

# 绕线式电机新型节能起动拓扑结构的仿真研究

何春晗, 任开春\*, 张兴起

(重庆通信学院 军事电力工程系, 重庆 400035)

**摘要:** 为了实现电机启动中能耗的再利用, 分析了电机机械特性和转矩与转差率关系, 推导出电机保持最大恒转矩启动时转子上电流变化规律。采用不可控整流电路与可控电流源相结合, 取代电机启动时转子上串接的电阻, 避免了大量电能以热能形式在电阻上损耗掉。可控电流源通过 Boost 电路实现; 在启动过程中, 可以将 Boost 电路吸收的能量通过逆变输出至电网或其他交流负载, 从而达到节能的目的。仿真结果表明, 电机具有最优的起动效果。

**关键词:** 恒转矩; 转差率; 可控电流源; 节能; Boost

中图分类号: TH113

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2010)09-0108-04

## Simulation of winding motor with new topology in energy-saving starting

HE Chun-han, REN Kai-chun, ZHANG Xing-qi

(Department of Military Power Engineering, Chongqing Communication Institute, Chongqing 400035, China)

**Abstract:** Aiming at realizing the re-utilization of energy in the motor starting, the mechanical properties and electrical torque with slip were analyzed, the current variation was derived when the motor starting with constant torque and keeping the maximum. Using non-controlled rectifier circuit combined with the controlled current source to replace the resistance on rotor when the motor starting, a lot of energy loss on resistance with the form of heat was avoided. Controllable current source can be realized with Boost circuit. During the startup, the energy that Boost circuit absorbed can be sent to the power grid through the inverter, the energy saving was achieved. The simulation results indicate that the motor starting has the best effect.

**Key words:** constant torque; slip; controlled current source; energy-saving; Boost

### 0 引言

港口、矿井等是电能消耗大户, 广泛采用龙门吊车、浮吊、绞车、行车等大型机械设备, 由于具有重载启动、频繁启制动的特点, 一般采用绕线式异步电机。

绕线式异步电机启动时通常采用转子串电阻启动的方式, 产生较大的启动转矩, 以满足重载启动的需要, 并缩短启动时间; 随着转速的升高, 逐渐减小串接电阻; 启动完毕后, 将串接电阻短路, 电机便在额定状态下运行。由于启动电流大, 串接电阻通常选用笨重的生铁, 串接电阻上消耗的能量是巨大的。同时, 启动过程中转子中的转差损耗无法再利用, 因而造成了能源的极大浪费。

本研究根据双馈调速的思想<sup>[1]</sup>, 提出启动的新型拓扑结构。该结构在满足启动时间、转矩、电流前提

下, 避免了传统启动过程中转子上串接电阻上产生的能耗; 同时, 还可以将启动过程中的转差损耗通过拓扑结构逆变至电网。本研究方案在大型电机控制领域是一次创新, 具有很大的经济效益。

### 1 电磁转矩与转差率关系分析

三相异步电动机的输出机械功率为输出机械转矩与转速的乘积。输出转矩又是电磁转矩的主要成分, 而转速的派生量为转差率, 又是异步电动机的基本量之一。所以研究三相异步电动机的电磁转矩  $T_{em}$  与转差率  $s$  的关系十分重要。已知电磁转矩方程为:

$$T_{em} = \frac{3u_1^2 \frac{r_2}{s}}{2\pi f_1 \left[ \left( r_1 + \frac{r_2}{s} \right)^2 + (x_1 + x_2)^2 \right]} \quad (1)$$

式中  $r_1, r_2$ —定子每相电阻和折合到定子侧的转子每相电阻;  $x_1, x_2$ —定子每相电抗和折合到定子侧的转子每相电抗;  $s$ —转差率;  $u_1, f_1$ —定子相电压和供电频率。

在式(1)中  $r_1, x_1$  为定子侧参数,当电动机选型后保持不变;  $u_1, f_1$  在启动过程中也不变。若  $s, x_2$  已知,则有  $T_{em} = f(r_2)$ , 令:

$$\frac{dT_{em}}{dr_2} = 0$$

得:

$$r_2 = s \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2)^2} = sk \quad (2)$$

其中:  $k = \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2)^2}$

式(2)为保持最大转矩启动时转子上总电阻值,与转差率成正比。

又已知异步电动机运行时其转子相电动势、每相漏抗、电流为:

$$E_r = sE_{r0} \quad (3)$$

$$X_r = sX_{r0} \quad (4)$$

$$I_r = \frac{E_r}{\sqrt{r_2^2 + X_r^2}} \quad (5)$$

式中  $s$ —异步电机的转差率;  $E_{r0}$ —转子开路电动势,也就是转子额定相电压值;  $X_{r0}$ — $s = 1$  时的转子绕组每相漏抗;  $I_r$ —转子回路的相电流。

由式(2)、式(3)、式(4)、式(5)可推出,最大恒转矩启动时转子每相电流  $I_r$  应保持恒定。

## 2 基于 Matlab/Simulink 的拓扑结构仿真实现

启动拓扑结构如图1所示:启动过程中,将转子侧的三相交流整流后作为 Boost 电路的输入,根据式(2)、式(3)、式(4)、式(5)的推导可知,Boost 电路主要实现恒流源功能;Boost 电路在启动过程中吸收的能量,又可通过逆变输出至电网或负载,从而达到节能的目的。

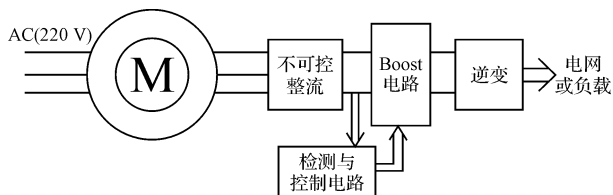


图1 电机启动拓扑结构的框图

转子串可控电流源仿真模型如图2所示。其分析如下<sup>[2-7]</sup>:

电机模型: Simulink/SimPowerSystems/Asynchronous Machine SI Units

测量模块: Simulink/SimPowerSystems/Machines Me-

asurement Demux

仿真参数:  $u_1 = 220 \text{ V}$ ,  $p = 2$ ,  $f_1 = 50 \text{ Hz}$ ,  $r_1 = 0.095 \Omega$ ,  $x_1 = 0.680$ ,  $x_2 = 0.672$ ,  $x_m = 18.7$ ,  $J = 2.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。

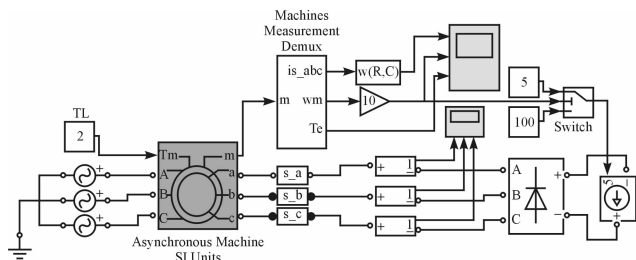


图2 转子串可控电流源仿真模型

仿真结果如图3、图4所示,电机在启动过程中控制可控电流源的输出为恒定值(100 A),当检测转速达到额定转速时需立即减小电流源输出(减至约5 A左右),否则会出现电机飞车现象。当电机达到额定转速后,电磁转矩与负载转矩保持平衡,电机在额定转速下运行。启动时转子电流变化如图4所示,通过观察可知与理论推导相符合。因此,为下一步采用 Boost 电路实现恒流源功能的研究提供了理论和实践依据。

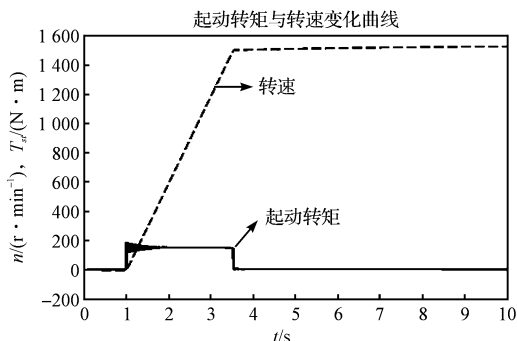


图3 启动转矩与转速仿真波形

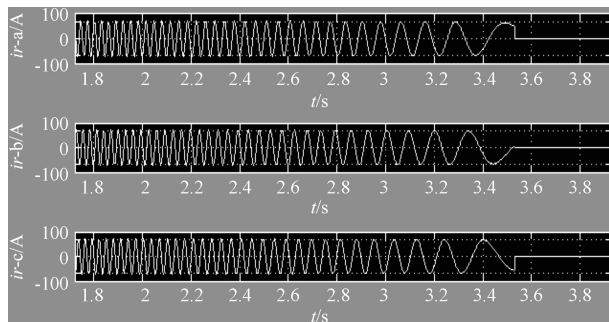


图4 启动过程中转子电流波形

## 3 Boost 电路实现恒流源功能的仿真分析

本研究根据实际的工程应用,对图2所示仿真模型中的恒流源采用 Boost 电路实现,由于启动过程中转子上电动势不断变化,造成 Boost 电路输入的波动,

此时可采用模糊控制算法解决由于波动而造成 Boost 电路输出不稳定问题。

### 3.1 Boost 电路模块

Boost 电路仿真模块如图 5 所示,在图中,主要通过控制输出负载上的电压值,从而保证了整流输出回路上的电流恒定;输出电压的控制采取电压闭环控制,通过 PWM\_Generator 子系统产生的 PWM 脉冲控制电路中的 MOSFET 导通与关断。根据经验比较,在产生 PWM 脉冲时采用模糊控制效果比较好。

### 3.2 仿真结果与分析

Boost 电路实现恒流源仿真模型如图 6 所示。由

于启动过程中转子电动势  $E_r = sE_{r0}$ ,随着转差率的变化 Boost 电路的输入会出现较大的波动;而应用模糊控制算法则可以解决这一难题<sup>[8-11]</sup>。仿真结果如图 7 所示,启动转矩和转速都能够满足要求。

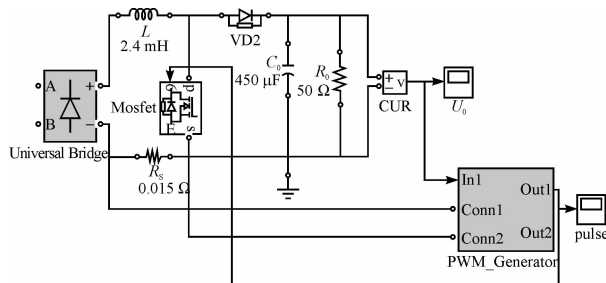


图 5 Boost 电路仿真模块

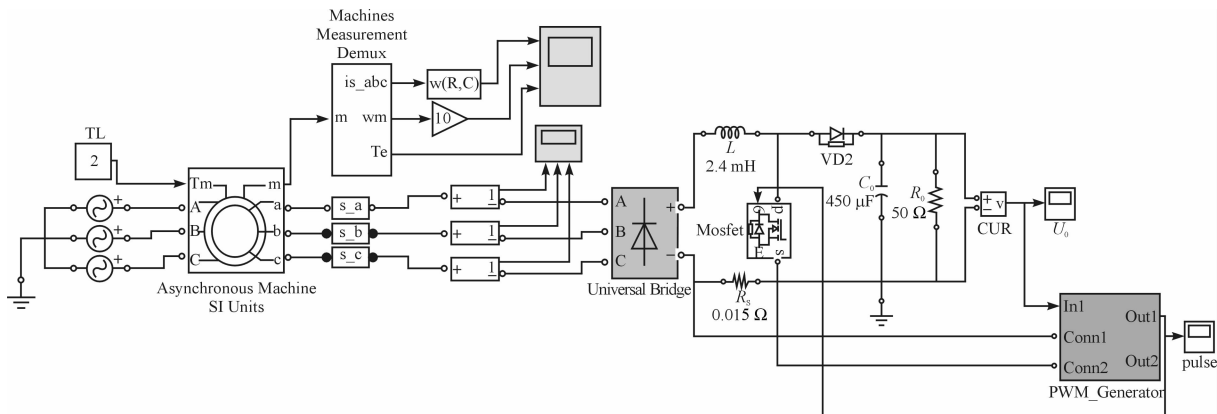


图 6 Boost 电路实现恒流源仿真模型

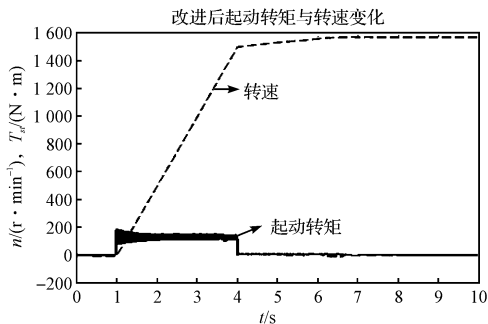


图 7 Boost 电路实现恒流源仿真结果

本研究提出的拓扑结构主要作用是在满足电机恒转矩启动前提下,避免转子上串电阻产生的能耗。同时,该拓扑可以吸收转差损耗的能量,以达到再利用目的。已知在启动过程中转差损耗  $P_s = sP_M$  ( $P_M$  为电磁功率)。则电机在启动过程中,除了避免转子串电阻上的能耗,每次启动过程中该拓扑结构还将节约的能量值约为  $\int_0^t f(s) P_M dt (W)$  (其中  $t$  为启动时间,  $f(s)$  为启动中转差率的变化)。

## 4 结束语

大型绕线电机在传统启动过程中大量电能以热能

形式在电阻上损耗掉,同时,一些传动机构和操作设备需定期更换;采用本研究提出的拓扑结构,在满足电机启动要求前提下,避免了电阻上的能耗,同时,采用 Boost 电路吸收启动过程中的能量,通过逆变将吸收的能量回馈至电网或其他负载,从而达到节能目的。目前该拓扑结构仅能实现启动时的节能,而制动的节能实现还需进一步研究。

### 参考文献 (References) :

- [1] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统—运动控制系统[M]. 北京:机械工业出版社,2003.
- [2] 郝世勇. Matlab 电机仿真精华 50 例[M]. 北京:电子工业出版社,2007.
- [3] 张晓华. 控制系统数字仿真与 CAD[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [4] 顾绳谷. 电机及拖动基础[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
- [5] 杨黎明,厉虹,郑业明,等. 机电传动控制技术[M]. 北京:国防工业出版社,2007.
- [6] 张燕宾. 电动机变频调速图解[M]. 1 版. 北京:中国电力出版社,2003.
- [7] 陈瑜. 电力电子与运动控制技术[M]. 北京:中国电力出版社,2003.
- [8] LIAO S P, LIN H T, LIN C J. A Note on the Decomposition Methods for Support Vector Regression[R]. National Taiwan University,2001.

- [9] OSUNA E, FREUND R, GIROSI F. An Improved Training Algorithm for Support Vector Machines [C]//Neural Networks for Singnal Processing-Proceedings of the 1977 IEEE Workshop. New York: [s. n.], 1997:276-285.
- [10] ZHOU Q, WU W, LIN J. AC-SPWM-Cycloconverter based on an Extended Chopper Scheme [C]. Proceedings of 7th

International Conf on Power Electronics. Daegu: [s. n.], 2007.

- [11] FLYM E P, SLATER R D, WOOD W S. Transient negative torques in induction motors due to rapid reconnection of the power supply [J]. **Proc. IEE**, 1969, 116(12):2009-2014. [编辑:李辉]

(上接第82页)

可适应不同轴距的拖拉机检测。台架没有电机驱动,简化了结构,可节省检测成本。

(3) 通过不同档位制动情况的检测试验,证明该试验台架能实时记录车辆制动过程,直观地反映出车辆制动性能的优劣,且工作可靠,可客观地评价拖拉机道路行驶中的制动性能。

#### 参考文献 (References):

- [1] Wrest Park History Contributors. Chapter 3 tractors and vehicles [J]. **Biosystems Engineering**, 2009, 103(1):36-47.
- [2] KIM J H, KIM K U, WU Y G. Analysis of transmission load of agricultural tractors [J]. **Journal of Terramechanics**, 2000, 37(3):113-125.
- [3] GB7258-2004 机动车运行安全技术条件 [S]. 北京:中国标准出版社, 2004.

- [4] HEINRICHS B E, ALLIN B D, BOWLER J J, et al. Vehicle speed affects both pre-skid braking kinematics and average tire/roadway friction [J]. **Accident Analysis and Prevention**, 2004, 36(5):829-840.

- [5] 赵奇平, 陈汉汛. 制动器性能试验智能 CAD 系统实现 [J]. 武汉理工大学学报:信息与管理工程版, 2003, 25(4):15-18.
- [6] 黄孝慈, 张海波. 整车制动性能检测技术的发展 [J]. 上海工程技术大学学报, 2007, 21(1):41-45.
- [7] 王文山, 马明星. 车辆制动检测实验台架的研制开发 [J]. 成组技术与生产现代化, 2006, 23(2):12-15.
- [8] 茅庆潭. 几种汽车制动力检测设备的优缺点分析 [J]. 交通标准化, 1999(4):6-7.
- [9] 蒋波, 严朝勇. 影响反力式滚筒制动试验台检测精度的因素 [J]. 农业装备与车辆工程, 2007, 189(4):36-38.
- [10] 曹一江, 刘晓为, 马兆铭. 光敏 Z-元件转速测量系统的研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(8):1334-1336. [编辑:柴福莉]

(上接第91页)

#### 参考文献 (References):

- [1] WU Guo-xiang, CHEN Guo-cheng, GAO Da-peng. An Investigation on Idle Load Cutting-in Control Strategy for Variable Speed Constant Frequency (VSCF) Wind Power Generation [C]. World Automation Congress, 2008. Chongqing: [s. n.], 2008.
- [2] 于文波, 童建东, 刘成斌, 等. 变速恒频双馈风力发电机空载并网滑模控制 [J]. 沈阳工程学院学报:自然科学版, 2007, 3(1):10-12.
- [3] 夏长亮, 王慧敏, 宋战锋, 等. 变速恒频双馈风力发电系统空载并网积分变结构控制 [J]. 天津大学学报, 2008, 41(11):1281-1286.
- [4] 李 岚, 杨一雄. 双馈风力发电机空载并网控制 [J]. 微特电机, 2009, 37(2):50-52.
- [5] 刘其辉, 贺益康, 张建华. 交流励磁变速恒频风力发电机

的运行控制及建模仿真 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5):43-50.

- [6] 刘其辉, 贺益康, 卞松江. 变速恒频风力发电机空载并网控制 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3):6-11.
- [7] 梁 亮, 李建林, 高志刚, 等. 双馈感应式风力发电机并网研究 [J]. 电气传动, 2008, 38(9):11-13.
- [8] 兰 华, 刘座铭, 童建东, 等. 双馈风力发电机空载并网控制策略研究 [J]. 继电器, 2008, 36(10):11-14.
- [9] MULJADI E, BUTTERFIELD C P, PARSONS B, et al. Effect of variable speed wind turbine generator on stability of a weak grid [J]. **IEEE Trans. Energy Convers**, 2007, 22(1):29-36.
- [10] HUGHES F M, ANAYS-LARA O, JENKINS N, et al. A power system stabilizer for DFIG-based wind generation [J]. **IEEE Trans. Power Syst.**, 2006, 21(2):763-772. [编辑:李辉]

(上接第95页)

#### 参考文献 (References):

- [1] [奥地利] WAKILEH G J. 电力系统谐波-基本原理、分析方法和滤波器设计 [M]. 徐政, 译. 北京:机械工业出版社, 2003.
- [2] 王兆安. 谐波抑制和无功功率补偿 [M]. 北京:机械工业出版社, 1998.
- [3] 尉云峰. RC 有源滤波器优化综合技术研究 [J]. 机电工程, 2002, 19(4):34-35.
- [4] 赵文强, 陈国柱. 改进型 LCL 滤波器拓扑在有源滤波器

中的应用 [J]. 机电工程, 2008, 25(12):39-42.

- [5] 张 宁, 宋福根. 单调谐波滤波器设计及其在谐波治理中的研究 [J]. 电气技术, 2008, 13(6):27-28.
- [6] 张明江, 纪延超, 张妍芳. 无源滤波器方案设计探讨 [J]. 黑龙江水专学报, 2008, 35(1):102-105.
- [7] 洪乃刚. 电力电子和电力拖动控制系统的 Matlab 仿真 [M]. 北京:机械工业出版社, 2006.
- [8] 洪乃刚. 电力电子和电力拖动控制系统的 Matlab 仿真 [M]. 北京:机械工业出版社, 2006. [编辑:李辉]