

笼型转子磁力耦合器调速特性

葛研军, 鞠录峰, 潘 林, 关成平, 刘永攀
(大连交通大学 电气信息工程学院, 辽宁 大连 116028)

摘 要: 设计了一种基于异步电机笼型转子的调速型异步磁力耦合器(SRAMC), 推导出其转矩与转差率关系式, 并据此分析了 SRAMC 起动特性、拐点特性及同步特性的运行机理。建立了 SRAMC 有限元仿真模型, 得到了转矩与转速曲线、转矩与转差率关系及相应的调速特性曲线。通过分析所建模型及上述曲线, 得到了 SRAMC 起动及额定转矩与气隙磁密、永磁体极距及其耦合长度的平方成正比, 且其最大转矩与内转子笼条电阻无关等结论。另外, SRAMC 具有较为优异的调速特性, 将其应用于离心式负载时, 可获得较好的节能收益。

关键词: 异步电机; 笼型转子; 磁力耦合器; 电磁转矩; 运行特性

中图分类号: TM 343 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)01-0054-05

doi: 10.12177/emca.2019.140

Speed Regulation Characteristics of Cage Rotor Magnetic Coupler

GE Yanjun, JU Lufeng, PAN Lin, GUAN Chengping, LIU Yongpan

(School of Electrical and Information Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

Abstract: A kind of speed regulating asynchronous magnetic coupler (SRAMC) based on cage rotor of asynchronous motor is designed. The relationship between torque and slip ratio is deduced. Based on this, the operation mechanisms of SRAMC's starting characteristics, inflection point characteristics and synchronization characteristics are analyzed. The SRAMC finite element simulation model is established. The torque and speed curves, the relation between torque and slip ratio, and the corresponding speed regulation characteristic curves are obtained. Through the analysis of the established model and the above-mentioned curves, it is concluded that the starting and rated torques of SRAMC are proportional to the air gap magnetic density, the polar distance of permanent magnet and the square of coupling length, and its maximum torque is independent of the resistance of inner rotor cage strip. In addition, SRAMC has excellent speed regulation characteristics, and good energy saving benefits can be obtained when it is applied to centrifugal load.

Key words: asynchronous motor; cage rotor; magnetic coupler; electromagnetic torque; operating characteristics

0 引 言

目前由电机拖动的离心式负载机械耗电量约占全国总量的 40%^[1]。因为该类负载的轴功率与其转速三次方成正比, 即转速降低时, 轴功率将呈三次方下降^[2-4], 所以对离心式负载调速可带来显著的经济收益。

调速方式主要有定子侧变频和负载侧变转差 2 种。变频调速的优点是调速精度高、适应范围广; 缺点是输电线路长, 存在谐波污染, 并需要独立的安装空间^[5]。变转差调速一般采用磁力耦合器(简称磁耦), 具有调速范围宽、可靠性高、价格低廉等优点^[6-8]。

磁耦一般由导体转子和永磁体转子组成。其

收稿日期: 2019-10-25; 收到修改稿日期: 2019-12-02

作者简介: 葛研军(1964—), 男, 博士, 教授, 研究方向为机电传动与控制。

鞠录峰(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为机电传动与控制。

中,导体转子由铜或铝等良导体材料制成。该类磁耦不仅磁势损失大^[9],而且机械特性软,导致导体转子发热量大^[10-12],系统运行效率低。

本文提出了一种笼型转子调速型异步磁力耦合器(SRAMC),外转子为永磁转子,而内转子则采用Y2系列的异步电机笼型转子,具有功率密度大、调速范围宽、动力学特性好、价格低廉等优点。

1 SRAMC 模型分析及计算

1.1 SRAMC 结构及工作原理

SRAMC 有限元模型如图1所示。

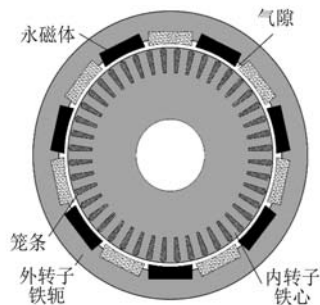


图1 SRAMC 有限元模型

图1中,SRAMC 主要由内、外转子,气隙等构成。外转子由铁轭及镶嵌在其上的磁极交错排布的永磁体构成;内转子为Y2系列笼型转子;内、外转子由气隙相隔,以实现无接触式动力传递。

图2所示为SRAMC在完全耦合时(额定状态)和调速状态2种工作状态示意图。

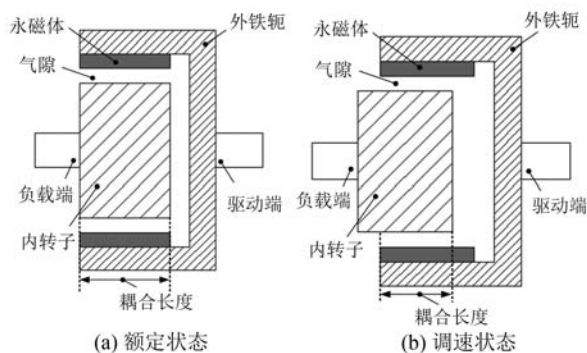


图2 SRAMC 工作状态

图2(a)中,外转子旋转时,上永磁体产生圆形旋转磁场,切割内转子笼条使其产生感生电流,并形成洛伦兹力以驱动负载进行旋转运动。

图2(b)中,通过调速机构减小内、外转子轴向耦合长度及相应的耦合磁通,使耦合器带载能力降低,导致内、外转子的转差增大,以实现所需的转速调整要求。

1.2 SRAMC 电磁转矩计算

设 n_2 、 n_1 分别为SRAMC内、外转子稳定运行时的转速, v 为气隙磁场对内转子笼条的切割线速度,则当外转子上的 p 对极永磁体以 $(n_1 - n_2)$ 转速切割内转子笼条时,有:

$$v = \frac{\pi d(n_1 - n_2)}{60} = 2\pi s f \quad (1)$$

式中: $\tau = \pi d/2p$ 为永磁体磁极距; $s = (n_1 - n_2)/n_1$ 为内、外转子转差率; $f = pn_1/60$ 为永磁体所形成气隙磁场的交变频率。

设内转子中笼条所形成的感应电动势为 E_{2s} ,则:

$$E_{2s} = BLv = 2BL\tau s f \quad (2)$$

式中: B 为永磁体形成的气隙磁密; L 为永磁体与笼条的耦合长度。

设笼条内感生电流有效值为 I_2 ,外转子传递给内转子的电磁功率、电磁转矩分别为 P_M 、 T ,内转子同步角速度为 Ω ,则有:

$$I_2 = \frac{E_{2s}}{\sqrt{r_2^2 + (sx_2)^2}} \quad (3)$$

$$P_M = m I_2^2 \frac{r_2}{s} \quad (4)$$

$$T = \frac{P_M}{\Omega} = \frac{P_M}{2\pi f/p} \quad (5)$$

式中: r_2 、 x_2 分别为内转子单根笼条电阻及电抗; m 为内转子电流相数。

将式(2)~式(4)分别代入式(5),可得:

$$T = \frac{2mpB^2L^2\tau^2f\frac{r_2}{s}}{\pi \left[\left(\frac{r_2}{s} \right)^2 + x_2^2 \right]} \quad (6)$$

由式(6)可知:(1)当SRAMC结构参数确定时, T 与 s 存在一一对应关系;(2) T 与 $BL\tau$ 平方成正比,而与 r_2 及 x_2 的平方成反比,即 $BL\tau$ 与SRAMC的带载能力成较大的正相关性,而与 r_2 及 x_2 成负相关性;(3)式(6)忽略了内转子的电枢反应,即 B 为恒定值。

2 SRAMC 运行特性

式(6)的 T 与 s 关系曲线如图 3 所示。

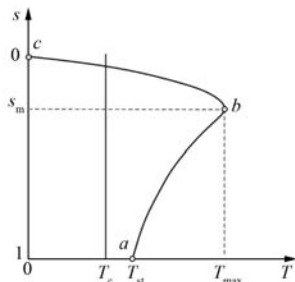


图 3 T 、 s 关系曲线

由图 3 可知, T 与 s 之间存在 3 个特征点, 分别为点 a 、点 b 及点 c , 据此可将其划分为 3 种运行特性。

2.1 起动特性

当 SRAMC 位于图 3 的点 a 时, 内转子静止, $s=1$, 因此 SRAMC 为起动状态。

设 SRAMC 的起动转矩及负载转矩分别为 T_{st} 、 T_c , 则结合式(6)和图 3 可知, 当 $T_{st} > T_c$ 时, SRAMC 可带载起动, 且随转速的上升, s 逐渐减小, 此时式(6)中的分子及分母均相应增大; 但转速较低时, s 值较大, r_2/s 较小, 因此式(6)中 r_2/s 所占比重不大, 即起动过程中 T 随 s 的减小而增大。

2.2 拐点特性

由图 3 可知, SRAMC 在整个运行区间内, 存在一拐点 b 。该点为 SRAMC 由起动区间过渡到额定状态的临界点, 即式(6)所示 T 的极值点。

对式(6)取极值, 则当 $s = \frac{r_2}{x_2}$ 时, 有:

$$T_{\max} = \frac{mpB^2L^2\tau^2f}{\pi x_2} \quad (7)$$

由式(7)可知, 与上述分析相仿, $T_{\max}$ 也与 $BL\tau$ 的平方成正比。所不同的是, $T_{\max}$ 与 x_2 的一次方成反比, 而与 r_2 无关。

由图 3 还可看出, 若内转子转速(或转差)在点 b 处稍有变化, 所对应的电磁转矩将发生较为剧烈的变化, 即拐点及其相邻区域处为 SRAMC 的不稳定工作区域。

2.3 同步特性

当 SRAMC 位于图 3 的点 c 时, $s=0$, 即内、外

转子转速相等, 此时内转子无法切割外转子永磁体磁力线, 导致 SRAMC 无法正常工作, 即 SRAMC 具有异步特性。

3 模型仿真

为了验证上述分析的 SRAMC 调速特性及所建模型的正确性, 基于 Y2-160M1-8 标准笼型转子建立 22 kW 14 极 SRAMC 仿真模型, 在有限元分析软件 ANSYS 上进行仿真。SRAMC 结构参数如表 1 所示。电机输出转速 $n_1 = 1\,500$ r/min, 永磁体材料为 N40SH。

表 1 SRAMC 结构参数

参数名称	参数值
外转子外径/mm	120
外转子内径/mm	90
气隙长度/mm	0.5
内转子外径/mm	89
内转子内径/mm	30
永磁体极对数	7
永磁体长度/mm	38
永磁体宽度/mm	10
铁心长度/mm	85

3.1 气隙磁场分析

通过气隙磁场分析, 可判断 SRAMC 不同转差下磁场运行状态, 以确定是否满足式(6)所述的气隙磁密恒定原则。

图 4 所示为图 1 的有限元模型在笼型转子为静止($s=1$)、额定($s=0.02$)及大转差($s=0.3$)状态下的径向气隙磁密分布曲线。

由图 4 可知, SRAMC 径向气隙磁密呈周期性分布, 曲线均为类正弦曲线, 其周期数即永磁体极对数。

另外, 图 4(b)及图 4(c)所对应的气隙磁密幅值约为 1.25 T, 略大于图 4(a)的 1.20 T; 与图 4(a)相比, 图 4(b)及图 4(c)的平滑度较差。这是因为图 4(b)及图 4(c)所示的调速状态下笼条电流产生的感应磁场对气隙磁场起到了增强或削弱的交变作用。图 4(a)所示的气隙磁密有效值为 1.02 T, 与图 4(b)及图 4(c)仅相差约 2%, 因此仍可近似认为 SRAMC 始终运行在气隙磁密恒定状态, 满足式(6)中气隙磁密恒定这一条件。这验

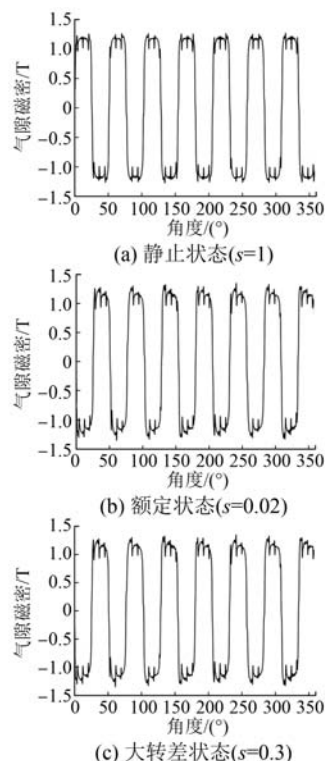


图4 径向气隙磁密分布曲线

证了外转子永磁体厚度选择的正确性以及样机仿真模型的可靠性。

3.2 电磁转矩分析

SRAMC 在输入转速 1 500 r/min 保持不变、驱动负载功率为 22 kW 时所得的转矩、转速随时间变化仿真曲线如图 5 所示。

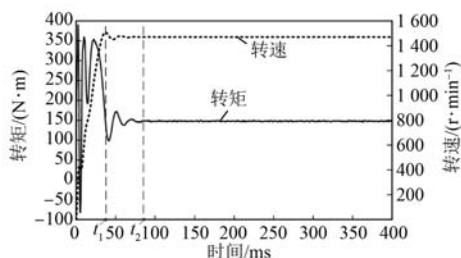


图5 SRAMC 转矩、转速随时间变化仿真曲线

与图 3 的分析方法相仿,也可将图 5 划分为 3 种工作区间。其中, $0 \sim t_1$ 为起动区间; $t_1 \sim t_2$ 为调整区间; $t > t_2$ 为额定运行区间。

$0 \sim t_1$ 区间中,内、外转子转差较大,其所对应的电磁转矩也较大,内转子具有较大的起动加速度; $t_1 \sim t_2$ 区间中,SRAMC 转速及转矩均围绕其额

定曲线上、下调整,直至额定(稳定)运行状态; $t > t_2$ 区间中,负载转矩与所加的电磁转矩相等,此时 SRAMC 进入稳定运行状态。该状态下的输出转矩为 $140 \text{ N} \cdot \text{m}$,转速为 $1\,470 \text{ r/min}$,所对应的转差率为 0.02,成功实现对负载的驱动。

为了研究 SRAMC 电磁转矩随转差率的变化趋势及验证式(6)所建模型的正确性,调节图 2(b)的耦合长度,依次模拟转差率为 0.02、0.04、0.06、0.08、0.10 时所对应的电磁转矩。由式(6)和图 1 可得不同转差率下 SRAMC 电磁转矩的理论及仿真数据如图 6 所示。

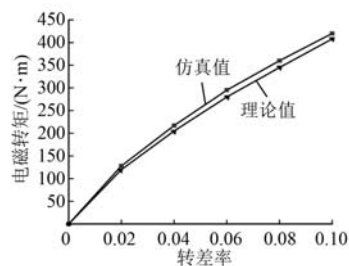


图6 SRAMC 转矩与转差率关系曲线

由图 6 可知,理论与仿真曲线具有较好的吻合度(误差 $<3\%$),曲线的变化趋势均呈电磁转矩随转差率的增大而增大,验证了本文式(6)模型所建的正确性。

3.3 调速特性分析

表 1 的 SRAMC 为其完全耦合时的工作状态(所对应的轴向长度为 85 mm);按图 2(b)的调速原理分别改变其耦合轴向长度为 60 mm 和 34 mm,可得 SRAMC 调速特性仿真曲线如图 7 所示。

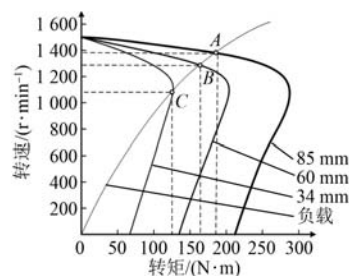


图7 SRAMC 调速特性仿真曲线

图 7 中,离心式负载特性曲线分别与 SRAMC 相交于点 A、点 B 及点 C,每个交点为一组 SRAMC 转速与电磁转矩数值,对应为 SRAMC 应用于离

心式负载机械调速过程中的转矩与转速输出。各工作点所对应的面积则为电机的输出功率。

由图 7 可知,点 A 对应面积最大,点 C 对应面积最小,点 B 则位于两者之间,即 SRAMC 的输出转速越低,电机的输出功率就越小。说明 SRAMC 具有较为稳定的调速性能,应用于离心式负载机械具有较好的节能特性。

表 2 及图 8 所示分别为 SRAMC 调速特性仿真数据及其相应的输出特性仿真曲线。

表 2 SRAMC 调速特性仿真数据

耦合长度/mm	转速/(r·min ⁻¹)	转矩/(N·m)
85	1 470	142
77	1 465	139
69	1 458	137
61	1 445	135
53	1 426	132
45	1 393	120
37	1 300	110
29	1 102	78.5
21	738	32
13	220	7
5	80	1.7
0	0	0

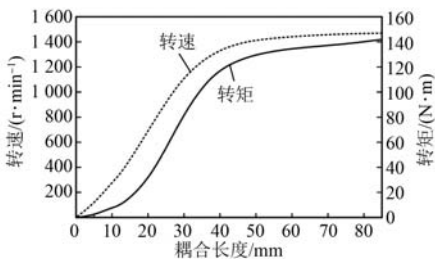


图 8 离心式负载下输出特性仿真曲线

由图 8 可知,当耦合长度在 60~85 mm 内变化时,由于永磁体磁通足以维持其额定运行状态,故输出转矩及转速基本不变;当耦合长度在 40~60 mm 区间变化时,由于永磁体轴向磁通的减小使其进入调速状态,此时随着电磁转矩的减小,输出速度平稳下降;当耦合长度在 0~20 mm 区间变化时,输出转速进一步呈线性化减小,而输出转矩则呈平方倍减小。

4 结 语

(1) SRAMC 稳定运行(包括额定及调速状态)时的气隙磁密为恒值,且电磁转矩与转差之间存在确定性对应关系。

(2) SRAMC 所输出的电磁转矩与气隙磁密、永磁体磁极距及其有效耦合长度的平方成正比,与笼条电阻及电抗的平方成反比。

(3) 当 SRAMC 转差为内转子笼条电阻与电抗比值时,所获得的电磁转矩为最大值,且最大转矩也与气隙磁密、永磁体磁极距及其有效耦合长度的平方成正比,但与内转子笼条电阻无关。

【参考文献】

[1] 吉城龙.调速型筒式异步磁力耦合器传动性能与调速性能研究[D].镇江:江苏大学,2016.

[2] 张照彦.斩波串级调速系统暂态过程分析及控制与保护研究[D].北京:华北电力大学(北京),2017.

[3] 葛研军,袁直,贾峰,等.笼型异步磁力耦合器机械特性与试验[J].农业工程学报,2016,32(12): 68.

[4] 章友京.盘式异步磁力耦合器变负载调速系统的工作性能研究[D].镇江:江苏大学,2016.

[5] 张瑞.乌海热电厂升压泵永磁调速改造及应用[D].保定:华北电力大学,2013.

[6] 万援.调速型稀土永磁磁力耦合器的性能研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2013.

[7] 葛研军,周凯凯,刘艳龙,等.磁力耦合器调速机构研究[J].大连交通大学学报,2014,35(3): 32.

[8] 葛研军,石运卓,贾峰,等.永磁式异步磁力耦合器漏磁系数计算[J].机械设计与制造,2013(7): 67.

[9] 葛研军,张俊,姜浩,等.铜套式磁耦运行特性分析及散热结构设计[J].机械传动,2018,42(8): 71.

[10] 杨超君,李直腾,郑武.鼠笼转子异步磁力联轴器磁场的有限元瞬态分析[J].江苏大学学报(自然科学版),2010,31(4): 437.

[11] 杨超君,吉城龙,张秀文,等.筒式异步磁力耦合器的转矩与调速关系研究[J].电机与控制学报,2019,23(1): 108.

[12] WALLACE A, JOUANNE A V, WILLIAMSON S, et al. Performance prediction and test of adjustable, permanent-magnet, load transmission systems [C] // Conference Record of the 2001 IEEE Industry Applications Conference, 36th IAS Annual Meeting, 2001.