

# 并网光伏电站的组件倾角优化设计与研究

杨柳柳, 汪 飞, 任林涛

(上海市电站自动化技术重点实验室, 上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200027)

**摘 要:** 综合考虑倾斜面太阳辐照度估算模型和实际组件转换效率估算模型, 建立一个固定倾角下的组件发电功率模型, 并提出一种以年功率最大为最优倾角设计原则的优化设计方法。基于武汉、南京和北京三地的大量数据对提出的方法进行验证和分析, 结果显示该方法可为电站增加发电量, 增大经济效益, 且电站纬度越高, 其发电量提升空间也越大。

**关键词:** 光伏组件; 优化设计; 转换效率; 太阳辐射; 固定倾角

**中图分类号:** TK514

**文献标识码:** A

## 0 引 言

综合考虑经济和技术因素, 大型并网光伏电站的阵列多采用固定倾角的安装方式, 倾角不同将导致系统发电量的差别, 因此最优倾角的选择对于一个大型电站而言就显得尤为重要, 是工程设计的关键因素之一。

倾斜面太阳辐照度、光伏阵列的安装容量、组件转换效率以及系统综合效率均会影响并网光伏电站的发电量。对于一个并网光伏电站而言, 在装机容量不变, 逆变器、电缆等电能传输环节损耗确定的条件下, 系统发电环节主要受气象环境因素的影响, 导致发电量产生显著的间接性和不确定性, 其中辐照度和温度的变化对光伏阵列的发电量造成的直接或间接影响最大。现阶段, 并网光伏电站的倾角设计多采用传统设计方法, 即以年辐照度最大为设计原则, 但该方法仅考虑太阳辐照度的影响, 而忽略了其他气象因素对整个系统发电量的影响, 存在着一定的不足, 未必能达到发电量最大的设计要求。因此, 本文将提出一套新的电站最优倾角的设计方法, 即采用年组件输出功率最大的设计原则。

首先, 本文通过“直散分离”和 Hay 模型建立逐日倾斜面辐射量估算模型, 并基于大量数据验证其适用性。其次搭建实验平台, 实时获取组件电性能参数值, 计算组件实际转换效率, 提出拟合优化后的组件

转换效率估算模型。在综合考虑这 2 个模型的基础上, 建立一个组件年输出功率模型, 并给出一套完整的最优倾角设计方法及设计流程。最后选取南京、武汉、北京地区为例, 分别计算出新方法与传统方法下的最优倾角, 并比较相应倾角下的发电量值, 分析新方法的学术研究与工程应用价值。

## 1 组件逐日倾斜面辐射量估算模型

光伏组件通过光电作用将太阳能转换成电能, 因此在计算发电量时, 辐照度是非常重要的参数值, 此数据可通过辐照度监测仪测得或从气象站获取。但由于所获取的数据都为水平面辐照度, 而光伏组件通常倾斜放置, 故需利用模型算法将组件水平面辐射量转化成倾斜面辐射量, 这对电站数据分析以及光伏行业的设计发展都有很大的实际意义。随着光伏发电系统的普及, 国内外许多学者都对逐日倾斜面辐射量估算模型展开了研究, 目前逐时倾斜面辐射量估算模型有: Perez 模型(1987)<sup>[1,2]</sup>、Reindl 模型(1990)<sup>[3,4]</sup>、Klein 模型(1977)<sup>[5]</sup>、Klucher 模型(1979)<sup>[6]</sup>、Hay 模型(1980)<sup>[7]</sup>等 10 多种。根据这几种模型的理论估算方法, 从准确性、复杂性、参数易采集性、地域针对性等多方面研究对比发现<sup>[8,9]</sup>: Perez 模型估算结果较准确但方法较繁杂; Reindl 模型方法相对简单, 但准确程度稍次; Klucher 模型对南向铅垂面实用性较好, 但用在北向铅垂面上偏差

收稿日期: 2016-08-25

基金项目: 台达环境与教育基金(DREM2015002)

通信作者: 汪 飞(1981—), 男, 博士、副教授, 主要从事新能源发电与微电网技术方面的研究。f.wang@shu.edu.cn

很大; Hay 模型较为简明实用, 且估算的值较为准确, 因此在工程设计时 Hay 模型最适用。

### 1.1 Hay 模型

在已知逐日水平面直射和散射辐射量的条件下, 还需根据太阳高度角和方位角估算逐日倾斜面辐射总量。Hay 模型认为倾斜面总辐射量是由太阳直接辐射量、天空散射辐射量以及地面反射辐射量 3 部分组成。一般情况下, 地面反射辐射量很小, 只占总值的百分之几, 可忽略不计。故光伏组件与地面呈 $\beta$ 倾角后, 逐日接收到太阳辐射量估算如式(1)所示:

$$H_T = H_b R_b + H_d \left[ \frac{R_b H_b}{H_0} + \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{H_b}{H_0} \right) (1 + \cos \beta) \right] + \frac{1}{2} \rho H (1 - \cos \beta) \quad (1)$$

式中,  $H_T$  —— 倾斜面总辐射量,  $\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ;  $H_b$  —— 水平面直射辐射量;  $H_d$  —— 水平面散射辐射量;  $H_0$  —— 大气层外太阳辐射量;  $\rho$  —— 地表反射率, 一般情况下取 0.2;  $H$  —— 水平面总辐射量,  $H = H_b + H_d$ ;  $R_b$  —— 倾斜面直接辐射量与水平面直接辐射量之比,

$$R_b = [(\cos \varphi \cos \beta + \sin \beta \sin \varphi \cos \gamma) \cdot \cos \delta (\sin \omega_{ss} - \sin \omega_{sr}) + \frac{\pi}{180} (\omega_{ss} - \omega_{sr}) \cdot (\sin \varphi \cos \beta - \sin \beta \cos \varphi \cos \gamma) \sin \delta + (\cos \omega_{ss} - \cos \omega_{sr}) \cos \delta \sin \beta \sin \gamma] / \left[ 2 \left( \cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi}{180} \omega_s \sin \varphi \sin \delta \right) \right]$$

其中,  $\delta$  为赤纬角,  $\delta = 23.45 \sin[360/365(284 + n)]$ ;  $n$  为一年从元旦算起的天数;  $\omega_s$  为水平面日落时角,  $\omega_s = \cos^{-1}[-\tan \varphi \tan \delta]$ , 其中  $\varphi$  为纬度;  $\omega_{ss}$  为倾斜面日落时角,  $\omega_{ss} = \min\{\omega_s, \cos^{-1}(-a/D) + \sin^{-1}(c/D)\}$ ;  $\gamma$  为方位角;  $\omega_{sr}$  为倾斜面日出时角, 其中,

$$a = (\sin \varphi \cos \beta - \sin \beta \cos \varphi \cos \gamma) \sin \delta; \\ b = (\cos \varphi \cos \beta + \sin \beta \sin \varphi \cos \gamma) \cos \delta; \\ c = \cos \delta \sin \beta \sin \gamma; D = \sqrt{c^2 + b^2}。$$

我国处于北半球, 正南是接收到太阳辐射度最好的方位, 此时在 Hay 模型中方位角为  $0^\circ$ , 且偏东为负, 偏西为正。

### 1.2 “直散分离”模型

多数情况下, 因条件的限制, 逐日  $H_b$ 、 $H_d$  以及

$H_0$  这些数据无法从气象站实时获取, 其计算公式很复杂但其与  $H$  都存在一定的数值关系。在已知逐日  $H$  时, 使用估算模型将逐日  $H_b$  和  $H_d$  从  $H$  分离出来, 即“直散分离”模型。

国内外研究人员提出个过一系列“直散分离”模型——Erbs 模型 (1982)、Orgill 模型 (1977) [10] 等, 这些模型可利用当地水平面总辐射量来估算水平面散射量, 但地区适用性较差。文献 [11, 12] 提出一种针对区域气候的直散分离理论研究与分析方法, 建立总辐射系数 (大气清晰度指数)  $K_t$  与散射系数  $K_d$  的多项式拟合模型, 通过该模型只需输入逐日  $H$ , 即可估算出该日  $H_b$  和  $H_d$ 。其中还需估算逐日  $H_0$ , 其值不受地域影响, 如式(2)所示:

$$H_0 = \frac{24000}{\pi} G_{sc} \left( 1 + 0.033 \cos \frac{360^\circ n}{365} \right) \cdot \left( \cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \varphi \sin \delta \right) \quad (2)$$

其中,  $G_{sc}$  —— 太阳常数, 参考值为  $1367 \pm 7 \text{ W/m}^2$ ;

$K_t = H/H_0 \leq 1.0$ ;  $K_d = H_d/H \leq 1.0$ 。根据“直散分离”理论, 针对不同的  $K_t$  范围,  $K_d$  会产生相应的“直散分离”模型 [13], 如式(3)所示。最后利用  $H_b$ 、 $H_d$  和  $H$  之间的数值关系进行计算。

$$\frac{H_d}{H} = 1.00 - 1.13 K_t, K_t < 0.22 \\ \frac{H_d}{H} = 1.39 - 4.027 K_t + 5.532 K_t^2 - 3.108 K_t^3, K_t > 0.8 \\ \frac{H_d}{H} = \begin{cases} 1.391 - 3.56 K_t + 4.189 K_t^2 - 2.137 K_t^3, \\ \omega_s \leq 81.4^\circ, 0.22 \leq K_t \leq 0.8 \\ 1.311 - 3.022 K_t + 3.427 K_t^2 - 1.821 K_t^3, \\ \omega_s > 81.4^\circ, 0.22 \leq K_t \leq 0.8 \end{cases} \quad (3)$$

### 1.3 验证倾斜面辐照度估算模型的准确性

将“直散分离”模型运用到倾斜面辐射量估算模型中, 为了验证模型的准确性, 特选取工程中应用较广的 PVDesign 和 RETScreen 两款光伏商业软件进行定量分析。从 NASA 气象数据库中选取上海地区 2015 年 12 个月份的水平面日均辐射量, 用两款软件分别将水平面日均辐射量转换成  $3^\circ$  倾角下的日均辐射量, 并用上述模型估算出相应  $3^\circ$  倾角下的日均辐射量。最终将这些数据用数据统计法中的平均百分误差 (MAPE) 进行误差分析比较, 结果如表 1 所示。

表1 倾斜面辐照度估算模型的验证

Table 1 Validation of inclined surface irradiance estimation model

月份	NASA 中 水平面 $H$	RETScreen 中 3°倾斜面 $H_T$	PVDesign 中 3°倾斜面 $H_T'$	估算模型下 3°倾斜面 $H_T''$	模型估算与 RETScreen 软件输出间的 $MAPE$	模型估算与 PVDesign 软件输出间的 $MAPE$
1	2.150	2.269	2.233	2.261	0.353	1.254
2	2.552	2.645	2.611	2.635	0.378	0.929
3	3.501	3.568	3.559	3.574	0.168	0.421
4	4.282	4.319	4.314	4.317	0.046	0.069
5	4.333	4.337	4.335	4.33	0.161	0.115
6	3.622	3.614	3.618	3.609	0.138	0.249
7	4.362	4.36	4.359	4.349	0.252	0.229
8	4.543	4.568	4.562	4.56	0.175	0.044
9	4.171	4.235	4.23	4.241	0.142	0.260
10	3.543	3.652	3.639	3.671	0.520	0.879
11	1.766	1.842	1.815	1.829	0.706	0.771
12	2.111	2.22	2.205	2.238	0.811	1.507
平均	3.411	3.469	3.457	3.468	0.321	0.559

注： $MAPE(\%) = \frac{100\%}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{H_T'' - H_T}{H_T} \right|$ ,  $N$  为样本数量。

平均百分误差反映模型精度的短期信息,其值越小说明模拟精度越高,±10%以内工程上是可接受的。从表中可看出,相对误差率都很低,基本都在1%以下,具有较高的估算精度,证明该模型具有可靠性和适用性。且从数据的变化规律说明,在辐照度低的冬季(11月到次年2月),估算模型的相对误差比其他季节略大。

1.4 估算倾斜面辐照度的步骤

将上述公式整合后代入具体参数,即可估算出各地逐日太阳能组件倾斜面辐照度,具体步骤为:

- 1)选择合适的地理位置,明确经纬度值;
- 2)利用公式计算该地区逐日大气层外太阳辐射量  $H_0$ ;
- 3)利用辐照测试仪等工具实测出或从气象站获取该地区逐日水平面总辐射量数据  $H$ ;
- 4)利用公式计算该地区日均晴朗指数  $K_t$ ;
- 5)根据“直散分离”模型计算日均总辐射系数;利用辐射量之间相关性计算逐日  $H_d$  和  $H_b$ ;
- 6)利用 Hay 模型将水平面辐射量转换成倾斜面辐射量。

2 组件转换效率

类似于其他半导体器件,太阳能组件对辐照度、温度等气象因素非常敏感。辐照度和温度本身也存在一定的耦合关系,高辐照度促进组件光电作用,从而使得组件温度升高,特别是对电站而言,温度的波动性较大。这些气象因素对组件的影响主要体现在组件参数性能方面,组件在出厂时铭牌上标有的参数值是在标准测试条件(STC)下的理论值,并不能真实反映在运行过程中的实际值,故需合适的模型对实际环境下的组件电性能参数值进行估算。

2.1 光伏组件实测系统搭建

为了研究光伏组件的电性能参数受外界气象环境因素影响的程度,搭建了屋顶光伏组件实时数据测试系统。系统主要由260 W的光伏组件(转换效率:15.90%;组件尺寸:1650 mm×991 mm;最大功率温度系数:−0.41%/℃)、I-V曲线测试仪、气象仪及其他设备组成。气象仪通过各传感器,对系统所在区域环境下各气象要素每隔35 s进行实时数据采集。具体气象监测要素及技术指标如表2所示。

表 2 气象参数表

Table 2 Meteorological parameters

测量气象因素	测量范围	精度	分辨率
环境温度/℃	-50~100	±0.3	0.1
组件温度/℃	-20~50	±0.5	0.1
太阳总辐射/W·m <sup>-2</sup>	0~2000	7~14	1.0
相对湿度/%	0~100	±3%	0.1
风速/m·s <sup>-1</sup>	0~70	±3%	0.1

通过软件实时收集光伏组件的特性参数及气象参数等数据,将 2015-07~2016-06 所有的有效数据进行合并、筛选和整理。并基于上述倾斜面辐射量估算模型,将水平面辐射量转化成倾斜面辐射量,建立了气象参数和组件性能参数的实测数据库。

## 2.2 光伏组件转换效率实测数据分析

实验中,组件的电压  $V_{mp}$  (V)、电流  $I_{mp}$  (A)可通过设备采集,但是组件的转换效率  $\eta$  无法直接测出,可按 DB32/T 1831—2011 提供的组件转换效率计算式(4)计算出实测组件转换效率。

$$\eta = (I_{mp} V_{mp}) / (AS) \quad (4)$$

式中,  $A$  ——组件面积, m<sup>2</sup>;  $S$  ——测试条件下辐照度, W/m<sup>2</sup>。

基于实测数据库分析发现:光伏组件的实测转换效率与气象要素(斜面辐照量、气温等)之间存在着较为复杂的多变量耦合关系。为在大量数据背后探寻实际气象数据和组件电性能参数之间的关系式,使用 SPSS (statistical product and service solutions) 软件进行 Pearson 相关性分析。结果如表 3 所示,组件的输出电流与辐照度差、温度差之间有着

表 3 组件性能参数与气象参数的 Pearson 相关性分析

Table 3 Pearson correlation analysis between component performance parameters and meteorological parameters

参数	$\eta$	$V_{mp}$	$I_{mp}$	$\Delta S$	$\Delta T$
$\eta$	1.000	0.427**	-0.862**	-0.882**	-0.856**
$V_{mp}$	0.427**	1.000	-0.707**	-0.691**	-0.757**
$I_{mp}$	-0.862**	-0.707**	1.000	0.998**	0.960**
$\Delta S$	-0.882**	-0.691**	0.998**	1.000	0.961**
$\Delta T$	-0.856**	-0.757**	0.960**	0.961**	1.000

注:\*\*在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

极显著的正相关;而组件的电压、转换效率与温度差呈现负相关;组件的电压与辐照度差也呈负相关。这些参数都通过了 0.01 的显著性检验,表明辐照度差和温度差是影响组件电性能最显著和直接的 2 大因素。

表 3 中,  $\Delta T = T_{\text{环境}} - T_{\text{组件}}$ ;  $\Delta S = S/S_{\text{ref}} - 1$ ;  $T_{\text{组件}} = T_{\text{环境}} + \frac{(NOCT - 20)}{800} S$ , 式中,  $S_{\text{ref}}$  为 1000 W/m<sup>2</sup>;  $NOCT$  为额定光伏组件工作温度,  $\Delta T$  为温度差,  $\Delta S$  为辐照度差。

## 2.3 光伏组件转换效率理论估算模型的搭建

由文献[14]可知,若把光伏组件作为二端元件,由于光伏组件具有与单体太阳能电池类似的特性,因此按单体太阳能电池推导的工程表达式同样适用于组件。故应用该文献所述的模型(5)即可复现组件或阵列的  $I$ - $V$  特性曲线。

$$\begin{aligned} I_{mp} &= I_{mp}^* S(1 + a\Delta T)/S_{\text{ref}} \\ V_{mp} &= V_{mp}^* (1 + c\Delta T) \ln(e + b\Delta S) \end{aligned} \quad (5)$$

式中,  $I_{mp}^*$ 、 $V_{mp}^*$  ——STC 下最大功率点电流和电压;工程系数典型值  $a=0.25\%/^{\circ}\text{C}$ ; 常数  $b=0.5$ ;  $c=-0.288\%/^{\circ}\text{C}$ ;  $e$  ——自然常数,取 2.718。

从上表 3 的相关性分析可知,组件的转换效率和外界气象条件有着很强的相关性,结合组件电压、电流的参数模型可推导出在外界环境的影响下组件转换效率估算模型,如式(6)所示。其中由于  $a$ 、 $c$  的值都很小,两者的乘积在工程上基本可忽略。

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{I_{mp} V_{mp}}{AH_T} \\ &= \frac{I_{mp}^* \frac{S}{S_{\text{ref}}} (1 + a\Delta T) V_{mp}^* (1 + c\Delta T) \ln(e + b\Delta S)}{AS} \\ &= \eta^* (1 + a\Delta T)(1 + c\Delta T) \ln(e + b\Delta S) \\ &= \eta^* [1 + (a + c)\Delta T] \ln(e + b\Delta S) \end{aligned} \quad (6)$$

式中,  $\eta^*$  ——在 STC 下组件转换效率。

工程中,  $\Delta T$  的系数值  $a + c$  为 -0.038%。本文将实验测试数据代入式(6)的转换效率估算模型中,计算出工程中理论的组件转换效率,并通过式(4)计算出组件实际转换效率,两者进行分析比较,验证模型的准确性。作为示例,此处随机选取 2016 年 3 月 31 日的实验数据,将工程理论的  $\eta$  估算值与  $\eta$  实际值进行比较分析:发现平均百分误差达到 18.5%,超过工



程误差范围<sup>[14]</sup>,说明该模型不够精确,需对模型(6)进行修正,得出一个更精确的 $\Delta T$ 系数值。

因此,本文利用 SPSS 软件对式(6)进行非线性拟合,发现拟合后的组件转换效率温度系数 $a+c$ 接近于组件的最大功率温度系数,因此本实验中该值即取组件参数值 $-0.41\%/^{\circ}\text{C}$ , $b$ 的值拟合后的值仍为0.5,与工程典型值一致。将拟合后的数值重新带入到式(6)中,得到修正后的转换效率估算模型。重新随机选取某一日的实验平台数据(2016年6月14日),验算在该新模型下的 $\eta$ 估算值,并与实际 $\eta$ 值进行比较,结果如图1所示。

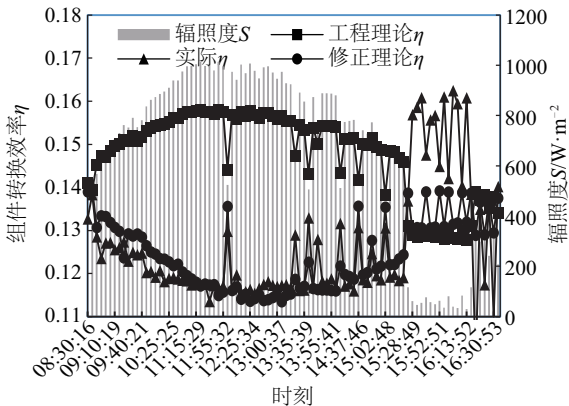


图1 实测组件转换效率值与辐照度  
Fig. 1 Measured component conversion efficiency and radiation

在分析大量数据后发现,基于修正后模型估算后的 $\eta$ 值与实际 $\eta$ 值之间的平均误差降为3.49%,在工程误差范围内,这表明修正模型能很好的估算组件转换效率。且从图4的数据变化可见,上午及中午的效率估算误差很小,15:00后误差很大。进一步结合当天实时辐照度数值分析发现,15:00后,由于天气转阴,辐照度小于 $100\text{ W/m}^2$ ,说明低辐照度情况下的组件转换效率估算误差升高,但整体误差在工程误差范围内。

3 最优倾角设计优化

3.1 倾角优化原则与设计流程

现阶段在并网光伏发电工程设计中,最优倾角有两种通用的设计方式,一是采用《光伏电站设计规范》中的光伏阵列最优倾角推荐值,二是以组件倾斜面接收到年最大太阳辐射量 $H_T$ 的原则来设计最优倾角。但根据最新《光伏电站设计规范 GB 50797—

2012》中发电量计算式(7)可发现: $\eta$ 和 $H_T$ 的变化都会影响发电量的变化,而且从图4分析已知 $\eta$ 与 $H_T$ 并不是正相关,因此传统的倾角设计原则在保证 $H_T$ 最大的基础上,并不能确保发电量最大。

$$E_p = H_T \cdot A \cdot \eta \cdot K \tag{7}$$

式中, $E_p$ ——发电量,kW; $K$ ——系统综合效率。

本文从组件倾角的优化角度考虑,为提升并网发电系统的总体发电量,建议使 $H_T$ 和 $\eta$ 的乘积最大,故在传统的设计方法基础上进行了倾角优化设计的改进。提出新最优倾角优化原则:组件输出年功率最大。具体而言,考虑组件逐日发电功率估算模型如式(8):

$$P = H_T \cdot A \cdot \eta \tag{8}$$

基于前面所建立的模型(1)和模型(6),采用等差寻优法选择最优倾角,其具体计算流程如图2所示。

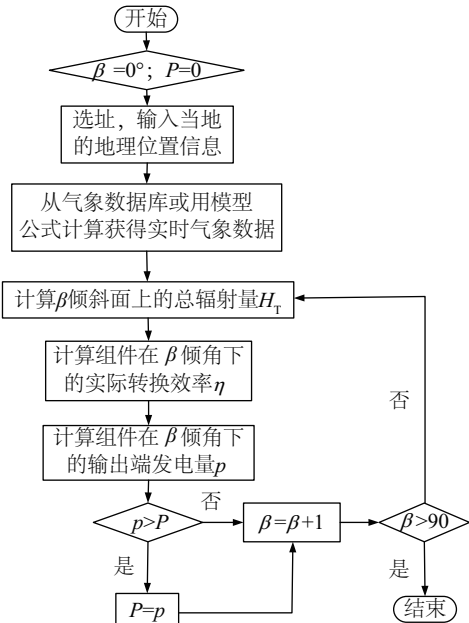


图2 倾角优化流程图

Fig. 2 Flow chart for tilt angle optimization

3.2 优化原则的实测数据分析

为分析所提出最优倾角优化方法的有效性,基于 NASA 气象数据库选取北京(北纬 $39.5^{\circ}$ 、东经 $116^{\circ}$ )、南京(北纬 $32^{\circ}$ 、东经 $119^{\circ}$ )、武汉(北纬 $29.5^{\circ}$ 、东经 $113^{\circ}$ )三地的气象数据。分别根据传统设计方法(即组件年辐射量 $H_T$ 最大)和本文提出设计方法(即组件年输出功率 $P$ 最大)计算最优倾角。图3将2种设计方法下的最优倾角及其附近倾角所对应的 $H_T$ 和 $P$ 值进行对比分析。

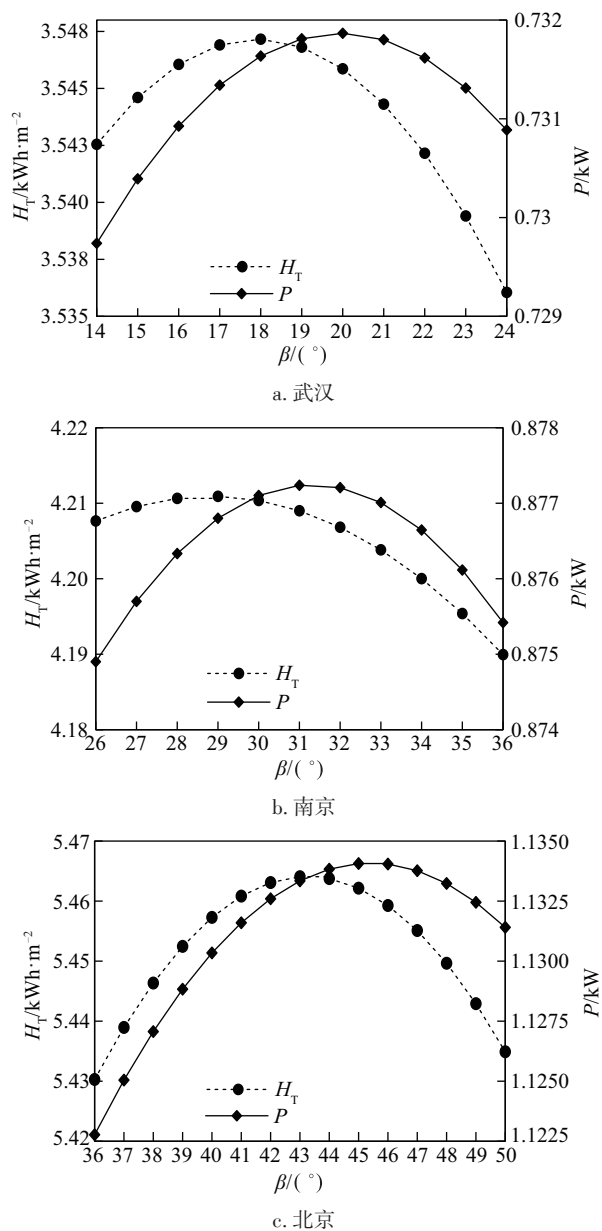


图3 南京、武汉和北京地区不同倾角下  $H_T$  和  $P$  曲线图  
Fig. 3 Curves of  $H_T$  and  $P$  under different angles in Nanjing, Wuhan and Beijing area

从图3明显看出,以年  $H_T$  最大和年  $P$  最大原则设计出的最优倾角值是不同的。武汉地区最优倾角分别为  $18^\circ$  和  $20^\circ$ ;南京地区最优倾角分别为  $29^\circ$  和  $31^\circ$ ;北京地区最优倾角分别为  $43^\circ$  和  $45^\circ$ ,该倾角差异是由于本文所提出的设计方法中引入地区气象环境因素对组件转换效率的影响而产生。且从上述分析结果可得出3个不同纬度地区的最优倾角均比传统方法设计的最优倾角高  $2^\circ$ ,这可近似作为实际工程优化的补偿角度。

为进一步分析所提出设计方法的优化型,采用倾斜面辐射量估算模型(1)分别计算出不同方法设计的最优倾角的年发电量。以2.1节选用的某厂商的光伏组件为例,针对一个2 MW的系统,通过两种倾角下的发电数据对比发现:新方法下的武汉地区一年可预估增加发电量6.51 MWh,提升0.031%;南京地区一年可预估增加发电量12.35 MWh,提升0.049%;北京地区一年可预估增加发电量20.44 MWh,提升0.063%。由此可见,本文提出的设计方法带来的发电量提升空间随着建站纬度的升高而增大。虽然平均为0.05%左右的发电量提升对于实际光伏电站而言并无显著改善,但本文通过系统的理论研究和数据分析,阐明了传统方法的设计局限性,提供了一种电站倾角设计的优化方法。

## 4 结 论

本文建立“直散分离”估算模型和倾斜面辐射量的估算模型,与现市场上几款商业软件数据进行分析对比,分析结果表明该模型具有实用性,在工程中可使用。并在此基础上给出一套倾斜面辐射度估算模型和估算步骤。

研究影响组件转换效率的气象因素,推导出工程中组件转换效率的估算模型。基于实验实测获取的气象和组件电性能参数数据,对比组件转换效率的估算值和实测值,分析该估算模型的准确性。

给出基于数据分析软件(SPSS)对理论组件转换效率模型进行修正的方法过程。针对不同的组件,按照本文给出的温度和辐照度系数的拟合方法,即可方便地模拟出相应系数,该方法可满足一般工程要求,对电站发电量的数据分析具有实际的指导意义。

阐明传统设计方法的局限性,提出固定式光伏组件最优倾角设计的改进方法,即以组件年输出功率最大为设计原则,具有一定的理论研究价值。通过比较发现所提出的优化设计原则可在电站其他条件都不变的情况下,提升年发电量,增大经济效益。

## [参考文献]

- [1] Perez R, Seals R, Ineichen P, et al. A new simplified version of the perez diffuse irradiance model for tilted surfaces[J]. Solar Energy, 1987, 39(3): 221—232.
- [2] Perez R, Ineichen P, Seals R. Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance[J]. Solar Energy, 1990, 44(5):

- 271—289.
- [3] Reindl D T, Beckmann W A, Duffie J A. Diffuse fraction correlations[J]. *Solar Energy*, 1990, 45(1): 1—7.
- [4] Reindl D T, Beckmann W A, Duffie J A. Evaluation of hourly tilted surface radiation models[J]. *Solar Energy*, 1990, 45(1): 9—17.
- [5] Klein S A. Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces[J]. *Solar Energy*, 1977, 19(4): 325—329.
- [6] Klucher T M. Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces [J]. *Solar Energy*, 1979, 23 (2) : 111—114.
- [7] Hay J E. Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal inclined surfaces[J]. *Solar Energy*, 1979, 23 (4): 301—307.
- [8] 姚万祥, 李峥嵘, 赵 群, 等. 几种散射辐射模型精度的对比[J]. *统计大学学报: 自然科学版*, 2014, 42 (6): 937—943.
- [8] Yao Wanxiang, Li Zhengrong, Zhao Qun. Comparative study on accuracy of several diffuse radiation models[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2014, 42 (6): 937—943.
- [9] 周 芳, 胡明辅, 周国平. 铅垂面上太阳辐射计算方法探讨[J]. *建筑节能*, 2007, 35(5): 55—58.
- [9] Zhou Fang, Hu Mingfu, Zhou Guoping. Calculation method of solar radiation on vertical surface [J]. *Construction Conserves Energy*, 2007, 35(5): 55—58.
- [10] 冯 巍, 董 宏, 杨 柳, 等. 太阳辐射直散分离模型比较研究——以北京地区为例[J]. *土木建筑与环境工程*, 2015, 37(1): 12—17.
- [10] Feng Wei, Dong Hong, Yang Liu. Comparison of the fraction model of direct and diffuse solar radiation—Taking Beijing area as an example[J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2015, 37 (1): 12—17.
- [11] 李 芬, 马年骏, 刘邦银, 等. 上海地区太阳能资源评估与散射辐射推算方法研究[J]. *水电能源科学*, 2015, 33(5): 207—219.
- [11] Li Fen, Ma Nianjun, Liu Bangyin. Solar resources assessment in Shanghai city and research on diffuse radiation calculation method [J]. *Water Resources and Power*, 2015, 33(5): 207—219.
- [12] Liu B Y H, Jordan R C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar-radiation[J]. *Solar Energy*, 1960, 4(3): 1—19.
- [13] Page J K. The estimation of monthly mean values of daily total short-wave radiation on vertical and inclined surfaces from sunshine records for latitudes 60°N to 40°S[R]. Department of Building Science, Faculty of Architectural Studies, University of Sheffield, 1976.
- [14] 苏建徽, 余世杰, 赵 为, 等. 硅太阳能电池工程用数学模型[J]. *太阳能学报*, 2001, 22(4): 409—412.
- [14] Su Jianhui, Yu Shijie, Zhao Wei. Investigation on engineering analytical model of silicon solar cells [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2001, 22 (4) : 409—412.

## OPTIMIZATION DESIGN AND RESEARCH OF TILT ANGLE OF PV MODULE IN GRID CONNECTED PV POWER STATION

Yang Liuliu, Wang Fei, Ren Lintao

(Shanghai Key Laboratory of Power Station Automation Technology, School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** The estimation model of solar irradiance on inclined surface and the estimation model of conversion efficiency for actual module are comprehensively considered, the power generation model of PV module under a fixed tilt angle is established, and a kind of optimization design method with the annual maximum power as the optimal tilt angle design principle is proposed. Based on large amount of data from Wuhan, Nanjing and Beijing, the proposed method is verified and analyzed. The results show that the optimal design can improve power generation quantity and bring economic benefits for PV power plants, and the higher the latitude of the PV power station, the greater the improving space for power generation.

**Keywords:** PV module; optimal design; conversion efficiency; solar radiation; fixed tilt angle