

一种单绕组双速感应电机定子绕组节能改造方案

姚 鹏

(上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司, 上海 200063)

摘 要: 在利用改进绕组设计对电机进行双速或多速节能改造时, 存在一些特殊工况要求不同转速时的能效尽可能接近, 这就需要对定子绕组进行特殊设计以实现 2 种转速条件下效率最优。针对该需求, 对比了 3 种单绕组双速电机实现方案, 对比发现反向换相法在 2 种极对数情况下均能保持较高的基波绕组系数, 进一步利用有限元方法研究了不同节距和绕组匝数对电机运行性能的影响, 并提出了最优的绕组设计方案。以 1 台 5.5 kW、4 极电机为例, 利用所提方法进行 4/6 极绕组设计并进行试验验证, 结果表明 2 种转速下电机效率基本一致, 验证了所提设计方法的可行性及有效性。

关键词: 感应电机; 电机再制造; 电磁分析; 单绕组双速; 反向换相法

中图分类号: TM 346 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)09-0066-07

doi: 10.12177/emca.2020.098

An Energy-Saving Design Scheme for the Stator Winding of Single-Winding Double-Speed Induction Motor

YAO Peng

(Shanghai Engineering Research Center of Motor System Energy Saving Co., Ltd., Shanghai 200063, China)

Abstract: Currently, two-speed or multi-speed energy-saving remanufacturing of motor system is generally realized by improved design of stator winding. But the energy efficiency at different speeds should be close to each other so that the optimal efficiency can be achieved under different rotating speeds in some special conditions. In response to this demand, three single-winding two-speed schemes of stator winding are compared, and it is found that the reverse commutation method can maintain a relatively high fundamental winding factor for both pole pair numbers. The effects of different pitches and winding turns on the motor performance are analyzed by finite element method, and the optimal winding design scheme is proposed. Taking a 5.5 kW, 4-pole motor as an example, the proposed method is used to carry out a 4/6 pole winding design and experiment validation. The results show that the motor efficiency is generally the same under the two speeds, which verifies the feasibility and effectiveness of the proposed design method.

Key words: induction motor; motor remanufacturing; electromagnetic analysis; single-winding double-speed; reverse commutation method

0 引 言

随着全球化石能源的巨大消耗, 能源使用效率已经成为工业行业和民用行业的主要关注问题之一。当前中国大部分工业机械设备采用感应电机驱动且已经过长期服役后, 其运行性能已不能

满足节能需求, 如果直接将其报废更换高效电机, 一次性成本投入过大, 且容易造成资源的浪费。如果能够对老旧电机实施再制造, 则能在很大程度上改善这一系列问题, 已成为电机系统节能领域的一个重要措施^[1-2]。

在电机高效再制造技术方面, 国内外学者开

收稿日期: 2020-05-27; 收到修改稿日期: 2020-07-09

作者简介: 姚 鹏(1981—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电机及其系统节能产品研发。

展了深入研究,常用方法有:将原有定子铁心替换为新型材料的低损耗铁心,如文献[3]提出了一种采用无阻尼绕组的优化设计的内置永磁转子代替感应电机的鼠笼转子的方案;文献[4]有针对性地保留了原电机转子部分,将电机定子改为新设计的定子铁心,这种方法需要将原有定子铁心更换,再制造工艺复杂且成本较高。

高效电机再制造的另一个方法是对定子绕组进行改造,使其满足负荷特性需求。例如,文献[5]对三相交流电机变极绕组结构进行了梳理和综述,预期了变极绕组结构的发展前景;文献[6]提出了一种3Y/4Y换相法变极绕组的设计方案;文献[7]针对自起动永磁电机,设计了定子绕组6/8变极绕组;文献[8-9]针对感应电机和同步磁阻电机的需求,提出一种多层交流绕组设计方案,该方法可以根据负载需求通过改进定子绕组实现调速,具有操作简单、成本低等优点,在工业中获得广泛应用。

然而,在实际应用中,存在一些随季节或工况变化而变化的负载,要求电机可以实现2种或多种转速运行,其再制造过程中绕组设计需要兼顾不同转速时的能效指标,以实现在2种或多种转速下效率达到最优。本文针对这一需求,开展能够满足2种转速下均实现较高能效的定子单绕组变极设计,在对比不同方法的单绕组变极方案的基础上,提出一种将反向法和换相法相结合的单绕组变极方法,并对该方法中节距和匝数进行优化设计,达到2种转速下效率接近的目的。并以1台Y系列5.5 kW电机为例,通过样机试制和试验验证了该方法的有效性。

1 定子单绕组变极方案对比分析

单绕组变极有2种基本方法:反向法和换相法^[10]。在实现变极时如果不改变各槽的相属,而仅仅在每相内部改变所属线圈的连接方法,以使部分线圈中的电流改变方向,称为反向法变极^[11];如果变极时打破原有三相的界限,把各线圈重新组合分配,则称为换相法变极。

反向法变极由于仅在每相内部改变所属线圈的连接方法来改变部分线圈中的电流方向,其绕组的出线较少,大多数情况下只有6根出线端,可简化变极开关的设计,如图1所示。但该方法无

法实现2种转速下均具有较高的绕组系数,会影响电机运行性能。

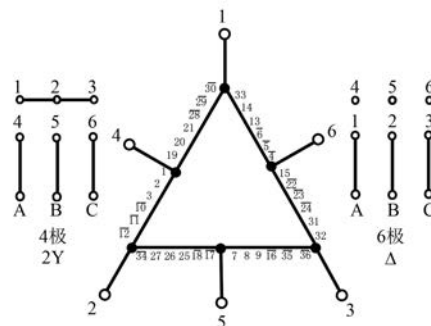


图1 反向法绕组接线

换相法在变极时不仅改变部分线圈电流的方向,而且改变部分槽内线圈的相属^[12]。用换相法获得的单绕组变极方案不同极数情况下的绕组系数比反向法有所提高,在一定程度上弥补了反向法的不足,有利于实现电机的高效运行,但出线头较多,接线复杂。换相法绕组接线图如图2所示。可以看出,采用该方法有13个出线端,使用和控制比反向法复杂。

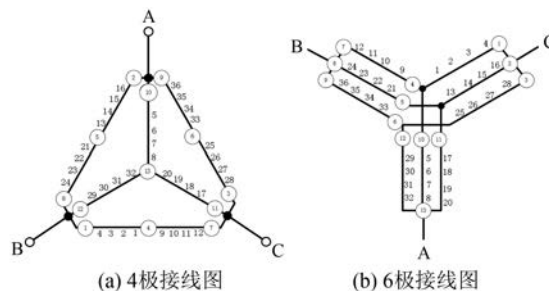


图2 换相法绕组接线

为了保证2种极数情况下电机定子绕组均具有较高的绕组系数,同时绕组接线出线简单,本文采用了一种反向换相法变极,绕组接线如图3所示。其中,有一半绕组反向或全部反向,并且每相只保留1/3绕组相属不变,其余2/3绕组又各均换属其他两相。从接法和原理上把现有成熟的反向法和换相法结合在一起,从而有效避免了2种方法各自的缺点同时还很好地发挥了其各自的优点,对提高电机的电磁性能有较大的优势。

由于电机绕组系数在一定程度上能够反应电磁性能,以下对3种方法的基波绕组系数进行详细对比,结果如图4所示。图4中,横轴展示了

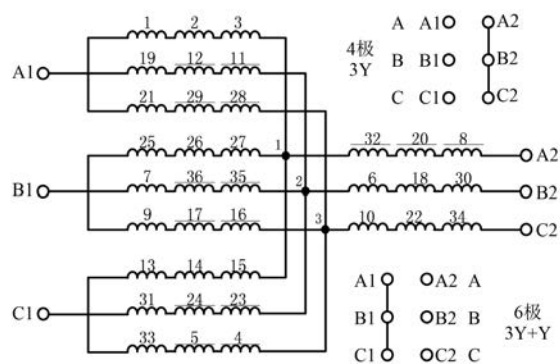


图3 反向换相法

3种单绕组变极方法,每种方法左侧为4极情况下的基波绕组系数,右侧为6极时的基波绕组系数经过对比发现反向换相法能在2种极情况下均保持较高的基波绕组系数且其幅值约为0.9。反向法只能在4极情况下保持较高的绕组系数,6极时绕组系数减少至约0.4,从而削弱了电机在6极时的性能。换相法2种极下的基波绕组系数虽有所改善,但最高仅能达到0.8。综合比较3种单绕组变极方案发现,只有反向换相法能够保证2种极情况下均具有较高的基波绕组系数。

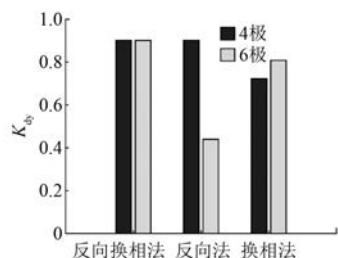


图4 不同绕组方案绕组系数对比

反向换相法实现单绕组变极的定子绕组采用3Y/(3Y+Y)的接法,整台电机3/4槽数嵌放3Y线圈,1/4槽数内嵌放Y线圈,仅有6个接线端,如图3所示。具体分为两部分:左侧部分称为3Y绕组,右侧部分称为Y绕组,3Y绕组线圈匝数是Y绕组线圈匝数的2~3.5倍。当电源连接到A1、B1、C1端子时,3Y绕组通入三相电流在电机中产生4个极的旋转磁场;当电源连接到A2、B2、C2端子时,3Y绕组和Y绕组全部投入,电机中将会产生6个极的旋转磁场。此时,3Y绕组中1/3的绕组相属不变,其余2/3绕组均换属其他两相。应用双极对数槽号相位图设计变极绕组时,可同

时观察同一绕组方案在2种不同极对数下的分布情况,兼顾2种极对数下的绕组性能并可定性分析在各种变极绕组连接方式下方方案的可行性。不同极数情况下的绕组槽号相位图如图5所示。由于其中部分绕组反向,故将反向绕组旋转180°并取消反向符号可得绕组槽号相位图,如图6所示。由图6可见,反向换相法在充分利用绕组的情况下,所获得的星型相量图完全对称。

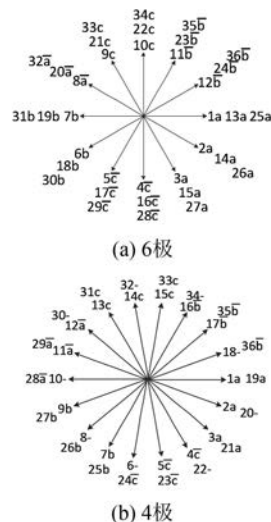


图5 不同极情况下的绕组槽号相位图

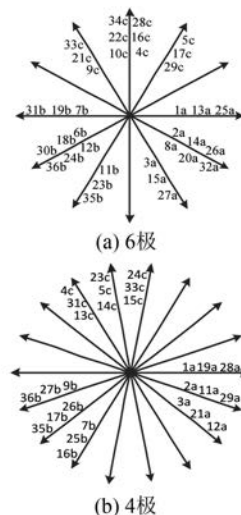


图6 反向后不同极情况下的绕组槽号相位图

2 不同极数时绕组磁势的谐波分析

电机中的大量的谐波会导致电机效率降低,转矩波动变大等不利影响,因此应该采取一定措

施降低电机中的谐波磁势。基于上述分析,将反
向换相法单绕组变极调速方法应用于 1 台
5.5 kW 电机铁心,其基本参数如表 1 所示。

表 1 5.5 kW 电机的主要参数	
参数名称	参数值
额定电压/V	380
极数	6/4
额定功率/kV	2.2/5.5
定子槽数	36
转子槽数	32
3Y 元件匝数	N_{3Y}
Y 元件匝数	N_Y
定子外径/mm	210
定子内径/mm	136

对于一台确定定子槽数的电机,结合绕组展
开图、节距和匝数,通过列写槽电流表并画出绕组
磁势图,最后对绕组磁势图进行傅里叶分解可以
定量地判断出磁场所含谐波的大小。

首先取定某一个时刻,现假设取定当 $i_a = i_b =$
 0.5 A , $i_c = -1\text{ A}$ 。画出表格并在各槽中标出各相
所有槽电流的方向。在槽电流表的基础上,采用
作图法最终可以画出绕组磁势图^[6],结果如图 7
所示。

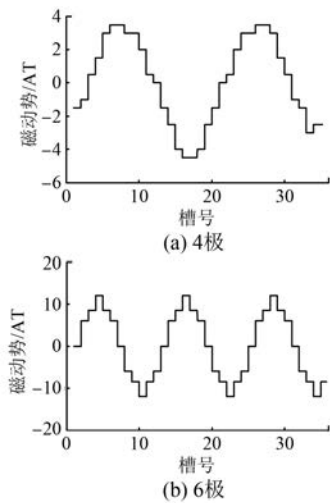


图 7 绕组磁势图

得到绕组磁动势图之后,对其进行傅里叶分
解可得到其谐波畸变率 (THD),从而实现对谐波
含量的定量分析。为了兼顾 2 种极对数情况下的
效率,需要对 2 种极数情况下的磁动势 THD 进行
研究。THD 的计算式为

$$F_{\text{THD}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} F_n^2}}{F_1} \tag{1}$$

式中: F_{THD} 为磁动势谐波畸变率; F_n 为第 n 次谐
波磁动势幅值; F_1 为基波磁动势幅值。

由于电机运行在 4 极情况下时电机的定子绕
组只有 3Y 绕组接入,并不存在 3Y 绕组与 Y 绕组
的匝数比问题,因此首先研究 4 极情况在不同节距
时电机定子绕组的基波磁势大小及 THD 情况。通
过改变线圈节距得出磁势波形畸变率如表 2 所示。

表 2 4 极情况下不同节距的磁动势谐波含量		
节距	基波幅值/AT	THD/%
6	3.54	11.71
7	3.78	9.34
8	4.06	12.28
9	4.15	16.40
10	4.14	20.79

对比不同节距情况下的 THD 可知,节距在 7
时 THD 最小,谐波含量最少,磁动势波形最接近
于正弦。基波幅值为 3.78,比节距 8~10 虽有所
减少,但幅度较小,为了在波形方面正弦,必然在
幅值方面会有所牺牲。4 极情况下整距绕组为 9,
6 极情况下整距为 6,故节距为 7 比 4 极情况为短
距,而比 6 极情况却为长距。

由于 6 极运行情况下 3Y 绕组和 Y 绕组均投
入运行,故 2 种绕组线圈之间的匝数比将会影响
到磁动势的谐波含量。假设 Y 绕组匝数为 30 保
持不变,将 3Y 绕组线圈匝数从 60 线性增加至
80,同时对比不同节距对 6 极性能的影响,以对比
其磁动势波形中的谐波含量,如表 3 所示。

由表 3 数据可知,在 6 极情况下节距取 6 时,
THD 取值较小,但 4 极节距为 6 时波形畸变率并
非最好,为了兼顾 2 种极对数的电磁性能情况,取
定绕组节距为 7, Y 绕组匝数为 30, 3Y 绕组匝数
为 65,在这种情况下,4 极 THD 为 9.34%, 6 极
THD 为 31.94%,均达到较为好的结果。

3 有限元仿真分析

3.1 气隙磁密对比

本节对前述 5.5 kW、4 极的感应电机进行仿
真分析(具体参数见表 1),节距根据第 2 节分析

表 3 6 极情况下不同节距的磁动势谐波含量

N_{3Y}/N_Y	60		65		70		75		80	
节距	基波幅值	THD/%	基波幅值	THD/%	基波幅值	THD/%	基波幅值	THD/%	基波幅值	THD/%
6	8.464	18.15	8.919	15.85	9.375	13.78	9.830	11.90	10.290	10.19
7	8.020	32.25	8.428	31.94	8.836	31.98	9.243	32.17	9.651	32.57
8	7.186	39.69	7.581	37.93	7.975	36.66	8.369	35.30	8.764	35.81
9	5.878	60.24	6.191	56.88	6.504	53.87	6.817	51.18	7.130	48.75
10	3.899	73.65	4.099	72.52	4.299	71.98	4.498	71.89	4.698	72.16

暂定为 7,3Y 绕组匝数暂定为 65,Y 绕组匝数暂定为 30。在加额定负载的情况下 2 种极对数情况下的电机气隙磁密如图 8 所示。

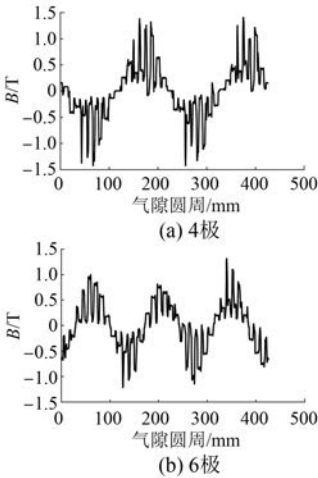


图 8 不同极数下的气隙磁密

通过对磁密波形进行傅里叶分解得出,4 极时基波磁密为 0.577 8 T,总 THD 为 68.86%,其中含有较高的 15、16、17 次谐波的谐波畸变率增加是由电机定转子的齿槽效应导致。6 极时基波磁密为 0.572 T,总 THD 为 56.3%,其中含有较高的 10、11、12 次谐波。

3.2 节距对效率影响

通过改变电机的节距及 2 种绕组中的匝数来检验第 2 节中方案的有效性。最终结果汇总如图 9 所示。

通过图 9 的对比可以发现,在节距 7 时电机运行在 4 极和 6 极均达到了较高的效率,其中 4 极时的电机效率小于节距为 8 时的;6 极时的效率小于节距为 6 时的,是为了兼顾 2 种节距情况下的效率,由图 9 可知取定节距 7 时 2 种极情况均达到较大的效率水平。此时,4 极效率为 85.14%,6 极效率为 78.55%,与第 2 节中对节距

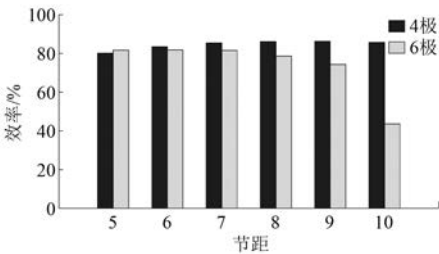


图 9 不同节距时的效率对比

的分析基本一致。

3.3 匝数对效率影响

在定子绕组节距确定后,将 3Y 绕组或 Y 绕组的匝数取为定值,适当调节另一种绕组中的线圈匝数,可得电机在不同匝数情况下的效率。具体分析结果如图 10 所示。首先在 4 极情况下保持 Y 绕组匝数不变,改变 3Y 绕组匝数以研究其效率的变化规律。由图 10 可见,在 3Y 绕组匝数为 65 时达到最大。同理在 3Y 绕组匝数确定后通过改变 Y 绕组匝数来获得运行于 6 极时的高效率匝数方案。

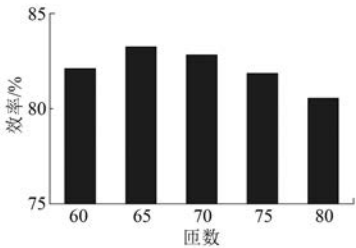


图 10 4 极 3Y 绕组不同匝数效率对比

进一步将 3Y 绕组匝数定为 65 不变,将 Y 绕组匝数从 20 匝等步长的增加到 40,结果如图 11 所示。可以看出,当 Y 绕组匝数为 20 时,6 极运行可以获得最大的效率。

结合上述分析,最终方案为线圈节距为 7,3Y

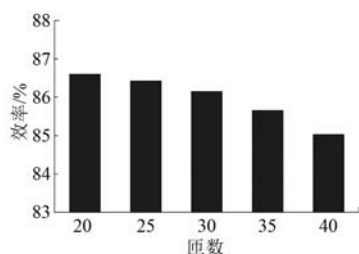


图 11 Y 绕组不同匝数下电机效率

绕组每个线圈匝数为 65, Y 绕组匝数定为 20。经电机设计中磁动势的理论分析得出,在 6 极时由于 Y 绕组中的电流是 3Y 绕组电流的 3 倍,则为了使每个线圈所产生的磁动势相等, Y 绕组匝数应约为 3Y 绕组匝数的 1/3 比较合理。

4 试验样机验证

基于第 3 节分析结论,在原 5.5 kW、4 极电机的基础上,确定最终电磁整改方案,并依据第 1 节中图 3 的反向换相法绕组接线原理,重新绕制定子绕组得到单绕组双速电机。该改造方法在充分利用电机原有铁心情况基础上,实现了电机的高效再制造。图 12 为电机定子经过重新绕制的定子绕组内部实际效果。试验过程中,按照国标分别进行不同极数下的能效测试,通过电机的空载试验和负载试验,得到电机的风摩耗、铁耗、额定工况下的电机电流及效率等运行数据,分析该电机在双速运行时的运行性能。2 个极数之间的切换可通过停机后改接接线端实现。



图 12 试验电机定子绕组

试验获得的电机效率随输出功率的变化情况如图 13 所示。额定功率下的 4 极和 6 极电流波形如图 14 所示。

从 2 种极数的电流波形可以看出,电机在 4 极时比 6 极时含有更多的谐波,这主要是由于 4

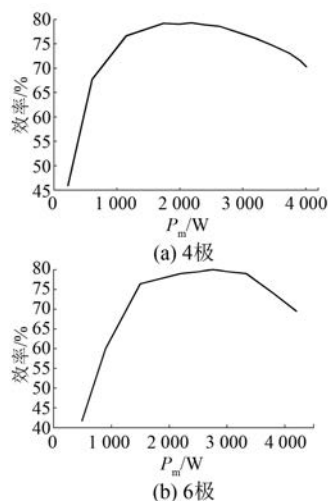


图 13 电机效率曲线图

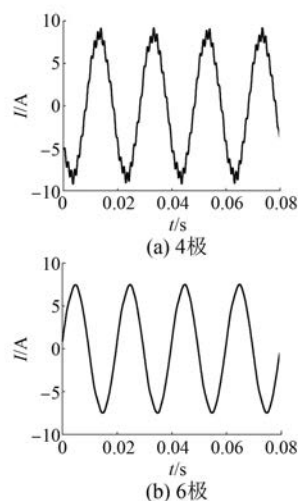


图 14 试验电流波形图

极时的绕组结构存在部分的非对称,即 Y 绕组没有投入运行,电流中谐波含量的增加会导致电机效率降低,从而导致电机在 6 极时的效率会略高。

进一步观察电机效率曲线发现电机在 2 种极对数情况下效率接近,其中 4 极时最高效率可以达到 79.30%, 6 极最高效率可以达到 80.12%。需要说明的是,为了降低试验成本及下线难度,改造样机时采用了实验室现有的线径较小的绕线,导致定子绕组的电阻偏大,电机整体效率偏低,这一问题在实际改造时可通过选择合适线径铜线解决。试验结果验证了所提方案的有效性。

5 结 语

本文首先对比分析了 3 种不同变极方案的优

缺点和其各自的基波绕组系数,通过对比发现反向换相法在保留反向法绕组接线简单的基础上同时提高了2种极情况下的基波绕组系数。在此基础上采用定子绕组磁动势谐波分析的方法分析了反向换相法在不同绕组节距和匝数情况下的THD,从而初步确定了反向换相法单绕组变极方法的具体方案。经过有限元方法和样机试验对反向换相法的方案进行了验证。试验结果表明,2种极数下电机效率基本一致,验证了所提方法的有效性和实用性。

【参考文献】

- [1] 李光耀,陈伟华,李志强,等. 电机高效再制造简介[J]. 电机与控制应用,2012,39(4): 67.
- [2] 施小豹,曹婷婷. 电机再制造技术探讨[J]. 电机与控制应用,2012,39(12): 43.
- [3] NI R, XU D, WANG G, et al. Efficiency enhancement of general AC drive system by remanufacturing induction motor with interior permanent-magnet rotor [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(2): 808.
- [4] 刘憬奇,张维. 电机高效再制造在某石化厂循环水泵中的应用[J]. 电机与控制应用,2012,39(8): 59.
- [5] 李娟,沈建新. Y系列感应电机采用低谐波绕组的
高效化改造[J]. 电工电能新技术,2014,33(12): 10.
- [6] 沈卫国. 3Y/4Y换相法变极绕组的实际应用[J]. 中小型电机,2003,30(3): 38.
- [7] 田蒙蒙,王秀和,杨玉波,等. 基于变极绕组的异步起动永磁同步电动机起动性能研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(11): 3287.
- [8] KABIR M A, JAFFAR M Z M, WAN Z, et al. Design, optimization, and experimental evaluation of multilayer AC winding for induction machine [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(4): 3630.
- [9] KABIR M A, HUSAIN I. Application of a multilayer AC winding to design synchronous reluctance motors [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(6): 5941.
- [10] 彭大华. YDLKS900-14/162000/1400 kW 6 kV 单绕组变极异步电机电磁方案设计[J]. 上海大中型电机,2017,62(3): 1.
- [11] 钱罗奋. 按负载要求设计反向法和换相法相结合的变极电机[J]. 中小型电机,2002,29(5): 20.
- [12] 程小华,张城生,许实章. 交流电机绕组理论中双极对槽号相位图的概念、画法和性质[J]. 中国电机工程学报,1993,13(2): 24.
- [13] LUO X, TANG Q, SHEN A, et al. PMSM sensorless control by injecting HF pulsating carrier signal into estimated fixed-frequency rotating reference frame [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(4): 2294.
- [14] WANG G, YANG L, ZHANG G, et al. Comparative investigation of pseudorandom high-frequency signal injection schemes for sensorless IPMSM drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(3): 2123.
- [15] 李浩源,张兴,杨淑英,等. 基于高频信号注入的永磁同步电机无传感器控制技术综述[J]. 电工技术学报,2018,33(12): 2653.
- [16] 柳鹏. 永磁同步电机高频注入无传感器控制系统的设计与实现[D]. 武汉:华中科技大学,2019.
- [17] 邵俊波,王辉,黄守道,等. 一种表贴式永磁同步电机无位置传感器低速控制策略[J]. 中国电机工程学报,2018,38(5): 1534.
- [18] 李浩源,张兴,杨淑英,等. 基于旋转高频注入的内置式永磁同步电机初始位置检测算法[J]. 电工技术学报,2018,33(8): 1723.
- [19] 包广清,王涛. 基于脉振高频注入法的永磁同步电机初始位置检测优化算法研究[J]. 微电机,2019, 52(5): 82.
- [20] 刘善宏,杨淑英,李浩源,等. 基于旋转坐标系解调的内置式永磁同步电机旋转高频注入法位置观测[J]. 电工技术学报,2020,35(4): 708.
- [21] 言钊,颜建虎,费晨. 基于旋转高频信号注入法的内置式永磁同步电机低速段转子位置检测及其误差补偿[J]. 电机与控制应用,2018,45(9): 1.

(上接第38页)