



廣西大學

家用光伏并网发电系统

学 院 电气工程学院

专 业 工程科学专业

班 级 工程科学创培 201 班

学 号 2001190137

姓 名 于若涛

指导教师 宋绍剑

二〇二二年十一月

摘 要

随着社会生产的日益发展，人类对能源的需求量在不断增长。由于化石能源造成的破坏，全球范围内的能源危机日渐突出。地球储存的化石能源总量是有限的，随着其储量减少、价格增加，生产的发展于人民生活水平的提高将被严重制约。可再生能源是满足世界能源需求与环保需要的重要资源，在当今的时代语境下，高效利用可再生能源的重要性不言而喻。其中，太阳能资源在我国非常丰富，具有很好的应用前景。

光伏发电系统在开发太阳能资源的过程中应运而生，它通过太阳能电池板，将太阳能转化为电能，并通过并网逆变器，将太阳能电池板产生的直流电转化为与市电同频的交流电，供给使用，或回馈给电网。

光伏并网发电系统的核心是并网逆变器。在本文中，作者结合电力电子技术课程中所学知识，参考相关文献，对电池板选型、组装方案、单相光伏并网逆变器利用 **Matlab** 进行了设计与仿真，并对仿真结果给出分析。

关键字：光伏发电， 电力电子， 并网逆变器， 最大功率点跟踪

Abstract

With the increasing development of social production, human demand for energy is steadily rising. Due to the destruction of the environment caused by fossil fuels, the global energy crisis is becoming more and more prominent. The total amount of fossil energy stored on the earth is limited. As its reserves decrease and prices increase, the development of production and the improvement of people's living standards will be severely restricted. Renewable energy is an important resource to meet the world's energy needs and environmental protection needs. In the context of today's era, the importance of efficient use of renewable energy is self-evident. Among them, solar energy resources are very rich in China and have promising application prospects.

The photovoltaic power generation system came into being in the process of developing solar energy resources. It converts solar energy into electrical energy through solar panels and converts the direct current generated by the solar panels into alternating current with the same frequency as the mains through grid-connected inverters to supply use or feedback to the grid.

The core of the photovoltaic grid-connected power generation system is the grid-connected inverter. In this paper, the author uses Matlab to design and simulate the panel selection, assembly scheme, and single-phase photovoltaic grid-connected inverter based on the knowledge learned in the power electronics technology course and refer to the relevant literature, and the simulation results are analyzed.

Keywords: Photovoltaic Power Generation, Power Electronics, MPPT

目录

1. 综述.....	4
1.1 发电方式	4
1.2 光伏发电	4
1.2.1 光伏发电系统	4
1.2.2 光伏逆变器	5
1.3 项目要求	6
1.3.1 家用屋顶光伏并网发电系统结构.....	6
二. 单相光伏并网发电系统设计与仿真.....	7
2.1 单相光伏并网发电系统设计	7
2.1.1 电池板选型	7
2.1.2 组装方案	8
2.1.3 单相光伏并网逆变器.....	8
2.2 单相光伏并网发电系统仿真.....	9
三. 总结	11
附录	12
附录一. 引用文献.....	12
附录二. MPPT 控制代码.....	13
附录三. 光伏电池板的 I-V, P-V 特性曲线	15

1. 综述

1.1 发电方式

发电是从一次能源中产生电能的过程。对于电力行业的公用事业公司，发电是向最终用户交付（传输、分配等）或存储（例如，使用抽水蓄能方法）之前的阶段。电力在自然界中并非能够随意获取的，它必须是“生产”的，即将其他形式的能源转化为电能。生产在发电站中进行，电力通常由机电发电机产生，主要由以燃烧或核裂变为燃料的热力发动机驱动，也可由其他方式驱动，如流动的水和风的动能。其他能源包括太阳能光伏发电和地热发电。还有一些较为奇异的方法被用来回收能量，例如聚变反应堆设计，旨在直接从由聚变反应产生的快速移动的带电粒子产生的强磁场中提取能量。

逐步将燃煤发电站淘汰、淘汰燃气发电站，并捕获其温室气体排放，是限制气候变化所需的能源转型的重要组成部分。预计将需要更多的太阳能和风能。随着交通、家庭和工业的进一步电气化，电力需求将强劲增长。

1.2 光伏发电

1.2.1 光伏发电系统

光伏电站，又称太阳能农场、太阳能发电厂，是为商业电力供应而设计的大型并网光伏发电系统（PV system）。它们与大多数建筑安装和其他分散式太阳能不同，因为它们通常以公用事业级别供电，而不是向本地用户或用户供电。[1]

太阳能电源的核心是太阳能电池板，它可将光直接转化为电能，这与聚光太阳能不同，不应将二者混淆。聚光太阳能是另一种主要的大型太阳能发电技术，它利用热量来驱动各种传统的发电机系统。这两种方法都有各自的优点和缺点，但迄今为止，由于各种原因，光伏技术得到了更广泛的应用。截至 2019 年，光伏系统约占公用事业规模太阳能发电容量的 97%。[2]

在一些国家，光伏电站的铭牌容量以兆瓦峰值（MW_p）为单位，指太阳能电池阵列的

理论最大直流功率输出。在其他国家，制造商会指明表面和效率。然而，加拿大、日本、西班牙和美国经常指定在 MWAC 中使用转换后的较低标称功率输出，这是一种更直接可对比的衡量标准。大多数太阳能园区的开发规模至少为 1 MW_p。截至 2018 年，全球最大的运营光伏电站已超过 1 吉瓦。截至 2019 年底，约 9,000 座总装机容量超 220GWAC 的电站是大于 4 MWAC 的太阳能发电场。

现有的大型光伏电站大部分由独立发电商拥有和运营，但社区和公用事业项目的参与正在增加。以前，几乎所有这些都至少部分得到了上网电价或税收抵免等监管激励措施的支持，但随着 2010 年后成本大幅下降以及大多数市场已实现电网平价，通常不需要外部激励措施。

1.2.2 光伏逆变器

太阳能逆变器或 PV 逆变器是一种功率逆变器，可将光伏 (PV) 太阳能电池板的可变直流 (DC) 输出传递为至可馈入商业电网或由本地的离网电网使用。它是光伏系统 (BOS) 中关键的平衡组件，允许使用普通的交流供电设备。太阳能逆变器应具有适用于光伏阵列的特殊功能，包括最大功率点跟踪 (MPPT) 和防孤岛保护等。

太阳能逆变器可分为三大类：

1. 独立逆变器：用于隔离系统，逆变器从光伏阵列充电的电池中获取直流能量。许多独立逆变器包含集成电池充电器，以便从交流电源补充电池。独立逆变器通常不以任何方式与公用电网接口，因此不需要具有防孤岛保护；
2. 并网逆变器：其相位与公用电网提供的正弦波相同。出于安全原因，并网逆变器设计为在失去公用事业供应时自动关闭。在公用事业停电期间，它们不提供备用电源；
3. 备用电池逆变器：是一种特殊的逆变器，旨在从电池中获取能量，通过车载充电器管理电池充电，并将多余的能量输出到公用电网。这些逆变器能够在公用事业停电期间为选定的负载提供交流能量，并且需要具有防孤岛保护。

1.3 项目要求

1.3.1 家用屋顶光伏并网发电系统结构

家用屋顶光伏并网发电系统可主要拆分为三部分：电池板选型、组装方案、单相光伏并网逆变器。其中，逆变器可为单级或 DC/DC+DC/AC 两级。我们在后面几段中分别对具体细节进行描述。[3]

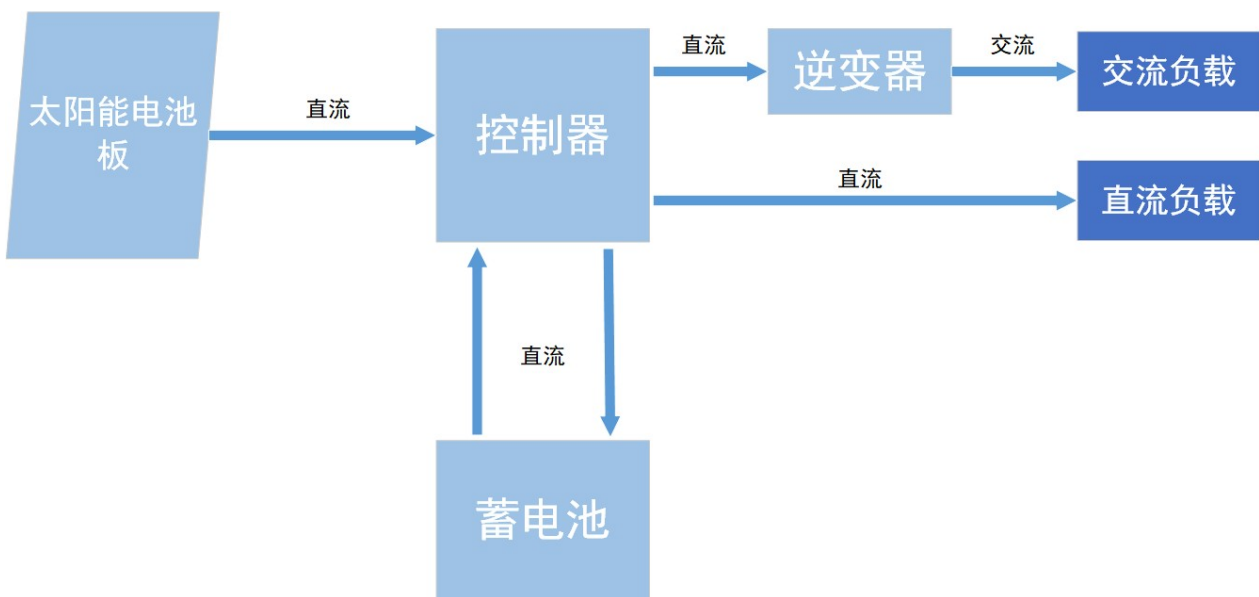


图 1

通常的小型光伏发电系统如图 1 所示，其中各部分的作用为：

1. 太阳能电池板：将太阳的辐射能量转化为电能，并存储于蓄电池中，或驱动负载工作。其质量和成本直接决定整个系统的质量和成本；
2. 太阳能控制器：控制整个系统的工作状态，并对蓄电池起到过充电保护、过放电保护的作用。在温差较大处进行温度补偿；
3. 蓄电池：常用铅蓄电池，微型系统中，可用镍氢电池、镍镉电池、锂电池等。对太阳能电池板产生的电能进行存储；
4. 逆变器：太阳能的直接输出一般为 12VDC、24VDC、48VDC，为向 220VAC 的设备提供电能，需通过逆变器，将直流电源转化为交流电。某些场合中，需使用 DC-DC 逆变器。

二. 单相光伏并网发电系统设计与仿真

2.1 单相光伏并网发电系统设计

我们在 Matlab 中利用 Simulink 工具包对单相光伏并网发电系统进行设计。

2.1.1 电池板选型

我们利用图 2 中的信号，模拟太阳能电池板运行过程中，环境光照强度的变化。[4]

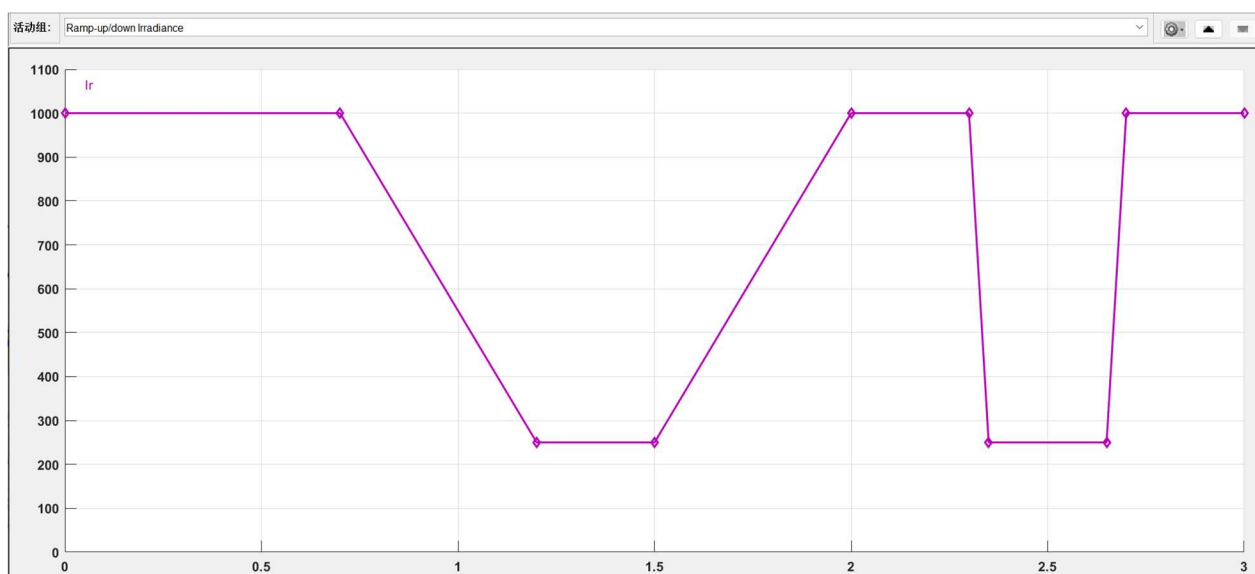


图 2

我们选用 Simulink 中 PV Panel 元件对太阳能电池板（光伏阵列）进行建模。光伏阵列由并联的 Npar 模块串组成，每个串由串联的 Nser 模块组成。四个 PV 模型参数包括：光生电流 I_{ph} 、二极管饱和电流 I_{sat} 、并联电阻 R_p 和串联电阻 R_s ，这四个参数是选择电池板的主要参考数据。我们在此指定太阳能电池板型号为 SunPower SPR-305-WHT, Npar=66, Nser=5。由生产厂家提供的信息可知：

$$[R_s, R_p, I_{sat}, I_{ph}] = [0.037998, 993.51, 1.1753e-08, 5.962]$$

测量的以下四个模块特性（STC：辐照度 1000 W/m^2 ，电池温度 25 摄氏度）分别为：开路电压 $V_{oc} = 64.2$ ，短路电流 $I_{sc} = 5.96$ ，最大功率点电压 $V_{mp} = 54.7$ ，最大功率点电流 $I_{mp} = 5.58$ 。PV 阵列的 I-V，P-V 特性曲线见附录三

2.1.2 组装方案

将光伏电池板正负极接出，利用电容滤波后，接到光伏并网逆变器处进行逆变。此处逆变电路选择 boost 电路，其控制信号由外接的控制电路给出。Boost 电路输出后，首先进行滤波，消去谐波，后接入电压源转换器 VSC，为后续接入电网做准备。VSC 由外接的 VSC 控制器进行控制。经 LC 电路滤波后，利用变压器，进行并网。整个系统如图 3 所示。

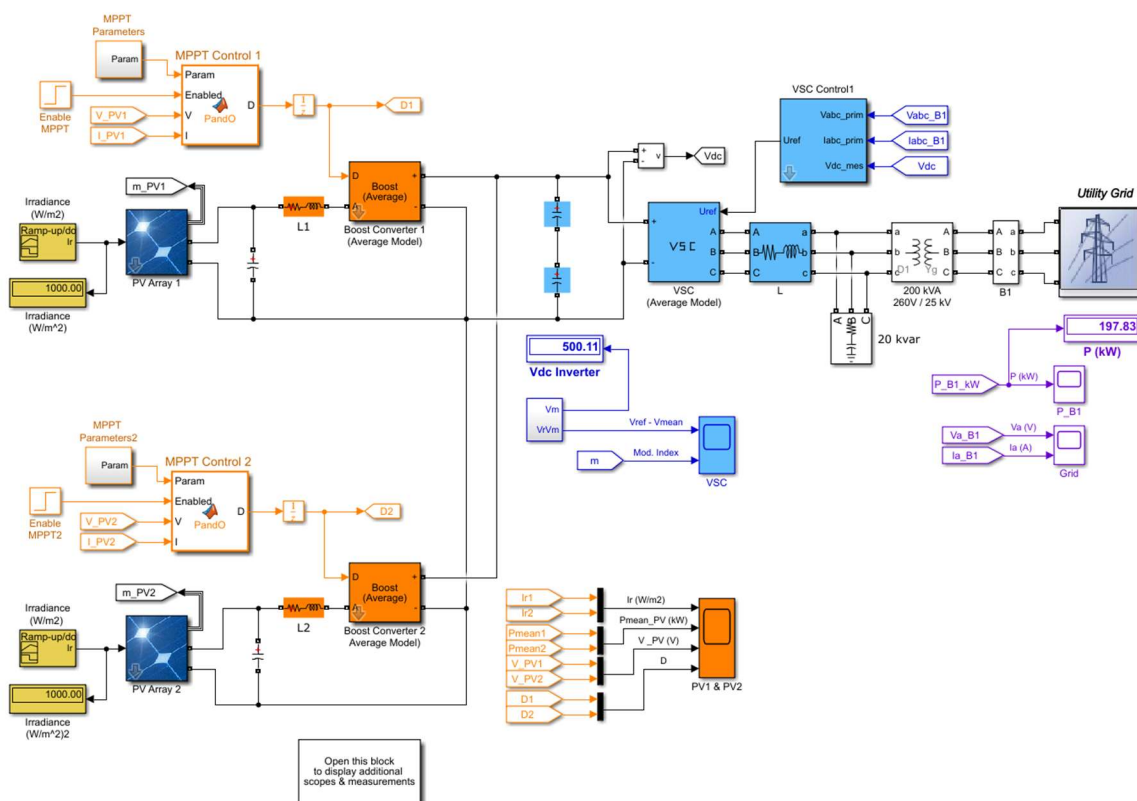


图 3

在该模型中，升压和 VSC 转换器由等效电压源表示，该电压源在开关频率的一个周期内产生平均的交流电压。这样的模型不包含谐波，但保留了控制系统和电力系统相互作用产生的动态。该模型允许使用更大的时间步长，从而实现更快的仿真。

2.1.3 单相光伏并网逆变器

在此电路中，作者仅利用 Boost 电路模块实现了 DC-DC 逆变。由于环境中光强的波动，对于电路的控制显得尤为重要。[5]外接的 MPPT 控制电路对 Boost 进行调控，控制算法实

现从供给的光能中，得到最大电能功率。控制代码详见附录二。提供给算法的参数如图 4。
[6]

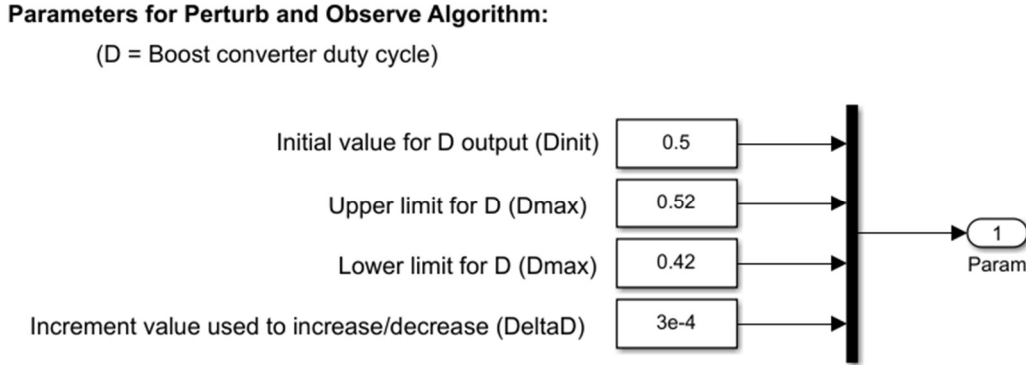


图 4

2.2 单相光伏并网发电系统仿真

从 $t = 0$ 到 $t = 0.05$ 秒，到 Boost 和 VSC 转换器的脉冲被阻塞。PV 电压对应于开路电压， $N_{ser} * V_{oc} = 5 * 64.2 = 321$ 。三电平桥作为二极管整流器运行，直流链路电容器充电至 500 V 以上。

在 $t = 0.05$ 秒时，升压和 VSC 转换被解除阻塞。直流链路电压调节为 $V_{dc} = 500V$ 。升压转换器的占空比是固定的 ($D = 0.5$)，太阳辐照度设置为 1000 W/m²。在 $t = 0.25$ 秒时达到稳态。因此，产生的 PV 电压为 $V_{pv} = (1 - D) * V_{dc} = (1 - 0.5) * 500 = 250$ 。PV 阵列输出功率为 96 kW，而辐照度为 1000 W/m² 的最大功率为 100.7 kW。在 Scope Grid 上观察 25 kV 母线的 A 相电压和电流同相。

在 $t = 0.4$ 秒时，启用 MPPT。MPPT 调节器通过改变占空比开始调节 PV 电压，以提取最大功率。当占空比为 $D = 0.453$ 时获得最大功率 (100.7 kW)。在 $t = 0.6$ 秒时，PV 平均电压为 274 V，正如 PV 模块规格所预期 ($N_{ser} * V_{mp} = 5 * 54.7 = 273.5$)。

从 $t = 0.7$ 秒到 $t = 1.2$ 秒，太阳辐照度从 1000 W/m² 下降到 250 W/m²。MPPT 继续跟踪最大功率。在 $t = 1.2$ 秒时，辐照度已降至 250 W/m²，占空比为 $D = 0.485$ 。对应的 PV 电压和功率为 $V_{pv} = 255$ V 和 $P_{pv} = 22.6$ kW。在这种快速辐照度变化期间，MPPT 会继续

跟踪最大功率。

从 $t = 1.5$ 秒到 3 秒，应用了各种辐照度变化，以说明 MPPT 控制器的良好性能

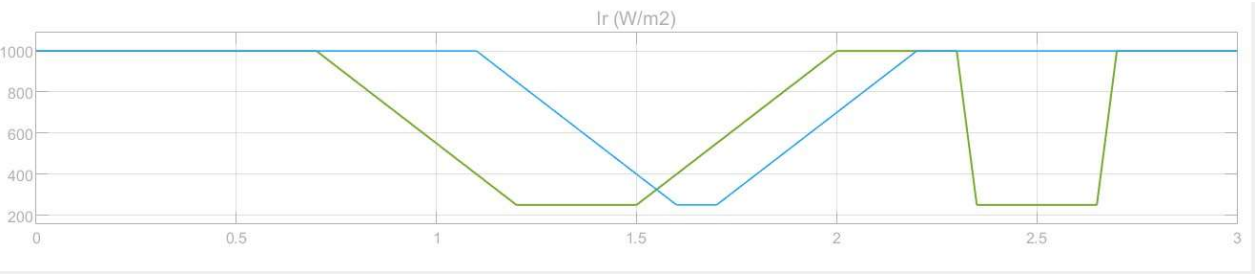


图 5. 光强随时间的变化



图 6. 功率随时间的变化

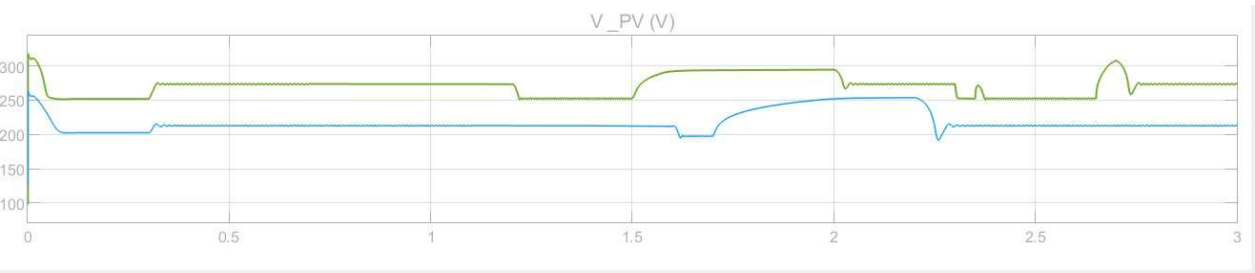


图 7. 电压随时间的变化

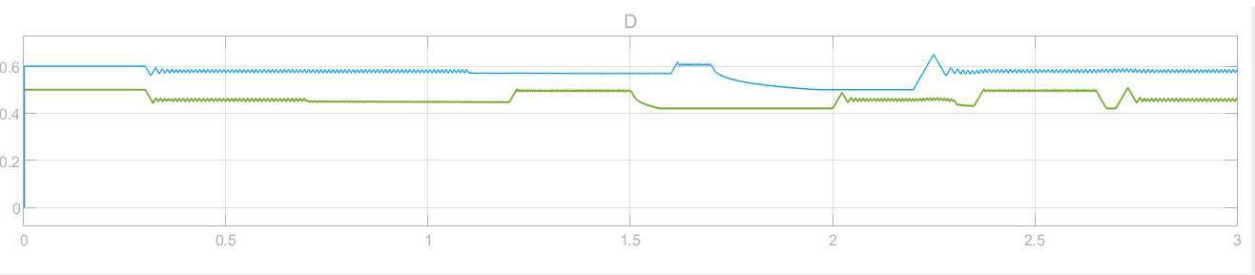


图 8. 占空比随时间的变化

三. 总结

光伏并网发电系统优化设计的原则，应当是在可靠并网的前提下，进行合理的配置，尽量减少系统规模，降低投资费用。即能满足使用的可靠性，又有较好的经济性。配置的规模除了取决于负载的类型、耗电量以外，还与当地的气象及地理等条件有关。

由于目前光伏电池组件的价格还比较高，所以一个完善的光伏并网发电系统或产品，除了要使用质量可靠的光伏电池组件、蓄电池及其他辅助部件以外，还必须因地制宜，对不同地区使用的光伏产品分别进行优化设计，而不能像一般的机电产品那样可以全国通用。光伏并网发电系统输出的应是与电网电压同频同相的正弦电流信号，但在实际的工作过程中，由于太阳能电池受气候及时间的影响较大，输出的直流电压不稳定。不稳定的直流电压经逆变器逆变后，输出的交流电流幅值也存在波动。再加上由于逆变器自身结构的原因，输出电流存在波形畸变。这就需要在设计并网逆变器硬件结构时，充分考虑以上因素，优化设计，减少逆变器输出波形畸变。

本文中考虑到以上要求，提出了以上安装方案和仿真，其中经过 DC/AC 逆变后的电流，通过电感、小电容滤波，将由于开关器件产生的高次谐波滤除。为进一步减少谐波对电网的污染，增加一高频变压器，使输入的太阳能电池矩阵和输出端的电网绝缘。

为进一步降低成本，提高效率，目前已开发出无变压器无绝缘方式的光伏并网用逆变器主电路。为减少高频逆变器对太阳能电池的电磁干扰，除在逆变器输出部分加电感、电容滤波外，还增加了共模滤波器，比高频变压器绝缘方式主电路简单，仍然是单级变换，效率高。没有变压器，体积小，重量轻，成本较低。但是，太阳能电池与外电网没有绝缘隔离，存在不安全因素，为了进行保护和防止电磁干扰，要采取许多防护措施。

附录

附录一. 引用文献

- [1] B. Kroposki, R. Margolis, and D. Ton, “Harnessing the sun,” *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 7, no. 3, pp. 22–33, 2009.
- [2] helioscope.com, “Concentrated solar power had a global total installed capacity of 6,451 MW in 2019,” <https://helioscsp.com/concentrated-solar-power-had-a-global-total-installed-capacity-of-6451-mw-in-2019/>, 2019.
- [3] A. R. Reisi, M. H. Moradi, and S. Jamasb, “Classification and comparison of maximum power point tracking techniques for photovoltaic system: A review,” *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 19, pp. 433–443, 2013.
- [4] T. Ma, H. Yang, and L. Lu, “Solar photovoltaic system modeling and performance prediction,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 36, pp. 304–315, 2014.
- [5] R. Venkateswari and S. Sreejith, “Factors influencing the efficiency of photovoltaic system,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 101, pp. 376–394, 2019.
- [6] P. Sanjeevikumar, G. Grandi, P. W. Wheeler, F. Blaabjerg, and J. Loncarski, “A simple MPPT algorithm for novel PV power generation system by high output voltage DC-DC boost converter,” in *2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 2015, pp. 214–220.

附录二. MPPT 控制代码

```
function D = PandO(Param, Enabled, V, I)

% MPPT controller based on the Perturb & Observe algorithm.

% D output = Duty cycle of the boost converter (value between 0 and 1)
%
% Enabled input = 1 to enable the MPPT controller
% V input = PV array terminal voltage (V)
% I input = PV array current (A)
%
% Param input:
Dinit = Param(1); %Initial value for D output
Dmax = Param(2); %Maximum value for D
Dmin = Param(3); %Minimum value for D
deltaD = Param(4); %Increment value used to increase/decrease the duty cycle D
% ( increasing D = decreasing Vref )
%

persistent Vold Pold Dold;

dataType = 'double';

if isempty(Vold)
    Vold=0;
    Pold=0;
    Dold=Dinit;
end
P= V*I;
dV= V - Vold;
dP= P - Pold;

if dP ~= 0 & Enabled ~=0
    if dP < 0
        if dV < 0
            D = Dold - deltaD;
        else
            D = Dold + deltaD;
        end
    else
        if dV < 0
            D = Dold + deltaD;
        else
            D = Dold - deltaD;
        end
    end
end
```

```
        D = Dold - deltaD;  
    end  
end  
else D=Dold;  
end  
  
if D >= Dmax | D<= Dmin  
    D=Dold;  
end  
  
Dold=D;  
Vold=V;  
Pold=P;
```

附录三. 光伏电池板的 I-V, P-V 特性曲线

