

分数槽集中绕组感应电机启动转矩特性分析

骆皓^{1,2*}, 朱正鹏¹, 肖一凡¹, 翟长春¹, 陈艳¹

(1. 南京工程学院 电力工程学院, 江苏 南京 211167;

2. 江苏省配电网智能技术与装备协同创新中心, 江苏 南京 211167)

Analysis of Starting Torque Characteristics of Induction Motors with Fractional Slot Concentrated Winding

LUO Hao^{1,2*}, ZHU Zhengpeng¹, XIAO Yifan¹, ZHAI Changchun¹, CHEN Yan¹

(1. School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;

2. Jiangsu Collaborative Innovation Center for Smart Distribution Network, Nanjing 211167, China)

Abstract: Fractional slot concentrated winding (FSCW) structure of induction motors contains abundant magnetomotive force harmonics in the air gap. Direct starting of the motor will result in huge inrush current and high torque ripple. Selecting an appropriate motor starting method ensures the necessary energy for starting the motor while minimizing costs and improving efficiency. This paper investigated two different starting methods for induction motors based on the FSCW structure: hard start and soft start. The full voltage method (hard start) was the simplest method but it might adversely affect motor lifespan. Alternatively, reduced voltage and frequency start (soft start) could reduce energy consumption during starting. First, the mathematical model of the induction motor was established based on winding theory. The starting torque and the impact of non-dominant pole-pair harmonic magnetic fields on torque ripple were analyzed under both hard and soft start conditions using electromagnetic torque theory. Then, the expression of the electromagnetic torque was derived using the virtual displacement method. Finally, the electromagnetic torque and torque ripple under the two starting methods were discussed based on the electromagnetic torque theory. In addition, the feasibility and stability of soft start were verified through theoretical

calculation, finite element simulation and experimental validation.

Key words: fractional slot concentrated winding; hard start; soft start; virtual displacement method; electromagnetic torque

摘要: 分数槽集中绕组(FSCW)结构感应电机气隙中含有丰富的磁动势谐波,电机直接启动会带来巨大的冲击电流和较大的转矩脉动,选择合适的电机启动方法在确保提供电机启动所需的能量,同时最大程度地降低其成本、提高效率。本文将基于FSCW结构的感应电机研究硬启动和软启动这两种不同的启动方式。全电压法(硬启动)是最简单的方法,但其可能会对电机寿命产生影响;降压降频启动(软启动)则是另一个方法,可以减少启动所需的能量消耗。首先,根据绕组理论建立感应电机的数学模型;通过电磁耦合理论的电磁转矩理论,分析了硬启动和软启动两种工况下的启动转矩、非主导极对数谐波磁场对转矩脉动的影响;然后,基于虚位移法推导出电磁转矩表达式;最后,基于电磁转矩理论讨论了两种启动方式下的电磁转矩和转矩脉动。此外,还通过理论计算、有限元仿真和试验验证了软启动的可行性和稳定性。**关键词:** 分数槽集中绕组;硬启动;软启动;虚位移法;电磁转矩

基金项目: 江苏省配电网智能技术与装备协同创新中心开放基金项目资助(XTCX202405);江苏省“六大人才高峰”高层次人才选拔培养资助项目(XNY-021);江苏省自然科学基金面上项目(BK20141095)

Projects supported by Jiangsu Collaborative Innovation Center for Smart Distribution Network (XTCX202405); Jiangsu Province “Six Talent Peaks” High-level Talent Selection and Cultivation Funding Program(XNY-021); Jiangsu Provincial Natural Science Foundation (BK20141095)

0 引言

三相异步电机因其结构简单、成本低廉以及性能良好等诸多优势而在工业传动系统中逐渐取代了直流电机的地位,得到广泛的应用^[1]。然而异步电机在实际使用时仍然有着高启动电流以及小启动转矩的缺点。异步电机直接启动会产生5至8倍的冲击电流,自身产生过大的冲击转矩造

成转子定子磨损,对电机造成损伤,减短电机寿命^[2]。由线圈绕线方式不同,可分为分布绕组和集中绕组,分布式绕组工艺相对复杂,但一般情况下反电势比较正弦,纹波较小;分数槽集中绕组(Fractional Slot Concentrated Winding, FSCW)结构相对简单,制作成本低,转矩密度高^[3]。

电机启动方式可分为两大类:硬启动和软启动。所谓硬启动即全压启动,电机定子绕组在额定电压激励下启动;而软启动是间接启动,一般是降压启动或变频启动。据统计,对于风机、水泵等交流电机,采用低压启动方式能在全额运行下节电 30% 左右^[4]。

根据以上背景,FSCW 结构被提出并应用于感应电机,通过研究不同启动方式下的定子电流、转矩脉动以及气隙磁密等电机性能^[5],探索电机运行规律,对电机各项性能参数分析,从而可实现对电机性能的改进。针对 FSCW 与感应电机,研究重点多集中于以下方面。

文献[6]通过推导分数槽集中绕组各次谐波空间磁场表达式,分析了各次谐波磁场对电机电磁转矩的影响。文献[7]分析了分数槽集中绕组气隙磁场中含有大量谐波,并通过设置补偿绕组消除非主导极次谐波。文献[8]主要分析一种 FSCW 电机通过主导极对数实现能量耦合,提出一种基于多频对极磁场耦合的直驱型双馈电机传动方案。文献[9]分析启动大型交流感应电机可以使用多种方法:全压启动、通过自耦变压器降压启动、软启动或使用可调速驱动器启动等,都有潜在的优势和折衷方案。文献[10-11]主要以永磁电机和五相感应电动机为研究对象,对空载条件下的电机进行研究,对比分析各相启动电流、扭矩以及扭矩脉动等。文献[12]以一台五相感应电动机为研究对象,分别对其星形、五边形、星五边形三种绕组结构进行设计优化,优化后的感应电机转矩脉动幅度有明显减小。文献[13]详细分析了应用于异步电动机上的不同启动技术,对比了传统电机和软启动技术的优缺点,并论述了软启动技术在现代社会的新型应用。文献[14]以鼠笼式异步电动机为例,介绍电机不同启动形式并从经济和技术方面进行了比较。文献[15]介绍了三相交流异步电动机四种启动装置,以三相交流电机的旋转磁场不对称状态为理论分析基础,详细描述大型电机的启动过程。文献

[16]设计了一种定子极与转子极空间分布相同的双层永磁球形电机,为了简化计算,将定子线圈等效为永磁体,并推导了基于虚功法的转矩模型,通过有限元仿真和实验对比分析了所提转矩模型的可行性。文献[17]介绍一种新型的变频感应电机控制技术。通过计算和实验数据,分析了不同位置对转矩响应的影响。给出了磁链控制器和转矩控制器的磁滞带幅值与损耗、开关频率等驱动性能的关系。

本文主要介绍硬启动和软启动转子静止下的启动特性,分析比较二者的启动特点。

1 分数槽集中绕组感应电机的基本结构及工作原理

1.1 基本结构

单层 FSCW 对同步电机和永磁电机(Permanent Motor, PM)有益,气隙磁通中大量的空间谐波使得单层 FSCW 配置不适合感应电机。而使用多层 FSCW 能消除次谐波(基波的一部分)和高阶空间谐波,并可实现非叠绕组绕制。因此本文提出一种分数槽集中绕组感应电机,定转子都有两层节距为 1 的绕组,其基本结构如图 1 所示。这种绕组绕制结构相较于整数槽绕组结构具有多个优点,如扭矩密度高、转矩脉动低、铜耗小、端部绕组长度较短、易于制造,且有效地减小了电机的重量和体积,适用于泵、风电等感应电机。

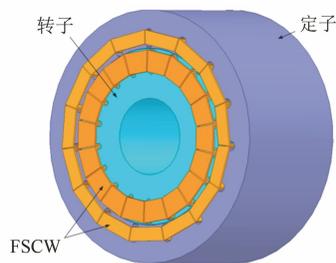


图 1 定转子 FSCW 感应电机结构图

Fig. 1 Structure of stator-rotor FSCW induction motor

不同于常规电机的整数槽绕组分布,FSCW 排列方式较为复杂,不同极槽配合下绕组的排列规律也不相同,因其谐波磁动势频谱中既存在一对主导极对数磁场,又有许多的谐波磁场^[18],其电感参数与常规电机有较大不同。

如图 2 所示,定子槽数为 15,转子槽数为 18,定转子间的气隙内有丰富的谐波阶次。根据 FSCW 电机绕组理论,三相电机不含 3 的倍数次

谐波,定子槽数为奇数,转子槽数为偶数,转子绕组不含偶数次谐波。因此,定子绕组主导极对数为7对极和8对极,转子绕组主导极对数为7对极和11对极,图2中画出了主导极谐波耦合磁场分量和基波分量。电机气隙中7对极气隙磁场最强,其他非主导极谐波幅值较小,因此该电机通过7对极磁场耦合传递能量,并在气隙中产生丰富的谐波磁场。

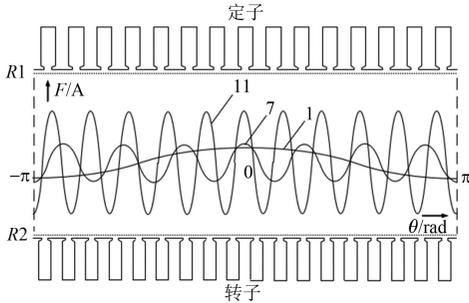


图2 定转子FSCW感应电机绕组理论图

Fig. 2 Theoretical diagram of stator-rotor FSCW induction motor winding

1.2 FSCW 感应电机启动方式

电机的启动方式有直接启动、变频启动、星形-三角形(Y-Δ)启动^[19]以及降压降频启动。硬启动通过给定子绕组施加额定电压来启动电机。首先,全压启动电流比较高,对于频繁全压启动的异步电机,启动瞬时的冲击电流很大,导致内部温度过高,破坏绕组绝缘性,所以短时间内启动次数不宜太多。其次,感应电机启动时一次侧需要较大的启动电流,则相连的母线电压下降,导致扭矩下降,当负载较大时可能引起启动失败。而在整个启动过程中,软启动是一个平滑的启动过程,其特点是启动瞬时电流小,可以在空载电机发挥优势,但是不适用于大负载的电机。为电机选择合适的启动方法,需要对电力系统和启动负载进行分析,以确保电机的设计既能提供所需的性能,又能最大限度地降低成本。如表1所示,列举了不同启动方式的优缺点。

2 分数槽集中绕组感应电机的基础理论

2.1 感应电机数学模型

建立感应电机数学模型需要进行以下假设:忽略电机齿槽效应、磁路饱和、铁心损耗以及三相

绕组对称分布等。三相感应电机的物理模型如图3所示。

表1 定转子FSCW感应电机不同启动方式的基本性能对比

Tab. 1 Comparison of basic performance of different starting methods for stator-rotor FSCW induction motor

基本性能	全压启动	变频启动	Y-Δ启动	降压降频启动
启动电流	大	小	小	小
启动转矩	大	较小	较小	较小
控制器成本	低	高	较高	低
可靠性	高	较高	高	高
效率	较低	较高	较高	较高
启动时长	短	较长	较长	较长

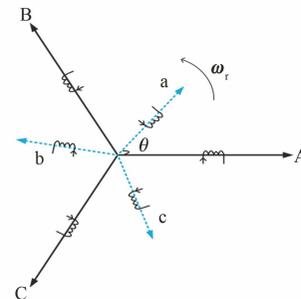


图3 三相感应电机的物理模型

Fig. 3 Physical model of three-phase induction motor

图3中定子有三个对称的绕组轴线A、B、C,转子有三个对称的绕组轴线a、b、c,空间上互差120°。a、b、c是可转动的转子绕组各相轴线,设定子绕组和转子绕组轴间的夹角为θ,ω_r为感应电机转子转动的电角速度且逆时针方向为正方向。由感应电机物理模型建立感应电机动态数学模型,包括电机的电压方程、磁链方程、电感方程和自感公式^[20]。

将定转子电压方程用矩阵形式表示:

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \\ u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_A \\ \psi_B \\ \psi_C \\ \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:u、i、ψ分别为电压、定子电流和磁链;A、B、C分别为定子绕组A、B、C相;a、b、c分别为转子

绕组 a、b、c 相; s 为定子侧; r 为转子侧。

磁链方程:

$$\begin{bmatrix} \psi_A \\ \psi_B \\ \psi_C \\ \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{AA} & L_{AB} & L_{AC} & L_{Aa} & L_{Ab} & L_{Ac} \\ L_{BA} & L_{BB} & L_{BC} & L_{Ba} & L_{Bb} & L_{Bc} \\ L_{CA} & L_{CB} & L_{CC} & L_{Ca} & L_{Cb} & L_{Cc} \\ L_{aA} & L_{aB} & L_{aC} & L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{bA} & L_{bB} & L_{bC} & L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{cA} & L_{cB} & L_{cC} & L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: L_{ij} 为电感, $(i, j) \in \{(i, j) | i = A, B, C, a, b, c; j = A, B, C, a, b, c\}$ 。

从式(2)可以看出磁链由自感磁链和绕组间的互感磁链构成。 $i=j$ 时, L_{ij} 为三相定、转子绕组自感; $i \neq j$ 时, L_{ij} 为各绕组之间的互感。

2.2 电磁转矩理论分析

电磁转矩可以分为两类, 洛伦兹力转矩和反转矩。分数槽集中绕组电机通过电磁转矩进行机电能量转换。根据能量守恒定律可得, 耦合磁场由电源输入的净电能 W_e 主要作用于两个部分, 一部分用于耦合磁场内磁能 W_m 的增加, 一部分用于电机总机械能 W_{mech} 的输出, 如式(3)所示:

$$W_e = W_m + W_{mech} \quad (3)$$

若磁路为线性, 磁能 W_m 在求取时, 以 ψ 和 θ 为自变量, 磁共能 W'_m 以 i 和 θ 为自变量。两者在表达式中虽自变量选取不同, 但在数值上相等。

$$W_m = \frac{1}{2} \sum_1^n \psi_k i_k \quad (4)$$

当转子发生微小角位移, 此时系统磁共能 will 发生变化, 转子上将受到电磁转矩 T_e 的作用。定转子间气隙合成磁场产生的电磁转矩 T_e 可由磁共能求位移的偏导得到。受定转子开槽影响, 气隙与槽内的磁场发生畸变。作用于载流导体的电磁力将由于空气磁阻较大而减小; 同时, 作用在齿壁上的合成切向磁场力与作用在槽内载流导体上的切向电磁力两者之和恒定于定转子不开槽情况下载流导体在磁场内受到的切向电磁力。

因此考虑虚位移法原理, 假定定转子电流保持不变, 系统为无损耗储能系统, 忽略定转子开槽和磁饱和影响, 转子磁场做一个微小的虚角位移变化 $d\theta$, 输入电能的变化 dW_e , 即:

$$dW_e = -e idt = id\psi \quad (5)$$

输入电能对时间求微分:

$$\frac{d\psi}{dt} i = \frac{d(Li)}{dt} i = \frac{dL}{dt} i^2 + \frac{di}{dt} Li \quad (6)$$

定转子电流不变引入中间变量 θ 对电感求位移的偏导数:

$$\begin{aligned} \frac{dW_e}{dt} &= \frac{dW_m}{dt} | (i = \text{inconstant}) + \\ &\frac{dW_m}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} | (i = \text{constant}) \end{aligned} \quad (7)$$

式(7)表示输入的总电能一部分为定转子各相绕组电磁功率, 另一部分转化为电磁转矩输出。所以式(7)可进一步改写为

$$\begin{aligned} \frac{dW_e}{dt} &= \frac{dW_m}{dt} | (i = \text{inconstant}) + \\ &\omega T | (i = \text{constant}) \end{aligned} \quad (8)$$

式中: T 为电磁转矩; $i = \text{constant}$ 表示定转子电流不变。所以转矩可以表示为

$$T = \frac{\frac{dW_e}{dt} - \frac{dW_m}{dt}}{\omega} | (i = \text{inconstant}) \quad (9)$$

代入式(4)与式(5), 得:

$$T = \frac{\frac{d\psi}{dt} i - \frac{d\left(\frac{1}{2}\psi i\right)}{dt}}{\omega} | (i = \text{inconstant}) \quad (10)$$

最后, 由总输入电能减去定转子各相绕组电磁耦合能量就为总输出机械能。根据式(8)、式(9)、式(10), 转矩可表达为

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2} i_A \frac{dL_{AA}}{d\theta} i_A + \frac{1}{2} i_B \frac{dL_{BB}}{d\theta} i_B + \frac{1}{2} i_C \frac{dL_{CC}}{d\theta} i_C + \\ &\frac{1}{2} i_a \frac{dL_{aa}}{d\theta} i_a + \frac{1}{2} i_b \frac{dL_{bb}}{d\theta} i_b + \frac{1}{2} i_c \frac{dL_{cc}}{d\theta} i_c + \\ &i_A \frac{dL_{AB}}{d\theta} i_B + i_A \frac{dL_{AC}}{d\theta} i_C + i_A \frac{dL_{Aa}}{d\theta} i_a + i_A \frac{dL_{Ab}}{d\theta} i_b + \\ &i_A \frac{dL_{Ac}}{d\theta} i_c + i_B \frac{dL_{BC}}{d\theta} i_C + i_B \frac{dL_{Ba}}{d\theta} i_a + i_B \frac{dL_{Bb}}{d\theta} i_b + \\ &i_B \frac{dL_{Bc}}{d\theta} i_c + i_C \frac{dL_{Ca}}{d\theta} i_a + i_C \frac{dL_{Cb}}{d\theta} i_b + i_C \frac{dL_{Cc}}{d\theta} i_c + \\ &i_a \frac{dL_{ab}}{d\theta} i_b + i_a \frac{dL_{ac}}{d\theta} i_c + i_b \frac{dL_{bc}}{d\theta} i_c \end{aligned} \quad (11)$$

式中: $\frac{1}{2}i_A \frac{dL_{AA}}{d\theta}i_A + \frac{1}{2}i_B \frac{dL_{BB}}{d\theta}i_B + \frac{1}{2}i_C \frac{dL_{CC}}{d\theta}i_C + \frac{1}{2}i_a \frac{dL_{aa}}{d\theta}i_a + \frac{1}{2}i_b \frac{dL_{bb}}{d\theta}i_b + \frac{1}{2}i_c \frac{dL_{cc}}{d\theta}i_c$ 为定子自感、转子自感随角位移变化产生的转矩即反应转矩;其余部分定子间互感、转子间互感、定转子间互感随角位移变化的转矩为洛伦兹力转矩。

3 不同启动方式下电磁转矩分析

3.1 仿真模型与试验平台

本文以一台定转子 FSCW 三相感应电机为样机,表 2 给出了该电机的基本设计参数。

表 2 FSCW 感应电机参数

Tab. 2 FSCW induction motor parameters

参数名称	参数值
定子内、外半径/mm	63.5、91
转子内、外半径/mm	27.5、63.15
定子轴向长度/mm	100
定、转子线圈匝数	35、40
气隙长度/mm	0.35
定子槽数、主导极对数	15、7
转子槽数、主导极对数	18、7

根据表 2 中样机参数,在 Ansys 软件中建立如图 4 所示的二维有限元模型。图中标注了定子各相绕组分布方式,A、B、C 为定子三相绕组各相中轴线,a、b、c 为转子三相绕组各相中轴线。

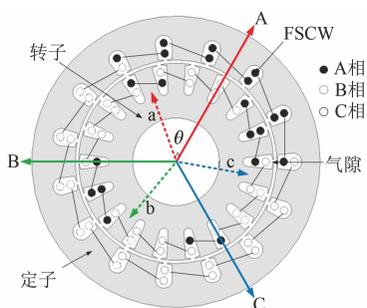


图 4 定转子 FSCW 感应电机二维模型

Fig. 4 2D model of stator-rotor FSCW induction motor

为了进一步验证第 2 节提到的理论,根据表 2 中参数制作样机,搭建试验平台。感应电机定子绕组受变频器电压激励,变频器可以改变电压大小,同时可改变输入电压频率实现软启动;扭矩传感器由直流电源为其提供直流激励;样机通过联轴器与减速机连接,减速机可放大局部扭矩,扭

矩传感器用来测量经过减速机降低的转子转速和扭矩;示波器用来读取电机、扭矩传感器的输出电压电流波形。试验室搭建平台如图 5 所示。



图 5 定转子 FSCW 感应电机样机

Fig. 5 Stator-rotor FSCW induction motor prototype

在此平台上,首先给定转子 1 A 的交流电流;然后对定子施加 50 V/50 Hz 和 8 V/10 Hz 的电压激励,可得各激励条件下的气隙磁密频谱图如图 6 所示。

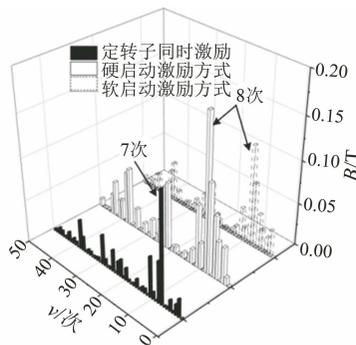


图 6 三种不同工况下激励 FSCW 感应电机气隙磁密频谱图

Fig. 6 Analysis of air gap spectrum of FSCW induction motor under three different excitation conditions

当样机在定转子都给定 1 A 电流源激励时,气隙中 7 对极谐波磁场最大,表明此时 7 对极是主导极;当样机仅在定子交流电压激励时,无论是硬启动还是软启动,其气隙中都是 8 对极磁密幅值最大。这是因为这两种激励方式下,定子电流远大于转子电流,而定子绕组上存在 8 对极的磁场,导致了气隙中 8 对极磁密最大,但是不参与耦合,耦合磁场主导极均为七对极,并且七对极的磁通密度幅值远大于除 8 对极外的其他各次谐波的磁通密度幅值,主导极谐波是电机产生电磁转矩的主要原因,而非主导极谐波会带来转矩脉动、电机噪音等一系列问题。在感应电机转子短路、电机

堵转的情况下,通过仿真对气隙中谐波频谱分析。

电机定转子轴线位置在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 偏转角度、步长为 1° 的各个位置处的平均电磁转矩如图 7 所示。

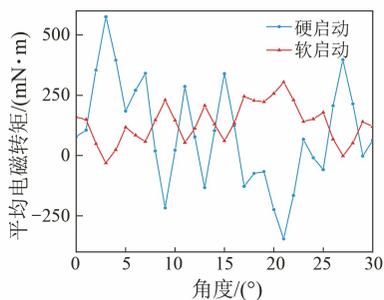


图 7 硬启动与软启动不同位置启动转矩

Fig. 7 Starting torques at different positions for hard start and soft start

由图 7 可知,对于不同的定转子三相绕组轴线位置,电机的平均电磁转矩幅值会发生变化,且其夹角每相差一度,平均电磁转矩幅值相差也很大。

3.2 硬启动电磁转矩特性分析

全电压启动法,又称硬启动,是最容易采用、设备成本最低、最可靠的方法。这种方法是对电机定子端绕组施加全线电压,感应电动机产生的转矩大致与施加电压的平方成正比,允许电机产生较高的启动转矩,并提供最短的加速时间。在暂态过程,由于启动电流通常是稳态电流的 2 至 3 倍,所以也会对电力系统造成压力。此外,这种瞬时转矩超过额定转子转矩的 6 倍,其冲击力会导致设备磨损。若电机启动时产生的转矩频繁超过转轴承受范围,甚至会导致巨大的故障。

试验均在电机堵转条件下进行。首先用增量式编码器通过联轴器安装在转轴上,调整旋转角度、确认起始位置,确定电机仿真与试验定转子初始位置的统一。从零时刻开始,仿真中转子位置与试验中转子位置一一对应。在定子上给定有效值 40.82 V、频率 50 Hz 的三相对称电压激励, FSCW 电机硬启动电流的仿真与试验结果如图 8 所示。结果表明,硬启动启动电流试验波形和仿真波形吻合度较高,误差不超过 5%。造成误差的原因主要有:未考虑样机内部铁心损耗、绕组损耗等问题。

调整模型转子位置,使得电机定子三相绕组轴线 A、B、C 与转子轴线 a、b、c 分别重合,在此条件下,对根据表 1 中参数所设计的电机进行仿真

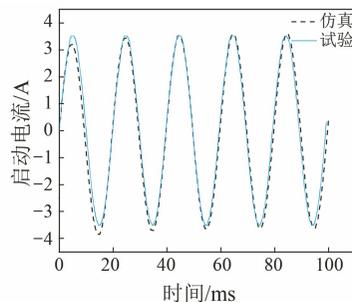


图 8 样机测试电流波形

Fig. 8 Sample test current waveform

试验。定子为 50 V/50 Hz 电压源励磁,转子各相短路,得到启动转矩的波形如图 9 所示。图中可以看出,硬启动时暂态过程约 300 ms,此后趋于稳态;在 1 s 内的电磁转矩平均值约为 78 mN·m,暂态过程中转矩的最大值可达到 400 mN·m,达到稳态运行时的 4 倍,对电机运行稳定性不利、对转轴冲击力很大,可能造成不可逆的损伤。

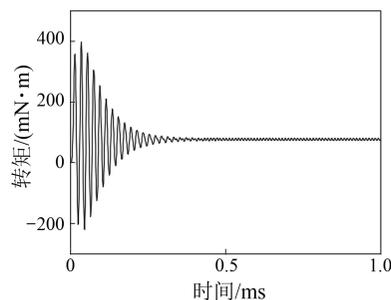


图 9 硬启动转矩波形

Fig. 9 Hard start torque waveform

根据虚位移法计算电磁转矩的理论,在定转子三相电压激励的基础上得到定转子绕组上三相电流幅值 I_{sm} 、 I_{tm} 与初相角 φ 、 δ ,用此电流源给定转子施加激励,定子 A 相电流激励为 $I_{sA} = I_{sm} \cos(100\pi t - \varphi)$, B 相、C 相初相角依次滞后 120° 。在 Ansys 中可以忽略其暂态时刻,直接得到稳态转矩。

如图 10 所示,当定子-转子轴线夹角为 0° 时,由虚位移法理论计算的平均电磁转矩达到 84.5 mN·m,峰值-峰值转矩脉动为 4.8 mN·m,约为平均转矩的 5.6%;由 Ansys 软件仿真得到的平均电磁转矩达到 77 mN·m,峰值-峰值转矩脉动为 7.5 mN·m,约为平均转矩的 9.7%;通过试验得出的平均电磁转矩为 69.5 mN·m,峰值-峰值转矩脉动为 1.8 mN·m,约为平均转矩的 2.5%。仿真值与理论值相差 8.8%,试验值与仿真值相差 9.7%。

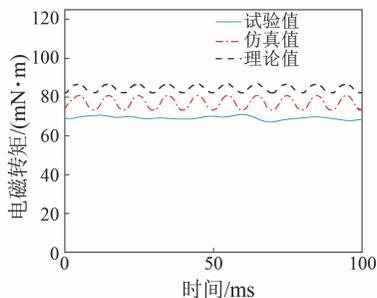


图 10 硬启动电磁转矩

Fig. 10 Hard start electromagnetic torque

3.3 软启动电磁转矩特性分析

异步电动机的转矩是电机内磁通与转子内流过电流之间共同作用产生的,若要实现电机的软启动,则需保证 v/f 比在合理范围内。若只降低频率不改变电压,则磁通会过大,磁回路逐渐饱和,重则烧毁电机。所以,频率与电压需成比例地降低,使电动机的磁通恒定,避免弱磁或磁饱和现象的产生,这类启动方式多在风机上应用。

软启动有两个特点:一是启动过程降低了电机的冲击电流;二是在整个启动过程转速是平稳上升,无转矩振荡。其所需的功率显著降低,并减少了电机产生的热量,在较低的速度范围内可用的转矩显著增加,这些都增加了更高的效率。在硬启动激励条件下,改变激励电压的幅值和频率,定子为 8 V/10 Hz 电压源励磁,转子各相短路,以同样方法得到软启动条件下的电磁转矩。如图 11 所示,在软启动时暂态过程同样约为 300 ms,此后趋于稳态;在 1 s 内的电磁转矩平均值约为 160 mN·m,暂态过程中转矩的最大值可达到 300 mN·m,达到稳态运行时的 2 倍,相较于硬启动的启动转矩,该峰值显著下降。

如图 12 所示,当定子-转子轴线夹角为 0° 时,由虚位移法理论计算的平均电磁转矩达到

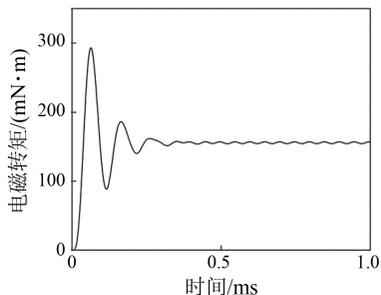


图 11 软启动转矩波形

Fig. 11 Soft start torque waveform

158.4 mN·m,峰值-峰值转矩脉动为 4.3 mN·m,约为平均转矩的 2.7%;由 Ansys 软件仿真得到的平均电磁转矩达到 156.7 mN·m,峰值-峰值转矩脉动为 3 mN·m,约为平均转矩的 1.9%;通过试验得出的平均电磁转矩为 138.3 mN·m,峰值-峰值转矩脉动为 7.8 mN·m,约为平均转矩的 5.6%。仿真值与理论值相差 1.2%,试验值与仿真值相差 11.7%。

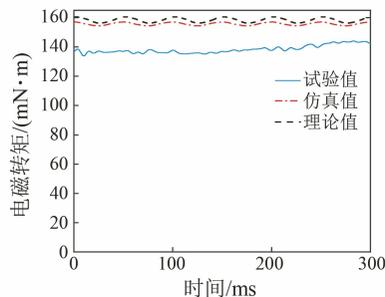


图 12 软启动电磁转矩

Fig. 12 Soft start electromagnetic torque

由于扭矩传感器无法测量高频扭矩脉动,并且电机和扭矩传感器之间存在机械惯性,因此只能测量平均扭矩。由于转轴上存在摩擦损失,导致试验结果略低于有限元模拟结果。

由于 FSCW 具有丰富的谐波磁场,转子偏转一定角度对高次谐波的影响较大,而 Ansys 软件是通过磁场能量的 $B-H$ 体积积分计算的,因此虚拟位移法的理论计算结果略高于模拟结果。

4 结语

本文研究了一种定转子均为分数槽绕组的多分量极对数磁场耦合的感应电机的启动方式。利用虚拟位移法分析了电机定转子之间能量的变化,得到了电磁转矩的一般表达式;通过有限元仿真、虚拟位移法理论计算和电机转矩试验,对硬启动和软启动的暂态过程和稳态过程电磁转矩进行了比较分析,得出以下结论:

(1) 硬启动与软启动的暂态过程时长基本相同,由于硬启动电压较大,其暂态过程的转矩峰值远高于软启动的转矩峰值,转矩脉动振幅也大于软启动转矩振幅。

(2) 定子和转子之间的强耦合和能量传递主要通过 7 对极谐波来实现,其余极对数的谐波磁场是弱耦合的,主导极谐波产生电磁转矩,非

主导极次谐波产生谐波漏感并在电机中引起转矩脉动。

(3) 对于定子和转子的初始状态,三相绕组定转子的夹角不同,会引起定转子绕组电感、磁链、定转子电流的变化,进而影响电机定子和转子之间磁共能的变化,导致电机的平均电磁转矩和转矩脉动变化。

参考文献

- [1] 谢颖, 蔡翔, 单雪婷, 等. 抽油机用高启动转矩感应电机设计与研究[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2019, 24(3): 66-73.
XIE Y, CAI X, SHAN X T, et al. The design and research of high starting torque induction motor in oil field [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2019, 24(3): 66-73.
- [2] 齐鹏策. 一种抑制空间电压矢量变频软启动器转矩脉动的控制策略研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2019.
QI P C. Research on a control strategy of suppressing torque ripple of space voltage vector variable frequency soft starter [D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2019.
- [3] SUNDARAM V M, TOLIYAT H A. A fractional slot concentrated winding (FSCW) configuration for outer rotor squirrel cage induction motors [C] // 2015 IEEE International Electric Machines & Drives Conference, Coeur d'Alene, ID, 2015.
- [4] 方鑫, 吴尧辉, 宋贺. 异步电机起动电磁仿真分析[J]. 电子科技, 2021, 34(6): 61-66.
FANG X, WU Y H, SONG H. Electromagnetic simulation analysis of asynchronous motor starting [J]. Electronic Science and Technology, 2021, 34(6): 61-66.
- [5] 翟长春, 骆皓, 吴刚, 等. 分数槽集中绕组双馈感应电机电磁特性分析[J]. 微电机, 2023, 56(1): 18-23+28.
ZHAI C C, LUO H, WU G, et al. Analysis of electromagnetic characteristics of fractional slot concentrative winding doubly-fed induction motor [J]. Micromotor, 2023, 56(1): 18-23+28.
- [6] 王承宇. 分数槽集中绕组永磁磁力矩电机的研究与设计[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
WANG C Y. Study and design of fractional-slot concentrated-winding permanent magnet torque machine [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.
- [7] 孙春阳, 骆皓, 吴刚, 等. 分数槽集中绕组感应电机非主导极次谐波磁动势抑制方法[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(11): 86-95.
SUN C Y, LUO H, WU G, et al. Method for suppressing non-dominant pole log-harmonic magnetomotive force in fractional slot concentrated winding induction machines [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(11): 86-95.
- [8] 骆皓, 许祥威, 侍正坤, 等. 基于多频对极磁场耦合的直驱型双馈电机电磁耦合特性分析[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(2): 159-165.
LUO H, XU X W, SHI Z K, et al. Analysis of electromagnetic coupling characteristics for doubly-fed induction generator based on multi-frequency pole pairs' magnetic field coupling [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(2): 159-165.
- [9] LARABEE J, PELLEGRINO B, FLICK B. Induction motor starting methods and issues [C] // Record of Conference Papers Industry Applications Society 52nd Annual Petroleum and Chemical Industry Conference, Denver, CO, 2005.
- [10] EL-REFAIE A M, ZHU Z Q, JAHNS T M, et al. Winding inductances of fractional slot surface-mounted permanent magnet brushless machines [C] // 2008 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Edmonton, AB, 2008.
- [11] 赵玉明. 五相感应电动机的绕组设计及性能分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2022.
ZHAO Y M. Winding design and performance analysis of five-phase induction motor [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2022.
- [12] 庄小雨. 双定子错位型六相轴向磁通永磁电机设计及性能分析[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2023.
ZHUANG X Y. Design and performance analysis of six-phase axial flux permanent magnet motor with double-stator dislocation [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2023.
- [13] 刘娜. 软启动技术在电机控制中的应用研究[J]. 装备维修技术, 2019, 4: 27.
LIU N. Research on the application of soft start technology in motor control [J]. Equipment Technology, 2019, 4: 27.
- [14] 胡艳强, 姜亮, 尤加红. 大功率低压电动机启动分析[J]. 智能建筑电气技术, 2023, 17(3): 88-

93+99.

HU Y Q, JIANG L, YOU J H. Starting analysis of high power low and voltage motor [J]. *Electrical Technology of Intelligent Buildings*, 2023, 17(3): 88-93+99.

[15] 张维舟, 洪腾腾. 高压电机启动方式分析[J]. *水泥工程*, 2021, 3: 70-73.

ZHANG W Z, HONG T T. Analysis of high voltage motor starting mode [J]. *Cement Engineering*, 2021, 3: 70-73.

[16] LI H, ZHAO Y, LI B, et al. Torque calculation of permanent magnet spherical motor based on virtual work method [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 67(9): 7736-7745.

[17] BUAJ G, CASADEI D, SERRA G. Direct stator flux and torque control of an induction motor: theoretical analysis and experimental results [C]// *IECON'98. Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (Cat. No. 98CH36200), Aachen, 1998.

[18] 汤蕴璆. *电机学*[M]. 4版. 北京: 机械工业出版社, 2011.

TANG Y M. *Electric Machinery* [M]. 4th ed. Beijing: China Machine Press, 2011.

[19] XIE Y, PI C, LI Z. Study on design and vibration reduction optimization of high starting torque induction motor [J]. *Energies*, 2019, 12(7): 1263.

[20] 张振振, 戈海龙, 成巍, 等. 基于滑模变结构的异步电机调速系统建模与控制 [J]. *微电机*, 2023, 56(8): 25-29.

ZHANG Z Z, GE H L, CHENG W, et al. Modeling and control of asynchronous motor speed control system based on sliding mode variable structure [J]. *Micromotor*, 2023, 56(8): 25-29.

收稿日期:2024-06-30
 收到修改稿日期:2024-07-15
 作者简介:
 骆皓(1978-),男,博士,教授,研究方向为双馈风力发电机及交流励磁控制技术,5188051@qq.com;
 *通信作者:骆皓(1978-),男,博士,教授,研究方向为双馈风力发电机及交流励磁控制技术,5188051@qq.com。

Analysis of Starting Torque Characteristics of Induction Motors with Fractional Slot Concentrated Winding

(LUO Hao^{1,2*}, ZHU Zhengpeng¹, XIAO Yifan¹, ZHAI Changchun¹, CHEN Yan¹
 (1. School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;
 2. Jiangsu Collaborative Innovation Center for Smart Distribution Network, Nanjing 211167, China)

Key words: fractional slot concentrated winding; hard start; soft start; virtual displacement method; electromagnetic torque

Induction motors with both stator and rotor using fractional slot concentrated winding structures are mainly applied in fans and pumps. Their characteristics are that the pole and slot numbers are close, and the air gap contains abundant magnetomotive force harmonics. The harmonic poles in the magnetic field rotate at high speeds relative to the rotor, causing torque ripple in the motor. Different starting methods result in different torque characteristics. This paper proposed an induction motor with both stator and rotor having fractional slot concentrated winding structures, and analyzed the advantages and disadvantages of motor performance under different starting methods. The primary focus was on the electromagnetic torque characteristics under two starting methods. Hard start referred to full voltage starting, where the motor's stator winding was excited at rated voltage, and soft starting referred to indirect starting, typically achieved through reduced voltage or frequency conversion starting.

First, the mathematical model of the induction motor was established using winding theory. The starting torque under hard and soft start conditions, as well as the impact of non-dominant pole harmonic magnetic fields on torque ripple, were analyzed using the electromagnetic torque theory in electromagnetic coupling. Then, the electromagnetic torque expression was derived based on the virtual displacement method. Finally, the electromagnetic torque and torque ripple under the two starting methods were analyzed.

Tab. 1 Comparison of basic performance between hard start and soft start of stator fractional slot concentrated winding induction motor

Basic performance	Hard start	Soft start
Starting instantaneous current	large	small
Transient process	short	short
Average electromagnetic torque	large	small
Torque pulsation frequency	high	low
Amplitude of torque pulsation	high	low
Energy conversion efficiency	low	high