

中国可再生能源学会标准

T/CRES00XX-202X

大型地面光伏电站发电能力建模导则

Guidelines for large scale grid-connected photovoltaic power plant
energy yield simulations

(征求意见稿)

202X-XX-XX 发布

202X-XX-XX 实施

中国可再生能源学 发布

目 次

前 言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 总则	2
5 发电能力模型	2
5.1 太阳辐射侧模型	2
5.1.1 太阳辐射模型	2
5.1.2 跟踪支架模型	2
5.1.3 阴影遮挡	2
5.1.4 入射角（IAM）损失	2
5.1.5 积灰损失模型	2
5.1.6 背面有效辐射	2
5.2 光伏阵列侧模型	3
5.2.1 光伏组件模型	3
5.2.2 弱光损失	3
5.2.3 温度损失	3
5.2.4 组件失配	3
5.2.5 组件功率衰减损失	3
5.2.6 直流线缆损失	3
5.2.7 双面光伏组件模型	3
5.2.8 组件故障导致的发电量降低	3
5.3 逆变器侧模型	3
5.3.1 逆变器效率模型	3
5.3.2 逆变器超配损失	4
5.3.3 逆变器低载损失	4
5.3.4 逆变器过压、过流损失（过载损失）	4
5.3.5 逆变器低压损失	4
5.3.6 交流电缆损失	4
5.4 变压器侧模型	4
6 模型评估	4
7 模型应用	4
附录 A（资料性） PEREZ 太阳辐射模型	6
附录 B（资料性） 典型气象年模型	7
附录 C（资料性） 平单轴跟踪模型	9
附录 D（资料性） 阴影遮挡模型	10
附录 E（资料性） 入射角损失模型	11
附录 F（资料性） 积灰损失模型	12
附录 G（资料性） 背面辐射模型	13
附录 H（资料性） 五参数组件模型	14
附录 I（资料性） 温度损失模型	15
附录 J（资料性） 组件失配模型	16
附录 K（资料性） 组件阵列衰减损失	17
附录 L（资料性） 直流线缆损失	18
附录 M（资料性） 双面光伏组件模型	19
附录 N（资料性） 组件故障导致的发电量降低模型	20

附录 O (资料性)	逆变器效率模型	21
附录 P (资料性)	逆变器超配损失模型	22
附录 Q (资料性)	逆变器过载损失模型	23
附录 R (资料性)	逆变器低压损失模型	24
附录 S (资料性)	交流电缆损失模型	25
附录 T (资料性)	单元升压变压器电能损失模型	26

前 言

本文件按照GB/T1.1—2020《标准化工作导则第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件的某些内容可能涉及专利，本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由阳光新能源开发股份有限公司提出。

本文件由中国可再生能源学会归口及发布。

本文件起草单位：阳光新能源开发股份有限公司、阳光电源（上海）有限公司、阳光电源股份有限公司、北京鉴衡认证中心有限公司、河海大学、上海交通大学。

本文件主要起草人：张彦虎、陶三奇、陈朋朋、王逸伦、白建波、张沛超、陈相霖、曹雪原、赵天、邵亚辉、黄晓阁、胡家宇、翁捷、王绍亮、候天才、汤霜霜、陈扬、戴朋龙。

本文件在执行过程中的意见建议请反馈至中国可再生能源学会标准化工作办公室。

大型地面光伏电站发电能力建模导则

1 范围

本文件规定了大型地面光伏电站发电能力建模的总则、发电能力模型、模型评估与模型应用。本文件适用于无配置储能的大型地面光伏电站的发电量评估计算。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB50797 光伏电站设计规范

NB/T10394-2020 光伏发电系统效能规范

IEC61853 光伏组件性能测试和能量评定

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

标准测试条件 standard test condition

简称为STC，大气质量AM1.5，太阳光辐照强度 $1000\text{W}/\text{m}^2$ ，光伏电池温度 25°C 。

注：光伏发电系统效能规范NB/T10394-2020。

3.2

太阳辐射强度 solar radiation intensity

指投射到单位面积上的辐射功率(W/m^2)。

3.3

辐射量 radiation amount

在一段时间内太阳投射到单位面积上的辐射能量(kWh/m^2)。

3.4

直流线缆损失 DC cable losses

光伏组件输出端至逆变器输入端所有直流线缆功率损失之和。

[来源：NB/T10394-2020中“直流线损”]

3.5

交流线缆损失 AC cable losses

并网光伏发电系统中逆变器输出端至升压变压器、升压变压器至并网点的所有交流线缆功率损失之和。

3.6

逆变器低载损失 Inverter low load losses

光弱条件下，逆变器功率达不到启动阈值，造成直流侧的功率损失。

3.7

逆变器直流侧过流损失 Inverter overload losses

指逆变器在超出其最大输入电流的情况下产生的损失。

3.8

入射角 (IAM) 损失 Angle of incidence (IAM) loss

入射角损失指由于太阳光以不同角度照射到光伏组件表面时,光的透过率和反射率随入射角的变化而变化所导致的能量损失。

3.9

逆变器超配损失 Inverter overmatch loss

逆变器超配损失是在光伏系统的逆变器容量大于光伏组件的总功率输出能力情况下,造成的能量损失。

4 总则

4.1 大型地面光伏电站的发电能力模型应能够满足系统发电量分析计算的需求,应能在广泛使用的计算机软件或程序中实现。

4.2 大型地面光伏电站的发电能力模型应包括太阳辐射侧模型、光伏阵列侧模型、逆变器侧模型、变压器侧模型。

5 发电能力模型

5.1 太阳辐射侧模型

5.1.1 太阳辐射模型

5.1.1.1 光伏电站较短时间周期内发电性能评估时,应计算不同入射角度下太阳辐照总量;倾斜方阵的正面太阳辐照总量为法向直射的辐照度、地面反射的辐照度和散射的辐照度之和。

5.1.1.2 倾斜方阵正面辐照度的太阳辐射模型宜采用perez模型,可按照附录A的模型建立。

5.1.1.3 光伏电站项目前期设计规划等较长时间周期的发电性能评估时,太阳辐射模型宜采用典型气象年模型,典型气象年模型参见附录B。

5.1.2 跟踪支架辐射计算模型

5.1.2.1 光伏跟踪支架按跟踪目标可分为单轴跟踪和双轴跟踪,单轴跟踪只跟踪太阳方位角,双轴跟踪同时跟踪太阳高度角和方位角。

5.1.2.2 单轴跟踪模型、双轴跟踪模型均应能模拟输出光伏阵列跟踪范围内的入射角,为太阳辐射模型求解提供数据支撑。

5.1.2.3 单轴跟踪中一般采用平单轴跟踪,平单轴跟踪模型可按附录C执行。

5.1.2.4 双轴跟踪的入射角 θ 在跟踪范围内宜取0。

5.1.3 阴影遮挡损失模型

5.1.3.1 阴影遮挡对发电量的影响评估时可假定阴影遮挡造成的能量损失与被遮挡面积的比例成正比,通过计算阴影遮挡部分占总光伏组件面积的占比(即阴影系数),来预估发电量损失。

5.1.3.2 阴影遮挡条件下的阴影系数计算可参见附录D。

5.1.4 入射角 (IAM) 损失模型

入射角损失可以通过计算入射角对应的IAM系数表述。入射角的IAM系数计算模型见附录E。

5.1.5 积灰损失模型

5.1.5.1 积灰损失可直接取经验值或建立积灰损失模型求解,积灰损失模型应能反映不同积灰量下的光伏组件发电损失。

5.1.5.2 积灰损失模型中积灰量的确定应考虑空气PM10、降水量、相对湿度、风速等因素影响。

5.1.5.3 积灰损失模型可采用神经网络模型、线性回归模型等,线性回归模型可按附录F建立。

5.1.6 背面有效辐射

背面有效辐射量的计算可使用视角系数模型（view-factor mode），模型见附录G。

5.2 光伏阵列侧模型

5.2.1 光伏组件模型

5.2.1.1 光伏组件可由多个并联的电池串组成，每个电池串由多个光伏电池串联组成，光伏电池单二极管模型等效电路如图1所示。单个光伏电池的单二极管模型可按附录H.1执行。

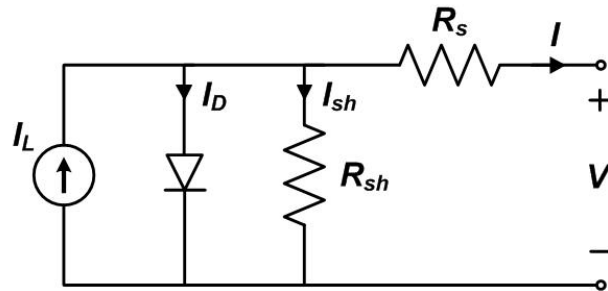


图1 光伏电池单二极管模型等效电路

5.2.1.2 光伏组件的单二极管模型宜采用五参数组件模型，五参数组件模型参见附录H.2。

5.2.2 弱光损失

光伏组件弱光条件下的功率损失可使用实验数据（在不同辐照下测量的I-V曲线）拟合修改单二极管模型参数计算求得，或可参考IEC 61853《光伏组件性能测试和能量评定》标准中的建模方法，使用不同辐照下的光伏组件输出功率测量值进行插值计算，求得其弱光条件下的发电功率。

5.2.3 温度损失

光伏组件的温度损失可参见附录I计算。

5.2.4 组件失配

组件失配损失可利用组件I-V特性的真实统计样本进行估量计算，计算模型可按照附录J执行。

5.2.5 组件功率衰减损失

组件功率衰减损失可按照附录K计算。

5.2.6 直流线缆损失

直流线缆损失可按照附录L计算。

5.2.7 双面光伏组件模型

双面光伏组件模型可按照附录M执行。

5.2.8 组件故障导致的发电量降低损失模型

组件故障导致的发电量降低损失计算可按照附录N执行。

5.3 逆变器侧模型

5.3.1 逆变器效率模型

5.3.1.1 在对逆变器做数学建模时，可采用逆变器厂商提供的逆变器原始性能曲线，通过数学拟合的方法获得输入电压和输入功率下的输出曲线拟合效率。逆变器模型还可采用美国SANDIA国家实验室开发的SANDIA模型，其所需模型参数可通过逆变器的铭牌参数获得。

逆变器的转换效率即输出端交流功率与输入端直流功率的比值。

$$\eta = \frac{P_{AC}}{P_{DC}} = \frac{P_{DC} - P_L}{P_{DC}}$$

P_{AC} 和 P_{DC} 分别表示输出交流功率和输入直流功率。 P_L 指转换过程中的功率损耗。 P_{AC} 和 P_{DC} 的参数取值可根据附录O取得。

5.3.1.2 逆变器的输入性能参数应包括：最大直流电功率、最大直流电压、最大直流电流、功率阈值、最大功率点额定电压、最大功率点电压范围。

5.3.1.3 逆变器的输出端性能参数应包括电网额定频率，电网额定电压，额定交流电功率，额定交流电流，最大交流电功率、最大交流电流，输出功率因数。

5.3.2 逆变器超配损失

逆变器超配损失可按照附录P计算。

5.3.3 逆变器低载损失

逆变器低载损失计算可基于逆变器的效率曲线进行，通过使用效率曲线上的数据来估算低载损失。首先确定逆变器在低负载条件下的效率值，然后计算在该负载下逆变器实际输出的功率与理论输出功率之间的差值，即得到低载损失。

5.3.4 逆变器过压、过流损失

逆变器过压、过流损失可按照附录Q计算。

5.3.5 逆变器低压损失

逆变器低压损失可按照附录R计算。

5.3.6 交流电缆损失

交流电缆损失包括逆变器到变压器、变压器到电网的电缆损耗，交流电缆的计算中默认三相电压、电流完全对称。逆变器到变压器的电缆损耗、变压器到电网的电缆损耗模型公式可参照附录S。

5.4 变压器侧模型

并网变压器的电能损耗包括铁损 P_{Fe} 和铜损 P_{Cu} ；铁损 P_{Fe} 为固定损耗，可用空载损耗 ΔP_0 代替；铜损 P_{Cu} 为跟随绕组负荷电流成正比的可变负载损耗，可用短路损耗 P_k 来计算。变压器的总损耗为：

$$P_b = P_{Fe} + P_{Cu} = \Delta P_0 + I_k^2 P_k$$

$$I_k = \frac{I_t}{I_N}$$

式中，空载损耗 ΔP_0 和短路损耗 P_k 可从变压器的产品手册中获得； I_k 为变压器负荷电流， I_t 为变压器高压侧实际电流有效值， I_N 为变压器高压侧额定电流有效值。

变压器损耗也可通过测试法确定变压器效率，进而计算损耗，模型见附录T。

6 模型评估

发电能力模型可采用发电能力模型在软件中的仿真预测值与发电量的实际值的比值（即准确率）进行评估，或与Pvsyst等权威软件模拟结果进行对比评估。

7 模型应用

大型地面光伏电站的发电量综合效率系数的模拟测算流程如下：

- 定义光伏系统的设计参数。
- 选择辐照和气象数据。
- 将辐照数据转化至阵列板面。
- 估算由于阵列表面的阴影、积尘、反射引起的光学损失。
- 估算有效辐照。

- f) 估算光伏电池片的温度。
- g) 估算光伏组件的电流和电压（IV）特性。
- h) 估算直流线缆和失配导致的损失。
- i) 估算直流-交流转换损失。
- j) 估算交流线缆和变压器损失。
- k) 求得综合效率系数K，带入发电量计算公式计算发电量，发电量计算公式见GB90797。

附录 A
(资料性)
perez 太阳辐射模型

Perez 太阳辐射模型公式如下：

$$G_t = G_{tb} + G_{ta} + G_{td}$$

$$G_{tb} = G_b \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z}$$

$$G_{ta} = G_h \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$$

$$G_{td} = G_{dh} [(1 - F_1) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + F_1 r_b + F_2 \sin \beta]$$

式中：

G_t 为倾斜面辐射总量；

G_{tb} 为倾斜面直射辐射量；

G_{ta} 为倾斜面反射辐射量；

G_{td} 为倾斜面散射辐射量；

β 为倾斜面与水平面之间的夹角；

ρ 为地面反射率；

θ 为任意时刻太阳直射光的入射角；

θ_z 为太阳天顶角；

F_1 为环绕太阳系数；

F_2 为水平亮度系数；

r_b 为经验值。

附录 B
(资料性)
典型气象年模型

B.1 模型说明

典型气象年模型适用于既具备太阳能资源各要素长序列数据，也具备气温、相对湿度、风速、气压以及露点温度等气象要素长序列数据的情况。

B.2 模型公式

分析历史长序列数据的年际变化曲线，结合当地的气候变化特点，挑选最近 10 年以上、年际辐照变化最小的时间区间作为典型年时间序列（即总方差最小的时间序列）。

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \mu)^2}{N}$$

式中：

σ^2 ——总体方差；

X——实际年总辐照量；

μ ——多年平均辐照量；

N——时间序列年数。

B.3 典型气象年数据选取

Step1: 计算累积概率分布值

分别计算各要素（其中包括气温、风速以及太阳辐照度）的长期累积分布函数和逐年逐时刻（月）累积分布函数值，计算公式如下：

$$S_n(x) = \frac{k-0.5}{n}$$

式中： $S_n(x)$ 为 x 处的长期累积分布值； n 为样本总数； k 为要素 x 在增序时间序列中的排序。然后，按照年份顺序分别在目标月份内按照增序排列，再按上式计算该要素逐年的月累积分布值。

Step2: 数据选取

对每个气象要素的分布计算其 Finkelstein-Schafer 统计值（Cfs），即：

$$C_{fs} = \frac{\sum_{i=1}^{nd} \delta_i}{nd}$$

式中： σ 为各要素长期累积分布值与逐年各月累积分布值的绝对差值； nd 为各分析月内的天数。在获得各气象要素每个月份的 Cfs 后，按一定权重系数 W_{fi} 把各 Cfs 值汇总成一个参数 W_s 。计算公式如下：

$$W_s = \sum_{i=1}^{KK} W_{Fi} \times C_{fsi}$$

式中：KK 为气象要素的个数。

选取 W_s 最小值对应的太阳能资源要素值作为该时刻（月）的代表值，即典型月。

表 1 生成典型气象月各构成气象要素的权重系数 W_{fi} 参考值

气象要素	具体指标	权重系数（方案 1）	权重系数（方案 2）	权重系数（方案 3）
气温	日平均气温	2/24	1/20	2/24
	日最低气温	1/24	/	1/24
	日最高气温	1/24	/	1/24
露点温度	日平均露点温度	1/24	/	/
	日最高露点温度	1/24	/	/
	日最低露点温度	2/24	/	/
风速	日平均风速	2/24	/	2/24

T/GRES00XX-202X

	日最大风速	2/24	/	2/24
太阳辐射	水平面总辐射	12/24	15/20	/
	散射辐射	/	4/20	/
	光伏阵列面总辐射	/	/	16/24

Step3: 输出典型气象年数据

以 Step1 和 Step2 的方法分别选取 12 个典型月序列数据, 组成完整典型年时间序列数据并输出。

附录 C
(资料性)
平单轴跟踪模型

在地平坐标系内，平单轴在东西跟踪时，光伏方阵的倾角不变，对太阳方位角进行追踪。平单轴跟踪模型可按如下公式执行：

$$\cos \theta = \cos Z \sin \alpha + \sin Z \cos \alpha = \sin (\alpha + Z)$$

式中，

θ 为入射角；

Z 为光伏方正倾角；

α 为太阳高度角。

附录 D
(资料性)
阴影遮挡模型

D.1 直射阴影系数

阴影系数计算需求出遮挡阵列面上阴影的长和宽，阵列面上的宽可以利用相似三角形的原理求得，长利用空间几何关系求得。

宽度计算：

$$s_w = \frac{(\text{up} - \text{moudle_space}) \cdot a_w}{\text{up}}$$

式中， α 表示等效高度角； a_w 表示阵列宽度； moudle_space 表示间距； up 表示上端点投影总长求遮挡的长：

长度计算：

$$\text{long} = a_l - (\text{moudle_space} - a_w \cdot \cos\beta + s_w \cdot \cos\beta) \cdot \text{abs}(\tan(Z1 - Z2))$$

式中， a_l 表示一长排阵列的长度。根据被遮挡的长和宽，进而求得直射阴影系数：

$$f_B = \frac{s_w \cdot \text{long}}{a_l \cdot a_w}$$

D.2 散射阴影系数

利用直射阴影系数模型，一次计算出方位角 $-180^\circ \sim 180^\circ$ ，倾角 $0 \sim 90^\circ$ 的组合方案下不同的阴影系数、入射角 \cos 值和太阳高度角 \cos 值，进而得到散射阴影系数。具体模型如下：

$$f_D = \frac{\sum_{i=1}^{90} \sum_{j=-180}^{180} f_{Bij} \cdot \cos\theta \cdot \cosh}{\sum_{i=1}^{90} \sum_{j=-180}^{180} \cos\theta \cdot \cosh}$$

背面的阴影系数同正面逻辑一致，改变相应角度和方位角即可。反射阴影系数已经在视角系数模型中考虑，不再单独计算。

附录 E
(资料性)
入射角损失模型

E.1 直射 IAM 系数：

正面入射角模型：

$$\cos \theta = \cos \beta \sinh + \sin \beta \cosh \cos (Z_1 - Z_2)$$

背面入射角模型：

$$\cos \theta = \cos (180 - \beta) \sinh + \sin (180 - \beta) \cosh \cos (Z_1 - Z_2 - 180)$$

根据上述中计算得到的正面和背面的入射角模型，得到入射角。

得到入射角后，带入入射角 IAM 系数模拟曲线，即可求得入射角对应的 IAM 系数。

E.2 散射 IAM 系数：

直接采用拟合模型计算得到，模型如下：

$$IAM_D \cong \exp \left[-\frac{1}{a_r} \left(c1 \left(\sin \beta + \frac{\pi - \beta - \sin \beta}{1 + \cos \beta} \right) + c2 \left(\sin \beta + \frac{\pi - \beta - \sin \beta}{1 + \cos \beta} \right)^2 \right) \right]$$

E.3 反射 IAM 系数

$$IAM_D \cong \exp \left[-\frac{1}{a_r} \left(c1 \left(\sin \beta + \frac{\beta - \sin \beta}{1 - \cos \beta} \right) + c2 \left(\sin \beta + \frac{\beta - \sin \beta}{1 - \cos \beta} \right)^2 \right) \right]$$

附录 F
(资料性)
积灰损失模型

积灰造成的发电效率损失计算时，积灰量可用积灰厚度来表征。

假定积灰损失计算周期内无有效降雨，则光伏组件积灰 N 天后的发电效率为：

$$P_n = (1 - x)^{\left\lceil \frac{f_n}{10} \right\rceil}$$

发电效率损失为：

$$P_{loss_n} = 1 - P_n$$

其中， x 为步长， $\left\lceil \frac{f_n}{10} \right\rceil$ 为关于积灰厚度的向上取整函数， f_n 为光伏组件积灰 n 天后积灰的厚度（um），计算如下：

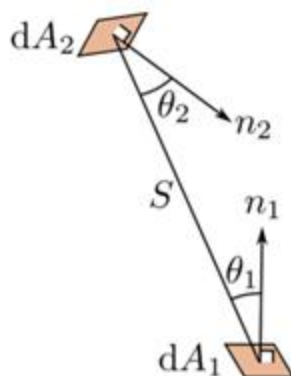
$$f_n = a_1 + a_2 y_2 + a_3 y_3 + a_4 y_4$$

其中， y_2 为日均PM10浓度； y_3 为日均风速， y_4 为日均湿度； a_1 、 a_2 、 a_3 和 a_4 为常量参数。

当存在有效降雨（当日降雨量达到经验值）或主动清洗时，有效降雨或主动清洗后默认组件得到完全清洗，发电效率损失为0，完全清洗后重新累积计算积灰层数。

附录 G
(资料性)
背面辐射模型

背面有效辐射量的计算时，如图G.1所示，假设地面为 A_1 ，组件背面为 A_2 ，则表示 A_1 反射的辐射量，可被 A_2 接收的比例。



图G.1 背面有效辐射计算图解

通过对微元面 dA_1 到达微元面 dA_2 的辐照部分进行积分，可得到背面有效辐射量，公式如下：

$$F_{A_1 \rightarrow A_2} = \frac{1}{A_1} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi s^2} dA_1 dA_2$$

式中： s 为微元面 dA_1 中心到 dA_2 中心的距离（m）； θ_1 为 A_1 法线 n_1 与 A_1A_2 连线的夹角； θ_2 为 A_2 法线 n_2 与 A_1A_2 连线的夹角。

附录 H
(资料性)
五参数组件模型

H.1 单个光伏电池的单二极管模型

模型公式为:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V+IR_s}{nV_{th}}\right) - 1 \right] - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad (H.1)$$

式中:

I_0 为二极管反向饱和电流, 单位 μA ;

n 为二极管理想因子;

V_{th} 为热电压, $V_{th} = \frac{kT}{q}$, 单位 V;

波尔兹曼常数 $k = 1.3806503 \times 10^{-23}$, J/K;

T 为 P-N 结绝对温度, 单位 K;

电子电荷 $q = 1.60217646 \times 10^{-19}$, 单位 C。

H.2 光伏组件的五参数模型

模型公式为:

$$I = N_p I_{ph} - N_p I_0 \left[\exp\left(\frac{V/N_s + IR_s/N_p}{nV_{th}}\right) - 1 \right] - \frac{VN_p/N_s + IR_s}{R_{sh}} \quad (H.2)$$

式中, I_{ph} 为光生电流, R_s 为串联电阻, R_{sh} 为并联电阻, I_0 为二极管反向饱和电流, n 为二极管理想因子, 其他参数见公式 (H.1) 中说明。

五参数模型中 I_{ph} 、 I_0 、 n 、 R_s 和 R_{sh} 的具体求解可用方法包括解析提取参数方法、利用特殊函数 (例如用 Lambert W 函数的方法) 提取参数方法、智能迭代算法或者使用曲线拟合等。

H.3 求解示例

以解析提取参数方法求解模型的五个参数的方法如下:

- a) 测量 I-V 曲线。通过测量或从制造商处获得光伏组件在标准测试条件 (STC) 下的 I-V 曲线数据, 包括短路电流 (I_{SC})、开路电压 (V_{OC})、最大功率点的电流 (I_{mp})、电压 (V_{mp})。
- b) 计算光生电流 I_{ph}
光生电流通常等于短路电流 (I_{SC})。
- c) 计算反向饱和电流 (I_0)
反向饱和电流可以通过在暗 I-V 曲线 (无光照条件下) 上进行曲线拟合来确定。
- d) 计算二极管理想因子 (n)
通过分析 I-V 曲线在最大功率点附近的斜率来确定, 或者通过曲线拟合来优化。
- e) 计算串联电阻
可通过最大功率法、短路电流法、线性回归法等方法或参考制造商提供数据进行确定。
- f) 计算并联电阻
可使用开路电压法、光生电流法、曲线拟合法等方法或参考制造商提供数据进行确定。

附录 I
(资料性)
温度损失模型

温度损失模型为：

$$P = P_{\max} \times (1 - \delta \times (T_{\text{module}} - 25^{\circ}\text{C}))$$

式中：

P 为组件实际输出功率；

δ 为组件功率温度系数；

T_{module} 为组件工作温度。

光伏组件的功率温度系数可通过测量或从厂商处获得包括短路电流、开路电压和最大功率温度系数数值，进而修正光伏组件在不同温度下的功率输出，求得组件功率温度系数。

组件工作温度可通过实际测量或建模方式进行确定，通过建模计算光伏组件工作温度时，应考虑影响组件实际工作温度和性能的环境参数，如辐照、环境温度、风速等。

附录 J
(资料性)
组件失配模型

组件失配损失可按以下模型方法计算：

- a) 测量绘制光伏组件的 I-V 特性曲线，对 I-V 特性曲线进行平滑处理，以平滑后的 I-V 特性曲线上每相邻两点构成直线，计算每相邻两直线间的夹角，得到光伏组件电流失配故障特征值；
- b) 确定阈值：根据光伏组件的规格和性能要求，确定一个合理的电流失配故障特征值的阈；
- c) 判断故障：将计算得到的电流失配故障特征值与阈值进行比较，如果特征值小于阈值，则认为组件没有电流失配故障；如果特征值大于或等于阈值，则认为组件存在电流失配故障；
- d) 计算失配损失

对于存在电流失配故障的组件，可以采用如下公式计算其失配损失：

$$P_s = \frac{\sum_{i=1}^n P_i - P_c}{\sum_{i=1}^n P_i} \times 100\%$$

式中，

$\sum_{i=1}^n P_i$ 为各组件修正最大功率之和；

P_c 为组串修正工作功率值；

P_s 为光伏组件的失配损失。

上式中，各组件修正最大功率之和和组串修正工作功率值都需要通过修正到统一光强和统一温度条件下来计算。

附录 K
(资料性)
组件阵列衰减损失

K.1 组件阵列衰减损失

光伏阵列输出功率衰减包括：初始光致衰减、老化衰减和破坏性因素衰减。

初始光致衰减可根据经验和组件产品类型取值。老化衰减可根据实际运行数据计算运行周期内的光伏阵列的年平均累计衰减率进行表征。

高湿度环境运行的光伏阵列还存在电势诱导衰减（PID），PID造成的发电量损失应考虑光伏阵列的运行环境、组件类型、电气连接等，计算PID引起的发电量损失可根据需求进行衰减率取值。

确定阵列衰减率值后，假定光伏组件初始发电能力为 E_0 ，则第N年发电能力可计算为：

$$E_N = (1 - \beta^N) \cdot E_0$$

式中： E_N 为第N年发电量（kWh）； E_0 为不计算衰减的初始发电量（kWh）； β^N 为累计衰减率（%）。

K.2 典型案例

以PERC组件为例，组件初始光致衰减率取值2%，年线性衰减率为0.7%，则组件运行周期内（20年）各年份老化衰减率可参照下表取值。

表K.1 组件阵列功率衰减率参考值

年份 N	年初衰减率 (%)	年末衰减率 (%)	累计老化衰减率 (%)	累计衰减率 (%) β^N
第 1 年	0	0.7	0.35	2.35
第 2 年	0.7	1.4	1.05	3.05
第 3 年	1.4	2.1	1.75	3.75
第 4 年	2.1	2.8	2.45	4.45
第 5 年	2.8	3.5	3.15	5.15
第 6 年	3.5	4.2	3.85	5.85
第 7 年	4.2	4.9	4.55	6.55
第 8 年	4.9	5.6	5.25	7.25
第 9 年	5.6	6.3	5.95	7.95
第 10 年	6.3	7	6.65	8.65
第 11 年	7	7.7	7.35	9.35
第 12 年	7.7	8.4	8.05	10.05
第 13 年	8.4	9.1	8.75	10.75
第 14 年	9.1	9.8	9.45	11.45
第 15 年	9.8	10.5	10.15	12.15
第 16 年	10.5	11.2	10.85	12.85
第 17 年	11.2	11.9	11.55	13.55
第 18 年	11.9	12.6	12.25	14.25
第 19 年	12.6	13.3	12.95	14.95
第 20 年	13.3	14	13.65	15.65

附录 L
(资料性)
直流线缆损失

光伏阵列的直流线缆功率损失可通过电阻性损耗来建模计算，计算公式如下：

$$R = \rho \frac{L}{A}$$
$$P_{\text{loss}} = I^2 \times R$$

式中：

R 为电缆电阻；

ρ 为材料电阻率；

L 为线缆长度；

A 为线缆导体截面积；

I 为光伏阵列在特定条件下的工作电流，可为光伏阵列最大功率点电流或实际工作条件下的组件阵列电流。

P_{loss} 为直流线缆功率损失。

附录 M
(资料性)

双面光伏组件模型

双面组件背面的发电特性可用单二极管模型模拟，背面的辐射量可以线性叠加到正面。

双面组件背面辐照可表达为：

$$G_r = B_r + D_r + D_g$$

式中：

G_r ：组件背面平面总辐照 (W/m^2)

B_r ：组件背面直接辐照 (W/m^2)

D_r ：组件背面天空散射辐照 (W/m^2)

D_g ：组件背面地面反射辐照 (W/m^2)

因此双面系统发电量公式可以表述为：

$$E = P\eta[G_{front} + f_b(G_r)]$$

式中：

E ：发电量 ($kW \cdot h$)；

P ：系统装机容量（一般以组件正面的标称功率为准）(kW)；

G_{front} ：光伏组件正面的辐射量，($kW \cdot h/m^2$)；

G_r ：背面的有效辐射量 ($kW \cdot h/m^2$)；

f_b ：组件双面发电系数，背面额定输出功率与正面额定输出功率的比值 (%)；

η ：光伏组件或系统转换效率 (%)。

组件背面直接辐照 B_r 、组件背面天空散射辐照 D_r 可根据太阳方位和光伏系统所在地理位置进行计算。组件背面地面反射辐照 D_g 的计算模型可采用视角系数模型 (view-factor mode)，其假设地面为 A_1 ，组件背面为 A_2 ，通过对微元面 dA_1 到达微元面 dA_2 的辐照部分进行积分，可计算获得地面反射辐照被组件背面吸收的比例。

附录 N
(资料性)

组件故障导致的发电量降低模型

计算不同故障因素下光伏方阵的光电转换特性公式可参见附录H中五参数模型公式，上述计算模型中组件各类故障类型导致的输入量和输入参数变化参考系数范围，如下表所示：

表 N.1 输入量和输入参数变化系数表

输入量/输入参数		组件故障类型					
		灰尘 遮挡	封装胶膜黄 变	线性 隐裂	造成失效面 积的碎片	内部电路腐 蚀	热斑
输入量	S	0.98-0.8	/	/	/	/	/
	T	/	/	/	/	/	大于 1.5
	U_{dc}	/	0-0.95	/	0-0.7	0-0.75	0-0.30
输入参数	U_m	/	0-0.95	/	0-0.7	0-0.75	0-0.30
	I_m	0-0.80	0-0.95	/	0-0.7	0-0.70	0-0.20
	U_{oc}	/	/	/	0-0.7	/	/
	I_{sc}	0-0.80	0-0.8	/	0-0.7	0-0.95	/

注：“/”代表该项参数变化不大无需考虑变化系数，数值表示需要在输入参数时根据故障程度在上述系数范围内选择较为合理的系数跟标称数值相乘，得出更接近故障组件实际运行时的性能参数。

表中，

S 为光伏方阵当前工况的太阳辐照度；

T 为光伏方阵当前工况的工作温度；

U_{dc} 为光伏方阵直流工作电压，即逆变器直流侧电压；

U_m 光伏方阵标准测试条件下最大功率点电压；

I_m 光伏方阵标准测试条件下最大功率点电流；

U_{oc} 光伏方阵标准测试条件下开路电压；

I_{sc} 光伏方阵标准测试条件下短路电流。

附录 0
(资料性)
逆变器效率模型

0.1 逆变器转换效率

逆变器转换效率可采用静态最大功率点跟踪效率，参数可根据下表工况要求测试得出。

表0.1 逆变器转换效率 (%)

I/U 特性曲线的 MPPT 电压	I/U 特性	MPP 功率与逆变器额定直流功率之比 PMPP, PVS/PDC, r							
		0.05	0.10	0.20	0.25	0.30	0.50	0.75	1.00
U_{MPPmax}	晶硅组件								
$U_{MPPmin}+0.7\Delta U$									
$U_{MPPmin}+0.5\Delta U$									
$U_{MPPmin}+0.3\Delta U$									
U_{MPPmin}									
U_{MPPmax}	薄膜组件								
$U_{MPPmin}.0.7\Delta U$									
$U_{MPPmin}+0.5\Delta U$									
$U_{MPPmin}+0.3\Delta U$									
U_{MPPmin}									

0.2 逆变器损耗

逆变器的电能转换损耗率按下式计算：

$$L_{C_loss} = 100\% - \eta_{conv}$$

式中：

L_{C_loss} —逆变器电能转换损耗率 (%)；

η_{conv} —逆变器转换效率 (%)。

按照上述表和公式计算出不同条件下的逆变器损耗率，电站中使用的不同型号逆变器应分别计算。

附录 P
(资料性)
逆变器超配损失模型

逆变器超配损失可基于功率曲线和效率曲线的方法计算：

- a) 获取逆变器的效率曲线和光伏组件的功率曲线；
- b) 根据实际的光照强度和温度条件，估算光伏组件的实际输出功率；
- c) 结合逆变器的效率曲线，计算在不同输出功率下逆变器的效率；
- d) 通过比较实际输出功率与逆变器最大输出功率，计算因超配而导致的效率损失和发电量损失。

附录 Q
(资料性)
逆变器过压过流损失模型

Q.1 逆变器直流侧过流损失

当制造商指定了获得最大功率所需的最小电压 (V_{min_Pnom}) 时, 这实际上对应于输入电流限制。

$$I_{max} = P_{nom(DC)} / V_{min_Pnom}$$

其中,

$$P_{nom(DC)} = P_{nom(AC)} / \text{Efficiency}$$

当输入电流大于 I_{max} 时, 逆变器会限制电流在 I_{max} 水平, 此时, 逆变器直流侧过流损失为最大功率点 (MPP) 和该电流下输入端直流功率之间的差值即:

$$I_{L_I_{max}} = (P_{mpp} - P_{array}) / P_{mpp}$$

Q.2 逆变器直流侧过压损失

超过逆变器额定电压导致的损耗, 即当阵列的 MPP 电压超过 V_{mpp_max} 时的损耗。

在超配比例过高或是非常高的情况下, 阵列组串电压超过逆变器最大的 MPP 电压上限, 工作点会被限制在 V_{mpp_min} 或 V_{mpp_max} 电压上。在这种情况下, 最大功率点 (MPP) 和该电压下输入端直流功率之间的差值即是逆变器的过压损耗。

$$I_{L_V_{max}} = (P_{mpp} - P_{array}) / P_{mpp}$$

附录 R
(资料性)
逆变器低压损失模型

当光伏逆变器的输入电压过低导致逆变器无法工作时，造成的损失，主要包括潜在发电量损失。当逆变器无法工作时，它将无法将光伏电池板产生的直流电转换为交流电并送入电网。因此，损失的电量可以通过以下方式估算：

首先，获取光伏电池板在正常运行时的输出功率 P_{normal} 。

然后，估算逆变器因输入电压过低而无法工作的持续时间 t_{down} 。

发电量损失：

$$P_L = P_{normal}t_{down}$$

其中， P_{normal} 应为逆变器正常工作时能够转换的最大功率， t_{down} 根据实际情况进行估算，可包括故障排查时间、维修时间等。

附录 S
(资料性)
交流电缆损失模型

S.1 逆变器到变压器的交流电缆损失

逆变器到变压器的交流电缆损失模型公式如下：

$$P_x = (P_t / \sqrt{3} V_N)^2 \rho_t \cdot L_t / S_t$$

式中，

P_t 代表逆变器的输出功率；

ρ_t 代表逆变器到变压器的电缆电阻率 ($\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$)；

L_t 代表电缆长度 (m)；

S_t 代表横截面面积(mm^2)；

V_N 代表逆变器的输出线电压有效值。

S.2 变压器到电网的交流电缆损失

变压器到电网的交流电缆损失模型公式如下：

$$P_y = (P_l / \sqrt{3} V_{NI})^2 \rho_l \cdot L_l / S_l$$

式中，

P_l 代表逆变器的输出功率；

ρ_l 代表变压器到电网的电缆电阻率 ($\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$)；

L_l 代表电缆长度 (m)；

S_l 代表横截面面积(mm^2)；

V_{NI} 代表变压器的高压侧线电压有效值。

附录 T
(资料性)
单元升压变压器电能损失模型

T.1 变压器效率

变压器效率应给出实际输出功率与交流额定功率之比为5%、10%、20%、25%、30%、50%、75%、100%时的转换效率值，采用GB/T 39857中规定的方法测试。

表T.1 变压器转换效率 (%)

实际输出功率与交流额定功率之比	0.05	0.10	0.20	0.25	0.30	0.50	0.75	1.00
η_T								

T.2 变压器损耗

变压器损耗率

变压器损耗率按式计算：

$$L_{T_loss} = 100\% - \eta_{T_conv}$$

式中：

L_{T_loss} ——变压器损耗率 (%)；

η_{T_conv} ——变压器转换效率 (%)。

按照表的条件和式计算出不同条件下的变压器损耗率，电站中使用的不同型号变压器应分别计算。

参考文献

- [1] 肖文波, 刘伟庆, 吴华明, 张华明. 太阳能电池单二极管模型中的参数提取方法[J]. 物理学报, 2018, 67(19):377-388
- [2] 高献坤, 姚传安, 高向川, 余泳昌. 光伏电池组件隐式、显式单二极管模型准确性对比研究[J]. 物理学报, 2014, 63(17):366-375
- [3] Dhass A D, Beemkumar N, Harikrishnan S, et al. A review on factors influencing the mismatch losses in solar photovoltaic system[J]. International Journal of Photoenergy, 2022, 2022(1): 2986004.
- [4] 王跃, 白建波, 李建. 光伏发电系统精细化逐时建模方法与应用案例分析[J], 太阳能, 2021, 42(05): 59-66
-