

光伏阵列解析模型的研究

陈正伟,朱建华,裘君英,刘 浏

(浙江科技学院 工程实践中心,杭州 310023)

摘 要: 根据光伏阵列的特性和工作原理,抽象出光伏阵列的物理模型,从而给出光伏阵列的数学仿真模型。牛顿迭代法和不动点迭代法被用来求解代表光伏阵列伏安特性的超越方程。牛顿迭代法因其快速收敛而更适合用于求解光伏阵列的数学模型中超越方程。通过这个光伏阵列的数学模型,可以得到光伏阵列较为准确的伏安特性曲线。光伏阵列数学模型可以进一步应用在光伏系统的仿真当中。

关键词: 光伏阵列;迭代法;仿真

中图分类号: TM615.2;TM743

文献标志码: A

文章编号: 1671-8798(2011)06-0456-04

Study of PV arrays analytical model

CHEN Zheng-wei, ZHU Jian-hua, QIU Jun-ying, LIU Liu

(Center of Engineering Practice, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: According to the properties of photovoltaic arrays, an analytical simulation model for photovoltaic arrays is developed based on the DC physical model of photovoltaic module. Newton iterative method and fixed points iterative method are used to find the result of the transcendental equation. Newton iterative method can find the result faster. The precise I - V characteristics curve of photovoltaic arrays is given by the model. The analytical simulation model can be used in simulation of photovoltaic system.

Key words: photovoltaic arrays; iterative method; simulation

随着化石能源的消耗,全球都在面临能源危机,温室效应导致全球气候变暖,低碳的生活方式逐渐被大家广泛地接受。人们在不遗余力地寻找可再生的清洁能源。太阳能依靠其清洁、分布广泛等特点成为当今发展速度居第二位的能源^[1-3]。光伏阵列是光伏发电系统的重要部件,其伏安特性是受太阳辐射强度、环境温度和光伏模块参数影响的非线性函数。要实现光伏发电系统的动态仿真,首先是要解决对光伏

阵列的伏安特性的仿真^[4-5]。本文从光伏电池的物理模型出发,给出一个可以用在光伏系统仿真的光伏阵列仿真模型。

1 光伏阵列的数学模型

1.1 光伏电池的数学模型

太阳能电池是利用半导体材料光伏效应的特性做成的。所谓光伏效应是指半导体材料吸收光能,由光子激发出的电子-空穴对分离从而产生电动势的现象。光伏电池组件的伏安特性随日照强度 $S(\text{W}/\text{m}^2)$ 和组件的温度 $t(^{\circ}\text{C})$ 而变化,即 $I=f(V, S, t)$ 。根据电学理论,当负载为纯电阻时,太阳电池的等效电路如图 1 所示^[6-8]。

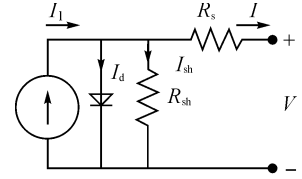


图 1 光伏电池组件电路模型

Fig. 1 Equivalent circuit of solar cell

对应的 I - V 函数如下:

光伏电池的输出特性方程为

$$I = I_1 - I_d - I_{sh} \quad (1)$$

$$I_d = I_o \left\{ \exp \left[\frac{q}{nKT} (V + IR_s) \right] - 1 \right\} \quad (2)$$

$$I_{sh} = \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (3)$$

$$I = I_1 - I_o \left\{ \exp \left[\frac{q}{nKT} (V + IR_s) \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (4)$$

式中: V —输出电压; I —输出电流; I_1 —光生电流; I_d —太阳能电池组件在无光照时,由外电压作用下等效二极管 P - N 结内流过的正向电流; I_o —太阳能电池组件内等效二极管 P - N 结内流过的反向饱和电流; T —太阳能电池组件的温度; R_s —太阳能电池组件串联等效电阻; R_{sh} —太阳能电池组件并联等效电阻; q —电子电荷常量; k —玻耳兹曼常数 ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$); n —二极管因子 ($1 < n < 2$)。

其中光电流 I_1 与入射光的光强 $G(\text{W}/\text{m}^2)$ 和温度有关:

$$I_1 = I_1(T_1)(1 + K_o(T - T_1)) \quad (5)$$

$$I_1(T_1) = G I_{sc}(T_1, \text{nom}) / G(\text{nom}) \quad (6)$$

$$K_o = (I_{sc}(T_2) - I_{sc}(T_1)) / (T_2 - T_1) \quad (7)$$

式中: $G(\text{nom})$ —额定光照强度(光强为 $1\,000 \text{ W}/\text{m}^2$); T_1 —温度 1 (25°C); T_2 —温度 2 (75°C); T —环境温度; $I_{sc}(T_1)$ —在温度为 T_1 、光照强度为额定强度 ($1\,000 \text{ W}/\text{m}^2$) 时的短路电流; $I_{sc}(T_2)$ —在温度为 T_2 、光照强度为额定强度 ($1\,000 \text{ W}/\text{m}^2$) 时的短路电流; G —太阳辐射强度; $G(\text{nom})$ —标准太阳辐射强度。

关于反向饱和电流,文献[2]中给出式(8)~(11)来求解:

$$I_o = I_o(T_1) \left[\frac{T}{T_r} \right]^{3/n} \exp \left[\frac{qE_g}{nK} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (8)$$

$$I_o(T_1) = I_{sc}(T_1) / (\exp[qV_{oc}(T_1)/nkT_1] - 1) \quad (9)$$

其中: E_g —禁带宽度; $V_{oc}(T_1)$ —光电池在温度为 T_1 的开路电压。

串联等效电阻为:

$$R_s = -dV/dI_{oc} - 1/\theta \quad (10)$$

$$\theta = I_o(T_1) \frac{q}{nkT_1} \exp[qV_{oc}(T_1)/nkT_1] \quad (11)$$

1.2 $M \times N$ 光伏阵列的数学模型

1.1 节给出了光伏电池单体的数学模型,对于 $M \times N$ (N 个电池串联然后 M 列并联) 的光伏阵列来

说,根据电源的串并联定理,其输出电流按照下面公式得出。

$$I=MI_1-MI_0\left[\exp\left(\frac{V/N+R_sI}{nkT/q}\right)-1\right]-\frac{V+R_sI}{NR_{sh}} \quad (12)$$

通常情况 R_{sh} 为千欧数量级的,所以式(12)中的 $\frac{V+R_sI}{NR_{sh}}$ 为很小的值,可以省略。另本文以 1×36 的光伏阵列 SolarexMSX60 60W 作为仿真对象,所以式(12)可以化解为:

$$I=I_1-I_0\left[\exp\left(\frac{V/N+R_sI}{nkT/q}\right)-1\right] \quad (13)$$

可以看出,式(13)是关于 I 的超越方程,要使用迭代法对其进行求解。

2 迭代法求解光伏阵列伏安特性方程

2.1 不动点迭代法

如果要求单变量方程 $f(x)=0$ 的根,可以先把 $f(x)=0$ 移项,改写成 $x=\phi(x)$ 。若要求 x^* 满足 $f(x)=0$,也就是满足 $x^*=\phi(x^*)$;反之亦然。这时可以称 x^* 为函数 $\phi(x)$ 的一个不动点。这样求 $f(x)$ 的零点就是等价于求 $\phi(x)$ 的不动点,选择一个初始值 x_0 ,就可以把它带入下边的公式求得: $x_1=\phi(x_0)$,然后如此反复迭代计算, $x_{k+1}=\phi(x_k)$ 这里 $\phi(x)$ 称为迭代函数。这种迭代法是一种逐次逼近的方法,其基本思想是将隐式方程 $f(x)=0$ 归结为一组显式的计算公式 $x=\phi(x)$,也就是说,迭代过程实质上是一个逐步显示化的过程。图 2 用几何图像来显示整个迭代过程。

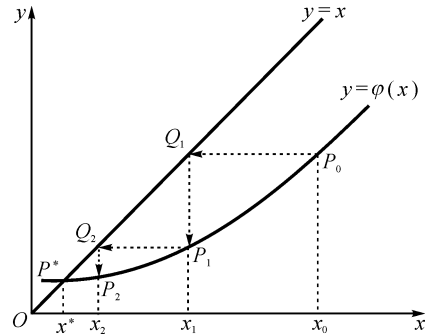


图 2 不动点迭代法

Fig. 2 Fixed-point iteration method

由图 2 可以看出:方程 $x=\phi(x)$ 的求根问题在 xy 平面上就是要确定曲线 $y=\phi(x)$ 与直线 $y=x$ 的交点 p 。对于 x^* 的某个近似值 x_0 ,它可以在曲线 $y=\phi(x)$ 上可确定一点 p_0 ,这个以 x_0 为横坐标,而纵坐标为 $\phi(x_0)=x_1$ 。过 p_0 引平行 x 轴的直线,设此直线交直线 $y=x$ 于点 Q_1 ,然后过 Q_1 再作平行于 y 轴的直线,这条直线与曲线 $y=\phi(x)$ 的交点记作 p_1 ,这时 p_1 点的横坐标为 x_1 ,纵坐标则等于 $\phi(x_1)=x_2$ 。按图 2 中箭头所示的路径继续做下去,在曲线 $y=\phi(x)$ 上得到点列 p_1, p_2, \dots ,其横坐标分别为依公式 $x_{k+1}=\phi(x_k)$ 求得的迭代值 x_1, x_2, \dots 。如果点列 $\{P_k\}$ 趋向于点 P^* ,则相应的迭代值 x_k 收敛到所求的根 x^* ,从而得到方程 $f(x)=0$ 的根^[9]。

2.2 牛顿迭代法

对于方程 $f(x)=0$,如果 $f(x)$ 是线性函数,则它的根就容易求得了。牛顿法实质上是一种把非线性方程线性化方法,其基本思想是将非线性方程 $f(x)=0$,逐步归结为某种线性方程来求解。设已知方程 $f(x)=0$ 有近似根 x_k (假定 $f'(x_k) \neq 0$),将函数 $f(x)$ 在点 x_k 展开,有 $f(x) \approx f(x_k) + f'(x_k)(x-x_k)$,于是方程 $f(x)=0$ 可近似表示为 $f(x_k) + f'(x_k)(x-x_k)=0$ 。这是个线性方程,记其根为 x_{k+1} 的计算公式为: $x_{k+1}=x_k - \frac{f(x_k)}{f'(x_k)}$,这就是牛顿迭代法的迭代公式。牛顿法的几何解释也明显。方程 $f(x)=0$ 的根 x^* 可解释为曲线 $y=f(x)$ 与 x 轴的交点的横坐标(图 3)^[9]。它可以由 P_k 的切线与 x 轴的交点得到 x_{k+1} ,一步步逼近并最终收敛于 x^* 。从而得到方程 $f(x)=0$ 的根。

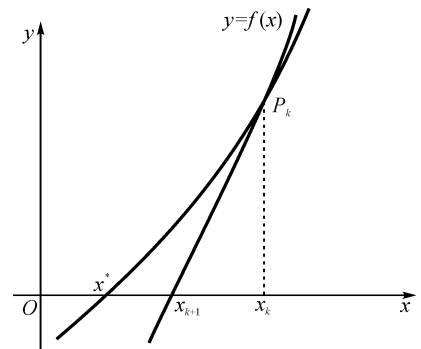


图 3 牛顿迭代法

Fig. 3 Newton iteration method

2.3 不动点迭代法与牛顿法求解超越方程

通过观察式(13),可以把光伏阵列的伏安特性方程抽象为求解方程:

$$x=K_1\exp(K_2x)+K_3$$

如果取 $K_1=1,K_2=-1,K_3=0,x_1=0.5$,进行迭代,得到表 1 的结果。由表 1 可知,用牛顿法求解光伏阵列特性的超越方程效果比不动点法显著。

3 光伏阵列伏安特性仿真结果

本文分别采用牛顿迭代法和不动点迭代法求解光伏阵列的解析模型,得到在标准光照和温度下的仿真结果,如图 4 至图 6 所示。

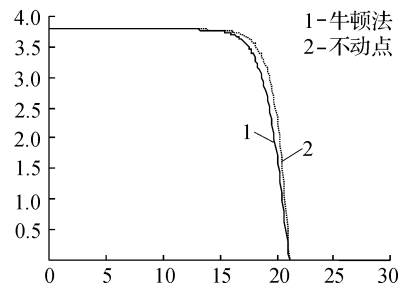


图 4 1 次迭代结果图
Fig. 4 First iteration result

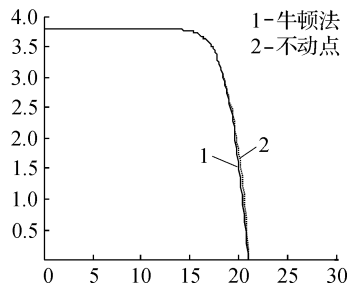


图 5 3 次迭代结果
Fig. 5 Third iteration result

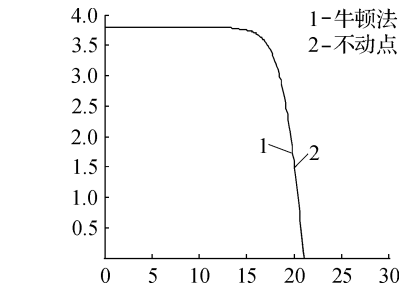


图 6 21 次迭代结果
Fig. 6 Twenty-first iteration result

由图 4~6 可以看出,在迭代次数较小时,牛顿迭代法和不动点迭代法由于收敛速度不一致,仿真出来的曲线存在一定的误差,但是误差不是很大,在 6% 以下;当迭代次数大于 20 次时,2 种迭代算法得到的伏安特性曲线基本重合,可以把该曲线作为 SolarexMSX60 的伏安特性曲线的精确解。

4 结 语

本文从光伏电池的物理模型出发得到它的数学模型,然后根据光伏阵列的串并联关系推导出光伏阵列的数学模型,最后分别用牛顿迭代法和不动点迭代法求解光伏阵列的伏安特性超越方程的解析解。仿真实验证明,该模型可以得到光伏阵列的较好的光伏特性,并可以进一步应用在光伏系统的仿真当中。

参考文献:

[1] 王长江. 基于 MATLAB 的光伏电池通用数学模型[J]. 电力科学与工程,2009,25(4):11-14.
[2] VIOREL B. Dynamic model of a complex system including PV cells, electric battery, electrical motor and water pump [J]. Energy,2003,28(12):1165-1181.
[3] OMAN H. Space solar power development[J]. IEEE/AES Aerospace and Electronic Systems Magazine,2000,15(2):3-8.
[4] 苏建徽,余世杰,赵为,等. 硅太阳能电池工程用数学模型[J]. 太阳能学报,2001,22(4):409-412.
[5] 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(5):1248-1251.
[6] HABIBI M, YAZDIZADEH A. New MPPT controller design for PV arrays using neural networks[J]. Lecture Notes in Computer Science,2009,5552(2):1050-1058.
[7] 王正林,王胜开,陈国顺,等. MATLAB/SIMULINK 与控制系统仿真[M]. 北京:电子工业出版社,2009.
[8] 欧阳名三,余世杰,沈玉樑. 一种太阳能电池 MPPT 控制器实现及测试方法的研究[J]. 电子测量与仪器学报,2004,18(2):30-34.
[9] 李庆扬,王能超,易大义. 数值分析[M]. 北京:清华大学出版社,2001.