

# 绕线转子永磁电机启动过程 准时间最优控制

张炳义, 阎德宝

(沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

**摘要:** 绕线转子永磁电机(WR-PMM)转子斩波调阻启动是一种便捷有效的启动控制策略。通过斩波调阻的方法实时调节转子外接电阻, 能使启动过程中平均转矩始终保持最大值, 实现绕线转子永磁电机启动过程准时间最优控制, 进而实现绕线式大中型电动机的重载平滑启动。给出了WR-PMM启动控制系统的整体设计方案, 完成控制系统的软硬件设计及选型, 搭建启动控制实验台, 对绕线样机启动性能进行测试。

**关键词:** 绕线转子永磁电机; 启动过程; 准时间最优控制; 转子斩波调阻

中图分类号: TM351

文献标识码: A

## Quasi-time Optimal Control of Wound-rotor Permanent Magnet Motor in Starting Process

ZHANG Bing-yi, YAN De-bao

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, Liaoning, China)

**Abstract:** Rotor resistance chopper control is a simple and effective strategy for the starting of wound-rotor permanent magnet motor (WR-PMM). In order to keep the average starting torque in maximum, the real-time adjustment of the rotor external resistor was necessary. The quasi-time optimal control of WR-PMM in starting process was achieved, and then realized the smooth start for medium-sized wound-rotor motor with heavy duty. The overall design scheme of WR-PMM start control system was given, the design of hardware and software and type selection were completed. Finally, built a starting control experimental platform and tested the starting performance of WR-PMM.

**Key words:** wound-rotor permanent magnet motor; starting process; quasi-time optimal control; rotor resistance chopper control

目前大部分起重机的拖动电机是绕线式异步电动机, 特点是启动特性好, 转子可外串电阻来提高电机启动性能, 其驱动系统普遍采用三相异步电动机和齿轮减速机配合使用。由于起重机的负荷变化大, 正常运行时电机的负载率一般低于50%, 异步电动机的效率和功率因数会随着负载率的降低而急剧下降, 造成能源浪费。而采用永磁电机可以在很宽的负载变动范围内保持高效高功率因数, 提高系统运行效率、简化传动链、降低养护成本。将绕线式异步电机和永磁同

步电机的优点有机结合提出了绕线转子自启动永磁电机。

文献[1]采用有限元仿真的方法计算和分析了鼠笼转子永磁电机的启动特性; 文献[2]利用Ansoft软件对异步启动永磁同步电机启动性能进行了仿真计算, 总结了一套基于有限元的自永磁同步电动机启动性能的仿真计算方法; 文献[3-5]提出并研究了绕线转子结构的自启动永磁电机, 着重分析了电机磁路结构设计和稳态性能, 并对其启动过程进行了分析; 文献[6]介绍了IGBT门

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2012YQ050242); 国家自然科学基金(51077093)

作者简介: 张炳义(1954-), 男, 博士, 教授, Email: zby541108@vip.sina.com

极驱动保护电路的分类,讨论了选用IGBT驱动器时的参考原则;文献[7]提出一种IGBT作斩波管的具有吸收保护作用的斩波回路拓扑结构,并对异步机转子斩波调阻调速系统整流回路的准动态过程进行了详细研究;文献[8]提出了一种转子IGBT斩波拓扑结构,有效地调节了转子电阻和保护斩波器;文献[9]对异步电机转子斩波调速系统的静态和动态性能进行了详细的分析,得出了转子外接电阻的计算方法和系统的动态数学模型。

本文针对自启动永磁电机启动过程电流大,转矩冲击明显的特点提出WR-PMM启动过程准时间最优控制系统的方案。系统采用转子IGBT斩波调阻的控制策略,完成启动控制系统的硬件和软件设计,并搭建样机启动控制实验台,实现了样机启动过程中实时输出最大异步转矩的准时间最优控制策略。

## 1 准时间最优控制

准时间最优控制的目的是在电机启动阶段,通过控制转子外串等效电阻使启动过程中转矩保持恒定最大转矩 $T_{mec\text{-max}}$ ,理想状态下使电机做匀加速运动。系统在恒定转矩 $T_{mec\text{-max}}$ 的约束条件下实现了启动过程“最短时间控制”,或称“时间最优控制”。然而整个启动过程与理想快速启动过程还有差别,主要表现在WR-PMM数学模型的建立和启动特性的研究上,所以将WR-PMM斩波调阻启动过程称为“准时间最优控制”过程。WR-PMM准时间最优控制过程目标曲线如图1所示。

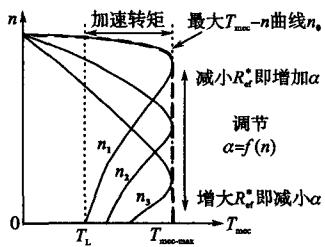


图1 准时间最优控制过程目标曲线

Fig.1 Target curves of the quasi-time optimal control process

图1中,  $n_1, n_2, n_3$  曲线为转子串不同电阻启动过程机械特性曲线,  $n_0$  为准时机最优控制过程曲线。在WR-PMM定转子自身阻抗参数确定的情况下,最大异步转矩对应转速唯一且取决于转子外部回路等效电阻。因此如果能在电机启动过程中,将实际运行转速实时检测并作为转子外串

电阻计算模型输入参量,电机即可沿着  $n_0$  曲线近似恒转矩加速至同步速。

WR-PMM斩波控制过程主要在转子绕组整流后的直流侧进行,为了便于建立转子IGBT斩波调阻控制准动态数学模型:首先将定子侧参数折算到转子侧并加入整流环节,得到转子直流侧等效电路模型;然后加入基于RCD缓冲电路的斩波控制环节可得到转子直流侧斩波调阻电路模型,经过整理可得出WR-PMM合成异步转矩 $T_{mec}$ 的公式,进而可以找出每个转速点对应最大转矩的转子外串电阻;最后根据实时输出最大异步转矩的控制原则,推倒出斩波占空比与电机转速关系如下式所示:

$$\alpha = 1 - \frac{(1 - \frac{n}{n_1})[1.58 \frac{R_1}{k_e^2 \sigma} + \frac{3}{\pi} (\frac{X_{1\sigma}}{k_e^2 \sigma} + \frac{X_{2\sigma}}{k_e^2 \sigma})] - 1.58 R_2}{R_{ef}} \quad (1)$$

式中:  $R_1, X_{1\sigma}, R_2, X_{2\sigma}$  分别为定转子绕组电阻和漏抗;  $k_e$  为有效匝数折算系数;  $\sigma$  为电路形式转换系数。

根据上式控制方法,即可使WR-PMM沿着图1中的最大异步转矩  $n_0$  曲线从零速近似匀加速至同步转速。

## 2 控制系统的设计

### 2.1 启动控制系统整体结构设计

根据WR-PMM样机运行原理和控制方法,搭建斩波调阻启动控制系统。系统中各主要器件的选择应同时兼顾样机主要性能参数和整个控制系统性价比等因素。除WR-PMM样机以外,控制系统主要包括:编码器、转子外串电阻器、转子三相整流模块、主控芯片及其外围电路、IGBT斩波器等。系统硬件原理图如图2所示。

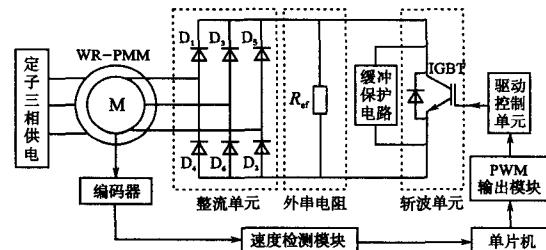


图2 系统硬件原理图

Fig.2 Principle diagram of the system hardware

### 2.2 外串电阻选择

当转速为零时,斩波调阻控制方案中所需外

串电阻达最大值,其阻值为

$$R_{\text{ef}} = 1.58 \left( \frac{R_1}{k_e^2 \sigma} - R_2 \right) + \frac{3}{\pi} \left( \frac{X_{1\sigma}}{k_e^2 \sigma} + X_{2\sigma} \right) \quad (2)$$

外串电阻只在启动过程中工作,其功率等级的选择要综合考虑启动过程功率损耗。启动过程不同转速时,外串电阻消耗功率  $P_{\text{ef}}$  为

$$P_{\text{ef}}(s) = s^2 \left( \frac{U_1}{k_e^2 \sigma} \right)^4 \frac{R_{\text{ef}}^*}{[sR_{\text{ef}} + 1.58(1+s)R_2 + R_{\text{ef}}^*]^2} \quad (3)$$

此功率是关于转差率  $s$  的非线性函数。电机每完成1次启动,外串电阻即存在一个时段的功率消耗,进入同步速之后,外串电阻停止工作,将式(3)对转差率进行积分,可得每次启动过程中外串电阻的平均损耗为

$$P_{\text{ef\_ave}} = \int_0^1 P_{\text{ef}}(s) ds = \frac{1}{8} \left( \frac{U_1}{k_e^2 \sigma} \right)^2 \frac{(R_{\text{ef}} - 1.58R_2)}{(R_{\text{ef}} + 1.58R_2)^2} \quad (4)$$

### 2.3 主控芯片的选用

主控芯片采用dsPIC30F系列高性能16位数字信号控制器。该芯片具有的电机控制PWM(MCPWM)模块简化了产生多种同步脉宽调制输出的任务。同时,该芯片还带有QEI编码器接口,用于检测旋运动系统的位置和速度。对于增量式光电编码器,通常有A,B,Z信号,其中A/B脉冲信号的周期和相位表征转速和转向,Z信号为索引信号,每转动1周发1个脉冲。通过此接口可检测WR-PMM的实时转速,实现对启动控制系统IGBT斩波回路的转速闭环控制。

### 2.4 数据采集

WR-PMM启动过程中需根据实时转速进行PWM斩波调阻,因此转速的准确测量十分关键。编码器型号选:EH100/45。供电电压:DC 8~30 V。实时输出的脉冲信号经过调整电路,将脉冲电压等级降至5 V,从而可以由CPU的QEA/QEB管脚直接检测接收,通过对编码器A/B脉冲信号在固定时间内的电平跳变计数,计算实时角速度和转向。

为了避免脉冲电平干扰带来的转速计算误差,采用了CPU自带的数字滤波功能,根据电机最大转速  $n_{\text{max}}=1500 \text{ r/min}$  和编码器脉冲数  $P_{\text{ENC}}=1024 \text{ 脉冲/r}$ ,得到最小脉冲持续的时间:

$$t_{\text{min}} = \frac{30}{n_{\text{max}} \times P_{\text{ENC}}} \quad (5)$$

进而由下式确定滤波器分频比  $f_{\text{div}}$ ,这里取16。

$$f_{\text{div}} = M \times d_{\text{FIR}} / 3 \quad (6)$$

式中:  $M$  为时钟晶振,取 4 MHz;  $d_{\text{FIR}}$  为滤波脉冲

宽度。

根据上述分析,在转子外接电阻  $R_{\text{er}}$  确定的情况下,导通占空比可以根据式(1)进行计算。

## 3 WR-PMM 启动控制实验

控制部分主要器件和启动控制过程所需参数如表1所示。系统采用示波记录仪采集存储启动过程中转矩转速和电量瞬态数据。

表1 控制电路与电机主要参数

Tab.1 Main parameters of control circuit and WR-PMM

斩波控制器参数	WR-PMM参数
编码器:1 024 脉冲/r	额定功率:7.5 kW
整流模块:1 000 V/300 A	电压/电流:380 V/13.4 A
芯片:dsPIC30F5015	频率/转速:50 Hz/1 000(r·min <sup>-1</sup> )
IGBT:1 000 V/150 A	定子/转子电阻:0.91 Ω/2.32 Ω
外串电阻:5 kW/10 Ω	定子/转子漏感:2.74 mH/4.49 mH
斩波频率:10 kHz	定转子有效匝数比:0.56

### 3.1 WR-PMM 斩波启动实验分析

根据表1中所示的电机参数,对7.5 kW绕线转子永磁电机样机进行实验,在没有采用斩波调阻启动方法的情况下,即仅将WR-PMM转子绕组短路时,最大启动转矩仅为50 N·m。采用IGBT斩波调阻启动时,样机带不同负载启动时的转速变化情况如图3所示。

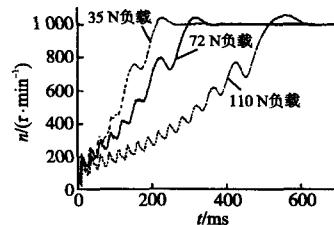


图3 WR-PMM转子斩波调阻启动时转速变化规律

Fig.3 Speed changes of rotor resistance chopper control of WR-PMM

实验结果表明,采用斩波启动控制时,最大启动转矩达到110 N·m,随着负载转矩的提高,启动时间逐渐延长,但都能保证牵入同步。

斩波调阻启动过程中,IGBT在接收到启动信号进入斩波状态,斩波占空比随电机转速的不断提高而变化,转子整流回路干路电流如图4所示。从图4的电流包络线可以看出,电机收到启动信号后,转子整流侧电流迅速升至最大值,近乎沿着最大电流包络线启动,此后随着电机转速接近同步速,电流逐渐减小,直至牵入同步后转子电流消失,电机启动过程近似准时间最优控制。

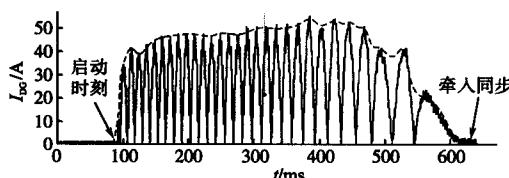


图4 转子整流回路干路电流(110 N·m)

Fig.4 The total current of rotor rectifier circuit(110 N·m)

### 3.2 WR-PMM 与鼠笼永磁电机对比分析

WRSL-PMSM 作为自启动永磁电机的一种,其稳态性能与鼠笼转子永磁电机基本一致,都有较好的效率和功率因数指标。但是,在启动性能方面,WR-PMM 具有转子电阻可调的优点,在提高启动转矩、制启动电流和改善牵入性能方面优势明显。

选取功率、转速和机座号等完全相同的WR-PMM 与鼠笼转子永磁电机做对比。在相同的电源和负载条件下,对比两种电机的启动特性。WR-PMM(额定负载 72 N·m)和鼠笼转子永磁电机(最大负载 45 N·m)启动电流有效值对比如图 5 所示。实验结果表明,WR-PMM 采用斩波调阻法可带额定 72 N·m 负载启动,而鼠笼永磁电机最大带载能力仅为 45 N·m。通过数据处理与折算,可得鼠笼转子永磁电机的启动电流冲击约为额定电流的 8.5 倍,而采用斩波调阻启动方法的 WR-PMM 启动电流冲击仅为 6.8 倍。

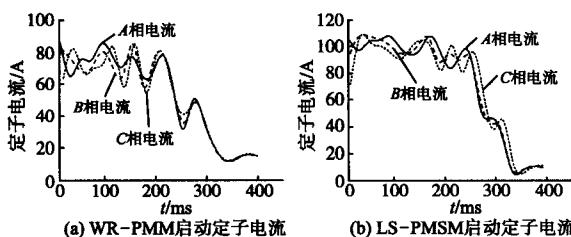


图5 WR-PMM 和鼠笼转子永磁电机启动定子电流

Fig.5 Stator starting current of WR-PMM and LS-PMSM

两种电机及其启动方法下转矩和转速变化过程如图 6 所示。

从图 6a 可知,WR-PMM 采用斩波调阻法带额定 72 N·m 负载与鼠笼永磁电机带 45 N·m 负载启动过程相比,前者转矩冲击更小、合成异步转矩更大。而这也直接体现在图 6b 所示的转速变化过程中,可以看出在 WR-PMM 所带负载为鼠笼永磁电机 1.6 倍的情况下,启动时间仅为鼠笼永磁电机的 1/2,WR-PMM 更快进入同步转速,实现自启动永磁同步电动机启动过程的准时间最优控制。

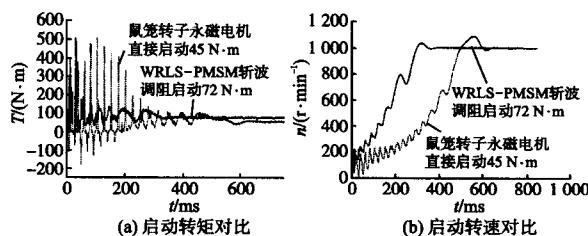


图6 启动转矩和转速对比

Fig.6 Contrast of starting torque and speed

### 4 结论

本文提出绕线转子永磁电机启动过程准时间最优控制方法。通过 WR-PMM 转子斩波调阻控制策略,有效提高 WR-PMM 启动能力。与不采用外串斩波调阻启动的 WR-PMM 相比,最大启动转矩可提高 80%以上,带载启动能力提高 1 倍以上,启动和牵入同步时间大幅度降低。相比鼠笼转子永磁电机,启动能力明显增强,启动时间大幅度减少,启动电流冲击可降低 20%以上,电流抑制效果明显,实现了启动过程准时间最优控制。

### 参考文献

- [1] 张健,罗应立,李和明,等.确定自启动永磁电机最小转矩的时步有限元仿真实验方法[J].中国电机工程学报,2011,31(21):102-109.
- [2] 刘秀君,李伟力,陈文彪.三相异步启动永磁同步电动机启动特性[J].电机与控制学报,2006,10(3):269-274.
- [3] 李超.绕线转子自启动永磁电动机的设计及其性能分析[D].沈阳:沈阳工业大学,2012.
- [4] Feng Guihong, Li Chao, Zhang Bingyi. Analysis on Starting Performance of a Novel Wound Rotor Line-start Permanent Magnet Synchronous Motor [C]//2011 International Conference on Electrical Machines and Systems. China: Beijing, 2011: 1969-2015.
- [5] 张杰.绕线转子自启动永磁同步电机启动过程的优化控制[D].沈阳:沈阳工业大学,2014.
- [6] 伍小杰,曹兴,夏帅,等.IGBT 驱动保护电路研究[J].电气传动,2010,40(10):13-17.
- [7] 沈天飞,陈伯时,龚幼民.异步电机转子 IGBT 斩波调速的准动态模型[J].电机与控制学报,2001,5(1):20-23,39.
- [8] SHEN Tianfei, CHEN Boshi. Study on Rotor IGBT Chopper Control for Induction Motor Drive [J]. Journal of Shanghai University, 2001,5(1): 66-70.
- [9] 祁强,张广溢.异步电动机转子电阻斩波调速系统的特性分析与仿真研究[J].电机与控制学报,2005,9(1):86-89.