

# The Research of Flywheel Solar Energy Storage System Based on Peak Power and Point Tracking

Chaotao LIU<sup>1</sup>, Qing XIA<sup>2</sup>

Electrical and Vehicle institute of Chongqing Jiaotong University, ChongQing, 400074

**Abstract:** Aimed at various factors of problem about the output power of photovoltaic cells will be influenced by environmental temperature and solar radiation intensity, studied on the law of power supply of photovoltaic cells, the principle of flywheel energy storage system and the characteristics of motor operation, presented a control system of MPPT model based on peak power and point tracking, combining with motor speed regulation MPPT's control algorithm adopt incremental conductance method in direct control method based on data. It makes the photovoltaic cells always work on the point of peak power, which formed the dynamic control achieve the peak power point tracking, and built the simulation mode of MPPT to analyse simulation in the environmental of Matlab or Smulinks. Research results show that the system can change the work point of photovoltaic cells according to environmental temperature, and make it work on the peak power point which will improve conversion efficiency of photovoltaic cells. It is proved to be feasible and practical.

**Keywords:** Photovoltaic cells; MPPT; Flywheel energy storage; Conductance increment

## 基于最大功率的点跟踪的太阳能飞轮储能系统的研究

刘朝涛<sup>1</sup> 夏清<sup>2</sup>

重庆交通大学 机电与车辆工程学院, 重庆 400074

**摘要:** 针对光伏电池组的输出功率会受到环境温度和阳光的辐射强度等多种因素的问题, 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, 提出了一种基于最大功率的点, 的跟踪 MPPT 的控制系统, MPPT 的控制算法采用基于数据的直接控制法中的电导增量法, 并与电机调速相结合。使得光伏电池能够始终工作在最大功率输出点上。从而形成了动态控制达到了最大功率点的跟踪的目的, 在 Matlab/Simulink 环境下建立 MPPT 的仿真模型并且进行仿真分析。研究结果表明, 该系统可以根据环境的等因素的改变而调整光伏电池的工作点, 使它工作在最大功率点附近, 从而提高光伏电池的转化效率。具有可行性和实际性。

**关键词:** 光伏电池; MPPT; 飞轮储能; 电导增量

### 1 引言

随着经济的快速发展, 能源的短缺问题越来越严重。因此, 解决能源短缺问题迫在眉睫。而解决能源短缺问题的主要方法就是对新型能源的开发和利用。目前, 太阳能光能发电技术已较为成熟, 光伏发电系统在未来能源系统中占据非常重要的地位[1], 已经正式应用于实际。但是太阳能发电装置有着输出能量不均匀。传输过程中能量的损失严重等。其中主要的难点就在于能量的储存。

飞轮储能技术能够降低配套输电线路容量需求, 缓解电网调峰压力。同时还能消除光伏发电的波动, 改善电力质量, 降低电网电力系统的运行成本, 减少碳排放量引起的缓解污染, 利于环保[2]。而且运行噪

声小, 维护简单, 寿命长。在本次研究的系统中选的电机是异步电机, 因为它能作为发电机也能作为电动机, 而且适于连续的开断处理。它能在太阳能输出功率低的时候切断电机的励磁电压, 电机几乎穿在一个损耗很小的环境下, 易于节能, 适用于电机需要开断的环境下[5]。

太阳能光伏发电控制中首先要解决最大功率跟踪问题。光伏电池的输出功率会受到环境温度和阳光的辐射强度等多种因素的影响。在用光伏电池利用太阳能发电的过程中外界的环境条件会发生变化, 这时候光伏电池的 U-P 曲线也会随之发生变化, 且它有且职业一个最大的功率输出点; 而人们总希望光伏电池能够始终工作在其最大功率输出点上。最大功率点跟踪 (Maximum Power Point Tracking, MPPT) 技术是一种通

过实时监测光伏电池的输出功率，按照特定的算法对监测到的输出功率进行分析，预测出可能的最大功率输出，从而调整光伏电池的工作点，使其工作在最大功率点附近的技术。本文的 MPPT 的控制算法采用基于采样数据的直接控制法中的电导增量法。使得它能实时确定光伏电池的最大输出功率点的近似值。

## 2 建立系统模型

该系统主要建立以下模型：光伏电池组模型、异步电机的工作模型和最大功率的点跟踪电导增量法模型，飞轮的控制模型。下面将对这些模型进行简单的介绍。

### 2.1 光伏电池模型

光伏电池是根据光电效应原理制作而成的。在光伏电池的结构中，每一个“PN 结”都是一个能量转换站，在这里光能转化为了电能，太阳能电池板中的每一个光伏电池的外特征模型都可以看作是由一个正向二极管和一个恒定电流源组成的并联电路。其中最为典型的等效电路模型为单二极管模型，如图 1：

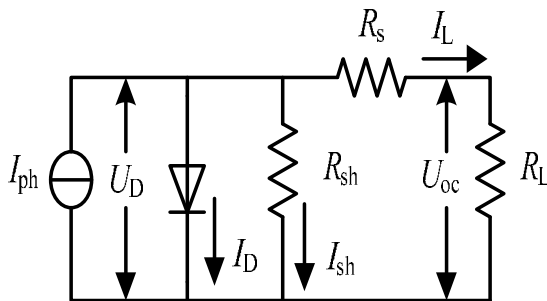


图 1. 光伏电池等效模型图

$U_{oc}$ ：光伏电池输出电压； $I_L$ ：光伏电池组输出电流； $R_L$ ：外部负载。

光伏电池组发电受到很多因素的影响，其中最明显的是光照强度和所处环境的温度的影响。在外界环境发生变化时，光伏电池组所产生的电流发生变化，从而影响到光伏电池组输出电压。而当电压改变时，负载所获得的功率也会随之改变，且它的电压和功率之间满足在不同的环境下会对应有一个最大功率的点，而且此时的电压是唯一的。

### 2.2 异步电机的工作模型

采用三相异步电机拖动的太阳能飞轮储能系统

中，带飞轮的异步电机的功率是与转速的平方成正比，而异步电机的调速是需要调节电机的励磁磁场的旋转频率来实现，因此本文中的 MPPT 是需要同电机调速相结合，而且是非线性的。

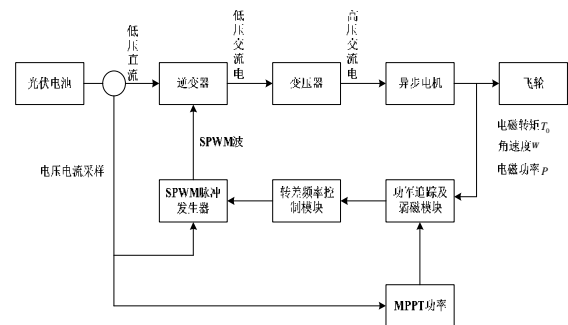


图 2. 异步电机带动的太阳能飞轮储能控制系统框图

控制系统的整体结构框架可以分为光伏电池及 MPPT 组件、逆变器及附属电路、变压器及附属电路、三相交流异步电机及监测装置、飞轮储能系统、功率跟踪模块、转差频率控制模块以及 SPWM 脉冲发生器等组成模块，根据以上组成模块的功能和属性搭建系统的原理框图。

表 1. 电动机（容量 10.5kW）参数

电压	380V	频率	50Hz
定子绕组电阻	0.435Ω	定子绕组电感	0.004H
转子绕组电阻	0.816Ω	转子绕组电感	0.004H
互感	0.0693H	转动惯量	0.189kg*m <sup>2</sup>
摩擦系数	0	极对数	2

光伏电池及 MPPT 组件中，由于供电功率较大，使用光伏电池组进行供电，光伏电池组由若干块光伏电池组成，为了能够使得供给电机的正常运转和抵消中途的损耗，光伏电池组提供给异步电机的功率在 7000W 至 9000W 之间变化，组件中的 MPPT 采用电导增量法根据光伏电池输入功率的变化，不断寻找那个时候功率的最大输出点，使得光伏电池能够始终以当时的最大功率输出，输出的电压在 45~50V 之间变化；逆变器是由三组绝缘栅极双极型晶体管(IGBT)和三组续流二极管组成的三相全桥式逆变电路组成，其开关速度快、所需的驱动功率小、驱动电路简单，采用全控性器件 IGBT 作为逆变器中的主要的电力电子器件，提高了逆变器的可控性；变压器是完成由低压

交流电到高压交流电的重要工具，本文中的变压器采用的是高频变压器，变压器的体积与其工作的频率成反比，工作频率越高体积越小，为了能够在实际应用中能够尽可能的减小空间而选用高频变压器；异步电机采用三相交流异步电动机，具体的参数如表 1 所示。

### 2.3 最大功率的点跟踪的电导增量法模型

光伏电池的输出功率会受到环境温度和阳光的辐射强度等多种因素的影响。在日照与温度参数固定的情况下，光伏电池的输出功率和输出电压关系曲线类似于一个二次函数；每条 U-P 曲线都有一个拐点，拐点处的功率即光伏电池的最大功率输出，且拐点处对应的电压只有一个；此时光伏电池的工作点就是输出电压-输出功率曲线的最高点，称为最大功率点 (Maximum Power Point) [6]。人们总希望光伏电池能够始终工作在其最大功率输出点上。最大功率点跟踪 (Maximum Power Point Tracking, MPPT) 技术是一种通过实时监测光伏电池的输出功率，按照特定的算法对监测到的输出功率进行分析，预测出可能的最大功率输出，从而调整光伏电池的工作点，使其工作在最大功率点附近的技术，从而大大的提高了光伏电池转化效率。

MPPT 的控制算法有很多种，若根据 MPPT 控制算法的相关特征以及具体实现机理的过程，可以将 MPPT 的控制算法分为三个大类：1. 基于参数选择方式的间接控制法；2. 基于采样数据的直接控制法；3. 基于现代控制理论的人工智能控制法[12]。

当外界环境温度和光照强度发生变化时，为了使得系统的动态和稳态响应性能良好，能够及时且准确的跟踪到最大功率点，结合本文中的实际情况，本文的 MPPT 的控制算法采用基于采样数据的直接控制法中的电导增量法。

电导增量法的控制原理就是对采集到的电池电压和功率信号进行出来，判据为功率对电压导数  $dP/dU$ ，判定此时的判据  $dP/dU$  的正负，然后通过调节电压的值来使得光伏电池工作在最大功率点的附近，这样就实现了光伏电池的最大功率输出。例如由光伏电池的 U-P 曲线图 2.6 可以看出，电池工作在在最大输出功率点处，判据功率对电压的导数  $dP/dU = 0$ ，当电池工作在最大输出功率点左方时，此时判据  $dP/dU > 0$ ，这时通过提高工作电压的方式

就可以提高电池的输出功率；当电池工作在最大输出功率点的右方时，此时判据  $dP/dU < 0$ ，这时通过降低工作电压的方式就可以提高电池的输出功率。通过许多次的不断修正判定，就可以使得光伏电池始终工作在最大输出功率点附近。

在 Matlab/Simulink 中建立 MPPT 的电导增量法控制仿真模型如图 3



图 3. MPPT 电导增量法仿真模型

### 2.4 飞轮的控制模型

飞轮储能装置是由一系列的机械构件组成的能量转换装置，充电时电能转化为机械能储存起来，放电时机械能转化为电能释放出去，飞轮的升速与降速就实现了能量的转换。飞轮储能装置的机械部分大致可以分为以下几个部分：1. 飞轮本体，由于飞轮本体需要较高速度旋转，一般选用质轻且强度高的金属或者高强度玻璃纤维等材料制成，这样才能抵抗高转速下的强大应力；2. 轴承，用于支撑飞轮本体，因为需要降低阻力，现在多采用磁悬浮轴承系统；3. 电机的控制器，主要对电机进行控制；4. 真空容器及保护壳体，由于需要减少充电及放电过程与空气等介质摩擦造成的损耗，整个飞轮储能装置将处于真空环境下，并设有保护壳体保护整个飞轮储能装置。如图 4 为飞轮储能装置的结构图。

## 3 系统模型仿真及结果分析

### 3.1 系统模型仿真

根据上述各个仿真总体结合在一起，得到整个系统的仿真模型图如图 5 所示。

光伏电池和 MPPT 组件的初始参数为温度 25 度，光照强度为 1200W/m<sup>2</sup>，随着仿真的进行，光伏电池的参数会发生变化来模拟最大功率的点跟踪的变

化；逆变器为三相逆变器，逆变器中选用的电力电子元器件为绝缘栅极双极型晶体管(IGBT)。

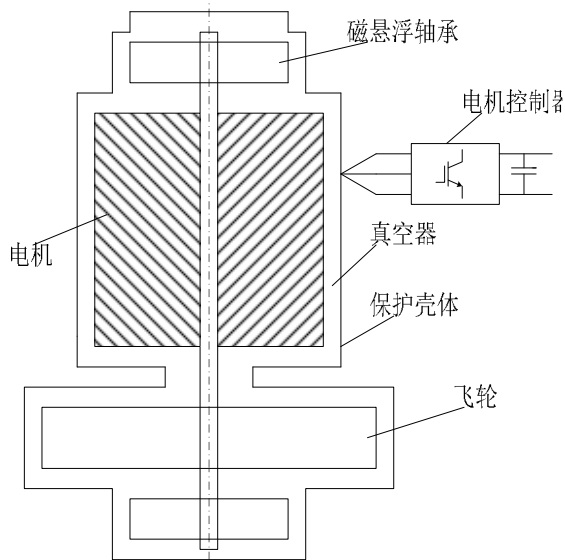


图 4. 飞轮储能装置结构图



图 5. 整个系统的仿真模型

逆变器中的电路组成形式为三相全桥式逆变电路，阻尼电阻为  $100k\Omega$ ；变压器的额定容量为  $105VA$ ，工作频率为  $10kHz$ ，变比为  $1:11$ ，三相交流异步电机的基本参数为：额定的电压为  $380V$ ，额定的频率为  $50Hz$ ，额定的功率为  $10.5kW$ ，额定的磁极对

数  $p=2$ ，额定的同步转速为  $1500r/min$ ，转动惯量  $J=0.189kg\cdot m^2$ ，互感  $L_m=0.069mH$ ，定子绕组的电阻为  $R_s=0.435\Omega$ ，定子绕组的电感为  $L_{ls}=0.002mH$ ，转子绕组的电阻为  $R_r=0.816\Omega$ ，转子绕组的电感为  $L_{lr}=0.002mH$ 。定子绕组的自感为  $L_s=0.071mH$ ，转子绕组的自感为  $L_r=0.071mH$ 。三相交流异步电机拖动飞轮叶片旋转时的阻力矩  $T_N$  为  $0.1N\cdot m$ ，飞轮叶片的转动惯量  $J_N$  为  $18.7kg\cdot m^2$ ，整个仿真控制系统在 Matlab/Simulink 环境下的仿真时间为  $200s$ ，采用的仿真算法为 ode5。

### 3.2 运行仿真结果分析

将所模块连接好检查无误以后进行仿真，当外界环境的温度设置为  $25$  度，光照强度输入分别设置为  $1200W/m^2$  和  $1000W/m^2$  时，得到电压-功率(U-P)曲线如图 6 所示；电压-电流(U-I)曲线如图 7 所示。

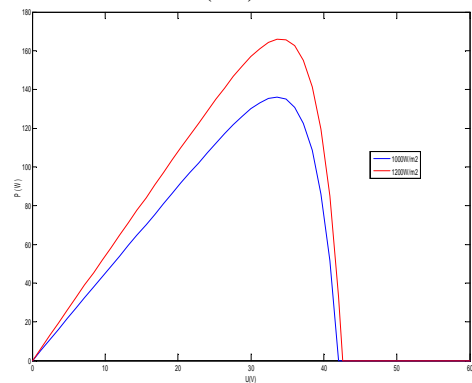


图 6. U-P 曲线

由图 6 可知在一定的条件下，光伏电池组的输出功率和电压之间有一定的关系，且它有唯一的一个拐点，此时的功率最大。

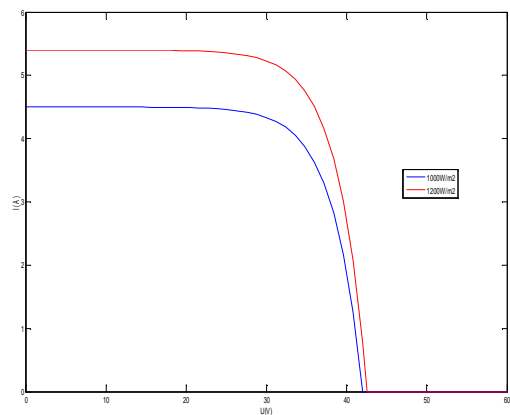


图 7. U-I 曲线



由图 6 图 7 可知光照强度越大, 输出电流越大, 输出的功率也越大。

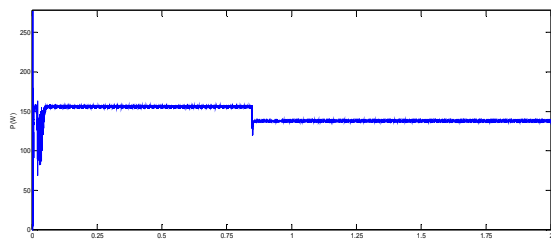


图 8. 功率曲线

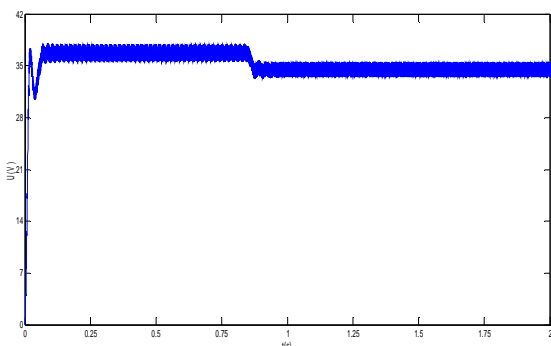


图 9. 电压曲线

由图 8 和图 9 所知, 在 0.85s 以前, 光照强度为 1200W/m<sup>2</sup>, 光伏电池的输出功率为 160W, 电压为 37V; 在 0.85s 时, 光照强度由 1200W/m<sup>2</sup> 突变为 1000W/m<sup>2</sup>, 由于 MPPT 的存在, 电压略有下降, 电压为 33V, 输出功率下降到 130W。由此证明, 由于 MPPT 的存在, 使得在外界环境条件发生变化后, 光伏电池系统能够进行有效的调节, 使工作点处于最大输出功率点附近, 符合设计要求。

#### 4 结束语

本次研究基于太阳能飞轮储能的系统中关于最大功率的点跟踪的研究。设计为 MPPT 电导量法的控制模型, 利用 Matlab/Simulink 仿真工具, 对整套系统进行仿真, 并获得重要的仿真结果的输出。

综上所述, 从仿真模型的结果可以看出, 最大功率点跟踪的电导量法控制模型能够投入使用。使得它能一直跟踪在不同环境下的光伏电池的最大功率点, 而且它的误差很小, 最大功率点唯一, 使得它给予电机的功率一直最大, 能够让能量更充分的使用, 节约能源。结果证明, 本文建立的控制模型具有良好的实用性, 并且可以移植到其他的控制模型中。

#### References (参考文献)

- [1] 陈侃, 冯琳, 贾林壮, 等. 基于 RTD 的光伏并网数字物理混合实时仿真平台设计[J]. 电力系统控制与保护, 2014, V42(3): 42-48.
- [2] Caldori R, Rossetto E, Turrir. Analysis of Dynamic Performance of Dispersed Generation Connected Through Inverter to Distribution[C]//17th International Conference on Electricity Distribution.
- [3] 骆妮, 李建林. 储能技术在电力系统中的研究进展[J]. 电网与清洁能源, 2012, V28(2): 71-79
- [4] 李雪松. 飞轮储能系统电动发电运行控制技术的研究[D]. [硕士学位论文]. 保定: 华北电力大学. 2006.
- [5] Shen Cui Feng. Neuron Decoupling and Adaptive PID Control of Three-motor Frequency Speed-regulation System[C]. Proceedings of the Third International Symposium on Test Automation & Instrumentation(Vol.1). 2010.
- [6] 赵争鸣, 陈剑, 孙晓瑛. 太阳能光伏发电最大功率点跟踪技术[M]. 北京. 电子工业出版社. 2012.
- [7] 徐文学. 光伏发电中的 MPPT 技术[D]. [硕士学位论文]. 湖北: 湖北工业大学. 2012.
- [8] Yu G J, Jung Y S, Choi J Y. A Novel Two-mode MPPT Control Algorithm Based on Comparative Study of Algorithms[C]//The 29th IEEE Conference on Photovoltaic Specialists, 2002: 1531-1534.
- [9] ESRAM T, Kimball J W, Krein P T. Dynamic Maximum Power Point Tracking of Photovoltaic Arrays Using Ripple Correlation Control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21(5): 1282-1291.
- [10] 王兆安, 刘进军. 电力电子技术[M]. 北京. 机械工业出版社. 2009.
- [11] 戴兴建, 唐长亮, 张凯. 先进飞轮储能电源工程应用研究发展[J]. 电源技术. 2009, V33(11): 1026-1028.
- [12] 李宝军, 王志新, 吴定国. 飞轮储能系统充放电过程建模与仿真研究[J]. 工业控制计算机. 2011, V24(12): 107-111.
- [13] 涂健. 基于太阳能光伏发电的飞轮储能系统研究[D]. [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学. 2011.
- [14] 王成元, 夏加宽, 孙宜标. 现代电机控制技术[M]. 第二版. 北京. 机械工业出版社. 2014.
- [15] 滕青芳, 范多旺, 董海鹰. 自动控制原理[M]. 北京. 人民邮电出版社. 2008.
- [16] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统[M]. 第三版. 北京机械工业出版社. 2010.
- [17] Joachim Holtz. Speed Sensorless Control in Induction Motor Speed Control System[J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2006, V53(1): 64-70.
- [18] 林永, 林飞, 焦连伟. 一种新的异步电机非线性控制策略[J]. 电机与控制应用. 2006(11): 25-34.
- [19] 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.
- [20] F. Briz, A. Diez, M. W. Degner, R. D. Lorenz. Current and Flux Regulation in Field-weakening operation[J]. IEEE Transaction on Industry Application, 2001, 37(1): 42-50.
- [21] Gabriel G L, Fani S G, James E W. Current Control of Induction Machines in the Field-weakened Region[J]. IEEE Transactions, 2007, 43(7/8): 981-989.
- [22] 周林, 武剑, 栗秋华等. 光伏阵列最大功率跟踪控制综述[J]. 高压技术, 2008, 34(6): 1145-1154.
- [23] 崔岩, 蔡炳煌, 李大勇等. 太阳能光伏系统 MPPT 控制算法的对比研究[J]. 太阳能学报, 2006, 27(6): 535-539.