

成型绕组永磁电机优化设计

孙重阳, 冯桂宏

(沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

摘要: 成型绕组电机净槽满率高, 在电机的额定功率、冷却系统、定子内外径、定子槽面积不变的条件下, 采用成型绕组时, 电机铁心长度更短, 转矩密度更高。将节距为 1 的传统上下双层成型绕组结构改为左右放置, 降低了成型绕组的绕制难度, 提高了生产效率。开口槽槽口宽度较大, 会增加气隙磁密中的谐波含量, 降低电机运行稳定性。采用 Taguchi 方法, 以成型绕组电机的气隙长度、定子槽宽和槽深为优化变量, 对齿槽转矩、输出转矩进行优化; 并建立电机模型进行有限元仿真分析。最终, 通过样机试验验证了扁铜线成型绕组电机方案设计的合理性。

关键词: 永磁电机; 成型绕组; Taguchi 优化; 有限元分析

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)01-0059-07

doi: 10.12177/emca.2019.142

Optimal Design of Forming Winding Permanent Magnet Motor

SUN Chongyang, FENG Guihong

(School of Electric Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: Based on the high net slot filling rate, the forming winding can make the iron core length shorter and the torque density higher when the rated power, cooling system, inner and outer diameters of stator, and stator slot area keep unchanged. The traditional upper and lower double-layer forming winding structure with pitch 1 is changed to left and right structure, in which the forming difficulty of winding is reduced and the production efficiency is improved. Due to the large width of slot opening, the harmonic content in the air gap magnetic flux density will be increased and the operation stability will be reduced. Thus, the Taguchi method is used to optimize the cogging torque and output torque of motor with air gap length and stator slot width and depth as optimization variables. The finite element analysis model of the motor is established and simulation is performed with this model. The prototype experiment verifies the rationality of the design of the forming winding.

Key words: permanent magnet motor; forming winding; Taguchi optimization; finite element analysis

0 引言

永磁电机的气隙磁场是由永磁体本身建立的, 与异步电机相比, 可以做成多极低速大转矩直驱, 从而提高驱动效率及运行稳定性, 在资源开采、舰船推进、风力发电、港口起重、电动汽车、工业生产等领域得到广泛应用^[1-2]。但是, 直驱永磁电机的体积较大^[3], 加工、运输、安装困难, 制约

了直驱永磁电机的推广应用与发展。因此, 如何提高电机转矩密度, 即电机在更小的体积下输出更大的转矩, 是直驱永磁电机研究重点之一^[4]。

绕组是电机的关键部分, 绕组的可靠性也直接影响电机的运行寿命^[5]。永磁电机按照绕组形式可分为散线绕组与成型绕组。散线绕组即漆包圆铜线绕组, 线圈绕制简单, 下线工艺比较成熟, 成本较低, 但是漆膜较薄, 容易受到损伤, 电机绝

收稿日期: 2019-09-18; 收到修改稿日期: 2019-10-17

作者简介: 孙重阳(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为永磁电机设计。

冯桂宏(1963—), 女, 教授, 硕士生导师, 研究方向为特种电机及其控制。

缘结构易受破坏,耐冲击力较差。成型绕组由矩形扁铜线绕制而成,易保持一定的形状,相比散线绕组在机械性能、电气性能、热性能等方面均有提升,但是结构较复杂,线圈设计及绕制工艺较难,成本较高^[6]。

目前成型绕组在新能源汽车电机领域应用较多。研究表明,在相同设计条件下,成型绕组电机的输出性能、散热能力均高于散线绕组电机^[7],且有助于提高电机的转矩密度,因此有必要对成型绕组直驱永磁电机进行研究。本文研究了同功率电机采用成型绕组替换散线绕组,分析比较了2种绕组型式的净槽满率及电机体积大小,并对电机热负荷进行核算。然后进行成型绕组结构设计,因为矩形槽的槽口宽度较大,会对电机的齿槽转矩造成影响,所以采用 Taguchi 优化方法对电机相关参数进行优化设计。最终通过有限元仿真及样机试验验证了成型绕组永磁电机方案的合理性。

1 同功率成型绕组替换散线绕组电机参数计算

散线绕组一般用于半闭口梨形槽,绕组截面为圆形,在槽内分布时绕组之间留有空隙,降低了定子槽有效面积利用率,净槽满率一般约为50%。成型绕组应用于开口矩形槽,绕组截面为矩形,在槽内分布时绕组间可以紧密配合,从而增加电机的净槽满率。在相同的定子槽面积中可以填充更多的铜,若采用相同的冷却方式,则可以提高电机的输出功率或者减小电机的体积,增加转矩密度。

以1台额定功率132 kW永磁电机为例,在保证电机定子内外径尺寸、磁钢尺寸、定子槽型面积不变的条件下,定子槽型如图1所示。基于电磁设计程序,分别采用散线绕组与成型绕组进行方案设计分析。电机主要参数如表1所示。

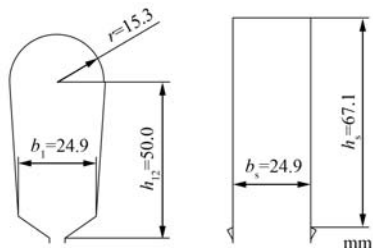


图1 定子梨形槽与矩形槽尺寸示意图

表1 电机主要参数

参数名称	散线绕组	成型绕组
额定功率 P/kW	132	132
额定电流 I_N/A	78	78
额定转速 $n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	60	60
定子槽数 z	48	48
定子外径 D_1/mm	1 060	1 060
定子内径 D_{i1}/mm	860	860
铁心长度 L_a/mm	500	450
每槽导体数 N_s	66	40
并联支路数 a	2	1

散线绕组电机净槽满率计算式为

$$S_f = \frac{N_s [N_{11} \pi \left(\frac{d_{11}}{2}\right)^2 + N_{12} \pi \left(\frac{d_{12}}{2}\right)^2]}{A_s - A_i} \quad (1)$$

式中: N_{11} 、 N_{12} 、 d_{11} 、 d_{12} 为散线绕组并绕根数、线径。

本文采用8根1.3 mm与1根1.25 mm漆包线并绕。

槽面积 A_s 和槽绝缘面积 A_i 的计算式为

$$A_s = \frac{(2r_1 + b_1) \cdot (h_{12} - h)}{2} + \frac{\pi r_1^2}{2} \quad (2)$$

$$A_i = C_i(2h_{12} + \pi r_1 + 2r_1 + b_1) \quad (3)$$

式中: b_1 、 h_{12} 、 r_1 为定子梨形槽宽、槽深、槽底半径; h 为散线绕组槽楔厚度,取3 mm; C_i 为散线绕组槽绝缘厚度,取0.6 mm。

同理,计算成型绕组电机净槽满率:

$$S'_f = \frac{N'_s N'_{11} k_a h_a}{A_s - A'_i} \quad (4)$$

式中: N'_{11} 、 k_a 、 h_a 为成型绕组并绕根数,扁铜线线宽、线高。

本文为9.5 mm×2.9 mm线规单根并绕。成型双层绕组在定子槽内排布结构如图2所示。

则 A'_s 、 A'_i 的计算式为

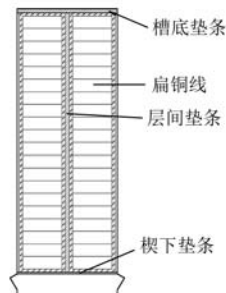


图2 成型双层绕组在定子槽内排布结构

$$A'_s = h_s b_s \quad (5)$$

$$A'_i = b_s(z_j + h_c) + h_g h_s + \left[C_{i2}(k_a + C_{i1})N_{i1} + C_{i2}(h_a + C_{i1}) \frac{N_s}{2} + C_{i2}^2 \right] \cdot 2 \quad (6)$$

式中: b_s 、 h_s 为定子矩形槽槽宽、槽深; z_j 、 h_c 、 h_g 为楔下垫条厚 0.5 mm、槽底垫条厚 1 mm、层间垫条厚 1 mm; C_{i1} 、 C_{i2} 为扁铜线自身绝缘厚双边 0.3 mm、外包绝缘厚双边 1.52 mm。

根据式(1)、式(4)计算可得散线绕组电机的净槽满率为 50.4%, 成型绕组电机的净槽满率为 82.4%。

电机的热负荷是衡量电机设计方案是否合理的重要指标。考虑到电机的冷却方式及工况条件, 电机热负荷设计在 1 500~1 600 A/(cm·mm²) 为宜。因为保证 2 台电机的冷却方式及冷却结构不变, 所以 2 台电机的热负荷应处于同一范围。下面对电机热负荷进行验证计算。

电机电负荷 A 的计算式为

$$A = \frac{2mNI_N}{\pi D_{i1}} \quad (7)$$

式中: m 为电机相数, 取 3; N 为每相串联匝数, $N = zN_s / (2ma)$ 。

散线绕组电机电密 J 的计算式为

$$J = \frac{I_N}{a\pi \left[N_{i1} \left(\frac{d_{i1}}{2} \right)^2 + N_{i2} \left(\frac{d_{i2}}{2} \right)^2 \right]} \quad (8)$$

成型绕组电机电密 J' 的计算式为

$$J' = \frac{I_N}{a(N'_{i1} k_a h_a)} \quad (9)$$

令热负荷 $P_Q = AJ$, 则计算可得散线绕组热负荷为 1 507 A/(cm·mm²), 成型绕组电机热负荷为 1 570 A/(cm·mm²), 均处于合理设计范围之内。由计算分析可知, 在保证电机的定子内外径、定子槽面积、冷却方式及冷却结构不变的条件下, 采用成型绕组电机的净槽满率可以较散线绕组提升约 30%, 铁心长度可以缩短 50 mm。

2 成型绕组结构设计

本文采用双层绕组。传统结构为在定子槽内上下放置绕组, 对于成型绕组来说, 上下放置的双层绕组结构在端部还需进行拉形、压弯等工序, 绕

组的设计工作较复杂, 因此, 针对本文采取的节距为 1 的永磁电机, 采用窄边立放、左右绕制的形式, 将传统双层绕组上下结构改为左右结构, 省去传统成型绕组端部拉形、压弯的工序, 绕组的设计和绕制工作比较容易, 同时也提升了电机下线的效率。单一绕组绕制示意图如图 3 所示。

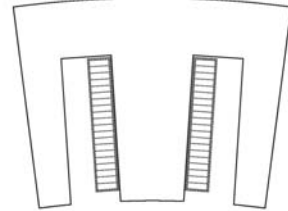


图3 单一绕组绕制示意图

由图 3 可以看出, 成型绕组在绕制时应按照定子齿部尺寸绕制成梯形, 上边窄、底边宽。这样绕制的好处是可以使绕组与定子冲片紧密配合, 增加电机的净槽满率, 改善电机的散热性能, 同时省略绕组端部拉形、压弯工序, 提高生产效率。成型绕组实物如图 4 所示。



图4 成型绕组实物

3 基于 Taguchi 方法优化电机参数

Taguchi 参数最优化设计方法最早由日本质量管理学专家田口玄一提出, 目前已广泛应用于永磁电机的优化设计工作。该方法的优点是可以利用最少的试验数据得到设计参数的最佳组合, 从而对电机进行优化^[8]。Taguchi 参数优化方法试验流程如图 5 所示。

成型绕组需要使用开口矩形槽, 槽口宽度较大, 会引起气隙磁导的变化, 增加气隙磁密的谐波含量, 同时会对电机的齿槽转矩造成影响, 提高转矩波动, 引起电机的振动和噪声。对于直驱永磁电机来说, 即使电机的齿槽转矩与转矩波动占比

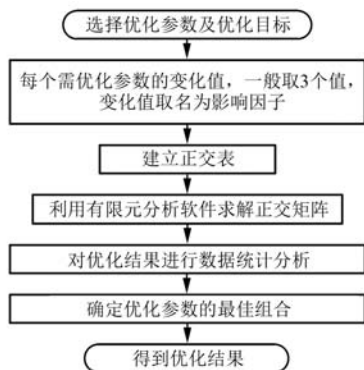


图5 Taguchi 参数优化方法试验流程

较小,但是因为电机的额定转矩较大,所以电机在实际运行时脉动幅值也会较大^[9],可能对联轴器、负载等造成机械冲击,使电机转轴发生刚性疲劳,造成气隙偏心等故障,影响驱动设备运行的寿命与稳定性。永磁电机齿槽转矩表达式^[10]为

$$T_c(\alpha) = \frac{\pi z L_a}{16\mu_0} (D_{i1}^2 - D_2^2) \sum_{n=1}^{\infty} n G_n F_{\frac{nz}{2p}} \sin n z \alpha \quad (10)$$

式中: α 为某一齿中心线与指定磁极中心线夹角; μ_0 为空气磁导率; D_2 为转子外径; $F_{\frac{nz}{2p}}$ 为气隙磁动势分布函数。

忽略高阶次齿槽转矩影响,则相对气隙磁导平方傅里叶分解系数 G_n 为

$$G_n = \frac{2z}{\pi} \int \frac{\pi}{z} - \frac{b_s}{2} \left(\frac{h_m}{h_m + \delta} \right)^2 \cos n z \theta d\theta = \frac{2}{n\pi} \left(\frac{h_m}{h_m + \delta} \right)^2 \sin n \left(\pi - \frac{z b_s}{2} \right) \quad (11)$$

式中: h_m 为永磁体磁化方向长度; δ 为气隙长度; θ 为位置角。

由式(11)可知,定子槽口宽度及气隙长度会影响 G_n 值,进而对电机的齿槽转矩造成影响,特别是对于开口矩形槽来说,槽口宽度过大,会增加气隙磁密的谐波含量,影响电机的齿槽转矩,同时分数槽集中绕组永磁电机齿槽转矩幅值会随着槽口宽度的变化呈周期性变化^[11]。因此,选取气隙长度、定子槽口宽、定子槽深为优化参数,以齿槽转矩、输出转矩为优化目标对电机进行优化设计。

因为层间垫条、楔下垫条、槽底垫条的厚度取值范围一般在 0.5~2.0 mm,同时会留有约 1 mm 的嵌线间隙,所以在保证成型绕组及各个垫条可

以嵌放入定子槽的条件下,每个优化参数选取 3 个水平值。优化参数及水平取值如表 2 所示。

表2 电机优化参数及各自水平值 mm

名称	δ	b_s	h_s
水平 1	1.9	23.9	66.6
水平 2	2.0	24.9	68.1
水平 3	2.1	25.9	69.6

Taguchi 正交矩阵及有限元分析结果如表 3 所示。

表3 Taguchi 正交矩阵及有限元分析结果

试验次数	试验分析矩阵			$T_c /$	$T_a /$
	δ	b_s	h_s	(N · m)	(kN · m)
1	1	1	1	916.1	21.68
2	1	2	2	967.0	21.95
3	1	3	3	829.0	21.40
4	2	1	2	713.6	21.28
5	2	2	3	779.9	21.54
6	2	3	1	620.3	21.01
7	3	1	3	886.6	20.87
8	3	2	1	820.7	21.11
9	3	3	2	840.4	20.60

3.1 平均值分析

为了分析电机优化参数对优化目标的影响及优化参数不同水平值对优化目标影响所占比重计算分析结果的平均值 m 。平均值 m 的计算式为

$$m(S) = \frac{1}{Y} \sum_{i=1}^Y S_i \quad (12)$$

式中: Y 为试验次数; S_i 为第 i 次试验的优化目标。

分析结果平均值如表 4 所示。

表4 分析结果平均值

平均值	$T_c /$ (N · m)	$T_a /$ (kN · m)
$m(S)$	819.30	21.27

根据下式计算各水平值对应优化目标的平均值:

$$m_{x_i}(S) = \frac{1}{3} \sum S_{x_i} \quad (13)$$

式中: x_i 为优化参数; S_{x_i} 为表 3 中优化参数水平值

对应优化目标。

例如计算 δ 选取水平 3 时电机齿槽转矩的平均值,由表 3 中的试验分析矩阵可知, δ 选取水平 3 时对应的试验次数为第 7、8、9 次,平均值为

$$m_{\delta_3}(T_c) = \frac{1}{3}[T_c(7) + T_c(8) + T_c(9)]$$

(14)

各性能指标平均值如表 5 所示。

表 5 各性能指标平均值			
参数名称	水平	$T_c/(N \cdot m)$	$T_a/(kN \cdot m)$
δ	1	904.0	21.68
	2	704.6	21.28
	3	849.2	20.86
b_s	1	838.8	21.28
	2	855.9	21.53
	3	763.2	21.00
h_s	1	785.7	21.27
	2	840.3	21.28
	3	831.8	21.27

3.2 比重分析

采用方差分析的方法进行优化参数的比重分析。比重可表示为

$$SS_x = 3 \sum_{i=1}^3 [m_{x_i}(S) - m(S)]^2$$

(15)

式(15)为纯数字量,计算结果如表 6 所示。

表 6 优化参数对优化目标影响的比重					
参数名称	T_c		T_a		
	SS	比重/%	SS	比重/%	
δ	63 672.57	76.3	1.008 9	70.50	
b_s	14 601.06	17.5	0.421 8	29.48	
h_s	5 178.63	6.2	0.000 3	0.02	
总计	83 452.26	100.0	1.431 0	100.00	

3.3 结果分析

将表 5 数据转化为折线图,以更直观的形式表明电机优化目标随优化参数水平值的变化趋势,以寻求最优解。电机齿槽转矩、输出转矩随槽口宽度 b_s 的变化趋势如图 6 所示。

由图 6 可知,当以电机的齿槽转矩 T_c 最小为优化目标时,选择 b_s 的水平 3[简写为 $b_s(3)$],以电机输出转矩平均值 T_a 最大为优化目标时,应选择 $b_s(2)$ 。

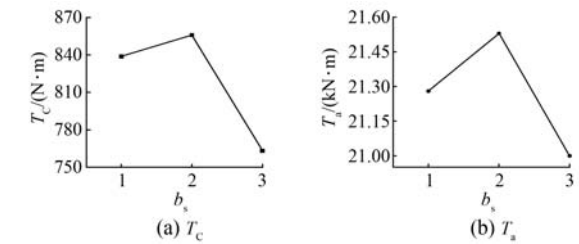


图 6 优化目标随 b_s 水平值的变化趋势图

其他优化参数选取不同水平值时,齿槽转矩的变化趋势如图 7 所示。

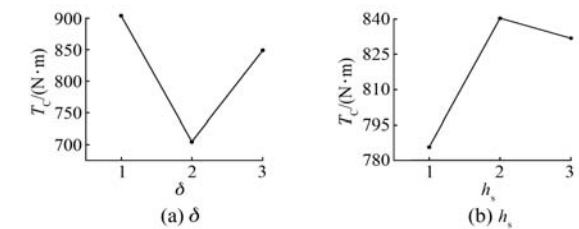


图 7 齿槽转矩随水平值的变化趋势图

以电机的齿槽转矩最小为优化目标时,电机优化参数应选择水平值: $\delta(2)$ 、 $b_s(3)$ 、 $h_s(1)$ 。相似地,以电机输出转矩最大为优化目标时,优化参数水平值: $\delta(1)$ 、 $b_s(2)$ 、 $h_s(2)$ 。当以电机的齿槽转矩最小、输出转矩最大为优化目标时,由表 6 的比重可以看出, δ 、 h_s 对 T_c 的比重较大, b_s 对 T_a 的比重较大,因此 δ 和 h_s 的选择以齿槽转矩最小、 b_s 的选择以输出转矩最大为基准,最后选取: $\delta(2)$ 、 $b_s(2)$ 、 $h_s(1)$ 。

4 模型有限元分析

根据第 3 节分析结果选取优化参数水平值建立电机三维有限元分析模型,如图 8 所示。对电机的三相空载反电动势、齿槽转矩、输出转矩进行分析。

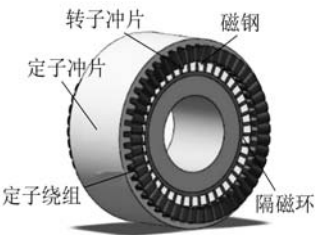


图 8 电机三维模型图

成型绕组电机模型反电动势波形如图 9 所

示。傅里叶分析结果如图 10 所示。

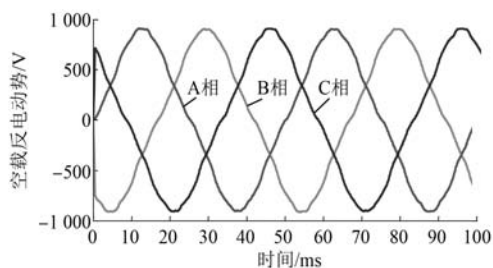


图 9 电机空载反电动势波形图

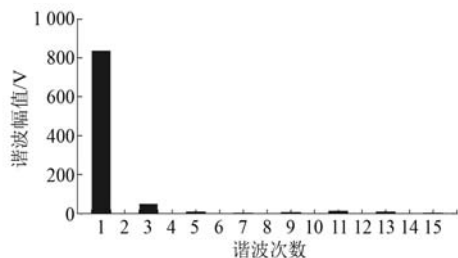


图 10 空载反电动势波形谐波幅值分析图

由图 9、图 10 可知,优化后成型绕组电机空载反电动势存在 3 次、少量 5 次、9 次、11 次、13 次谐波,波形畸变率为 6.36%,正弦性较好。

优化前后电机齿槽转矩、输出转矩波形如图 11、图 12 所示。

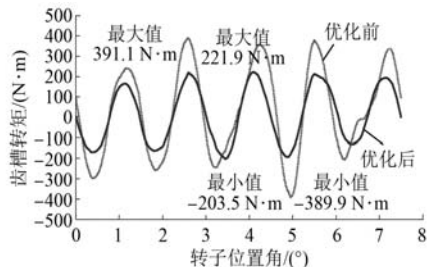


图 11 优化前后电机齿槽转矩波形图

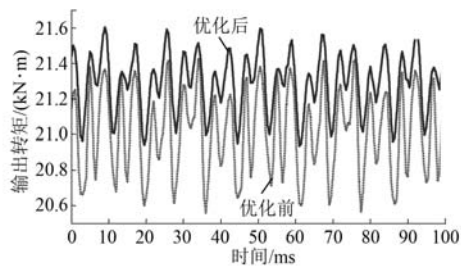


图 12 优化前后电机输出转矩波形图

电机齿槽转矩可以由齿槽转矩波形的峰峰值

表示,即波形的最大值与最小值的差值。由图 11 可知,优化前电机齿槽转矩峰峰值为 781.0 N·m,采用 Taguchi 方法优化后,电机齿槽转矩峰峰值为 425.4 N·m,减小了约 46%。由图 12 可知,优化前电机输出转矩为 21.0 kN·m,优化后的电机输出转矩为 21.3 kN·m。

同功率散线绕组电机输出转矩为

$$T_a = 9549 \frac{P}{n} = 21.01 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (16)$$

在保证电机冷却方式及热负荷取值范围不变的情况下,铁心长度比同功率散线绕组电机缩短了 50 mm。电机转矩密度 T_d 的计算式^[12]为

$$T_d = \frac{T_a}{V} \quad (17)$$

其中: $V = \frac{D_1^2 \pi}{4} L_a$ 。

将数据代入式(17),可计算得出散线绕组电机的转矩密度为 47.64 kN·m/m³,成型绕组电机的转矩密度为 53.66 kN·m/m³,转矩密度提高了 12.64%。

5 样机试验

根据优化后的电机参数进行样机的设计与加工,叠压后的定子铁心如图 13 所示。待电机总装后,搭建试验平台进行电机试验,如图 14 所示。图 14 中,左侧为陪试机,右侧为扁铜线成型绕组样机。



图 13 定子铁心图

电机轴伸侧空载,通过变频器控制电机达到额定转速,通过振动测试仪分别在电机前后端盖、机壳表面共选 5 个点测量电机的振动情况,试验数据记录如表 7 所示。根据试验记录电机振动测量结果可知,电机运行时振动位移较小,运行稳定性较好。



图 14 对拖试验平台图

表 7 电机振动测量记录

测量点	1	2	3	4	5
振动值/mm	0.4	0.8	0.5	0.5	0.8

将扁铜线样机反拖至同步速,由谐波分析仪测得扁铜线样机的线空载反电动势波形如图 15 所示。由图 15 可以看出,成型绕组样机的线反电动势波形的正弦性较好。测得线反电动势有效值为 1 010 V,有限元仿真电机线反电动势有效值为 1 026 V,二者结果偏差为 1.6%。

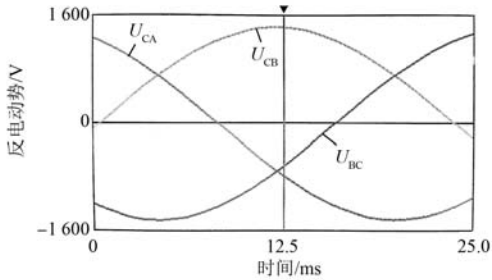


图 15 试验测得电机线反电动势波形图

6 结 语

本文首先对同功率成型绕组替换散线绕组电机相关参数进行了计算,在保证电机的定子内外径、定子槽面积、冷却方式及冷却结构不变的情况下,采用成型绕组电机的净槽满率比散线绕组提升了约 30%,铁心长度可以缩短 50 mm,电机转矩密度提高了 12.64%。因此,如果工况条件对于电机的外形尺寸要求严苛,可以考虑采用成型绕组在满足电机出力的情况下缩小电机体积。但是,采用成型绕组后,电机需用开口槽,槽口宽度较大,会增加气隙磁密中的谐波含量,增加电机的齿

槽转矩和转矩波动,因此要对成型绕组电机进行合理优化。本文仅考虑了将散线绕组替换为成型绕组,电机转子结构及磁钢尺寸均保持不变,此时电机定子齿部磁密未饱和,未来增加磁钢用量,电机的体积能进一步减小,使转矩密度更高。

【参 考 文 献】

[1] 吕鹏,崔巍.饱和时分槽集中绕组永磁同步电机电感计算[J].电机与控制应用,2018,45(7): 56.

[2] 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.

[3] CRIDER J M, SUDHOFF S D. An inner rotor flux-modulated permanent magnet synchronous machine for low-speed high-torque applications [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30 (3): 1247.

[4] 鲍晓华,刘佳炜,孙跃,等.低速大转矩永磁直驱电机研究综述与展望[J].电工技术学报,2019,34(6): 1148.

[5] 袁春龙.成型绕组无损嵌线工艺在大型永磁直驱风力发电机中的应用[J].电机与控制应用,2011,38(11): 54.

[6] 程铭.一种直驱永磁电机分数槽绕组的设计与分析[J].防爆电机,2018,53(4): 5.

[7] 任庆,桂祈祯.基于扁铜线绕组的车用电机磁路分析[J].机械,2016,43(11): 47.

[8] 兰志勇,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.

[9] XIA C,JI B,YAN Y.Smooth speed control for low-speed high-torque permanent-magnet synchronous motor using proportional-integral-resonant controller [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015,62(4): 2123.

[10] 唐旭,王秀和,田蒙蒙,等.基于改变定子齿槽参数的异步启动永磁同步电动机齿槽转矩削弱措施研究[J].电工技术学报,2016,31(23): 1.

[11] 张琪,梁冰洁,黄苏融,等.槽口宽度对分数槽集中绕组永磁电机齿槽转矩的影响[J].电机与控制应用,2015,42(7): 1.

[12] 葛研军,万宗伟,王雪,等.新型永磁复合电机的设计与优化[J].电机与控制应用,2018,45(6): 51.