



# (12)发明专利

(10)授权公告号 CN 110262618 B

(45)授权公告日 2020.07.31

(21)申请号 201910530715.0

(22)申请日 2019.06.19

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 110262618 A

(43)申请公布日 2019.09.20

(73)专利权人 电子科技大学

地址 611731 四川省成都市高新区(西区)

西源大道2006号

(72)发明人 殷春 王鹏 杨晓 程玉华 张阔

黄雪刚

(74)专利代理机构 成都行之专利代理事务所

(普通合伙) 51220

代理人 温利平

(51)Int.Cl.

G05F 1/67(2006.01)

(56)对比文件

CN 103684027 A,2014.03.26

CN 108268083 A,2018.07.10

CN 106991075 A,2017.07.28

CN 106991076 A,2017.07.28

CN 106774612 A,2017.05.31

吴丰等.梯度与极值搜索复合算法的多峰值MPPT控制.《电力电子技术》.2017,第51卷(第6期),32-34.

审查员 解鸿国

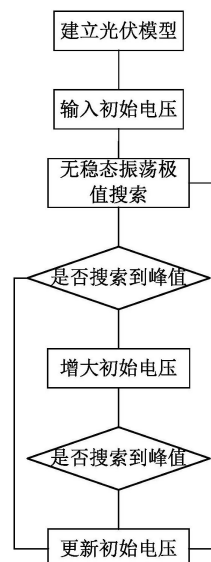
权利要求书1页 说明书10页 附图5页

(54)发明名称

一种基于无稳态振荡极值搜索的光伏峰值功率跟踪方法

(57)摘要

本发明公开了一种基于无稳态振荡极值搜索的光伏峰值功率跟踪方法,通过对局部阴影下光伏最大功率进行跟踪,建立光伏阵列串并联成光伏阵列模型,然后改变光伏子模块中的光照强度来模拟实际光伏阵列模型产生局部阴影的情况;给定初始输入电压值 $v_0$ ,采用无稳态振荡法按照预设时间进行极值搜索,通过判断两个相近时间点功率的差值来确定是否达到局部功率极值,如若没有,则延长搜索时间继续搜索该初始电压下的局部功率极值,当判断达到当前局部极值后更新初始电压值进行下一个局部功率点的搜索,直到监督达到结束条件停止搜索,实现局部阴影下的光伏峰值功率跟踪。



1. 一种基于无稳态振荡极值搜索的光伏峰值功率跟踪方法,其特征在于,包括以下步骤:

(1)、建立光伏模型

建立光伏电池串并联组成的光伏阵列模型,通过设定光伏阵列相关子模块中的光照值,模拟实际光伏阵列中的局部阴影情况,将电压作为光伏阵列模型的输入,功率作为光伏阵列模型的输出;

(2)、设置无稳态振荡法极值搜索的初始电压 $v_0$ ,设置极值搜索迭代次数 $i, i=1, 2, 3 \cdots$ ;

(3)、以初始电压 $v_0$ 作为光伏阵列模型输入,采用无稳态振荡法极值搜索算法进行时长为 $t+m$ 的极值搜索,记录第 $i$ 次极值搜索时,时刻 $t$ 的光伏阵列模型的功率 $P_t^i$ 和时刻 $t+m$ 的功率 $P_{t+m}^i$ ,  $t$ 和 $m$ 都是根据实际情况设置的时间参数;

(4)、判断是否 $|P_{t+m}^i - P_t^i| < \mu$ ,  $\mu$ 表示预设阈值,  $\mu > 0$ , 如果满足条件,则记录 $P_{t+m}^i$ 为第 $i$ 次极值搜索时的峰值功率,并且记录其对应的峰值电压 $v_i$ ,进入步骤(7),否则进入步骤(5);

(5)、延长无稳态振荡法极值搜索算法的搜索时间,延长的搜索时间为 $\lambda+m$ ,  $\lambda$ 表示延长时间参数,记录本次延长搜索时间中时刻 $\lambda$ 的功率 $P_\lambda^i$ 和时刻 $\lambda+m$ 的功率 $P_{\lambda+m}^i$ ;

(6)、判断是否 $|P_{\lambda+m}^i - P_\lambda^i| < \mu$ , 如果满足条件,则记录 $P_{\lambda+m}^i$ 为第 $i$ 次极值搜索时的峰值功率,并且记录其对应的峰值电压 $v_i$ ,再进入步骤(7),否则,返回步骤(5);

(7)、统计前 $i$ 次极值搜索的峰值功率以及对应的峰值电压,选出最大的峰值功率以及对应的峰值电压,再判断选出的峰值电压 $v_i$ 是否超出设置的初始电压 $v_0$ ,如果超出,则极值搜索结束;否则,令初始电压 $v_0 = v_i + Kh$ ,  $K$ 为常数,  $h$ 为更新搜索步长,再返回步骤(3);

其中,所述无稳态振荡法极值搜索算法进行极值搜索的具体步骤包括:

(2.1)、令系统初始估计电压 $\hat{v} = v_0$ ;

(2.2)、将估计电压 $\hat{v}$ 与扰动 $R(t) = a \sin(\omega t)$ 相加,得到电压 $v = \hat{v} + R(t)$ ,将电压 $v$ 输入至光伏阵列模型,得到对应的功率 $P$ ,通过滤波器滤去不稳定的波形,得到稳定功率 $\hat{P}$ ;其中,幅值 $a$ 满足: $\dot{a} = -\omega_l a + r \omega_l \hat{P}$ ,  $\omega_l$ 为低通滤波器截止频率,  $r$ 为常数增益;

(2.3)、将稳定功率 $\hat{P}$ 与扰动 $Q(t) = \sin(\omega t)$ 相乘,得到信号 $\Delta P = Q(t) \cdot \hat{P}$ ;

(2.4)、将 $\Delta P$ 乘以一个常系数 $K^*$ 后进行积分,其中, $K^* > 0$ ,在估计电压点 $\hat{v}$ 处寻找到下一个估计迭代点 $\hat{v}'$ ,即 $\hat{v}' = \hat{v} + K^* \Delta P$ ,令 $\hat{v} = \hat{v}'$ ,再返回步骤(2.2)。

## 一种基于无稳态振荡极值搜索的光伏峰值功率跟踪方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于光伏发电技术领域,更为具体地讲,涉及一种基于无稳态振荡极值搜索的光伏峰值功率跟踪方法。

### 背景技术

[0002] 光伏系统最大功率MPPT控制算法可追踪光伏电池的最大功率点,使其发电效率更高,但是光伏电池会由于环境温度、光照强度等其他原因其输出功率会受到影响。在光照强度照射不均匀时会使输出功率呈现多个峰值的情况,这是MPPT算法无法解决的,希望有一种能够快速稳定搜索到多峰极值的方法来解决该问题,较于其他已有的跟踪方法,当本系统需要在线实时应用其输出极值时,扰动极值搜索算法自身固有的稳态振荡会起到不利影响。

[0003] 如果能够更稳定的输出最大功率值会使光伏电池的利用率更高所以希望能够有更好的方法去保障搜索极值的速度同时提高输出的稳定性,因此需要提出新的搜索算法。较于一般的极值搜索算法改变比例环节k的大小来确保搜索范围及速度但是k越大搜索速度虽然越快但输出会因此而更加不稳定,对于大部分系统这种振动是不愿意接受的。

### 发明内容

[0004] 本发明的目的在于克服现有技术的不足,提供一种基于无稳态振荡极值搜索的光伏峰值功率跟踪方法,通过不断改变光伏阵列模型电压的初始点遍历极值点的搜索,以准确实现局部阴影下的光伏峰值功率跟踪,从而提高搜索效率。

[0005] 为实现上述发明目的,本发明提出一种基于无稳态振荡极值搜索的光伏峰值功率跟踪方法,其特征在于,包括以下步骤:

[0006] (1)、建立光伏模型

[0007] 建立光伏电池串并联组成的光伏阵列模型,通过设定光伏阵列相关子模块中的光照值,模拟实际光伏阵列中的局部阴影情况,将电压作为光伏阵列模型的输入,功率作为光伏阵列模型的输出;

[0008] (2)、设置无稳态振荡法极值搜索的初始电压 $v_0$ ,设置极值搜索迭代次数 $i, i=1, 2, 3, \dots$ ;

[0009] (3)、以初始电压 $v_0$ 作为光伏阵列模型输入,采用无稳态振荡法极值搜索算法进行时长为 $t+m$ 的极值搜索,记录第 $i$ 次极值搜索时,时刻 $t$ 的光伏阵列模型的功率 $P_t^i$ 和时刻 $t+m$ 的功率 $P_{t+m}^i$ , $t$ 和 $m$ 都是根据实际情况设置的时间参数;

[0010] (4)、判断是否 $|P_{t+m}^i - P_t^i| < \mu$ ,  $\mu$ 表示预设阈值, $\mu > 0$ ,如果满足条件,则记录 $P_{t+m}^i$ 为第 $i$ 次极值搜索时的峰值功率,并且记录其对应的峰值电压 $v_i$ ,进入步骤(7),否则进入步骤(5);

[0011] (5)、延长无稳态振荡法极值搜索算法的搜索时间,延长的搜索时间为 $\lambda+m$ , $\lambda$ 表示

延长时间参数,记录本次延长搜索时间中时刻 $\lambda$ 的功率 $P_{\lambda}^i$ 和时刻 $\lambda+m$ 的功率 $P_{\lambda+m}^i$ ;

[0012] (6)、判断是否 $|P_{\lambda+m}^i - P_{\lambda}^i| < \mu$ ,如果满足条件,则记录 $P_{\lambda+m}^i$ 为第 $i$ 次极值搜索时的峰值功率,并且记录其对应的峰值电压 $v_i$ ,再进入步骤(7),否则,返回步骤(5);

[0013] (7)、统计前 $i$ 次极值搜索的峰值功率以及对应的峰值电压,选出最大的峰值功率以及对应的峰值电压,再判断选出的峰值电压 $v_i$ 是否超出设置的初始电压 $v_0$ ,如果超出,则极值搜索结束;否则,令初始电压 $v_0 = v_i + Kh$ , $K$ 为常数, $h$ 为更新搜索步长,再返回步骤(3)。

[0014] 本发明的发明目的是这样实现的:

[0015] 本发明基于无稳态振荡极值搜索的光伏峰值功率跟踪方法,通过对局部阴影下光伏最大功率进行跟踪,建立光伏阵列串并联成光伏阵列模型,然后改变光伏子模块中的光照强度来模拟实际光伏阵列模型产生局部阴影的情况;给定初始输入电压值 $v_0$ ,采用无稳态振荡法按照预设时间进行极值搜索,通过判断两个相近时间点功率的差值来确定是否达到局部功率极值,如若没有,则延长搜索时间继续搜索该初始电压下的局部功率极值,当判断达到当前局部极值后更新初始电压值进行下一个局部功率点的搜索,直到监督达到结束条件停止搜索,实现局部阴影下的光伏峰值功率跟踪。

[0016] 同时,本发明基于无稳态振荡极值搜索的光伏峰值功率跟踪方法还具有以下有益效果:

[0017] (1)、本发明针对存在局部阴影的光伏阵列存在多峰极值的情况,提出基于无稳态振荡法极值搜索光伏最大功率跟踪方法,通过改变初始电压,利用无稳态振荡法极值搜索算法搜索出不同初始电压附近的功率峰值,从而避免陷入到某一个局部峰值,并且以每次搜索到功率极值点所对应的电压 $v_i$ 作为新的初始电压值,有效避免算法重复搜索同一极值点,提高搜索效率。

[0018] (2)、本发明通过对多个峰值的比较得到最大峰值,能精确地得到光伏阵列的最大功率点。

[0019] (3)、本发明是一个双闭环系统,可以准确搜索到不同输入初始电压相对应的极值,相比一般梯度极值搜索法在不牺牲收敛速度的同时具有更好的稳定性。

## 附图说明

[0020] 图1是本发明基于无稳态振荡极值搜索的光伏峰值功率跟踪方法流程图;

[0021] 图2是本发明中无稳态振荡极值搜索算法示意图;

[0022] 图3是本实施例中光伏阵列模型的p-v封装模块图;

[0023] 图4是本实施例中p-v封装模块内部示意图;

[0024] 图5是光伏阵列模拟局部阴影环境仿真图;

[0025] 图6是三峰时光伏阵列I-v曲线图;

[0026] 图7是三峰时光伏阵列p-v曲线图;

[0027] 图8是三峰时一般极值搜索算法下p-t曲线图;

[0028] 图9是三峰时本发明极值搜索算法下v-t曲线图;

[0029] 图10是三峰时本发明极值搜索算法下p-t曲线图;

[0030] 图11是 $a$ 的变化示意图。

## 具体实施方式

[0031] 下面结合附图对本发明的具体实施方式进行描述,以便本领域的技术人员更好地理解本发明。需要特别提醒注意的是,在以下的描述中,当已知功能和设计的详细描述也许会淡化本发明的主要内容时,这些描述在这里将被忽略。

[0032] 实施例

[0033] 图1是本发明基于无稳态振荡极值搜索的光伏峰值功率跟踪方法流程图。

[0034] 在本实施例中,如图1所示,本发明一种基于无稳态振荡极值搜索的光伏峰值功率跟踪方法,具体步骤包括:

[0035] S101:建立光伏模型:

[0036] 首先建立光伏电池串并联组成的光伏阵列模型,通过设定光伏阵列相关子模块中的光照值,模拟实际光伏阵列中的局部阴影情况,将电压作为光伏阵列模型的输入,功率作为光伏阵列模型的输出。

[0037] S102:设置初始电压:

[0038] 设置无稳态振荡法极值搜索的初始电压 $v_0$ ,设置极值搜索迭代次数 $i$ , $i=1,2,3\cdots$ 。

[0039] S103:无稳态振荡极值搜索:

[0040] 以初始电压 $v_0$ 作为光伏阵列模型输入,采用无稳态振荡极值搜索算法进行时长为 $t+m$ 的极值搜索,记录时刻 $t$ 的光伏阵列模型的功率 $P_t$ 和时刻 $t+m$ 的功率 $P_{t+m}$ , $t$ 和 $m$ 都是根据实际情况设置的时间参数。

[0041] 如图2所示,无稳态振荡极值搜索算法的具体过程包括以下步骤:

[0042] S201:令系统初始估计电压 $\hat{v} = v_0$ ,即光伏阵列模型电压 $\hat{v} = v_0$ 。

[0043] S202:经过高通滤波器滤波后得到高通滤波器输出信号 $\hat{P} = P - m$

[0044] 输入扰动处理:

[0045] 将估计电压 $\hat{v}$ 与扰动 $R(t)$ 相加,得到电压 $v = \hat{v} + R(t)$ 。

[0046] 本实施例中采用的扰动表示式为:

$$[0047] \quad R(t) = a \sin(\omega t), \dot{a} = -\omega_l a + r \omega_l \hat{P} \quad (1)$$

[0048] 其中, $\sin(\omega t)$ 为正弦扰动信号。

[0049] S203:获取对应功率:

[0050] 将电压 $v$ 输入光伏阵列模型,得到对应的功率 $P$ ,通过滤波器滤去不稳定的波形,得到稳定的功率 $\hat{P}$ 。

[0051] 在本实施例中,稳定功率 $\hat{P}$ 再次通过低通滤波器 $\frac{\omega_l}{s + \omega_l}$ 得到新的稳定信号 $\hat{G}$ ,信号 $\hat{G}$ 乘以常数增益 $r$ 得到扰动幅度 $a = r \cdot \hat{G}$ 。稳定功率 $\hat{P} = (P - m)$ , $m$ 为 $P$ 的低频分量, $\hat{G} = \hat{P} - n$ , $n$ 为 $\hat{P}$ 的高频分量,扰动幅值 $a$ 随着信号 $\hat{G}$ 变化而变,随着算法搜索逐渐收敛,信号 $\hat{G}$ 逐渐趋近于零,因此 $a$ 也逐渐趋近于零。从而证明了本发明采用的极值搜索法在不牺牲收敛速度的同时具有更好的稳定性。

[0052] S204:功率扰动处理:

[0053] 将功率 $\hat{P}$ 与扰动相乘,得到信号 $\Delta P = Q(t) \cdot \hat{P}$ 。

[0054] 本实施例中扰动 $Q(t)$ 可表示为:

[0055]  $Q(t) = \sin(\omega t)$  (2)

[0056] S205:寻找下一个估计迭代点:

[0057] 将 $\Delta P$ 经过积分器得到后再乘以一个常数 $k$ ,在估计点后 $\hat{v}$ 寻找到下一个估计迭代点 $\hat{v}'$ ,即 $\hat{v}' = \hat{v} + k\Delta P$ ,令 $\hat{v} = \hat{v}'$ ,返回步骤S202。

[0058] S104:判断是否搜索得到局部极值:

[0059] 判断是否 $|P_{t+m}^i - P_t^i| < \mu$ ,  $\mu$ 表示预设阈值, $\mu > 0$ ,如果满足条件,则记录 $P_{t+m}^i$ 为第 $i$ 次极值搜索时的峰值功率,并且记录其对应的峰值电压 $v_i$ ,进入步骤,进入步骤S107,否则进入步骤S105。

[0060] S105:延长搜索时间:

[0061] 如果在搜索时间 $t+m$ 后还未达到初始电压 $v_0$ 对应的极值点,则需要延长无稳态振荡极值搜索算法的搜索时间,延长的搜索时间为 $\lambda+m$ , $\lambda$ 表示延长参数,记录本次延长搜索时间中时刻 $\lambda$ 的功率 $P_\lambda^i$ 和时刻 $\lambda+m$ 的功率 $P_{\lambda+m}^i$ 。

[0062] S106:判断延长搜索是否搜索得到局部极值:

[0063] 与步骤S104类似,通过比较延长搜索时间中时刻 $\lambda$ 的功率 $P_\lambda^i$ 和时刻 $\lambda+m$ 的功率 $P_{\lambda+m}^i$ 的差值是否小于预设阈值即可判定是否搜索得到局部极值,即判断是否 $|P_{\lambda+m}^i - P_\lambda^i| < \mu$ ,如果是,则记录 $P_{\lambda+m}^i$ 为第 $i$ 次极值搜索时的峰值功率,并且记录其对应的峰值电压 $v_i$ ,进入步骤S107,否则返回步骤S105。

[0064] 可见,如果在延长时间 $\lambda+m$ 后仍然没有搜索到当前初始电压 $v_0$ 所对应的局部功率极值,算法则会继续延长搜索时间 $\lambda+m$ 进行搜索,直到判断阈值成功搜索到局部极值,否则会每次延长搜索时间 $\lambda+m$ 一直进行下去。

[0065] S107:更新初始电压:

[0066] 统计前 $i$ 次极值搜索的峰值功率以及对应的峰值电压,选出最大的峰值功率以及对应的峰值电压,再判断选出的峰值电压 $v_i$ 是否超出设置的初始电压 $v_0$ ,如果超出,则极值搜索结束;否则,令初始电压 $v_0 = v_i + Kh$ , $K$ 为常数, $h$ 为更新搜索步长;

[0067] 由步骤S103至S107形成了一个循环,持续搜索得到系统的各个极值。在步骤S103至步骤S107循环执行期间,对搜索结束参数进行监测,一旦达到搜索结束条件,则极值搜索结束,在记录的所有极值中选择最大值作为光伏系统的最大功率点,按照其对应的光伏阵列电压对光伏阵列进行控制。

[0068] 搜索结束条件一般可以设置为两种,一种是当多峰极值搜索时间达到设定阈值,即采用一个计时器记录多峰极值搜索算法运行的总体时间,当极值算法运行时间达到设定的阈值,则算法停止搜索;另一种是当需要搜索的初始电压值 $v_0$ 超出预设初始电压,则算法搜索结束。本发明采用第二种结束条件进行仿真,用户可以根据实际情况选择结束条件判

定。

[0069] 综上,本方法通过引入 $r, \omega_1$ 两个设计参数,其中 $r$ 为一个常值增益,通过设计 $r$ 的符号来决定算法搜索的极值为极大值还是极小值,并使得扰动信号幅值 $a$ 始终大于零, $\omega_1$ 为低通滤波器的截止频率, $m$ 为 $y$ 的低频分量。这种无稳态振荡算法的工作原理在于,当算法逐渐收敛时,信号 $y-m$ 趋近于零, $a$ 也会随之趋近于零,也就是说,扰动信号幅值足够小时,函数的输出可以近似认为是无稳态振荡。这样输入扰动既在搜索的初始时刻保障了极值搜索的搜索范围也在输出趋于稳定后消除了扰动对输出的振荡影响。本跟踪方法中采用的无稳态振荡极值搜索算法可以保证收敛速度,降低正弦激励信号的幅值,最终消除稳态振荡的不利影响。本方案能消除稳态振荡,对极值点的摄动具有较强的适应性。

[0070] 仿真验证

[0071] 为了说明本发明的可行性和正确性,下面分别通过理论推导和仿真验证两种方式对本发明的技术方案进行分析说明。

[0072] 本发明在对每个初始输入电压进行最大功率点搜索时,采用的是无稳态振荡极值搜索算法,该方法对于一个给定的初始电压,能通过不断的迭代进行自闭环循环,从而搜索到给定初始电压附近的功率峰值,其证明的具体过程如下。

[0073] 对于光伏系统可以简化为如下方程:

$$[0074] \quad \dot{x} = f(x, u), P = h(x) \quad (3)$$

[0075] 其中上标圆点表示求导, $P$ 是光伏系统的功率。

[0076] 定义 $u = \alpha(x, v)$ ,  $v \in \mathbb{R}$ ,  $v$ 是光伏系统的电压,所以系统方程可以表示为:

$$[0077] \quad \dot{x} = f(x, \alpha(x, v)) \quad (4)$$

[0078] 其存在极值点,当有以下假设成立:

[0079] 假设1:存在函数 $r: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$ ,使得当且仅当 $x = l(v)$ 时 $f(x, \alpha(x, v)) = 0$ 成立;

[0080] 假设2:对于任意的 $v \in \mathbb{R}$ ,系统(4)的平衡点 $x = l(v)$ 是以指数形式收敛稳定的。

[0081] 假设3:存在 $v^* \in \mathbb{R}$ 使得以下式子成立:

$$[0082] \quad \begin{aligned} (h \circ l)'(v^*) &= 0, \\ (h \circ l)''(v^*) &= H < 0. \end{aligned} \quad (5)$$

[0083] 其中, $h \circ l$ 是二阶连续可微函数。

[0084] 因此假设功率 $P = h(l(v))$ 在 $v = v^*$ 处有局部极值。

[0085] 根据图2所示的基于无稳态振荡的极值搜索方法可知其系统方程如下:

$$[0086] \quad \begin{aligned} \dot{x} &= f(x, \alpha(x, \hat{v} + a \sin \omega t)), \\ \dot{\hat{v}} &= k(p - m) \sin \omega t, \\ \dot{a} &= -\omega_l a + r \omega_l (p - m), \\ \dot{m} &= -\omega_h m + \omega_h p. \end{aligned} \quad (6)$$

[0087] 其中, $\omega_1 > 0$ ,  $\omega_h > 0$ ,分别为滤波器参数, $s$ 表示拉普拉斯算子, $a > 0$ 且 $m$ 是 $y$ 中的低频分量

[0088] 定义误差变量: $\tilde{v} = \hat{v} - v^*$ ,  $\tilde{m} = m - h \circ l(v^*)$ ,可以得到:

[0089]  $\dot{x} = f(x, \alpha(x, v^* + \tilde{v} + a \sin \omega t)) \quad (7)$

$$\dot{\hat{v}} = k(p - m) \sin \omega t,$$

[0090]  $\dot{a} = -\omega_l a + r \omega_l (p - m), \quad (8)$

$$\dot{m} = -\omega_h m + \omega_h p.$$

[0091] 定义  $\tau = \omega t$ , 系统可以表示为:

[0092]  $\omega \frac{dx}{dt} = f(x, \alpha(x, v^* + \tilde{v} + a \sin \tau)), \quad (9)$

[0093]  $\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \tilde{v}_c \\ a_c \\ \tilde{m}_c \end{bmatrix} = \delta \begin{bmatrix} K'(\theta(\tau) - m_c) \sin \tau \\ -\varepsilon \omega'_L a_c + r \varepsilon \omega'_L (\theta(\tau) - \tilde{m}_c) \\ -\omega'_H \tilde{m}_c + \omega'_H \theta(\tau) \end{bmatrix} \quad (10)$

[0094] 其中,  $\theta(\tau) = h \circ l(v^* + \tilde{v}_c + a_c \sin \tau) - h \circ l(v^*)$ , 下标  $c$  用于对式 (8) 和式 (10) 中的相同变量进行区分。

[0095] 根据假设3, 有:

$$\theta(0) = 0,$$

[0096]  $\dot{\theta}(0) = (h \circ l)'(v^*) = 0, \quad (11)$

$$\ddot{\theta}(0) = (h \circ l)''(v^*) = H < 0.$$

[0097] 将系统 (10) 均值化后得到均值化系统方程为:

[0098]  $\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \tilde{v}_c^a \\ a_c^a \\ \tilde{m}_c^a \end{bmatrix} = \delta \begin{bmatrix} \frac{K'}{2\pi} \int_0^{2\pi} \theta(\sigma) \sin \sigma d\sigma \\ -\varepsilon \omega'_L a_c^a + r \varepsilon \omega'_L \tilde{m}_c^a + \frac{r \varepsilon \omega'_L}{2\pi} \int_0^{2\pi} \theta(\sigma) d\sigma \\ -\omega'_H \tilde{m}_c^a + \frac{\omega'_H}{2\pi} \int_0^{2\pi} \theta(\sigma) d\sigma \end{bmatrix} \quad (12)$

[0099] 系统 (10) 的平衡点  $(\tilde{v}_c^{a,e}, a_c^{a,e}, \tilde{m}_c^{a,e})$  满足:

[0100]  $\int_0^{2\pi} \theta(\sigma) \sin \sigma d\sigma = 0, \frac{r}{2\pi} \int_0^{2\pi} \theta(\sigma) d\sigma = a_c^{a,e} + r m_c^{a,e}, \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \theta(\sigma) d\sigma = \tilde{m}_c^{a,e}$

[0101] 通过解以上的等式, 我们知道平衡点就是原点  $(0, 0, 0)$ 。组合应用奇异摄动技术和中心流形定理, 系统 (12) 可被改写为等价形式



$$\begin{aligned}
\frac{d\tilde{v}_c^a}{d\tau} &= \frac{\delta K'}{2\pi} \int_0^{2\pi} \theta(\sigma) \sin \sigma d\sigma \\
\frac{da_c^a}{d\tau} &= \varepsilon [-\delta\omega'_L a_c^a - r\delta\omega'_L \tilde{m}_c^a + \frac{r\delta\omega'_L}{2\pi} \int_0^{2\pi} \theta(\sigma) d\sigma] \quad (13) \\
\frac{d\tilde{m}_c^a}{d\tau} &= -\delta\omega'_H \tilde{m}_c^a + \frac{\delta\omega'_H}{2\pi} \int_0^{2\pi} \theta(\sigma) d\sigma \\
\frac{d\varepsilon}{d\tau} &= 0
\end{aligned}$$

[0103] 接下来,系统(13)可以被改写为:

$$\dot{y} = \frac{dy}{d\tau} \begin{bmatrix} \tilde{v}_c^a \\ a_r^a \\ \varepsilon \end{bmatrix} = A_1 y + g_1(y, z) \quad (14)$$

$$\dot{z} = \frac{d\tilde{m}_c^a}{d\tau} = A_2 z + g_2(y, z) \quad (15)$$

[0106] 这里  $z = \tilde{m}_c^a$

$$y = \begin{bmatrix} \tilde{v}_c^a \\ a_r^a \\ \varepsilon \end{bmatrix} \quad A_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad g_1(y, z) = \delta \begin{bmatrix} \frac{K'}{2\pi} \int_0^{2\pi} \theta(\sigma) \sin \sigma d\sigma \\ \varepsilon [-\omega'_L a_c^a - r\omega'_L \tilde{m}_c^a + \frac{r\omega'_L}{2\pi} \int_0^{2\pi} \theta(\sigma) d\sigma] \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = -\delta\omega'_H, \quad g_2(y, z) = \frac{\delta\omega'_H}{2\pi} \int_0^{2\pi} \theta(\sigma) d\sigma$$

[0109] 可以看出 $g_1$ 和 $g_2$ 是二阶连续可导的并且

$$g_i(0, 0) = 0; \frac{\partial g_i}{\partial y}(0, 0) = 0; \frac{\partial g_i}{\partial z}(0, 0) = 0, \quad (16)$$

[0111] 对于 $i=1, 2$ 存在一个常量 $\rho > 0$ 和一个连续可导的函数 $q(y)$ , 定义若对于所有 $\|y\| < \rho$ , 则 $z = q(y)$ 是(14), (15)的一个中心流形。

[0112] 函数满足

$$q(0) = 0 \quad \frac{dq}{dy}(0) = 0 \quad (17)$$

[0114] 为了分析系统(17)的局部稳定性, 必须得到中心流形的近似表达式。为了找到 $z = q(y)$ 的近似表达式, 设

$$\mathcal{N}(\varphi(y)) = \frac{\partial \varphi}{\partial \tilde{v}_c^a} \frac{d\tilde{v}_c^a}{d\tau} + \frac{\partial \varphi}{\partial a_c^a} \frac{da_c^a}{d\tau} + \delta\omega'_H \varphi(y) - \frac{\delta\omega'_H}{2\pi} \int_0^{2\pi} \theta(\sigma) d\sigma \quad (18)$$

$$\text{其中对 } \theta(\sigma) \text{ 进行泰勒展开 } \theta(\sigma) = \theta(0) + \dot{\theta}(0)(\sigma) + \frac{\ddot{\theta}(0)}{2}(\sigma)^2 + R = \frac{\ddot{\theta}(0)}{2}(\sigma)^2 + R$$

[0117]  $R=R(\sigma, v)$  包含着  $\sigma$  的高阶形式, 为了分析局部稳定性忽略  $R$ 。

[0118] 若  $\varphi(y) = \frac{\ddot{\theta}(0)}{2}(\tilde{v}_c^a)^2 + \frac{\ddot{\theta}(0)}{2}(a_c^a)^2$ , 则  $\mathcal{N}(\varphi(y)) = O(|\tilde{v}_c^a|^3 + |a_c^a|^3 + |\varepsilon|^3)$

[0119] 且  $\varphi(0) = 0, \frac{\partial \varphi}{\partial y}(0) = 0$  从而可得

[0120]  $z = q(y) = \frac{\ddot{\theta}(0)}{2}(\tilde{v}_c^a)^2 + \frac{\ddot{\theta}(0)}{2}(a_c^a)^2 + O(|\tilde{v}_c^a|^3 + |a_c^a|^3 + |\varepsilon|^3)$  (19)

[0121] 应用中心流形定理, 我们能得到“简化的”系统 (20);

$$[0122] \quad \begin{cases} \frac{d\tilde{v}_c^a}{d\tau} = \frac{\delta K'}{2\pi} \int_0^{2\pi} \theta(\sigma) \sin \sigma d\sigma \\ \frac{da_c^a}{d\tau} = -\delta \varepsilon \omega_L' a_c^a + r \delta \varepsilon \omega_L' O(|\tilde{v}_c^a|^3 + |a_c^a|^3 + |\varepsilon|^3) \end{cases} \quad (20)$$

[0123] 系统 (20) 为标准奇异摄动形式, 奇异摄动参数为“ $\varepsilon$ ”。我们设  $\tilde{v}_c^a$  在其平衡点的值为

[0124]  $\tilde{v}_c^a = -\frac{\theta'''(0)}{8\theta''(0)}(a_c^a)^2 + O((a_c^a)^3)$  得到在  $\kappa = \varepsilon \tau$  时域下的系统

[0125]  $\frac{da_c^a}{d\kappa} = -\delta \omega_L' a_c^a + r \delta \omega_L' O(|\tilde{v}_c^a|^3 + |a_c^a|^3 + |\varepsilon|^3)$  (21)

[0126] 由于  $\delta \omega_L' > 0$  (21) 在原点局部指数稳定 (大范围渐近稳定)。在时域  $\tau = \frac{\kappa}{\varepsilon}$ , 我们研究以下系统的稳定性

$$[0127] \quad \frac{d\tilde{v}_c^a}{d\tau} = \frac{\delta K'}{2\pi} \int_0^{2\pi} \theta(\sigma) \sin \sigma d\sigma \quad (22)$$

[0128] 其中  $a_c^a$  应被认作独立于时间变量  $\tau$  的正参量。我们使用李亚普诺夫直接法研究了系统 (22) 的稳定性, 并选择了函数

[0129]  $V(\tilde{v}_c^a) = \frac{1}{2} \left[ \int_0^{2\pi} \theta(\sigma) d\sigma \right]^2 > 0$  为系统李雅普诺夫方程式。

[0130] 在时间尺度下获得  $V$  的导数:

[0131]  $\theta(\sigma) = \theta(0) + \dot{\theta}(0)(\sigma) + \frac{\ddot{\theta}(0)}{2}(\sigma)^2 + R = \frac{\ddot{\theta}(0)}{2}(\sigma)^2 + R$

[0132]  $R=R(\sigma, v)$

[0133]  $\varphi(0) = 0, \frac{\partial \varphi}{\partial y}(0) = 0$

[0134] 其中  $\frac{\delta K'}{2\pi} \left[ \int_0^{2\pi} \theta(\sigma) \sin \sigma d\sigma \right]^2 > 0$

[0135] 应用公式通过分部积分, 我们得到  $\int_0^{2\pi} \dot{\theta}(\sigma) \sin \sigma d\sigma = a_c^a \int_0^{2\pi} \ddot{\theta}(\sigma) \cos^2 \sigma d\sigma$  可知上式

在  $\tilde{v}_c^a + a_c^a \sin \sigma$  足够小时为负则可以得到  $V(\tilde{v}_c^a) < 0$

[0136] 那么系统 (22) 的原点是渐近稳定的。

[0137] 至此证明了对任意一个给定的初始点, 可以通过无稳态振荡极值搜索算法稳定的搜索到其附近的极值。

[0138] 本发明在多情况下基于无稳态振荡极值搜索的光伏最大功率通过比较搜索的到的输出稳定值之间的差值是否小于设定阈值来确定是否搜索到极值点, 并且通过设定阈值之间的逻辑判断来确立对应初始值的增加值的大小, 如果判断稳定输出值不为极值则对应输入的初始电压加h, 若搜索到了极值则更新电压搜索下一个极值。从而实现对多峰极值的搜索, 通过比较后可以得到最大功率输出。

[0139] 本发明在Matlab的simulink环境下利用赛维LDK光伏组件建立光伏电池串并联组成的光伏阵列模型作为实现光伏阵列的仿真模型, 并且在本实例中可以根据实际光伏电池的参数进行STC下的短路电流 $I_{sc}$ 、开路电压 $U_{oc}$ 、最大功率 $P_m$ 、最大功率点电压 $U_m$ 、最大功率点电流 $I_m$ 的仿真。

[0140] 如图4所示, 设置光伏系统参数为:  $U_m = 37.9$ ,  $I_m = 5.16$ ,  $U_{oc} = 45.3$ ,  $I_{sc} = 5.54$ 。图5是光伏阵列模拟局部阴影环境仿真图。如图5所示, 光伏阵列由六块PV模块通过串并联的形式组成, 同时为了在光伏发电中尽量避免错配现象, 抑制热斑效应, 在每个光伏组件中都增加了旁路二极管和阻塞二极管, 达到减少光伏组件间错配现象带来能耗损失的目的, 但因为二极管的加入增加了光伏阵列输出特性的复杂度, 会使得p-v曲线出现多峰值的情况, 从而复杂化了全局最大功率点的搜寻。

[0141] 本实施例中通过改变部分PV模块的光照S值, 来模拟光伏电池局部阴影的环境, 使得光伏阵列出现多峰的情况。将T统一设置为25, 首先将光照S分别设置为500lux 200lux和900lux。图6是三峰时光伏阵列I-v曲线图。如图6所示, 因为设置了三种不同的光照值, 其I-v图有三个阶梯。图7是三峰时光伏阵列p-v曲线图。如图7所示, 其p-v图有三个峰值, 第一个功率峰值约为381W对应电压为39.2V第二个功率峰值约为619W对应的电压为78V, 第三个功率峰值约为707W对应的电压为112.1V。。

[0142] 为了增加对比现采用了一般的极值搜索算法对多峰系统进行极值搜索如图8所示可以看出一般的极值搜索算法如果只是使用固定初始电压作为搜索方法的初始值则对应多峰情况将只会搜索到对应的一个峰值且会有一定的振荡。体现了一般方法的局限性。

[0143] 采用本发明方法对以上光伏系统的光伏阵列模型进行功率峰值搜索, 其中各参数设置如下: 初始电压 $v_0 = 30$ , 初始值更新步长 $h = 20$ , 搜索时间参数 $t = 20$ , 局部极值的判断阈值 $\mu = 2$ , 搜索结束条件采用搜索的总体运行时间 $t_{总} = 50$ 。

[0144] 图10是三峰时极值搜索算法下p-t曲线图。图9是三峰时极值搜索算法下v-t曲线图。图10三峰状态下的p-t图其中每15秒更新一次初始值,  $v(0)$  表示为初始电压,  $P^*$  为实际搜索到的功率P为峰值功率,

[0145] 图10中所示在给定初始电压30V后由图9所示搜索到的电压为37.8V对应的输出功率为380W, 接下来搜索第二峰值, 使用搜索到第一个峰值点对应的电压37.8V上更新步长作为搜索第二个峰值的初始点, 更新步长为20, 由图9所示搜索到的电压为80V对应的输出功率为612W, 搜索第三峰值时同上使用第二个峰值电压80V加上更新步长20得到第三个初始电压为100V后由图9所示搜索到的电压为115.9V对应的输出功率为701W。

[0146]	序号	初 始 电 压 v(0)	搜索实际电压	峰值电压	搜索实际功率	峰值功率	功率误差
	第 1 峰值	30V	37V	39.2V	380W	381W	0.2%
	第 2 峰值	57.8V	80V	78V	612W	619W	1.13%
	第 3 峰值	100V	115.1	112.1v	702W	707W	0.71%

[0147] 表1

[0148] 由表1可知,运用本发明方法对光伏阵列模块搜索的结果与其本身仿真结果的误差在1.2%以内,说明本发明方法可以准确的搜索到光伏阵列模块的各个功率峰值,通过比较各功率峰值的大小,即可确定全局最大功率峰值。同时由图11可得出扰动信号幅值a随着系统收敛逐渐趋向于零。

[0149] 尽管上面对本发明说明性的具体实施方式进行了描述,以便于本技术领域的技术人员理解本发明,但应该清楚,本发明不限于具体实施方式的范围,对本技术领域的普通技术人员来讲,只要各种变化在所附的权利要求限定和确定的本发明的精神和范围内,这些变化是显而易见的,一切利用本发明构思的发明创造均在保护之列。

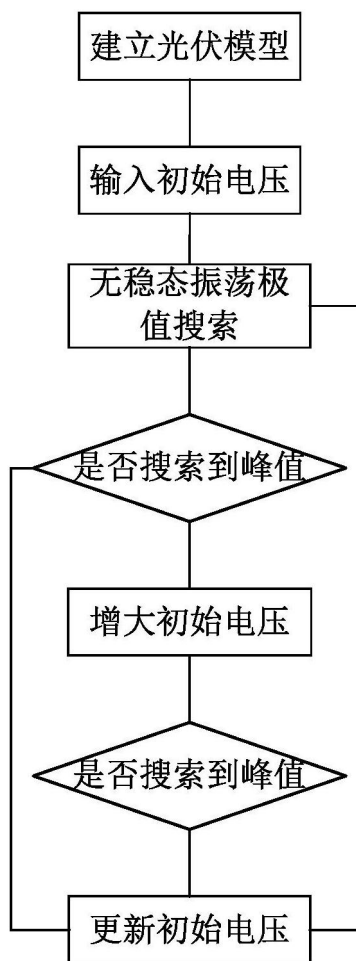


图1

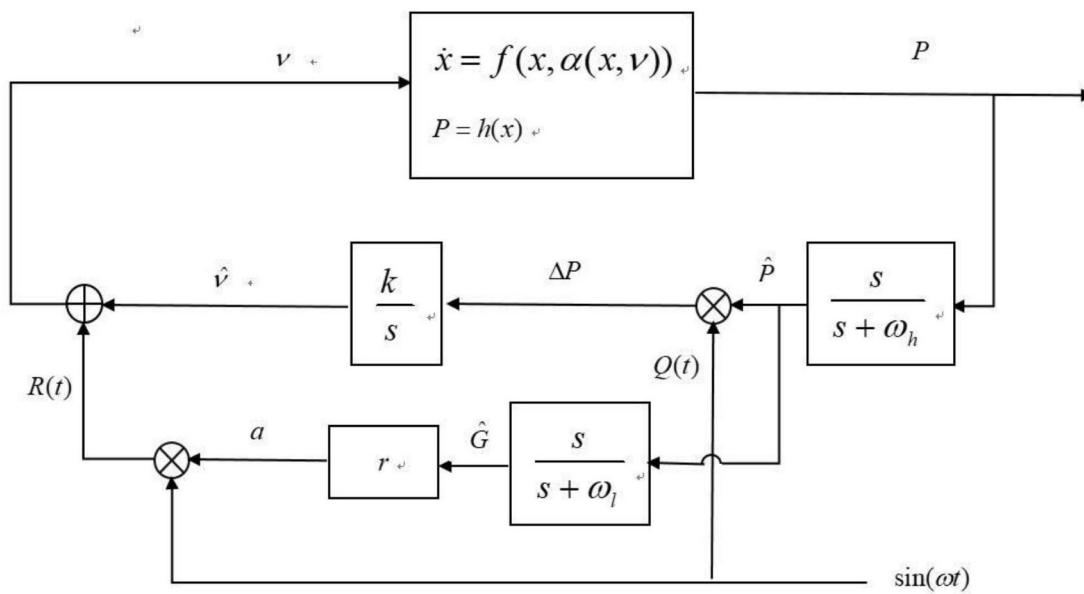


图2

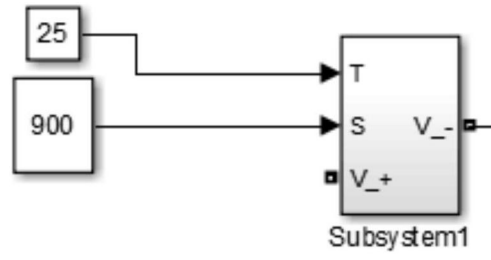


图3

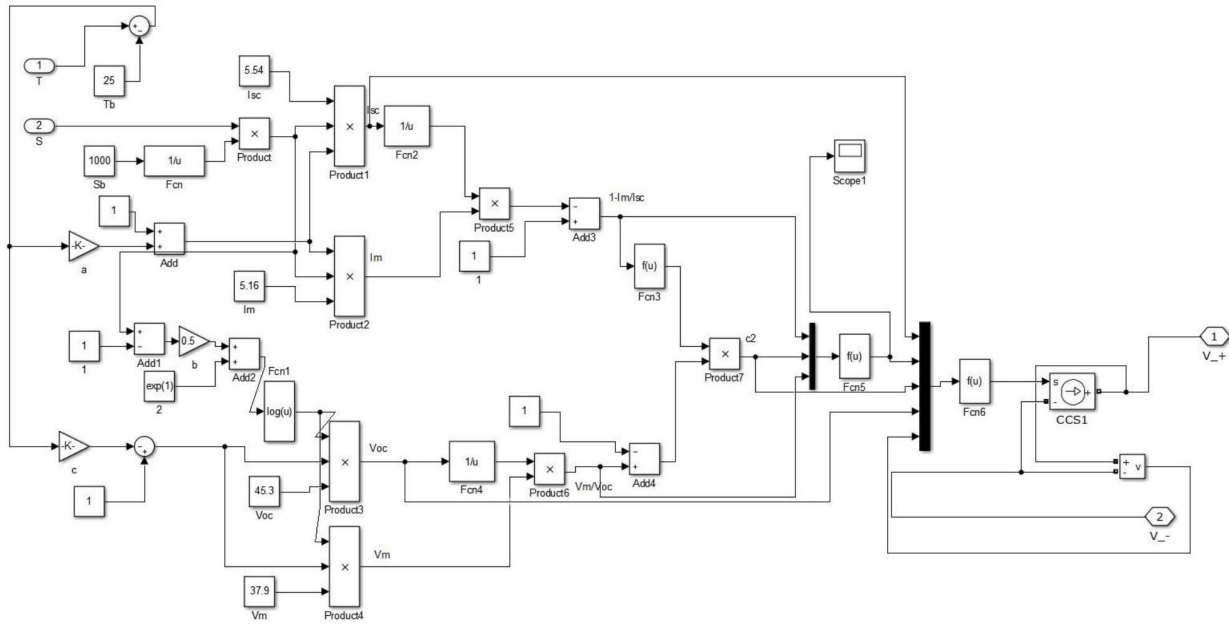


图4

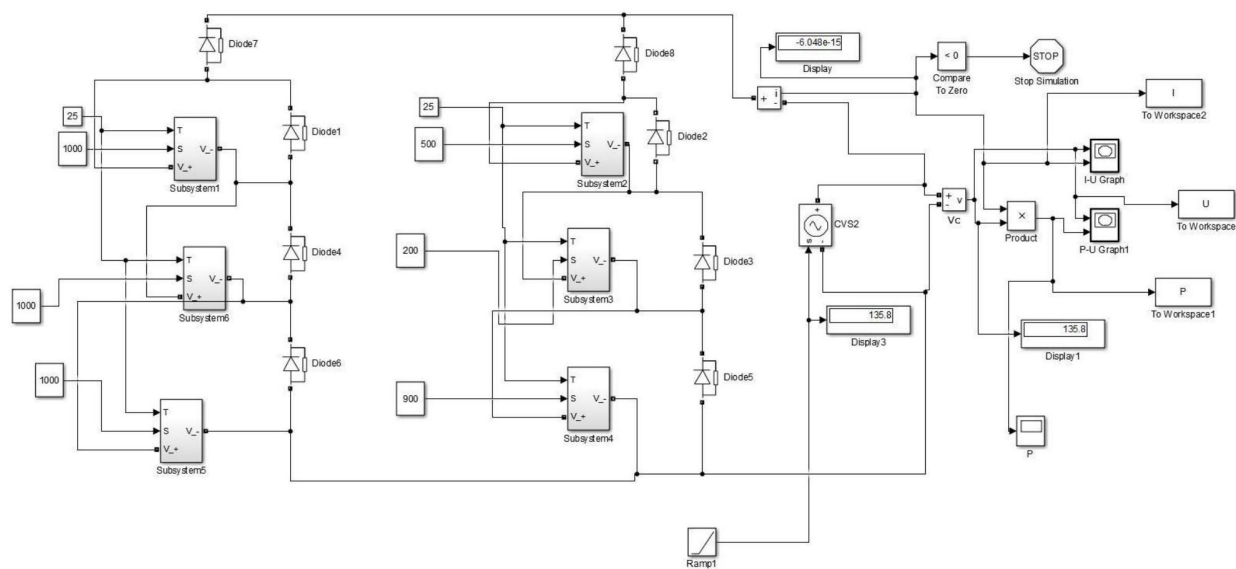


图5

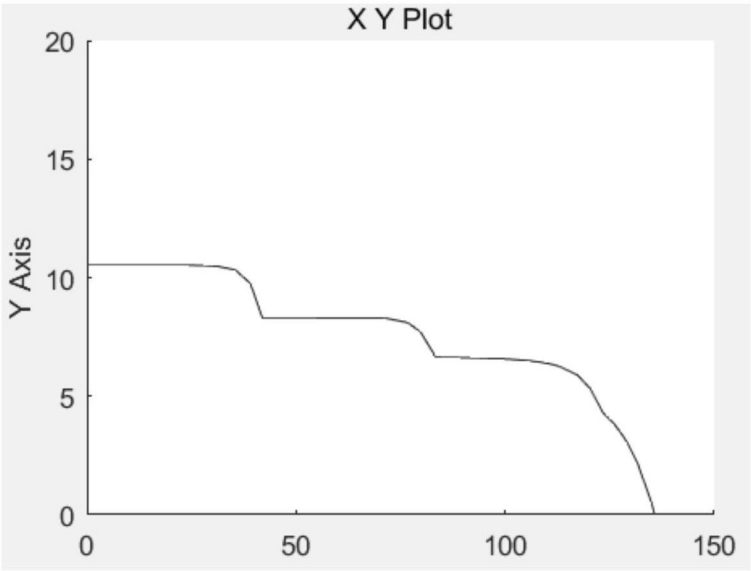


图6

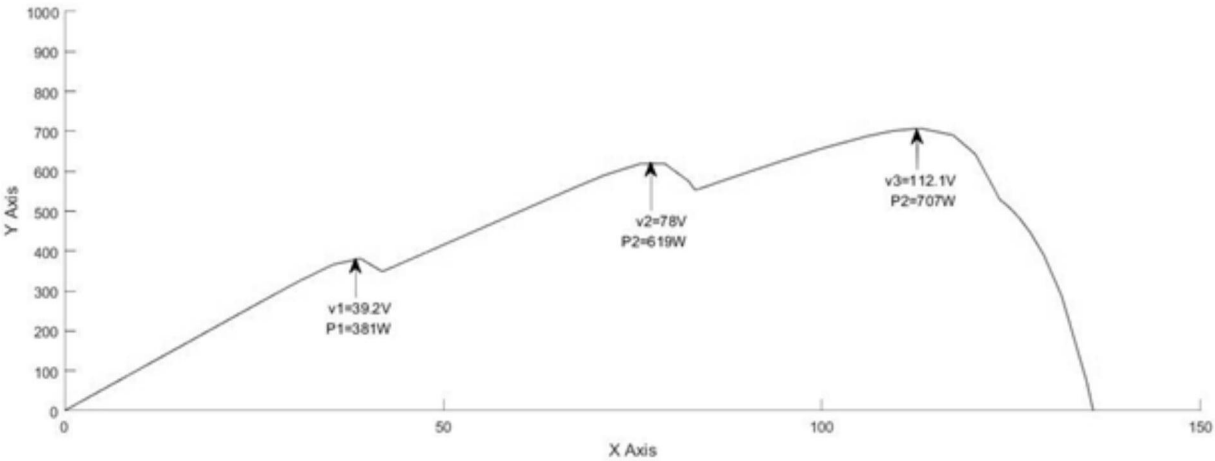


图7

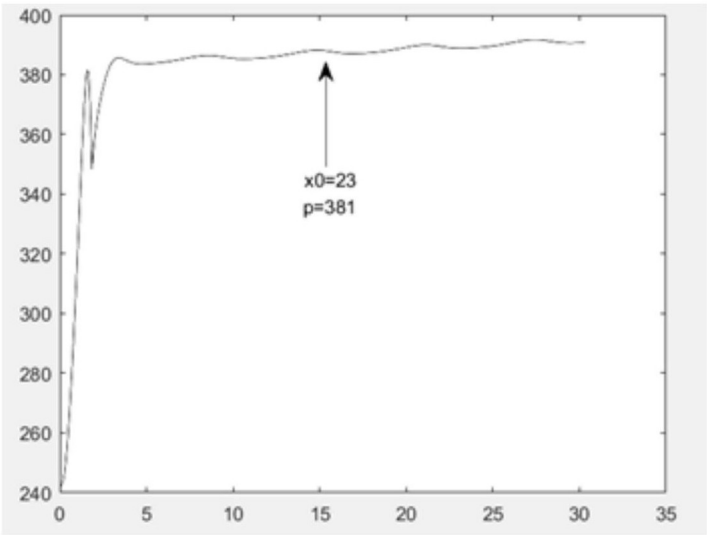


图8

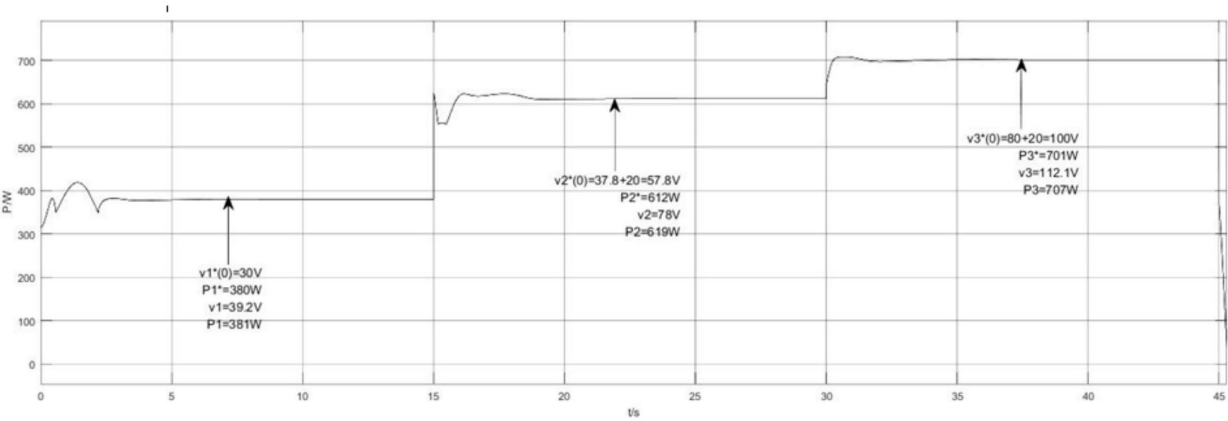


图9



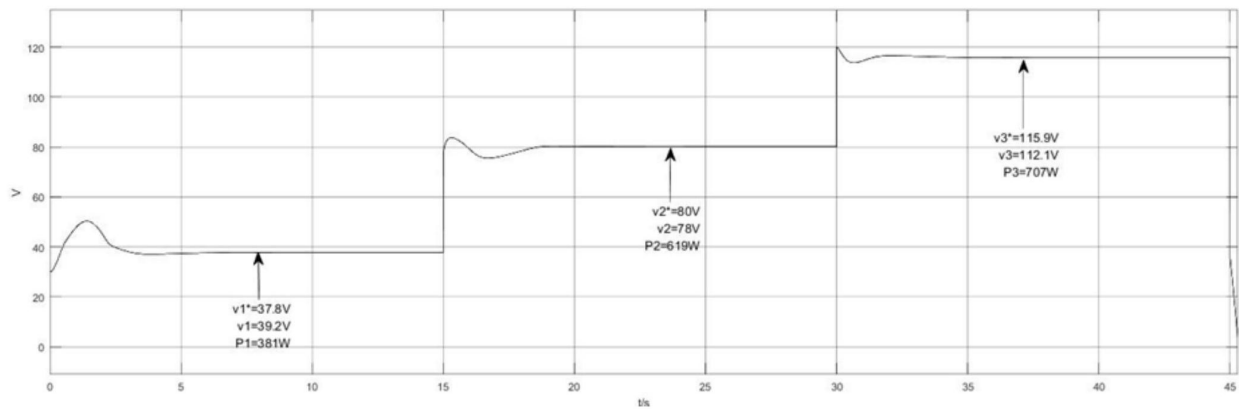


图10

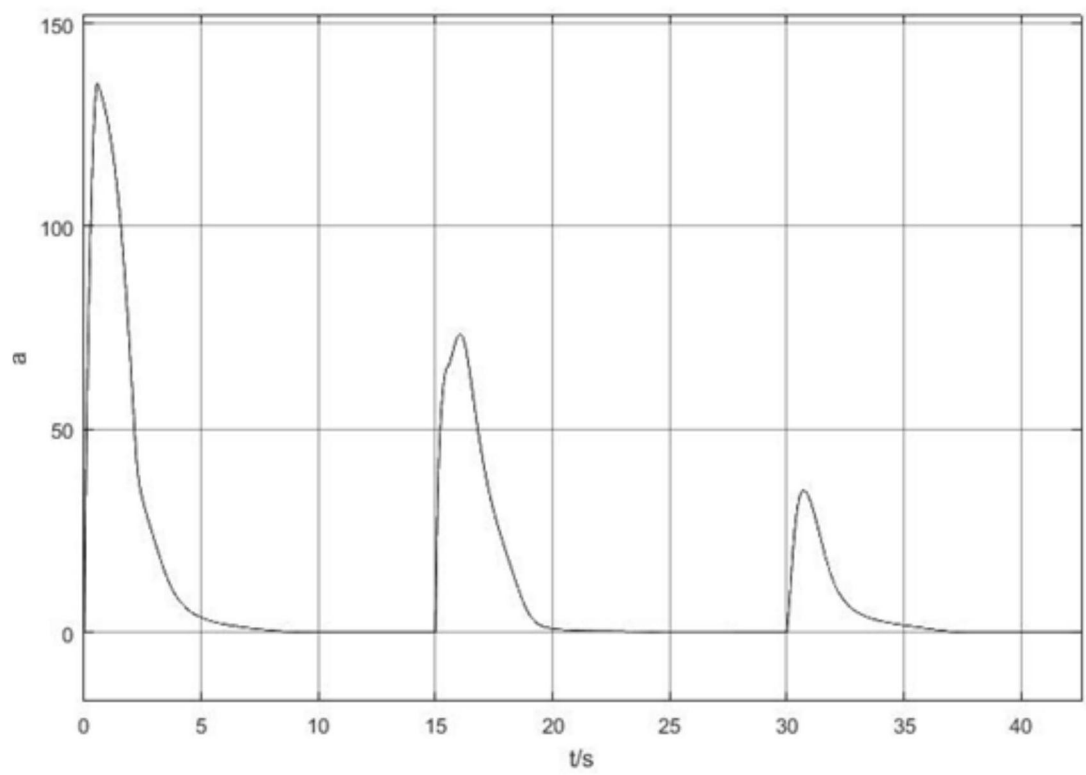


图11