

与太阳能电池研究相适配的双原点坐标系

张忠政 程晓舫[†]

(中国科学技术大学热科学和能源工程系, 合肥 230026)

(2013年12月3日收到; 2014年2月18日收到修改稿)

光生电流是太阳能电池电流方程中的一个关键数值,但在单原点坐标系中无法进行标示,因此设计了双原点坐标系.在双原点坐标系中,通过对基尔霍夫电流定律如何进行标示的讨论,实现了太阳能电池等效电路中各电流项和电压项的标示.双原点坐标系清晰地指出:光生电流与短路电流之差随短路电流增大而增大,只有在低光照下光生电流与短路电流才大致相当,在高光照下两者差异不可忽略;太阳能电池输出功率与内耗功率在光生电流总功率中的占比随光生电流会发生改变,若要求输出功率大于内耗功率,则太阳能电池不宜工作在高光照下.双原点坐标系为太阳能电池的研究提供了一个适配的坐标系.

关键词: 双原点坐标系, 太阳能电池, 基尔霍夫电流定律, 内耗功率

PACS: 88.40.fc, 88.40.H-, 88.40.hj, 88.40.jj

DOI: 10.7498/aps.63.118801

1 引言

把基尔霍夫电流定律应用于太阳能电池电路^[1-7](图1),即可写出太阳能电池电流方程,

$$\begin{aligned}
 I_{\text{ph}} &= I + I_{\text{D}} + I_{\text{sh}} \\
 &= I + I_0 \left[\exp\left(\frac{V + IR_{\text{s}}}{nV_{\text{th}}}\right) - 1 \right] \\
 &\quad + \frac{V + IR_{\text{s}}}{R_{\text{sh}}}, \tag{1}
 \end{aligned}$$

式中, I 为负载电流, V 为负载电压, I_{ph} 为光生电流, I_{D} 为二极管电流, I_{sh} 为并联内阻电流, I_0 为二极管反向饱和电流, V_{th} 为热电势, n 为二极管理想因子, R_{s} 为串联内阻, R_{sh} 为并联内阻.

由(1)式绘制太阳能电池的伏安曲线,需要知道 I_{ph} , I_0 , n , R_{s} , R_{sh} 等五个参数.在 I - V 坐标系中只能反映等号右边的负载电压 V 和负载电流 I ,无法描述等号左边的光生电流 I_{ph} .

当认为 $I_{\text{ph}} \approx I_{\text{sc}}$ ^[8-13],从而使用

$$\begin{aligned}
 I_{\text{sc}} &\approx I + I_0 \left[\exp\left(\frac{V + IR_{\text{s}}}{nV_{\text{th}}}\right) - 1 \right] \\
 &\quad + \frac{V + IR_{\text{s}}}{R_{\text{sh}}}. \tag{2}
 \end{aligned}$$

作为太阳能电池研究的近似表述时,由于用短路电流 I_{sc} 表述光生电流 I_{ph} ,此时使用 I - V 坐标系就可以描述负载电压和电流以及光生电流了,但仍然无法描述(1)式中的基尔霍夫电流定律,也无法在 I - V 坐标系中描述图1中二极管端电压 V_{D} 、二极管电流 I_{D} 、并联内阻电流 I_{sh} 以及串联内阻两端的电压 IR_{s} .

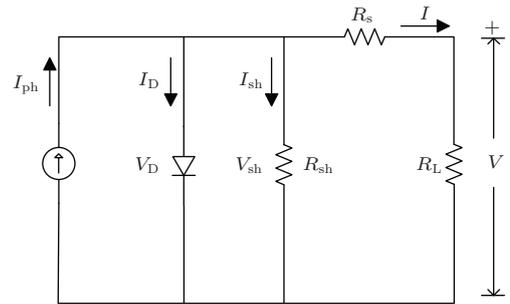


图1 太阳能电池电路示意

在不做 $I_{\text{ph}} \approx I_{\text{sc}}$ 的假设时,为了能够同时描述太阳能电池等效电路中的各电流 I_{ph} , I_{D} , I_{sh} 和各电压项 V_{D} , IR_{s} ,本文对 I - V 坐标系进行了改造.

[†] 通讯作者. E-mail: xfcheng@ustc.edu.cn

2 双原点坐标系

图 2 中的坐标系 $[O_{PV}]-V_{PV}O_{Diode}$ 就是研究太阳能电池普遍使用的 $I-V$ 坐标系, 下标“PV”表示为太阳能电池坐标系, O_{PV} 为坐标原点, $O_{PV}-V_{PV}$ 为沿正方向的电压坐标轴, $O_{PV}-O_{Diode}$ 为沿正方向的电流坐标轴, 图中实线为太阳能电池伏安曲线. 在短路点, 太阳能电池 $I-V$ 方程为

$$I_{ph} = I_{sc} + I_0 \left[\exp \left(\frac{I_{sc} R_s}{nV_{th}} \right) - 1 \right] + \frac{I_{sc} R_s}{R_{sh}}. \quad (3)$$

显然只要有串联内阻 R_s , 就始终会有 $I_{ph} > I_{sc}$, 因此只有延长电流坐标轴, 才能把光生电流 I_{ph} 表现出来. 在坐标系 $[O_{PV}]-V_{PV}O_{Diode}$ 中, 沿电流坐标轴设计出一个与 I_{ph} 数值相等的线段 $O_{PV}-O_{Diode}$. 以 O_{Diode} 为原点, 即可构造出二极管坐标系 $[O_{Diode}]-V_{Diode}O_{PV}$, 下标“Diode”表示为二极管坐标系, O_{Diode} 为坐标原点, $O_{Diode}-V_{Diode}$ 为沿正方向的电压坐标轴, $O_{Diode}-O_{PV}$ 为沿正方向的电流坐标轴 (在图 2 中右侧坐标轴 I_{Diode} 自上而下进行刻度标注), 并且可绘制二极管伏安曲线如图 2 中的双点划线, 二极管电流方程为

$$I_D = I_0 \left[\exp \left(\frac{V_D}{nV_{th}} \right) - 1 \right]. \quad (4)$$

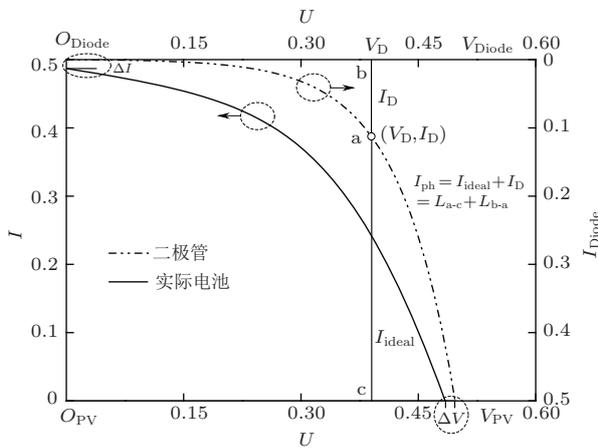


图 2 双原点坐标系

将两个坐标系 $[O_{PV}]-V_{PV}O_{Diode}$ 和 $[O_{Diode}]-V_{Diode}O_{PV}$ 在同一幅图中表现出来, 构成双原点坐标系. 本文计算模拟用的太阳能电池电性参数为: $I_0 = 5 \times 10^{-4}$ A, $n = 2.8$, $R_s = 0.15$ Ω , $R_{sh} = 6.00$ Ω , $I_{ph} = 0.5$ A (一个太阳 1000 W/m² 时的光生电流). 在双原点坐标系中, 以 O_{PV} 为原

点绘制了所熟知的太阳能电池伏安曲线, 以 O_{Diode} 为原点也绘制了熟悉的二极管伏安曲线, 两个原点间的电流坐标轴的线段长度 $O_{PV}-O_{Diode}$ 由光生电流 I_{ph} 数值所给定.

双原点坐标系中首先要建立实际太阳能电池伏安曲线与二极管伏安曲线的关系, 这两条曲线在坐标系 $[O_{PV}]-V_{PV}O_{Diode}$ 中的电流轴 $O_{PV}-O_{Diode}$ 上和电压轴 $O_{PV}-V_{PV}$ 上分别表征出短路电流与光生电流的差异: 电流缺口 (ΔI) 和开路电压的差异: 电压缺口 (ΔV), 怎样解释这两个缺口, 就成为双原点坐标系可否应用于太阳能电池研究工作的关键.

3 太阳能电池基尔霍夫电流定律的坐标表述

3.1 基尔霍夫电流定律的标示位置

首先必须对基尔霍夫电流定律的标示位置进行确定. 由 (1) 式可知, 二极管电流 I_D 和并阻电流 I_{sh} 均与二极管端电压 V_D 有直接关系, 故标示太阳能电池基尔霍夫电流定律时要在二极管电压 V_D 位置处进行.

3.2 双原点坐标中的理想太阳能电池伏安曲线

图 2 中的二极管坐标系 $[O_{Diode}]-V_{Diode}O_{PV}$ 中, 针对二极管伏安曲线上任意一点 a, 流过二极管的电流 I_D 的数值等于线段 b—a 的长度, 二极管两端的电压 V_D 的数值等于线段 $O_{Diode}-b$ 的长度. 令线段 a—c 的长度用 I_{ideal} 表示, 写出基尔霍夫电流定律的表述式,

$$\begin{aligned} I_{ph} &= I_{ideal} + I_D \\ &= I_{ideal} + I_0 \left[\exp \left(\frac{V_D}{nV_{th}} \right) - 1 \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

在双原点坐标系中, 线段 b—a—c 是坐标系 $[O_{Diode}]-V_{Diode}O_{PV}$ 中关于二极管的基尔霍夫电流定律标示线; 但上式若以坐标系 $[O_{PV}]-V_{PV}O_{Diode}$ 来考察, 就转变成为理想太阳能电池 ($R_s = 0, R_{sh} \rightarrow \infty$) 的基尔霍夫电流定律标示线, 由此, 双原点坐标系建立了二极管伏安曲线与理想太阳能电池伏安曲线之间的联系. 而在理想太阳能电池和实际太阳能电池的伏安曲线间, 确实存在有电压轴上的电压缺口和电流轴上的电流缺口.

3.3 电压缺口

在理想太阳能电池上增加并联内阻, 便构成并阻太阳能电池 ($R_s = 0, R_{sh} \mapsto \infty$) 见图 3 中的点划线, 其电流方程为

$$I_{ph} = I + I_D + I_{sh}$$

$$= I + I_0 \left[\exp\left(\frac{V_D}{nV_{th}}\right) - 1 \right] + \frac{V_D}{R_{sh}} \quad (6)$$

在基尔霍夫电流定律的标示线上, 向下平移 V_D/R_{sh} 即实现由理想太阳能电池伏安曲线到并阻太阳能电池伏安曲线的转变. $I_{sh} = V_D/R_{sh}$ 位于理想太阳能电池电流线段 I_{ideal} 的上方, 即流过并联内阻的电流 I_{sh} 是从理想太阳能电池电流 I_{ideal} 中切分出来的. 令并阻太阳能电池电流方程中的电流等于 0, 就在坐标系 $[O_{PV}]-V_{PV}O_{Diode}$ 的电压轴 $O_{PV}-V_{PV}$ 上产生电压缺口 (ΔV), 即电压缺口是由并联内阻引起.

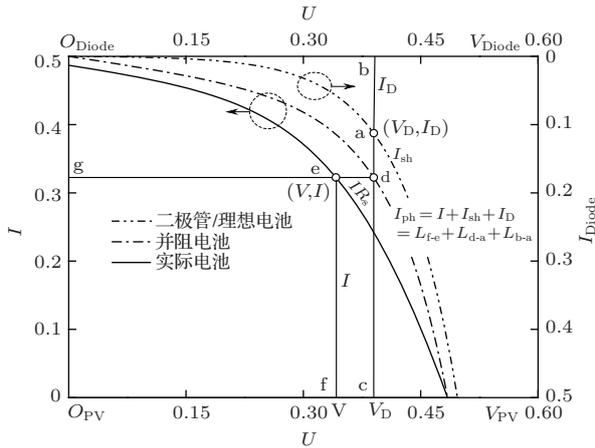


图 3 基尔霍夫电流定律的坐标表述

3.4 电流缺口

在并阻太阳能电池上增加串联内阻, 便构成实际太阳能电池 ($R_s \neq 0, R_{sh} \mapsto \infty$) (见图 3 中的实线), 二极管端电压 V_D 与太阳能电池工作状态 (I, V) 的关系为

$$V_D = V + IR_s \quad (7)$$

将上式代入 (6) 式即得到实际太阳能电池的电流方程 (1) 式, 实际太阳能电池伏安曲线由并阻太阳能电池伏安曲线向左平移 IR_s 得到. 并阻太阳能电池伏安曲线转变到实际太阳能电池伏安曲线时, 在电流轴

$O_{PV}-O_{Diode}$ 上产生了电流缺口 (ΔI), 即电流缺口是由串联内阻引起.

由此, 完成了双原点坐标系适合于实际太阳能电池研究的全部理论分析.

4 双原点坐标系的应用

与单原点坐标系相比, 双原点坐标系用于太阳能电池研究时有以下两个优势.

4.1 $I_{ph} \approx I_{sc}$ 的纠错

改写短路点太阳能电池电流方程 (3) 式, 可写出电流缺口的表述式,

$$\Delta I = I_{ph} - I_{sc}$$

$$= I_{sc} \frac{R_s}{R_{sh}} + I_0 \left[\exp\left(\frac{I_{sc}R_s}{nV_{th}}\right) - 1 \right] \quad (8)$$

图 4 给出电流缺口 ΔI 与短路电流 I_{sc} 的关系.

由图 4 可见, 电流缺口随 I_{sc} 数值的增加而增长, 即电流缺口随着光照的增加而增长. 因此在 $\Delta I \rightarrow 0$ 的低光照下, 使用 $I_{ph} \approx I_{sc}$ 尚可, 但在 $\Delta I \mapsto 0$ 的高光照下, 使用 $I_{ph} \approx I_{sc}$ 就存在有极大的差异. 依据本文计算案例, 在假定光生电流 I_{ph} 随光照强度 φ 同比增加 $dI_{ph}/d\varphi = 1$ 的理论基础上 [10-13], 电流缺口与短路电流差异在 5% 时的光照强度为 4.8 个太阳, 差异在 10% 时为 6.4 个太阳. 本文算例定性指出, 短路电流与光生电流的差异会随着光照强度增加而增加, 之前研究太阳能电池聚光的文献中 [14], 在高聚光时依然认为短路电流约等于光生电流, 未考虑到二者近似相等的条件应是较低聚光倍数.

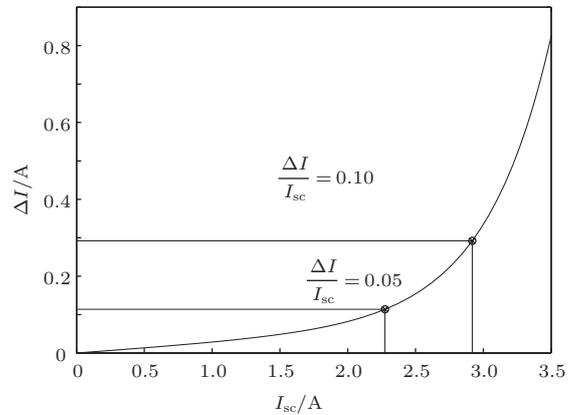


图 4 $\Delta I-I_{sc}$ 关系图

4.2 太阳能电池各部分功率及其分析

在双原点坐标系中, 由于已经标示出实际太阳能电池的二极管电流及其端电压, 串并联内阻电流及其端电压, 当然也就可以标示相应的内耗功率.

4.2.1 太阳能电池各部分的功率及其在双原点坐标系中的标示

在基尔霍夫电流定律两边同乘以二极管端电压 V_D ,

$$\begin{aligned}
 P_{ph} &= I_{ph} V_D \\
 &= (I + I_D + I_{sh}) V_D \\
 &= I(V + IR_s) + I_D V_D + \frac{(V + IR_s)^2}{R_{sh}} \\
 &= IV + I_D V_D + I^2 R_s + V \times \frac{V_D}{R_{sh}} + IR_s \times \frac{V_D}{R_{sh}} \\
 &= P + P_D + P_{R_s} + P_{R_{sh}} + P_x. \tag{9}
 \end{aligned}$$

整理得到六种功率: 光生电流功率 P_{ph} , 太阳能电池输出功率 P , 二极管内耗功率 P_D , 串阻内耗功率 P_{R_s} , 并阻内耗功率 $P_{R_{sh}}$ 和混合内耗功率 P_x . 在一个太阳下, 具有本文电性参数的太阳能电池, 输出最大功率时各部分的功率在二极管坐标系 $[O_{Diode}] - V_{Diode} O_{PV}$ 中展示如图 5 所示.

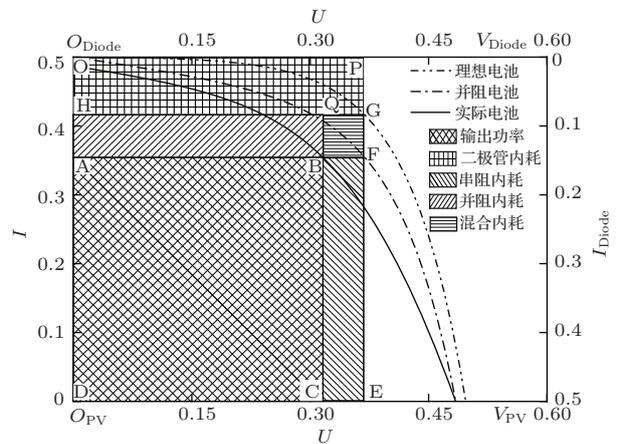


图 5 最大功率点下太阳能电池的二极管损耗功率和串并联内阻的损耗功率

4.2.2 最大功率下各部分功率在光生电流功率中的占比随光生电流的变化

在最大功率条件下, 太阳能电池五个部分的功率以及内耗总功率在光生电流功率中的占比 Ratio 分别为,

$$Ratio =$$

$$\left[\begin{aligned}
 &\frac{P_m}{I_{ph} V_{mD}}, \frac{P_{mD}}{I_{ph} V_{mD}}, \frac{P_{mR_s}}{I_{ph} V_{mD}}, \frac{P_{mR_{sh}}}{I_{ph} V_{mD}}, \\
 &\frac{P_{mx}}{I_{ph} V_{mD}}, \frac{P_{mD} + P_{mR_s} + P_{mR_{sh}} + P_{mx}}{I_{ph} V_{mD}}
 \end{aligned} \right], \tag{10}$$

式中下标“m”表示最大输出功率的情况, 假定温度不变, 串并联内阻、二极管理想因子和二极管饱和电流不随光照变化 [15], 则各部分功率占比随光生电流变化的情况如图 6 所示.

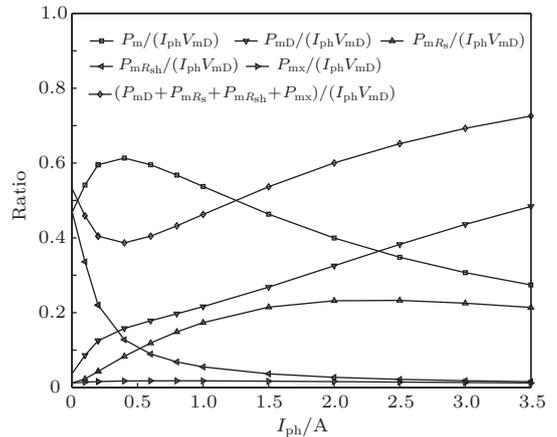


图 6 各部分功率占比随光生电流变化的情况

各部分功率占比的定性分析为: 1) 随光生电流的增加, 输出功率占比先增后减, 二极管内耗功率占比增加明显, 串阻内耗功率占比先增后减, 并阻内耗功率占比逐渐减小, 混合内耗功率在较低数值下缓慢增加, 内耗总功率占比先减后增; 2) 内耗功率随光照的变化状况是: 在一个太阳以下, 主要是并阻内耗和二极管内耗, 且并阻内耗大于二极管内耗; 在一个太阳以上, 并阻内耗较快衰减, 二极管内耗和串阻内耗成为主体, 且二极管内耗一直增加, 串阻内耗增至某个数值后开始下降; 混合内阻内耗可忽略不计; 3) 在 1.3 个太阳下, 太阳能电池的输出功率始终大于内耗总功率, 这表明: 太阳能电池不适合在高光照下工作; 4) 相关聚光电池研究的文献中 [5,6,16,17], 更多关注了聚光能提升输出功率, 未考虑到聚光同时会引起电池内耗功率增加.

5 结 论

针对太阳能电池电流方程中的光生电流在传统的 $I-V$ 坐标系无法表述这一现象, 提出并设计了双原点坐标系. 在双原点坐标系中, 标示了太阳能电池等效电路中的各部分电流 I_D , I_{sh} , I 和电压和 V , IR_s , 并且完整地标示出由基尔霍夫电流定律所建

立的太阳能电池电流方程,完整地展示出太阳能电池各部分的功率.双原点坐标系实现了物理模型、数学公式与函数图像的一一对应.

应用双原点坐标系对太阳能电池的光生电流与短路电流的差异,输出功率和内耗功率随光生电流变化的情况进行研究,得到如下结论:

1) 光生电流和短路电流之差,随着光生电流增加而增大,因此 $I_{ph} \approx I_{sc}$ 仅适合于低光照.

2) 随着光生电流的增加,输出功率在光生电流功率中的占比先增加后减小,二极管和串并联内阻的内耗功率在光生电流功率中的占比先减小后增加;高光照下,内耗功率主要来自二极管其次是串阻再次是并阻,并且内耗功率会变得大于输出功率,因此太阳能电池不适合在高光照下工作.

参考文献

- [1] Kennerud, K L 1969 *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. AES **5** 912
- [2] Yu S J, He H R 1991 *Utilization of Solar Photovoltaic* (Hefei: Hefei University of Technology Press) P6 (in Chinese) [余世杰, 何慧若 1991 太阳能的光伏利用(合肥:合肥工业大学出版社)第6页]
- [3] Chen F X, Wang L S, Xu W Y 2013 *Phys. B* **22** 045202
- [4] Losurdo M, Giangregorio M M, Bianco G V, Sacchetti A, Capezzuto P, Bruno G 2009 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **93** 1749
- [5] Chen M B, Cui R Q, Wang R X, Zhang Z W, Lu J F, Chi W Y 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3632 (in Chinese)[陈明波, 崔容强, 王亮兴, 张忠卫, 陆剑锋, 池卫英 2004 物理学报 **53** 3632]
- [6] Zhao Y, Xiong S Z, Zhang X D 2010 *Physics* **39** 314[赵颖, 熊绍珍, 张晓丹 2010 物理 **39** 314]
- [7] Geoff W 2001 *Journal of Electrical & Electronics Engineering* **21** 49
- [8] Wu J Q, Li W J, Xi X, Tang J X, Deng L F, Li P T 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 117107 (in Chinese)[吴甲奇, 李文佳, 席曦, 汤建新, 邓林峰, 黎沛涛 2011 物理学报 **60** 117107]
- [9] Ortiz-Conde A, Sanchez F 2006 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **90** 352
- [10] Zhai Z T, Cheng X F, Yang Z J 2009 *Acta Energetica Solaris Sinica* **30** 1078 (in Chinese) [翟载腾, 程晓航, 杨臧健 2009 太阳能学报 **30** 1078]
- [11] Zhang Z Z, Cheng X F, Liu J L 2013 *Applied Mechanics and Materials* **291** 38
- [12] Yu S J, He H R, Cao R X 1998 *Acta Energetica Solaris Sinica* **19** 394 (in Chinese) [余世杰, 何慧若, 曹仁贤 1998 太阳能学报 **19** 394]
- [13] Bai Y M, Chen N F 2007 *Physics* **36** 862 (in Chinese) [白一鸣, 陈诺夫 2007 物理 **36** 862]
- [14] King R R, Law D C, Edmondson K M 2007 *Applied Physics Letters* **90** 183516
- [15] Deng J L 2007 *PH. D. Principle Study and Technique Application of Explicit Solution for Solar Cell I-V Equation* (Hefei: University of Science and Technology of China) (in Chinese) 丁金磊 2007 太阳能电池 I-V 方程显式求解原理(合肥:中国科学技术大学)
- [16] Martin AG, Keith E 2013 *Progress in Photovoltaics* **21** 1
- [17] He Y L, Ding J N, Peng Y C, Gao X N 2008 *Physics* **37** 862 (in Chinese)[何宇亮, 丁建宁, 彭英才, 高晓妮 2008 物理 **37** 862]

Dual-origin coordinate system for solar cells

Zhang Zhong-Zheng Cheng Xiao-Fang[†]

(Department of Thermal Science and Energy Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

(Received 3 December 2013; revised manuscript received 18 February 2014)

Abstract

Photo-generated current is important in solar cell current equation. The value of photo-generated current cannot be labeled in the conventional single origin coordinate system, and a novel dual-origin coordinate system is designed. This article provides a process in how to mark the Kirchhoff's law in a dual-origin coordinate system; besides, the current items (photo-generated current, diode current, shunt resistance current) and the voltage items (diode voltage, series resistance voltage) are also shown. A dual-origin coordinate system clearly points out that the difference between photo-generated current and short-circuit current will increase with increasing short-circuit current. This difference can be ignored only in low light, but it must be considered in high light. The proportions of output power and internal friction power may change with photo-generated current. Assuming that the output power is greater than the internal friction power, the solar cell should not be used to work under high light. A dual-origin coordinate system can provide an adaptation for solar cell study.

Keywords: dual-origin coordinate system, solar cell, Kirchhoff's law, internal friction power

PACS: 88.40.fc, 88.40.H-, 88.40.hj, 88.40.jj

DOI: 10.7498/aps.63.118801

[†] Corresponding author. E-mail: xfcheng@ustc.edu.cn