

[扰动观察]

基于改进扰动观察法的光伏最大功率点跟踪策略研究

文/徐子炎 郭亚楠
平高集团有限公司

针对传统的扰动观察法无法同时兼顾响应速度和跟踪精度的问题，伴随组串式逆变器被应用于大型地面电站愈发普遍，基于组串式光伏逆变器的基础上，采用了一种自适应变步长的扰动观察法。将最大功率点处进行分区，在不同区域内采用不同步长，以此来提高系统的响应速度和跟踪精度。使用MATLAB/Simulink对该法进行了建模与仿真，结果证明，该法能够较快地完成最大功率点的跟踪，且平稳波动小，精度高，提高了系统性能。

为了解决全球气候变化和能源危机问题，响应中央碳中和、碳达峰工作部署，开发利用以风能、太阳能为代表的新能源成为了一种有效的解决方案。由于光伏电池输出的电压和电流随着光照强度和环境温度的变化而表现出较强的非线性，因此为提高光伏发电系统的效率，必须对光伏电池的输出进行控制，找到光伏系统最大功率点（Maximum Power Point, MPP），最大功率点跟踪（Maximum Power Point Tracking, MPPT）技术已成为不可或缺的一部分。

最大功率点跟踪技术目前广泛研究的方法有定电压法、扰动观察法、电导增量法、模糊逻辑控制和神经网络元控制算法等，每种算法均存在一定的优缺点。其中扰动观察法（Perturbation and Observe, P&O）是目前应用最广泛的算法，本文在对传统扰动观察法与一些改进的扰动观察法研究基础上，对一种基于自适应变步长的扰动观察法进行建模与仿真。在距离MPP较远时，采用较大步长快速地接近MPP；在距MPP附近时，采用较小步长接近MPP，以抑制MPP存在的功率振荡现象。由于组串式光伏逆变器的技术突破，组串式逆变器应用

于大型地面电站愈发普遍，设计了组串式光伏逆变器，对基于自适应扰动观察法进行了仿真验证。

光伏电池模型建立及其特性

1. 光伏电池等效电路

单个光伏电池的等效电路如图1所示，光伏电池在有光照的情况下，内部产生电动势，在加了负载情况下有电流流过。

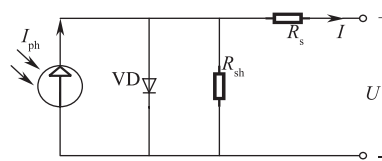


图1 光伏电池等效电路

实际面向光伏工程的光伏电池数学模型为

$$I = I_{sc} \left\{ 1 - n_1 \left[1 - \exp \left(\frac{U_L + I_L R_s}{n_2 U_{oc}} \right) \right] \right\} - \frac{U_L + I R_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

式中， I 为输出电流，单位为A； U 为输出电压，单位为V； R_s 为串联电阻，单位为 Ω ； R_{sh} 为并联电阻，单位为 Ω ； A 为二极管理想因子； k 为玻尔兹曼常数， $1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ ； T 为温度，K。

基金项目：平高集团有限公司科技项目（PGKJ2020-043）

在光伏电路的实际计算中, 由于 R_s 很小、 R_{sh} 很大, 其中

$$\begin{aligned} n_1 &= \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}}\right) \exp\left(\frac{-U_m}{n_2 U_{oc}}\right) \\ n_2 &= \left(\frac{U_m}{U_{oc}} - 1\right) \left[\ln\left(1 - \frac{I_m}{I_{oc}}\right)\right]^{-1} \end{aligned} \quad (2)$$

则输出功率为

$$P = UI_{sc} \left\{1 - n_1 \left[\exp\left(\frac{U}{n_2 U_{oc}}\right) - 1\right]\right\} \quad (3)$$

由式(2)可知, 计算出 I_{sc} 、 U_{oc} 、 I_m 及 U_m 就可以得到 n_1 与 n_2 。其中, I_{sc} 为短路电流; U_{oc} 为开路电压; I_m 为最大功率跟踪点处的电流; U_m 为最大功率跟踪点处的电压。

I_{sc} 、 U_{oc} 、 I_m 、 U_m 的计算由式(4)得出

$$\begin{aligned} I'_{sc} &= I_{sc} \times \frac{S}{S_{ref}} (1 + x \Delta\theta) \\ U'_{oc} &= U_{oc} \ln(1 - z \Delta\theta) (1 + y \Delta S) \\ I'_m &= I_m \times \frac{S}{S_{ref}} (1 + x \Delta\theta) \\ U'_m &= U_m \ln(1 + z \Delta\theta) (1 + y \Delta S) \end{aligned} \quad (4)$$

其中

$$\Delta\theta = \theta - \theta_{ref} \quad (5)$$

$$\Delta S = \frac{S}{S_{ref}} - 1 \quad (6)$$

式中, θ 为任意时刻电池温度; θ_{ref} 为标准温度25℃; $\Delta\theta$ 为任意温度下与标准温度25℃的差值; S 为任意时刻的光照强度; S_{ref} 为标准太阳光照强度1 000 W/m²; ΔS 为任意光照强度与标准光照强度的差值。 $x=0.0025/^\circ\text{C}$; $y=0.05$; $z=0.00288/^\circ\text{C}$;通过计算即可得到光伏电池的输出电流和输出功率。

2. 光伏电池仿真模型

整个光伏阵列采用的是4×8组成的10 kW光伏阵列模型, 电池参数见表1。

表1 电池参数

参数	取值
短路电流/A	5.96
开路电压/V	64.2
最大功率/kW	305.226
最大功率点电压/V	54.7
最大功率输出点电流/A	5.58

对0℃、25℃和50℃不同温度下的光伏电池

进行仿真, 如图2所示。可知光伏电池的电流随着光照温度的上升有所上升, 但是上升得并不明显, 并且随着温度的升高, 最大功率点有所降低。在0.25 kW/m²、0.5 kW/m²和1 kW/m²不同光照强度下的光伏电池仿真如图3所示, 可知随着光照强度的增加, 电流明显增加, 光照强度的变化对光伏电池的输出功率特性影响很明显。由此可见, 本文建立的光伏电源模型是有效的。

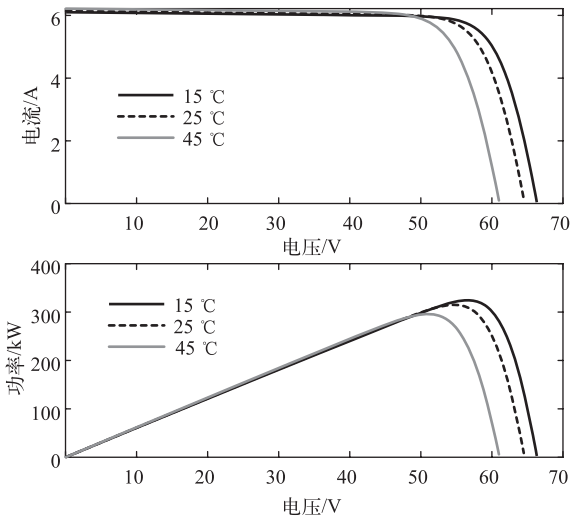


图2 不同温度下光伏电池曲线

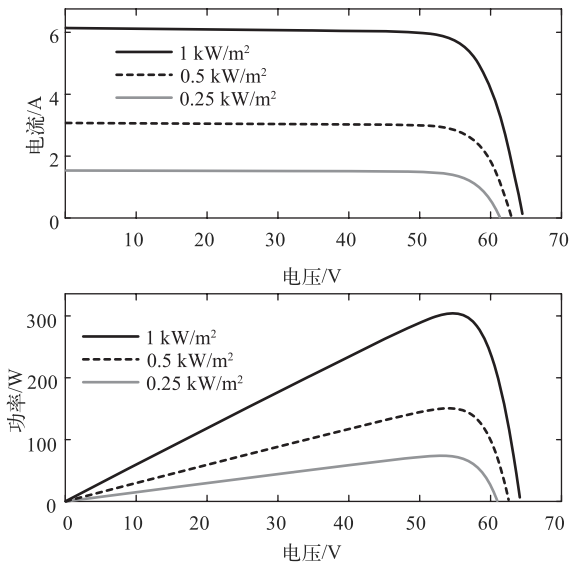


图3 不同光照下光伏电池曲线

扰动观察法及其改进

1. 传统的扰动观察法

传统的扰动观察法(P&O法)是通过控制电压

的步长使光伏电池达到最大功率点，如下式

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dU} > 0: U &= U + \Delta U \\ \frac{dP}{dU} = 0: U &= U_m \\ \frac{dP}{dU} < 0: U &= U - \Delta U \end{aligned} \quad (7)$$

在 $dP > dU$ 时，工作点在最大功率点左边，此时增加电压。在 $dP < dU$ 时，工作点在最大功率点右边，此时减小电压，进行扰动之后，若 $\Delta P > 0$ ，则扰动方向正确；若 $\Delta P < 0$ ，则扰动方向错误，需要改变扰动方向。对于传统的扰动观察法而言，采用的是定步长，若扰动步长选择过大，跟踪速度虽然变快，但在MPP附近波动变大，能量损失变大；若步长选择过小，在MPP处波动变小，能量损失变小，但跟踪速度变慢，扰动次数增多。

2. 基于自适应步长的扰动观察法

采用自适应步长的扰动观察法，可以很好地解决扰动观察法无法兼顾跟踪精度和响应速度二者问题。通过对光伏电池的仿真。可以看出，在距离MPP越近时，斜率变大，增长的速度变慢，因此以MPP为分点，将MPP及两侧进行分区，可以分为稳定区、增长区（MPP左侧）和下降区（MPP右侧）。

通过对图2和图3的光伏电池的输出特性 $P-U$ 曲线分析可得：经分析计算，在最大功率点处下降区的斜率约等于上升区斜率的4倍，在上升区曲线平缓，在下降区曲线陡峭。因此选择上升区的步长为下降区步长的4倍，选择大长度保证MPP的响应速度，同时在MPP处设置一个2%的保护区域，在这个保护区域内的步长比上升区和下降区的步长都小，以此来保证MPP的跟踪精度，降低振荡频率，减小能量的损失。

因此MPP步长的选取成为衡量跟踪精度大小以及速度的关键。改进后的扰动步长变化取决于功率的改变，数学模型如式（8）所示，上升区的步长为式（8）的4倍，即

$$\Delta U_i = \Delta U_0 \times \frac{dP_i}{dU_i} \quad (8)$$

由式（8）可知，当 dP/dU 变量为一个定值时，等同于一个定步长的扰动观察法。当被跟踪点位于MPP左侧时， $dP/dU > 0$ ，被跟踪点靠近MPP移动；当被跟踪点在MPP右侧时， $dP/dU < 0$ ，被跟踪点也

向MPP移动。其逻辑控制框图如图4所示。

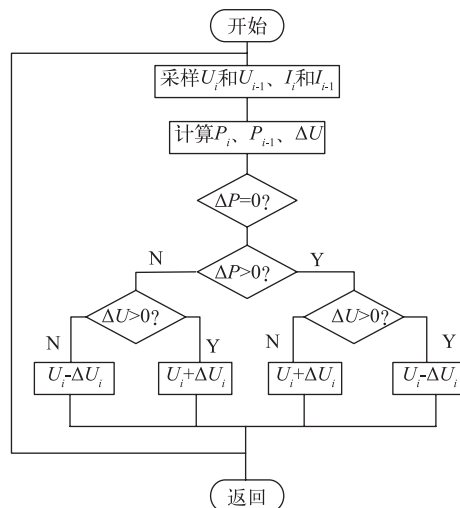


图4 算法流程图

仿真分析

在MATLAB/Simulink平台上搭建基于DC/DC变换的Boost电路扰动观察法模型，如图5所示，其中包括PV Array模块、两路Boost Converter模块，Boost Converter模块中又包含扰动观察法模块和DC/DC电路变换，将采集到的电压 U 、电流 I 信号经过MPPT控制模块处理，通过改变占空比 D 控制光伏电池端电压，完成对MPP的跟踪。Boost Converter模块中DC/DC电路仿真参数设置为： $C_1 = 1\,000 \times 10^{-6} \text{F}$ ， $C_2 = 3800 \times 10^{-6} \text{F}$ ， $L = 1.45 \times 10^{-3} \text{H}$ ，仿真时间为0.05 s，控制算法选用ode23tb。

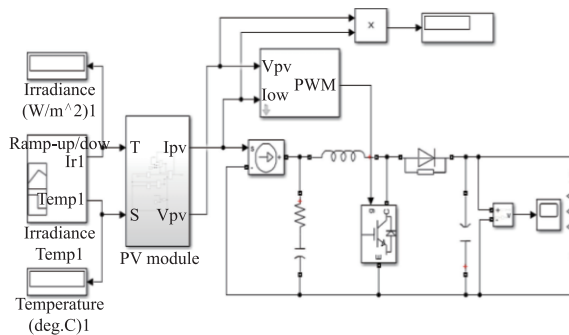


图5 组串式光伏逆变器仿真平台搭建

1. 仿真结果分析

扰动观测法对比如图6所示，环境温度为标准情况下 $S_{\text{ref}} = 1\,000 \text{ W/m}^2$ ， $T = 25\text{ }^\circ\text{C}$ 。由图6可以看出，传统的扰动观察法响应速度慢，在MPP处振荡明显，能量损失大，改进后的扰动观察法相比于传统

的扰动观察法, 响应速度有所提升且振荡减弱。

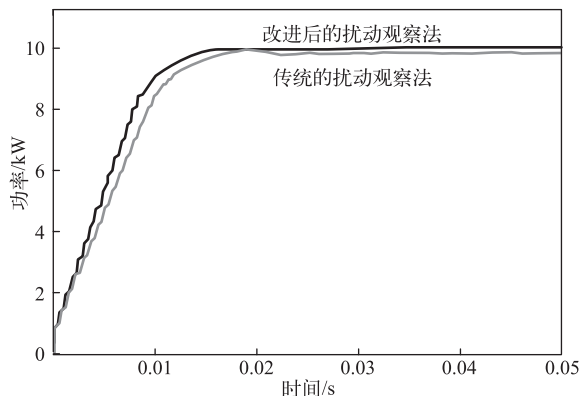


图6 扰动观测法对比

为验证该方法在不同温度和光照强度下的跟踪效果, 设置仿真时间为1 s, 环境温度设置为25 ℃、50 ℃, 光照强度设置为1 000 W/m²、200 W/m²、1 000 W/m², 依次进行变换的波形图, 如图7所示。由图7可以看出, 在光照和环境温度突变的情况下, 仍能较快地完成追踪, 且平稳波动小, 追踪效果稳定。

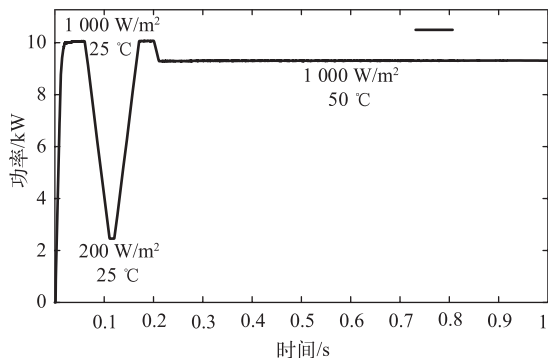


图7 变参数仿真结果

结束语

本文使用Simulink仿真软件在基于两路最大功率跟踪的Boost升压电路的基础上, 采用自适应分区变步长的扰动观察法, 搭建了带有最大功率跟踪功能的组串式光伏发电系统仿真模型, 对其进行了验证, 结果表明:

- 1) 该控制策略具有良好的跟踪效果, 在外界环境变化的同时, 能够较快响应由于环境影响带来的变化。
- 2) 在达到最大功率后, 平稳波动小, 能量损失

较小。在一定程度上, 提高了光伏发电的经济性。

3) 通过完整的逆变器仿真, 证明了该电路设计的合理性, 模型清晰简约, 具有较好的应用前景。EA

(收稿日期: 2022-09-24)

参考文献

- [1] 艾永乐, 刘群峰, 韩朝阳, 等. 基于改进扰动观察法的光伏MPPT策略[J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(4): 339-344.
- [2] 孔令生, 刘崧, 范心明, 等. 一种基于同步控制双输入高升压DC/DC变换器[J]. 广东电力, 2021, 34(1): 66-73.
- [3] 李晖, 台流臣. 一种用于三相电压型PWM整流器的新型三矢量模型预测直接功率控制[J]. 广东电力, 2020, 33(7): 64-71.
- [4] 樊立萍, 童兵. 基于BOOST变换器的MFC最大功率跟踪控制[J]. 太阳能学报, 2021, 42(2): 274-280.
- [5] 申舒琪, 李国勇. 光伏发电系统最大功率点跟踪的研究与设计[J]. 计算机仿真, 2021, 38(2): 72-76.
- [6] 占鑫, 刘世良, 王雄, 等. 基于升压斩波电路的复合最大功率点跟踪控制策略研究[J]. 电气自动化, 2021, 43(1): 51-54.
- [7] 李刚, 李超臣, 王雅文, 等. 局部阴影下光伏电池最大功率点跟踪方法[J]. 电测与仪表, 1-9[2021-04-19].
- [8] 张兴, 曹仁贤. 太阳能光伏并网发电及其逆变控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [9] 刘志坚, 刘杰, 李鹏程, 等. 基于模糊算法的复合Boost光伏MPPT研究[J]. 电源技术, 2020, 44(10): 1514-1517.
- [10] 武天雨, 王宁. 基于多变量灰色模型的光伏短期预测[J]. 电气应用, 2021, 40(6): 17-23.
- [11] 翟学, 郭紫昱, 曲名新, 等. 分布式光伏发电系统接线方案优化[J]. 电气应用, 2020, 39(12): 87-93.
- [12] 杨亚兰, 巨国娇, 黄睿, 等. 光伏电站抑制次同步振荡措施研究[J]. 电气应用, 2020, 39(7): 90-95.