

太阳能发电系统 MPPT 控制策略

王桥莉¹, 张文浪²

(1. 陕西东方航空仪表有限责任公司, 陕西 汉中 723000; 2. 陕西公众智能科技有限公司, 陕西 西安 710000)

摘 要: 现有的太阳能取之不尽、用之不竭, 是人类已知最清洁的能源, 光伏发电受到各界的广泛关注。然而太阳能电池的发电效率受到光照强度以及温度的影响, 在特定工况下只有将工作电压维持到一定值时才能使太阳能电池保持最大功率状态。首先介绍了光伏发电的原理, 其次分析了各项因素对太阳能发电效率的影响, 接下来利用扰动观测法实现了对太阳能电池最大功率点跟踪。仿真验证了该方法的有效性。

关键词: 光伏发电; 光照强度; 温度; 最大功率点追踪

中图分类号: TM615

文献标志码: A

DOI: 10.15913/j.cnki.kjycx.2022.09.023

随着化石能源的逐渐枯竭, 人类面临着能源危机。为了解决这些问题, 走可持续发展道路, 发展新能源是大势所趋, 太阳能有明显的优势, 受到世界各国的关注和重视。以太阳能发电系统作为研究对象, 并且进行太阳能发电系统的最大功率点跟踪控制进行仿真, 具有非常重要的实践意义^[1]。

太阳能电池作为太阳能发电的承载物和连接点, 其运行状态受到光照强度、温度以及负载等因素的影响。当光照强度升高时, 太阳能电池输出功率增加。当温度升高时, 太阳能电池输出功率输出降低。当光伏系统工作在一定条件时, 太阳电池存在的唯一功率输出最大点, 这个点也被称为光伏最大功率点。通过控制策略使太阳能电池工作在这个点的技术被称为 MPPT 控制策略 (Maximum Power Point Tracking, MPPT)^[2]。

基于光伏 MPPT 跟踪快速和振荡平稳抑制的要求, 本文首先介绍了光伏发电的基本原理, 并讲解了扰动观测法的工作原理, 仿真建模分析结果表明扰动观察法具有响应速度快、跟踪精度高、稳定性高等特点, 能很好满足光伏发电的 MPPT 实际运行要求。

1 太阳能电池的工作特性

1.1 太阳能电池的数学模型

太阳能是光的一种辐射能, 必须应用特定的辐射效应转换器将太阳能转化为电能, 这种转换器装置被称为太阳能电池。如图 1 所示, 常见的太阳能电池等效电路是用电流源与二极管并联, 电流源的功率输出受光照强度的直接影响。在理论推导时, 常假设电池等效模型中电流未泄漏, 串联电阻为零, 并联电阻无

穷大。

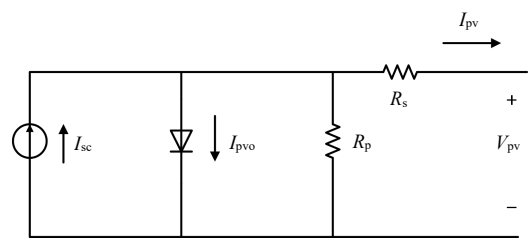


图 1 太阳能电池单二极管模型

列写基尔霍夫定律可得太阳能电池输出电流, 具体如下:

$$I_{pv} = I_{sc} - I_{pvo} \quad (1)$$

式 (1) 中: I_{sc} 为特定温度下的短路电流; I_{pvo} 为二极管电流。

$$I_{pov} = I_{rev} (e^{qV_{pv}/kT} - 1) \quad (2)$$

式 (2) 中: I_{rev} 为反向饱和电流; q 为电子电荷量 ($1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$); v 为二极管电压; k 为玻尔兹曼常数 ($1.381 \times 10^{-19} \text{ J/K}$); T 为开尔文温度。

利用式 (3) 可以近似求解:

$$I_{sc} = \left(\frac{G}{G_{st}} \right) I_{st} \quad (3)$$

式 (3) 中: I_{sc} 为光电效应短路电流; G 为辐射率; G_{st} 为在标准测试下辐射率; I_{st} 为在标准测试下电流值。

设置开路电压值可求解反向饱和电流值, 例如端口开路 (I_{pv} 为 0, V_{oc} 为 V_{pv})。

$$I_{rev} = \frac{IT}{e^{qV_{oc}/kT} - 1} \quad (4)$$

考虑将串联电阻、复合系数等因素^[3], 得到光伏电

流方程式:

$$I_{pv} = I_{sc} - I_{rev} (e^{qv/kT} - 1) \quad (5)$$

从上式可以看出当温度升高时, 太阳能电池输出功率略微减小; 当光照强度上升时, 输出功率提升较为明显。因此, 温度、光照强度等外界环境参数对太阳能电池的输出功率有较大影响^[4]。

1.2 Boost 变换器建模

一般太阳能电池输出电压小于电网电压的峰值, 经 Boost 变化升压后可提高电压, 有利于逆变并网, 因此本文选用 Boost 变换器作为 MPPT 控制的载体。Boost 拓扑图如图 2 所示。

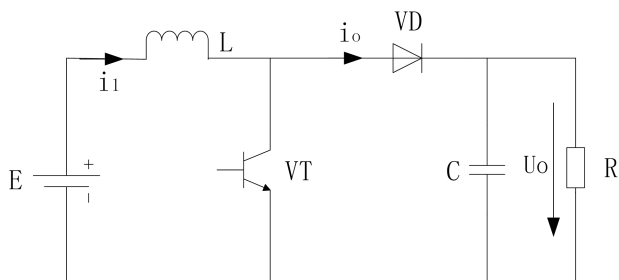


图 2 boost 功率控制电路

由图可知, 开关管 VT 导通, 输入电流流经电感 L 和开关管 VT, 电感电流开始储存能量, 二极管 VD 关断状态。当 VT 打开, L 线圈两端的极性将由线圈产生的磁场改变, 以保持电感电流不变, 电感电压再与电源 E 串联, 以高于 E 的电压向后级供电, 产生升压作用^[5]。

当后级系统需要大的电压时, 增大占空比升压; 当后级系统需要小的电压时, 减小 V 空比减压。利用占空比改变工作电压, 以改变功率的输出状态。

2 扰动观察法 MPPT 策略设计

接下来简述一下扰动观察法的基本原理。扰动观察法的原理图如图 3 所示。

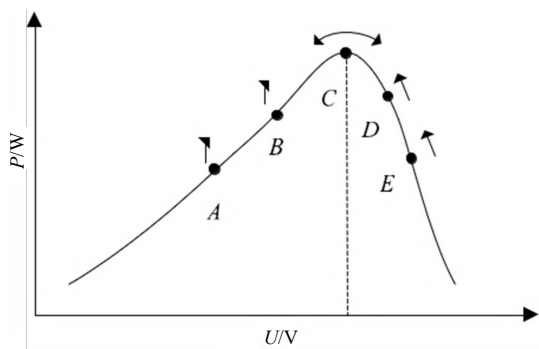


图 3 太阳能输出功率特性曲线

先假设太阳能电池的运行在其特性曲线的 A 点, 为保证太阳能电池输出更大的功率, 需向右移动, 即

增大工作电压, 以增加太阳能电池的输出功率, 此时太阳能电池将会达到太阳能输出特性曲线 B 点。相较于 A 点, 明显增加了输出功率。

其次, 继续判断是否达到最大功率输出的状态, 继续向正方向进行扰动, 增加输出电压, 从而使输出功率也不断的增加, 此时太阳能电池将会达到太阳能输出特性曲线 C 点。相较于 B 点, 明显增加了输出功率。

最后, 继续判断是否达到最大功率输出的状态, 继续向正方向进行扰动, 增加输出电压, 从而使输出功率进行减少随之降低。因此, 应适当转变电压扰动干扰方向, 以此保证太阳能电池输出功率处于最大的状态。

反之, 若一开始太阳能电池工作在 E 点, 进行上述搜索。会从 E 点, 减小工作电压, 改变太阳能电池的工作状态, 以获得太阳能电池尽可能大的功率输出, 则会继续向左工作, 转至 D 点。此时继续寻优搜索, 则降低工作电压, 从 D 转至 C 点, 以获得太阳能电池尽可能大的功率输出。

如此循环往复, 使太阳能电池始终在 C 点附近上下运行, 从而保证了太阳能电池持续输出最大功率。由于整个过程如爬山一样循环往复, 从山底到山顶, 反复寻求山顶太阳能功率输出最大的点。因此此种方法被称之为爬山法。

扰动观测法的流程图如图 4 所示。

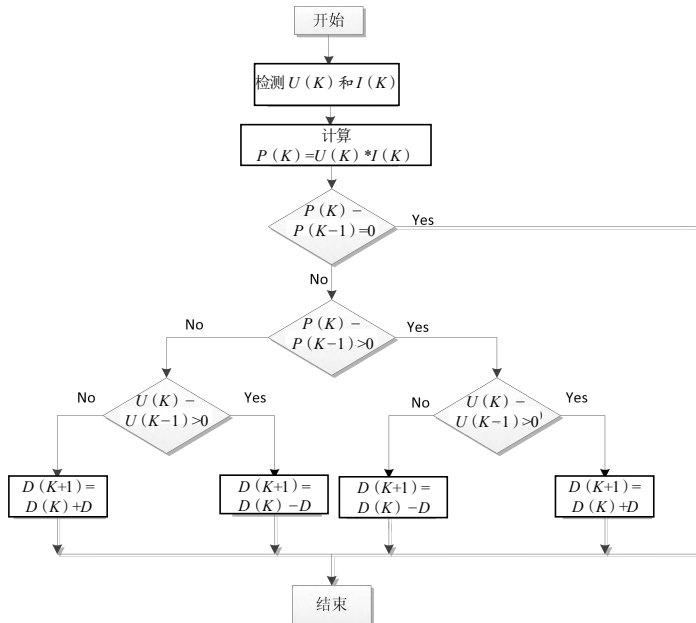


图 4 扰动观测法流程图

$U(K)$ 、 $I(K)$ 代表此刻的工作电压、工作电流, $U(K-1)$ 表示上一时刻的输出电压, $P(K)$ 代表此刻的输出功率, $P(K-1)$ 上一时刻的输出功率,

$D(K)$ 代表目前此时刻变换器的占空比, $D(K-1)$ 代表上一时刻占空比, $D(K+1)$ 代表下一时刻占空比, ΔD 代表占空比的改变量。则此方案的工作步骤如下。

首先, 采集 $U(K)$ 、 $I(K)$ 的实时数值, 得到此时太阳能电池的输出功率。

接着, 将这一时刻的输出功率 $P(K)$ 与上一个时刻的输出功率 $P(K-1)$ 比较。若是差值不为 0, 则代表此时就处于最大功率状态, 无需改变占空比, 以影响工作电压, 进而改变太阳能电池输出功率; 若差值为 0, 继续进行下一步。

最后, 进行继续比较。将这一时刻的输出功率 $P(K)$ 与上一个时刻的输出功率 $P(K-1)$ 比较。

若差值小于 0, 则表示这一时刻输出功率大于上一时刻, 可进行进一步优化。若此时的工作电压 $U(K)$ 大于 $U(K-1)$, 则增加占空比, 增大工作电压, 以提高输出效率; 若此时的工作电压 $U(K)$ 小于 $U(K-1)$, 则减小占空比, 减小工作电压, 以提高输出效率。

若输出功率差值大于 0, 则表示这一时刻输出功率小于上一时刻, 可进行进一步优化。若此时的工作电压 $U(K)$ 大于 $U(K-1)$, 则减小占空比, 减小工作电压, 以提高输出效率; 若此时的工作电压 $U(K)$ 小于 $U(K-1)$, 则增大占空比, 增大工作电压, 以提高输出效率。

若 P 监测前、后没有发生改变, 则 D 应不改变。

综上所述, 只要能够选择合适开关 VT 的占空比 D 以及占空比的改变值 ΔD , 控制器就能够迅速地找到太阳能电池阵列的最大功率。

3 仿真验证

采用 Matlab/Simulink 仿真平台搭建仿真模型, 其中光伏组件参数为标准测试条件 $S=1\ 000\ \text{W/m}^2$ 、 $T=25\ ^\circ\text{C}$ 下开路电压 $V_{oc}=22.4\ \text{V}$ 、最大功率点电压 $V_m=18\ \text{V}$ 、短路电流 $I_{sc}=3.5\ \text{A}$ 、最大功率点电流 $I_m=2.9\ \text{A}$, 光伏的最大输出功率约为 $52\ \text{W}$ 。Boost 变换器中的参数为电感 $L=5\ \text{mH}$ 、电容 $C_1=100\ \mu\text{H}$ 、电容 $C=100\ \mu\text{H}$, 负载电阻 $R=30\ \Omega$ 。

3.1 启动时最大功率点的跟踪特性

标准测试环境下, 启动时最大功率点跟踪特性曲线如图 5 所示。从图可以看出, 使用扰动观测法可以迅速达到太阳能电池的最大功率值, 其稳态值为 $52\ \text{W}$ 。

3.2 环境变化时跟踪性能

当光照强度 S 不变, 环境温度 T 突变时的 MPPT 跟踪特性曲线如图 6 所示。从图可以看出, 在从 $60\ ^\circ\text{C}$ 变换到 $25\ ^\circ\text{C}$, 再突变到 $60\ ^\circ\text{C}$ 的情况的跟踪时间分别为 $0.1\ \text{s}$ 与 $0.2\ \text{s}$ 。这表明太阳能电池输出功率受到温度

因素的影响, 先上升后下降, 也表明了扰动观测法可在温度变化情况下跟踪到最大功率点。

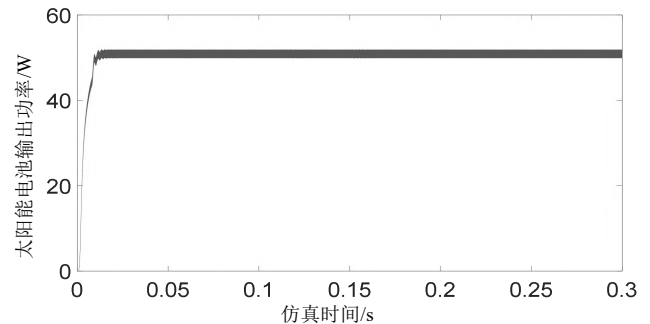


图 5 启动时 MPPT 特性曲线

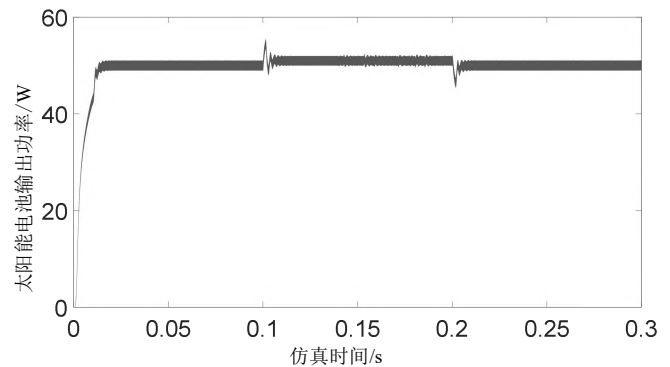


图 6 S 不变、 T 突变的 MPPT 跟踪特性曲线

当环境温度 T 不变, 光照强度 S 突变时的 MPPT 跟踪特性曲线如图 7 所示。在实际环境条件下, 光照强度变化频繁, 制约运行效率, 因此光强突变时最大功率点追踪性能非常重要。从图中可以看出, T 为 $25\ ^\circ\text{C}$, S 分别在 $0.1\ \text{s}$ 、 $0.2\ \text{s}$, 仿真波形从 $1\ 000\ \text{W/m}^2$ 变换到 $800\ \text{W/m}^2$, 再突变到 $1\ 000\ \text{W/m}^2$ 。使用扰动观测法后, 在光照强度发生变化时, 可以迅速跟踪到最大功率点。且最大功率在光照从高到低, 再从低到高的过程中呈相反趋势。

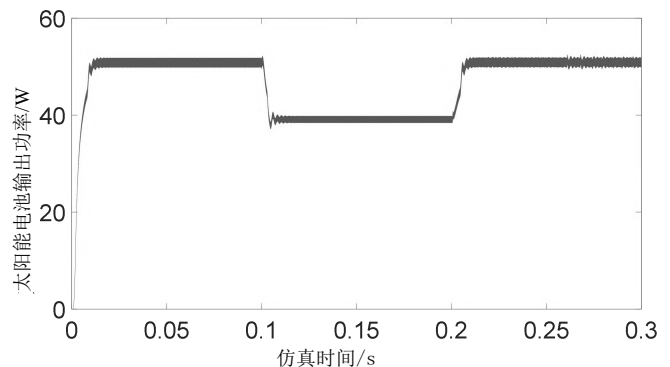


图 7 T 不变、 S 突变的 MPPT 跟踪特性曲线

4 结论

由于光伏发电受环境因素制约, 若不加以控制, 会影响工作效率。本文通过分析太阳能电池工作原理,

(下转第 77 页)

近中间隔墙钢梁严重变形(估计火灾时燃烧温度在 500℃以上),故南 9 号庭院产生的飞火通过中间隔墙与吊顶的夹缝进入南 10 号庭院中部,从而点燃南 10 号庭院中部的成品布堆垛(有铁质货架),这种可能性较大。由于电动车起火初期消耗了有限空间的大量氧气,外部又不能及时补充足够的氧气支持有焰燃烧,故南 9 号庭院中部在初起火灾数分钟后进入大面积的阴燃阶段,此推断与现场南 9 号庭院中部烟熏痕迹非常明显的现象基本吻合。

南 10 号庭院中部起火部位最可能是成品布处,起火点为线圈的可能性最大,但由于现场与线圈无相关连接的电线,故线圈在火灾时不可能带电工作,所以也不存在线圈引起的电气线路故障火灾。

可推断火灾于某年 11 月 26 日 01:00 左右发生,南 10 号内于 11 月 25 日 18:00 前已无人员,当天湿度较大,为 95%,若有遗留火种,在当时的气象条件下,初起火灾以阴燃为主,且阴燃状态需维持数小时,南 10 号庭院内的围墙内壁及建筑外立面应有非常严重烟熏的痕迹,但现场无严重烟熏的痕迹。

火灾时非雷电天气,可排除引火源为雷击;南 10 号庭院围墙较高,庭院中部上方有吊顶,且中部起火(假设),外来火源从南 10 号围墙外进入庭院中部可能非常小,但从南 9 号庭院产生的飞火通过中间隔墙与吊顶的夹缝进入南 10 号庭院中部可能就变得较大。

5 结论

通过 FDS 对火灾场景重构,分析了火灾场景的温度、烟气密度、清晰高度等参数指标,其理论结果与现场吻合度较高。由于 FDS 建模的局限性,如燃烧物质参数不能完全确定、火灾规模同现实场景非完全一

致、参数及计算的误差等,造成一定的偏差。虽然 FDS 的火灾模拟结果不能作为火灾调查的直接证据,但能够侧面印证火灾事故原因认定的准确性,并能在一定程度上科学地诠释火灾的发生发展规律。一些工业建筑火灾荷载较大、火灾规模发展迅速,只有迅速、大量排烟排热,才能更好地保护结构不坍塌,同时为消防救援提供更有利的环境。因此在屋面增设可燃性采光带(窗),可较大地发挥火灾时的排烟效能。

参考文献:

- [1] 袁振华.大型商场建筑性能化防火设计——以重庆市万达茂项目为例[J].工程技术研究,2021,6(17):230-231.
- [2] 丁昊.一起火灾事故的调查与分析[J].消防界(电子版),2021,7(23):111-112.
- [3] 王蕾,夏永旭,姚毅,等.基于 FDS 的公路隧道大型客车火灾数值模拟及分析[J].公路工程,2020,45(6):231-237.
- [4] 王炜罡,文虎,贾勇锋.基于 FDS 的高层居民楼火灾模拟[J].西安科技大学学报,2020,40(2):314-320.
- [5] 张文凯,徐蕾,王梦珠.基于 FDS 的办公楼火灾数值模拟分析[J].大连民族大学学报,2019,21(3):272-279,288.
- [6] 元延敏,代洪强.基于大型场所的 FDS 数值模拟分析[J].山西建筑,2011,37(7):104-106.

作者简介:何方(1971—),男,硕士,工程师,研究方向为消防检测、评估等。

[编辑:张超]

(上接第 72 页)

给出了扰动观测法的步骤,仿真结果表明,本文所介绍的扰动观测法可以跟踪到最大功率点。

参考文献:

- [1] 周文源,袁越,傅质馨,等.恒电压结合牛顿法的光伏系统 MPPT 控制[J].电力系统及其自动化学报,2012,24(6):6-9.
- [2] 卫东,王央康,常亚文.一种基于增量电导法的变步长 MPPT 算法[J].太阳能学报,2018,39(5):1277-1283.
- [3] 付青,耿炫,单英浩,等.一种光伏发电系统的双扰动 MPPT 方法研究[J].太阳能学报,2018,39(8):2341-2347.

- [4] 潘庭龙,沈艳霞.风电系统滑模极值搜索 MPPT 控制方法研究[J].太阳能学报,2012,33(12):2193-2197.
- [5] 范钦民,闫飞,张翠芳,等.基于模糊控制的光伏 MPPT 算法改进[J].太阳能学报,2017,38(8):2151-2158.

作者简介:王桥莉(1986—),女,陕西西安人,工学硕士,中级职称,主要从事激光惯导及工程技术研究。张文浪(1985—),男,福建龙岩人,工程硕士,中级职称,主要从事智能传感及监测技术研究。

[编辑:张超]