

## 并网光伏发电系统的电气效率研究

罗宇飞<sup>1</sup>，孙韵琳<sup>1,2</sup>，陈开汉<sup>2</sup>，沈辉<sup>1,2\*</sup>

（1. 顺德中山大学太阳能研究院，顺德 528300；2. 中山大学太阳能系统研究所，广州 510006）

**摘要：**本文主要研究太阳能光伏发电系统的电气效率，具体包括直流效率、逆变器效率和系统总效率。为了研究使用微逆变器和组串型逆变器这两种光伏发电系统的电气效率，本实验搭建了一个 6kW<sub>p</sub> 的光伏发电系统，采用室外太阳能测试设备分别在光伏阵列无遮挡和部分遮挡两种状态下，对使用组串型逆变器和使用微逆变器的光伏发电系统的电气效率进行测量和分析比较。实验结果表明：在无遮挡条件下组串型光伏发电系统的组件失配损失只有 3% 左右，系统的电气总效率主要取决于逆变器的效率，而当光伏阵列发生部分遮挡时，逆变器的类型、最大功率跟踪范围、组件的连接方式、逆变器效率等都会影响系统的性能。

**关键词：**光伏发电系统；直流效率；微逆变器；系统效率

### 0 引言

在现阶段，按太阳能光伏阵列与逆变器的连接方式不同，太阳能光伏并网发电系统可分为三种典型的拓扑结构<sup>[1]</sup>（如图 1 所示）：分别是集中型、组串型和交流组件型。不同的拓扑结构光伏发电系统，在安全性、系统效率、成本、维修等方面有很大差异<sup>[2]</sup>。下面分别介绍这几种拓扑结构。

集中型结构具有系统成本低，逆变器转换效率高的优点。但是在这种结构中组件既有并联也有串联，系统因组件失配造成的较大的功率损失；在组串型光伏发电系统中，逆变器分别对各个组串进行最大功率跟踪，而且把各组串输出的直流电压转换成相同的直流电压后进行汇流，然后再将直流电转换成交流电。这种结构的优点是各组串分别对应一个最大功率跟踪器，相互独立工作，由于能对每一串光伏组件阵列进行最大功率跟踪，减少了组串失配造成的能量损失，提高了效率，但是组件之间仍然存在失配问题。为避免以上这些问题，逆变器生产企业于是将目光转向了新的逆变器，微逆变器就是其中的一种，使用微逆变器的光伏发电系统采用交流组件型结构，每一个太阳能电池组件配一个逆变器，相互独立工作，由于输出交流电压相同，各微逆变器的输出端并联后并网。

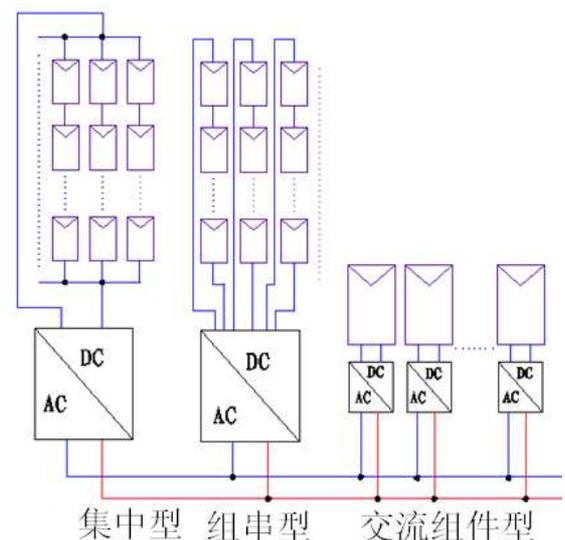


图 1 三种典型的拓扑结构

国内外都有很多研究人员在研究光伏发电系统的性能，他们先采集光伏发电系统一年以上的运行数据（太阳辐照度、环境温度、组件温度、光伏阵列输出电流和电压、系统输出电流和电压），然后再根据数据计算系统的性能参数<sup>[3]</sup>。由于采集的时间长，所以数据的准确度难以保证，并且这些数据与电站的管理和维护有关，这些数据都是用逆变器自带的采集系统采集的，数据的精确度也难保证。

使用室外太阳能光伏发电系统效率测试仪可采集太阳辐照度、组件温度、逆变器输入端和输出端的电压和电流，计算出系统的电气效率，从而能在

较短时间内准确测试光伏发电系统的性能。本文为比较微型逆变器发电系统与传统发电系统电气效率的差异,搭建了一个6kWp的光伏发电系统,其中有4kWp光伏发电系统使用4台SMA SB1200逆变器,另外2kWp使用10台英伟力公司生产的MC250微型逆变器,并使用室外太阳能光伏电气效率测试仪来采集数据,通过实验现场测试了组串型光伏发电系统和交流组件型光伏发电系统的直流效率和系统效率。光伏阵列的电气效率是光伏阵列高效运行以及经济效益回收的重要指标,通过光伏发电系统电气效率测试可以检测系统设计是否合理,电气设备选型是否匹配等系统的重要信息。

阴影是使系统效率降低的一个重要原因,如何减少阴影遮挡对光伏发电系统的功率损失也是近年来国内外研究学者关心的问题。国外在阴影对光伏发电系统的影响方面已经做了很多相关研究,造成组件失配的原因主要有云层遮挡、表面污垢、地面物体遮挡和组件参数差异等。其中最引人关注的问题是在有地面物体遮挡时应用交流组件型拓扑结构是否比其他结构更合适。Graaf、Weiden和Haan等人的研究表明,阴影遮挡对交流组件型和组串型拓扑结构的影响较小<sup>[4]</sup>。Beuth在1998年在一个实验中用组串型、集中型和交流组件型拓扑结构光伏系统做阴影条件下的性能比较实验,得出的结论是组件型拓扑结构并不具有优势,从安装成本和可靠性方面考虑,阴影条件下使用组串型和集中型逆变器更合适。但Gross等人在1997年的实验表明,使用组件型逆变器比使用集中型逆变器可减少阴影造成损失的19.5%~25%。

本文通过测量有阴影遮挡时光伏发电系统的电气效率分析了阴影遮挡对光伏发电系统的影响,同时也比较了使用微逆变器和组串型逆变器的光伏发电系统性能。

## 1 影响发电量的因素

太阳能光伏并网发电系统主要由太阳电池组

件、逆变器、配电设备组成。太阳电池组件能吸收太阳能输出直流电,逆变器使直流电转换成能供用电器使用的交流电。光伏发电系统的发电功率主要与以下因素有关<sup>[5]</sup>:

(1) 气象因素,包括太阳辐照度、环境温度和风速等。太阳辐照总量直接影响发电量,不同倾角和方位角放置的光伏组件接收的辐照量不一样,所以对于固定式光伏发电系统,光伏阵列的倾角和方位角也影响发电量。

(2) 光伏阵列的光电转换效率。光伏阵列的转换效率小于单块组件的转换效率,这是因为光伏阵列由光伏组件串联和并联组成,由于各个组件实际输出的参数不匹配造成了能量损失,而且在不同太阳辐照度和环境温度下组件的转换效率也不同。

(3) 逆变器的性能。逆变器的性能主要包括逆变器的启动电压和功率,逆变器的转换效率。逆变器的转换效率与逆变器的输入电压和功率有关。

(4) 其他因素。设备故障、灰尘遮挡、电缆损耗等。

## 2 电气效率计算公式

光伏发电系统的效率包括光伏阵列的直流效率、逆变器效率和系统效率。

在现阶段,按太阳能光伏阵列与逆变器的连接方式不同,太阳能光伏并网发电系统可分为三种典型的拓扑结构:集中型、组串型和交流组件型;按组件类型不同可分为单晶硅光伏发电系统、多晶硅光伏发电系统和薄膜光伏发电系统等等。光伏组件阵列的输出性能并不是阵列中各个组件输出性能的简单叠加,阵列中各个组件相互影响组成一个整体,所以需要使用直流效率的概念来反映光伏组件阵列的整体性能;在各种不同类型和结构的光伏发电系统中,光伏阵列的输出性能有很大差异,为方便比较也需要使用直流效率这个概念。直流效率概念的提出有利于研究各个因素对光伏发电系统性能的影响,优化光伏发电系统和提升光伏发电系统的性能。

光伏阵列的直流效率是光伏组件阵列的输出功率实际测量值与理论计算值之比。在计算组件输出功率时需要考虑风速、太阳辐照度和温度等外部环境因素对太阳能电池阵列的影响，为了方便比较要进行太阳辐照度和温度修正。直流效率可以用下式来计算：

$$\eta_{DC} = (I_{stc} / I_{rr}) \times (1 - \eta) \times (P_{DC} / P_{nom}) \quad ①$$

$$\eta = (T_{pv} - 25) \times \lambda \quad ②$$

式中： $I_{stc}$  为标准太阳辐照度

$I_{rr}$  为太阳辐照度测量值

$P_{DC}$  为光伏阵列输出功率

$P_{nom}$  为组件峰值功率之和

$\eta$  为组件温度修正系数

$\lambda$  为太阳能电池组件的功率温度系数

系统效率是系统输出功率与光伏组件在一定条件下产生的功率之比。系统效率可由下式计算：

$$\eta_s = P_{op} / P_{sp} \quad ③$$

式中：

$P_{op}$  为系统输出功率 (kW)；

$P_{sp}$  为光伏阵列的输出功率理论值(kW)。

$P_{sp}$  是光伏阵列的输出功率理论值，不能直接测量，只能先在室内测量单个组件的峰值功率，然后再根据现场测量得到的太阳辐照度和组件温度计算出光伏阵列输出功率的理论值。

$$\text{逆变器效率 } \eta_{ac} = P_{ac} / P_{DC} \quad ④$$

即逆变器的输出功率与输入功率之比。

逆变器的效率与输入电压和功率有关，一般情况下在输入功率大的时候逆变器的效率较高，在输入电压达到某个特定值时，效率达到最高。

影响光伏发电系统效率大小的因素有最大功率跟踪准确度、太阳能电池组件匹配度和直流电能传输损耗等。最大功率跟踪准确度与太阳能电池组件之间的连接方式有关，也与光伏阵列与逆变器的是否匹配有关，太阳能电池组件的匹配度与组件的连接方式

和组件输出性能的一致性有关。所以通过检测系统电气效率可检测系统设计是否合理，电气设备选型是否匹配。

### 3 电气效率的测试

为计算直流效率需要同时测量太阳能电池组件的输出功率  $P_{DC}$ 、太阳辐照度  $I_{rr}$  和太阳能电池温度  $T_{pv}$ 。直流效率考虑了直流电能传输的损耗，所以应该在逆变器的输入接口测量太阳能电池组件的输出功率。

测量前必须将太阳能电池组件表面清洗干净，测量周期内辐照度最大值和最小值之差不能超过  $20W/m^2$  才能保证直流效率计算的准确度。当光伏阵列内各个组件的倾角不同时，应同时测量最大和最小倾角的辐照度，计算直流效率时使用太阳辐照度最大值。测量太阳能电池温度时要把温度探头放在被测太阳能电池组件底部的中心位置。

为比较组串型太阳能光伏发电系统和交流组件型太阳能光伏发电系统的直流效率，特进行组串型太阳能光伏发电系统直流效率测试实验和交流组件型太阳能光伏发电系统直流效率测试实验。

此组串型光伏发电系统共使用 5 块型号为 KD202GH-2PU-KH 的多晶硅太阳能电池组件和一台 SMA SB1200，太阳能电池组件采用 5 串 1 并的方式连接。

表 1 太阳能电池组件参数

参数	数值
峰值功率	202W
最佳工作点电压	26.6V
最佳工作点电流	7.60A
开路电压	33.2V
短路电流	8.25A
开路电压温度系数	-0.12V/°C
短路电流温度系统	$4.95 \times 10^{-3} A/°C$
串联电阻	0.541 $\Omega$
曲线修正因子	$1.91 \times 10^{-3} \Omega/°C$
峰值功率温度系数	-0.922W/°C
正常工作电池温度	47.9°C

此交流组件型光伏发电系统使用 1 块型号为 KD202GH-2PU-KH 的多晶硅太阳能电池组件和 1 个英伟力微逆变器。

表 2 逆变器参数

类型	组串型	微逆变器
型号	SB 1200	MAC250
最大输入功率	1.32kW	250W
最大输入电压	400V	50V
最大功率跟踪范围	100V~320V	22V~40V
最大输入电流	12.6A	10A
最大效率	92.1%	95%
欧洲效率	90.7%	94%

### 3.1 组串型太阳能光伏发电系统的电气效率测试

组件的峰值功率标称值是生产厂家根据室内测试的结果标定的，组件峰值功率实际值与标称值有偏差，为准确计算直流效率，首先要测量系统中每一块太阳能电池组件的输出特性。本文使用室外太阳能电池组件输出特性测试仪 I-V400 来测量，测量结果如下：

表 3 太阳能电池组件输出特性测量值

组件编号	1	2	3	4	5
峰值功率/wp	201.12	206.69	206.69	205.44	201.47
开路电压/V	33.26	33.24	33.05	33.26	33.08
短路电流/A	8.26	8.24	8.22	8.17	8.10
最佳工作点电压/V	26.50	26.35	26.00	26.42	26.16
最佳工作点电流/A	7.74	8.00	7.98	7.93	7.86

从上表可知，光伏发电系统中五块组件的峰值功率总和为 1018.04W<sub>p</sub>，即 P<sub>nom</sub>=1018.04W<sub>p</sub>。

然后再测量光伏阵列在正常工作时的输出电流和输出电压以及太阳辐照度、太阳能电池温度和环境温度。把这些参数值代入直流效率计算公式中即可计算光伏发电系统的直流效率。以下是测量结果：

表 4 组串型光伏发电系统的电气效率

P <sub>DC</sub> /W	T <sub>PV</sub> /°C	Irr/W/m <sup>2</sup>	η <sub>DC</sub> /%	η <sub>AC</sub> /%	η <sub>sys</sub> /%
254	53	295	96.06	81	78
711	54	829	95.86	87	83
739	60	882	95.85	86	82

上表使用关系式②来计算太阳能电池阵列的直流效率，由以上数据可知，在不同的太阳辐照度和环境温度下，光伏阵列的直流效率基本不变。

### 3.2 交流组件型光伏发电系统的电气效率测试

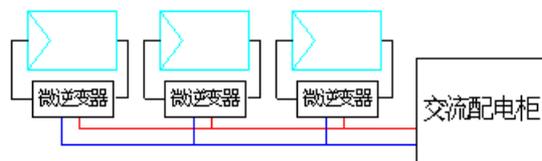


图 2 微逆变器光伏发电系统接线示意图

微逆变器光伏发电系统的接线方式为每块太阳能电池组件接一个逆变器，各个微逆变器将组件输出的直流电转换成交流电，然后再将所有的逆变器输出端并联。

经室外太阳能电池组件特性测试仪测试得出组件的峰值功率为 202.40W<sub>p</sub>，然后再测量太阳能电池组件在正常工作时的输出电流和输出电压以及太阳辐照度、太阳能电池温度和环境温度。把这些参数值代入直流效率计算公式中即可计算光伏阵列的直流效率。以下是测量结果：

表 5 交流组件型光伏发电系统的电气效率

P <sub>DC</sub> /W	T <sub>PV</sub> /°C	Irr/W/m <sup>2</sup>	η <sub>DC</sub> /%	η <sub>AC</sub> /%	η <sub>sys</sub> /%
144.4	60.5	836	98.98%	88.85	87.95
145.5	59	837	99.03%	88.66	87.80
145.6	58.9	837	99.05%	88.67	87.83

### 3.3 数据分析

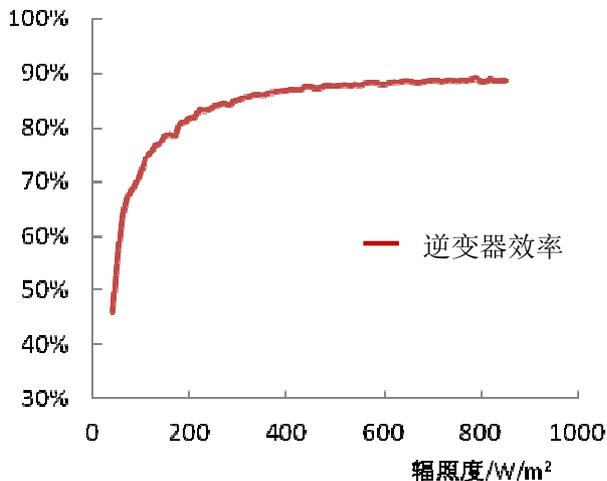


图3 组串式逆变器的效率

通过实验数据可得出如下结论：

(1) 本实验使用的组串式逆变器在不同辐照度下的效率曲线如图3所示，当辐照度大于 $300\text{W}/\text{m}^2$ 时逆变器的效率基本保持不变，在辐照度小于 $300\text{W}/\text{m}^2$ 时，效率随辐照度减小而急剧下降。

(2) 组串型太阳能光伏发电系统的直流效率约96%，也就是有约4%的能量损失，这个数值与逆变器的最大功率跟踪准确度、太阳电池组件的匹配度和直流传输损耗等相关。

(3) 组串型光伏发电系统正常工作时的系统效率约在82%左右，不同的光伏发电系统由于逆变器效率、组件连接方式、组件之间的匹配度不同，系统效率可能有较大差异，同一个光伏发电系统在不同的辐照下有不同的系统效率。

(4) 由于微逆变器一般放在组件底下，直流端导线较短，传输损失较小，而且一块组件带一个最大功率跟踪器，各个组件之间相互独立。在这种情况下影响光伏阵列的直流效率的因素只有逆变器的最大功率跟踪准确度，所以直流效率较高。

### 3.5 阴影遮挡对系统效率的影响

为避免对光伏组件发生热斑效应，原则上要求在早上9点到下午15点光伏阵列不能有阴影遮挡，其实除了这段时间之外光伏发电系统的发电量也是不能忽视的，而且有时为满足客户要求或者达到一定的安装容量，不得不在有阴影遮挡的地方安装光伏发电系统，所以研究如何在有阴影遮挡的情况下提高光伏发电系统的发电功率仍然有实际应用价值。

为了研究阴影对光伏发电系统发电功率的影响以及组串型逆变器是否比微逆变器更有利于减少阴影造成的功率，我们进行了如下实验：

实验中使用七块型号为KD202GH-2PU-KH的组件串联接入一个型号为SMA SB1200逆变器中组成一个组串光伏发电系统，交流组件型光伏发电系统使用一块型号为KD202GH-2PU-KH的组件连接一个英伟力微逆变器。组件的电路图和阴影遮挡方式如下图所示，本实验使用的光伏组件共有电池片54块，全部串联连接，每18块电池片并联1个旁路二极管：

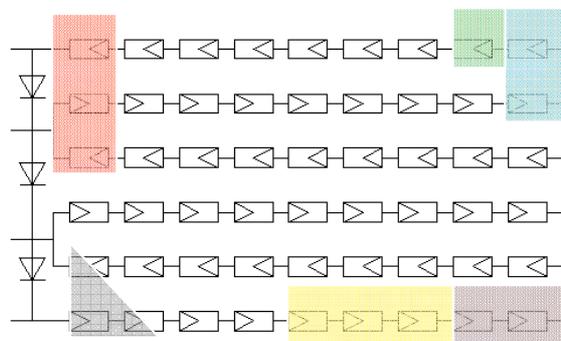


图4 光伏组件阴影设置图

图中绿色、蓝色、红色、紫色、黄色、灰色分别表示单片、两片横、三片横、两片竖、三片竖、三角形遮挡。遮挡时，使用普通纸片进行遮挡，遮挡比例为70%。在实验中为保证遮挡比例相同，我们同时测量了无阴影和有阴影时的太阳辐照度，然后通过改变遮挡纸片与组件之间的垂直距离来改变阴影的遮挡比例，从而获得比较一致的遮挡比例。

首先用光伏组串 I-V 特性现场测试仪分别测量两个光伏发电系统的光伏阵列在各种方式的阴影下的 I-V 曲线，我们得到的结果如下图所示：

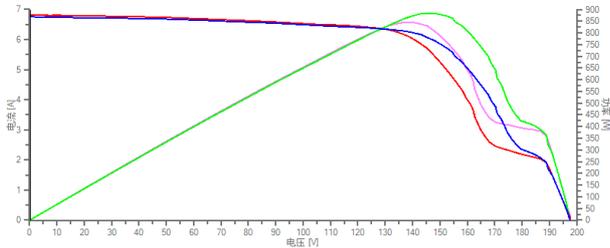


图 5 光伏组串在阴影下的 I-V 曲线

上图中蓝色线和红色线分别是遮挡一块和横向三块电池片时光伏组串的 I-V 曲线，洋红色和绿色分别是遮挡一块和横向三块电池片时光伏组串功率曲线，由于二片横、二片竖、三片竖、三角形这三种遮挡方式下的 I-V 曲线与单片遮挡时的 I-V 曲线相似，基本上没有区别，所以图中没有显示这些图像。从实验得出的图像来看，遮挡一块和横向三块电池片时，最大功率点电流与无阴影遮挡时基本相同，只是最大功率点电压下降了 7.3 伏左右，刚好是平均一块组件的最大功率点电压的 1/3。这是由于每个组件都有三个旁路二极管，组件中部分电池片被遮挡时，旁路二极管导通，导致组件的最大功率点电压急骤下降 [6]。

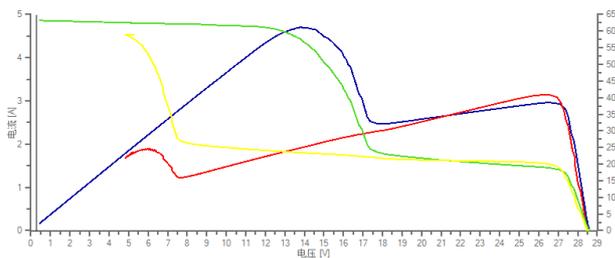


图 6 光伏组件在阴影下的 I-V 曲线

绿色线和黄色线分别是遮挡一块和横向三块电池片时光伏组件的 I-V 曲线，蓝色线和红色线分别是遮挡一块和横向三块电池片时光伏组串的功率曲线，从实验得出的图像来看，两种不同方式的阴影遮挡下，组件的 I-V 曲线都有两个峰值功率点，而

且电压在 19 伏以上时，I-V 曲线基本相同。但是由于横向三块电池片被遮挡时，有两个电池片串被遮挡，最大功率点电压在开路电压附近，而单块电池片被遮挡时最大功率点电压在 14V 左右。

光伏阵列的 I-V 曲线测试完成后再测量两个系统在无阴影遮挡并正常工作时的电气效率。先分别按如图 3 所示的 6 种方式在一块组件上设置阴影，每设置完一次遮挡方式后等待约 2 分钟，等逆变器正常稳定工作后再进行记录，数据记录的时间间隔为 5 秒钟。测试得到如下数据：

表 6 组件型光伏发电系统的电气效率

遮挡方式	直流效率 /%	系统效率 /%	逆变器效率 /%	电压 /V	电流 /A	辐照度 /W/m <sup>2</sup>
无	99.65	88.88%	89.20	22.69	4.31	558
单片	27.40	20.28	73.91	27.76	0.94	520
两片横	30.32	22.31	73.63	27.58	0.93	459
三片横	31.67	23.31	73.55	27.39	0.93	434

表 7 组串型光伏发电系统的系统效率

遮挡方式	直流效率 /%	系统效率 /%	逆变器效率 /%	电压 /V	电流 /A	辐照度 /W/m <sup>2</sup>
无	95.98	85.40	88.98	150.33	6.55	809
单片	92.70	82.14	88.61	144.89	5.63	700
两片横	92.77	82.15	88.55	144.75	5.61	700
三片横	86.80	76.90	88.60	136.55	5.36	665
两片竖	91.80	81.52	88.80	144.74	5.42	673
三片竖	92.85	81.81	88.11	146.64	5.49	690
三角形	93.17	88.67	82.62	147.35	5.47	680

从数据可知，对于微逆变器光伏发电系统，当与旁路二极管并联的被遮挡电池片串数为 1 时，单块组件的最大功率点电压下降到 20 伏以下，在电压 27V 左右有一个次峰值功率点，微逆变器由于最大

功率跟踪范围在 22 伏到 40 伏之间，所以微逆变器只能跟踪到次峰值功率点；而当与旁路二极管并联的被遮挡电池片串数为 2 时，在电压 27V 左右有最大功率点，由于此电压值在微逆变器的最大功率跟踪范围内，微逆变器能准确跟踪到最大功率点。由于输入功率的下降，逆变器的转换效率也随之下降。

对于组串型光伏发电系统，当受阴影遮挡时，与被遮挡电池片并联的旁路二极管导通，电压下降，电压下降值基本上与导通的二极管数量成正比，电流不变。假设光伏组串的组件数量为  $m$ ，每个组件有三个旁路二极管，那么电池片串数为  $3m$ ，由于电池片被遮挡造成导通的二极管数量为  $n$ ，那么如果最大功率点电压仍在逆变器的最大功率跟踪范围内那么直流效率的损失率约为  $n/3m$ 。由于输入电压和功率的下降，逆变器的转换效率也随之下降。

通过实验可得到如下结论：

1、在有阴影遮挡时，除逆变器类型外还有其他因素会影响系统的性能。

2、逆变器的最大功率跟踪范围、组件的连接方式、逆变器的效率等都是影响系统性能的重要因素。

3、被遮挡的电池片串数越多，功率损失越大；同一电池片串中被遮挡电池片的数量，对发电功率只有轻微的影响<sup>[7]</sup>。所以在进行系统设计时应尽量减少被遮挡电池片串数。

#### 4 结语

光伏发电系统的电气效率包括直流效率、逆变器效率和系统效率，它是反映太阳电池阵列整体性能的物理量。其中直流效率与光伏阵列的内部因素如最大功率跟踪准确度、组件匹配度、电能传输损耗等有关，逆变器效率是逆变器的输出功率与输入功率之比，与输入功率和电压有关，系统效率是逆变器效率和直流效率的乘积。

在没有阴影时，使用微逆变器的光伏发电系统由于一块组件连接一个微逆变器，减少了组件失配造成的功率损失，所以直流效率较高。本文通过实

验证使用微逆变器的光伏发电系统有较高的直流效率，但系统效率还与逆变器的效率相关，不同的光伏发电系统由于逆变器效率、组件连接方式、组件的匹配度不周，系统效率可能有较大差异，同一个光伏发电系统在不同的辐照下有不同系统效率。

在有阴影遮挡时，逆变器的类型、最大功率跟踪范围、组件的连接方式、逆变器的效率等都会影响系统的性能。在进行光伏系统设计时如果阴影无法避免，尽量减少被遮挡电池片的串数可以减少功率损失。

#### [参考文献]

- [1] 刘飞, 段善旭, 徐鹏威, 王志峰. 光伏并网发电系统若干技术问题的研究[J]. 太阳能 2006;4:34—37.
- [2] Soeren Baekhoej Kjaer, John K. Pedersen, Frede Blaabjerg. Power Inverter Topologies for Photovoltaic Modules – A Review[J]. IEEE 2002:782—788.
- [3] M. Sidrach-de-Cardona, Ll. Mora Lo'pez. Performance analysis of a grid-connected photovoltaic System[J]. Energy 1999;24:1986-1993.
- [4] Achim Woyte, Johan Nijs, Ronnie Belmans. Partial shadowing of photovoltaic arrays with different system configurations: literature review and field test results[J]. Solar Energy 2003; 74:217—233.
- [5] C.W.A. Baltus, J.A. Eikelboom, R.J.C. van Zolingen. ANALYTICAL MONITORING OF LOSSES IN PV SYSTEMS[J]. 14<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference.
- [6] Peter Mark Jansson, Senior Member, Kevin Whitten, Member, John L. Schmalzel, Fellow. Photovoltaic Module Shading: Smart Grid Impacts[J]. IEEE 2011: 323-328.
- [7] M.C. Alonso-García, J.M. Ruiz, W. Herrmann. Computer simulation of shading effects in photovoltaic arrays[J]. Renewable Energy 2006;31: 1986–1993.