

带有 MPPT 功能的光伏阵列 Matlab 通用仿真模型

茆美琴, 余世杰, 苏建徽

¹合肥工业大学能源研究所, 合肥 230009; ²教育部光伏系统工程研究中心, 合肥 230009)

摘要: 基于光伏模块直流物理模型, 在 matlab 仿真环境下, 开发了光伏阵列通用仿真模型。利用该模型, 可以模拟任意太阳辐射强度、环境温度、光伏模块参数、光伏阵列串并联方式组合下的光伏阵列 I-V 特性。此外, 该模型还融合了光伏阵列的最大功率跟踪 (MPPT) 功能, 可以用于光伏发电系统和风光复合发电系统的动态仿真。

关键词: 光伏阵列特性; 光伏并网系统; MPPT; Matlab 仿真

文章编号: 1004-731X (2005) 05-1248-04 **中图分类号:** TP391.9 **文献标识码:** A

Versatile Matlab Simulation Model for Photovoltaic Array with MPPT Function

MAO Mei-qin, YU Shi-jie, SU Jian-hui

¹Institute of Energy Research, HeFei University of Technology, Hefei 230009, China;²Research Center for Photovoltaic System Engineering, Ministry of Education, Hefei 230009, China)

Abstract: A Versatile simulation model for photovoltaic array is developed based on the DC physical model of photovoltaic module under Matlab environment. By the model, the I-V characteristics of photovoltaic array with different combinations can be simulated at any corresponding insolation level, ambient temperature and parameters of the photovoltaic module. In addition to that, the model includes the function of Maximum Power Point Tracking (MPPT). It can be used in the dynamic simulation of photovoltaic systems and wind-solar hybrid systems.

Keywords: characteristic of photovoltaic array; photovoltaic grid connected system; MPPT; Matlab simulation

引言

太阳能是当今发展速度居第二位的能源。太阳能光伏发电过去 15 年平均年增长为 15%, 到二十世纪 90 年代末期以来, 更是以 30% 以上的速度增长。目前, 太阳能光伏发电的发展趋势是由小型独立户用系统向大型并网系统发展。由于太阳能的波动性和随机性, 光伏电站输出的电能波动很大。随着这种分布式光伏并网电站的容量越来越大, 其输出功率的波动对电网的影响不容忽视。研究分布式光伏并网发电系统与电网系统的相互作用, 已成为国际上大规模光伏并网电站应用领域的研究热点, 而计算机仿真技术则是研究这一内容的有效的技术手段。

过去, 光伏发电系统的仿真, 大多是按照准稳态理论来对系统各部件建模^[1-2], 对系统功率流进行计算, 从而对系统的长期稳态性能进行评价。但在光伏并网发电系统动态性能的研究中, 上述模型不能反映当太阳能辐射强度、环境温度变化时, 光伏电站运行状态的瞬态变化以及这种变化对电网的影响。这就需要建立光伏电站的动态仿真模型。

光伏阵列是分布式光伏并网电站系统的关键部件, 其 I-V 特性是太阳辐射强度、环境温度和光伏模块参数的非线性

性函数。要实现光伏发电系统的动态仿真, 首先一步是解决如何对光伏阵列 I-V 特性进行仿真模拟。该模型一旦建立, 可用于模拟所研究系统的输入电源。简化的做法是把光伏阵列直接等效为直流电压源。但该模型不能实时跟踪太阳辐射强度、环境温度变化和光伏阵列参数的变化, 因而这样的系统仿真不能反映上述参数变化对整个系统性能的影响。目前, 有关这方面的工作, 国内还未见公开发表的文献。国外虽有涉及这方面的公开文献, 但所建模型主要针对特定的光伏模块^[3-4], 因而缺乏通用性。

Matlab/simulink 仿真工具可用于复杂系统 (连续的、或离散的或混合型的) 的仿真, 由于其强大的功能和方便、快捷的模块化建模环境, 而日益受到人们的重视。本文针对 Matlab 仿真环境, 基于光伏模块直流物理模型, 开发了光伏阵列通用仿真模型。该模型考虑了环境温度、太阳辐射强度、光伏阵列串并连数、光伏模块参数 (如标准条件下太阳电池的短路电流、开路电压、最大功率点电压、最大功率点电流、电压温度系数、电流温度系数等) 对 I-V 特性的影响, 并考虑了系统是否带有最大功率跟踪 (MPPT) 功能。本文给出了该模型在单相光伏并网系统仿真中的具体应用实例。结果表明, 由于通用性强, 该模型还可以方便地推广应用于其它光伏系统 (如, 光伏水泵系统) 或风光复合发电系统的动态仿真。

1 光伏电池特性

典型的光伏电池 (电流 I—电压 V)、(功率 P—电压 V)

收稿日期: 2004-04-25 修回日期: 2005-01-25

基金项目: 国家十五攻关课题 ((2001BA403B0501))

作者简介: 茆美琴 (1961-), 女, 安徽芜湖人, 副研究员, 博士生, 研究方向为太阳能及风能发电系统 CAD; 余世杰 (1934-), 男, 江苏常熟人, 教授, 博导, 研究方向为光伏技术理论; 苏建徽 (1964-), 男, 安徽合肥人, 教授, 研究方向为电力电子与电力传动在新能源发电系统中的应用。

特性如图 1, 图 2 所示。图 1 表示 $I-V$ 、 $P-V$ 随太阳辐射变化而变化的规律。图 2 则表示 $P-V$ 随环境温度变化的规律。

由图可以看出太阳能电池 $I-V$ 、 $P-V$ 特性, 与太阳辐射强度、环境温度之间是高度非线性的。

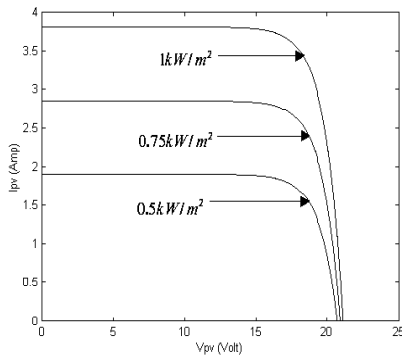


图 1 典型光伏电池 $I-V$ 、 $P-V$ 特性随太阳辐射强度变化曲线

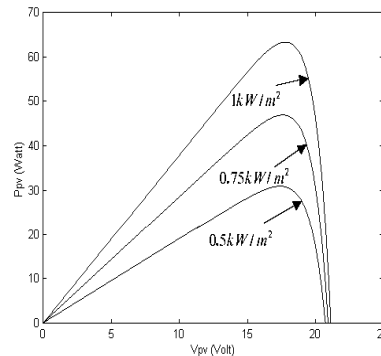


图 2 典型光伏电池 $P-V$ 特性随温度变化曲线

2 光伏阵列通用仿真模型

在实际应用中, 光伏模块通常通过串并联的方式, 组合成 $M \times N$ 光伏阵列 (其中 M 、 N 分别为光伏模块串、并联数)。因此, 光伏阵列的 $I-V$ 特性, 就是实际需要的特性。

2.1 光伏阵列数学模型

本文用于 Matlab 建模的光伏阵列数学模型如下^[5]: 任意太阳辐射强度 R ($\text{w} \cdot \text{m}^{-2}$) 和环境温度 T_a ($^{\circ}\text{C}$) 条件下, 太阳能电池温度 T_c ($^{\circ}\text{C}$) 为:

$$T_c = T_a + t_c \cdot R \quad (1)$$

其中, R 为光伏阵列倾斜面上的总太阳辐射; t_c ($\text{degw}^{-1} \cdot \text{m}^2$) 为太阳能电池模块的温度系数。

设在参考条件下, I_{sc} 为短路电流, V_{oc} 为开路电压, I_m 、 V_m 为最大功率点电流和电压, 则当光伏阵列电压为 V , 其对应点电流为 I :

$$I = I_{sc} (1 - C_1 (e^{\frac{V}{C_2 V_{oc}}} - 1)) \quad (2)$$

其中,

$$C_1 = (1 - I_m / I_{sc}) e^{-\frac{V_m}{C_2 V_{oc}}} \quad (3)$$

$$C_2 = (V_m / V_{oc} - 1) / \ln(1 - I_m / I_{sc}) \quad (4)$$

考虑太阳辐射变化和温度影响时,

$$I = I_{sc} (1 - C_1 (e^{\frac{V-DI}{C_2 V_{oc}}} - 1)) + DI \quad (5)$$

其中,

$$DI = \alpha \cdot R / R_{ref} \cdot DT + (R / R_{ref} - 1) \cdot I_{sc} \quad (6)$$

$$DV = -\beta \cdot DT - R_s \cdot DI \quad (7)$$

$$DT = T_c - T_{ref} \quad (8)$$

R_{ref} 、 T_{ref} : 太阳辐射和光伏电池温度参考值, 一般取为 $1\text{kW}/\text{m}^2$, 25°C ;

α : 在参考日照下, 电流变化温度系数 ($\text{Amps}/^{\circ}\text{C}$);

β : 在参考日照下, 电压变化温度系数 ($\text{V}/^{\circ}\text{C}$);

R_s : 光伏模块的串联电阻 (Ohms), 由下式决定^[4]

$$R_s = \frac{N}{N_p} R_{s,ref} = \frac{N}{N_p} (A_{ref} \ln(\frac{I_{m,ref}}{I_{sc,ref}}) - V_{m,ref} + V_{oc,ref}) / I_{m,ref} \quad (9)$$

$$A_{ref} = \frac{T_{cref} \mu_{V_{oc}} - V_{oc,ref} + \epsilon N_s}{\frac{\mu_{I_{sc}} T_{cref}}{I_{Lref}} - 3} \quad (10)$$

其中: e : 材料带能, $e = 1.12\text{eV}$ (硅);

$I_{m,ref}$ 、 $V_{m,ref}$: 参考条件下, 光伏阵列最大功率点电压和电流;

$I_{sc,ref}$ 、 $V_{oc,ref}$: 参考条件下, 光伏阵列短路电流和开路电压;

$\mu_{V_{oc}}$ 、 $\mu_{I_{sc}}$: 参考条件下, 光伏阵列开路电压和短路电流温度系数;

N_s : 光伏阵列各模块的单元串联数;

N : 光伏阵列模块的串联数;

Np : 光伏阵列模块的并联数;

$T_{c,ref}$: 参考条件下, 光伏电池温度, 一般设定为 25°C 。

2.2 光伏阵列最大功率跟踪数学模型

光伏阵列在任意太阳辐射强度、及环境温度下的功率为

$$P = IV = (I_{sc} (1 - C_1 (e^{\frac{V-DI}{C_2 V_{oc}}} - 1)) + DI) V \quad (11)$$

由极值条件, $dP/dV=0$ 得:

$$I_{sc} (1 - C_1 (e^{\frac{V-DI}{C_2 V_{oc}}} - 1)) + DI - V I_{sc} C_1 e^{\frac{V-DI}{C_2 V_{oc}}} / (C_2 V_{oc}) = 0 \quad (12)$$

上式是个超越方程, 可由牛顿法进行迭代解出对应最大功率点的电压 V_{max} :

$$\begin{aligned} V_{k+1} &= V_k - P'(V_k) / P''(V_k) \\ &= V_k - \frac{I + V^k (-I_{sc} C_1 \frac{1}{C_2 V_{oc}} e^{\frac{V^k - DI}{C_2 V_{oc}}})}{(2 + \frac{V^k}{C_2 V_{oc}}) (-I_{sc} \frac{C_1}{C_2 V_{oc}} e^{\frac{V^k - DI}{C_2 V_{oc}}})} \end{aligned} \quad (13)$$

当 $|V_{k+1} - V_k| < \epsilon_1$ 时, $V_{max} = V_{k+1}$

上式中, V_{k+1} 和 V_k 分别为 V 的第 $k+1$ 次和第 k 次迭代值。 ϵ_1 为迭代精度。 $P'(V_k)$ 和 $P''(V_k)$ 分别是第 k 次迭代下 P 对 V 的一阶和二阶导数。将所得的 V_{max} 代入 (2) 式, 得 I_{max} , 从而最大功率 P_{max} 可由下式求得:

$$P_{max} = V_{max} \cdot I_{max} \quad (14)$$

3 光伏阵列 Matlab 通用仿真模型

基于上述数学模型, 本文在 Matlab 环境下, 利用 simulink 工具, 并结合编写 S 函数, 建立了光伏阵列的通用仿真模块。图 3 为光伏阵列 Matlab 仿真模块内部结构, 其中, $sfunpv$ 为 S 函数, 用来实时求解对应任意太阳辐射、环境温度下太阳能电池的最大功率电压 V_{mp} 和电流 I_{mp} 。图 4 所示为该模

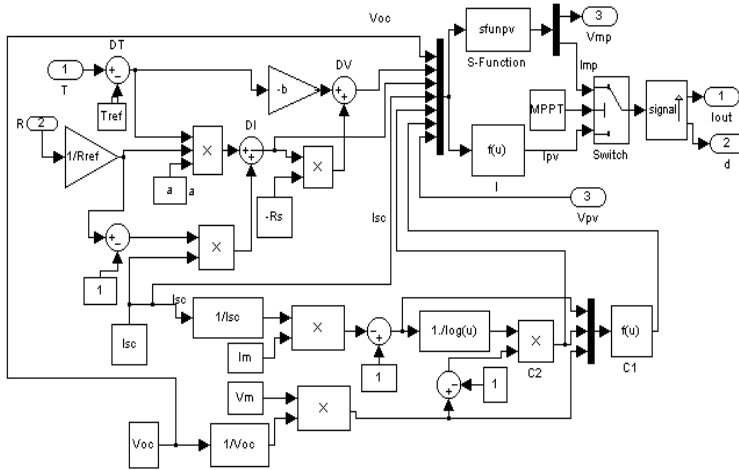


图3 太阳阵列

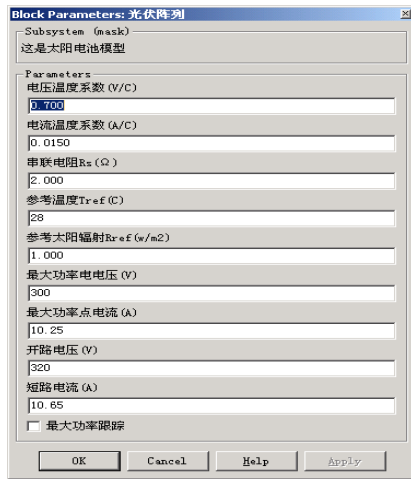


图5 光伏阵列 Matlab 仿真模型用户设置参数界面

4 光伏阵列 Matlab 通用仿真模型在光伏并网系统中的应用

把上述光伏阵列 Matlab 通用仿真模型，用于单相光伏并网系统的动态仿真。该系统的 Matlab 模型如图 6 所示。其中，系统输入电源为本文所建立的光伏阵列模块。DC-AC 逆变模块为 Matlab 自带的通用逆变桥。

当光伏阵列的参数设置如图 5 所示时得到系统仿真结果如图 7 至图 9 所示。其中，图 7 为光伏阵列输出电流随太阳辐射强度的变化情况。在 $t=1s$, $t=2s$ 时，太阳辐射强度分别从 $1000W/m^2$ 降至 $800W/m^2$ 和 $600W/m^2$ ，光伏阵列输出电流也从 10.65A 分别降至 8.45A 和 6.25A。图 8 为逆变器

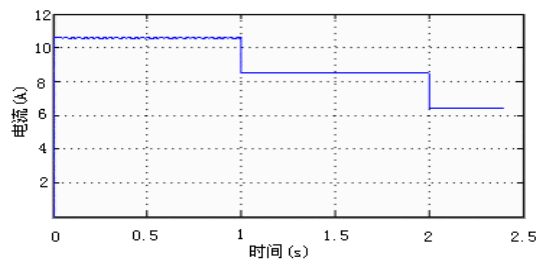


图7 光伏阵列输出电流随太阳辐射强度的变化

块外观，其中 T , R , V_{pv} 分别为实时环境温度、太阳辐射强度和光伏阵列的工作电压， I_{out} 为光伏阵列输出电流，根据系统是否带有 MPPT 输出电流可以是 I_{mp} 或对应 V_{mp} 的实际阵列电流 I_{out} ; V_{mp} 为光伏阵列最大功率点的电压; d 为接地点。

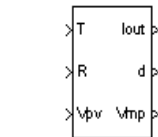


图4 光伏阵列 Matlab 仿真模型封装

在光伏阵列 matlab 仿真模型内部封装了参数 t_c 、 T_{ref} 、 R_{ref} 、 a 、 b 、 I_{sc} 、 V_{oc} 、 I_m 、 V_m 、MPPT 等参数。用户可通过点击图 4 所示的图标，得图 5 所示用户交互界面，方便地设置上述参数，从而构成不同 $I-V$ 特性的光伏阵列。当用户通过图 5 选中最大功率跟踪时， I_{out} 输出的就是最大功率点的电流。

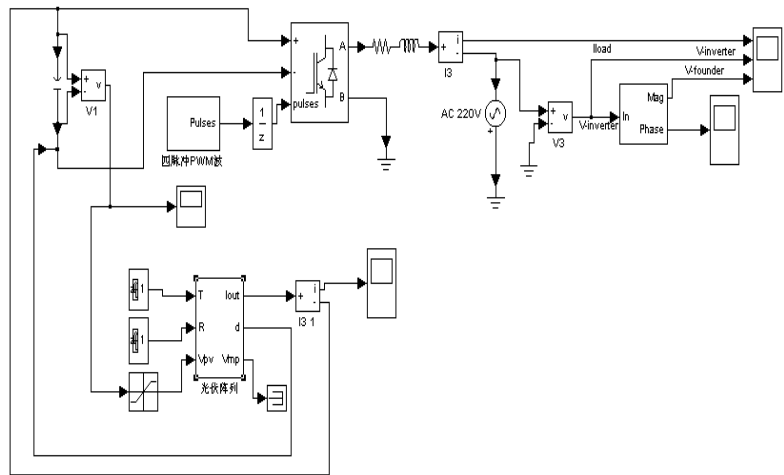


图6 单相光伏并网 Matlab 仿真模型

输入端的电压随太阳辐射强度的变化情况。由于采取的控制策略为固定调制比方式，因此，逆变器输入端的电压有所下降。图 9 为逆变器并网电压、电流随太阳辐射变化而变化的情况。从图中可以看出，当太阳辐射强度变化时，并网电压基 0 波幅值不变，而并网电流随着太阳辐射强度的减小而减小。

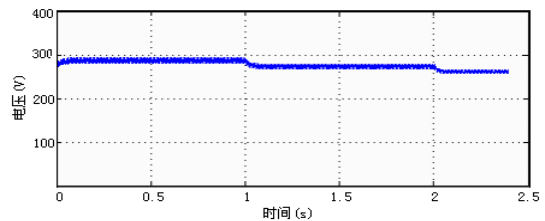


图8 逆变器输入端的电压随太阳辐射强度的变化

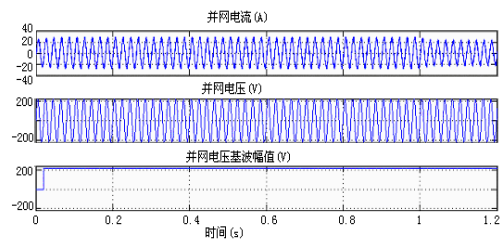


图9 逆变器并网电压、电流随太阳辐射强度的变化

5 结论

光伏阵列的 $I-V$ 特性除了与光伏电池模块参数及模块串并联方式有关以外, 还与环境温度, 太阳辐射强度有关。因而光伏阵列实际上是一个与多个参量高度非线性相关的电源。实时模拟其 $I-V$ 特性是研究光伏并网发电系统动态性能的关键。本文根据光伏电池的物理数学模型, 并结合编写 S 函数, 开发了光伏阵列的 Matlab 通用仿真模型。实例计算表明, 利用上述模型可以动态跟踪环境温度、太阳辐射强度等参数的变化, 对任意组合的光伏阵列的 $I-V$ 特性进行模拟。除了适用于太阳能并网系统以外, 该模型还可以方便地推广应用于其它光伏系统(如, 光伏水泵系统)或风光复合发电系统的动态仿真。本文中, 有关最大功率点的跟踪(MPPT), 采用了实时优化迭代算法, 因而仿真时间花费较

(上接第 1202 页)

融合后系统状态不确定性的基本概率赋值下降到 0.0006, 比融合前大大降低。此时, 整个系统运行的态势评估结果: 系统故障(系统处于故障状态的程度 0.8834)。系统给出 4 种故障的原因、处理措施及步骤。对于一般情况, 如果某个子系统正常, 则不参加融合。

4.3 评估结果的评价

每种方法测试 200 个相同的样本, 对比如表 3 所示。由于模糊综合评判方法的隶属度为领域专家主观确定, 单一神经网络方法的综合评估能力有限, 为此, 容易造成故障漏诊和错诊, 本文方法的基本概率分配函数数值为神经网络与领域专家共同确定, 与两者相比, 提高了评估的准确率。

表 3 测试结果与传统评估方法对照表

| 评估统计 分 类 | 本文 方 法 | 模糊综合 评 判 | 神经网络 方 法 |
|-------------|-----------|-------------|-------------|
| 正确评估 | 195 | 178 | 183 |
| 漏 诊 | 2 | 10 | 8 |
| 错 诊 | 3 | 12 | 9 |
| 正确率(%) | 97.5 | 89 | 91.5 |

5 结论

(1)多传感器故障信源的合理配置为态势评估提供了必须的故障特征信息。经过神经网络、专家系统规则推理及 D-S 证据推理的有机融合, 使态势评估系统能够较好地模拟人类专家的逻辑思维和形象思维能力, 并能随着故障特征的变化自动进行调整, 避免或减少了漏诊及错诊。与传统评估方法相比, 提高了评估的准确率和解释能力。

长。这一点还需进一步改进。

参考文献:

- [1] J.G.McGowan and J.F.Manwell. Hybrid Wind/PV/Diesel Power Systems Modeling and South American Applications[C]. WREC 1996.
- [2] 茆美琴, 余世杰, 苏建徽. 风/光复合发电系统变结构仿真建模研究[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(3): 361-364.
- [3] A.ZAHEDI. Development of An Electrical Model For A PV/Battery System for Performance Prediction[J]. Renewable Energy, 1998, 15(1): 531-534.
- [4] Viorel Badescu. Dynamic model of a Complex System Including PV Cells, Electric Battery, Electrical Motor and Water Pump[J]. Energy, 2003, 28(12): 1165-1181.
- [5] Platon Baltas, etc. The Arizona University Photovoltaic Designer Program(ASUPVD)[Z]. Department of Electrical and Computer Engineering, Arizona State University, 1996.

(2)本体论设计及实现方法, 较好地实现了复杂系统的模型共享及模型重用, 为现场各类态势评估、信息融合系统的工程化提供了重要的提示。

参考文献:

- [1] Miao, A.X, Zacharias, G.L. A computational situation assessment model for nuclear power plant operations[J]. IEEE transactions on systems, man, and cybernetics. Part A, 1997, 27(6):728-742.
- [2] Waltz E, Llinas J. Multisensor data fusion.[M]. Boston: Artech House, 1990.18-97.
- [3] Leem C S. An automated fault diagnosis for manufacturing process monitoring and control [J]. International Journal of Modeling and Simulation, 1996, 16(4): 200-208.
- [4] Shafer G. A mathematical theory of evidence[M]. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1976: 1-32.
- [5] 王道平, 张义忠. 故障智能诊断系统的理论与方法[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001.125-167.
- [6] Gallant S I. Neural network learning and expert systems. [M]. Cambridge, MA : MIT Press, 1993:125-172.
- [7] Zbigniew W. Ras, Agnieszka Dardzinska. Ontology-based distributed autonomous knowledge systems[J]. Information Systems, 2004.1 Vol.29 (1): 47-58
- [8] 陆汝钤, 金芝, 陈刚. 面向本体的需求分析[J]. 软件学报, 2000, 11(8): 1009-1017
- [9] Wei Shou-zhi, Wang-Gang, Zhao Hai. Power transformer on-line detection and fault diagnosis system based on neural network and embedded Internet[A]. Proceedings of the 6th International Conference on Information Fusion [C].Melbourne, Australia : International Society of Information Fusion, 2003. 372-378.
- [10] 张德干, 赵海. 基于信息融合思想的通用水电仿真系统[J]. 系统仿真学报, 2002, 12(10): 1344-1347.