

9-14-2020

Study on theconvergence rate of different iterative algorithms in solving PV model parameters

Nan SHI

The Engineering Training and Basic Experimental Center, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150022 ,China

Xianhui ZHU

School of Electrical and Control Engineering, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150022 , China

Yidan LI

School of Electrical and Control Engineering, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150022 , China

ying YANG

School of Electrical and Control Engineering, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150022 , China

Pengtao YUAN

The Engineering Training and Basic Experimental Center, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150022 ,China

Follow this and additional works at: <https://jepst.researchcommons.org/journal>

Recommended Citation

SHI, Nan; ZHU, Xianhui; LI, Yidan; YANG, ying; and YUAN, Pengtao (2020) "Study on theconvergence rate of different iterative algorithms in solving PV model parameters," *Journal of Electric Power Science and Technology*. Vol. 35: Iss. 3, Article 7.

DOI: 10.19781/j.issn.16739140.2020.03.007

Available at: <https://jepst.researchcommons.org/journal/vol35/iss3/7>

This Article is brought to you for free and open access by Journal of Electric Power Science and Technology. It has been accepted for inclusion in Journal of Electric Power Science and Technology by an authorized editor of Journal of Electric Power Science and Technology.

不同迭代算法求解光伏模块参数的收敛速度

师楠¹, 朱显辉², 李一丹², 杨莹², 苑鹏涛¹

(1. 黑龙江科技大学工程训练与基础实验中心, 黑龙江 哈尔滨 150022; 2. 黑龙江科技大学电气与控制工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150022)

摘要: 迭代算法在确定光伏模块参数中的应用非常广泛。为研究不同迭代算法求解光伏模块参数时的收敛速度, 在简要概括牛顿-拉夫逊和高斯-赛德尔迭代算法特点的基础上, 结合光伏模块输出特性的非线性超越方程, 详细推导了牛顿-拉夫逊和高斯-赛德尔迭代求解光伏模块输出参数的等式。利用这些等式分别对 3 种不同结构的光伏模块求解参数, 并对结果进行分析和验证。其结果表明, 在同等精度的前提下, 牛顿-拉夫逊迭代法对初值的选取不敏感且收敛速度较快, 更加适用于光伏模块参数计算。

关键词: 光伏模块; 迭代算法; 牛顿-拉夫逊; 高斯-赛德尔; 收敛速度; 初值敏感性

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.03.007 中图分类号: TM914.4 文章编号: 1673-9140(2020)03-0055-06

Study on the convergence rate of different iterative algorithms in solving PV model parameters

SHI Nan¹, ZHU Xianhui², LI Yidan², YANG Ying², YUAN Pengtao¹

(1. The Engineering Training and Basic Experimental Center, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150022, China;
2. School of Electrical and Control Engineering, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150022, China)

Abstract: The iterative algorithm is widely used in determining the parameters of photovoltaic models. In order to study the convergence speed of using the different iterative to solve the PV parameters, on the basis of brief introduction on the characteristics of Newton-Raphson and Gauss-Seidel iterative algorithms, combining with non-linear transcendental equation for the output characteristics of photovoltaic models, the equations of the output parameters for the photovoltaic models are deduced in detail with Newton-Raphson and Gauss-Seidel iterative method. We use the equations to derive the PV parameters of three different photovoltaic modules and analyze and test these results. The results show that Newton-Raphson iterative method is insensitive to the selection of initial values and has faster convergence rate under the same precision. Such method is more suitable for the calculation of photovoltaic model parameters.

Key words: photovoltaic models; iterative algorithm; Newton-Raphson; Gauss-Seidel; convergence speed; initial value sensitivity

收稿日期: 2017-11-30; 修回日期: 2018-07-14

基金项目: 国家自然科学基金(51677057); 黑龙江省普通本科高等学校青年创新人才培养计划(UNPYSCT-2017144)

通信作者: 师楠(1982-), 女, 讲师, 主要从事可再生能源与电网调度研究; E-mail: snhit@sina.cn

太阳能发电具有可持续发展和降低碳排放等优点,近年来发展势头迅猛。截至 2016 年底,全球光伏发电累计装机容量已达 305 GW,新增装机容量 70 GW,中国累计装机容量 77.42 GW,新增装机容量 34.54 GW,均占全球第一位。随着装机容量的快速增长,对光伏系统动态响应能力的需求也将日益提高,有必要对其进行有针对性的深入研究。

光伏模块是太阳能发电系统功率转换的基本单元,由若干个单体光伏电池串并联而成,其输出电流-电压(I - V)关系为非线性超越方程。为在设计阶段对光伏系统的性能进行分析,需对非线性超越方程中的未知参量进行求解,这是给出准确的光伏模块输出特性曲线的必要前提^[1],也是对光伏发电进行最大功率跟踪的重要基础。为此,设计适当的数值求解方法计算光伏模块参数已受到国内外科研工作者的广泛关注^[2]。

牛顿-拉夫逊迭代算法(以下简称牛顿迭代)是当前求解光伏模块参数的主要方法^[3],文献[4-5]分别构造了牛顿迭代算法,实现了光伏输出曲线和电池参数的数值求解;文献[6-7]针对奇异矩阵和参数漂移等问题导致的迭代不收敛现象,分别给出了改进的牛顿迭代方法。近年来,高斯-赛德尔迭代算法(以下简称高斯迭代)在光伏模块参数求解中得到了较为广泛的应用^[8],文献[9-10]分别给出了利用高斯迭代算法求解光伏模块参数的方法;文献[11-12]则结合最大功率点参数,给出了精度更高的光伏参数求解思路。

可见,在利用牛顿和高斯迭代算法求解光伏模块参数的研究中,主要集中在迭代法的嵌入求解、保证收敛和提高精度等方面,而准确求解光伏模块参数的目的在于改善最大功率跟踪的精度,提高光伏发电效率。为保证光伏发电最大功率点的有效跟踪,要求迭代算法具有较快的计算时间^[13]。因此,对比 2 种迭代算法求解参数时的收敛速度,并给出量化结果尤为重要,而这一问题尚未得到科研人员的重点关注。

针对上述问题,该文以单二极管电路模型为例,在详细推导光伏模块 5 个未知参数数学方程的基础上,针对 3 种不同类型的光伏模块,对牛顿和高斯迭代算法在求解参数时的收敛速度和初值敏感性进行

了对比分析。最后,给出了相应的结论,力图为光伏发电评估、建模和最大功率跟踪等提供借鉴。

1 光伏模块数学模型

光伏模块电路模型包括理想单二极管模型、单二极管 R_s 模型、单二极管 R_s 、 R_{sh} 模型和双二极管模型等。模型越复杂,精度越高,涉及参数越多,建模和求解时间也越长。单二极管 R_s 、 R_{sh} 模型在复杂性和精度之间取得较好的折中,应用最为广泛。

以单二极管 R_s 、 R_{sh} 模型为例,在忽略二极管饱和和暗电流中的常数项后,输出电流 I 与电压 V 之间的关系满足^[14]:

$$I = I_{ph} - I_o \exp\left(\frac{V + IR_s}{N_s V_t}\right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

式中 I_{ph} 为光生电流, I_o 为二极管饱和暗电流, N_s 为串联电池数, R_s 和 R_{sh} 分别为串、并联电阻。 V_t 为结热电压,满足:

$$V_t = \frac{KTA}{q} \quad (2)$$

式中 K 为玻尔兹曼常数; T 为二极管开氏温度; A 为二极管理想因子; q 为电子电量。

将数据手册给定的开路电压(V_{oc} , 0)和短路电流点(0, I_{sc})分别带入式(1),可得:

$$I_{ph} = I_o \exp\left(\frac{V_{oc}}{N_s V_t}\right) + \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (3)$$

$$I_{sc} = I_{ph} - I_o \exp\left(\frac{I_{sc} R_s}{N_s V_t}\right) - \frac{I_{sc} R_s}{R_{sh}} \quad (4)$$

将式(3)带入式(1),可得:

$$I = I_o \left\{ \exp\left(\frac{V_{oc}}{N_s V_t}\right) - \exp\left(\frac{V + IR_s}{N_s V_t}\right) \right\} + \frac{V_{oc} - V - IR_s}{R_{sh}} \quad (5)$$

将式(3)带入式(4),且忽略 $R_s(I_{sc} R_s \ll V_{oc})$,可得:

$$I_o = \left(I_{sc} - \frac{V_{oc} - I_{sc} R_s}{R_{sh}} \right) \left/ \exp\left\{ \left(\frac{V_{oc}}{N_s V_t} \right) \right\} \right. \quad (6)$$

将最大功率点(V_m , I_m)带入式(1),可得:

$$I_m = I_{ph} - I_o \exp\left(\frac{V_m + I_m R_s}{n_s V_t}\right) - \frac{V_m + I_m R_s}{R_{sh}} \quad (7)$$

将式(3)、(4)带入式(7)中,消去 I_o 、 I_{ph} ,并进行

相应的变换,得到:

$$V_t = (V_m + I_m R_s - V_{oc}) / \left\{ N_s \ln \left(\frac{(I_{sc} - I_m)(R_{sh} + R_s) - V_m}{I_{sc}(R_{sh} + R_s) - V_{oc}} \right) \right\} \quad (8)$$

由最大功率点处功率对电压导数为 0,有

$$R_s = \left[\frac{V_{oc} - V_m + N_s V_t \ln(V_m N_s V_t - I_m N_s V_t (R_{sh} + R_s))}{(I_{sc} R_{sh} - V_{oc} + I_{sc} R_s)(I_m R_s - V_m)} \right] / I_m \quad (9)$$

利用短路电流点(0, I_{sc})处电流对电压导数等于负的并联电阻的倒数,可得

$$R_{sh} = \frac{N_s V_t (R_{sh} + R_s)}{N_s V_t + (I_{sc} R_{sh} - V_{oc} + I_{sc} R_s) \exp\left(\frac{I_{sc} R_s - V_{oc}}{N_s V_t}\right)} + \frac{R_s (I_{sc} R_{sh} - V_{oc} + I_{sc} R_s) \exp\left(\frac{I_{sc} R_s - V_{oc}}{N_s V_t}\right)}{N_s V_t + (I_{sc} R_{sh} - V_{oc} + I_{sc} R_s) \exp\left(\frac{I_{sc} R_s - V_{oc}}{N_s V_t}\right)} \quad (10)$$

基于式(3)、(6)、(8)~(10)可对光伏模块 5 个未知参数进行求解,式(8)~(10)为隐函数超越方程,需

$$g'(R_{sh}) = \frac{N_s V_t + R_s I_{sc} \exp\left(\frac{I_{sc} R_s - V_{oc}}{N_s V_t}\right)}{N_s V_t + [I_{sc}(R_s + R_{sh}) - V_{oc}] \exp\left(\frac{I_{sc} R_s - V_{oc}}{N_s V_t}\right)} - \frac{N_s V_t (R_{sh} + R_s) + R_s [I_{sc}(R_{sh} + R_s) - V_{oc}] \exp\left(\frac{I_{sc} R_s - V_{oc}}{N_s V_t}\right)}{N_s V_t (R_{sh} + R_s) + [I_{sc}(R_{sh} + R_s) - V_{oc}] \exp\left(\frac{I_{sc} R_s - V_{oc}}{N_s V_t}\right)} \times \frac{I_{sc} \exp\left(\frac{I_{sc} R_s - V_{oc}}{N_s V_t}\right)}{N_s V_t (R_{sh} + R_s) + [I_{sc}(R_{sh} + R_s) - V_{oc}] \exp\left(\frac{I_{sc} R_s - V_{oc}}{N_s V_t}\right)} - 1 \quad (13)$$

牛顿迭代求解的具体步骤:

① 给定初始仿真条件,光伏模块串联电路 $R_s = 0 \Omega$, 并联电阻 $R_{sh} = 1000 \Omega$, 热电压 $V_t = 0 \text{ V}$, 最大迭代次数 $k_{max} = 10^7$, $k = 1$;

② 若 $k \leq k_{max}$, 利用式(8)计算热电压 V_t , 利用式(10)迭代计算 $R_s(k+1)$, 利用式(11)迭代计算 $R_{sh}(k+1)$; 若 $k \geq k_{max}$, 显示迭代不收敛, 结束仿真;

对其进行迭代求解, 求解过程中涉及到变量 V_t 的值, 因而, 将式(8)~(10)一起进行迭代计算。式(3)、(6)为显函数, 在已知等号右侧的参数时, 可直接进行计算, 为节省计算时间, 无需对其进行迭代计算。

2 牛顿迭代算法求解参数

牛顿迭代算法的基本思想为利用一阶泰勒展开式对函数进行数值逼近, 其中涉及到偏导数的求解, 需将式(9)、(10)变换为 $g(R_{s/sh}) = f(R_{s/sh}) - R_{s/sh} = 0$ 的形式, 并求 $g(R_{s/sh})$ 对 $R_{s/sh}$ 的偏导数, R_s 和 R_{sh} 离散化迭代形式为

$$R_{s/sh}(k+1) = R_{s/sh}(k) - \frac{g(R_{s/sh}(k))}{g'(R_{s/sh}(k))} \quad (11)$$

其中 $g(R_s)$ 对 R_s 的偏导数为

$$g'(R_s) = \frac{-N_s V_t}{V_m - I_m (R_{sh} + R_s)} - 1 - \frac{[V_m N_s V_t - I_m N_s V_t (R_{sh} + R_s)]}{I_m [V_m - I_m (R_{sh} + R_s)]} \times \frac{[I_{sc} I_m (R_{sh} + 2R_s) - I_m V_{oc} - I_{sc} V_m]}{[I_{sc}(R_{sh} + R_s) - V_{oc}] [I_m R_s - V_m]} \quad (12)$$

$g(R_{sh})$ 对 R_{sh} 的偏导数为

③ 分别计算 $e1 = R_s(k+1) - R_s(k)$, $e2 = R_{sh}(k+1) - R_{sh}(k)$ 的绝对值, 并取 $\max(e1, e2)$;

④ 若 $\max(e1, e2) \leq 1e-5$, 利用式(2)计算二极管理想因子 A , 利用式(6)计算二极管饱和暗电流 I_0 , 利用式(4)计算光生电流 I_{ph} ; 否则, 令 $k = k+1$, $R_s(k) = R_s(k+1)$, $R_{sh}(k) = R_{sh}(k+1)$, 返回步骤②。

建模流程如图 1 所示。

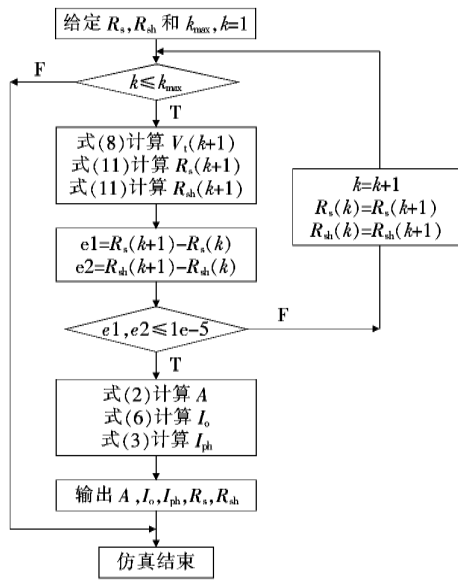


图1 牛顿迭代法求解流程

Figure 1 Flow chart of Newton iteration method

3 高斯迭代算法求解参数

高斯迭代法是一种以雅克比迭代为基础构建的加速迭代方法,其基本思想:若待计算向量为 (x_1, x_2, \dots, x_n) ,在第 $k+1$ 次迭代计算 $x_i(k+1)$ 时,可以利用 $[x_1(k+1), x_2(k+1), \dots, x_{i-1}(k+1), x_i(k), \dots, x_n(k)]$ 进行迭代计算,以求加快算法的收敛速度。高斯迭代具体建模流程如图2所示。

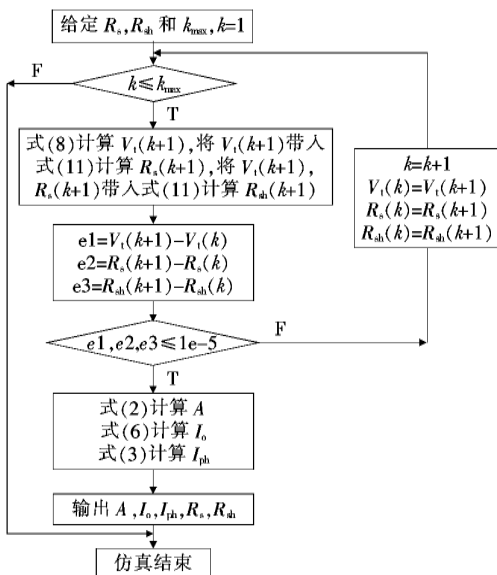


图2 高斯迭代法求解流程

Figure 2 Flow chart of Gauss iteration method

高斯迭代求解的具体步骤与牛顿迭代基本相同,区别之处在于步骤②中。高斯迭代求解步骤②:若 $k \leq k_{\max}$,利用式(8)计算热电压 V_i ,利用式(10)迭代计算 $R_s(k+1)$,把式(10)迭代计算 $R_s(k+1)$ 带入到式(11)中,并利用式(11)迭代计算 $R_{sh}(k+1)$ 。

4 迭代算法的收敛速度和初值敏感度分析

为考察2种迭代算法的收敛速度,分别对单晶硅 shell SQ80、多晶硅 KC200GT 和薄膜 shell ST40 光伏模块进行迭代计算,3种光伏模块的参数来自于文献[15]。采用图1、2所示流程对不同结构的电池参数进行计算,其结果完全一致,如表1所示。

表1 不同迭代法计算结果

Table 1 Calculation results of different iterative methods

光伏模块	R_s/Ω	R_{sh}/Ω	A	I_{ph}/A	I_o/A
KC200GT	0.217	951.95	1.342	8.212	$1.71e-7$
SQ80	0.350	12 437.31	1.009	4.850	$3.42e-10$
ST40	1.423	952.91	1.289	2.684	$1.41e-7$

基于表1所得的电池参数,结合已有资料中给定的最大功率点数据对牛顿和高斯迭代的计算精度进行校验,在曲线拟合点数为501个点时, KC200GT、SQ80 和 ST40 最大功率点对应的电压和电流分别为7.613 6 A、26.32 V, 4.577 7 A、17.527 2 V 和 2.412 7 A、16.589 6 V,证明了2种迭代算法在求解光伏特性曲线时的准确性。

进一步对高斯(在表中以GS表示)和牛顿迭代(在表中以NR表示)算法收敛速度和迭代次数进行统计,结果如表2所示。

表2 不同迭代法收敛速度

Table 2 Convergence rates of different iterative methods

光伏模块	GS速度	GS次数	NR速度	NR次数
KC200GT	0.346	11 366	0.251	32
SQ80	2.790	198 320	0.254	57
ST40	0.245	2 929	0.248	29

需要说明的一点是,在计算迭代收敛速度时,由于执行仿真操作的计算机后台有其他程序实时运行,导致不同时刻对同一光伏模块,以同一迭代法进

行计算的收敛时间会有较大差别,但达到收敛时的迭代次数维持不变。为与迭代次数相互验证,该文仍然给出了收敛速度的计算结果,并取同一算法分别连续运行 10 次的平均收敛时间作为收敛速度的数值。

由表 2 可以看出,在同一容许偏差下,牛顿和高斯迭代均能达到给定精度,但高斯算法所需的迭代次数远远大于牛顿迭代,导致高斯迭代的收敛速度慢于牛顿迭代。但高斯迭代算法不需要求解光伏模块超越方程的偏导数,相比于牛顿迭代较为繁琐的求偏导过程,实现起来相对简单。

为进一步讨论 2 种迭代算法求解光伏输出特性时对初始值的敏感程度,将初始值改为 $R_s = 0.1 \Omega$, 并联电阻 $R_{sh} = 10\ 000 \Omega$, 其他参数不变,所得求解时间和迭代次数如表 3 所示。

表 3 不同初值下迭代法收敛速度

Table 3 Convergence rates of iterative methods at different initial values

光伏模块	GS 速度	GS 次数	NR 速度	NR 次数
KC200GT	0.430	17 480	0.252	33
SQ80	2.320	164 320	0.251	56
ST40	0.236	2 515	0.248	30

由表 3 可见,改变初值后高斯迭代的计算时间共缩短了 0.395 s,迭代次数累计减小了 28 300 次,而牛顿迭代法在改变初值后的计算时间共增加了 0.003 s,迭代次数增加了 1 次。

由于不同时段内的迭代计算时间存在一定差异,因此,该文以迭代次数为基准分析 2 种迭代法对初值的敏感程度。可知,在高斯和牛顿迭代取不同初值时,牛顿迭代法的迭代次数几乎不变,而达到同一精度时高斯迭代次数的变化较大,说明高斯迭代对初始值的敏感性高于牛顿迭代法,在采用高斯迭代计算光伏特性输出曲线时应予以关注。可见,收敛速度较快且对初值不敏感的牛顿迭代法更加适用于光伏模块参数计算。

5 结语

求解光伏模块参数的目的在于确定光伏输出 $I-V$ 曲线,不同工况下输出特性曲线的拟合仍需再

次采用迭代算法计算。为得到较高的拟合精度,需对 $I-V$ 特性曲线多个数据点进行迭代计算,迭代算法能否快速、稳定地收敛直接影响到最大功率跟踪能否可靠进行。

该文推导了求解光伏电池 5 个未知参数的数学模型,构造了牛顿和高斯迭代法求解光伏模块输出参数的等式,并分别对单晶硅、多晶硅和薄膜光伏电池的参数进行迭代求解,对结果进行比较分析,得出以下结论:采用牛顿和高斯迭代法均能达到所需精度,但牛顿迭代法得到数值解所需的迭代次数少于高斯迭代,同时具有更快的收敛速度;并且牛顿迭代法对所选取初值的敏感程度远低于高斯迭代,因此牛顿迭代法在光伏电池参数计算领域具有更大的优势,可为光伏发电的仿真设计和工程实践提供参考。

参考文献:

- [1] 师楠,周苏荃,李一丹,等. 基于 Bezier 函数光伏阵列建模对比仿真研究[J]. 可再生能源,2016,34(5):656-659.
SHI Nan,ZHOU Suquan,LI Yidan,et al. Comparison of simulation modeling of PV array based on Bezier function[J]. Renewable Energy Resources,2016,34(5):656-659.
- [2] 杨晓梅,刘欢,闻枫,等. 光伏微电网孤岛运行模式下冲击负荷跟踪补偿控制[J]. 电力科学与技术学报,2019,34(4):115-122.
YANG Xiaomei,LIU Huan,WEN Feng,et al. Tracking and compensating control of impulse load for PV micro-grid in the islanding operation mode[J]. Journal of electric power science and technology,2019,34(4):115-122.
- [3] 胡文斌,陈小伟,王宗. 加权牛拉法在电力系统中的应用[J]. 智慧电力,2018,46(3):68-73.
HU Wenbin,CHEN Xiaowei,WANG Zong. Application of weighted newton-raphson method in power system[J]. Smart Power,2018,46(3):68-73.
- [4] 崔岩,蔡炳煌,李大勇,等. 太阳能光伏模板仿真模型的研究[J]. 系统仿真学报,2006,18(4):829-831+834.
CUI Yan,CAI Minghuang,LI Dayong,et al. Study on simulation model of PV module[J]. Journal of System Simulation,2006,18(4):829-831+834.
- [5] Yahya-Khotbehsara A,Shahhoseini A. A fast modeling

- of the double-diode model for PV modules using combined analytical and numerical approach[J]. *Solar Energy*, 2018,162: 403-409.
- [6] Imane D, Samia H, Hadj A A. A new approach for modelling the aging PV module upon experimental *I-V* curves by combining translation method and five-parameters model [J]. *Electric Power Systems Research*, 2018,163: 231-241.
- [7] 王康,葛晓慧,辛焕海,等. 基于牛顿-拉夫逊法的光伏面板模型参数计算[J]. *电力系统自动化*, 2010, 34(20):94-98+107.
WANG Kang, GE Xiaohui, XIN Huanhai, et al. Parameters calculation of photovoltaic panel model based on newton-raphson method [J]. *Automation of Electric Power System*, 2010, 34(20):94-98+107.
- [8] Shongwe S, Hanif M. Comparative analysis of different single-diode PV modeling methods[J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2015, 5(3):938-946.
- [9] Chatterjee A, Keyhani A, Kapoor D. Identification of photovoltaic source models[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2011, 26(3):883-889.
- [10] Shongwe S, Hanif M. Gauss-Seidel iteration based parameter estimation for a single diode model of a PV module[C]//2015 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC), London, ON, Canada: IEEE, 2016.
- [11] 胡庆焱,王冰,张鹏飞,等. 基于高斯-赛德尔迭代法的光伏电池参数辨识与最大功率点基准曲线的研究[J]. *可再生能源*, 2015, 33(12):1803-1808.
HU Qingyi, WANG Bing, ZHANG Pengfei, et al. Research on parameter solution algorithm and reference curve at maximum power point of photovoltaic model based on Gauss-Seidel iteration[J]. *Renewable Energy Resources*, 2015, 33(12):1803-1808.
- [12] Kareem M S A, Saravanan M. A new method for accurate estimation of PV module parameters and extraction of maximum power point under varying environmental conditions [J]. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 2016, 24(4): 2028-2041.
- [13] Sahu H S, Nayak S K. Numerical approach to estimate the maximum power point of a photovoltaic array[J]. *Iet Generation Transmission and Distribution*, 2016, 10(11):2670-2680.
- [14] 师楠,周苏荃,李一丹,等. 基于 Bezier 函数的光伏电池建模[J]. *电网技术*, 2015, 39(8): 2195-2200.
SHI Nan, ZHOU Suquan, LI Yidan, et al. PV cell modeling based on Bezier function[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(8): 2195-2200.
- [15] Et-Torabi K, Nassar-Eddine I, Obbadi A, et al. Parameters estimation of the single and double diode photovoltaic models using a Gauss-Seidel algorithm and analytical method: A comparative study[J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 148:1041-1054.