

文章编号: 0254-0096(2014) 10-2022-08

光伏并网电站仿真与决策优化软件设计

白建波¹, 曹 阳¹, 郝玉哲¹, 张 臻², 姜 猛²

(1. 河海大学常州校区机电工程学院, 常州 213022; 2. 光伏科学与技术国家重点实验室, 常州 213031)

摘 要: 针对太阳能光伏并网电站系统, 建立“太阳能辐照 + 光伏组件 + 逆变器 + 损耗”一系列数学模型, 采用编程软件实现光伏电站并网系统的仿真和决策优化设计软件。该软件主要以世界各地典型年气象数据为基础, 用以仿真获得光伏阵列表面辐照度、光伏阵列发电功率、光伏逆变器输出功率、系统总损失以及系统净输出发电参数等, 其结果能反映实际电站建成后的发电情况。

关键词: 并网光伏电站; 优化设计软件; 性能仿真; 决策优化设计

中图分类号: TK514 文献标识码: A

0 引 言

目前我国已在系统并网光伏逆变器、并网建筑一体化和大型并网荒漠电站的工程开发上取得了突破性进展^[1-2]。在光伏并网系统中, 光伏组件阵列串并联的设计、安装朝向和倾角的布置、逆变器的选配、系统线路的合理布置均会影响系统的运行, 故光伏并网系统的仿真与优化设计软件相对于光伏并网系统建设具有重要意义。目前国内光伏并网系统设计和仿真主要采用 RETScreen 和 PVsyst 等软件。20 世纪 80 年代中期, 王斯成^[3]开始对光伏电源的计算机辅助设计进行相关研究。至 20 世纪 90 年代, 国内学者^[4-6]对太阳能光伏系统的模拟进行了深入研究, 但在光伏并网系统的模拟、设计与优化决策软件方面, 目前还十分稀少, 缺乏全面设计与分析太阳能并网光伏系统的工具。

基于此, 本文设计开发了光伏系统仿真设计及决策优化软件 SIMUPV2.0, 其设计内容以世界各地典型气象数据为基础, 精确建立光伏并网系统各环节的数学模型, 模拟仿真实际系统未来的发电量和效率等情况。本文对系统的建模思路、模型校核、软件功能和应用实例进行介绍。

1 太阳能光伏并网发电系统建模

并网光伏发电系统主要由光伏组件阵列、逆变

器、传输线路和变压器部分组成(如图 1)。为了体现实际光伏并网系统的特性, 分别建立光伏组件表面太阳能辐照模型、光伏组件光电转换模型、逆变器直交流逆变模型、线路损耗部分和电气变压器损耗数学模型, 并将结合系统运行路线详述了整个仿真参数计算的运作路线(如图 2)。

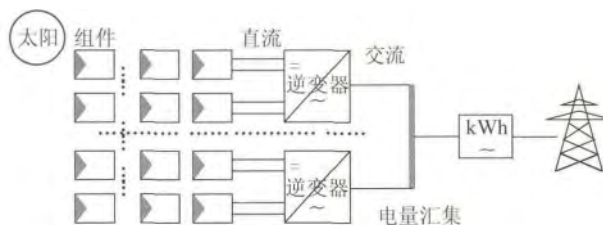


图 1 光伏并网系统主要结构简图

Fig. 1 Schematic diagram of a grid-connected PV power system



图 2 光伏并网系统系统建模参数传递图

Fig. 2 Transit diagram of model parameters for a grid-connected power PV system

收稿日期: 2013-08-01

基金项目: 江苏省自然科学基金面上项目(BK20141154); 江苏省自然科学基金(BK2011263); 河海大学优秀创新人才计划

通信作者: 白建波(1974—), 男, 博士、副教授, 主要从事太阳能光伏与可再生能源在建筑中的应用方面的研究。bai_jianbo@163.com

1.1 光伏组件表面太阳能辐照数学模型

太阳能光伏并网系统在设计过程中,需获得光伏组件接收光照的倾斜面上月平均日的辐照数据。目前用于计算倾斜面上月均辐照度的方法主要有两种,分别是文献[7]发表的基于各向同性天空算法(Isotropic Sky)和文献[8]发表的倾斜面平均辐照度计算方法(KT方法)。各向同性天空算法在计算倾斜面辐照量的过程中假设散射辐射和地面发射辐射均为各向同性,缺点是只有在一年中的太阳二分点(3月份和9月份的春分、秋分)计算值才正确;和Isotropic Sky法相比,KT方法较为复杂,但倾斜面辐照度计算更为精确。本项目采用KT方法作为计算倾斜面辐照度的数学模型,该方法可计算任意纬度、任意安装朝向、任意安装倾斜角情况下的倾斜面辐照量,其具体模型计算公式为:

$$\bar{H}_T = \bar{H}_{bT} + \bar{H}_{dT} + \bar{H}_{rT} \quad (1)$$

$$\bar{H}_T = \bar{R} \bar{H} \quad (2)$$

$$\bar{R} = D + \frac{\bar{H}_d}{H} \left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right) + \rho_g \left(\frac{1 - \cos\beta}{2} \right) \quad (3)$$

式中, \bar{H}_T ——倾斜面上的辐射量; \bar{H}_{bT} ——直射辐射量; \bar{H}_{dT} ——天空散射辐射量; \bar{H}_{rT} ——地面反射辐射量; D ——斜面直射辐射量与水平面总辐射量之比; ρ_g ——地面反射率,一般取值为0.2; β ——阵列倾角; \bar{H}_d ——水平面散射辐射量; \bar{H} ——水平面总辐射量; $\frac{\bar{H}_d}{H} \left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right)$ ——斜面散射辐射与水平面总辐射之比; $\rho_g \left(\frac{1 - \cos\beta}{2} \right)$ ——地面反射在斜面的辐射与地面总辐射之比。

本方法通过计算斜面上的辐射量与水平面辐射量之比,从而求出当月代表日的任意倾斜面及朝向上的辐照量。

如表1所示并网系统地点选为上海,光伏阵列倾角为 30° 和方位角为 20° 情况下,本软件计算结果和采用PVSYS和PV3C仿真软件计算各月辐照量的比较。可看出,本软件的计算结果和其他两个软件相比,吻合程度相当高。

1.2 太阳能光伏组件的数学模型

能精确模拟光伏阵列所接收的太阳能辐照量是光伏系统设计的有效前提,而光伏组件在不同辐照度及环境温度下的性能输出(功率、电压和电流等)的精确模拟则是系统设计的重中之重。

表1 本软件、PVSYS和PV3C光伏阵列表面辐照量比较

Table 1 Comparison of calculated radiation among the presented software PVSYS and PV3C

月份	水平面上 平均日辐射/ $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$	各月光伏阵列平面上的平均 日辐射/ $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$		
		PV3c	PVSYS	本软件
1	1.92	2.32	2.39	2.31
2	2.44	2.74	2.80	2.72
3	2.89	3.02	3.07	2.99
4	3.94	3.89	3.90	3.87
5	4.17	3.91	3.89	3.9
6	4.44	4.06	4.01	4.06
7	4.94	4.55	4.48	4.54
8	4.08	3.94	3.92	3.92
9	3.53	3.64	3.66	3.61
10	3.50	4.05	4.09	4.01
11	2.72	3.48	3.50	3.47
12	2.28	3.04	3.10	3.02

目前对于光伏组件性能输出的模拟大多采用简化的单二极管模型,而单二极管模型又可分为五参数模型^[9,10]、四参数模型^[11,12](忽略并联电阻)、三参数模型(忽略串/并联电阻)。相比较而言,五参数模型最为精确,但算法较复杂且部分模型参数无法从组件厂商获得,而三参数模型精度不够高,相比之下,四参数模型精度较高且其所需模型参数均能从组件的铭牌参数中获得,因此本软件仿真时选用四参数模型来模拟组件性能,该模型由Rauschenbach(1980)、Townsend(1989)和Eckstein(1990)分别加以开发和完善^[11,13]。

1.2.1 太阳能光伏组件四参数模型

图3为光伏组件输出特性等效电路图,在一定的环境温度和太阳辐射度下,电流-电压特征(即I-V曲线)关系可由式(4)给出,从而得到组件的输出功率。

$$\begin{aligned} I &= I_L - I_D - I_{sh} \\ &= I_L - I_0 \left\{ \exp \frac{V + IR_s}{a} - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \end{aligned} \quad (4)$$

式中, I ——光伏组件输出电流,A; V ——光伏组件输出电压,V; I_L ——光生电流,A; I_0 ——二极管反向饱和电流,A; R_s ——串联电阻, Ω ; R_{sh} ——并联电阻, Ω ; a ——曲线拟合参数。

$$P = IV \quad (5)$$

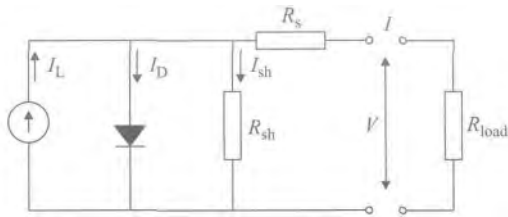


图 3 光伏组件等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit diagram for a PV module

光伏组件电流与电压的关系见图 4,最大功率可由 $I-V$ 曲线下方长方形的最大面积获得,最大功率点功率为 P_{mp} , 电流为 I_{mp} , 电压为 V_{mp} 。理想情况下, 电池应在最大功率点工作。为了获取到四参数模型中 I_L, I_0, R_s 和 a 这 4 个参数 (R_{sh} 参数假设无穷大), 必须计算出组件的温度, 而在不同环境温度和辐照度情况下的组件温度不同。组件铭牌参数通常提供标称工作温度, 即组件在太阳辐照度为 800 W/m^2 、风速 1 m/s 、环境温度 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 和处于开路状态下的运行温度。可进一步根据式 (6) 和式 (7) 计算获得任意条件下的组件温度。

$$\tau\alpha/U_L = (T_{c, \text{NOCT}} - T_a)/G_{T, \text{NOCT}} \quad (6)$$

$$T_c = T_a + (G_T\tau\alpha/U_L)(1 - \eta_c/\tau\alpha) \quad (7)$$

式中, τ ——遮挡物的透射比; α ——入射光线的吸收比; U_L ——热量损失系数; $T_{c, \text{NOCT}}$ ——标况标称温度 K ; T_a ——环境温度 K ; $G_{T, \text{NOCT}}$ ——组件标称情况下辐照度 800 W/m^2 ; G_T ——太阳辐照度 W/m^2 ; T_c ——组件温度 K ; η_c ——光伏组件实际效率。

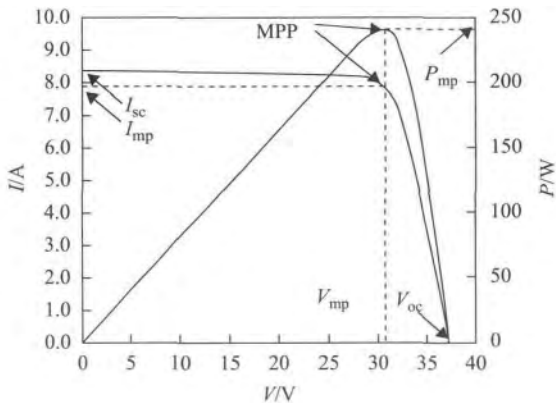


图 4 光伏组件典型的 $I-V$ 曲线和 $P-V$ 曲线

Fig. 4 Typical $I-V$ and $P-V$ curves for a PV module

此外, 本软件所采用的四参数模型在计算过程中首先求出参考条件下 (辐照度为 1000 W/m^2 , 电池温度为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$, 大气质量 AM1.5) 的 4 个参数, 其后计算不同辐照度或环境温度下的电池温度,

进而根据温度与 4 个电学参数, 计算获得不同辐照度或环境温度情况下的电压和电流之间的关系。

1.2.2 组件性能 $I-V$ 曲线仿真与实验结果对比

为了验证模型的准确度, 将某组件模拟值与实验数据进行对比。某 200 W 组件提供的铭牌性能参数为: 峰值功率 200 W , 最大功率点电压 26.3 V , 最大功率点电流 7.6 A , 开路电压 33.3 V , 短路电流 8.22 A , 短路电流温度因子 0.0006 K^{-1} , 开路电压温度因子为 -0.0037 K^{-1} 标况条件下的组件温度 $46 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

图 5 所示为生产厂商提供的 $I-V$ 性能曲线与采用四参数模型模拟的 $I-V$ 性能曲线对比, 可以看出, 在辐照度较高时, 模型精度很高, 模拟曲线与实际值吻合良好, 在辐照度较低时, 模拟值略高于实际值。但模拟值已能较好地反映光伏组件的输出特性。

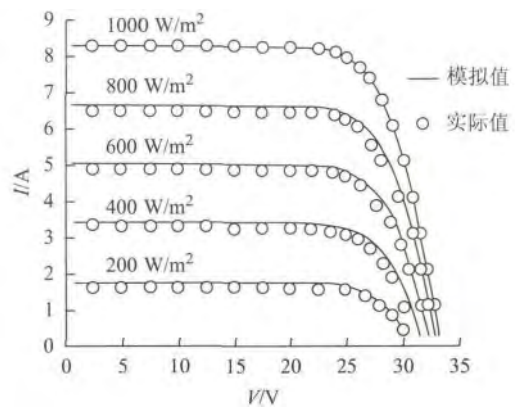


图 5 200 W 组件模拟 $I-V$ 曲线与实际值的比较

Fig. 5 Comparison between simulation data with experimental data from the 200 W module

1.3 逆变器的数学模型

在光伏并网系统中, 逆变器将直流电转换为交流电, 其转换效率直接影响系统的发电量。逆变器输出功率和效率与输入功率及输入电压密切相关, 且呈非线性特性。目前对于逆变器的性能模拟方法主要有两种: 其一为曲线拟合的方式 (如 PVSYS), 根据厂商提供的性能曲线, 提供输入功率和输出功率之间的拟合关系, 由于未考虑输入电压对输出功率的影响, 其精度受到一定影响; 另外一种逆变器数学模型是由 P. H. Laukamp 于 1988 年提出的^[14], 该模型除需输入功率外, 还需提供输入电压和输出电压的设定值, 适用于逆变器的性能瞬态模拟^[14]。

本文采用美国 Sandia 国家实验室的经验公式模型^[15],该模型具有较高的精确度,模型参数可由厂商铭牌参数表中得知。输出功率计算算法为:

$$P_{ac} = \left[\frac{P_{aco}}{(A - B)} - C \times (A - B) \right] \times (P_{dc} - B) + C(P_{dc} - B)^2 \quad (8)$$

$$A = P_{dco} [1 + C_1(V_{dc} - V_{dco})] \quad (9)$$

$$B = P_{so} [1 + C_2(V_{dc} - V_{dco})] \quad (10)$$

$$C = C_0 [1 + C_3(V_{dc} - V_{dco})] \quad (11)$$

逆变器效率为:

$$\eta = \frac{P_{ac}}{P_{dc}} \quad (12)$$

式中 P_{ac} ——逆变器交流输出功率, W; P_{aco} ——最大输出交流功率, W; P_{dc} ——输入直流功率, W; V_{dc} ——直流输入电压, V; P_{dco} ——逆变器在交流功率达到标称状况下的直流功率, W; V_{dco} ——逆变器在交流功率达到标称状况下的直流电压,一般取 $(V_{max} + V_{min}) / 2$, V; P_{so} ——逆变器启动直流功率,即逆变器自损耗直流功率, W; C_0, C_1, C_2, C_3 ——模型经验系数,通常情况下可设为零,为了提高模型的精度,可进一步通过实验来获取 4 个参数,其精度可达 0.1%。

现以 Fronius IG 3000 并网逆变器为例,具体参数为:交流电压 240 V,交流功率 2700 W,直流功率 2879 W,直流电压 277 V,启动功率 27.9 W, C_0 为 $-1.009 \times 10^{-5} \text{ W}^{-1}$, C_1 为 $-1.367 \times 10^{-5} \text{ W}^{-1}$, C_2 为 $-3.587 \times 10^{-5} \text{ W}^{-1}$, C_3 为 $-3.421 \times 10^{-3} \text{ W}^{-1}$ 。图 6 所示为经验系数为零和不为零时的逆变器性能模拟曲线对比,由图 6 可看出,该模型即使在采用经验系数为零时,已有较高精确度。

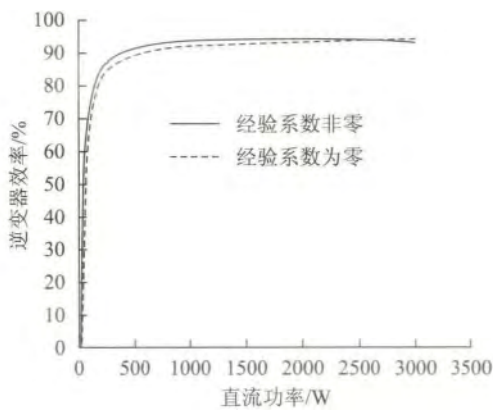


图 6 逆变器经验系数分别为零和非零时的性能曲线

Fig. 6 Performance curves about inverter empirical coefficients between zero and non-zero

1.4 线路部分损失数学模型

光伏组件阵列系统发出来的直流电能,通过直流线缆传输到逆变器,由后者逆变后转为交流电通过交流线缆传送到电网。在直流输送和交流输送环节中,电能在线路中输送有一部分损耗,线缆中传输时的损失功率可采用:

$$\Delta P = I^2 R \quad (13)$$

式中 I ——线缆中传输电流, A; R ——线缆电阻, Ω 。

1.5 并网变压器的损耗模型

光伏电站系统直流电经光伏逆变器转变为交流电后,通过交流配电系统后再经变压器变压汇入公用配电网或者输电网。变压器的损耗计算包括有功损耗 ΔP 和无功损耗 ΔQ 两部分,并可进而计算出变压器综合功率损耗^[16],该模型所需参数可通过变压器的铭牌参数和经验参数获得。

2 光伏并网系统模拟与决策优化设计软件的设计与开发

本项目采用面向对象编程软件开发本系统,为光伏并网系统设计者提供可行性研究参考和优化设计工具。

2.1 流程设计

本项目软件主体流程设计如图 7。

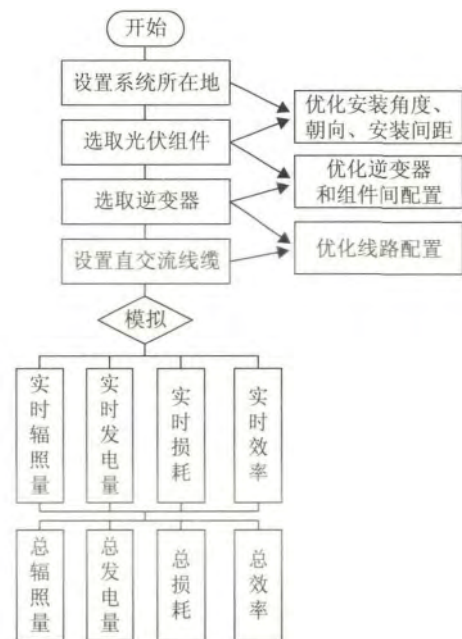


图 7 本项目的软件设计流程

Fig. 7 The design process of the software

2.2 功能设计

本项目主要包括以下几部分功能:

- 1) 光伏电站系统的设计(不同电站地点、不同光伏组件、不同光伏逆变器等);
- 2) 光伏组件在不同辐照度及不同温度下的 $I-V$ 性能曲线及最佳功率点的获取;
- 3) 由气象数据库中水平面每月平均日辐射量和计算光伏阵列倾斜面上的每月平均日辐射量;
- 4) 光伏逆变器在不同输入参数(电流、电压和功率)下的实时运行效率;
- 5) 仿真计算光伏并网系统的各月发电量和年累积发电量;
- 6) 实现对并网光伏系统发电功率的逐时模拟;
- 7) 实现光伏并网系统的软件自主设计及优化匹配;
- 8) 预估未来并网光伏电站发电量及变化趋势。

2.3 决策与优化功能

2.3.1 安装角度及朝向的优化

在实际应用中,光伏阵列大多是固定倾斜角安装,其安装朝向及角度决定了阵列所能接收到的辐照度值,软件可根据所选光伏阵列的地理位置及其气象参数,合理地布置阵列的安装朝向及倾角使阵列在全年中得到最大的太阳辐射量。

2.3.2 逆变器及组件合理配置

逆变器的效率随输入直流电压及直流功率的改变而改变,合理地匹配输入与所选逆变器的关系,可增加整个系统的输出效率。软件提供以下 2 种方式供选择,以提高整体输出效率:

- 1) 逆变器匹配组件,在已知组件的型号、数量及串并联方式来选择合理的逆变器型号;
- 2) 组件匹配逆变器,即已知逆变器的型号及阵列容量来选择合适的组件型号及串并联方式。

2.3.3 优化组件间距

在系统设计完成后,需计算阵列所需空间,而阵列朝向方向前后排的距离计算是关键。若距离太近,则所需空间较小,但前排会在一定时间段对后排造成阴影影响,导致阵列的出现失配;若距离太远,所需空间较大,在土地资源极其紧缺的今天同样是不可取的。软件可根据合理的计算得出最佳距离或可根据给定空间给出最大的输出情况下的系统容量及其布置方式。

2.3.4 预估光伏系统未来发电量

本设计软件在仿真光伏电站发电量时,采用典型气象年(Typical Meteorological Year, TMY)作为预测未来发电量的气象数据。典型气象年是以近 30 年的月平均值为依据,从近 10 年的资料中选取一年中各月份接近 30 年的平均值作为典型气象年的气象数据。因此采用典型气象年气象数据用于预估光伏电站发电量具有较高的可信度,同时也是其他类型太阳能应用仿真系统的常用做法。

另外本文将光伏组件在寿命周期内的功率衰减及线路损耗的性能衰减作为影响电站未来运行期间发电量的重要因素。目前大多数组件厂商均提供光伏组件在组件寿命周期内的衰减比例。在预测未来发电量时,仿真模型考虑组件每年功率衰减对阵列输出直流部分的影响及线路损耗的衰减部分,进而影响逆变器工作状态点和线路及变压器损耗,从而预测出未来发电量的变化趋势。根据已运行多年的光伏系统发电情况的实测,此种预估方法具有较高的精确度,适合用于预测未来光伏电站的性能衰减。

3 项目仿真实例

3.1 优化仿真实例

本仿真系统对安装在江苏常州的容量为 30 kW 并网系统进行全年发电量仿真计算。光伏电站配置为:额定功率 30 kW,采用天合光能公司 TSM-230PC05 型号组件 130 块,组件标称功率输出为 230 W,组件 26(串联)×5(并联)组成光伏阵列;逆变器选择 SMA 公司的 Sunny 6000US,其最大允许功率输入为 42.5 kW。

表 2 为阵列倾角为 30° ,朝向为正南(阵列方位角 0°)时,阵列面所获得的月辐照量和发电量。在该安装倾斜角和朝向情况下,各排阵列之间最佳间距为 1.27 m。与本软件的优化功能计算后对比,常州地区的最优安装倾角为 27° ,朝向正南,此时各排阵列之间最佳间距为 1.16 m。表 3 为在最优安装角和朝向情况下的月辐照量和发电量,分析表 2 和表 3 的数据可知,每月的光伏阵列面辐射量有增有减,优化后的平均每月的辐照量增加了 0.11 kWh/m^2 ,整个系统的年发电量增加了 1.6%。

表 2 光伏阵列辐照量及发电量仿真结果(倾角为 30° 朝向正南)

Table 2 Simulation results of radiation and generation power for the PV array(tilted 30° South)

月份	水平面各月 日均辐射量/ $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$	水平面各月 总辐射量/ $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}$	阵列面各月 日均辐射量/ $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$	阵列面各月 总辐射量/ $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}$	日平均 发电量/ kWh	月总 发电量/ MWh
1	2.74	84.94	3.75	116.13	92.17	2.86
2	3.12	87.36	3.72	104.13	92.29	2.58
3	3.32	102.92	3.53	109.45	85.47	2.65
4	4.15	124.50	4.10	123.02	103.50	3.10
5	4.72	146.32	4.40	136.80	114.04	3.54
6	4.60	138.00	4.19	125.82	106.32	3.19
7	5.02	155.62	4.61	142.80	118.11	3.66
8	4.67	144.77	4.51	139.67	112.62	3.49
9	3.96	118.80	4.12	123.73	99.49	2.98
10	3.40	105.40	3.94	122.05	94.80	2.94
11	2.85	85.50	3.77	113.23	89.69	2.69
12	2.69	83.39	3.86	119.59	96.61	2.99
月平均	3.77	114.79	4.04	123.01	100.50	3.06

表 3 最优情况下阵列辐照量及发电量仿真结果

Table 3 Simulation results of radiation and generation power for the PV array with optimization

月份	水平面各月 日均辐射量/ $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$	水平面各月 总辐射量/ $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}$	阵列面各月 日均辐射量/ $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$	阵列面各月 总辐射量/ $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}$	日平均 发电量/ kWh	月总 发电量/ MWh
1	2.74	84.94	3.68	113.94	93.17	2.89
2	3.12	87.36	3.69	103.24	93.54	2.62
3	3.32	102.92	3.53	109.57	86.77	2.69
4	4.15	124.50	4.14	124.07	105.42	3.16
5	4.72	146.32	4.47	138.51	116.54	3.61
6	4.60	138.00	4.27	127.96	108.58	3.26
7	5.02	155.62	4.68	145.17	120.98	3.75
8	4.67	144.77	4.56	141.24	115.98	3.57
9	3.96	118.80	4.14	124.15	101.27	3.04
10	3.40	105.40	3.91	121.31	96.21	2.98
11	2.85	85.50	3.71	111.36	90.77	2.72
12	2.69	83.39	3.77	116.94	97.45	3.02
月平均	3.77	114.79	4.05	123.12	102.23	3.11

3.2 实际电站实例

为了验证该软件仿真的精度,选取河海大学常州校区已建成的小型屋顶光伏并网系统为研究对象,在实时监测水平面辐照度和环境温度的基础上,对该电站实时发电量进行预测并将其和实际测量结果进行比较。该小型光伏并网系统基本情况为:安装地点为江苏常州;装机容量为 2.4 kW,由 10 块型号为 TSM-240PC05(标准测试条件下的最大输出功率为 240 W)多晶硅组成,阵列安装倾角为 27° ,方位角为 0° (正南);5 块组件串联为 1 个阵列共分成 2 个阵列,通过直流汇流箱分别接入 2 个 EVERSOL-TL2000AS 光伏逆变器中,该逆变器的最大允许直流输入功率为 2.3 kW,最大的交流输出功率为 2 kW;逆变器输出的交流电通过交流线路流入交流配电箱,最后汇入单相 220 V 配电网中。

选取其中一个阵列的发电性能进行预测值和实测值的比较,图 8 为 2013 年 11 月 18 日 08:00 ~ 15:30 该小型光伏阵列预测输出功率和实测输出功率的曲线变化情况。可看出仿真值与实测值吻合度很高,另外输出功率变化趋势和当天辐照度的变化趋势也保持较高的一致性。经过进一步的计算,其当天的累计发电量的误差为 1.9%,因此本软件用于预测实时发电量具有较高的精确度。

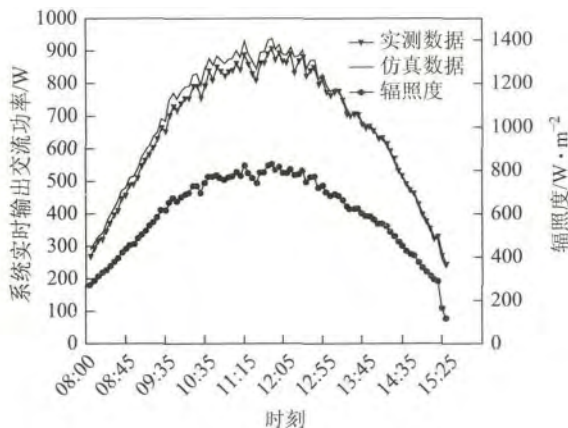


图 8 光伏阵列预测输出功率与实测数据比较及辐照度变化图

Fig. 8 Comparison of the generation output between the prediction and measured data and variation of solar irradiance

4 结 论

本项目开发的光伏并网电站仿真与决策优化设

计软件可实现对并网光伏发电整个系统的全方位的设计、仿真模拟与优化决策,并可针对组件太阳能辐照、光伏组件、逆变器等单独模拟,模型精度高,能达到高精度仿真的要求。

[参考文献]

- [1] 王斯成. 国内外光伏发电现状及趋势[J]. 中国电力发展与改革研究, 2009, (12): 22—25.
- [2] 赵春江, 杨金焕. 太阳能光伏发电应用的现状及发展[J]. 节能技术, 2007, 25(5): 461—465.
- [2] Zhao Chunjiang, Yang Jinhuan. State & development of photovoltaic application [J]. Energy Conservation Technology, 2007, 25(5): 461—465.
- [3] 王斯成. 光伏电源系统的计算机辅助设计[J]. 太阳能学报, 1986, 7(3): 251—164.
- [3] Wang Sicheng. Computer Aided Design for the Photovoltaic Power Systems [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 1986, 7(3): 251—164.
- [4] 杨金焕. 固定式光伏方阵最佳倾角的分析[J]. 太阳能学报, 1992, 13(1): 86—92.
- [4] Yang Jinhuan. Analysis of optimum tilted angle for fixed photovoltaic arrays [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 1992, 13(1): 86—92.
- [5] 杨金焕, 葛 亮. 太阳辐射量与光伏系统优化设计软件[J]. 中国建设动态: 阳光能源, 2005, (12): 34—36.
- [5] Yang Jinhuan, Ge Liang. Solar radiation and software of optimum sizing of photovoltaic systems [J]. China Construction News: Sun Energy, 2005, (12): 34—36.
- [6] 茆美琴, 苏建徽, 张国荣, 等. 大型光伏并网系统的建模与仿真[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2005, 28(9): 1069—1072.
- [6] Mao Meiqin, Su Jianhui, Zhang Guorong, et al. Simulation of large-scale photovoltaic grid-connected systems [J]. Journal of Hefei University of Technology, 2005, 28(9): 1069—1072.
- [7] Liu B, Jordan R. Daily insolation on surfaces tilted toward the equator [J]. ASHRAE Journal, 1961, 10: 53—59.
- [8] Klein S A, Theilacker J C. An algorithm for calculating monthly-average radiation on inclined surfaces [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 1981, 103(5): 29—33.
- [9] De Soto W, Klein S A, Beckman W A. Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance

- [J]. *Solar Energy*, 2006, 80(1): 78—88.
- [10] 翟载腾, 程晓舫, 杨臧建, 等. 太阳能电池一般电流模型参数的解析解 [J]. *太阳能学报*, 2009, 30(8): 1078—1082.
- [10] Zhai Zaiteng, Cheng Xiaofang, Yang Zangjian, et al. Analytic solutions of solar cell model parameters [J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2009, 30(8): 1078—1082.
- [11] Townsend T U. A method for estimating the long-term performance of direct-coupled photovoltaic systems [D]. Madison: University of Wisconsin-Madison, 1989.
- [12] Khezzer R, Zereg M, Khezzer A. Comparative study of mathematical methods for parameters calculation of Current-Voltage characteristic of Photovoltaic module [A]. International Conference on Electrical and Electronics Engineering [C], Bursa, Turkey, 2009.
- [13] Eckstein J. Detailed modeling of photovoltaic system components [D]. Madison: University of Wisconsin-Madison, 1990.
- [14] Laukam P H. Inverter for photovoltaic systems (user-written trnsys source code) [EB/OL]. <http://sel.me.wisc.edu/trnsys/trnlib/hydrogens/hydrogens.pdf>
- [15] David L K, Gonzalez S, Galbraith G M. Performance model for grid-connected photovoltaic inverters [R]. Sandia Report SAND2007-5036, 2007.
- [16] 毛承雄, 王丹, 范澍. 电子电力变压器 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2010, 115—116.

DEVELOPMENT OF SIMULATION AND DECISION-MAKING SOFTWARE OF SOLAR PV GRID-CONNECTED POWER SYSTEM

Bai Jianbo¹, Cao Yang¹, Hao Yuzhe¹, Zhang Zhen², Jiang Meng²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China;

2. State Key Laboratory of Photovoltaic Science and Technology, Changzhou 213031, China)

Abstract: The mathematical model for solar PV grid-connected power system was presented, which included solar radiation, solar PV modules, inverters and electrical losses etc. By using programming software tools, the simulation and decision-making software for solar PV grid-connected power system was developed. Based on the world typical weather data and precise component models in the PV system, the software could simulate the solar radiation on the surface of PV modules, generation power, total losses and generation efficiency etc. It could forecast the future generation situation of PV system. The software also included functions as follows: component selection and customization, simulation of multiple operation modes, investment and analysis, environment evaluation and optimizing design.

Keywords: PV grid-connected power station; design-optimizing software; performance simulation; design-optimizing and decision-making