

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.02.017

# 开关磁阻电机恒加速度起动方案研究

范逸斐, 朱学忠\*

(南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210000)

**摘要:** 针对开关磁阻电机起动/发电系统起动时转矩过冲导致的断轴问题,开展了SR电机起动特性分析,根据SR电机机械特性方程,建立了电磁转矩随负载转矩变化特性与转子加速度之间的关系。为了对SR电机进行非线性的调速控制,基于Ansoft分析得到的转矩、电流、角度二维表,对负载转矩特性已知情况提出了利用插值查表法的转矩控制恒加速度法;基于PID控制原理,对负载特性未知情况提出了一种PI参数和开通关断角随转速变化的PWM控制恒加速度法。运用Matlab/Simulink建立了非线性模型,进行了起动加速阶段的仿真试验。研究表明,恒加速度起动方案能使输出转矩跟随负载转矩变化,有效提高SR起动/发电系统的可靠性。

**关键词:** 开关磁阻电机; 负载转矩追踪; 恒加速度起动

中图分类号: :TH39; TM352 文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2014)02-0208-05

## Switched reluctance motor starting with constant acceleration

FAN Yi-fei, ZHU Xue-zhong

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210000, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of bearing failure caused by torque overshoot of switched reluctance (SR) starter/generator system existed in starting stage, after the analysis of SR motor starting characteristics on the basis of mechanical properties of SR motors, the relevance between the character of electromagnetic torque changing with load torque and acceleration was established. In order to adjust the SR motor's speed in nonlinear way, based on the two-dimensional table of torque from Ansoft, current and angle, a method of constant acceleration by torque control was presented for known character of load torque. Based on the principal of PID control, a method of constant acceleration on PWM in which the PI parameters and opening angle/turn-off angle change with rotating speed was presented for unknown character of load torque. By establishing the nonlinear model on Matlab/Simulink, the simulation of starting phase was tested. The experimental results show that the methods of constant acceleration can make electromagnetic torque follow load torque and improve the reliability of the SR starter/generator system effectively.

**Key words:** switched reluctance motor(SRM); follow load torque; starting with constant acceleration

## 0 引 言

开关磁阻电机简称SRM。该电机转子无绕组、无永磁体,因此具有结构简单坚固、可靠性高等特点,此外还有起动转矩大、控制方式灵活、调速性能好、功率密度大、易冷却等优点,因此被广泛应用于各种工业驱动场合<sup>[1]</sup>。

随着多/全电飞机(MEA/AEA)成为未来航空的发

展趋势,以往的低压直流、恒速恒频和变速恒频发电系统在可靠性、容错性、环境的适应性以及发电机大容量、高功率密度等重要指标上已渐渐无法满足飞机的总体要求,因此,270 V高压直流电源相比起传统电源优势明显。而由于在可靠性、功率密度等方面的优点前SR电机在270 V航空高压起动/发电系统的应用上面临极大的机遇。

但SR电机较大的起动转矩在有利于发动机起动时,也对轴系系统产生较大负荷。在某些极端环境

收稿日期: 2013-10-21

作者简介: 范逸斐(1989-),男,江苏宜兴人,主要从事开关磁阻电机调速方面的研究. E-mail:851186930@qq.com

通信联系人: 朱学忠,男,副教授,硕士生导师. E-mail:550125770@qq.com

下,当飞机发动机进行多次频繁起动时,轴系将会积累较大损伤,甚至会造成断轴<sup>[2]</sup>。从电源特性分析,就是绕组电流快速上升时会产生较大冲击力,当其超过电机薄弱环节的扭矩极限时,电机轴断裂,这种情况是要极力避免的。

本研究试图探讨通过对SR电机起动转矩进行控制,以避免负荷过大或断轴情况的产生,提高起动/发电系统的可靠性。

## 1 传统起动方案

现代航空发动机起动/发电系统在实际应用中,常采用的是限功率起动方式(恒转矩+恒功率)。在这种方法下,电机启动速度快,时间短。根据输出电磁转矩不同情况,可分为3个阶段:①恒转矩环节,此时根据电机及系统元器件性能,选择电流斩波限,输出转矩恒定;②恒功率环节,当到达一定转速后,发动机点火,提供正转矩,功率恒定,继续加速,此时根据 $P=T\cdot\omega$ ,输出转矩下降;③直到到达脱离转速,电机与发动机脱离,开始进行发电工作<sup>[3-5]</sup>。

本研究以一台12/8的SR电机作为实验对象。其电源电压为270 V,电流限取值为开关管可流过最大电流值160 A,此时开通角为 $0^\circ$ ,关断角为 $20^\circ$ ,设定负载转矩随转速变化特性在500 rad/s时等于给定转矩。转速和转矩波形如图1所示,转速迅速上升,当输出转矩与负载转矩相等时,进入匀速状态。

转矩在起动瞬间从0升至最大值。虽然这种大起动转矩提供了较大的起动加速度,但也会对轴承造成损害。为了克服这一缺点,实现平稳起动,就需要对输出转矩进行控制。

## 2 恒加速度起动控制方案

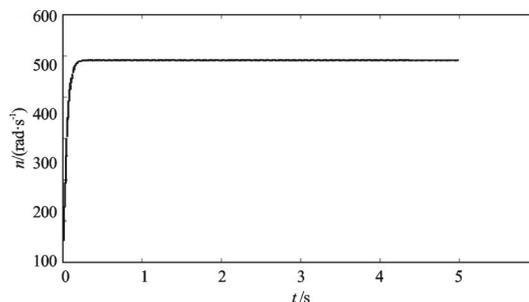
环境的不同使得发动机的阻转矩特性有很大不同,为了使得同一型号的起动/发电系统工作于不同类型和不同工作条件的发动机上,需要使输出电磁转矩随负载转矩变化。开关磁阻电机机械方程如下式:

$$T_{em} = J \frac{d\omega}{dt} + K_c \cdot \omega + T_L \quad (1)$$

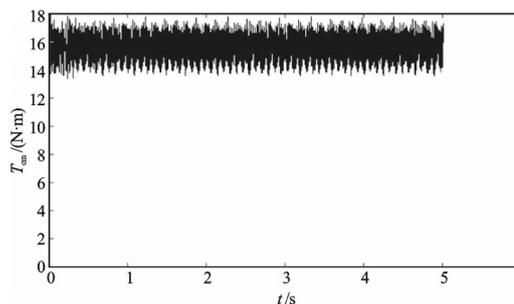
式中: $J$ —转动惯量, $\omega$ —转速, $K_c$ —阻尼系数, $T_L$ —负载转矩。阻尼系数较小,进行分析时可以视为0,如下式:

$$T_{em} = J \cdot a + T_L \quad (2)$$

当输出转矩随负载转矩变化时,表现为加速度恒定。为了减小起动转矩过冲,可在限功率起动方式基



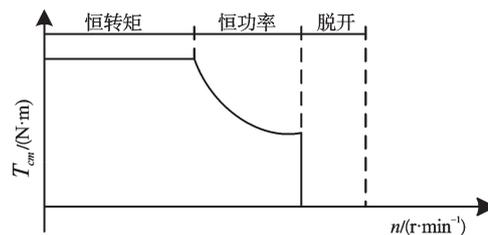
(a) 转速仿真曲线



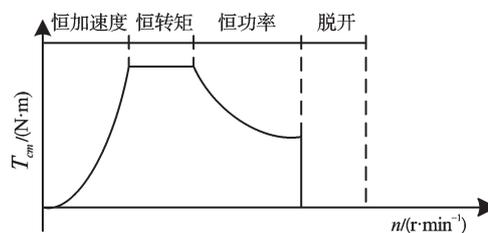
(b) 转矩仿真曲线

图1 传统起动方式转速和转矩仿真曲线

础上增加一个恒加速度环节,限功率与恒加速度SR电动机转矩—转速特性对比如图2所示。



(a) 限功率



(b) 恒加速度

图2 限功率与恒加速度SR电动机转矩—转速特性对比

其中负载转矩是随转速变化的。可以设为:

$$T_L = f(\omega) \quad (3)$$

### 2.1 负载转矩已知情况下起动控制方案

如果负载发动机机械特性稳定,工作环境对负载转矩随转速变化特性影响不大,即可认为负载转矩随转速变化曲线已知,可考虑直接控制输出转矩。

在对SR电机的研究中,瞬时转矩的控制相对比较复杂,实际应用性较差。一般往往将一个周期的平均转矩作为控制对象。

开关磁阻电机电动运行时,输出转矩是电流与定子相对位置的函数。所以可以以电流为控制对象,利用 Ansoft 等电磁仿真软件模拟不同电流下一个单周期的平均转矩,以此建立电流-平均转矩二维表。

负载转矩与转速关系已知情况下的控制系统如图 3 所示,在负载转矩曲线已知的情况下,本研究建立负载转矩-转速的二维表。需要注意的是,由于开关磁阻电机的控制特性,此时得到的转速为前一个检测周期的平均转速。因此,所能得到的也是一个周期内的平均转矩。

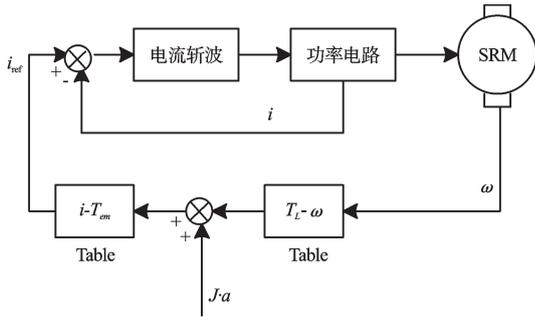


图 3 负载转矩与转速关系已知情况下的控制系统  
根据式(2),将其离散化,可得:

$$\bar{T}_{em} = J \cdot a + T_l(k+1) = J \cdot a + Table(\bar{v}(k) + a \cdot T_l) \quad (4)$$

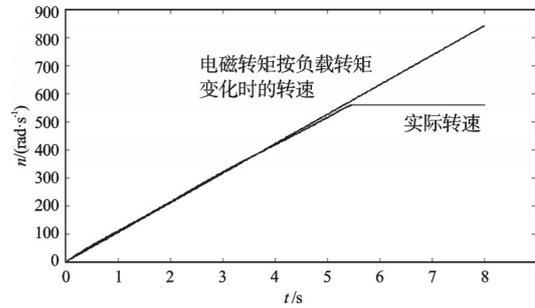
这样,本研究就可以获得下一个控制周期内所要输出的平均电磁转矩,再利用电流-平均转矩二维表,查表得到斩波电流限。这样就实现了对输出转矩的控制。

本研究在 Simulink 上按照这种情况进行模拟仿真,根据实际情况反馈,获得一定情况下的负载转矩-转速表,以此按式(4)设计电流斩波控制方案,此时设定负载转矩曲线  $T_l = K \cdot v^2$ 。仿真结果如图 4 所示,在这种情况下电机起动加速度可以有效跟随给定加速度。相对地,起动时转矩较缓慢上升,直到可输出的最大转矩,避免了转矩过冲。

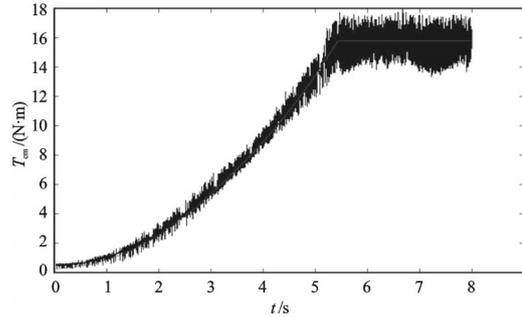
### 2.2 负载转矩未知情况下起动控制方案

在许多情况下,SR 电机负载转矩随速度变化曲线并不可知。如飞机发动机,在高原或沙漠等不同工作环境下,所产生的负载转矩变化趋势就有差异。所以不可能获得准确的负载转矩-转速曲线。但可以确定,负载转矩随转速的变化是连续的。

SR 电机电动运行时,能够得到的控制量为电流(电压)和转速。定子中通电流,转子产生电磁转矩,电磁转矩与负载转矩的差值决定电机的转动状态。一般来说,要对电机转矩进行控制,电流(电压)是首选的控制量。但在负载转矩未知情况下,很难得到在某一转速下应该提供的电磁转矩。用这种方法控制



(a) 转速曲线



(b) 转矩曲线

图 4 已知负载转矩特性条件下的电机起动转速和转矩输出 转矩较为困难。

因此,可以考虑将转速作为控制对象。

根据式(2)可以发现,如果对 SR 电机加速度进行控制,使其保持恒定,也可实现输出转矩对负载转矩的追踪。

基于 SR 电机高度非线性,负载转矩随转速变化,以加速度作为控制对象的系统是时变的,系统参数随转速变化。所以,在这里考虑采用电压 PWM 控制<sup>[6]</sup>。但在控制加速度时,有以下几个问题需要考虑:

(1) 对于 SR 电机在计算转速时,一般采用光电传感器,获得转过一个固定角度的时间,以此求得在这个时间内的平均转速,而并不是实时转速。此时已经存在一阶延时。若将加速度作为控制对象,需要对转速再次微分离散化,又会产生一次延时。这就造成了加速度闭环控制极大的滞后性。笔者在仿真中也发现以采集的加速度进行控制时,存在较大的振荡。

因此必须进行降阶。可以将恒定加速度下与时间对应的转速斜坡作为参考对象,令检测到的实际转速跟踪斜坡转速,以此来实现恒加速度控制,负载转矩曲线未知情况下的控制系统如图 5 所示。

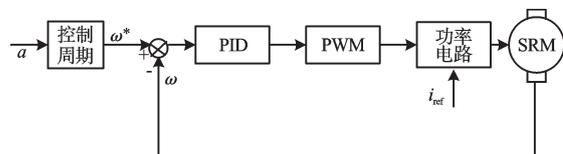


图 5 负载转矩曲线未知情况下的控制系统

(2) 在实际仿真实验过程中会发现,在电机刚起

动阶段,在采用同一套PID参数控制时,在某些负载转矩曲线下,会产生超调,反映到转矩上就是在开通瞬间仍会有部分转矩过冲。

这是由于SR电机的转速检测并不是连续的,必须由光耦产生的位置信号来进行计算。这就导致初启动时,因为转速较慢,在若干个控制周期内无法获得有效位置信号。即虽然实际转速已经产生,但检测转速在一段时间内却持续为0,由于PID调节的性质,误差积分不断积累,就会产生较大的开通占空比,导致了初启动时的转矩过冲。因此本研究要考虑在刚启动时对进行转矩补偿以减小初期的转矩过冲。

通过在启动初期低速情况下调节开通关断角,改变开通时间,对输出转矩的影响更明显<sup>[7-8]</sup>,同时也可以减小换相期间转矩脉动<sup>[9]</sup>。

由图6、图7可以发现,开关管开通时间较短的情况下,启动初期转矩过冲较小,但随着转速上升,会有较大的转矩脉动;而开通时间较长情况下,转矩特性与之相反<sup>[10-11]</sup>,即开通初期有较大转矩脉动,但较高速后脉动较小。

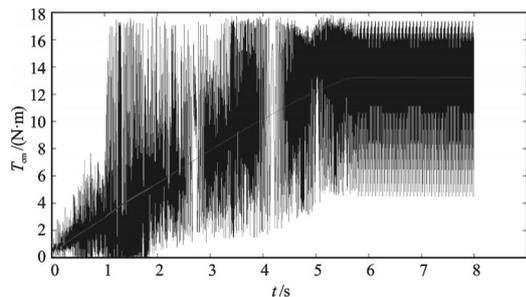


图6 开通角5°,关断角15°时转矩波形

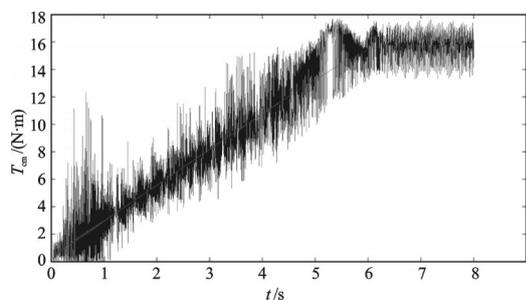


图7 开通角0°,关断角20°时转矩波形

(3) 在PID调节中,一般不同系统参数对应不同的最适合PID参数。以航空发动机作为转矩为例,一般认为其理想负载特性为:转矩与转速的平方成正比,或与转速指数函数成正比。但由于工作环境复杂,虽然实际负载特性整体变化曲线没有较大改变,但与理想特性存在偏差。

根据式(2),在恒加速度情况下,经过一段时间,SR电动机转速发生变化时,引起的转矩变化为:

$$\Delta T_{em} = T_{em2} - T_{em1} = T_L(\omega_2) - T_L(\omega_1) \quad (5)$$

按照航空发动机的负载特性,随着转速上升,经过相同控制周期后产生的转矩差会越来越大:

$$T_L(\omega_3) - T_L(\omega_2) > T_L(\omega_2) - T_L(\omega_1) \quad (6)$$

即不同转速下,若需转速提高相同的值,所要输出的转矩差值不同,即所需的电压差也不同。虽然PID调节中积分调节本身具有误差积累的作用,但由于加速度控制时系统整体是时变的,如果仍采用同一套PID参数,会削弱PID的控制效果<sup>[12]</sup>。

因此应针对不同的负载转矩类型,在不同转速阶段有各自适合的PID参数。以风机类负载转矩为例:低转速时,选取较低的比例系数,可减小开通时的转矩超调,但这是以减缓反应时间为代价的,高速后稳定速度会变慢,这时就要增大比例系数和积分系数。因此变参数PID是一种较为可行的办法<sup>[13]</sup>。

因此本研究考虑将开通/关断角调节与PID调节结合起来,随转速变化采用不同的开通/关断角;同时再加以可变PID参数,在不同速度阶段采用不同的参数。以此优化启动阶段的转矩波形。

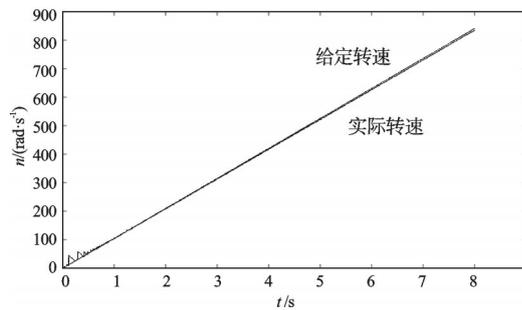
### 3 启动仿真分析

本研究主要针对负载转矩—转速关系未知条件下,设置不同负载转矩曲线,采用PWM方法控制加速度。仿真时设置负载转矩最大值为电流斩波限对应的平均转矩。在带载启动时,假设5 000 r/min时的负载转矩为给定电流斩波限下所能输出的最大平均电磁转矩16 N·m。按转速变化设置5组PID参数,以及3组开通/关断角:转速低于150 rad/s,开通角5°,关断角19°;转速低于400 rad/s,开通角2°,关断角20°;转速高于400 rad/s,开通角0°,关断角20°。随转速变化,采用不同的参数组。两种不同带载情况下仿真得到的转速和转矩波形如图8、图9所示:①空载情况下仿真波形;②风机类负载,即负载转矩与转速的平方成正比( $T_L = K_2 \cdot v^2$ )。

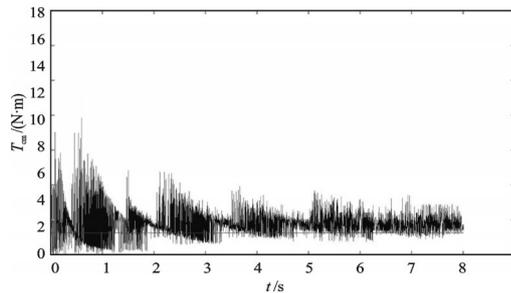
通过仿真可以看出,对不同的负载转矩曲线,通过采用可变PID与开通关断角结合的方法,可使SR电动机转速跟随给定斜坡曲线,与之相对,输出的电磁转矩波形与负载转矩波形一致,与一般恒转矩以及限功率启动方式相比,可有效减小SR电机启动时的转矩过冲。

### 4 结束语

本研究主要探讨了SR电动机启动阶段控制转矩

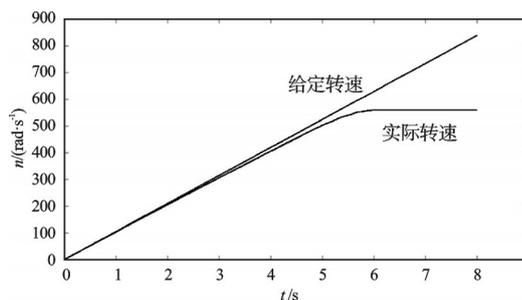


(a) 转速波形

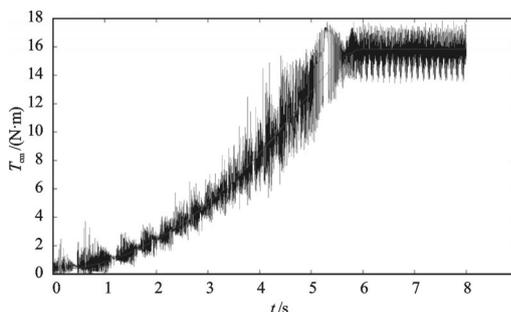


(b) 转矩波形

图8 开通8 s内转速和转矩波形



(a) 转速波形



(b) 转矩波形

图9 开通8 s内转速和转矩波形

过冲,使电机输出转矩随负载转矩变化的方法,着重分析了在负载转矩与转速关系已知情况下如何通过

电流对平均电磁转矩进行控制;以及在负载转矩与转速关系未知情况下,如何通过电机的恒加速度启动对转矩进行控制。

通过 Simulink 软件的模拟仿真,本研究对限功率启动方式与转矩控制启动方式进行了对比,可以看到在恒加速度启动方式下,SR电机可以获得较为平滑的启动特性,可较好地减小转轴损耗。这在飞机发动机启动/发电系统等可靠性要求较高的场合具有良好的应用前景。

#### 参考文献(References):

- [1] 王洪诚,陈刚,王钰涵,等. 基于线性模型的开关磁阻电机控制系统[J]. 兵工自动化,2012,31(6):70-73.
- [2] 钱兴良,罗载奇,蒲晓霞,等. 航空直流启动发电机输出轴断裂故障分析[J]. 燃气涡轮试验与研究,2012,25(1):54-57.
- [3] 刘迪吉. 开关磁阻调速电机[M]. 北京:机械工业出版社,1994.
- [4] 马鹏宇,王洪诚,王秀娟,等. 基于粒子群算法实现的开关磁阻电机调速系统[J]. 兵工自动化,2013,32(10):76-79.
- [5] 刘闯,朱学忠,曹志亮,等. 6 kW 开关磁阻启动/发电系统设计及实现[J]. 南京航空航天大学学报,2000,32(3):145-148.
- [6] 咎小舒. 开关磁阻启动/发电系统控制策略及实验研究[D]. 徐州:中国矿业大学信电学院,2011.
- [7] 王庆龙,汪增福,张兴,等. SRM 转矩脉动抑制的控制策略分析[J]. 电气传动,2012,42(2),3-6.
- [8] INDERKA R B, DONCKER R W A. DITC-Direct instantaneous torque control of switched reluctance drives [J]. **IEEE Transaction on Industry Applications**, 2003, 39(4):1046-1051.
- [9] MADEMALIS C, KIOSKERIDIS I. Performance optimization in switched reluctance motor drives with online commutation angle control [J]. **IEEE Transaction on Energy Conversion**, 2003, 18(3):448-457.
- [10] 严加根,刘闯,姚国飞,等. 开关磁阻电机矩角特性的研究与应用[J]. 电工技术学报,2005,20(9):29-33.
- [11] 全力,刘闯. 六相开关磁阻启动/发电机系统的启动特性理论仿真与实验[J]. 电气自动化,2005,27(6):21-24.
- [12] 陈湘潭,陈朝东,文方. 一种基于自适应PID参数的无超调控制方法研究[J]. 贵州工业大学学报,2005,20(9):29-33.
- [13] 钟庆昌,谢剑英,李辉. 变参数PID控制器[J]. 信息与控制,1999,28(4):273-277.

[编辑:洪炜娜]

#### 本文引用格式:

范逸斐,朱学忠. 开关磁阻电机恒加速度启动方案研究[J]. 机电工程,2014,31(2):208-212.

FAN Yi-fei, ZHU Xue-zhong. Switched reluctance motor starting with constant acceleration[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014, 31(2):208-212.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>