

并网光伏发电系统数学模型研究与分析

徐 维

(常州工学院电子信息与电气工程学院, 江苏 常州 213002)

摘要: 提出了考虑跟踪闭锁角与步进跟踪方式的自动跟踪式光伏阵列模型, 并验证该模型是准确的。运用仿真软件分析了跟踪式光伏阵列运行特性、跟踪闭锁现象及步进跟踪控制方式对光伏阵列工作特性的影响。给出了并网光伏发电系统整体模型, 验证了该模型是准确的。

关键词: 并网光伏发电系统; 数学模型; 太阳辐射

Research and analysis on the mathematic model of GCPV generation system

XU Wei

(Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213002, China)

Abstract: This paper puts forward an auto-tracking photovoltaic array model, which considers the tracker locking angle and step-track approach, and then verifies its accuracy. It uses the simulation software to analyze the characteristic of the tracking photovoltaic (PV) array and the influence to the PV array by the the tracker locking and step-track approach. In the end, it gives the system model of grid-connected photovoltaic system and validates its accuracy.

Key words: photovoltaic generation system; mathematic model; solar irradiance

中图分类号: TM74 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)10-0017-05

0 引言

并网光伏发电系统的核心元件主要有光伏阵列和并网逆变器。光伏阵列按是否跟踪太阳运动, 可分为固定式和跟踪式两种类型。依据跟踪形式的不同, 跟踪式光伏阵列主要有水平单轴跟踪、倾斜单轴跟踪和双轴跟踪等形式。光伏并网逆变器实现光伏阵列直流电向交流电的转换, 它是保证光伏发电系统输出电能质量和发电效率的核心设备之一。

1 跟踪式光伏阵列模型

光伏阵列采光面的朝向是影响光伏阵列吸收太阳辐射量的主要因素。固定式光伏阵列的倾角和方位角固定, 难以最大效率地吸收太阳辐射。跟踪式光伏阵列通过实时跟踪太阳运动, 使太阳直射光线到光伏阵列采光面的入射角达到最小, 从而增加光伏阵列吸收的有效太阳辐射, 提高光伏发电系统发电量。

1.1 传统光伏阵列模型

固定式光伏阵列模型:

$$\cos \theta = \sin \alpha \cos \beta + \cos \alpha \sin \beta \cos(\gamma - A) \quad (1)$$

式中: θ 为太阳直射光与光伏阵列采光面法线方向的夹角, 即太阳入射角; α 为太阳高度角, 指太阳到观测点的连线与地平面的夹角; A 为太阳方位角, 指太阳到观测点连线在地面的投影与正北方向的夹角; β 为光伏阵列倾角; γ 为光伏阵列方位角, 指倾斜面法线在地平面的投影与正北方向的夹角。

水平单轴跟踪光伏阵列模型:

$$\begin{cases} \cos \theta = \sqrt{1 - \cos^2 \alpha \cos^2(\gamma_r - A)} \\ \tan \rho = \frac{\sin(A - \gamma_r)}{\tan \alpha} \end{cases} \quad (2)$$

式中: γ_r 为跟踪轴方位角, 指水平跟踪轴与正北方向的夹角; ρ 为跟踪角, 指跟踪轴相对于基准线转过的角度。

倾斜单轴跟踪光伏阵列模型:

$$\begin{cases} \cos \theta = \sqrt{1 - \{\cos(\alpha - \beta_r) - \cos \beta_r \cos \alpha [1 - \cos(A - \gamma_r)]\}^2} \\ \tan \rho = \frac{\cos \alpha \sin(A - \gamma_r)}{\sin(\alpha - \beta_r) + \sin \beta_r \cos \alpha [1 - \cos(A - \gamma_r)]} \end{cases} \quad (3)$$

式中: β_r 为跟踪轴相对于地平面的倾角, 当 $\beta_r=0$ 时,

倾斜单轴跟踪式阵列模型就退化为水平单轴跟踪式光伏阵列模型。

双轴跟踪光伏阵列模型:

$$\theta = 0 \quad (4)$$

2 光伏阵列改进模型

2.1 跟踪式光伏阵列改进模型

水平单轴跟踪光伏阵列的太阳入射角 θ 、跟踪角 ρ 、光伏阵列倾角 β 和方位角 γ 可按下式计算:

$$\begin{cases} \cos \theta = \sqrt{1 - \cos^2 \alpha \cos^2 (\gamma_r - A)} \\ \tan \rho = \frac{\sin (A - \gamma_r)}{\tan \alpha} \\ \beta = |\rho| \\ \gamma = \gamma_r + 90^\circ, \rho > 0 \\ \gamma = \gamma_r - 90^\circ, \rho < 0 \end{cases} \quad (5)$$

倾斜单轴跟踪光伏阵列的太阳入射角 θ 、跟踪角 ρ 、光伏阵列倾角 β 和方位角 γ 可按下式计算:

$$\begin{cases} \cos \theta = \sqrt{1 - \left\{ \cos (\alpha - \beta_r) - \cos \beta_r \cos \alpha [1 - \cos (A - \gamma_r)] \right\}^2} \\ \tan \rho = \frac{\cos \alpha \sin (A - \gamma_r)}{\sin (\alpha - \beta_r) + \sin \beta_r \cos \alpha [1 - \cos (A - \gamma_r)]} \\ \cos \beta = \cos \beta_r \cdot \cos \rho \\ \gamma = \gamma_r + 180^\circ - \arccos (\tan \beta_r \cdot \operatorname{ctg} \beta), \rho > 0 \\ \gamma = \gamma_r + 180^\circ + \arccos (\tan \beta_r \cdot \operatorname{ctg} \beta), \rho < 0 \end{cases} \quad (6)$$

双轴跟踪光伏阵列的太阳入射角 θ 、光伏阵列倾角 β 和方位角 γ 可按下式计算:

$$\begin{cases} \theta = 0^\circ \\ \beta = 90^\circ - \alpha \\ \gamma = A \end{cases} \quad (7)$$

2.2 跟踪式光伏阵列的模拟算法

图 1 给出了考虑跟踪闭锁现象和步进跟踪的跟踪式光伏阵列采光面有效辐射模拟流程图,图 1 中: ε 为跟踪误差限值; β_{lock} 为跟踪闭锁角; β_0 和 γ_0 分别为光伏阵列的初始倾角和方位角; θ_t 、 ρ_t 、 β_t 和 γ_t 分别为 t 时刻由模型计算的太阳入射角、跟踪角、光伏阵列倾角和方位角。如果 t 时刻太阳入射角误差大于 ε 则启动跟踪, 否则不启动跟踪, 从而实现步进跟踪控制功能, 通过 ε 可控制步进跟踪的精度。如果跟踪过程中出现 $\beta_t > \beta_{\text{lock}}$ 的情况, 则光伏阵列倾角取为 β_{lock} , 从而模拟跟踪闭锁现象。

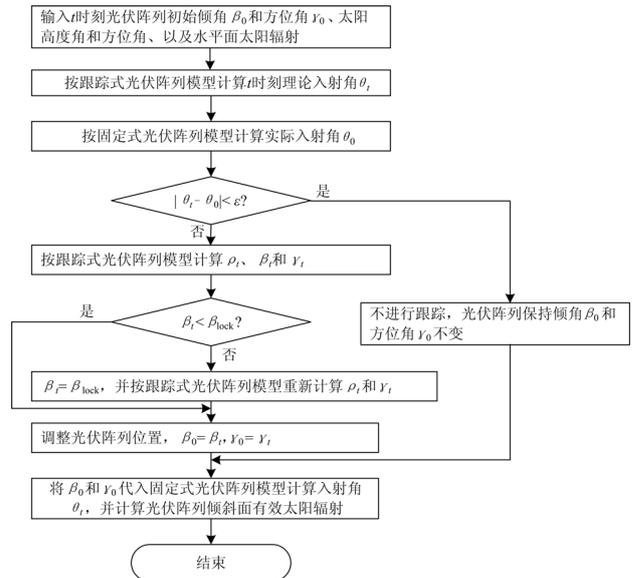


图 1 跟踪式光伏阵列控制流程图

Fig.1 Control flow graph of auto-tracking photovoltaic array

3 跟踪式光伏阵列模型验证与仿真研究

3.1 跟踪式光伏阵列模型验证与分析

我国首座高压并网光伏电站—100 kWp 高压并网光伏电站位于东经 $90^\circ 30'$, 北纬 $30^\circ 5'$, 海拔 4 350 m。本节用 2008 年 11 月 19 日现场实测数据对跟踪式光伏阵列模型的模拟值进行比较验证。图 2 (a) 显示了四种形式光伏阵列的实测有效太阳辐射曲线, 图 2 (b) 显示了用本文光伏阵列改进模型计算的仿真曲线, 由图可见, 仿真曲线与实测曲线的变化趋势基本吻合。由图 2 (a) 可见, 早晨 10:30 以

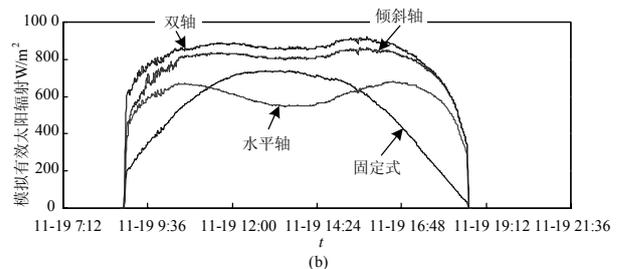
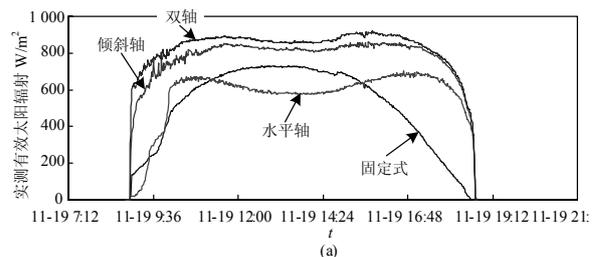


图 2 四种形式光伏阵列有效辐射实测曲线和仿真曲线
Fig.2 Curve of real determination and simulation of 4 form's photovoltaic array

前, 固定式光伏阵列和水平单轴光伏阵列实测辐射值偏小, 这是受到周围建筑物遮挡的影响。为避免遮挡对模型验证的影响, 取 10:30 之后的实测数据与固定式光伏阵列和水平单轴光伏阵列仿真曲线进行比较。

统计分析图 2 仿真曲线与实测曲线的均方根误差、有效太阳辐射均值和日总辐射量, 结果见表 1。

表 1 四种形式光伏阵列的统计结果

Tab.1 Statistical result of 4 form's photovoltaic array

		固定式	水平轴	倾斜轴	双轴
实测值	有效太阳辐射均值/(W/m ²)	550.8	592.3	757.5	793.4
	日太阳辐射量/(kWh/m ²)	5.1	5.6	7.5	7.9
模型值	有效太阳辐射均值/(W/m ²)	555.3	612.3	763.0	814.0
	日太阳辐射量/(kWh/m ²)	5.2	5.8	7.8	8.1
	均方根误差/(W/m ²)	7.1	9.0	9.2	10.4

通过模型仿真可得到各种形式光伏阵列的太阳入射角变化曲线, 如图 3 所示。

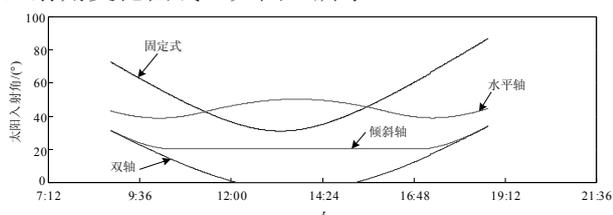


图 3 跟踪式光伏阵列太阳入射角仿真曲线

Fig.3 Simulation curve of sun-line incidence angle

综上所述, 通过与实测数据的比较可知, 考虑跟踪闭锁与步进跟踪的光伏阵列改进模型具有较高准确性, 由模型仿真发现闭锁现象持续时间与跟踪形式有关, 并且直接影响了光伏阵列的太阳入射角变化规律, 从而影响到光伏阵列采光面的有效太阳辐射。

4 并网光伏发电系统整体模型

4.1 模型描述

图 4 显示了典型并网光伏发电系统的等效电路, 包括直流电路、逆变桥和交流电路三部分, 其中交流部分仅显示了 A、B、C 三相电路中一相电路。图 4 中, U_{PV} 和 I_{PV} 分别为光伏阵列输出电压和电流; C 为直流侧支撑电容; M 和 α 为逆变桥幅值调制比和相移角; \dot{U}_i 为逆变桥输出交流电压相量; \tilde{S}_i 是逆变桥输出的复功率; L_f 和 C_f 是滤波器的单相电感和电容; ω 是基波角频率; 升压变压器表示为 Γ 形等值电路; R_T 、 X_T 、 G_T 和 B_T 分别是变压器电阻、电抗、电导和电纳; \dot{U}_g 是并网点电压相

量; \tilde{S}_g 为并网光伏发电系统输出的复功率。

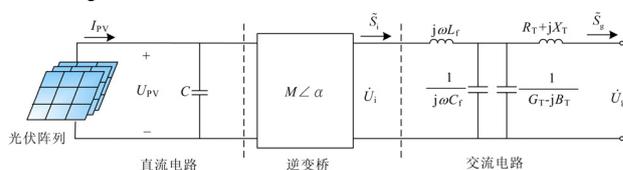


图 4 并网光伏发电系统等效电路

Fig.4 Equivalent circuit of grid-connected photovoltaic system

光伏阵列用于实现太阳辐射向电能的转换功能, 下面的五参数模型描述了光伏阵列采光面的有效辐射向电能转换的 I-V 特性:

$$\begin{cases} I_{PV} = N_{pp} \cdot \left\{ I_L - I_o \exp \left[\frac{\frac{U_{PV}}{N_s N_{ss}} + \frac{I_{PV} R_s}{N_{pp}}}{a} \right] - 1 \right\} - \frac{U_{PV} + I_{PV} R_s}{N_s N_{ss} + N_{pp}} \\ P_{PV} = U_{PV} I_{PV} \end{cases} \quad (8)$$

式中: U_{PV} 、 I_{PV} 和 P_{PV} 分别为光伏阵列输出电压、电流和功率; N_s 是单个光伏组件中光伏电池的串联数; N_{ss} 为光伏组件的串联数; N_{pp} 为光伏组件串的并联数。该模型有五个参数: 光电流 I_L 、二极管反向饱和电流 I_o 、理想因子 a 、串联电阻 R_s 和并联电阻 R_{sh} , 这五个参数与太阳辐射、工作温度和大气光学气团有关。通常, 光伏组件的制造商给出了标准额定条件 (Standard Rated Condition, SRC) 下的运行参数, 由此可计算出五个参数的参考值, 对于任意气象条件, 可通过修正参考值得到五个参数的实际值。SRC 指太阳辐照度 1000 W/m^2 , 太阳电池表面温度 $25 \text{ }^\circ\text{C}$, 大气光学气团 AM1.5 的条件。

如果光伏系统采用最大功率跟踪 (Maximum Power Point Tracing, MPPT) 控制策略, 则光伏阵列运行在最大功率点 (Maximum Power Point, MPP), MPP 点的光伏阵列电压和电流应满足非线性方程:

$$\frac{I_{PV}}{N_{pp}} + \frac{U_{PV}}{N_s N_{ss}} \cdot \frac{-I_o R_{sh} \exp \left(\frac{\frac{U_{PV}}{N_s N_{ss}} + \frac{I_{PV} R_s}{N_{pp}}}{a} \right) - a}{\frac{U_{PV}}{N_s N_{ss}} + \frac{I_{PV} R_s}{N_{pp}}} = 0$$

$$a R_{sh} + I_o R_s \exp \left(\frac{\frac{U_{PV}}{N_s N_{ss}} + \frac{I_{PV} R_s}{N_{pp}}}{a} \right) + a R_s \quad (9)$$

并网逆变器用于实现光伏阵列发出的直流电向交流电的转换, 光伏发电系统通过并网逆变器将直流电路和交流电路连接在一起, 电力变换过程遵循瞬时功率平衡原理和电力电子变换原理。本文假设逆变器桥为理想三相桥式逆变电路, 采用正弦脉宽调制法 (Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM),

逆变桥交流电压相量和交流有功功率分量分别为：

$$\dot{U}_i = U_i \angle \alpha = \frac{\sqrt{2}}{4} M U_{PV} \angle \alpha \quad (10)$$

$$P_i = P_{PV} \quad (11)$$

式中： U_i 为理想逆变桥输出交流相电压幅值； M 和 α 为逆变桥幅值调制比和相移角； P_i 是逆变桥输出的三相交流有功功率有效值。逆变桥也可输出一部分无功功率 Q_i ，其数量取决于整个系统的无功需求，并受逆变桥额定功率的限制。

逆变桥输出的交流电经 LC 滤波器和升压变压器送入电网，逆变器通过谐波控制技术可将总谐波含量降低到 5% 以下，LC 滤波器可滤去剩余的谐波分量，从升压变压器送入电网的交流电谐波含量很小，因此本文模型中仅考虑基波分量。将图 4 的交流电路部分进行 Y-Δ 变换，得到 π 型等值电路，如图 5 所示。图中： \tilde{S} 表示复功率； z_{12} 、 z_{13} 和 z_{23} 分别为变换后的阻抗模值； φ_{12} 、 φ_{13} 和 φ_{23} 分别为阻抗角； U_g 为并网点电压有效值； θ_g 为并网点电压相角。逆变桥与并网光伏发电系统输出的三相交流功率表示为：

$$P_i = 3U_i \left[\frac{U_i}{z_{12}} \cos \varphi_{12} + \frac{U_i}{z_{13}} \cos \varphi_{13} - \frac{U_g}{z_{12}} \cos(\theta_g - \alpha - \varphi_{12}) \right] \quad (12)$$

$$Q_i = 3U_i \left[\frac{U_i}{z_{12}} \sin \varphi_{12} + \frac{U_i}{z_{13}} \sin \varphi_{13} + \frac{U_g}{z_{12}} \sin(\theta_g - \alpha - \varphi_{12}) \right] \quad (13)$$

$$P_g = 3U_g \left[\frac{U_i}{z_{12}} \cos(\alpha - \theta_g - \varphi_{12}) - \frac{U_g}{z_{12}} \cos \varphi_{12} - \frac{U_g}{z_{23}} \cos \varphi_{23} \right] \quad (14)$$

$$Q_g = 3U_g \left[\frac{U_i}{z_{12}} \sin(\alpha - \theta_g - \varphi_{12}) + \frac{U_g}{z_{12}} \sin \varphi_{12} + \frac{U_g}{z_{23}} \sin \varphi_{23} \right] \quad (15)$$

式中： P_g 和 Q_g 分别是逆变器注入并网点的交流有功功率和无功功率，由逆变桥输出电压相量 \dot{U}_i 和并网点电压相量 \dot{U}_g 共同决定。

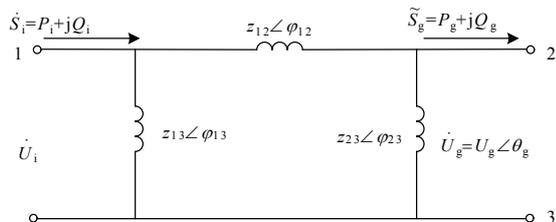


图 5 逆变器交流电路的 π 型等值电路

Fig.5 Equivalent circuit of inverter

4.2 模型验证与分析

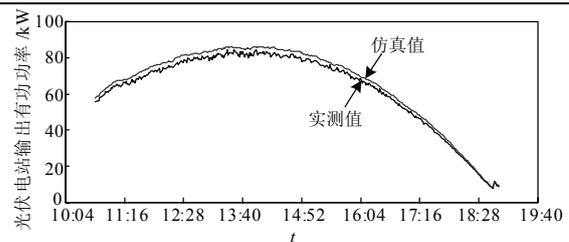
模型仿真，采用 Matlab 软件对并网光伏发电系

统整体模型进行仿真，将观测到的太阳光的放射角作为已知参数输入，将光伏电站输出的有功功率和光伏阵列的电压作为输出量。并网光伏电站包含 100 kWp 固定式光伏阵列，光伏阵列倾角 23°，方位角 162°，电站配备了一台 150 kW 并网逆变器，实现了 MPPT 策略和单位功率因数。光伏阵列五参数模型的 SRC 参数值，根据实际光伏组件的出厂参数计算得出，逆变器参数取 150 kW 并网逆变器的实际参数，如表 2 所示。用某次的实测数据与模型仿真的数据进行比较验证，实测 23° 倾斜面辐照度曲线和光伏阵列表面温度曲线如图 6 所示。

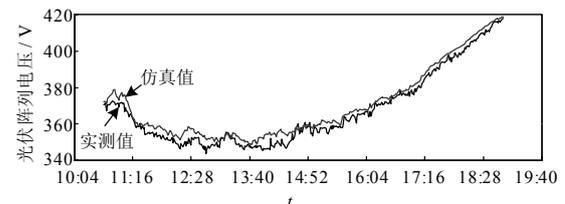
表 2 光伏系统模型参数

Tab.2 Model parameters of photovoltaic system

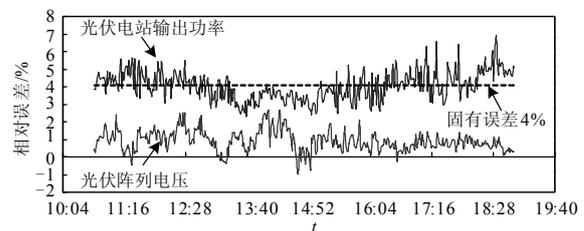
光伏阵列五参数模型 (SRC)	$I_{L,SRC}=4.085 \text{ A}$, $I_{O,SRC}=7.008 \times 10^{-7} \text{ A}$, $a_{SRC}=0.0392$, $R_{s,SRC}=0.0053 \Omega$, $R_{sh,SRC}=2750 \Omega$, $N_s=72$, $N_{ss}=11$, $N_{pp}=56$
逆变器交流电路模型	$L_f=250 \mu\text{H}$, $C_f=450 \mu\text{F}$, $R_f=0.00321 \Omega$, $X_T=0.01023 \Omega$, $G_T=0.01524 \text{ S}$, $B_T=0.05194 \text{ s}$



(a) 光伏电站输出有功功率



(b) 光伏阵列电压



(c) 仿真数据的相对误差

图 6 仿真数据与实测数据的比较

Fig.6 Data comparison between the simulation and the determination

对比仿真数据与实测数据，如图 6 所示。从图 6 (a) 和 (b) 可见，模型仿真的光伏电站输出功率

和光伏阵列电压曲线变化趋势与实测数据的变化趋势基本一致, 仿真曲线略高于实测曲线。出现仿真值偏高的主要原因在于采用光伏组件出厂参数计算的光伏阵列五参数模型仍然是一种理想模型, 光伏组件在现场实际运行中的转换效率要小于理想转换效率, 同时模型采用了理想逆变电路, 没有考虑逆变器损耗, 因而实际输出功率略低于仿真值, 另外光伏阵列表面覆尘也可能是原因之一。从图 6 (c) 可见, 光伏电站输出功率的相对误差在 2.2%~6.9% 之间, 仿真值偏高引起的固有误差约为 4%, 光伏阵列电压误差不超过 3.2%。输出功率的仿真误差在早晨和傍晚时略大, 中午时偏小, 出现这种趋势的主要原因在于实际逆变器在早晨和傍晚的输出功率比中午的输出功率低得多, 逆变器效率在早晚低功率时的运行效率降低较多, 逆变器相对损耗也较大, 而仿真中为使模型简洁、计算量减少、仿真时间缩短, 没有考虑逆变器损耗, 从而带来仿真误差。综上所述, 并网光伏发电系统整体模型能够较为准确地模拟实际并网光伏发电系统的运行特性。

5 结论

建立准确的数学模型是保证并网光伏发电系统分析与规划合理准确性的重要手段, 同时通过模型仿真研究, 也可获得不同形式并网光伏发电系统运行特性, 从而为分析不同形式并网光伏发电系统对电网的影响及其成因提供依据。

本文首先研究了跟踪式光伏阵列模型, 提出跟踪式光伏阵列改进模型以及考虑跟踪闭锁和步进跟踪的有效太阳辐射计算方法, 并进行了模型验证和

仿真分析研究。

参考文献

- [1] Saha S, Sundarsingh V P. Novel grid-connected photovoltaic inverter[J]. IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, 1996, 143(2): 219-224.
- [2] Wasynczuk O. Modeling and dynamic performance of a line-commutated photovoltaic inverter system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1989, 4(3): 337-343.
- [3] 茆美琴, 余世杰, 苏建徽. 带有 MPPT 功能的光伏阵列 Matlab 通用仿真模型[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(5): 1248-1251.
- [4] Rodriguez C, Amaratunga G A J. Dynamic stability of grid-connected photovoltaic systems[A]. in: Proceedings of the 2004 IEEE Power Engineering Society General Meeting[C]. 2004.2193-2199.
- [5] 王一波, 李晶, 许洪华. 考虑电网安全稳定约束的光伏电站最大安装容量计算与分析[J]. 太阳能学报, 2008, 29(8): 971-975.
- [6] De Soto W, Klein S A, Bechman W A. Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance[J]. Solar Energy, 2006, 80(1): 78-88.
- [7] De Soto W. Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance[D]. University of Wisconsin-Madison, 2004.

收稿日期: 2009-07-03; 修回日期: 2009-11-26

作者简介:

徐维(1969-), 女, 副教授, 硕士, 研究方向为电工应用技术、绿色能源技术。E-mail: xwei@czu.cn

(上接第 16 页 continued from page 16)

- [7] 黄涛. 区域电力市场中发电企业市场报价策略研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
HUANG Tao. Study on bidding strategies of generation enterprise in regional power market[D]. Shanghai: Shanghai JiaoTong University, 2007.
- [8] 刘思峰, 党耀国, 方志耕, 等. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
LIU Si-feng, DANG Yao-guo, FANG Zhi-geng, et al. Grey system theory and its application[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [9] 罗党. 灰色决策问题分析方法[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2005.
LUO Dang. Analysis method for grey decision problem[M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy

Press, 2005.

- [10] Nogales F J, Contreras J, Conejos A J, et al. Forecasting next-day electricity prices by time series models[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(2): 34-348.
- [11] 柯于刚, 顾洁. 混沌递阶遗传神经网络在组合预测中的应用[J]. 电气应用, 2007, 26(4): 35-38.
KE Yu-gang, GU Jie. Application of chaotic and hierarchical genetic algorithm for artificial neural networks to combination forecasting[J]. Electrotechnical Application, 2007, 26(4): 35-38.

收稿日期: 2009-07-08; 修回日期: 2009-09-07

作者简介:

顾洁(1971-), 女, 副教授, 博士, 研究方向为电力市场及电力系统优化, 智能电网。E-mail: gujie@sytu.edu.cn