

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.01.015

# 基于有限功率的太阳能飞轮储能系统研究\*

刘朝涛<sup>1</sup>, 张毅<sup>2</sup>

(1. 重庆交通大学机电与汽车工程学院, 重庆 400074; 2. 重庆市轨道交通(集团)有限公司, 重庆 401120)

**摘要:**针对传统光伏电池供电功率小且不稳定无法常规驱动异步电动机拖动飞轮高速运转的问题,对光伏电池的供电规律、飞轮储能系统的原理和特点、电机的运行特性等方面进行了研究,提出了一种基于功率追踪模型的控制策略,利用系统中的功率追踪模型计算出了需要的控制参数,结合矢量控制方法对电动机进行了功率控制,该模型可以根据检测到的电池输入功率的变化不断地修正控制参数,从而形成动态控制达到了功率追踪的目的,在 Matlab/Simulink 环境下建立了仿真模型并且进行了仿真分析。研究表明,该系统能够时时地检测光伏电池的输入功率,电机的电磁功率能够有效地追踪输入功率,并且电机能够拖动飞轮以较高速运转,响应速度快且控制性能良好,达到了功率控制的目的,具有可行性与实际性。

**关键词:**光伏电池;异步电动机;功率追踪;矢量控制;Matlab/Simulink;

中图分类号:TM914.4

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)01-0073-06

## Based on the limited power of solar flywheel energy storage research

LIU Chao-tao<sup>1</sup>, ZHANG Yi<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical and Automotive Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Chongqing Rail Transit (Group) Co., Ltd, Chongqing 401120, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the traditional photovoltaic cells power was too low and unable to conventional drive flywheel high-speed by asynchronous motor, photovoltaic battery power rule, the principle and characteristic of flywheel energy storage system, operation characteristics of the motor were studied. A power control system was proposed based on the model track. Intensive sampling method was adopted to power samples provided by the photovoltaic cells, and used model to calculate the corresponding control parameters, combined with vector control method for motor power control; The objective of the power track achieved by the model that could be detected according to the change of the battery power input constant revision control parameter to form a dynamic control. In the Matlab / Simulink environment simulation model was established and analyzed. Research results indicate that the system can effectively track the input power, and motor can drive flywheel operate at a higher speeds, response fastly and have good control performance. It reaches control purposes, is feasibility and practicality.

**Key words:** photovoltaic cells; asynchronous motor; power tracking; vector control; Matlab/Simulink

## 0 引言

近年来,由于太阳能以其无污染、清洁的优势,已经成为发展的热点,光伏发电在未来能源系统中占据非常重要的地位<sup>[1]</sup>。虽然光伏发电有着诸多的优点,

但是太阳能的缺点也很明显,输出功率不稳定;由于输出功率的不稳定使得直接利用太阳能变得困难,必须将其能量进行存储。

不同的储能技术有不同的特点,尤其在能量密度和功率密度这两个最重要的关键技术指标上,兼具较

收稿日期:2015-11-09

基金项目:重庆市教委科学技术研究项目(KJ120409)

作者简介:刘朝涛(1968-),男,四川南充人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事新能源及电气传动技术方面的研究. E-mail:36990439@qq.com

高能量和功率密度的新型储能技术是发展的一个重要方向<sup>[2]</sup>。蓄电池储能存在着体积大储能密度低,生产成本高且废旧电池易对环境产生污染等问题。飞轮储能技术是一种新兴的,清洁的储能方式;相比于传统的蓄电池储能有更高的能量及功率密度、对环境无污染,寿命长等特点<sup>[3,4]</sup>。飞轮储存的能量取决于飞轮叶片的旋转速度,速度越快储存的能量就越多,飞轮由与其同轴的电机驱动,由于飞轮装置处于真空装置中,阻力十分小,控制电机就可以控制飞轮的速度。主流的飞轮储能系统多半是同步电机作为驱动电机,虽然同步电动机的控制性能较好,易于调速,但是结构较为复杂且性价比不高。在本研究的飞轮储能系统中,驱动电机采用的是异步电机,异步电机性价比较高并且在太阳能输出功率较低无法拖动飞轮转动的时候,切断电机的励磁电压,电机几乎处在一个损耗很小的环境下,易于节能,适用于电机需要经常开断的环境下<sup>[5]</sup>。

通用的异步电机调速系统都是通过接入电网而获得功率,电网的功率相对电机是无穷的。当利用太阳能给异步电机供电时,功率受到了限制,不再能够提供无穷大的功率。

为了解决在受限功率的情况下的驱动飞轮和电机调速问题,本研究将建立功率追踪模型,再结合矢量控制对电机进行变压变频调速,使电机以较高速率驱动飞轮并且使电磁功率和输入功率基本保持一致。

## 1 建立系统模型

该系统模型主要包括光伏电池模型、飞轮控制模型、功率追踪模型和变频控制模型。

### 1.1 光伏电池模型

光伏电池模型主要分为物理模型和外特性模型两大类。物理模型主要通过分析光电转换具体过程实现,其模型较为复杂。外特性模型则是根据其运行特性分析,得出的等效电路模型。本研究采用外特性模型对光伏电池建模,光伏电池模型可以简化成一个输出电流为  $I_p$  的恒流源与一个二极管并联的简化模型,如图1所示。

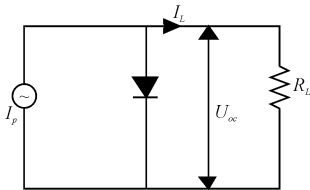


图1 光伏电池等效模型

$U_{oc}$ —光伏电池开路电压; $I_L$ —光伏电池输出电流; $R_L$ —负载电阻。

光伏电池发电过程中会受到很多外在因素(比如光照强度和温度)的影响,在外在因素发生变化的时候输出电流  $I_L$  发生变化导致输出电压的变化,且功率也会发生变化<sup>[6-7]</sup>。

### 1.2 飞轮的控制模型

飞轮储能装置的机械结构主要分为以下几个部分:①飞轮叶片,采用金属或玻璃纤维等高强度材料制成,以抵抗高速旋转产生的强大应力;②轴承,用来支撑飞轮,多用磁悬浮材料等构成;③电机及其控制器,主要是用来驱动飞轮叶片旋转;④真空容器及壳体,用来降低摩擦,并且保护设备。

由此可见,飞轮储能装置的核心控制部件为电机,本研究仿真所用的电机为异步电动机,由电动机作为原动机拖动飞轮运转,飞轮相对于电机被等效成一个负载转矩加在电机上。由于异步电动机动态数学模型是一个高阶、强耦合、非线性、多变量的系统,相对于直流电机的动态数学模型要复杂得多。为了使得异步电动机能够像直流电机那样取得良好的控制特性,本研究中采用矢量控制中的间接矢量控制即转差频率控制。

转差频率法不需要观测转子磁链的实际位置,定向是通过控制转差频率来实现的。在转差频率中按磁场定向的要求将定子电流矢量  $i_s$  分解为励磁分量  $i_M^*$  和转矩分量  $i_T^*$ ,有:

$$i_s^2 = i_M^{*2} + i_T^{*2} \quad (1)$$

转差频率和定子频率之间有关系:

$$\omega_s = \omega_r + \frac{i_T^*}{T_r i_M^*} \quad (2)$$

式中: $\omega_r$ —转子频率, $\omega_s$ —定子频率。

等式第二项即为转差频率  $\omega_f$ ,由  $\omega_f$  和  $i_s$  就可以唯一确定  $i_M^*$  和  $i_T^*$ ,这就是磁场定向的原理。

磁场定向后将复杂的异步电机系统解耦转化成了和直流电机控制相类似的控制方式。在本研究的仿真系统中采用的是电压型逆变器,所以需要将相应的电流控制转化为电压控制,其变化关系为:

$$u_M^* = R_s i_M^* - \omega_s L'_s i_T^* \quad (3)$$

$$u_T^* = R_s i_T^* + \omega_s L_s i_M^* + L'_s \frac{di_T^*}{dt} \quad (4)$$

式中: $u_M^*$ ,  $u_T^*$ —定子电压的励磁分量和转矩分量; $R_s$ —定子绕组电阻; $L_s$ —定子电感; $L'_s$ —定子瞬态电感<sup>[8-9]</sup>。

这样  $u_M^*$ ,  $u_T^*$  经过  $2\pi/3s$  变换,得到 SPWM 逆变器的三相电压控制信号,从而控制逆变器的输出电压。

综上所述,电机控制模型需要控制定子电流的励磁分量  $i_M^*$  和转矩分量  $i_T^*$ ,在后面功率追踪模型中将实现对电机模型的追踪控制。

### 1.3 功率追踪模型

功率追踪模型是该系统模型中的核心控制部分,它将实现电机的输出功率实时追踪输入功率,与其保持基本一致,且逐步提高转速拖动飞轮,将光伏电池的电能转化为机械能储存在飞轮里面。

功率追踪模型的输入为电机的电磁功率和光伏电池所提供的功率,为了保证输入功率的精度,采样密度十分重要,在模型中,采样间隔为  $5 \times 10^{-6}$  s。电磁功率  $P_e$  机械表达式如下式所示:

$$P_e = T_e * \omega \quad (5)$$

式中: $T_e$ — 电机的电磁转矩, $\omega$ — 电机的机械角速度。

由于飞轮与电机为单联轴系统,电机的机械角速度与飞轮的机械角速度相等。

功率追踪模型通过不断监测两个功率值之间的变化来判定是否开启功率追踪。当电机刚开始启动的时候,电机的电磁功率小于输入功率时,不开启功率追踪时,电机以正常方式启动;当电机电磁功率达到输入功率的时候,开启功率追踪时,电机的运转将受到功率追踪模型输出的影响,使得电机的电磁功率始终保持和光伏电池输入功率一致,控制原理框图如图 2 所示。

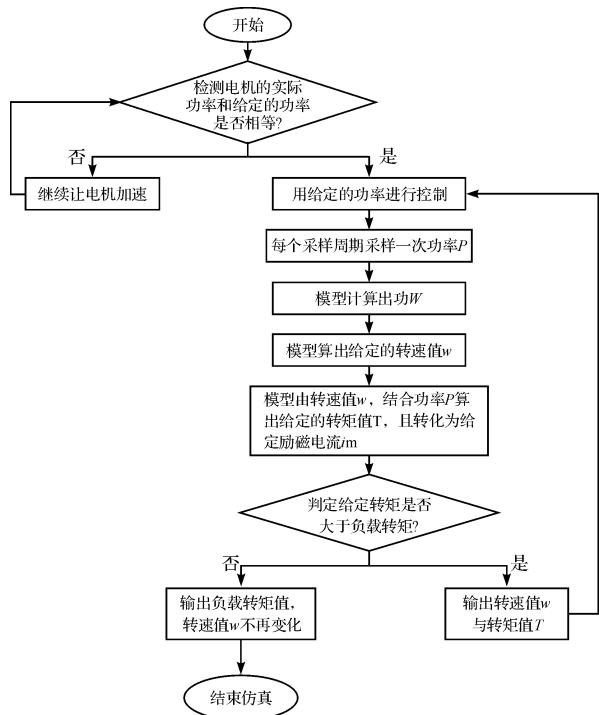


图 2 功率追踪模型控制原理框图

因为电机的转差频率控制模型输入的变量为电机的转速  $n$  和定子电流的励磁分量  $i_M^*$ ,而在功率追踪控

制模型中,最先通过内置的算法算出得到的结果是电机的转速给定值  $\omega^*$  和转矩给定值  $T^*$ ,需要内置的算法将控制电机的电磁转矩经过计算转化为定子电流的励磁分量给定值输出给电机控制模型,由于后续的电机电控是采用转差频率控制的,所以定子电流矢量  $i_s^*$  在 MT 轴系内的相位  $\theta^*$  为:

$$\theta^* = \arctan \frac{i_T^*}{i_M^*} \quad (6)$$

转差频率  $\omega_f$  为:

$$\omega_f = \frac{1}{T_r} * \frac{i_T^*}{i_M^*} \quad (7)$$

式中: $T_r$ — 转子时间常数,是一个定值。

电机的电磁转矩  $T_e$  的电流矢量表达式为:

$$T_e = p_0 \frac{L_m^2}{L_r} i_M^* i_T^* \quad (8)$$

式中: $p_0$ — 极对数, $L_m$ — 定子绕组电感, $L_r$ — 转子绕组电感。

将式子(6,7)代入式(8)得:

$$T_e = p_0 \frac{L_m^2}{L_r} i_M^{*2} T_r \omega_f \quad (9)$$

从这个式子可以得到电磁转矩  $T_e$  和定子电流的励磁分量  $i_M^*$  的关系式,可以将控制电磁转矩转化为控制定子电流的励磁分量。将转速给定值  $\omega^*$  和定子电流的励磁分量给定值  $i_M^*$  输入到电机的控制系统中,从而实现对电机的控制。

Simulink 是基于框图的仿真平台,Simulink 挂接在 Matlab 环境中,以 Matlab 强大的数学计算为基础,用直观的模块框图进行仿真与计算。本研究按照图 2 的功率追踪模型原理框图在 Matlab/Simulink 中搭建功率追踪模型的仿真模型,功率追踪模型的仿真模型如图 3 所示。

在模型中,In1— 电机的电磁功率,In3— 光伏电池的输入功率;Out1— 输出定子电流的励磁分量给定值  $i_M^*$ ,Out2— 输出转速给定值  $\omega^*$ 。

### 1.4 变频控制模型

三相异步电动机的转速总是略低于同步转速,而电机的同步转速是由电源的频率决定的。

异步电机的同步转速为:

$$n = \frac{60f_1}{p} \quad (10)$$

改变电源的频率  $f_1$  就可以改变电机的同步转速,异步电机的变频调速不仅仅可以实现无极调速,并且在平滑性和调速前后电机性能方面都比较好,使得变频调速应用日益广泛。

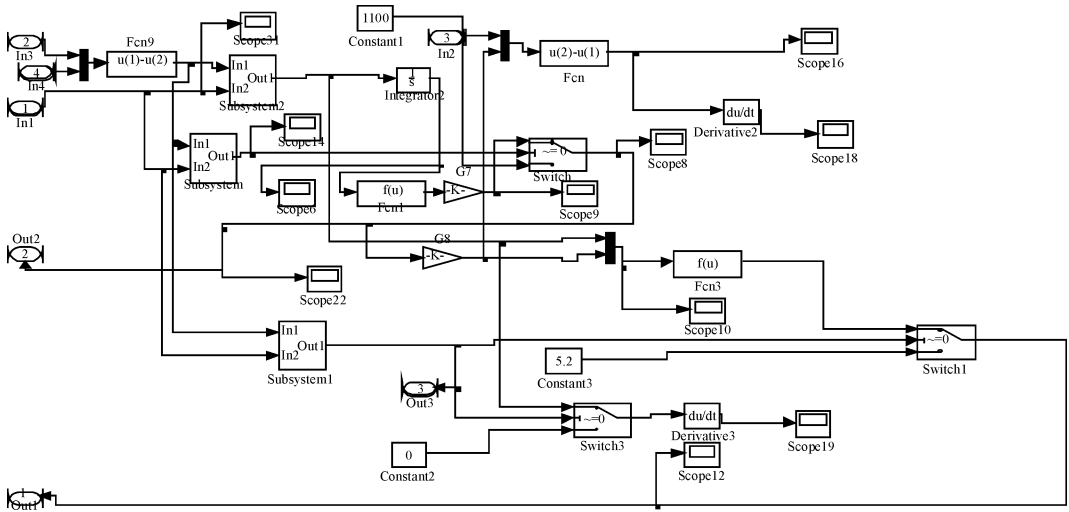


图 3 功率追踪的 Simulink 仿真模型

本研究中对电机的转速控制采用的是改变电机的频率  $f_1$ ，即使用变频调速。在改变电源的频率时，电动机的同步转速和转子的转速都将随之而变化。在本研究的控制系统中，将调频的过程分为两个部分，即在基频以下的时候，通过保持磁通为定值，通过调节电枢电压，使得转矩为恒定值；当频率升高到基频以上的时候，保持电枢电压不变，减弱磁通的值，降低转矩来提高转速<sup>[10]</sup>。

系统中担任变压变频任务的是逆变器，逆变器由 6 只开关频率较高的功率开关器件组成。本研究中采用 SPWM 法来控制逆变器每个功能开关的导通和关断的顺序和时间<sup>[11-13]</sup>，在矢量控制模型的输出端输出

需要控制的电压幅值和频率，控制器按照要求通过输出三相幅值和频率可变的正弦波，然后用可调的正弦波与锯齿波进行比较，产生相应的矩形脉冲来控制逆变器，使逆变器输出某一周期的一系列幅值相等、宽度不同、正负交变的三相矩形脉冲电压波，从而实现同步变压变频的任务。

## 2 系统模型仿真及结果分析

### 2.1 系统模型仿真

本研究在每个模块的仿真模型搭建成功以后将各个模块的 Simulink 仿真模型连接在一起搭建整体的仿真模型，整个系统的 Simulink 仿真模型如图 4 所示。

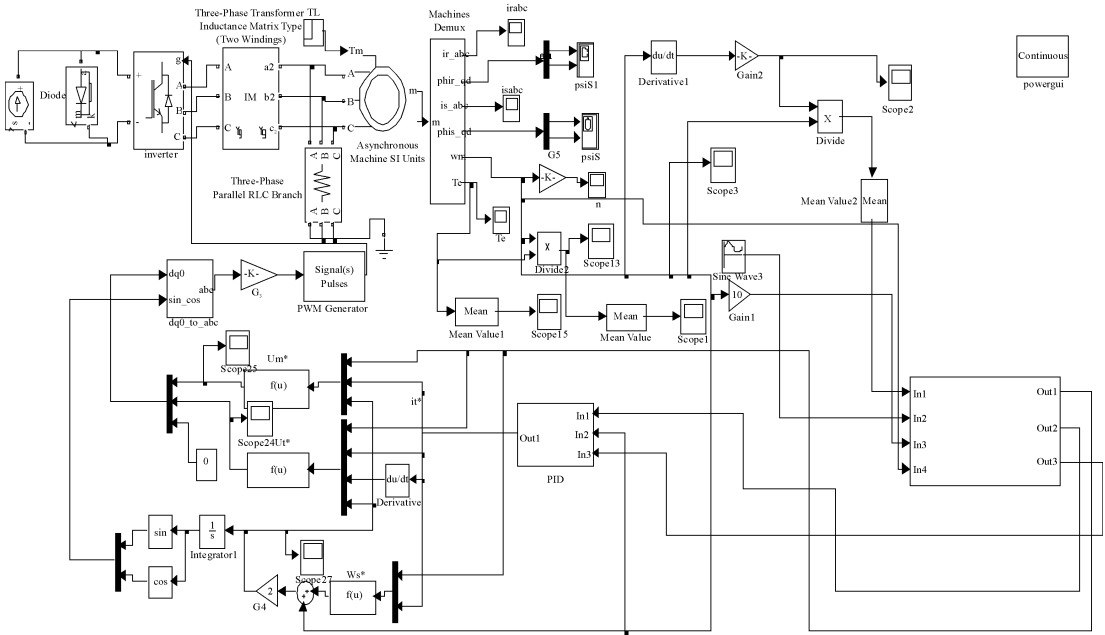


图 4 整体系统的 Simulink 仿真模型

整个系统仿真模型图大致由主电路、功率追踪模型、电机矢量控制模型和数据采集显示模块等组成。

主电路中的三相交流异步电动机额定功率为 10.5 kW；额定电压为 380 V；额定频率为 50 Hz；同步

转速为 1 500 r/min。飞轮的转动惯量为  $18.7 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ，由于飞轮是在处于接近真空的状态下运转，摩擦阻力特别小，所以负载转矩  $T_L$  取为  $0.1 \text{ N} \cdot \text{m}$ ，用来模拟电机拖动飞轮的负载。数据采集显示主要采集电机的定子转子的电流和电机的转速、转矩以及电磁功率。

## 2.2 运行仿真及仿真结果分析

在所有模块连接检查无误后，运行仿真，仿真时间为 200 s。仿真结束后，光伏电池提供的功率如图 5 所示。

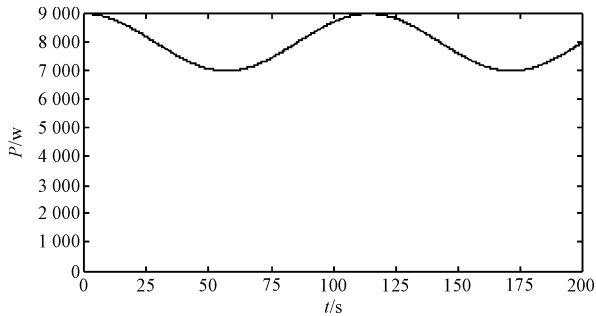


图 5 光伏电池提供的功率

由图 5 可以看出，光伏电池提供的功率在 7 000 W ~ 9 000 W 之间变化。

电机的电磁功率如图 6 所示。

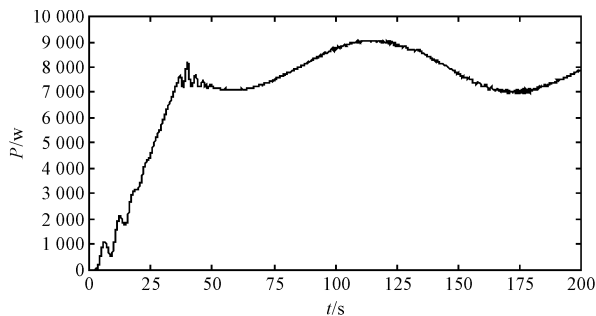


图 6 电机的电磁功率

在图 6 中，在 0 ~ 40 s 之间，电机电磁功率小于光伏电池提供的功率，电机以正常方式启动，功率追踪模型不工作；在 40 s 以后，功率追踪模型开启工作，经过很短时间的调整后，电机电磁功率与光伏电池提供的功率基本相等，最大误差小于 5%。

电机的转速如图 7 所示。

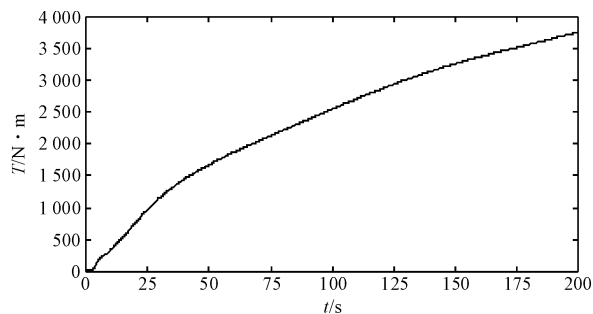


图 7 电动机转速

从图 7 看出无论电机的电磁功率是减小还是增大，电机的转速都能增加，在 200 s 末电机的转速已经达到 3 750 r/min(电机的同步转速为 1 500 r/min)。

电机平均转矩如图 8 所示。

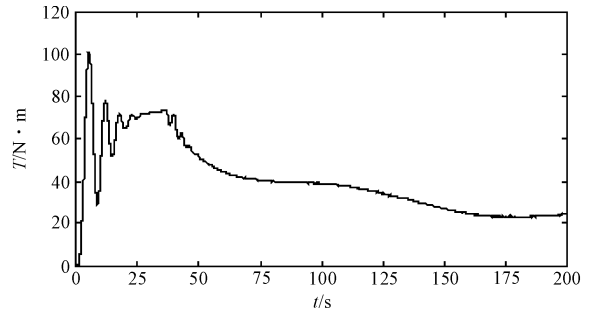


图 8 电机的平均转矩

在图 8 中，转矩能够按照输入功率的变化而做出调整；在 0 ~ 40 s 时，电机按照转差频率控制以最大转矩启动，保证了启动的快速性；在 40 s ~ 200 s 时，电机的平均转矩随着输入功率的减小而减小，随着输入功率的增加而保持不变或者较小幅度的增加。

光伏电池提供的能量与飞轮储存的动能如表 1 所示。

表 1 光伏电池提供的能量与飞轮储存的动能

电池提供的能量(50 s ~ 200 s) 飞轮储存的动能(50 s ~ 200 s)	
1 150 kJ	991.1 kJ

从表 1 中的数据可以得出本研究建立的系统的效率比  $\eta = 991/1\ 150 = 86.2\%$ ，系统将大部分光伏电池提供的电能转化为了飞轮的机械能，满足设计要求。

## 3 结束语

本研究提出了在有限的太阳能电池供电功率的情况下，设计了功率追踪模型及改良了电机控制模型。利用 Matlab/Simulink 仿真工具，对整套系统进行了仿真，并且实现了重要仿真结果的输出。

综上所述，从仿真模型和结果可以看出，功率追踪模型能够定时投入使用，使得电机的电磁功率能够一直追踪光伏电池的输入功率，能够随着输入功率的变化而变化，且误差很小，能够满足要求；由于功率追踪模型的输入，使得在不太大的输入功率情况下，电机能够以较高转速运转起来，并且驱动负载，实现了能量的转化；并且使得电机的转矩得到了动态的控制，使得整个系统的机械性能得到了大大的提高。结果证明，本研究建立的控制模型具有良好的实用性可以移植到其他控制系统中。

参考文献 (References) :

[1] 黄庆丰,杨红培,翟登辉. 基于 Simulink 的两级式单相光伏逆变器的系统仿真[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(19):58-61.

[2] 高尚,祁新春,谢涛,等. 共直流母线光伏-混合储能发电系统及其双重滤波优化控制[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(20):92-97.

[3] 柳黎明. 基于矢量控制的异步电机转速和转矩调节技术[J]. 机电工程,2011,28(4):504-508.

[4] 何杰,王家军. 基于 SVPWM 的永磁同步电动机系统建模与仿真[J]. 机电工程,2009,26(7):77-82.

[5] 万山民,陈晓. 感应电动机转子磁场定向下的弱磁控制算法[J]. 中国电机工程学报,2011,31(30):93-99.

[6] 赵争鸣,陈剑,孙晓璞. 太阳能光伏发电最大功率点追踪技术[M]. 北京:电子工业出版社,2012.

[7] 张冰冰,邱晓燕,刘念,等. 基于混合储能的光伏波动功

率平抑方法研究[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(19):103-109.

[8] 王成元,夏加宽,孙宜标. 现代电机控制技术[M]. 北京:机械工业出版社,2014.

[9] LIN P Y, LAI Y S. Novel voltage trajectory control for field-weakening operation of induction motor drives [J]. **IEEE Trans. on Industry Applications**,2011,47(1):122-127.

[10] 汤蕴缪,罗应立,梁艳萍. 电机学[M]. 3 版. 北京:机械工业出版社,2008.

[11] 李叶松,雷力. 基于转子磁场定向的异步电动机弱磁方法研究[J]. 电力电子技术,2007,41(5):34-35.

[12] 齐琛,陈希有,牟宪民. PWM 逆变器混合扩频调制技术[J]. 中国电机工程学报,2012,32(24):38-44.

[13] 朱军,田森,付融冰,等. 基于载波频率成分的永磁同步电机转子定位研究[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(14):48-54.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

刘朝涛,张毅. 基于有限功率的太阳能飞轮储能系统研究[J]. 机电工程,2017,34(1):69-78.

LIU Chao-tao, ZHANG Yi. Based on the limited power of solar flywheel energy storage research[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017,34(1):69-78.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 32 页)

[4] GALLARDO-ALVARADO J, POSADAS-GARCÍA J. Mobility analysis and kinematics of the semi-general 2(3-RPS) series-parallel manipulator[J]. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**,2013,29(6):463-472.

[5] ZENG Q, FANG Y. Structural synthesis and analysis of serial-parallel hybrid mechanisms with spatial multi-loop kinematic chains[J]. **Mechanism and Machine Theory**,2012,49(3):198-215.

[6] YI LU, LEINONEN TATU. Solution and simulation of position-orientation for multi-spatial 3-RPS parallel mechanisms in series connection [J]. **Multibody Syst Dyn**,2005,14(1):47-60.

[7] YI LU, BO HU. Analyses of kinematics/statics and workspace of a 2(SP + SPR + SPU) serial-parallel manipulator [J]. **Multibody Syst Dyn**,2009,21(4):361-370.

[8] YI LU, BO HU. Solving driving forces of 2(3-SPR) serial-parallel manipulator by CAD variation geometry approach [J]. **ASME Journal of Mechanical Design**,2006,128(6):1349-1351.

[9] JAIME G A, CARLOS A N, LUIS C R, et al. Kinematics and dynamics of 2(3-RPS) manipulators by means of screw theory and the principle of virtual work [J]. **Mechanism and Machine Theory**,2008,43(10):1281-1294.

[10] ARASH RAHMANI, AHMAD GHANBARI, MEHRAN

MAHBOUBKHAH. Direct Kinematics Solution of 2-(6UPS) Hybrid Manipulator based on Neural Network [J]. **Journal of World's Electrical Engineering and Technology**,2015,4(1):21-28.

[11] KUANG-CHAO FAN, HAI WANG, JUN-WEI ZHAO, et al. Sensitivity analysis of the 3-PRS parallel kinematic spindle platform of a serial-parallel machine tool[J]. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**,2003,43(3):1561-1569.

[12] ZHENG X Z, BIN H Z, LUO Y G. Kinematic analysis of a hybrid serial-parallel manipulator [J]. **Int J Adv Manuf Technol**,2004,23(4):925-930.

[13] 胡波. 基于约束力/矩的少自由度并联机构和串并联机构理论研究[D]. 秦皇岛:燕山大学机械工程学院,2010.

[14] 李树军,李德锡,权太国. 一种 3 自由度串并联平台型机器人机构[J]. 东北大学学报,1996(6):65-68.

[15] 胡波,宋春晓,王安东,等. n(3-RPS)混联机构静力学和刚度模型[J]. 燕山大学学报,2015(5):408-413.

[16] 梁辉,李伟,赵宇,等. 2(3-RPS)并串运动平台的奇异性分析[J]. 青岛科技大学学报:自然科学版,2016,37(1):67-72.

[17] 晏祖根,王瑞泽,孙智慧,等. 四自由度并联机器人运动学分析[J]. 包装与食品机械,2014(2):34-36,57.

[编辑:李 辉]