
NEWSOFT开发工作室：

<http://shop126883743.taobao.com/?spm=a1z10.1-c.0.0.ju4JmL>

请勿抄袭

NewSoft 工作室

单相光伏并网逆变器 仿真研究

基于光伏电池模型、MPPT、孤岛检测算法的并网逆变器仿真研究

NewSoft 工作室
2015/9/18

目录

| | |
|----------------------------|----|
| 一、光伏电池特性研究..... | 2 |
| 1.1 光伏电池的工作原理..... | 2 |
| 1.2 光伏电池的等效电路..... | 2 |
| 1.3 光伏电池的数学模型..... | 3 |
| 1.4 光伏电池仿真模型的建立..... | 5 |
| 二、光伏并网发电系统最大功率点跟踪技术研究..... | 6 |
| 2.1 最大功率点跟踪控制的原理介绍..... | 6 |
| 2.2 MPPT 算法..... | 7 |
| 三、单相光伏并网发电系统的孤岛检测技术研究..... | 11 |
| 3.1 孤岛效应的概述..... | 11 |
| 3.2 孤岛效应的机理分析..... | 11 |
| 3.3 主动频率偏移法..... | 13 |
| 四、单相光伏并网逆变器控制技术研究..... | 16 |
| 4.1 并网电流的控制..... | 16 |
| 4.2 电网电压的前馈补偿..... | 16 |
| 五、仿真结果..... | 17 |
| 5.1 仿真模型..... | 17 |
| 5.2 仿真结果..... | 18 |

一、光伏电池特性研究

1.1 光伏电池的工作原理.

利用“光伏效应”将太阳能转换为电能的装置即为光伏电池。当太阳光照射到光伏电池表面，电池吸收光能后使其内部载流子的浓度和分布状态均会发生变换，进而产生了电动势的现象被称为“光伏效应”。光子被半导体吸收后，内部的价电子一旦获得的能量超过禁带宽度 E_g ，就会由价带激发迁至导带，从而脱离共价键的束缚。这些被激发的空穴和电子，有的复合恢复成平衡状态，有的自由碰撞。光伏电池的上下电极在连接上负载之后，外电路形成电流的过程如图 1-1 所示。由于受到电场力的作用，N 区的少数载流子自由电子留在 N 区，而光生空穴则流向 P 区；而 P 区的电子流向 N 区，空穴保持原来的区域。从外部电路来看，若有负载连接到电池上，便有电子流从 N 电极流向 P 电极，电子流回到半导体材料内部后，电子与空穴复合，变回中性。从外部电路来看，电流方向是从 P 区流向 N 区。

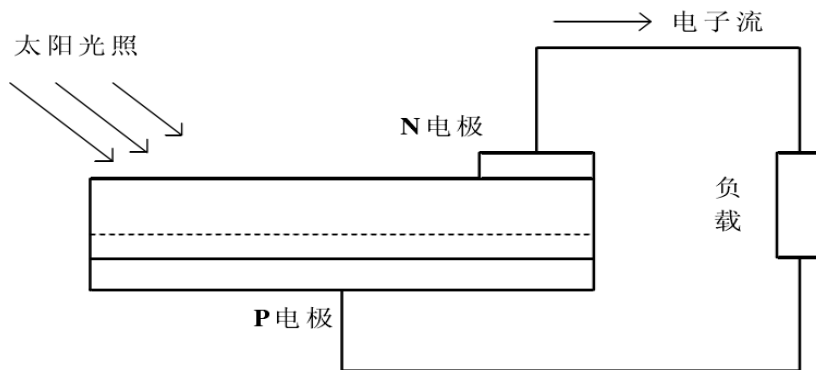


图 1-1 光伏电池生成电流示意图

1.2 光伏电池的等效电路

如图 1-2 所示，光伏电池的等效电路相当于一个恒电源与一只正向二极管并联。负载两端电压为 U ， U 产生与光电流相反的电流为暗电流 I_d 。由于外部因素，会产生漏电，所以需要引入旁路电阻 R_{sh} 来等效。 R_s 为串联电阻，主要由电池的体电阻、电极与半导体的接触电阻以及金属导体电阻三者构成。

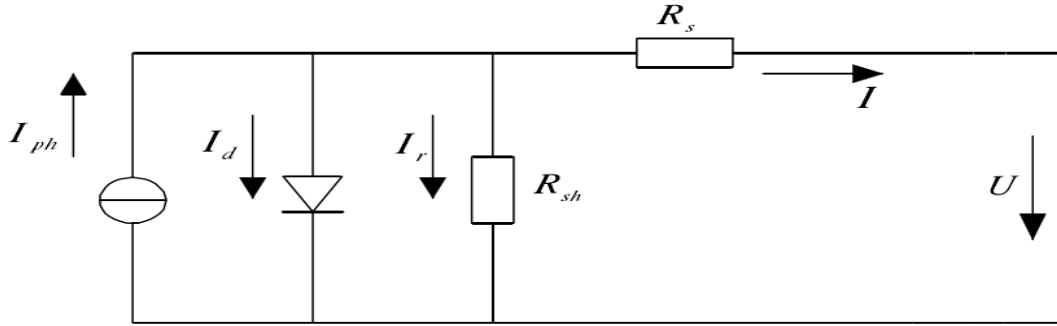


图 1-2 光伏电池的等效电路图

光伏电池工作于发电状态的电流方程表达式为：

$$I = I_{ph} - I_d - I_r$$

其中，

$$I_d = I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(U + IR_s)}{nkt} \right] - 1 \right\}$$

$$I_r = \frac{U + IR_s}{R_{sh}}$$

由上式可知，光伏电池的输出电流表达式：

$$I = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(U + IR_s)}{nkt} \right] - 1 \right\} - \frac{U + IR_s}{R_{sh}}$$

式中， I ——光伏电池的输出电流；

U ——光伏电池输出电压；

I_{ph} ——光生电流；

I_0 ——二极管反相饱和电流；

q ——电子的电荷量；

R_s ——串联电阻；

R_{sh} ——旁路电阻；

n ——二极管特性因子；

k ——玻耳兹曼常数；

T ——光伏电池温度。

从式可以看出，光伏电池的电流输出方程是一个超越指数方程，而且电压和电流耦合在一起不便于进行下一步的计算。因此，需要对以上表达式进行简化，获得能够实际应用的表达式。

1.3 光伏电池的数学模型

由于上式求解过程比较复杂，且个别参数与外界条件有着密切关系，有可能使得所建立的数学模型在实际中无法应用。因此需要在保证工程数学模型精度的前提下，将电流的输出特性方程进行适当的简化和变形。

由于旁路电阻 R_{sh} 阻值远远大于 R_s ，所以一般情况下， $(U+IR_s)/R_{sh}$ 远小于 1，可将该项忽略掉。

$$I = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(U + IR_s)}{nkt} \right] - 1 \right\}$$

$$I = I_{sc} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(U + IR_s)}{nkt} \right] - 1 \right\}$$

当光伏电池处于最大功率点工作状态时， $U=U_m$ ， $I=I_m$ ，则

$$I_m = I_{sc} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(U_m + IR_s)}{nkt} \right] - 1 \right\}$$

当光伏电池处于开路状态时， $U=U_{oc}$ ， $I=0$ ，则

$$0 = I_{sc} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(U_{oc} + IR_s)}{nkt} \right] - 1 \right\}$$

综合以上对光伏电池数学模型分析可知：

$$I = I_{sc} \left\{ 1 - C_1 \left[\exp \left(\frac{U}{C_2 U_{oc}} \right) - 1 \right] \right\}$$

其中，

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \exp \left(\frac{-U_m}{C_2 U_{oc}} \right)$$

$$C_2 = \left(\frac{U_m}{U_{oc}} - 1 \right) \left[\ln \left(1 - \frac{I_m}{I_{oc}} \right) \right]^{-1}$$

当外界光照强度和温度发生变化时，光伏电池的输出特性必然会受到影响。这就需要修改光伏电池的模型来描述其不同环境下的特性曲线。根据参考的光伏电池温度和光照辐射强度，来推算新环境下光伏电池输出参数的特性曲线。

$$\Delta T = T - T_{ref}$$

$$\Delta S = \frac{S}{S_{ref}} - 1$$

$$I'_{sc} = I_{sc} \frac{S}{S_{ref}} (1 + \alpha \Delta T)$$

$$U'_{oc} = U_{oc} (1 - \lambda \Delta T) \ln(e + \beta \Delta S)$$

$$I'_m = I_m \frac{S}{S_{ref}} (1 + \alpha \Delta T)$$

$$U'_m = U_m (1 - \lambda \Delta T) \ln(e + \beta \Delta S)$$

上式中， T 为温度差值， S 为光照辐射强度差值；其中 α 、 β 、 λ 为常数，其典型值为 $\alpha = 0.0025/^\circ\text{C}$ ， $\beta = 0.5$ ， $\lambda = 0.00288/^\circ\text{C}$ ，从而得到在不同光照辐射强度和温度下的光伏电池数学模型。

1.4 光伏电池仿真模型的建立

使用 MATLAB/Simulink 环境搭建了光伏电池仿真模型，该模型可以在外界环境发生变化的条件下对光伏电池的输出特性进行仿真实验。

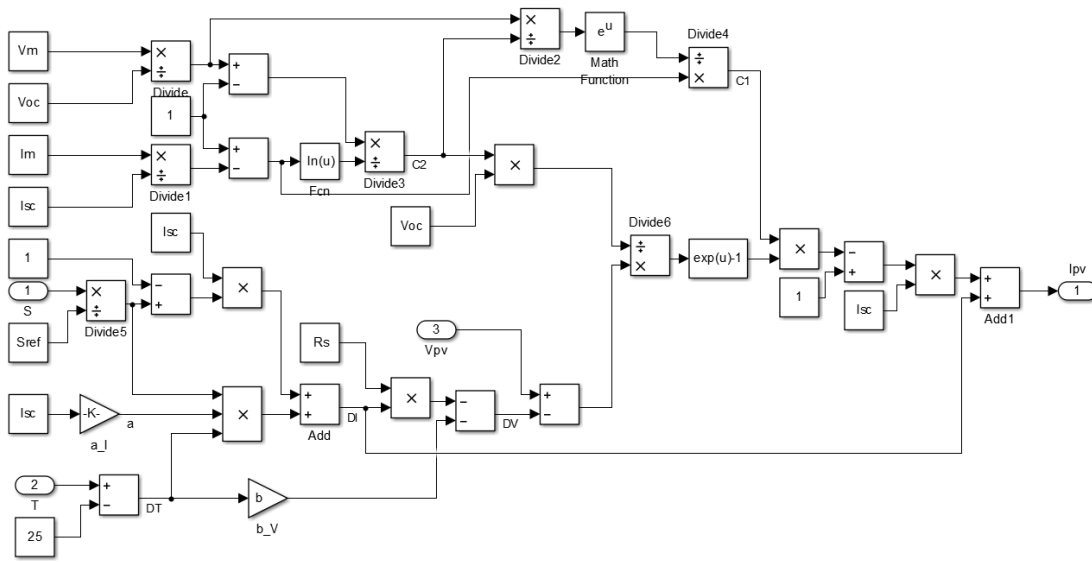


图 1-3 光伏电池仿真模型

如图 1-3 所示，输入 1 模块 S 为外部光照强度，输入 2 模块 T 为光伏电池外部环境温度，输入 3 模块 Vpv 为光伏阵列的工作电压。输出 1 模块 Ipv 为电流输出端。由于输出 1 为数字信号，所以在封装后该输出控制一个受控直流电流源，使得输出由数字信号变为直流电信号，该模型的封装结构如图 1-4 所示。

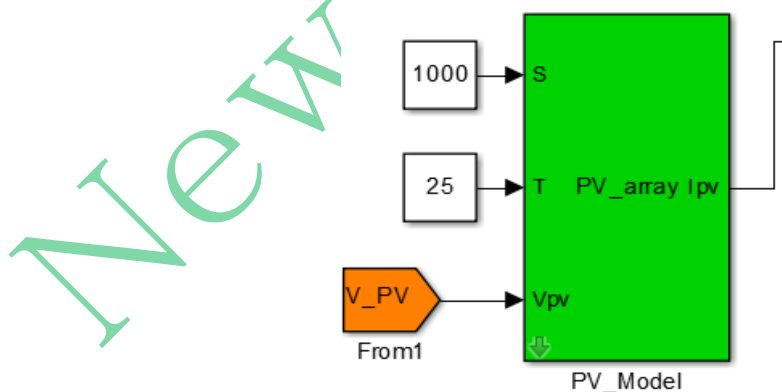
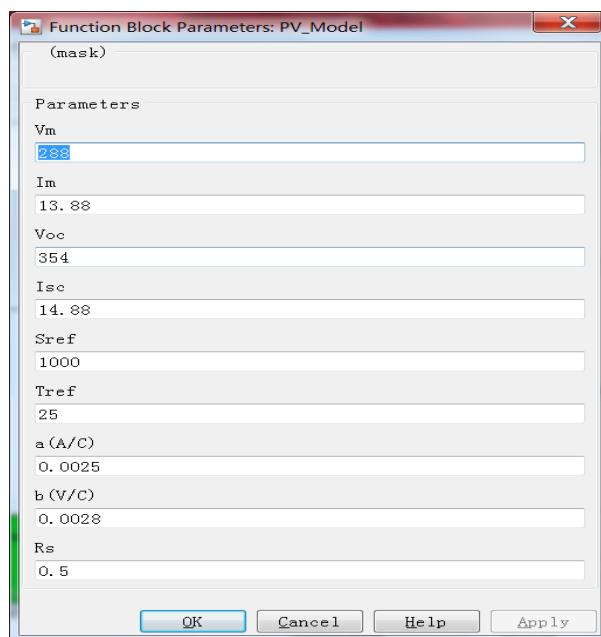


图 1-4 光伏电池封装模型

为了方便地设置光伏电池在新的测试条件下的 I_{sc} 、 U_{oc} 、 I_m 、 U_m 的值，设置了其参数界面，如图 1-5 所示。



二、光伏并网发电系统最大功率点跟踪技术研究

2.1 最大功率点跟踪控制的原理介绍

通过对光伏电池数学模型及仿真结果分析,我们可以得出光伏电池输出具有明显的非线性,并且受环境温度与光伏照射强度以及负载的影响。在稳定的外界环境条件下,光伏电池的输出电压只有工作在 $P-V$ 特性曲线峰值所对应的电压处,此时才能维持输出功率点在最大值附近。因此,实时调整光伏电池的工作电压是光伏发电系统中提高发电效率的重要环节。

最大功率跟踪控制使光伏系统具有自寻优能力,通过监测到光伏电池当前的输出电压、电流值,经过一定控制算法的分析,从而判断当前工作状态是否在最大功率点处。然后通过改变等效负载阻抗来调整光伏电池的工作电压,不管外界环境还是负载发生变化,控制器也能使光伏电池工作在最大功率点。其原理示意图如图 2-1 所示。

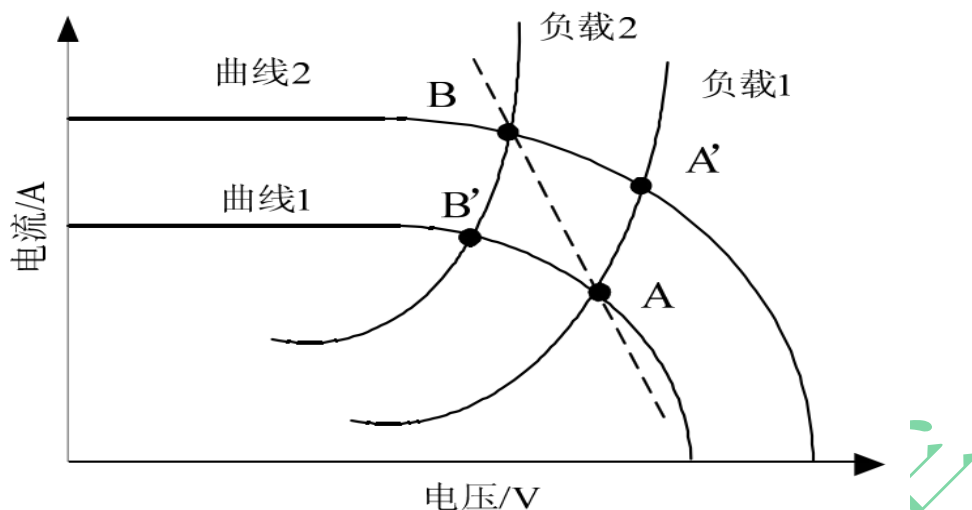


图 2-1 最大功率跟踪原理图

图中曲线 1 和 2 分别为光伏电池工作在相同温度而光照强度不同的外界环境条件下的输出特性曲线。图中的 A 点和 B 点为某一特定工作环境下的光伏电池的最大功率输出点。假设开始时系统工作于 A 点，此时出现外界干扰，光伏电池的输出特性由曲线 1 变为 2。在不改变负载的情况下，系统在稳定工作状态时处于曲线 2 上的 A' 点，可以看到 A' 点已经严重偏离了曲线 2 的最大功率点。为了保证光伏电池重新回到最大功率点，应该改变系统的等效负载，使新的负载特性曲线与曲线 2 的交点位于曲线 2 的最大功率输出点 B，同样如若光照强度变弱，应使系统由 B 工作到 A。

2.2 MPPT 算法

目前，常用的最大功率点跟踪控制技术有：恒定电压法、间歇扫描法、滞环比较法、扰动观察法、电导增量法、最有梯度法以及模糊控制法等方法。

2.2.1 扰动观察法

扰动观察法是不断的对光伏发电系统施加扰动来寻找到系统输出最大功率点的位置，具体的控制原理为：首先对光伏电池的输出电压施加扰动，然后检测当前的功率输出值，并与扰动前的输出功率值作出比较。如果两者之间的差值大于零，就说明之前的扰动方向是正确的，应该继续增加扰动量。如果扰动后的功率输出值较之前的减小了，则说明扰动的方向应该相反方向对光伏电池的工作电压施加扰动。其控制原理如图 2-2 所示，设定光伏电池开始工作在 P_n 点，通过设置一个扰动量 D ，控制器通过检测前后两次功率值并进行比较，如果 $P_{n+1} > P_n$ ，

即输出功率增加，则可以确定扰动方向正确，按原来方向继续扰动，直到最大功率点 P_m 附近。如果 $P_{n+1} < P_n$ ，即输出功率减小，系统工作到了 P'_{n+1} 处，则可以确定原扰动方向错误，应按原来相反方向扰动。同理，如果系统工作在最大功率点右侧，也可以通过扰动使输出功率逐渐逼近 P_m ，所以不管系统工作在 P_m 左侧还是右侧，通过扰动调节，系统最终会工作在 P_m 附近。但是，由于扰动量的存在系统最终会在 P_m 附近振荡，系统跟踪效果的好坏与扰动量的大小密切相关。扰动观察法的控制流程框图如图 2-3 所示。

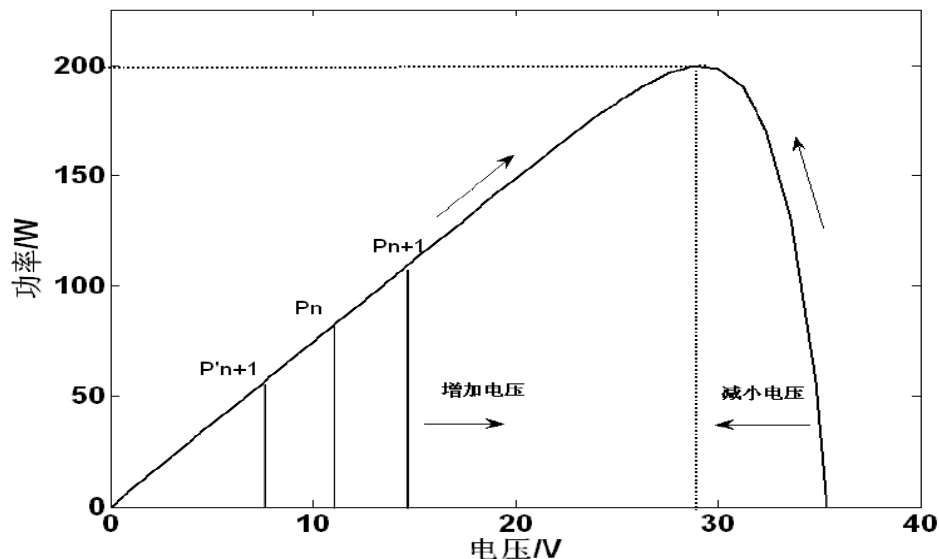


图 2-2 扰动法观察法的控制原理

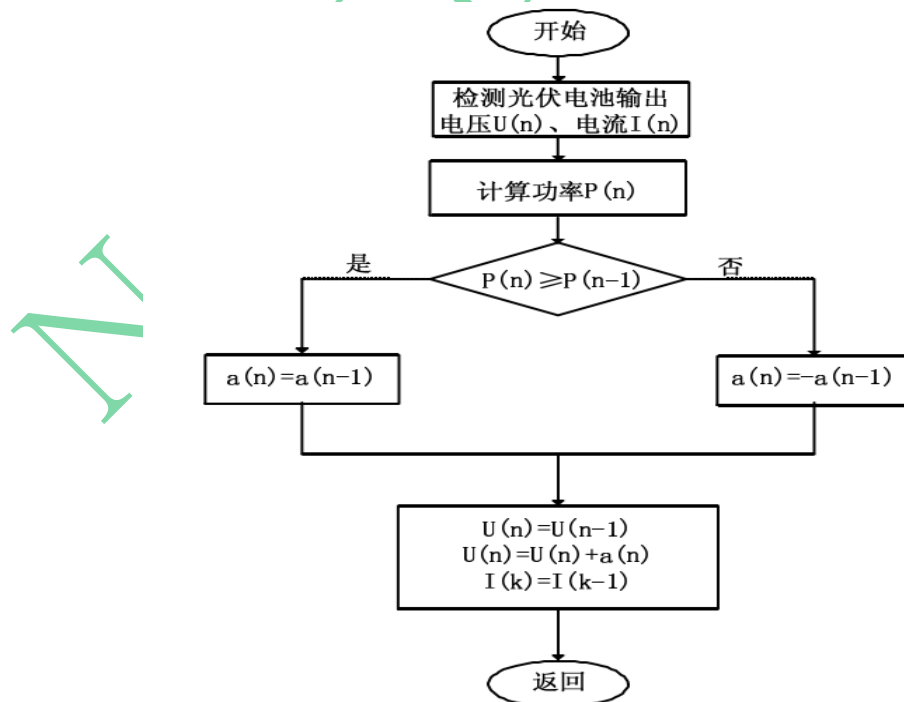
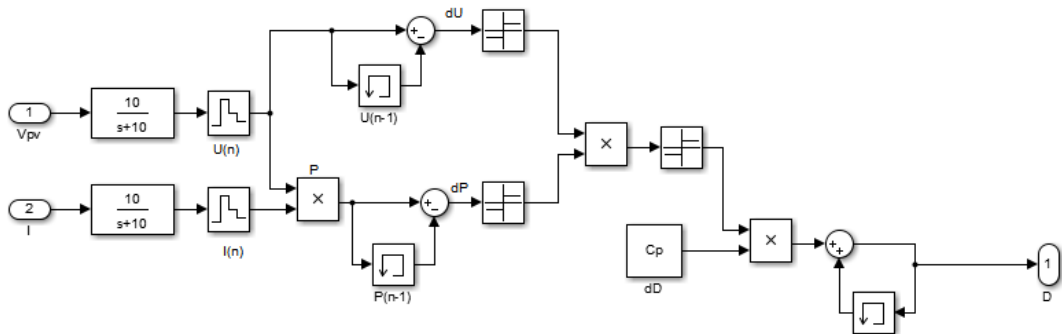


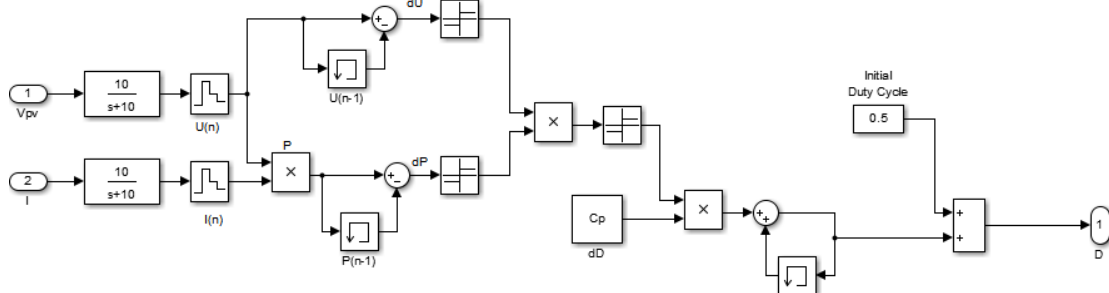
图 2-3 扰动观察法的控制流程框图

扰动观察法只需要判断电压和功率是增大还是减小，因此控制方法简单，除此之外，对于硬件的要求不高，所以在实际应用中已得到广泛的应用。但是，该方法只适合在光照强度变化较慢的外界条件下使用，使得跟踪速度与精度无法兼顾到。当外界环境处于稳定状态时，光伏电池的实际输出功率只能是在最大功率点的附近做小范围的振荡，并不能达到稳定的最大功率输出值，这样势必会降低光电的转换效率，造成一定功率的损失。而且，当外界条件发生迅速的变化时，该控制方法极有可能出现误判的现象。

仿真模型如下图：



基于占空比的扰动观察法仿真模型：



2.2.2 电导增量法

电导增量法的控制原理为：在比较瞬时的电导与电导的变化量的基础上来判断光伏电池当前工作点所处的位置，从而调整工作点电压来实现最大功率的控制。光伏电池输出的 $P-U$ 特性曲线为一条单峰的曲线，当输出功率为最大值时，即处于峰值点处的功率对电压的导数等于零。当工作点处于在峰值的两侧时，输出功率均小于最大功率。可以依此来判断系统工作状态，并进行电压调节，使系统工作在最大功率点处，避免了扰动法仅仅依靠电压、功率变化量进行判断引起的误判，而且具有更高的精度。

电导增量法控制原理如图 2-4 所示，由 $P=UI$ ，对两端求导得：

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV}$$

当 $dP/dV > 0$ 时，光伏电池工作点位于峰值点的左侧，需要增加工作电压来

向右移动；当 $dP/dV < 0$ 时，光伏电池工作点位于峰值点的右侧，同样需要减小工作电压来向左移动；当 $dP/dV = 0$ 时，光伏电池工作在峰值点处，需要保持工作电压不变。

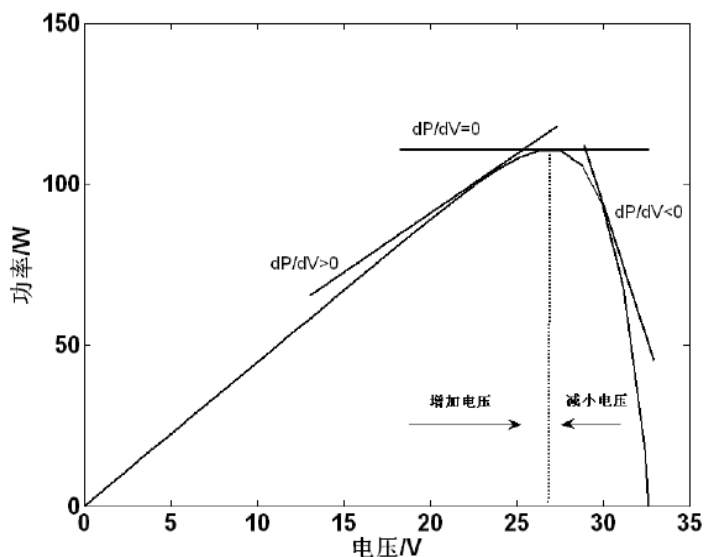


图 2-4 电导增量法控制原理

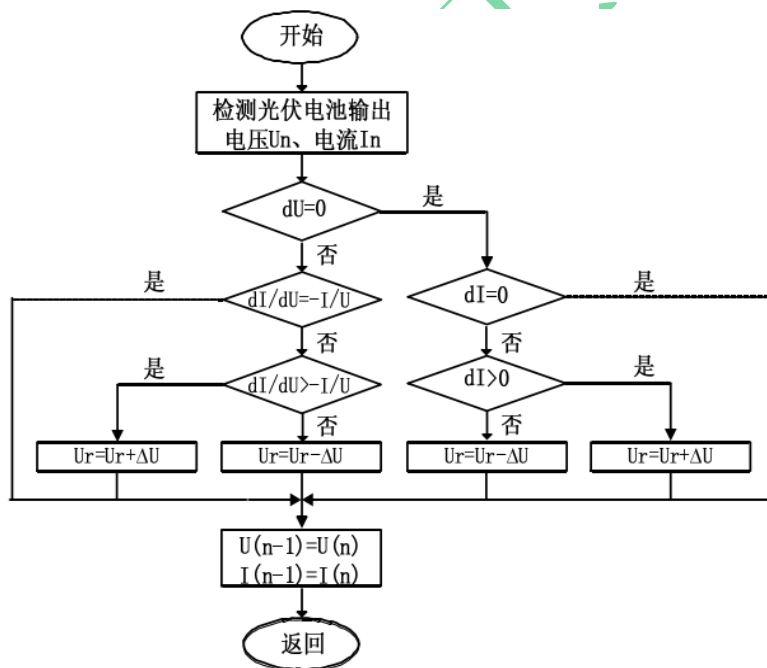


图 2-5 电导增量法控制流程图

电导增量法算法流程如图 2-5 所示，通过采样光伏电池的输出电流和电压，来判断当前电流与电压的变化量，进而对工作电压做出适当的调整。如果电压的变化量为零，而电流的变化量不为零，则表明外界环境条件发生变化，需要对当前的工作电压作出调整。当电流的变化量大于零时，需要增加工作点电压，否则减小工作点电压。如果电压的变化量不为零，比较光伏电池的瞬时电导与电导变化量的关系，如果电导变化量大于负电导值，增加占空比，反之减小占空比，最后保存本次电压电流采样值，然后进入下一次循环。由于电导增量法的跟踪速度

快，控制效果精确，所以在外界条件变化较快的场合下，仍然可以得到良好的控制性能。在外界环境发生变化时，光伏电池输出电压能以较快的速度跟踪变化，进入稳态后震荡也比较小，可是其响应速度仍然较缓慢。

三、单相光伏并网发电系统的孤岛检测技术研究

3.1 孤岛效应的概述

当光伏并网发电系统接入到公共电网后，如果公共电网由于故障检修或者误操作而造成电网停止向本地供电，而此时的并网系统无法检测到公共电网停电的状态，同时继续并网运行工作，这就会使得本地负载处在接受供电的状态。此时，光伏并网发电系统与负载形成了一个孤立运行的系统，这种现象的产生就被称为孤岛效应。在实际情况中，公共电网由于各种因素发生停电的现象是不可避免的，因此孤岛效应的产生确实存在，这对光伏并网发电系统构成了隐患，必须加以解决此问题。

孤岛效应产生之后，会造成如下一些不利影响：

- 1、电网停止供电后，若此时光伏发电系统仍在给负载供电，会给相关的维修人员和用户带来电击的危险。
- 2、光伏发电系统脱离电网后，其电压和频率会失去控制，如果没有相关的继电器对孤岛系统中的电压和频率进行限制，可能使得“孤岛”运行于波动状态，对电网和设备会造成损害。
- 3、当光伏发电系统再次接入电网时，两者的相位不同步可能产生很高的冲击电流，会损害光伏发电装置和设备，甚至引起电网的重跳闸。
- 4、孤岛的形成会使得相关故障（如短路故障或接地故障）不能被清除，会损害用电设备，并会干扰发电系统的自动恢复。

3.2 孤岛效应的机理分析

光伏并网发电系统的结构图如图 4-1 所示，逆变器输出的有功功率为 P 、无功功率为 Q ；逆变器向电网侧提供的有功功率为 P 、无功功率为 Q 。 P_{load} 为负载上消耗有功功率； Q_{load} 为负载上消耗无功功率； U_i 为逆变器输出电压； U_g 为电网电压。

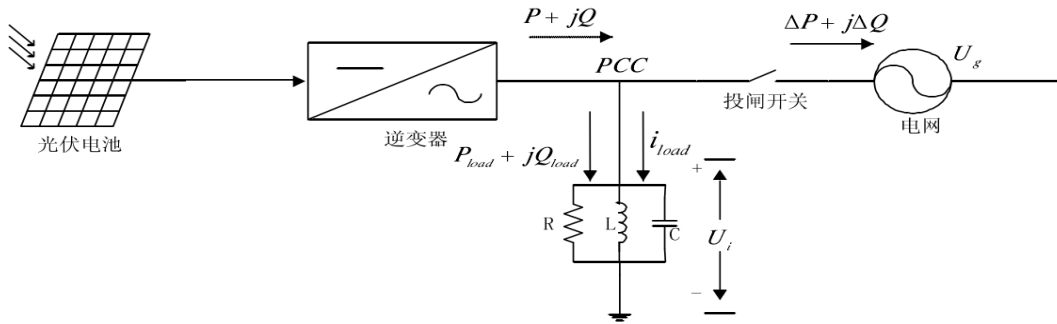


图 3-1 光伏并网发电系统结构示意图

当光伏并网发电系统接入公共电网后，分别对电网侧的开关闭合与断开的情况进行讨论。当开关闭合时，系统处于正常工作的状态，由图中功率流向可得：

$$P = P_{load} + \Delta P = \frac{U_g^2}{R} + \Delta P$$

$$Q = Q_{load} + \Delta Q = U_g^2 \left(\frac{1}{\omega_g L} - \omega_g C \right) + \Delta Q$$

当逆变器输出的有功功率小于本地负载所需的有功功率时，负载所需的不足部分将由电网来提供补充；当本地负载所需的有功功率小于逆变器输出的有功功率时，多余的部分将馈送到电网。其中， ω_g 为电网电压的角频率。当开关断开时，光伏并网发电系统与电网断开，逆变器继续向本地负载供电，此时系统处于孤岛运行状态。

$$P = P_{load} = \frac{U_i^2}{R}$$

$$Q = Q_{load} = U_i^2 \left(\frac{1}{\omega_i L} - \omega_i C \right)$$

上式中， ω_i 为逆变器输出电压角频率。有上面的式子可算的

$$\frac{\Delta P}{P} = 1 - \frac{U_g^2}{U_i^2}$$

$$\frac{\omega_i}{\omega_g} \times \frac{U_g^2}{U_i^2} = \frac{Q - \Delta Q + Q_c}{Q + Q_c \times \frac{\omega_i}{\omega_g} \times \frac{U_g^2}{U_i^2}}$$

当光伏并网逆变器工作在谐振状态下，谐振角频率 $\omega = 1/\sqrt{LC}$ 。上式中，谐振电容 C 的无功功率为 Q_c ，其中 $Q_c = \omega_g \times C \times U_g^2$ 。

$$\frac{\omega_i}{\omega_g} \times \frac{\Delta P}{P} - \frac{\Delta Q}{Q} = \left(\frac{\omega_i^2}{\omega_g^2} - 1 \right) \times \frac{Q_c}{Q} + \frac{\omega_i}{\omega_g} - 1$$

通过上式可知，光伏并网发电系统处于孤岛运行的状态时，逆变器输出的电压与频率影响了其有功功率与无功功率的输出。本地负载所需的功率全部由并网逆变器输出功率提供，则有 $\Delta P = 0$ ， $\Delta Q = 0$ ，

$$\left(\frac{\omega_i}{\omega_g} - 1\right) \left(\frac{Q_c}{Q} \left(\frac{\omega_i}{\omega_g} + 1 \right) + 1 \right) = 0$$

由以上分析可知,当 $\omega_i = \omega_g$ 时,本地负载所消耗的功率等于逆变器输出的功率,处于平衡状态。公共耦合点 PCC 处的状态会随着逆变器输出电压和频率发生变化而改变。

3.3 主动频率偏移法

主动频率偏移法(Active Frequency Drift, AFD)作为目前常用的孤岛效应检测方法之一,其工作原理为:通过改变逆变器输出电流波形,即在前半周期,使得电流的频率比上一周期公共耦合点 PCC 电压的频率略微低或略微高,当电压还未达到零点而电流半波已经到达零点时,强制将电流保持为零直到后半周期的到来;在后半周期,当逆变器输出电流再次达到零点时,维持该电流值继续为零直至该周期结束。

在光伏并网发电系统正常工作时,由于 PCC 点电压受到公共电网电压的钳制作用,在电网的平衡作用下并网电流的频率将保持不变,当电网断开时,电流频率的变化会使得公共耦合点电压的频率发生偏移,在经过一段时间的积累作用,当其超过正常范围值即可检测出孤岛效应。PCC 点电压与并网电流的示意图如图 3-2 所示,图中实线为公共点电压,虚线为逆变系统输出电流

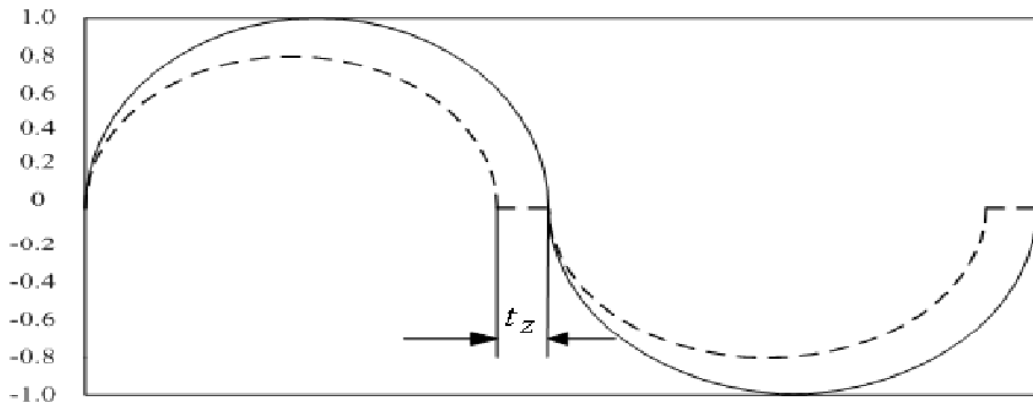


图 3-2 主动频率偏移法的公共点电压和并网电流信号

当电网断开后,随着扰动信号的施加,PCC 点失去电网的平衡作用,频率会发生变化,当新的平衡状态产生时,应满足如下关系:

$$\arctan \left[R \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C \right) \right] = \frac{\omega t_Z}{2} = \frac{\pi c_f}{2}$$

其中, t_z 为电流在过零点时刻滞后或超前 PCC 点电压过零点时刻的时间间隔, 称为电流的截断时间, 设定电压周期为 T , cf 定义为截断系数, 其中 $cf = 2t_z / T$, 表示频率扰动的强度。

正反馈的主动频率偏移法(Active Frequency Drift with Positive Feedback, AFDPF) 是对主动频率偏移法的一种改进, 对公共耦合点的频率运用了正反馈, 提高了孤岛检测的速度。当孤岛效应发生时, PCC 处的电压频率变化会在反馈作用下加速偏移, 能够更快地检测到孤岛, 缩短检测时间。在该方法中, 提出了如下的函数表达式:

$$cf = cf_0 + k\Delta f$$

其中, cf_0 初始固定扰动信号; k : 反馈增益; $\Delta f = f - f_0$, f 为 PCC 处的电压频率, f_0 电网电压额定频率。

尽管 AFDPF 方法提高了孤岛检测的速度, 但与 AFD 检测法原理类似, 施加的干扰信号 cf 都是按照同一方向对逆变器输出电流的频率加以扰动。由于负载性质不同, 当孤岛发生时, PCC 点电压频率可能与施加的扰动信号方向相反, 可能会延长检测时间甚至无法检测出孤岛。

综上所述, 在考虑负载特性对检测效果的影响下, 本文提出了周期性双向扰动的 AFDPF 孤岛效应检测方法, 就是周期性地对逆变器输出的电流施加正反两方向的频率扰动信号, 避免了检测结果对负载特性的依赖。

该检测方法能够针对不同的负载特性, 在电网断开后逆变器输出的电流频率发生明显的波动, 有效的避免了关于负载在单向频率扰动下所产生平衡作用的问题, 对当前频率变化的趋势先做出判断, 然后再施加相同方向的扰动信号, 提高了检测效率。周期性双向扰动的 AFDPF 孤岛效应检测法流程图如图 4-3 所示。加入了两种不同向的扰动信号 cf_1 、 cf_2 , 分别为 5%、-5%; Δf_1 、 Δf_2 为施加干扰信号 cf_1 、 cf_2 后, 逆变器输出的并网电流频率与公共耦合点 PCC 的电压频率之间的误差; cf_k 、 cf_{k+1} 分别表示上一周期、本周期的 PCC 点电压频率。

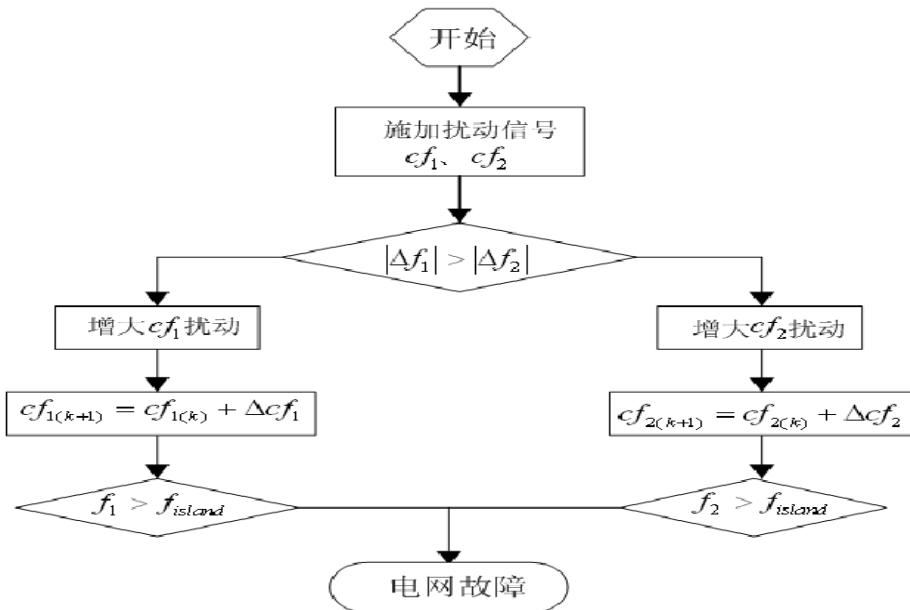


图 3-3 周期性双向扰动的 AFDPF 孤岛效应检测法流程图

通过以上的分析研究，在 Matlab/Simulink 环境下搭建了孤岛效应检测系统的仿真模型，编写检测控制的 S 函数模块来实现周期性双向扰动的 AFDPF 孤岛效应检测方法。

```

%=====
% mdlOutputs
function sys=mdlOutputs(t,x,u)
global f_i f_vo theta_i theta_vo isIslanding
theta_vo=u(2);

if abs(theta_vo)<0.04 % 电压相位为0时更新频率0.04
    f_vo=u(1);
end

if(isIslanding==0)
    if abs(theta_vo)<0.04
        if (f_vo>50.5) || (f_vo<49.5) %判断频率是否越界
            sys=[0 0];
            isIslanding=1;
        else
            f_i=f_vo+2.5;%2.5
            theta_i=theta_vo;
        end
    else
        if(pi-theta_i<0.03) && (pi-theta_vo>0.03)
            theta_i=pi;
        elseif(2*pi-theta_i<0.03) && (2*pi-theta_vo>0.03)
            theta_i=2*pi;
        elseif (pi-theta_vo<0.03) && (pi-theta_i>0.03)
            theta_i=pi;
        elseif (2*pi-theta_vo<0.03) && (2*pi-theta_i>0.03)
            theta_i=2*pi;
        else
            theta_i=theta_i+2*pi*f_i*1e-4;
        end
    end
    sys(1)=sin(theta_i);
else
    sys(1)=0;
end
sys(2)=f_vo;

```


四、单相光伏并网逆变器控制技术研究

4.1 并网电流的控制

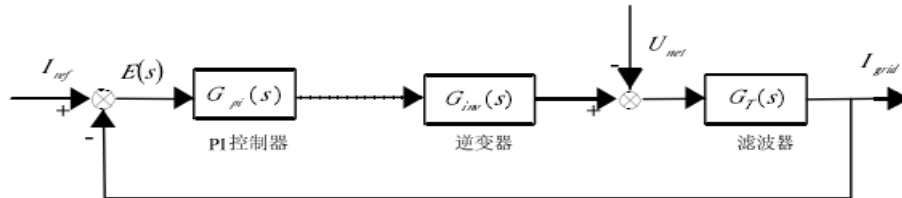


图 4-1 并网电流的控制系统

并网电流控制结构示意图如图 4-1 所示，将逆变器输出的并网电流经过滤波后进行实时采样，并对采样的实际输出电流与参考电流进行比较得到误差值 $E(s)$ ，经过 PI 控制器调节后的电流误差值 $E(s)$ 再与三角载波信号进行比较，从而得到控制并网电流输出的 PWM 驱动信号，通过 PI 控制器的调节，提高了逆变输出电流的稳态精度。在并网电流的控制系统框图中， I_{ref} 为给定的并网参考电流， I_{grid} 为逆变器输出的实际并网电流， U_{net} 为电网电压。将滤波电感 L 上的电流 I_g 作为状态变量，利用基尔霍夫电压定律(KLV)可推导出逆变器输出电路

的电压平衡方程：

$$U_o = L \frac{dI_g}{dt} + RI_g + U_g$$

进行拉氏变换可得

$$I_g(s) = \frac{1}{Ls + R} [U_o(s) - U_g(s)] = G_T(s) [U_o(s) - U_g(s)]$$

$1/(Ls+R)$ 为滤波系统的传递函数，忽略功率开关器件、PWM 开关周期及死区时间等非线性因素的影响，全桥逆变系统的传递函数在 SPWM 控制方式下可以等效为一阶惯性环节，其传递函数为：

$$G_{inv} = \frac{K_{pmw}}{T_{pmw}s + 1}$$

其中， T_{pwm} 为时间常数， K_{pwm} 为逆变器增益， L_m 是控制算法环节调节器的饱和和限幅值， $K_{pwm} = U_d/L_m$ 。

PI 控制器的传递函数为：

$$G_{pi}(s) = \frac{K_p s + K_i}{s}$$

经过以上的研究分析可以得到，光伏并网逆变控制系统的开环传递函数为

$$G(s) = \frac{K_p s + K_i}{s} \cdot \frac{K_{pmw}}{T_{pmw}s + 1} \cdot \frac{1}{Ls + R}$$

4.2 电网电压的前馈补偿

在电流内环控制的基础上，引入了电网电压前馈补偿来抑制电网电压扰动的

控制策略，以达到改善逆变器输出并网电流的目的。在电流内环的控制下，要求逆变环节输出的并网电流快速地跟随并网参考电流，并且并网电流与电网电压保持同频、同相，该过程的实现将是整个单相光伏并网控制系统设计中关键部分之一。通过在控制系统中加入电网电压的前馈补偿环节，可以有效减小电网电压的波动给并网电流带来的干扰，降低其波动对并网电流的影响。由于电网电压前馈补偿采用的是开环控制方式去抵消扰动信号，所以这种控制方式并没有改变原控制系统的特性。此外，在引入电网电压前馈补偿之后，可以在一定程度上适当减小系统的反馈增益，这样可以减小系统的跟踪误差。该控制策略的系统框图如图 4-2 所示，即在并网电流控制系统的基础上加入前馈补偿环节 $G_N(s)$ 。

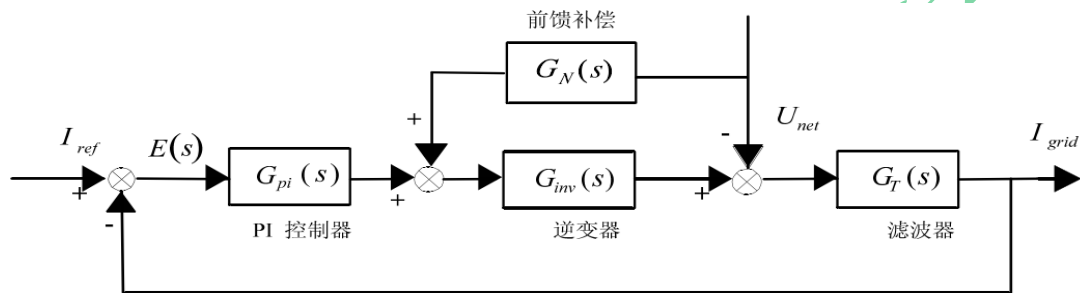


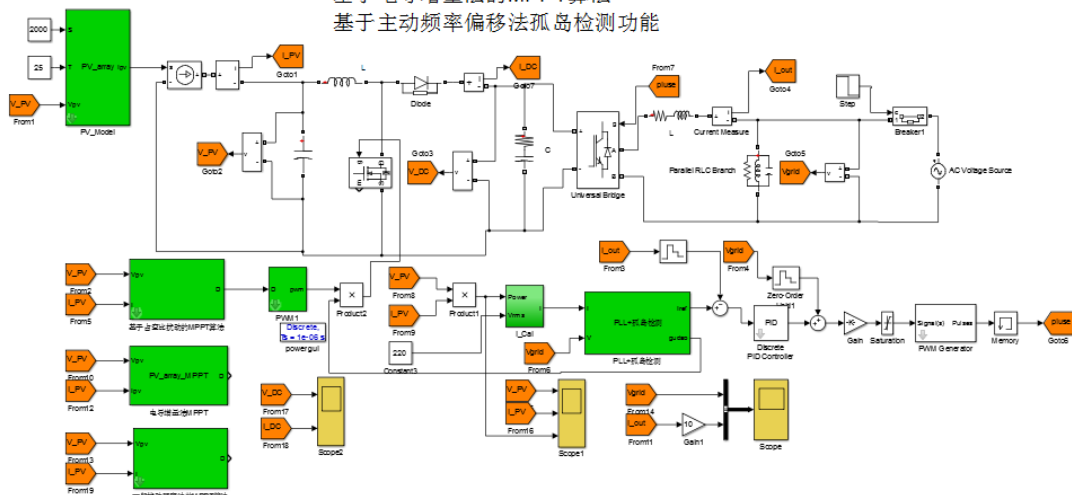
图 4-2 电网电压前馈补偿控制结构框图

通过在并网逆变系统中加入电网电压前馈补偿控制，有效的减小了电网电压对逆变环节输出并网电流的影响，提高了并网电流的质量，能够实现良好的补偿效果。

五、仿真结果

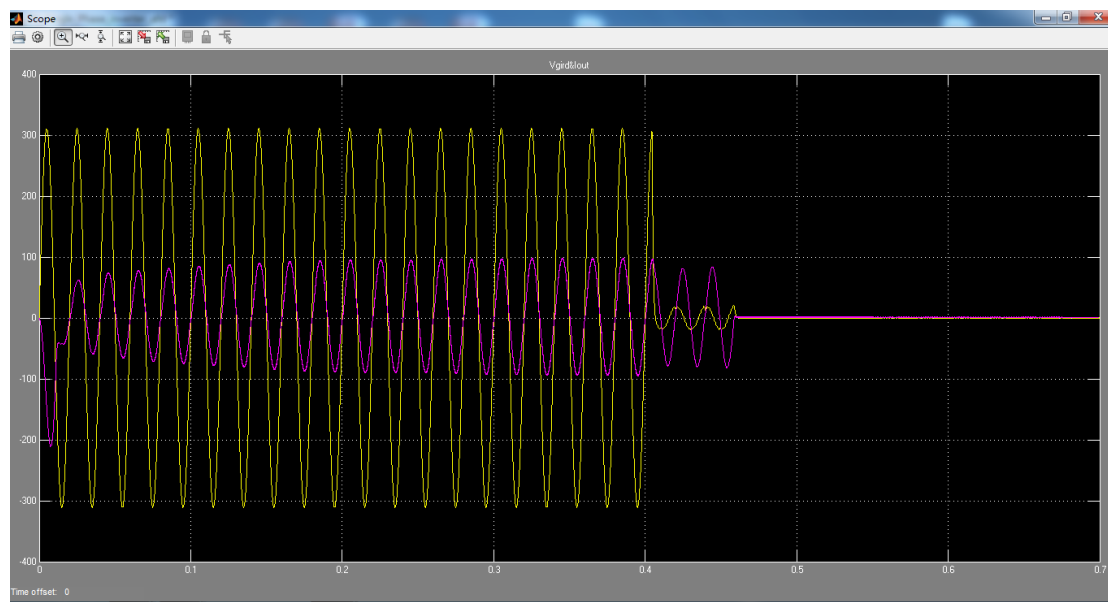
5.1 仿真模型

基于 PV 模型和 MPPT 实现两级单相光伏并网逆变仿真研究
 基于占空比扰动的 MPPT 算法
 基于一般扰动观察法的 MPPT 算法
 基于电导增量法的 MPPT 算法
 基于主动频率偏移法孤岛检测功能

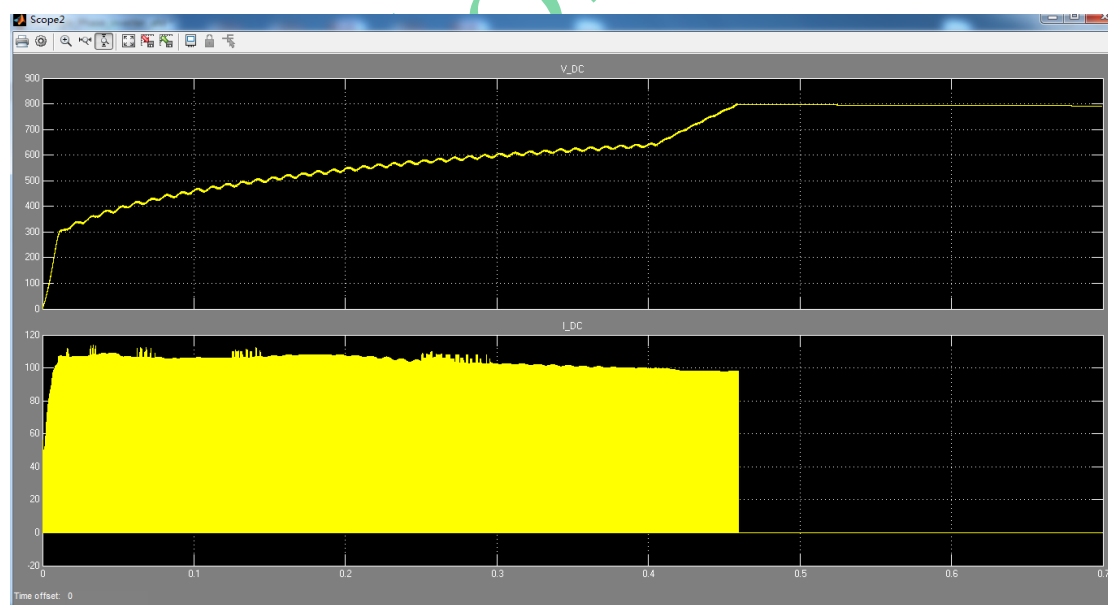


5.2 仿真结果

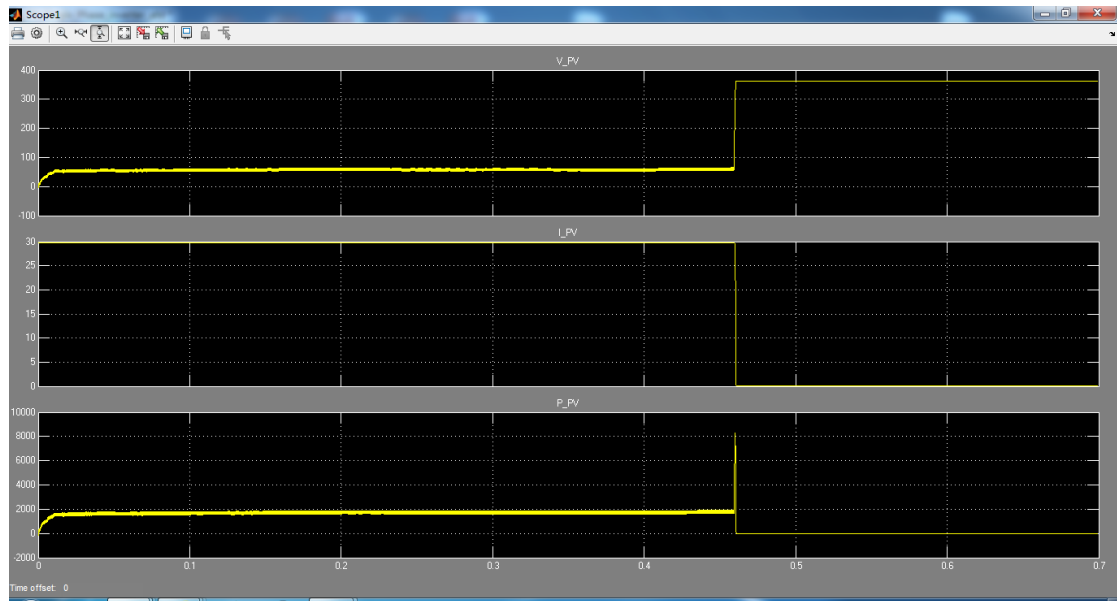
电网电压和输出电流



直流母线电压和电流



光伏电压和电流:



NewSoft