

光伏发电系统输出功率计算方法研究

赵 波,薛美东,葛晓慧,徐玮麟
(浙江省电力试验研究院,杭州 310014)

Research on Calculating Methods of Output Power of the Photovoltaic System

ZHAO Bo, XUE Mei-dong, GE Xiao-hui, XU Wei-wei

(Zhejiang Electric Power Test and Research Institute, Hangzhou 310014, Zhejiang Province, China)

ABSTRACT: Accurate calculation of output power of the photovoltaic system is critical to the photovoltaic system energy management and satisfactory coordination between the photovoltaic system and electricity control & dispatch as well as the power load. The current study develops a calculating method for the photovoltaic system output power based on the structure and working principle of the photovoltaic system, by which the output power can be computed at any solar irradiation level, ambient temperature, parameters of the photovoltaic module. By comparing the calculated data with the authentic operating data of PV station, the suitability and accuracy of this calculating method is demonstrated.

KEY WORDS: photovoltaic; output power; energy yield forecasting

摘要:准确计算光伏发电系统的输出功率,对光伏发电系统发电量的监管和光伏并网系统与电网调度、电力负荷等的配合问题具有重大意义。根据光伏发电系统的结构和工作原理,提出了光伏发电系统输出功率计算方法,可以计算任意太阳辐射量、环境温度、系统结构下的光伏发电系统输出功率。通过与真实光伏电站运行数据的比对,结果显示了光伏发电系统输出功率计算方法的适用性与准确性。

关键词:光伏发电;输出功率;发电量预测

0 引言

太阳能是一种清洁、绿色、可持续利用的新能源,光伏发电(PV)是太阳能利用的主要形式。目前,太阳能光伏发电正从小容量独立户用系统向大容量并网电站发展,将对电网产生不容忽视的影响。一方面,大量光伏发电系统并网运行使得配电网负荷的增长情况难于准确预测,从而影响系统的调度和机组出力的计划。准确计算光伏发电系统输出功率,有

助于了解大规模光伏并网系统的发电运行特性以及电网调度、电力负荷等的配合问题,可以有效减轻光伏并网发电对电网的影响。另一方面,准确计算光伏发电系统输出功率能够较好的监管光伏发电系统的发电量。2009年,首个并网光伏电站招标示范工程——敦煌项目确定的光伏电价是1.09元/kW·h,比现行电价高出2/3,而且专家认为实际的光伏电价将比1.09元的“标杆电价”略高。准确的计算光伏发电系统输出功率能够有效防止不法之徒将市电储存在储能装置中,然后以光伏电价售出来赚取差额电价的窃电行为。

传统的光伏系统输出功率计算方法忽略了系统各部分的特性,将光伏电池、逆变器等组成部分全部拟合为相应的转换效率,模型的准确度有限。SAM等国外软件采用了详细的太阳辐射量模型和光伏模块模型^[1-2],可以准确仿真光伏系统的输出特性,但软件侧重于光伏系统规划,应用在输出功率计算实用性差。一方面,构建模型所需参数过于复杂,难以获得;另一方面,输入的太阳辐射量等气象数据文件格式固定,导入实测的气象数据困难。

通过分析光伏发电系统的结构和工作原理,本文提出了光伏发电系统输出功率计算方法,包括太阳辐射量模型、光伏发电系统模型2部分,在保证输出功率计算准确性的同时,降低输入数据的要求、简化模型参数,提高了计算方法的实用性。最后通过光伏电站的数据对本文提出的算法进行验证。

1 太阳辐射量模型

太阳辐射量有多种测量方式,根据测量方式不同,太阳辐射量数据分为水平面数据和倾斜面数据,

常规的气象数据是水平面数据,需要通过倾斜面辐射计算模型转换为倾斜面数据才能用于计算光伏发电系统的输出功率。根据数据的详细程度,太阳辐射量数据可能只包含太阳总辐射1种数据或者太阳总辐射和散射辐射2种数据,而已有的倾斜面辐射计算模型至少需要上述3种数据中的2种,所以对于只包含太阳总辐射的气象数据,需要通过散射辐射拟合模型计算太阳总辐射中的散射成分。

1.1 倾斜面辐射计算模型

倾斜面太阳辐射量由3部分组成:直接辐射、散射辐射和反射辐射^[3],

$$G = G_b R_b + G_d R_d + \rho G_h R_g \quad (1)$$

$$R_b = [(\cos \varphi \cos \beta + \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma) \cos \delta \cos \omega + (\sin \varphi \cos \beta - \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma) \sin \delta + \sin \beta \sin \gamma \cos \delta \sin \omega] \div \cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta$$

$$R_d = K_t R_b + \frac{1}{2} (1 - K_t) (1 + \cos \beta)$$

$$R_g = K_t R_b + \frac{1}{2} (1 - K_t) (1 + \cos \beta)$$

式中, G_b 、 G_d 、 G_h 分别为水平面的直接辐射、散射辐射和总辐射; ρ 为地面的反射系数; R_b 、 R_d 、 R_g 分别为相应的倾斜面与水平面的比例系数; φ 为太阳入射角,太阳光线和倾斜面法线的夹角; β 为倾角,水平面和倾斜面的夹角; γ 为方向角,倾斜面法线和正南方向的夹角,正南为0°,向西为正,向东为负; μ 为纬度,北半球为正,南半球为负; ω 为时角,1h=15°,正午为0°,上午为负,下午为正; δ 为太阳赤纬角; K_t 为散射辐射透过率,等于 G_d / G_0 ; G_0 为大气上界太阳辐射。

由于大气上界几乎没有干扰,可以通过对太阳常数 E_0 的入射角修正得到大气上界太阳辐射。

$$G_0 = E_0 [1 + 0.033 \cos(0.017 202 n)] \sin \alpha \quad (2)$$

世界气象组织(WMO)1981年的太阳常数 E_0 的推荐值是1 367 W/m², n 代表一年中的第 n 天。

1.2 散射辐射拟合模型

在式(1)中水平面太阳总辐射 G_h 、直接辐射 G_b 和散射辐射 G_d 是未知变量,并且满足 $G_h = G_b + G_d$,所以在计算倾斜面太阳辐射量 G 时至少需要太阳总辐射、直接辐射和散射辐射3组数据中的2组数据。通常情况下散射辐射量是不可知的,需要通过已有的水平面太阳总辐射数据拟合散射辐射数据。

常用的方法是通过实测数据拟合大气透过率 K 和散射比 f 的关系曲线,包括分段模型和分层模型2种,但无论是分段模型还是分层模型都需要通过大量的气象数据拟合公式中的待定系数,这与气象数据不全的实际情况产生了矛盾。虽然模型是通过个别地区的气象数据得到的,但仿真结果相似^[4],文献[4]还通过地中海地区的数据进行了验证。因此,可以根据纬度等地理因素选择可用的散射辐射拟合模型。

分段模型考虑不同的天气情况对散射辐射量的影响,根据大气透过率 K 的数值将天气分为阴(全部被云覆盖)、多云(部分被云覆盖)和晴3种情况,将 K/f 曲线拟合为2段直线和1段高阶的多项式曲线。

$$\begin{aligned} f &= a_0 + a_1 K & K \leq K_b \\ f &= b_0 + b_1 K + b_2 K^2 + b_3 K^3 + b_4 K^4 & K_b < K \leq K_c \\ f &= c_0 & K > K_c \end{aligned} \quad (3)$$

式中,大气透过率 $K = G_b / G_0$,散射比 $f = G_d / G_h$ 。

Orgill和Hollands根据加拿大多伦多4 a的气象数据建立了高纬度模型,Erbs根据美国北纬31°到北纬42°之间5个监测站的数据建立了中纬度模型,De Miguel根据地中海地区11个国家的数据建立了低纬度模型,具体参数如表1。

对比不同纬度的3个模型,2段直线的参数基本

表1 散射辐射分段拟合模型对比

模型	a_0	a_1	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	c_0	K_b	K_c
Orgill&Hollands	1.0	-0.249	1.577 0	-1.840 0	-	-	-	0.177	0.35	0.75
Erbs	1.0	-0.090	0.951 1	-0.160 4	4.388	-16.638	12.336	0.165	0.22	0.80
De Miguel (CLIMED2)	0.995	-0.081	0.724 0	2.738 0	-8.320	4.967	-	0.180	0.21	0.76

一致,尤其是中、低纬度模型,由于 K 的区间划分相近,参数 a 和 c 也相近,高阶多项式曲线的阶数决定了模型的复杂程度以及和实测数据的相似度。学者普遍认为,虽然高、中、低纬度的散射辐射拟合模型适用性,计算中可以根据地区纬度信息选择相应的散

射辐射拟合模型。

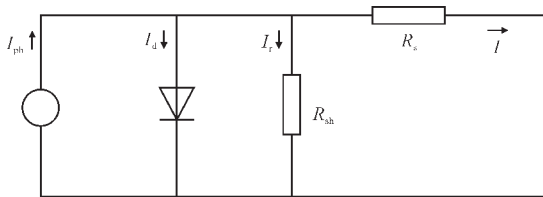
2 光伏系统数学模型

典型的光伏发电系统是由光伏阵列、电力电子

变换器、电缆、储能元件、负载等构成。从功率流动的角度分析,光伏发电系统的输出功率来源于光伏电池,其输出电压和电流呈非线性关系,并且受太阳辐射量和温度的影响,输出功率会发生变化,实际效率大约为10%~18%;在功率传输过程中,部分能量还会消耗在逆变器和线路上^[5]。因此,通过建立光伏电池模型和逆变器模型可以模拟功率在光伏发电系统中的传递过程,计算光伏发电系统的输出功率。

2.1 光伏电池模型

在一定的太阳辐射量和温度下,光伏电池的输出功率存在唯一的功率最大点,称为最大功率点(maximum power point, MPP)。为了有效的利用太阳能,在实际应用中光伏电池始终工作在最大功率点附近,所以光伏电池模型就是根据光伏电池的输出



特性计算最大输出功率。

图1 光伏电池等效电路图

光伏电池的输出特性用非线性的输出电流和电压曲线($I-V$ 曲线)表示,其关系是由固体物理理论推导出来的,等效电路如图1。代表光生电流的恒流源 I_{ph} 和电池内部的半导体节并联构成理想的电路模型。为了达到工程分析的精度要求,增加了并联电阻 R_{sh} 和串联电阻 R_s 。 R_{sh} 模拟由于表面玷污、晶体缺陷等产生的漏电流。 R_s 代表扩散顶区的表面电阻、电池的体电阻、上下电极与光伏电池间的欧姆电阻及金属导体电阻。由等效电路推知,光伏电池的输出电流为

$$I = I_{ph} - I_d - I_r \quad (4)$$

式中, $I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} [I_{sc} + C_T (T - T_{ref})]$

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

$$I_0 = I_{d0} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left[\frac{qE_g}{k} \left(\frac{1}{R_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right]$$

$$I_r = \frac{(U - IR_s)}{R_{sh}}$$

式中, G 、 T 为实际的太阳辐射量和温度; G_{ref} 、 T_{ref} 为参考的太阳辐射量和温度,标准状态为1 000 W/m²、298 K; I_{sc} 为短路电流; C_T 为温度系数,通常可取2.3 mA/°C,或参见光伏板产品说明书; q 为电子电量,1.602 e⁻¹⁹ C; k 为波尔兹曼常数,1.381 e⁻²³ J/K; E_g 为能带系能量,通常取1.12 eV; n 为二极管排放系数,近似等于1.3; N_{sc} 、 N_{sc} 是串联的光伏电池模块数量; I_{d0} 为二极管反向电流; R_s 为串联电阻; R_{sh} 为并联电阻。

I_{ph} 是光生电流,随太阳辐射量和温度变化; I_d 是流过二极管的电流; I_0 是二极管反向饱和电流,受温度影响; I_r 是漏电流。未知常量可以通过光伏电池技术参数,标准状态下短路电流、开路电压以及最大功率点电流和电压求得。

基于上述数学模型本文在Matlab环境下利用simulink工具建立了光伏阵列的通用仿真模块。太阳辐射量、温度、输出电压作为输入量,可以仿真不同输出电压下输出电流、输出功率特性,也可以计算不同太阳辐射量、温度下光伏阵列的最大输出功率。

2.2 逆变器模型

逆变器是光伏发电系统必不可少的一部分,它不仅能将光伏阵列产生的直流电能转换为交流电能,还具有自动稳压功能,可以改善光伏发电系统的供电质量。虽然逆变器结构复杂,但是输出功率计算与逆变器的拓扑结构和逆变原理关系较小,主要取决于逆变器输入和输出功率的关系,即转换效率。通过拟合逆变器的效率曲线计算给定输入功率下的输出功率。配合光伏电池模型,在Matlab中编写了基于最小二乘法的逆变器效率曲线拟合程序。

3 计算实例

以某一60 kW并网运行光伏电站为例,选取2009年4、5、9和10月份的气象数据和输出功率数据对本文提出的光伏发电系统模型和输出功率计算方法进行验证。

3.1 光伏系统描述

该光伏电站位于浙江省杭州市,地处北纬30.1°东经131°,全年日照小时数为1 400~2 200 h,太阳辐射能力约为1 280 kW·h/m²。60 kW光伏电站由338块175 Wp光伏电池、1台30 kW变压器型三相逆变器、3台6 kW带高频隔离变压器型单相逆变器和3

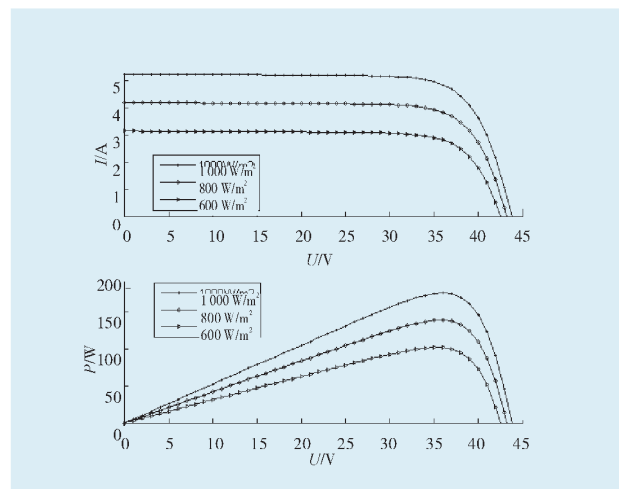
台5 kW单相逆变器组成。光伏电站于2009年3月1日成功并网投入试运行,其间由于实验、调试等原因导致系统停运,可用数据215 d,其中以4、5、9和10月份数据最完整。同时,4、5、9和10月分别处于春夏、秋冬之交,天气情况良好,具备代表性。

3.2 光伏系统模型仿真

光伏电池采用宁波太阳能电源有限公司TDB 125×125-72-P型号,建模所需技术参数及仿真效果见表2、图2;逆变器采用合肥阳光电源有限公司SG30K3型号、SG6K-C型号和Xantrex公司的GT5.0

表2 光伏电池输出特性

项 目	光伏电池实际技术参数	仿真结果
短路电流/A	5.26	5.259 6
开路电压/V	43.8	43.823 9
最大功率/W	175	175.049 9
最大功率点电流/A	4.95	4.862 5
最大功率点电压/V	35.4	36.000 0



SP型号,SG30K3的转换效率和仿真效果见表3、图3。

表3 逆变器效率曲线拟合结果对比

输入功率/W	逆变器实际转换效率/%	拟合结果/%
1e-6	0	0.000 0
3.39	88.5	88.485 0
6.45	93.0	93.091 3
9.53	46.85	48.10
1	94.4	94.270 6
15.87	94.5	94.562 9
31.97	94.0	93.990 2

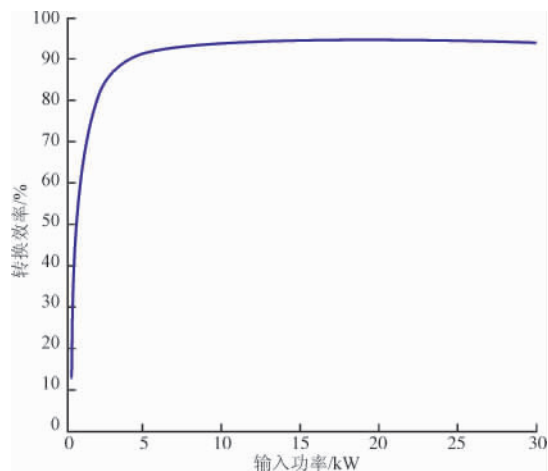
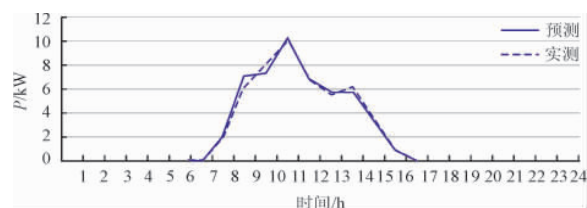


图2 太阳辐射量变化时太阳电池的仿真结果(T=298K)

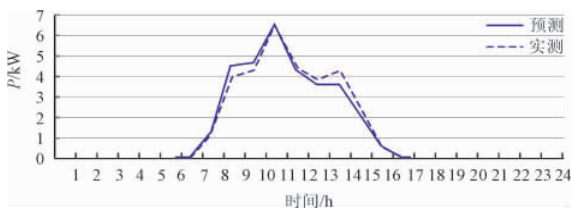
图3 逆变器效率拟合曲线

3.3 光伏系统输出功率计算

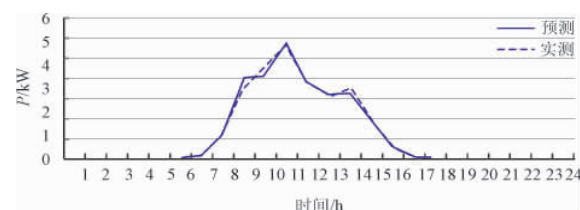
在系统输出功率仿真中,系统按照逆变器划分



为30 kW、3×6 kW和3×5 kW3个子系统。



(a) 30 kW三相系统输出功率对比



(b) 3x6 kW单相系统输出功率对比

(c) 3x5 kW单相系统输出功率对比

图4 60kW光伏系统输出功率对比

图4是30 kW三相系统、3×6 kW单相系统和3×5 kW单相系统2009年9月26日24 h系统输出功率计算值和实测值的对比图。从图中可知,误差最大点出现在9时,此时刻3个系统的误差分别为16.2%、15.7%、15.7%,其余时刻误差均在10%以下,整体误

差（误差绝对值的几何平均）分别为3.5%、7.2%、5.1%。说明本文提出光伏系统的输出功率计算方法，在不同系统组成、不同安装容量下计算结果的准确性。

3.4 光伏系统发电量预测

根据光伏系统每小时的输出功率值还可以近似

计算系统的发电量，用于光伏发电系统发电量的监管，所以本文提出的光伏发电系统输出功率计算方法还可以实现光伏发电系统发电量的预测。

表4列出了30 kW三相系统、3× 6 kW单相系统和3× 5 kW单相系统的发电量仿真结果。月发电量误差在10%以下，4、5和9月误差更是在5%以内，说

表4 3种系统月发电量仿真结果对比

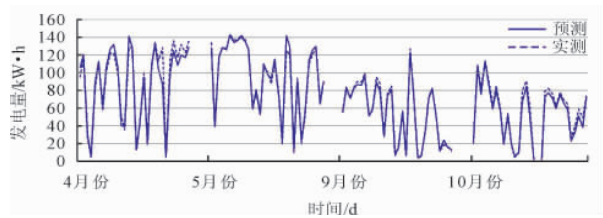
类 别	月份	实测发电量 (kW·h)	预测发电量 (kW·h)	月误差/%	日平均发电量 (kW·h)	日平均偏差 (kW·h)	日误差%算 术平均
30 kW 三相系统	4月	2 703.54	2 663.21	-1.49	95.11	1.98	9.54
	5月	2 997.74	3 054.85	1.90	109.10	1.38	5.00
	9月	1 654.54	1 623.93	-1.85	58.00	1.16	6.74
	10月	1 733.64	1 615.52	-6.81	57.70	1.70	8.96
3×6 kW 单相系统	4月	1 779.92	1 694.36	-4.81	60.51	1.52	8.98
	5月	1 972.84	1 943.56	-1.48	69.41	1.26	4.67
	9月	1 066.80	1 033.88	-3.09	36.92	1.24	7.04
	10月	1 124.34	1 028.16	-8.55	36.72	1.68	11.83
3×5 kW 单相系统	4月	1 241.77	1 294.65	-4.08	44.35	1.31	8.40
	5月	1 424.68	1 447.15	-1.55	50.88	1.10	4.75
	9月	752.45	785.91	-4.26	26.87	0.95	6.12
	10月	749.59	823.48	-8.97	26.77	1.37	10.09

明了模型在长期发电量预测上的准确性。

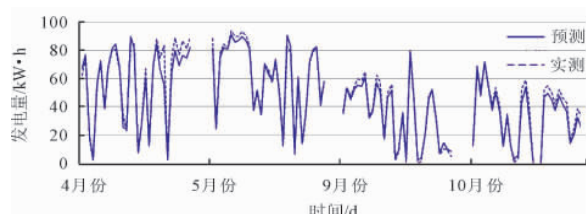
从表4可以看出，发电量越大，月误差越小，这是由模型的误差导致的，误差主要来自光伏电池模型和逆变器模型。首先，光伏电池模型的参数由标准状态（1 000 W/m²、298 K）下的光伏电池技术参数求得， R_s 、 R_{sh} 是对光伏电池的漏电流的等效，其本身也是随太阳辐射量和温度的复杂函数，同样， C_T 、 E_g 等参数也是随太阳辐射量和温度改变的，只因为在一定的范围内，这种误差小到可以忽略，所以近似认为是常数且等于标准状态下的数值，但是当太阳辐射量很低时，由于发电量很低，这种误差就变得“明显”了。其次，逆变器的效率曲线是通过实际数据拟合而成，其特点是输入功率较小时效率上升的很快，仅通过2~3个点的数据无法精确的拟合效率突变的趋势，所以当输入功率较小时逆变器模型的误差很大，随着输入功率增大，效率基本稳定在90%左右，近似为一条直线，所以输入功率越大其输出功率计算越准确。因此，当太阳辐射量很低时，光伏

电池模型的误差已经不能忽略不计，同时由于发电功率很低（即逆变器的输入功率），对应逆变器的效率也存在较大误差，导致误差被放大，所以太阳辐射量越低，计算的误差越大。从光伏系统的角度看，即系统发电量越小，月误差越大。

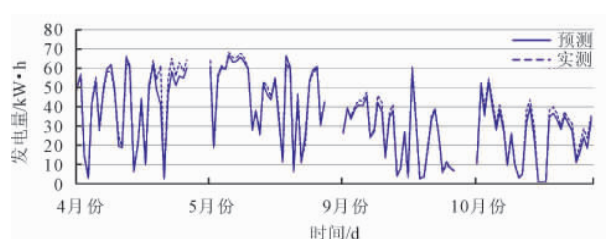
月误差只能反映整体误差水平，预测值可能比实测值高也可能比实测值低，预测值的曲线总是以实测值为中心摆动，如图5，导致正负部分相互抵消，为了反映日发电量预测的准确性，对日误差取绝对值后计算算术平均。日误差算术平均既反映了日发电量预测的平均误差水平，也反映了预测值相对实测值的摆动幅度，数据显示日误差绝大部分仍在10%以内，说明了模型在短期发电量预测上的准确性。



(a) 30 kW三相系统发电量对比



(b) 3×6 kW单相系统发电量对比



(c) 3×5 kW单相系统发电量对比

图5 60 kW光伏系统发电量对比

图5是30 kW三相系统、3×6 kW单相系统和3×5 kW单相系统4、5、9、10月份日发电量预测值和实测值的对比图,虽然个别数据点偏差较大,但整体的趋势一致,进一步说明模型在短期发电量预测上的准确性。

4 结论

本文从功率流动的角度出发,通过对光伏发电系统结构及其输入、输出特性的详细分析,构建了由倾斜面辐射计算模型、散射辐射拟合模型、光伏电池模型、逆变器模型为主要框架的光伏发电系统模型,实现不同环境条件、系统结构下的系统输出功率计算和发电量预测,并通过某真实的60 kW光伏电站实测数据进行了验证,计算结果表明本文提出的光伏发电系统模型具有以下特点。

1) 适用性强。功能方面,模型不仅可以实时计算系统输出功率,还可以预测系统的发电量;结构方面,由于建立了太阳辐射量计算模型,对于输

入的气象数据的形式、详细程度的要求降低,有利于输入数据的获取;参数方面,在光伏发电系统的建模中简化了参数要求,只需要从光伏电池产品说明中获取短路电流、开路电压以及标准状态下最大功率点电流和电压数据等数据,就可以实现对光伏发电系统的输出特性仿真。

2) 准确度高。根据模型计算,系统输出功率仿真误差在10%以下,月发电量预测的误差大部分在5%以内,日发电量预测的误差大部分在10%以内。但是,由于太阳辐射量由自然条件所决定,存在较多的不确定因素及地区差异,需要根据长期的运行效果对模型中的系数进行修正,以使计算更加准确。

参考文献

- [1] Cameron CP, Boysim WE, Riley DM. Comparison of PVSystem Performance model Predictions with Measured PV System Performance [A]. Conference Record of the 33rd IEEE[C]. Photovoltaic Specialists Conference, 2008.
- [2] Rahman S, Chowdhury B H. Simulation of Photovoltaic Power Systems and Their Performance Prediction [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1988, 3(3): 440-446.
- [3] 周芳, 胡明辅, 周国平. 铅垂面上太阳辐射计算方法探讨[J]. 太阳能研究与应用, 2007, 35(5): 55-59.
- [4] Notton G, Cristofari C, Muselli M et al. Calculation on an Hourly Basis of Solar Diffuse Irradiations from Global Data for Horizontal Surfaces in Ajaccio[J]. Energy Conversion and Management, 2004, 45(18-19): 2849-2866.
- [5] 赵争鸣, 刘建政, 孙晓瑛等. 太阳能光伏发电及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.

收稿日期 2010-03-18。

作者简介:

赵波(1977—),男,博士,高级工程师,研究方向为新能源对电网的影响,微网。

(编辑 徐花荣)