动性能参数对比			
优化目标	优化前	优化后	优化比/(%)
I_{st}	8.73	7.58	13.17
T_{st}	2.40	2.53	5.14
T_{pi}	2.26	2.08	-7.96
t_s/s	0.592	0.557	5.91
t_r/s	0.321	0.313	2.49

从表 7 中对比结果可以看出,应用 Taguchi 方法可以方便有效地对 HV-LS-PMSM 的起动性能进行优化,起动电流倍数有明显的减小,起动时间和牵入同步时间缩短,对于供电变压器以及其他设备及电机自身干扰及损伤减小。虽然牵入转矩倍数有所下降,但其值足够保证电机牵入同步运行。

3 实验及结果分析

本研究利用磁路法就 HV-LS-PMSM 的起动性能进行了优化,并按照优化后的电机参数进行了样机设计和实验,实验台的搭建如图 5 所示。

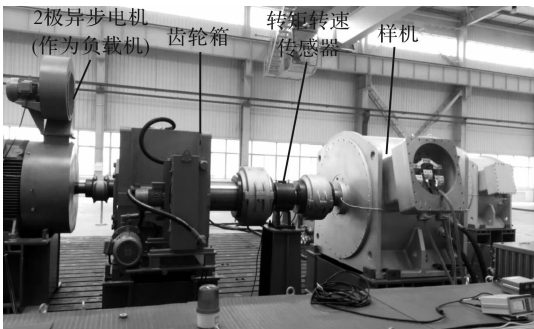


图 5 样机实验台

本研究用陪试电机给样机施加额定转矩负载,用转矩转速测量仪测量所加转矩值及样机起动过程中的速度变化,并将数据通过自动记录仪传入到计算机中存储,绘制起动速度曲线与优化后曲线对比如图 6 所示。

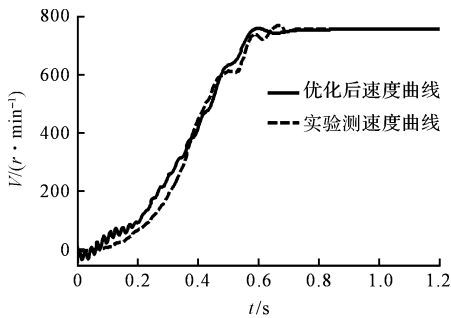


图 6 实验启动速度与优化后速度曲线对比

利用功率分析仪监测启动过程中的电流,得到启动电流倍数为 8.1,与优化后的结构相比,误差为 6.8%,在工程上满足设计要求。

从图中可以看出,实际电机启动瞬间并无反转现象,启动初期速度上升较缓慢,0.2 s 后速度增加很快,并很快达到同步速度并稳定运行。

4 结束语

本研究首先通过 Matlab 与 RMxprt 相结合的方式,利用路的方法,得到 HV-LS-PMSM 的电磁设计方案,并得到转子槽参数水平。通过 Taguchi 正交原理建立正交表,将转子槽参数进行组合并进行仿真分析,以优化电机起动性能。

(1)HV-LS-PMSM 转子槽数量、槽口高、槽口宽以及槽深对电机的启动电流倍数、启动转矩倍数、牵入转矩倍数、启动时间以及牵入同步时间都有影响,且影响程度不一,转子槽数对启动电流倍数影响比重最大,占 93.14%,槽深对牵入同步时间影响最大,占 46.4%,转子槽数对启动转矩倍数影响最大,占 70.3%,其次为槽口高,转子槽数对牵入转矩倍数影响最大,占 66.8%,次之为转子槽深,而转子槽口宽对牵入转矩倍数基本无影响,转子槽口高对启动时间影响所占比重最大,占 64.9%,其次为槽数;

(2)优化后的 HV-LS-PMSM 起动性能较优化前均有所改善,启动电流倍数减小 13.17%,启动时间和牵入同步时间缩短,启动转矩倍数提高 5.14%,虽然牵

入转矩倍数有所下降,但足以保证使电机在带额定负载情况下牵入同步运行,同时,带额定负载启动实验也证明了优化后的起动性能。

参考文献 (References):

- [1] ARIKAWA S, HIGUCHI T, YOKOI Y, et al. Motion characteristics of a novel self-start type permanent magnet synchronous motor[C]. International Conference on Electrical Machines and Systems, Busan: IEEE, 2013.
- [2] 尚 静,邹继斌,胡建辉. 基于动态模型的场路结合法求解异步启动永磁同步电机的启动过程[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 146-150.
- [3] 王 杨. 基于 ANSYS 的异步启动永磁同步电动机起动性能仿真设计[J]. 西莫电机技术, 2016, 7(3): 1-28.
- [4] KAHOURZADE S, MAHMOUDI A, HEW W P, et al. Design and performance improvement of a line-start PMSM [C]. Energy Conversion Congress and Exposition, Denver: IEEE, 2013.
- [5] SORGDRAGER A J, WANG R J, GROBLER A J. Transient performance investigation and Taguchi optimization of a line-start PMSM [C]. International Electric Machines and Drives Conference, Coeur d'Alene: IEEE, 2015.
- [6] 高泽梅,王淑红,武 潇,等. 基于田口实验的永磁同步电动机优化设计[J]. 微电机, 2015, 48(1): 16-23.
- [7] 冯桂宏,丁宏龙. 基于混合 Taguchi 遗传算法的永磁同步电机优化设计[J]. 电工电能新技术, 2015, 34(1): 23-27.
- [8] 王成山,何 伟,卢小敏. 全自动蝶式圆合扭结包装机研发[J]. 包装与食品机械, 2016(1): 70-72.
- [9] 王秀和,杨玉波,朱常青. 异步启动永磁同步电动机-理论、设计与测试[M]. 1 版. 北京:机械工业出版社, 2009.
- [10] 兰志永,杨向宇,王芳媛,等. Taguchi 方法在内嵌式正弦波永磁同步电机优化设计中的应用[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12): 37-46.
- [11] CHEN Jian yi, CHEMMANGOT V N, XU Long ya. Design and finite element analysis of an outer-rotor permanent magnet generator for directly coupled wind turbines[J]. IEEE Transactions on Magnetic, 2000, 36(5): 3802-3808.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

张炳义,冯 永,冯桂宏,等. 基于 Taguchi 的高压自启动永磁同步电动机起动性能优化[J]. 机电工程, 2017, 34(9): 1013 - 1018.

ZHANG Bing-yi, FENG Yong, FENG Gui-hong, et al. Starting performance optimization of high voltage line start permanent magnet synchronous motor based on Taguchi[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017, 34(9): 1013 - 1018.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>